

مدلی ساده برای پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت هیبرید سینگل کراس ۷۰۴

بنیامین ترابی* و افشین سلطانی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۸/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۲/۳۰)

چکیده

برای پیش‌بینی رشد و عملکرد لازم است زیرمدل‌های مربوط به فنولوژی، تولید و توزیع ماده خشک، تغییرات سطح برگ و موازنه آب خاک مورد مطالعه قرار گیرند. در مطالعه حاضر، برای پیش‌بینی عملکرد ذرت در شرایط اصفهان، پارامترهای زیرمدل‌های مذکور با استفاده از داده‌های مربوط به تاریخ‌های کاشت مختلف در سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۲ در منطقه اصفهان و داده‌های مربوط به سایر پژوهشگران در نقاط مختلف دنیا برآورد گردید. با استفاده از مدل رشد و عملکرد، تغییرات روزانه مربوط به فنولوژی، ماده خشک، سطح برگ و موازنه آب خاک از طریق آمار روزانه هواشناسی (دمای حداقل، دمای حداکثر، مقدار تابش و میزان بارندگی) محاسبه شد و سپس عملکرد در پایان فصل رشد پیش‌بینی گردید. عملکرد مشاهده شده در این مطالعه حدود ۱۱۳۷۰ تا ۱۵۷۷۰ کیلوگرم در هکتار با میانگین ۱۳۱۳۰ کیلوگرم در هکتار بود؛ در حالی که دامنه تغییرات عملکرد پیش‌بینی شده ۱۲۴۴۰ تا ۱۵۴۴۰ کیلوگرم در هکتار با میانگین ۱۳۳۶۰ کیلوگرم در هکتار بود. ارزیابی مدل نشان داد که ضرایب رگرسیون عملکرد مشاهده شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده آن ($a = 3233 \pm 1380$ و $b = 0.77 \pm 0.12$) بر مبنای حدود اطمینان ۹۵٪ اختلاف معنی‌داری با ضرایب خط ۱:۱ ($a = 0$ و $b = 1$) نداشتند. مقدار R^2 برای مدل ۹۲٪ برآورد شد. همچنین جذر میانگین مربعات انحرافات برابر ۵۷۰ کیلوگرم در هکتار و ضریب تغییرات برابر ۴/۳٪ به‌دست آمد. بنابراین، استنباط شد که مدل می‌تواند برای شرایط اصفهان از دقت مناسبی جهت پیش‌بینی عملکرد ذرت برخوردار باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های گیاهی، شبیه‌سازی، فنولوژی، ماده خشک، سطح برگ

۱. گروه زراعت، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان

۲. گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ben_torabi@yahoo.com

مقدمه

کاربرد مدل‌های کامپیوتری در کشاورزی به سرعت در حال افزایش است. مدل‌های رشد گیاهان زراعی ابزارهای قوی برای پیش‌بینی تغییرات عملکرد می‌باشند (۳۳). عملکرد یک محصول زراعی در یک مکان، حاصل تغییرات عوامل مدیریتی و محیطی است. عوامل محیطی شامل نوع خاک، آفات، بیماری‌ها، رطوبت خاک ذخیره شده در زمان کاشت، تغییرات روزانه آب و هوا در طول فصل رشد و عوامل مدیریتی شامل تراکم گیاه، تاریخ کاشت، حاصل‌خیزی، آبیاری و تیمارهای شیمیایی برای مبارزه با آفات و بیماری‌ها هستند (۹). روش‌های مختلفی برای تصمیم‌گیری عوامل فوق جهت افزایش بهره‌وری و کاهش خطرات در شرایط مختلف آب و هوایی وجود دارند (۳۶) و ۴۰). مدل‌های گیاهان زراعی، ابزارهای قوی برای بهینه‌سازی چنین تصمیماتی تحت شرایط مختلف آب و هوایی هستند (۱۷) و ۵۲). هدف از به وجود آوردن یک مدل این است که در شرایط مختلف محیطی، عملکرد یک محصول را به خوبی پیش‌بینی کند.

در شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت به طور کلی دو شیوه وجود دارد. در شیوه اول، مدل‌های شبیه‌سازی عمومی وجود دارند که بر اساس فرایندهای کلی رشد توسعه یافته‌اند و برای گیاهان مختلف از جمله ذرت استفاده می‌شوند، مثل مدل‌های SUCROS، WOFOST، INTERCOM (۴۷)، STIC (۶) و CropSyst (۴۲). در شیوه دوم، مدل‌های شبیه‌سازی رشد و عملکرد خاص ذرت قرار دارند، مثل CERES-Maize (۱۴) و اجرای آن در DSSAT (۱۵) و مدل ساخته شده توسط ماکائو و همکاران (۲۴) و اصلاح شده آن توسط ویلسون و همکاران (۵۱).

این دو شیوه از چهار لحاظ با هم اختلاف دارند: (۱) مدل‌های شبیه‌سازی عمومی به پارامترهای ورودی کمتری نسبت به مدل‌های خاص ذرت نیاز دارند و همچنین پارامتر کمتری را تخمین می‌زنند. (۲) نمو ذرت در مدل‌های شبیه‌سازی عمومی اصولاً به قابلیت دسترسی مواد پرورده از طریق فتوسنتز

وابسته است. در حالی که در مدل‌های خاص ذرت، دما عامل محرک اولیه می‌باشد. (۳) در مدل‌های شبیه‌سازی عمومی، برای تعیین تولید ماده خشک اغلب تنفس، رشد و نگهداری محاسبه می‌شوند. اما در مدل‌های خاص ذرت، تولید ماده خشک به طور مستقیم از طریق تابش خورشیدی جذب شده یا کارایی مصرف تابش محاسبه می‌شود. (۴) مدل‌های شبیه‌سازی عمومی فنولوژی، به استثنای مرحله گل‌دهی، را بررسی نمی‌کنند. همچنین اختلاف هیبریدهای مختلف مثل حساسیت به طول روز، پتانسیل تعداد دانه و پتانسیل سرعت پرشدن دانه را نشان نمی‌دهند. در حالی که مدل‌های خاص ذرت، چندین مرحله فنولوژیک و خصوصیات هیبرید را تخمین می‌زنند (۸).

