

برآورد الگوی توزیع رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای در مزرعه پیاز

حمید زارع ایبانه^{1*} - الهام فرخی² - مجید وظیفه‌دوست³ - خلیل اژدری⁴

تاریخ دریافت: 89/1/27

تاریخ پذیرش: 89/6/6

چکیده

بررسی وضعیت رطوبت در خاک‌های تحت کشت گیاهان زراعی، جهت نیل به عملکرد بالا و کاهش آب مصرفی، ضروری می‌باشد. آگاهی از نحوه توزیع رطوبت در ناحیه ریشه مستلزم صرف وقت و انجام آزمایش‌های صحرایی پرهزینه است که مدل‌های شبیه‌ساز جایگزین مناسبی در پاسخ‌گویی به مسائل مربوط به حرکت و توزیع آب هستند. در این پژوهش، بررسی وضعیت رطوبت خاک به کمک مدل شبیه‌ساز آگروهیدرولوژیکی SWAP صورت گرفت و توانمندی مدل فوق در مقایسه با نتایج میدانی ارزیابی شد. مدل SWAP براساس اطلاعات آبیاری در یک مزرعه پیاز مجهز به سامانه آبیاری قطره‌ای در منطقه بسطام شاهرود و پارامترهای هیدرولیکی خاک به دست آمده از مدل RETC اجرا گردید. اطلاعات رطوبتی با برداشت نمونه‌های خاک از محل قطره‌چکان و 10 سانتی‌متری آن، از لایه‌های 0-15، 15-30، 30-45 و 45-60 به تعداد 9 کرت مورد آزمایش حاصل شد. مقایسه متناظر رطوبت شبیه‌سازی با رطوبت مشاهداتی تا عمق 60 سانتی‌متری در محل قطره‌چکان و 10 سانتی‌متری آن در قالب ترسیم نموداری و محاسبه معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) انجام شد. مقادیر RMSE، NRMSE و MAE در محل قطره‌چکان 0/001، 0/03، 0/07، 0/07، 0/07، 0/08، 0/02، 0/08، 0/07 سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب به دست آمد. کم بودن آماره‌های خطاسنجی محاسبه شده در کاربرد مدل SWAP نشان‌دهنده دقت مناسب این مدل در شبیه‌سازی رطوبت توزیعی در منطقه ریشه است. انجام عملیات آبیاری از طریق یک سیستم آبیاری قطره‌ای با دور آبیاری 48 ساعت انجام شد که عملکردی معادل 14780 kg/ha در مقابل 14134 kg/ha عملکرد برآورد شده توسط مدل را در پی داشت. در مجموع نتایج حاصل حاکی از آن بود که مدل SWAP قادر است پاسخ‌های معتبری را با صحت و دقت کافی در زمان نسبتاً کوتاهی ارائه نماید. این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد و سودمند برای ارزیابی و بهینه‌سازی رطوبت توزیع شده در ناحیه ریشه گیاهان زراعی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی رطوبت، مدل SWAP، آبیاری قطره‌ای، مزرعه پیاز

مقدمه

است. آکسوی و کاواس (16) مدل‌های موجود را در دو گروه مدل‌های تجمیعی⁵ و توزیعی⁶ تقسیم‌بندی نموده و اعتقاد دارند که مدل‌های تجمیعی تغییرات مکانی عوامل ورودی به مدل را در نظر نمی‌گیرند. در حالی که مدل‌های توزیعی، توزیع مکانی عوامل موثر در شکل‌گیری یک رخداد را در نظر می‌گیرند. مدل SWAP⁷ (خاک، آب، اتمسفر، گیاه) از گروه مدل‌های توزیعی و به‌عنوان یک مدل فراگیر قادر است تا در شرایط اشباع و غیراشباع، حرکت زمانی و مکانی آب و املاح را با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز شبیه‌سازی نماید (4 و 6). این مدل نسخه اصلاح شده‌ای از مدل‌های SWATR، SWAPTR و SWACROP و از خانواده مدل‌

برای آگاهی از نحوه توزیع رطوبت در ناحیه ریشه، آزمایش‌های صحرایی وقت‌گیر و پرهزینه‌ای لازم است که دامنه اعتبارشان از نظر شرایط فیزیکی و منطقه‌ای دارای محدودیت‌هایی است. در حالی که مدل‌های عددی با شبیه‌سازی شرایط واقعی حرکت آب در محیط متخلخل، قادر به ارزیابی وضعیت رطوبت خاک در یک سیستم آبیاری هستند (11). در سال‌های اخیر مدل‌های شبیه‌ساز معتبری برای پاسخ‌گویی به مسائل مربوط به حرکت آب و املاح در خاک ارائه شده

1 و 2- استادیار و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بو علی سینا همدان

(*- نویسنده مسئول: Email:zareabyaneh@gmail.com)

3- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان

4- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود

5- Lumped model

6- Distributed model

7- Soil, Water, Atmosphere, Plant

خوبی وجود دارد، اما برای درختان به دلیل حساسیت بالای مدل به پارمترهای گیاهی، مطالعات کامل تری لازم است. سینگ و همکاران (29) در کشور هندوستان مقدار بهره‌وری آب برای دانه گندم، برنج و پنبه را با مدل SWAP معادل 1/04، 0/84 و 0/21 کیلوگرم در هکتار محاسبه نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که تطابق خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی بهره‌وری آب و مقادیر اندازه‌گیری وجود دارد. حتی برخی مقایسات انجام شده از نتایج این مدل با دیگر مدل‌های مشابه هم، حاکی از دقت مدل SWAP دارد، به طوری که ایتزینگر و همکاران (22) از اتریش، شبیه‌سازی وضعیت رطوبت خاک حاصل از مدل SWAP را در مقایسه با دو مدل CERES و WOFOST و نزدیک‌تر به واقعیت گزارش نمودند. همچنین قابلیت ترکیب تکنیک سنجش از دور¹ (RS) و الگوریتم ژنتیک² (GA) با نتایج مدل SWAP و لحاظ اثرات رخدادهای اقلیمی بر عملکرد محصولات زراعی به منظور ارزیابی اثرات خشکسالی‌های کشاورزی از سوی محققین مختلف بیان شده است (23 و 34).

بررسی نتایج به‌دست آمده از تحقیقات و ارزیابی‌های مدل SWAP نشان می‌دهد که کاربرد مدل فوق به‌صورت منطقه‌ای بوده و برای هر گیاه بعد از واسنجی، جهت پیش‌بینی توزیع رطوبت خاک به کار می‌رود. بنابراین در این مطالعه گیاه پياز به عنوان محصولی دو ساله، پرمصرف از نظر آب و دارای تنوع مکانی کشت در مناطق مختلف کشور مدنظر قرار گرفت تا با شبیه‌سازی توزیع رطوبت آن به صورت بهینه، از هدر رفت آب و هزینه‌های مرتبط با آن جلوگیری گردد (13). لذا پژوهش حاضر، با هدف مطالعه و مدل‌سازی جریان آب و بررسی بیلان آن در یک خاک تحت کشت پياز با مدل SWAP به روش آبیاری قطره‌ای در منطقه شاهرود از استان سمنان انجام گرفت.

مدل شبیه‌ساز SWAP

مدل شبیه‌ساز SWAP برای شبیه‌سازی حرکت آب در پروفیل خاک‌های اشباع و غیراشباع، براساس معادله ریچاردز بنا نهاده شده است (6).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(z) \quad (1)$$

که در آن: θ رطوبت خاک [$L^3 L^{-3}$], t زمان [T], h بار فشاری آب در خاک [L], $K(h)$ تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع [$L T^{-1}$], S تابع جذب آب توسط ریشه [$L^3 L^{-3} S^{-1}$] و z عمق خاک [L] که معادل عمق ریشه است. این معادله در حالت غیراشباع دارای سه متغیر پتانسیل ماتریک،

