

## ارزیابی مدل SIMDualKC با استفاده از داده‌های لیسیمتری جهت برآورد تبخیر- تعرق روزانه گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum* L.)

هوشنگ قمرنیا\* و فاطمه ساسانی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۳)

### چکیده

مدل SIMDualKC، یک مدل شبیه‌سازی برنامه آبیاری بوده که ضریب گیاهی دوگانه را برای تعیین  $ET_c$  به کار برده و بدین منظور، در گام زمانی روزانه، دو بیلان حجمی جداگانه را در خاک محاسبه می‌نماید. یک بیلان برای لایه تبخیر که در آن  $K_e$  محاسبه می‌شود و دیگری بیلان در کل منطقه ریشه که  $K_{cb}$  برای شرایط رطوبتی خاک اصلاح می‌شود. در این مطالعه، داده‌های دو سال تبخیر- تعرق لیسیمتری گیاه گشنیز برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شد. مقدار  $K_{cb}$  برای دوره اولیه کشت ۰/۲۱، برای دوره میانی فصل ۱/۱۲ و برای دوره انتهایی فصل ۰/۷۹ به دست آمد. نتایج به دست آمده حاصل از شبیه‌سازی، برازش خوبی را بین داده‌های  $ET_c$  حاصل از مدل و  $ET_c$  منتج از محاسبات بیلان حجمی داده‌های لیسیمتری زهکش‌دار را نشان می‌دهد. مقدار RMSE برای واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب به میزان ۱/۶۴ و ۱/۵۳ میلی‌متر در روز به دست آمد. راندمان مدل‌سازی EF برابر با ۰/۸ و شاخص تطابق  $d_{IA}$  برابر با ۰/۹۳ می‌باشد که نشان‌دهنده اجرای خوب مدل‌سازی با استفاده از مدل SIMDualKC است. مقدار تبخیر از خاک به طور متوسط در دو سال واسنجی و صحت‌سنجی برابر با ۱۸۱ میلی‌متر به دست آمد که بیان‌گر ۲۵٪ میزان  $ET_c$  می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل SIMDualKC، مدل مناسبی جهت شبیه‌سازی تبخیر-تعرق روزانه گیاهی با استفاده از رویکرد ضریب گیاهی دوگانه برای گیاه گشنیز در منطقه غرب ایران است.

واژه‌های کلیدی: ضریب گیاهی دوگانه، گشنیز، مدل SIMDualKC

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی کرمانشاه

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hghamarnia@razi.ac.ir

## مقدمه

پیاز (۱۷)، درخت آلو (۲۵)، درخت بالنگ (۱۲) و برنج (۲۴) اشاره نمود.

درصدهای مختلف پوشش گیاهی نیز به علت تغییرات جزء تبخیر باعث تغییر در ضریب گیاهی دوگانه می‌گردد (۱۱). مقدار این ضریب در دوره خواب گیاه نیز تغییر نموده که برای گیاه ذرت مورد بررسی قرار گرفته است (۱۳). در این میان، برای برخی گیاهان ضریب گیاهی منفرد و یا دوگانه‌ای در مراجع نیامده است. گیاه گشنیز از جمله این گیاهان بوده که توسط قمرنیا و همکاران (۲) در یکی از استان‌های غربی ایران مورد مطالعه قرار گرفت و ضرایب گیاهی منفرد و دوگانه آن براساس داده‌های لیسیمتری تعیین گردید.

## مدل SIMDualKC

مدل SIMDualKC، یک مدل شبیه‌سازی برنامه آبیاری بوده که بیلان حجمی خاک را در سطح مزرعه و در گام زمانی روزانه محاسبه می‌نماید. گام‌های محاسباتی موردنیاز جهت تعیین تبخیر-تعرق به روش ضریب گیاهی دوگانه و تدوین برنامه آبیاری مطابق فائو ۵۶ (۶)، به صورت مدل تهیه شده است (۲۲). در این مدل، تأثیرات تراکم گیاه، ارتفاع و شکل پوشش گیاهی بر روی  $K_{cb}$  با اعمال ضریب تراکم  $K_d$ ، در نظر گرفته شده و به اثرات کشت و اقدامات زراعی مانند کاربرد مالچ‌ها و پوشش سبزینه فعال بین و داخل ردیف‌های کشت بر  $ET_c$  به صورت جداگانه پرداخته شده (۶ و ۹) و مقادیر نفوذ عمقی مطابق با معادلات ارائه شده در این زمینه (۱۶) محاسبه شده است. در مطالعه نخست، این مدل برای محصولات ذرت تحت آبیاری کامل، کم‌آبیاری و شرایط دیم در منطقه کوروچه کشور پرتغال، گندم تحت شرایط دیم و آبیاری تکمیلی سطحی در منطقه آلپوی سوریه، پنبه تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری جویچه‌ای در دره فرگانای ازبکستان و در مطالعه بعدی برای گندم زمستانه و ذرت تابستانه به روش آبیاری کرتی در بیژینگ در جنوب چین آزمون، واسنجی و صحت‌سنجی شده است. مطالعات انجام شده برای محصولات اشاره شده مطابق با شاخص‌های

در محاسبه تبخیر-تعرق با استفاده از ضریب گیاهی منفرد، اثر تعرق گیاه و تبخیر از خاک سطحی به صورت یک ضریب گیاهی نشان داده می‌شود. در این روش، تفاوت تبخیر از خاک و تعرق یک سطح تحت کشت گیاهان و چمن مرجع در یک ضریب گنجانده می‌شود. از آنجایی که ممکن است تبخیر از خاک سطحی تحت تأثیر بارندگی یا آبیاری روزانه نوسان کند، ضریب گیاهی منفرد، تنها میانگین اثر شرایط بر تبخیر-تعرق گیاه در طول دوره موردنظر را توصیف می‌کند. در روش ضریب گیاهی دوگانه، تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاهان به صورت جداگانه و از طریق اعمال ضریب تبخیر ( $K_e$ ) و ضریب پایه گیاه ( $K_{cb}$ ) محاسبه می‌شود (۶). این رویکرد می‌تواند به برآوردهای دقیق‌تری از  $ET_c$  نسبت به متوسط‌گیری زمانی روش ضریب گیاهی منفرد منجر شود. در آبیاری با دور بالا و در مورد گیاهانی که گیاه کشت شده بخشی از خاک را در طول دوره رشد می‌پوشاند، همچنین زمانی که بارندگی‌های متعدد در طول دوره رشد اتفاق می‌افتد، روش ضریب گیاهی دوگانه نتایج دقیق‌تری را در برآورد  $ET_c$  ارائه می‌دهد (۷).

