

شبیه‌سازی توأمان انتقال رطوبت، نیترات و آمونیوم در خاک با استفاده از مدل

HYDRUS-2D در آبیاری جویچه‌ای ذرت

آرش رنجبر، علی رحیمی خوب^{۱*}، حامد ابراهیمیان و مریم وراوی پور

دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.

arashranjbar@ut.ac.ir

استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.

akhob@ut.ac.ir

استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

ebrahimian@ut.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.

mvaravi@ut.ac.ir

چکیده

تغییر شکل و انتقال کود اوره، نیترات و آمونیوم در خاک بصورت زنجیره‌ای از واکنش‌های متصل به هم صورت می‌گیرد که برای مدیریت دقیق‌تر آب و کود در مزرعه باید این واکنش‌ها توأمان باهم در نظر گرفته شوند. در این پژوهش مدل HYDRUS-2D به منظور پیش‌بینی توزیع و انتقال توأمان رطوبت، نیترات و آمونیوم در زیر جویچه و پشته‌های آبیاری طی دوره رشد ذرت ارزیابی شد. نخست، گیاه ذرت تحت سه تیمار کود اوره صفر، ۱۵۰ و ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و در سه تکرار کشت شد. مقادیر جذب نیتروژن توسط گیاه به علاوه میزان رطوبت و غلظت نیترات و آمونیوم خاک در اعماق مختلف زیر پشته و جویچه‌ها طی فصل رشد، قبل و بعد از هر نوبت کوددهی اندازه‌گیری شدند. از این داده‌ها برای واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح موجود در مدل استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل در طول مرحله صحت‌سنجی نشان دادند که بین مقادیر رطوبت، نیترات و آمونیوم شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در خاک تطابق خوبی وجود داشت. شاخص‌های ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای پیش‌بینی رطوبت خاک در محدوده توسعه ریشه به ترتیب برابر با ۰/۷۷۲ و ۴/۳۷٪ بدست آمدند. علاوه بر این، شاخص‌های مذکور برای پیش‌بینی غلظت آمونیوم خاک در زیر جویچه و پشته‌های هر سه تیمار به ترتیب بین ۰/۶۴۵ تا ۰/۷۹۸ و ۲۳/۱۴٪ تا ۲۹/۴٪ و برای نیترات به ترتیب بین ۰/۷۱۶ تا ۰/۸۲۹ و ۵۷/۲۳٪ تا ۲۵/۲٪ تغییر نمودند. در مجموع نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که مدل HYDRUS علاوه بر انتقال رطوبت، توزیع نیترات و آمونیوم را در زیر جویچه و پشته‌های آبیاری با دقت مناسبی شبیه‌سازی می‌کند و به همین دلیل می‌تواند ابزار مفیدی برای مدیریت آب و کود در آبیاری جویچه‌ای باشد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت آب و کود، واسنجی، انتقال املاح.

۱ - آدرس نویسنده مسئول: تهران - پاکدشت - پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.

* - دریافت: آذر ۱۳۹۵ و پذیرش: اسفند ۱۳۹۵

مقدمه

به دلیل اثر مثبت نیتروژن بر روی عملکرد محصول، اکثر کشاورزان مقادیر بالای آب و نیتروژن را برای اطمینان از تامین نیاز گیاه بدون آگاهی از زمان مناسب، استفاده می‌کنند و بدین ترتیب عناصر غذایی و مفید خاک در معرض آبهویی قرار می‌گیرند و باعث آلودگی منابع آب زیرزمینی می‌شوند که در نتیجه آن به سلامت انسان‌ها لطمه‌های جبران ناپذیری وارد خواهد شد (راموس و همکاران، ۲۰۱۲). طبق آمار بدست آمده، مصرف کودهای شیمیایی در واحد سطح محصولات زراعی در کشور از ۳۱۲ کیلوگرم بر هکتار در سال ۱۳۷۸-۱۳۷۹ به ۳۸۶ کیلوگرم بر هکتار در سال ۱۳۸۵-۱۳۸۶ افزایش یافته است (سپاسخواه، ۱۳۸۹). کود اوره یکی از رایج‌ترین کودهای نیتروژنه مورد استفاده در دنیا است و مصرف آن باید بر اساس مقدار نیتروژن موجود در خاک و جذب گیاه در طول دوره رشد باشد. علیرغم اینکه آگاهی از سرنوشت شکل‌های مختلف نیتروژن و انتقال آنها در خاک برای مدیریت کود و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی بسیار ضروری است اما بررسی آن به علت اینکه تحت تأثیر فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی متعددی در خاک می‌باشد، بسیار پیچیده است. در این راستا نقش مدل‌های شبیه‌ساز انتقال آب و املاح می‌تواند بسیار مهم باشد. طی سالیان گذشته مطالعات گسترده‌ای روی مدل‌های شبیه‌سازی برای ارزیابی سناریو-های مختلف مدیریت آب و کود انجام شده است (هانسن و همکاران، ۲۰۰۶؛ فوگات و همکاران، ۲۰۱۴). استفاده از این مدل‌ها هزینه و زمان لازم برای آزمایشات مزرعه‌ای را کاهش داده و به جای چند سال آزمایش در مزرعه، سناریوهای مختلف و متعددی در مدل اجرا و با ارزیابی نتایج آنها، بهترین تیمار از نظر اقتصادی و کاهش مخاطرات زیست محیطی انتخاب می‌گردد.

نتایج مطالعات متعددی مدل عددی دو بعدی HYDRUS^۲ (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۶) را به عنوان ابزاری توانا برای شبیه‌سازی جریان توأمان آب و املاح در خاک و جذب شکل‌های مختلف نیتروژن توسط ریشه گیاه در آبیاری جویچه‌ای معرفی کرده‌اند (کرویسیر و همکاران، ۲۰۰۸؛ ابراهیمیان و همکاران، ۲۰۱۳). میلهل و همکاران (۲۰۰۱) تاثیر محل قرارگیری کود نیتروژن در جویچه را بر روی توزیع و آبهویی نیتروژن داخل پروفیل خاک ارزیابی کردند و گزارش دادند که مدل HYDRUS-2D، توزیع آب و نیترات در آبیاری جویچه‌ای را بهتر از مدل یک بعدی آن شبیه‌سازی می‌کند. عباسی و همکاران (۲۰۰۴) مدل HYDRUS-2D را به منظور شبیه‌سازی توزیع آب و املاح (برماید کلسیم) داخل خاک در آبیاری جویچه‌ای با انتهای بسته، واسنجی و صحت سنجی کردند. نتایج آنها حاکی از دقت مناسب مدل در برآورد توزیع آب و املاح برای یک مقطع عرضی از جویچه بود. هانسن و همکاران (۲۰۰۶) از مدل HYDRUS-2D به عنوان ابزاری در جهت بهبود مدیریت کود و آب در آبیاری قطره‌ای استفاده کردند. در مطالعه آنها برای اولین بار توزیع و انتقال توأمان اوره، آمونیوم و نیترات در خاک، با استفاده از مدل HYDRUS-2D در آبیاری قطره‌ای شبیه‌سازی شد. تا قبل از آن در اکثر مطالعات فقط جذب و توزیع نیترات داخل خاک شبیه‌سازی شده بود. در حالی که علاوه بر نیترات، آمونیوم نیز توسط گیاه جذب می‌شود و بین این دو فعل و انفعالات پیچیده‌ای وجود دارد. به طور کلی، کود اوره در آب براحتی حل می‌شود و بعد از ورود به خاک، هیدرولیز شده و آمونیوم تولید می‌گردد. در ادامه، طی فرآیند نیترات‌زایی^۳ توسط باکتری‌های موجود در خاک، آمونیوم به نیتريت و سپس به نیترات تبدیل می‌شود. علاوه بر جذب نیترات و آمونیوم توسط گیاه، بررسی

2 - HYDRUS- 2D

3 - Nitrification

آمونیم داخل خاک، در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود اوره برای کشت ذرت در آبیاری جویچه‌ای است.

مواد و روش‌ها

آزمایش مزرعه‌ای

به منظور انجام این تحقیق، گیاه ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) تحت آبیاری کامل و به صورت جوی و پشته‌ای در تاریخ ۱۰ خرداد ۱۳۹۴ کشت شد. منطقه مورد آزمایش، اراضی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران واقع در شهرستان پاکدشت در جنوب شرقی تهران بود. این منطقه با ارتفاع ۱۰۲۰ متری از سطح دریا، از نظر جغرافیایی در طول ۶۶' ۵۱° شرقی و عرض ۴۶' ۳۵° شمالی واقع شده است. میانگین سالانه دمای هوای منطقه طی دهه گذشته در حدود ۱۹ درجه سانتیگراد بوده است که ماه‌های جولای (تیر) و ژانویه (دی) به ترتیب با ۳۴ و ۶/۸ درجه سانتیگراد بیشترین و کمترین میانگین دما را داشته‌اند. متوسط بارندگی در این منطقه ۱۶۵ میلی‌متر در سال می‌باشد و براساس طبقه بندی دومارتن دارای اقلیمی خشک است.

