

SUCROSBEET: مدلی ساده برای شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد چغندر قند در شرایط پتانسیل و محدودیت نیتروژن

رضا دیهیم فرد^{۱*}، مهدی نصیری محلاتی^۱ و علیرضا کوچکی^۱

^۱گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
^۲گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: deihim@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۹/۱۱

دیهیم فرد، ر. م. نصیری محلاتی و ع. کوچکی. ۱۳۹۱. SUCROSBEET: مدلی ساده برای شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد چغندر قند در شرایط پتانسیل و محدودیت نیتروژن. ۲ (۱): ۲۰-۱.

چکیده

امروزه مدل‌های شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی، به‌طور گسترده‌ای در تجزیه و تحلیل واکنش عملکرد گیاهان به تغییرات آب و هوایی و عوامل مدیریتی در شرایط پتانسیل و نیز محدودیت نیتروژن به کار گرفته می‌شود. با توجه به اهمیت کشت چغندر قند در استان خراسان، و نیز تاثیر نیتروژن بر عملکرد کمی این گیاه، ارزیابی مدل تغییر یافته سوکرزیت، که می‌تواند تاثیر این عوامل بر رشد این گیاه را در شرایط محدودیت نیتروژن شبیه‌سازی کند، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور بعد از افزودن زیرمدل بیلان نیتروژن به مدل اولیه سوکرز، قابلیت این مدل در شبیه‌سازی رشد و عملکرد چغندر قند در شرایط محدودیت نیتروژن، با استفاده از داده‌های حاصل از دو آزمایش ارزیابی شد. به‌طور کلی مدل سوکرزیت واکنش خوبی به تیمارهای مختلف نیتروژن نشان داد. نتایج ارزیابی مدل نشان داد که در مراحل اولیه رشد، مدل در تمامی تیمارها برآورد خوبی از مقادیر شبیه‌سازی شده ماده خشک، شاخص سطح برگ و غلظت نیتروژن در اندام‌های هوایی داشت اما اواسط رشد میزان آریبی در برآورد بیشتر بود. افزون بر این، مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای عملکرد اندام ذخیره‌ای حدود ۹ مگاگرم در هکتار بود که رقم نسبتاً قابل قبولی برای یک مدل ساده مثل سوکرزیت می‌باشد. نتایج تعیین اعتبار مدل سوکرزیت نشان داد که در دز پایین کاربرد نیتروژن، برآورد مدل کمتر و در دز بالا، بیشتر از مقدار مشاهده شده آن‌ها است. به‌طور کلی نتایج مطالعه حاضر نشان داد که مدل تغییر یافته سوکرزیت قابلیت نسبتاً خوبی در تخمین عملکرد چغندر قند در شرایط پتانسیل و نیز محدودیت نیتروژن داشته و می‌توان از آن در مطالعات تخمین خلاء عملکرد و نیز پهنه بندی اکولوژیکی در سطح ملی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: چغندر قند، نیتروژن، مدل‌سازی، SUCROSBEET.

مقدمه

فتوسنتز که فرآیند تثبیت کربن به فرم هیدرات کربن است، پایه و اساس تولید می باشد. علاوه بر منابعی مانند آب و نور، قابلیت دسترسی به نیتروژن نیز به شدت بر این فرآیند تاثیرگذار است. این تاثیر عمدتاً از طریق نمودار سطح برگ و ظرفیت فتوسنتزی است (van Keulen *et al.*, 1988) زیرا نیتروژن عنصر اصلی در ساختار کلروفیل است. مدل های شبیه سازی مکانیزم گرای پیچیده و جامع، که بیان نیتروژن در خاک و جذب این عنصر را توسط گیاه زراعی به صورت کمی بیان می کنند، ابزار مفیدی در درک بهتر تاثیر این عوامل بر فرآیند های مهم فیزیولوژیک (از جمله فتوسنتز) و نیز واکنش رشد گیاه به تغییرات نیتروژن در خاک به حساب می آیند (van Ittersum *et al.*, 2003). از میان مدل های جامع می توان APSIM (Keating *et al.*, 2003)، CERES (Jones *et al.*, 1998) و CropSyst (Stockle *et al.*, 2003) را نام برد. با این وجود یکی از موانع و مشکلات عمده استفاده از این مدل ها این است که آن ها عمدتاً نیازمند داده های زیادی برای اجرا هستند و اندازه گیری بسیاری از آن ها در مزرعه و گلخانه عملاً دشوار است. در این مدل ها نه تنها از تعداد زیادی پارامتر (برای گیاه و خاک) و توابع برای شبیه سازی استفاده می شود، بلکه روابط و مکانیزم های پیچیده به کار برده شده در آن ها برای کمی سازی رشد و نمو، چگونگی تفسیر خروجی آن ها را در برخی از موارد با مشکل مواجه ساخته است.

در مقابل، مدل های ساده تر که نیازمند به داده های کمتری می باشند، مشکلات قبلی را نداشته و بهتر می توانند مورد استفاده قرار گیرند (Spitters, 1990). از این مدل ها که استفاده از آن ها و تفسیر نتایج به دست آمده از آن ها آسان تر می باشد، به طور گسترده و موفقیت آمیزی برای ارزیابی عملکرد پتانسیل انواع گیاهان زراعی در شرایط محدودیت آب و نیتروژن استفاده شده است. برای مثال می توان به مدل هایی همچون SBEET برای چغندرقتند (Soltani *et al.*, 2005)، مدل WOFOST برای گندم (Nassiri *et al.*, 2006)، مدل Azodyn برای گندم (Jeuffroy *et al.*, 1999)، مدل SUBEMOpo در چغندرقتند (Vandendriessche, 2000) و مدلی برای بادام زمینی (Hammer *et al.*, 1995) اشاره کرد.

در شرایط عرضه کافی نیتروژن در خاک (با فرض اینکه هیچ گونه محدودیتی از نظر آب و سایر عناصر غذایی برای گیاه وجود نداشته باشد) تجمع نیتروژن عمدتاً تحت تاثیر خصوصیات فیزیولوژیک گیاه قرار دارد (Gastal and Lemaire, 2002). در شرایط کمبود نیتروژن، غلظت این عنصر به پایین تر از حد بحرانی خود در گیاه رسیده و در نتیجه فرآیند های آسیمیلایون کربن، رشد و گسترش سطح برگ و فنولوژی گیاه تحت تاثیر قرار می گیرند. کاهش بیوماس در چنین شرایط ناشی از دو عامل: کاهش جذب تشعشع توسط کانوپی به دلیل کاهش سرعت توسعه سطح برگ، و دوم، تقلیل در کارایی فتوسنتزی در نتیجه کاهش غلظت نیتروژن و کلروفیل در برگ ها و در برخی موارد ترکیبی از هر دو عامل می باشد (Muchow, 1990). نتایج برخی از محققین نشان می دهد که میزان حساسیت این دو فرآیند به تنش نیتروژن متفاوت است به طوری که در اکثر موارد گسترش سطح برگ در مقایسه با فتوسنتز، در شرایط محدودیت نیتروژن کاهش بیشتری نشان داده است (Keating *et al.*, 2003). (Vos and van der Putten, 1998) در مطالعه خود بر روی سیب زمینی گزارش کردند که اثرات کمبود نیتروژن بر کارایی مصرف تشعشع (که هر دو فرآیند فتوسنتز و تنفس را در بر می گیرد) ناچیز اما کاهش ۳۰۰-۴۰۰ درصدی در گسترش سطح برگ به همراه داشت. در برخی موارد نیز نتایج عکس مشاهده شده است. به طور مثال ووس و همکاران (Vos *et al.*, 2005) در ذرت نشان دادند که در شرایط کمبود نیتروژن در خاک، کارایی مصرف تشعشع ۳۸٪ کاهش یافت در حالی که این مقدار برای گسترش سطح برگ تا ۳۰٪ بود. چغندرقتند یک از گیاهان زراعی مهم کشور می باشد و در محدوده وسیعی از شرایط اقلیمی کشت می شود. با این وجود هر ساله مقادیر قابل توجهی شکر وارد کشور می شود که دلیل اصلی آن پایین بودن عملکرد این گیاه در واحد سطح می باشد. با توجه به اینکه افزایش عملکرد در واحد سطح یکی از راهکارهای افزایش تولید می باشد، و از سوی دیگر پارامترهای اقلیمی (تشعشع، درجه حرارت، بارندگی و غیره) و خاکی، به شدت بر رشد و عملکرد این گیاه تاثیر گذار هستند، بررسی کمی تاثیر این عوامل بر رشد گیاه در مناطق مختلف می تواند کمک شایانی به درک بهتر عوامل محدود کننده عملکرد این گیاه کند.

سوکرزبیت، ابتدا مطالعه همه جانبه ای بر روی مدل های موجود از جمله GECROS (Yin and van Laar, 2005)، LINTUL3 (Bouman *et al.*, 2001)، ORYZA2000 (Shibu *et al.*, 2010)، APSIM (Wang *et al.*, 2003)، CERES (Hanks and Ritchie, 1991)، Azodyn (Jeuffroy and Recous, 1999) و برخی از مدل های دیگر صورت گرفت و سپس بیلان نیتروژن در مدل سوکرزبیت با همان زبان شبیه سازی (FST Rappoldt and van Kraalingen, 1996) اضافه گردید. همچنین فرآیند های تقاضا و جذب نیتروژن توسط گیاه زراعی (به صورت مکانیزم گرا)، عرضه نیتروژن در خاک (به فرم ساده تر از مدل های دیگر) و نیز اثرات تنش نیتروژن بر گیاه از طریق یک فاکتور کاهش با نام شاخص تغذیه نیتروژن^۳ در مدل اعمال شد. در ادامه تنها به تشریح فرآیندهای مرتبط با بیلان نیتروژن در گیاه و خاک و نیز دیگر تغییراتی که در مدل جدید سوکرزبیت انجام شده است، می پردازیم. جزئیات بیشتر در خصوص نحوه شبیه سازی سایر فرآیندهای رشد و نمو فنولوژیک، بیلان کربن و آب و نیز تخصیص کربوهیدرات به اندام های مختلف را می توان در مدل اصلی سوکرز (Goudriaan and van Laar, 1994; van Laar *et al.*, 1997) مطالعه کرد.

بیلان نیتروژن در گیاه و خاک: در مدل سوکرزبیت، مدل سازی تغییرات نیتروژن معدنی در خاک به صورت تک لایه انجام شده است (مطابق روش ارائه شده توسط Yin and van Laar, 2005). در این روش میزان جذب نیتروژن معدنی فقط از یک لایه خاک که ریشه ها در آن قرار دارند^۴ شبیه سازی می شود و لایه زیرین آن^۵ برای مدل سازی آبشویی نیتروژن در نظر گرفته شده است. بنابراین میزان جذب نیتروژن معدنی از لایه های مختلف خاک قابل شبیه سازی نیست و جذب نیتروژن روزانه از کل پروفیل خاک با فرض یکنواخت بودن توزیع نیتروژن در آن می باشد.

