

تخمین شاخص تغذیه نیتروژن با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی AquaCrop و HYDRUS در طول دوره رشد ذرت دانه‌ای

آرش رنجبر، علی رحیمی خوب¹، حامد ابراهیمیان و مریم وراوی پور

دانشجوی فارغ التحصیل 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

دریافت: 96/11/17 و پذیرش: 97/5/24

چکیده

پایش شاخص تغذیه نیتروژن یا NNI (Nitrogen Nutrition Index) در طول فصل رشد نیازمند آزمایش‌های پرهزینه و زمانبر است. به دلیل اهمیت تعیین NNI در بهبود کارایی مصرف کود و آب و کاهش خطرات زیست محیطی، اخیراً در سطح دنیا مطالعاتی به منظور تخمین غیر مستقیم آن توسط پارامترهای مختلف گیاهی انجام شده است. هدف اصلی از این مطالعه، تخمین NNI در طول فصل رشد ذرت با استفاده از یک روش غیر تخریبی بود. دو پارامتر مورد نیاز برای تخمین NNI عملکرد ماده خشک و میزان جذب واقعی نیتروژن توسط گیاه در طول دوره رشد است که به ترتیب توسط دو مدل AquaCrop و HYDRUS-2D تخمین زده شدند. در این مطالعه از معادله نیتروژن بحرانی ارائه شده برای کشت ذرت تابستانه در ایران استفاده شد. نمونه‌های گیاهی و خاک برای واسنجی و صحت سنجی دو مدل مذکور در طول دو سال زراعی برداشت شدند. نتایج بدست آمده نشان دادند که مدل AquaCrop با دقت خوبی قادر است عملکرد ماده خشک ذرت را طی دوره کشت تخمین بزند ($R^2=0.995$, $NRMSE=14.21\%$). همچنین دقت برآورد میزان جذب نیتروژن از مدل HYDRUS نسبتاً قابل قبول بود ($R^2>0.907$, $NRMSE<28.20\%$). در نهایت شاخص تغذیه نیتروژن در طول دو فصل، یک بار با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده از مزرعه محاسبه (NNIo) و بار دیگر با استفاده از مقادیر شبیه‌سازی شده توسط دو مدل مذکور تخمین زده شد (NNIp). مقایسه پراکنش نقاط NNIp در برابر NNIo نشان داد که میزان درستی تخمین بر اساس معیارهای $R^2>0.638$ و $NRMSE<20.86\%$ برای هر دو سال قابل قبول بود.

واژه‌های کلیدی: مدیریت کود و آب، جذب نیتروژن، عملکرد ماده خشک، معادله نیتروژن بحرانی

¹ نویسنده مسئول، آدرس: تهران - پاکدشت - پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

مقدمه

ضرایب معادله هستند (جاستس و همکاران، 1994). با ضرب کردن هر دو طرف معادله (2) در W ، رابطه مابین مجموع جذب نیتروژن بحرانی (N_{uc}) و مقدار ماده خشک تولید شده (W) به صورت زیر بدست می‌آید (پلنت و همکاران، 2000) که در این معادله N_{uc} مقدار بحرانی نیتروژن جذب شده (کیلوگرم نیتروژن در هکتار) برای تولید W (تن در هکتار) می‌باشد.

(3)

$$N_{uc} = 10 a W^{(1-b)}$$

به طور کلی، پایش NNI در طول دوره رشد، وضعیت و میزان دسترسی گیاه به نیتروژن را نشان می‌دهد. اما نکته قابل توجه این است که تعیین غلظت واقعی و غلظت نیتروژن بحرانی در گیاه و در نتیجه مقادیر جذب متناظر هر کدام، نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی برای برداشت داده‌های مزرعه‌ای و تحلیل‌های آزمایشگاهی است. بنابراین طی سالیان گذشته، مطالعاتی هر چند اندک در مورد تخمین غیر مستقیم NNI با روش‌های کاربردی انجام شده است. تعدادی از این تحقیقات روی تخمین غیر مستقیم غلظت نیتروژن داخل برگ یا میزان عملکرد محصول با استفاده از داده‌های کلروفیل برداشت شده توسط کلروفیل‌متر در مزرعه انجام گرفته است (فیو و همکاران، 1998، پنگ و همکاران، 1993). اما نتایج حاکی از این هستند که روابط متعدد تجربی بین غلظت کلروفیل و نیتروژن برگ وجود دارند که، با توجه به تنوع ژنوتیپی و شرایط زیستی گیاه در مطالعات مختلف، تغییرات زیادی داشته‌اند. به همین دلیل مقادیر به دست آمده از کلروفیل‌متر به تنهایی ابزار مناسبی برای این منظور قلمداد نشده است (هولس و همکاران، 2007).

همچنین بیشتر از یک دهه است که مطالعاتی در زمینه استفاده از روش‌های سنجش از راه دور² (RS) برای تخمین مقدار NNI انجام می‌شود. هولس و همکاران (2007) با بررسی سه روش مختلف بر اساس روش‌های سنجش از راه دور نتیجه گرفتند که به طور کلی بررسی تغییرات مکانی و زمانی شرایط نیتروژنی گیاه و تخمین غیر مستقیم NNI با استفاده از روش‌های سنجش از راه دور با دقت مناسبی امکان‌پذیر است. در دقیق‌ترین روش مورد ارزیابی آن‌ها، W توسط تصاویر ماهواره‌ای تخمین زده شد که از آن برای محاسبه مقادیر N_c (معادله 2) استفاده گردید. علاوه بر این، مقدار کلروفیل به طور

استفاده از مقدار مناسب کود نیتروژن در زمان نیاز گیاه به آن نه تنها می‌تواند باعث افزایش عملکرد کیفی و کمی محصول شود، بلکه موجب بالارفتن کارایی مصرف نیتروژن و آب می‌گردد. بدین ترتیب مقدار کمتری نیتروژن در خاک تجمع یافته و در نتیجه احتمال آبشویی و آلودگی محیط زیست کمتر خواهد شد. طی دو دهه اخیر مطالعات گسترده‌ای روی فرآیندهای جذب نیتروژن توسط گیاه و حرکت و توزیع آن در خاک و اندام‌های گیاه به منظور افزایش راندمان مصرف کود و کاهش اثرات مخرب زیست محیطی، انجام شده است. نتایج این تحقیقات نشان داده که شاخص تغذیه نیتروژن¹ (NNI) یک ابزار کارآمد برای تحلیل داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای به منظور تعیین وضعیت نیتروژنی گیاه و مدیریت کودهای نیتروژنه در مزرعه است (عطاالکریم و همکاران، 2014). این شاخص که بر اساس خصوصیات فیزیولوژیکی و مرفولوژیکی گیاه (Plant-Based) می‌باشد، طبق معادله (1) تعریف می‌شود و عبارت است از نسبت بین جذب واقعی نیتروژن (N_u) و جذب نیتروژن بحرانی (N_{uc}) که در طول دوره رشد گیاه قابل اندازه‌گیری و محاسبه هستند.

(1)

$$NNI = \frac{N_u}{N_{uc}}$$

در صورتی که این شاخص نزدیک به یک باشد، نشان دهنده این است که گیاه برای رشد حداکثر، با کمبود نیتروژن مواجه نیست. در حالیکه مقادیر بیشتر از یک معرف ازدیاد و مقادیر کمتر از یک معرف کمبود نیتروژن در دسترس گیاه هستند. منظور از نیتروژن بحرانی، حداقل غلظت نیتروژن (%N_c) مورد نیاز در اندام‌هوایی گیاه است که منجر به تولید حداکثر اندام‌هوایی در زمان معینی از دوره رشد می‌شود (گرینود و همکاران، 1990). این غلظت با استفاده از معادله زیر تعیین می‌شود:

(2)

$$\%N_c = aW^{-b}$$

در این معادله، W مقدار عملکرد ماده خشک تولید شده در هر مرحله‌ای از رشد (تن در هکتار)، $\%N_c$ غلظت نیتروژن بحرانی در آن مرحله رشد بر حسب درصد (گرم نیتروژن در 100 گرم ماده خشک)، a و b

² Remote sensing¹ Nitrogen nutrition index

طرف دیگر معادله نیتروژن بحرانی و NNI باید در شرایط بدون تنش آبی برای گیاه تعیین شود.

ذرت به عنوان یکی از کشت‌های اصلی تابستانه در ایران به شمار می‌رود که مصرف آب و نیتروژن بالایی دارد و از طرفی اکثر کشاورزان بدلیل فقدان ابزاری مناسب برای تشخیص وضعیت نیتروژن در گیاه، مقدار کود بیش از حد را بدون آگاهی از زمان مناسب استفاده می‌کنند. تخمین NNI در طول فصل رشد از آن جهت که می‌تواند منجر به بهبود مصرف نیتروژن و کاهش مخاطرات زیست محیطی گردد اهمیت فراوانی دارد. در ایران تحقیقات اندکی در زمینه ارزیابی مدیریت نیتروژن در مزارع گندم و کلزا با استفاده از NNI صورت گرفته که در این مطالعات از معادلات نیتروژن بحرانی تعیین شده در سایر نقاط دنیا استفاده شده است (زینلی و همکاران، 1391؛ بهدادیان و همکاران، 1392). با توجه به نکات مورد اشاره، دو مدل HYDRUS و AquaCrop، قابلیت برآورد به ترتیب Nu و W در طول دوره رشد را دارند که بدین ترتیب می‌توانند منجر به ایجاد روشی کاربردی و غیر تخریبی به منظور تخمین NNI شوند. بنابراین، اهداف اصلی مطالعه حاضر عبارتند از: 1- تعیین NNI با استفاده از معادله نیتروژن بحرانی ذرت تابستانه در منطقه مورد مطالعه و داده‌های اندازه‌گیری شده در طول دوره رشد، 2- تخمین NNI در طول فصل رشد با استفاده از خروجی‌های دو مدل HYDRUS-2D و AquaCrop و اسنجی شده برای کشت ذرت، 3- مقایسه NNI بدست آمده با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و تخمینی در تیمارهای مختلف طی فصل رشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش مزرعه‌ای

آزمایش‌های مزرعه‌ای در این تحقیق طی دو سال زراعی 1394 و 1395 در مزرعه تحقیقاتی اراضی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران واقع در شهرستان پاکدشت انجام شد. منطقه مورد مطالعه با ارتفاع 1020 متری از سطح دریا، از نظر جغرافیایی در طول 66° 51° شرقی و عرض 46° 35° شمالی و در جنوب شرقی استان تهران واقع شده است. میانگین سالانه دمای هوای منطقه طی دهه گذشته در حدود 19 درجه سانتی‌گراد بوده است که ماه‌های تیر و دی به ترتیب با 34 و 6/8 درجه سانتی‌گراد بیشترین و کمترین میانگین دما را داشته‌اند. متوسط بارندگی در این منطقه 165 میلی‌متر در سال می‌باشد و براساس طبقه بندی دومارتن دارای اقلیمی خشک است.

مستقیم از تصاویر ماهواره‌ای محاسبه شد و از آن برای تعیین Nu محتوی پوشش گیاهی در واحد سطح خاک استفاده گردید. در نهایت NNI طبق معادله (1) در طول فصل محاسبه شد. در هر حال، تصاویر با کیفیت از روزهای آفتابی و بدون ابر برای کاهش خطای ناشی از کاربرد روش RS بسیار ضروری می‌باشد.

علاوه بر این نتایج تحقیقات بروی مدل‌های گیاهی نشان می‌دهد که چنانچه این مدل‌ها با اندازه‌گیری پارامترهای گیاهی (برای مثال شاخص سطح برگ، میزان کلروفیل، ماده خشک) در طول دوره رشد همراه باشند می‌توانند ابزار مناسبی برای تخمین شرایط نیتروژنی گیاه و میزان کاربرد کود باشند. برای مثال ناد و همکاران (2008) گزارش دادند که دقت تخمین NNI با استفاده از مدل AZODYN می‌تواند با استفاده از ماده خشک، شاخص سطح برگ و میزان کلروفیل اندازه‌گیری شده در طول فصل رشد بهبود یابد. اما تاکنون مدلی که بطور توأمان شاخص تغذیه نیتروژن و تغییرات نیتروژن در خاک را بدون نیاز به هیچ‌گونه نمونه‌برداری طی فصل رشد گیاه پیش‌بینی کند، ارائه نشده است.

