



## برآورد هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو تحت سطوح مختلف نیتروژن با استفاده از دمای برگ

محمد رضا نادری<sup>۱</sup>، محمد بنایان<sup>۲</sup>، مرتضی گلدانی<sup>۳</sup>، امین علیزاده<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۵/۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۱۷

### چکیده

از آنجا که هدایت روزنه‌ای ( $g_s$ ) پیوند دهنده‌ی فتوسنتز و تعرق گیاه است، برآورد دقیق آن به منظور اتخاذ عملیات‌های مدیریتی که قادر به افزایش رشد گیاه از طریق مصرف کارآمدتر آب هستند، دارای اهمیت زیادی می‌باشد. در مطالعه‌ی حاضر، از مدل ساده‌ای که مبتنی بر اختلاف دمای میان برگ گیاه و یک سطح مرجع است، به منظور برآورد هدایت روزنه‌ای برگ‌های گیاه استفاده شد. این مدل به وسیله داده‌های مربوط به یک آزمایش مزرعه‌ای دو ساله، که طی سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد بر روی گیاه دارویی کدوی پوست کاغذی به اجرا در آمد، واسنجی و اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد، کارآیی و دقت مدل در شبیه‌سازی هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو تحت شرایطی که بوته‌ها با کمبود نیتروژن مواجه نبودند، بسیار خوب بود. تحت شرایطی که بوته‌های کدو با کمبود نیتروژن مواجه بودند نیز، از طریق معرفی شاخص تغذیه نیتروژن ( $NNI$ ) و اعمال آن در مدل، کارآیی و دقت مدل تا حد خوب یا بسیار خوب بهبود یافت. اختلاف نسبی بین میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی هدایت روزنه‌ای برای تیمارهای بدون کمبود نیتروژن، ۱/۸ تا ۲/۵ درصد و برای تیمارهای با کمبود نیتروژن، ۲/۸ تا ۵ درصد بود. بنابراین، مدل مورد استفاده در این مطالعه، به دلیل دقت نسبتاً بالا، ساده بودن و نیاز داشتن به داده‌های ورودی اندک، گزینه‌ای مناسب جهت استفاده در مدل‌های گیاهی مبتنی بر هدایت روزنه‌ای می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بیلان انرژی، سطح مرجع، فتوسنتز، تعرق

نادری، م. ر.، م. بنایان، م. گلدانی و ا. علیزاده. ۱۳۹۷. مدلی ساده برای برآورد هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو با استفاده از دمای برگ. مجله اکوفیزیولوژی گیاهی. ۳۲: ۶۱-۷۷.

۱- دانشجوی دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران - مسئول مکاتبات. پست الکترونیک: banayan@um.ac.ir

۳- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

## مقدمه

در حال حاضر، بیش از ۶۰ درصد کل آب شیرین جهان، در تولید گیاهان زراعی به مصرف می‌رسد (ژو و همکاران، ۲۰۱۱). از این رو، بسیاری از دانشمندان بر این عقیده‌اند که باید به منظور حصول اطمینان از تأمین آب مورد نیاز بخش خانگی در آینده، به‌ویژه در نقاطی که با کمبود آب مواجه هستند، مقدار آب شیرین اختصاص یافته به بخش کشاورزی کاهش یابد (ژو و همکاران، ۲۰۱۱). این در حالیکه انتظار می‌رود در حد فاصل سال‌های ۲۰۵۰-۲۰۰۵، تقاضای جهانی برای غذا به دو برابر افزایش یابد (بورلاگ، ۲۰۰۹). بنابراین، به منظور دستیابی به پایداری بلند مدت در تولید غذا طی دهه‌های آینده، بایستی در عین استفاده کارآمدتر از منابع محدود آب شیرین، عملکرد گیاهان زراعی نیز با افزایش مواجه گردد (لال و همکاران، ۱۹۹۹). به حد اکثر رساندن کارایی فتوسنتز و تعرق گیاهان زراعی، نقطه‌ی آغاز ارزیابی ظرفیت جهانی برای دستیابی به این هدف می‌باشد (ژو و همکاران، ۲۰۰۸).

هدایت روزنه‌ای ( $g_s$ )، پیوند دهنده‌ی فتوسنتز و تعرق گیاهان زراعی است و به همین علت، از هدایت روزنه‌ای به عنوان پارامتری کلیدی در مدل‌های اقلیمی طراحی شده جهت کمی کردن برهم‌کنش گیاه زراعی و اقلیم استفاده می‌شود (نایتانی و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین، برآورد هدایت روزنه‌ای به منظور شبیه‌سازی بهره‌وری گیاه زراعی و همچنین، کارایی مصرف آب در اکوسیستم‌های کشاورزی، ضروری می‌باشد (یو و همکاران، ۲۰۰۴). پیش‌بینی هدایت روزنه‌ای با استفاده از مدل‌هایی که وابستگی این پارامتر به عوامل محیطی را شرح می‌دهند، روشی جایگزین برای اندازه‌گیری‌های مکرر هدایت روزنه‌ای در مزرعه محسوب می‌شود. هدایت روزنه‌ای در زمره‌ی فرآیندهایی قرار دارد که طی چند دهه‌ی اخیر، مدل‌های فراوانی به منظور شبیه‌سازی آن، طراحی و اعتبارسنجی شده‌اند (گروسا و همکاران، ۲۰۱۲).

طی سال‌های اخیر، از دو روش اصلی به منظور شبیه‌سازی هدایت روزنه‌ای گیاه به عنوان تابعی از محرک‌های محیطی استفاده شده است. یکی از این روش‌ها، بر تنظیم محیطی فرآیند باز شدن روزنه‌ها تمرکز دارد (کاجول و همکاران، ۲۰۱۰). این روش بر مبنای واکنش مستقیم روزنه‌ها نسبت به محرک‌های محیطی مختلفی که فرض می‌شود به صورت افزاینده و بدون هیچ اثر متقابلی، هدایت روزنه‌ای را تنظیم می‌کنند و یا بر اساس همبستگی مشاهده شده میان فتوسنتز خالص ( $A_{net}$ ) و هدایت روزنه‌ای، که مبتنی بر فرض وجود یک رابطه‌ی متقابل بین این

دو متغیر می‌باشد، طراحی شده است (آدلینگ و همکاران، ۲۰۰۵). به‌رحال، این گونه مدل‌ها نسبتاً پیچیده هستند و نیاز به داده‌های ورودی زیادی نیز دارند. روش دوم مبتنی بر اقتصاد آب گیاه می‌باشد و بر روی نقش تنظیم‌کنندگی روزنه‌ها متمرکز شده است (کاجول و همکاران، ۲۰۱۰). در این گونه مدل‌ها، فرآیند باز شدن روزنه‌ها به منظور دستیابی به حداکثر جذب کربن به ازای هر واحد آب تعرق یافته، بهینه‌سازی می‌گردد و بنابراین، اتلاف آب طی فرآیند تعرق به عنوان هزینه‌ای برای گیاه در نظر گرفته می‌شود. مزیت این روش آن است که برهم‌کنش‌های ذاتی میان آسیمیلایون مواد فتوسنتزی و تعرق را در نظر می‌گیرد. با این وجود، علی‌رغم جذابیت و قابلیت مدل‌های مبتنی بر روش بهینه‌سازی روزنه‌ای، این مدل‌ها به دلیل برخورداری از روابط ریاضی و رویه‌های رقومی بسیار پیچیده، تا به امروز در مدل‌های کاربردی اقلیمی یا اکولوژیکی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند (گائو و همکاران، ۲۰۰۲).

از این رو، توسعه مدل‌های ساده‌ای که می‌توانند بدون نیاز به داده‌های ورودی زیاد، هدایت روزنه‌ای گیاه را شبیه‌سازی کنند، به منظور ارزیابی رشد و کارایی مصرف آب گیاه زراعی ضروری می‌باشد. مجیدی و همکاران (۱۳۹۰)، مدل ساده‌ای را جهت برآورد میزان تعرق گیاه با استفاده از اندازه‌گیری دمای برگ پیشنهاد نمودند. مدل مزبور، به آسانی و بر مبنای اختلاف دمای برگ گیاه و یک سطح مرجع، میزان تعرق گیاه را برآورد می‌نماید. بنابراین، با توجه به ضرورت توسعه مدل‌های ساده‌ی شبیه‌سازی هدایت روزنه‌ای گیاه، در مطالعه‌ی حاضر تلاش شد تا با اندکی تغییر، از مدل معرفی شده توسط مجیدی و همکاران (۱۳۹۰)، به منظور شبیه‌سازی هدایت روزنه‌ای گیاه دارویی کدوی پوست کاغذی استفاده شود.

## مواد و روش‌ها

## توصیف مدل

جزئیات مدل مورد استفاده جهت برآورد سرعت تعرق برگ با استفاده از اختلاف دمای میان برگ گیاه و یک سطح مرجع، پیش از این در مقاله‌ای توسط مجیدی و همکاران (۱۳۹۰) شرح داده شده است. در مقاله‌ی حاضر به منظور برآورد هدایت روزنه‌ای برگ، تغییراتی به شرح زیر، بر روی مدل پیشنهادی این محققین صورت گرفت.

به منظور برآورد تابش خالص برگ گیاه و سطح مرجع، از روش غیرمستقیم استفاده شد. در این روش، تابش خالص با استفاده از رابطه‌ی زیر برآورد می‌شود:

کسر فشار بخار آب ( $D_{vp}$ )، بر اساس اختلاف میان فشار بخار اشباع ( $e_s$ ) و فشار بخار واقعی ( $e_a$ ) تعیین گردید. فشار بخار اشباع ( $e_s$ ) نیز با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

$$e_s = 0.6108 \exp \left[ \frac{17.27T_a}{T_a + 273.3} \right] \quad (۷)$$

که در این رابطه،  $e_s$  فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال) و  $T_a$  درجه حرارت هوا (درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. علاوه‌براین، فشار بخار واقعی ( $e_a$ ) نیز با استفاده از رابطه‌ی ۸ برآورد گردید.

$$e_a = \left( \frac{RH}{100} \right) \times e_s \quad (۸)$$

در این رابطه،  $e_a$  بر حسب کیلوپاسکال و  $RH$  رطوبت نسبی (درصد) است. فشار اتمسفر ( $P_a$ ) با استفاده از روش فائو (رابطه‌ی ۹) محاسبه گردید.

$$P_a = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26} \quad (۹)$$

در این رابطه،  $P_a$  بر حسب کیلوپاسکال و  $Z$  ارتفاع منطقه از سطح دریا (برای مشهد ۹۹۹ متر) می‌باشد.