توصیف مکانیستیک پویایی نیتروژن در گیاه و خاک در شکل ۱ ارائه شده است. نیتروژن معدنی قابل دسترس برای جذب گیاه (نیتروژن خاک یا SOILN، شکل ۱)، از

ارزیابی کمی این عوامل تنها با استفاده از مدل های شبیه سازی رشد گیاهان زراعی میسر می باشد. با در اختیار داشتن داده های آب و هوایی بلند مدت در یک منطقه و یک مدل ساده شبیه سازی رشد، می توان عملکرد و ماده خشک گیاه را در شرایط پتانسیل و نیز محدودیت آب و نیتروژن برآورد کرد. یکی از مدل هایی که تاکنون به طور موفقیت آمیزی برای شبیه سازی بسیاری از گیاهان از جمله گندم بهاره (van Laar *et al.*, 1997)، گندم پاییزه (Bannayan and Crout, 1999)، کاکائو (Zuidema *et al.*, 2005) استفاده شده است، مدل سوکرز^۱ می باشد که تولید ماده خشک روزانه را بر اساس سرعت فتوسنتز کانوپی و با در نظر گرفتن هزینه های تنفسی شبیه سازی می کند (Goudriaan and van Laar, 1994). مدل سوکرز نه تنها می تواند رشد و نمو گیاهان زراعی را در شرایط پتانسیل (سوکرز^۱) برآورد کند، بلکه با برآورد بیلان آب در شرایط محدودیت آن نیز قادر به شبیه سازی است (سوکرز بیت^۲، van Laar *et al.*, 1997). با این حال، گزارش های اندکی در خصوص کاربرد این مدل در شبیه سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی در شرایط محدودیت نیتروژن، وجود دارد.

با توجه به اینکه تاکنون مدل سازی بیلان نیتروژن در مدل سوکرز انجام نشده است، هدف اصلی از این مطالعه، اضافه نمودن یک زیرمدل ساده بیلان نیتروژن به مدل سوکرز، جهت استفاده از این مدل برای شبیه سازی رشد و عملکرد چغندر قند در شرایط محدودیت نیتروژن است.

مواد و روش ها

توصیف مدل

نظر به اینکه مدل اصلی سوکرز برای گندم بهاره پارامترسازی شده است، از این رو قبل از انجام هر گونه تغییری در این مدل، ابتدا بخش های مختلف مدل جدید که از این پس آن را سوکرزبیت^۲ می نامیم، برای گیاه چغندر قند پارامترسازی شد. برخی از این پارامترها از منابع تحقیقاتی، برخی دیگر از طریق اندازه گیری و تخمین (با استفاده از داده های به دست آمده از آزمایش مزرعه ای - جدول ۱) و تعدادی نیز با استفاده از واسنجی مدل به دست آمد. برای افزودن بیلان نیتروژن به مدل

³ Nitrogen Nutrition Index (NNI)

⁴ Upper Layer (UL)

⁵ Lower Layer (LL)

¹SUCROS

²SUCROSBEET

SOILN: نیتروژن معدنی موجود در خاک (g N m^{-2}), NI: مقدار اولیه نیتروژن در خاک برای شروع شبیه سازی (g N m^{-2}), RNSOIL: سرعت تغییرات نیتروژن معدنی در خاک ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$), FERN: کاربرد نیتروژن به فرم کود ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$), NRF: کسر بازیافت نیتروژن در خاک ($0-1$), MAX: تابع داخلی برنامه FST که حداکثر مقدار را برمی گرداند, NACR: سرعت جذب روزانه نیتروژن توسط گیاه ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$) (بخش جذب و تجمع نیتروژن), INDGSN: عرضه نیتروژن داخلی خاک ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$). با توجه به اینکه جذب نیترات (یکی از اشکال نیتروژن معدنی) از خاک تابعی از میزان رطوبت موجود در خاک است، فاکتور آب (WF) در مدل سوکرزبیت در نظر گرفته شده است (Yin and van Laar, 2005) که میزان قابلیت دسترسی به نیتروژن معدنی خاک موجود در خاک (SOILN) را نشان می دهد (شکل ۱):

$$WF = \text{MIN}(1., \text{WCUM}/(\text{TKLT} \times (\text{WCFC} - \text{WCWP}))) \quad (3)$$

WCUM: کل مقدار آب موجود در پروفیل خاک (mm), TKLT: ضخامت لایه ای از خاک که ریشه ها در آن قرار دارد (mm), WCFC: محتوای آب حجمی خاک در حالت ظرفیت مزرعه ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O cm}^{-3} \text{soil}$), WCWP: محتوای آب حجمی خاک در نقطه پژمردگی ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O cm}^{-3} \text{soil}$). مقدار WF بین ۰-۱ تغییر می کند. چنانچه برابر با ۱ باشد، هیچ گونه محدودیت آبی از نظر جذب نیترات از خاک توسط گیاه وجود ندارد. بر اساس رابطه فوق ممکن است نیتروژن معدنی در خاک موجود باشد اما به دلیل کمبود رطوبت در خاک، برای گیاه قابل دسترس نباشد.

تقاضای نیتروژن: برای مدل سازی میزان تقاضای نیتروژن توسط گیاه در مدل سوکرزبیت، فرض شده است که گیاه همیشه محتوی نیتروژن در اندام های خود را در حد پتانسیل نگه می دارد (Drenth et al., 1994). بر این اساس، ابتدا حداکثر تقاضای نیتروژن توسط هر اندام محاسبه می شود. این تقاضا از اختلاف بین حداکثر غلظت نیتروژن و تجمع واقعی آن در هر اندام تقسیم بر زمان انتگرال گیری به دست می آید. تقاضای کل نیتروژن توسط گیاه برابر با مجموع تقاضای تک تک اندام ها و تابعی از حداکثر غلظت نیتروژن، سرعت رشد، وزن خشک

چندین منبع منشا می گیرد. اول، نیتروژن اولیه موجود در پروفیل خاک هنگام جوانه زنی و کاشت. دوم، نیتروژن حاصل از فرآیند های تثبیت نیتروژن، تجزیه و معدنی شدن ماده آلی خاک در طول فصل رشد (INDGSN) و در نهایت نیتروژن به کاربرده شده به صورت کوددهی (FERN). در شرایط هوازای میزان عرضه نیتروژن به خاک (ناشی از فرآیند های تجزیه ماده آلی خاک، تثبیت نیتروژن و غیره) را می توان به نحو صحیح و قابل قبولی، با استفاده از محتوی ماده آلی خاک، کمی نمود. روش ساده تر این است که به جای مدل سازی چنین فرآیندهای پیچیده ای در خاک، میزان عرضه نیتروژن ورودی به خاک را تنها با استفاده از یک پارامتر که وابسته به منطقه می باشد، کمی کرد (Bouman, and van Laar, 2006; Shibu et al., 2010). در مدل سوکرزبیت از پارامتر INDGSN برای این منظور استفاده شده است. که از طریق واسنجی مدل در تیمار صفر کیلوگرم نیتروژن در هکتار به دست آمده است. (ten Berge et al., 1997) مقدار این پارامتر را برای خاک های مناطق حاره، روزانه در حدود ۰/۹-۰/۵ کیلوگرم در هکتار گزارش کردند. نیتروژنی که از منبع کود به خاک اضافه می شود، ممکن است توسط گیاه جذب نشده و به صورت تصعید، آبشویی و دنیتریفیکاسیون از دسترس گیاه خارج شود. در مدل سوکرزبیت به جای توصیف مکانیستیک این فرآیندها در خاک، میزان تلفات نیتروژن با استفاده از پارامتری به نام کسر بازیافت نیتروژن (NRF) مدل سازی شد. کسر بازیافت نیتروژن در شرایط مزرعه ای تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله نوع خاک، مرحله نموی، نوع کود و زمان کوددهی و نیز روش کاربرد کود قرار دارد (De Datta et al., 1986). مقدار این پارامتر نیز همچون پارامتر INDGSN در مدل حاضر، از طریق واسنجی مدل به دست آمد.

بر این اساس، بیلان نیتروژن معدنی خاک از اختلاف بین نیتروژن اضافه شده به خاک از طریق کود دهی یا فرآیند معدنی شدن، و نیتروژن تخلیه شده از خاک از طریق فرآیند های جذب توسط گیاه و نیز تلفات آن به دست می آید (Shibu et al., 2010):

$$\text{SOILN} = \text{INTGRL}(\text{NI}, \text{RSOILN}) \quad (1)$$

$$\text{RSOILN} = (\text{FERN} \times \text{NRF}) - \text{MAX}(0., (\text{NACR} - \text{INDGSN})) \quad (2)$$

NDEMSX: حداکثر تقاضای نیتروژن توسط اندام های ذخیره ای ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، NMAXSO: حداکثر غلظت نیتروژن در اندام ذخیره ای (g N g DM^{-1})، GSO: سرعت رشد اندام ذخیره ای ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). تقاضای نیتروژن توسط کل گیاه (NDEMC)، از مجموع تقاضای تک تک اندام های آن به دست می آید ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$):

$$\text{NDEMC} = \text{NDEML} + \text{NDEMP} + \text{NDEMSX} \quad (7)$$

جذب و تجمع نیتروژن: برای مدل سازی جذب نیتروژن توسط گیاه، ابتدا پارامتری با نام حداکثر جذب روزانه نیتروژن (NMAXUP) در مدل سوکرزبیت تعریف شده است. مقدار این پارامتر در انواع گیاهان زراعی، متفاوت است و می تواند توسط کاربر در فرآیند واسنجی مدل تغییر یابد (Bouman *et al.*, 2001). مقدار پتانسیل جذب نیتروژن توسط گیاه برابر است با حداقل دو مقدار NMAXUP و مقدار نیتروژنی که توسط خاک عرضه می شود (NSUP):

$$\text{NUPP} = \text{MAX}(0., \text{MIN}(\text{NMAXUP}, \text{NSUP})) \quad (8)$$

NUPP: پتانسیل جذب نیتروژن توسط کل گیاه ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، بر این اساس، سرعت جذب واقعی نیتروژن توسط هر اندام، از حداقل دو مقدار تقاضا و عرضه نیتروژن قابل دسترس به دست می آید (Bouman and van Laar, 2006; Shibu *et al.*, 2010):

$$\text{NALV} = (\text{MAX}(0., \text{MIN}(\text{NDEML}, \dots, \text{NUPP} \times (\text{NDEML} / \text{NOTNUL}(\text{NDEMC})))))) \times \text{EMERG} \quad (9)$$

$$\text{NAPT} = (\text{MAX}(0., \text{MIN}(\text{NDEMP}, \dots, \text{NUPP} \times (\text{NDEMP} / \text{NOTNUL}(\text{NDEMC})))))) \times \text{EMERG} \quad (10)$$

$$\text{NASO} = (\text{MAX}(0., \text{MIN}(\text{NDEMSX}, \dots, \text{NUPP} \times (\text{NDEMSX} / \text{NOTNUL}(\text{NDEMC})))))) \times \text{EMERG} \quad (11)$$

$$\text{NACR} = (\text{NALV} + \text{NAPT} + \text{NASO}) \times \text{EMERG} \quad (12)$$

NALV, NASO, NAPT, NACR: به ترتیب سرعت جذب واقعی نیتروژن توسط برگها، دمبرگها، اندامهای ذخیره ای و کل گیاه ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، EMERG: پارامتری

و تجمع نیتروژن در آن اندام است. تقاضای نیتروژن برگ ها به صورت زیر برآورد شده است (شکل ۱):

$$\text{NDEML} = \text{MAX}((\text{NMAXL} \times (\text{WLVG} + \text{GLV} \times \text{DELTA}) - \text{ANLV}) / \text{DELTA}, 0.) \quad (4)$$

NDEML: حداکثر تقاضای نیتروژن توسط برگها ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، NMAXL: حداکثر غلظت نیتروژن در برگها (g N g DM^{-1})، WLVG: وزن خشک برگ های سبز (g m^{-2})، GLV: سرعت رشد برگها ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، DELTA: فاصله زمانی انتگرال گیری، ANLV: میزان تجمع نیتروژن در برگها (g N m^{-2})، در بخش تجمع نیتروژن بیشتر توضیح داده شده است.