استفاده از یک مدل شبیه‌سازی برای پیش‌بینی رشد و عملکرد، به میزان دسترسی به پارامترهای ورودی آن مدل در منطقه مورد نظر بستگی دارد. همچنین برخی از مدل‌ها ممکن است معادلات یا روابط بین فرایندهای مختلف رشد و عملکرد گیاه و یا حتی مقدار یک پارامتر مربوط به خصوصیات گیاه را با توجه به اقلیم منطقه معینی به دست آورده باشند که در مناطق دیگر قابل استفاده نباشند، یا کارایی قابل قبولی نداشته باشند (۸، ۳۴ و ۵۱). بنابراین جهت پیش‌بینی رشد و عملکرد یک محصول با مدل باید سازگاری معادلات یا روابط بین فرایندهای مختلف رشد و عملکرد با شرایط اقلیمی منطقه مورد نظر، میزان دسترسی به پارامترهای ورودی مدل و میزان کارایی مدل در پیش‌بینی رشد و عملکرد را مد نظر قرار داد.

هدف از این مطالعه، ایجاد یک مدل ساده بود که بتواند عملکرد را به فنولوژی، تولید و توزیع ماده خشک، میزان رشد برگ و موازنه آب خاک نسبت دهد و این مدل بتواند به عنوان یک ابزار کاربردی ساده برای پیش‌بینی عملکرد ذرت به کار گرفته شود.

مواد و روش‌ها

توصیف مدل

مدل مورد استفاده، تقریباً مشابه مدل سلطانی و همکاران (۳۶) و

رایج‌ترین شاخص حرارتی مورد استفاده GDD می‌باشد که برای پیش‌بینی مراحل مختلف نمو در دامنه محدودی از تاریخ‌های کاشت و عرض‌های جغرافیایی استفاده می‌شود (۳۵). در این مطالعه، با توجه به اینکه متوسط دمای هوا در منطقه مورد مطالعه اصولاً از ۳۰ درجه سلسیوس بیشتر نمی‌باشد و نیز با توجه به این که دمای پایه و مطلوب برای ذرت به ترتیب ۱۰ و ۳۰ درجه سلسیوس (۳) گزارش شده است (جدول ۲)، بنابراین، از یک مدل مسطح برای توصیف مراحل مختلف نموی و محاسبه GDD به صورت زیر استفاده شد:

$$\begin{aligned} \text{GDD} &= 0 & \text{اگر } T &\leq TB \\ \text{GDD} &= T - TB & \text{اگر } TB < T < TO & \quad [1] \\ \text{GDD} &= TO - TB & \text{اگر } T &\geq TO \end{aligned}$$

که در آن T ، TB و TO به ترتیب متوسط دمای هوا، دمای پایه و دمای مطلوب بر حسب درجه سلسیوس هستند. GDD برای مراحل مختلف نمو به صورت تجمعی بیان شد. بنابراین، از شروع هر مرحله نموی تا پایان آن مرحله GDD روزانه محاسبه و سپس با هم جمع گردید و در نهایت به صورت تجمعی ارائه شد (شکل ۱).

در این مطالعه، برای پیش‌بینی مدت زمان از کاشت تا مراحل مختلف نمو، با استفاده از معادله ۱، از داده‌های مربوط به هیبرید ذرت دیررس سینگل کراس ۷۰۴ تحت شرایط استان اصفهان در سه تاریخ کاشت ۱۰ و ۳۱ اردیبهشت و ۲۱ خرداد ۱۳۷۳ استفاده شد (۲۹؛ جدول ۳). GDD برای مراحل نموی مورد پیش‌بینی از کاشت تا مراحل سبز شدن، پایان رشد برگ، شروع رشد دانه، پایان رشد دانه و رسیدگی برداشت به ترتیب برابر ۹۷، ۱۲۸۰، ۱۳۳۰، ۲۱۸۰ و ۲۲۵۰ درجه سلسیوس در روز بودند.

تولید و توزیع ماده خشک

بسیاری از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی، افزایش روزانه ماده خشک را با ضرب تابش خورشیدی رسیده (مگاژول بر متر مربع در روز)، کسر تابش دریافت شده به وسیله گیاه و RUE

(۳۷) و سلطانی و سینکلر (۴۰) بود. این مدل، رشد و نمو محصول و موازنه آب خاک را محاسبه می‌کند. فنولوژی بر اساس مطالعات گریم و همکاران (۱۲ و ۱۳)، سلطانی و همکاران (۳۵ و ۳۹) و ترابی (۴۶) محاسبه شد. محاسبه میزان رشد و توسعه سطح برگ تقریباً مشابه روش سلطانی و همکاران (۳۷) و سلطانی (۳۳) انجام گرفت. تجمع بیوماس بر اساس مفهوم دریافت و کارایی مصرف تابش (۱۹، ۳۶ و ۳۸) و محاسبه میزان عملکرد دانه بر اساس میزان افزایش شاخص برداشت روزانه (۳۱ و ۳۴) انجام شد. مدل برای اجرا نیاز به یک سری ورودی داشت که در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین کلیه پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل که از منابع مختلف گرفته شده است در جدول ۲ آورده شده است. این مدل با استفاده از این پارامترهای ورودی می‌تواند محاسبات را از کاشت تا رسیدگی به صورت روزانه انجام دهد و زمان وقوع مراحل مختلف نموی، سرعت رشد روزانه محصول، عملکرد دانه، شاخص برداشت و سطح برگ را پیش‌بینی کند. در این مدل اجزای موازنه آب، آب مورد نیاز آبیاری و دفعات آبیاری نیز برآورد می‌شوند.