#### ویژگی‌های سطح مرجع

در مدل پیشنهاد شده توسط مجیدی و همکاران (۱۳۹۰) و همچنین در مطالعه‌ی حاضر، از اختلاف دمای میان برگ و یک سطح مرجع به‌منظور برآورد تعرق و هدایت روزنه‌ای برگ گیاه استفاده شد. سطح مرجع، سطحی با خصوصیات ظاهری شبیه برگ گیاه است که قادر به تعرق کردن نمی‌باشد و در ارتفاعی مشابه با ارتفاع گیاه نصب می‌شود. این سطح، یک سطح مصنوعی است که از مواد مختلفی می‌توان آن را تهیه نمود. برای ساختن سطح مرجع، از یک کاغذ صافی گرد با قطر ۹ سانتی‌متر، که هر دو سمت آن توسط رنگ سبز تیره به‌طور کامل رنگ‌آمیزی شده بود (مجیدی و همکاران، ۱۳۹۰)، استفاده گردید و سپس، با استفاده از پایه‌های پلاستیکی، گیره کاغذ و نخ قرقره سبز رنگ، در مجاورت بوته‌های کدو نصب شد (شکل ۱).

#### داده‌های آزمایشی

##### آزمایشات مزرعه‌ای

آزمایشات مزرعه‌ای مربوط به این مطالعه، طی سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳، با استفاده از گیاه دارویی کدوی پوست کاغذی در مزرعه‌ی تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد (با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی، ارتفاع از سطح دریا ۹۹۹ متر، میانگین

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + \Delta R \quad (۱)$$

که در این رابطه،  $R_s$  تشعشع خورشیدی (ژول بر مترمربع بر ثانیه)،  $\Delta R$  تشعشع خالص موج بلند (ژول بر مترمربع بر ثانیه) و  $\alpha$  ضریب آلودگی سطح مورد نظر می‌باشد. به‌منظور محاسبه‌ی تشعشع خورشیدی در یک روز معین با استفاده از تعداد ساعات آفتابی روزانه، رابطه‌ی انگستروم (رابطه‌ی ۲) مورد استفاده قرار گرفت (پوهلرت، ۲۰۰۴).

$$R_s = R_a \left( A + B \left( \frac{H_s}{L_d} \right) \right) \quad (۲)$$

که در این رابطه،  $R_s$  تشعشع خورشیدی روزانه (مگاژول بر متر مربع بر ثانیه)،  $R_a$  تشعشع روزانه فرا زمینی (مگاژول بر مترمربع بر ثانیه)،  $A$  و  $B$  ضرایب تجربی (برای مشهد:  $A = ۰.۳۷$  و  $B = ۰.۳۷$ )؛  $H_s$  (عامری و نصیری محلاتی، ۱۳۸۸)،  $H_s$  تعداد ساعات آفتابی و  $L_d$  طول روز (ساعت) می‌باشد (پوهلرت، ۲۰۰۴). تشعشع خالص موج بلند ( $\Delta R$ ) با استفاده از رابطه‌ی زیر برآورد گردید (کیو و همکاران، ۱۹۹۸):

$$\Delta R = \left( 0.4 + 0.6 \frac{R_s}{R_{so}} \right) \left( \varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 \right) \quad (۳)$$

که در این رابطه،  $R_{so}$  حداکثر تشعشع خورشیدی (تشعشع خورشیدی روز صاف) (ژول بر متر مربع بر ثانیه)،  $\varepsilon_a$  گسیلندگی اتمسفر،  $\varepsilon_s$  گسیلندگی سطح مورد نظر و  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن می‌باشد. حداکثر تشعشع خورشیدی ( $R_{so}$ ) با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود (کیو و همکاران، ۱۹۹۸):

$$R_{so} = (A + B)R_a \quad (۴)$$

گسیلندگی اتمسفر نیز با استفاده از معادله‌ی سوین-بانک (رابطه‌ی ۵) برآورد گردید (کیو و همکاران، ۱۹۹۸).

$$\varepsilon_a = 0.92 \times 10^{-5} T_a^2 \quad (۵)$$

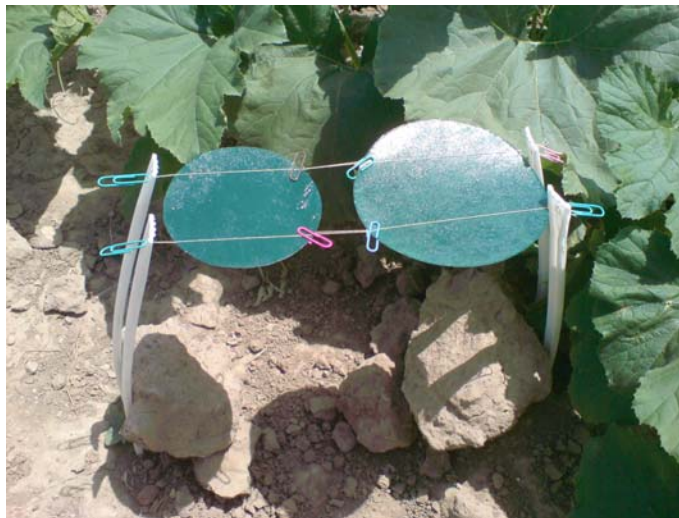
در نهایت، سرعت تعرق برگ ( $E$ ) با استفاده از رابطه‌ی زیر به هدایت روزنه‌ای برگ تبدیل شد (گائو و همکاران، ۲۰۰۲):

$$g_s = \frac{E \times P_a}{D_{vp}} \quad (۶)$$

که در این رابطه،  $g_s$  هدایت روزنه‌ای برگ (میلی‌متر بر ثانیه)،  $E$  سرعت تعرق برگ (میلی‌متر بر ثانیه)،  $D_{vp}$  کسر فشار بخار آب (کیلوپاسکال) و  $P_a$  فشار اتمسفر (کیلوپاسکال) می‌باشد. برای به دست آوردن هدایت روزنه‌ای برگ بر حسب میلی‌مول بر متر مربع بر ثانیه، هدایت روزنه‌ای بر حسب میلی‌متر بر ثانیه، در عدد ۵۵۵۵۵/۵۵ ضرب شد.

استفاده در این آزمایشات، در جدول ۱ ارائه گردیده‌اند. میانگین ماهیانه داده‌های آب و هوایی طی فصل‌های زراعی ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

سالیانه حداقل دما ۸/۳ درجه سانتی‌گراد، میانگین سالیانه حداکثر دما ۲۱/۶ درجه سانتی‌گراد و مجموع بارش سالیانه ۲۵۶/۵ میلی‌متر) به اجرا درآمدند. جزئیات تیمارهای مورد



شکل ۱- سطح مرجع نصب شده در مجاورت بوته‌های کدو.

جدول ۱- تیمارهای مورد استفاده در آزمایشات مزرعه‌ای

فصل زراعی	تاریخ کاشت	تراکم (بوته در متر مربع)	مقدار کاربرد نیتروژن (کیلوگرم در هکتار)	کُد تیمار
۱۳۹۲	۱۶ اردیبهشت	۲/۵	۵۰	T1-1392
			۱۵۰	T2-1392
			۲۵۰	T3-1392
۱۳۹۳	۱۶ اردیبهشت	۲/۵	۵۰	T1-1393
			۱۵۰	T2-1393
			۲۵۰	T3-1393

جدول ۲- میانگین ماهیانه داده‌های آب و هوایی در فصل‌های زراعی ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳

فصل زراعی	ماه	$T_{avg}$ (°C)*	$T_{max}$ (°C)	$T_{min}$ (°C)	P (mm)	$RH_{avg}$ (%)	$R_s$ (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )
۱۳۹۲	اردیبهشت	۲۰/۹	۲۸	۱۳/۶	۲۶/۸	۳۱/۵	۲۴/۳
	خرداد	۲۶/۷	۳۳/۹	۱۹/۵	۰/۴	۲۲/۱	۲۵/۹
	تیر	۲۸/۷	۳۶/۱	۲۱/۳	۰	۲۲	۲۶/۸
	مرداد	۲۵/۹	۳۳	۱۸/۸	۲/۴	۲۵/۴	۲۴
۱۳۹۳	اردیبهشت	۲۲/۹	۳۰/۲	۱۵/۵	۲۷/۱	۲۷/۴	۲۳/۵
	خرداد	۲۷/۱	۳۴/۸	۱۹/۳	۴	۲۰/۳	۲۶/۵
	تیر	۲۸	۳۵/۶	۲۰/۳	۰	۱۵	۲۷/۲
	مرداد	۲۷/۴	۳۵/۵	۱۹/۳	۰	۱۵/۳	۲۵/۱

\*  $T_{ave}$  میانگین ماهیانه‌ی درجه حرارت،  $T_{max}$  میانگین ماهیانه‌ی درجه حرارت حداکثر،  $T_{min}$  میانگین ماهیانه‌ی درجه حرارت حداقل،  $P$  مجموع بارش ماهیانه،  $RH_{ave}$  میانگین ماهیانه‌ی رطوبت نسبی و  $R_s$  میانگین ماهیانه‌ی تابش خورشیدی می‌باشند.

