

## مقایسه تغذیه آب زیرزمینی در آبیاری بارانی و شیاری در یک مزرعه کشاورزی با استفاده از مدل‌سازی ناحیه غیراشباع

الهام بیک زاده<sup>۱\*</sup>، علی نقی ضیایی<sup>۲</sup>، حسین انصاری<sup>۳</sup>، راضیه لک<sup>۴</sup>، محسن زکی<sup>۵</sup>

۱. کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴. کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۵. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۶/۲۸)

### چکیده

به‌منظور استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی و ارزیابی قابلیت آسیب‌پذیری آبخوان، بررسی نقش جریان برگشتی آبیاری در تغذیه آب زیرزمینی و تأثیر روش آبیاری بر مقدار آن، به‌عنوان راه‌کاری برای مدیریت بهتر منابع آب زیرزمینی در آینده، لازم و ضروری است. بر همین اساس در دشت نیشابور در مزرعه‌ای با کشت تریتیکاله با بافت خاک متوسط، مقدار تغذیه ناشی از روش‌های مختلف آبیاری (سطحی و بارانی) با استفاده از اندازه‌گیری رطوبت خاک در دو چاهک شش متری برآورد شد. در هر نیم متر عمق خاک و همچنین عمق ۰/۱۵ و ۰/۳ متر چاهک‌ها حسگر REC نصب شد و به مدت ۱۷۳ روز رطوبت خاک اندازه‌گیری شد. سپس از این مقادیر برای شبیه‌سازی جریان در ناحیه غیراشباع با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D استفاده شد. مدل برای همه نقاط کالیبره شد و برای برآورد مقدار زهکشی شده از زیر لایه‌های ۶ متری خاک به کار گرفته شد. مقدار آب آبیاری کاربردی در مزرعه سطحی حدود ۲۳۰ میلی‌متر و در مزرعه بارانی حدود ۲۹۹ میلی‌متر بدست آمد. مقدار جریان زهکشی شده از عمق ۶ متری نیز در زمین آبیاری سطحی ۸۰ میلی‌متر و در زمین آبیاری بارانی بسیار اندک و تقریباً صفر بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری بارانی، آبیاری سطحی، تغذیه آب زیرزمینی، ناحیه غیراشباع، HYDRUS-1D

### مقدمه

برآورد تغذیه، حمایت آژانس‌های بین‌المللی و نشریه‌های حاصل از نشست‌های بین‌المللی در طول ۲۰ سال گذشته نشان‌دهنده افزایش نیاز به برآورد قابل اطمینان تغذیه می‌باشد (Mohamadi, 2012). روش‌های زیادی برای برآورد تغذیه آب-های زیرزمینی با توجه به درجه موفقیت وجود دارد که در هریک از روش‌های موجود تکنیک‌های فیزیکی و ردیاب و یا رویکردهای مدل‌سازی می‌تواند بکار رود. بهترین گزینه مناسب برای هر منطقه به مقیاس‌های مکانی و زمانی در نظر گرفته شده و اهداف برآورد تغذیه بستگی دارد (Scanlon *et al.*, 2002).

از انواع رویکردهایی که برای شبیه‌سازی جریان غیراشباع استفاده می‌شود، می‌توان روندیابی ذخیره رطوبت خاک، رویکردهای نیمه‌تحلیلی و راه‌حل‌های عددی معادله ریچاردز را نام برد. نمونه کدهایی که برای حل معادله ریچاردز استفاده می‌شود می‌توان به HYDRUS-1D (Simunek *et al.*, 1998) و VS2DT (Lappala *et al.*, 1999) نام برد.

در سال‌های اخیر در بسیاری از کشورهای جهان برداشت آب از منابع آب زیرزمینی از میزان تغذیه سالیانه آن‌ها بیشتر بوده است. در سال ۲۰۰۵ میلادی، چین، هند و ایران رتبه‌های اول تا سوم برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی را داشته‌اند (Lak, 2014). در ایران به‌طور متوسط سالانه پنج میلیارد مترمکعب آب بیش از ظرفیت لایه‌های آبدار زمین مورد بهره‌برداری قرار گرفته است که این مقدار آب معادل آب مورد نیاز جهت تولید یک سوم کل غله تولیدی کشور است (Lak, 2014). با بررسی تجربه سایر کشورها مشاهده می‌شود که این کشورها از روش‌ها و ابزارهای متفاوتی در مدیریت منابع آب زیرزمینی استفاده کرده و تلاش دارند تا با حفظ منابع آبی موجود از مشکلات آبی اجتناب نمایند. افزایش مطالعات علمی

\* نویسنده مسئول: Elhambz@gmail.com

نیشابور جزئی از حوضه آبریز کالشور نیشابور می‌باشد که در دامنه جنوبی ارتفاعات بینالود و در شمال شرق کویر مرکزی واقع شده است این حوضه در طول جغرافیایی ۱۳ و ۵۸ تا ۳۰' و ۵۹° و عرض جغرافیایی ۴۰' و ۳۵° تا ۳۹° و ۳۶° واقع شده است. در حوضه نیشابور یک ایستگاه سینوپتیک و از ایستگاه‌های تابعه وزارت نیرو تعداد ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی و ۲ ایستگاه تبخیرسنجی فعال وجود دارد. مزرعه‌ی انتخابی واقع در شهرستان نیشابور در مختصات جغرافیایی  $Y=36.184061$  و  $X=58.650577$  در ۱۰ بزرگراه نیشابور-سبزوار می‌باشد. مساحت قطعه زمین مورد مطالعه حدود ۲۴ هکتار است که ۱۷ هکتار آن توسط سیستم آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک و ۷ هکتار با روش آبیاری سطحی شیاری آبیاری می‌گردد. در این طرح برآورد میزان تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی ناشی از آبیاری و بارندگی در هر دو زمین زراعی و مقایسه بین دو سیستم آبیاری بارانی و سطحی مدنظر بوده، بنابراین حسگرهای رطوبتی (RotobatElectical Conductivity) REC در هر دو زمین نصب شد. این حسگرهای استوانه‌ای شکل به ارتفاع ۸ و شعاع ۱,۵ سانتی‌متر بوده و شامل دو مجموعه تجهیزات مجزا دیتالاگر و حسگر بوده و استفاده از آن بسیار ساده می‌باشد. به این ترتیب که حسگرها داده‌های مربوط به رطوبت را در حافظه خود ذخیره کرده و زمانی که به دیتالاگر متصل می‌شوند اعداد مورد نظر قرائت خواهند شد.

مشخصات منحصر به فرد سنسورهای رطوبتی مذکور به شرح ذیل می‌باشند:

- ۱- قابلیت اندازه‌گیری رطوبت با دقت ۰,۰۵ درصد و صحت ۰,۵ درصد در خاک‌های با بافت مختلف تا عمق بیش از ۵۰ متری بدون کاهش دقت
- ۲- توانایی اندازه‌گیری EC خاک با دقت ۱ میلی‌موس بر سانتی‌متر و صحت ۱۰ میلی‌موس بر سانتی‌متر تا عمق بیش از ۵۰ متری بدون کاهش دقت
- ۳- توانایی اندازه‌گیری دمای خاک با دقت ۰,۱ درجه سانتی‌گراد و صحت ۰,۵ درجه سانتی‌گراد تا عمق بیش از ۵۰ متری بدون کاهش دقت
- ۴- هر حسگر دارای حافظه مجزایی برای ثبت اطلاعات می‌باشد که با اتصال به دیتالاگر می‌توان اطلاعات ذخیره شده را با فرمت اکسل برداشت نمود.

همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌گردد، در هر زمین از یک مجموعه حسگر که در عمق‌های مختلف تا ۶ متر نصب شدند استفاده و رطوبت خاک اندازه‌گیری شد. مطابق شکل (۱)

(Damm, ) SWAP و (Fayer, 2000) UNSATH, *et al.*, 1987 (Kroes and Van 2003) اشاره کرد.