برای برآورد NNI لازم است جذب نیتروژن توسط گیاه، عملکرد ماده خشک و معادله مقدار بحرانی جذب (معادله 3) مشخص شوند. بسته نرم‌افزاری هایدروس (HYDRUS-2D) (سیمونک و همکاران، 2006) به عنوان ابزاری توانا برای شبیه‌سازی جریان توأمان آب و املاح در خاک و جذب شکل‌های مختلف نیتروژن توسط ریشه گیاه معرفی شده است (کرویسیر و همکاران، 2008، راموس و همکاران، 2012، ابراهیمیان و همکاران، 2013). رنجبر و همکاران (1396a) نیز دقت شبیه‌سازی انتقال توأمان آب، نیترات و آمونیوم در زیر جویچه و پشته‌های آبیاری توسط HYDRUS-2D را قابل قبول ارزیابی کردند. ولی این نرم‌افزار عملکرد ماده خشک را شبیه‌سازی نمی‌کند.

مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد محصول غالباً از پارامترهای متعدد غیر ثابتی بعنوان ورودی استفاده می‌کنند که واسنجی آن‌ها پیچیده و به داده‌های زیادی نیاز دارند. اما مدل AquaCrop که توسط فائو ارائه شده است از معادلات ساده‌تری برای شبیه‌سازی عملکرد محصول استفاده می‌کند و اکثر پارامترهای گیاهی آن برای بسیاری از گیاهان بصورت ثابت تعیین شده و تعداد کمی از پارامترهای آن نیاز به واسنجی دارند و نتایج آن برای شرایطی که گیاه تحت تنش شدید آبی نباشد از دقت خوبی برخوردار است (هنگ و همکاران، 2009). از

سال، در قسمت مرکزی سه تیمار N0، N3 و N5 یکی در روی پشته و دیگری در کف جویچه مجاورش نصب گردیدند. بعد از اتمام میزان آب سهل الوصول (و رسیدن رطوبت خاک به حدود 20 درصد حجمی) اقدام به آبیاری مجدد می‌گردید تا گیاه با هیچ‌گونه تنش رطوبتی مواجه نشود. مقدار آب آبیاری با استفاده از رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی خاک (جدول 2) و با در نظر گرفتن ضریب مدیریتی مجاز آبیاری² (MAD) برای گیاه ذرت (0/5) و عمق ریشه در مراحل مختلف رشد محاسبه می‌گردید.

عملیات کوددهی به صورت سرک و طی سه نوبت در زمان‌های 22، 52 و 65 روز بعد از کشت در سال زراعی 1394 و 28، 40 و 66 روز بعد از کشت در سال زراعی 1395 انجام گرفت. روزهای مشخص شده برای کوددهی به ترتیب با مراحل 6-7 برگی، 9-11 برگی و گلدهی همزمان بودند. در هر نوبت کوددهی به ترتیب 40، 30 و 30 درصد از کل کود مشخص شده برای هر تیمار در هر سال زراعی با دقت اندازه‌گیری و همراه آبیاری با پیمانه‌های معین در کف جویچه‌ها به طور یکنواخت پخش شد تا در آب داخل جویچه‌ها حل شده و همراه با آب در خاک نفوذ و پخش شود. در نهایت کشت سال اول بعد از 119 روز از تاریخ کاشت (5 مهر سال 1394) و کشت سال دوم بعد از 115 روز از تاریخ کاشت (15 شهریور سال 1395) برداشت شدند.

نمونه‌برداری از خاک و گیاه

همانند مطالعات مشابه (ابراهیمیان و همکاران، 2013)، پایش رطوبت و برداشت نمونه از خاک برای اندازه‌گیری نیترات و آمونیوم به منظور واسنجی مدل HYDRUS-2D در سه تیمار N0، N3 و N5 انجام شد. برداشت نمونه از کلیه تیمارها حجم آزمایش‌ها را بسیار افزایش می‌داد. از طرفی هدف واسنجی مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی جذب نیتروژن در شرایط کاربرد حداقل، متوسط و حداکثر مقادیر کود در خاک بود. چون آبیاری ذرت به روش جویچه‌ای بود، لذا بررسی توزیع رطوبت و نیترات و آمونیوم زیر جویچه‌ها و پشته‌های آبیاری باید در دو بعد (عمقی و عرضی) صورت می‌گرفت (میلهل و همکاران، 2001). بنابراین نمونه‌های خاک از قسمت‌های مرکزی کرت‌های مذکور و در سه عمق 0-20، 20-40 و 40-60 سانتیمتری از روی پشته و کف جویچه مجاور آن به صورت جداگانه برداشت شدند. نمونه‌های خاک در سال اول آزمایش به ترتیب یک روز

در این مطالعه گیاه ذرت (رقم سینگل کراس 704) در تاریخ 10 خرداد 1394 و 24 اردیبهشت 1395 به روش جوی و پشته کشت شد. تیمارهای نیتروژن در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی و با سه تکرار، شامل هفت سطح صفر (N0)، 50 (N1)، 100 (N2)، 150 (N3)، 200 (N4)، 250 (N5) و 300 (N6) کیلوگرم نیتروژن در هکتار توسط کود اوره (حاوی 46% نیتروژن) پیاده شدند. این سطوح براساس آزمون خاک و آب قبل از کاشت، با استفاده از نمونه‌برداری تصادفی در عمق‌های 0-20، 20-40 و 40-60 سانتیمتری از سطح مزرعه و مطابق با توصیه‌های مطالعات پیشین در منطقه (قیصری و همکاران، 2009) و در زمینه تعیین منحنی نیتروژن بحرانی به گونه‌ای تعیین شدند که از مقادیر بسیار کم تا بسیار زیاد نیتروژن برای مصرف گیاه در تیمارها وجود داشته باشند (پلنت و لیمایر، 2000). عمق خاک زراعی در منطقه 60 سانتی‌متر بود و به همین دلیل برای بررسی تغییرات رطوبت و غلظت نیترات و آمونیوم نمونه‌های خاک تا این عمق برداشت شدند. متوسط ویژگی‌های بدست آمده از آنالیز شیمیایی آب و خاک مزرعه تحقیقاتی طی سال‌های آزمایش به ترتیب در جداول 1 و 2 ارائه شده است. همچنین بر اساس آزمون خاک مشخص شد که خاک مورد استفاده از نظر فسفر و پتاسیم هیچ‌گونه کمبودی ندارد (جدول 2). شایان ذکر است که مقادیر غلظت نیترات و آمونیوم موجود در خاک و آب با استفاده از روش تقطیر بخار آب اندازه‌گیری شدند (برمنز و کینی، 1965). نیتروژن کل نیز با استفاده از روش کج‌لدال اندازه‌گیری شد (هورویتر، 1970). بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری (کلات، 1986) و رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و پژمردگی نیز توسط دستگاه صفحات فشاری به ترتیب در مکش‌های 0/3 و 15 بار تعیین شدند.

برای هر کرت آزمایشی مساحتی حدود 25 متر مربع در نظر گرفته شد. فاصله ردیف‌ها در هر کرت 75 سانتیمتر و فاصله بین هر گیاه در ردیف‌های کشت 18 سانتیمتر (با تراکم کشت 74000 گیاه در هکتار) بود. برای جلوگیری از تأثیر کرت‌ها روی نتایج یکدیگر بین آن‌ها از هر طرف حاشیه یک متری لحاظ گردید. به منظور تعیین زمان مناسب آبیاری تغییرات رطوبت خاک در عمق‌های 0-20، 20-40 و 40-60 سانتیمتری طی فصل کشت با استفاده از روش انعکاس سنجی زمانی¹ (با دستگاه TDR) به طور مستمر قبل و بعد از آبیاری اندازه‌گیری می‌شد. بدین منظور حسگرهای مخصوص دستگاه، طی هر دو

² Management allowed depletion

¹ Time-domain reflectometer

های خاک از عمق‌های مذکور برداشت شدند. این نمونه‌ها بعد از انتقال به آزمایشگاه جهت تعیین غلظت نیترات و آمونیوم با استفاده از روش تقطیر بخار آب (برمنر و کینی، 1965) مورد تجزیه قرار گرفتند. همزمان با برداشت نمونه‌های خاک نیز مقادیر رطوبت در اعماق متناظر زیر جویچه و پشته توسط TDR اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است که داده‌های هواشناسی مورد نیاز در این تحقیق از ایستگاه هواشناسی واقع در پردیس ابوریحان جمع‌آوری گردید.

قبل و همچنین دو و چهار روز بعد از هر نوبت کوددهی جمع‌آوری شدند. به علاوه اینکه در همین سال نمونه‌های خاک به ترتیب در یک روز قبل از کشت و نیز 89 و 119 روز پس از کشت (برداشت نهایی محصول) و از عمق-های مذکور برداشت شدند. نمونه‌های خاک در سال دوم به ترتیب یک روز قبل و همچنین دو و چهار روز بعد از کوددهی نوبت دوم برداشت شدند. علاوه بر این، در همین سال به ترتیب در یک روز قبل از کشت و نیز 90 و 115 روز پس از کشت (برداشت نهایی محصول) نمونه-

جدول 1- نتایج آنالیز شیمیایی آب آبیاری در مزرعه

پارامتر	سال 1394	سال 1395
نیترات (mg.cm ⁻³)	0/020	0/024
آمونیم (mg.cm ⁻³)	0/017	0/015
نیترژن (%)	0/01	0/01
غلظت فسفر (mg.cm ⁻³)	<0/0001	<0/0001
غلظت پتاسیم (mg.cm ⁻³)	0/005	0/005
اسیدیته (pH)	7/9	7/7
هدایت الکتریکی (dS.m ⁻¹)	0/71	0/60

طبق معادله (1) NNI در هر مرحله رشد در طول دو سال محاسبه گردید. کلیه تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسم نمودارها به ترتیب با استفاده از نرم‌افزار (Statistical SAS Analysis Software و Excel انجام گرفت).

شرح مدل AquaCrop

آکواکراپ یک مدل شبیه‌ساز رشد گیاه می‌باشد که در عین سادگی، دقت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد محصول، سناریوهای مختلف مدیریتی و زیست محیطی دارد و هسته اصلی آن معادله‌های زیر می‌باشند (ون گایلن و همکاران، 2014):

(4)

$$W = K_{S_{bi}} \times WP^* \times \sum_{i=1}^n \frac{T_{ri}}{ET_{oi}}$$

(5)

$$T_{ri} = K_{si} \times K_{C_{Tri}} \times ET_{oi}$$

نمونه‌های گیاهی در سال اول آزمایش به ترتیب در روزهای 28، 36، 45، 63، 75، 87 و 119 بعد از کاشت و در سال دوم به ترتیب در روزهای 32، 39، 49، 59، 80 و 115 بعد از کاشت جمع‌آوری شدند. در هر مرحله نمونه‌برداری، شش گیاه از ردیف‌های میانی هر کرت آزمایشی انتخاب و از سطح خاک بریده و بعد از انتقال سریع به آزمایشگاه در آون با دمای 70 درجه سانتی‌گراد خشک شدند. فرآیند خشک شدن در آون تا جایی که وزن نمونه‌ها به ثبات می‌رسید ادامه داشت. سپس نمونه‌ها وزن شده و آسیاب می‌شدند. میزان نیترژن کل با استفاده از روش استاندارد کج‌لدال اندازه‌گیری شد (هورویتز، 1970).