روی برگ مورد نظر قرار داده شد و توسط دوربین دیجیتال، از مجموعه‌ی کاغذ و برگ یک عکس گرفته شد. عکس گرفته شده، در نرم‌افزار رایگان ImageJ v1.50a (قابل دانلود در سایت: <http://imagej.nih.gov/ij/>) بارگذاری گردید. توسط این نرم‌افزار، هیستوگرام‌های مربوط به برگ گیاه و کاغذ A4 ترسیم شدند و مقدار میانگین درخشندگی هر یک از آنها یادداشت گردید (شکل ۲). سپس، بر مبنای میانگین درخشندگی برگ گیاه و کاغذ A4، ضریب آلودی نسبی با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه شد.

$$Albedo_{rel} = \frac{B_{Leaf}}{B_{Paper}} \quad (10)$$

که در این رابطه،  $Albedo_{rel}$  ضریب آلودی نسبی برگ،  $B_{Leaf}$  میانگین درخشندگی برگ گیاه و  $B_{Paper}$  میانگین درخشندگی کاغذ A4 می‌باشد. در نهایت، ضریب آلودی مطلق برگ با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه گردید:

$$Albedo_{abs} = 0.65 \times Albedo_{rel} \quad (11)$$

در این رابطه،  $Albedo_{abs}$  ضریب آلودی مطلق برگ و عدد ثابت ۰/۶۵، ضریب آلودی کاغذ A4 می‌باشد.

#### اندازه‌گیری غلظت نیتروژن اندام هوایی

به‌منظور تعیین غلظت نیتروژن اندام هوایی بوته‌های کدو، نمونه‌های خشک شده، با استفاده از یک آسیاب برقی پودر شدند و سپس توسط مخلوطی از اسید سولفوریک و پراکسید هیدروژن غلیظ، هضم گردیدند (ژو و همکاران، ۲۰۱۱). غلظت نیتروژن نمونه‌های هضم شده، توسط روش کج‌دال و با چهار تکرار برای هر تیمار، اندازه‌گیری شد. غلظت نیتروژن اندام هوایی بوته‌های کدو بر حسب درصد وزن خشک گزارش گردید.

#### داده‌های آب و هوایی

داده‌های مربوط به درجه حرارت هوا، سرعت باد و رطوبت نسبی، در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای از سایت [www.wunderground.com](http://www.wunderground.com) برداشت گردیدند. در حواصل بین دو مقدار گزارش شده، داده‌های آب و هوایی مورد نیاز، از طریق درون‌یابی خطی برآورد شدند. علاوه بر این، داده‌های روزانه‌ی مربوط به حداقل و حداکثر درجه حرارت هوا، میزان بارش، رطوبت نسبی و تعداد ساعات آفتابی نیز از ایستگاه هواشناسی مشهد به دست آمدند.

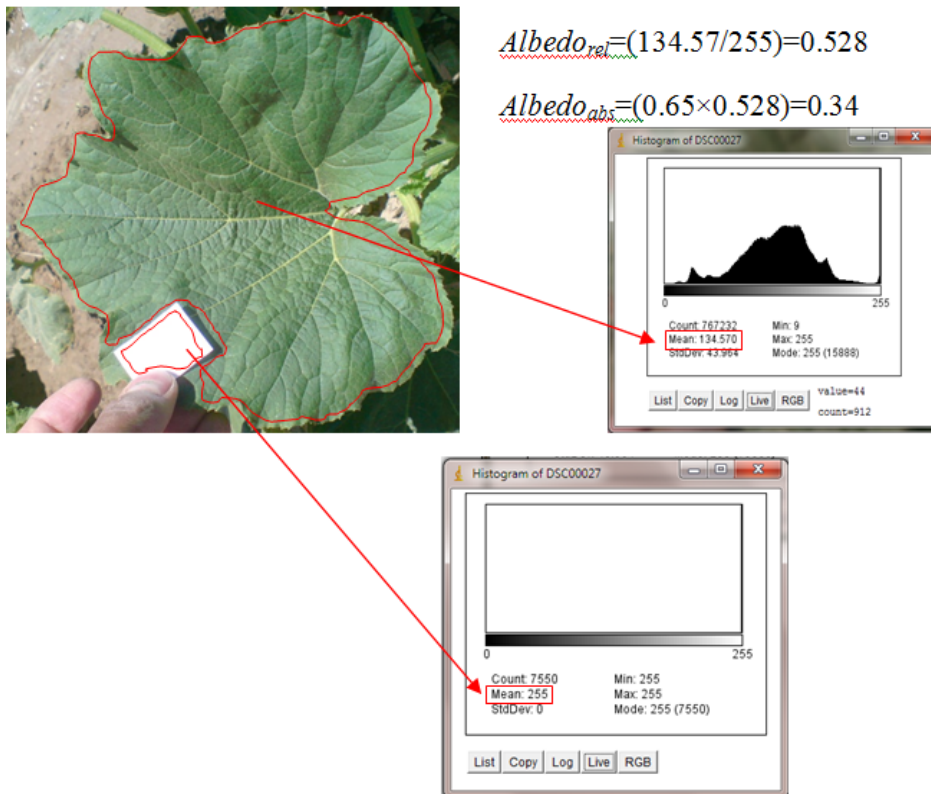
در هر دو آزمایش، آماده‌سازی بستر بذر با استفاده از عملیات‌های رایج (شامل شخم با گاوآهن برگردان‌دار، خرد کردن کلوخه‌ها با زدن دو دیسک عمود بر هم و تسطیح زمین با مال) صورت گرفت و بذور در تاریخ ۱۶ اردیبهشت به صورت کپه‌ای، با رعایت فاصله روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر (جهت دستیابی به تراکم ۲/۵ بوته در مترمربع)، کشت شدند. پس از سبز شدن بوته‌ها و در زمان باز شدن کامل اولین برگ حقیقی، بوته‌های اضافی تنک شدند و بدین ترتیب، در هر کپه تنها یک بوته باقی ماند. اندازه کرت‌ها ۵ × ۱۵ متر بود و در هر کرت ۶ ردیف کاشت، با پهنای ۲ متر و عرض جویچه‌های ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. از آبیاری جویچه‌ای به منظور تأمین آب مورد نیاز بوته‌های کدو استفاده شد و اولین آبیاری بلافاصله پس از کشت و سایر آبیاری‌ها با فاصله‌ی زمانی هر هفت روز یکبار انجام شدند. در طی فصل رشد کدو، علف‌های هرز به صورت دستی وجین شدند. تیمارهای مورد مطالعه در هر دو آزمایش شامل سه سطح کود نیتروژنه (۵۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ کیلوگرم بر هکتار، از منبع اوره با ۴۶ درصد نیتروژن) بودند، که در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با چهار تکرار آرایش یافتند. در هر دو سال، نیمی از کل نیتروژن مورد نیاز هر تیمار، هم‌زمان با مرحله‌ی ۶-۴ برگی و نیم دیگر آن، هم‌زمان با آغاز گل‌دهی، به مصرف رسید. برای کاربرد نیتروژن، پس از انجام آبیاری، کود اوره به صورت نواری بر سطح دیواره‌ی کشت شده‌ی هر جویچه پاشیده شد.

#### اندازه‌گیری هدایت روزنه‌ای و دمای برگ

از یک پُرومتر قابل حمل (LI-1600) به منظور اندازه‌گیری هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها، دو روز پس از انجام آبیاری، با استفاده از ۱۲ برگ کاملاً توسعه یافته برای هر تیمار صورت گرفتند. این اندازه‌گیری‌ها، طی شش روز آفتابی (تاریخ‌های ۲۰ خرداد، ۲۷ خرداد، ۳ تیر، ۱۰ تیر، ۱۷ تیر و ۲۴ تیر) و در حواصل ساعت ۱۱ تا ۱۳:۳۰ انجام شدند. همراه با اندازه‌گیری هدایت روزنه‌ای، دمای برگ و سطح مرجع نصب شده در مجاورت بوته‌ی کدو نیز توسط یک دماسنج مادون قرمز اندازه‌گیری شدند. ارتفاع بوته نیز با استفاده از یک خط‌کش فلزی اندازه‌گیری شد.

#### برآورد ضریب آلودی برگ

برآورد ضریب آلودی برگ‌های کدو، طبق روش ارائه شده توسط گورسکی (۲۰۱۳) و با استفاده از یک دوربین دیجیتال صورت گرفت. بدین منظور، یک قطعه‌ی کوچک کاغذ A4 بر



شکل ۲- برآورد ضریب آلبودی برگ کدو با استفاده از روش دوربین دیجیتال

جدول ۳- معیارهای مورد استفاده به منظور ارزیابی کارایی مدل

کارایی مدل	معیار
بسیار خوب	$RE \leq 0.1$ و $d \geq 0.95$
خوب	$RE > 0.1$ و $d \geq 0.95$ $0.15 \geq$
قابل قبول	$> 0.15$ و $d \geq 0.95$ $0.2 \geq RE$
ضعیف	$RE > 0.2$ و $d \geq 0.95$ $0.25 \geq$

زیر استفاده شد (گالاردو و همکاران، ۲۰۱۱): ۱- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ۲- خطای نسبی (RE) (استوکل و همکاران، ۲۰۰۴)، ۳- شاخص انطباق ویلموت (d) (ویلموت، ۱۹۸۲) و ۴- ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) رگرسیون خطی میان مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده. تجزیه رگرسیون توسط نرم‌افزار SigmaPlot 11.0 صورت گرفت و مدل در محیط نرم‌افزار ModelMaker 3.0 اجرا شد. در نهایت، کارایی مدل با استفاده از معیارهای زیر (جدول ۳)، که نخستین بار توسط استوکل و همکاران (استوکل و همکاران، ۲۰۰۴) ارائه گردیدند، مورد ارزیابی قرار گرفت.

#### واسنجی (کالیبراسیون) مدل

برای واسنجی مدل، از تیمار ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار سال ۱۳۹۳ (یعنی تیمار T3-1393)، که نسبت به سایر تیمارهای مورد مطالعه در این سال و همچنین سال ۱۳۹۲، عملکرد و رشد بوته‌های کدوی آن بیشتر بود، استفاده شد.