Motevalizade *et al* (2012)، به منظور بررسی تأثیر آب برگشتی از آبیاری و بارندگی بر روی مقدار تغذیه آب زیرزمینی دشت جوین سبزوار که منطقه‌ای نیمه‌خشک هست، از مدل HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی نفوذ استفاده کردند و مقدار تغذیه حاصل از شبیه‌سازی در زیر حوضه‌های جوین را ۳۰۱ میلیون مترمکعب برآورد کردند. (Izadi *et al*(2013)، با استفاده از کاربرد و ارزیابی یک مدل توسعه‌یافته آب زیرزمینی- آب سطحی در حوضه آبریز نیشابور به پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در این دشت پرداختند. در این تحقیق بیلان سالانه آب زیرزمینی برای یک دوره مطالعاتی ۱۲ ساله مورد بررسی قرار گرفت. مقدار متوسط ۱۲ ساله تغذیه ۳۹۰ میلیون مترمکعب، ورودی آب زیرزمینی از ارتفاعات بینالود ۵۶ میلیون مترمکعب و خروجی از محدوده مطالعاتی ۳۰ میلیون مترمکعب برآورد شد. همچنین مقدار متوسط ۱۲ ساله برداشت آب از آبخوان ۶۱۷ میلیون مترمکعب برآورد گردید. Ahmad *et al.* (2012)، برای برآورد تغذیه‌ی آب زیرزمینی در دشت نیشابور از روش نوسانات سطح آب WTF با استفاده از مدل‌سازی معکوس و تعیین درصد نفوذ حاصل از بارندگی و برگشت آب آبیاری استفاده کردند. نتایج نشان داد که حداقل و حداکثر مقدار تغذیه‌ی حاصل از بارندگی به ترتیب ۴۶/۱ و ۱۰۱/۶ میلیون مترمکعب در سال است. Jafariand Raeisi (2012)، برای برآورد تغذیه ناشی از آبیاری مزارع گندم به آبخوان دشت هرات از چهار روش لایسیمتر، بیلان آب و خاک، بیلان جرمی کلر و مدل‌سازی استفاده کردند. میزان تغذیه تغییراتی از ۱۲ تا ۲۵۶ میلی‌متر در سال را نشان داد. با توجه به تحقیق‌های انجام‌شده در این زمینه و اهمیت جریان‌های برگشتی از آبیاری و بارندگی، در این پژوهش به مطالعه تغذیه آب زیرزمینی ناشی از آبیاری زمین‌های کشاورزی در مزرعه‌ای در نیشابور مجهز به دو سیستم آبیاری سطحی و بارانی با رویکرد مدل‌سازی ناحیه غیراشباع با استفاده از مدل HYDRUS که مدلی شناخته‌شده در زمینه شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک هست، پرداخته شده است.

## مواد و روش‌ها

موقعیت مکان پژوهش، مزرعه‌ای واقع در دشت نیشابور هست که به دلیل اهمیت مسئله‌ی بیلان آب زیرزمینی و منفی بودن آن در این دشت و مجهز بودن این مزرعه به دو سیستم آبیاری بارانی و آبیاری شیاری این محل انتخاب شده است. دشت

آمد. سپس حسگرها با توجه به بافت خاک در اعماق مختلف واسنجی شدند. با توجه به اینکه در این پژوهش خاک در سطح و عمق مزرعه همگن و ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است، از مدل HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی منطقه جریان استفاده شد، به همین منظور برای چاهک‌های شش متری نیمرخ‌های خاک به عمق شش صد سانتیمتر در نظر گرفته شد.

### معادله جریان

معادله‌ی جریان زیرسطحی در یک محیط متخلخل غیراشباع از طریق شکل اصلاح‌شده معادله ریچاردز به صورت زیر می‌باشد (Van Genuchten, 1980):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $\theta$  رطوبت حجمی [ $L^3L^{-3}$ ]،  $h$  مکش ماتریک [L]،  $S$  جمله تخلیه (برداشت آب توسط ریشه) [ $T^{-1}$ ] و  $K$  عبارت است از تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع [ $LT^{-1}$ ]. معمول‌ترین مدل برای توصیف ویژگی‌های هیدرولیکی نظیر منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع که توابع کاملاً غیر خطی با فشار هستند، رابطه ون گنوختن-معلم است که به شرح زیر می‌باشد (Van Genuchten, 1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s + \theta_r}{(1 + (\alpha h)^n)^m} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$K(h) = K_s S_e (1 - (1 - S_e^{1/m})^m)^2 \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (\text{رابطه ۴})$$

$\theta_s$  اشباع نسبی،  $\theta_r$  رطوبت حجمی اشباع [ $L^3L^{-3}$ ]،  $\theta_r$  رطوبت باقی‌مانده [ $L^3L^{-3}$ ]،  $\alpha$ ،  $n$  و  $m$  پارامترهای شکل (shape factor) هستند و  $\alpha$  دارای بعد ( $L^{-1}$ ) است. برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی مدل ون گنوختن انتخاب شده در مدل HYDRUS از نرم‌افزارهای RETC و Rosetta استفاده شد (Van Genuchten, 1980). به این ترتیب که ابتدا با استفاده از منحنی‌های رطوبتی به دست آمده برای هر یک از اعماق خاک و نرم‌افزار RETC، بهترین ضرایب برازش شده به دست آمد. سپس با توجه به اینکه این نرم‌افزار در برخی موارد رطوبت باقیمانده را صفر برازش می‌کند، از نرم‌افزار Rosetta برای برآورد این ضرایب و همچنین هدایت هیدرولیکی استفاده شد و بهترین ضرایب با استفاده از این دو مدل به دست آمد. در نهایت به دلیل خطای ناشی از بهم خوردن ساختمان خاک در آزمایشگاه، خطای ناشی از اندازه‌گیری در آزمایشگاه و خطاهای ناشی از مدل‌های استفاده شده برای برآورد پارامترها، ضرایب به دست آمده با توجه به داده‌های رطوبتی اندازه‌گیری شده در مزرعه برای اعماق مختلف واسنجی گردید. واسنجی با استفاده از مدل HYDRUS-1D و با توجه به گزینه حل معکوس موجود در مدل

در هر نیم متر عمق خاک، یک حسگر نصب شد و برای لایه‌ی سطحی (منطقه‌ی ریشه) نیز دو حسگر در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتیمتری در هر مجموعه در نظر گرفته شد. در مجموع تعداد ۲۸ حسگر در دو چاهک شش متری در مزرعه بکار برده شد که به صورت روزانه قرائت می‌شدند. اطلاعات بیشتر راجع به دستگاه REC در سایت دانشگاه فردوسی مشهد موجود است (<https://news.um.ac.ir>).



شکل ۱- حسگرهای رطوبتی نصب‌شده در اعماق ۱۵ تا ۶۰۰ سانتی‌متری

برای نصب هر مجموعه از حسگرهای REC در مزرعه یک چاهک حفر شد و حسگرها در دیواره‌ی چاهک نصب گردید تا بدین طریق بتوان خاک اطراف حسگر را طبیعی و دست نخورده فرض نمود. همچنین برای دقت بیشتر در کار، خاک هر نیم متر از عمق چاهک را هنگام حفر، جدا ریخته تا موقع پر کردن آن، لایه‌های خاک سر جای خود برگردانده شود. لایه‌های خاک به مقدار مناسب کوبیده شد تا از نشست خاک پس از پر کردن، جلوگیری شود.

داده‌برداری از حسگرها همزمان با کشت تریتیاله از روز پنج‌شنبه یازدهم آبان ماه سال ۱۳۹۱ به صورت روزانه شروع شد و تا تاریخ دوم اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۲ ادامه پیدا کرد. لازم به ذکر است که داده‌برداری در روزهای بارندگی و روزهای یخبندان و همچنین چندین روز به خاطر خرابی دیتالاگر انجام نشد، به عبارتی در طول ۱۷۳ روز، برای ۴۵ روز به علت مشکلات ذکر شده داده‌برداری انجام نشد. برای تعیین ویژگی‌های خاک منطقه و واسنجی کردن حسگرها تا عمق ۶ متری و از هر ۰/۵ متر نمونه‌ای تهیه شد و برای انجام آزمایش‌های لازم به آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی منتقل شد.

