



## برآورد هفتگی کارایی مصرف تابش ذرت در شرایط پتانسیل تولید زراعی

حمیدرضا افشارنادری<sup>۱</sup>، نوذر قهرمان<sup>۲\*</sup>، پرویز ایران‌نژاد<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۶

### چکیده

در این پژوهش، با هدف دستیابی به نمودار تغییرات هفتگی کارایی مصرف تابش ذرت (RUE)، یک رقم میان‌رس ذرت در فصل بهار در مزرعه پژوهشی دانشگاه تهران در کرج کشت شد. اطلاعات میدانی زیست‌سنجی با پایش منظم زیست‌توده خشک و شاخص مساحت برگ سبز بوته‌ها در ۱۵ هفته متوالی از فصل رشد، جمع‌آوری گردید. سپس با سنجش کامل شدت روزانه تابش تمام‌طیفی خورشید و آسمان در سطح مزرعه، به کمک شبیه‌سازی آفتاب‌گیری و پردازش تصویر، با در نظر گرفتن میانگین روزانه بازتابندگی و ضریب خاموشی پوشش گیاهی، از یک مدل چندلایه تابش درون پوشش گیاهی برای برآورد نظری میزان نور مرئی جذب شده در پوشش ذرت استفاده شد. شبیه‌سازی آفتاب‌گیری روزانه شب‌هنگام در بین ساعات ۲۱:۰۰ تا ۲۱:۳۰، اجرا شد و در آن، تمام قد بوته ذرت به طور هم‌زمان از تمام زوایای بین پرتوهای آفتاب و سطح افق در طی روز نمونه‌برداری، با نور تکفام پرتودهی می‌شد. سنجش میانگین روزانه بازتابندگی تکفام بوته نیز به کمک پردازش تصویر انجام گرفت. اندازه‌گیری‌ها از زمان بسته شدن تاج پوشش متوقف و در نهایت، ۱۲ مقدار متفاوت کارایی مصرف تابش (با در نظر گرفتن یک مقدار صفر برای هفته چهاردهم و دو مقدار یکسان صفر برای دو هفته آخر فصل رشد) در بازه‌های زمانی یک هفته‌ای محاسبه شد. نتایج این پژوهش بیان‌گر آن است که حتی در وضعیت پتانسیل تولید زراعی نیز نمی‌توان با قطعیت تنها یک مقدار ثابت از RUE را به کل فصل رشد ذرت تعمیم داد. طی فصل رشد دامنه تغییرات کارایی مصرف تابش ذرت به ۳۶/۱ g/MJ می‌رسد. میانه مقادیر هفتگی این کمیت که احتمال رخداد آن در نیمی از فصل رشد ۱۰۰ درصد است، برابر ۳/۵ g/MJ می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پوشش گیاهی، تابش فعال فتوسنتزی، زیست‌توده، ضریب خاموشی، فصل رشد

### مقدمه

به بیان دیگر، کارایی مصرف تابش به‌طور ساده، غیرمستقیم و کلی نتیجه نهایی تمام فرآیندهای رشد و نمو محصول که وابستگی گیاه‌شناختی، فیزیولوژیکی، ژنتیکی و زیست‌شیمیایی بسیار پیچیده‌ای به فوتوسنتز دارند را نسبت به انرژی جذب شده در فرآیند فوتوسنتز مقایسه می‌نماید (Hikosaka et al., 2016). موارد زیر از مهم‌ترین دلایل برآورد کارایی مصرف تابش محصول هستند: ۱- برآورد نظری مقدار زیست‌توده از کارایی مصرف تابش نسبت به برآورد زیست‌توده از فوتوسنتز پوشش گیاهی<sup>۷</sup> ساده‌تر است (Zhu et al., 2012). ۲- معیاری مناسب در کمی‌سازی بهره‌وری زراعی، سلامت گیاه و عملیات کشاورزی است. ۳- مبنایی ساده و کارآمد در شبیه‌سازی رشد محصول است (Monteith and Unsworth, 2013). از مقدار کارایی مصرف تابش یک محصول سه برآورد متفاوت

کارایی مصرف تابش محصول شاخصی است که با الهام از تعریف بازدهی تبدیل انرژی، میزان تولید زیست‌توده<sup>۵</sup> گیاهی را به تابش مصرفی محصول پیوند می‌زند. کارایی مصرف تابش عبارت است از خارج‌قسمت زیست‌توده خشک گیاه (بر حسب گرم) بر تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده<sup>۶</sup> توسط گیاه (بر حسب ژول) (Russell et al., 1990). این شاخص سهم خالص تولید زیست‌توده را به‌ازای انرژی تابشی جذب شده در واکنش‌های فوتوسنتز معین می‌کند.

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

\*نویسنده مسئول: [nghahreman@ut.ac.ir](mailto:nghahreman@ut.ac.ir)

DOI: 10.22125/agmj.2019.187260.1064

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

<sup>۴</sup> RUE: Radiation Use Efficiency

<sup>۵</sup> Biomass

<sup>۶</sup> APAR: Absorbed Photosynthetically Active Radiation

<sup>۷</sup> Canopy

روزانه ضریب خاموشی<sup>۱</sup> پوشش گیاهی، یا تعمیم مقادیر لحظه‌ای ضریب خاموشی پوشش گیاهی به کل ساعات روشنایی روز یا حتی تمام فصل رشد و ۳- تعمیم مقادیر لحظه‌ای بازتابندگی پوشش گیاهی به کل ساعات روشنایی روز یا حتی تمام فصل رشد، یا چشم‌پوشی کلی از تأثیر آن (صفر گرفتن بازتابندگی پوشش گیاهی). در بسیاری از گزارش‌های پژوهشی مرتبط با برآورد کارایی مصرف تابش گونه‌های زراعی، شدت تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده توسط گیاه با وجود همین ساده‌سازی‌ها برآورد گردیده است که در ادامه به چند نمونه از آنها اشاره شده است. اگر چه محاسبه شیب خط وایازش به‌میزان اندکی این خطاها را کاهش می‌دهد، اما در پایش پویایی کارایی مصرف تابش محصول در بازه‌های زمانی کوتاه مدت، به دلیل ماهیت ریزمقیاس پایش، تکرار این اشتباهات پایش را از خطای سامانمند بزرگی متأثر می‌کند که کاهش اعتمادپذیری نتایج را در پی خواهد داشت. ترکیبی از خطاهای برآورد فوق‌الذکر در پژوهش‌های مختلف وجود دارد. برای نمونه Liu et al., (2012) در ارزیابی کارایی مصرف تابش دو رقم ذرت در سه الگوی کشت متفاوت، با صفر گرفتن بازتابندگی پوشش ذرت، سنجش میزان جذب تابش فعال فوتوسنتزی روزانه را به‌ساعات ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ محدود ساخته و با نتایج آن ضریب خاموشی پوشش ذرت را محاسبه کرده‌اند. Andrade et al., (1993) جذب تابش فعال فوتوسنتزی روزانه را تنها در ساعات ۱۱:۰۰ تا ۱۳:۰۰ به‌وقت محلی اندازه گرفته و از بازتابندگی پوشش ذرت چشم‌پوشی کرده‌اند. Greaves and Wang (2017) در ارزیابی اثر تنش آبی بر میزان جذب نور و کارایی مصرف تابش ذرت، برای کل فصل رشد ضریب خاموشی پوشش ذرت را برابر ۰/۶۵ و بازتابندگی پوشش ذرت را صفر فرض کرده‌اند. Westgate et al., (1997) برای برآورد کارایی مصرف تابش در شرایط تأثیر دو فاصله‌گذاری متفاوت بین ردیف‌های کشت، با چشم‌پوشی از بازتابندگی پوشش ذرت، تنها در ساعات ۱۲:۰۰ تا ۱۴:۰۰ جذب روزانه تابش فعال فوتوسنتزی را اندازه‌گیری کرده‌اند. Kiniry et al., (1998) نیز در بررسی پاسخ کارایی مصرف تابش ذرت و ذرت خوشه‌ای (سورگوم) نسبت به تغییرات کمبود فشار بخار آب، بازتابندگی پوشش را صفر و میزان جذب روزانه تابش فعال

وجود دارد: ۱- در یک مقطع زمانی خاص از فصل رشد (مثلاً موقع گلدهی یا رسیدگی محصول) میزان این کمیت به‌واسطه تعریف آن تنها با درج یک عدد، محاسبه می‌شود (Akmal et al., 2014). ۲- با توجه به تعریف کارایی مصرف تابش محصول، شیب خط وایازش (رگرسیون) بین مقادیر زیست‌توده خشک نمونه‌برداری شده از واحد سطح کشت (مثلاً با واحد گرم بر متر مربع)، و تابش فعال فوتوسنتزی تجمعی جذب‌شده توسط محصول به‌عنوان میانگینی از کارایی مصرف تابش گیاه در فصل رشد تعیین می‌شود (Monteith, 1994; Sinclair and Muchow, 1999). ۳- با توجه به اوقات نمونه‌برداری از زیست‌توده بدون استفاده از خط وایازش، با کاربست مستقیم تعریف کارایی مصرف تابش، جدولی از مقادیر کارایی مصرف تابش در فصل رشد محصول تهیه می‌شود (Hossain et al., 2014). در این پژوهش نیز به این شیوه عمل شده است. به‌علت زمان‌بری، دشواری و هزینه زیاد اندازه‌گیری میدانی کارایی مصرف تابش، تحقیقاتی که به‌طور منظم و دقیق کارایی مصرف تابش گونه‌های زراعی در فصل رشد محصول را پایش کند بسیار اندک است. در بیش‌تر پژوهش‌ها از روش دوم برآورد این شاخص، استفاده شده است (Lindquist et al., 2005). این روش برای شبیه‌سازی رشد محصول درستی و دقت زیادی ندارد، زیرا تنها به یک مقدار عددی از کارایی مصرف تابش برای کل فصل رشد محصول بسنده می‌کند و تغییرات کارایی مصرف تابش در مراحل رشد، نمو و فنولوژی محصول را نادیده می‌گیرد. با این‌وجود، محاسبه شیب خط وایازش بین داده‌های تابش فعال فوتوسنتزی تجمعی جذب شده گیاه و زیست‌توده خشک برداشت‌شده از واحد مساحت سطح، روش رایج برآورد کارایی مصرف تابش محصولات زراعی است که البته در موارد نمونه‌برداری زمانی پراکنده و نامنظم درست‌ترین گزینه است. برای مثال از این روش در پژوهش Andrade et al., (1993) برای برآورد کارایی مصرف تابش ذرت استفاده شده است. معمولاً وجود سه اشتباه اساسی در برآوردهای میدانی یا نظری شدت تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده توسط محصول، منجر به کاهش قطعیت و درستی نتایج برآورد رگرسیونی کارایی مصرف تابش محصول می‌شود. این اشتباهات به ترتیب اولویت عبارتند از: ۱- سنجش ناقص شدت تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده توسط محصول در طول روز، ۲- استفاده از نتایج این سنجش در برآورد

<sup>1</sup> Extinction coefficient

تاریخ ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۶ بوته‌های ذرت در ردیف‌های کشت سبز و از این تاریخ آبیاری بارانی که به‌طور عمده با سامانه آبیاری عقربه‌ای (سنتر پیوت) صورت می‌گرفت، در کرت مطالعاتی به مساحت  $10 \times 15$  متر مربع با کارکرد تناوبی آبیاری ثابت تکمیل گردید. تا مرحله رسیدگی ذرت دور آبیاری هر ۶ روز یک مرتبه و با دبی پاشش  $2/2$  لیتر در ثانیه برای مدت ۴ ساعت تنظیم شد. در مواقع ۶ و ۷ برگی شدن بوته‌های ذرت نیز برای حفظ شرایط پتانسیل تولید زراعی از طریق مبارزه با علف‌های هرز و آثار رقابتی آنها، به مقدار ۲ لیتر در هکتار از سم علفکش نیکوسولفورن با نام تجاری «کروز» استفاده گردید.

### داده‌های زیست‌سنجی

اولین نمونه‌برداری تخریبی از بوته‌ها در تاریخ ۷ خرداد ۱۳۹۶ با برش طوقه‌ای یک بوته در هر متر مربع از ردیف‌های کشت کرت مطالعاتی انجام شد. در این تاریخ با گذشت یک هفته از سبز شدن کلیه بوته‌ها از مصرف کامل اندوخته غذایی (اندوسپرم) بذرها و عدم تأثیر آن در تولید زیست‌توده جدید، و واگذاری کامل تولید زیست‌توده به فوتوسنتز اطمینان حاصل گردید. این نمونه‌برداری تخریبی به‌طور مرتب در طول فصل رشد به فاصله زمانی یک هفته تکرار و نمونه‌ها با فرض یکسان‌انگاری رشد و نمو تمامی بوته‌ها، مورد سنجش مساحت برگ‌های سبز قرار گرفته و سپس کل بوته به کوره الکتریکی منتقل می‌گردید. سنجش تخریبی مساحت برگ‌های سبز بوته‌ها با دستگاه مساحت‌سنج برگ از کمپانی Delta-T Devices Ltd. انگلستان انجام شد. در جدول ۱ مقادیر این اندازه‌گیری‌ها در ۱۵ نوبت نمونه‌برداری درج شده است. بوته‌های انتقالی به کوره الکتریکی پس از ۲۴ ساعت استقرار در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد، کاملاً خشک و تمامی اندام‌های هوایی ذرت برای تعیین زیست‌توده خشک توزین می‌گردید. در جدول ۱ برای ۱۵ هفته متوالی از نمونه‌برداری تخریبی بوته‌ها، مقادیر زیست‌توده خشک ذرت موجود در یک متر مربع از سطح کشت نیز ثبت شده است.

### نور خالص دریافتی

منظور از تابش فعال فوتوسنتزی همان تابش نور مرئی با دامنه طول موج ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر است که سبب فعال شدن واکنش‌های فوتوشیمیایی چرخه فوتوسنتز در

فوتوسنتزی را تنها در ساعات ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ وقت محلی اندازه گرفته‌اند. در پژوهش حاضر، که هدف آن پایش پویایی هفتگی کارایی مصرف تابش ذرت است، با رویکرد افزایش درستی و قطعیت برآورد، برای دستیابی به نمودار تغییرات زمانی کارایی مصرف تابش در فصل رشد، اقدام به کشت و داشت ذرت شد.

### مواد و روش‌ها

در بیش‌تر مطالعات و پژوهش‌های مرتبط به زیست‌سنجی<sup>۱</sup> گونه‌های زراعی، به‌خاطر دشواری و هزینه زیاد پایش مرتب جرم ریشه‌ها در فصل رشد، از سهم ریشه‌ها در اندازه کلی زیست‌توده گیاهی چشم‌پوشی و تنها اندام‌های هوایی گیاه پس از برش طوقه‌ای بوته به‌عنوان زیست‌توده توزین می‌شوند. با فرض یکسان‌انگاری رشد و نمو همه بوته‌ها در فصل رشد، همین روش تخریبی مبنای نمونه‌برداری زیست‌توده ذرت در کاشت و داشت مزرعه‌ای قرار گرفت.

### روش کاشت و داشت

در تاریخ ۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۶ ذرت رقم متوسط‌طرس "Maxima" در مزرعه آموزشی و پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در محمدرشهر کرج، با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و ارتفاع  $1292/9$  متر از سطح آب‌های آزاد، با پیروی از هندسه کاشت مستطیلی به شکل و آرایش ردیفی کشت شد. کاشت با فاصله بین ردیف ۷۵ سانتیمتر و به‌طور تقریبی در راستای شمالی - جنوبی با تراکم کشت ۱۰ بوته در هر متر مربع انجام شد. به‌منظور رعایت شرایط پتانسیل تولید زراعی که وضعیت عدم کمبود آب، نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک در فصل رشد محصول است، پیش از کاشت کودهای پایه‌ای N-P-K به‌مقدار ۷۵ کیلوگرم در هکتار از کود اوره، ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار از کود سوپر فسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار از کود سولفات پتاسیم در شخم قبل از کاشت به خاک اضافه شد. در مرحله داشت نیز هنگام ظهور گل‌آذین<sup>۲</sup> ذرت به‌صورت دستی، کود سرک اوره با مقدار کلی ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار در سطح مزرعه پخش شد. در

<sup>1</sup> Biometry

<sup>2</sup> Tassel

در پوشش گیاهی لحاظ نشده، و تنها مؤلفه اصلی کاهش نور مرئی دریافتی در سطح پوشش گیاهی که همان بازتابش پوشش گیاهی می‌باشد، مد نظر قرار گرفته است. علل اصلی این چشم‌پوشی: ۱- سهم بسیار ناچیز بازتابش خاک (به‌ویژه خاک زیر پوشش گیاهی) و پراکندگی نور در پوشش گیاهی نسبت به تابش مستقیم و پخشیده خورشید در تأمین نور و ۲- پیچیدگی بسیار زیاد برآورد نظری یا میدانی سهم این عوامل در تأمین نور است (Campbell and Norman, 1998; Verhoef, 1984). در طول فصل رشد ذرت سنجش مداوم شدت تابش تمام‌طیف خورشید و جو در سطح مزرعه، به‌صورت انباشته (تجمعی) و پیوسته در کل ساعات روشنایی روز توسط TSR<sup>۲</sup> انجام گرفت. در جدول ۲ مقادیر انباشته تابش برای هفته‌های بین دو نوبت متوالی از نمونه‌برداری تخریبی بوته‌های ذرت فهرست شده است. در جدول ۲ متناظر با این ۱۴ هفته از فصل رشد ذرت، مقادیر هفتگی شدت خالص تابش فعال فوتوسنتزی دریافتی (محاسبه شده از معادله ۱) نیز آورده شده است. در این پژوهش به‌کمک پردازش تصویر مقادیر میانگین روزانه بازتابندگی پوشش ذرت در ۷ هفته اول نمونه‌برداری برآورد گردید که فهرست آن در جدول ۲ آمده است. برای بقیه هفته‌های فصل رشد نیز به‌دلیل بسته شدن کامل پوشش ذرت، به‌طور ثابت مقدار میانگین روزانه بازتابندگی پوشش در هفته هفتم تعمیم داده شده است. عملیات پردازش تصویر توسط نرم‌افزار Digimizer بر روی تصاویر برداشتی از یک بوته ذرت هنگام شبیه‌سازی آفتابگیری<sup>۳</sup> روزانه آن انجام گرفت. شبیه‌سازی آفتابگیری روزانه شب‌هنگام در بین ساعات ۲۱:۰۰ تا ۲۱:۳۰، به‌وسیله نوعی پویسگر<sup>۴</sup> زاویه‌ای ویژه اجرا شد. در شکل ۱ تصویری از وضعیت استقرار این پویسگر در پوشش ذرت مزرعه آمده است. در شبیه‌سازی آفتابگیری روزانه با این دستگاه، تمام قد بوته ذرت هدف به‌طور همزمان از تمام زوایای بین پرتوهای آفتاب و سطح افق در طی روز نمونه‌برداری، پرتودهی می‌شد. در این وضعیت بازتاب نور از بوته، نماینده‌ای از میانگین روزانه بازتابش نور خورشید از بوته ذرت است و برداشت تصویر آن اطلاعات خام بازتابندگی را در روشنایی تصویردانه‌های<sup>۵</sup> بوته ذخیره می‌کند. در شکل

رنگدانه‌های سبزینه (کلروفیل) در کلروپلاست‌ها، به‌ویژه از نوارهای<sup>۱</sup> آبی و قرمز طیف مرئی می‌شود.

جدول ۱- مساحت برگ‌های سبز یک بوته و زیست‌توده خشک ذرت در دوره نمونه‌برداری

Table 1- One plant green leaves area and maize dry biomass during the sampling period

Day After Emergence	Sampling date	One plant Green leaves area (m <sup>2</sup> )	Maize dry biomass per unit area (g.m <sup>-2</sup> )
7	28-May-2017	0.0069	3.5
14	4-Jun-2017	0.0193	13.2
21	11-Jun-2017	0.0298	39.8
28	18-Jun-2017	0.1634	421.9
35	25-Jun-2017	0.2797	632.5
42	2-Jul-2017	0.4478	935.5
49	9-Jul-2017	0.4857	1001.2
56	16-Jul-2017	0.5066	1166.7
63	23-Jul-2017	0.5119	1263.6
70	30-Jul-2017	0.5161	2627.1
77	6-Aug-2017	0.5242	3140.1
84	13-Aug-2017	0.5346	3459.9
91	20-Aug-2017	0.5358	3461.6
98	27-Aug-2017	0.4512	3198.6
105	3-Sep-2017	0.3603	2791.5

تمام بافت‌های فوتوسنتز کننده با جذب زیاد نورهای آبی و قرمز، سبز رنگ به‌چشم می‌آیند (Jones, 2014). برای برآورد مقدار تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده در پوشش گیاهی، ابتدا باید میزان نور مرئی دریافتی پوشش را مشخص کرد، که به دو روش کلی برآورد نظری و اندازه‌گیری میدانی انجام می‌یابد. اندازه‌گیری میدانی نور دریافتی به‌وسیله انواع تابش‌سنج‌ها یا نورسنج‌های اختصاصی پوشش گیاهی اجرا می‌شود. در این پژوهش نیز مبنای محاسبه نور خالص دریافتی، اندازه‌گیری شدت تابش تمام‌طیف در سطح مزرعه و استفاده از معادله ۱ بود.

$$\text{Daily IPAR}_{\text{net}} = 0.45 R_s (1 - \overline{\Gamma_{\text{PAR}}}(d)) \quad (1)$$

در معادله فوق Daily IPAR<sub>net</sub> شدت خالص تابش فعال فوتوسنتزی دریافتی در طول روز (J.m<sup>-2</sup>.day<sup>-1</sup>)، R<sub>s</sub> شدت روزانه تابش تمام‌طیف خورشید و جو (J.m<sup>-2</sup>.day<sup>-1</sup>)،  $\overline{\Gamma_{\text{PAR}}}(d)$  میانگین روزانه درصد بازتابندگی پوشش گیاهی در نوار مرئی و ضریب ۰/۴۵ سهم نور مرئی از تابش تمام‌طیفی خورشید و جو در سطح زمین است (Monteith and Unsworth, 2013). شایان ذکر است که در معادله ۱ برای برآورد شدت خالص تابش فعال فوتوسنتزی دریافتی تأثیر بازتابش خاک، تراکسیل نور از برگ‌ها و پراکندگی نور

<sup>2</sup> TSR: Total Solar Radiometer

<sup>3</sup> Insolation

<sup>4</sup> Scanner

<sup>5</sup> Pixels

<sup>1</sup> Bands

کسینوسی<sup>۲</sup> آشکارسازهای نور آرایه خطی این وسایل در درجات بزرگ زاویه سرسوی<sup>۳</sup> نور فرودی است. به همین دلیل با محدود شدن زمان سنجش با این دستگاه نمی‌توان به برآورد کاملاً درستی از مقدار کل نور جذب شده در ساعات روشنایی روز دست یافت (Webb et al., 2008). منظور از اشتباه کسینوسی انحراف نشانه‌های خروجی یک آشکارساز یا حسگر تابش است که تابعی از کسینوس زاویه سرسوی پرتوهای فرودی به آشکارساز یا حسگر تابش می‌باشد. در این پژوهش برای محاسبه هفتگی کل تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده از برآورد نظری آن با کاربری مدل چندلایه تابش درون پوشش گیاهی استفاده شد. این مدل که برای برآورد نظری میزان جذب نور و ضریب خاموشی پوشش گیاهی، نتایج سنجش‌های دستگاه‌های سیتومتر نیز به آن وارد می‌شود، مدل اصلی و پایه برآورد نظری نور مرئی جذب شده در پوشش گیاهی است، که معادله اساسی آن برای این منظور عبارت است از:

$$APAR=IPAR_{net}(1-\exp(-K(t).LAI(t))) \quad (2)$$

در این معادله APAR شدت تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده در پوشش گیاهی بر حسب ژول بر متر مربع در واحد زمان،  $IPAR_{net}$  شدت خالص تابش فعال فوتوسنتزی دریافتی حسب ژول بر متر مربع در واحد زمان،  $K(t)$  ضریب خاموشی پوشش گیاهی در هر مرحله رشد و  $LAI(t)$  شاخص مساحت برگ<sup>۴</sup> پوشش گیاهی در آن مرحله از رشد است و ضریب خاموشی و شاخص مساحت برگ هر دو بدون واحد هستند (Monteith and Unsworth, 2013). با انتگرال‌گیری از معادله ۲ در مدت طلوع تا غروب آفتاب، مقادیر انباشته روزانه شدت تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده در پوشش گیاهی از معادله ۳ محاسبه شد.

$$DailyAPAR=DailyIPAR_{net}(1-\exp(-\bar{K}(d).LAI(d))) \quad (3)$$

در این معادله Daily APAR شدت روزانه تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده در پوشش گیاهی ( $J.m^{-2}.day^{-1}$ )،  $Daily\ APAR_{net}$  شدت خالص تابش فعال فوتوسنتزی دریافتی در طول روز ( $J.m^{-2}.day^{-1}$ )،  $\bar{K}(d)$  میانگین روزانه ضریب خاموشی پوشش گیاهی و  $LAI(d)$  شاخص مساحت برگ پوشش گیاهی در روز مورد نظر است.

۲ تصویر برداشتی از یک بوته ذرت در هنگام شبیه‌سازی آفتابگیری روزانه در تاریخ ۲۱ خرداد ۱۳۹۶ و پنجره اجرایی نرم‌افزار Digimizer نشان داده شده است.



Figure 1- The scanner used for insolation simulation of maize plants

شکل ۱- تصویری از پوشگر مورد استفاده در شبیه‌سازی آفتابگیری بوته‌های ذرت

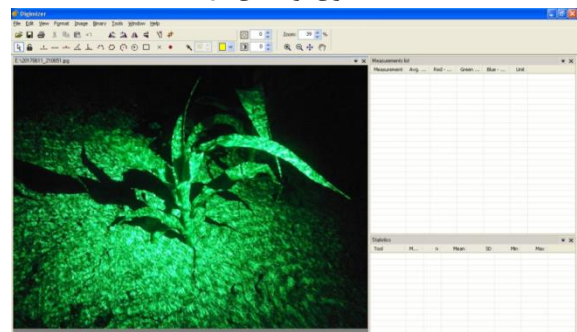


Figure 2- An example of executive system window of Digimizer software and loaded image

شکل ۲- نمونه‌ای از پنجره اجرایی نرم‌افزار Digimizer و تصویر بارگذاری شده در آن

### تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده

معمولاً برآورد میدانی تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده در مزرعه توسط دستگاه‌های سیتومتر<sup>۱</sup> یا شبکه‌ای از نورسنج‌های مستقر در ارتفاعات مختلف درون پوشش گیاهی انجام می‌پذیرد (Monteith, 1969; Ross, 1981). هزینه و مشکلات اجرایی این شبکه‌ها، به ویژه پاکیزه نگاه داشتن نورسنج‌های واقع بر سطح خاک زیر بوته‌ها، منجر به استفاده بیش‌تر از دستگاه‌های قابل حمل سیتومتر در برآورد میدانی نور مرئی جذب شده در پوشش گیاهی مزرعه شده است. دو گونه تجاری رایج این ادوات: ۱- سنجش‌گرهای آرایه چند آشکارساز خطی و ۲- سنجش‌گرهای گران‌قیمت مجهز به عدسی چشم ماهی می‌باشند (Jones, 2014). ایراد عمده سنجش‌گرهای آرایه چند آشکارساز خطی محدودیت زمانی سنجش درست و بدون ابهام آرایه خطی به ساعات ۱۱:۰۰ تا ۱۳:۰۰ روز است. این محدودیت ناشی از اشتباه

<sup>2</sup> Cosine error

<sup>3</sup> Zenith angle

<sup>4</sup> LAI: Leaf Area Index

<sup>1</sup> Ceptometer

جدول ۲- فهرست مقادیر انباشته هفتگی شدت تابش تمام‌طیفی،  $IPAR_{net}$  (شدت خالص تابش فعال فوتوسنتزی دریافتی) و میانگین

روزانه بازتابندگی نوار مرئی پوشش ذرت

Table 2- List of weekly cumulative quantities of Full Spectrum Irradiation,  $IPAR_{net}$  (Intensity of Net Intercepted Photosynthetically Active Radiation) and Daily average of maize canopy visible band reflectivity

Week Number	Day After Emergence	Weekly Full Spectrum Irradiation ( $\frac{MJ}{m^2 \cdot week}$ )	Daily average of maize canopy visible band reflectivity (%)	Weekly $IPAR_{net}(\frac{J}{m^2 \cdot week})$
3	14	239.032	19	87127164
4	21	219.812	22	77154012
5	28	235.516	29	75247362
6	35	217.690	15	83266425
7	42	205.274	12	81288504
8	49	182.166	10	73777230
9	56	185.931	11	74465366
10	63	204.091	11	81738446
11	70	192.617	11	77143109
12	77	192.866	11	77242833
13	84	185.935	11	74466968
14	91	179.127	11	71740364
15	98	177.081	11	70920941
16	105	175.490	11	70283745

۱۰ بوته در هر متر مربع، شاخص مساحت برگ سبز در هفته‌های نمونه‌برداری تخریبی از ۱۰ برابر کردن مساحت برگ‌های سبز یک بوته (جدول ۱) محاسبه گردید و به‌خاطر تغییر اندک آن در طی یک هفته، اندازه هفتگی آن ثابت فرض شد. با همین فرض میانگین روزانه ضریب خاموشی پوشش ذرت در طول یک هفته نیز ثابت گرفته شد و فهرست مقادیر هفتگی آن در جدول ۳ آمده است. در جدول ۳ مقادیر هفتگی شدت تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده در پوشش ذرت (محاسبه شده از معادله ۳) و تفاوت هفتگی زیست‌توده خشک ذرت در واحد سطح کشت نیز درج شده است.

### نتایج و بحث

بر اساس تعریف و مفهوم کارایی مصرف تابش، معادله ۵ مدلی ساده، قوی و کارآمد در شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی ارائه می‌کند.

$$DBM_i = \int_{t_{1i}}^{t_{2i}} APAR(t)_i \cdot RUE_i(t) dt \quad (5)$$

در این معادله  $DBM_i$  زیست‌توده خشک محصول در مرحله رشد  $i$  بر حسب گرم،  $APAR(t)_i$  تابع زمانی انرژی تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده در پوشش گیاهی، در مرحله رشد  $i$  و بر حسب ژول و  $RUE_i(t)$  کارایی مصرف تابش محصول در مرحله  $i$  از رشد و نمو محصول بر حسب گرم بر ژول است (Pitman, 2000). در این مدل که اصلی‌ترین متغیر محرکه فوتوسنتز و تولید زیست‌توده گیاهی را در برآورد رشد محصول لحاظ می‌کند، اگر  $RUE_i(t)$  یک تابع

بر خلاف اغلب مطالعات پیشین در زمینه برآورد کارایی مصرف تابش محصولات زراعی که در آنها تنها برآورد مقادیر لحظه‌ای ضریب خاموشی پوشش گیاهی مورد نظر بوده است، در این پژوهش برای افزایش درستی برآورد میزان جذب روزانه تابش فعال فوتوسنتزی، بدون تعمیم مقادیر لحظه‌ای ضریب خاموشی پوشش گیاهی به کل ساعات روشنایی روز، با کاربست معادله ۴ میانگین روزانه ضریب خاموشی پوشش گیاهی محاسبه شد (این معادله توسط نگارنده استخراج شده است).

$$\bar{K}(d) = \frac{-\ln(1-A(d))}{2 A(d)} \quad (4)$$

در این معادله  $\bar{K}(d)$  میانگین روزانه ضریب خاموشی پوشش گیاهی و  $A(d)$  مساحت کل برگ‌های سبز یک بوته گیاه در روز مورد نظر ( $m^2$ ) است. در این نوشتار به‌جزئیات فیزیکی و ریاضی استخراج معادله ۴ پرداخته نمی‌شود ولی فرض‌های اصلی استخراج این معادله عبارتند از: ۱- تناسب جذبندگی زاویه‌ای تکفام<sup>۱</sup> یک بوته گیاه با جذبندگی زاویه‌ای تکفام یک متر مربع از پوشش گیاهی ۲- تیرگی و کدورت کامل برگ‌ها ۳- ناوابستگی ضریب خاموشی به طول موج نور و ۴- استقرار قائم ساقه اصلی بوته و تقارن محوری و مرکزی برگ‌ها نسبت به آن. ضخامت زیاد برگ‌های سبز در بیش‌تر مراحل رشد رویشی و زایشی ذرت و ریخت‌شناسی (مورفولوژی) بوته‌های قد بلند آن، نزدیکی به‌فرض‌های ۲ و ۴ را نیز تضمین می‌کند. با فرض ضروری یکسان‌انگاری رشد و نمو تمام بوته‌های ذرت با تراکم کشت

<sup>1</sup> Monochromatic Angular Absorptivity

دقت برآورد در این پژوهش، از چهار ویژگی و امتیاز متفاوت برخوردار هستند:

۱- عملیات کاشت و داشت در وضعیت پتانسیل تولید زراعی بوده است؛ بنابراین، تولید و افزایش هفتگی زیست توده و شاخص مساحت برگ سبز در شرایط مطلوب و آرمانی (ایده آل) رشد از نظر عدم کمبود آب و مواد مغذی پایه‌ای گیاه بوده است. لذا در نمودار شکل ۳ نیز مقادیر آرمانی کارایی مصرف تابش در هفته‌های فصل رشد ذرت ثبت شده‌اند که مرجع و معیار مقایسه کارایی مصرف تابش ارقام متوسط‌ترس ذرت هستند.

جدول ۳- فهرست مقادیر هفتگی ضریب خاموشی پوشش ذرت، شدت APAR (تابش فعال فوتوسنتزی جذب شده) و تفاوت زیست توده خشک ذرت در واحد سطح کشت

Table 3- Weekly values of maize canopy extinction coefficient, APAR (Absorbed Photosynthetically Active Radiation) intensity and maize dry biomass per unit planting area

Week Number	Day After Emergence	Maize canopy extinction coefficient	(a) Weekly APAR Intensity ( $\frac{J}{m^2 \cdot week}$ )	(b) Weekly difference of maize dry biomass per unit planting area ( $\frac{g}{m^2 \cdot week}$ )
3	14	0.50	2959712	9.7
4	21	0.50	7155721	26.6
5	28	0.51	10575248	382.1
6	35	0.55	49141074	210.6
7	42	0.59	65523989	303.0
8	49	0.66	69988627	65.7
9	56	0.68	71787037	165.5
10	63	0.70	79349087	96.9
11	70	0.70	75006410	1363.5
12	77	0.70	75193113	513.0
13	84	0.71	72651379	319.8
14	91	0.72	70173333	1.7
15	98	0.72	69392977	-263.0
16	105	0.66	66785054	-407.1

شدت خالص تابش فعال فوتوسنتزی دریافتی نادیده گرفته می‌شود، یا در بهترین حالت تنها به‌تعمیم زمانی مقادیر لحظه‌ای بازتابندگی پوشش بسنده می‌شود، در این پژوهش از میانگین روزانه بازتابندگی پوشش ذرت در برآورد روزانه شدت خالص تابش فعال فوتوسنتزی دریافتی استفاده شده است. این موضوع در حالی به‌افزایش درستی مقادیر جدول ۳ منجر می‌شود که حتی در رویه و نتایج سنجش بیش‌تر ادوات سیتومتر نیز تأثیر بازتابندگی پوشش گیاهی لحاظ نشده است.

۴- برآورد مقادیر کارایی مصرف تابش بر مبنای میانگین روزانه ضریب خاموشی پوشش گیاهی صورت گرفته است، که با حذف خطای تعمیم زمانی یک مقدار لحظه‌ای از ضریب خاموشی پوشش گیاهی به کل ساعات روشنایی روز، سبب افزایش درستی برآورد کارایی مصرف تابش گیاه

ثابت و برابر با مقدار شیب خط وایزش فرض شود، در کل فصل رشد محصول نمی‌توان به‌برآورد کاملاً درست و دقیقی از روند رشد دست یافت. ارائه فهرستی هفتگی از کارایی مصرف تابش ذرت سبب ظهور  $RUE_i(t)$  در هر مرحله از رشد و نمو ذرت می‌شود. برای این منظور با توجه به‌تعریف کارایی مصرف تابش، از جدول ۳ خارج‌قسمت مقادیر هفتگی ستون (b) بر مقادیر متناظر ستون (a) محاسبه، و برای فصل رشد ذرت ۱۲ مقدار متفاوت از کارایی مصرف تابش در بازه‌های زمانی یک هفته حاصل گردید (مقادیر سه هفته آخر فصل رشد صفر هستند). این مقادیر (نمودار شکل ۳)، با رویکرد کلی افزایش درستی و

۲- پیوستگی زمانی سنجش روزانه تابش تمام‌طیف خورشید و جو در ساعات روشنایی کلیه روزها ۱۰۰ درصد و پیوستگی روزانه آن در هفته‌های فصل رشد ذرت ۹۸ درصد بوده است (برای تاریخ‌های ۸ و ۹ تیر ۱۳۹۶، شدت تابش تمام‌طیفی خورشید و جو در سطح مزرعه، به‌صورت نظری برآورد شد)؛ تفکیک زمانی<sup>۱</sup> سنجش تابش مستقیم و پخشیده خورشید نیز بسیار زیاد و ۱۰ ثانیه بوده است. در نتیجه فهرست مقادیر هفتگی ستون (a) جدول ۳ تفکیک زمانی بسیار زیادی دارند و فاقد اشتباه حاصل از نقصان و ناپیوستگی زمانی برآورد جذب نور مرئی در پوشش گیاهی هستند.

۳- برخلاف بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با برآورد کارایی مصرف تابش که تأثیر بازتابندگی پوشش گیاهی در برآورد

<sup>1</sup>Temporal Resolution

چرخه زیست‌شیمیایی فوتوسنتز است که نسبت به گونه‌های زراعی سه‌کربنه کارایی فوتوسنتزی بیشتری دارد و لذا انتظار می‌رود که آهنگ تولید زیست‌توده، سرعت رشد و کارایی مصرف تابش آن نیز شیب زیادتری داشته باشد (Hanks and Ritchie, 2001; Yin and Gon van, 2005). بر اساس مقادیر ستون (b) جدول ۳، وقوع دو قله نمودار شکل ۳ با رسیدن به دو بیشینه سرعت رشد زیست‌توده ذرت هم‌زمان شده است. همچنین با توجه به مقادیر جدول ۱، نقطه عطف منحنی زمانی افزایش رشد زیست‌توده ذرت نیز در هفته پنجم فصل رشد واقع شده و هم‌زمان با رسیدن به قله اول نمودار شکل ۳ می‌باشد.

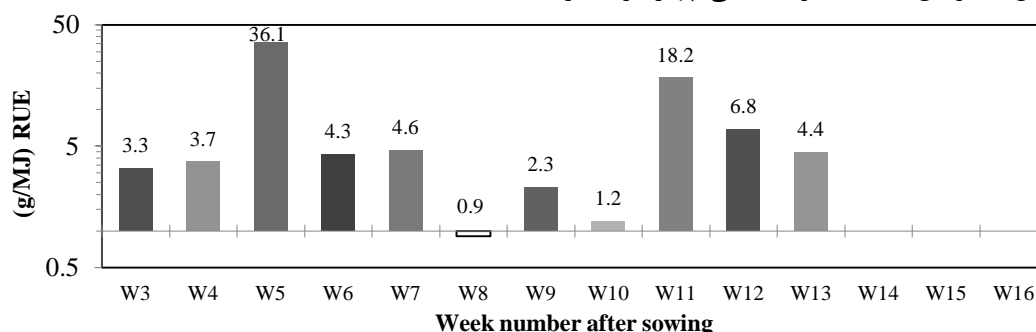


Figure 3- The time graph of maize weekly radiation use efficiency during growing season  
 شکل ۳- نمودار کارایی مصرف تابش در بازه‌های هفتگی فصل رشد ذرت

از سوی دیگر با توجه به نمودار شکل ۳ مشخص می‌شود که در دوره گذار از فاز رشد رویشی به فاز رشد زایشی، کارایی مصرف تابش ذرت افت چشمگیری یافته و دو کمینه غیر صفر آن در هفته‌های هشتم و دهم فصل رشد، تقریباً با مراحل ظهور گل‌آذین و گرده‌افشانی هم‌زمان هستند. با استفاده از مقادیر نمودار شکل ۳، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات هفتگی کارایی مصرف تابش به ترتیب برابر با ۳/۵ g/MJ، ۹/۴۳ g/MJ و ۱۶۰ درصد به دست می‌آید. در مدت انجام این پژوهش مرجعی یافت نشد که آمار هفتگی از کارایی مصرف تابش ذرت را ارائه کند، تا بتوان نتایج به دست آمده را با آن مقایسه کرد. با این وجود، با توجه به اطلاعات ارائه شده توسط Boote and Loomis (1991)، Hanks and Ritchie (2001) و Lindquist et al., (2005) مشخص شد که میانگین مقادیر هفتگی کارایی مصرف تابش ذرت در نمودار شکل ۳، تفاوت زیادی با مقدار کلی کارایی مصرف تابش ذرت در فصل رشد ندارد. این محققین به ترتیب مقدار کلی کارایی مصرف تابش ذرت را  $0.20 \pm 3/74$  g/MJ و  $2/9-3/3$  g/MJ

می‌شود. بنابراین، با توجه به پیوستگی زمانی فوتوسنتز و تولید زیست‌توده در کل ساعات روشنایی روز، لحاظ کردن میانگین روزانه ضریب خاموشی پوشش گیاهی به جای مقادیر لحظه‌ای آن، به مراتب دقت برآورد کارایی مصرف تابش محصول را افزایش می‌دهد.

در شکل ۳ نمودار زمانی کارایی مصرف تابش در بازه‌های هفتگی فصل رشد ذرت ترسیم شده است. دو قله این نمودار در هفته‌های پنجم و یازدهم فصل رشد، به ترتیب فنولوژیکی در مراحل برگ‌دهی از فاز رشد رویشی و آغاز پر شدن دانه‌ها از فاز رشد زایشی ذرت است. علت اصلی تمایل زیاد شیب‌های افزایشی در مجاورت قله‌های نمودار شکل ۳ نیز این است که ذرت گیاهی چهار کربنه در

### نتیجه‌گیری

شاخص کارایی مصرف تابش به دلیل جامع‌نگری فوتوسنتز و کلیه فرآیندهای تولید زیست‌توده با معیار جذب فعال و متمرکز نور مرئی در پوشش گیاهی، یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مطالعه و بررسی بهره‌وری زراعی، سلامت گیاه و عملیات کاشت و داشت محصول است. دستیابی به مقادیر هفتگی کارایی مصرف تابش ذرت در شرایط پتانسیل تولید زراعی علاوه بر کاربرد در شبیه‌سازی رشد ذرت، اقدامی مهم در زمینه مطالعات و پژوهش‌های مرتبط با هواشناسی کشاورزی، زراعت و تولیدات گیاهی، زیست‌سنجی زراعی، آبیاری، بوم‌شناسی زراعی، گیاه‌پزشکی،

از سوی دیگر با توجه به نمودار شکل ۳ مشخص می‌شود که در دوره گذار از فاز رشد رویشی به فاز رشد زایشی، کارایی مصرف تابش ذرت افت چشمگیری یافته و دو کمینه غیر صفر آن در هفته‌های هشتم و دهم فصل رشد، تقریباً با مراحل ظهور گل‌آذین و گرده‌افشانی هم‌زمان هستند. با استفاده از مقادیر نمودار شکل ۳، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات هفتگی کارایی مصرف تابش به ترتیب برابر با ۳/۵ g/MJ، ۹/۴۳ g/MJ و ۱۶۰ درصد به دست می‌آید. در مدت انجام این پژوهش مرجعی یافت نشد که آمار هفتگی از کارایی مصرف تابش ذرت را ارائه کند، تا بتوان نتایج به دست آمده را با آن مقایسه کرد. با این وجود، با توجه به اطلاعات ارائه شده توسط Boote and Loomis (1991)، Hanks and Ritchie (2001) و Lindquist et al., (2005) مشخص شد که میانگین مقادیر هفتگی کارایی مصرف تابش ذرت در نمودار شکل ۳، تفاوت زیادی با مقدار کلی کارایی مصرف تابش ذرت در فصل رشد ندارد. این محققین به ترتیب مقدار کلی کارایی مصرف تابش ذرت را  $0.20 \pm 3/74$  g/MJ و  $2/9-3/3$  g/MJ



طبیعی دانشگاه تهران در انجام کار میدانی این پژوهش، همچنین اداره کل هواشناسی استان البرز جهت تأمین داده‌های تابش‌سنجی تشکر و قدردانی می‌شود.

### پیوست

#### خلاصه روش استخراج معادله برآورد نظری میانگین

##### روزانه ضریب خاموشی پوشش گیاهی (معادله ۴)

بین میانگین‌های روزانه تراگسیلندگی، بازتابندگی و جذبندگی پوشش گیاهی معادله (پ-۱) برقرار است.

$$\bar{t}(d) = 1 - \bar{r}(d) - \bar{a}(d) = (1 - \bar{r}(d)) \left( 1 - \frac{\bar{a}(d)}{1 - \bar{r}(d)} \right) \quad (\text{پ-۱})$$

که  $\bar{t}(d)$  میانگین روزانه تراگسیلندگی نور مرئی پوشش گیاهی است.  $\bar{r}(d)$  میانگین روزانه بازتابندگی نور مرئی پوشش گیاهی و  $\bar{a}(d)$  میانگین روزانه جذبندگی نور مرئی پوشش گیاهی است. پس از بازنویسی معادله (پ-۱):

$$\frac{\bar{t}(d)}{1 - \bar{r}(d)} = 1 - \frac{\bar{a}(d)}{1 - \bar{r}(d)} \quad (\text{پ-۲})$$

کسر سمت چپ معادله (پ-۲) بیان‌گر میانگین روزانه تراگسیلندگی نور خالص دریافتی به پوشش گیاهی است که با نماد  $\bar{t}_{\text{net}}(d)$  جایگزین می‌شود:

$$\bar{t}_{\text{net}}(d) = 1 - \frac{\bar{a}(d)}{1 - \bar{r}(d)} \quad (\text{پ-۳})$$

به دلیل آنکه یک پوشش گیاهی زراعی مجموعه‌ای از بوته‌های منفرد است که با فرض یکسان‌انگاری رشد، همگی با یک شیوه و روند یکسان نور خالص ورودی به پوشش گیاهی را تراگسیل می‌دهند، میانگین روزانه ضریب خاموشی یک پوشش گیاهی نیز مضرری از میانگین روزانه ضریب خاموشی یک بوته است؛ و به دلیل آنکه یک بوته را می‌توان نماینده کوچک مقیاسی از پوشش گیاهی در نظر گرفت، ابتدا میانگین روزانه ضریب خاموشی یک بوته استخراج، و سپس بر مبنای آن یک معادله برای برآورد میانگین روزانه ضریب خاموشی پوشش گیاهی ارائه می‌شود. برای این منظور با فرض برگ‌های کاملاً کدر (تراگسیلندگی برابر صفر) با بازنویسی معادله (پ-۳) برای یک بوته منفرد:

$$\bar{t}_{\text{net},1}(d) = 1 - \frac{\bar{a}_1(d)}{1 - \bar{r}(d)} \quad (\text{پ-۴})$$

که  $\bar{t}_{\text{net},1}(d)$  میانگین روزانه تراگسیلندگی نور خالص دریافتی به یک بوته،  $\bar{a}_1(d)$  میانگین روزانه جذبندگی نور خالص یک بوته و  $\bar{r}(d)$  میانگین روزانه بازتابندگی پوشش گیاهی است که عامل پیدایش نور خالص دریافتی برای تمام بوته‌ها است. با فرض برگ‌های کاملاً کدر در پوشش

اصلاح نژاد زراعی، حاصلخیزی خاک و بیماری‌شناسی گیاهی است. هر تیمار منفرد یا مرکب از عوامل مورد بررسی در رشته‌های فوق‌الذکر، مقدار کارایی مصرف تابش محصول را تغییر می‌دهد. بنابراین، مقایسه کارایی مصرف تابش در وضعیت پتانسیل تولید زراعی با مقادیر متناظر آن در شرایط غیر پتانسیل، یا شرایط کاشت و داشت طرح‌های آزمایشی ویژه در پرورش محصول، بزرگی تأثیر هر عامل یا تیمار منفرد یا مرکب را در میزان بهره‌وری زراعی و سلامت محصول مشخص می‌سازد. روشن است که میزان درستی و قطعیت این مقایسه‌ها با افزایش تفکیک زمانی و توجه به مقیاس هفتگی کارایی مصرف تابش افزایش یافته و به همین خاطر، می‌توان نتایج این پژوهش را به عنوان ملاک و مرجعی از شاخص هفتگی کارایی مصرف تابش ذرت معرفی کرد. ضمن آنکه کاشت ذرت در این پژوهش با آرایش، هندسه و تراکم کشت متداول ملی بوده است و لذا با رعایت این نکته در کشت بهار، مقادیر هفتگی کارایی مصرف تابش در هر کشت تحقیقاتی دیگر از ارقام متوسط‌ترس ذرت نیز، با نتایج این پژوهش قابل مقایسه است. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که در فصل رشد ذرت، تابع زمانی کارایی مصرف تابش یک تابع ثابت نیست و دامنه تغییرات آن به  $36/1 \text{ g/MJ}$  می‌رسد (حدود ۱۰ برابر مقدار کلی کارایی مصرف تابش در فصل رشد). مقدار کارایی مصرف تابش در مرحله رسیدگی ذرت صفر است و در مراحل ظهور گل‌آذین و گرده‌افشانی نیز کاهش زیادی دارد. نمودار توابع زمانی کارایی مصرف تابش، از نظر تولید زیست‌توده قوی‌ترین و آسیب‌پذیرترین مراحل رشد و نمو محصول را مشخص می‌کنند. لذا می‌توان از نمودار ارائه شده در این پژوهش، به‌عنوان معیاری ساده و جامع برای تعیین زمان کوددهی سرک و حساسیت به تنش آبی نیز استفاده کرد. از دیدگاه هواشناسی کشاورزی، با تکرار این پژوهش در فصل کشت بهار دیگر مناطق زراعی جغرافیای ایران، و مقایسه کارایی مصرف تابش در آن مناطق، مستعدترین یا توانمندترین مناطق کشت بهار ذرت مشخص می‌شود؛ و نقشه پراکندگی جغرافیایی این مناطق اطلاعاتی کلیدی در مباحث و مطالعات ملی آمایش سرزمین و برنامه‌ریزی کلان زراعی است.

### سپاسگزاری

از مساعدت جناب آقای دکتر محمدرضا جهانسوز رئیس مزرعه آموزشی و پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع

$$\tau_{diffuse} = 2 \int_0^{\pi/2} \tau_{direct}(\theta) \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (پ-۱۰)$$

که در آن  $\theta$  زاویه سوسوی آفتاب و  $\tau_{direct}(\theta)$  تابع تراگسیلندگی زاویه‌ای پوشش گیاهی برای تابش مستقیم خورشید است. میانگین روزانه این تابع یک مقدار ثابت  $\bar{\tau}_{direct}(d)$  است که به  $\theta$  وابستگی ندارد. بنابراین، میانگین روزانه تراگسیلندگی پوشش گیاهی ( $\bar{\tau}$ ) عبارت است از:

$$\bar{\tau} = \frac{\bar{\tau}_{direct} + \tau_{diffuse}}{2} = \frac{1}{2} (\bar{\tau}_{direct}(d) + 2 \int_0^{\pi/2} \tau_{direct}(d) \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta) = \bar{\tau}_{direct}(d)$$

مدل چندلایه، تراگسیلندگی پوشش گیاهی برای تابش مستقیم خورشید را با معادله (پ-۱۱) تعیین می‌کند:

$$t = e^{-kLAI} \quad (پ-۱۱)$$

در نتیجه:

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_{direct}(d) = e^{-\bar{k}(d)LAI(d)} \quad (پ-۱۲)$$

به دلیل آنکه شاخص مساحت برگ یک بوته خارج قسمت مساحت برگ‌های بوته ( $A(d)$ ) بر یک متر مربع است، از معادله اخیر میانگین روزانه تراگسیلندگی یک بوته عبارت است از:

$$\bar{\tau}_1(d) = e^{-\bar{k}_1(d) \frac{A(d)}{1 m^2}} \quad (پ-۱۳)$$

که  $\bar{k}_1(d)$  میانگین روزانه ضریب خاموشی یک بوته برای نور مستقیم و پخشیده است، و با هم‌ارز نمودن معادله‌های (پ-۸) و (پ-۱۳) اندازه آن مشخص می‌شود:

$$e^{-\bar{k}_1(d) \frac{A(d)}{1 m^2}} = 1 - \frac{A(d)}{1 m^2} \quad (پ-۱۴)$$

$$\bar{k}_1(d) = \frac{-1}{A(d)} \ln(1 - A(d))$$

یک بوته نماینده کوچک مقیاسی از پوشش گیاهی است؛ که باید ویژگی‌های آن برای: ۱- کلیه تراکم‌های کشت ۲- تمام شکل‌های فضایی بوته در گیاهان زراعی ۳- ابعاد هندسی بوته تمام گونه‌های زراعی و ۴- ابعاد هندسی (به ویژه ارتفاع) بوته در طول فصل رشد قابل تعمیم باشد، و با توجه به فرض اولیه استخراج معادله (پ-۱۴) (کروی بودن تابع سمتگیری پوشش گیاهی)، مقدار تابع سمتگیری کروی به عنوان ضریب تناسب میانگین روزانه ضریب خاموشی پوشش گیاهی و تک بوته انتخاب می‌شود. تابع سمتگیری کروی یکنواختی چهار عامل بالا را تضمین می‌کند. اندازه تابع سمتگیری کروی در حقیقت میانگینی از ضریب خاموشی صفر (عدم وجود پوشش گیاهی) و ضریب خاموشی یک (پوشش گیاهی با برگ‌های افقی) است (مقدار ۰/۵ فرض اولیه انتخاب ضریب خاموشی پوشش گیاهی برای

گیاهی پراکنش ثانویه نور و پراکنش چندگانه تراگسیلشی ایجاد نشده و با توجه به معادله (پ-۱):

$$\bar{\tau}_{net,1}(d) = 1 - \frac{\bar{a}_1(d)}{\bar{a}(d) + \bar{t}(d)} \quad (پ-۵)$$

اکنون با فرض آنکه پوشش گیاهی تابع سمتگیری کروی داشته باشد:  $\bar{t}(d) = \bar{t}(d)_{spherical} = 0$  و در نتیجه:

$$\bar{\tau}_{net,1}(d) = 1 - \frac{\bar{a}_1(d)}{\bar{a}(d)} \quad (پ-۶)$$

در این معادله  $\bar{a}(d)$  میانگین روزانه جذبندگی نور خالص پوشش گیاهی است. با توجه به مسیر حرکت کماتی شکل خورشید در آسمان و حرکت آفتاب‌لکه‌ها در طول روز، بیشینه مساحت انباشته سطوح نورگیر یک بوته با مساحت برگ‌های بوته در روز مورد نظر ( $A(d)$ ) برابر است. بیشینه مساحت انباشته سطوح نورگیر موجود در یک متر مربع از پوشش گیاهی نیز همان یک متر مربع است (به دلیل سایه‌اندازی برگ‌ها بر یکدیگر کل سطوح برگ موجود در یک متر مربع (LAI)، هیچ‌گاه در معرض تابش مستقیم خورشید نیست، و در یک متر مربع از سطح کشت بیشینه مساحت سایه برگ‌ها مساوی یک متر مربع است). بنابراین، با توجه به وابستگی جذبندگی پوشش گیاهی به مساحت سطح نورگیر و شدت نور فرودی بر آن سطح، تناسب زیر حاصل می‌شود:

$$\bar{a}_1(d) \propto \bar{a}(d) \sim$$

$$\sim A(d) \propto 1 m^2$$

از تناسب فوق:

$$\bar{a}_1(d) = \frac{A(d)}{1 m^2} \bar{a}(d) \quad (پ-۷)$$

با جانشانی تساوی فوق در معادله (پ-۶):

$$\bar{\tau}_{net,1}(d) = 1 - \frac{A(d)}{1 m^2} \quad (پ-۸)$$

در این معادله  $A(d)$  مساحت برگ‌های یک بوته در روز مورد نظر ( $m^2$ ) است. در طول روز تابش فرودی بر پوشش گیاهی مجموعی از تابش مستقیم خورشید ( $I_{direct}$ ) و تابش پخشیده جو ( $I_{diffuse}$ ) است. بنابراین، با توجه به تعریف تراگسیلندگی:

$$\tau = \tau_{direct} + \tau_{diffuse} \quad (پ-۹)$$

که در آن،  $\tau$  تراگسیلندگی پوشش گیاهی نسبت به تابش کل (مجموع تابش مستقیم و پخشیده)، و  $\tau_{direct}$  و  $\tau_{diffuse}$  به ترتیب، دو سهم تراگسیلندگی پوشش گیاهی برای تابش مستقیم خورشید و تابش پخشیده جو هستند. مقدار لحظه‌ای  $\tau_{diffuse}$  با انتگرال زیر محاسبه می‌شود

(Campbell and Norman, 1998).

در این معادله  $A(d)$  مساحت برگ‌های یک بوته در روز مورد نظر ( $m^2$ ) است و نباید واحد متر مربع به‌واحد دیگری تبدیل گردد.

### منابع

Akmal, M., Ibrahim, M., Asim, M., Afzal, M., Achakzai, A. K. K. 2014. Leaf area profile and light use efficiency study in maize as influenced by changes in the planting geometry and N-Rates. *Pure and Applied Biology*, 3(4):132-143.

Andrade, F. H., Uhart, S. A., Cirilo, A. 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crops Research*, 32:17-25.

Boote, K. J., Loomis, R.S. 1991. Modeling Crop Photosynthesis: From Biochemistry to Canopy. CSSA Special publication 19. American Society of Agronomy and Crop Science Society of America. 169p.

Campbell, G. S., Norman, J. M. 1998. An Introduction to Environmental Biophysics. Springer. 286p.

Greaves, G. E., Wang, Y. 2017. The effect of water stress on radiation interception, radiation use efficiency and water use efficiency of maize in a tropical climate. *Turkish Journal of Field Crops*, 22(1):114-125.

Hanks, J., Ritchie, J. T. 2001. Modeling Plant and Soil Systems. American Society of Agronomy, Inc. Crop Science Society of America, Inc. Soil Science Society of America, Inc. 545p.

Hikosaka, K., Niinemets, U., Anten, N. P. R. 2016. Canopy Photosynthesis: From Basics to Applications. Springer Science + Business Media Dordrecht, 428p.

Hossain, M. M., Rumi, M. S., Nahar, B. S., Batan, M. A. 2014. Radiation use efficiency in different row orientation of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Environmental Science and Natural Resources*, 7(1): 41-46.

Jones, H. G. 2014. Plants and Microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology. Cambridge University Press. 407p.

Kiniry, J. R., Landivar, J. A., Witt, M., Gerik, T. J., Caverro, J., Wade, L. J. 1998. Radiation-use efficiency response to vapor pressure deficit for maize and sorghum. *Field Crops Research*, 56: 265-270.

Lindquist, J. L., Arkebauer, T. J., Walters, D. T., Cassman, K. G., Dobermann, A. 2005. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. *Agronomy Journal*, 97:72-78.

Liu, T., Song F., Liu, S., Zue, X. 2012. Light interception and radiation use efficiency response to narrow - wide row planting patterns in maize. *Australian Journal of Crop Science*, 6(3): 506-513.

تمام تراکم‌های کشت است). بنابراین، میانگین روزانه ضریب خاموشی پوشش گیاهی ( $\bar{k}(d)$ ) عبارت است از:

$$\bar{k}(d) = \frac{1}{2} \bar{k}_1(d) = \frac{-1}{2A(d)} \ln(1-A(d)) \quad (پ-۱۵)$$

Liu, X., Rahman, T., Yang, F., Song, C., Yong, T., Liu, J., Zhang, C., Yang, W. 2017. PAR Interception and utilization in different maize and soybean intercropping patterns. *PLOS ONE*. DOI:10.1371/journal.pone, 0169218:1-17.

Monteith, J. 1969. Light interception and radiative exchange in crop stands. *Agronomy and Horticulture-Faculty Publications*, 185:89-115.

Monteith, J. L. 1994. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. *Agricultural and Forest Meteorology*, 68:213-220.

Monteith, J. L., Unsworth, M. H. 2013. Principles of Environmental Physics. Elsevier Ltd., 401p.

Pitman, J. I. 2000. Absorption of photosynthetically active radiation, radiation use efficiency and spectral reflectance of bracken [*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn] canopies. *Annals of Botany*, 85 (Supplement B):101-111.

Ross, J. 1981. The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands. Dr W. Junk Publishers. 391pages.

Russell, G., Marshall, B., Jarvis, P. G. 1990. Plant Canopies: Their Growth, Form and Function. Cambridge University Press, 178p.

Sinclair, T. R., Muchow, R. C. 1999. Radiation-use efficiency. *Adv. Agronomy*, 65:215-265.

Soltani, A., Sinclair, T. R. 2012. Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield. CAB International. 322p.

Verhoef, W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16:125-141.

Webb, N., Nichol, C., Wood, J., Potter, E. (2008). User Manual for the SunScan Canopy Analysis System Type SS1. Delta-T Devices Ltd.. 83p.

Westgate, M. E., Forcella, F., Reicosky, D. C., Somsen, J. 1997. Rapid canopy closure for maize production in the northern US corn belt: Radiation-use efficiency and grain yield. *Field Crops Research*, 49: 249-258.

Yin, X., Gon van Larr, H. H. 2005. Crop Systems Dynamics. An Ecophysiological Simulation Model for Genotype – by – Environment Interactions. Wageningen Academic Publishers. 155p.

Zhu, X. G., Song, Q., Ort, D. R. 2012. Elements of a dynamic systems model of canopy photosynthesis. *Current Opinion in Plant Biology*, 15: 237-244.



## Estimation of weekly radiation-use efficiency of maize under potential production conditions

H. R. Afsharnaderi<sup>1</sup>, N. Ghahreman<sup>2\*</sup>, P. Irannejad<sup>3</sup>

Received: 30/04/2019

Accepted: 07/08/2019

### Abstract

The aim of this study is obtaining continuous weekly values of maize RUE by novel in-situ measurements of radiation. A semi-maturing cultivar of maize was cultivated in University of Tehran research farm in Karaj. Dry biomass and leaf area index were measured during 15 consecutive weeks of growing season. Then, based on in-situ complete pyr heliometry, by using insulation simulation and image processing, daily average of maize canopy reflectivity, extinction coefficient and the absorbed visible light of the canopy were estimated using a multi-layer model. During growing season infield continuous measurement of full spectrum irradiation, was measured continuously by TSR for all daylight hours. The diurnal insolation was simulated for that plant by an angular scanner (illuminator) during night time between 21:00 to 21:30 hrs. By applying an image processing technique, the visible band reflectivity of maize cover was estimated for the first seven weeks of study period. The measurements were continued till full closure of canopy and 12 different weekly values of RUE were calculated using the field measured data. The proposed approach allows generating continuous graph of RUE values. The research results indicate that even in the potential production conditions, using a constant value of radiation use efficiency for entire growing season of maize is not possible. During the growing season, the range of maize radiation-use efficiency reached 36.1 g/MJ, but the weekly values median of this quantity was equal to 3.5 g/MJ, which its occurrence probability in half of the growing season is 100%.

**Keywords:** Biomass, Extinction coefficient, Growing season, Plant canopy, photosynthetically active radiation



<sup>1</sup> Ph.D. Student of Agrometeorology, University of Tehran, Karaj, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran  
(\*Corresponding author email address: nghahreman@ut.ac.ir)

DOI: 10.22125/agmj.2019.187260.1064

<sup>3</sup> Associate Professor, Geophysics Institute, University of Tehran, Iran