ضریب گیاهی منفرد، توسط محققین متعدد مطالعه و مقادیر آن نسبت به مقادیر استاندارد فائو اصلاح شده است که می‌توان به مطالعات قمرنیا و همکاران (۳) برای گیاه سیاه‌دانه در کرمانشاه، عزیزی زهان و همکاران (۱۰) برای گیاه زعفران در شیراز و زارع ایبانه و همکاران (۵) برای گیاه سیر در همدان اشاره نمود. اما ضریب  $K_e$  مطابق با خیس‌شدگی سطح خاک تغییر می‌کند، بالاخص زمانی که پوشش سطح خاک کم می‌باشد. مقدار این ضریب وقتی که سطح خاک خیس باشد، بالا و وقتی خاک خشک شود، مقدار آن کاهش می‌یابد (۸). برخی محققین با تعیین تبخیر-تعرق گیاهان مختلف به روش ضریب گیاهی دوگانه نشان دادند که این روش نسبت به ضریب گیاهی منفرد، هم‌خوانی بیشتری با شرایط واقعی دارد که می‌توان به مطالعات انجام شده در مورد کشت‌های متوالی گندم زمستانه و ذرت تابستانه (۱۵)، سورگوم (۲۶)، ذرت (۱۸ و ۲۷)،

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

عمق خاک (cm)	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm <sup>3</sup> )	PH	$\Theta(pwp)$ (%)	$\Theta(fc)$ (%)	EC (ds/m)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	بافت خاک
۰-۳۰	۱/۳	۷/۶۵	۱۷/۲	۲۷/۶	۰/۶	۳/۷	۴۲/۳	۵۴	سیلتی - رسی
۳۰-۶۰	۱/۳	۷/۶۲	۱۷/۲	۲۷/۶	۰/۶	۳/۷	۴۲/۳	۵۴	
۶۰-۹۰	۱/۳	۷/۷۵	۱۷/۲	۲۷/۶	۰/۵۸	۳/۷	۴۲/۳	۵۴	
۹۰-۱۲۰	۱/۳	۷/۷۵	۱۷/۲	۲۷/۶	۰/۵۹	۳/۷	۴۲/۳	۵۴	

جدول ۲. تاریخ کاشت و طول هریک از مراحل رشد گیاه گشنیز

سال	تاریخ کاشت	دوره رشد اولیه	دوره توسعه	دوره میانی	دوره انتهایی	کل
۱۳۸۸ -۸۹	۲۳ اسفند	۳۰	۴۷	۲۴	۱۳	۱۱۴
۱۳۸۹ -۹۰	۲۴ اسفند	۴۰	۳۵	۲۱	۱۰	۱۰۶
متوسط دو سالانه		۳۵	۴۱	۲۳	۱۲	۱۱۰

آماري بيان‌گر خوبي برآزش مدل با داده‌های مشاهده شده می‌باشد (۲۳ و ۲۸).

گیاه گشنیز دارویی، یک ساله با ساقه‌ای افراشته، شیاردار و منشعب با ارتفاع ۲۰ تا ۱۴۰ سانتی‌متر و از تیره چتریان می‌باشد. (۴). طول دوره رویش آن ۱۰۰ تا ۱۲۰ روز است که در بسیاری از کشورها به‌عنوان گیاه بهاره و در برخی کشورهای مدیترانه و جنوب شرقی آسیا به‌صورت گیاهی زمستانه کشت می‌شود. ضمناً گیاهی گرما دوست بوده و در انواع خاک‌ها می‌روید (۱). این مطالعه، کارآیی مدل SIMDualKC در برآورد ضرایب گیاهی گیاه گشنیز در اقلیمی نیمه خشک واقع در غرب ایران مورد بررسی قرار می‌دهد.

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌های صحرایی روی گیاه گشنیز با استفاده از سه دستگاه لیسیمتر زهکش‌دار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی کرمانشاه با مشخصات ۴۷ درجه ۹ دقیقه عرض شمالی و ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی و ۱۳۱۹ متر ارتفاع از سطح دریا انجام شد. این منطقه بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد است. در این مطالعه، پارامترهای

هواشناسی موردنیاز شامل (دمای بیشینه و کمینه، رطوبت نسبی، کمینه و بیشینه بارش، سرعت باد در ارتفاع دو متری و سایر پارامترهای جوی) از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه در فاصله دو کیلومتری محل آزمایش با ارتفاع ۱۳۱۹ اخذ شد. آزمایش‌ها در یک دوره دو ساله از اسفند ۱۳۸۹ تا تیر ۱۳۹۱ انجام شد. با استفاده از داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای روش پنمن-مانیت،  $ET_0$  مرجع محاسبه گردید (۶). کل میزان بارندگی برای سال اول آزمایش برابر ۱۱۹ میلی‌متر و برای سال دوم آزمایش برابر ۱۷۱ میلی‌متر می‌باشد. خاک طرح مورد مطالعه سیلتی-رسی بوده که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن تا عمق ۱۲۰ سانتی‌متری در جدول ۱ آمده است.