های آگروهیدرولوژیک می‌باشد (12 و 14). پژوهشگران متعددی مدل SWAP را در حالات مختلف مدیریت آب و خاک به کار گرفته و نتایج آن را مورد بررسی قرار داده‌اند. اساس ارزیابی‌های انجام شده اعمال اطلاعات آب، خاک، گیاه و هواشناسی به عنوان ورودی مدل است که نتایج خروجی آن با اطلاعات میدانی مقایسه و ارزیابی شده است. منگو و همکاران (25) از جمله محققینی هستند که عملکرد مناسب مدل SWAP در شبیه‌سازی حرکت آب و نمک در زهکش‌های تنبوشه‌ای در زمین مورد آبیاری با آب شور، به هدف مدیریت بیلان آب و اصلاح را گزارش نمودند. نتایج تحقیقات منصور و همکاران (12) نیز موید توانمندی مدل SWAP در مدل‌سازی مدیریت آب شور برای نواحی خشک مانند رودست اصفهان بود. دروگرز و همکاران (21) در یک منطقه تحت آبیاری در بخش غربی ترکیه، جریان آب در خاک را با مدل SWAP برای 14 تیمار شبیه‌سازی نمودند. یافته‌های آنان نشان داد که مدل SWAP کارایی بالایی برای تجزیه و تحلیل همه اجزاء معادله بیلان آب در سطح شبکه‌های آبیاری و مزارع دارد. در تحقیقی دیگر توانمندی مدل SWAP در شبیه‌سازی رطوبت و شوری خاک و عملکرد نسبی گندم با وجود متغیرهای متعدد میدانی توسط کبانی و همکاران (9) گزارش گردید. سینگ (28) برای مدل‌سازی عملکرد محصولات زراعی گندم و پنبه، تحت رژیم‌های مختلف آب شور در منطقه نیمه‌خشک شمال غربی هند، از این مدل استفاده نمود. در این راستا تحقیقات قهرمان و همکاران (7) نشان داد بکارگیری معادلات پنمن - مانتیث و پنمن (1948) در برآورد تبخیر تفرق نسبت به دیگر روش‌های تجربی نظیر هارگریوز سامانی و بلانی کریدل برای شبیه‌سازی عملکرد گندم و جو با مدل عددی SWACROP (نسخه 93 SWAP) در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری در منطقه کرج دقت مدل را افزایش می‌دهد. به همین ترتیب ون واسلن و همکاران (33) نیاز آبی درخت موز در شرایط اقلیمی بلژیک را براساس پیش‌فرض مدل SWAP از روش پنمن - مانتیث برآورد و با نتایج روش بیلان آبی مورد مقایسه قرار دادند که نتایج موید برآوردهای خوب مدل بود.

مطالعات انجام شده توسط مارینو و همکاران (24) برای شبیه‌سازی جریان آب در خاک با مدل SWAP حاکی از پیش‌بینی خوب مدل در مقایسه با مقادیر میدانی بود. نتایج گزارش شده توسط براندیل و همکاران (18) از کشور لهستان نیز بیان‌گر پیش‌بینی مطلوب وضعیت رطوبت در خاک‌های زراعی لخت کم عمق و محتوی کود گیاهی با مدل SWAP است. در تحقیق دیگر اگنس و همکاران (15) با ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی توازن آب خاک در گیاهان مدیترانه‌ای نشان دادند بین مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در عمق‌های متفاوت ریشه گیاهان علفی، تطابق

1- Remote sensing

2- Genetic Algorithm

(شاهرود) واقع در عرض جغرافیایی $36^{\circ}27'$ شمالی، طول جغرافیایی $54^{\circ}58'$ شرقی و ارتفاع 1345 متری از سطح دریا در سال 1385 به اجرا درآمد. متوسط بلند مدت بارندگی سالانه منطقه 56/5 میلی-متر و میانگین حداکثر و حداقل دمای هوا به ترتیب 39/6 و 5/8- درجه سانتی‌گراد است (3). برای انجام این مطالعه، نمونه‌هایی از خاک مزرعه در چهار لایه 0-15، 15-30، 30-45 و 45-60 سانتی‌متری در میانه هر کرت با فرض یکنواختی مشخصات خاک برداشت و به آزمایشگاه منتقل گردید. به منظور تعیین برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌ها هوا خشک شده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. در این مطالعه بافت خاک از روش هیدرومتری، وزن مخصوص ظاهری از روش سیلندره‌های فلزی و هدایت هیدرولیکی خاک با روش آزمایشگاهی بار ثابت³ به دست آمد. رطوبت خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم توسط دستگاه صفحات فشاری (5 بار و 15 بار) اندازه‌گیری گردید. صفحه 5 بار برای مقادیر مکش 0/1 تا 5 بار و صفحه 15 بار برای مکش‌های بیش از 5 بار به کار گرفته شد. نتایج برخی خصوصیات فیزیکی خاک محل مورد مطالعه در جدول (1) آمده است. لازم به ذکر است که ویژگی‌های گزارش شده براساس میانگینی از 9 نمونه خاک اخذ شده از 9 کرت می‌باشد.

ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل هدایت الکتریکی عصاره اشباع (EC_e) و اسیدیته (pH) به ترتیب با دستگاه پرتابل هدایت‌سنج و پ-هاش متر تعیین گردید. عوامل نیتروژن، نیترات، نیتريت با استفاده از دستگاه کج‌لدال⁴ و کربن آلی به روش اکسیداسیون مرطوب اندازه‌گیری شدند.

براساس جدول (1) بافت خاک لومی‌شنی است که تا عمق 60 سانتی‌متری سطح خاک ادامه دارد. این جدول نشان می‌دهد که با افزایش عمق، درصد رس افزایش و درصد شن و سیلت کاهش می‌یابد. با سنگین‌تر شدن بافت در 60 سانتی‌متری به بعد نفوذ آب دارای سرعت کمتری خواهد شد. همچنین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه اول تا حدودی بیشتر از لایه دوم است که با توجه به کمتر بودن مقدار رس در لایه سطحی خاک نسبت به عمق، منطقی به نظر می‌رسد.

جدول (2) نتایج فوق را به تفکیک هر چهار لایه از سطح خاک تا عمق 60 سانتی‌متری نشان می‌دهد. برای کیفیت آب آبیاری نیز پارامترهای اسیدیته و هدایت الکتریکی اصلاح و همچنین مقادیر آنیون‌ها و کاتیون‌ها به تفکیک هر یک از عناصر تعیین شد. این ویژگی‌ها در جدول (3) آورده شده است.

جداول (2) و (3) نتایج آزمایش‌های شیمیایی خاک و کیفی آب آبیاری را نشان می‌دهند. براساس جدول (2) pH خاک در محدوده خنثی و از نظر هدایت الکتریکی عصاره اشباعی (EC_e)، خاک مزرعه

رطوبت و هدایت هیدرولیکی است. لذا به تنهایی قابل حل نبوده و باید از دو معادله دیگر یعنی معادله منحنی رطوبتی و معادله هدایت هیدرولیکی غیراشباع کمک گرفت. در مدل SWAP مدل رطوبتی ون‌گونختن (31) به همراه مدل هدایت هیدرولیکی معلم (26) به کار گرفته می‌شود:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (a\psi)^n\right]^m} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

$$k(s_e) = k_s s_e^L \left[1 - \left(\frac{1}{s_e^m}\right)^m\right]^2$$

(3)

در معادله 2، m و n ضرایب مشخص‌کننده شکل منحنی رطوبتی [-] و L^{-1} ، ψ پتانسیل ماتریک آب خاک [L]، θ_s رطوبت اشباع $[L^3L^{-3}]$ ، θ_r رطوبت باقی‌مانده که معمولاً در مکش 15 بار اندازه‌گیری می‌شود $[L^3L^{-3}]$ ، و θ رطوبت حجمی نمونه در پتانسیل ماتریک $[L^3L^{-3}]$ است.

در معادله 3 نیز $K(s_e)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع $[LT^{-1}]$ ، k_s هدایت هیدرولیکی اشباع $[LT^{-1}]$ ، s_e درجه اشباع مؤثر یا نقصان رطوبت حجمی [-] و L ثابتی موسوم به ضریب اعوجاج [-] است.

برای دستیابی به ضرایب مدل 2 از نرم‌افزار RETC¹ استفاده شد. برنامه RETC به منظور تحلیل منحنی رطوبتی و توابع هدایت هیدرولیکی به عنوان توابع کلیدی در توصیف کمی جریان غیراشباع آب ارائه شده است (32). برای این منظور داده‌های توزیع اندازه ذرات و جرم مخصوص ظاهری خاک به همراه مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در مکش‌های مختلف به نرم‌افزار RETC وارد و پارامترهای معادله پارامترهای معادله ون‌گونختن تعیین شد.

در این پژوهش شرایط مرزی فوقانی توسط جریان تبخیر تعرق پتانسیل $(mm.d^{-1})$ ، آبیاری $(mm.d^{-1})$ و بارندگی $(mm.d^{-1})$ تعیین می‌شود که در مرز بالایی ناحیه غیراشباع در زمان پس از آبیاری ($T > 0$) مرز با پتانسیل ثابت است. به عبارت دیگر در عمق $z=0$ مکش بلافاصله پس از برقراری جریان به صفر کاهش یافته و یا رطوبت در عمق صفر معادل رطوبت اشباع خاک (θ_s) است (32). در مرز تحتانی نیز شرایط مرزی از نوع زهکشی آزاد² لحاظ گردید. شرایط اولیه در لحظه $T=0$ شامل مقدار رطوبت خاک قبل از عملیات آبیاری (θ_0) بود.

مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی مدل SWAP، آزمایشی در زمینی به مساحت 132 مترمربع (12 متر \times 11 متر) در مزرعه تحقیقاتی بسطام

3- Constant head method
4- Keijeldal

1- Retention curve
2- Free drainage

فاقد محدودیت شوری برای کشت محصولات زراعی است (10). کاتیون‌ها نیز فاقد محدودیت خاصی می‌باشد. نتایج جدول (3) نیز گویای وضعیت مناسب کیفی آب آبیاری می‌باشد، زیرا طبق دیاگرام ویلکوکس، آب در کلاس C₁S₁ و از نظر آنیون‌ها و

جدول 1- مشخصات فیزیکی خاک محل اجرای طرح

| هدایت هیدرولیکی اشباع (cmd ⁻¹) | درصد رطوبت حجمی | | چگالی ظاهری (gcm ⁻³) | بافت خاک | درصد ذرات | | | لایه (cm) |
|---|-----------------|-------|-------------------------------------|----------|-----------|------|----|--------------|
| | PWP | FC | | | رس | سیلت | شن | |
| 26/40 | 5/90 | 18/81 | 1/54 | لوم شنی | 10 | 16 | 74 | 0-15 |
| 24/24 | 7/38 | 23/82 | 1/57 | لوم شنی | 11 | 18 | 71 | 15-30 |
| 19/20 | 9/35 | 24/68 | 1/53 | لوم شنی | 17 | 15 | 68 | 30-45 |
| 28/56 | 9/87 | 23/99 | 1/56 | لوم شنی | 19 | 14 | 67 | 45-60 |

جدول 2- مشخصات شیمیایی خاک محل اجرای طرح

| N | P | K | NH ₄ -N | NO ₃ -N | کربن آلی | EC _e | pH | لایه |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|-----------------------|-----|-------|
| (kg ha ⁻¹) | (kg ha ⁻¹) | (kg ha ⁻¹) | (kg ha ⁻¹) | (kg ha ⁻¹) | (%) | (dS m ⁻¹) | (-) | (cm) |
| 65/3 | 21 | 95 | 32/50 | 28/30 | 0/46 | 1/39 | 7/8 | 0-15 |
| 61/5 | 19 | 74 | 26/17 | 34/26 | 0/59 | 1/20 | 7/1 | 15-30 |
| 54/8 | 11 | 63 | 21/39 | 25/34 | 0/60 | 0/64 | 7/3 | 30-45 |
| 52/7 | 7 | 45 | 19/87 | 27/80 | 0/63 | 0/55 | 7/5 | 45-60 |

جدول 3- وضعیت کیفی آب آبیاری

| pH | EC | Ca ²⁺ | Na ⁺ | Mg ²⁺ | HCO ₃ ⁻ | CO ₃ ²⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | منبع |
|----|--------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|------|
| | dS m ⁻¹ | | | | Mg lit ⁻¹ | | | | |
| 8 | 0/212 | 9 | 7/4 | 1/1 | 101 | 6 | 168 | 5/7 | چاه |

با لحاظ راندمان 85 درصد برای سیستم قطره‌ای محاسبه گردید. به دلیل تبخیر زیاد منطقه در فصل بهار و تابستان و نیز جلوگیری از نفوذ عمقی زیاد، دور آبیاری 48 ساعت در نظر گرفته شد. زیرا با افزایش دور آبیاری، میزان آب آبیاری افزایش یافته و به دنبال آن شرایط برای تبخیر بیشتر و نفوذ عمقی بالاتر، فراهم می‌گردد. تمامی آب مورد نیاز در طی فصل رشد از منبع آب زیرزمینی توسط یک حلقه چاه تأمین گردید.

پس از کاشت پیاز در ابتدای اردیبهشت، نمونه‌هایی از خاک مزرعه در مقیاس زمانی ماهانه از لایه‌های 0-15، 15-30، 30-45 و 45-60 سانتی‌متر برداشت شد. نمونه‌گیری براساس میانگینی از 9 نمونه خاک اخذ شده از 9 کرت برای هر ماه و در نقاط مختلف مزرعه در امتداد طولی خط میانه مزرعه بود. از اطلاعات فوق به عنوان داده‌های مشاهداتی رطوبت خاک در صحت‌یابی نتایج مدل استفاده گردید. نمونه‌گیری توسط سیلندرها فلزی با قطر داخلی 8 سانتی‌متر و ارتفاع 4 سانتی‌متر انجام و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شد. اطلاعات مربوط به رطوبت هر نمونه خاک به روش توزینی از ترازوی IND ایران با دقت 0/01 گرم تعیین شد. لازم به توضیح است که عمق توسعه ریشه گیاه پیاز حداکثر 30 سانتی‌متر است، اما نمونه‌برداری‌ها تا عمق 60 سانتی‌متری صورت گرفت تا توزیع رطوبت در لایه‌های زیر ناحیه ریشه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

داده‌های ورودی مدل SWAP

در اول فروردین ماه 1385 بذر پیاز رقم آذرشهر به صورت نشا در خزانه کشت شد. نشاها پس از آماده‌سازی اولیه زمین، در اول اردیبهشت ماه در زمین اصلی استقرار یافتند. عملیات کاشت به صورت دستی با اختصاص دو خط کشت در دو طرف هر ردیف صورت گرفت. تراکم کشت با توجه به فاصله ردیف‌های کاشت 30 سانتی‌متر، فاصله بوته روی هر ردیف 15 سانتی‌متر، بالغ بر 200 هزار بوته در هکتار بود.

در محل طرح، 9 کرت به ابعاد 3×3 متر با سطح خالص 81 مترمربع ایجاد شد. برای سهولت در تردد و جلوگیری از اثرات حاشیه‌ای، فاصله هر کرت 50 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در هر کرت 5 خط لاترال با 7 قطره‌چکان و آبدهی 4 لیتر در ساعت به فاصله 50 سانتی‌متر برقرار شد. قطر لوله‌های لاترال یک سانتی‌متر و تنظیم فواصل قطره‌چکان‌ها مطابق تعداد بوته‌های هر ردیف بود. در هر کرت 35 قطره‌چکان، از نوع درخت¹، با دبی 140 لیتر در ساعت وجود داشت. در ابتدای هر کرت یک کنتور حجمی جهت اندازه‌گیری مقدار آب توزیعی نصب شد. همچنین هر خط لاترال به شیرهای کنترل دبی نیز مجهز بود. با اخذ داده‌های هواشناسی مورد نیاز از اداره کل هواشناسی شهرستان شاهرود، نیاز آبی گیاه پیاز براساس مقادیر تبخیر تعرق روزانه گیاه مرجع (ET₀) و ضریب گیاهی (K_c)، از مدل ترکیبی پنمن ماتیتث فائو 56 حاصل شد. در نهایت عمق آب آبیاری

1- Inline

مورد نیاز برای اجرای مدل SWAP در جدول (4) به صورت دسته‌بندی شده آمده است.

برای اجرای مدل بایستی آمار و اطلاعات مناسبی از پارامترهای هواشناسی، خاک، گیاه و آبیاری در سطح کرت آزمایشی به محیط مدل وارد تا شبیه‌سازی تغییرات رطوبت انجام گردد. کلیه اطلاعات

جدول 4- اطلاعات مورد نیاز برای مدل SWAP

| اطلاعات | متغیرهای ورودی | نحوه تامین اطلاعات | متغیرهای ورودی | نحوه تامین |
|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|------------|
| تابش روزانه خورشیدی | ه ۱۱ | تاریخ آبیاری | م ۱ | |
| حداقل و حداکثر دمای روزانه | ه ۱۱ | عمق آب آبیاری | م ۱ | |
| میانگین فشار بخار | ه ۱۱ | میزان شوری آب آبیاری | م ۱ | |
| ساعات آفتابی | ه ۱۱ | روش آبیاری | قطره‌ای | |
| میانگین سرعت باد | ه ۱۱ | ارتفاع گیاه و عمق ریشه | م ۱ | |
| بارندگی روزانه | ه ۱۱ | ضریب گیاه (K_c) | بم | |
| بافت خاک | م ۱ | شاخص سطح برگ | بم | |
| محدودیت‌های نفوذ ریشه | م ۱ | فاکتور جذب | بم | |
| شرایط اولیه | م ۱ | تبخیر تعرق گیاه مرجع PMF56 | م ۱ | |
| شرایط مرزی | م ۱ | آستانه تحمل به شوری | بم | |
| اطلاعات منحنی رطوبتی خاک | آ ۱ | راندمان مصرف نور | بم | |
| مقدار رطوبت خاک | م ۱ | سطح ویژه برگ | بم | |
| هدایت هیدرولیکی | م ۱ | دمای تجمعی کاشت تا گلدهی | ه ۱۱ | |
| پارامترهای هیدرولیکی | RET C | دمای تجمعی گلدهی تا رسیدگی | ه ۱۱ | |

ه ۱۱ = اطلاعات ایستگاه هواشناسی، م = اندازه‌گیری مزرعه‌ای، بم = بررسی منابع، ب = برنامه آبیاری، آ = اطلاعات آزمایشگاهی

$$D_{r,i-1} = 1000(\theta_{FC} - \theta_{i-1}) \times DRZ \quad (5)$$

در معادله فوق θ_{i-1} رطوبت اولیه خاک ناحیه ریشه (%)، θ_{FC} رطوبت ظرفیت زراعی ناحیه ریشه (%). و DRZ عمق ریشه (mm) می‌باشد.