آنالیز داده‌های مزرعه‌ای

داده‌های شامل W و N در همه تیمارها (N0 تا N6) برای هر سری نمونه‌برداری طی دو سال آزمایش ثبت گردید و با استفاده از آن‌ها مقدار Nu در هر تیمار و در هر سری نمونه‌برداری محاسبه شد. سپس با استفاده از معادله نیترژن بحرانی ارائه شده برای ذرت در منطقه پاکدشت که عبارتست از $Nc = 2.9 W^{-0.27}$ (رنجبر و همکاران، 1396b)، پارامتر Nuc در هر مرحله از نمونه-برداری در دو سال تعیین گردید. با استفاده از Nu و Nuc

جدول 2- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه (متوسط دو سال)

پارامتر	عمق 0 تا 20 (cm)	عمق 20 تا 40 (cm)	عمق 40 تا 60 (cm)
جرم مخصوص ظاهری (g.cm^{-3})	1/60	1/61	1/61
رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (درصد حجمی)	26/2	26/6	27/9
رطوبت پژمردگی (درصد حجمی)	13/0	13/3	13/8
نیترات (mg.cm^{-3})	0/017	0/009	0/005
آمونیم (mg.cm^{-3})	0/011	0/008	0/006
نیتروژن (%)	0/1	0/08	0/05
فسفر قابل دسترس (mg.cm^{-3})	0/084	0/076	0/052
پتاسیم قابل دسترس (mg.cm^{-3})	1/437	0/867	0/830
اسیدیته (pH)	8/10	8/00	7/93
هدایت الکتریکی (dS.m^{-1})	2/90	3/32	3/95
درصد ماده آلی (%)	1/41	0/85	0/56
گروه بافت خاک	لوم	لوم	لوم
	13/6	13/6	17/6
رس			
درصد ذرات خاک	34/6	36/6	34/6
	51/8	49/8	47/8
شن			

داده‌های ورودی مورد نیاز مدل AquaCrop برای تخمین ماده خشک گیاه، شامل دو دسته اصلی پارامترهای ثابت (conservative) و غیر ثابت (non-conservative) هستند که در جداول (3) و (4) ارائه شده‌اند. پارامترهای conservative برای هر نوع گیاه و تحت هر شرایطی ثابت در نظر گرفته می‌شوند و مقادیر آن برای گیاهان زراعی نظیر ذرت در دستورالعمل مدل ارائه گردیده‌اند. اما پارامترهای non-conservative بسته به شرایط اقلیمی یا نوع بذر و مدیریت کشت باید در مزرعه اندازه‌گیری شوند و وارد مدل گردند. در غیر این صورت باید با استفاده از روش آزمون و خطا واسنجی شوند که این عملیات تا کسب بهترین نتایج ادامه خواهد داشت.

واسنجی و صحت سنجی مدل AquaCrop

در این مطالعه، هدف از کاربرد مدل AquaCrop تخمین مقدار W در طول دوره رشد ذرت بود تا با استفاده از معادله جذب نیتروژن بحرانی (معادله 3)، مقدار N_{uc} قابل محاسبه می‌گردید. بنابراین مدل باید برای تخمین دقیق W در شرایطی که هیچ‌گونه تنش کودی و آبی به گیاه وارد نمی‌شد (تیمار بهینه کودی)، واسنجی و صحت سنجی می‌گردید. واسنجی مدل ابتدا بر اساس داده‌های تیمار بهینه مربوط به سال 1394 انجام گرفت. بدین منظور، ابتدا پارامترهای conservative بر اساس دستورالعمل کاربرد مدل AquaCrop تعیین شدند (جدول 3). سپس پارامترهای non-conservative مدل (جدول 4) بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای تعیین گردیدند. در ادامه این پارامترها با استفاده از روش سعی و خطا تا جایی تغییر داده شدند که نتایج شبیه‌سازی مقدار عملکرد دانه و

که در آن W ماده خشک (g m^{-2})، WP^* مقدار بهره‌وری نرمال شده آب¹ (ماده خشک تولید شده به مقدار آب تعرق یافته g.m^{-2})، T_{ri} میزان تعرق (روزانه) گیاه در روز i ام (mm.day^{-1})، ET_{oi} تبخیر و تعرق مرجع در روز i ام (mm.day^{-1}) که با استفاده از داده‌های اقلیمی روزانه و معادله فائو پنمن-مانتیت (آلن و همکاران، 1998) محاسبه گردید، n تعداد روزهای مشخصی از دوره رشد، KC_{Tri} ضریب تعرق گیاهی (بدون بعد)، KS_{bi} ضریب تنش سرما برای ماده خشک تولید شده (بدون بعد) و KSi ضریب تنش رطوبتی خاک (بدون بعد) می‌باشد. مقدار WP^* بر اساس مقادیر پیشنهاد شده در راهنمای مدل (ریس و همکاران، 2012) برای ذرت تحت شرایط بدون تنش کودی و آبی انتخاب شد (جدول 3).

چون در این مطالعه آبیاری کامل انجام گرفت و در فصل کشت کاهش دما در منطقه رخ نداد بنابراین ضرایب KS_{bi} و KSi در معادلات (4) و (5) برابر یک در نظر گرفته شدند. ضریب گیاهی KC در معادله (5) نیز با استفاده از دستورالعمل ارائه شده در نشریه فائو 56 (آلن و همکاران، 1998) در طول دوره رشد برآورد گردید. مقدار پوشش گیاهی طی هر دو دوره کشت سال 1394 و 1395 به ترتیب در 6 مرحله با استفاده از عکس‌های دیجیتال و تحلیل آن‌ها با نرم‌افزار Canopeo طبق روش پاتریگنایی و اشتر (2015) برآورد گردید. مدل AquaCrop دارای ساختاری است که زنجیره‌ای از داده‌های خاک، گیاه و اقلیم را برای مدل‌سازی رشد گیاه به هم پیوند می‌دهد.

¹ Normalized water productivity

دقیق‌ترین جواب تغییر داده شدند (موسوی زاده و همکاران، 2016). در نهایت با استفاده از داده‌های سال دوم کشت (1395) مدل واسنجی شده مورد ارزیابی و صحت سنجی قرار گرفت.

رطوبت خاک نسبت به نتایج مشاهداتی کمترین خطا را داشته باشند. سپس برای تعیین دقیق‌تر پارامترها (fine-tuned)، مقادیر W و پوشش گیاهی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نیز مقایسه شدند و پارامترها تا استحصال

جدول 3- پارامترهای Conservative (ثابت) ورودی به مدل AquaCrop برای گیاه ذرت

مقدار	پارامتر
8	دمای پایه رشد یا Tbase (°C)
30	دمای بالا یا Tupper (°C)
6/5	پوشش گیاهی همزمان با ظهور جوانه 90% از بذرها یا CCo (cm ²)
19/9	ضریب رشد پوشش یا CGC (% day ⁻¹)
1/05	ضریب گیاهی ذرت در دوره رشد کامل قبل از شروع پیری یا K _{CTr,x}
0/3	نرخ کاهش ضریب گیاهی ناشی از پیری و کمبود نیتروژن (% day ⁻¹)
12/7	ضریب کاهش پوشش یا CDC (% day ⁻¹)
0/14	آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه بالا یا pexp,lower
0/72	آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه پایین یا pexp,upper
2/9	عامل شکل برای ضریب تنش آبی رشد گیاه
0/69	آستانه تخلیه آب خاک برای کنترل روزنه گیاه - سطح آستانه بالا یا psto
6	عامل شکل ضریب تنش آب برای کنترل روزنه
0/69	آستانه تخلیه آب خاک برای پیری تاج پوشش - سطح آستانه بالا یا psen
2/7	عامل شکل ضریب تنش آب برای پیری تاج پوشش
33/7	بهره‌وری نرمال شده آب برای تبخیر و تعرق و دی اکسید کربن یا WP* (g.m ⁻²)

جدول 4- پارامترهای گیاهی Non-Conservative برای گیاه ذرت بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای در تیمار N4 سال 1394

مقدار	شرح
10	زمان جوانه زنی (day)
93	حداکثر پوشش گیاهی یا CCx (%)
63	زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی (day)
98	زمان شروع پیری (day)
119	زمان رسیدگی فیزیولوژیک (day)
65	زمان گلدهی (day)
60	زمان رسیدن به حداکثر عمق ریشه (day)
10	طول دوره گلدهی (day)
65	حداکثر عمق موثر ریشه یا Zx (cm)
30	حداقل عمق موثر ریشه یا Zn (cm)
40	شاخص برداشت مرجع یا Hlo (%)
74000	تراکم کشت (Plant.ha ⁻¹)

شرح مدل HYDRUS-2D

برای تخمین Nu در معادله (1) باید جریان آب و شکل‌های مختلف نیتروژن (شامل اوره، نترات و آمونیوم) در خاک طی دوره کشت شبیه‌سازی گردد. بدین منظور از مدل شناخته شده HYDRUS-2D استفاده گردید. این مدل برای بررسی جریان آب در محیط متخلخل از حل عددی معادله ریچاردز استفاده می‌کند که

یکی از اجزای آن میزان جذب آب (Sink term) توسط ریشه در واحد زمان از حجم واحد خاک می‌باشد. در HYDRUS-2D جذب آب توسط گیاه براساس مدل فدس و همکاران (1978) تعریف شده است که پارامترهای مدل فدس نیز با استفاده از داده‌های مطالعاتی وسلینگ و همکاران (1991) برای ذرت تعیین گردید. منحنی رطوبتی $\theta(h)$ و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع

در این معادلات c و s غلظت املاح به ترتیب در فاز مایع [ML^{-3}] و جامد [MM^{-1}], q_i مولفه \dot{m} شدت جریان [LT^{-1}], μ_w مشابه نرخ ثابت مرتبه اول برای املاح در فاز مایع که ارتباط بین زنجیره‌های واکنش در معادلات 6 تا 8 را به وجود می‌آورد [T^{-1}], γ_s ضریب تبادل مرتبه صفر برای املاح در فاز جامد [T^{-1}], ρ چگالی ظاهری خاک [ML^{-3}], S جزء خروجی در معادله ریچاردز [L^3L^{-3}] $[T^{-1}]$, c_{root} غلظت در جزء خروجی [ML^{-3}], D_{ij} تانسور ضریب انتشار در فاز مایع [L^2T^{-1}] و اندیس‌های 1، 2 و 3 به ترتیب نشان‌دهنده اوره، آمونیوم و نترات می‌باشند. جزء آخر دو معادله (7) و (8) نشان‌دهنده جذب غیرفعال نترات و آمونیوم از طریق جذب آب توسط ریشه (S) هستند. معادله تانسور ضریب انتشار (D_{ij}) شامل دو پارامتر D_T ضریب انتشار پذیری طولی [L] و D_T ضریب انتشار پذیری عرضی [L] است که باید واسنجی شوند. ایزوترم جذب سطحی برای آمونیوم مرتبط با s_2 و c_2 به صورت معادله خطی زیر است:

(9)

$$s_2 = K_{d,2} c_2$$

که در آن $K_{d,2}$ ضریب توزیع برای آمونیوم می‌باشد [L^3M^{-1}]. معادله (6) نشان‌دهنده اولین زنجیره واکنش یعنی اوره است در حالی که معادلات (7) و (8) به ترتیب نشان‌دهنده آمونیوم و نترات در زنجیره تجزیه مرتبه اول می‌باشند. در این معادلات نرخ ثابت مرتبه اول $\mu_{w,1}$ به عنوان خروجی در معادله (6) (هیدرولیز اوره) و عامل تولید آمونیوم در معادله (7) (آمونیوم تولید شده از هیدرولیز اوره) و همچنین نرخ ثابت مرتبه اول $\mu_{w,2}$ به عنوان خروجی در معادله (7) (مصرف آمونیوم در نتیجه فرآیند نترات زایی) و عامل تولید نترات در معادله (8) (تولید نترات در نتیجه فرآیند نترات زایی) می‌باشد. علاوه بر این، ضریب تبادل مرتبه صفر $\gamma_{s,2}$ به عنوان عامل تولید نیتروژن معدنی در معادله (7) (برای معدنی شدن نیتروژن آلی) در نظر گرفته شد. در حالت کلی پارامترهای هیدرولیکی خاک (پارامترهای منحنی رطوبتی و هدایت آبی معادله وان گنوختن - معلم) و پارامترهای انتقال و تغییر شکل املاح باید واسنجی گردند.

در این مطالعه، برآورد مقدار جذب نیتروژن کل گیاه در طول دوره کشت مهم‌ترین جزء شبیه‌سازی توسط مدل HYDRUS بود، که از مجموع جذب نترات و آمونیوم طی فصل رشد برآورد شد. مدل HYDRUS قادر است جذب فعال و یا غیرفعال املاح را شبیه‌سازی کند. از

خاک $K(h)$ پارامترهای دیگر معادله ریچاردز هستند که به ترتیب توسط معادله ون گنوختن (ون گنوختن، 1980) و مدل کاپیلاری معلم (معلم، 1976) بدست آمدند. به طور کلی پارامترهای هیدرولیکی خاک که در بخش شبیه‌سازی جریان آب در خاک واسنجی شدند شامل، θ_s رطوبت حجمی اشباع خاک [$L^3.L^{-3}$], θ_r رطوبت حجمی باقیمانده در پروفیل خاک [$L^3.L^{-3}$], K_s هدایت هیدرولیکی اشباع [$L.T^{-1}$] و پارامترهای تجربی n (بدون بعد) و α [L^{-1}] بودند.