#### شاخص‌های آماری مورد استفاده به منظور ارزیابی کارایی مدل

به منظور ارزیابی توافق میان مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی هدایت روزنه‌ای برگ، از شاخص‌های آماری

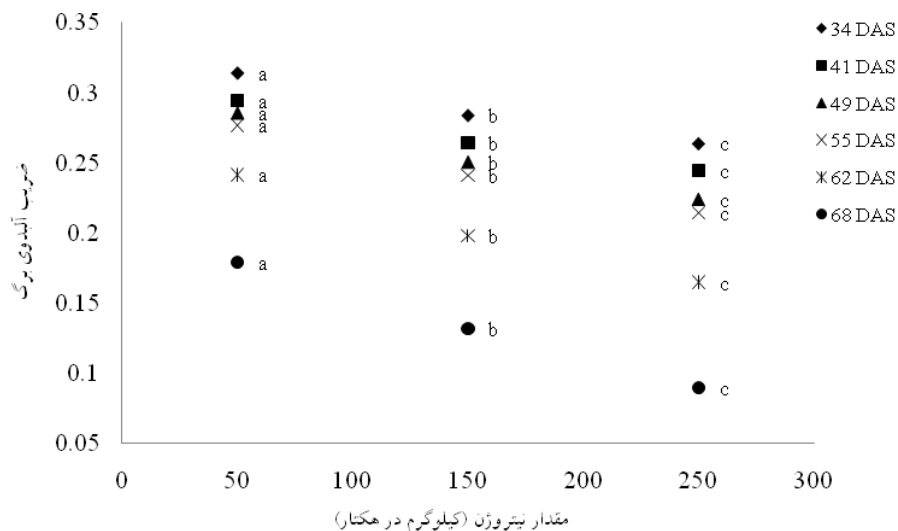
## نتایج و بحث

## ضریب آلودگی برگ

روند تغییر میانگین دو ساله ضریب آلودگی برگ‌های کدو در تاریخ‌های مختلف نمونه‌برداری، نشان داد که به‌طور کلی با افزایش مقدار کاربرد نیتروژن، ضریب آلودگی به‌طور معنی‌دار کاهش یافت (شکل ۳). میانگین دو ساله ضریب آلودگی برگ کدو در کل دوره‌ی نمونه‌برداری (از ۳۴ تا ۶۸ روز پس از کشت)، برای مقادیر نیتروژن ۵۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، به ترتیب برابر با ۰/۲۷، ۰/۲۳ و ۰/۲۱ بود. این مقادیر به مقدار میانگین گزارش شده برای ضریب آلودگی گیاهان زراعی در طی فصل رشد (یعنی ۰/۱۹) (هولینگر و همکاران، ۲۰۱۰) نزدیک هستند.

آلودگی، معیاری از نسبت تشعشع ساطع شده از یک سطح به کل تشعشع رسیده به آن سطح می‌باشد (دیویس-برنارد، ۲۰۱۴). بنابراین، آلودگی نقش حیاتی در تنظیم انرژی سطحی بر عهده

دارد و بازخورد (فیدبک) مستقیم پوشش گیاهی نسبت به شرایط اقلیمی است (ریچاردسون و همکاران، ۲۰۱۳). در مورد برگ، تحقیقات عمدتاً بر روابط قابل تشخیص آشکاری که میان بازتابش از سطح برگ در طول موج‌های خاص و تنش‌های گیاهی وجود دارند، متمرکز شده‌اند (دیویس-برنارد، ۲۰۱۴). به عنوان مثال، کمبود نیتروژن سبب افزایش انعکاس نور از سطح برگ می‌شود، چرا که رابطه‌ای منفی میان مقدار کلروفیل برگ و انعکاس نور در طول موج‌های کوتاه (۵۵۰ و ۷۰۰ نانومتر) مشاهده شده است (دیویس-برنارد، ۲۰۱۴). از این رو، افزایش ضریب آلودگی برگ‌های کدو در نتیجه‌ی کاهش مصرف نیتروژن را می‌توان به این علت نسبت داد که، برگ‌های گیاهان مواجه با کمبود نیتروژن به دلیل از دست دادن کلروفیل، زرد و کم رنگ می‌باشند (فاجریا، ۲۰۰۹) و بنابراین، بخش بیشتری از تشعشع خورشیدی رسیده به سطح خود را منعکس می‌کنند.



تصویر ۳- تأثیر کاربرد نیتروژن بر میانگین دو ساله ضریب آلودگی برگ‌های کدو در تاریخ‌های مختلف نمونه‌برداری (DAS): روز پس از کاشت؛ در هر تاریخ نمونه‌برداری، میانگین‌های با حروف مشابه، براساس آزمون LSD، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

## هدایت روزنه‌ای

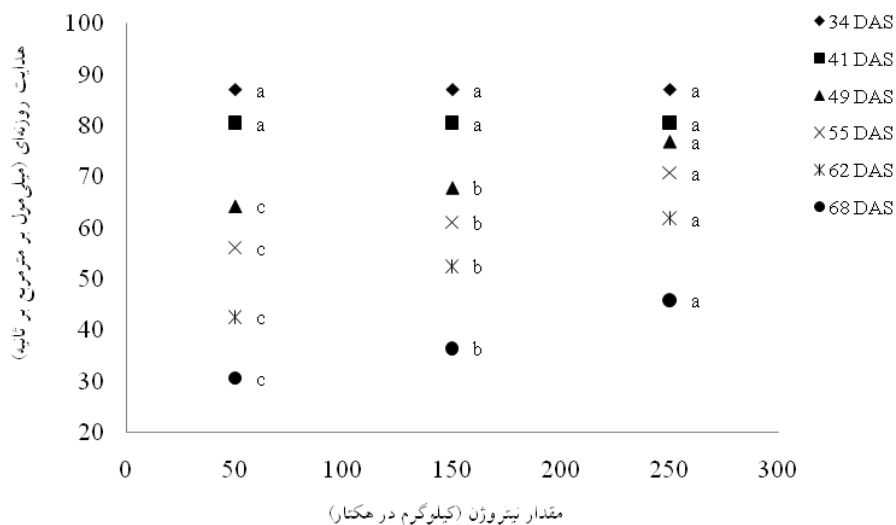
به استثنای دو تاریخ اول نمونه‌برداری، در سایر تاریخ‌ها، با افزایش مقدار کاربرد نیتروژن، میانگین دو ساله هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو به‌طور معنی‌دار افزایش یافت (شکل ۴). بر این اساس، میانگین دو ساله هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو در کل دوره‌ی نمونه‌برداری، برای تیمارهای ۵۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار، به ترتیب برابر با ۶۲/۶، ۶۶/۲ و ۷۱/۹ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه بود. بنابراین، بالاترین هدایت

روزنه‌ای برگ‌های کدو، با کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار حاصل شد. در تأیید این نتایج، جاکوب و همکاران (۱۹۹۵) گزارش کردند که کمبود نیتروژن می‌تواند سبب کاهش هدایت روزنه‌ای برگ‌های گیاه شود.

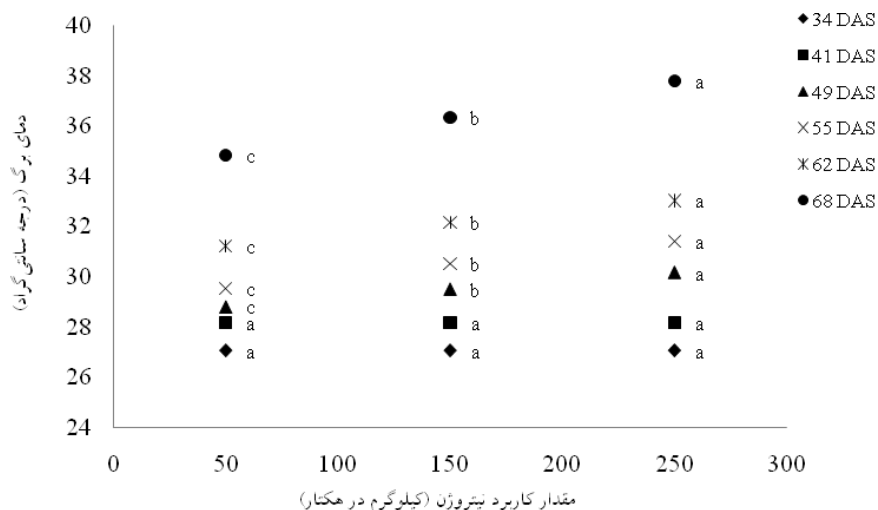
عوامل کنترل کننده‌ی هدایت روزنه‌ای، مشابه با عواملی هستند که تعرق و فتوسنتز گیاه را تنظیم می‌نمایند (ریچاردسون و همکاران، ۲۰۱۳). تحقیقات اخیر نشان داده‌اند، پتانسیل آب برگ که تحت تأثیر وضعیت آب کل گیاه می‌باشد، نقش مهمی

خواهد شد (فاجریا، ۲۰۰۹). گیاهانی که با کمبود نیتروژن مواجه هستند در مقایسه با گیاهانی که نیتروژن کافی در اختیار دارند، دارای تارهای کشنده‌ی کمتری می‌باشند (فاجریا، ۲۰۰۹). ژانگ و همکاران (۲۰۱۲) گزارش نمودند که گسترده‌ترین سیستم ریشه‌ای خیار در تیمارهایی مشاهده شد که مقدار نیتروژن کافی دریافت کرده بودند.

در تنظیم تعرق بر عهده دارد (نایتانی و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین، افزایش هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو بر اثر افزایش میزان کاربرد نیتروژن را می‌توان به تأثیر مثبت نیتروژن بر رشد ریشه‌ی این گیاه نسبت داد، چرا که با ارتقای رشد ریشه، میزان جذب آب توسط گیاه افزایش می‌یابد و در نتیجه، وضعیت آب کل گیاه بهبود خواهد یافت. کمبود نیتروژن موجب کاهش رشد ریشه و متعاقباً، کاهش جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه



شکل ۴- تأثیر کاربرد نیتروژن بر میانگین دو ساله هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو در تاریخ‌های مختلف نمونه‌برداری (DAS: روز پس از کاشت؛ در هر تاریخ نمونه‌برداری، میانگین‌های با حروف مشابه، براساس آزمون LSD، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).



شکل ۵- تأثیر مقدار مصرف نیتروژن بر میانگین دو ساله دمای برگ کدو در تاریخ‌های مختلف نمونه‌برداری (DAS: روز پس از کاشت؛ در هر تاریخ نمونه‌برداری، میانگین‌های با حروف مشابه، براساس آزمون LSD، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).