در این مطالعه تیمارها شامل سه سطح صفر به عنوان شاهد (بدون کود) (N0)، ۱۵۰ (N150) و ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (N250) توسط کود اوره (حاوی ۴۶٪ نیتروژن) و به صورت طرح بلوک‌های کاملا تصادفی و با سه تکرار ایجاد شدند. این سطوح براساس آزمون خاک و آب قبل از کاشت، با استفاده از نمونه- برداری در عمق‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتیمتری به گونه‌ای تعیین شدند که گیاه در معرض مقادیر کم تا زیاد نیتروژن قرار داشته باشد. خلاصه‌ای از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین بر اساس مقادیر اولیه فسفر و پتاسیم موجود در خاک (جدول ۱) مشخص شد که خاک هیچگونه کمبودی از این عناصر ندارد. درصد ذرات خاک نیز با استفاده از آزمایش هیدرومتری تعیین شدند. همچنین بافت خاک توسط مثلث بافت، از نوع لوم تعیین شد. مقدار آمونیم و

فرآیندهایی نظیر نترات زدایی^۴، تثبیت نیتروژن^۵، معدنی شدن^۶، تصعید آمونیاک^۷ و غیره... باعث پیچیدگی شبیه-سازی می‌گردد. در مطالعه هانسن و همکاران (۲۰۰۶)، علاوه بر جذب نترات و آمونیم به صورت غیر فعال^۸، فرآیندهای هیدرولیز اوره، جذب سطحی آمونیم^۹ و نترات‌زایی به صورت یک زنجیره پشت سر هم در نظر گرفته شده بودند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که مدل HYDRUS- 2D توانایی بالایی در شبیه‌سازی انتقال و تغییر شکل توأمان اوره، آمونیم و نترات در خاک را دارد. بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از مدل HYDRUS- 2D در آبیاری جویچه‌ای نشان داد که اکثر مطالعات بر شبیه‌سازی انتقال و آبشویی نترات تمرکز داشته‌اند (کرویسیر و همکاران، ۲۰۰۸؛ ابراهیمیان و همکاران، ۲۰۱۳؛ تافته و سپاسخواه، ۲۰۱۲).

این در حالیست که بخصوص وقتی در روش آبیاری جویچه‌ای از کود اوره استفاده می‌شود، علاوه بر اینکه آمونیم توسط گیاه جذب می‌شود، غلظت آن نیز نقش مهمی در فرآیند نترات‌زایی دارد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین برای افزایش دقت شبیه‌سازی سرنوشت نیتروژن و شکل‌های مختلف آن، لازم است علاوه بر توزیع رطوبت، انتقال و تغییر شکل اوره، نترات و آمونیم به صورت یک زنجیره‌ای از واکنش‌های متصل به هم داخل خاک در نظر گرفته شود. لی و همکاران (۲۰۱۵) بر اساس همین قابلیت مدل HYDRUS، تغییرات اوره، نترات و آمونیم در اعماق خاک کرت‌های کشت برنج را به صورت یک بعدی بررسی کردند. با توجه به خلاء مطالعات صورت گرفته، هدف اصلی از این تحقیق، واسنجی و صحت سنجی مدل HYDRUS- 2D به منظور شبیه‌سازی توأمان انتقال و توزیع رطوبت، نترات و

-
- 4- Denitrification
 - 5 - Immobilization
 - 6 - Mineralization
 - 7 - ammonia volatilization
 - 8 - passive
 - 9 - ammonium adsorption

به صورت جداگانه برداشت شدند. نمونه‌ها به ترتیب یک روز قبل و همچنین دو و چهار روز بعد از هر نوبت کود-دهی (در مجموع سه سری نمونه برای هر نوبت کوددهی) برداشت شدند. به علاوه اینکه نمونه‌هایی به ترتیب قبل از کشت و نیز ۸۹ و ۱۱۹ روز پس از کشت (برداشت نهایی محصول) از خاک در عمق‌های مذکور برداشت شدند. این نمونه‌برداری‌ها از قسمت‌های مرکزی تیمارها و با استفاده از حفره ایجاد شده توسط آگری به قطر سه سانتیمتر انجام می‌گرفتند. سپس حفره‌ها با خاک اطراف پر می‌شدند و نمونه‌ها بعد از انتقال به آزمایشگاه جهت تعیین غلظت نیترات و آمونیوم با استفاده از روش تقطیر بخار آب مورد تجزیه قرار می‌گرفتند (برمنز و کینی، ۱۹۶۵). همزمان با برداشت نمونه‌های خاک نیز مقادیر رطوبت در اعماق متناظر زیر جویچه و پشته توسط TDR اندازه‌گیری می‌شد.

نمونه‌های گیاهی از زمان ۲۶ روز بعد از کاشت تا انتهای فصل کشت طی شش نوبت برداشت شدند. در هر مرحله نمونه‌برداری شش گیاه از ردیف‌های میانی هر کرت آزمایشی انتخاب و از سطح خاک بریده می‌شدند و بعد از انتقال سریع به آزمایشگاه در آون با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد خشک می‌شدند. فرآیند خشک شدن در آون تا جایی که وزن نمونه‌ها به ثبات می‌رسید ادامه داشت. سپس نمونه‌ها وزن شده و آسیاب می‌گشتند. علاوه بر این، با استفاده از روش استاندارد کج‌دال (هورویتر، ۱۹۷۰) میزان نیتروژن کل آنها اندازه‌گیری می‌شد. در نهایت داده‌های شامل وزن خشک و غلظت نیتروژن برای نمونه‌های برداشت شده از کل تیمارها اندازه‌گیری گردید. شایان ذکر است که تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها به کمک نرم افزار SAS و Excel صورت گرفت.

نیترات محلول در آب آبیاری نیز به ترتیب برابر ۰/۱۵ و ۰/۲۳ میلی‌گرم بر سانتیمتر مکعب اندازه‌گیری شد. نیتروژن مورد نیاز با استفاده از کود اوره تامین شد و عملیات کوددهی به صورت سرک و طی سه نوبت در زمان‌های ۲۲، ۵۲ و ۶۵ روز بعد از کشت انجام گرفت. به ترتیب ۴۰، ۳۰ و ۳۰ درصد از کل کود مشخص شده برای هر تیمار در هر نوبت کوددهی با دقت اندازه‌گیری می‌شد و بعد از اتمام آبیاری در روزهای مذکور، در کف جویچه‌ها به طور یکنواخت پخش می‌گشت. به عبارت دیگر مقادیر کود مشخص شده برای هر تیمار با استفاده از پیمان‌های معین بلافاصله بعد از آبیاری هر تیمار داخل آب جویچه‌ها ریخته می‌شد. از آنجایی که حجم آب و مقدار کود مشخص بود بنابراین غلظت اوره در آب آبیاری به عنوان یکی از ورودی‌های مدل قابل محاسبه بود. در نهایت بعد از ۱۱۹ روز از تاریخ کاشت و در تاریخ پنج مهر برداشت نهایی انجام شد. برای هر کرت آزمایشی مساحتی حدود ۲۵ متر در نظر گرفته شد. فاصله ردیف‌ها در هر کرت ۷۵ سانتیمتر و فاصله بین هر گیاه در ردیف‌های کشت ۱۵ سانتیمتر بود. برای جلوگیری از تاثیر کرت‌ها روی نتایج یکدیگر بین آنها حاشیه یک متری لحاظ گردید. به منظور تعیین زمان مناسب آبیاری تغییرات رطوبت خاک در طول فصل کشت با استفاده از روش انعکاس سنجی زمانی (با دستگاه TDR) به طور مستمر قبل و بعد از آبیاری رصد می‌شد و بعد از اتمام میزان آب سهل الوصول (و رسیدن رطوبت خاک به حدود ۲۰ درصد حجمی) اقدام به آبیاری مجدد می‌گردید تا گیاه با هیچ‌گونه تنش رطوبتی مواجه نشود. در هر تیمار نمونه‌های خاک در سه عمق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتیمتری از روی پشته و کف جویچه مجاور آن

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

عمق ۴۰ تا ۶۰ سانتیمتر	عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتیمتر	عمق ۰ تا ۲۰ سانتیمتر	پارامتر
۱/۶۱	۱/۶۱	۱/۶۰	جرم مخصوص ظاهری ($g.cm^{-3}$)
۲۷/۹	۲۶/۶	۲۶/۲	ظرفیت زراعی (درصد حجمی)
۱۳/۸	۱۳/۳	۱۳/۰	رطوبت پژمردگی (درصد حجمی)
۰/۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۰۱۷	نیترات ($mg.cm^{-3}$)
۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۰/۰۱۱	آمونیم ($mg.cm^{-3}$)
۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۱	نیتروژن (%)
۰/۰۵۲	۰/۰۷۶	۰/۰۸۴	فسفر در دسترس ($mg.cm^{-3}$)
۰/۸۳۰	۰/۸۶۷	۱/۴۳۷	پتاسیم در دسترس ($mg.cm^{-3}$)
لوم	لوم	لوم	بافت خاک
۱۷/۶	۱۳/۶	۱۳/۶	رس
۳۴/۶	۳۶/۶	۳۴/۶	سیلت
۴۷/۸	۴۹/۸	۵۱/۸	شن

مدل دو بعدی HYDRUS

در این مدل برای بررسی جریان آب در محیط متخلخل از حل عددی معادله دو بعدی ریچاردز استفاده شده است:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K^A_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + K^A_{iz} \right) \right] - S \quad (1)$$

که در آن:

θ رطوبت حجمی [L^3L^{-3}]، h پتانسیل فشاری آب در خاک [L]، t زمان [T]، K تابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع [LT^{-1}]، S جزء خروجی [$L^3L^{-3}T^{-1}$]، x_j و x_i مختصات مکانی [L]، K_{ij}^A مولفه تانسور بدون بعد و غیر ایزوتروپی K^A می‌باشد. منحنی رطوبتی خاک $\theta(h)$ با معادله وانگنوختن (۱۹۸۰) و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک $K(h)$ با مدل کاپیلاری معلم (۱۹۷۶) مطابق روابط زیر بدست آمده است:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (4)$$

Se اشباع نسبی، θ_s رطوبت حجمی اشباع خاک [L^3L^{-3}]، θ_r رطوبت حجمی باقیمانده در پروفیل خاک [L^3L^{-3}]، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع [LT^{-1}] و α و n پارامترهای تجربی ورودی مدل هستند که در بین آنها m و n بی بعد و α دارای بعد L^{-1} است. پارامتر l معمولاً به طور میانگین برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (معلم، ۱۹۷۶). پارامتر S که در معادله (۱) مشخص شده است، نشاندهنده حجم آب جذب شده توسط گیاه از واحد حجم خاک، در واحد زمان است.