فنولوژی

پیش‌بینی دقیق فنولوژی گیاهان زراعی از ویژگی‌های ضروری مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به شمار می‌رود. تولید و تسهیم ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حد زیادی به وسیله زمان بندی مراحل نمو تنظیم می‌شود (۳۶ و ۴۰). دما یکی از مؤثرترین عوامل محیطی است که سرعت نمو گیاه ذرت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. معادلات خطی و غیرخطی متعددی واکنش دما در مقابل فرایندهای نموی در گیاهان مختلف را توصیف کرده‌اند (۴، ۱۰، ۱۱، ۲۵، ۳۵، ۳۹ و ۵۵). پیش‌بینی مراحل مختلف نمو در گیاه ذرت با توجه به رابطه بین سرعت نمو و دما بر اساس شاخص‌های حرارتی انجام می‌گیرد. شاخص‌های حرارتی نسبت به زمان تقویمی مراحل مختلف نموی را خیلی دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کنند (۳۰).

جدول ۱. پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل ذرت

واحد	پارامتر (مخفف)
	داده های هواشناسی و اقلیمی
درجه سلسیوس	حداکثر دمای روزانه (TMAX)
درجه سلسیوس	حداقل دمای روزانه (TMIN)
مگاژول در متر مربع در روز	تابش خورشیدی روزانه (SRAD)
میلی متر	بارندگی روزانه (RAIN)
	ویژگی های خاک
ندارد	آلبیدو (SALB)
میلی متر بر میلی متر	ضریب زهکشی (DRAINF)
سانتی متر بر سانتی متر	کسر حجمی رطوبت در نقطه پژمردگی (IDUL)
سانتی متر بر سانتی متر	کسر حجمی رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی (ILL)
سانتی متر بر سانتی متر	کسر حجمی رطوبت در نقطه اشباع (ISAT)
ندارد	شماره منحنی خاک (CN)
	مدیریت زراعی
روز سال از اول ژانویه	تاریخ کاشت (PDOY)
بونه در متر مربع	تراکم (DEN)
میلی متر	رطوبت خاک در موقع کاشت (ISW)
ندارد	کسر آب قابل تعرق خاک برای انجام آبیاری (IRGLVL)

در مدل حاضر در ۰/۶ تثبیت گردید (جدول ۲). مقدار LAI با توجه به مدل EPIC محاسبه شد (۳۳). RUE ذرت برای تابش فعال فتوسنتزی در مراحل قبل و بعد از پرشدن دانه بین ۲/۳۸ تا ۴/۳۳ گرم بر مگاژول تخمین زده شده است (۱۷، ۱۸ و ۴۵). در حالی که جونز و کینیری (۱۴) مقدار آن را ۵ گرم بر مگاژول گزارش کرده بودند. لیندکوئیست و همکاران (۱۸) نشان دادند که مقدار کارایی مصرف تابش در طول دوره رشد رویشی (IRUE1) و زایشی (IRUE2) ثابت است و هیچ گونه کاهش را نشان نخواهد داد. عدم کاهش IRUE2 می تواند به علت شرایط مطلوب رشد و عدم کاهش مقدار مواد پرورده برای تقاضای دانه باشد (۲۶). ماکائو (۲۱) مشاهده کرد IRUE2 به علت انتقال مجدد نیتروژن برگ به دانه کاهش می یابد. این انتقال نیتروژن به دلیل تقاضای دانه بود که به ندرت می توانست از زمین جذب شود. کارایی مصرف کل تابش تقریباً معادل

(گرم بر مگاژول تابش دریافت شده) برآورد می کنند (۶، ۱۴، ۱۹، ۲۴، ۳۲، ۳۸ و ۵۳). در این مطالعه نیز تولید ماده خشک روزانه با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید:

$$BDM = PAR \times FINT \times RUE \quad [2]$$

که در آن PAR کل تابش فعال فتوسنتزی روزانه رسیده به گیاه ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$)، $FINT$ کسر تابش دریافت شده توسط گیاه است. مقدار PAR به ضریب خاموشی (k_{PAR}) و شاخص سطح برگ (LAI) بستگی دارد و طبق رابطه مانسی و سایکی (به نقل از ۱۶) به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$FINT = 1 - \exp(-k_{PAR} \times LAI) \quad [3]$$

مقدار k_{PAR} برای ذرت بین ۰/۴۳ تا ۰/۶۸ گزارش شده است (۵، ۷، ۱۶، ۲۰ و ۴۸). مادونی و همکاران (۲۰) و براس و همکاران (۵) نشان دادند که مقدار k بسته به تراکم گیاهی می تواند متغیر باشد. طبق وردوت و همکاران (۴۸) مقدار k_{PAR}

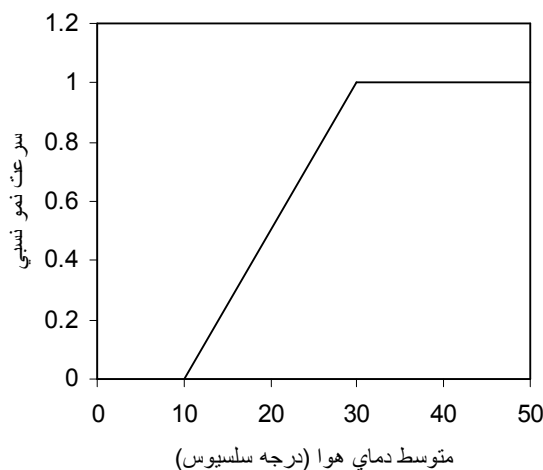
جدول ۲. نام، واحد اندازه‌گیری، مقدار تخمین و منبع تخمین پارامترهای ورودی در مدل ذرت

منبع تخمین	تخمین	واحد	پارامتر (مخفف)
۳	۱۰	درجه سلسیوس	دمای پایه برای نمو (TB)
۳	۳۰	درجه سلسیوس	دمای مطلوب برای نمو (TO)
۵۱	۸	درجه سلسیوس	دمای پایه برای کارآیی مصرف تابش (TBRUE)
۵۱	۲۰	درجه سلسیوس	دمای مطلوب تحتانی برای کارآیی مصرف تابش (TO1RUE)
۵۱	۴۰	درجه سلسیوس	دمای مطلوب فوقانی برای کارآیی مصرف تابش (TO2RUE)
۵۱	۵۰	درجه سلسیوس	دمای سقف برای کارآیی مصرف تابش (TCRUE)
۱۷	۴/۳۳	گرم بر مگاژول	کارآیی مصرف تابش فعال فتوسنتزی در شرایط مطلوب در قبل از پر شدن دانه (IRUE1)
۴۵	۲/۳۸	گرم بر مگاژول	کارآیی مصرف تابش فعال فتوسنتزی در شرایط مطلوب طی دوره پر شدن دانه (IRUE2)
۴۸	۰/۶	ندارد	ضریب خاموشی برای تابش فعال فتوسنتزی (KPAR)
۳۱ و ۲۱	۰/۰۱۵	گرم در روز	سرعت افزایش شاخص برداشت (DHI)
۱	(۵/۵، ۰/۷)	(ندارد، بوته در متر مربع)	نقطه ۱ روی منحنی شاخص سطح برگ نسبی در مقابل تراکم (P1)
۱	(۷، ۰/۸)	(ندارد، بوته در متر مربع)	نقطه ۲ روی منحنی شاخص سطح برگ نسبی در مقابل تراکم (P2)
۳۳	(۰/۱۵، ۰/۰۵)	(ندارد، ندارد)	نقطه ۱ روی منحنی شاخص سطح برگ نسبی در مقابل مرحله نمو نرمالیزه شده (D1)
۳۴	(۰/۵۰، ۰/۹۵)	(ندارد، ندارد)	نقطه ۲ روی منحنی شاخص سطح برگ نسبی در مقابل مرحله نمو نرمالیزه شده (D2)
۲۹	۴/۸	ندارد	حداکثر شاخص سطح برگ مشاهده شده در منطقه (LAIMX)
۳۳ و ۲۳	۰/۳۵	ندارد	کسر آب قابل دسترس در هنگام شروع کاهش تولید ماده خشک (WSSG)
۳۳	۰/۲۵	ندارد	کسر آب قابل دسترس در هنگام شروع کاهش تولید سطح برگ (WSSL)
۳۳	۰/۵	ندارد	ضریب خاموشی برای کل تابش خورشیدی در محاسبه تقسیم تبخیر و تعرق (KET)
۳۳	۰/۲۳	ندارد	ضریب آلیدوی گیاه (CALB)
۳۱	۱۰۰۰	میلی متر	عمق موثر استخراج آب از خاک (SOLDEP)

مطالعه، مقدار IRUE1 برای تابش فعال فتوسنتزی طبق کینیری و همکاران (۱۷) برابر ۴/۳۳ گرم بر مگاژول و IRUE2 برای تابش فعال فتوسنتزی طبق تولنار و آگیلرا (۴۵) ۲/۴ گرم بر مگاژول تخمین زده شدند (جدول ۲).

ماکائو و کاربری (۲۲) نشان دادند که توسعه کنوپی برگ تحت تأثیر دمای محیط قرار گرفته و از این طریق مقدار

نصف کارآیی مصرف تابش فعال فتوسنتزی می‌باشد. در مدل ماکائو و همکاران (۲۴) مقدار کارآیی مصرف کل تابش در قبل و بعد از شروع پر شدن دانه به ترتیب روی ۱/۶ و ۱/۲ گرم بر مگاژول تنظیم شد. والاچ و همکاران (۴۹) مقدار کارآیی مصرف کل تابش را در قبل و بعد از پیر شدن سریع برگ به ترتیب برابر ۲/۸ و ۱/۵ گرم بر مگاژول تخمین زدند. در این



شکل ۱. واکنش سرعت نمو نسبی به دما در ذرت توسط مدل مسطح

جدول ۳. داده‌هایی که از آنها برای تخمین برخی پارامترهای مدل یا ارزیابی مدل استفاده شده است

منبع آزمایش	تیمار	عرض جغرافیایی (شمالی)	محل و سال آزمایش
۱	تراکم و آرایش کاشت	۳۲° ۲۶'	اصفهان، ۱۳۶۹
۲۸	تاریخ کاشت	۳۲° ۳۵'	کبوتر آباد، ۱۳۶۶ و ۱۳۶۷
۴۴	رژیم‌های مختلف آبیاری	۳۲° ۲۳'	لورک نجف آباد، ۱۳۶۶
۵۵	رقم	۳۲° ۲۳'	لورک نجف آباد، ۱۳۷۵
۴۳	تراکم و ردیف کاشت	۳۲° ۳۲'	شروان فلاورجان، ۱۳۷۱
۲۹	تاریخ کاشت	۳۲° ۳۲'	شروان فلاورجان، ۱۳۷۳

دماهای گزارش شده برای کارآیی مصرف تابش و نیز با توجه به رابطه زیر، کارآیی مصرف تابش فعال فتوسنتزی در شرایط نامطلوب دمایی تصحیح گردید:

$$RUE = IRUE1 \times DVRUE \times TCFRUE \quad [4]$$

که در آن RUE کارآیی مصرف تابش فعال فتوسنتزی در شرایط مختلف دمایی، IRUE1 کارآیی مصرف تابش فعال فتوسنتزی در طول دوره رشد رویشی در شرایط مطلوب دمایی، DVRUE ضریب کارآیی مصرف تابش فعال فتوسنتزی می‌باشد و مقدار آن قبل از پر شدن دانه برابر با ۱ و بعد از پر شدن دانه برابر RRUE می‌باشد. مقدار RRUE برابر با نسبت کارآیی مصرف تابش فعال فتوسنتزی در بعد از پر شدن دانه به قبل از پر شدن

شاخص سطح برگ و نسبت دریافت تابش توسط کنوپی تعیین می‌شود. دما همچنین طول مدت رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و حداکثر زمانی که تابش می‌تواند به کنوپی برخورد کند، کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان به این نکته پی برد که کارآیی مصرف تابش می‌تواند تحت تأثیر دما تغییر نماید (۳۳) و (۵۱). روابط خطی و غیرخطی متعددی برای توصیف واکنش کارآیی مصرف تابش نسبت به دما در ذرت مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۲، ۱۴ و ۲۴). در مدل حاضر، مقدار دمای پایه و سقف برای کارآیی مصرف تابش به ترتیب برابر ۸ و ۵۰ درجه سلسیوس و دمای مطلوب بین ۲۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس تخمین زده شدند (۵۱؛ جدول ۲). در مدل حاضر، با استفاده از

نظر گرفته شدند (جدول ۲). P1 نشان می‌دهد که در تراکم ۵/۵ بوته در متر مربع، شاخص سطح برگ نسبی برابر ۰/۷ است و نیز P2 نشان می‌دهد که در تراکم ۷ بوته در متر مربع شاخص سطح برگ نسبی برابر ۰/۸ است.

مقدار RLAI با توجه به مرحله نمودی استاندارد شده (NGS)، نسبت زمان حرارتی موجود به زمان حرارتی از کاشت تا رسیدگی برداشت) از طریق معادلات زیر به دست آمد:

$$\text{RLAI} = \text{NGS} / (\text{NGS} + \text{EXP}(a + b \times \text{NGS})) \quad \text{اگر } \text{NGS} < \text{BLS}$$

$$\text{RLAI} = \text{BSGLAI} \times ((1 - \text{NGS}) / (1 - \text{BLS})) \quad \text{اگر } \text{NGS} \geq \text{BLS}$$

[۷]

BLS مرحله نمو استاندارد شده در شروع پرشدن دانه است که در آن حداکثر شاخص سطح برگ (BSGLAI) حاصل می‌شود و بعد از آن شاخص سطح برگ کاهش می‌یابد (شکل ۴). a و b ضرایب معادله هستند و با در دست بودن دو نقطه D1 و D2 و از طریق حل همزمان معادله فوق برای آن دو نقطه به دست می‌آید. مقدار D1 و D2 در این مطالعه بر طبق پژوهش سلطانی (۳۳) به ترتیب برابر (۰/۱۵، ۰/۰۵) و (۰/۹۵، ۰/۵۰) در نظر گرفته شد (جدول ۲). D1 نشان می‌دهد که پس از طی شدن ۱۵ درصد زمان حرارتی از کاشت تا برداشت LAI به ۵ درصد حداکثر خود می‌رسد و D2 نشان دهنده آن است که LAI با سپری شدن ۵۰٪ زمان حرارتی به ۹۵٪ حداکثر خود می‌رسد.

موازنه آب خاک

برای پیش‌بینی مقدار آب مصرفی مرتبط با رشد و عملکرد لازم است که موازنه آب در عمق خاک صورت گیرد. برای موازنه آب خاک، آب‌های ورودی به خاک از آب‌های خروجی از خاک کسر می‌گردد (۳۳ و ۴۱). برای موازنه آب خاک از فرمول زیر استفاده شد:

$$\text{SWC}_i = \text{SWC}_{i-1} + \text{ERAIN} + \text{IRGW}_i - \text{DRAIN}_i - \text{SEVP}_i - \text{Tri}$$

[۶]

که در آن SWC_i مقدار آب موجود در خاک در روز i ام، SWC_{i-1} مقدار آب موجود در خاک در روز i-1 ام، ERAIN میزان بارندگی مؤثر، IRGW_i میزان آب از طریق آبیاری در روز

دانه می‌باشد. TCFRUE ضریب تصحیح کارایی مصرف تابش فعال فتوسنتزی برای میانگین دمای روزانه است (۳۳؛ شکل ۲). تجمع عملکرد دانه به عنوان تابعی از تجمع ماده خشک و افزایش خطی شاخص برداشت روزانه (DHI) توصیف شد (۳۵). مطالعات نشان داده است که شاخص برداشت ذرت به طور خطی در طول دوره پر شدن دانه افزایش می‌یابد و مقدار افزایش خطی آن بین ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۱۶۲ در روز گزارش شده است (۲۱، ۳۱ و ۵۱). در این مدل، مقدار DHI برابر ۰/۰۱۵ در روز (۲۱ و ۳۱) تخمین زده شد (جدول ۲). از آنجایی که شاخص برداشت نسبت وزن دانه به کل ماده خشک می‌باشد، افزایش در شاخص برداشت تا زمانی انجام می‌گیرد که حداکثر وزن دانه به دست آید و بعد از آن منحنی شاخص برداشت در مقابل زمان حرارتی یک حالت مسطح پیدا می‌کند (۲۱ و ۳۴؛ شکل ۳).

سطح برگ

محاسبات مربوط به سطح برگ با روشی تقریباً مشابه با مدل EPIC (۵۰) که در مدل SBEET (۳۳ و ۳۷) به کار گرفته شده بود، انجام گرفت. با استفاده از این روش، میزان شاخص سطح برگ در هر روز از کاشت تا برداشت از طریق معادله زیر محاسبه شد:

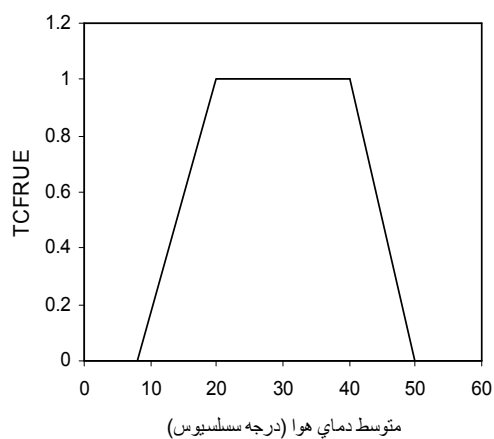
$$\text{LAI} = \text{RLAI} \times \text{LAIMAX} \quad [۵]$$

که در آن LAIMAX حداکثر شاخص سطح برگ برای تراکم مورد نظر و RLAI نسبت LAI موجود به حداکثر LAI قابل حصول توسط محصول می‌باشد. LAIMAX با استفاده از رابطه زیر به دست آمد:

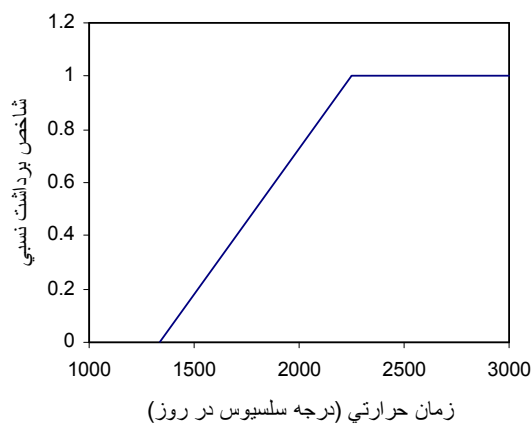
$$\text{LAIMAX} = (\text{PDEN} / \text{PDEN} + \text{EXP}(\text{AI} - \text{BI} \times \text{PDEN}))$$

[۶]

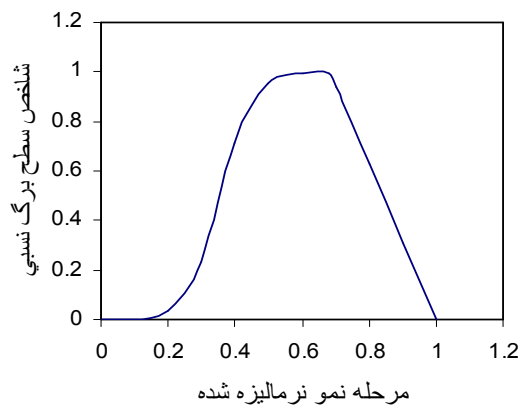
در این معادله، PDEN تراکم گیاه ذرت در متر مربع می‌باشد که به صورت یک ورودی باید به مدل داده شود. AI و BI ضرایب معادله هستند که با در دست بودن دو نقطه P1 و P2 و از طریق حل همزمان معادله فوق برای آن دو نقطه به دست می‌آید. در این مدل مقدار $\text{P1} = (۵/۵, ۰/۷)$ و مقدار $\text{P2} = (۷, ۰/۸)$ در



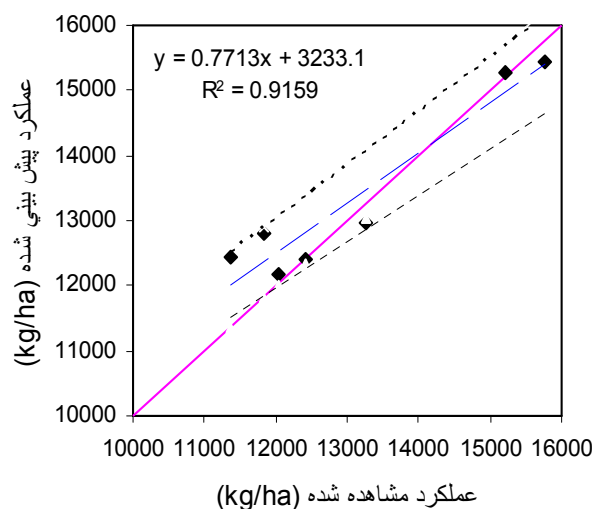
شکل ۲. واکنش ضریب تصحیح کارایی مصرف تابش فعال فتوسنتزی (TCFRUE) به دما در ذرت



شکل ۳. واکنش تغییرات میزان شاخص برداشت در مقابل زمان حرارتی تجمعی از شروع تا پایان پرشدن دانه در ذرت



شکل ۴. تغییرات شاخص سطح برگ نسبی در مقابل مرحله نمو نسبی (نرمالیزه شده) در ذرت



شکل ۵. عملکرد شبیه سازی شده در مقابل عملکرد مشاهده شده. خط توپر، خط چین و نقطه چین به ترتیب خط ۱:۱، معادله رگرسیون و حدود اطمینان خط رگرسیون هستند.

دامنه تغییرات عملکرد پیش‌بینی شده ۱۲۴۴۰ و ۱۵۴۴۰ کیلوگرم در هکتار و دارای میانگین ۱۳۳۶۰ کیلوگرم در هکتار بود. کارایی مدل با توجه به پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. یکی از معیارهای ارزیابی مدل ضرایب رگرسیون خطی ساده بین عملکرد پیش‌بینی شده و عملکرد مشاهده شده (a و b) بود (۴۷). ضرایب a و b به ترتیب نشان دهنده مقدار انحراف خط رگرسیون از مبدأ مختصات و مقدار اریب خط رگرسیون از خط ۱:۱ (خط ۴۵ درجه) می‌باشند. ضرایب مدل رگرسیون $a = 3233 \pm 1380$ و $b = 0.7713 \pm 0.12$ بر مبنای حدود اطمینان ۰/۹۵ (۲۸) اختلاف معنی‌داری با ضرایب خط ۱:۱ (a = ۰ و b = ۱) نشان ندادند. بنابراین می‌توان استنباط کرد که داده‌ها به خوبی حول خط ۱:۱ قرار دارند. همچنین مقدار R^2 (ضریب تبیین) برای مدل ۰/۹۲ بود. در به‌کارگیری مدل‌ها برای پیش‌بینی عملکرد، مقدار R^2 باید بیش از ۰/۶۰ باشد (۳۸) که این شرط در مدل حاضر وجود دارد. جذر میانگین مربعات انحرافات (RMSD)، ۵۷۰ کیلوگرم در هکتار بود، که ۴/۳٪ هر دو میانگین مشاهده شده و پیش‌بینی شده بود. این در حالی است که ضریب تغییرات (CV) در آزمایش‌های مزرعه‌ای بین ۲۰ تا ۳۰ درصد می‌باشد.

i ام، DRAINi میزان زهکشی عمقی که از محل ریشه خارج شده است، SEVPi میزان تبخیر از سطح خاک و TRIi میزان تعرق روزانه گیاه می‌باشد. محاسبات مربوط به زهکشی و تبخیر و تعرق بر طبق پژوهش سلطانی (۳۳) انجام شد. پارامترهای مربوط به موازنه آب خاک شامل ضریب تصحیح تولید ماده خشک برای تنش آب (WSSG)، ضریب تصحیح گسترش سطح برگ برای تنش آب (WSSL)، ضریب خاموشی برای کل تابش خورشیدی در محاسبه تقسیم تبخیر-تعرق (KET)، ضریب آلیدوی گیاه (CALB) و عمق مؤثر استخراج آب از خاک (SOLDEP) می‌باشند که مقدار آنها برای مدل حاضر در جدول ۲ آورده شده است.

نتایج و بحث

در شکل ۵ عملکرد شبیه سازی شده و عملکرد مشاهده شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین در این شکل خط ۱:۱، خط رگرسیون و حدود اطمینان خط رگرسیون آورده شده‌اند. عملکرد مشاهده‌ای دارای دامنه تغییرات ۱۱۳۷۰ تا ۱۵۷۷۰ کیلوگرم در هکتار و با میانگین ۱۳۱۳۰ کیلوگرم در هکتار بود؛ در حالی که

نتیجه گیری

جای مدل EPIC، که در این مطالعه به کارگرفته شده است، استفاده گردد تا مدل بتواند برای سایر شرایط آب و هوایی به صورت مطمئن تری به کار رود. در این مدل، برای موازنه آب خاک، خاک به صورت تک لایه در نظر گرفته شده است که لازم است خصوصیات لایه‌های مختلف آن جهت موازنه آب خاک لحاظ گردد.

به طور کلی، مدل حاضر می‌تواند برای پیش‌بینی عملکرد ذرت در محدوده تاریخ‌های کاشت مرسوم اصفهان به کار گرفته شود. برای این که مدل بتواند در دامنه وسیع‌تری از تاریخ‌های کاشت و عرض‌های جغرافیایی استفاده شود لازم است اثر طول روز بر مراحل مختلف نمو ذرت مورد بررسی قرار گیرد. همچنین برای محاسبه میزان افزایش سطح برگ از یک مدل فیزیولوژیک به

منابع مورد استفاده

1. Akbari, G. 1991. The effects of plants and planting pattern on growth, yield and yield components of corn in Isfahan. MSc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2. Andrade, F. H., M. E. Otegui and C. R. C. Vega. 2000. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize. *Agronomy Journal* 92: 92-97.
3. Birch, C. J., G. L. Hammer and K. G. Rickert. 1998. Temperature and photoperiod sensitivity of development in five cultivars of maize (*Zea mays* L.) from emergence to tassel initiation. *Field Crops Research* 55: 93-107.
4. Bonhomme, R., M. Derieux and G. O. Edmeades. 1994. Flowering of diverse maize cultivars in relation to temperature and photoperiod in multilocation field trials. *Crop Science* 34: 156-164.
5. Borrás, L., G. A. Maddonni and M. E. Otegui. 2003. Leaf senescence in maize hybrids: Plant population, row spacing and kernel set effects. *Field Crops Research* 82: 13-26.
6. Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussiere, Y. M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J. P. Gaudillere, C. Henault, F. Maraux, B. Seguin and H. Sinoquet. 2003. An overview of model STICS. *European Journal of Agronomy* 18: 309-332.
7. Caveró, J., I. Farre, P. Debaeke, and J. M. Faci. 2000. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agronomy Journal* 92: 679-690.
8. Dobermann, A., T. Arkebauer, K. Cassman, R. Drijber, J. Lindquist, J. Specht, D. Walters, H. Yang, D. Miller, D. Binder, G. Teichmeier, R. Ferguson and C. Wortmann. 2003. Understanding corn yield potential in different environments. Annual report to the fluid fertilizer foundation on grant "Yield potential and optimal soil productivity in irrigated corn systems of the north-central USA".
9. Duchon, C. E. 1986. Corn yield prediction using climatology. *Journal of Climatology and Applied Meteorology* .25: 581-590.
10. Dwyer, L. M., D. W. Stewart, L. Carrigan, B. L. Ma, P. Neave and D. Balchin. 1999. A general thermal index for maize. *Agronomy Journal* 91: 940-946.
11. Ellis, R. H., R. J. Summerfield, G. O. Edmeades and E. H. Roberts. 1992. Photoperiod, temperature and the interval from sowing to tassel initiation in diverse cultivars of maize. *Crop Science* 32: 1225-1232.
12. Grimm, S. S., J. W. Jones, K. J. Boote and D. C. Herzog. 1994. Modeling the occurrence of reproductive stages after flowering for four soybean cultivars. *Agronomy Journal* 86: 31-38.
13. Grimm, S. S., J. W. Jones, K. J. Boote and J. D. Hesketh. 1993. Parameter estimation for predicting flowering date of soybean cultivars. *Crop Science* 33: 137-144.
14. Jones, C. A. and J. R. Kiniry. 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station.
15. Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman and J. T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18: 235-265.
16. Kiniry, J. R. and D. P. Knievel. 1995. Response of maize seed number to solar radiation intercepted soon after anthesis. *Agronomy Journal* 87: 228-234.
17. Kiniry, J. R., J. R. Williams, R. L. Vanderlip, J. D. Atwood, D. C. Reicosky, J. Mulliken, W. J. Cox, H. J. Mascagni, Jr., S. E. Hollinger and W. J. Wiebold. 1997. Evaluation of two maize models for nine U.S. locations. *Agronomy Journal* 89: 421-426.

18. Lindquist, J. L., T. J. Arkebauer, D. T. Walters, K. G. Cassman and A. Dobermann. 2005. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. *Agronomy Journal* 97: 72-78.
19. Lizaso, J. I., W. D. Batchelor, K. J. Boote and M. E. Westgate. 2005. Development of a leaf – level canopy assimilation model for CERES- Maize. *Agronomy Journal* 97: 722-733.
20. Maddoni, G. A., M. E. Otegui and A. G. Cirilo. 2001. Plant population density, row spacing, and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. *Field Crops Research* 71: 183-193.
21. Muchow, R. C. 1990. Effect of high temperature on grain-growth in field-grown maize. *Field Crops Research* 23: 145-158.
22. Muchow, R. C. and P. S. Carberry. 1989. Environmental control of phenology and leaf growth in tropically adapted maize. *Field Crops Research* 20: 221-236.
23. Muchow, R. C. and T. R. Sinclair. 1991. Water deficit effects on maize yields modeled under current and greenhouse climates. *Agronomy Journal* 83: 1052-1059.
24. Muchow, R. C., T. R. Sinclair and J. M. Bennett. 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yields across locations. *Agronomy Journal* 82: 338-342.
25. Olsen, J. K., G. W. Blight and D. Gillespie. 1990. Comparison of yield, cob characteristics and sensory quality of six supersweet (sh.) corn cultivars grown in a subtropical environment. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 30: 387-393.
26. Rajcan, I. and M. Tollenaar. 1999. Source: sink ratio and leaf senescence in maize: I. Dry matter accumulation and partitioning during grain filling. *Field Crops Research* 60: 245-253.
27. Rezaei, A. and A. Soltani. 2007. An Introduction to Applied Regression Analysis. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
28. Sarmadnia, G. 1995. The effect of planting date on grain yield of maize cultivars in Isfahan. *Iranian Journal of Agricultural Sciences* 26: 17-25.
29. Sharifi, M. R. 1995. Photoperiod and temperature effects on development, growth and yield of corn. MSc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
30. Shaykewich, C. F. 1995. An appraisal of cereal crop phenology modeling. *Canadian Journal of Plant Science* 75: 329-341.
31. Sinclair, T. R. and R. C. Muchow. 1999. Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy* 65: 215-265.
32. Sinclair, T. R. and R. C. Muchow. 2001. System analysis of plant traits to increase grain yield on limited water supplies. *Agronomy Journal* 93: 263-270.
33. Soltani, A. 2009. Mathematical Modeling in Field Crops. JDM Press.
34. Soltani, A., B. Torabi and H. Zarei. 2005a. Modeling crop yield using a modified harvest index-based approach: Application in chickpea. *Field Crops Research* 91: 273-258.
35. Soltani, A., G. L. Hammer, B. Torabi, M. J. Robertson and E. Zeinali. 2006a. Modeling chickpea growth and development: Phenological development. *Field Crops Research* 99: 1-13.
36. Soltani, A., K. Ghassemi-Golezani, F. Rahimzadeh-Khooie and M. Moghaddam. 1999. A simple model for chickpea growth and yield. *Field Crops Research* 62: 213-224.
37. Soltani, A., M. Gholipoor and H. Hajizadeh. 2005b. SBEET: A simple model to simulate growth and yield of sugar beet. *Journal of Agricultural Science and Technology* 19: 11-26.
38. Soltani, A., M. J. Robertson, A. Rahemi-Karizaki, J. Pooreza and H. Zarei. 2006c. Modeling biomass accumulation and partitioning in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science* 192: 379-389.
39. Soltani, A., M. J. Robertson, B. Torabi, M. Yousefi-Daz and R. Sarparast. 2006b. Modelling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Field Crops Research* 138: 156-167.
40. Soltani, A. and T. R. Sinclair. 2011. A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research* 124: 252-260.
41. Soltani, A. and B. Torabi. 2009. Crop Modeling: Case Studies. JDM Press.
42. Stöckle, C., M. Donatelli and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18: 289-307.
43. Talebian-Mashhadi, M. 1993. Effect of row spacing and plant density on growth, yield and yield components of maize hybrids. MSc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
44. Tavakoli, H. 1988. Effects of different irrigation regimes on vegetative and reproductive growth of corn. MSc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
45. Tollenaar, M. and A. Aguilera. 1992. Radiation use efficiency of an old and a new maize hybrid. *Agronomy Journal* 84: 536-541.
46. Torabi, B. 2004. Prediction of phenological development in chickpea. MSc. Thesis, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Gorgan, Gorgan, Iran.

47. Van Ittersum, M. K., P. A. Leffelaar, H. Van Keulen, M. J. Kropff, L. Bastiaans and J. Goudriaan. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18: 201-234.
48. Verdopdt, V., E. V. Ranst and L. Ye. 2002. Daily simulation of potential dry matter production of annual field crops. *Agronomy Journal* 96: 1739-1753.
49. Wallach, D., B. Goffinet, J. E. Bergez, P. Debaeke, D. Leenhardt and J. N. Aubertot. 2001. Parameter estimation for crop models: A new approach and application to a corn model. *Agronomy Journal* 93: 757-766.
50. Williams, J. R., C. A. Jones, J. R. Kiniry and D. A. Spanel. 1989. The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE* 32: 497-510.
51. Willson, D. R., R. C. Muchow and C. J. Murgatroyd. 1995. Model analysis of temperature and solar radiation limitation to maize potential productivity in a cool climate. *Field Crops Research* 43: 1-18.
52. Xie Y., J. R. Kiniry, V. Nedbalek and W. D. Rosenthal. 2001. Maize and sorghum simulation with CERES-Maize, SORKAM, and ALMANAC under water-limiting condition. *Agronomy Journal* 93: 1148-1155.
53. Yang, H. Y., A. Dobermann, J. L. Lindquist, D. T. Walters, T. J. Arkebauer and K. G. Cassman. 2004. Hybrid-maize – a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Research* 87: 131-154.
54. Yazdandoost-Hamedani, M. 1996. Assessment of growth, yield and yield components of corn hybrids and yield of corn hybrids. MSc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
55. Yin, X., M. J. Kropff and R. H. Ellis. 1996. Rice flowering in response to diurnal temperature amplitude. *Field Crops Research* 48: 1-9.