در این تحقیق برای تعیین منحنی مشخصه آب و خاک هر نمونه، از دستگاه صفحات فشاری در مکش‌های متفاوت و با دو تکرار، استفاده شد. بافت خاک نیز با روش هیدرومتری، جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از روش کلوخه و پارافین و همچنین رطوبت حجمی اشباع از نمونه‌های اشباع شده به دست

بر این بوده که حجم آب ورودی در طول مزرعه نفوذ کرده و رواناب صفر می‌باشد) و به دلیل حرکت عمودی آب در خاک، نشت جانبی نیز صفر فرض شده است.

اجزای معادله بیلان در انتهای مدل‌سازی در دو مزرعه بارانی و سطحی شرح داده خواهد شد.

### نتایج و بحث

نتایج حاصل از تعیین بافت، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت حجمی اشباع خاک تا عمق ۶ متری و به ازای هر نیم متر در جدول (۱) آورده شده است. به طور کلی ۶ نوع بافت خاک تا عمق ۶ متر مشاهده گردید. نتایج حاصل از واسنجی حسگرها در اعماق مختلف و با توجه به نوع بافت خاک نیز در شکل (۲) ارائه شده است که با استفاده از روابط به دست آمده برای حسگرهای واسنجی شده برای اعماق مختلف، به قرائت روزانه رطوبت خاک در اعماق متفاوت و در روزهای فصل رشد تریتیکاله پرداخته شد. در شکل (۳) نیز همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر تبخیر و تعرق، بارندگی مؤثر و آبیاری (سطحی و بارانی) روزانه نشان داده شده است که مجموع آبیاری و بارندگی با توجه به داده‌های ایستگاه هواشناسی، برای آبیاری سطحی در طول این فصل رشد ۳۱۵ میلی‌متر و برای آبیاری بارانی مقدار ۳۰۲ میلی‌متر و همچنین مقدار تبخیر و تعرق واقعی ۴۰۹، و تبخیر و تعرق پتانسیل ۴۰۸ میلی‌متر محاسبه شد.

رطوبت در طول دوره رشد گیاه تریتیکاله در زمین با آبیاری سطحی در اعماق متفاوت چاهک شش متری با استفاده از مدل HYDRUS-1D و با توجه به ضرایب ون گنوختن واسنجی شده به دست آمد که از بین ۱۴ عمق مورد بررسی، رطوبت در اعماق ۱۵، ۳۰، ۱۵۰، ۳۵۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ سانتی‌متر به طور نمونه انتخاب و در شکل (۴) نشان داده شده است. شکل (۵) نیز مربوط به مقادیر رطوبت در زمین با آبیاری بارانی می‌باشد. خطای مدل‌سازی رطوبت در اعماق مختلف با توجه به رطوبت‌های اندازه‌گیری شده در هر دو زمین با آبیاری بارانی و سطحی در جدول (۲) آورده شده است.

همان‌طور که در شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین مقادیر مشاهده‌ای رطوبت و مقادیر پیش‌بینی شده در دو زمین آبیاری سطحی و بارانی وجود دارد. در هر دو چاهک شش متری، نوسانات رطوبت در لایه‌های سطحی زمین مشاهده می‌شود که به طور کلی بالاترین خطا (جز در برخی لایه‌های زیرسطحی) نیز مربوط به همین ناحیه می‌باشد. این مسئله می‌تواند به دلایلی همچون جذب آب توسط ریشه گیاه، تبخیر و تعرق و بارندگی باشد که در لایه‌های سطحی مؤثرتر

صورت گرفت. به این ترتیب که تمامی ورودی‌های مورد نیاز از جمله ضرایب ون گنوختن و همچنین مقادیری از داده‌های رطوبتی اندازه‌گیری شده در مزارع بارانی و سطحی وارد مدل شده و مدل با مقایسه نتایج بدست آمده و رطوبت‌های واقعی، مقادیر دیگری برای ضرایب مورد نظر انتخاب می‌کند. به این ترتیب هنگامی که کمترین خطا (RMSE) بدست آمد ضرایب واسنجی شده را به عنوان خروجی نمایش می‌دهد.

برای برآورد جذب آب توسط ریشه از مدل ماکروسکوپی فدس که به عنوان متداول‌ترین مدل هست استفاده شد (Feddes *et al.*, 1987) و با توجه به بیشینه عمق ریشه و همچنین برداشت تریتیکاله در دوره میانی (برداشت زودتر و کاهش رشد ریشه نسبت به زمانی که گیاه رشد کامل دارد)، حداکثر عمق توسعه ریشه یک متر و بیست سانتیمتر در نظر گرفته شد و بیشینه عمقی که چگالی ریشه را در بر می‌گرفت، یک چهارم اولیه تراکم ریشه، عمق سی سانتیمتری خاک در نظر گرفته شد.

در این پژوهش با توجه به اندازه‌گیری رطوبت به صورت روزانه شرایط اولیه برای همه عمق‌ها برابر با رطوبت اندازه‌گیری شده در روز ۹۱/۸/۱۱ در نظر گرفته شد. شرایط مرزی در بالادست، شرایط اتمسفریک و شرایط پایین‌دست، زهکشی آزاد  $\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right) = 0$  در نظر گرفته شد. انتخاب شرایط اتمسفریک (تماس سطح خاک با اتمسفر) نیازمند داده‌ها و اطلاعاتی نظیر شدت بارندگی که از ایستگاه باران‌سنجی نیشابور به دست آمده، آبیاری روزانه (در دو زمین با آبیاری سطحی و بارانی) و همچنین تبخیر و تعرق پتانسیل است که با استفاده از داده‌های اخذ شده از ایستگاه سینوپتیک شهرستان نیشابور و با استفاده از معادله فائو پنمن - مانیتیت محاسبه شده است.