شایان ذکر است که در مدل HYDRUS-2D جذب آب توسط گیاه براساس مدل فدس و همکاران (۱۹۷۸) که در دستورالعمل فنی مدل هایدروس تشریح شده است (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۶)، تعیین گردید. پارامترهای مدل فدس نیز با استفاده از داده‌های مطالعاتی وسلینگ و همکاران (۱۹۹۱) تعیین شده‌اند. از این داده‌ها معمولاً در مدل HYDRUS برای محصول ذرت استفاده می‌شود (ابراهیمیان و همکاران، ۱۳۹۰؛ نوایان و جلیل نژاد، ۱۳۹۴؛ کرویسیر و همکاران، ۲۰۰۸؛ راموس و همکاران، ۲۰۱۱؛ گادین و همکاران، ۲۰۱۵).

شبیه‌سازی توزیع و انتقال اوره، نیترات و آمونیم در خاک یکی از اهداف این تحقیق بود. برای این

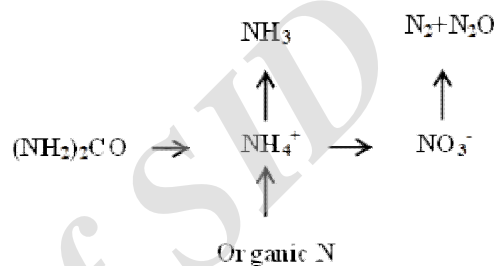
$$\frac{\partial \theta c_2}{\partial t} + \rho \frac{\partial s_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij,2} \frac{\partial c_2}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_i c_2}{\partial x_i} - \mu_{w,2} \theta c_2 + \mu_{w,1} \theta c_1 + \gamma_{s,2} \rho - S c_{root,2} \quad (۶)$$

$$\frac{\partial \theta c_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij,3} \frac{\partial c_3}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_i c_3}{\partial x_i} + \mu_{w,2} \theta c_2 - S c_{root,3} \quad (۷)$$

در این معادلات c و s غلظت املاح به ترتیب در فاز مایع [ML^{-3}] و جامد [MM^{-1}]، q_i مولفه i ام شدت جریان [$L T^{-1}$]، μ_w ضریب تبادل مرتبه اول برای املاح در فاز مایع [T^{-1}]، μ_w مشابه ضریب تبادل مرتبه اول که ارتباط بین زنجیره‌های مشخصی را به وجود می‌آورد [T]، γ_s ضریب تبادل مرتبه صفر برای املاح در فاز جامد [T^{-1}]، ρ چگالی ظاهری خاک [ML^{-3}]، S جزء خروجی در معادله (۱) [$L^3 L^{-3} T^{-1}$]، c_{root} غلظت در جزء خروجی [ML^{-3}]، D_{ij} تانسور ضریب انتشار برای فاز مایع [$L^2 T^{-1}$] و اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نشان دهنده اوره، آمونیوم و نیترات می‌باشند. پارامتر $S c_{root}$ در هر دو معادله (۶) و (۷) نشان دهنده جذب غیر فعال نیترات و آمونیوم از طریق جذب آب توسط ریشه (S) هستند. پارامتر c_{root} معمولاً برابر غلظتی بیشتر از حد غلظت نیترات و آمونیوم واقعی در خاک در نظر گرفته می‌شود با این فرض که تمامی نیترات و آمونیوم موجود در خاک طی فرآیند جذب غیر فعال، قابل جذب توسط گیاه می‌باشند (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۶). اما به ترتیبی که در مرحله واسنجی تشریح خواهد شد، این پارامتر به گونه‌ای تغییر داده شد تا مقدار جذب نیتروژن کل توسط گیاه و غلظت نیترات و آمونیوم داخل خاک در زمان‌های مختلف توسط مدل تا حد ممکن دقیق شبیه‌سازی گردد (کرویسیر و همکاران، ۲۰۰۸). تانسور ضریب انتشار (D_{ij}) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\theta D_{ij} = D_T |q| \delta_{ij} + (D_L - D_T) \frac{q_i q_j}{|q|} + \theta D_w \tau_w \delta_{ij} \quad (۸)$$

منظور، در مدل مدل HYDRUS از معادله جابجایی-انتشار^{۱۰} (CDE) با واکنش مرتبه صفر و یک استفاده می‌شود و این معادله به صورت عددی و از روش اجزاء محدود گالرکین^{۱۱} با شرایط مرزی و اولیه مناسب حل می‌گردد. در مدل HYDRUS امکان در نظر گرفتن همزمان توزیع و انتقال چندین املاح که در ارتباط با واکنش تجزیه مرتبه اول هستند وجود دارد. زنجیره تجزیه مرتبه اول اوره به صورت زیر تشریح می‌شود (هانسن و همکاران، ۲۰۰۶):



در این تحقیق فرآیندهای هیدرولیز اوره (تبدیل اوره به آمونیوم)، معدنی شدن نیتروژن آلی^{۱۲}، نیترات‌زایی (تبدیل آمونیوم به نیترات)، جذب سطحی آمونیوم و جذب نیترات و آمونیوم توسط ریشه در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که فرآیند هیدرولیز اوره و نیترات‌زایی به عنوان واکنش مرتبه اول و معدنی شدن به عنوان واکنش مرتبه صفر در نظر گرفته شد (لی و همکاران، ۲۰۱۵). معادله دیفرانسیل جزئی CDE به منظور شبیه‌سازی دو بعدی انتقال نیتروژن شامل واکنش زنجیره‌ای و متوالی تجزیه مرتبه یک تحت جریان غیر ماندگار در محیط متخلخل غیر اشباع بصورت زیر است (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۸):

$$\frac{\partial \theta c_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij,1} \frac{\partial c_1}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_i c_1}{\partial x_i} - \mu_{w,1} \theta c_1 \quad (۵)$$

10- Convection-Diffusion Equation
11 - Galerkin
12-Mineralization of Organic Nitrogen

که در آن:

D_w ضریب پخشیدگی ملکولی در آب آزاد [L^2T^{-1}]
 τ_w عامل خمیدگی خلل و فرج خاک (بدون بعد)، δ_{ij} تابع
 دلتای کرونگر، D_L ضریب انتشار پذیری طولی (L) و D_T
 ضریب انتشار پذیری عرضی (L) است. ایزوترم جذب
 سطحی مرتبط با s_2 و c_2 (معادله ۶) به شکل معادله خطی
 زیر است:

$$s_2 = K_{a,2} c_2 \quad (9)$$

که در آن:

$K_{d,2}$ ضریب توزیع برای آمونیوم می‌باشد [L^3M^{-1}].
 معادله (۵) نشان‌دهنده اولین زنجیره واکنش یعنی اوره
 است در حالی که معادلات (۶) و (۷) به ترتیب نشان
 دهنده آمونیوم و نیترات در زنجیره تجزیه مرتبه اول می-
 باشند. در این معادلات ضریب تبادل مرتبه اول w_1 به
 عنوان خروجی در معادله (۵) (هیدرولیز اوره) و منبع در
 معادله (۶) (آمونیوم تولید شده از هیدرولیز اوره) و
 همچنین ضریب تبادل مرتبه اول w_2 به عنوان خروجی
 در معادله (۶) (مصرف آمونیوم در نتیجه فرآیند نیترات
 زایی) و منبع در معادله (۷) (تولید نیترات در نتیجه فرآیند
 نیترات زایی) می‌باشد. علاوه بر این، ضریب تبادل مرتبه
 صفر $\gamma_{s,2}$ به عنوان منبع در معادله (۶) (برای معدنی شدن
 نیتروژن آلی) در نظر گرفته شد.

پارامترهای ورودی مدل و روش واسنجی و صحت سنجی آن‌ها

شبیه‌سازی در مدل HYDRUS با حل عددی
 معادلات حاکم بر جریان آب و انتقال املاح و بر اساس
 انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترهای موجود در این
 معادلات و همچنین تعیین شرایط اولیه و مرزی مناسب
 انجام می‌شود (کرویسیر و همکاران، ۲۰۰۸؛ ابراهیمیان و
 همکاران، ۲۰۱۳). به طور کلی فرآیند واسنجی مدل به دو
 بخش واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک (پارامترهای
 ون‌گنوختن - معلم) و واسنجی پارامترهای انتقال و تغییر
 شکل املاح تفکیک شده. از مقادیر اندازه‌گیری شده

رطوبت، غلظت نیترات و آمونیوم در عمق‌های ۲۰-۰،
 ۴۰-۲۰ و ۶۰-۴۰ سانتیمتری خاک زیر جویچه و پشته-
 های آبیاری در زمان قبل از کشت و قبل و بعد از اولین و
 دومین نوبت کوددهی به منظور واسنجی و از داده‌های
 اندازه‌گیری شده قبل و بعد از سومین نوبت کوددهی و ۸۵
 و ۱۱۹ روز بعد از کشت به منظور صحت‌سنجی پارامتر-
 های مذکور استفاده شد. برای واسنجی پارامترهای
 هیدرولیکی خاک شامل θ_s ، θ_r ، K_s ، n و α ، مطابق سایر
 مطالعات در این زمینه (برای مثال ابراهیمیان و همکاران،
 ۲۰۱۳)، از قابلیت حل معکوس که در مدل HYDRUS
 گنجانده شده و داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک
 استفاده شد. فرآیند حل معکوس براساس حل عددی
 معادله ریچاردز با استفاده از روش بهینه سازی لوبنرگ-
 مارکوارت صورت گرفته است که در آن پارامترهای
 هیدرولیکی خاک با حداقل کردن تابع هدف بهینه می-
 شوند.