حداکثر تقاضای نیتروژن توسط دمبرگها نیز مشابه روند بالا مدل سازی شده است با این تفاوت که حداکثر غلظت نیتروژن در دمبرگها برابر ۵۰٪ مقدار آن در برگها در نظر گرفته شد. (Drenth *et al.*, 1994) نیز یک رابطه خطی بین غلظت نیتروژن در برگها و ساقهها در گیاه برنج یافت به این صورت که غلظت نیتروژن در ساقهها معادل ۵۰٪ آن در برگها بود:

$$\text{NDEMP} = \text{MAX}((\text{NMAXL} \times 0.5 \times (\text{WPT} + \text{GPT} \times \text{DELTA}) - \text{ANPT}) / \text{DELTA}, 0.) \quad (5)$$

NDEMP: حداکثر تقاضای نیتروژن توسط دمبرگها ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، WPT: وزن خشک دمبرگها (g m^{-2})، GPT: سرعت رشد دمبرگها ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، ANPT: میزان تجمع نیتروژن در دمبرگها (g N m^{-2}).

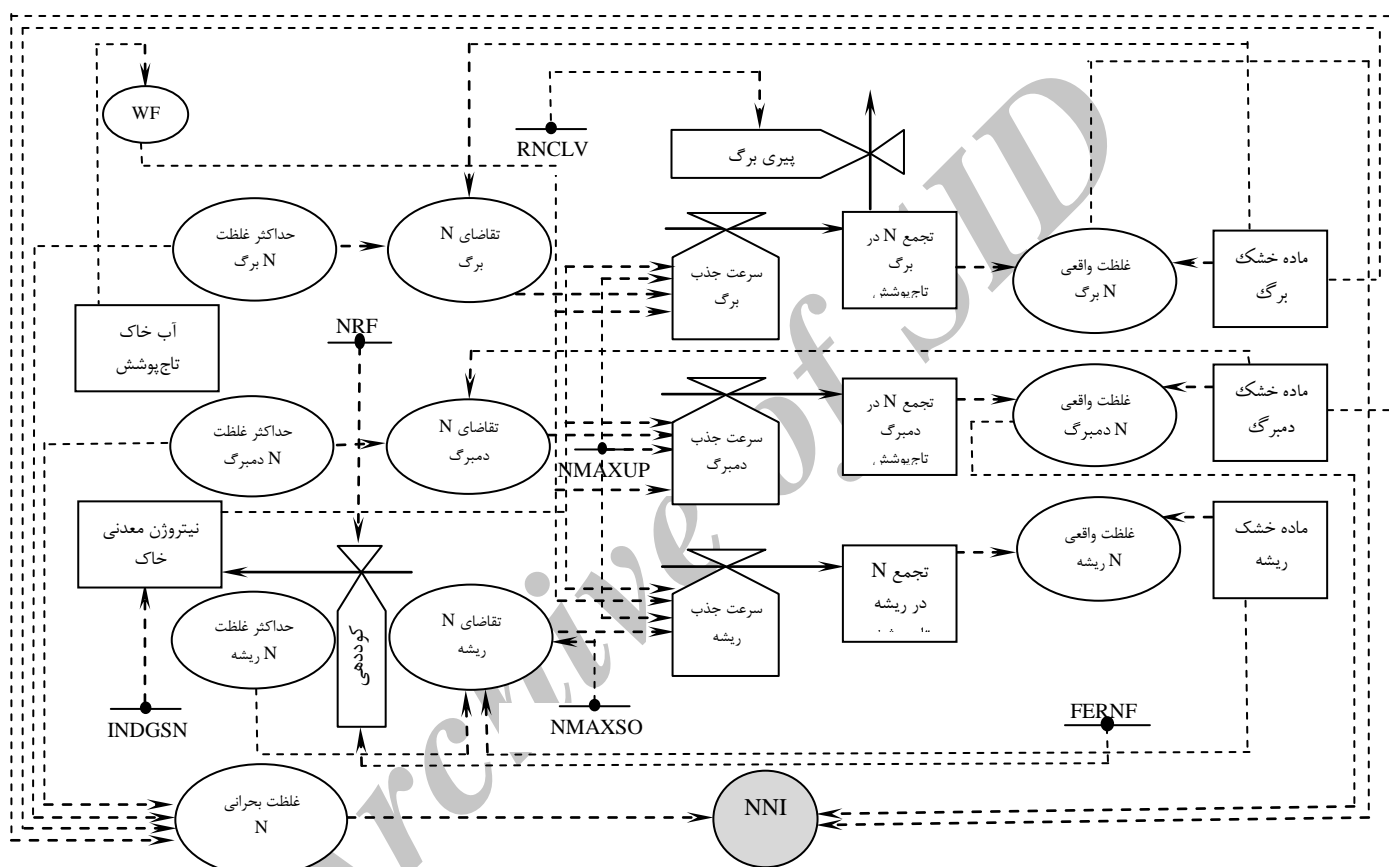
قابل ذکر است که حداکثر غلظت نیتروژن در برگها و دمبرگها تابعی از مرحله نموی گیاه می باشد (Bouman *et al.*, 2001) به طوری که در ابتدای دوره رشد گیاه، در بالاترین مقدار خود و بعد از آن سیر نزولی پیدا می کند. این مقادیر، روزانه از طریق توابع تعریف شده در مدل و روش میان یابی به دست می آید. حداکثر غلظت نیتروژن در اندام ذخیره ای یک پارامتر ساده است و به مرحله نموی بستگی ندارد. بر این اساس، حداکثر تقاضای روزانه توسط اندام ذخیره ای تابعی از سرعت رشد روزانه این اندام و نیز حداکثر غلظت نیتروژن در آن است:

$$\text{NDEMSX} = \text{MAX}(\text{NMAXSO} \times \text{GSO}, 0.) \quad (6)$$

قند برابر با $0.180 / (g N g L^{-1})$ در نظر گرفته شده است (Boons-Prins *et al.*, 1993). بر اساس این پارامتر می‌توان مقدار نیتروژنی که روزانه به دلیل زوال برگ‌ها از سیستم خارج می‌شوند را به صورت کمی بیان کرد (شکل ۱):

$$NLDLV = DLV * RNCLV \quad (۱۳)$$

است که نشان می‌دهد آیا گیاه سبز شده است یا خیر (۰-۱). برای مدل سازی سرعت تجمع نیتروژن در برگ‌ها، ابتدا باید میزان نیتروژنی که روزانه به دلیل پیری برگ‌ها، از سیستم خارج می‌شود را برآورد کرد. برای انجام چنین برآوردی، یک پارامتر با نام RNCLV در مدل تعریف شده است که بنا به تعریف، میزان نیتروژن باقیمانده در برگ‌ها بعد از پیری و زرد شدن آن‌ها است. این پارامتر در چغندر



شکل ۱- دیاگرام مربوط به بیان نیتروژن در مدل سوکرزیت. پارامترها در جدول ۳ توضیح داده شده‌اند.

$$NLV = NALV - NLDLV \quad (۱۴)$$

سرعت تجمع نیتروژن در دمبرگ‌ها و اندام‌های ذخیره ای معادل همان سرعت جذب روزانه نیتروژن توسط آن‌ها است:

$$NPT = NAPT \quad (۱۵)$$

$$NSO = NASO \quad (۱۶)$$

NLDLV: تلفات نیتروژن از برگ‌ها به دلیل پیری آن‌ها $(g N m^{-2} d^{-1})$ ، DLV: سرعت مرگ برگ‌ها به دلیل سایه‌اندازی، سن و کمبود نیتروژن $(g Leaf m^{-2} d^{-1})$. برای محاسبه تجمع روزانه نیتروژن در هر یک از اندام‌های گیاهی، ابتدا بایستی مقادیر سرعت تجمع را در هر یک از آن‌ها به دست آورد. سرعت تجمع نیتروژن در برگ‌ها (NLV)، بر مبنای سرعت جذب روزانه نیتروژن و نیز تلفات نیتروژن از آن‌ها از رابطه زیر برآورد می‌شود:

ماکزیمم آن در گیاه در نظر گرفته شد (Porter, 1993; Jamieson *et al.*, 1998). پایه اصلی این فرض در مدل بر مبنای مطالعه انجام شده توسط (Zhen and Leigh, 1990) می باشد. در برخی مدل ها مثل APSIM (Keating *et al.*, 2003)، غلظت های بحرانی و حداقل نیتروژن (MNC, CNC) در تک تک اندام ها، به صورت توابعی در مدل ارائه شده اند ولی در برخی دیگر مثل I_Wheat (Meinke, 1996) این دو غلظت به صورت تابعی از مرحله نمو در طول فصل رشد برآورد می شوند. اثرات تنش نیتروژن در مدل حاضر بر سه فرآیند فتوسنتز (و تولید ماده خشک)، گسترش سطح برگ و نیز پیری برگ با استفاده از شاخص تغذیه نیتروژن (NNI) مدل سازی گردید. محققین زیادی از روش شاخص تغذیه نیتروژن برای تاثیر کمبود نیتروژن بر رشد گیاه در مدل های خود استفاده کرده اند. به طور مثال می توان به مدل (Gabrielle *et al.*, 1998a) در کلزا، مدل Azodyn برای گندم (Jeuffroy and Recous, 1999)، و نیز مدل FASSET در گندم (Olesen *et al.*, 2002) اشاره نمود. بر اساس این شاخص، میزان کمبود نیتروژن در گیاه با استفاده از غلظت های واقعی و بحرانی نیتروژن برآورد می شود (شکل ۱):

$$NNI = \text{LIMIT}(0., 1., NCCR/CNC) \quad (۲۵)$$

NNI: شاخص تغذیه نیتروژن در گیاه (۰-۱)، CNC: غلظت بحرانی نیتروژن در گیاه (g N g DM^{-1})، شاخص NNI در دامنه ۰-۱ است که مقدار صفر بیانگر حداکثر تنش در گیاه و مقدار ۱ عدم تنش نیتروژن برای گیاه تلقی می شود.