## دمای برگ

می‌باشد (دیویس-برنارد، ۲۰۱۴). بنابراین، با کشت گیاهانی که ضریب آلدوی برگ آن‌ها بیشتر است، امکان کاهش درجه حرارت هوای سطح زمین وجود دارد (دیویس-برنارد، ۲۰۱۴). به عنوان مثال، مدل‌های شبیه‌سازی پیش‌بینی کرده‌اند که با اندکی افزایش در ضریب آلدوی گیاهان زراعی، می‌توان درجه حرارت هوای آمریکای شمالی و اروپا را در طی فصل تابستان، به میزان ۱ درجه سانتی‌گراد کاهش داد (دیویس-برنارد، ۲۰۱۴).

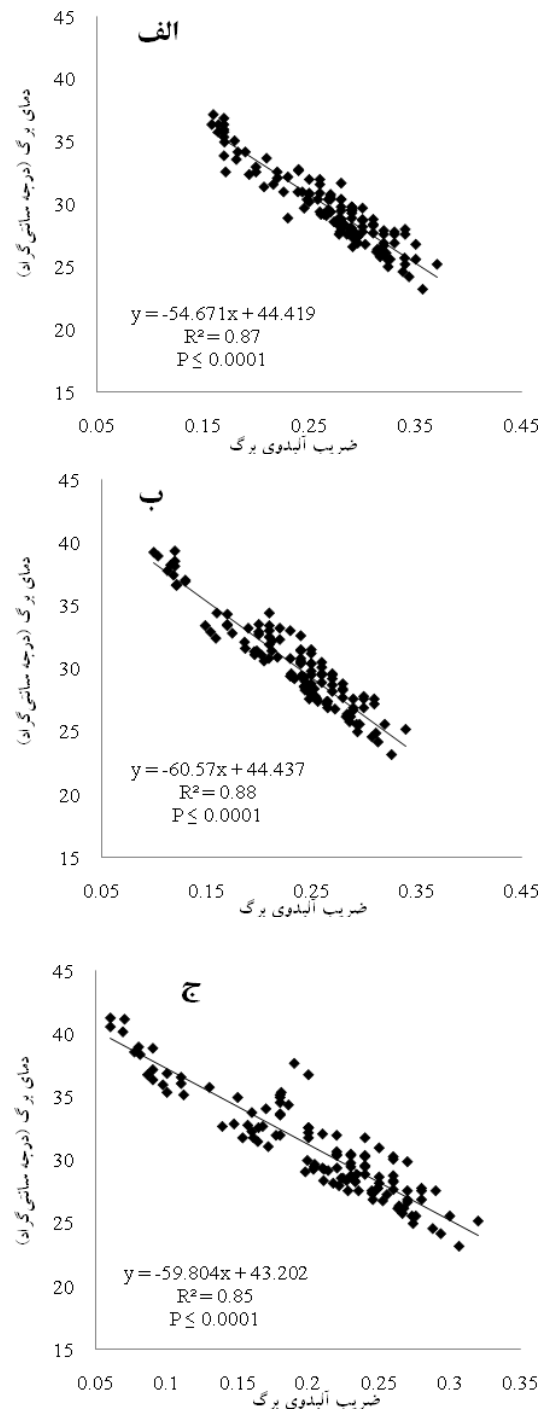
## واسنجی (کالیبراسیون) مدل

در هر دو آزمایش (۱۳۹۲ و ۱۳۹۳)، بالاترین رشد کدو بر اثر کاربرد ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار حاصل شد (یعنی تیمارهای T3-1392 و T3-1393). علاوه بر این، وجود شرایط آب و هوایی مساعدتر (درجه حرارت و تشعشع خورشیدی بالاتر) در فصل رشد ۱۳۹۳، موجب شد تا رشد بوته‌های کدو در تیمار T3-1393 بیشتر از تیمار T3-1392 باشد. از این رو، واسنجی مدل هدایت روزنه‌ای، با استفاده از داده‌های مربوط به تیمار T3-1393 (تیمار ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار از آزمایش ۱۳۹۳) صورت پذیرفت. پارامترهای مورد استفاده برای واسنجی این مدل در جدول ۳ ارائه گردیده‌اند. نسبت مقاومت آیرودینامیک برگ به سطح مرجع ( $n$ ) از مقاله‌ی میجیدی و همکاران (۱۳۹۰) اقتباس گردید. برای ضریب آلدوی برگ نیز در ابتدا مقدار میانگین گزارش شده در بخش ۳-۱ مورد استفاده قرار گرفت (یعنی ۰/۲۱)، اما به دلیل آنکه با استفاده از این مقدار، خطای مدل بسیار افزایش یافت، بنابراین در نهایت، برای ضریب آلدوی برگ از مقداری استفاده شد که اختلاف میان مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده‌ی هدایت روزنه‌ای را به حداقل برساند. مقدار ضریب آلدوی سطح مرجع نیز از داده‌های آزمایشی تیمار مورد استفاده برای واسنجی مدل (یعنی تیمار T3-1393) به دست آمد. مقادیر مربوط به چگالی هوا ( $\rho$ )، ظرفیت گرمایی هوا ( $C_p$ )، گسیلندگی ( $\epsilon_s$ ) برگ کدو و ثابت استفان-بولتزمن ( $\sigma$ )، به ترتیب از مقالات پولهاموس و همکاران (۲۰۱۳)، دفرایی و همکاران (۲۰۱۳)، لویز و همکاران (۲۰۱۲) و پولهاموس و همکاران (۲۰۱۳) اقتباس شدند.

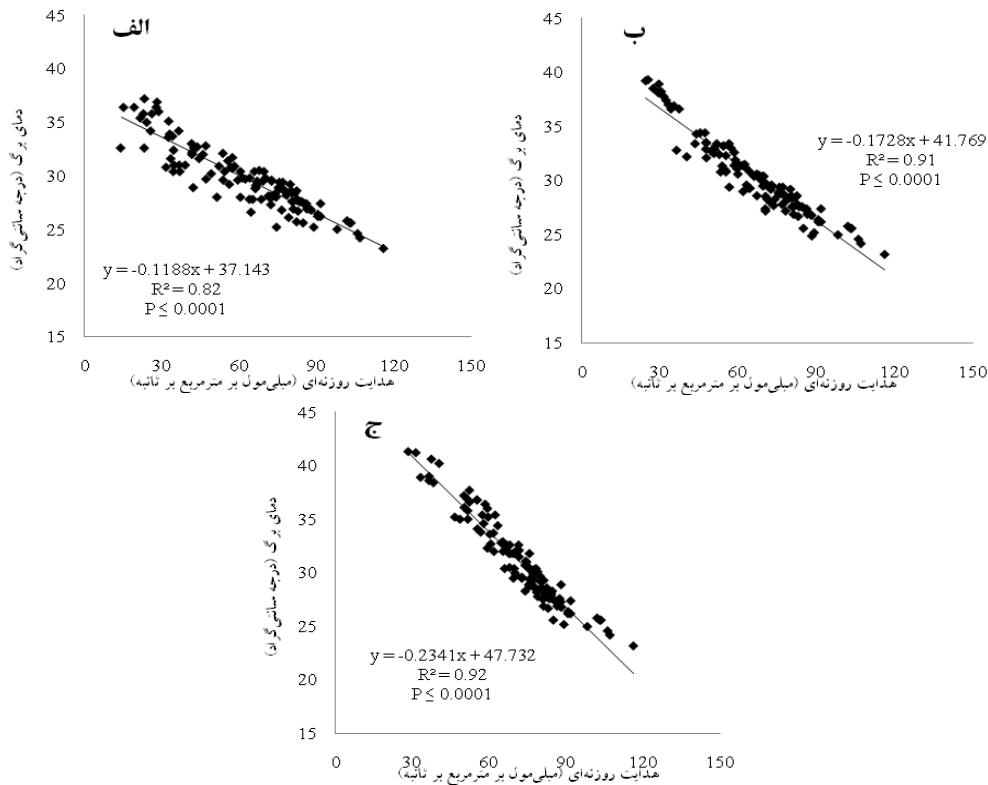
روند کلی تغییر میانگین دو ساله دمای برگ در تاریخ‌های مختلف نمونه‌برداری، نشان داد که به استثنای دو تاریخ اول نمونه‌برداری (۳۴ و ۴۱ روز پس از کاشت)، در سایر تاریخ‌ها، افزایش مصرف نیتروژن موجب افزایش معنی‌دار درجه حرارت برگ شد (شکل ۵) و بالاترین میانگین دو ساله دمای برگ در کل دوره نمونه‌برداری، متعلق به تیماری بود که ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار دریافت کرد. بر این اساس، میانگین دو ساله دمای برگ کدو از روز سی و چهارم تا روز شصت و هشتم پس از کاشت، برای تیمارهای ۵۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، به ترتیب برابر با ۲۹/۷، ۳۰/۳ و ۳۰/۹ درجه سانتی‌گراد بود. افزایش دمای برگ کدو در نتیجه‌ی افزایش کاربرد نیتروژن را می‌توان به کاهش ضریب آلدوی برگ بر اثر افزایش مصرف نیتروژن (شکل ۳)، که منجر به بازتابش بخش کمتری از تشعشع خورشیدی رسیده به سطح برگ می‌شود، نسبت داد.