تابع هدف در این روش، مجموع مربعات
 باقیمانده‌ها (SSQ) می‌باشد (سیمونک و همکاران،
 ۲۰۰۶). به منظور افزایش احتمال دستیابی به مقدار کمینه
 تابع هدف، ابتدا بر اساس مشخصات زودیافت خاک
 شامل درصد رس، سیلت، شن، جرم مخصوص ظاهری،
 رطوبت ظرفیت زراعی و رطوبت پژمردگی دائم اندازه-
 گیری شده از خاک مزرعه در پروفیل ۶۰-۰ سانتیمتری و
 با استفاده از نرم افزار Rosetta مقادیری به عنوان حدس
 اولیه برای پارامترهای هیدرولیکی مذکور بدست آمد.
 سپس با استفاده از این حدس‌های اولیه و وارد کردن
 مختصات نقاط مشاهداتی در اعماق مختلف زیر جویچه و
 پشته‌های آبیاری و رطوبت اندازه‌گیری شده آن‌ها، حل
 معکوس انجام گرفت. از آنجایی که در هر سه لایه از
 خاک مورد بررسی (جدول ۱) و در هر سه تیمار،
 خصوصیات فیزیکی نظیر بافت و وزن مخصوص ظاهری
 تقریباً شبیه یکدیگر بودند، لذا کل پروفیل ۶۰-۰
 سانتیمتری به عنوان لایه‌ای واحد به مدل معرفی گردید،
 با این فرض که پارامترهای هیدرولیکی خاک در کل این

لایه‌ها یکسان بوده‌اند. در نهایت پارامترهای واسنجی شده، توسط بقیه داده‌های اندازه‌گیری شده که برای صحت سنجی تفکیک شده بودند، ارزیابی شدند. شایان ذکر است که کیفیت پارامترهای هیدرولیکی واسنجی شده با استفاده از دو شاخص ضریب تعیین (R^2) و SSQ قابل ارزیابی است (ابراهیمیان و همکاران، ۲۰۱۳).

بعد از بدست آمدن پارامترهای هیدرولیکی برای خاک مورد مطالعه، می‌بایست پارامترهای مربوط به واکنش و انتقال املاح در هر تیمار نیز تعیین می‌شدند. چون بعد از استفاده از کود اوره، انتقال و تغییرات غلظت اوره، آمونیوم و نیترات در خاک به طور همزمان و به صورت یک سری واکنش‌های زنجیره‌ای به هم مرتبط هستند، بنابراین برای برآورد این پارامترها باید فرآیندهای مربوطه به طور همزمان بررسی شوند. در مدل HYDRUS امکان تخمین پارامترهای انتقال املاح دو یا چند عنصر به طور همزمان توسط حل معکوس وجود ندارد. بنابراین برای این منظور همانند سایر مطالعات در این زمینه اقدام گردید (لی و همکاران، ۲۰۱۵). بدین صورت که ابتدا با توجه به شرایط کلی این مطالعه و بر اساس نتایج مطالعات قبلی، برای پارامترهای مذکور در اعماق و لایه‌ها مختلف خاک هر سه تیمار، مقادیر اولیه‌ای به عنوان ورودی مدل در دامنه منطقی انتخاب گردید. سپس عملیات شبیه‌سازی با استفاده از این مقادیر انجام گرفت.

در نهایت مقادیر شبیه‌سازی شده غلظت نیترات و آمونیوم در نقاط و زمان‌های مختلف زیر جویچه و پشته‌های آبیاری به علاوه مقادیر تخمینی جذب نیتروژن کل (شامل مجموع جذب نیترات و آمونیوم شبیه‌سازی شده در طول دوره کشت) با مقادیر اندازه‌گیری شده از هر تیمار در مزرعه مطالعاتی مقایسه شدند. تغییر پارامترهای انتقال املاح تا زمانی که بیشترین دقت برای شبیه‌سازی بدست آمد ادامه داشت. به عبارت دیگر پارامترهای مذکور طوری در لایه‌های مختلف خاک تغییر داده شدند تا برای هر تیمار کمترین اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی

شده و مشاهداتی به وجود آمد. در نهایت پارامترهای واسنجی شده توسط بخش دیگری از داده‌ها که به منظور صحت‌سنجی مدل تفکیک شده بودند، تست شدند. شایان ذکر است که از این روش واسنجی ضرایب انتقال املاح در مطالعاتی نظیر فوگات و همکاران (۲۰۱۴) و لی و همکاران (۲۰۱۵) نیز استفاده شده است.

در ابتدای شبیه‌سازی برای هر کدام از سه تیمار مورد بررسی، مقدار غلظت کود اوره مورد استفاده به صورت محلول در آب آبیاری در هر نوبت کوددهی به عنوان یک پارامتر ورودی به مدل داده شد. علاوه بر این، در هر آبیاری مقدار نیترات و آمونیوم محلول در آب آبیاری نیز به عنوان ورودی به مدل داده می‌شد. با بررسی غلظت‌های آمونیوم اندازه‌گیری شده در زیر جویچه و پشته‌های آبیاری مشخص شد که بعد از عملیات کوددهی، غلظت آمونیوم ایجاد شده از فرآیند هیدرولیز اوره در نواحی زیر جویچه‌ها بیشتر از نواحی زیر پشته‌ها بود که دلیل آن تحرک نسبتاً پایین آمونیوم در خاک بود. به طور کلی نتایج مطالعات متعددی نشان داده است که توزیع رطوبت و نیتروژن در زیر جویچه و پشته‌های آبیاری متفاوت است (کرویسیر و همکاران، ۲۰۰۸؛ ابراهیمیان و همکاران، ۲۰۱۳).

از طرف دیگر عواملی نظیر مقدار نیتروژن موجود در خاک، رطوبت، دما، تهویه و فعالیت‌های باکتری‌های خاک بر سرعت فرآیندهای نیترات‌زایی، نیترات زدایی و معدنی شدن تاثیر مستقیم دارند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۵). به همین دلیل در اعماق مختلف زیر جویچه و پشته‌های آبیاری ضریب سرعت این فرآیندها می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین به خاطر اینکه غیر یکنواختی عرضی توزیع آمونیوم، نیترات و رطوبت در زیر جویچه و پشته‌ها با شرایط دقیقتری طی شبیه‌سازی در نظر گرفته شود، تا عمق ۳۰ سانتیمتری زیر جویچه‌ها به دو بخش عرضی A و B تقسیم شد (شکل ۱-ب). از عمق ۳۰-۶۰ سانتیمتری زیر جویچه و پشته‌ها نیز به عنوان بخش C در نظر گرفته شد. کرویسیر و همکاران

(۲۰۰۸) نیز به منظور شبیه‌سازی دو بعدی انتقال رطوبت و نیترات در نواحی زیر جویچه و پشته‌های آبیاری توسط مدل HYDRUS، پروفیل خاک را به همین شکل تقسیم‌بندی کرده بودند.

پارامترهای ورودی برای بخش انتقال و تغییر شکل املاح در مدل HYDRUS-2D، در قالب سه بخش کلی پارامترهای انتقال، واکنشی^{۱۳} و جذب املاح تقسیم بندی می‌شوند. در بخش پارامترهای انتقال املاح، ضریب پخشیدگی مولکولی در آب آزاد (D_w) برای اوره، آمونیوم و نیترات به ترتیب برابر $1/3$ ، $1/52$ و $1/64$ سانتیمتر مربع در روز در نظر گرفته شد (لی و همکاران، ۲۰۱۵). ضریب انتشارپذیری طولی (D_L) برای هر کدام از قسمت‌های A، B یا C برابر حدوداً یک دهم عمق آن‌ها (سه سانتیمتر) و ضریب انتشارپذیری عرضی (D_T) برابر یک دهم مقدار D_L در نظر گرفته شد (فوگات و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین ضریب توزیع آمونیوم (K_d) معمولاً بین سه تا چهار سانتیمتر مکعب بر گرم تغییر می‌کند که در این مطالعه برای همه اعماق برابر $3/5$ سانتیمتر مکعب بر گرم در نظر گرفته شد (هانسن و همکاران، ۲۰۰۶).

همانطور که پیشتر توضیح داده شد، برای پارامترهای واکنشی و جذب املاح نظیر نرخ هیدرولیز اوره (K_h)، نرخ نیترات زایی (K_n)، نرخ معدنی شدن نیتروژن آلی خاک (K_m) و حداکثر غلظت قابل جذب نیترات و آمونیوم توسط ریشه (C_{root,NO_3^-} ، C_{root,NH_4^+}) که باید واسنجی می‌شدند، در ابتدا مقادیر اولیه‌ای از مطالعات قبلی در نظر گرفته شد (چاودری و همکاران، ۲۰۰۴). مقدار K_h برابر با $0.38 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ برای قسمت‌های فوقانی خاک (A و B) در نظر گرفته شد (هانسن و همکاران، ۲۰۰۶). مقدار اولیه K_n و K_m نیز در کل قسمت‌های مورد بررسی به ترتیب برابر 0.2 و $0.045 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که مقدار رطوبت و دمای خاک روی بعضی از این فرآیندها

تاثیرگذار است که به خاطر ساده‌تر کردن شرایط شبیه‌سازی، این اثرات نادیده گرفته شدند (چاودری و همکاران، ۲۰۰۴؛ هانسن و همکاران، ۲۰۰۶). سپس کل این ضرایب برای هر کدام از قسمت‌های A، B و C با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده تصحیح و واسنجی شدند (لی و همکاران، ۲۰۱۵).