برای کمی کردن اثرات تنش نیتروژن بر فتوسنتز کانوپی، شاخص NNI به طور مستقیم در سرعت فتوسنتز ناخالص کانوپی ضرب گردید. همچنین اثر NNI بر گسترش سطح برگ در مدل جدید از طریق تاثیر بر سرعت نسبی رشد برگ ها (RGRL) و فقط در مرحله رشد نمایی سطح برگ اعمال شده است:

$$GLAI = ((LAI \times (\text{EXP}(\text{RGRL} \times \text{DTEFF} \times \text{DELTA}) - 1.)) / \text{DELTA}) \times \text{NNI} \quad (۲۶)$$

GLAI: سرعت توسعه شاخص سطح برگ ($\text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، LAI: شاخص سطح برگ ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)، RGRL: سرعت نسبی رشد برگ ($^{\circ}\text{C d}^{-1}$)، DTEFF: درجه حرارت موثر ($^{\circ}\text{C}$)، در مراحل بعدی رشد برگ (مرحله رشد خطی)، کمبود

NPT: سرعت تجمع نیتروژن در دمبرگ ها ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، SO: سرعت تجمع نیتروژن در اندام های ذخیره ای ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، از انتگرال گیری سرعت تجمع نیتروژن در هر اندام با یک مقدار اولیه (ZERO)، تجمع نیتروژن در آن اندام به دست می آید (Bouman and van Laar, 2006):

$$\text{ANLV} = \text{INTGRL}(\text{ZERO}, \text{NLV}) \quad (۱۷)$$

$$\text{ANPT} = \text{INTGRL}(\text{ZERO}, \text{NPT}) \quad (۱۸)$$

$$\text{ANSO} = \text{INTGRL}(\text{ZERO}, \text{NSO}) \quad (۱۹)$$

$$\text{ANCR} = (\text{ANSO} + \text{ANLV} + \text{ANPT}) \quad (۲۰)$$

ANLV: تجمع نیتروژن در برگ ها (g N m^{-2})، ANPT: تجمع نیتروژن در دمبرگ ها (g N m^{-2})، NSO: تجمع نیتروژن در اندام های ذخیره ای (g N m^{-2})، ANCR: تجمع نیتروژن در کل گیاه (g N m^{-2}).

تنش نیتروژن: برای مدل سازی اثرات تنش نیتروژن بر فرآیندهای رشد، ابتدا می بایست غلظت نیتروژن در اندام ها را شبیه سازی نمود. غلظت نیتروژن در اندام ها از تجمع نیتروژن در آن ها تقسیم بر وزن خشک آن ها به دست می آید:

$$\text{NCLV} = \text{ANLV} / \text{NOTNUL}(\text{WLVG}) \quad (۲۱)$$

$$\text{NCPT} = \text{ANPT} / \text{NOTNUL}(\text{WPT}) \quad (۲۲)$$

$$\text{NCSO} = \text{ANSO} / \text{NOTNUL}(\text{WSO}) \quad (۲۳)$$

$$\text{NCCR} = \text{ANCR} / \text{NOTNUL}(\text{WLVG} + \text{WPT} + \text{WSO}) \quad (۲۴)$$

NCLV، NCPT، NCSO و CR: به ترتیب غلظت نیتروژن در برگ ها، دمبرگ ها، اندام های ذخیره ای و کل گیاه (g N g DM^{-1}).

در شرایطی که مقدار نیتروژن قابل دسترس در خاک کمتر از میزان مورد نیاز گیاه باشد، تقاضای نیتروژن توسط گیاه زراعی تامین نشده و منجر به کاهش غلظت نیتروژن در گیاه می شود تا جاییکه ممکن است به حد غلظت بحرانی (Critical Nitrogen Concentration) (CNC) برسد. غلظت بحرانی نیتروژن در گیاه، غلظتی است که کمتر از آن تنش نیتروژن ایجاد شده و باعث کاهش سرعت تولید بیوماس و عملکرد می شود. در مدل سوکرزیبت غلظت بحرانی نیتروژن برابر با ۵۰٪ غلظت

کاهش می‌کند. کاهش تجمع نیتروژن در اندام‌ها بر میزان غلظت نیتروژن در آن‌ها تاثیر گذاشته و به این ترتیب شاخص تغذیه نیتروژن (NNI) نیز در گیاه روزانه تغییر می‌کند.

سایر تغییرات اعمال شده در مدل سوکرزبیت:

علاوه بر اضافه نمودن زیرمدل بیلان نیتروژن به مدل سوکرزبیت، عوامل مدیریتی مانند آبیاری و کوددهی نیز که از قبل در مدل سوکرز ۲ وجود نداشت، در مدل گنجانده شد. آبیاری و کوددهی در دو حالت اتوماتیک^۱ (برای استفاده از مدل در شرایط پتانسیل) و دستی^۲ مدل سازی شد (Yin and van Laar, 2005). برای مثال، بر اساس منبع ورودی آب به سیستم، مدل در سه حالت شبیه سازی را انجام می‌دهد که با پارامتری به نام IRRIGF در مدل تعریف شده است. اگر پارامتر مذکور برابر با ۱- در نظر گرفته شود، ورودی آب، فقط باران است (شرایط دیم)، اگر پارامتر IRRIGF برابر با صفر باشد، ورودی آب برابر با آبیاری دستی + آب باران (شرایط آبی) است و اگر پارامتر مذکور برابر با ۱ باشد، سیستم به طور اتوماتیک توسط مدل آبیاری می‌شود تا همواره آب خاک در حد ظرفیت مزرعه (DUL) نگهداری شود (آبیاری اتوماتیک). پارامتر IRRIGF توسط کاربر قابل تغییر است. در روش دستی نیز سیستم، توسط مقدار آب تعریف شده توسط کاربر در هر مرحله از نمو، آبیاری می‌گردد. مشابه روش اشاره شده برای آبیاری دستی و اتوماتیک، کوددهی دستی و اتوماتیک نیز در مدل توسط کاربر قابل تغییر است. در این حالت، فاکتوری به نام FERNF در مدل تعریف شده است که با تغییر آن می‌توان سیستم را در دو وضعیت اتوماتیک و دستی کوددهی کرد.

نیتروژن به طور غیر مستقیم گسترش سطح برگ را در مدل محدود می‌کند. به این صورت که کاهش غلظت نیتروژن در برگ‌ها از طریق تاثیر بر فتوسنتز کانوپی، میزان بیوماس تولیدی را کاهش و با تخصیص کمتر کربوهیدرات به رشد برگ‌ها، رشد آن‌ها محدود شده و از گسترش سطح برگ آن‌ها کاسته می‌شود.

برای کمی کردن اثرات تنش نیتروژن بر زوال برگ از روش ارائه شده در مدل لینتول^۳ (Shibu *et al.*, 2010) استفاده گردید. در این روش از پارامتری به نام سرعت نسبی مرگ برگ ناشی از کمبود نیتروژن (RDRNS) استفاده شده است:

$$DLAI = DLV2 \times SLA \quad (27)$$

$$DLV2 = WLVG \times (RDRNS \times (1 - NNI)) \quad (28)$$

DLAI: سرعت پیری شاخص سطح برگ ($m^2 m^{-2} d^{-1}$), SLA: سطح برگ ویژه ($m^2 g^{-1}$), DLV2: سرعت مرگ برگ به دلیل کمبود نیتروژن ($g Leaf m^{-2} d^{-1}$), RDRNS: پارامتر سرعت نسبی مرگ برگ ناشی از کمبود نیتروژن (d^{-1}), مقدار این پارامتر در مدل لینتول^۳ (Shibu *et al.*, 2010) بعد از واسنجی مدل برابر با ۰/۰۳ به دست آمد. در سوکرزبیت نیز مقدار این پارامتر با استفاده از واسنجی مدل تعیین گردید.

چنانچه نیتروژن قابل دسترس گیاه در خاک، جوابگوی تقاضای نیتروژن گیاه باشد ($NNI = 1$), در آن صورت سرعت مرگ برگ ناشی از نیتروژن (DLV2) صفر بوده و هیچ گونه آثاری از زوال سطح برگ در گیاه به دلیل نیتروژن دیده نمی‌شود. با کاهش غلظت نیتروژن در گیاه و نیز کاهش شاخص NNI، برگ‌ها با سرعتی برابر با RDRNS روزانه پیر شده و به همان نسبت سطح برگ گیاه از بین می‌رود. در نهایت، مجموع اثرات کمبود نیتروژن (DVL2)، سایه اندازی و سن گیاه (DVL1)، بر سرعت مرگ برگ‌ها ($DLV = DLV1 + DLV2$)، باعث خروج مقداری نیتروژن از سیستم شده (NLDLV) که در بخش‌های قبل به آن اشاره شد) و این مساله به نوبه خود بر میزان تجمع نیتروژن در برگ‌ها و نیز کل اندام‌ها تاثیر

¹ Automatic

² Manual

جدول ۱- جزئیات آزمایش های استفاده شده برای واسنجی و تعیین اعتبار مدل.

آزمایش	منطقه	سال زراعی	رقم	تاریخ کاشت	تیمار آزمایش	تقسیم کود
واسنجی مدل	مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی- مشهد	۱۳۸۷-۱۳۸۸	فیاما	نیمه دوم اسفند	۰، ۸۰، ۱۶۰، ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار	یک مرحله: ۵۰ روز پس از سبز شدن گیاه
تعیین اعتبار مدل	ایستگاه تحقیقات کرج-تهران	۱۳۸۱-۱۳۸۲	MSC2	نیمه اول اردیبهشت	چهار سطح آبیاری × چهار سطح کود نیتروژن (۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ کیلوگرم در هکتار)	دو مرحله: نصف کاشت و نصف دیگر ۷-۸ برگی

$$DVS = AFGEN(DVSTB, TSUM) \quad (33)$$

FUNCTION DVSTB = 0., 0., 448., 0.45, 562., 0.6, 850., ..., 0.95, 950., 1., 1200., 1.2, 1500., 1.35, 1600., 1.40, ..., 1900., 1.5, 2200., 1.7, 2600., 1.85, 3000., 2., 3200., 2. (34)

DVSTB: تابع مربوط به رابطه بین مرحله نمو و زمان حرارتی تجمعی، AFGEN: تابع داخلی برنامه FST که مرحله نمو را روزانه با توجه به مقدار زمان حرارتی تجمعی بر می گرداند.