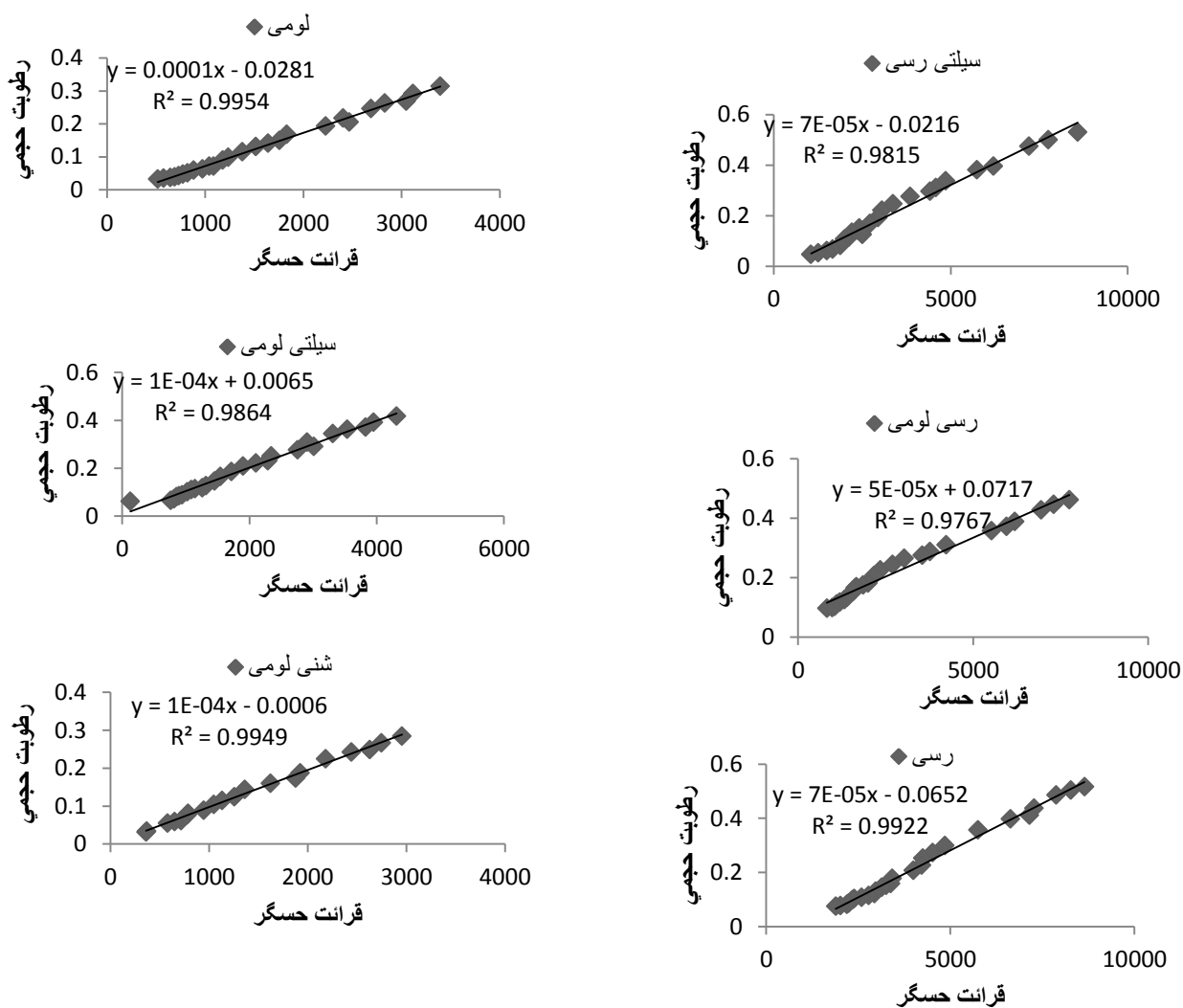
### اجزای معادله‌ی بیلان

در انتها اجزای معادله بیلان مورد بررسی قرار گرفت که معادله آن به صورت زیر می‌باشد (simunek *et al.*, 1998):

$$R = (I + P) - (ET + S + D) \pm \Delta W \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن I مقدار عمق آب آبیاری که به صورت حجم آب آبیاری تقسیم بر مساحت محاسبه می‌شود، P مقدار بارندگی که با نصب باران‌سنج در منطقه به دست می‌آید. ET مقدار تبخیر و تعرق با استفاده از روش‌های موجود و مناسب منطقه، D رواناب، s شامل نشت و جریان زیرسطحی می‌باشد،  $\Delta W$  نیز تغییرات رطوبتی خاک قبل و بعد از دوره بیلان می‌باشد.

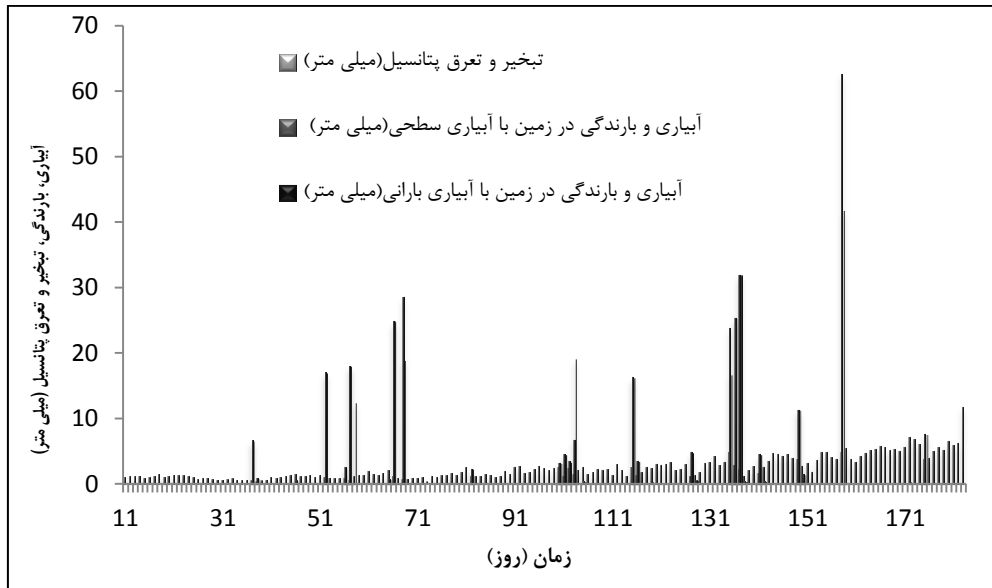
قابل ذکر است که مقدار رواناب تولیدشده برای مزرعه مورد مطالعه در طول دوره رشد، صفر در نظر گرفته شد (فرض



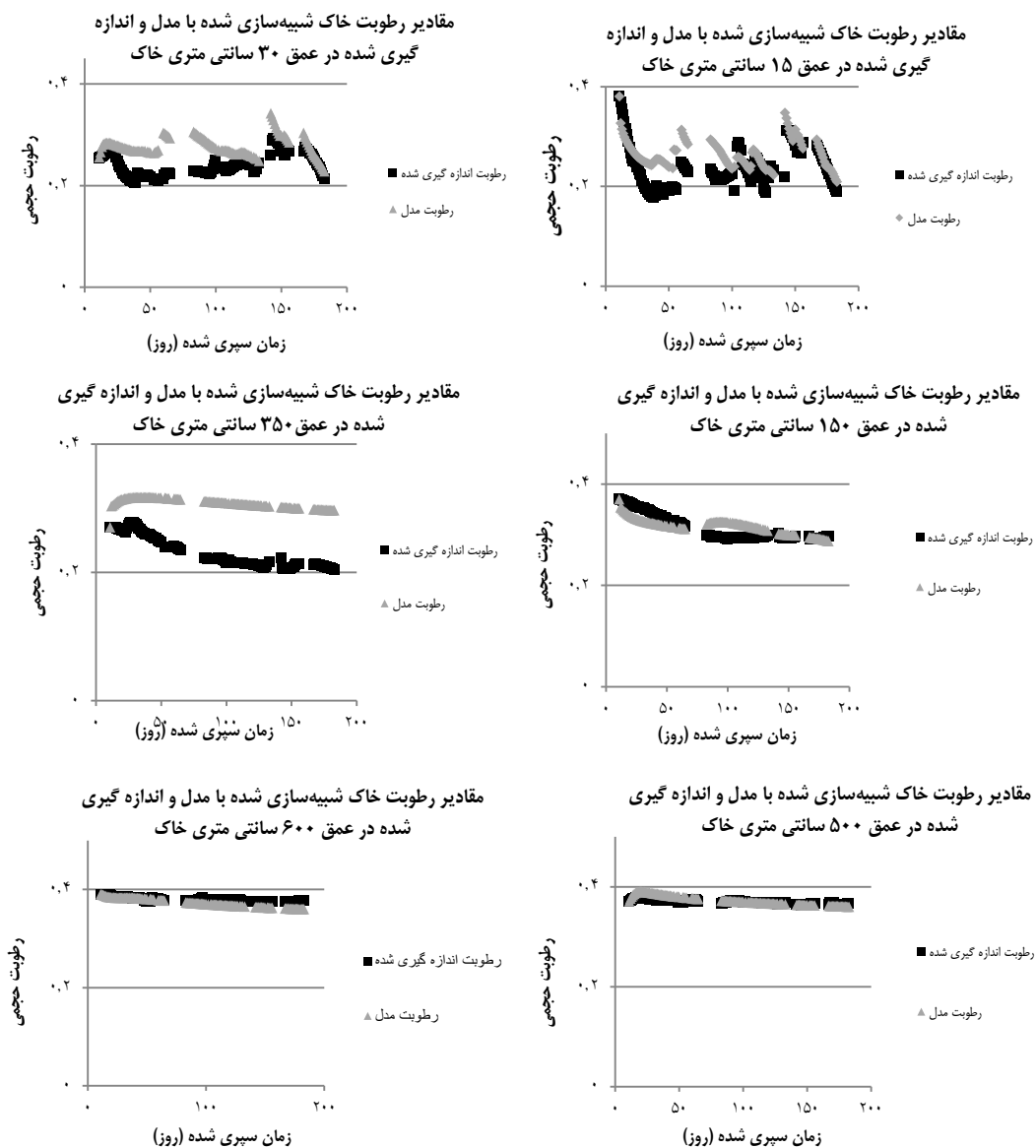
شکل ۲- منحنی‌های واسنجی حسگر REC برای بافت‌های مختلف خاک