مقدار نیتروژن کل گیاه در طول دوره کشت به عنوان میزان جذب مجموع نیترات و آمونیوم توسط گیاه در طول کشت در نظر گرفته شد. در مورد شبیه‌سازی جذب املاح، ابتدا فرض شد که جذب غیرفعال نیترات و آمونیوم به صورت نامحدود توسط ریشه گیاه صورت گرفته است. بدین منظور مقدار حداکثر غلظت قابل جذب این املاح توسط ریشه (C_{root,NO_3^-} ، C_{root,NH_4^+}) بیشتر از مقدار غلظت واقعی مشاهده شده آن‌ها در خاک (0.2 میلی گرم بر سانتیمتر مکعب) در نظر گرفته شد. از آنجایی که این ضرایب مقدار حداکثر قابل جذب املاح داخل خاک توسط ریشه را تعیین می‌کنند، لذا روی تغییرات غلظت نیترات و آمونیوم داخل خاک تاثیر مستقیم دارند. بنابراین بعد از تعیین مقدار اولیه، با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده جذب نیتروژن اندازه‌گیری شده و همچنین غلظت نیترات و آمونیوم داخل خاک این ضرایب نیز واسنجی شدند (مطابق مطالعه لی و همکاران (۲۰۱۵) در واسنجی (HYDRUS-1D)

شرایط اولیه و مرزی

از آنجایی که شبیه‌سازی در طول فصل کشت انجام می‌شد، غلظت اوره، نیترات و آمونیوم و همچنین مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده در سه عمق مورد مطالعه خاک در زمان قبل از کشت به عنوان شرایط اولیه مرحله واسنجی در نظر گرفته شد. در قسمت بالایی پروفیل خاک مورد بررسی، برای سطح خیس شده جویچه در حین آبیاری شرط مرزی جریان متغیر در زمان^{۱۴} و برای باقی

مقادیر اولیه و بهینه شده پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل θ_s , θ_r , K_s , n و α که بر اساس فرآیند حل معکوس و به طور همزمان بدست آورده شدند، به علاوه حدود اطمینان ۹۵ درصد و انحراف از معیار این پارامترها در جدول (۲) گزارش شده است. روش بهینه‌سازی معکوس به این دلیل دقت نسبتاً بالایی دارد که در آن، ارتباط بین همه پارامترهای مذکور با مقدار رطوبت در نظر گرفته می‌شود و در نهایت این پارامترها به طور همزمان تصحیح می‌شوند (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۲). با توجه به بافت و خصوصیات فیزیکی خاک، نتایج نشان می‌داد که مقادیر بهینه شده در دامنه منطقی قرار داشتند. همچنین مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده در برابر رطوبت اندازه‌گیری شده در مجموع سه تیمار طی مرحله واسنجی (شکل ۲-الف) و صحت سنجی (شکل ۲-ب) در شکل (۲) نشان داده شده است.

شاخص‌های R^2 و SSQ در شکل (۲-الف) نشان می‌دهند که پارامترهای بهینه شده با دقت مناسبی تخمین زده شده‌اند. از طرف دیگر مقادیر MBE ، $NRMSE$ و R^2 در شکل (۲-ب) نیز نشان می‌دهند که نتایج بدست آمده از تست پارامترهای بهینه شده دقت مناسبی دارند. علاوه بر این با توجه به رویه آزمون t نمونه‌های جفت شده^{۱۸} نیز مشخص شد که بین داده‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده رطوبت اختلاف معنی‌داری وجود نداشت ($P > 0.05$). در شکل (۳) مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رطوبت خاک در اعماق زیر پشته و جویچه‌های آبیاری در تیمار N5 و مربوط به مرحله صحت سنجی، به طور نمونه نمایش داده شده‌اند. در این شکل‌ها نیز به طور واضح مشخص شده است که مدل قابلیت بالایی در شبیه‌سازی رطوبت و فرآیند توزیع مجدد آن در اعماق مختلف جویچه و پشته‌ها و در زمان‌های مختلف قبل و بعد از آبیاری داشته است. علاوه بر این، مطابق نتایج ارائه شده در مطالعات قبلی (ابراهیمیان و

سطح جویچه و پشته شرط مرزی اتمسفری^{۱۵} در نظر گرفته شد. شرط کوچی (Cauchy) برای مرز بالایی و پایینی انتقال املاح، زهکشی آزاد^{۱۶} برای حرکت آب و املاح در مرز پایینی، و شرط مرزی بدون شدت جریان^{۱۷} در طرفین جویچه‌ها در نظر گرفته شد. همه این شروط مرزی در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. در این شکل نیز نقاط نمونه‌برداری از زیر جویچه و پشته‌های آبیاری مشخص شده‌اند.

ارزیابی مدل

از شاخص‌های ارزیابی ضریب تعیین (R^2)، متوسط خطای اریبی (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی رطوبت خاک و غلظت نترات و آمونیوم استفاده گردید. وقتی که مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده مساوی باشند (حالت بهینه) MBE برابر صفر و علامت مثبت آن نیز بیانگر آن است که مدل مقادیر را بیشتر تخمین می‌زند، علامت منفی نشان دهنده آن است که مدل مقادیر را کمتر پیش‌بینی می‌کند (کلمنته و همکاران، ۱۹۹۴).

$$NRMSE = \frac{RMSE \times 100}{\bar{O}} \quad (10)$$

$$MBE = \frac{\sum(P_i - O_i)}{n} \quad (11)$$

در این روابط:

$RMSE$ ریشه میانگین مربعات خطا، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، O_i مقادیر مشاهداتی، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهداتی و n تعداد داده‌های مورد بررسی می‌باشد.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت سنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک

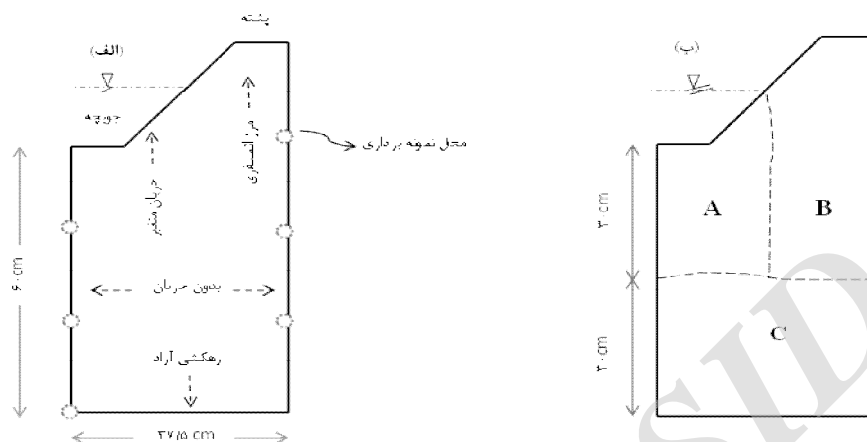
15 - Atmospheric Boundary Condition

16 - Free drainage

17 - No flux

داده شده است. در کل مدل رطوبت را در زمان و نقاط مختلف هر سه تیمار به خوبی شبیه‌سازی کرده است.

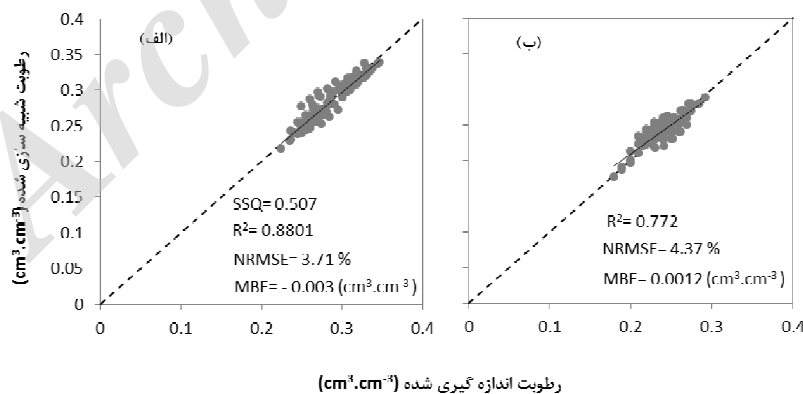
همکاران، ۲۰۱۳) مقدار رطوبت در زیر جویچه‌ها در هر سه تیمار نسبتاً بیشتر از رطوبت در زیر پشته‌ها بود که این نکته در شکل (۳) به طور نمونه فقط برای تیمار N5 نشان



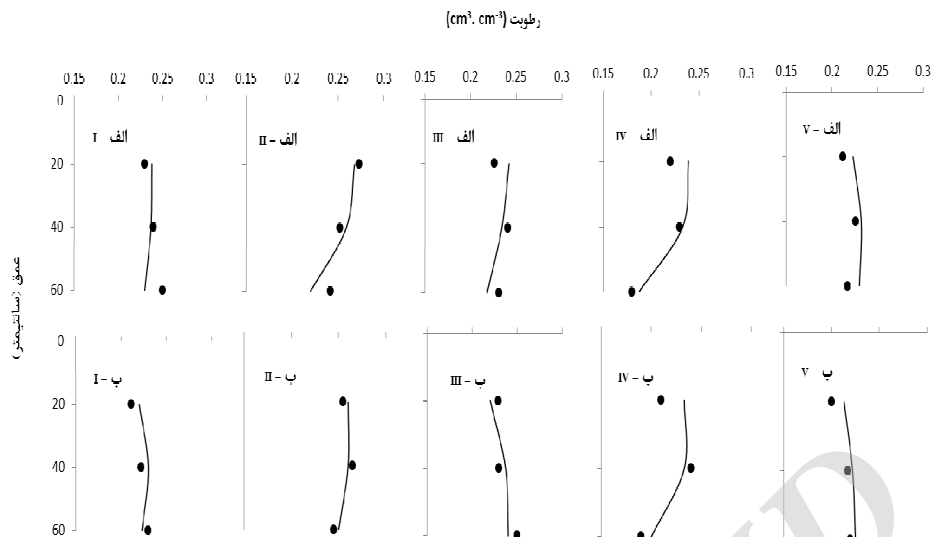
شکل ۱- الف) - شرایط مرزی اعمال شده برای جریان در مدل HYDRUS- 2D و محل نقاط نمونه‌برداری از زیر جویچه و پشته‌ها. ب) - تقسیم بندی لایه‌های خاک مورد بررسی