علاوه بر این، مدل HYDRUS از معادله جابجایی - انتشار¹ (CDE) با واکنش مرتبه صفر و یک برای شبیه‌سازی توزیع و انتقال اوره، نترات و آمونیوم در خاک استفاده می‌کند و این معادله به صورت عددی و از روش اجزاء محدود گالرکین² با شرایط مرزی و اولیه مناسب حل می‌گردد. یکی از ویژگی‌های مدل HYDRUS این است که با استفاده از آن امکان در نظر گرفتن همزمان توزیع و انتقال چندین املاح که در ارتباط با واکنش تجزیه مرتبه اول هستند وجود دارد (هانسن و همکاران، 2006). در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی جذب شکل-های مختلف نیتروژن توسط گیاه، فرآیندهای هیدرولیز اوره (تبدیل اوره به آمونیوم)، معدنی شدن نیتروژن آلی³، نترات‌زایی (تبدیل آمونیوم به نترات)، جذب سطحی آمونیوم بر ذرات خاک و جذب نترات و آمونیوم توسط ریشه برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شدند. مطابق با مطالعات قبلی، فرآیند هیدرولیز اوره و نترات‌زایی به عنوان واکنش مرتبه اول و معدنی شدن به عنوان واکنش مرتبه صفر لحاظ گردید (لی و همکاران، 2015). معادله دیفرانسیل جزئی CDE به منظور شبیه‌سازی دو بعدی انتقال نیتروژن شامل واکنش زنجیره‌ای تجزیه مرتبه یک تحت جریان غیر ماندگار در محیط متخلخل غیر اشباع بصورت زیر است (سیمونک و همکاران، 2008):

(6)

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

(7)

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

(8)

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

1. Convection-diffusion equation

2. Galerkin

3. Mineralization of organic nitrogen

پروفیل خاک، حل معکوس انجام گرفت. از آنجایی که در هر سه لایه از خاک مورد بررسی (جدول 2) و در هر سه تیمار N0، N3 و N5، خصوصیات فیزیکی نظیر بافت و وزن مخصوص ظاهری خیلی نزدیک به هم بودند، لذا کل پروفیل 0-60 سانتیمتری به عنوان لایه‌ای واحد به مدل معرفی گردید، با این فرض که پارامترهای هیدرولیکی خاک در کل این لایه‌ها یکسان بوده‌اند. در نهایت پارامتر-های واسنجی شده، توسط داده‌های اندازه‌گیری شده در سال دوم آزمایش ارزیابی شدند.

در مدل HYDRUS امکان تخمین پارامترهای انتقال املاح دو یا چند عنصر به طور همزمان توسط حل معکوس وجود ندارد. بنابراین برای صحت سنجی پارامتر-های مربوط به انتقال اوره، نیترات و آمونیوم به طور همزمان، ابتدا مقادیر اولیه‌ای به عنوان ورودی مدل انتخاب گردید. سپس عملیات شبیه‌سازی با استفاده از این مقادیر انجام گرفت. در نهایت مقادیر شبیه‌سازی شده جذب نیتروژن کل و غلظت نیترات و آمونیوم در نقاط و زمان‌های مختلف زیر جویچه و پشته‌های آبیاری با مقادیر اندازه‌گیری شده از هر تیمار مقایسه شدند. در ادامه پارامترهای انتقال املاح تا مرحله‌ای که بیشترین دقت برای شبیه‌سازی فراهم گردید تغییر داده شدند. نهایتاً، پارامترهای واسنجی شده توسط داده‌های مزرعه‌ای سال دوم آزمایش صحت‌سنجی شدند. این روش واسنجی در سایر مطالعات مشابه نیز انجام شده بود (فوگات و همکاران، 2014، لی و همکاران، 2015).

در ابتدای شبیه‌سازی برای هر کدام از سه تیمار N0، N3 و N5، مقدار غلظت کود اوره مورد استفاده به صورت محلول در آب آبیاری به علاوه غلظت نیترات و آمونیوم موجود در آب آبیاری در هر نوبت کوددهی به عنوان یک پارامتر ورودی به مدل داده شد. بدلیل توزیع غیر یکنواخت اکسیژن، رطوبت، نیترات و آمونیوم در اعماق مختلف زیر جویچه و پشته‌های آبیاری، این نواحی مطابق شکل (1) به سه بخش A، B و C تقسیم شدند. به عبارت دیگر غلظت اکسیژن، رطوبت و نیتروژن محتوی خاک در اعماق زیر جویچه و پشته‌ها بعد از عملیات آبیاری و کوددهی متفاوت است و این اختلاف با افزایش عمق کمتر می‌گردد. همین عامل باعث می‌شود بازه تغییرات ضرایب واکنشی و انتقال املاح در عمق‌ها و عرض‌های مختلف جویچه و پشته‌ها با یکدیگر فرق داشته باشد (ژانگ و همکاران، 2015). نظیر این تقسیم‌بندی در مطالعه (کرویسیر و همکاران، 2008) مشاهده شد. برای واسنجی پارامترهای انتقال املاح نیز انجام شده است. مقادیر اولیه پارامترهای ضریب پخشیدگی مولکولی

آنجایی که شبیه‌سازی جذب فعال پیچیده‌تر است و به پارامترهای بیشتری نیاز دارد، بنابراین در این مطالعه همانند سایر مطالعات مشابه جذب املاح (نیترات و آمونیوم) فقط طی فرآیند غیر فعال و از طریق جذب توده‌ای آب توسط ریشه شبیه‌سازی گردید (هانس و همکاران، 2006). پارامتر Croot در معادله 7 و 8 نیز نشان‌دهنده جذب غیرفعال توسط ریشه است. به عبارت دیگر پارامترهای C_{root,NO_3^-} و C_{root,NH_4^+} حداکثر غلظت نیترات و آمونیوم هستند که ریشه گیاه قادر به جذب آن‌ها می‌باشد. چنانچه ریشه بدون هیچ محدودیتی قادر به جذب غلظت‌های بالای این یون‌ها از خاک باشد، باید مقادیر این پارامترها زیاده‌تر از حداکثر غلظت واقعی آن‌ها در خاک لحاظ شود. از طرف دیگر مقدار صفر این پارامترها نشان‌دهنده این است که امکان جذب غیرفعال این املاح توسط گیاه وجود نخواهد داشت (سیمونک و همکاران، 2006).

واسنجی و صحت‌سنجی مدل HYDRUS-2D

به طور کلی فرآیند واسنجی مدل HYDRUS-2D به دو بخش واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک (پارامترهای ون‌گنوختن - معلم) و واسنجی پارامترهای انتقال و تغییر شکل املاح (ضریب انتشار پذیری طولی (D_L) ، ضریب انتشار پذیر عرضی (D_T) ، ضریب توزیع آمونیوم (K_d) ، نرخ هیدرولیز اوره (K_h) ، نرخ نیترات‌زایی (K_n) ، نرخ معدنی شدن نیتروژن آلی (K_m) به علاوه حداکثر غلظت قابل جذب نیترات و آمونیوم توسط ریشه گیاه) تفکیک شد. از مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت، غلظت نیترات و آمونیوم در عمق‌های 0-20، 20-40 و 40-60 سانتیمتری خاک زیر جویچه و پشته‌های سه تیمار N0، N3 و N5 در سال اول کشت به منظور واسنجی و از داده‌های اندازه‌گیری شده در سال دوم به منظور صحت سنجی پارامترهای مذکور استفاده شد. برای واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل θ_r ، θ_s ، K_s و n ، α ، در کنار داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک، از روش حل معکوس که جزء قابلیت‌های مدل HYDRUS است، استفاده گردید. روش بهینه‌سازی معکوس به این دلیل دقت نسبتاً بالایی دارد که در آن، ارتباط بین همه پارامتر-های مذکور با مقدار رطوبت در نظر گرفته می‌شود و در نهایت این پارامترها به طور همزمان تصحیح می‌شوند (سیمونک و همکاران، 2002). در این روش ابتدا بر اساس خصوصیات فیزیکی خاک و مطالعات مشابه، مقادیری به عنوان حدس اولیه برای پارامترهای هیدرولیکی مذکور بدست آمد. سپس با استفاده از این حدس‌های اولیه و مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در

شرایط اولیه و مرزی برای مدل HYDRUS-2D

غلظت اوره، نترات و آمونیوم و همچنین مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده در سه عمق مورد مطالعه خاک در زمان قبل از کشت به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد. در قسمت بالایی پروفیل خاک مورد بررسی، برای سطح خیس شده جویچه در حین آبیاری شرط مرزی جریان متغیر در زمان¹ و برای باقی سطح جویچه و پشته شرط مرزی اتمسفری² در نظر گرفته شد. شرط کوچی (Cauchy) برای مرز بالایی و پایینی انتقال املاح، زهکشی آزاد³ برای حرکت آب و املاح در مرز پایینی، و شرط مرزی بدون شدت جریان⁴ در طرفین جویچه‌ها در نظر گرفته شد. همه این شروط مرزی در شکل (1) نشان داده شده است. در این شکل نیز نقاط نمونه‌برداری از زیر جویچه و پشته‌های آبیاری مشخص شده‌اند.

بررسی دقت برآورد شاخص تغذیه نیتروژن بحرانی (NNI)

طبق معادله (1)، پارامتر NNI_o که عبارت است از شاخص تغذیه نیتروژن بحرانی محاسبه شده بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده در طول دو دوره کشت، با استفاده از روابط زیر محاسبه شد.

(10)

$$NNI_o = \frac{N_{u,o}}{N_{uc,o}}$$

(11)

$$N_{uc,o} = 10 a W^{1-b}$$

در این روابط Nu_o مقدار نیتروژن جذب شده توسط گیاه ($Kg.ha^{-1}$) در زمان مشخصی از دوره رشد و در تیمار معینی می‌باشد که با استفاده از روش کج‌لدال اندازه‌گیری شده است. Nuc_o مقدار جذب نیتروژن بحرانی محاسبه شده توسط W اندازه‌گیری شده ($ton.ha^{-1}$)¹ در همان زمان مشخص از دوره رشد گیاه و برای همان تیمار معین می‌باشد ($Kg.ha^{-1}$) و a و b نیز ضرایب واسنجی شده معادله ترقیق نیتروژن بحرانی هستند. بعد از واسنجی و صحت‌سنجی دو مدل AquaCrop و HYDRUS-2D با استفاده از داده‌های برداشت شده در سال اول و دوم، NNI_p شاخص تغذیه نیتروژن بحرانی برآورد شده بر اساس روابط زیر محاسبه گردید.

در آب آزاد (D_w) برای اوره، آمونیوم و نترات به ترتیب برابر $1/3$ ، $1/52$ و $1/64$ سانتیمتر مربع در روز در نظر گرفته شد (لی و همکاران، 2015). ضریب انتشار پذیر طولی (D_L) برای هر کدام از قسمت‌های A، B یا C برابر حدوداً یک دهم عمق آن‌ها (سه سانتیمتر) و ضریب انتشار پذیر عرضی (D_T) برابر یک دهم مقدار D_L در نظر گرفته شد (فوکات و همکاران، 2012). همچنین ضریب توزیع آمونیوم (K_d) معمولاً بین 3 تا 4 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، 2006). همچنین مقدار اولیه K_n برابر با (day^{-1}) $0/38$ برای قسمت‌های فوقانی خاک (A و B) در نظر گرفته شد (هانسن و همکاران، 2006). مقدار اولیه K_n و K_m نیز در کل بخش‌های A، B و C مساوی یکدیگر و به ترتیب برابر $0/2$ و $0/0045$ (day^{-1}) در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که مقدار رطوبت و دمای خاک روی بعضی از این فرایندها تأثیر گذار است که به خاطر ساده‌تر کردن شرایط شبیه‌سازی، این اثرات نادیده گرفته شدند (هانسن و همکاران، 2006).