ارزیابی رابطه‌ی درجه حرارت و ضریب آلدوی برگ (شکل ۶) نشان داد که در طی دوره‌ی نمونه‌برداری، برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه، یک رابطه‌ی منفی معنی‌دار ( $P \leq 0.0001$ ) میان دما و ضریب آلدوی برگ‌های کدو وجود داشت و با کاهش ضریب آلدوی، دمای برگ افزایش یافت (شکل ۶). علاوه بر این، رابطه‌ی میان دمای برگ و هدایت روزنه‌ای نیز به صورت یک رابطه‌ی منفی معنی‌دار ( $P \leq 0.0001$ ) بود (شکل ۷). بنابراین، افزایش هدایت روزنه‌ای کدو بر اثر افزایش کاربرد نیتروژن (شکل ۴) می‌تواند موجب کاهش درجه حرارت برگ‌های این گیاه شود. درجه حرارت برگ‌های کدو در نتیجه‌ی افزایش مصرف نیتروژن، افزایش یافت (شکل ۵). این افزایش می‌تواند ناشی از این باشد که تأثیر ضریب آلدوی بر دمای برگ، قوی‌تر از تأثیر هدایت روزنه‌ای بوده است. به عنوان مثال، نتایج تجزیه رگرسیون (شکل‌های ۶ و ۷) نشان داد که با در نظر گرفتن تمامی تیمارها، به ازای هر ۰/۱ واحد کاهش در ضریب آلدوی، دمای برگ ۵/۸۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد، در حالیکه به ازای هر ۰/۱ واحد افزایش در هدایت روزنه‌ای، دمای برگ تنها ۰/۰۲ درجه سانتی‌گراد کاهش خواهد یافت. بنابراین، کاهش ضریب آلدوی برگ در نتیجه‌ی افزایش مقدار مصرف نیتروژن (شکل ۳) موجب افزایش جذب انرژی خورشیدی توسط برگ‌های کدو و متعاقباً بالا رفتن درجه حرارت آن‌ها شده است (شکل ۵).

آلدوی، پارامتری بسیار مهم در بیلان انرژی محسوب می‌شود و تعیین‌کننده‌ی میزان بازتابش انرژی تشعشعی از یک سطح



شکل ۶- رابطه‌ی میان درجه حرارت و ضریب آلدوی برگ‌های کدو در تیمارهای (الف) ۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، (ب) ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و (ج) ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار



شکل ۷- رابطه‌ی میان درجه حرارت و هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو در تیمارهای (الف) ۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، (ب) ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و (ج) ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار

جدول ۳- پارامترهای واسنجی مدل هدایت روزنه‌ای برای تیمار T3-1393 (تیمار ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار از آزمایش سال ۱۳۹۳)

مقدار	پارامتر
۰/۹	نسبت مقاومت آیرودینامیک برگ گیاه به سطح مرجع ( $n$ )
۰/۴	ضریب آلدوی برگ
۰/۲۷	ضریب آلدوی سطح مرجع
۱/۲۳۴	چگالی هوا ( $\rho$ ) ( $\text{kg m}^{-3}$ )
۱۰۰۶/۴۳	ظرفیت گرمایی هوا ( $C_p$ ) ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
	گسیلندگی سطحی ( $\epsilon_s$ )
۰/۹۷	برگ کدو
۰/۸۵	سطح مرجع
$۵/۶۷ \times ۱۰^{-۸}$	ثابت استفان-بولتزمن ( $\sigma$ ) ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ )

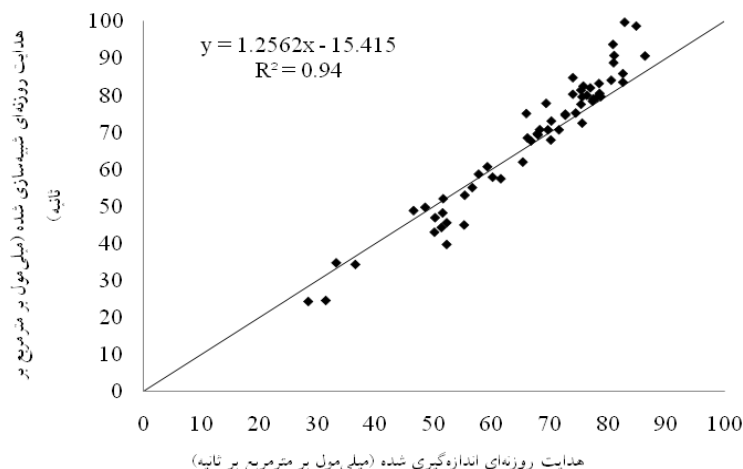
بین میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی هدایت روزنه‌ای در تیمار واسنجی (تیمار T3-1393)، تنها  $+۲/۵۳$  درصد بود.

علی‌رغم وجود اختلاف معنی‌دار میان شیب و عرض از مبدأ رگرسیون خطی با شیب و عرض از مبدأ خط یک به یک (جدول ۵)، به دلیل بالا بودن شاخص انطباق ویلموت ( $\geq ۰/۹۵$ ) و در عین حال، پایین بودن خطای نسبی ( $RE \leq ۰/۱$ )، مدل

ترسیم خط یک به یک مقادیر شبیه‌سازی شده‌ی هدایت روزنه‌ای در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده، برای تیمار واسنجی (تیمار T3-1393) نشان داد که میان مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده‌ی هدایت روزنه‌ای، رابطه‌ی نزدیکی وجود داشت ( $R^2 = ۰/۹۴$ ) (شکل ۸). اختلاف نسبی (که به صورت مقدار شبیه‌سازی شده - مقدار اندازه‌گیری شده) / مقدار اندازه‌گیری شده، محاسبه می‌شود؛ (گالاردو و همکاران، ۲۰۱۱)

حداکثر اختلاف میان مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی تعرق روزانه تنها ۰/۱۷ میلی‌متر در روز بود. بر این اساس، این محققین نتیجه گرفتند که کارآیی مدل در شبیه‌سازی تعرق گیاه چغندر قند، مطلوب بود.

کارآیی بسیار خوبی در شبیه‌سازی هدایت روزانه‌ی برگ‌های کدو برای تیمار واسنجی (تیمار T3-1393) داشت (جدول ۶). در تأیید این نتایج، مجیدی و همکاران (۱۳۹۰) نیز با استفاده از همین مدل به‌منظور برآورد تعرق چغندر قند، گزارش کردند که



شکل ۸- رابطه‌ی میان مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی هدایت روزانه‌ی برگ‌های کدو برای تیمار واسنجی (تیمار T3-1393)

عرض نقطه‌ی تلاقی میان رگرسیون خطی مایلی که نشان‌دهنده‌ی افزایش پیوسته در غلظت نیتروژن و وزن خشک گیاه است و یک خط عمودی که متناظر با افزایش غلظت نیتروژن بدون تغییر معنی‌دار وزن خشک گیاه می‌باشد، برآورد می‌گردد (جوستیس و همکاران، ۱۹۹۴). داده‌های مربوط به آزمایش سال ۱۳۹۳ نشان دادند که در تمامی تاریخ‌های نمونه‌برداری پس از اعمال تیمارها، با افزایش مقدار نیتروژن تا ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، وزن خشک اندام هوایی کدو به صورت معنی‌دار افزایش یافت (جدول ۴). از آنجایی که غلظت نیتروژن اندام هوایی کدو در تیمار ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، حداقل غلظتی بود که موجب دستیابی به حداکثر وزن خشک کدو شد، بنابراین، غلظت نیتروژن این تیمار به عنوان غلظت بحرانی نیتروژن در نظر گرفته شد و شاخص تغذیه نیتروژن بر مبنای آن محاسبه گردید (جدول ۴). با توجه به اینکه طی فصل رشد کدو، تنوع قابل ملاحظه‌ای در شاخص تغذیه نیتروژن تیمارهای ۵۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار مشاهده نشد (جدول ۴)، لذا، به ترتیب مقادیر میانگین ۰/۶۱ و ۰/۸۴ برای این تیمارها در نظر گرفته شدند.

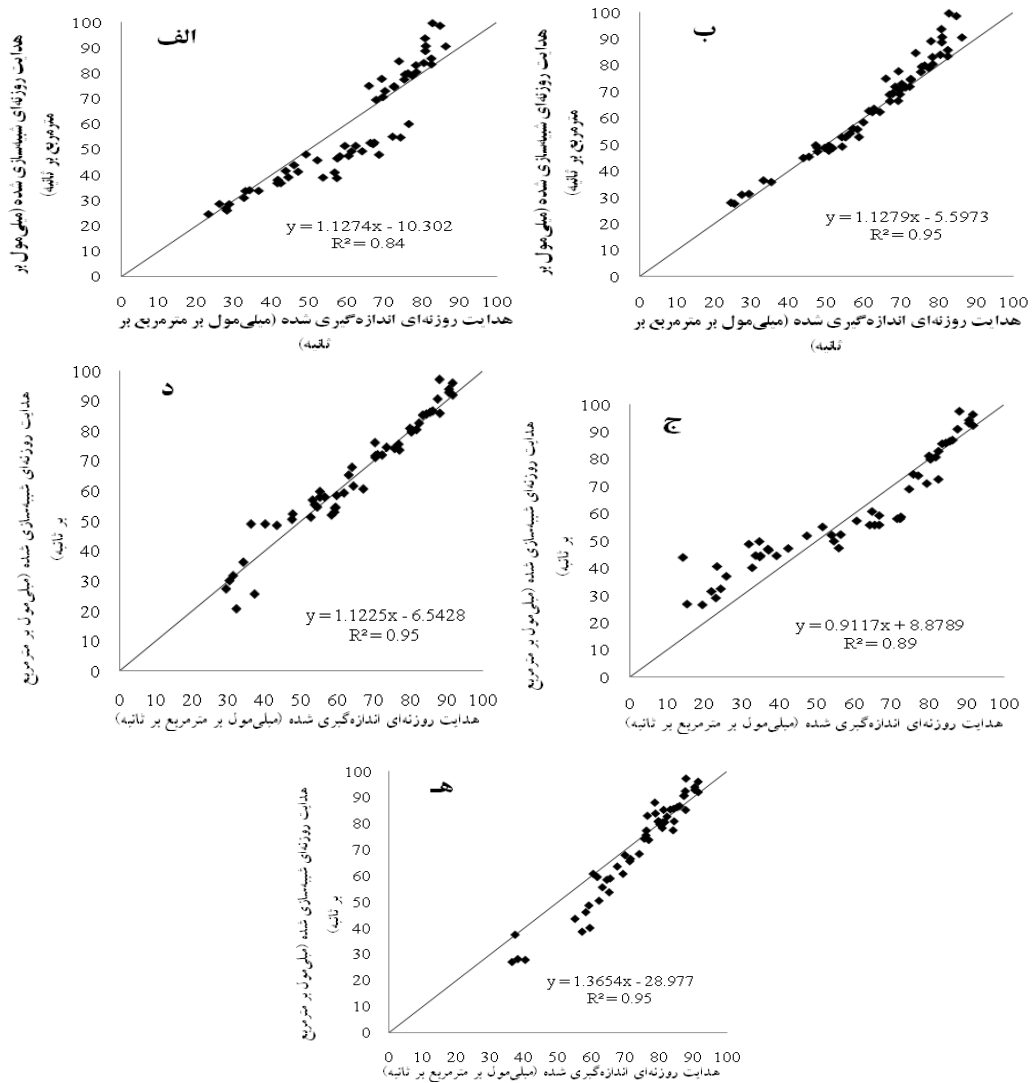
به‌منظور شبیه‌سازی هدایت روزانه‌ی در تیمارهایی که مقدار نیتروژن آن‌ها کمتر از تیمار واسنجی بود (یعنی تیمارهای T1-1392، T2-1392، T1-1393 و T2-1393)، هدایت روزانه‌ی شبیه‌سازی شده با استفاده از پارامترهای واسنجی مدل، در شاخص تغذیه نیتروژن ( $NNI$ ) ضرب گردید. شاخص تغذیه نیتروژن، روشی مرجع جهت تشخیص کمبود نیتروژن در گیاهان زراعی است (زیادی و همکاران، ۲۰۱۰) و می‌توان از آن به عنوان معیار تعیین وضعیت نیتروژن گیاه در طی فصل رشد محصول استفاده کرد (کریستوس، ۲۰۱۱). هنگامی که مقدار این شاخص کمتر از یک است، گیاه با کمبود نیتروژن مواجه بوده و در نتیجه، کاربرد مقدار بیشتر کود نیتروژنه ضرورت می‌یابد (کریستوس، ۲۰۱۱). شاخص تغذیه نیتروژن از طریق مقایسه‌ی غلظت واقعی نیتروژن گیاه با غلظت بحرانی نیتروژن در یک روز معین، برآورد می‌شود.