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی خاک قبل و بعد از فرآیند بهینه‌سازی معکوس توسط مدل HYDRUS

K_s (cm.day ⁻¹)	n	α (cm ⁻¹)	θ_s (cm ³ .cm ⁻³)	θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	
۱۳۹/۳۲	۱/۲۰	-/۰.۳۱	۰/۳۷۶	۰/۰.۳۸	مقادیر اولیه
۱۲۴/۰۰	۱/۲۱	-/۰.۳۵	۰/۳۸۳	۰/۰.۷۱	مقادیر بهینه شده
(۸۶/۵۱ - ۱۷۱/۲۶)	(۱/۰.۵ - ۱/۳.۸)	(-/۰.۲۳ - -/۰.۴۶)	(-/۰.۳۰۲ - -/۰.۴۶۴)	(-/۰.۲۶ - -/۰.۱۴۷)	حدود اطمینان ۹۵٪
۳۰/۴۷	۰/۰.۸	-/۰.۱۰	۰/۰.۴۱	۰/۰.۳۳	انحراف معیار



شکل ۲- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی بهینه شده خاک طی مراحل الف: واسنجی و ب: صحت سنجی



شکل ۳- رطوبت اندازه‌گیری شده (●) و شبیه‌سازی شده (■) در اعماق مختلف زیر جویچه (الف) و پشته‌های آبیاری (ب) بترتیب در زمان‌های I: یک روز قبل از کوددهی سوم (۶۴ روز بعد از کشت)، II: دو روز بعد از کوددهی سوم (۶۷ روز بعد از کشت)، III: چهار روز بعد از کوددهی سوم (۶۹ روز بعد از کشت)، IV: ۸۹ روز بعد از کشت، V: ۱۱۹ روز بعد از کشت.

های $C_{\text{roots}, \text{NH}_4^+}$ و $C_{\text{roots}, \text{NO}_3^-}$ برای هر سه تیمار به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۰/۰۱ میلی‌گرم بر سانتیمتر مکعب بدست آمد. مقادیر جذب نیتروژن شبیه‌سازی شده با استفاده از این ضرایب و مقادیر واقعی به ترتیب در تیمار N0 برابر ۹۹/۷۲ و ۹۹/۴۸، در تیمار N150 برابر ۲۱۸/۹۸ و ۲۲۱/۶۱ و در نهایت در تیمار N250 برابر ۲۹۴/۱۹ و ۲۶۷/۱۳ بدست آمد. در مجموع مقادیر و نتایج بدست آمده برای پارامترهای واسنجی شده در مقایسه با سایر مطالعات نظیر کرویسیر و همکاران (۲۰۰۸) و ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) در محدوده منطقی قرار داشت.

شکل‌های (۴) و (۵) مقادیر غلظت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به ترتیب نیترات و آمونیوم در لایه ۰-۶۰ سانتیمتری تیمارهای مختلف را در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای انتقال املاح نشان می‌دهند. همانطور که مشخص شده است، پارامترهای واسنجی شده به خوبی قادر به شبیه‌سازی توزیع نیترات و آمونیوم در خاک زیر جویچه و پشته‌ها بوده‌اند. همچنین تاثیر کاربرد کود در تیمارهای مختلف بر روی غلظت نیترات و آمونیوم در خاک کاملاً مشهود است. با اینحال

واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای انتقال املاح در خاک جدول (۳) مقادیر واسنجی شده برای هر کدام از پارامترهای انتقال و واکنشی املاح در قسمت‌های مختلف خاک را ارائه داده است. مقادیر پارامترهای D_L و D_T در هر سه تیمار فقط در لایه ۰-۳۰ سانتیمتری (قسمت‌های A و B) نسبت به مقادیر اولیه تغییر داشتند. تغییر پارامتر K_h و K_n نسبت به پارامترهای K_m و K_d تاثیر چندانی روی دقت غلظت نیترات و آمونیوم شبیه‌سازی شده در خاک نداشت و بنابراین بدون تغییر باقی ماندند. پارامترهای K_m و K_n به شدت روی نتایج شبیه‌سازی تاثیر داشتند. مقدار K_m و K_n در زیر جویچه‌ها (ناحیه A) کمتر از نقاط زیر پشته‌ها (ناحیه B) بود. علاوه بر این با افزایش عمق (ناحیه C) مقدار آن‌ها نیز کاهش می‌یافت. از طرف دیگر مقدار این پارامترها در تیمار N250 نسبت به دو تیمار دیگر بیشتر بود. دلیل این اختلاف‌ها اینست که سرعت نیترات‌زایی و معدنی شدن نیتروژن در جایی که شرایط تهویه و رطوبتی مناسب و محتوی نیتروژن خاک بیشتر باشد بالاتر می‌رود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۵). در نهایت مقادیر واسنجی شده پارامتر-

29.4). در بخش صحت سنجی مدل، به جزء تیمار N250 که تا حدودی در آن مقدار آمونیوم کمتر تخمین زده شده بود ($MBE = -0.001 \text{ gr.cm}^{-3}$) در سایر تیمارها هیچ کم یا بیش تخمینی قابل ملاحظه‌ای مشاهده نگردید ($MBE \approx 0$). با توجه به رویه آزمون t نمونه‌های جفت شده نیز مشخص شد که بین غلظت‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده نیترات و آمونیوم اختلاف معنی‌داری وجود نداشت ($P > 0.05$).

در شکل (۴-ب) به وضوح نشان داده شده که با افزایش میزان کاربرد کود (N250)، چون تغییرات غلظت نیترات در خاک بالاتر رفته بنابراین دقت مدل در تخمین نیترات تا حدودی کمتر شده است. این نکته در مورد آمونیوم بر عکس است. در شکل (۵-ب) نیز به وضوح مشخص است که بیشترین ضریب تبیین مربوط به تیمار N250 است در حالی که خطای مدل در تخمین آمونیوم در همین تیمار نسبتاً بیشتر از تیمارهای دیگر است ($NRMSE =$

جدول ۳- پارامترهای واسنجی شده انتقال و واکنشی املاح در قسمت‌های مورد بررسی خاک در تیمارهای مختلف

تیمار	بخش‌های خاک	$K_n (\text{day}^{-1})$	$K_m (\text{day}^{-1})$	$K_h (\text{day}^{-1})$	$K_d (\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$D_L (\text{cm})$	$D_T (\text{cm})$
N0	A	۰/۰۲	۰	۰	۳/۵	۲	۰/۲
	B	۰/۱۵	۰	۰	۳/۵	۲	۰/۲
	C	۰/۰۹	۰	۰	۳/۵	۳	۰/۳
N150	A	۰/۱۳	۰	۰/۳۸	۳/۵	۲	۰/۲
	B	۰/۱۸	1×10^{-7}	۰/۳۸	۳/۵	۲	۰/۲
	C	۰/۱۴	۰	۰	۳/۵	۳	۰/۳
N250	A	۰/۱۸	$1/5 \times 10^{-7}$	۰/۳۸	۳/۵	۲	۰/۲
	B	۰/۱۸	$2/5 \times 10^{-7}$	۰/۳۸	۳/۵	۲	۰/۲
	C	۰/۱۴	۰	۰	۳/۵	۳	۰/۳

در شکل (۶) به طور نمونه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به ترتیب نیترات و آمونیوم خاک در اعماق زیر پشته و جویچه‌های آبیاری در تیمار N250 طی مرحله صحت سنجی مدل نمایش داده شده‌اند. در این شکل‌ها نیز به طور واضح مشخص است که ضرایب واسنجی شده باعث شدند مدل قابلیت بالایی در شبیه‌سازی توزیع و انتقال نیترات و آمونیوم در اعماق مختلف خاک و در زمان‌های مختلف قبل و بعد از کوددهی داشته باشد.

تغییرات آمونیوم فقط در عمق ۰-۲۰ و ۲۰-۴۰ سانتیمتری زیر جویچه‌های تیمار N250 (شکل ۶) و N150 (نشان داده نشده) قابل ملاحظه بود و با افزایش عمق، غلظت آمونیوم به شدت کم می‌شد که دلیل آن کم تحرک بودن آمونیوم در خاک می‌باشد. به همین دلیل شیب تغییرات غلظت آمونیوم در زیر پشته‌ها کمتر از نواحی زیر جویچه‌ها بود که در شبیه‌سازی توسط مدل نیز کاملاً مشهود است. بلافاصله بعد از وارد شدن کود در خاک، اوره هیدرولیز شده و آمونیوم ایجاد می‌گردد. به همین دلیل در روز دوم و چهارم بعد از سومین نوبت کوددهی، غلظت آمونیوم اندازه‌گیری شده در عمق ۲۰ و ۴۰ سانتیمتری افزایش یافته است. این شرایط به خوبی در مدل نیز پیش‌بینی شده است. در زمان‌های ۸۹ و ۱۱۹ روز بعد از کشت در اثر فرآیند نیترات‌زایی، غلظت آمونیوم مجدداً در زیر جویچه‌ها کاهش یافته است. در تیمار N0 هیچ کودی وارد خاک نشده بود و عملاً نیترات و آمونیوم موجود در خاک از مواد آلی خود خاک به وجود آمده بود. بنابراین غلظت آمونیوم و نیترات در زیر پشته‌ها تا حدودی بیشتر از نواحی زیر جویچه‌ها بود که دلیل آن همانطور که پیشتر توضیح داده شد، می‌تواند وجود شرایط رطوبتی و تهویه‌ای مناسب‌تر در نواحی زیر پشته‌ها برای فرآیند نیترات‌زایی و معدنی شدن باشد.