واسنجی و تعیین اعتبار مدل: ارزیابی مدل سوکرزبیت شامل دو بخش واسنجی و تعیین اعتبار است که با استفاده داده های به دست آمده از دو آزمایش انجام شد (جدول ۱). آزمایش اول که در مشهد توسط نگارندگان انجام گردیده جهت واسنجی مدل و آزمایش دوم (Karimi and Naderi, 2008) برای تعیین اعتبار مدل استفاده شد. این دو آزمایش در دو منطقه کاملاً متفاوت از لحاظ اقلیمی به انجام رسیده است. واسنجی مدل سوکرزبیت با روش گام به گام (Boot, 2003) و به صورت دستی انجام شد. در این مرحله ابتدا مدل برای تیمار عدم محدودیت نیتروژن (۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) و سپس برای تیمار حداقل نیتروژن (عدم کاربرد کود) واسنجی گردید. تعیین اعتبار مدل با روش جذر میانگین مربعات خطا صورت گرفت. بر اساس این روش، محاسبه انحراف مقادیر پیش بینی شده توسط مدل از مقادیر اندازه گیری شده که توصیفی از قابلیت پیش بینی مدل را ارائه می کند، از رابطه زیر به دست می آید (Jamieson et al., 1998):

از تغییرات دیگر انجام شده در مدل سوکرزبیت، کمی کردن فنولوژی چغندر قند بر اساس زمان حرارتی می باشد. فنولوژی چغندر قند در سال اول که صرفاً رشد رویشی دارد، تحت کنترل دما می باشد. زمان حرارتی مورد نیاز چغندر قند از کاشت تا رسیدگی برداشت حدود ۳۰۰۰ درجه روز می باشد که بر اساس روابط زیر در مدل تعریف گردید (Parsa, 2008):

$$TSUM = INTGRL (ZERO, RTSUM) \quad (29)$$

$$RTSUM = DTEFF \times EMERG \quad (30)$$

$$DTEFF = AFGEN (DTEFFT, DAVTMP) \quad (31)$$

$$FUNCTION DTEFFT = 0., 0., 3., 0., 25., 22., 40., 0. (32)$$

TSUM: زمان حرارتی تجمعی (°C d)، RTSUM: زمان حرارتی روزانه (°C d)، DTEFF: درجه روز رشد یا درجه حرارت موثر روزانه (°C)، DAVTMP: متوسط درجه حرارت روزانه (°C). بر اساس این توابع، سرعت نمو در کمتر از دمای پایه (۳ درجه سانتی گراد) صفر است، با افزایش دما تا زمان رسیدن به دمای بهینه (۲۵ درجه سانتی گراد) به طور خطی افزایش می یابد، و افزایش دما بیش از دمای بهینه، کاهش سرعت نمو را به همراه خواهد داشت (Boons-Prins et al., 1993). درجه روز رشد (DTEFF) که از معادله بالا به دست می آید، به زمان حرارتی تجمعی از روزهای قبل (TSUM) افزوده می شود. سپس مرحله نمو (DVS) که یک متغیر وضعیت فاقد بُعد است و مقدار آن در دامنه بین صفر (در زمان کاشت) تا ۲ (رسیدگی برداشت) می باشد، با استفاده از روش زیر در مدل محاسبه می شود:

باشد، آن مدل برآورد خوبی از مقادیر مشاهده شده دارد و اگر بین ۲۰-۳۰ باشد، برآورد مناسبی خواهد بود. نتایج این تحقیق نشان داد که در دزهای پایین کاربرد نیتروژن، مقدار این شاخص خیلی بیشتر از تیمارهای بالای نیتروژن است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که شاخص سطح برگ در مقایسه با سایر صفات واسنجی شده، از میزان خطای کمتری برخوردار است (جدول ۲). روند یکسانی بین مقادیر شبیه سازی شده غلظت نیتروژن در اندام‌های هوایی توسط مدل و مقادیر مشاهده شده آن‌ها دیده شد به طوری که غلظت نیتروژن در این اندام‌ها با پیشرفت نمو کاهش یافت (شکل ۳) اما دقت مدل در شبیه سازی این صفت به اندازه شاخص سطح برگ نبود. (Shibu *et al.*, 2010) در نتایج واسنجی مدل خود برای برنج، با استفاده از شاخص میانگین انحراف مطلق (Average Absolute Deviation (AAD))، اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده توسط مدل لیتول ۳ را در شرایط محدودیت نیتروژن بین ۲۹-۲۱٪ در تیمارهای حداکثر کاربرد نیتروژن و حدود ۳۳٪ در تیمار عدم کاربرد کود نیتروژن بیان کردند.

(Vandendriessche, 2000) نیز تجمع ماده خشک برگ و ماده خشک کل چغندر قند را در مناطقی از بلژیک، با استفاده از مدل SUBEMOpO در شرایط پتانسیل برآورد کردند. آنها تجمع ماده خشک را در سال‌های مختلف بعد از واسنجی مدل، از ۱۸۹۴ تا ۲۴۰۳ گرم در مترمربع شبیه سازی کردند که همبستگی خوبی با مقادیر مشاهده شده داشت. اما مقادیر شبیه سازی شده ماده خشک برگ در برخی سال‌ها بیشتر از مقادیر مشاهده شده بود که دلیل آن را آلودگی شدید خاک به نماتود کیست چغندر قند دانستند.

(۳۵)

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \cdot \frac{100}{\bar{O}}$$

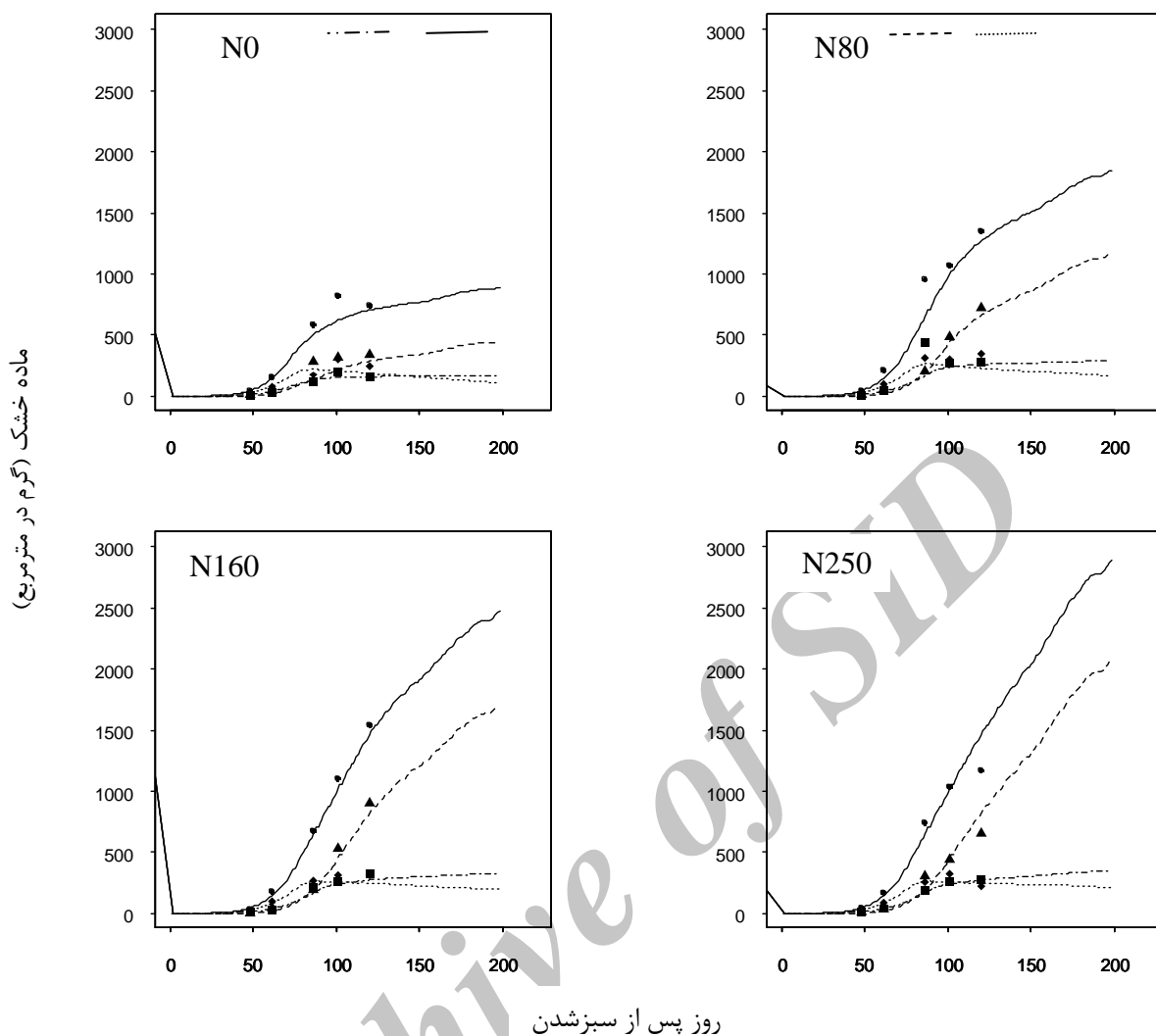
P_i : مقادیر پیش بینی شده، O_i : مقادیر اندازه گیری شده، n : تعداد مشاهدات، \bar{O} : میانگین داده های اندازه گیری شده.

بدیهی است که کمتر بودن این شاخص، دقت بالاتر مدل را در پیش بینی عملکرد نشان می‌دهد. علاوه بر شاخص جذر میانگین مربعات خطا، در این تحقیق از خط ۱:۱ و نیز رگرسیون خطی برای مقایسه نتایج مدل با واقعیت استفاده گردید.

نتایج و بحث

واسنجی مدل

بر اساس روش گام به گام در واسنجی مدل، ابتدا صفات اندازه گیری شده در طول فصل مانند بیوماس کل، تخصیص بیوماس به برگ‌ها، دمبرگ‌ها، ریشه‌ها و اندام ذخیره ای و نیز شاخص سطح برگ با مقادیر پیش بینی شده آن‌ها مقایسه شد (شکل‌های ۲ و ۳) و سپس متغیرهایی انتهایی فصل مانند عملکرد و بیوماس نهایی واسنجی شدند. نتایج حاصل از واسنجی بیوماس کل، برگ‌ها، دمبرگ‌ها و اندام ذخیره ای نشان دهنده توافق نسبتاً خوبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده است (جدول ۲). به این صورت که در مراحل اولیه رشد، مدل در تمامی تیمارها برآورد بسیار خوبی از مقادیر شبیه سازی شده داشته اما اواسط رشد میزان آریبی در برآورد بیشتر بوده است. به طوری که مقادیر شبیه سازی شده ماده خشک برگ‌ها و دمبرگ‌ها در بسیاری از تیمارها بیش از مقادیر اندازه گیری شده، است. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود جذر میانگین مربعات خطا به طور متوسط در اندام‌های مختلف در دامنه ۱۵-۲۴ درصد است. (Jamieson *et al.*, 1998) گزارش کردند که چنانچه مقدار عددی جذر میانگین مربعات خطا در دامنه ۲۰-۱۰



شکل ۲- نتایج شبیه سازی شده (خطوط) و مشاهده شده (علامت) تجمع ماده خشک در برگ ها (◆) ، دمبرگ ها (■) ، اندام های ذخیره ای (▲) و کل گیاه (●) در تیمارهای مختلف نیتروژن.