مقدار $D_{r,i}$ یا تخلیه رطوبتی در انتهای روز، از صفر تا TAW (کل آب قابل دسترس در ناحیه ریشه خاک) تغییر می‌کند. اگر $D_{r,i}$ برابر صفر باشد، تخلیه‌ای از حد ظرفیت زراعی وجود ندارد و آب خاک در ابتدای روز بعد در حد ظرفیت زراعی است. مقدار نفوذ عمقی در انتهای روز i از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$DP_i = (P - RO_i) + I_i - ET_{a,i} - D_{r,i-1} \quad (6)$$

واضح است در زمانی که رطوبت ناحیه ریشه از حد ظرفیت زراعی کمتر باشد، نفوذ عمقی برابر صفر است و در غیر این صورت مقدار آن از معادله 8 محاسبه می‌شود (4).

مقدار تبخیر تعرق گیاه پیاز¹ (ET_c) با اعمال اطلاعات هواشناسی مورد نیاز مانند درجه حرارت، بارندگی، تابش خورشیدی و همچنین ضریب گیاهی² (K_c) به روش پنمن مانیتیت در مقیاس زمانی روزانه در نرم‌افزار SWAP محاسبه گردید.

در مجموع برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت، مدل مستلزم

مدل SWAP، برای نمایش وضعیت رطوبتی خاک، هر یک از مولفه‌های معادله بیلان رطوبت را در قالب معادله 4 محاسبه می‌نماید.

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (4)$$

که در آن $D_{r,i}$ مقدار آب تخلیه شده از ناحیه ریشه در انتهای روز i (mm)، $D_{r,i-1}$ مقدار آب تخلیه شده از ناحیه ریشه در انتهای روز $i-1$ (mm)، P_i مقدار بارندگی روز i (mm)، RO_i مقدار رواناب سطحی در روز i (mm)، I_i مقدار آب آبیاری در روز i (mm)، CR_i مقدار صعود موئینه از سطح ایستابی در روز i (mm)، $ET_{c,i}$ مقدار تبخیر و تعرق گیاهی در روز i (mm) و DP_i نفوذ عمقی از ناحیه ریشه در روز i (mm) است.

پارامترهای سمت راست معادله 4 با توجه به اندازه‌گیری‌های ابتدای دوره به مدل اعمال می‌گردد تا محاسبات لازم برای روزهای بعدی صورت گیرد. همچنین مقادیر P و I به صورت روزانه از اطلاعات هواشناسی و آبیاری حاصل شد. عمیق بودن سفره آب زیرزمینی و تاثیر نامحسوس آن مانع از صعود موئینه (CR) رطوبت به منطقه ریشه می‌شود، ضمن آن که طراحی سیستم آبیاری قطره‌ای براساس کمتر بودن سرعت ریزش آب از قطره‌چکان نسبت به سرعت نفوذ آب به خاک است لذا عوامل رواناب سطحی (RO) و صعود موئینه از معادله قابل حذف می‌باشند. مقدار $D_{r,i-1}$ یا عمق آب تخلیه شده از حد ظرفیت زراعی با لحاظ رطوبت اولیه خاک در ابتدای روز نخست تخمین، به صورت زیر تعیین گردید.

1- Crop evapotranspiration

2- Crop coefficient

بهرتر نتایج از معیار خطای بی‌بعد با عنوان خطای نرمال مجذور مربعات (NRMSE) نیز استفاده گردید تا توانایی مدل مشخص گردد. معیارهای مورد نظر از روابط زیر به دست آمد:

$$RMSE = \left(\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{N} \right)^{0.5} \quad (8)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{\sum |P_i - O_i|}{N} \quad (10)$$

که در آن‌ها P_i مقادیر پیش‌بینی (شبیه‌سازی)، O_i مقادیر اندازه‌گیری، \bar{O} متوسط مقادیر پیش‌بینی و N تعداد داده‌هاست. همچنین ارتباط بین رطوبت شبیه‌سازی (y) و اندازه‌گیری شده (x) در قالب مدل خطی $y=ax+b$ ارائه شد. در این مدل خطی دو معیار شیب خط برازشی (a) و عرض از مبدأ آن (b) بیان‌کننده مناسب بودن عملکرد مدل به کار گرفته شده (SWAP) در شبیه‌سازی می‌باشند. به طوری که هر چه مقدار a به یک و b به صفر نزدیک باشد، عملکرد روش پیش‌بینی مناسب‌تر است.

نتایج و بحث

ضرایب معادله ون‌گونختن (n و α) با داشتن داده‌های متناظر پتانسیل ماتریک و رطوبت خاک از نرم‌افزار RETC محاسبه شد. مقدار فاکتور اعوجاج⁶ بنا به پیشنهاد ون‌گونختن در نرم‌افزار RETC عدد ثابت 0/5 لحاظ گردید (32). جدول (5) نتایج این بخش از کار را براساس اطلاعات آزمایشگاهی ورودی به مدل مشتمل بر 10 نقطه منحنی رطوبتی خاک از نقطه اشباع تا مکش 15 بار و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای چهار عمق با اطمینان در سطح 95 درصد آماری نشان می‌دهد.

مقایسه رطوبت باقیمانده (θ_f) و هدایت هیدرولیکی خاک (K_s) رطوبت اشباع خاک (θ_s) از جدول (5) با مقادیر درصد رطوبت در نقطه پژمردگی (θ_{pwp}) و K_s از جدول (1)، دقت مدل RETC را نشان می‌دهد. خروجی مدل براساس اطلاعات ورودی تا مکش 15 بار حاصل شد. لذا از مقادیر جدول فوق در شبیه‌سازی رطوبت خاک در مدل SWAP استفاده شد. بدین ترتیب عمل واسنجی با لحاظ پارامترهای هیدرولیکی خاک و اعمال آن در مدل، انجام و نتایج حاصل از آن با مقدار رطوبت واقعی مقایسه گردید. مقایسات در محل توزیع آب یعنی محل نصب قطره‌چکان و 10 سانتی‌متری آن صورت گرفت. مراحل فوق تا انطباق نتایج رطوبت شبیه‌سازی بر رطوبت

پارامترهای گیاهی ارتفاع گیاه، عمق ریشه، شاخص سطح برگ¹ (LAI)، همانندسازی دی‌اکسید کربن (CO_2)، تقسیم‌بندی وزن خشک گیاه به اجزای گیاهی و تعیین میزان آب مصرفی گیاه است. برای این منظور پارامترهای تعداد بوته در هکتار، وزن خشک اندام‌های گیاهی و عمق ریشه در طول فصل رشد اندازه‌گیری و برای سایر پارامترها هم طیفی از مقادیر قابل قبول براساس تجربه و بررسی منابع در نظر گرفته شد.

شبیه‌سازی میزان تولید ماده خشک (A_{pgross}) برحسب کیلوگرم ماده خشک در هکتار در روز در قالب مدل تفضیلی²، به شکل رابطه 7 صورت گرفت (5 و 17).

$$A_{pgross} = A_{Max} \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon_{PAR} \cdot PAR_{L,a}}{A_{MAX}}} \right) \quad (7)$$

که در آن A_{MAX} : حداکثر سرعت همانندسازی دی‌اکسید کربن ε_{PAR} ، $(kgCO_2 \cdot ha^{-1} \cdot d^{-1})$: شیب اولیه یا راندمان مصرف نور $PAR_{L,a}$ ، $(kgCO_2 \cdot J^{-1} \cdot absorbed)$: سرعت تابش جذب شده در عمقی به اندازه L از تاج گیاه³. تمامی اطلاعات مورد نیاز برای اجرای مدل SWAP در قالب فایل‌های اطلاعاتی نرم‌افزار به مدل وارد شدند.