از طرف دیگر تغییرات غلظت نیترات، به دلیل تحرک بالای این یون در خاک، قابل ملاحظه بود. در کل غلظت نیترات در زیر پشته‌ها از غلظت آن در زیر جویچه-

در شکل (۶) به طور نمونه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به ترتیب نیترات و آمونیوم خاک در اعماق زیر پشته و جویچه‌های آبیاری در تیمار N250 طی مرحله صحت سنجی مدل نمایش داده شده‌اند. در این شکل‌ها نیز به طور واضح مشخص است که ضرایب واسنجی شده باعث شدند مدل قابلیت بالایی در شبیه‌سازی توزیع و انتقال نیترات و آمونیوم در اعماق مختلف خاک و در زمان‌های مختلف قبل و بعد از کوددهی داشته باشد.

تغییرات آمونیوم فقط در عمق ۰-۲۰ و ۲۰-۴۰ سانتیمتری زیر جویچه‌های تیمار N250 (شکل ۶) و N150 (نشان داده نشده) قابل ملاحظه بود و با افزایش عمق، غلظت آمونیوم به شدت کم می‌شد که دلیل آن کم تحرک بودن آمونیوم در خاک می‌باشد. به همین دلیل شیب تغییرات غلظت آمونیوم در زیر پشته‌ها کمتر از نواحی زیر جویچه‌ها بود که در شبیه‌سازی توسط مدل نیز کاملاً مشهود است. بلافاصله بعد از وارد شدن کود در

استفاده بهینه از کود نیتروژن و کاهش تلفات آن باید مطالعات دقیقی روی چگونگی توزیع شکل‌های مختلف نیتروژن در داخل خاک انجام شود. در این تحقیق توزیع رطوبت، انتقال و تغییر شکل اوره، نیترات و آمونیوم به صورت یک زنجیره‌ای از واکنش‌های متصل به هم در نواحی زیر پشته و جویچه‌های آبیاری در طول دوره رشد ذرت توسط مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی شد.

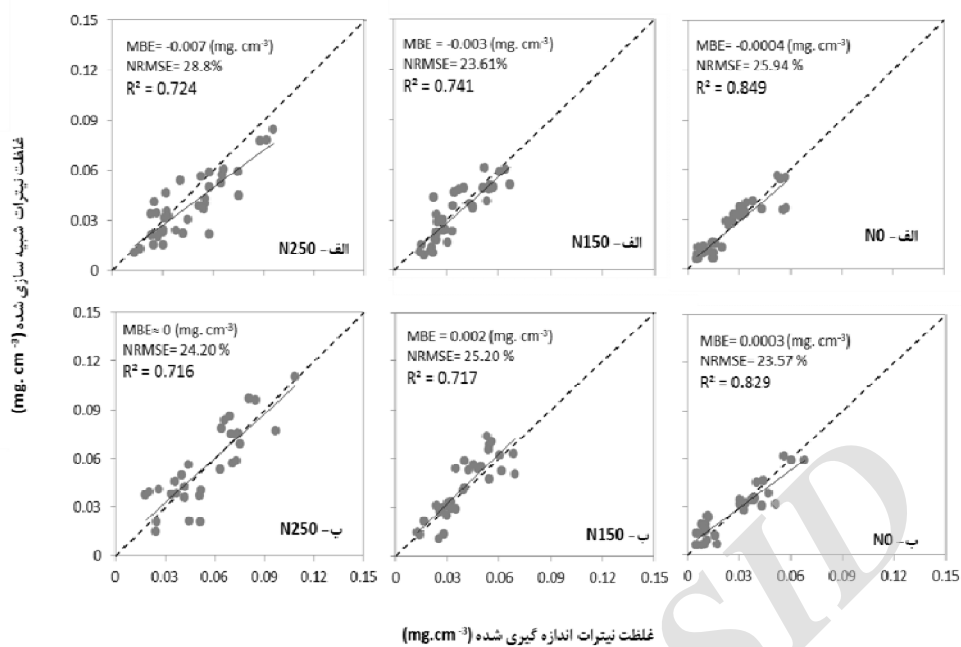
ضرایب هیدرولیکی و انتقال املاح در مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت، جذب نیتروژن، غلظت نیترات و آمونیوم در نقاط مختلف خاک در طول دوره رشد گیاه واسنجی و سپس صحت سنجی شدند. واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از روش حل معکوس و پارامترهای انتقال املاح با استفاده از سعی و خطا انجام گرفت. مقایسه نتایج بدست آمده از مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل HYDRUS-2D قابلیت بالایی در پیش‌بینی زمانی و مکانی توزیع رطوبت و غلظت نیترات و آمونیوم در زیر جویچه و پشته‌های آبیاری را داشته است. همچنین داده‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل تطابق مناسبی با یکدیگر داشتند. مقایسه شاخص‌های آماری محاسبه شده نشان دادند که توزیع رطوبت با دقت بالاتری نسبت به غلظت نیترات و آمونیوم در خاک شبیه‌سازی شده بود. نتایج این پژوهش نشان داد که می‌توان از مدل HYDRUS-2D برای مدیریت آب و کود در مزرعه به منظور کاهش تلفات نیتروژن و آلودگی محیط زیست استفاده کرد.

ها برای دو تیمار N150 و N250 بیشتر بود. بعد از کوددهی، غلظت نیترات در زیر جویچه‌ها (به خصوص در تیمار N250) با افزایش عمق بیشتر شد که این می‌تواند باعث ازدیاد آبشویی نیترات از محدوده توسعه ریشه گیاه شود. چهار روز بعد از کوددهی با افزایش سرعت نیترات-زایی تقریباً غلظت نیترات در پروفیل ۴۰-۰ سانتیمتری نیز بیشتر شد.

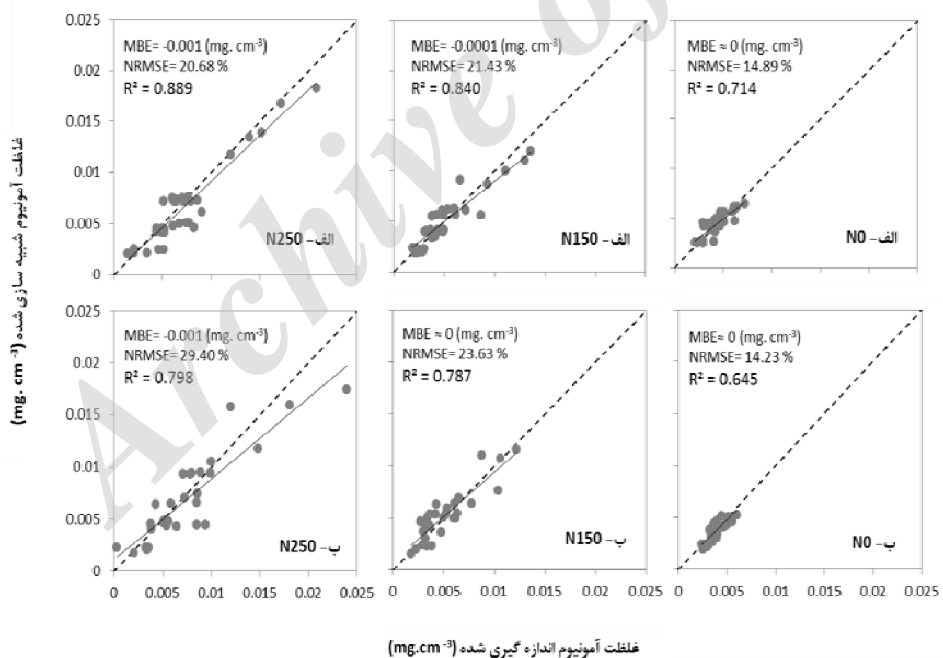
توزیع غلظت نیترات نسبت به عمق در زیر پشته‌های تیمارهای N150 و N250 متفاوت از جویچه‌ها بود. بعد از کوددهی، غلظت نیترات در عمق‌های ۲۰ و ۴۰ سانتیمتری زیر پشته بیشتر از عمق ۶۰ سانتیمتری شده بود. این نشان می‌دهد که در زیر پشته با افزایش عمق غلظت نیترات تا حدودی کاهش یافته است که بر عکس شرایط حاکم بر نقاط زیر جویچه‌ها می‌باشد. یکی از دلایل آن می‌تواند تراکم و جذب بیشتر ریشه در این ناحیه باشد. از طرف فرآیندهای نیترات‌زایی و معدنی شدن با نرخ بیشتری در نقاط زیر پشته انجام می‌گیرد (کرویسیر و همکاران، ۲۰۰۸). در مجموع با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده (شکل ۶) مشخص شد که مدل واسنجی شده قابلیت آن را داشته که با دقت نسبتاً مناسبی تغییرات مکانی و زمانی غلظت نیترات و آمونیوم در خاک را برای هر سه تیمار مورد بررسی شبیه‌سازی کند که البته در اینجا فقط نمودارهای مربوط به تیمار N250 نمایش داده شده است.

نتیجه‌گیری

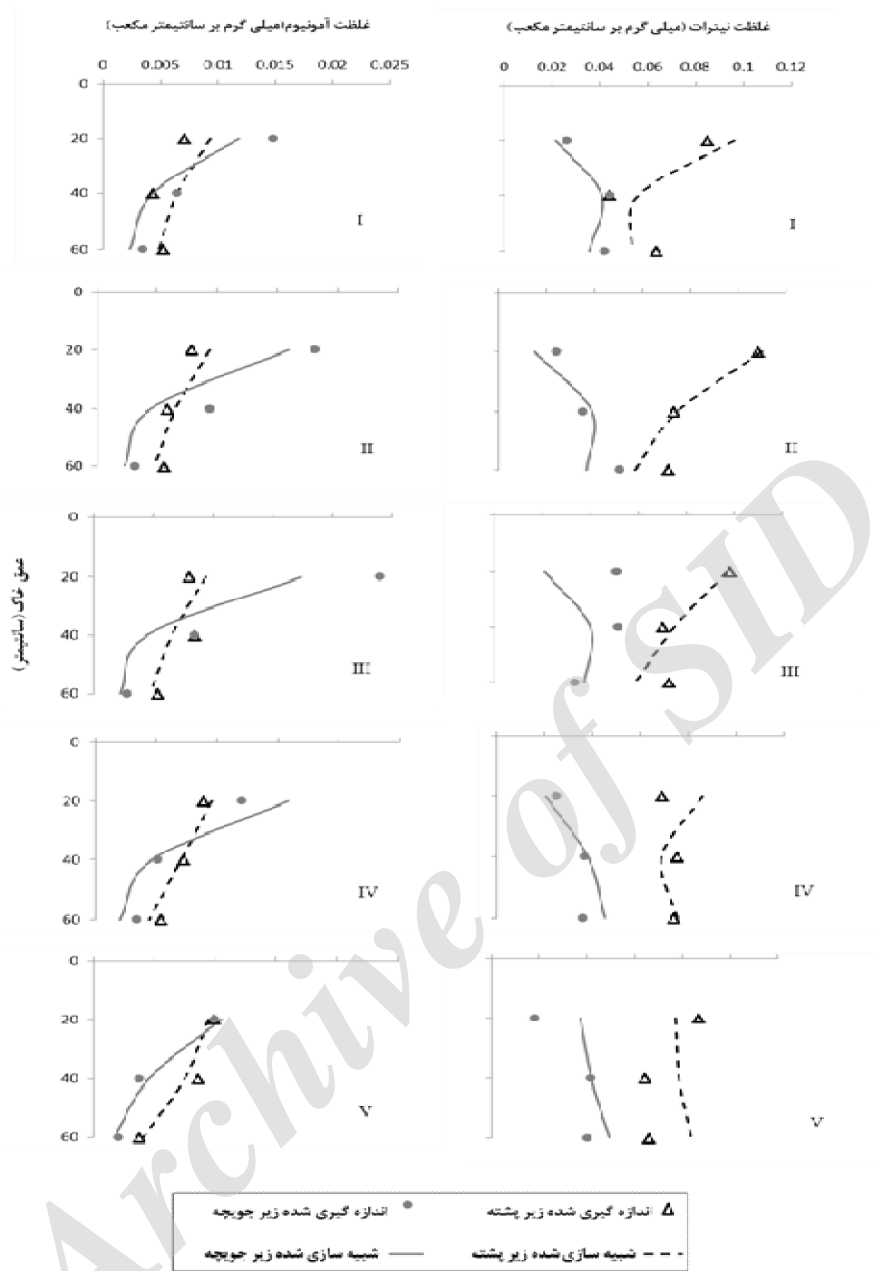
انتقال رطوبت و املاح در نواحی زیر پشته و جویچه‌های آبیاری باهم متفاوت هستند، بنابراین برای



شکل ۴- غلظت نیترات شبیه سازی و اندازه گیری شده در خاک تیمارهای مختلف در مرحله: الف) - واسنجی، ب) - صحت سنجی



شکل ۵- غلظت آمونیوم شبیه سازی و اندازه گیری شده در خاک تیمارهای مختلف در مرحله: الف) - واسنجی، ب) - صحت سنجی



شکل ۶- غلظت نیترات و آمونیوم اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در اعماق مختلف زیر جویچه و پشته- های آبیاری در تیمار N250 به ترتیب در زمان‌های I: یک روز قبل از کوددهی سوم (۶۴ روز بعد از کشت)، II: دو روز بعد از کوددهی سوم (۶۷ روز بعد از کشت)، III: چهار روز بعد از کوددهی سوم (۶۹ روز بعد از کشت)، IV: ۸۹ روز بعد از کشت، V: ۱۱۹ روز بعد از کشت

فهرست منابع

۱. ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کودآبیاری در آبیاری جویچه‌ای یک در میان به منظور کاهش آلودگی نیترات. رساله دکتری رشته آبیاری و زهکشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. ۱۴۶ صفحه.

۲. سپاسخواه، ع. ۱۳۸۹. کشاورزی ارگانیک و بهره‌وری آب و کود. همایش کشاورزی ارگانیک. فرهنگستان علوم، تهران، ۲۲ آبان.
۳. نوابیان، م.، جلیل نژاد ماسوله. ن. ۱۳۹۴. اثر رطوبت خاک بر ضرایب تبدیل چرخه نیتروژن در آبیاری جویچه‌ای گیاه ذرت با استفاده از مدل HYDRUS-1D. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۲(۶): ۲۴۵-۲۵۸.
4. Abbasi, F., Feyen, J and van Genuchten, MT. 2004. Two dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: model calibration and validation. *Journal of Hydrology* 290:63-79.
 5. Bremner, J.M., and Keeney D.R. 1965. Steam distillation methods for determination of ammonium nitrite and nitrate. *Analytica Chimica Acta*, 32:485-495.
 6. Chowdary, V.M., Rao, N.H and Sarma, P.B.S., 2004. A coupled soil water and nitrogen balance model for flooded rice fields in India. *Agriculture, Ecosystems & Environment - Journal* . 103 (3),425-441.
 7. Clemente, R.S., De Jong, R., Hayhoe, H.N., Reynolds, W.D., and Hares, M. 1994. Testing and comparison of three unsaturated soil water flow models. *Agricultural Water Management*, (25): 135-152.
 8. Crevoisier, D., Popova, Z., Mailhol, JC and Ruelle, P. 2008. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation. *Agricultural Water Management*.(95):354-366.
 9. Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Playan, E., Abbasi, F and Navabian, M. 2013. Simulation of 1D surface and 2D subsurface water flow and nitrate transport in alternate and conventional furrow fertigation. *Journal of Irrigation Science*, 31(3): 310-316.
 10. Feddes, RA., Kowalik, PJ and Zaradny, H. 1978. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*. John Wiley & Sons, New York.
 11. Gaudin ACM, Tolhurst TN, Ker AP, Janovicek K, Tortora C, Martin RC, et al. (2015) Increasing Crop Diversity Mitigates Weather Variations and Improves Yield Stability. *PLoS ONE* 10 (2): e0113261. doi:10.1371/journal.pone.0113261.
 12. Hanson, BR., Šimůnek, J and Hopmans, JW. 2006. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural Water Management* (86):102-113.
 13. Horowitz, W. 1970. *Official Methods of Analysis*. 11th Edition. Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C.
 14. Li, Y., Šimůnek, J., Zhang, Z.T., Jing, L.F and Ni, L.X. 2015. Evaluation of nitrogen balance in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D. *Agric. Agricultural Water Management*.(148): 213-222.
 15. Mailhol, JC., Ruelle, P and Nemeth, I. 2001. Impact of fertilization practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrigation Science* 20:139-147.
 16. Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour Research* 12(3):513-522.
 17. Phogat, V., Skewes, M.A., Cox, J.W., Sanderson, G., Alam, J and Šimůnek, J. 2014. Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching. *Journal of Hydrology*,(513). 504-516.
 18. Phogat, V., Mahadevan, M., Skewes, M and Cox, J.W. 2012. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of

- almond and implications of system design. *Irrigation Science*. 30 (4), 315–333.
19. Ramos, T.B., Simůnek, J., Goncalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., Castanheira, N.L., Pereira, L.S., 2011. Field evaluation of a multicomponent solute transport model in soils irrigated with saline waters. *Journal of Hydrology* 407, 129–144.
 20. Ramos, T.B., Simůnek, J., Goncalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A and Pereira, L.S. 2012. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agricultural Water Management*. (111): 87–104.
 21. Simůnek, J., van Genuchten, M.T., Sejna, M., (2008). Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone J.* 7 (2), 587–600.
 22. Simůnek, J., Jacques, D., Hopmans, J.W., Inoue, M., Flury, M and van Genuchten, M.T. 2002. Solute transport during variably-saturated flow—inverse methods. In: Dane JH, Topp GC (eds) Chapter 6.6 in *methods of soil analysis: part 1. Physical methods*, 3rd edn. SSSA, Madison, pp 1435–1449.
 23. Simůnek, J., van Genuchten, M.T., Sejna, M. 2006. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. In: *Technical Manual. Version 1.0*. PC Progress, Prague, Czech Republic, 241 p.
 24. Taftah, A and Sepaskhah, A.R. 2012. Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. *Agricultural Water Management*. (113), 19–29.
 25. van Genuchten M.T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. (44):892–898.
 26. Wesseling, J.G., Elbers, J.A., Kabat, P and van den Broek, B.J. 1991. SWATRE: instructions for input, Internal Note, Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands.
 27. Zhang X., Wang Q., Xu J., Gilliam, F. S, Tremblay, N and Li, C. 2015. In Situ Nitrogen Mineralization, Nitrification, and Ammonia Volatilization in Maize Field Fertilized with Urea in Huanghuaihai Region of Northern China. *PLOS ONE*, 10(1):1-15.