در مورد شبیه‌سازی جذب املاح، همانند سایر مطالعات در این زمینه (برای مثال فوکات و همکاران، 2012) فرض شد که نترات و آمونیوم فقط از طریق فرآیند جذب غیرفعال و به مقدار نامحدود توسط ریشه گیاه جذب می‌شوند. بدین منظور مقدار اولیه حداکثر غلظت قابل جذب این املاح توسط ریشه (C_{root,NO_3^-} ، C_{root,NH_4^+}) خیلی بیشتر از مقدار غلظت واقعی مشاهده شده آن‌ها در خاک در نظر گرفته شد ($0/2$ میلی‌گرم بر سانتیمتر مکعب) تا مانعی برای شبیه‌سازی جذب این املاح در مدل ایجاد نگردد. از آنجایی که این ضرایب حداکثر غلظت املاح داخل خاک که ریشه قادر به جذب آن است را نشان می‌دهد، لذا کاهش مقدار پارامترهای C_{root,NO_3^-} ، C_{root,NH_4^+} از یک حدی به بعد باعث افزایش غلظت نترات و آمونیوم داخل خاک می‌شد. بنابراین پارامترهای انتقال و جذب املاح توامان با یکدیگر واسنجی شدند تا دقیق‌ترین مقادیر برای جذب نیتروژن کل و غلظت نترات و آمونیوم داخل خاک حاصل شد. به همین دلیل در هر مرحله واسنجی، بعد از تغییر پارامترهای انتقال، ابتدا اختلاف بین غلظت نترات و آمونیوم در نقاط مشاهداتی با مقادیر شبیه‌سازی شده بررسی می‌شد. سپس مقدار جذب کل شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شد این مراحل تا زمان استحصال دقیق-ترین نتایج ادامه یافت.

¹ Time variable flux

² Atmospheric boundary condition

³ Free drainage

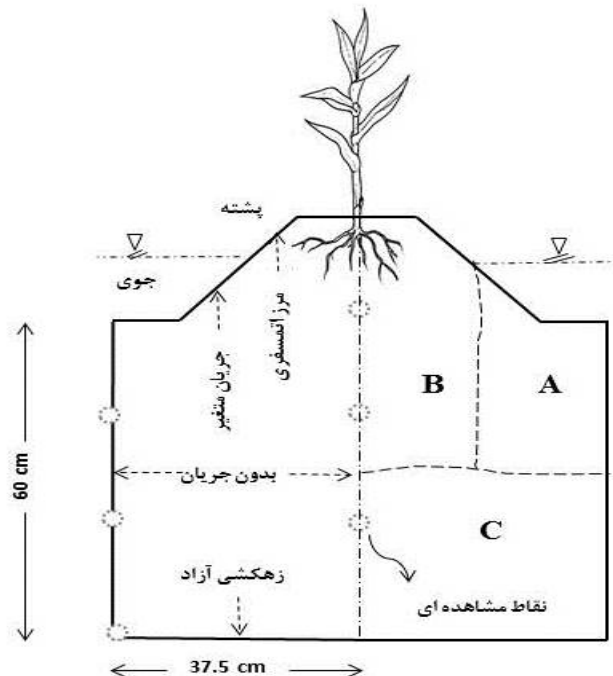
⁴ No flux

(12)

$$NNI_p = \frac{N_{u,p}}{N_{uc,p}}$$

(13)

$$N_{uc,p} = 10 a W_p^{1-b}$$



شکل 1- تقسیم‌بندی لایه‌های خاک، شرایط مرزی اعمال شده برای جریان در مدل HYDRUS-2D و محل نقاط مشاهده‌ای (نمونه برداری) از زیر جویچه و پشته‌ها.

سازی و مشاهداتی رطوبت خاک و غلظت نترات و آمونیوم استفاده گردید. چنانچه $10 < NRMSE$ ، $20 < NRMSE < 30$ و $NRMSE > 30$ باشد به ترتیب نشان‌دهنده سطوح تخمین عالی، خوب، متوسط و ضعیف می‌باشد (جامیسون، 1991). 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 (کلمنت و همکاران، 1994).

(14)

$$NRMSE = \frac{RMSE \times 100}{\bar{n}}$$

در این روابط Nu,p مقدار نیتروژن جذب شده توسط گیاه ($Kg.ha^{-1}$) در زمان مشخصی از دوره رشد و در تیمار معینی می‌باشد که با استفاده از مدل HYDRUS-2D تخمین زده شده است. Nuc,p مقدار جذب نیتروژن بحرانی محاسبه شده است که توسط Wp ($ton.ha^{-1}$) محاسبه گردید. شایان ذکر است که Wp توسط مدل AquaCrop در همان زمان مشخص از دوره رشد گیاه و برای همان تیمار معین برآورد شده بود. a و b نیز ضرایب واسنجی شده معادله ترقیق نیتروژن بحرانی می‌باشند. بعد از این مراحل، مقادیر NNI_p و NNI_0 محاسبه شده در طول فصل کشت با یکدیگر مقایسه و دقت و خطای پیش‌بینی NNI با استفاده از شاخص‌های آماری مناسب ارزیابی گردید.

ارزیابی نتایج مدل‌ها

از شاخص‌های ارزیابی ضریب تعیین (R^2)، متوسط خطای اریبی (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده ($NRMSE$) برای مقایسه مقادیر شبیه-

(15)

صحت‌سنجی نشان می‌دهد که مدل قابلیت بالایی در تخمین مقادیر ماده خشک تولیدی در سال 1395 داشته است ($R^2=0.995$, $NRMSE=14.21\%$, $MBE=-0.714$ ton.ha⁻¹). البته این نتایج نشان می‌دهند که مدل تا حدودی ماده خشک را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است ($MBE<0$). اما در حالت کلی شاخص‌های آماری محاسبه شده حاکی از دقت مناسب مدل AquaCrop در برآورد W طی دوره رشد ذرت است که با نتایج مطالعه هنگ و همکاران (2009) که برای شرایط اقلیمی مختلف انجام شده بود، مطابقت دارد.

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل HYDRUS-2D

با استفاده از فرآیند حل معکوس و به طور همزمان مقادیر بهینه پارامترهای هیدرولیکی خاک بدست آمدند. مقادیر اولیه پارامترهای θ_s , θ_r , K_s , n و α به ترتیب برابر $0/376$ (cm³.cm⁻³), $0/038$ (cm³.cm⁻³), $139/32$ (cm.day⁻¹), $1/20$ و $0/031$ (cm⁻¹) در نظر گرفته شده بود و مقادیر نهایی آن‌ها نیز به ترتیب برابر $0/383$ (cm³.cm⁻³), $0/071$ (cm³.cm⁻³), $124/00$ (cm.day⁻¹), $1/21$ و $0/035$ (cm⁻¹) محاسبه گردید. با توجه به بافت لومی 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 و صحت‌سنجی در شکل (3) نشان داده شده است.

مقادیر پارامترهای MBE , $NRMSE$ و R^2 گزارش شده نشان می‌دهند که پارامترهای مورد نظر با دقت مناسبی واسنجی شده‌اند. علاوه بر این با توجه به رویه آزمون Paired-Samples T-Test Procedure نیز مشخص شد که بین داده‌های اندازه‌گیری و برآورد شده رطوبت اختلاف معنی‌داری ($P>0.05$) وجود نداشت. ابراهیمیان و همکاران (2013) پارامترهای هیدرولیکی خاک را با استفاده از روش حل معکوس تخمین زدند.

سیمونک و همکاران (2002) نیز نشان داده‌اند که در روش بهینه‌سازی معکوس پارامترهای هیدرولیکی خاک چون همه داده‌های اندازه‌گیری توأمان با هم در نظر گرفته می‌شوند، نتایج دقیق‌تری نسبت به روش‌های بهینه‌سازی ترتیبی ایجاد می‌گردد. این نتایج حاکی از این هستند که مدل واسنجی شده قابلیت بالایی در شبیه‌سازی توزیع زمانی و مکانی رطوبت و فرآیند توزیع مجدد آن در اعماق مختلف جوپچه و پشته‌های هر سه تیمار N0، N3 و N5 و به طور کلی همه تیمارهای مورد بررسی در این مطالعه دارد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

(16)

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

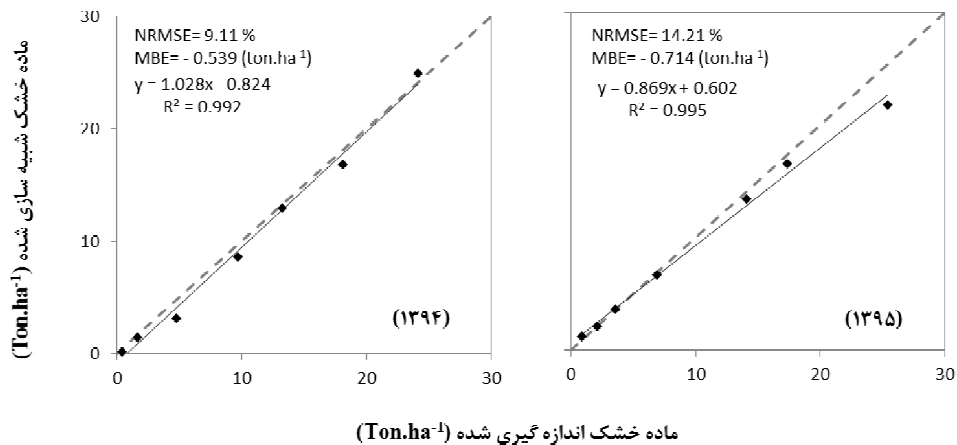
در این روابط، RMSE ریشه میانگین مربعات خطا، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، O_i مقادیر مشاهداتی، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهداتی و n تعداد داده‌های مورد بررسی می‌باشد.

نتایج و بحث

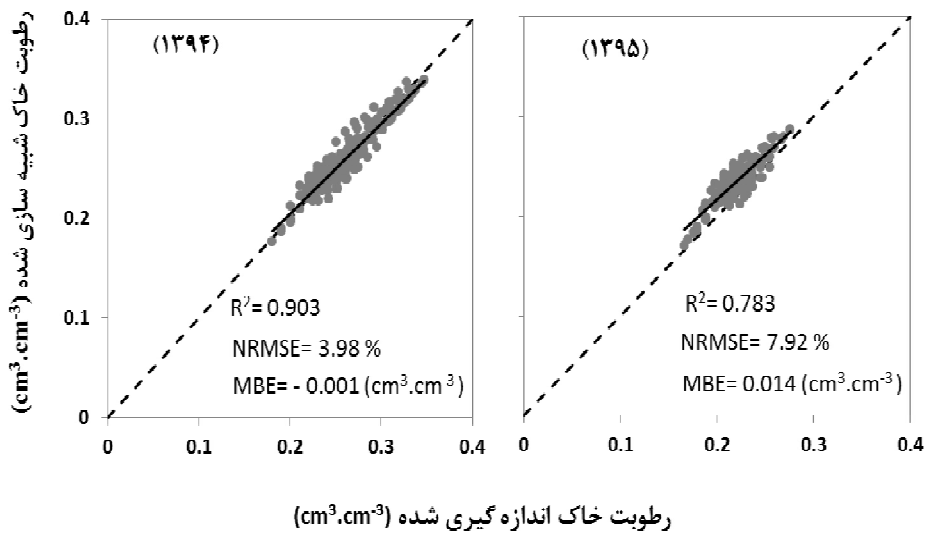
مقادیر W و غلظت N بعد از اندازه‌گیری در آزمایشگاه و آنالیزهای آماری توسط SAS برای هر هفت تیمار و در طول دوره رشد تا قبل از برداشت علوفه‌ای محاسبه شد. علاوه بر این تیمار N4 به عنوان تیمار بهینه (Nopt) یا همان تیماری که با کمترین کود مصرفی ممکن بیشترین عملکرد را ایجاد کرده بود انتخاب شد. بنابراین تیمارهای N5 و N6 به عنوان $N > Nopt$ و تیمارهای N0، N1، N2 و N3 به عنوان $N < Nopt$ شناسایی شدند. در کل 42 داده از هفت تیمار و شش نمونه‌برداری در طول هر فصل رشد بدست آورده شد که با استفاده از آن‌ها NNIO نیز محاسبه گردید. در ادامه نتایج بدست آمده از واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های شبیه‌سازی و مقایسه NNIO و NNIP ارائه شده است.