واسنجی مدل SWAP

به منظور شناخت دقت مدل در شبیه‌سازی عمل واسنجی براساس اطلاعات پارامترهای هیدرولیکی خاک حاصل از اندازه‌گیری میدانی و نرم‌افزار RETC انجام شد. عمل واسنجی با لحاظ مقدار عددی برای هر یک از متغیرها بر مبنای آزمایشات صحرائی، آزمایشگاهی و در اندکی از موارد از منابع معتبر در مدل انجام و نتایج با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در گام‌های زمانی مختلف در سطح 9 کرت و دو محل توزیع رطوبت، مقایسه گردید. پس از کسب اطمینان از دقت مدل، عملیات فوق تا انطباق نتایج رطوبت شبیه‌سازی بر رطوبت اندازه‌گیری با دقت قابل قبول در لایه‌های مختلف خاک تا عمق 60 سانتی‌متری به صورت دستی تکرار شد. ارزیابی نتایج واسنجی و شبیه‌سازی از طریق محاسبه معیارهای آماری مجذور میانگین مربعات خطا⁴ (RMSE) بر حسب سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب و میانگین خطای مطلق⁵ (MAE) با هدف کمینه شدن خطا و بیشینه بودن معیار ضریب تعیین (R^2) در محل قطره‌چکان و 10 سانتی‌متری آن انجام گرفت. همچنین به منظور مقایسه

- 1- Leaf area index
- 2- Detailed model
- 3- Canopy
- 4- Root mean square error
- 5- Mean absolute error

6- Tortosity factor

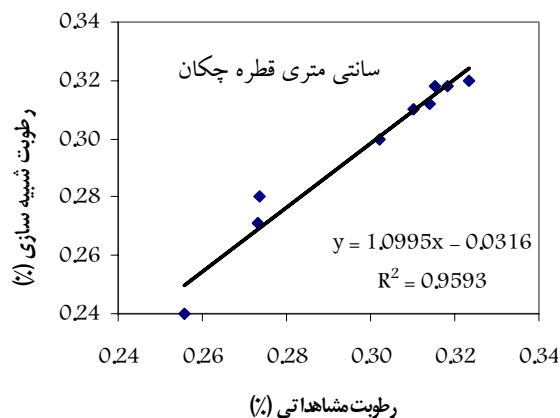
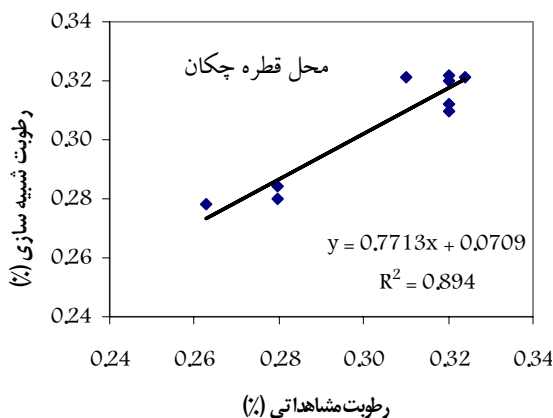
واقعی با دقت قابل قبول تکرار شد. جدول (6) خلاصه‌ای از معیارهای خطا برای شبیه‌سازی را به صورت میانگینی از چهار لایه 0-15، 15-30، 30-45 و 45-60 سانتی‌متر نشان می‌دهد. نتایج حاصل از عملیات واسنجی طبق جدول (6) نشان داد که جواب‌های مدل براساس پارامترهای هیدرولیکی لایه‌های خاک

جدول 5- پارامترهای هیدرولیکی خاک تولید شده توسط مدل RETC

| لایه | α | n | θ_s | θ_r | k_s |
|-------|----------|------|------------------------------|------------|--------------------|
| | --- | | $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ | | cm d^{-1} |
| 0-15 | 0/08 | 1/81 | 37/79 | 5/9 | 25/7 |
| 15-30 | 0/083 | 1/84 | 29/95 | 7/53 | 23/8 |
| 30-45 | 0/074 | 1/86 | 19/63 | 9/35 | 19/12 |
| 45-60 | 0/075 | 1/92 | 16/61 | 9/87 | 28/76 |

جدول 6- مقادیر معیارهای خطا برای رطوبت خاک مشاهداتی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار SWAP

| نقاط مشاهداتی | RMSE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) | NRMSE | MAE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) |
|-------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| محل قطره‌چکان | 1×10^{-3} | 3×10^{-2} | 7×10^{-3} |
| 10 سانتی‌متری قطره‌چکان | 8×10^{-3} | 2×10^{-2} | 7×10^{-3} |



شکل 1- مقایسه تغییرات رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نسبت به عمق خاک در دو مکان

در مدل برازش داده شده b به صفر بسیار نزدیک است و a نیز به- ترتیب در محل قطره‌چکان و 10 سانتی‌متری آن در حدود 0/8 و 1/1 است که به یک نزدیک است. اجرای نرم‌افزار MINITAB نیز موید عدم اختلاف معنی‌دار بین آن‌ها بود. مقایسه ضرایب همبستگی و مقادیر a و b حاصل از شکل (1) برای هر دو محل نشان می‌دهد که پیش‌بینی رطوبت در 10 سانتی‌متری قطره‌چکان به‌صورت غیرمحسوسی بهتر است. در توجیه علت آن می‌توان به نقش ریشه گیاه و معابر ناشی از رشد ریشه به سمت محل توزیع رطوبت اشاره داشت که منجر به هدایت رطوبت به محل 10 سانتی‌متری می‌گردد. همچنین فشار جریان خروجی از قطره‌چکان در انتقال رطوبت به فواصل دورتر بی‌تاثیر نبوده و از آنجایی که در محل قطره‌چکان درصد پوشش گیاهی نسبت به محل کاشت آن کمتر است بنابراین انتظار

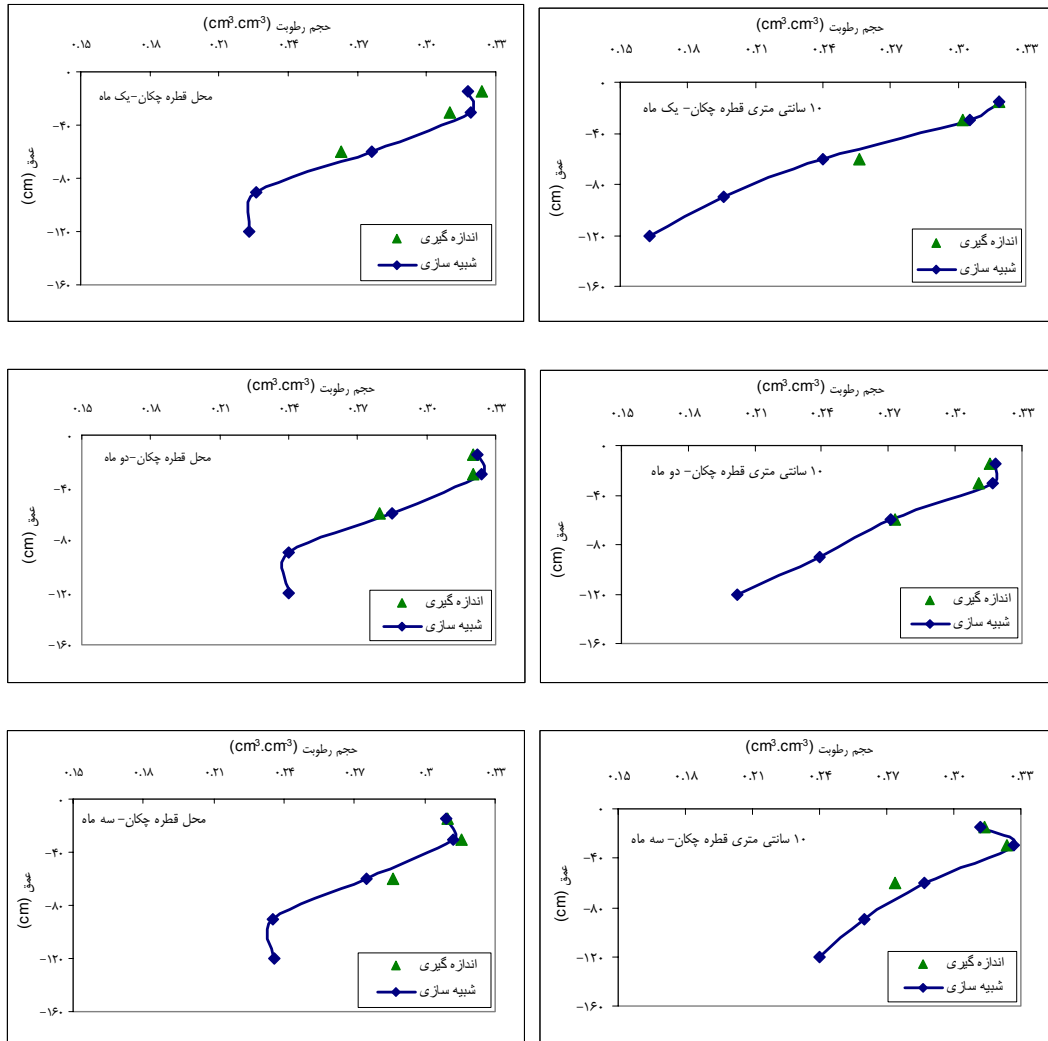
زیرا مقادیر خطای بسیار کم مدل، نشان از توانایی بالای آن جهت انجام شبیه‌سازی دارد. نتایج واسنجی مدل برای توزیع جریان در ناحیه اطراف ریشه گیاه در جدول (6) نشان می‌دهد مقادیر مشاهداتی بسیار نزدیک به مقادیر رطوبت خاک شبیه‌سازی شده می‌باشد.

