

## شبیه سازی رطوبت در پروفیل خاک با استفاده از مدل LEACHM<sup>۱</sup>

محمد جلینی\*، فریدون کاوه\*\*، ابراهیم پذیرا\*\*\*، منصور پاره کار\*\*\*\* و محمد جواد عابدی\*\*\*\*\*

### چکیده

توسعه راه‌حلهایی برای مسائل مختلف کشاورزی از جمله آبیاری، استفاده از شبیه‌سازی حرکت آب در خاک را الزامی کرده‌است. از طرفی، به منظور بهره‌گیری از این مدل‌ها برای شبیه‌سازی، نتایج آنها باید با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه گردد. در این مطالعه نتایج شبیه‌سازی رطوبت توسط مدل LEACHM با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در پروفیل خاک مورد مقایسه قرار گرفته‌است. به این منظور آزمایشی در مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان با سه سطح آبیاری: ۱- آبیاری بر اساس برآورد نیاز کامل گیاه (چغندرقد) یا تیمار بدون تنش آبی (MAD=50%)، ۲- آبیاری زمانی که میزان تخلیه مجاز به ۷۰ درصد رسید (تنش آبی مداوم با MAD=70%) و ۳- آبیاری زمانی که میزان تخلیه مجاز به ۹۰ درصد رسید (یک بار تنش آبی با MAD=90%) و پس از آن بر اساس نیاز کامل گیاه (مانند تیمار ۱) تا انتهای فصل رشد آبیاری صورت گرفت. آنالیز حساسیت مدل حاکی از آن بود که وزن مخصوص ظاهری تاثیر زیادی روی تغییرات رطوبت خاک دارد. نتایج نشان داد که مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده تطابق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. مقدار خطای مطلق ۱/۸۷ تا ۴/۵۴ درصد در تیمار یک، ۱/۹۰ تا ۳/۱۱ درصد در تیمار دو و

---

۱- قسمتی از رساله دکتری در گروه تخصصی آبیاری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

\*- استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان

\*\* - دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

\*\*\*- استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

\*\*\*\*- استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان

\*\*\*\*\*- استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

تاریخ دریافت مقاله ۸۰/۸/۲، تاریخ دریافت نسخه نهایی ۸۲/۳/۱۰

۳/۹۸ تا ۵/۵۸ درصد در تیمار سه بود. به طور کلی، مدل مقادیر رطوبت را بیشتر از واقعیت برآورد کرد.

**واژه‌های کلیدی:** حرکت آب در خاک، مدل، تنش آبی، شبیه سازی رطوبت، چغندرقد، LEACHM

#### مقدمه

منابع آب یکی از سرمایه‌های ملی هر کشور است. از طرفی، یکی از منابع محدودکننده افزایش سطح زیر کشت در مناطق خشک و نیمه خشک نیز آب است. در گذشته که نیازهای جوامع بشری به آب در مقایسه با پتانسیل‌ها کمتر بود، این سرمایه طبیعی کمتر مورد توجه و اهمیت قرار می‌گرفت و غالباً منابع آب به حدی بود که هیچ گونه رقابتی در استفاده از آنها ایجاد نمی‌شد و به طور کلی آب به عنوان یک کالای رایگان و تمام‌نشدنی محسوب می‌شد. اما با گذشت زمان به لحاظ افزایش جمعیت و نیاز روزافزون به مواد غذایی، نیاز به آب ابعاد وسیع تری پیدا کرد. این مسئله در مناطق خشک و نیمه خشک حادثتر و از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد و مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح برای استفاده بهینه از آب فوق‌العاده ضروری است. اصلاح مدیریت آبیاری و برنامه‌ریزی دقیق برای استفاده بهینه از آب در این مناطق با کاربرد مدل‌های ریاضی قابل انجام می‌باشد، به طوری که در دهه‌های اخیر استفاده از مدل‌ها به عنوان ابزاری مدیریتی و تحقیقی روز به روز در حال توسعه است. مدل‌های ریاضی روند حرکت آب در سیستم خاک، گیاه و اتمسفر را به صورت کمی شبیه‌سازی می‌کنند (۱۷). محققین بسیاری از قبیل وان گنوختن (۱۶) نیومن و همکاران (۱۱)، مولز و رمسون (۱۰) و سلیم و اسکندر (۱۴) روی مدل‌های حرکت آب در خاک و جذب آن توسط گیاه تحقیق کرده‌اند و به نتایج قابل قبولی دست یافته‌اند.

مدل LEACHM<sup>۱</sup> توسط هاتسون و وگنت (۵) در سال ۱۹۹۲ ارائه شده است و بعد از آن به عنوان یک مدل قوی توسط افراد دیگر برای شبیه سازی حرکت آب و نمک در خاک مورد استفاده قرار گرفته و تأیید شده است (۵). پاره کار (۱۲) از مدل LEACHM برای شبیه‌سازی حرکت آب و نمک در محیط متخلخل استفاده کرد و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه نمود و به نتایج قابل قبولی دست یافت. راموس و کاربنل (۱۳) در تحقیقی برای پیش‌بینی حرکت آب و نیترات از مدل LEACHM در مزارع کشت شده با گندم آبی استفاده نمودند. نتایج نشان داد در صورتی که روابط بین رطوبت و مکش به درستی انتخاب شوند مدل دقت قابل قبولی دارد. به عبارتی، مدل نسبت به ضرایب