جدول ۱- نتایج حاصل از تعیین بافت و جرم ظاهری مخصوص خاک و رطوبت حجمی اشباع

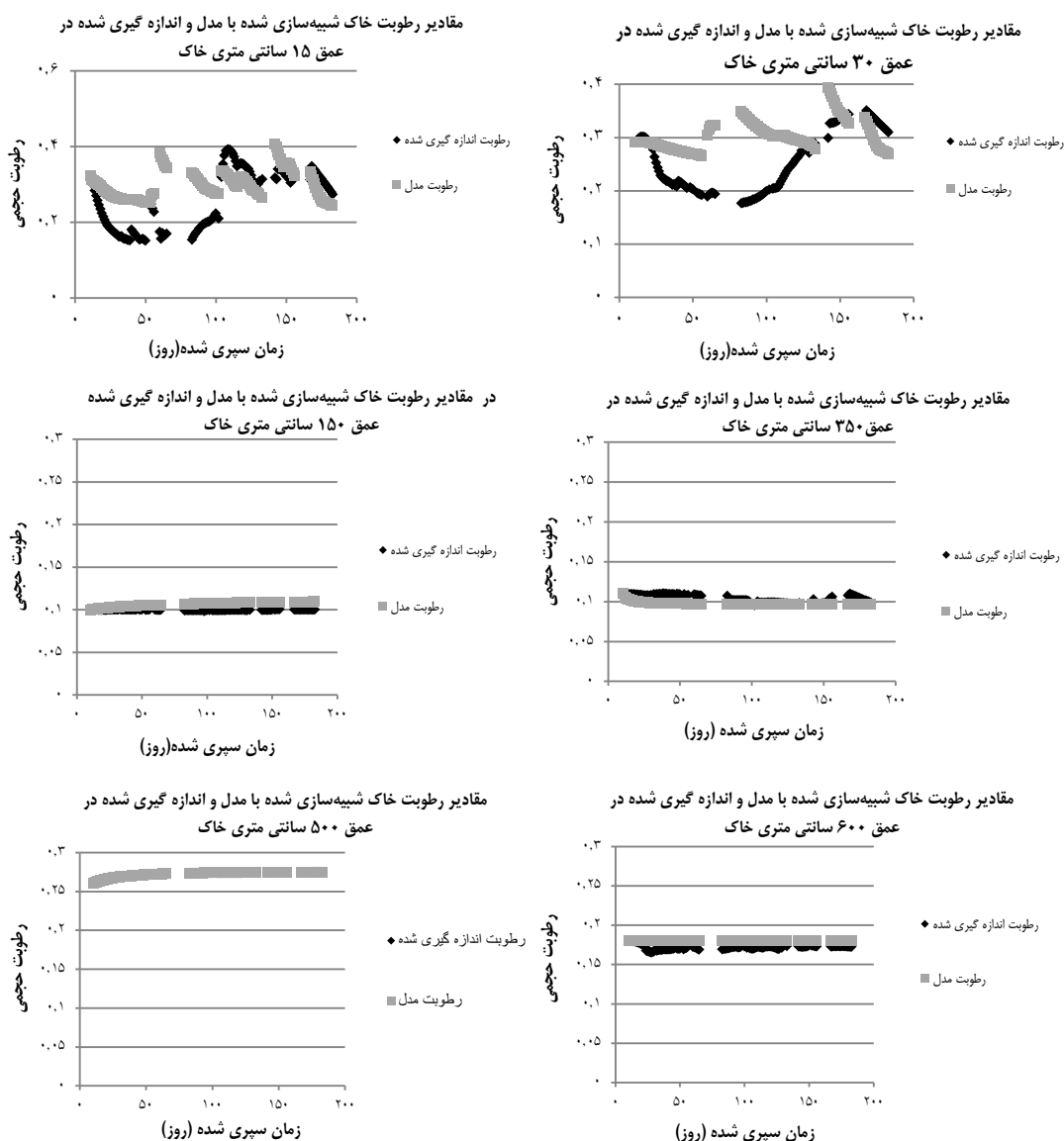
رطوبت حجمی اشباع	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	بافت خاک	درصد			
			درصد رس	سیلت	درصد شن	عمق (سانتی متر)
۰/۴۲	۱/۶۰	لوم رسی	۴۰/۹۲	۳۰,۰۰	۲۹/۰۸	۵۰-۰
۰/۳۴	۱/۵۲	لوم	۲۱/۱۰	۳۴/۸۵	۴۴/۲۵	۵۰-۱۰۰
۰/۴۱	۱/۶۵	لوم رسی	۳۱/۵۰	۳۵/۷۵	۳۲/۷۵	۱۰۰-۱۵۰
۰/۳۶	۱/۵۰	لوم شنی	۱۲/۲۵	۲۶/۷۵	۶۱,۰۰	۱۵۰-۲۰۰
۰/۳۲	۱/۶۱	لوم شنی	۱۲,۰۰	۱۹/۵۰	۶۹/۶۰	۲۰۰-۲۵۰
۰/۳۶	۱/۵۶	لوم شنی	۲۰,۰۰	۴/۲۴	۶/۵۶	۲۵۰-۳۰۰
۰/۳۸	۱/۵۰	لوم سیلتی	۲۳/۴۰	۴۹,۰۰	۲۷/۶۰	۳۰۰-۳۵۰
۰/۳۳	۱/۵۳	لوم	۱۶/۵۰	۳۳/۷۵	۴۹/۷۵	۳۵۰-۴۰۰
۰/۳۴	۱/۵۱	لوم	۱۷/۲۵	۳۶/۷۵	۴۶,۰۰	۴۰۰-۴۵۰
۰/۵۲	۱/۴۴	رسی	۵۶/۵۰	۲۷/۲۵	۱۶/۲۵	۴۵۰-۵۰۰
۰/۴۷	۱/۶۰	رس سیلتی	۵۵/۵۰	۴۲/۲۵	۲/۲۵	۵۰۰-۵۵۰
۰/۴۴	۱/۵۳	رسی	۵۲/۴۵	۴۴/۰۵	۳/۵۰	۵۵۰-۶۰۰



شکل ۳- مقدار آبیاری و بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل در طول دوره رشد برای آبیاری بارانی و سطحی



شکل ۴- مقادیر رطوبت خاک شبیه‌سازی شده با مدل و اندازه‌گیری شده در آبیاری سطحی در طول دوره رشد گیاه در اعماق مختلف



شکل ۵- مقادیر رطوبت خاک شبیه سازی شده با مدل و اندازه گیری شده در آبیاری بارانی در طول دوره رشد گیاه در اعماق مختلف

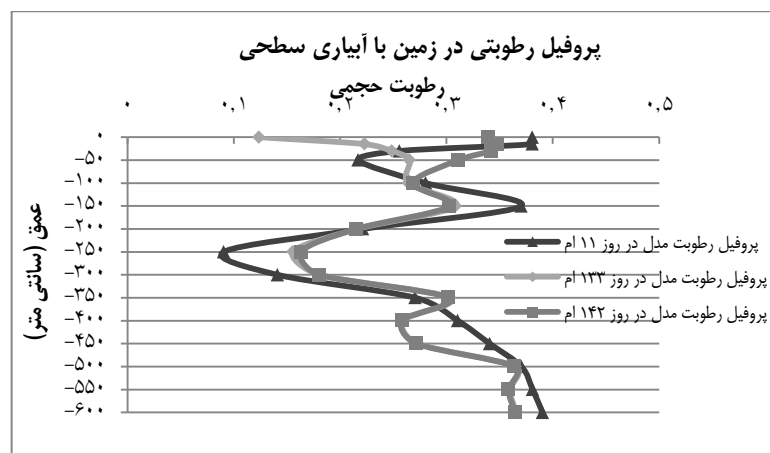
جدول ۲- خطای مدل سازی رطوبت در زمین های آبیاری سطحی و بارانی