پس از انجام واسنجی، نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در زمان‌های مختلف بعد از آبیاری مورد مقایسه قرار گرفت. شکل (1) مقادیر مشاهداتی رطوبت را در مقابل مقادیر شبیه‌سازی، برای 93 روز بعد از نشاء در محل نصب قطره‌چکان و 10 سانتی‌متری آن نشان می‌دهد.

همان‌گونه که شکل (1) نشان می‌دهد ضرایب مدل برازش داده‌شده به مقادیر بهینه (یک و صفر) نزدیک می‌باشد. به‌طوری که

شبیه‌سازی رطوبت را برای سه زمان 30، 60 و 90 روز پس از نشاء کاری در محل قطره‌چکان و 10 سانتی متری قطره‌چکان نشان می‌دهد.

است که تبخیر و تلفات آب در محل قطره‌چکان بیشتر باشد که سبب کاهش دقت شبیه‌سازی می‌شود. لذا انتظار نوسانات رطوبت در محل قطره‌چکان بیش از محل 10 سانتی متری است. نتایج حاصل از داده‌های شبیه‌سازی و میدانی این تحقیق توسط مدل رایانه‌ای SWAP تحلیل گردید. نمونه‌ای از این شبیه‌سازی‌ها برای رطوبت ناحیه ریشه در شکل (2) آمده است. این شکل نتایج



شکل 2- توزیع رطوبت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تا عمق 120 سانتی متری در طول دوره رشد در دو محل

رطوبت اولیه منطقی به نظر می‌رسد و در دو نقطه انتهایی شرایط غیراشباع ماندگار برقرار است. وضعیت رطوبت در محل 10 سانتی متری از قطره‌چکان نیز نشان می‌دهد رطوبت در لایه سطحی حداکثر و مقدار آن در اعماق با افزایش طول دوره رشد افزایش یافته است. علت افزایش رطوبت در اعماق را می‌توان به تکرار عملیات آبیاری و گسترش توزیع عمودی و افقی ریشه گیاه نسبت داد. در حقیقت کاشت گیاه در محل 10 سانتی متری قطره‌چکان و گسترش

طبق نتایج شکل (2)، حداکثر مقدار رطوبت در سطح خاک 32 درصد حجمی بود و به ازای افزایش عمق، رطوبت، روند کاهشی داشت. همچنین عدم تغییر مقدار رطوبت و ثابت بودن آن در عمق 90-120 cm از سطح خاک در محل قطره‌چکان نشان‌دهنده عدم انتقال رطوبت سطحی به این عمق است. به عبارت دیگر در لایه‌های فوقانی به علت غالبیت نیروی مکش خاک در از دست ندادن رطوبت نسبت به نیروی ثقل، عدم افزایش رطوبت در لایه انتهایی نسبت به

اعتقاد داشتند که بهبود توزیع آب و مواد غذایی در آبیاری قطره‌ای، منوط به ارتباط مناسب بین شدت جریان، فاصله قطره‌چکان‌ها، مشخصات رطوبتی خاک و مدت زمان آبیاری است. همچنین بخشی از افزایش رطوبت در اعماق در ماه‌های دوم و سوم را می‌توان به شکل گرفتن لوله‌های موئین و صعود موئینگی از اعماق پایین به سمت بالا نسبت داد. از دیگر نکات قابل توجه در شکل (2)، تفاوت کلی رفتار روند رطوبتی در دو مکان اندازه‌گیری است. این تفاوت در اعماق انتهایی محل قطره‌چکان و محل 10 سانتی‌متری کاملاً مشهود است. علت این امر می‌تواند در گسترش عمقی ریشه گیاه در محل کاشت آن باشد. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد کاشت گیاه در محل 10 سانتی‌متری و رشد سیستم ریشه منجر به هدایت رطوبت به سوی گیاه و انتقال آن به سمت اعماق پایین‌تر شده است. به همین دلیل تفاوت در مقدار رطوبت دو محل قابل توجه است. ضمن آن‌که تشابه رفتاری در سه زمان مورد مطالعه، نشان‌دهنده صحت تغییرات می‌باشد. این نتایج در راستای مطالعه اژدری (2) می‌باشد که با بکارگیری مدل دو بعدی HYDRUS، به تفاوت رفتار رطوبت خاک در محل قطره‌چکان و 10 سانتی‌متری آن و تشابه رفتار رطوبت در مزرعه زیر کشت گیاه ترب اشاره داشته است.

تغییرات رطوبت 90 روز پس از نشاء حاکی از آن است که مقدار رطوبت در سطح خاک نسبت به ماه‌های قبل در هر دو محل، اندکی کاهش داشته است. کاهش رطوبت در سطح خاک را می‌توان به گرم‌تر شدن هوا در منطقه نسبت داد. گذشت زمان و گرم‌تر شدن هوا منجر به افزایش میزان تبخیر از لایه‌های سطحی و همچنین افزایش نیاز آبی گیاه (افزایش تعرق) شده که کاهش رطوبت در این لایه‌های بالایی را به دنبال داشته است.

عمودی و افقی ریشه در اطراف این محل سبب نگهداشت بیشتر رطوبت در خاک شده است.

وضعیت رطوبت در ماه‌های مختلف کشت بیان‌کننده آن است که میزان رطوبت با توجه به کوتاه بودن دور آبیاری، همچنان در حد ظرفیت زراعی مزرعه است ولی میزان رطوبت با گذشت زمان و انجام آبیاری‌های پی در پی در اعماق پایینی روند افزایشی دارد. در شکل (2) مشاهده می‌شود افزایش تدریجی رطوبت در اعماق خاک، دو ماه پس از نشاء تا عمق 120 cm به صورت ادامه‌دار بوده است، به‌گونه‌ای که مقدار رطوبت در محل قطره‌چکان پس از دو ماه در عمق 120 cm، از 22 به 24 درصد حجمی و در 10 سانتی‌متری قطره‌چکان از 16 درصد به 20 درصد حجمی رسیده است. این افزایش تدریجی در ماه سوم پس از کشت، در محل 10 سانتی‌متری با شدت بیشتری دیده می‌شود. این نتایج در راستای مطالعات باک و میرز (19) و اژدری و همکاران (1) می‌باشد. محققین فوق علت افزایش رطوبت در آبیاری قطره‌ای را پایین بودن دور آبیاری و ثابت ماندن ظرفیت آب خاک، پتانسیل آب برگ، فتوسنتز خالص و تعرق و تکرار آبیاری دانستند.

نکته حائز اهمیت در شکل (2) این است که روند افزایش رطوبت از سطح خاک به اعماق پایین با شیب زیاد صورت نگرفته و این به معنای افزایش تدریجی جریان است. افزایش رطوبت در اعماق بیش از عمق ریشه گیاه به منزله تلفات آب به صورت زهکشی عمقی از مرز انتهایی است که اژدری (2) مقدار آن را برای سیستم آبیاری قطره‌ای با شرایط این آزمایش ناچیز، قابل اغماض و در حد 0/05 درصد گزارش نموده است.

روند تدریجی افزایش رطوبت نسبت به عمق و همچنین افزایش تدریجی رطوبت با گذشت زمان در طول دوره رشد، نشان‌دهنده توزیع مناسب رطوبت از طریق قطره‌چکان، فاصله مناسب آن‌ها و به طور کلی طراحی صحیح سیستم آبیاری است. پیترو و همکاران (27) نیز

جدول 7- مقادیر برآورد شده پارامترهای معادله بیلان رطوبتی خاک توسط مدل SWAP و مقادیر مشاهداتی

| تاریخ | مقادیر حاصل از | بارندگی (mm) | آبیاری (mm) | رواناب سطحی (mm) | جریان سطحی از بالادست (mm) | تبخیر و تعرق واقعی (mm) | زهکشی (mm) |
|----------|----------------|--------------|-------------|------------------|----------------------------|-------------------------|------------|
| 20- | مدل | 1/74 | 4/716 | 0/0 | 0/0 | 1/488 | 0/0 |
| 2006Apr- | مشاهداتی | 1/98 | 4/72 | 0/0 | 0/0 | 1/82 | 0/0 |
| 21- | مدل | 3/25 | 6/615 | 0/0 | 0/0 | 2/470 | 0/0 |
| 2006May- | مشاهداتی | 3/00 | 6/59 | 0/0 | 0/0 | 2/37 | 0/0 |
| 21- | مدل | 0/9 | 12/893 | 0/0 | 0/0 | 5/160 | 0/0 |
| 2006Jun- | مشاهداتی | 0/886 | 12/83 | 0/0 | 0/0 | 5/20 | 0/0 |
| 22- | مدل | 0/01 | 14/827 | 0/0 | 0/0 | 9/336 | 0/0 |
| 2006-Jul | مشاهداتی | 0/03 | 13/95 | 0/0 | 0/0 | 9/78 | 0/0 |
| 22- | مدل | 0/03 | 13/839 | 0/0 | 0/0 | 9/860 | 0/0 |
| 2006Aug | مشاهداتی | 0/03 | 13/95 | 0/0 | 0/0 | 9/78 | 0/0 |

| | | | | | | | |
|-----|-------|-----|-----|-------|------|----------|----------|
| 0/0 | 7/177 | 0/0 | 0/0 | 7/002 | 0/33 | مدل | -21 |
| 0/0 | 7/48 | 0/0 | 0/0 | 7/78 | 0/33 | مشاهداتی | 2006Sep- |
| 0/0 | 5/92 | 0/0 | 0/0 | 9/98 | 1/04 | مدل | میانگین |
| 0/0 | 6/07 | 0/0 | 0/0 | 9/97 | 1/04 | مشاهداتی | |

و 10 سانتی متری آن) تجزیه و تحلیل گردید. برای شبیه سازی توزیع رطوبت خاک تا عمق 120 سانتی متری سطح خاک از مدل SWAP و برای اجرای مدل فوق از تمامی عوامل هواشناسی، خاک، گیاه و آبیاری در سطح کرت آزمایشی تحت کشت پیاز در مزرعه آموزشی، پژوهشی بسطام (شاهرود) استفاده شد.

نتایج واسنجی مدل SWAP نشان داد که بین مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری شده رطوبت تفاوت قابل ملاحظه و معنی داری وجود ندارد. نتایج این بخش از کار در قالب معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) در دو محل قطره-چکان و 10 سانتی متری آن در چهار لایه از خاک نشان داده شد. مقادیر RMSE، NRMSE و MAE در محل قطره چکان 0/001، 0/03، 0/07 سانتی مترمکعب بر سانتی مترمکعب و در 10 سانتی متری از قطره چکان 0/08، 0/02 و 0/07 سانتی مترمکعب بر سانتی مترمکعب به دست آمد.

در مجموع نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که برنامه ریزی آبیاری اعمال شده و تکرار آبیاری ها در هر 48 ساعت با میزان دبی به کار گرفته شده، می تواند میزان رطوبت در ناحیه ریشه را در حد ظرفیت مزرعه حفظ نماید تا گیاه دچار تنش رطوبتی و افت محصول نگردد. زیرا حفظ رطوبت در حد ظرفیت زراعی یکی از اهداف عملیات آبیاری است که سیستم آبیاری قطره ای در حفظ آن از توانمندی لازم برخوردار است و نیازی به اجرای مدیریت های دیگر در این نوع سیستم نمی باشد لیکن می تواند سایر سیستم ها مورد مقایسه قرار گیرد. انجام عملیات آبیاری از طریق یک سیستم آبیاری قطره ای و توزیع مناسب زمانی و مکانی آن، 14780 kg/ha عملکرد در مقابل گویای آن است که مقدار برآورد شده توسط مدل را در پی داشت. نتایج آبی گیاه در طول دوره رشد بوده و از تلفات آب به صورت نفوذ عمقی تا حد قابل قبولی جلوگیری شده است. این مسئله در شرایط کم آبی حاکم بر ایران و دیگر نقاط جهان، هدف بسیاری از مطالعات در بخش کشاورزی است.

با توجه به گراف های شکل (2)، این گونه به نظر می رسد که مدل SWAP، نسبت به مقادیر مشاهداتی به مقدار بسیار جزئی کم-برآورد دارد. در تأیید این مطلب، کیانی (8)، ایتزینگر و همکاران (22) و یوتست و همکاران (30) نیز بیان داشتند که برآوردهای مدل SWAP معمولاً کمتر از مقادیر واقعی می باشد اما این اختلاف قابل اغماض است و بر صحت برآوردها تأثیر منفی ندارد.

به طور کلی نتایج حاصل از شبیه سازی و واسنجی مدل نشان داد که مدل جهت شبیه سازی نحوه حرکت آب در خاک به ویژه در سیستم آبیاری قطره ای، مدل مناسبی است. وظیفه دوست (34)، براندیل و همکاران (18) و دروگرز و همکاران (20) طی تحقیقات خود در مورد مدل SWAP، اذعان داشتند که این مدل به خوبی قادر به شبیه سازی وضعیت رطوبتی خاک هستند، منوط بر آن که ورودی آن ها به درستی انتخاب و وارد شوند.

نتایج مقادیر پارامترهای بیلان آب حاصل از اندازه گیری های میدانی و مدل SWAP در جدول (7) آمده است.

با توجه به جدول فوق دیده می شود که مقادیر برآورد شده عوامل بارندگی، آبیاری و تبخیر و تعرق توسط مدل بسیار نزدیک به مقادیر به دست آمده از مزرعه است. این مسئله گواه بر آن است که برآوردهای نسبتاً دقیق عوامل بیلان رطوبتی، منجر به شبیه سازی های صحیحی از میزان رطوبت و نحوه توزیع آن شده است. همچنین همان گونه که انتظار می رفت مدل مقادیر رواناب سطحی، جریان سطحی از بالادست و تلفات عمقی از زیر ناحیه ریشه را معادل صفر برآورد نموده است که صحت چنین فرضیاتی برای سیستم آبیاری قطره ای در نتایج پیتر و همکاران (27) گزارش شده است.

نتیجه گیری

در این مطالعه برای تحقیق و اطلاع از نحوه توزیع عمودی آب در خاک اطراف ریشه گیاه و برآورد دقیق نفوذ عمقی آب در یک سیستم آبیاری قطره ای، اندازه گیری های مختلفی به عمل آمد. داده های آزمایشگاهی و صحرایی مربوط به لایه های مختلف خاک (تا عمق 60 سانتی متری سطح خاک) بود که برای دو نقطه (محل قطره چکان

- 1- اژدری خ، فرخی ا. و زارع‌ایبانه ح. 1388. مطالعه تغییرات کود نیتروژن و رطوبت در مزرعه‌ای مجهز به سیستم کودآبیاری قطره‌ای. مجموعه مقالات کنفرانس بین‌المللی منابع آب، دانشگاه صنعتی شاهرود: 214-221.
- 2- اژدری خ. 1387. شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. جلد پانزدهم، شماره اول: 168-180.
- 3- بی‌نام. 1385. سالنامه هواشناسی. سازمان هواشناسی کل کشور. تهران.
- 4- جرعه‌نوش م.ه. و سپاسخواه ع.ر. 1383. ارائه مدلی برای تخمین شوری حاصل از صعود موئینه از سطح ایستایی کم‌عمق شور. دومین کنفرانس ملی دانشجویی منابع آب و خاک، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی.
- 5- خانی‌قریه‌گپی م، داوری ک، علیزاده ا، هاشمی‌نیا س.م. و ذوالفقاران ا. 1386. ارزیابی مدل SWAP در برآورد عملکرد چغندرقدند تحت کمیت‌ها و کیفیت‌های مختلف آبیاری. مجله آبیاری و زهکشی ایران، جلد اول، شماره 2: 107-117.
- 6- شهیدی ع. 1387. اثر برهم کنش کم‌آبیاری و شوری بر عملکرد و اجزاء عملکرد ارقام گندم با تعیین تابع تولید آب- شوری در منطقه بیرجند، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب.
- 7- قهرمان ن، خلیلی ع، لیاقت ع.م. و اسماعیل‌نیا س. 1383. ارزیابی مدل SWACROP جهت برآورد عملکرد گیاهان گندم و جو در اقلیم کرج. دومین کنفرانس ملی دانشجویی منابع آب و خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
- 8- کیانی ع.ر. 1386. استفاده از مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب، اصلاح و عملکرد نسبی گندم. مجموعه مقالات نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- 9- کیانی ع، میرلطیفی م، همایی م. و چراغی ع.م. 1384. کارایی مصرف آب گندم تحت شرایط شوری و کم‌آبی، مجله تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، جلد 6، شماره 24: 47-64.
- 10- علیزاده ا. 1386. طراحی سیستم‌های آبیاری، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، چاپ هفتم، صفحه 131.
- 11- محمدی ک. 1380. حل عددی معادله جریان یک بعدی آب در خاک با استفاده از روش عملگرهای مرجع. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. جلد پنجم، شماره اول.
- 12- منصوری ح، مصطفی‌زاده س.ف، موسوی ف. و فیضی م. 1386. استفاده از مدل SWAP به منظور بررسی تأثیر مدیریت آبیاری با آب شور بر رطوبت خاک منطقه رودشت اصفهان، مجموعه مقالات نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- 13- نوری‌مقدم ر، مرتضوی‌بک ا، آفتابی م، و یکتوس پ. 1385. تولید اینبردلاین برای اصلاح توده های بومی پیاز. چهارمین کنفرانس علوم باغبانی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی.
- 14- وظیفه‌دوست م، علیزاده ا، کمالی غ.ع. و فیضی م. 1387. افزایش بهره‌وری آب کشاورزی در مزارع تحت آبیاری منطقه برخوار اصفهان، مجله آب و خاک علوم و صنایع کشاورزی فردوسی مشهد، جلد 22، شماره 2: 484-495.
- 15- Agnese C., Blanda F., Drago A., Minacapilli M., Provenzano G., Rallo G., and Sciortin. 2007. Assessing the agro hydrological SWAP model to simulate soil water balance in typical Mediterranean crops. Geophysical Research Abstracts, vol. 9: 08146.
- 16- Aksoy H., and Kavvas M.L. 2005. A review of hillslop and watershed scale erosion and sediment transport models. Catena. 64: 247-271.
- 17- Bessembinder J.J.E., Leffelaar P.A., Dindwal A.S., and Ponsioen T.C. 2005. Which crop and which drop, and the scope for improvement of productivity. Agric. Water Manag. 73(2): 113-130.
- 18- Brandyle T., Szaty L., Gnatow S., and Tomasz O. 2005. Examination of SWAP suitability to predicts soil water conditions in a field Peat-Moorsh soil, Department of environment, Warsaw Agricultural University, Poland.
- 19- Bucks D.A., and Myers L.E. 1987. Trickle irrigation-application uniformity from simple emitter plugging. Trans.16 (6): 1108-1111.
- 20- Droggers P., Akbari M., Torabi M., and Pazira E. 2000. Exploring field scale salinity using simulation modeling, Example for Rudasht area, Esfahan Province, Iran, IAEIR-IWMI Research Report 2, 16pp.
- 21- Droggers P., Bastiaansen W.G., Beyazugul M., Kayam Y., Kite G.W., and Murray-Rust H. 2000 b. Distributed agro-hydrological modeling of an irrigation system in western turkey, Agriculture Water Management, 43: 183-202.
- 22- Eitzinger J., Trnka M., Hosch J., Zalud Z., and Dubrovsky M. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. Institute for Meteorology and Physics, University of Sciences (BOKU), Vienna, Austria.

- 23- Ines A.V.M., Honda K., Das Gupta A., Droogers P., and Clemente R.S. 2006. Combining remote sensing-simulation modeling and genetic algorithm optimization to explore water management options in irrigated agriculture, *J. of Agricultural Water Management*, 83(3): 221-232.
- 24- Marinov J.D., Querner E., and Roelsma J. 2005. Simulation of water flow and nitrogen transport for a Bulgarian experimental plot using SWAP and ANIMO models. *J. of Contaminant Hydrology*, 77(3): 145-164.
- 25- Manghu S., Matthew B., Louise M., and Alfred H. 2005. Simulation of water and salt movement in Tile-drained field irrigation with saline water under a serial biological concentration management scenario, Research and Development Division, Department of Primary Industries, Private Bag I, Ferguson Road, Tatura, Vic. 3616 Australia.
- 26- Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resou. Res.* 12(3): 513-522.
- 27- Peter J.T., Ian K.D., Ian M.B., Craig P.B., Mike A.S., and Brain A.K. 2003. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. *J. Irrig, Sci.* 22: 201-209.
- 28- Singh R. 2003. simulation on direct and cyclic use of saline waters for sustaining Cotton-Wheat in a semi-arid area of north-west India, Department of soil and water engineering, Colloge of Agricultural Engineering, CCS Haryana Agricultural University, Hisar 125004, India.
- 29- Singh R., Van Dam J.C., and Feddes R.A. 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district India, *J. of Agricultural Water Management*, 82: 253-278.
- 30- Utset A., Velicia H. Del Rio B., Morillo R., Antonio Centeno J., and Carlos Martines J. 2007. Calibration and validation agrohydrogical model to simulate sugarbeet water use under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, Volume 94, Issues 1-3, P: 11-21.
- 31- Van Genuchten M.Th. 1980. A closed -form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- 32- Van Genuchten M.T., Leij F.J., and Yates S.R. 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Office of research and developement U.S. environmental protection agency ADA, Oklahoma.
- 33- Van Vosselen A., Verplancke H., and Van Ranst E. 2005. Assessing water Consumption of banana: traditional versus modeling approach, *J. of Agricultural Water Management*, 74:201-218.
- 34- Vazifeduost M. 2005. Development of an agricultural drought assessment system, Integration of crop and soil modeling remote sensing and geographical information. Wageningen Agricultural University.

Evaluation of the SWAP Model to Estimate the Distribution Pattern of Soil Moisture Under Drip Irrigation Management

H. Zare Abyaneh^{1*} - E. Farokhi² - M. Vazifeh Doost³ - K. Azhdari⁴

Received: 16-4-2010

Accepted: 28-8-2010

Abstract

Assessing moisture in the soil under cultivation of crops to achieve high performance and reduced water are necessary. Knowledge of the moisture distribution in the root zone, time consuming and costly field tests that simulation models, a suitable alternative in answer to issues of movement and are water distribution. In this study assessment of soil moisture, to aid SWAP simulation model was and above model Empowerment compared with field results was assessed. SWAP model based on the information in a field irrigated onion, equipped with drip irrigation systems and soil hydraulic parameters obtained from model RETC, were performed. Moisture Information with harvest soil from emitter place and 10 cm of the layers 15-0, 30-15, 45-30 and 60-45 were obtained. Comparison of simulated moisture with observations moisture to a depth of 60 cm in the emitter place and 10 cm it, in the form of graphs and calculation criteria of Root Mean Squared Error (RMSE), Root Mean Squared error of normal (NRMSE) and mean absolute error (MAE) was performed. Values of RMS, RRMSE and MAE in the normal place dropper 0.001, 0.03 and 0.07 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ and in 10 cm were 0.08, 0.02 and 0.07 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, respectively. Low errors calculated from the model SWAP, shows good accuracy of the model simulated moisture distribution in the root zone. Operations irrigation through a drip irrigation system, with irrigation 48 hours was equivalent to performance kg/ha 14780 against 14134 kg/ha estimated by the model will follow. In total, the results indicate that the SWAP model is able to respond with a valid enough accuracy and precision in a relatively short time to provide. This model can be as effective and useful tool for evaluating and optimizing the distribution of moisture in the root-crop area, used.

Keywords: Moisture simulation, SWAP model, Drip irrigation, Onion farm

1,2- Assistant Professor and **Former MSc Student**, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Agriculture Faculty, Bu-Ali Sina University of Hamedan

(*-Corresponding Author Email: zareabyaneh@gmail.com)

3- Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Agriculture Faculty, Gilan University

4- Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Agriculture Faculty, University of Technology, Shahrood