بر اساس تیمار صفر کیلوگرم نیتروژن در هکتار واسنجی و برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شد (جدول ۳). بعد از این مرحله تا انتهای دوره رشد، شاخص تغذیه نیتروژن به شدت افت کرد و به کمتر از ۰/۲۵ رسید. در چنین شرایطی تقاضای نیتروژن توسط گیاه تنها از طریق عرضه یک منبع خارجی نیتروژن (کود) امکان پذیر می باشد. برآورده نشدن تقاضای نیتروژن گیاه در چنین شرایطی (عدم کاربرد کود) باعث تجمع پایین نیتروژن در اندام ها به ویژه برگ ها شده که نتیجه آن کاهش غلظت نیتروژن و در نتیجه، فتوسنتز کانوپی است.

واکنش گیاه به تنش نیتروژن

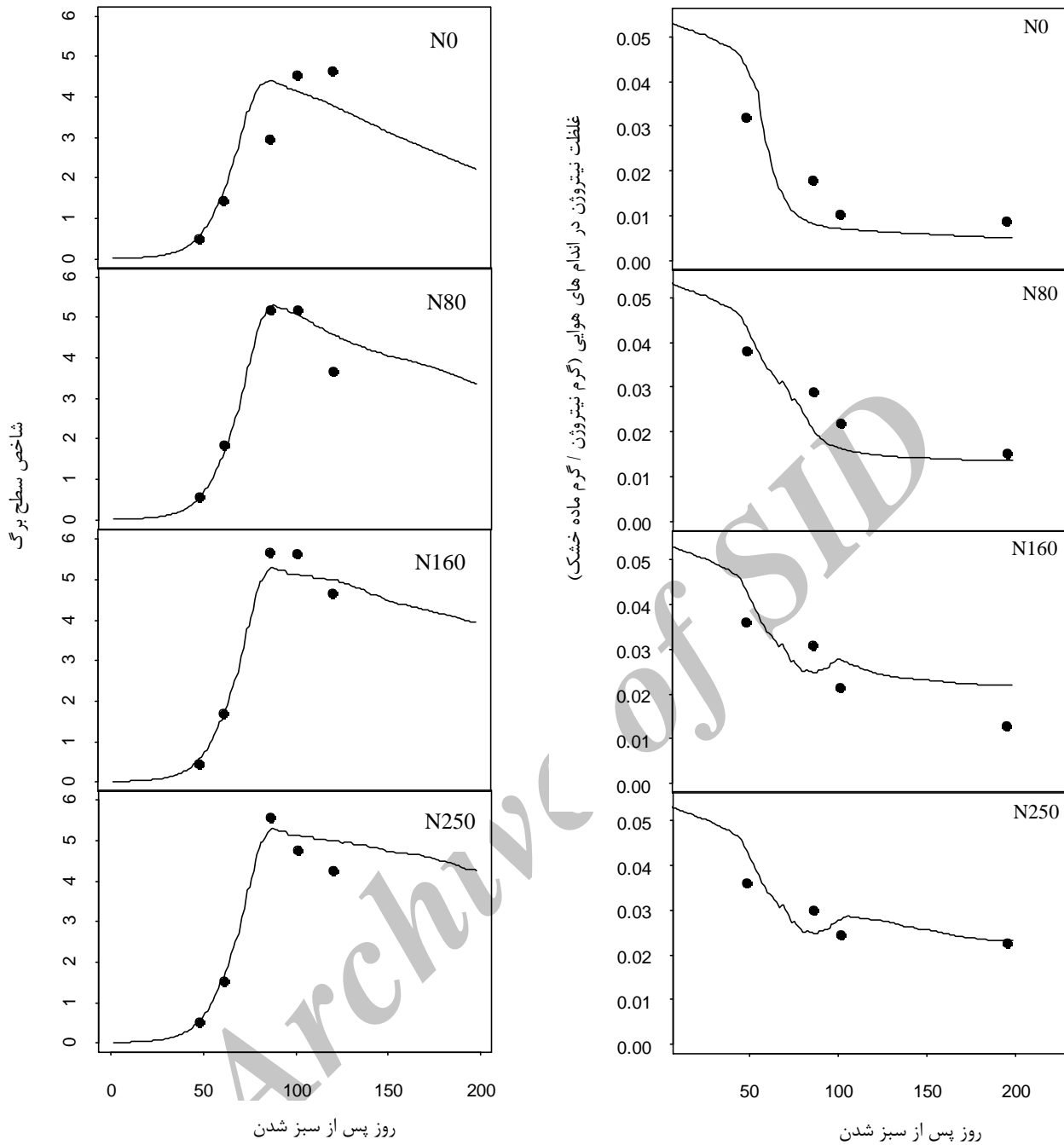
مقادیر شبیه سازی شده شاخص تغذیه نیتروژن در تیمارهای مختلف (شکل ۴) نشان دهنده واکنش روشن چغندر قند به کاربرد نیتروژن است. در تیمار عدم کاربرد کود، مقدار واسنجی شده نیتروژن داخلی خاک (INDGSN) به اندازه ای بوده است که گیاه را تا حدود ۷۰ روز پس از سبز شدن در شرایط بدون محدودیت نیتروژن قرار دهد (البته مقدار نیتروژن اولیه در خاک نیز در این مورد حائز اهمیت است). پارامتر نیتروژن داخلی خاک که تابعی از برخی خصوصیات خاک مانند بافت، ماده آلی، سیستم مدیریتی خاک و نیز مرحله نموی می باشد،

جدول ۲- مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (درصد) برای صفات واسنجی شده در طول فصل رشد با استفاده از داده های به دست آمده از آزمایش مزرعه ای.

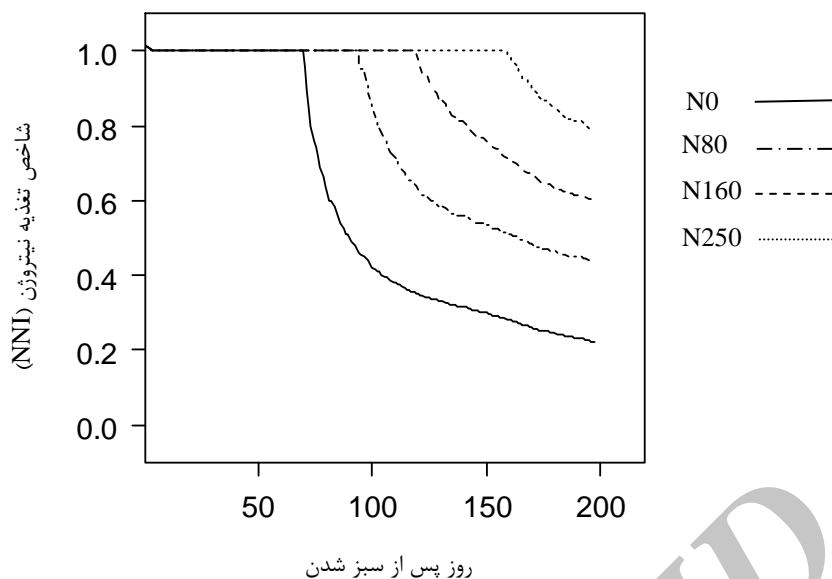
جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)							
تیمار	ماده خشک برگ سبز	ماده خشک دمبرگ	ماده خشک اندام	ماده خشک کل	شاخص سطح برگ	غلظت نیتروژن در اندام های هوایی	میانگین
۰	۳۳	۲۰	۳۹	۱۹	۲۸	۳۳	۲۸/۶
۸۰	۲۸	۵۵	۱۰	۱۸	۱۲	۱۸	۲۳/۵
۱۶۰	۱۸	۱۶	۱۰	۵	۹	۱۶	۱۲/۲
۲۵۰	۱۷	۵	۳۲	۲۳	۱۲	۱۳	۱۷
میانگین	۲۴	۲۴	۲۲/۷	۱۶/۱	۱۵/۲	۲۰	-

برسد. با آنکه روند شبیه سازی شاخص سطح برگ توسط مدل سوکرزبیت، تقریباً در تمامی تیمارهای نیتروژن یکسان بود، لیکن شیب کاهش سطح برگ به دلیل پیری آن، در تیمار صفر کیلوگرم نیتروژن درهکتار خیلی بیشتر بود.

(از طریق تاثیر شاخص تغذیه نیتروژن بر فتوسنتز کانوپی در مدل). کاهش فتوسنتز کانوپی خود عرضه آسیمیلات ها را به سمت اندام ها (به ویژه برگ ها) کاسته، و این مساله باعث کاهش رشد سطح برگ شده است. همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می شود در شرایط عدم کاربرد کود، گیاه نتوانسته به حداکثر شاخص سطح برگ (۵/۲)



شکل ۳- مقایسه نتایج شبیه سازی شده (خطوط) و مشاهده شده (نقاط) شاخص سطح برگ و غلظت نیتروژن اندام های هوایی در تیمارهای مختلف نیتروژن.



شکل ۴- تغییرات شاخص تغذیه نیتروژن (NNI) در طول فصل رشد چغندر قند در تیمارهای مختلف نیتروژن.

و می‌تواند در مراحل بعدی رشد، مورد استفاده گیاه قرار گیرد (Shangguan *et al.*, 2004).

نکته قابل توجه اینکه حتی در بالاترین مقدار کاربرد نیتروژن (۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) نیز تقاضای نیتروژن در چغندر قند به طور ۱۰۰ درصد تامین نگردید. با در نظر گرفتن کسر بازیافت نیتروژن در مدل (NRF) بعد از واسنجی، عملاً حدود ۲۵-۷۰٪ از کل نیتروژن به کاربرد شده در قالب کود، مورد استفاده گیاه در طول فصل رشد قرار نگرفته و به صورت های مختلف از جمله آبشویی و تصعید از دسترس گیاه خارج شده است. از سوی دیگر به توجه به طولانی بودن دوره رشد چغندر قند و حجم بالای بیوماس تولیدی توسط اندام های هوایی و اندام ذخیره ای (۲۸/۸ مگاگرم در هکتار ماده خشک کل اندام ها در بالاترین دز کاربرد نیتروژن)، تقاضای نیتروژن کل گیاه تا انتهای فصل تامین نشد و باعث بروز دوره اندکی تنش نیتروژن گردید. در چنین شرایطی، علاوه بر کاربرد بیشتر کود، که می‌تواند تقاضای گیاه را به طور کامل تامین کند و شاخص NNI را در تمام دوره رویش گیاه در مقدار ۱ نگه دارد، مدیریت صحیح و بهینه کود نیتروژن نیز میزان تلفات نیتروژن را به حداقل رسانده (افزایش NRF) و نیتروژن بیشتری را در دسترس گیاه قرار دهد.

عدم رسیدن گیاه به حداکثر شاخص سطح برگ، کاهش دریافت نور را به همراه داشته که نتیجه آن به حداقل رسیدن بیوماس و عملکرد تولیدی در تیمار عدم کاربرد کود است. بر همین اساس، عملکرد شبیه سازی شده از ۲۱/۵ مگاگرم در هکتار در تیمار عدم کاربرد نیتروژن تا ۱۰۳/۴ مگاگرم در هکتار در تیمار ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار متغیر بود. (Gammelvind *et al.*, 1996) نیز در تحقیقات خود به نتایج مشابهی دست یافتند. آن‌ها بیان داشتند که عدم فراهمی نیتروژن برای گیاه، آسیمیلاسیون کربن را از طریق تاثیر بر سرعت فتوسنتز، سطح برگ و نفوذ تشعشع فعال فتوسنتزی به درون کانوپی تحت تاثیر قرار می‌دهد.

با افزایش کاربرد کود نیتروژن، دوره ای که طی آن گیاه در شرایط عدم محدودیت نیتروژن رشد یافت، افزایش پیدا کرد (از ۷۰ روز در تیمار صفر به ۱۵۹ روز) به طوری که تقاضای چغندر قند برای جذب نیتروژن در مقایسه با سایر تیمارها به مقدار بیشتری تامین گردید. به طور مثال، در تیمار ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، گیاه تنها دوره کوتاهی از مراحل انتهایی رشد رویشی چغندر قند، در معرض تنش نیتروژن بوده است (۴۱ روز). باید توجه داشت که مقادیر بیشتر کاربرد نیتروژن، منجر به جذب بیشتر نیتروژن گردیده که قابل ذخیره در بافت های گیاهی است (البته تا حد غلظت حداکثر نیتروژن در گیاه)

جدول ۳- تعدادی از پارامترهای مربوط به رشد و نمو و بیلان نیتروژن در مدل SUCROSBEET.

واحد	مقدار	تعریف	علایم پارامترها در مدل*
-	۰ و ۱	فاکتور تعیین کننده روش کوددهی در مدل (دستی یا اتوماتیک)	FERNF
$\text{gN m}^{-2} \text{d}^{-1}$	۰/۰۱	مقدار نیتروژنی که روزانه در اثر فرآیند های تثبیت نیتروژن، تجزیه و معدنی شدن ماده آلی به خاک اضافه می شود.	INDGSN
-	۱،۰۰-۱	فاکتور تعیین کننده ورودی آب در مدل (بارندگی، آبیاری دستی، آبیاری اتوماتیک)	IRRIGF
$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$	۴	شاخص سطح برگ بحرانی	LAICR
gN (gDM)^{-1}	۰/۰۱۳	حداکثر غلظت نیتروژن در اندام ذخیره ای	NMAXSO
gN (gDM)^{-1}	۰/۰۰۶	حداقل غلظت نیتروژن در اندام ذخیره ای	NMINSO
$\text{gN m}^{-2} \text{d}^{-1}$	۰/۳	حداکثر سرعت جذب روزانه نیتروژن توسط گیاه	NMAXUP
d^{-1}	۰/۰۱	سرعت نسبی مرگ برگ ناشی از کمبود نیتروژن	RDRNS
$(^{\circ}\text{Cd})^{-1}$	۰/۰۰۱۹	سرعت نسبی رشد سطح برگ در مرحله رشد نمایی	RGRL
gN (gL)^{-1}	۰/۰۱۸۰	نیتروژن باقیمانده در برگ ها بعد از پیری	RNCLV
$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$	۰/۰۲	سطح برگ ویژه	SLA

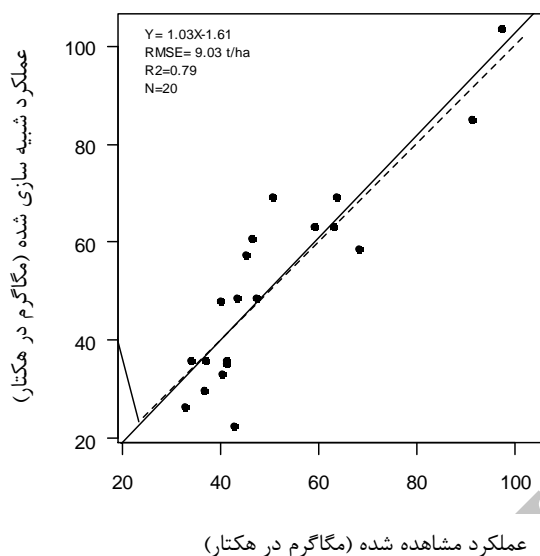
* تعدادی از این پارامترها از منابع تحقیقاتی، برخی از طریق اندازه گیری و تخمین، و بعضی دیگر با استفاده از واسنجی مدل به دست آمده است.

توصیف کرد. مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای این متغیر حدود ۹ مگاگرم در هکتار بود که رقم نسبتا قابل قبولی برای یک مدل ساده مثل سوکرزیت می باشد. (Soltani *et al.*, 2005) در تحقیق خود بر روی تعیین اعتبار مدل SBEET که مدل ساده ای برای برآورد عملکرد چغندر قند در شرایط پتانسیل و محدودیت آب می باشد، مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای عملکرد ریشه را ۱۱/۷ مگاگرم در هکتار و قابل قبول اعلام کردند. نتایج آن ها همچنین نشان دادند که از این مدل می توان در مطالعات شبیه سازی عملکرد پتانسیل اقلیمی چغندر قند و تجزیه و تحلیل آن در رابطه با عوامل محیطی استفاده کرد.

از آنجایی که واسنجی، نتایج نسبتا قابل قبولی را برای بیوماس کل، بیوماس برگ ها و دم برگ ها، شاخص سطح برگ و غلظت نیتروژن در اندام های هوایی سبز نشان داد، لذا مدل سوکرزیت با داده های مستقل دیگری تعیین اعتبار شد که در ادامه به آن پرداخته شده است.

تعیین اعتبار مدل

نتایج تعیین اعتبار مدل برای عملکرد اندام ذخیره ای، در شکل ۵ نشان داده شده است. مدل تغییر یافته سوکرزیت برآورد نسبتا قابل قبولی برای عملکرد تر اندام ذخیره ای به همراه داشت. مقادیر عملکرد مشاهده شده در محدوده ۳۲/۷ تا ۹۷/۴ با میانگین ۵۱/۱ مگاگرم در هکتار بود و به طور کلی مدل ۷۹٪ از تغییرات مشاهده شده عملکرد را



شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده عملکرد اندام ذخیره ای چغندر قند در تیمارهای مختلف نیتروژن. داده ها مربوط به آزمایش انجام شده توسط مولف و نتایج آزمایش کرمی و نادری (۱۳۸۷) می باشد. خط رگرسیون به صورت پیوسته و خط ۱:۱ به صورت نقطه چین نمایش داده شده است.

نتیجه گیری

مدل جدید سوکرزیت که در این مقاله به آن پرداخته شد، فرآیندهای اصلی رشد گیاه زراعی را که در نسخه های پیشین آن (سوکرز ۱ و سوکرز ۲) توصیف شده بود (Goudriaan and van Laar, 1994)، با فرآیندهای مربوط به بیلان نیتروژن خاک - گیاه ترکیب کرد. سپس مدل حاضر با استفاده از نتایج دو آزمایش برای گیاه چغندر قند پارامترسازی شد. در این مدل فرآیندهای مهم مرتبط با تغییرات نیتروژن در خاک مانند نیتریفیکاسیون، دنیتریفیکاسیون، آبشویی نترات و غیره به صورت جزء به جزء و مکانیزم گرا مدل سازی نشده بلکه تنها با استفاده از چندین پارامتر که وابسته به منطقه و فصل هستند، در مدل وارد گردید (همانند روش استفاده شده در مدل ORYZA2000 (Bouman and van Laar, 2006)). از این رو، رطوبت خاک تاثیر مستقیم بر پویایی نیتروژن در خاک نداشته و تنها از طریق پارامتری بر جذب نیتروژن توسط گیاه تاثیرگذار بود. به طور کلی مدل سوکرزیت به تیمارهای مختلف نیتروژن واکنش خوبی نشان داد. مدل همچنین پیش بینی بهتری از ماده خشک کل اندام ها نسبت به هر کدام از آن ها (به تفکیک برگ ها، دمبرگ

نتایج تعیین اعتبار مدل سوکرزیت همچنین نشان داد که در دزهای پایین کاربرد نیتروژن، برآورد مدل کمتر و در دزهای بالا، بیشتر از مقدار مشاهده شده آن ها است (شکل ۵). به طور کلی نتایج تعیین اعتبار مطالعه حاضر نشان داد که مدل سوکرزیت قابلیت نسبتا خوبی در تخمین عملکرد چغندر قند در شرایط پتانسیل و نیز محدودیت نیتروژن داشته و می توان از آن در مطالعات تخمین خلاء عملکرد و نیز پهنه بندی استفاده کرد. مدل سوکرز تا کنون در بسیاری از مطالعات و در مناطق مختلف برای پیش بینی تولید و عملکرد گندم (Bannayan and Crout, 1999)، جوانه زنی و رشد اولیه در چغندر قند (Guerif and Duke, 1998)، اثرات تغییر اقلیم بر رشد گندم (Nonhebel, 1996) با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. Utset *et al.* (2007) نیز در تحقیق مشابه، عملکرد چغندر قند را در شرایط مدیریتانه ای اسپانیا با اعتبار سنجی مدل SWAP، برابر با ۸۹ مگاگرم در هکتار شبیه سازی کردند و اظهار داشتند که اگرچه جذرمیانگین مربعات خطا برای تبخیر و تعرق کمی زیاد بود، اما همبستگی خوبی میان مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده عملکرد وجود داشت ($r = 0.71$).

برای گیاهان زراعی دیگر، تنها با تغییر پارامترها و توابع مربوط به غلظت های حداکثر و بحرانی نیتروژن، استفاده نمود. با این حال باید توجه داشت که اثرات تنش نیتروژن بر رشد از طریق کاهش سطح برگ و یا فتوسنتز، بسته به گونه گیاه زراعی متفاوت می باشد که بایستی آن را مد نظر قرار داد (Lemaire *et al.*, 2008).