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop

در مرحله واسنجی، تعدادی از پارامترهای گیاهی non-conservative با توجه به مشاهدات مزرعه‌ای و نیز مراحل فنولوژیکی گیاه در طول دوره کشت تصحیح و تکمیل شدند و تعدادی دیگر با استفاده از روش سعی و خطا تا جایی تغییر داده شدند تا بهترین نتایج برای تخمین مقادیر ماده خشک، رطوبت خاک، محصول دانه و پوشش گیاه بدست بیاید که کل این پارامترها در جدول 4 ارائه گردید. سپس مدل واسنجی شده با داده‌های رطوبت خاک، ماده خشک، پوشش گیاهی و عملکرد دانه اندازه‌گیری شده در سال دوم مورد مقایسه قرار گرفت و تست شد. از آنجایی که در این مطالعه برآورد دقیق ماده خشک در طول دوره رشد در تیمار N4 توسط AquaCrop اهمیت دارد، فقط نتایج بدست آمده در تخمین مقدار ماده خشک تولیدی طی مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل در شکل 2 ارائه شده است. نتایج بدست آمده در بخش



شکل 2- مقادیر ماده خشک اندازه‌گیری و برآورد شده در مرحله واسنجی (1394) و صحت سنجی (1395)



شکل 3- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS-2D طی مراحل واسنجی (1394) و صحت‌سنجی (1395)

تیمارهای مورد بررسی در مرحله واسنجی به ترتیب 0/694 تا 0/882 و 14/01 تا 24/79% بود. همچنین این بازه تغییرات در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب 0/711 تا 0/847 و 22/28 تا 27/83% بود. این نتایج نشان می‌دهند که مدل واسنجی شده با دقت قابل قبولی قادر به شبیه‌سازی توزیع مکانی و زمانی نیترات و آمونیوم در

بعد از واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک، پارامترهای انتقال و واکنشی نیز واسنجی گردید و سپس با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در سال 1395 صحت‌سنجی انجام شد. لی و همکاران (2015) از همین روش برای واسنجی پارامترهای انتقال و واکنشی املاح خاک استفاده کردند. دامنه تغییرات R² و NRMSE در

خاک زیر جویچه و پشته‌های هر سه تیمار مورد بررسی بوده‌است.

در جدول (5) مقادیر واسنجی شده برای هر کدام از پارامترهای مذکور در قسمت‌های مختلف خاک را ارائه شده است. مقادیر پارامترهای D_T و D_L در هر سه تیمار فقط در لایه 0-30 سانتیمتری (قسمت‌های A و B) نسبت به مقادیر اولیه تغییر داشتند. تغییر پارامتر K_d و نسبت به پارامترهای K_n و K_m تاثیر چندانی روی دقت غلظت نیترات و آمونیوم شبیه‌سازی شده در خاک نداشت و بنابراین بدون تغییر باقی ماندند. لذا، برای سایر تیمارها که از آن‌ها نمونه خاکی برداشت نشده بود و در واسنجی و صحت سنجی مدل HYDRUS-2D بررسی نشدند (N_1, N_2, N_4 و N_6) پارامترهای D_L, D_T و K_d یکسان با نزدیک‌ترین تیمار بررسی شده در نظر گرفته شد. بدین ترتیب برای تیمار N_1 پارامترهای مشابه تیمار N_0 ، برای تیمار N_1 پارامترهای مشابه تیمار N_0 ، برای تیمار N_2 پارامترهای مشابه تیمار N_3 ، برای تیمار N_4 و N_6 پارامترهای مشابه تیمار N_5 در نظر گرفته شد. فرض بر این بود که نزدیک بودن غلظت N در تیمارها به یکدیگر باعث می‌شود پارامترهای انتقال و واکنشی املاح در خاک تا حد زیادی مشابه باشند. لازم به ذکر است که K_h به‌جز در تیمار N_0 برای سایر تیمارها نیز یکسان بود.

پارامترهای K_n و K_m به شدت روی نتایج شبیه‌سازی تاثیر داشتند. مقدار K_n و K_m در زیر جویچه-ها (ناحیه A) کمتر از نقاط زیر پشته‌ها (ناحیه B) بود. علاوه بر این با افزایش عمق (ناحیه C) مقدار آن‌ها نیز کاهش می‌یافت. در مطالعه لی و همکاران (2015)، K_n نیز با افزایش عمق از 0/25 تا 0/02 (day^{-1}) کاهش داشت. البته چون در مطالعه آن‌ها شبیه‌سازی یک بعدی انجام می‌شد، K_m تا عمق 40 سانتیمتری ثابت در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر مقدار این پارامترها در تیمار N_5 نسبت به دو تیمار دیگر بیشتر بود. دلیل این اختلاف‌ها این است 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، 2015). بر همین اساس مقدار K_n و K_m در تیمار N_1 برابر با نزدیک‌ترین تیمار نیتروژنی به آن یعنی N_0 و در تیمار N_2 برابر N_3 و در تیمار N_4 و N_6 برابر با ضرایب بدست آمده در تیمار N_5 در نظر گرفته شد. در نهایت مقادیر واسنجی شده پارامترهای $C_{\text{root},\text{NO}_3^-}$ و $C_{\text{root},\text{NH}_4^+}$ برای هر سه تیمار به ترتیب برابر با 0/1 و 0/01 میلی‌گرم بر سانتیمتر مکعب بدست آمد. لذا برای تیمارهای N_1, N_2, N_4 و N_6 نیز همان مقادیر 0/1 و 0/01 میلی‌گرم بر سانتیمتر مکعب در نظر گرفته شد.

جدول 5- پارامترهای واسنجی شده انتقال و واکنشی املاح در قسمت‌های مورد بررسی خاک در تیمارهای مختلف

تیمار	بخش‌های خاک	K_n (day^{-1})	K_m (day^{-1})	K_h (day^{-1})	K_d ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	D_L (cm)	D_T (cm)
N0	A	0/02	0	0	3/5	2	0/2
	B	0/15	0	0	3/5	2	0/2
	C	0/09	0	0	3/5	3	0/3
N3	A	0/13	0	0/38	3/5	2	0/2
	B	0/18	1×10^{-7}	0/38	3/5	2	0/2
	C	0/14	0	0	3/5	3	0/3
N5	A	0/18	$1/5 \times 10^{-7}$	0/38	3/5	2	0/2
	B	0/18	$2/5 \times 10^{-7}$	0/38	3/5	2	0/2
	C	0/14	0	0	3/5	3	0/3

برآورد جذب نیتروژن

فرض دوم این تحقیق این بود که مدل HYDRUS-2D بعد از واسنجی قادر است با دقت مناسبی مقدار جذب نیتروژن را در طول دوره رشد شبیه‌سازی کند. در شکل (4) مقادیر جذب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل نسبت به هم در تیمارهای N_0, N_3 و N_5 نشان داده شده است. شایان ذکر است که مجموع جذب نیترات و آمونیوم شبیه‌سازی شده توسط

مدل به عنوان مجموع جذب نیتروژن شبیه‌سازی شده در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص گردیده است، مقادیر جذب نیتروژن به خصوص بعد از مرحله رشد اولیه و در مرحله رشد رویشی و توسعه گیاه با دقت بالایی شبیه‌سازی نشده است. این در حالیست که مقدار جذب نهایی در انتهای فصل کشت در هر دو سال با دقت مناسبی شبیه‌سازی شده است. مشابه این در شبیه‌سازی جذب نیترات توسط کرویسیر و همکاران (2008)

طور که در شکل (5- الف) مشخص است، تغییرات در تیمارهای مختلف طی دو سال کشت تا حدود زیادی مشابه به یکدیگر هستند. دامنه تغییرات NNIO در سال‌های 1394 و 1395 به ترتیب از 0/57 تا 1/47 و از 0/55 تا 1/39 بود. مقدار NNIO تقریباً در اکثر نمونه‌برداری‌های دو سال برای تیمارهای N0 تا N3 کوچک‌تر از یک و برای تیمارهای N5 و N6 بزرگ‌تر از یک و برای تیمار N4 در حدود یک بود. از طرف دیگر مقادیر NNIO برای نمونه‌برداری‌های 45 و 49 روز بعد از کشت به ترتیب در سال‌های 1394 و 1395 بیشترین مقدار را داشت. دلیل این مسئله سرعت جذب بالا در این بازه از زمان کشت که همزمان با اوج گرفتن رشد رویشی ذرت (در بازه 35 تا 55 روز بعد از کشت) بود اتفاق افتاد. نتایج مطالعه بین و همکاران (2007) نیز حاکی از این بود که نرخ جذب نیتروژن توسط ذرت در ابتدای فصل رشد آهسته، و در اواسط رشد سریع و بعد از آن مجدداً آهسته بود. از طرف دیگر، افزایش مقدار NNIO نسبت به افزایش کاربرد نیتروژن در شکل‌های مذکور نیز به وضوح مشخص شده است که مشابه همین نتایج توسط لی و همکاران (2012) نیز برای کشت ذرت بهار در چین ارائه شده است.

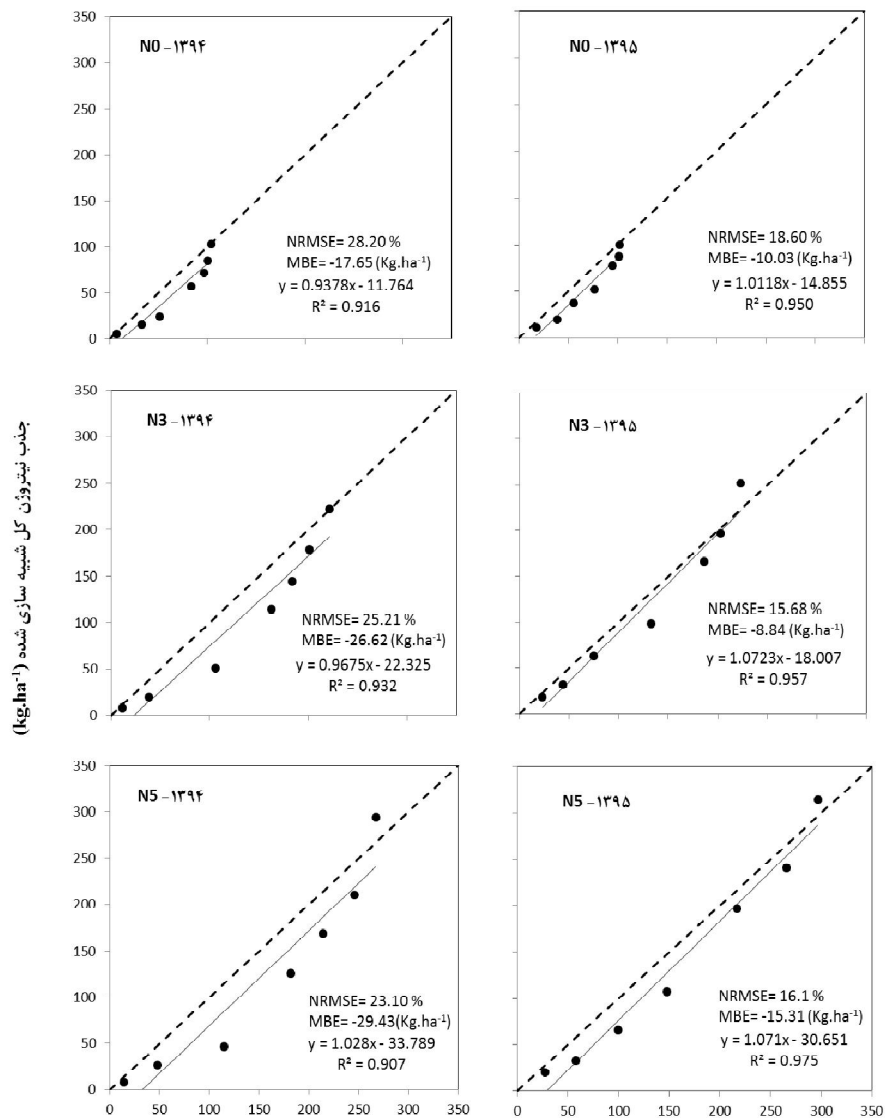
در شکل (5- ب) نیز مقادیر تغییرات NNIP در روزهای نمونه‌برداری برای تیمارهای مختلف نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که مقادیر برآورد شده NNIP کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شده‌اند. دامنه تغییرات NNIP در سال‌های 1394 و 1395 به ترتیب از 0/39 تا 1/23 و از 0/40 تا 1/24 بود. مقدار NNIP تقریباً در اکثر نمونه‌برداری‌های دو سال برای تیمارهای N0 تا N4 کوچک‌تر از یک و برای تیمار N6 بزرگ‌تر از یک و برای تیمار N5 در حدود یک بود. از طرف دیگر مقادیر NNIP برای نمونه‌برداری‌های 45 و 49 روز بعد از کشت به ترتیب در سال‌های 1394 و 1395 بیشترین مقدار شبیه‌سازی شده نبود. دلیل این مسئله این است که مدل HYDRUS قادر به پیش‌بینی افزایش نرخ جذب در طول دوره رشد رویشی نبوده و با یک نرخ ثابت میزان جذب نیتروژن را شبیه‌سازی کرده است. با این حال افزایش مقدار NNIP نسبت به افزایش کاربرد نیتروژن در شکل‌های مذکور نیز به وضوح مشخص شده است.

نیز نشان داده شده است با این تفاوت که در نتایج آن‌ها، دلایل کاهش دقت جذب در طول فصل رشد بررسی نشده است. به عبارت دیگر همزمان با رشد رویشی ذرت و تا مرحله گلدهی که گیاه مقادیر زیادی از نیتروژن را جذب و در برگ‌ها و اندام خود ذخیره می‌کند، مدل میزان جذب را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند. در حالی که در مرحله رشد زایشی، جذب به تدریج کمتر شده و گیاه، نیتروژن مورد نیاز خود را از مازاد نیتروژنی که در مرحله قبلی در برگ‌های خود (و به طور کلی اندام ذخیره‌ای) ذخیره کرده است تأمین می‌کند (پلنت و لیماپر، 2000). در حالی که نرخ جذب نیتروژن توسط مدل تقریباً تا اواخر دوره رشد با یک شیب ثابت شبیه‌سازی شده است. بنابراین اگرچه در انتهای فصل مقادیر جذب نیتروژن کل با دقت خوبی برآورد شده است، اما در طول دوره کشت و به خصوص در مرحله رشد رویشی گیاه، مقدار جذب با دقت کمتری برآورد گردیده است.

دلیل خطای مذکور می‌تواند این باشد که در این مطالعه (همانند مطالعات قبلی در این زمینه) برای ساده‌تر کردن فرآیند شبیه‌سازی جذب توسط گیاه، فرض شد که جذب املاح فقط طی فرآیند جذب غیرفعال صورت می‌گیرد. به همین دلیل در مرحله رشد رویشی مقدار جذب کمتر از حد واقعی برآورد شد. از طرف دیگر، مدل در انتهای کشت نرخ جذب بیشتری را نسبت به مقدار واقعی برآورد کرد. این در حالیست که جذب فعال توسط ریشه گیاه نیز در طول فصل رشد، به خصوص اگر گیاه تحت تنش نیتروژنی هم باشد، می‌تواند نقش موثری در جذب املاح داشته باشد (سیمونک و هوپمنز، 2009). نکته مهم این است که این خطای ایجاد شده در برآورد میزان جذب تجمعی تا چه حد می‌تواند روی تخمین مقادیر NNIP تأثیر بگذارد که باید بررسی گردد. در هر حال نتایج شکل (4) حاکی از این است که اگرچه دقت مدل در شبیه‌سازی مقادیر جذب N در هر دو سال عالی نبوده اما در محدوده قابل قبول قرار دارد.

مقایسه شاخص‌های تغذیه نیتروژن محاسبه شده بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (NNIP) و واقعی (NNIO)

در راستای هدف اصلی این مطالعه، دو پارامتر NNIO و NNIP (روابط 10 و 12) به ترتیب با استفاده از داده‌های مشاهداتی در مزرعه و مدل‌های واسنجی شده محاسبه گردیدند و روند تغییرات آن‌ها در طول دو فصل رشد بررسی و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. همان-



جذب نیتروژن کل اندازه گیری شده (kg.ha⁻¹)

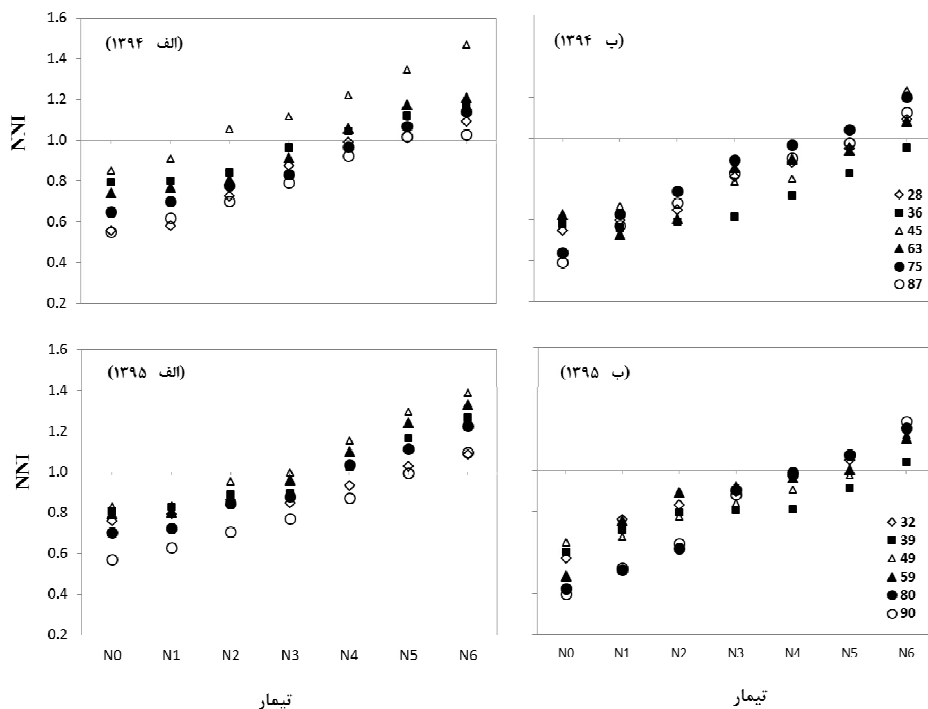
شکل 4- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده جذب نیتروژن در تیمارهای مختلف طی دوره کشت در سال 1395 و 1394

محاسبه شده (R^2) بر اساس داده‌های سال 1394 کمتر از مقادیر نظیر آن بر اساس داده‌های سال 1395 است. همچنین این شکل‌ها به خوبی نشان می‌دهند که مقادیر NNIP در هر دو سال کمتر از مقدار اصلی برآورد شده‌اند ($MBE < 0$). به عبارت دیگر، طبق معادله (12) می‌توان گفت خطای ناشی از کم تخمینی Nu,p توسط HYDRUS موجب کم تخمینی NNIP در هر دو سال کشت نیز شده است. ژائو و همکاران (2016) نیز با استفاده از یک روش غیر تخریبی و اندازه‌گیری کلروفیل جو زمستانه، NNI را با دقت مناسبی ($RMSE = 0.13$) تخمین زده بودند. در مطالعه آن‌ها باید کلروفیل با

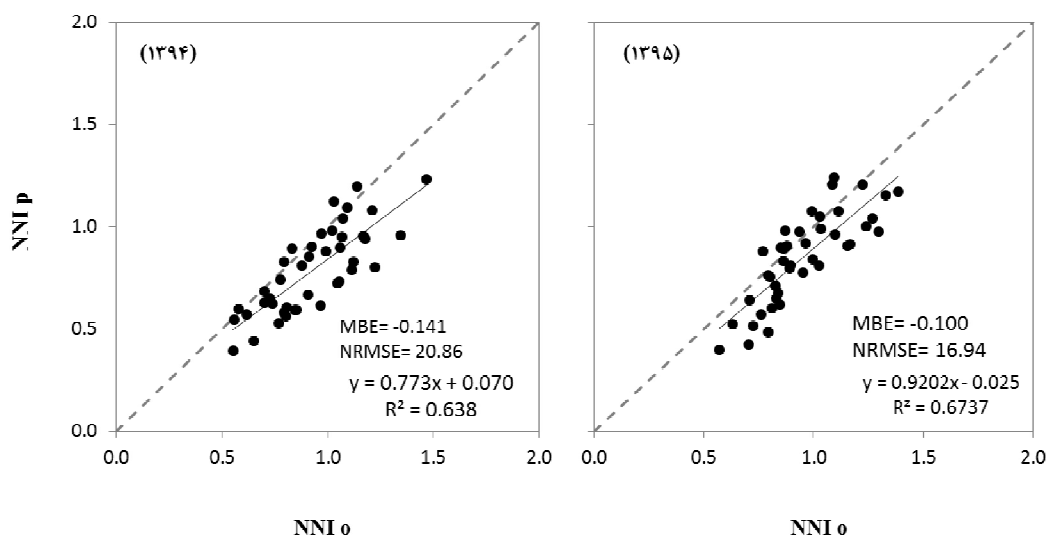
شاخص‌های آماری مناسب جهت ارزیابی مقادیر تخمین زده شده NNIP نسبت به مقادیر محاسباتی با استفاده از داده‌های واقعی NNIO بدست آورده شد. شکل (6) پراکنش و دقت برآورد نقاط NNIP در برابر NNIO را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص شده است، خطای تخمین (NRMSE, MBE) برای NNIP در سال 1395 کمتر از سال 1394 می‌باشد. مقدار NRMSE در سال‌های 1394 و 1395 به ترتیب برابر 20/86 و 16/94 بدست آمد و حاکی از این است که مقادیر NNIP با دقت قابل قبولی برای هر دو سال برآورد شده است. از طرف دیگر ضریب تعیین

حالی که NNIP در این مطالعه بدون هیچ‌گونه نمونه- برداری در طول فصل رشد برآورد شد.

استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر در طول فصل برداشت و براساس روابط ایجاد شده NNI برآورد می‌گردد. در



شکل 5- تغییرات NNIP و NNIP در تیمارهای مختلف طی سال‌های 1394 و 1395



شکل 6- پراکنش نقاط NNIPo در مقابل NNIP در تیمارهای مختلف طی دو سال کشت 1394 و 1395

در یک منطقه، امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف کوددهی و پیش‌بینی NNI با دقت مناسب را در طول

نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که با استفاده از مدل‌های واسنجی شده HYDRUS و AquaCrop

فصل کشت به وجود می‌آورند. به طور کلی اهمیت پیش‌بینی NNI به این دلیل است که می‌تواند موجب مدیریت هرچه بهتر مصرف نیتروژن در کشاورزی شود. علاوه بر این، مصرف به موقع و دقیق نیتروژن می‌تواند باعث بهبود هرچه بیشتر کارایی مصرف آب در مزرعه گردد. اما قبل از تخمین NNI باید معادله نیتروژن بحرانی در هر منطقه و برای گیاهان مختلف تعیین شده باشد و سپس دو پارامتر جذب واقعی نیتروژن و جذب بحرانی نیتروژن با دقت بالا، در طول فصل رشد تخمین زده شود. عدم دقت مناسب در برآورد هر کدام از این پارامترها باعث کاهش دقت نهایی NNI می‌گردد. به همین دلیل پیش‌بینی NNI کار پیچیده‌ای بشمار می‌رود. تا الان روش‌های متعددی برای تخمین NNI با استفاده از ابزارهای مختلفی نظیر کلروفیل متر (فیبو و همکاران، 1998)، تصاویر ماهواره‌ای (هولس و همکاران، 2007)، مدل‌های شبیه‌سازی مثل AZYDON (ناد و همکاران، 2008) و یا ارتباط بین NNI و داده‌های برداشت شده توسط کلروفیل-متر ارائه شده است. اما در همه این روش‌ها باید در طول فصل یکسری اطلاعات و نمونه‌برداری‌های تخریبی یا غیرتخریبی از مزرعه برداشت شوند. بنابراین واضح است که بدون این اطلاعات، امکان پیش‌بینی NNI با استفاده از این روش‌ها می‌تواند دقت محاسبات نهایی را تا حد زیادی کاهش دهد. اما استفاده از نتایج دو مدل HYDRUS و AquaCrop این امکان را ایجاد می‌کند تا بر اساس نوع مدیریت آب و نیتروژن در مزرعه، بتوان NNI را پیش‌بینی کرد. بنابراین امکان اجرای سناریوهای مختلف مدیریتی و بهبود آن‌ها نیز مهیا می‌گردد. نکته قابل توجه در استفاده از این مدل‌ها این است که با تغییر بافت خاک پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح باید مجدداً و اسنچی گردند. اما تغییر در نوع آبیاری فقط باعث تغییر شرایط مرزی شبیه‌سازی می‌گردد. علاوه بر این هر دو مدل از جمله بهترین مدل‌های پیشنهاد شده در زمینه مطالعات گیاهی و انتقال املاح در خاک هستند. عاملی که در این مطالعه تا حدودی باعث کاهش دقت پیش‌بینی NNI گردید، احتمالاً فرضیات ساده‌سازی انجام شده در فرآیند و اسنچی و اجرای این مدل‌ها است. برای مثال، علت اینکه مدل HYDRUS در این مطالعه قادر به پیش‌بینی دقیق‌تر تغییرات نرخ جذب نیتروژن در طول دوره رشد رویشی نبود می‌تواند این باشد که به دلیل ساده کردن فرآیند و اسنچی، فرض شد که نیتروژن فقط از طریق فرآیند جذب غیرفعال وارد گیاه می‌گردد و از جذب فعال چشم‌پوشی شد. همین عامل می‌تواند سبب کاهش دقت