عمق (سانتی متر)	RMSE رطوبت حجمی در زمین با آبیاری بارانی	RMSE رطوبت حجمی در زمین با آبیاری سطحی
۰-۱۵	۰/۰۸۲	۰/۰۴۰
۱۵-۳۰	۰/۰۷۵	۰/۰۴۲
۳۰-۵۰	۰/۰۴۲	۰/۰۴۹
۵۰-۱۰۰	۰/۰۱۰	۰/۰۴۷
۱۰۰-۱۵۰	۰/۰۰۲	۰/۰۱۹
۱۵۰-۲۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۲۹
۲۰۰-۲۵۰	۰/۰۱۸	۰/۰۰۷
۲۵۰-۳۰۰	۰/۰۱۱	۰/۰۶۸
۳۰۰-۳۵۰	۰/۰۰۷	۰/۰۷۹
۳۵۰-۴۰۰	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳
۴۰۰-۴۵۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۶
۴۵۰-۵۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶
۵۰۰-۵۵۰	۰/۰۱۶	۰/۰۰۹
۵۵۰-۶۰۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرات رطوبتی در چاهک شش متری زمین با آبیاری سطحی شدیدتر بوده و رطوبت در اعماق متفاوت تغییرات شدیدتری نسبت به چاهک شش متری بارانی نشان داده است و نوسانات رطوبتی در زمین بارانی کمتر بوده و بیشترین تغییرات رطوبتی در همان اعماق سطحی و تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری بوده است. به علاوه در نیمرخ‌های رطوبتی زمین آبیاری سطحی، از عمق ۵ متری به بعد تغییرات رطوبتی نزدیک به صفر شده و نوسانات رطوبت بسیار کاهش پیدا کرده اما در چاهک بارانی این اتفاق رخ نداده است و این‌طور به نظر می‌رسد که رطوبت لایه‌های بالایی به عمق ۶ متری نرسیده باشد. دلیل این تفاوت‌ها در دو چاهک می‌تواند به علت یکنواختی پخش و حجم آب متفاوت وارد شده در دو زمین باشد. همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین تفاوت در سه نیمرخ رطوبتی در هر دو زمین آبیاری سطحی و بارانی در روزهای وقوع آبیاری و بارندگی بیشینه و دو روز قبل و بعد از آن، مربوط به لایه‌های سطحی می‌باشد که در آبیاری سطحی به دلیل حجم بیشتر آب وارد شده به زمین، محسوس‌تر است و به‌طور کلی تغییرات چندانی در اعماق بیش‌تر از ۱۰۰ سانتی‌متری مشاهده نمی‌شود. اما هر دو شکل روند تغییرات رطوبت خاک در اعماق سطحی در روزهای قبل و بعد از بارندگی و آبیاری سنگین را به خوبی نشان می‌دهد. در شکل (۸) نیز مقایسه‌ای میان نیمرخ‌های رطوبتی حسگرها و مقادیر پیش‌بینی شده در دو چاهک بارانی و سطحی در روزهای ۱۳۳ و ۱۴۲ صورت گرفته است. در این شکل نیز تطابق خوبی بین نیمرخ‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مشاهده می‌شود و تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی بیشتر در آبیاری سطحی و در لایه‌های سطحی خاک ملاحظه می‌شود که می‌تواند به همان دلایلی باشد که پیش‌تر اشاره شد.

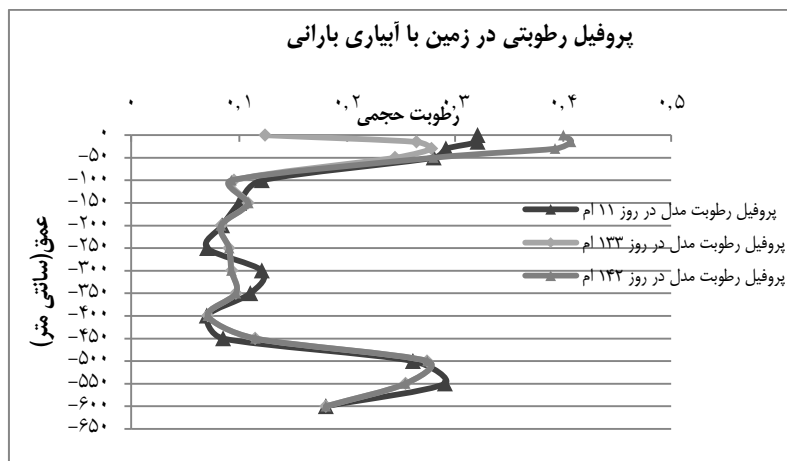
ظاهر می‌گردد. قابل ذکر است که در لایه‌های با بافت سنگین، نفوذ جانبی وجود دارد که در مدل‌های یک بعدی در نظر گرفته نمی‌شود (در این تحقیق مدل یک بعدی به علت سادگی کار در نظر گرفته شد) و در اینجا جریان مرزی در دیواره‌ها صفر فرض شده و از حرکت افقی آب در خاک نیز صرف نظر شده است. در رابطه با توزیع سیستم ریشه نیز به همین صورت بوده و مدل یک بعدی فوس نمی‌تواند به صورت شعاعی و عمودی توزیع ریشه را شبیه‌سازی کند. همچنین خطای اندازه‌گیری و تعیین نوع بافت خاک نیز به شدت تأثیرگذار می‌باشد به این ترتیب که وجود لایه‌های متفاوت بافت خاک موجب حرکت و نگهداشت متفاوت آب در خاک می‌گردد که در تعیین ضرایب نفوذ متناسب با هر لایه مؤثر است. اما به‌طور کلی تغییرات شدید نیمرخ رطوبتی در اعماق بیشتر از ۱۵۰ سانتی‌متر مشاهده نشد، در حالی که کوچک‌ترین تغییرات در بارندگی، آبیاری و تبخیر و تعرق و عواملی از این قبیل موجب تغییر شدید و نوسان در لایه‌های سطحی، به خصوص لایه‌های کمتر از یک متر گردید.

در شکل‌های (۶) و (۷) نیمرخ‌های رطوبتی مدل در آبیاری سطحی و بارانی در چند روز قبل و بعد از سنگین‌ترین آبیاری و بارندگی وارد شده در هر دو زمین نشان داده شده (روز ۱۳۷ ام با مجموع ۳۱ میلی‌متر آبیاری و بارندگی) که با مقادیر رطوبت در روز اول مدل‌سازی (روز ۱۱ ام) نیز مقایسه شده است. با توجه به نیمرخ‌های به دست آمده قبل و بعد از آبیاری سنگین در هر دو مزرعه سطحی و بارانی، تأثیر حجم آب وارد شده به خصوص در لایه‌های سطحی‌تر (۱ متر) کاملاً محسوس بوده و بر لایه‌های عمیق‌تر چندان تغییری مشاهده نمی‌شود. به‌طور کلی در هر دو شکل، نوسانات کاهشی و افزایشی رطوبت، لایه‌های خاک با بافت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همچنین