ها و اندام ذخیره ای) داشت. نتایج مدل حاضر نشان داد که اثرات محدودیت نیتروژن بر تولید کل ماده خشک به خوبی شبیه سازی شده است در حالی که شبیه سازی تخصیص بیوماس بین اندام نیازمند ارزیابی بیشتر با استفاده از داده های آزمایشی متنوع تری از شرایط محیطی مختلف است.

رهیافت مدل سازی بیلان نیتروژن که در مدل سوکرزیت به کار گرفته شد، این امکان را می دهد تا بتوان آن را

منابع

- Bannayan, M. and Crout, N.M.J., 1999. A stochastic modeling approach for real-time forecasting of winter wheat yield. *Field Crops Research*. 62, 85-95.
- Bouman, B.A.M., Kropff, M.J., Tuong, T.P., Wopereis, M.C.S., ten Berge, H.F.M. and van Laar, H.H., 2001. ORYZA2000: Modelling Lowland Rice. International Rice Research Institute, philippine.
- Bouman, B.A.M. and van Laar, H.H., 2006. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. *Agricultural Systems*. 87, 249-273.
- Boons-Prins, E.R., de Koning, G.H.J., van Diepen, C.A. and Penning de Vries, F.W.T., 1993. Crop-specific Simulation Parameters for Yield Forecasting across the European Community. CABO-DLO, Wageningen, Netherlands.
- Boot, K., 2003. Systematic approach and order for calibration. In: Hoogenboom, G., Jones, J.W., Porter, C.H., Wilkens, P.W., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A. and Tsuji G.Y. (Eds.), *Decision Support System for Agrotechnology Transfer*. University of Hawaii, Honolulu, USA.
- De Datta, S.K., 1986. Improving nitrogen fertilizer efficiency in lowland rice in tropical Asia. *Fertilizer Research*. 9, 171-186.
- Drenth, H., ten Berge, F.F.M. and Riethoven, J.J.M., 1994. ORYZA Simulation Modules for Potential and Nitrogen Limited Rice Production. SARP Research Proceedings, Wageningen, Netherlands.
- Gabrielle, B., Denoroy, P., Gosse, C., Jones, F. and Andersen, M.N., 1998a. A model of leaf area development and senescence for winter oilseed rape. *Field Crops Research*. 57, 209-222.
- Gammelvind, L.H., Schjoerring, J.K., Mogensen, V.O., Jensen, C.R. and Bock, J.G.H., 1996. Photosynthesis in leaves and siliques of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Plant and Soil*. 186, 227-236.
- Gastal, F. and Lemaire, G., 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*. 53, 789-799.
- Goudriaan, J. and van Laar, H.H., 1994. *Modelling Potential Crop Growth Processes. Textbook with Exercises*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Guerif, M. and Duke, C.L., 1998. Calibration of the SUCROS emergence and early growth module for sugar beet using optical remote-sensing data assimilation. *European Journal of Agronomy*. 9, 127-136.
- Hammer, G.L., Sinclair, T.R., Boote, K.J., Wright, G.C., Meinke, H. and Bell, M.J., 1995. A peanut simulation model: 1. Model development and testing. *Agronomy Journal*. 87, 1085-1093.
- Hanks, J. and Ritchie, J.T., 1991. *Modeling Plant and Soil Systems*. American Society of Agronomy, USA.
- Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Brooking, I.R. and Francis, G.S., 1998. Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation. *European Journal of Agronomy*. 8, 161-179.
- Jeuffroy, M.H. and Recous, S., 1999. Azodyn: A simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European Journal of Agronomy*. 10, 129-144.
- Jones, J.W., Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., Thornton, P.K., Wilkens, P.W., Imamura, D.T., Bowen, W.T. and Singh, U., 1998. Decision support system for agrotechnology transfer. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dor-drecht, The Netherlands. pp. 157- 177.
- Karimi, A. and Naderi, M., 2008. Different levels of irrigation and nitrogen effects on quantitative and qualitative yield and water use efficiency of Sugarbeet. *Agricultural Sciences and Technology*. 21(1), 235-246.

- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M. and Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*. 18, 267–288.
- Lemaire, G., van Oosterom, E., Jeuffroy, M.H., Gastal, F. and Massignam, A., 2008. Crop species present different qualitative types of response to N deficiency during their vegetative growth. *Field Crops Research*. 105, 253-265.
- Meinke, H., 1996. Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping systems perspective. Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- Muchow, R.C., 1990. Effect of leaf nitrogen and water regime on the photosynthetic capacity of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) under field conditions. *Australian Journal of Agricultural Research*. 41, 845-852.
- Nassiri, M., Koocheki, A., Kamali, G.A. and Shahandeh, H., 2006. Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 52 (1), 113-124.
- Nonhebel, S., 1996. Effects of temperature rise and increase in CO₂ concentration on simulated wheat yields in Europe. *Climate Change*. 34, 73-90.
- Olesen, J.E., Petersen, B.M., Berntsen, J., Hansen, S., Jamieson, P.D. and Thomsen, A.G., 2002. Comparison of methods for simulating effects of nitrogen on green area index and dry matter growth in winter wheat. *Field Crops Research*. 74 (2-3), 131-149.
- Parsa, S., 2008. Modelling spatial and temporal variation of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield in Khorasan province. Ph.D. Thesis. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- Porter, J.R., 1993. AFRCWHEAT2: A model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *European Journal of Agronomy*. 2, 69–82.
- Rappoldt, C. and van Kraalingen, D.W.G., 1996. The Fortran Simulation Translator, FST version 2.0. Introduction and Reference Manual. Quantitative Approaches in Systems Analysis, Wageningen, The Netherlands.
- Shangguan, Z.P., Shao, M.A., Ren, S.J., Zhang, L.M. and Xue, Q., 2004. Effect of nitrogen on root and shoot relations and gas exchange in winter wheat. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*. 45, 49–54.
- Shibu, M.E., Leffelaar, P.A., van Keulen, H. and Aggarwal, P.K., 2010. LINTUL3, a simulation model for nitrogen-limited situations: Application to rice. *European Journal of Agronomy*. 32, 255–271.
- Soltani, A., Gholipour, M. and Haji-Zadeh, A., 2005. SBEET: A simple model for simulating sugar beet yield. *Agricultural Sciences and Technology*. 19 (2), 11-26.
- Spitters, C.J.T. and Schapendonk, A.H.C.M., 1990. Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. *Plant and Soil*. 123, 193–203.
- Stockle, C.O., Donatelli, M. and Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*. 18, 289 - 307.
- ten Berge, H.F.M., Thiyagarajan, T.M., Shi, Q., Wopereis, M.C.S., Drenth, H. and Jansen, M.J.W., 1997. Numerical optimization of nitrogen application to rice. Part I. Description of MANAGE-N. *Field Crops Research*. 51, 29-42.
- Utset, A., Velicia, H., del Ri'o, B., Morillo, R., Centeno, J.A. and Mart'inez, J.C., 2007. Calibrating and validating an agrohydrological model to simulate sugar beet water use under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*. 94, 11–21
- Vandendriessche, H.J., 2000. A model of growth and sugar accumulation of sugar beet for potential production conditions: SUBEMOpo. II. Model performance. *Agricultural Systems*. 64, 21-35.
- van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L. and Goudriaan, J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*. 18, 201–234.
- van Keulen, H., Goudriaan, J. and Seligman, N.G., 1988. Modelling the effects of nitrogen on canopy development and crop growth. In: Russel, G., Marshall, B., Jarvis, P.G. (Eds.), *Plant Canopies: Their Growth, Form and Function*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- van Laar, H.H., Goudriaan, J. and van Keulen, H., 1997. SUCROS 97: Simulation of Crop Growth for Potential and Water-limited Production Situations, as Applied to Spring Wheat. *Quantitative Approaches in Systems Analysis*, Wageningen, The Netherlands.
- Vos, J. and van der Putten, P.E.L., 1998. Effect of nitrogen supply on leaf growth, leaf nitrogen

- economy and photosynthetic capacity in potato. *Field Crops Research*. 59, 63 –72.
- Vos, J., van der Putten, P.E.L. and Birch, C.J., 2005. Effect of nitrogen supply on leaf appearance, leaf growth, leaf nitrogen economy and photosynthetic capacity in maize. *Field Crops Research*. 93, 64 –73.
- Wang, E., Robertson, M.R., Hammer, G.L., Carberry, P., Holzworth, D., Hargreaves, J., Huth, N., Chapman, S., Meinke, H. and McLean, G., 2003. Design and implementation of a generic crop module template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy*. 18, 121-140.
- Yin, X. and van Laar, H.H., 2005. Crop System Dynamic: An Ecophysiological Simulation Model of Genotype-by-Environment Interactions. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands.
- Zhen, R.G. and Leigh, R.A., 1990. Nitrate accumulation by wheat (*Triticum aestivum* L.) in relation to growth and tissue N concentrations. In: van Beusichem, M.L. (Eds.), *Plant Nutrition Physiology and Applications*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. pp. 17–20.
- Zuidema, P.A., Leefelaar, P.A., Gerritsma, W., Mommer, L. and Anten, N.P.R., 2005. A physiological production model for cocoa (*Theobroma cacao*): model presentation, validation and application. *Agricultural Systems*. 84, 195 –225.

Archive of SID

SUCROSBEET: A simple model for simulating growth and development of sugar beet under potential and nitrogen-limited conditions

Reza Deihimfard,^{1,2*} Mehdi Nassiri Mahallati¹ and Alireza Koocheki¹

¹Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

²Department of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran.

*Corresponding author: deihim@sbu.ac.ir

Abstract

Crop simulation models have been widely used to simulate growth and development of crops under various production situations. Sugar beet is one of the most important field crops in Iran particularly in Khorasan province. This study aimed to modify SUCROS model (that only simulates potential and water-limited crop growth) for using under nitrogen-limited conditions. Accordingly, a simple subroutine for nitrogen balance was added to the previous version. So, the new model dubbed as SUCROSBEET, is an adapted version of the old one, including nitrogen limitation. Nitrogen stress in the new model was defined through the nitrogen nutrition index (NNI): the ratio of actual nitrogen concentration and critical nitrogen concentration in the plant. This paper describes the model and details of model calibration and testing using independent data sets of nitrogen treatments (with fertilizer rates of 0–270 kgN ha⁻¹) under varying environmental conditions. In general, the model responded well to nitrogen stress in all the treatments. However, the model underestimated the growth at lower level of nitrogen application and overestimated at higher levels. The simulated average yield was somehow similar to its observed value with root mean square error of 9 Mg ha⁻¹. It is concluded that the modified model could be reasonably used to simulate sugar beet yield under both potential and N-limited situations. Also, the enhancement of its capability is enabled the model to estimate yield gap and agro-zoning at a national scale.

Keywords: Sugar beet, Modelling, SUCROS, Nitrogen.