مقادیر شبیه‌سازی جذب نیتروژن در اواسط فصل رشد شده باشد. تصحیح همین فرضیه ممکن است باعث بهبود دقت تخمین جذب گردد. همچنین، در برخی مواقع اختلاف در تاریخ کشت و پارامترهای اقلیمی می‌تواند باعث کم یا زیاد شدن نرخ رشد و در نتیجه آن جذب نیتروژن توسط گیاه گردد که این عامل نیز می‌تواند باعث کاهش دقت تخمین مدل گردد. بنابراین کماکان بهبود دقت در پیش‌بینی NNI با استفاده از روش‌ها غیر تخریبی توسط مدل‌های شبیه‌سازی وجود دارد که مستلزم بررسی‌های دقیق‌تر و مطالعات بیشتر در این زمینه هست.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه از مدل‌های AquaCrop و HYDRUS به ترتیب برای تخمین پارامترهای ماده خشک و میزان جذب نیتروژن طی فصل رشد استفاده شد و نتایج آن برای برآورد NNI در طول فصل رشد ذرت بکار برده شد. مدل AquaCrop با دقت بالایی ماده خشک را در طول فصل رشد برآورد کرد. همچنین شبیه‌سازی جذب نیتروژن توسط این مدل با دقت نسبتاً مناسبی انجام گرفت. بر اساس نتایج مدل HYDRUS-2D تقریباً تا اواخر دوره رشد، گیاه نیتروژن را با یک شیب ثابت جذب می‌کرد. در حالی که مشخص شد در واقعیت و طی دوره رشد رویشی ذرت، نرخ جذب نیتروژن توسط گیاه افزایش می‌یابد و مدل قادر به پیش‌بینی این تغییرات نبود. بنابراین اگرچه در انتهای فصل مقادیر جذب تجمعی نیتروژن با دقت خوبی برآورد شده بود، اما در طول دوره کشت مقدار جذب با دقت کمتری برآورد گردید. دلیل خطای مذکور می‌تواند این باشد که بخاطر ساده‌سازی‌های فرآیند و اسنچی مدل، از جذب فعال املاح توسط ریشه چشم‌پوشی شده بود و فقط جذب غیرفعال املاح توسط جریان توده‌ای آب به سمت ریشه لحاظ گردیده بود. پراکنش و دقت برآورد نقاط NNIP در برابر NNIO نشان داد که در مجموع میزان دقت تخمین بر اساس داده‌های هر دو سال نسبتاً مناسب بود. همچنین مقادیر NNIP در هر دو سال کمتر از مقدار NNIO برآورد شدند. از آنجایی که مدل HYDRUS مقادیر جذب را در تیمارهای مختلف طی فصل رشد کمتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی کرده بود، همین مسئله باعث شد که مقادیر NNIP در هر دو سال کمتر از NNIO برآورد شود. بنابراین، چنانچه مدل HYDRUS-2D دقیق‌تر و با جزئیات بیشتری و اسنچی گردد امکان افزایش دقت تخمین NNI نیز وجود خواهد داشت که باید در مطالعاتی جداگانه بررسی گردد.

فهرست منابع:

1. بهدادیان، ع.، سلطانی، ا.، زینلی، ا.، عجم نوری، ح.، معصومی، ح. (1392). ارزیابی اثرات مدیریت کود نیتروژن در مرحله گلدهی بر عملکرد کلزا در شرایط گرگان. مجله به زراعی کشاورزی. دوره 15، شماره 1، 163-174.
2. رنجبر، آ.، رحیمی خوب، ع.، ابراهیمیان، ح.، وراوی پور. م. 1396a. شبیه‌سازی توأمان انتقال رطوبت، نیترات و آمونیوم در خاک با استفاده از مدل HYDRUS-2D در آبیاری جویچه‌ای ذرت. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. 31، 2، 259-276.
3. رنجبر، آ.، رحیمی خوب، ع.، وراوی پور. م.، ابراهیمیان، ح. 1396b. معادله نیتروژن بحرانی گیاه ذرت در منطقه پاکدشت. تحقیقات آب و خاک ایران. 48، 1، 1-9.
4. زینلی، ا.، سلطانی، ا.، گالشی، س.، ا.، موحدی نائینی، س.، ع. (1391). ارزیابی شاخص تغذیه نیتروژنی مزارع گندم در گرگان. مجله پژوهش‌های تولید گیاهی. جلد نوزدهم، شماره چهارم. 137-156.
5. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. CropEvapotranspiration–Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO, Rome (Irrigation and Drain. Paper No. 56).
6. Ata-Ul-Karim, S.T., Yao, X., Liu, X., Cao, W., Zhu, Y. 2014. Determination of Critical Nitrogen Dilution Curve Based on Stem Dry Matter in Rice. PLoS ONE, 9, 8.
7. Bremner, J.M., and Keeney D.R. 1965. Steam distillation methods for determination of ammonium nitrite and nitrate. Analytica Chimica Acta, (32), 485-495.
8. 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.
9. Crevoisier, D., Popova, Z., Mailhol, J.C., Ruelle, P. 2008. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation. Agricultural Water Management. (95), 354–366.
10. Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Playan, E., Abbasi, F., 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.
11. Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. John Wiley & Sons, New York.
12. Feibo, W., Lianghuan, W., Fuha, X. 1998. Chlorophyll meter to predict nitrogen sidedress requirements for short-season cotton. Field Crops Res. 56, 309–314.
13. Gheysari, M., Mirlatifi, S.M., Bannayan, M., Homae, M. and Hoogenboom, G., 2009. Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage. Agricultural water management, 96(5), 809-821.
14. Greenwood, D. J., Lemaire, G., Gosse, G., Cruz, P., Draycott, A. and Neeteson, J. J. 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. Annals of Botany. London. 66: 425–436.
15. Hanson, B.R., Simunek, J., Hopmans, J.W. 2006. Evaluation of urea– ammonium–nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. Agricultural Water Management (86):102–113.
16. Heng, L.K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T. and Steduto, P., 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. Agronomy Journal, 101(3), 488-498.
17. Horowitz, W. (1970). Official Methods of Analysis. 11th Edition. vAssociation of Official Analytical Chemists, vWashington, vD.C.
18. Houles, V., Gu'erif, M., Mary, B.V. 2007. Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations. Eur. J. Agron. 27, 1–11.

19. Jamieson, P.D., Porter, J.R., Wilson, D.R. 1991. A test of computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Res.* 27, 337-350.
20. Justes, E., Mary, B., Meynard, J.M., Mached, J.M., Thelier-Huché, L., 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of botany*, 74(4), 397-407.
21. Klute, A. 1986. *Methods of soil analysis part I. Physical and mineralogical methods.* 2nd Ed. Soil Science Society of America. 1188 p.
22. Li, Y., Šimůnek, J., Zhang, Z.T., Jing, L.F., 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.
23. Li, W., He, P., Jin, J. 2012. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for spring maize in north east china. *Journal of Plant Nutrition*, 35(11), 1747-1761.
24. Mailhol, J.C., Ruelle, P., Nemeth, I. 2001. Impact of fertilization practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrigation Science* 20:139–147.
25. Mousavizadeh, S.F., Honar, T., Ahmadi, S.H. 2016. Assessment of the AquaCrop Model for simulating Canola under different irrigation managements in a semiarid area. *International Journal of Plant Production*. 10 (4), 425-445.
26. Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 12(3), 513-522.
27. Naud, C., Makowski, D., Jeuffroy, M.H., 2008. Is it useful to combine measurements taken during growing season with a dynamic model to predict the nitrogen status of winter wheat? *European Journal of Agronomy*. 28 (3), 291–300.
28. Patrignani, A. and Ochsner, T.E. 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agronomy Journal*, 107(6), 2312-2320.
29. Phogat, V., Skewes, M.A., Cox, J.W., Sanderson, G., Alam, J., 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.
30. Phogat, V., Mahadevan, M., Skewes, M., 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.
31. Peng, S., Garcia, F.V., Laza, R.C., Cassman, K.G., 1993. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. *Agronomy Journal*. 85, 987–990.
32. Plenet, D., Lemaire, G., 2000. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. *Plant Soil*. 216, 65–82.
33. Ramos, T.B., Šimůnek, J., Goncalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., 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.
34. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2012. *AquaCrop Reference Manual*, AquaCrop version 4.0. Rome, Italy: FAO.
35. Šimůnek, J., van Genuchten, M.T., Šejna, M., 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone J.* 7 (2), 587–600.
36. Šimůnek, J., Van Genuchten, M.T. and Šejna, M., 2006. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. *Technical manual*, version, 1, p.241.
37. Šimůnek, J., Jacques, D., Hopmans, J.W., Inoue, M., Flury, M., 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.
38. Van Gaelen, H., Tsegay, A., Delbecque, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., Miranda, R., Vanuytrecht, E., Abrha, B., Diels, J. and Raes, D., 2015. A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the AquaCrop procedure. *The Journal of Agricultural Science*, 153(7), 1218-1233.
 39. 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.
 40. Wesseling, J.G., Elbers, J.A., Kabat, P., van den Broek, B.J. 1991. SWATRE: instructions for input, Internal Note, Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands.
 41. Yin, F., Fu, B., and Mao, R. 2007. Effect of nitrogen fertilizer application rates on nitrate nitrogen distribution in saline soil in the Hai river basin, china. *Journal of Soils and Sediments*, 7(3):136-142.
 42. Zhang, X., Wang, Q., Xu, J., Gilliam, F. S., Tremblay, N., 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).
 43. Zhao, B., Liu, Z., Ata-Ul-Karim, S. T., Xiao, J., Liu, Z., Qi, A., ... & Duan, A. 2016. Rapid and nondestructive estimation of the nitrogen nutrition index in winter barley using chlorophyll measurements. *Field crops research*, 185, 59-68.

Estimation of Nitrogen Nutrition Index Using AquaCrop and HYDRUS Simulation Models during Maize Growing Period

A. Ranjbar, A. Rahimikhoob¹, H. Ebrahimian, and M. Varavipour

Former PhD student, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran; E-mail: Arashranjbar@ut.ac.ir

Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran; E-Mail: Akhob@ut.ac.ir

Assistant Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran; E-mail: Ebrahimian@ut.ac.ir

Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran; E-mail: Mvaravi@ut.ac.ir

Received: February, 2018 and Accepted: August, 2018

Abstract

Monitoring nitrogen nutrition index (NNI) during the growing season requires costly experiments and is a time-consuming process. Recently, some remarkable studies have been carried out in order to determine NNI by employing different plant parameters which can improve fertilizer and water use efficiency and reduce environmental hazards. The main objective of this study was to estimate the NNI during the growing season of maize by using a non-destructive method. Dry matter (W) and actual nitrogen uptake (Nu), the required parameters for predicting NNI, were estimated by AquaCrop and HYDRUS-2D models, respectively. The critical nitrogen curve, proposed by Ranjbar *et al.* for summer maize in Iran, was used in this study. Plant and soil samples were taken for calibration and validation of the two models during the two growing seasons. The results showed that AquaCrop can accurately predict maize dry matter production during the growth period ($R^2 = 0.995$, NRMSE = 14.21 %). Moreover, the accuracy of the estimation of nitrogen uptake by the HYDRUS-2D was relatively acceptable ($R^2 > 0.907$, NRMSE < 28.20 %). Finally, NNI was calculated using measured (NNI_o) and simulated (NNI_p) data over the two seasons. Comparing the NNI_p versus the NNI_o revealed that accuracy of the estimated values was acceptable based on the R^2 and NRMSE criteria (>0.638 and <20.86, respectively) in both years.

Keywords: Water and fertilizer management, N uptake, Dry matter, Critical N equation

¹ Corresponding author: College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran.