



دانشگاه گیلان

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی  
جلد بیست و دوم، شماره سوم، ۱۳۹۴  
<http://jopp.gau.ac.ir>

## پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iLegume برای پیش‌بینی رشد و عملکرد سویا در شرایط گرگان

\*علیرضا نه‌بندانی<sup>۱</sup>، افشین سلطانی<sup>۲</sup>، ابراهیم زینلی<sup>۳</sup>، سامیه رئیسی<sup>۴</sup> و روح‌الله رجیبی<sup>۵</sup>  
<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، استاد گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی  
و منابع طبیعی گرگان، <sup>۲</sup>دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، <sup>۳</sup>استادیار مرکز تحقیقات  
کشاورزی و منابع طبیعی، <sup>۴</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان  
تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۴

### چکیده

**سابقه و هدف:** مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی نمود ریاضی فرآیندهای رشد گیاه بوده که توسط روابط بین ژنوتیپ، محیط‌زیست و مدیریت محصول تحت تأثیر قرار می‌گیرند. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به‌عنوان مکملی کارگشا برای تحقیقات آزمایشی مطرح است. این مدل‌ها می‌توانند برای تفسیر نتایج و بررسی بوم‌نظام زراعی در شرایط محیطی و مدیریت‌های متفاوت مورد استفاده قرار گیرند. اهداف این مطالعه، توصیف مدل SSM-iLegume، تعیین پارامترهای ژنتیکی ارقام سویا در گرگان و سرانجام گزارش نتایج ارزیابی مدل می‌باشد.

**مواد و روش‌ها:** مدل SSM-iLegume مراحل فنولوژیک را به‌عنوان تابعی از دما و طول روز پیش‌بینی می‌کند. محاسبه مراحل فنولوژی در مدل براساس مفهوم روز بیولوژیک (حداقل تعداد روز لازم برای تکمیل مرحله نمو معین در دما، طول روز و رطوبت مطلوب) می‌باشد. گسترش و پیر شدن سطح برگ تابعی از دما، نیتروژن فراهم برای رشد برگ، تراکم بوته و انتقال مجدد نیتروژن می‌باشد. برای شبیه‌سازی گسترش سطح برگ، گام اول تعیین افزایش تعداد برگ در ساقه اصلی در هر روز با استفاده از مفهوم فیلوکرون (واحد دمایی بین ظهور برگ متوالی) است.

\*مسئول مکاتبه: [a.nehbandani@yahoo.com](mailto:a.nehbandani@yahoo.com)

در این مدل تولید ماده خشک به‌عنوان تابعی از تشعشع دریافت شده و دما تخمین زده می‌شود. افزایش روزانه ماده خشک گیاه زراعی توسط تولید ناشی از تشعشع فعال فتوسنتزی برآورد می‌شود، که تابعی از تشعشع دریافت شده توسط گیاه زراعی (FINT) و کارایی استفاده از PAR جهت تولید ماده خشک گیاه، مانند کارایی استفاده از تشعشع، می‌باشد. تشکیل عملکرد در مدل با توجه به کل ماده خشک تولید شده در دوره پرشدن دانه و نیز ماده خشک تخصیص یافته به دانه به سادگی شبیه‌سازی می‌شود. مدل‌سازی سرعت رشد دانه‌ها و تشکیل عملکرد بر مبنای مفهوم افزایش خطی شاخص برداشت توسط سلطانی و سینکلر (۲۰۱۱) شرح داده شده است. مدل نیاز به داده‌های هواشناسی روزانه مانند حداقل و حداکثر دما، مقدار بارندگی و تشعشع خورشید دارد. مدل می‌تواند برای سناریوها/ تیمارهای متعدد برای بیش از چندین سال اجرا شود.

**یافته‌ها:** برای برآورد ضرایب و ارزیابی مدل از داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای مختلف استفاده شد. بعد از برآورد پارامترهای ژنتیکی، مدل با استفاده از داده‌های مستقل مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج حاکی از کارایی قابل قبول آن برای جنبه‌های مهم گیاه زراعی در مقابل آزمایشات مشاهده شده شامل روز تا گلدهی ( $RMSE=5/8$ ,  $CV=11$ ) روز تا رسیدگی ( $RMSE=8/7$ ,  $CV=6$ )، تعداد گره روی ساقه اصلی ( $RMSE=1/7$ ,  $CV=13$ ) و عملکرد دانه ( $RMSE=4/8$ ,  $CV=15$ ) بود.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داد که برآوردها برای متغیرهای مختلف قابل قبولی است. بنابراین، این مدل می‌تواند در مطالعات شبیه‌سازی عملکرد سویا و محدودیت‌های آن در واکنش به شرایط زیست‌محیطی، ورودی‌های مدیریتی و عوامل ژنتیکی استفاده شود.

**کلمات کلیدی:** مدل‌های گیاهان زراعی، سویا، مدل SSM، شبیه‌سازی

## مقدمه

سویا (*Glycine max*) یکی از مهمترین گیاهان زراعی روغنی در دنیا است. دانه سویا با بیش از ۱۸ درصد روغن و ۳۸ درصد پروتئین، یکی از مهمترین منابع تأمین روغن نباتی در جهان می‌باشد؛ علاوه بر آن، سویا به دلیل تثبیت نیتروژن، نقش زیادی در حاصلخیزی خاک و کاهش مصرف کود و همچنین بهبود وضعیت محیط‌زیست دارد (۱).

برای ارزیابی راه‌های افزایش عملکرد سویا، ابتدا باید پتانسیل عملکرد و عوامل محدود کننده عملکرد سویا (آب و هوا، خاک، آب و عوامل ژنتیکی) تعیین شده و سپس مورد بررسی قرار گیرند. برای این منظور می‌توان از آزمایش‌های مزرعه‌ای در نقاط مختلف و طی چند سال استفاده کرد تا از این طریق راه‌های بهبود مدیریت زراعی و بهبود ژنتیکی مشخص گردد، اما انجام این چنین آزمایشاتی می‌تواند بسیار زمان بر و پرهزینه باشد. امروزه مدل‌های شبیه‌سازی این امکان را فراهم ساخته‌اند تا با استفاده از آن‌ها، تیمارهای موردنظر را اجرا کرده و در زمان و هزینه صرفه‌جویی کرد. مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی جنبه‌های مختلف علمی شامل هواشناسی کشاورزی، فیزیک خاک، شیمی خاک و فیزیولوژی گیاهان زراعی را به‌وسیله روابط ریاضی برای پیش‌بینی رشد و نمو و عملکرد به‌کار می‌گیرند (۲۲). مدل‌های شبیه‌سازی برای درک واکنش گیاهان زراعی به پویایی سیستم آب-خاک-گیاه-اقلیم استفاده می‌شوند (۲۷). همچنین، از این مدل‌ها در ارزیابی صفات فیزیولوژیک برای بهبود عملکرد و کمک به تصمیم‌گیری برای به حداکثر رساندن استفاده از منابع قابل دسترس استفاده می‌شود (۳؛ ۳۰ و ۳۳).

از جمله مدل‌هایی که برای سویا استفاده شده است می‌توان به مدل EPIC (۳۶)، Sinclair- Soybean (۲۵)، SOYGRO (۱۰)، مدل CROPGRO-Soybean (۵)، APSIM (۱۲) و مدل SoySim (۲۳) اشاره کرد. علاوه بر مدل‌های یاد شده مدل دیگری به نام SSM-iLegume توسط سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲) برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی مختلف تهیه شده است (۲۹). این مدل دارای کد باز بوده و چون دارای ساختار ساده است برای اهداف آموزشی نیز قابل استفاده است. از آن جایی که مدل از صفحه گستر اکسل برای ورودی و خروجی استفاده می‌کند کار با آن ساده است. از این مدل می‌توان در موارد متعددی نظیر کاربردهای تحقیقاتی، مدیریت زراعی و آموزشی استفاده نمود. شبیه‌سازی فنولوژی و تولید ماده خشک در مدل SSM به‌دلیل استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های متفاوت و جدید در ساختار مدل برای بیان گسترش و پیر شدن برگ‌ها و همچنین توزیع

ماده خشک، نسبت به سایر مدل‌ها ساده‌تر بوده و نیاز به پارامترهای ورودی کمتری دارد. توجه به موازنه نیتروژن گیاه با استفاده از روش سینکسر و همکاران (۲۰۰۳) که بیشتر بر پایه جنبه‌های فیزیولوژیک گیاه بوده و نیاز به پارامترهای ورودی کمتری دارد (۲۴)، همچنین تولید عملکرد بر اساس روش بهبود یافته افزایش در شاخص برداشت (سلطانی و سینکسر، ۲۰۱۲)، مدل SSM را به گزینه مناسبی تبدیل می‌کند (۲۹).

استفاده از مدل SSM-iLegume در این مطالعه به دلایل زیر ترجیح داده شد:

- ۱- سایر مدل‌ها به اندازه کافی روشن و واضح نمی‌باشند. زیرا یک مدل مناسب باید دارای پارامترها، شکل‌ها و کدهای کاملاً مشخص و واضحی باشد.
- ۲- بیشتر مدل‌ها برای پیش‌بینی فرآیندهای کلیدی در گیاهان زراعی از معادلات و پارامترهای زیادی استفاده می‌کنند. در بعضی موارد ساختار مدل به قدری پیچیده است که حتی برای اعضای تیم سازنده مدل نیز واضح نیست. گاهی افزودن پیچیدگی در این مدل‌ها ضرورتی نداشته و منجر به افزایش خطا در آن‌ها می‌شود. کاربرانی که از مدل‌های جعبه سیاه استفاده می‌کنند نمی‌توانند به صورت شفاف ساختار مدل و محدودیت‌های آن را بدانند. همچنین مدل‌های پیچیده نیاز به وارد کردن ورودی‌های زیادی هستند که ممکن است به راحتی در دسترس نباشند.
- ۳- گاهی نرم‌افزار مدل ساده، واضح و انعطاف‌پذیر نیست. در بسیاری از موارد استفاده کننده از مدل نیازمند کمک گرفتن از افرادی است که اشراف کامل به مدل دارند.
- ۴- تعداد زیادی از مدل‌ها دارای یک یا چند پارامتر نامفهوم می‌باشند. در این مدل تمامی پارامترهای مربوط به گیاه زراعی و رقم به صورت واضح و شفاف بوده و همه قابل اندازه‌گیری مستقیم است. برای استفاده از مدل SSM-iLegume نیاز به تعیین ضرایب ژنتیکی (پارامتریابی) و ارزیابی مدل است. بنابراین، هدف از این مطالعه تعیین ضرایب ژنتیکی (پارامتریابی) ارقام سحر و DPX سویا برای استفاده در مدل SSM-iLegume و ارزیابی این مدل در شرایط گرگان بود.

## مواد و روش‌ها

به منظور شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد سویا با مدل SSM در شرایط اقلیمی استان گلستان، از داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای مستخرج از پایان‌نامه‌های اجرا شده در مزرعه تحقیقاتی دانشکده تولید گیاهی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و طرح‌های تحقیقاتی اجرا شده در مزرعه مرکز

تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گرگان روی دو رقم سحر و DPX سویا استفاده شد (جدول ۱).

جدول ۱- آزمایش‌های مورد استفاده برای برآورد پارامترها و ارزیابی مدل SSM\_iLegume

Table 1. Experiments used for parameterization and evaluation of SSM-iLegume model

منبع Reference	تیمارها Treatments	مکان و سال آزمایش Experimental location and year
آزمایش‌های مورد استفاده برای برآورد پارامترها Experiments used for parameter estimation		
(16)	رقم، تراکم Genotype, plant density	گرگان، ۲۰۱۰ Gorgan, 2010
(15)	رقم، تراکم Genotype, plant density	گرگان، ۲۰۰۶ Gorgan, 2006
آزمایش‌های مورد استفاده برای ارزیابی مدل Experiments used for model evaluation		
(19)	تاریخ کاشت، تراکم Genotype, planting date	گرگان، ۲۰۰۵ Gorgan, 2005
(21)	رقم، تراکم Genotype, plant density	گرگان، ۲۰۰۶ Gorgan, 2006
(18)	رقم، تاریخ کاشت Genotype, planting date	گرگان، ۲۰۰۱ Gorgan, 2001
(20)	رقم، آبیاری Genotype, irrigation	گرگان، ۲۰۰۵ Gorgan, 2005
(11)	رقم، تراکم Genotype, plant density	گرگان، ۲۰۰۰ Gorgan, 2000
(38)	رقم، تاریخ کاشت Genotype, planting date	گرگان، ۲۰۰۳ Gorgan, 2003
(8)	رقم، تاریخ کاشت Genotype, planting date	گرگان، ۲۰۱۱ Gorgan, 2011

ساختار مدل: این مدل توسط سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲) تهیه شده است (https://sites.google.com/site/afshinsoltani/-9-down) (۲۹). که توانایی شبیه‌سازی مراحل فنولوژی، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، موازنه نیتروژن گیاه، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد. پاسخ فرآیندهای گیاهی به عوامل محیطی مانند تشعشع خورشیدی، فتوپریود، حرارت،

نیترژن و آب قابل دسترس و تفاوت‌های ژنتیکی ارقام در مدل در نظر گرفته شده است. مدل شبیه‌سازی را به صورت روزانه انجام می‌دهد و از اطلاعات قابل دسترس آب و هوا و خاک استفاده می‌کند (۲۸). لازم به ذکر است که این مدل اثر آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز را بر روی گیاه در نظر نمی‌گیرد.

**فنولوژی:** مدل مراحل سبز شدن، شروع گلدهی، شروع غلاف‌دهی، شروع پرشدن دانه، رسیدگی فیزیولوژیک و رسیدگی برداشت را پیش‌بینی می‌کند. محاسبه مراحل فنولوژی در مدل براساس مفهوم روز بیولوژیک (حداقل تعداد روز لازم برای تکمیل مرحله نمو معین در دما، طول روز و رطوبت مطلوب) می‌باشد (۲۹). روز بیولوژیک با ضرب توابع دما و فتوپریود محاسبه می‌شود:

$$BD = f(T) \times f(P) \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه  $f(T)$  و  $f(P)$  به ترتیب توابع دمایی و فتوپریود هستند که به ترتیب سرعت نسبی نمو را در هر دما و فتوپریود نسبت به حالت مطلوب آن‌ها نشان می‌دهند. وقتی روز بیولوژیک برای یک مرحله فنولوژیک به مقدار معین برای آن مرحله برسد در نتیجه آن مرحله رخ خواهد داد.

مدل، واکنش سرعت نسبی نمو در سویا به میانگین دمای روزانه را با استفاده از یک تابع دندان مانند<sup>۱</sup> توصیف می‌کند (۲۷). پارامترهای مورد نیاز در این تابع شامل TBD: دمای پایه<sup>۲</sup>، TP1D: دمای مطلوب تحتانی<sup>۳</sup>، TP2D: دمای مطلوب فوقانی<sup>۴</sup> و TCD: دمای سقف<sup>۵</sup> می‌باشد.

مدل از تابع دوتکه‌ای برای کمی‌سازی واکنش سرعت نمو به فتوپریود استفاده می‌کند (۲۷). براساس این تابع، سرعت نمو در سویا (گیاه روز کوتاه) در طول روزهای کوتاه در حداکثر خود می‌باشد. پارامترهای موجود در این تابع شامل فتوپریود بحرانی و ضریب حساسیت به فتوپریود می‌باشد. فتوپریودی (PP، برحسب ساعت) که در آن به علت برخورد با روزهای بلند سرعت نمو شروع به کاهش می‌کند، فتوپریود بحرانی (CPP، برحسب ساعت) خوانده می‌شود.  $ppsen$  ضریب حساسیت به فتوپریود است.

- 
- 1- Dent-link
  - 2- Base Temperature for Development
  - 3- Lower Optimum Temperature for Development
  - 4- Upper Optimum Temperature for Development
  - 5- Ceiling Temperature for Development

مقادیر پارامترهای تابع دمایی و فتوپریود با توجه به منابع موجود برای سویا گروه رسیدگی ۳ در جدول ۲ آورده شده است (۲۹). هر دو رقم مورد استفاده در این مطالعه در گروه ۳ قرار دارند.

جدول ۲- دماهای کاردینال، طول روز بحرانی و ضریب حساسیت به فتوپریود در سویا.

Table 2. Cardinal temperatures, critical photoperiod and photoperiod sensitivity coefficient in soybean.

منبع References	مقدار Value	پارامتر Parameters
(16)	7 °C	دمای پایه (TBD) Base temperature for development
(16)	27 °C	دمای مطلوب تحتانی (TP1D) Lower optimum temperature for development
(16)	34 °C	دمای مطلوب فوقانی (TP2D) Upper optimum temperature for development
(16)	45 °C	دمای سقف (TCD) Ceiling temperature for development
(16)	13.4	فتوپریود بحرانی (CPP) Critical photoperiod
(16)	-0.285	ضریب حساسیت به فتوپریود (ppsen) در گروه رسیدگی ۳ Photoperiod sensitivity coefficient in maturity group III

با معلوم بودن مقادیر پارامترهای مورد استفاده در رابطه ۱، تعداد روز بیولوژیک موردنیاز برای رسیدن به هر مرحله نمو محاسبه شد. در محاسبات برای روزهای قبل از سبز شدن و بعد از مرحله رسیدگی فیزیولوژیک که سویا به فتوپریود حساس نمی‌باشد، مقدار تابع فتوپریود یک در نظر گرفته شد. روز بیولوژیک برای هر مرحله نمو از ابتدا تا انتهای فصل رشد سویا براساس مشاهدات مراحل فنولوژی توسط نه‌بندانی (۲۰۱۳) و نجفی (۲۰۰۶) محاسبه شد (۱۶ و ۱۵)، سپس با توجه به این‌که هر مرحله نموی در رقم سحر و DPX در چه بازه زمانی در مزرعه اتفاق افتاده بود، روز بیولوژیک موردنیاز برای طی شدن هر مرحله تعیین شد.

مدل به پارامترهای روز بیولوژیک از کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا شروع گلدهی، شروع گلدهی تا شروع غلاف‌دهی، شروع غلاف‌دهی تا شروع پرشدن دانه، شروع پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیک، رسیدگی فیزیولوژیک تا رسیدگی برداشت، آغاز پاسخ به فتوپریود، پایان پاسخ به فتوپریود، مرحله پایان تولید برگ در ساقه اصلی، مرحله پایان تولید برگ در بوته و آغاز تثبیت زیستی نیتروژن نیاز دارد که برای هر رقم محاسبه گردید (جدول ۳).

جدول ۳- مقادیر روز بیولوژیک برای ارقام سویا در مدل.

Table 3. Biological day values for soybean cultivars in model.

DPX	سحر Sahar	اختصار Abbreviation	پارامتر Parameters
6	6	bbSWEM	کاشت تا سبز شدن Sowing to emergence
18.5	18.5	bbEMR1	سبز شدن تا شروع گلدهی Sowing to beginning bloom
14.5	13	bbR1R3	شروع گلدهی تا شروع غلاف‌دهی Beginning bloom to beginning pod
7.5	4.5	bbR3R5	شروع غلاف‌دهی تا شروع پرشدن دانه Beginning pod to beginning seed
32	32	bbR5R7	شروع پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیک Beginning seed to beginning maturity
10	10.5	bbR7R8	رسیدگی فیزیولوژیک تا رسیدگی برداشت Beginning physiological maturity to maturity
6	6	bbBRP	آغاز پاسخ به فتوپریود Response to photoperiod begins
79.5	74	bbTRP	پایان پاسخ به فتوپریود Response to photoperiod terminates
22	15	bbR1TLM	شروع گلدهی تا پایان تولید برگ در ساقه اصلی Beginning bloom to termination of leaf production on main stem
25	25	bbR1TLP	شروع گلدهی تا پایان تولید برگ در بوته Beginning bloom to termination of leaf production on plant
46.5	42		سبز شدن تا شروع رشد دانه Sowing to termination seed growth
79.5	74	bbTSG	سبز شدن تا پایان رشد دانه Sowing to termination seed growth
6	6	bbBRG	سبز شدن تا آغاز رشد ریشه Sowing to beginning root growth
46.5	42	bbTRG	سبز شدن تا پایان رشد ریشه Sowing to termination root growth
12	12	bbBNF	سبز شدن تا آغاز تثبیت بیولوژیک نیتروژن Sowing to beginning biological nitrogen fixation

**تغییرات سطح برگ:** در مدل محاسبه افزایش سطح برگ در دو مرحله انجام می‌شود. مرحله اول تعیین تعداد گره در ساقه اصلی و سپس محاسبه سطح برگ براساس تعداد گره در ساقه است. تغییرات تعداد گره در مقابل واحد دمایی تجمعی دارای الگوی دو مرحله‌ای می‌باشد. با معکوس کردن سرعت ظهور برگ فیلوکرون به‌دست خواهد آمد. در مرحله اول، با افزایش واحد دمایی، تعداد برگ در ساقه



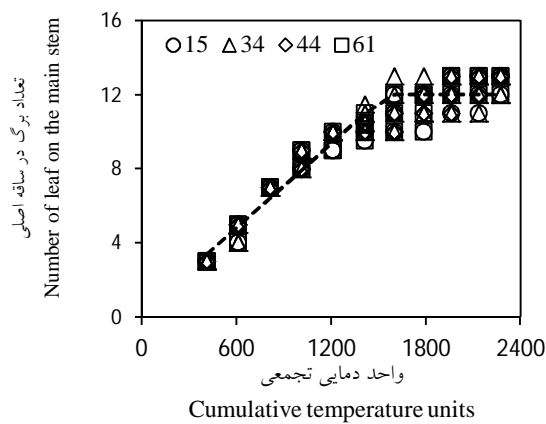
اصلی به صورت خطی افزایش پیدا می کند که شیب این خط عبارت از سرعت ظهور برگ (تعداد برگ به ازای هر درجه سانتی گراد) می باشد. در مرحله دوم، با رسیدن واحد دمایی به یک حد معین، افزایش تعداد برگ در ساقه اصلی متوقف می شود، یعنی افزایش در واحد دمایی، افزایشی در تعداد برگ در ساقه اصلی را به دنبال نخواهد داشت، که این زمان در واقع همان مرحله TLM (پایان تولید برگ در ساقه اصلی) می باشد. نهبندانی و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که در سویا تولید برگ در ساقه اصلی در مرحله R5 خاتمه می یابد (۱۷).

رابطه زیر به داده های تعداد گره در ساقه اصلی (y) در مقابل واحد دمایی تجمعی (x) در مطالعه نهبندانی (۲۰۱۳) و نجفی (۲۰۰۶) برازش داده شد (۱۶) و (۱۵):

$$y = a + bx \quad \text{اگر } x < x_0 \quad \text{رابطه ۲}$$

$$y = a + bx_0 \quad \text{اگر } x \geq x_0$$

که در آن a محل برخورد منحنی با محور عمودی ( $x = 0$ )، b سرعت افزایش خطی در تعداد برگ (برگ به ازای هر واحد افزایش در واحد دمایی)،  $x_0$  زمان خاتمه افزایش خطی در تعداد برگ می باشد. سرعت افزایش خطی در تعداد برگ برای رقم سحر و DPX به ترتیب  $0/0002 \pm 0/0099$  و  $0/0002 \pm 0/0076$  برگ بر واحد دمایی محاسبه شد. بنابراین مقدار فیلوکرون (که در واقع همان عکس سرعت ظهور برگ است) در رقم سحر معادل ۱۰۰ درجه سانتی گراد روز و در رقم DPX معادل ۱۳۲ درجه سانتی گراد روز محاسبه شد (جدول ۴).



شکل ۱- روند تولید برگ در ساقه اصلی در مقابل واحد دمایی تجمعی در رقم DPX. (منبع داده ها ۱۶).

Figure 1. Changes of node number on main stem versus cumulative temperature unit in cv. DPX. Data are from (16).

جدول ۴- ضرایب a، b و مقدار  $x_0$  رابطه بین تعداد گره در ساقه اصلی در مقابل واحد دمایی تجمعی (رابطه ۲) در رقم سحر و RMSE. DPX جذر میانگین مربعات خطا و  $R^2$  ضریب تبیین هستند.

Table 4. Coefficients a, b and  $x_0$  between node number on main stem versus cumulative temperature unit (Equation 2) in Sahar and DPX cultivars. RMSE is root mean square error and  $R^2$  is coefficient of determination.

رقم	$x_0 \pm se$	$a \pm se$	$b \pm se$	RMSE	$R^2$
سحر	$\pm 16.041267$	$\pm 0.15-0.68$	$\pm 0.00020.0099$	1.14	0.92
Sahar					
DPX	$1550 \pm 25.68$	$0.27 \pm 0.23$	$0.0076 \pm 0.0002$	0.80	0.94

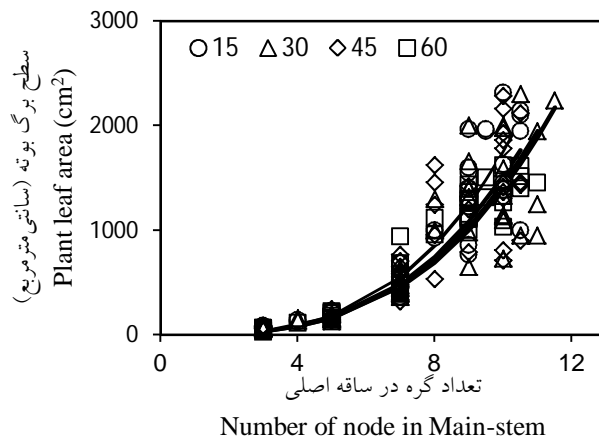
مرحله بعد محاسبه سطح برگ گیاه<sup>۱</sup> (PLA) بر حسب مترمربع در بوته) از تعداد کل گره در ساقه اصلی (MSNNi) است. شکل این رابطه عمدتاً به صورت توانی است (شکل ۲) (۲۸).

$$PLA = MSNN^{PLAPOW} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این رابطه PLAPOW ضریب ثابت می‌باشد. در مدل باید ضریب PLAPOW در تراکم ۳۰ بوته در مترمربع محاسبه شده و وارد شود. مدل مقدار ضریب برای سایر تراکم‌ها با توجه به رابطه شکل ۳ (ب) به صورت زیر محاسبه می‌کند:

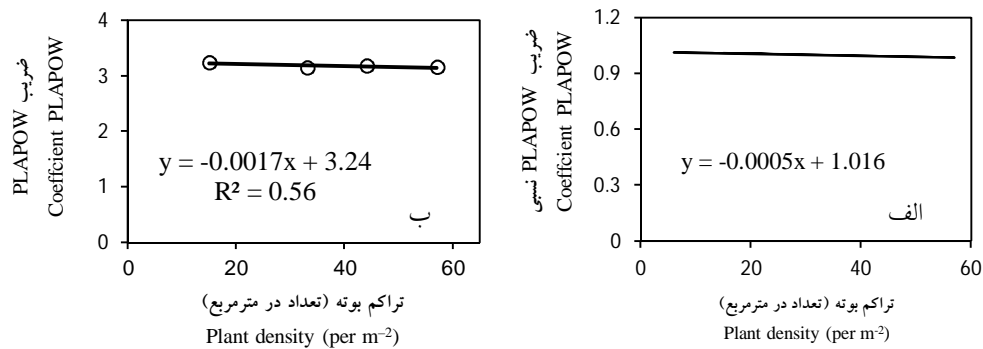
$$PLAPOW = PLAPOW30 * (1.016 - 0.0005 * PDEN) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن مقدار PLAPOW30 مقدار PLAPOW در تراکم ۳۰ بوته در مترمربع و PDEN تراکم بوته در مترمربع می‌باشد. رابطه ۳ به داده‌های تعداد برگ در ساقه اصلی در مقابل سطح برگ در تراکم ۳۰ بوته در مترمربع در رقم سحر و DPX برازش داده شد و مقدار ضریب PLAPOW30 به ترتیب ۳/۰۳۶ و ۳/۱۱ برای رقم سحر و DPX محاسبه شد.



شکل ۲- سطح برگ در بوته به عنوان تابعی از تعداد برگ روی ساقه اصلی توصیف شده به وسیله معادله  $PLA = MSNN^{PLAPOW}$  اعداد نشان دهنده تراکم بوته می باشند. (منبع ۱۶).

Figure 2. Plant leaf area as a function of main stem node number as described by a power equation ( $PLA = MSNN^{PLAPOW}$ ). Numbers indicate plant density. Data are from Nehbandani, 2013 (16).

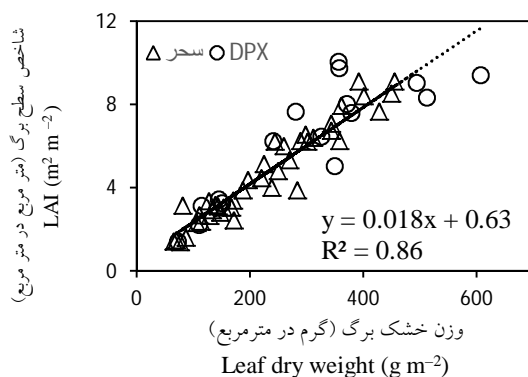


شکل ۳- (الف) اثر تراکم بر ضریب  $PLAPOW$  در سویا بر اساس داده های شکل ۲ و (ب) روند کاهشی ضریب  $PLAPOW$  نسبی در مقابل افزایش تراکم در ارقام سویا. (منبع ۱۶).

Figure 3. (A) The effect of plant density on the  $PLAPOW$  coefficient in soybean according to the data of Figure 2. and (B) Decreasing trend of  $PLAPOW$  coefficient versus density increase in soybean cultivars. Data are from (16).

محاسبه سطح برگ بعد از مرحله  $TLM$  نیاز به تخمین  $SLA$  دارد. شکل ۴ رابطه خطی بین سطح برگ و وزن خشک برگ بر اساس مطالعه نهبندانی (۲۰۱۳) و نجفی (۲۰۰۶) را نشان می دهد (۱۶) و (۱۵). شیب رابطه بین این دو متغیر میزان  $SLA$  می باشد. بررسی حدود اطمینان نشان داد که بین ارقام

از نظر میزان SLA اختلاف معنی‌داری وجود ندارد بنابراین، میزان SLA برای جمع داده‌های دو رقم سویا ۰/۰۱۸ مترمربع بر گرم محاسبه و در مدل استفاده شد.



شکل ۴- سطح برگ به‌عنوان تابعی از وزن خشک برگ در دو رقم سویا (سحر و DPX). شیب خط نشان‌دهنده سطح ویژه برگ می‌باشد. (منبع ۱۶ و ۱۵).

Figure 4. LAI as a function of leaf dry weight in two soybean cultivars (Sahar and DPX). The slope of the regression line is specific leaf area. Data are from (16) and (15).

مدل کاهش روزانه LAI (DLAI) را از سرعت روزانه کاهش نیتروژن برگ‌ها (XNLF) بر حسب گرم در مترمربع در روز) و نیتروژن ویژه برگ در برگ‌های سبز (SLNG) بر حسب گرم نیتروژن در مترمربع) و نیتروژن ویژه برگ در برگ‌های زرد (SLNS) بر حسب گرم نیتروژن در مترمربع) محاسبه می‌کند:

$$DLAI = XNLF / (SLNG - SLNS) \quad \text{رابطه (۵)}$$

XNLF به سرعت تجمع ماده خشک در دانه‌ها و وابستگی آن به نیتروژن برگ‌ها، بستگی دارد.

تولید و توزیع ماده خشک: در مدل تولید ماده خشک با روش ساده مبتنی بر کارایی استفاده از تشعشع (RUE<sup>1</sup>) پیش‌بینی می‌شود. مقدار PAR دریافت شده در هر روز (FINT) از شاخص سطح برگ و ضریب خاموشی نور (K برای PAR) بر اساس قانون بیر- بوگر- لامبرت در مدل محاسبه می‌شود (۲۶):

$$FINT = 1 - \exp(-K \times LAI) \quad \text{رابطه (۶)}$$

1- Radiation use efficiency

در مدل مقدار K برای تمام فصل رشد ثابت در نظر گرفته می‌شود. مقدار ماده خشک تولید شده در هر روز از حاصل ضرب PAR دریافت شده در RUE به دست می‌آید. RUE برای میانگین دمای روزانه و غلظت CO<sub>2</sub> قابل تعدیل است (۲۷).

مدل مقدار RUE در هر روز را از RUE در شرایط مطلوب IRUE و فاکتور تصحیح RUE برایدما (TCFRUE) محاسبه می‌نماید:

$$RUE = IRUE \times TCFRUE \quad (\text{رابطه ۷})$$

در مدل براساس منابع مقدار RUE در شرایط مطلوب برای سویا ۲ گرم برمگاژول در نظر گرفته شد (۲۹). اگرچه RUE تحت شرایط مطلوب رشد ثابت بوده ولی دماهای نامناسب می‌توانند موجب کاهش آن شوند (۲۷). به همین دلیل مقدار RUE براساس دمای روزانه تعدیل می‌شود. فاکتور تصحیح RUE برای دما (TCFRUE) در مدل با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$TCFRUE = 0 \quad \text{رابطه (۸) اگر } TMP \leq TBRUE$$

$$TCFRUE = (TMP - TBRUE) / (TP1RUE - TBRUE) \quad \text{اگر } TBRUE < TMP < TP1RUE$$

$$TCFRUE = 1 \quad \text{اگر } TP1RUE \leq TMP \leq TP2RUE$$

$$TCFRUE = (TP2RUE - TMP) / (TP2RUE - TCRUE) \quad \text{اگر } TP2RUE < TMP < TCRUE$$

$$TCFRUE = 0 \quad \text{اگر } TMP \geq TCRUE$$

TCFRUE مشابه f(T) بین صفر تا ۱ تغییر می‌کند و در واقع این فاکتور مقدار RUE در هر دمایی را نسبت به دمای مطلوب نشان می‌دهد. TBRUE، TP1RUE، TP2RUE و TCRUE دماهای کاردینال برای RUE هستند و به ترتیب دمای پایه، دمای مطلوب تحتانی، دمای مطلوب فوقانی و دمای سقف را نشان می‌دهند.

مقادیر متغیرهای مربوط به RUE و K براساس منابع در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- کارایی استفاده از تشعشع (RUE)، ضریب خاموشی برای تشعشع فعال فتوسنتزی (KPAR) و دماهای کاردینال برای RUE در سویا.

Table 5. Radiation use efficiency (RUE), extinction coefficient for photosynthetically active radiation (KPAR) and cardinal temperatures for RUE in soybean.

منبع References	مقدار Value	پارامتر Parameters
(29)	2 g MJ <sup>-1</sup>	کارایی استفاده از تشعشع (RUE) Radiation use efficiency (RUE)
(29)	0.65	ضریب خاموشی برای تشعشع فعال فتوسنتزی (KPAR) Extinction coefficient for photosynthetically active radiation (KPAR)
(29)	10 °C	دمای پایه برای RUE (TBRUE) Base temperature for RUE(TBRUE)
(29)	20 °C	دمای مطلوب تحتانی برای RUE (TP1RUE) Lower optimal temp for RUE(TP1RUE)
(29)	30 °C	دمای مطلوب فوقانی برای RUE (TP2RUE) Upper optimal temp for RUE(TP2RUE)
(29)	40 °C	دمای سقف برای RUE (TCRUE) Ceiling temperature for RUE(TCRUE)

سلطانی و همکاران (۲۰۰۶) برای نخستین بار در نخود از یک الگوی دو قسمتی<sup>۱</sup> برای توصیف تخصیص ماده خشک تا قبل از مرحله TLM بین برگ‌ها و ساقه استفاده کردند که به خوبی توانست تخصیص ماده خشک بین برگ‌ها و ساقه را توصیف کند (۳۰). در مقادیر کمتر وزن خشک کل، سهم بیشتری از ماده خشک به برگ‌ها منتقل می‌شود (مرحله ۱)، اما در مقادیر بیشتر وزن خشک کل (تحت شرایط مساعد برای رشد رویشی) ماده خشک بیشتری به ساقه‌ها تخصیص می‌یابد (مرحله ۲). مداح (۲۰۰۶) و بخشنده (۲۰۱۱) برای بیان توزیع ماده خشک در گندم و نخود از این رابطه استفاده کردند. این الگو به صورت زیر توصیف می‌گردد (۱۳) و (۴):

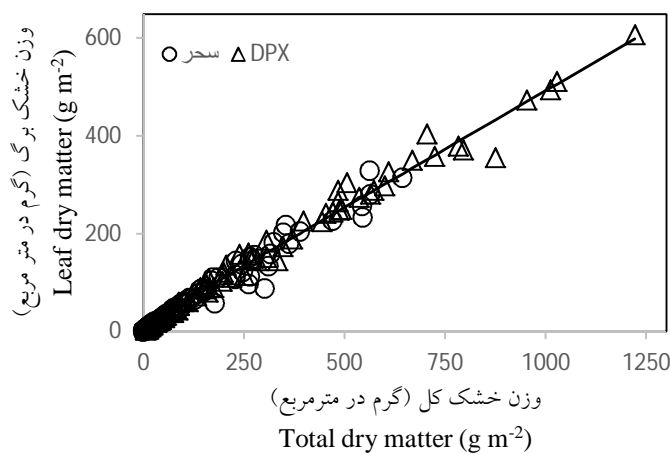
$$y = b_1x \quad \text{اگر} \quad x \leq x_0 \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$y = b_1x_0 + b_2(x-x_0) \quad \text{اگر} \quad x > x_0$$

#### 1- Biphasic Pattern

که در آن  $x$  وزن خشک برگ،  $x_0$  نقطه چرخش بین دو مرحله توزیع ماده خشک (WTOPL) و  $b_1$  ضریب توزیع در طول مرحله اول (FLF1A) و  $b_2$  ضریب توزیع در طول مرحله دوم (FLF1B) می‌باشند. برای به‌دست آوردن پارامترهای WTOPL، FLF1A و FLF2B رابطه ۶ به داده‌های وزن خشک کل در مقابل وزن خشک برگ تا قبل از مرحله TLM (مصادف با مرحله R5 در رقم سحر و DPX) در مطالعه نهبندانی (۲۰۱۳) و نجفی (۲۰۰۶) برازش داده شد (شکل ۵ و جدول ۶) (۱۶ و ۱۵). پس از بررسی حدود اطمینان هر یک از ضرایب، نتایج نشان داد که بین ارقام و تراکم‌ها از نظر ضرایب توزیع اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. بنابراین، برازش یک معادله به کل داده‌های هر دو آزمایش (ارقام و تراکم‌ها) کافی بود. ضریب تخصیص به برگ در قسمت اول (FLF1A) و دوم (FLF1B) به ترتیب ۰/۵۹ و ۰/۴۸ محاسبه شد. نقطه چرخش از قسمت اول به دوم برابر با ۱۳۹ گرم در مترمربع بود. بنابراین، هنگامی که میزان ماده خشک تجمعی (WTOP) به ۱۳۹ گرم در مترمربع در سویا برسد، FLF از FLF1A به FLF1B تغییر پیدا می‌کند.

در مدل ضریب تخصیص ماده خشک به برگ‌ها و ساقه در زمان پرشدن دانه صفر در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵- رابطه بین وزن خشک تجمعی برگ در مقابل وزن خشک کل از کاشت تا مرحله R5 در رقم سحر و DPX. منبع (۱۵ و ۱۶).

Figure 5. Relationship between cumulative leaf dry matters versus total dry matter from emergence to R5 in Sahar and DPX cultivars. (Data are from 16 and 15)

جدول ۶- ضرایب  $b_1$  و  $b_2$  و مقدار  $x_0$  رابطه بین وزن خشک کل با وزن خشک برگ در سویا. RMSE جذر میانگین مربعات خطا و  $R^2$  ضریب تبیین هستند.

Table 6. The coefficients  $b_1$  and  $b_2$  and  $x_0$  value in relationship between cumulative leaf dry matters versus total dry matter in soybean. RMSE is root mean square error and  $R^2$  is coefficient of determination.

$R^2$	RMSE	FLF1B $\pm$ se	WTOPL $\pm$ se	FLF1A $\pm$ se	مجموع ارقام و تراکم‌ها Total cultivars and densities
0.99	10.86	0.48 $\pm$ 0.01	139 $\pm$ 26.23	0.59 $\pm$ 0.02	

**تشکیل عملکرد:** تشکیل عملکرد در مدل با توجه به کل ماده خشک تولید شده در دوره پرشدن دانه و نیز ماده خشک تخصیص یافته به دانه شبیه‌سازی می‌شود. مدل‌سازی سرعت رشد دانه‌ها و تشکیل عملکرد بر مبنای مفهوم افزایش خطی شاخص برداشت توسط سلطانی و سینکлер (۲۰۱۱) شرح داده شده است (۲۸).

سرعت رشد واقعی دانه به تولید ماده خشک روزانه و ماده خشک حاصل از انتقال مجدد (TRANSL) محدود می‌شود. در مدل کل ماده خشک فراهم برای انتقال مجدد<sup>۱</sup> (TRLDM) و رشد دانه از حاصل ضرب کسر ماده خشک تاج پوشش در شروع رشد دانه که قابل انتقال مجدد<sup>۲</sup> می‌باشد (FRTRL) و مقدار ماده خشک تاج پوشش در شروع رشد دانه (BSGDM) به دست می‌آید.

طی پرشدن دانه، در هر روز که تولید ماده خشک روزانه کمتر از نیاز دانه‌ها (یعنی SGR) باشد، مقدار کمبود از تفاضل سرعت رشد دانه اصلاح شده برای انرژی ماده خشک (SGR/GCF) و مقدار ماده خشک تولیدی روزانه (DDMP) به دست می‌آید که همان انتقال مجدد روزانه یعنی TRANSL است.

مقادیر پارامترهای این بخش براساس منابع در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷- برآورد پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی تشکیل عملکرد در سویا.

Table 7. Parameter estimates relating to simulation yield formation in soybean.

منبع References	مقدار Value	پارامتر Parameters
(29)	0.22	FRTRL
(25)	1.3	GCF
(24)	0.01	PDHI

1- Total Crop Mass at Beginning Seed Growth Which is Translocateable to Grains

2- Fraction Crop Mass at Beginning Seed Growth Which is Translocateable to Grains



موازنه نیتروژن: در مدل قبل از رشد دانه تقاضای روزانه برای نیتروژن (NUP) به عنوان تابعی از افزایش روزانه شاخص سطح برگ (GLAI)، میزان افزایش در ماده خشک ساقه<sup>۱</sup> (GST) و محتوای نیتروژن در واحد سطح برگ<sup>۲</sup> (SLNG) برحسب گرم نیتروژن در مترمربع) و در واحد وزن ساقه<sup>۳</sup> (SNCG) برحسب گرم نیتروژن بر گرم) محاسبه می شود:

$$\text{NUP} = (\text{GLAI} \times \text{SLNG}) + (\text{GST} \times \text{SNCG}) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

نیاز روزانه نیتروژن بذرها (INGRN) در مدل از حاصل ضرب سرعت رشد دانه<sup>۴</sup> (SGR) و غلظت نیتروژن دانه<sup>۵</sup> (GNC) محاسبه می شود. هنگامی که نیتروژن جذب نمی شود یا نیتروژن جذب شده برای رشد دانه کافی نیست، باقی نیاز دانه به نیتروژن از ساقه و برگها به دانه منتقل می شود. مدل نیتروژن قابل انتقال از برگها و ساقهها (TRLN) در هر روز را از شاخص سطح برگ (LAI) و وزن خشک ساقه (WST) و اختلافین غلظت نیتروژن در برگ و ساقه سبز (SLNG) و (SNCG) و زرد (SLNS و SNCS) در اندامها محاسبه می کند:

$$\text{TRLN} = \text{LAI} \times (\text{SLNG} - \text{SLNS}) + (\text{NST} - \text{WST} \times \text{SNCS}) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

حداقل نیتروژن در برگها و ساقهها به عنوان نیتروژن ساختاری در نظر گرفته می شود و به این ترتیب از برگ و ساقه منتقل نخواهند شد. در مدل کسری از نیتروژن روزانه که از برگها منتقل می شوند (FXLF) معادل با نسبت نیتروژن قابل انتقال در برگها به کل نیتروژن قابل انتقال (TRLN) می باشد:

$$\text{FXLF} = \text{LAI} \times (\text{SLNG} - \text{SLNS}) / \text{TRLN} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در جدول ۸ پارامترهای مربوط به موازنه نیتروژن آورده شده است.

- 
- 1- Daily increase (growth) in stem dry weight
  - 2- Specific leaf nitrogen in green leaves (target)
  - 3- Stem nitrogen concentration in green stems (target)
  - 4- Daily increase in seeds (grains) dry matter
  - 5- Grain nitrogen concentration

جدول ۸- برآورد پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی موازنه نیتروژن در سویا.

Table 8. Parameter estimates relating to simulation nitrogen balance in soybean.

منبع References	مقدار Value	واحد Unit	پارامتر Parameters
(24)	2.5	گرم نیتروژن در مترمربع برگ (g N m <sup>-2</sup> )	نیتروژن ویژه برگ‌های در حال رشد و سبز (SLNG) Specific leaf N in green leaves (SLNG)
(24)	0.8	گرم نیتروژن در مترمربع برگ (g N m <sup>-2</sup> )	نیتروژن ویژه برگ‌های پیر و زرد (SLNS) Specific leaf N in senesced leaves (SLNS)
(24)	0.02	گرم نیتروژن بر گرم وزن خشک (g N g <sup>-1</sup> )	غلظت نیتروژن در ساقه سبز (SNCG) N content in green stems (SNCG)
(24)	0.005	گرم نیتروژن بر گرم وزن خشک (g N g <sup>-1</sup> )	غلظت نیتروژن حداقل در ساقه زرد (SNCS) N content in senesced stems (SNCS)
(25)	0.065	گرم نیتروژن بر گرم وزن خشک (g N g <sup>-1</sup> )	غلظت نیتروژن دانه (GNC) Grain N content (GNC)
(9)	0.6	گرم نیتروژن در مترمربع در روز (g N m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup> )	حداکثر سرعت تجمع نیتروژن (MXNUP) Maximum N uptake rate (MXNUP)

پارامترهای مدیریتی و خاک مورد نیاز مدل: ورودی‌های خاک جهت موازنه آب خاک عبارت از محتوای حجمی آب خاک در حالت اشباع (SAT)، میزان آب خاک در ظرفیت زراعی (DUL)، محتوای آب خاک قابل استخراج (EXTR)، فاکتور زه‌کشی (DRAINF)، شماره منحنی (CN) و آلبيدو خاک (SALB) هستند. عمق لایه بالایی (DEP1) و عمق خاک (SOLDEP) نیز باید در اختیار باشد (جدول ۹). توضیحات بیشتر در این خصوص توسط سلطانی و همکاران (۲۰۱۳) بیان شده است (۳۱).

جدول ۹- برآوردهایی از برخی پارامترهای مهم در موازنه آب خاک برای خاک لوم رسی سیلنتی.

Table 9. Estimates of some key parameters in soil water balance for silty clay loam

منبع References	مقدار Value	پارامترها برای خاک لوم رسی سیلنتی Parameters for Silty clay loam
(37)	0.526	مقدار آب خاک در حالت اشباع (SAT، مترمکعب بر متر مکعب) Volumetric water content when the soil is fully saturated with water (SAT, $m^3 m^{-3}$ )
(37)	0.383	مقدار آب در ظرفیت زراعی (DUL، مترمکعب بر متر مکعب) Volumetric water content at drained upper limit (DUL, $m^3 m^{-3}$ )
(37)	0.157	مقدار آب قابل استخراج (EXTR، مترمکعب بر متر مکعب) Volumetric water content extractable by the crops (EXTR, $m^3 m^{-3}$ )
(37)	0.208	مقدار آب خاک در نقطه پژمردگی دائم (LL، مترمکعب بر متر مکعب) Volumetric water content at lower limit (LL, $m^3 m^{-3}$ )
(29)	1200	ورودی‌های عمق خاک (SOLDEP؛ میلی‌متر) Inputs of soil depth (SOLDEP, mm)
(29)	0.13	آلبیدو خاک (SALB) Soil albedo
(29)	0.4	فاکتور زه‌کشی (DRAINF) Drainage factor ( $mm mm^{-1}$ )
(29)	73	شماره منحنی (CN) Curve number

مقادیر ضریب خاموشی برای تشعشع خورشیدی (KET) و همچنین آلبیدو گیاه زراعی (CALB) براساس مطالعه ریچی (۱۹۹۸) به ترتیب ۰/۵ و ۰/۲۳ در مدل در نظر گرفته شد (جدول ۱۰) (۲۲). براساس مطالعه امیر و سینکلر (۱۹۹۱) مقادیر حداقل تبخیر بالقوه از خاک، وقتی خاک با گیاه زراعی پوشیده شده است (EOSMIN) ۱/۵ میلی‌متر در روز لحاظ شد. آستانه FTSW برای تجمع نیتروژن (WSSN) ۰/۵، آستانه FTSW برای نمو سطح برگ (WSSL) ۰/۴ و آستانه FTSW برای رشد (WSSG) ۰/۳ برای مدل در نظر گرفته شد (۲).

در مدل فرض می‌شود که تنش آب تأثیری بر زمان تا مراحل مختلف نموی در سویا ندارد. اما این فاکتور در مدل گنجانده شده است تا بتوان در صورت نیاز در مطالعات از آن استفاده کرد. محاسبه این فاکتور بر اساس بسته‌شدن روزنه در نتیجه کمبود آب است. زمانی که آب محدودکننده تولید ماده خشک نیست و روزنه‌ها باز هستند، نمو تحت تأثیر کمبود آب قرار نمی‌گیرد. اما، در شرایط محدودیت آب، نمو فنولوژیک می‌تواند کند شده یا تسریع یابد. مقدار ضریب اصلاح تنش کمبود آب برای سرعت نمو فنولوژیک (WSSD) در مدل ۰/۵ در نظر گرفته شد.

همچنین مقدار سرعت افزایش عمق ریشه (GRTDP) ۳۰ میلی‌متر در روز، حداکثر عمق مؤثر استخراج آب (MEED) ۱۰۰۰ میلی‌متر و ضریب کارایی تعرق (TEC) ۴/۵ پاسکال در مدل قرار داده شد (۲۹). این پارامترها در جدول ۱۰ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱۰- برآورد پارامترهای گیاهی در سویا که در موازنه آب خاک استفاده می‌شود.

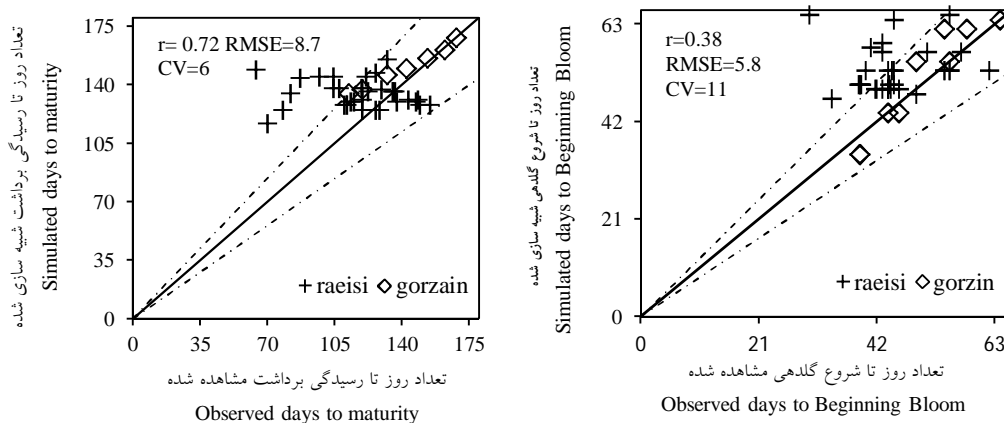
Table 10. Parameter estimates relating to plant in soybean that is used in soil water balance.

منبع References	مقدار Value	پارامتر Parameter
(22)	0.5	ضریب خاموشی برای تشعشع خورشیدی (KET) Extinction coefficient for global solar radiation (KET)
(22)	0.23	آلبدو گیاه زراعی (CALB) Crop albedo (CALB)
(2)	1.5	حداقل تبخیر از خاک (EOSMIN, میلی‌متر در روز) Minimum soil evaporation (EOSMIN, mm d <sup>-1</sup> )
(2)	0.5	آستانه FTSW برای نمو سطح برگ (WSSN) FTSW threshold when nitrogen fixation starts to decline (WSSN)
(2)	0.4	آستانه FTSW برای نمو سطح برگ FTSW threshold for leaf expansion (WSSL)
(2)	0.3	آستانه FTSW برای رشد (WSSG) FTSW threshold for growth (WSSG)
(29)	0.5	ضریب اصلاح تنش کمبود آب برای سرعت نمو فنولوژیک (WSSD) FTSW threshold for development (WSSD)
(29)	4.5	ضریب کارایی تعرق (TEC, پاسکال) Transpiration efficiency coefficient (TEC, Pa)
(29)	30	سرعت افزایش عمق ریشه (GRTDP, میلی‌متر بر روز) Potential root growth (GRTDP, mm/bd)
(29)	1000	حداکثر عمق مؤثر استخراج آب (MEED, میلی‌متر) Maximum effective extraction depth (MEED, mm)

## نتایج و بحث

فنولوژی: نتایج حاصل از شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی (گلدهی و رسیدگی) برای دو رقم سویا سحر و DPX نشان داد که مدل SSM با دقت خوبی مراحل مذکور را شبیه‌سازی نموده است، به طوری که نتایج حاصل از ارزیابی فنولوژی مدل نشان داد مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای روز

تا گلدهی و رسیدگی به ترتیب ۵/۸ روز و ۸/۷ روز است که حدود ۱۱ درصد میانگین روز تا گلدهی و حدود ۶ درصد از روز تا رسیدگی مشاهده شده هستند یعنی ضریب تغییرات (CV) بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهده شده برای روز تا گلدهی ۱۱ درصد و روز تا رسیدگی ۶ درصد بود که نشان دهنده دقت بالای مدل در پیش بینی مراحل فنولوژیکی است. همچنین همبستگی بالای فنولوژی شبیه سازی شده با فنولوژی مشاهده شده نشان می دهد که مدل در پیش بینی فنولوژی موفق بوده است (شکل ۶).



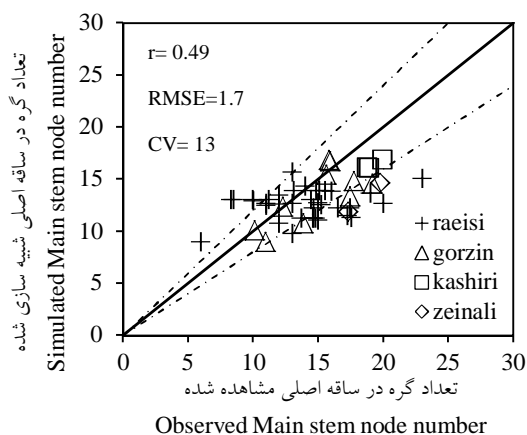
شکل ۶- مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده روز تا شروع گلدهی (R1) و رسیدگی برداشت (R8)، دامنه ۲۰ درصد از اختلاف بین شبیه سازی شده و اندازه گیری شده توسط خطوط منقطع نشان داده شده است. خط ممتد خط ۱:۱ است (منبع: ۸؛ ۱۸؛ ۱۹ و ۲۱).

Figure 6. Simulated versus observed days to beginning Bloom (R1) and maturity (R8), the 20% ranges of discrepancy between simulated and measured are indicated by dashed lines. Solid line is 1:1 line. (Data are from 8, 18, 19 and 21).

پیش بینی نمو فنولوژیک یا مراحل نمو گیاه اهمیت زیادی دارد، چون تولید و توزیع ماده خشک در مدل های شبیه سازی گیاهان زراعی تا حدود زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی می باشد. به همین ترتیب، پیش بینی آن نسبت به پیش بینی تغییرات سطح برگ و سایر فرآیندها نسبتاً مشکل تر است، زیرا تفاوت بین گونه ها و ارقام زیاد است، انواع واکنش های متفاوت وجود دارد و اطلاعات

کمی زیادی نیز وجود ندارد (۳۰). همچنین، مراحل فنولوژی در مدیریت مزرعه (آبیاری، مصرف کود و دیگر نهاده‌ها) برای دستیابی به حداکثر عملکرد نقش مهمی دارند.

**تعداد برگ در ساقه اصلی:** شکل ۷ شبیه‌سازی حداکثر تعداد گره (برگ) در ساقه اصلی سویا را با استفاده از مدل SSM نشان می‌دهد. برای تعداد گره در ساقه اصلی ۱/۷ است که حدود ۱۳ درصد میانگین تعداد برگ مشاهده شده در ساقه اصلی است (شکل ۷) که نشان‌دهنده دقت تقریباً خوب این مدل برای شبیه‌سازی تعداد برگ می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص است مقادیر پیش‌بینی شده تعداد برگ در ساقه اصلی در بازه خطوط  $\pm 20\%$  درصد قرار دارند. قرارگیری اکثر اعداد پیش‌بینی شده در بین خطوط  $\pm 20\%$  دلیلی بر قابل قبول بودن دقت این مدل در پیش‌بینی این متغیر می‌باشد.

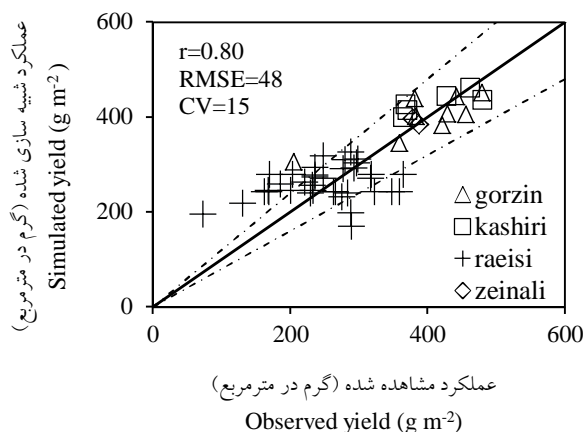


شکل ۷- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده حداکثر تعداد گره در ساقه اصلی، دامنه ۲۰ درصد از اختلاف بین شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده توسط خطوط منقطع نشان داده شده است. خط ممتد خط ۱:۱ است (منبع ۱۱؛ ۳۸؛ ۸؛ ۱۸؛ ۱۹ و ۲۱).

Figure 7. Simulated versus observed main stem node number, the 20% ranges of discrepancy between simulated and measured are indicated by dashed lines. Solid line is 1:1 line. (Data are from 11, 38, 8, 18, 19 and 21).

**عملکرد:** شکل ۸ شبیه‌سازی عملکرد سویا را با استفاده از مدل SSM نشان می‌دهد.  $RMSE$  برای عملکرد برابر با ۴۸ گرم در مترمربع بود که معادل ۱۵ درصد میانگین عملکرد مشاهده شده بود. مقدار ضریب همبستگی برای رابطه بین مقدار عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برابر با ۰/۸۰ بود. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود بیشتر نقاط در محدوده خطوط  $\pm 20\%$  درصد می‌باشند. بر این

اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد با استفاده از مدل SSM رضایت بخش بود که می‌تواند نشان‌دهنده برآورد صحیح پارامترهای مدل و یا تصدیق‌کننده کارایی مدل در تخمین مقدار عملکرد سویا باشد.



شکل ۸- مقادیر شبیه‌سازی شده در مقابل مشاهده شده عملکرد دانه؛ دامنه ۲۰ درصد از اختلاف بین شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده توسط خطوط منقطع نشان داده شده است. خط ممتد خط ۱:۱ است (منبع ۱۱؛ ۳۸؛ ۸؛ ۱۸؛ ۱۹ و ۲۱).

Figure 8. Simulated versus observed grain yield, the 20% ranges of discrepancy between simulated and measured are indicated by dashed lines. Solid line is 1:1 line. (Data are from 11, 38, 8, 18, 19 and 21).

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق پارامترهای موردنیاز مدل SSM-iLegume برای دو رقم سویا سحر و DPX براساس آزمایش‌های مزرعه‌ای برآورد شد. سپس ارزیابی مستقل مدل با استفاده از آزمایش‌های که از آنها برای برآورد پارامتر استفاده نشده بود انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی شامل گلدهی (با مقدار RMSE برابر ۵/۸ روز و CV ۱۱ درصد) و رسیدگی (با مقدار RMSE برابر ۸/۷ روز و CV برابر ۶ درصد)، حداکثر تعداد گره (برگ) در ساقه اصلی (با مقدار RMSE برابر ۱/۷ گرم در مترمربع و CV برابر ۱۳ درصد) و عملکرد (با مقدار RMSE برابر ۴۸ گرم در مترمربع و CV برابر ۱۵ درصد) در سویا نشان داد شبیه‌سازی سویا با استفاده از مدل SSM رضایت بخش بود که می‌تواند نشان‌دهنده برآورد صحیح پارامترهای مدل و یا تصدیق‌کننده کارایی مدل در پیش‌بینی رشد و عملکرد سویا در شرایط گرگان باشد. بنابراین، می‌توان از این مدل برای اهداف تجزیه و تحلیل

عملکرد سویا و بررسی واکنش سویا به محدودیت‌های ناشی از شرایط مختلف محیطی، مدیریتی و عوامل ژنتیکی در گرگان استفاده نمود.

#### منابع

1. Acock, B., and Trent, A. 1991. The Soybean Crop Simulator, Glycim: Documentation for the Modular Version 91. Department of Plan, Soil, and Entomological Sciences, University of Idaho, Moscow, Idaho.
2. Amir, J., and Sinclair, T. 1991. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. *Field Crops Res.* 28: 59-69.
3. Asare, D.K., Sammis, T.W., Assadian, H., and Fowler, J.L. 1992. Evaluating three cotton simulation models under different irrigation regimes. *Agric. Water Manag.* 22: 391-407.
4. Bakhshandeh, E., Soltani, A., Zeinali, E., Kalateh-Arabi, M., and Ghadiryan, R. 2011. Evaluation of allometric relationships between leaf area and vegetative characteristics in bread and durum wheat cultivars. *Iranian J. Crop Sci.* 13: 642-657.
5. Boote, K.J., Jones, J.W., and Hoogenboom, G. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model Marcel Dekker.
6. Elwell, D.L., Curry, R.B., and Keener, M.E. 1987. Determination of potential yield-limiting factors of soybean using SOYMOD/OARCD. *Agric. Sys.* 24: 221-242.
7. Ghadiryan, R., Soltani, A., Zeinali, E., Kalateh Arabi, M., and Bakhshandeh, E. 2011. Evaluating non-linear regression models for use in growth analysis of wheat. *Elect. J. Crop Prod.* 4: 55-77. (In Persian)
8. Gorzin, M. 2012. Effects of environmental conditions during pod filling period on seed quality of soybean (*Glycine max* (L.) Merr) and its relationship with *Phomopsis sp* in Golestan province. M.Sc. Thesis, Faculty of Plant Production. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)
9. Harper, J.E. 1971. Seasonal nutrient uptake and accumulation patterns in soybeans. *Crop Sci.* 11: 374-350.
10. Jones, J.W., Boote, K.J., Jagtap, S.S., Hoogenboom, G., and Wilkerson, G.G. 1988. SOYGRO V5.41. Soybean Crop Growth Simulation Model. User's Guide. Agricultural Engineering Department and Agronomy Department. University of Florida, Gainesville, Florida 32611.
11. Kashiri, H. 2002. Reaction summer planting soybean row spacing and plant density. A thesis for the degree of M.Sc. in Agronomy, Faculty of Plant Production. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)
12. Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N., Meinke, H., and Hochman, Z.



2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18: 267-288.
13. Maddah, M. 2006. Comparative physiology of growth and yield formation in wheat and peas. M.Sc. Thesis, Faculty of Plant Production. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
14. McCree, K.J., Fernandez, C.J. and Ferraz de Oliveira, R. 1990. Visualizing interactions of water stress responses with a whole-plant simulation model. *Crop Sci.* 30: 294-300.
15. Najafi, R. 2006. Effect on growth and yield of soybean seed. M.Sc. thesis, Faculty of Plant Production. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)
16. Nهبندانی, A. 2013. Parameterizing SSM model for the growth and yield of soybean. M.Sc. thesis, Faculty of Plant Production. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
17. Nهبندانی, A., Soltani, A., Zeinali, E., Raeisi, S., and Najafi, R. 2013. Allometric relationships between leaf area and vegetative characteristics in soybean. *Int. J. Agric. Crop. Sci.* 6: 1127-1136.
18. Raeisi, S. 2001. Comparison of early varieties and promising soybean row spacing and planting date. Improvement Institute Seed and Plant, Center of Golestan province. (In Persian)
19. Raeisi, S. 2005. Determine best planting date and pattern for DPX. Improvement Institute Seed and Plant, Center of Golestan province. (In Persian)
20. Raeisi, S. 2005. Evaluation water use efficiency and yield cultivar soybean in rain irrigation. Improvement Institute Seed and Plant, Center of Golestan province. (In Persian)
21. Raeisi, S. 2006. Evaluation cultivar soybean in planting pattern. Improvement Institute Seed and Plant, Center of Golestan province. (In Persian)
22. Ritchie, J., Singh, U., Godwin, D., and Bowen, W. 1998. Cereal growth, development and yield. *Springer.* 1: 79-98.
23. Setiyono, T.D., Cassman, K.G., Specht, J.E., Dobermann, A., Weiss, A., Yang, H., Conley, S.P., Robinson, A.P., Pedersen, P. and De Bruin, J.L. 2010. Simulation of soybean growth and yield in near optimal growth conditions. *Field Crops Res.* 119: 161-171.
24. Sinclair, T., Farias, J., Neumaier, N., and Nepomuceno, A. 2003. Modeling nitrogen accumulation and use by soybean. *Field Crops Res.* 81: 149-158.
25. Sinclair, T.R. 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production: Model development. *Field Crops Res.* 15: 125-141.
26. Sinclair, T.R. 2006. A reminder of the limitations in using Beer's law to estimate daily radiation interception by vegetation. *Crop Sci.* 46: 2343-2347.
27. Soltani, A. 2009. Mathematical modeling in filed crops. JDM Press, Mashhad, Iran. 175p. (In Persian)

28. Soltani, A., and Sinclair, T.R. 2011. A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Res.* 124: 252–260.
29. Soltani, A., and Sinclair, T.R. 2012. *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield.* CAB. 322p.
30. Soltani, A., Hammer, G.L., Torabi, B., Robertson, M.J., and Zeinali, E. 2006. Modeling chickpea growth and development: Phenological development. *Field Crops Res.* 99: 1-13.
31. Soltani, A., Maddah, V., and Sinclair, T.R. 2013. SSM-Wheat: a simulation model for wheat development, growth and yield. *Int. J. Plant Prod.* 7: 711-740.
32. Soltani, A., Robertson, M.J., Rahemi-Karizaki, A., Poorreza, J., and Zarei, H., 2006d. Modeling biomass accumulation and partitioning in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *J. Agron. Crop Sci.* 192: 379–389.
33. Soltani, A., Torabi, B., Zeinali, E., and Sarparast, R. 2004. Response of chickpea to photoperiod as a qualitative long-day plant. *Asian J. Plant Sci.* 6: 705-708.
34. Stockle, C.O., Donatelli, M., and Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18: 289-307.
35. Whisler, F.D., Acock, B., Baker, D.N., Fye, R.E., Hodges, H.F., Lambert, J.R., Lemmon, H.E., Mckinion, J.M., and Reddy, V.R. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. Agron.* 40: 141-208.
36. Williams, J.R., Jones, C.A., and Dyck, P.T. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE.* 27: 129-144.
37. Zeinali, E. 2009. Nitrogen nutrition of wheat in Gorgan, agronomic aspects, physiological and environmental. Ph.D. Thesis, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)
38. Zeinali, E., Akramghaderi, F., Soltani, A., and Kashiri, H. 2003. Effect of planting date on yield and yield components of three soybean cultivars in Gorgan. *Agric. Res. Iran.* 1: 81-92. (In Persian)