بر اساس تعریف، غلظت بحرانی نیتروژن، حداقل غلظتی از کل نیتروژن اندام هوایی گیاه است که در یک موقعیت و زمان معین، موجب دستیابی به حداکثر وزن خشک بخش هوایی می‌شود (جوستیس و همکاران، ۱۹۹۴). این شاخص به صورت

جدول ۴- مقایسه میانگین وزن خشک اندام هوایی و شاخص تغذیه نیتروژن در روزهای مختلف پس از اعمال تیمارهای آزمایش سال ۱۳۹۳

شاخص تغذیه نیتروژن				غلظت نیتروژن اندام هوایی (درصد)				وزن خشک اندام هوایی* (g m <sup>-2</sup> )				مقدار نیتروژن (kg ha <sup>-1</sup> )
روز ۷۷	روز ۷۰	روز ۵۶	روز ۴۲	روز ۷۷	روز ۷۰	روز ۵۶	روز ۴۲	روز ۷۷	روز ۷۰	روز ۵۶	روز ۴۲	
۰/۶۱	۰/۶۲	۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۵	۱/۳۳	۳۵۰c	۳۶۰c	۲۲۵c	۶۰c	۵۰
۰/۸۱	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۸۶	۱/۲۲	۱/۲۷	۱/۳۵	۱/۸۱	۵۰۹b	۵۱۷b	۳۱۰b	۸۶b	۱۵۰
۱	۱	۱	۱	۱/۵	۱/۵	۱/۶	۲/۱	۶۵۱a	۶۵۷a	۳۹۰a	۱۰۸a	۲۵۰

\* برای وزن خشک اندام هوایی، در هر ستون میانگین‌های با حروف مشابه، براساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۱ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۹- رابطه‌ی میان مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی هدایت روزنه‌ای برای تیمارهای (الف) T1-1393، (ب) T2-1393، (ج) T1-1392، (د) T2-1392 و (ه) T3-1392

## اعتبارسنجی مدل

هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو برای تیمار T3-1392، که مقدار نیتروژن آن با تیمار واسنجی برابر است، بسیار خوب بود (جدول ۶). اختلاف نسبی بین میانگین هدایت روزنه‌ای شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در تیمار T3-1392، تنها ۱/۱- درصد بود. این اختلاف اندک بیانگر آن است که مدل با دقت بالا هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو را در این تیمار، که از لحاظ مقدار مصرف نیتروژن شرایطی مشابه با تیمار واسنجی دارد، شبیه‌سازی کرده است.

در تیمارهایی که با کمبود نیتروژن مواجه بوده‌اند (یعنی تیمارهای با مقدار نیتروژن ۵۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار)، کارایی مدل برای تیمارهای T1-1392 و T1-1393، خوب و برای تیمارهای T2-1392 و T2-1393، بسیار خوب بود (جدول ۶). اختلاف نسبی بین میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی هدایت روزنه‌ای در تیمارهای T1-1392، T2-1392، T1-1393 و T2-1393، به ترتیب برابر با ۵+، ۲/۸۳+، ۴/۱۵- و ۳/۹۱+ درصد بود. بنابراین، با اصلاح مدل از طریق استفاده از شاخص تغذیه نیتروژن، در تیمارهایی که با کمبود نیتروژن مواجه بودند نیز مدل با دقت نسبتاً بالایی هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو را شبیه‌سازی نمود.

از تیمارهای T1-1392، T2-1392، T3-1392، T1-1393 و T2-1393 به منظور اعتبارسنجی مدل هدایت روزنه‌ای استفاده شد. ارزیابی رگرسیون خطی میان مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی هدایت روزنه‌ای نشان داد که در تمامی تیمارهای مورد استفاده برای اعتبارسنجی مدل، رابطه‌ی نزدیکی میان این مقادیر وجود داشته است (شکل ۹). با این وجود، بالا بودن ضریب تبیین ( $R^2$ ) رگرسیون خطی میان مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نمی‌تواند به خوبی کارایی مدل در شبیه‌سازی هدایت روزنه‌ای را مشخص کند. ضمن آنکه، تقریباً در تمامی تیمارها، اختلاف معنی‌دار میان شیب و عرض از مبدأ رگرسیون خطی، با شیب و عرض از مبدأ خط یک به یک وجود داشت (جدول ۵) و تنها برای شیب رگرسیون خطی تیمار T1-1393، این اختلاف مشاهده نشد (جدول ۵). از این رو، برای اظهار نظر دقیق‌تر در مورد کارایی مدل در شبیه‌سازی هدایت روزنه‌ای برای تیمارهای اعتبارسنجی، معیارهای توسعه یافته توسط استوکل و همکاران (۲۰۰۴) (جدول ۳) مورد ارزیابی قرار گرفتند. بر مبنای شاخص انطباق ویلموت ( $d$ ) و خطای نسبی ( $RE$ )، کارایی مدل در شبیه‌سازی

جدول ۵- مقایسه آماری شیب و عرض از مبدأ رگرسیون خطی میان مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده هدایت روزنه‌ای، با شیب و عرض از مبدأ خط یک به یک ( $n$ : تعداد مشاهدات)

تیمار	$n$	رگرسیون خطی		خطای استاندارد		عدد $t$		عدد $P$	
		عرض از مبدأ	شیب	عرض از مبدأ	شیب	عرض از مبدأ	شیب	عرض از مبدأ	شیب
T1-1392	۶۰	۸/۸۷۹	۰/۹۱۲	۲/۹۶۷	۰/۰۴۳	۲/۹۹۲۶	۲/۰۴۶۵	۰/۰۰۴	۰/۰۴۵۲
T2-1392	۶۰	-۶/۵۴۳	۱/۱۲۳	۲/۴۰۳	۰/۰۳۳	۲/۷۲۲۸	۳/۷۲۷۳	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۰۴
T3-1392	۶۰	-۲۸/۹۷۷	۱/۳۶۵	۳/۱۴۵	۰/۰۴۰	۹/۲۱۳۷	۹/۱۲۵۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
T1-1393	۶۰	-۱۰/۳۰۲	۱/۱۲۷	۴/۰۹۲	۰/۰۶۴	۲/۵۱۷۶	۱/۹۸۴۴	۰/۰۱۴۶	۰/۰۵۱۹
T2-1393	۶۰	-۵/۵۹۷	۱/۱۲۸	۲/۱۹۴	۰/۰۳۴	۲/۵۵۱۰	۳/۷۶۴۷	۰/۰۱۳۴	۰/۰۰۰۴
T3-1393	۶۰	-۱۵/۴۱۵	۱/۲۵۶	۲/۷۲۴	۰/۰۴۰	۵/۶۵۹۰	۶/۴۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

جدول ۶- خلاصه‌ای از شاخص‌های آماری مورد استفاده به منظور ارزیابی کارایی مدل در تیمار واسنجی (T3-1393) و تیمارهای اعتبارسنجی (سایر تیمارها). ( $RMSE$ : جذر میانگین مربعات خطا،  $RE$ : خطای نسبی،  $d$ : شاخص انطباق ویلموت و  $n$ : تعداد مشاهدات)

تیمار	$n$	$RMSE$	$RE$	$d$	کارایی مدل
T1-1392	۶۰	۹/۶۷	۰/۱۵	۰/۹۷	خوب
T2-1392	۶۰	۶/۳۴	۰/۰۹	۰/۹۸	بسیار خوب
T3-1392	۶۰	۸/۰۴	۰/۱	۰/۹۶	بسیار خوب
T1-1393	۶۰	۹/۴۶	۰/۱۵	۰/۹۶	خوب
T2-1393	۶۰	۵/۲۶	۰/۰۸	۰/۹۹	بسیار خوب
T3-1393	۶۰	۵/۹	۰/۰۹	۰/۹۷	بسیار خوب

## نتیجه‌گیری

کارایی آن در شبیه‌سازی هدایت روزنه‌ای، بسیار خوب یا خوب باشد. اختلاف نسبی بین میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی هدایت روزنه‌ای در تیمارهای با کمبود نیتروژن، تنها ۲/۸ تا ۵ درصد بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل مورد ارزیابی در این مطالعه، هم تحت شرایطی که گیاه با کمبود نیتروژن مواجه نبود و هم تحت شرایطی که از کمبود نیتروژن رنج می‌برد، توانست با دقت بالا هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو را برآورد کند. سادگی و دقت مناسب مدل و وابستگی آن به تعدادی داده‌ی سهل‌الوصول، آن را به ابزاری ارزشمند برای استفاده در مدل‌های شبیه‌سازی مبتنی بر هدایت روزنه‌ای مبدل کرده است. با این وجود، به دلیل حساسیت نسبتاً بالای این مدل به تغییرات درجه حرارت هوا، دمای برگ و دمای سطح مرجع، جهت کسب نتایج مطلوب از مدل، اندازه‌گیری دقیق این متغیرها ضروری می‌باشد.