داده‌های موردنیاز برای مطالعه حاضر شامل داده‌های هواشناسی برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع،  $ET_0$  (mm) (شامل پارامترهای هواشناسی اشاره شده در فائو ۵۶)، داده‌های گیاهی (شامل تاریخ‌های رشد اولیه، توسعه گیاه، میان‌فصل، آخر فصل و برداشت یا انتهای فصل-جدول ۲، ضرایب گیاهی پایه  $(K_{cb})$  برای مراحل ابتدایی، میانی و انتهای فصل، عمق‌های ریشه،  $Z_r(m)$  ارتفاع گیاه،  $h(m)$  جزء پوشش گیاهی،  $f_c$  و جزء تخلیه آب خاک برای شرایط بدون تنش (p) برای مراحل

برای شبیه‌سازی آزمایش‌ها در سال دیگر می‌باشد. وقتی نتایج صحت‌سنجی مناسب نباشد، فرآیند واسنجی مجدداً تکرار می‌شود. در این مطالعه از داده‌های مشاهده‌ای و صحرایی گیاه گشنیز در سال ۸۹-۱۳۸۸ برای واسنجی مدل و از داده‌های سال ۹۰-۱۳۸۹ برای صحت‌سنجی استفاده شد. برای ارزیابی پیش‌بینی مدل از شاخص‌های آماری ذیل استفاده گردید (۱۶)، (۲۱ و ۲۲). ضرایب رگرسیون بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده شامل ضریب تبیین (b) و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) مطابق معادلات ۲ و ۳ محاسبه گردید:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})} \quad [2]$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad [3]$$

که  $O_i$  و  $P_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) مقادیر جفت داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده مربوط به یک متغیر مشخص و  $\bar{O}$  و  $\bar{P}$  مقادیر متوسط متناظر می‌باشند. ضریب رگرسیون نزدیک به یک، بیان‌گر نزدیکی کواریانس به واریانس مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد. به عبارت دیگر، مقادیر پیش‌بینی شده از نظر آماری به مقادیر مشاهده‌ای متناظر با خود نزدیک هستند. وقتی ضریب تبیین نیز نزدیک به یک باشد، نشانگر توصیف تغییرات مقادیر مشاهده‌ای توسط مدل می‌باشد. همچنین از مجموعه شاخص‌های خطاهای برآورد باقیمانده نیز استفاده گردید (۱۴ و ۱۹). ریشه میانگین مربعات خطا که واریانس خطاها را نشان می‌دهد، به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad [4]$$

خطای مطلق متوسط، میزان خطاهای برآوردی را به صورت بیانی دیگر از RMSE ارائه می‌دهد:

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad [5]$$

مختلف رشد)، داده‌های خاک (شامل کل آب در دسترس، TAW(mm/m)، عمق لایه‌های خاک، عمق مؤثر لایه تبخیر،  $Z_e(m)$ ، کل آب قابل تبخیر، REW(m)، آب سهل‌الوصول قابل تبخیر در لایه تبخیر، TEW(m)، کلاس بافتی لایه تبخیر به منظور محاسبه REW توسط مدل)، داده‌های آبیاری (شامل جزء خیس‌شدگی خاک، برنامه آبیاری با تاریخ‌ها و عمق‌های مربوطه) می‌باشد.

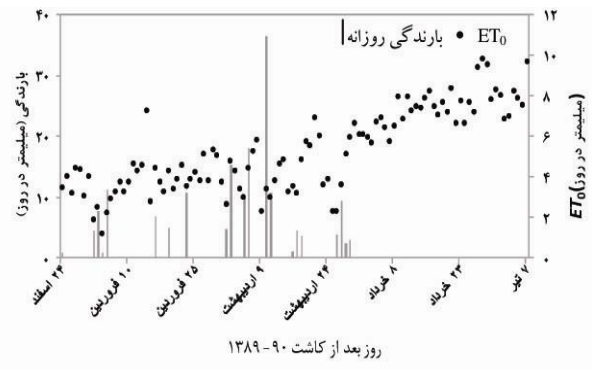
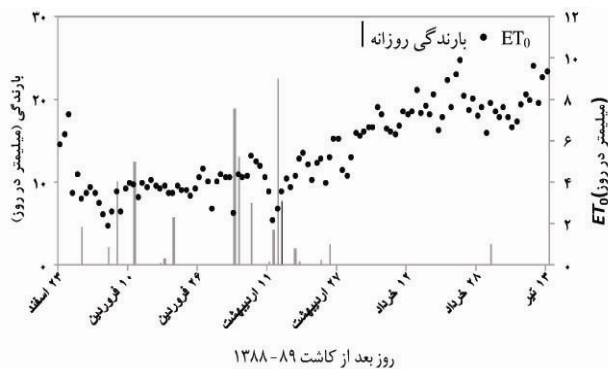
میزان صعود مؤئینه با توجه به عمق بالای سطح ایستابی در محاسبات بیان حجمی خاک در نظر گرفته نمی‌شود. نفوذ عمقی با استفاده از معادله پارامتری به شرح معادله ۳ محاسبه شده که بخشی از مدل SIMDualKC می‌باشد (۱۶).

$$W_a = at^b \quad [1]$$

که در آن  $W_a$ ، ذخیره رطوبتی منطقه ریشه برحسب میلی‌متر، t، زمان سپری شده بعد از آبیاری یا بارندگی، a، مقدار ذخیره آبی بین رطوبت در حالت ظرفیت زراعی ( $W_{FC}$ ) و رطوبت در حالت اشباع ( $W_s$ ) و b مقدار ثابت که برای خاک‌های با قابلیت زهکشی سریع کمتر از ۰/۰۱۷۳- و برای سایر خاک‌ها بزرگ‌تر از ۰/۰۱۷۳- در نظر گرفته می‌شود (۱۶).

#### واسنجی و صحت‌سنجی مدل

واسنجی مدل شامل اصلاح پارامترهای غیرمشاهده‌ای و استاندارد گیاه ( $K_{cb}$  و p)، خاک ( $Z_e$ ، TEW و REW)، پارامترهای معادله نفوذ عمقی (a و b) و شرایط رطوبتی اولیه خاک به منظور حداقل نمودن تفاوت میان مقادیر  $ET_c$  محاسبه شده توسط مدل و مقادیر  $ET_c$  به دست آمده از داده‌های لیسیمتری می‌باشد. زمانی که فرآیند سعی و خطا برای مقادیر  $K_{cb}$  و p به مرحله‌ای رسید که تفاوت میان مقادیر  $ET_c$  محاسبه شده توسط مدل و مقادیر  $ET_c$  به دست آمده از داده‌های لیسیمتری به مقدار قابل قبولی برای کاربر رسید، این فرآیند برای  $Z_e$ ، TEW و REW تکرار شده تا این که اختلاف اشاره شده به حداقل رسیده و در تکرارهای متوالی به پایداری برسد (۲۳). صحت‌سنجی مدل شامل استفاده از مقادیر واسنجی



شکل ۱.  $ET_0$  روزانه و بارندگی در طول فصل رویش سال‌های آزمایش: (۲۳ اسفند ۱۳۸۸ تا ۱۳ تیر ۱۳۸۹) و (۲۴ اسفند ۱۳۸۹ تا ۷ تیر ۱۳۹۰)

وجود ندارد که از مقادیر پیش‌فرض مطالعه قم‌رینا و همکاران (۲) استفاده گردید.

## نتایج و بحث

داده‌های روزانه مربوط به  $ET_0$  و بارندگی برای دو سال آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.

شبیه‌سازی با استفاده از جدول مقادیر  $K_{cb}$ ،  $TEW$  و  $REW$  (۶) و با لحاظ بافت خاک سیلتی-رسی آغاز گردید. مقادیر فرض اولیه و واسنجی شده برای پارامترهای  $p$  و  $K_{cb}$  در جدول ۳ آمده است.

پارامترهای واسنجی شده برای تبخیر از سطح خاک ( $TEW$  و  $REW$ ) بزرگ‌تر از مقادیر جداول استاندارد در آغاز فرایند سعی و خطا ( $TEW = 29 \text{ mm}$  و  $TEW = 20/5 \text{ mm}$ ) می‌باشد. این مقادیر بزرگ‌تر بیان‌گر ضخامت لایه تبخیر بزرگ‌تر،  $Z_e = 0/2 \text{ m}$  می‌باشد. پارامترهای واسنجی شده برای نفوذ عمقی معادل  $a = 370$  و  $b = -0/017$  می‌باشد.

از میان پارامترهای اشاره شده برای واسنجی مدل (پارامترهای ضریب گیاهی پایه، پارامترهای تبخیر از سطح خاک، پارامترهای رطوبت اولیه خاک و پارامترهای معادله نفوذ عمقی خاک)، بیش از همه اعمال تغییرات در مقادیر پارامترهای رطوبت اولیه خاک ( $0/5-1$ ) بر نتایج شبیه‌سازی تأثیرگذار بوده است. از آنجایی که مقادیر اولیه ضرایب گیاهی پایه در حدود

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad [5]$$

حداکثر خطای مطلق به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$E_{amx} = \text{Max} |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad [6]$$

علاوه بر شاخص‌های آماری برازش، شاخص‌های آماری کیفیت مدل نیز مورد استفاده قرار گرفت. راندمان مدل‌سازی ( $EF$  و بی بعد) یکی از این شاخص‌ها بوده که مبین بزرگی نسبی واریانس باقی‌مانده در مقایسه با واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده است و به صورت نسبت خطای مربع میانگین به واریانس داده‌های مشاهده‌ای با کسر از مقدار واحد تعریف شده و مقدار نزدیک به صفر یا منفی، نشان‌دهنده آن است که مدل پیش‌بینی خوبی را از داده‌های مشاهده‌ای ارائه می‌دهد (۲۰):

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [7]$$

شاخص بی‌بعد مطابقت ( $d_{IA}$ )، بیان‌گر نسبت بین خطای مربع میانگین و خطای پتانسیل می‌باشد که مقدار یک برای این شاخص مطابقت کامل بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده و مقدار صفر مبین عدم تطابق کامل می‌باشد (۱۴ و ۱۹):

$$d_{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad [8]$$

با توجه به شرحی که در مورد گیاه مورد مطالعه ارائه شد، پیش‌فرض‌های اولیه از مقادیر  $K_{cb}$  این گیاه در مرجع فائو (۶)

جدول ۳. مقادیر واسنجی شده ضرایب پایه گیاهی و درصد رطوبت خاک ( $p$  و  $K_{cb}$ ) برای شرایط بدون تنش آبی برای گیاه گشنیز

مقادیر واسنجی شده	مقادیر اولیه	پارامتر	دوره رشد
۰/۲۱	۰/۱۵	$K_{cb}$	دوره اولیه رشد
۱/۱۲	۱/۱۵	$K_{cb}$	دوره میانی رشد
۰/۷۹	۰/۹	$K_{cb}$	دوره انتهایی رشد
۰/۷	۰/۷	$P_{ini}$	دوره اولیه رشد
۰/۷	۰/۷	$P_{dev}$	دوره توسعه رشد
۰/۹	۰/۷	$P_{mid}$	دوره میانی رشد
۰/۹	۰/۷	$P_{end}$	دوره انتهایی رشد

جدول ۴. شاخص‌های آماری برازش برای داده‌های تبخیر- تعرق مشاهده‌ای (داده‌های لیسیمتری) و شبیه‌سازی شده توسط مدل

سال آزمایش گیاه گشنیز	b	$R^2$	RMSE(mm d <sup>-1</sup> )	AAE(mm d <sup>-1</sup> )	$E_{max}$ (mm d <sup>-1</sup> )	EF	$d_{IA}$
سال واسنجی (۱۳۸۸-۱۳۸۹)	۱/۱	۰/۸۹	۱/۶۴	۱/۴۶	۳/۶۵	۰/۸۰	۰/۹۳
سال صحت‌سنجی (۱۳۸۹-۱۳۹۰)	۱/۰۴	۰/۸۸	۱/۵۳	۱/۲۳	۴/۴۰	۰/۷۸	۰/۹۳

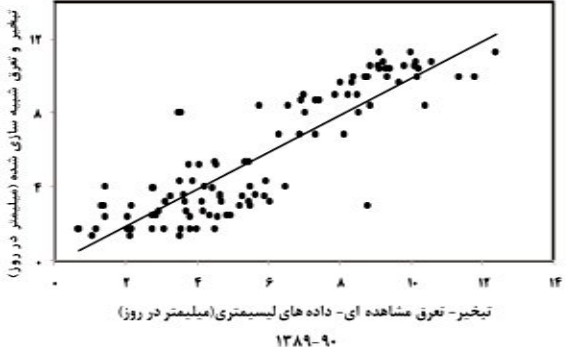
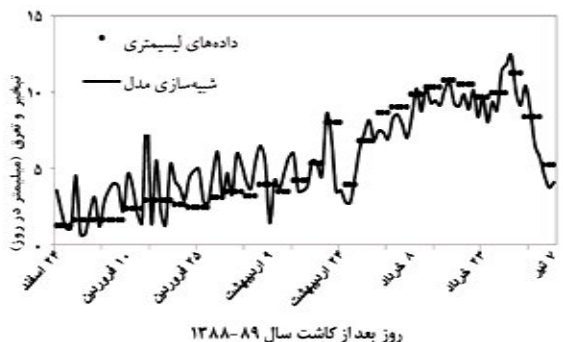
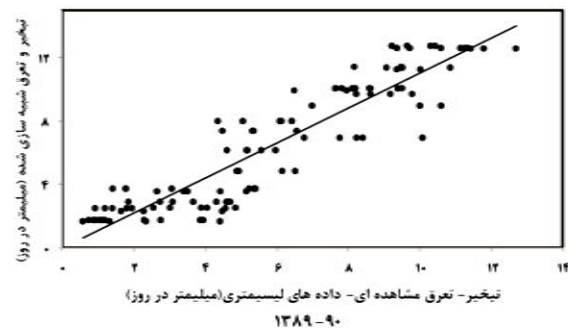
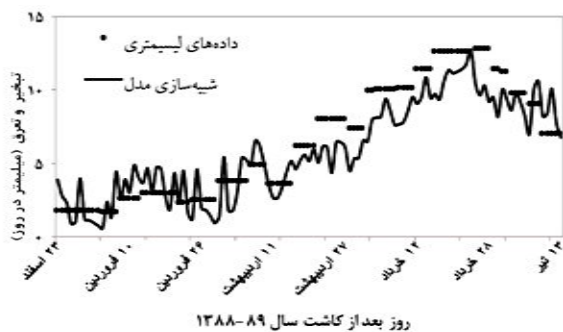
حدود ۱/۳ میلی‌متر می‌باشد. راندمان مدل‌سازی (EF) برای دو سال واسنجی و صحت‌سنجی به‌طور متوسط معادل ۰/۷۹ می‌باشد. این مقدار مبین واریانس باقیمانده‌ها بوده که با واریانس داده‌های برآورد شده از مقادیر اندازه‌گیری  $ET_c$  در لیسیمترها هماهنگ می‌باشد. شاخص تطبیق ویلموت،  $d_{IA}$ ، برابر با ۰/۹۳ به دست آمده که از آن هم‌خوانی خطای مربع میانگین با خطای پتانسیل فرآیند مدل‌سازی دریافت می‌شود.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که مدل SIMDualKC پیش‌بینی‌های قابل قبولی را برای مقادیر  $ET_c$  گیاه مورد مطالعه ارائه نموده است. قمرنیا و همکاران (۲) در مطالعه تعیین ضریب دوگانه گشنیز که به روش گام به گام فائو (۶) اجرا شده است، به مقدار RMSE برابر ۱/۱۹ و ضریب تبیین ۰/۸۸ دست یافتند. مدل حاضر با RMSE متوسط ۱/۵۸ و ضریب تبیین ۰/۸۸، ضمن ساده نمودن فرآیند محاسبه توانسته است پیش‌بینی رضایت‌بخشی را از مقادیر  $ET_c$  ارائه دهد و مطابقت خوبی با نتایج مطالعه قمرنیا و همکاران (۲) داشته باشد.

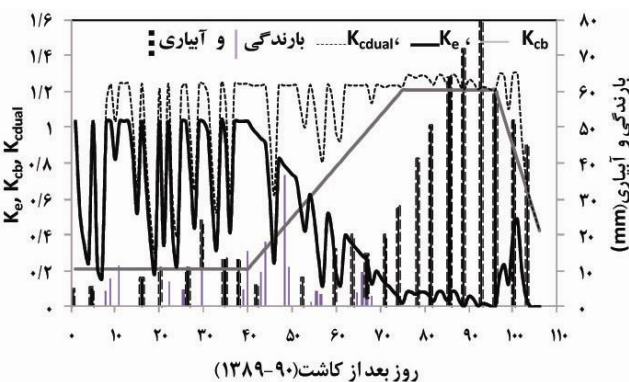
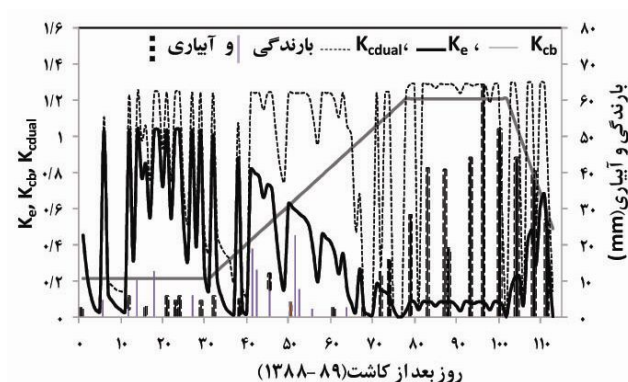
مقادیر به دست آمده توسط مطالعه قمرنیا و همکاران (۲) انتخاب گردید، لذا دامنه تغییرات این پارامتر حداقل بوده و در سعی و خطای نهایی مطابق با مقادیر مطالعه پیشین به دست آمد. کمترین عامل تأثیرگذار مربوط به پارامترهای معادله نفوذ عمقی بوده که نشان‌دهنده حساسیت حداقل مدل به این پارامترها می‌باشد. مقادیر  $ET_c$  برآورد شده از داده‌های لیسیمتری و شبیه‌سازی شده به وسیله نرم‌افزار در شکل ۲ آمده است.

شاخص‌های آماری برازش در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در تمامی موارد ضریب رگرسیون نزدیک به یک بوده که نشانگر تطابق خوب موارد پیش‌بینی شده توسط مدل با مقادیر برآورد شده میدانی است. ضرایب تبیین بین ۰/۸۸ و ۰/۸۹ برای فرآیندهای واسنجی و صحت‌سنجی بوده که بیان‌گر توصیف قابل قبول مدل از تغییرات مقادیر برآوردی میدانی می‌باشد.

خطاهای برآورد مدل پایین بوده، به گونه‌ای که مقادیر RMSE معادل ۱/۶۴ و ۱/۵۳ میلی‌متر در روز و میزان AAE



شکل ۲. مقادیر  $ET_c$  برآورد شده از داده‌های لیسیمتری و شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار SIMDualKC

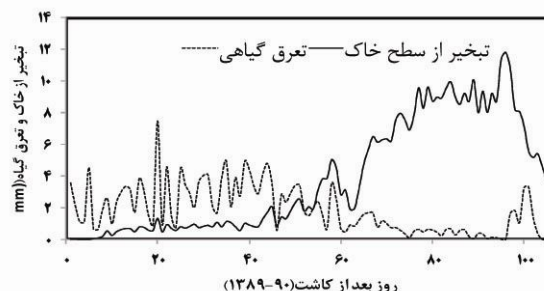
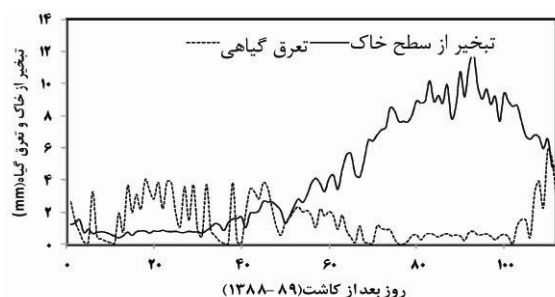


شکل ۳. نمودار ضرایب گیاهی گیاه گشنیز در سال‌های ۱۳۸۸-۸۹ و ۱۳۸۹-۹۰

### ضرایب گیاهی

است، پوشش گیاهی نیز در این دوره کم بوده و این عامل به‌طور مستقیم بر مقدار  $K_e$  تأثیر گذاشته و مقدار آن را در این دوره افزایش می‌دهد. با بررسی مقدار  $K_e$  بین وقوع دو حادثه بارندگی و آبیاری مشخص می‌شود که مقدار این ضریب در ابتدای فاصله وقوع دو حادثه آبیاری و یا بارندگی بیشتر و به تدریج تا وقوع بعدی کاهش می‌یابد. با افزایش رشد گیاه و به تبع آن افزایش جذب آب توسط ریشه، تدریجاً ضریب  $K_{cb}$  افزایش یافته تا این‌که به مقدار  $K_{cb\ mid}$  در دوره میانی رشد

تغییرات فصلی  $K_e$  و  $K_{cb}$  همراه با عمق‌های آبیاری و بارندگی در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنان که در شکل مشاهده می‌شود، مقدار  $K_{cb\ mid}$  کمتر از مقدار ارائه شده در جدول ۳ می‌باشد که به دلیل اصلاح ضریب برای شرایط اقلیمی می‌باشد. مقادیر  $K_e$  برای گیاه مورد مطالعه در طول دوره اولیه کشت، زمانی که رطوبت خاک بالاست، بیشتر می‌باشد، ضمن آنکه در دوره اولیه رشد گیاه، آبیاری و بارندگی صورت پذیرفته



شکل ۴. نمودار تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه گشنیز در سال‌های ۱۳۸۸-۸۹ و ۱۳۸۹-۹۰

جدول ۵. شاخص‌های خوبی برازش برای داده‌های تبخیر- تعرق مشاهده‌ای (داده‌های لیسیمتری) و شبیه‌سازی شده توسط مدل

E/ET <sub>c</sub> (%)		ET <sub>c</sub>		T(mm)		E(mm)		دوره رشد گیاه
۱۳۸۹-۱۳۹۰	۱۳۸۸-۱۳۸۹	۱۳۸۹-۱۳۹۰	۱۳۸۸-۱۳۸۹	۱۳۸۹-۱۳۹۰	۱۳۸۸-۱۳۸۹	۱۳۸۹-۱۳۹۰	۱۳۸۸-۱۳۸۹	گشنیز
۸۲	۷۲	۱۳۴/۰	۸۳/۴	۲۴/۴	۲۳/۸	۱۱۲/۶	۵۹/۶	اولیه
۳۳	۲۹	۱۹۲/۳	۲۲۴/۸	۱۲۷/۸	۱۶۰/۲	۶۴/۵	۶۴/۶	توسعه
۴	۵	۲۰۰/۹	۲۱۴/۲	۱۹۳/۵	۲۰۲/۶	۷/۴	۱۱/۶	میانه فصل
۱۷	۲۴	۲۷۶/۶	۱۲۱/۱	۲۵۶/۳	۹۲/۲	۲۰/۳	۲۹/۰	آخر فصل
۳۲	۲۵	۶۰۵/۹	۶۵۱/۳	۴۰۸/۷	۴۸۶/۵	۱۹۷/۲	۱۶۴/۸	کل دوره رشد

مقدار متوسط  $E/ET_c$  برای دوره اولیه رشد برای دو سال ۱۳۸۸-۸۹ و ۱۳۸۹-۹۰ برابر با ۷۷٪ می‌باشد. اختلاف ۱۰ درصدی  $E/ET_c$  در دو سال آزمایش مربوط به اختلاف میزان بارندگی در دوره اولیه رشد (۳۶ میلی‌متر در سال اول آزمایش و ۶۷ میلی‌متر در سال دوم آزمایش) می‌باشد. در طول مرحله توسعه، مقدار  $E/ET_c$  به‌طور متوسط در دو سال آزمایش به ۳۱٪ کاهش می‌یابد. میزان  $E/ET_c$  در میانه فصل برای متوسط دو سال آزمایش به ۴/۵٪ کاهش یافته که دلیل آن رسیدن پوشش گیاهی به حداکثر مقدار خود و به تبع آن حداقل شدن انرژی در دسترس برای انجام عمل تبخیر می‌باشد. با کم شدن درصد پوشش گیاهی ( $f_c$ ) در آخر فصل و زرد شدن برگ‌ها، مجدداً مقدار  $E$  افزایش و مقدار  $T$  کاهش یافته و در مطالعه حاضر به‌طور متوسط به ۲۰٪ می‌رسد. اختلاف ۷٪ در دو سال آزمایش مربوط به عمق آبیاری بیشتر در سال آزمایش ۱۳۸۸-۸۹ می‌باشد. متوسط کل  $E/ET_c$  برای سال‌های آزمایش برابر با ۲۵٪

رسیده و به حالت پایدار درآید و از آن پس تا زمان برداشت کاهش می‌یابد.  $K_e$  تا زمان آخرین آبیاری پایین بوده و افزایش آن از زمان کاهش پوشش خاک توسط گیاه می‌باشد. در مورد گیاه مورد مطالعه، تبخیر آب از خاک دارای دامنه وسیعی از تغییرات بوده که علت آن وقوع متعدد فرآیند خیس‌شدگی به‌وسیله باران یا آبیاری می‌باشد. روند کاهش  $K_e$  تا انتهای دوره توسعه گیاه ادامه داشته که دلیل آن انرژی کمتر برای تبخیر از خاک در پوشش گیاهی بالاست.

#### تحلیل مؤلفه‌های تبخیر- تعرق

نتایج شبیه‌سازی میزان تبخیر از سطح خاک ( $E$ ) و تعرق گیاه گشنیز ( $T$ ) در طول دوره رشد در شکل ۴ و مقدار عددی آن در جدول ۴ آمده است. اختلاف واضح میان دوره‌های مختلف رشد در شکل ۴ تحت تأثیر شرایط اقلیمی (شکل ۱) و آبیاری صورت گرفته در طول دوره رشد می‌باشد. مطابق با جدول ۵،



حاکمی از کارایی و توانمندی مدل در برآورد ضریب گیاهی دوگانه و به تبع آن تبخیر- تعرق روزانه گیاه مورد مطالعه می‌باشد. مدل توانسته است در مورد گیاه گشنیز هم که مقداری برای ضریب گیاهی آنها در مراجع ذکر نشده است، نتایج قابل قبولی را ارائه دهد. در بررسی نسبت جزء تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاهی در دوره‌های مختلف، اهمیت احتساب ضریب گیاهی دوگانه در محاسبه  $ET_c$  و به تبع آن ارایه برنامه و عمق آبیاری مشخص شده که منجر به تحویل حجم آبی متناسب با این دو نسبت در دوره‌های مختلف رشد گیاه و افزایش کارایی و راندمان مصرف آب می‌گردد.

برای سال ۸۹-۱۳۸۸ و ۳۲٪ برای سال ۹۰-۱۳۸۹ می‌باشد. این مسأله به میزان بارندگی دوره رشد (میزان کل بارندگی برای سال اول آزمایش برابر با ۱۱۹ میلی‌متر و ۱۷۱ میلی‌متر برای سال دوم آزمایش) مرتبط می‌باشد.

## نتیجه گیری

نتایج شبیه‌سازی مدل SIMDualKC برای گیاه گشنیز، مطابق با شاخص‌های آماری رضایت‌بخش می‌باشد. این شاخص‌ها، شامل ضریب رگرسیون نزدیک به یک و ضریب تبیین ۰/۸۹ و مقدار RMSE معادل ۱/۵۸ میلی‌متر و میزان AAE حدود ۱/۳ میلی‌متر و راندمان مدل‌سازی (EF)، ۰/۸۰ می‌باشد. این نتایج

## منابع مورد استفاده

۱. امید بیگی، ر. ۱۳۷۶. *رهیافت‌های تولید و فراوری گیاهان دارویی*. جلد ۲، انتشارات طراحان نشر، تهران.
۲. قمرنیا، ه.، م. جعفری‌زاده، ا. میری و م. ا. قبادی. ۱۳۹۰. برآورد ضریب گیاهی گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) در منطقه‌ای با اقلیم نیمه‌خشک. *مجله مدیریت آب و آبیاری* ۱(۲): ۸۳-۷۳.
۳. قمرنیا، ه.، ا. میری، م. جعفری‌زاده و م. ا. قبادی. ۱۳۹۰. تعیین ضرایب گیاهی سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) در مراحل مختلف رشد به روش لیسیمتری. *مجله پژوهش آب در کشاورزی* ۲۵(۲): ۱۴۵-۱۳۳.
۴. ولدآبادی، س. ع.، م. ح. لباسچی و ح. علی‌آبادی فراهانی. ۱۳۸۸. تأثیر قارچ میکوریز آربوسکولار (AMF)، کود  $P_2O_5$  و دور آبیاری بر شاخص‌های فیزیولوژیک رشد گشنیز (*Coriandrum sativum* L.). *مجله تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران* ۲۵(۳): ۴۱۸-۴۲۸.
۵. زارع ابیانه، ح.، ع. قاسمی، ص. معروفی و م. بیات ورکشی. ۱۳۸۹. تعیین نیاز آبی گیاه و ضرائب گیاهی منفرد و دوگانه سیر در اقلیم نیمه‌خشک سرد. *مجله دانش آب و خاک* ۱(۱): ۱۲۲-۱۱۱.
6. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56, FAO, Rome. 300 p.
7. Allen, R. G., A. J. Clemmens, C.M. Burt, K. Solomon and T. O'Halloran. 2005a. Prediction accuracy for project wide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *J. Irrig. and Drain. Eng.* 131(1): 24-36.
8. Allen, R. G., W. O. Pruitt, D. Raes, M. Smith and L. S. Pereira. 2005b. Estimating evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soils information. *J. Irrig. and Drain. Eng.* 131(1): 14-23.
9. Allen, R. G. and L. S. Pereira. 2009. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *J. Irrig. Sci.* 28(1): 17-34.
10. Azizi-Zohan, A. A., A. A. Kamgar-Haghighi and A.R. Sepaskhah. 2008. Crop and pan coefficients for saffron in a semi-arid region of Iran. *J. Arid. Environ.* 72(3): 270-278.
11. Bodner, G., W. Loiskandl and H. P. Kaul. 2007. Cover crop evapotranspiration under semi-arid conditions using FAO dual crop coefficient method with water stress compensation. *J. Agric. Water Manage.* 93(3): 85-98.
12. Er-Raki, S., A. Chehbouni, N. Guemouria, J. Ezzahar, G. Boulet and L. Hanich. 2009. Citrus orchard evapotranspiration: comparison between eddy covariance measurements and the FAO-56 approach estimates. *J. Plant Biosyst.* 143 (1): 201-208.

13. Hay, C. H. and S. Irmak. 2009. Actual and reference evaporative losses and surface coefficients of a maize field during nongrowing "dormant" periods. J. Irrig. and Drain. Eng. 135 (3): 313-322.
14. Legates, D. and G. McCabe. 1999. Evaluating the use of goodness of fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. J. Water Resour. Res. 35(1): 233-241.
15. Liu, Y. and R.M. Fernando. 1998. Irrigation scheduling. In: Pereira, L. S., A. Musy., R. J. Liang. and M. Hann (Ed.). Water and soil management for sustainable agriculture in the North China Plain. ISA. Lisbon 167-235.
16. Liu, Y., L. S. Pereira and R. M. Fernando. 2006. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. J. Agric. Water Manage. 84: 27-40.
17. López-Urrea, R., F. Martin de Santa Olalla, A. Montoro and L. Fuster. 2009. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. J. Agric. Water Manage. 96(6): 1031-1036.
18. Majnooni-Heris, A., S. H. Zand-Parsa, A. R. Sepaskhah and A. A. Kamgar-Haghighi. 2007. Comparison of MSM model for prediction of potential evapotranspiration of maize with FAO methods. J. of Sci. and Techn. of Agric. and Natu. Res. 11(41): 29-42.
19. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. ASAE - ASABE. 50(3): 885-900.
20. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. J. Hydrol. 10(3): 282-290.
21. Popova, Z. and L. S. Pereira. 2011. Modelling for maize irrigation scheduling using long term experimental data from Plovdiv region, Bulgaria. J. Agric. Water Manage. 98(4): 675-683.
22. Rosa, R. D., P. Paredes, G. C. Rodrigues, I. Alves, R. M. Fernando, L. S. Pereira and R. G. Allen. 2012a. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. Agric. Water Manage. 103: 8-24.
23. Rosa, R. D., P. Paredes, G. C. Rodrigues, R. M. Fernando, I. Alves, L. S. Pereira and R. G. Allen. 2012b. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 2. Model testing. Agric. Water Manage. 103: 62-77.
24. ShiZhang, P., D. JiaLi, M. Zhi, X. JunZheng and L. DaoXi. 2007. Estimation and verification of crop coefficient for water saving irrigation of late rice using the FAO-56 method. Trans. CSAE. 23(7): 30-34.
25. Spohrer, K., C. Jantschke, L. Herrmann, M. Engelhardt, S. Pinmanee and K. Stahr. 2006. Lychee tree parameters for water balance modeling. J. Plant and Soil. 284(1-2): 59-72.
26. Tolk, J. A. and T. A. Howell. 2001. Measured and simulated evapotranspiration of grain sorghum grown with full and limited irrigation in three high plains soils. Trans. ASAE. 44(6): 1553-1558.
27. Zhao, C. and Z. Nan. 2007. Estimating water needs of maize (*Zea mays* L.) using the dual crop coefficient method in the arid region of northwestern China. Afr. J. Agric. Res. 2(7): 325-333.
28. Zhao, N., Y. Liu, J. Cai, P. Paredes, R. D. Rosa and L. S. Pereira. 2013. Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain: Basal crop coefficients and soil evaporation component. J. Agric. Water Manage. 117: 93-105.