این روابط حساس می‌باشد. اسمیت و همکاران (۱۵) جریان آب در پروفیل خاک را با کاربرد مدل LEACHM شبیه سازی نمودند. آزمایش در ستون‌هایی از خاک به قطر ۲۰ و طول ۶۵ سانتی متر و در حالت اشباع و نزدیک اشباع بود. برای به دست آوردن ضرایب معادله منحنی رطوبتی خاک از داده‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای استفاده شد. نتایج نشان داد که دقت مدل بستگی زیادی به روش اندازه‌گیری ندارد. حداکثر خطای نسبی ۰/۱، حداکثر ضریب تغییرات ۱۱/۴ و حداقل آن ۹/۳ درصد گزارش شده است. کلمنت و همکاران (۳) با کاربرد سه مدل LEACHM، SWATRE<sup>۱</sup> و SWASIM<sup>۲</sup> جریان آب در خاک را در مزارع کشت شده با سویا و چمن بررسی نمودند. هر سه مدل جریان آب را به صورت یک بعدی و با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز<sup>۳</sup> شبیه‌سازی می‌کنند و تنها تفاوت آنها در روابطی است که میزان تبخیر و تعرق گیاه را برآورد می‌نمایند. نتایج حاصله حکایت از دقت هر سه مدل داشت. مهدیان و گالیچاند (۸ و ۹) بیان داشتند که توزیع آب در پروفیل خاک نتیجه تأثیر متقابل متغیرهای زیادی در رابطه با گیاه، خاک، مواد مغذی و عملیات کشاورزی می‌باشد و در این رابطه مدل‌های رشد ابزار مفیدی برای کمی نمودن این اثرات می‌باشد. آنها رطوبت خاک شبیه‌سازی شده با مدل‌های SWACROP<sup>۴</sup> و SUBSTOR<sup>۵</sup> را با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزارع سیب‌زمینی در کانادا مورد مقایسه قرار دادند و نتیجه گرفتند که مدل‌ها دقت قابل قبولی دارند. متوسط خطای مدل‌ها بین ۲/۷ تا ۴/۱ درصد و دقت آنها بین ۳/۷ تا ۴/۱ درصد گزارش شده است. واسیلز (۱۷) روند حرکت آب و میزان رطوبت در پروفیل خاک را در مزارع پنبه به روش المان‌های محدود شبیه‌سازی نمود و نتیجه گرفت که در صورت انتخاب درست مقادیر داده‌ها و نیز در دست بودن برخی از ضرایب گیاهی از قبیل شاخص سطح برگ<sup>۶</sup> و درصد تاج پوشش<sup>۷</sup> مدل نتایج قابل قبولی خواهد داشت و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مدیریتی و تحقیقی استفاده شود. واسیلز و گویدو (۱۸) با کاربرد یک مدل ریاضی، دینامیک حرکت آب را در یک خاک با ساختمان دست خورده و نخورده بررسی نمودند و در نهایت نتیجه گرفتند که تطابق خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود دارد.

- 1- Soil Water and Actual Transpiration Rate, Extended
- 2- Soil Water Simulation Model
- 3- Richards equation
- 4- Soil Water Actual Transpiration and Crop Production
- 5- Simulation of Underground Bulking Storage Organs
- 6- Leaf Area Index
- 7- Crop Cover

استفاده از مدل‌های ریاضی در بررسی حرکت آب در خاک و مدیریت آبیاری در مزارع روز به روز در حال توسعه و پیشرفت است. در صورت داشتن برخی از ویژگی‌های خاک، می‌توان با این مدل‌ها زمان مناسب آبیاری را تعیین نمود و مدیریت‌های مختلف را در مزرعه پیاده کرد. با در نظر گرفتن این اهداف، کاربرد مدل LEACHM در شرایط رطوبتی مختلف در مزرعه چغندر قند مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

#### آزمایش‌های مزرعه‌ای

آزمایش‌ها در مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان، ایستگاه طرق واقع در پنج کیلومتری شرق مشهد که دارای عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۴۰ دقیقه و ارتفاع از سطح دریا ۹۵۸ متر است در سال ۱۳۷۹ انجام شد. در مزرعه اثرات سه سطح یا رژیم رطوبتی بعد از سبز شدن گیاه بررسی شد. سطوح آبیاری یا رطوبتی عبارت بودند از:

الف- آبیاری بر اساس نیاز کامل گیاه یا تیمار بدون تنش آبی. در این مورد بعد از این که ۵۰ درصد میزان رطوبت قابل دسترس در محیط ریشه تخلیه گردید آبیاری انجام شد. به عبارتی مقدار حداکثر تخلیه مجاز برابر با ۵۰ درصد بود (MAD=50%).

ب- آبیاری زمانی که میزان تخلیه مجاز به ۷۰ درصد رسید صورت گرفت (تنش آبی مداوم با MAD=70%).

ج- آبیاری زمانی که میزان تخلیه مجاز به ۹۰ درصد رسید انجام شد (یک بار تنش آبی با MAD=90% و پس از آن بر اساس نیاز کامل گیاه (مانند تیمار یک) تا انتهای فصل رشد آبیاری صورت گرفت.

قبل از کاشت، نمونه برداری از لایه‌های خاک برای تعیین وضعیت عناصر غذایی صورت گرفت و مقادیر کمبود ازت، فسفر و پتاسیم و سایر عناصر ریزمغذی بر اساس توصیه کودی به زمین داده شد. در طی دوره رشد اندازه‌گیری رطوبت خاک در فواصل زمانی معین از لایه‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۸۰ سانتی‌متری با دستگاه TDR<sup>۱</sup> انجام گرفت. در ضمن زمان جوانه‌زنی، سبز شدن، شروع رشد رویشی، رسیدن و برداشت گیاه، درصد پوشش گیاهی و عمق ریشه در مراحل مختلف (برای استفاده در مدل ریاضی به منظور محاسبه میزان تعرق) در طی آزمایش اندازه‌گیری شد. بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری، منحنی مشخصه رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، پیش‌بینی

1- Time Domain Reflectometry

هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک با استفاده از مدل کمپل، اندازه‌گیری میزان تبخیر از تشتک کلاس A در مزرعه برای تعیین میزان تبخیر و تعرق پتانسیل، درجه حرارت حداکثر و حداقل و نیز میزان آبیاری و بارندگی از دیگر پارامترهای ورودی مدل بود که اندازه‌گیری و تعیین شد. برای رسم منحنی رطوبتی خاک باید تغییرات مکش آب خاک در مقابل رطوبت موجود باشد. برای نیل به این مقصود، به خاک اشباع مکش‌های مختلفی وارد شد و در این مکش‌ها مقدار رطوبت باقی مانده در داخل خاک اندازه‌گیری گردید. سپس با توجه به این مقادیر، ضرایب معادلات کمپل از طریق برازش در هر لایه به‌دست آمد. برای اعمال مکش از دستگاه صفحه فشاری<sup>۱</sup> استفاده شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی خاک

عمق لایه (cm)	بافت خاک	درصد ذرات خاک			وزن مخصوص ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	مقدار رطوبت حجمی خاک (درصد)			ضرایب معادله کمپل	
		شن	رس	سیلت		اشباع	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی	a	b
۰-۲۰	سیلتی لوم	۲۸	۱۴	۵۸	۱/۴۱	۲۷/۹۹	۱۲/۲۰	۳۱۹	-۳/۴۲	۴/۴۴۸
۲۰-۴۰	سیلتی لوم	۲۴	۲۲	۵۴	۱/۵۱	۲۹/۹۰	۱۲/۷۰	۲۵	-۷/۲۸	۴/۶۱۳
۴۰-۶۰	لوم	۲۶	۲۴	۵۰	۱/۴۵	۲۶/۹۲	۱۳/۳۰	۱۸۴	-۱/۷۶	۵/۸۴۰
۶۰-۸۰	لوم	۳۶	۱۸	۴۶	۱/۴۲	۲۳/۷۱	۹/۸۰	۸۱	-۲/۰۶	۴/۲۹۰
۸۰-۱۱۰	شن لومی	۸۰	۵	۱۵	۱/۶۰	۷/۳۴	۱/۶۰	۱۰۰۰	-۰/۱۷	۳/۱۶۲

### توصیف مدل

با ورود آب به سطح خاک از طریق آبیاری یا بارندگی طبقات زیر بلافاصله اشباع نمی‌شوند، بلکه آب در پروفیل خاک اغلب به صورت غیر اشباع حرکت می‌کند. می‌توان گفت که حرکت در حالت غیر اشباع متداول‌ترین نوع حرکت آب در خاک است که بیشتر تحت اثر پتانسیل ماتریک<sup>۲</sup> یا پتانسیل موئینگی صورت می‌گیرد. معادله عمومی جریان در حالت غیر اشباع، از ترکیب معادله دارسی<sup>۳</sup> و معادله پیوستگی<sup>۴</sup> به وجود می‌آید و به صورت زیر بیان می‌گردد (۱۲):

1- Pressure Plate

2- Matrics Potential

3- Darcy equation

4- Continuity equation

$$C_h \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S_w \quad (1)$$

در این معادله:

$h$  = ارتفاع آب (L)

$k$  = هدایت هیدرولیکی (L/T)

$C_h$  = ظرفیت رطوبت ویژه (L/L<sup>3</sup>)

$S_w$  = پارامتر مربوط به جذب آب توسط ریشه گیاه (L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>/T)

$z$  = عمق پروفیل خاک (L)

$t$  = زمان (T)

اغلب مدل‌های ریاضی حرکت آب در محیط غیر اشباع، از معادله (۱) برای تجزیه و تحلیل استفاده می‌کنند. ولی مشکل اساسی این مدل‌ها تعیین رابطه بین هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، رطوبت خاک و پتانسیل ماتریک می‌باشد (۱۲).

در مدل LEACHM برای تعیین رابطه بین رطوبت و ارتفاع آب از رابطه کمپل (۲) که توسط هاتسون و کاس (۴) تعدیل شده به صورت زیر استفاده گردیده است.

$$h = a \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b}, h < h_c \quad (2)$$

$$h = \frac{a \left( 1 - \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{0.5} \left( \frac{\theta_c}{\theta_s} \right)^{-b}}{\left( 1 - \frac{\theta_c}{\theta_s} \right)}, h > h_c > 0 \quad (3)$$

$$\theta_c = \frac{2b\theta_s}{1+2b} \quad (4)$$

$$h_c = a \left( \frac{2b}{1+2b} \right)^{-b} \quad (5)$$

در این روابط:

$\theta_s$  = ظرفیت حجمی رطوبت در حالت اشباع

$a, b$  = ضرایب معادله که از برازش داده‌ها بدست می‌آیند.

رابطه بین هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و رطوبت نیز به صورت زیر است:

$$k(\theta) = k_s \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+2+p} \quad (6)$$

$k_s$  = هدایت هیدرولیکی اشباع (L/T)

$k$  = هدایت هیدرولیکی غیر اشباع (L/T)

$p$  = اثر منافذ

## آنالیز حساسیت مدل

آنالیز حساسیت<sup>۱</sup> مدل تکنیکی است که برای ارزیابی و واسنجی<sup>۲</sup> مدل استفاده می‌شود. با این تکنیک می‌توان تأثیرپذیری مدل و شرایط واقعی را از داده‌های ورودی مورد بررسی قرارداد. اگر با تغییر کمی در یک پارامتر، مقدار متغیر وابسته به آن (در اینجا رطوبت حجمی) تغییر کمی را نشان دهد می‌توان این‌طور استنباط کرد که این پارامتر تأثیر ناچیزی روی نتایج دارد و بدون خطای قابل ملاحظه‌ای آن پارامتر را می‌توان اندازه‌گیری کرد و یا تخمین زد. بر عکس، در صورت تأثیرپذیری زیاد متغیر از پارامتر، آن پارامتر را باید با دقت بیشتری اندازه‌گیری یا پیش‌بینی نمود. در غیر این صورت باید خطای فاحشی را قبول نمود.

به‌علت آن که مدل LEACHM به داده‌های ورودی زیادی نیاز دارد (جدول ۲)، آنالیز حساسیت روی این داده‌ها انجام شد. روش استفاده برای این آنالیز، روشی است که توسط لن و فری را (۶) ارائه شده است. در این روش از رابطه (۷) برای آنالیز استفاده می‌شود.

$$D_{\max} = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| * 100 \quad (7)$$

در رابطه فوق:

$D_{\max}$  = اختلاف مطلق ماکزیمم<sup>۳</sup>

$P_m$  = مقدار برآورد رطوبت بر اساس داده ورودی تعدیل شده<sup>۴</sup>

$P_b$  = مقدار برآورد رطوبت بر اساس داده ورودی پایه<sup>۵</sup>

بر اساس مقدار  $D_{\max}$ ، شاخص حساسیت<sup>۶</sup> به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$D_{\max} = 0$	,	SI = 0	,
$0 < D_{\max} \leq 10$	,	SI = 1	,
$10 < D_{\max} \leq 50$	,	SI = 2	,
$50 < D_{\max}$	,	SI = 3	,

1- Sensitivity

2- Calibration

3- Maximum Absolute Difference

4- Modified Value

5- Basue Value

6- Sensitivity Index

## معیارهای ارزیابی نتایج

برای ارزیابی نتایج از پارامترهای آماری زیر استفاده شده است (۷):

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (9)$$

$$RE = (MBE/\bar{O}) * 100 \quad (10)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \hat{O})^2} \quad (11)$$

در این روابط:

$P_i$  = مقدار رطوبت برآورد شده (درصد)

$O_i$  = مقدار رطوبت اندازه گیری شده (درصد)

$\bar{O}$  = میانگین مقدار اندازه گیری شده (درصد)

$n$  = تعداد نقاط

$MBE$  = خطای متوسط<sup>۱</sup>

$MAE$  = خطای مطلق<sup>۲</sup>

$RE$  = خطای نسبی<sup>۳</sup>

$EF$  = کارایی مدل<sup>۴</sup>

مقادیر خطای متوسط، مطلق و نسبی در حالت بهینه یا حالتی که مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده

مساوی باشند برابر با صفر و مقدار کارایی یا راندمان مدل در این حالت برابر با یک می باشد.

خطای متوسط شاخصی از مقایسه با مقادیر پایه است به طوری که مقدار نزدیک به صفر آن بیان

کننده آن است که متوسط مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده مشابه است. در ضمن علامت مثبت

آن نشان دهنده این است که مدل مقادیر را بیشتر تخمین می زند و علامت منفی نشان دهنده آن است

1- Mean Bias Error

2- Mean Absolute Error

3- Relative Error

4- Modeling Efficiency



که مدل مقادیر را کمتر پیش‌بینی می‌کند. مقدار MAE بیشتر بیان‌کننده دقت مدل است که با افزایش آن دقت مدل کم و با کاهش آن دقت مدل افزایش می‌یابد. مقدار EF نیز نشان‌دهنده خوبی برازش داده‌ها می‌باشد و از منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها تغییر می‌کند.

جدول ۲- داده‌های ورودی مدل و تعریف آنها

واحد	تعریف پارامتر	پارامتر
		خاک
کیلو پاسکال	مکش اولیه خاک	$h_1$
کیلو پاسکال	ضریب $a$ در معادله کمپل	AEVA
کیلو پاسکال	ضریب $b$ در معادله کمپل	BCAM
میلی‌متر بر روز	هدایت هیدرولیکی اشباع	$K_s$
گرم بر سانتی‌متر مکعب	وزن مخصوص ظاهری	$B_0$
درصد	رس	CLAY
درصد	سیلت	SILT
درصد	شن	SAND
درصد	کربن آلی	OC
		اقلیم
میلی‌متر	تبخیر از تشنگ کلاس A	$ET_a$
بی‌بعد	ضریب تشنگ تبخیر	$K_a$
سانتی‌گراد	درجه حرارت حداقل روزانه	$T_{min}$
سانتی‌گراد	درجه حرارت حداکثر روزانه	$T_{max}$
سانتی‌گراد	درجه حرارت متوسط روزانه	$T_{mean}$
		گیاه
درصد	درصد پوشش گیاه	Crop Cover
نسبت	نسبت تبخیر و تعرق واقعی به پتانسیل	$ET_{crop}/ET_p$
روز از آغاز فصل	زمان جوانه زنی	$G_d$
روز از آغاز فصل	زمان شروع رشد رویشی	$E_d$
روز از آغاز فصل	زمان رسیدن گیاه	$M_d$
روز از آغاز فصل	زمان برداشت گیاه	$H_d$

## نتایج و بحث

## آنالیز حساسیت مدل

مقادیر اختلاف مطلق ( $D_{max}$ ) و شاخص حساسیت برای برخی از داده‌های ورودی و مقدار رطوبت به‌عنوان داده خروجی در هر لایه در جدول ۳ ارائه شده‌است. ملاحظه می‌گردد که مقدار رطوبت نسبت به وزن مخصوص ظاهری فوق‌العاده حساس، نسبت به درصد پوشش و ضریب  $b$  در معادله کمپل حساس و نسبت به بقیه داده‌ها غیر حساس می‌باشد. به‌عنوان نمونه در شکل ۱ روند تغییرات رطوبت نسبت به زمان نشان داده شده است.

جدول ۳ - خلاصه‌ای از آنالیز حساسیت مدل نسبت به داده‌های ورودی

عمق لایه خاک (سانتی‌متر)								پارامتر ورودی
۶۰-۸۰		۴۰-۶۰		۲۰-۴۰		۰-۲۰		
SI	$D_{max}$	SI	$D_{max}$	SI	$D_{max}$	SI	$D_{max}$	
۳	۵۱	۳	۵۶	۳	۶۸	۳	۶۱	وزن مخصوص ظاهری
۱	۵	۱	۴	۱	۳	۱	۳	هدایت هیدرولیکی اشباع
۱	۶	۱	۳	۱	۲	۱	۲	ضریب $a$ در معادله کمپل
۲	۳۳	۲	۲۶	۲	۱۳	۲	۲۵	ضریب $b$ در معادله کمپل
۲	۱۶	۲	۱۱	۲	۱۳	۲	۱۲	درصد پوشش گیاه
۱	۴	۱	۳	۱	۳	۱	۳	نسبت تبخیر و تعرق واقعی به پتانسیل
۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	روز جوانه‌زنی
۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	شروع رشد رویشی
۱	۷	۱	۴	۱	۵	۱	۵	شروع رسیدن گیاه
۲	۱۴	۱	۹	۱	۹	۱	۸	روز برداشت گیاه

## مقایسه مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه‌گیری شده

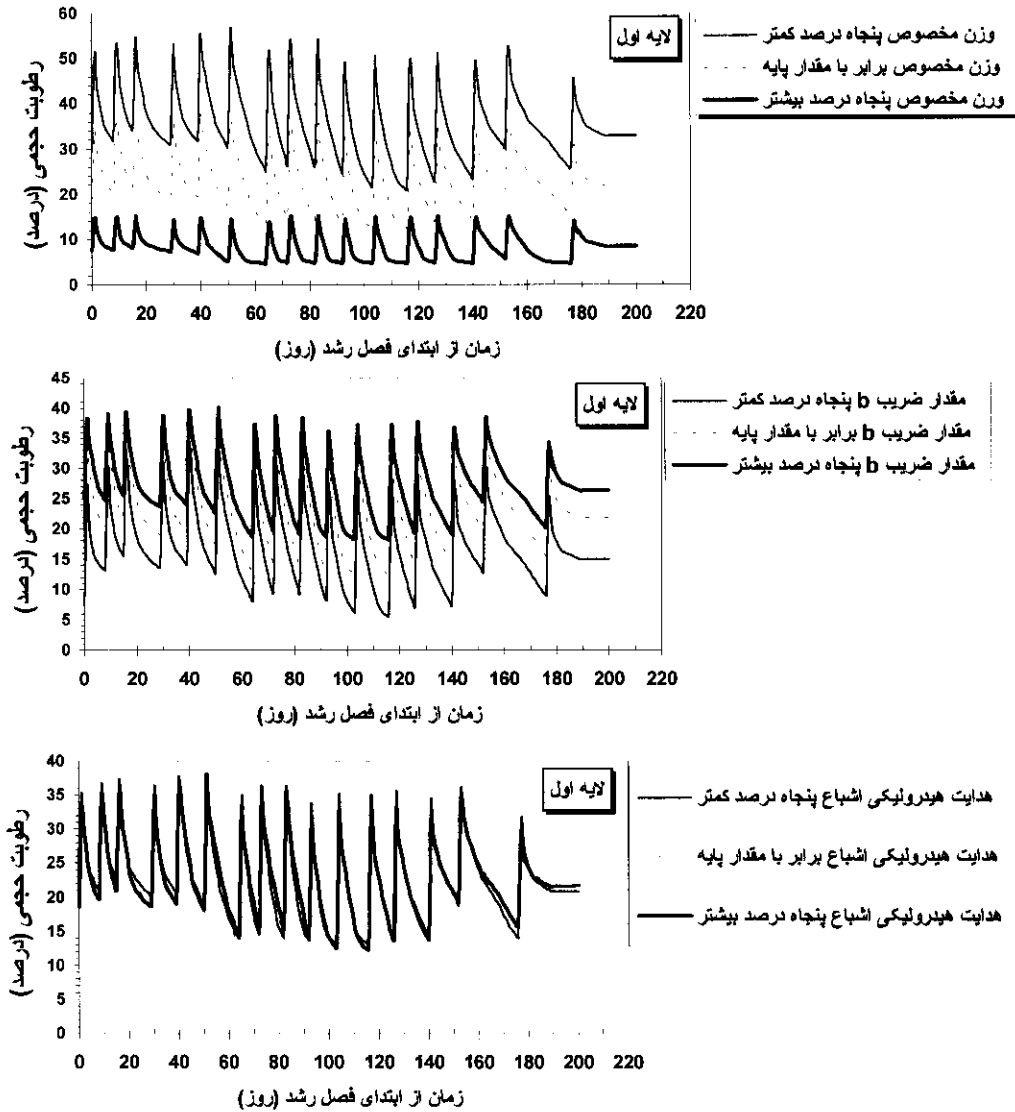
## مقایسه کمی

نتایج مقایسه بین مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف در جدول ۴ ارائه شده‌است. اکنون به بررسی این نتایج در هر تیمار می‌پردازیم.

## تیمار بدون تنش آبی

با توجه به جدول ۴ ملاحظه می‌گردد که مقدار خطای متوسط (MBE) از ۱/۳۱ در لایه سوم (۴۰-۶۰) تا ۳/۵۸ در لایه دوم (۲۰-۴۰) متغیر می‌باشد و با توجه به علامت مثبت آن نشان‌دهنده آن است که مدل مقادیر را بیشتر برآورد می‌کند. مقدار خطای مطلق (MAE) نیز که نشان‌دهنده دقت مدل

است از ۱/۸۷ در عمق ۶۰-۴۰ تا ۴/۵۴ درصد در عمق ۲۰-۰ تغییر می‌کند. هم‌چنین مقدار خطای نسبی (RE) نیز از ۵/۳۵ درصد در لایه سوم تا ۱۵/۹۶ درصد در لایه اول متغیر می‌باشد.



شکل ۱- آنالیز حساسیت مدل نسبت به وزن مخصوص ظاهری، ضریب b در معادله کمپل و هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه اول خاک

## تیمار تنش آبی مداوم

در این تیمار نیز مقادیر پارامترهای آماری در جدول ۴ ارائه شده است. ملاحظه می‌گردد که با توجه به علامت مثبت MBE مدل همانند تیمار یک مقادیر را بیشتر از واقعیت تخمین می‌زند. ولی در کل با توجه به مقادیر کم MBE و MAE مدل در این تیمار نیز از دقت قابل قبولی برخوردار است. مقدار خطای نسبی از ۱/۹۰ درصد در عمق ۰-۲۰ تا ۹/۳۷ درصد در عمق

جدول ۴- مقادیر پارامترهای آماری در تیمارها و لایه‌های مختلف خاک

EF	RE (%)	MAE (%)	MBE (%)	تیمار و عمق (سانتی متر)
				<u>تیمار بدون تنش</u>
-۲/۱۲	۱۵/۹۶	۴/۵۴	۳/۳۱	۰-۲۰
-۱/۷۴	۱۴/۶۰	۴/۰۶	۳/۵۸	۲۰-۴۰
۰/۱۷	۵/۳۵	۱/۸۷	۱/۳۱	۴۰-۶۰
-۱/۰۲	۱۵/۸۱	۳/۱۹	۳/۱۹	۶۰-۸۰
				<u>تیمار تنش مداوم</u>
-۰/۵۰	۱/۹۰	۲/۹۸	-۰/۳۳	۰-۲۰
۰/۰۱	۴/۴۸	۳/۱۱	۰/۹۴	۲۰-۴۰
۰/۵۷	۵/۸۴	۱/۹۰	۱/۲۲	۴۰-۶۰
-۰/۰۴	۹/۳۷	۲/۲۴	۱/۷۵	۶۰-۸۰
				<u>تیمار یک بار تنش</u>
-۱/۸۴	۲۰/۲۷	۴/۴۹	۳/۶۲	۰-۲۰
-۲/۵۴	۲۵/۸۷	۵/۵۸	۵/۲۸	۲۰-۴۰
-۱/۳۳	۱۹/۸۷	۴/۲۱	۴/۰۶	۴۰-۶۰
-۱/۴۷	۲۱/۶۷	۳/۹۸	۳/۹۸	۶۰-۸۰

۸۰-۶۰ تغییر می کند.

### تیمار یک بار تنش آبی

در این مورد مدل نسبت به بقیه تیمارها از دقت کمتری برخوردار است. مقدار خطای متوسط از ۳/۶۲ در لایه اول تا ۵/۲۸ در لایه دوم تغییر می کند و در ضمن با توجه به علامت مثبت آن مدل در تمام لایه ها رطوبت را بیشتر برآورد می کند. مقدار متوسط خطای مطلق و نسبی که بیشتر نشان دهنده دقت مدل اند به ترتیب برابر با ۴/۵۷ و ۲۱/۹۲ درصد تغییر می کنند.

در تحقیقات کلمنت و همکاران (۱۹۹۴) مقدار خطای متوسط توسط مدل LEACHM بین ۳/۹۴- تا ۳/۲۵+، مقدار خطای نسبی بین ۲۹/۵- تا ۷/۵۴+ درصد و مقدار ضریب تغییرات بین ۵/۲۵ تا ۳۲/۰۰ درصد گزارش شده است و با این وجود از این مدل به عنوان یک مدل قابل قبول یاد شده است. در تحقیق انجام شده توسط اسمیت و همکاران (۱۹۹۵) که مدل LEACHM را انتخاب نموده اند نیز مقدار خطای نسبی بین ۴/۱- تا ۱۶/۵+، مقدار انحراف معیار بین ۰/۱- تا ۱۰/۱+ و مقدار ضریب تغییرات بین ۲/۳ تا ۲۰/۵ درصد گزارش شده است. مهدیان و گالیچاند (۱۹۹۵ و ۱۹۹۶) بیان داشتند که مدل های ریاضی ابزار مفیدی برای مدیریت آبیاری در مزارع می باشد که بعد از ارزیابی می توان از آنها استفاده نمود. واسیلز (۱۹۹۷) با حل یک بعدی جریان آب در خاک توسط روش عددی المان های محدود نتیجه گرفت که با استفاده از مدل های ریاضی در مزارع می توان مدیریت آبیاری جهت بهینه نمودن مصرف آب را به خوبی انجام داد. تحقیقات سایر محققین نیز حاکی از مفید بودن کاربرد این مدل ها در زمینه های آبی می باشد (۵، ۱۰، ۱۲ و ۱۶).

### مقایسه کیفی

مقایسه نتایج مقادیر به صورت ترسیمی یا کیفی در شکل های ۲ تا ۴ ارائه شده است.

### تیمار بدون تنش آبی

در این تیمار با توجه به شکل ۲ ملاحظه می گردد که مدل در سه لایه اول (۶۰-۰) تقریباً با یک روند مشابه مقدار رطوبت را برآورد می کند ولی در لایه چهارم مدل به جز در فاصله زمانی ۸۰ تا ۱۶۰ روز از آغاز فصل رشد که مقادیر را با دقت قابل قبولی تخمین می زند در باقی فصل مقادیر را کمتر برآورد می کند.

### تیمار تنش آبی مداوم

در این تیمار، مدل مقادیر را در دو لایه اول (۰-۴۰) تقریباً خوب پیش بینی می کند ولی در لایه سوم (۴۰-۶۰) مدل مقادیر رطوبت را تا ۷۵ روز از ابتدای رشد بیشتر از حد مورد انتظار پیش بینی می کند. در لایه چهارم نیز مدل تا ۸۰ روز از آغاز فصل مقادیر را خیلی بیشتر تخمین می زند ولی بعد از آن تقریباً دقت خوبی دارد (شکل ۳).

### تیمار یک بار تنش آبی

در این مورد مدل در لایه های اول و دوم در فاصله زمانی اعمال تنش آبی (۱۶ روز بعد از کاشت تا ۶۵ روز از ابتدای فصل) مقادیر را بیشتر برآورد می کند ولی در بقیه زمانها از دقت قابل قبولی برخوردار است. در لایه سوم و چهارم (۴۰-۸۰) مدل از دقت کافی برخوردار نیست به طوری که از شروع تنش تا آخر فصل رشد مقادیر را بیشتر تخمین می رند و این عدم دقت در لایه چهارم بیشتر است (شکل ۴).

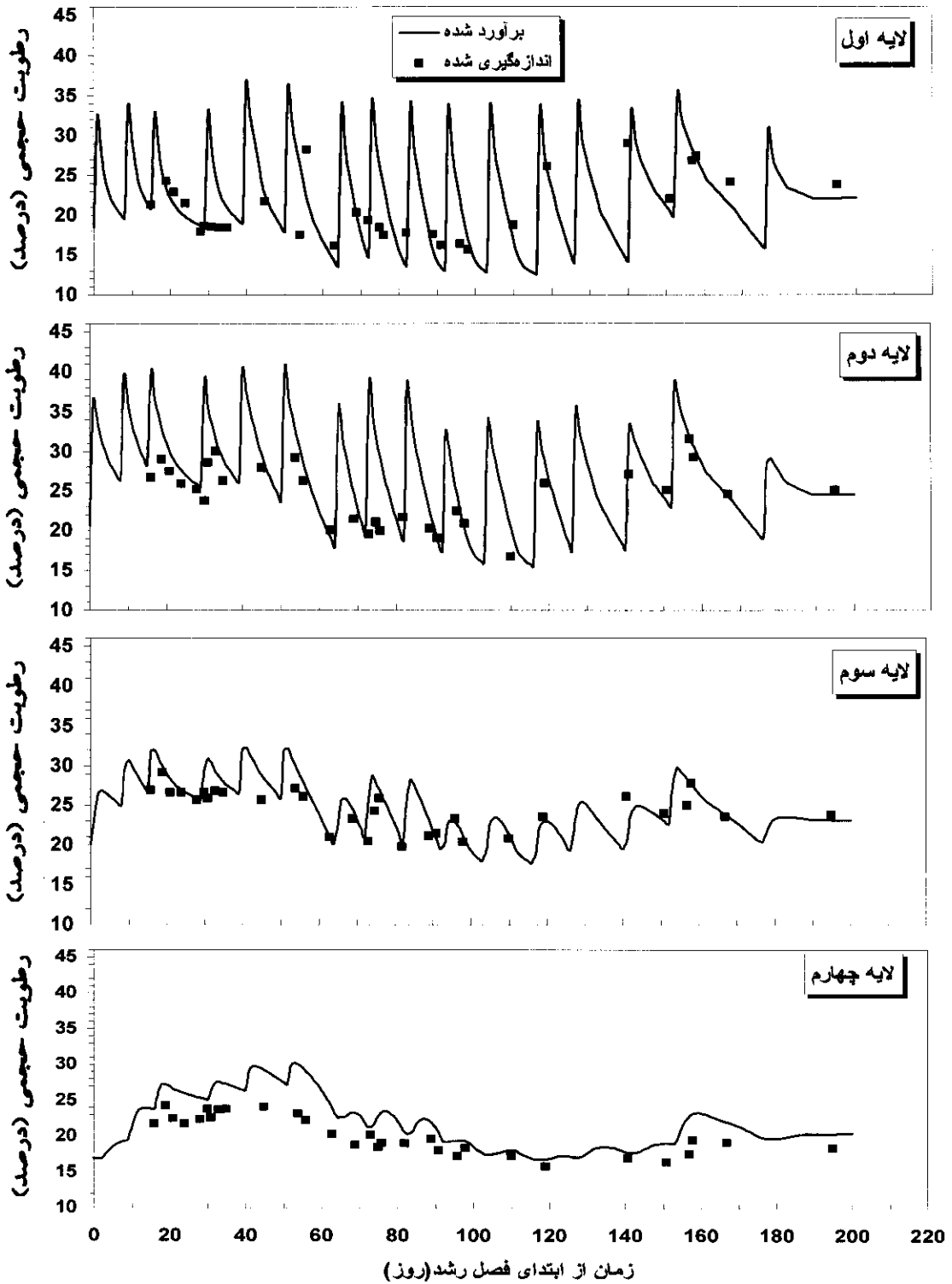
### نتیجه گیری

رطوبت پروفیل خاک در ناحیه ریشه با استفاده از مدل LEACHM و داده های مزرعه ای جمع آوری شده در سال ۱۳۷۹ در مزرعه تحقیقاتی ایستگاه طرق مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. به طور کلی نتایج زیر حاصل گردید.

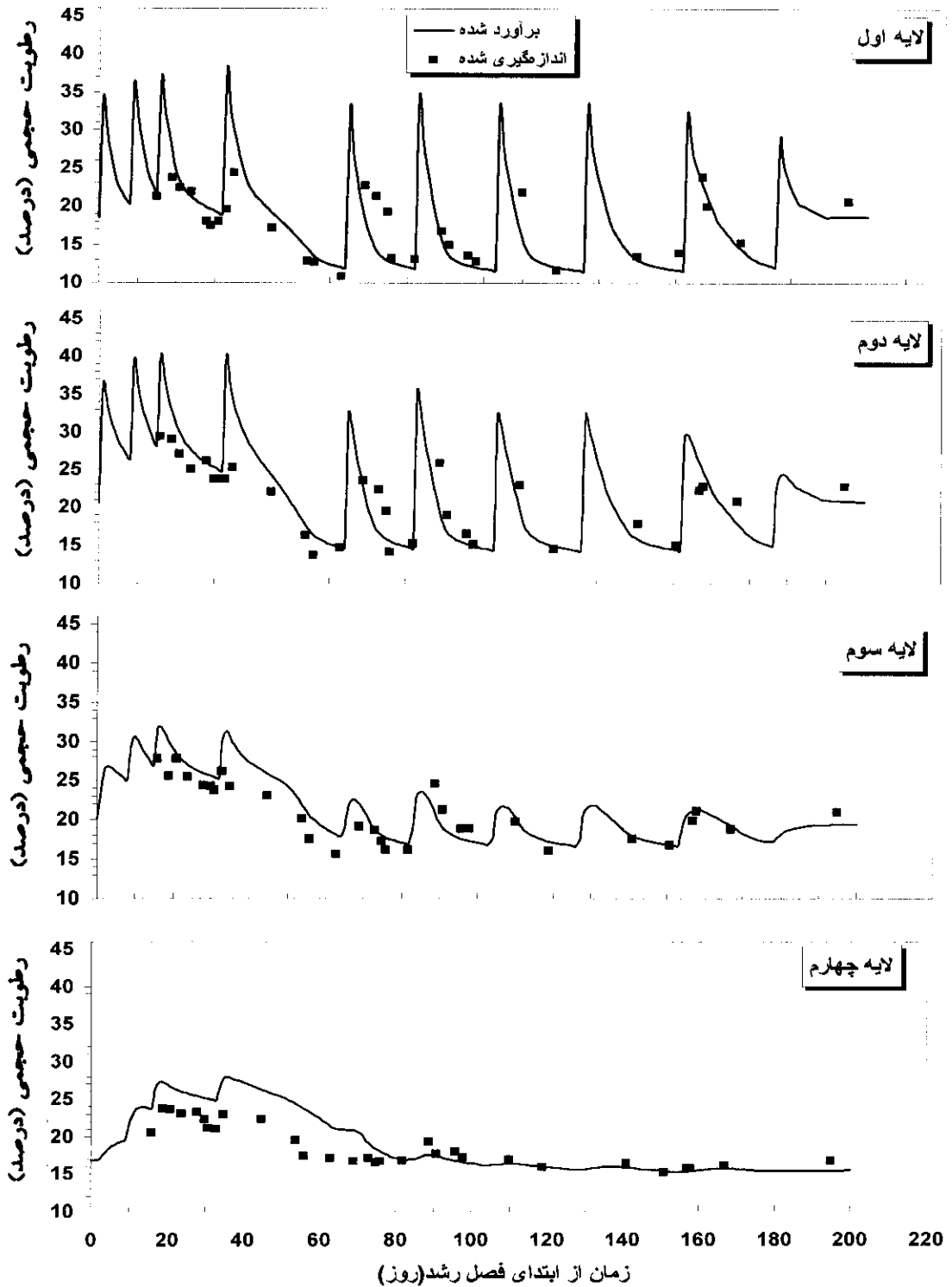
۱- آنالیز حساسیت نشان داد که مدل نسبت به وزن مخصوص ظاهری که بیان کننده تراکم و میزان گنجایش نگهداری آب در خاک می باشد فوق العاده حساس است. با افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک، مقدار رطوبت در آن به شدت کاهش می یابد که این به علت کاهش مقدار تخلخل مؤثر می باشد. مدل نسبت به ضریب  $b$  در معادله کمپل و درصد پوشش گیاهی حساس ولی نسبت به بقیه ضرایب و داده های ورودی غیر حساس می باشد.

۲- مقادیر رطوبت خاک شبیه سازی شده در عمق توسعه ریشه با مقادیر اندازه گیری شده در مزرعه تطابق خوبی دارند به طوری که مقدار خطای مطلق بین  $1/87$  تا  $5/58$  تغییر می کند. دقت مدل با نتایج سایر محققین مطابقت خوبی دارد.

۳- در کل، مدل برای حالت بدون تنش آبی نتایج بهتری می دهد، هر چند در بقیه حالتها نیز نتایج خوب است.

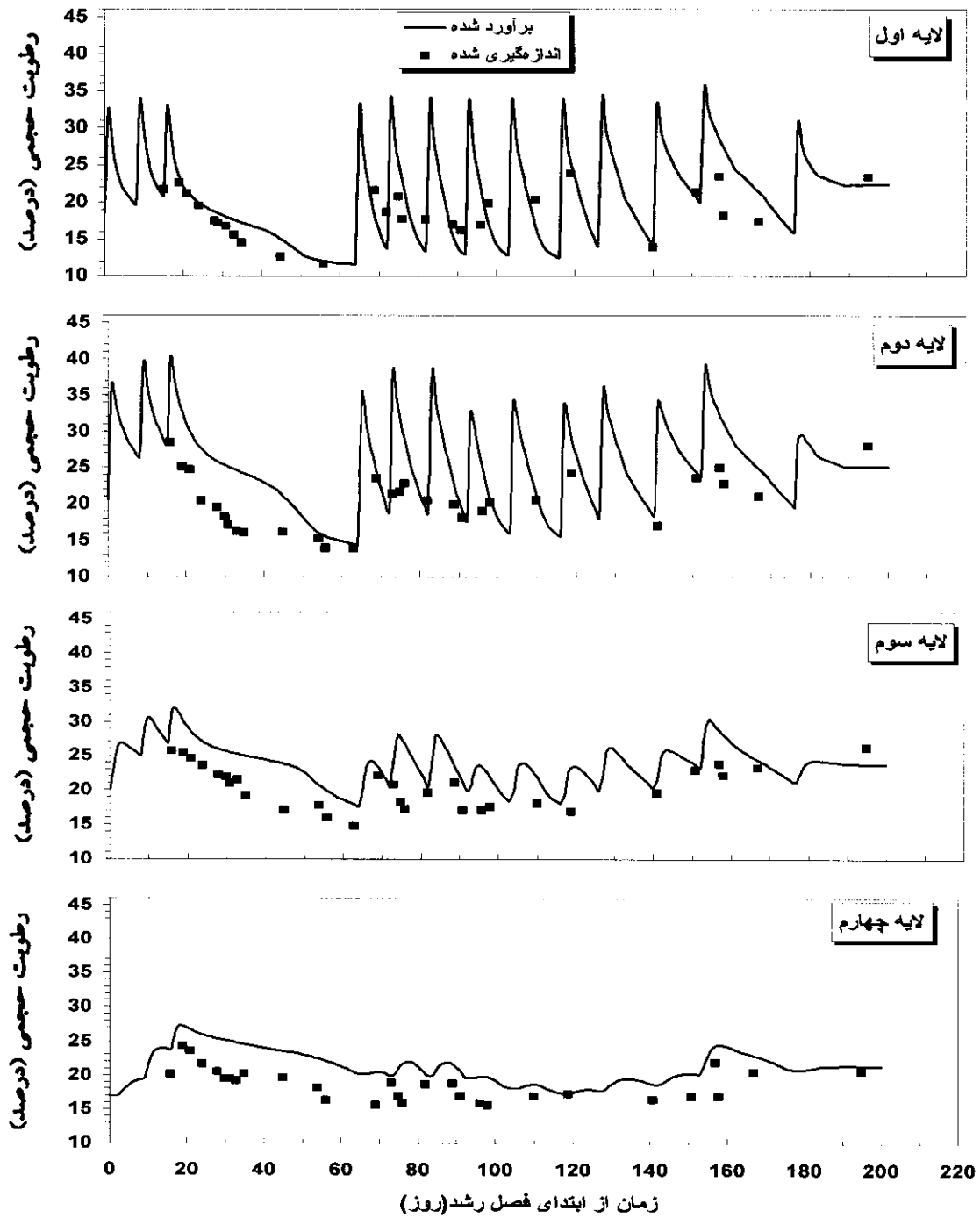


شکل ۲- مقایسه مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه گیری شده در تیمار بدون تنش آبی



شکل ۳- مقایسه مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه گیری شده در تیمار تنش آبی مداوم





شکل ۴- مقایسه مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه گیری شده در تیمار یک بار تنش آبی

## منابع و مأخذ

- ۱- خیرابی، جمشید، علی‌رضا توکلی، محمدرضا انتصاری و علی‌رضا سلامت. ۱۳۷۵. دستورالعمل‌های کم آبیاری. کمیته ملی آبیاری و زهکشی، سازمان چاپ رشدیده.
- 2- Campbell, G. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil. Sci.* 117: 311-314.
- 3- Clemente, R. S., R. De Jong, H. N. Hayhoe., W. D. Reynolds., and M. Hares. 1994. Testing and comparison of three unsaturated soil water flow models. *Agricultural Water Management.* 25: 135-152.
- 4- Hutson, J. L., and Cass. A. 1987. A retentivity function for use in soil- water simulation models. *J. Soil. Sci.* 38: 105-113.
- 5- Hutson, J.L., and R.J. Wagent. 1992. LEACHM. Leaching Estimation and Chemistry Model: A process based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in unsaturated zone. Version 3. Dept. of Agronomy, Cornell University, Ithaca, NY.
- 6- Lane, J. W., and V. A. Ferrira. 1990. Sensitivity analysis. In *CREAMS, A Field Scale Model for Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management System*, ed. W. G. Knisel, 113-158. Vol. A. Model Documentation. USDA Conservation Res. Report Np. 26. Washington, D. C.: GPO.
- 7- Loague, K., and Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Validation of Flow and Transport models for the unsaturated Zone.* Wierenga, P. j., Guest Editoe, J. Contam. Hydrol., 7, 51-73.
- 8- Mahdian, M. H., and J. Gallichand. 1995. Validation of SUBSTOR Model for Simulation soil water content. *Trans. ASAE.* 38(2): 513-520.
- 9- Mahdian, M. h., and J. Gallichand. 1996. Modeling soil water content and pressure head with SWACROP in potato fields. *Canadian Agricultural Engineering.* 38(1): 1-11.
- 10- Molz, I. J., and Remson, I. 1970. Extractoin term models of soil moisture use by transpring plant. *Water Resour. Res.* 6. 1346-1356.
- 11- Neuman, S. P., Feddes. R. A., and Bresler, E. 1974. Finite element simulation. of flow in saturated- unsaturated soils considering water uptake by plants. Israel. Inst. of Tech., Hydrodyn. & Hydraul. Engrg. Lab., Haifa, Israel.
- 12- Parehkar, M. 1998. Recharge processes under Arid semi-Arid Areas. (Laboratory experiment and modeling).Phd Thesis, Cranfield Uni. Silsoe Collage.

- 13- Ramos, C., and E. A. Carbonell. 1991. Nitrate leaching and soil moisture prediction with the LEACHM- Model. *Fertilizer Research*. 27: 180-199.
- 14- Selim, H. M., and Iskandar, I. K. 1981. Modeling nitrogen transport and transformations in soils. I. Theoretical considerations and II. Validation. *Soil Science*. 131: 233-241.
- 15- Smith, W. N., W. D. Reynolds, R. S. Clemente., and E. Topp. 1995. Water flow through Intact soil columns: Measurement and Simulation Using LEACHM. *J. Environ. Qual.* 24: 874-881.
- 16- Van Genuchten, M. T. 1982. A comparison of numerical solutions of the one dimensional unsaturated- saturated flow and mass transport equations. *Adv. in Water Resour.* 5: 47-55.
- 17- Vassils, Z. A. 1997. Simulation of soil moisture dynamics on irrigated cotton in semi-arid climates. *Agricultural Water Management*.34: 233-246.
- 18- Vassils, Z. A., and C. L. Guido. 1998. Modeling of water and nitrogen dynamics on an undisturbed soil and a restored soil after open – cast mining. *Agricultural Water Management*. 37: 21-40.