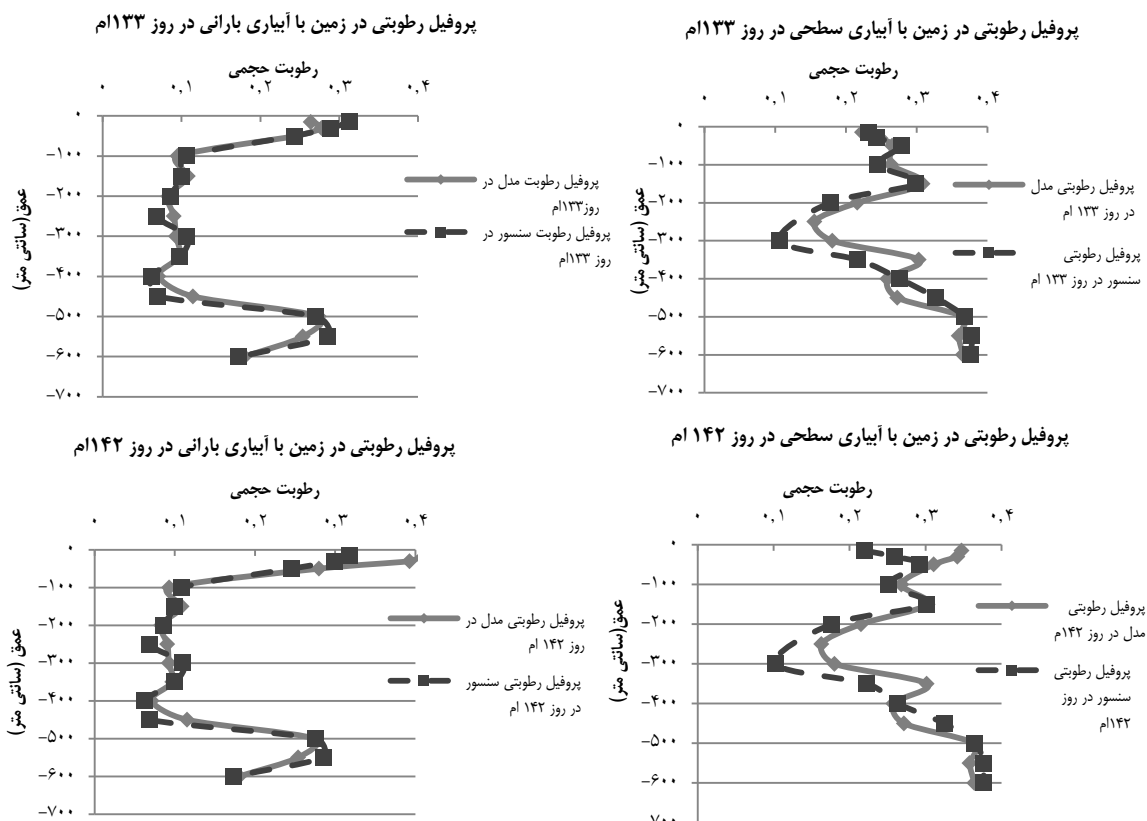


شکل ۶. نیمرخ رطوبتی اندازه‌گیری شده در زمین با آبیاری سطحی در روزهای ۱۳۳ و ۱۴۲





شکل ۷. نیمرخ رطوبتی اندازه‌گیری شده در زمین با آبیاری بارانی در روزهای ۱۴۲۲ و ۱۴۲۳



شکل ۸. مقایسه نیمرخ‌های رطوبت اندازه‌گیری شده و پیش بینی شده در دو زمین با آبیاری سطحی و بارانی در روزهای قبل و بعد از آبیاری و بارندگی سنگین (روز ۱۳۷۷ ام)

است و این مسئله که نفوذ عمقی از چاهک سطحی بیشتر باشد دور از انتظار نیست، بنابراین واضح است که تغذیه برآورد شده از این چاهک بیشتر از چاهک بارانی باشد. جدول (۴) نیز اجزای معادله بیلان (معادله ۵) را نشان می‌دهد. سپس با این هدف که رطوبت افزایش یافته در لایه‌ها فرصت خروج پیدا کند، برای پنج ماه دیگر با فرض اینکه زمین در دوره خشکی و بدون محصول

در ادامه به برآورد مقادیر تغذیه از چاهک‌های شش متری سطحی و بارانی با استفاده از مدل Hydrus1D پرداخته شد. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، مقدار تغذیه از چاهک آبیاری سطحی ۸۰ میلی‌متر و تغذیه از چاهک آبیاری بارانی نزدیک به صفر می‌باشد. حجم جریان وارد شده در زمین با آبیاری سطحی در هر دفعه آبیاری بیشتر از آبیاری بارانی

به مقایسه نیمرخ رطوبتی در ابتدا، اواسط و انتهای دوره خشکی پرداخته شد که در شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب برای زمین‌های آبیاری سطحی و بارانی نشان داده شده است. در شکل (۹) کاهش رطوبت در اعماق مختلف زمین آبیاری سطحی در طول دوره خشکی مشاهده می‌شود که نسبت به نیمرخ رطوبتی آبیاری بارانی محسوس‌تر می‌باشد در آبیاری بارانی این کاهش تنها در ۵۰ سانتی‌متری اول محسوس می‌باشد.

باشد، مدل‌سازی ادامه یافت که نتایج مقدار جریان زهکشی شده در دو چاهک در جدول (۵) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در چاهک آبیاری سطحی، میزان جریان زهکشی شده ۱۱۰ میلی‌متر بوده و افزایش نفوذ عمقی بسیار اندکی در چاهک آبیاری بارانی مشاهده می‌شود که به نظر می‌رسد آبی که صرف افزایش رطوبت لایه‌ها شده است تحت نیروی مکش بالایی بوده و به کندی حرکت می‌کند. به منظور بررسی تغییرات رطوبت در طول دوره خشکی،

جدول ۳. مقایسه مقادیر تغذیه برآورد شده در چاهک‌های شش متری مزارع تحت عملیات آبیاری سطحی و بارانی

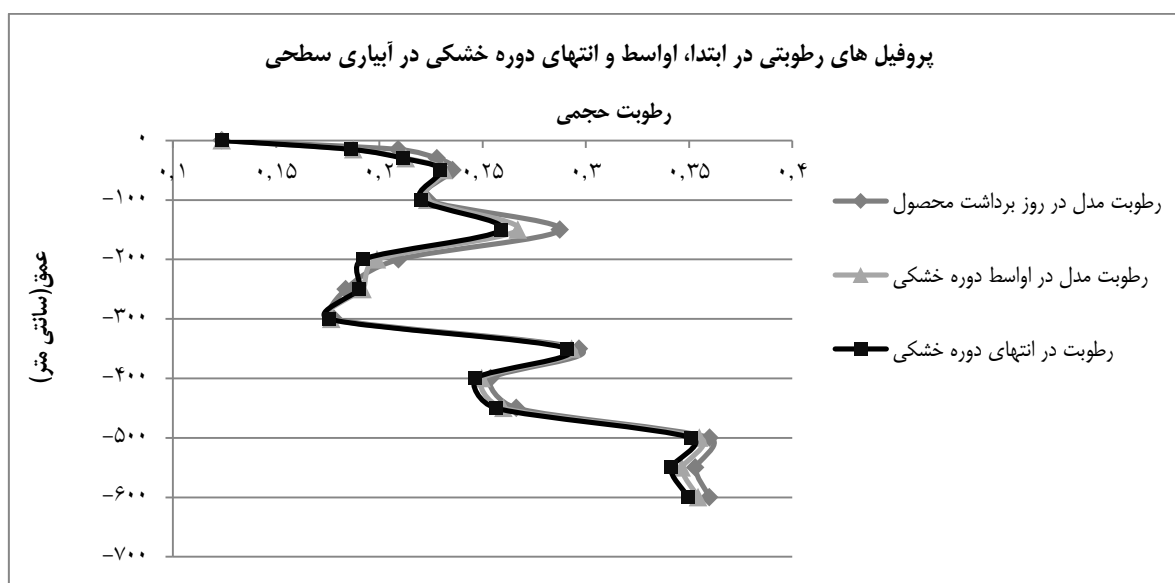
مقدار تغذیه برآورد شده در چاهک شش متری در زمین با آبیاری بارانی (میلی‌متر)	۰/۰۰۰۰۱۱۷
مقدار تغذیه برآورد شده در چاهک شش متری در زمین با آبیاری سطحی (میلی‌متر)	۸۰

جدول ۴- اجزای معادله بیلان در چاهک‌های شش متری زمین‌های آبیاری سطحی و بارانی

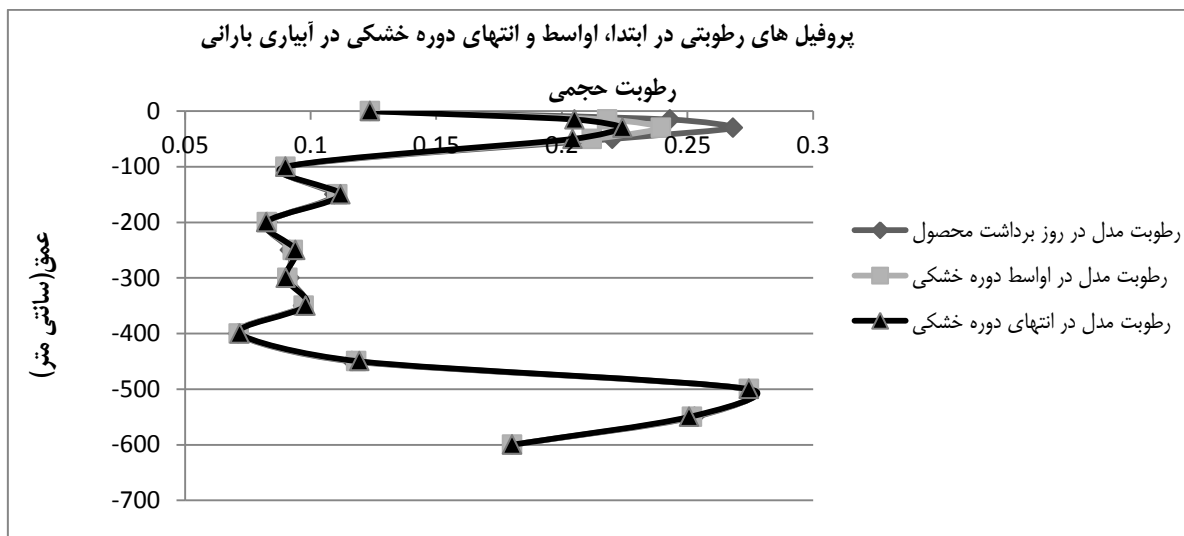
آبیاری سطحی (میلی‌متر)						
I + P	S	D	$E_p$	$T_a$	$W_1$	$W_2$
۳۱۵	۰	۰	۲۱۲	۱۸۲	۱۷۲۰	۱۶۳۵
آبیاری بارانی (میلی‌متر)						
۳۰۳	۰	۰	۲۰۳	۱۳۶	۸۹۶	۸۹۳

جدول ۵. مقایسه مقادیر تغذیه برآورد شده در چاهک‌های شش متری زمین‌های آبیاری سطحی و بارانی در دوره آیش

مقدار تغذیه برآورد شده در چاهک شش متری در زمین با آبیاری بارانی (میلی‌متر)	۰/۰۰۰۰۲۲
مقدار تغذیه برآورد شده در چاهک شش متری در زمین با آبیاری سطحی (میلی‌متر)	۱۱۰



شکل ۹. مقایسه نیمرخ‌های رطوبتی شبیه‌سازی شده توسط مدل در روزهای برداشت محصول، اواسط دوره خشکی و انتهای دوره خشکی در زمین با آبیاری سطحی



شکل ۱۰. مقایسه نیمرخ‌های رطوبتی شبیه‌سازی شده توسط مدل در روزهای برداشت محصول، اواسط دوره خشکی و انتهای دوره خشکی در زمین با آبیاری بارانی

### نتیجه‌گیری

با توجه به رطوبت‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده در چاهک‌های شش متری مشاهده می‌شود که از سطح زمین تا عمق یک متری، منحنی‌های رطوبتی دارای نوسانات بیشتری نسبت به سایر عمق‌ها هستند. این مسئله می‌تواند به دلیل عواملی مانند تبخیر و تعرق و جذب آب توسط ریشه باشد که موجب می‌شود در لایه‌های سطحی زمین سیستم پویاتری از تغییرات رطوبت و مکش وجود داشته باشد و هرچه بر عمق افزوده شود، این منحنی‌ها حالت یکنواخت‌تری پیدا می‌کنند. نتایج حاکی از آن است که آبی که از منطقه ریشه عبور می‌کند دیگر به لایه‌های سطحی برگشته و به سمت آب زیرزمینی حرکت می‌کند.

همچنین از جمله دلایل اختلاف بین نتایج مدل و اندازه‌گیری‌ها، وجود نفوذ جانبی به خصوص در لایه‌هایی با بافت سنگین است. در مدل‌سازی یک بعدی، از آنجا که در دیواره‌های چاهک جریان صفر در نظر گرفته می‌شود از حرکت آب به صورت افقی چشم‌پوشی می‌شود. همچنین توزیع ریشه در مدل‌های یک بعدی نمی‌تواند به صورت شعاعی و عمودی برآورد شود.

مقادیر نفوذ عمقی یا آب زهکشی شده در محل چاهک شش متری در زمین آبیاری سطحی ۸۰ میلی‌متر بوده که در حدود ۲۵ درصد مجموع آب ناشی از بارندگی و آبیاری در طول دوره رشد است. این در حالی است که در آبیاری بارانی مقدار جریان زهکشی شده نزدیک به صفر بود. به طور کلی در آبیاری سطحی عمق زیادتری از آب آبیاری به صورت یک باره به زمین داده می‌شود، در نتیجه تلفات نفوذ افزایش پیدا می‌کند. همچنین بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل، مقدار

جریان زهکشی شده در محل چاهک آبیاری سطحی در خارج از دوره کشت (دوره خشکی به مدت پنج ماه)، به میزان ۳۰ میلی‌متر افزایش پیدا کرده ولی در محل چاهک بارانی مقدار نفوذ عمقی افزایش چندانی نداشته و همچنان نزدیک به صفر بود. با احتساب این دوره در یک سال مجموع نفوذ عمقی در آبیاری سطحی بالغ بر ۳۰ درصد مجموع آبیاری و بارندگی می‌باشد که بسیار قابل ملاحظه است. بنابراین توسعه آبیاری تحت فشار در صورت حفظ حجم برداشت آب زیرزمینی و عدم کاهش آن خطرات جبران ناپذیری بر منابع آب زیرزمینی داشته و از طرف دیگر به دلیل کاهش نفوذ عمقی به تجمع نمک در لایه‌های سطحی خاک هم کمک خواهد کرد

### سپاسگزاری

از شرکت محترم آب منطقه‌ای خراسان رضوی به ویژه آقای مهندس قندهاری که بخش اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای این پژوهش را حمایت مالی کرده‌اند صمیمانه سپاس‌گزاریم.

### نمادها

$\theta$	رطوبت حجمی
$h$	مکش
$S$	جمله تخلیه
$K$	تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع
$S_e$	اشباع نسبی
$\theta_s$	رطوبت حجمی اشباع
$\theta_r$	رطوبت باقی‌مانده
$\alpha$	پارامتر شکل
$n$	پارامتر شکل
$m$	پارامتر

D	نشست و جریان زیر سطحی	I	شکل
S	رواناب		عمق آب آبیاری
$\Delta W$	تغییرات رطوبتی خاک قبل و بعد از دوره بیلان	P	مقدار بارندگی
		ET	تبخیر و تعرق پتانسیل

## REFERENCES

- Ahmadi, T., Ziaei, A. N., Rasoulzadeh, A., Davary, K. (2012). Groundwater recharge estimation using water table fluctuations (WTF) method. *Third National Conference on Integrated Water Resources Management, Sari*. (In Farsi)
- Fayer, M. J. (2000). UNSAT-H Version 3.0: unsaturated soil water and heat flow model, theory, user manual, and examples. *Pacific Northwest National Laboratory*, 13249.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. and Zarandy, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield. *Pudoc. Wageningen*, pp. 189.
- Izadi, A., Alizadeh, A., Davari, K., Ziaei, A. N., Akhavan, S. (2013). *Application and evaluation of a developed groundwater-surface water model in Neyshabour watershed*. PhD. dissertation, Ferdowsi university of Mashhad. (In Farsi)
- Jafari, h., Raesi, A. (2012). Estimation of recharge from irrigation of Harat aquifer in Yazd province. *Third meeting of Earth Science, Tehran*. (In Farsi)
- Kroes, J.G., Van Damm, J.C., 2003. Reference Manual SWAP: Version 3.0.3. Rep. 773. *Alterra Green World Res., Wageningen, The Netherlands*.
- Lak, R. (2014). Estimation of groundwater recharge in irrigated farms using unsaturated zoon modeling, case study: Neyshabour Plain. MSc. dissertation, Ferdowsi university of Mashhad. (In Farsi)
- Lappala, E. G., Healy, R. W., & Weeks, E. P. (1987). Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media. *Department of the Interior, US Geological Survey*.
- Mohamadi, H., Mohamadrezazade, N. (2012). Economic tools for managing groundwater resources in the world and Iran. *Second National Conference on Applied Research of Water Resources of Iran*. (In Farsi)
- Motevalizade, M., Ghahreman, B., Davary, K., Ghandehari, A. (2012). *Infiltration modeling using Hydrus-1D in Sabzevar-Jovein plain*. MSc. dissertation, Ferdowsi university of Mashhad. (In Farsi)
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., and Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18-39.
- Simunek, J., Huang, K., Sejna, M., & van Genuchten, M. TH., 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media—Version 2.0. *Igwmc-tps-70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado*.
- Simunek, J., Huang, K., Sejna, M., & van Genuchten, M. TH. (1999). The HYDRUS-2D Software Package for Simulating the Two-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 2.0. U. S. Salinity Laboratory *Agricultural Research Service U.S. Department Of Agriculture Riverside*.
- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892–898.  
<https://news.um.ac.ir>