مجیدی و همکاران (۱۳۹۰)، بر مبنای اختلاف دمای میان برگ گیاه و یک سطح مرجع، مدلی ساده را جهت برآورد تعرق گیاه پیشنهاد نمودند. در مطالعه‌ی حاضر سعی شد تا با انجام اصلاحات جزئی بر روی مدل مزبور، از آن به‌منظور شبیه‌سازی هدایت روزنه‌ای برگ‌های گیاه دارویی کدوی پوست کاغذی استفاده شود. این مدل ابتدا برای شرایط بدون کمبود نیتروژن، واسنجی شد و سپس با استفاده از شاخص تغذیه نیتروژن (*NNI*)، برای شرایطی که گیاه با کمبود نیتروژن مواجه است، اصلاح گردید. کارایی مدل در شبیه‌سازی هدایت روزنه‌ای برگ‌های کدو برای شرایط بدون کمبود نیتروژن، بسیار خوب بود، به‌طوری‌که تنها ۱/۱ تا ۲/۵ درصد اختلاف میان مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی هدایت روزنه‌ای وجود داشت. در شرایطی که بوته‌های کدو با کمبود نیتروژن مواجه بودند نیز، افزودن شاخص تغذیه نیتروژن به مدل موجب شد تا

## منابع

- عامری، ع.ا. و م. نصیری محلاتی. ۱۳۸۸. اثرات سطوح مختلف نیتروژن و تراکم بر میزان تولید گل، مواد موثره و کارایی مصرف نور در گیاه دارویی همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.). پژوهش و سازندگی، ۸۱: ۱۴۴-۱۳۳.
- مجیدی، م. ا. علیزاده و م. کافی. ۱۳۹۰. برآورد میزان تعرق گیاه با استفاده از اندازه‌گیری دمای برگ. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱(۵): ۱۴۵-۱۵۷.
- Bannayan, M. and S. Sanjani. 2011. Weather conditions associated with irrigated crops in an arid and semi arid Environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151: 1589-1598.
- Borlaug, N. E. 2009. Foreword. *Food Security*, 1: 1-11.
- Christos, A. D. 2011. Nitrogen nutrition index and its relationship to N use efficiency in linseed. *European Journal of Agronomy*, 34: 124-132.
- Davies-barnard, T. 2014. Geoengineering of the Climate System. In: *Issues in Environmental Science and Technology*, Hester, R.E. and Harrison, R.M. (Eds). The Royal Society of Chemistry, 38: 105-130.
- Defraeye, T., P. Verboven, D. Derome, J. Carmeliet and B. Nicolai. 2013. Stomatal transpiration and droplet evaporation on leaf surfaces by a microscale modelling approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65: 180-191.
- Fageria, N. K. 2009. *The use of nutrients in crop plants*. Boca Raton, FL, CRC Press, p. 430.
- Gallardo, M., C. Giménez, C. Martínez-Gaitán, C. O. Stöckle, R. B. Thompson and M.R. Granados. 2011. Evaluation of the VegSyst model with muskmelon to simulate crop growth, nitrogen uptake and evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 101: 107-117.
- Gao, Q., P. Zhao, X. Zeng, X. Cai and W. Shen. 2002. A model of stomatal conductance to quantify the relationship between leaf transpiration, microclimate and soil water stress. *Plant, Cell and Environment*, 25: 1373-1381.
- Gerosa, G., S. Mereu, A. Finco and R. Marzuoli. 2012. Stomatal conductance modeling to estimate the evapotranspiration of natural and agricultural ecosystems. In: Irmak A. (Ed.), *Evapotranspiration-remote sensing and modeling*. InTech press, China.
- Gorski, K. M. 2013. Albedo project. <https://sites.google.com/site/albedoproject/home>, last access: 4 February 2013.
- Hollinger, D. Y., S. V. Ollinger, A. D. Richardson, T. P. Meyers, D. B. Dail, M. E. Martin, N. A. Scott, T. J. Arkebauer, D. D. Baldocchi, K. L. Clark, P. S. Curtis, K. J. Davis, A. R. Desai, D. Dragoni, M. L. Goulden, L. Gu, G. G. Katul, S. G. Pallardy, U. Paw, K. T. Schmid, H. P. Stoy, P. C. Suyker and S. B.

- Verma. 2010. Albedo estimates for land surface models and support for a new paradigm based on foliage nitrogen concentration. *Global Change Biology*, 16: 696-710.
- Jacob, J., M. Udayakumar and T. G. Prasad. 1995. Mesophyll conductance was inhibited more than stomatal conductance in nitrogen deficient plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 17: 55-61.
- Justes, E., B. Mary, J. M. Meynard, J. M. Machet and L. Thelier-Huches. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*, 74: 397-407.
- Katul, G., S. Manzoni, S. Palmroth and R. Oren. 2010. A stomatal optimization theory to describe the effects of atmospheric CO<sub>2</sub> on leaf photosynthesis and transpiration. *Annals of Botany*, 105: 431-442.
- Lal, M., K. K. Singh, G. Srinivasan, L.S. Rathore, D. Naidua and C.N. Tripathi. 1999. Growth and yield responses of soybean in Madhya Pradesh, India to climate variability and change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93: 53-70.
- López, A., F. D. Molina-Aiz, D. L. Valera and A. Pena. 2012. Determining the emissivity of the leaves of nine horticultural crops by means of infrared thermography. *Scientia Horticulturae*, 137: 49-58.
- Naithani, K. J., B. E. Ewers, E. Pendall. 2012. Sap flux-scaled transpiration and stomatal conductance response to soil and atmospheric drought in a semi-arid sagebrush ecosystem. *Journal of Hydrology*, 464-465: 176-185.
- Pohlert, T. 2004. Use of empirical global radiation models for maize growth simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126: 47-58.
- Polhamus, A., J. B. Fisher and K.P. Tu. 2013. What controls the error structure in evapotranspiration models? *Agricultural and Forest Meteorology*, 169: 12-24.
- Qiu, G. Y., T. Yano and K. Momiic., 1998. An improved methodology to measure evaporation from bare soil based on comparison of surface temperature with a dry soil surface. *Journal of Hydrology*, 210: 93-105.
- Richardson, A. D., T. F. Keenan, M. Migliavacca, Y. Ryu, O. Sonnentag and M. Toomey. 2013. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169: 156-173.
- Stöckle, C. O., J. Kjelgaard and G. Bellocchi. 2004. Evaluation of estimated weather data for calculating Penman-Monteith reference crop evapotranspiration. *Irrigation Sciences*, 23: 39-46.
- Uddling, J., M. Hall, G. Wallin and P. E. Karlsson. 2005. Measuring and modelling stomatal conductance and photosynthesis in mature birch in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132: 115-131.
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63: 1309-1313.
- Yu, Q., Y. Zhang, Y. Liu and P. Shi. 2004. Simulation of the stomatal conductance of winter wheat in response to light, temperature and CO<sub>2</sub> changes. *Annals of Botany*, 93: 435-441.
- Zhang, L., L. Gao, L. Zhang, S. Wang, X. Sui and Z. Zhang. 2012. Alternate furrow irrigation and nitrogen level effects on migration of water and nitrate-nitrogen in soil and root growth of cucumber in solar-greenhouse. *Scientia Horticulturae*, 138: 43-49.
- Zhou, J., C. Wang, H. Zhang, F. Dong, X. Zheng, W. Gale and S. Li. 2011. Effect of water saving management practices and nitrogen fertilizer rate on crop yield and water use efficiency in a winter wheat-summer maize cropping system. *Field Crops Research*, 122: 157-163.
- Zhu, X. G., S. P. Long and D.R. Ort. 2008. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology*, 19: 153-159.
- Ziadi, N., G. Belanger, A. Claessens, L. Lefebvre, A. N. Cambourisa, N. Tremblay, M. C. Nolina and L. E. Parent. 2010. Determination of a critical nitrogen dilution curve for spring wheat. *Agronomy Journal*, 102: 241-250.



## Estimation of the leaf stomatal conductance in pumpkin under different nitrogen levels using leaf temperature

R. Naderi<sup>1</sup>, M. Bannayan<sup>2</sup>, M. Goldani<sup>2</sup>, A. Alizadeh<sup>3</sup>

Received: 2016-5-8 Accepted: 2016-10-8

### Abstract

Since stomatal conductance ( $g_s$ ) couples the crop photosynthesis and transpiration, estimation of  $g_s$  is important for adopting management practices which can increase crop growth through efficient use of water. In the current study, a simple model based on temperature difference between crop leaf and a reference surface was used for estimation of the leaf stomatal conductance. The model calibrated and validated using two years field experiment data with pumpkin carried out during 2013 and 2014 at Research Farm of Ferdowsi University of Mashhad. Results showed that model had a very good performance and very accurately simulated pumpkin leaf stomatal conductance under conditions without nitrogen deficiency. Under nitrogen deficient conditions, by using the nitrogen nutrition index ( $NNI$ ), the good or very good performance and accuracy were obtained from the model. The relative difference ( $RD$ ) between simulated and observed values of average of stomatal conductance during the growing season was ranged from 1.1% to 2.5 for non-nitrogen deficient treatments and from 2.8% to 5% for nitrogen deficient treatments. The accuracy and simplicity of the model and its low input requirements make it suitable for use in stomatal conductance based crop growth models.

**Key words:** Energy balance, reference surface, photosynthesis, transpiration

---

1- PhD student of crop ecology, department of agronomy, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Associate professor, department of Agronomy, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Professor of Irrigation, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran