

## Groundwater Recharge Assessment of Different Irrigation Scenarios by Using Unsaturated Zone Modeling (Case Study: Neishabour Plain)

ENSIEH SHAMSI TAVASANI<sup>1</sup>, ALINAGHI ZIAEI<sup>1\*</sup>, SEYED MOHAMMADREZA NAGHEDIFAR<sup>1</sup>, HOSSEIN ANSARI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>. Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran

(Received: July. 27, 2019- Revised: Sep. 2, 2019- Accepted: Sep. 15, 2019)

### ABSTRACT

Since many parts of Iran are located in arid and semi-arid regions of the world, groundwater recharge is an important component of the water cycle in these areas. In this paper, groundwater recharge under different irrigation scenarios for thirty logs lied in Neishabour plain was investigated. Daily data, including precipitation, evapotranspiration and leaf area index were used to run HYDRUS-1D software. Thirty observation logs with different depths of water table were selected at different locations in the plain. Analysis of the recharge rate in the wheat-fallow scenario showed that for different soil textures, groundwater recharge is dependent on the number of irrigation applications. For the logs with sandy soil textures, the maximum amount of recharge was obtained in five irrigation events scenario by an average of 325.23 mm year<sup>-1</sup>. For the logs with sandy clay loam soil texture, the highest recharge rate was obtained in the seven irrigation events scenario by an average of 67.43 mm per year<sup>-1</sup>. In the logs dug in loamy soil texture, due to the high depth of the soil block, the same recharge rate was obtained at different scenarios. In the case of a double-cropping scenario, groundwater recharge increased due to irrigation of tomato in summer. In this scenario, the highest recharge rate was obtained in observation log drilled in sandy soil texture with a depth of 15 m which was equal to 440.47 mm year<sup>-1</sup>.

**Keywords:** Richards' equation; HYDRUS-1D; Arid and semi-arid region; Infiltration.

## ارزیابی تغذیه آب زیرزمینی ناشی از اعمال سناریوهای مختلف آبیاری با استفاده از شبیه‌سازی عددی ناحیه غیر اشباع (مطالعه موردی: دشت نیشابور)

انسیمه شمسی تواسانی<sup>۱</sup>، علی نقی ضیائی<sup>۱\*</sup>، سیدمحمدرضا ناقدی‌فر<sup>۱</sup>، حسین انصاری<sup>۱</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۵/۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۶/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۲۴)

### چکیده

از آنجایی که بسیاری از مناطق ایران جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود، موضوع تغذیه آب‌های زیرزمینی به عنوان یکی از اجزای مهم چرخه آب در این مناطق از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش، تغذیه آب زیرزمینی ناشی از آب آبیاری برای ۳۰ نقطه از دشت نیشابور که دارای لاگ حفاری بودند در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های روزانه شامل بارش و تبخیر و تعرق و شاخص سطح برگ گیاه کشت‌شده، برای شبیه‌سازی در HYDRUS-1D استفاده شد. ۳۰ لاگ حفاری براساس تنوع عمق سطح ایستابی و موقعیت مکانی و پراکندگی در سطح آبخوان برای مدل‌سازی انتخاب شدند. بررسی میزان تغذیه در سناریو کشت گندم-آیش نشان داد که بسته به نوع بافت و ضخامت لایه غیر اشباع، مقدار تغذیه نسبت به تعداد دفعات آبیاری متفاوت خواهد بود. در بافت شنی حداکثر مقدار تغذیه مربوط به سناریوی ۵ نوبت آبیاری (در بلوک خاکی با عمق ۱۵ متر) به‌طور متوسط برابر ۳۲۵/۲۳ میلی‌متر در سال (۴۵ درصد آب کاربردی) است. در بافت لوم-رسی-شنی بیشترین مقدار تغذیه در سناریوی ۷ نوبت آبیاری (در بلوک خاکی با عمق ۱۲ متر) به‌طور متوسط برابر ۶۸/۸۶ میلی‌متر در سال (۹/۵ درصد مقدار آب کاربردی) می‌باشد. در لاگ‌های حفاری با بافت لومی به دلیل زیاد بودن عمق بلوک خاک، مقدار تغذیه در سناریوهای مختلف یکسان و برابر ۳/۵ میلی‌متر در سال (۰/۵ درصد آب کاربردی) است. در سناریو کشت گندم-محصول تابستانه، به دلیل آبیاری گیاه گوجه‌فرنگی در فصل تابستان افزایش میزان تغذیه در لاگ‌های حفاری مشاهده می‌شود که به‌موجب آن بیشترین مقدار تغذیه در لاگ حفاری با بافت شنی و عمق بلوک خاک ۱۵ متر به‌طور متوسط برابر با ۴۴۰/۴۷ میلی‌متر در سال (۶۰ درصد آب کاربردی) می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: معادله ریچاردز - HYDRUS-1D - منطقه خشک و نیمه‌خشک - نفوذ.

### مقدمه

آبیاری که نه به صورت تبخیر-تعرق از مزرعه خارج شده و نه توسط زهکش‌های سطحی جمع‌آوری شده باشد، بلکه به صورت جریان سطحی یا زیرسطحی به دریاچه، رودخانه و یا آبخوان آب زیرزمینی منتهی شود (Jafari *et al.*, 2012). در این پژوهش مقصود از جریان برگشتی آبیاری میزانی از آب آبیاری است که به داخل خاک نفوذ کرده و نهایتاً منجر به تغذیه آبخوان آب زیرزمینی می‌شود (Naghdifar *et al.*, 2018).

لزوم شناخت تغذیه آب‌های زیرزمینی از آنجا ناشی می‌گردد که این منابع قسمت اعظم آب‌های شیرین قابل استفاده را در مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهند. با پیش‌بینی دقیق تغذیه آب زیرزمینی می‌توان از آن در برنامه‌ریزی برای تامین منابع آب قابل اعتماد و نیز مدیریت این منابع استفاده نمود. مدل‌های عددی از جمله روش‌های کم‌هزینه و پرکاربرد

کشور ایران با متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. با توجه به میزان ۲۵۰ میلی‌متر بارندگی سالانه در سطح کشور، هر سال حدود ۴۱۳ میلیارد متر مکعب آب حاصل از نزولات جوی در ایران وجود دارد که ۷۸ درصد آن مربوط به بارش‌ها در مناطق کوهستانی بوده و بارش بر روی دشت‌ها، ۲۲ درصد باقی‌مانده را شامل می‌شود. در مجموع ۷۲ درصد از این بارندگی‌ها بلافاصله از طریق تبخیر و تعرق وارد جو می‌شوند؛ بنابراین، حجم قابل استحصال در حدود ۲۸ درصد نزولات جوی بوده که این رقم بسیار اندک است. براساس گزارشات بخش اعظم منابع آبی موجود در کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود (Ebrahimian and Hassnli, 2016). بخشی از این آب دوباره به منابع آب زیرزمینی برمی‌گردد.

جریان برگشتی آبیاری عبارت است از مقدار آب مازاد

معادله موج-سینماتیکی ریچاردز به تخمین جریان انتقال یافته از ناحیه غیراشباع به آب زیرزمینی کمک می‌کند، اما فرضیاتی که در استخراج این معادله (از جمله همگن بودن منطقه غیر اشباع) استفاده شده است، کاربرد آن را محدود می‌نماید (Twarakavi *et al.*, 2008).

در پژوهش حاضر، میزان تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از حل فرم کامل معادله ریچاردز در اراضی با لایه‌بندی‌های مختلف در دشت نیشابور برآورد شده است. با توجه به اینکه یکی از کاستی‌های مشترک در اکثر پژوهش‌های یاد شده در بندهای قبل، محدود بودن آن‌ها به الگوهای کشت و آبیاری در شرایط کنونی در دشت نیشابور است، در پژوهش حاضر، تغذیه آب زیرزمینی تحت الگوهای کشت و آبیاری متنوع مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

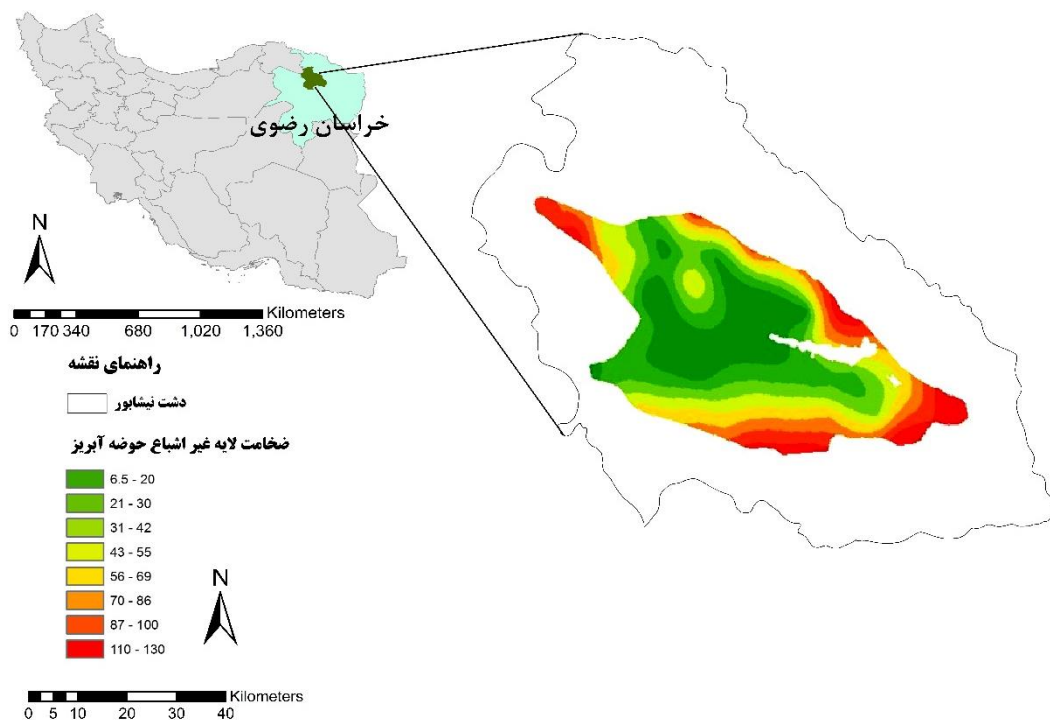
### منطقه مورد مطالعه

موقعیت مکانی پژوهش، آبخوان دشت نیشابور می‌باشد (شکل ۱- الف) که به دلیل اهمیت مسئله‌ی بیلان آب زیرزمینی و منفی بودن آن در این دشت، انتخاب شده است. حوزه آبریز دشت نیشابور جزئی از حوزه آبریز کویر مرکزی ایران بوده و در شمال شرق آن قرار می‌گیرد. محدوده‌ی مطالعاتی نیشابور با وسعت کل ۷۵۰۰ کیلومتر مربع که حدود ۴۳۰۰ کیلومتر مربع آن را دشت و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد در طول جغرافیایی ۱۳° و ۵۸° تا ۳۰° و ۵۹° و عرض جغرافیایی ۴۰' و ۳۵' تا ۳۹' و ۳۶° واقع شده است. کشت غالب در دشت نیشابور محصول گندم با سطح زیر کشت (آبی و دیم) ۱۳۹۱۶ هکتار می‌باشد.

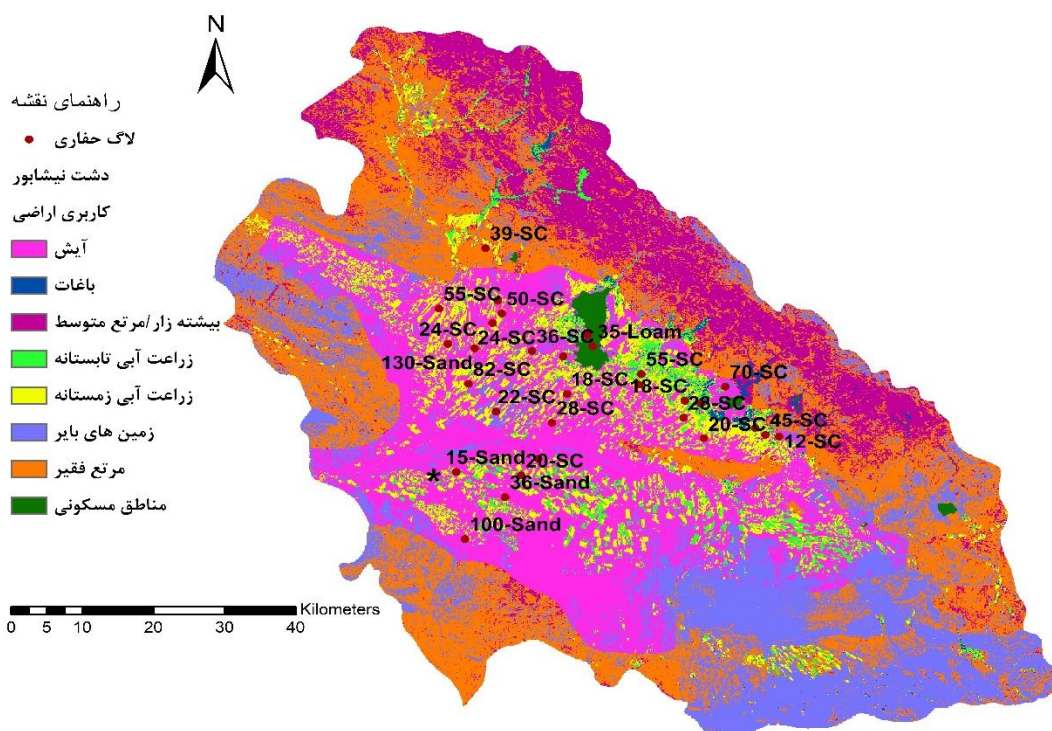
### کاربری اراضی دشت نیشابور و موقعیت لاگ‌های حفاری

۳۰ لاگ حفاری براساس تنوع عمق سطح ایستایی و موقعیت مکانی و پراکندگی در سطح آبخوان، بیشتر در محل‌های زراعی برای مدل‌سازی انتخاب شدند. شکل (۱) موقعیت قرارگیری لاگ-های حفاری نسبت به کاربری اراضی دشت نیشابور را نشان می‌دهد. لاگ‌های حفاری با نوع بافت لوم ۴، شن ۵ و لوم رسی-شنی ۶ و عمق سطح ایستایی معرفی شدند (شکل ۱- ب). انتخاب لاگ-های حفاری براساس موقعیت قرارگیری آن‌ها نسبت به زراعت آبی زمستانه انجام شد.

برای پیش‌بینی حرکت آب در محیط‌های اشباع/غیراشباع می‌باشند که کاربرد آن‌ها توسط محققان ایرانی و خارجی جهت برآورد تغذیه حاصل از آب آبیاری در مزارع تحت کشت گیاه‌های مختلف به اثبات رسیده است (Jiménez-Martinez *et al.*, 2009; Min *et al.*, 2015; Naghedifar *et al.*, 2018; Szymkiewicz *et al.*, 2019). در این زمینه و در مقیاس خرد، (Zaki 2013) استفاده از روش سطح شار صفر به اندازه‌گیری میدانی جریان برگشتی حاصل از آبیاری مزرعه‌ای تحت کشت گیاه تریتیکاله<sup>۱</sup> واقع در نیشابور با دو سیستم آبیاری سطحی و زیرسطحی پرداخت. گرچه این پژوهش توانست توصیف مناسبی از تغذیه در قسمت‌های مختلف مزرعه را نشان دهد، اما همچنان نیاز به یک مدل کالیبره‌شده برای برآورد تغذیه در شرایط مختلف (شرایط دمایی متفاوت، گیاه‌های مختلف و نیز الگوهای مختلف آبیاری و بارندگی) احساس می‌شد. بدین سبب Lak (2014) و Beykzadeh *et al.* (2016) با اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی خاک مزرعه و استفاده از تعداد اندکی از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط (Zaki 2013)، مدل هایدروس یک‌بعدی<sup>۲</sup> را کالیبره نموده و میزان جریان برگشتی آبیاری را برآورد کردند. در این دو پژوهش به دلیل عدم استفاده از داده‌های غنی برای کالیبره کردن مدل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تطابق خوبی نداشته و بنابراین جریان برگشتی آبیاری شبیه‌سازی شده چندان قابل اعتماد نبود. بنابراین، Naghedifar *et al.* (2018) با بالا بردن دقت مکانی داده‌های اندازه‌گیری شده (۱۰ چاهک مشاهداتی با عمق‌های ۲ تا ۶ متری و استفاده از ۷۶ سنسور رطوبتی) برای کالیبراسیون مدل هایدروس یک‌بعدی، نتایج رضایت‌بخش‌تری نسبت به پژوهش‌های قبل بدست آوردند. در مقیاس کلان‌تر نسبت به پژوهش‌های مذکور، Izady (2011) ضمن ارائه یک مدل مفهومی جامع برای آبخوان دشت نیشابور، مدل تلفیقی جریان‌های سطحی-زیرزمینی را با استفاده از نرم‌افزارهای SWAT و MODFLOW توسعه داده و از این طریق تغذیه آب زیرزمینی را برآورد نمودند (Harbaugh, 2005; Nazarieh *et al.*, 2007). علاوه بر این، (Gassman *et al.*, 2018) افزون بر تلفیق جریان سطحی زیرزمینی در دشت نیشابور، حرکت آب در ناحیه غیراشباع را با حل فرم موج-سینماتیکی<sup>۳</sup> معادله ریچاردز یک‌بعدی شبیه‌سازی نموده و تغذیه آب زیرزمینی را در یک منطقه تحت آبیاری برآورد کردند. هر چند که استفاده از



(الف)



(ب)

شکل ۱- (الف) موقعیت قرارگیری دشت نیشابور در خراسان رضوی به همراه ضخامت لایه غیر اشباع در حوضه آبریز و نیز (ب) نقشه کاربری اراضی دشت نیشابور

می‌باشد (رابطه ۶):

$$\alpha(h, z) = \begin{cases} \frac{h - h_4}{h_3 - h_4}, & h_3 > h > h_4 \\ 1, & h_2 \geq h \geq h_3 \\ \frac{h - h_1}{h_2 - h_1}, & h_1 > h > h_2 \\ 0, & h \leq h_4 \text{ or } h \geq h_1 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۶})$$

بر طبق این رابطه، چنانچه  $h < h_4$  باشد (پتانسیل ماتریک خاک در نقطه پژمردگی یا کمتر از آن باشد) فرض می‌شود که جذب آب نیز صفر است. در صورتی که پتانسیل ماتریک خاک بین  $h_2$  و  $h_3$  باشد، جذب آب بهینه تصور می‌شود. در حالی که در فشار بین  $h_3$  و  $h_4$  و نیز بین  $h_1$  و  $h_2$  جذب آب به صورت خطی همراه با  $h$  به ترتیب، افزایش و کاهش می‌یابد. در صورتی که رطوبت خاک به نقطه اشباع نزدیک شود ( $h > h_1$ )، میزان جذب آب مساوی با صفر در نظر گرفته می‌شود.

#### بارندگی و آبیاری

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل بارندگی و تبخیر-تعرق و شاخص سطح برگ برای یک دوره مطالعاتی ۷ ساله، (از سال زراعی ۸۷-۸۶ الی ۹۳-۹۲) می‌باشد. دلیل انتخاب این ۷ سال برای شبیه‌سازی، داده‌های در دسترس و کامل در این سال-ها می‌باشد. سیستم آبیاری سطحی از نوع کرتی که بطور معمول در آبیاری گندم در دشت نیشابور استفاده می‌شود در این پژوهش مد نظر قرار گرفت.

#### سناریوهای مختلف آبیاری

در این پژوهش دو سناریو برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است که سناریو اول دارای سه حالت و سناریو دوم دارای یک حالت می‌باشد. اطلاعات زراعی استفاده شده در این پژوهش از مرکز تحقیقات کشاورزی استان خراسان رضوی اخذ گردیده و هدف از انجام این تحقیق مقایسه بین سناریوهای مختلف آبیاری و تاثیر آن بر آب برگشتی بر اساس شبیه‌سازی عددی است. بر-اساس اطلاعات اخذ شده از مرکز تحقیقات کشاورزی استان خراسان رضوی، طول دوره رشد گندم ۲۳۳ روز بوده و نیاز خالص آبیاری ۵۰۴ میلی‌متر است که در ۷ نوبت در طول فصل رشد و در هر نوبت آبیاری ۷۲ میلی‌متر آب در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. براین اساس سناریو اول در سه حالت می‌باشد؛ حالت اول، ۵ نوبت آبیاری با عمق آبیاری ۱۰۰/۸ میلی‌متر که دور آبیاری بیشتر از حد معمول می‌باشد و حالت دوم، ۱۰ نوبت آبیاری که مقدار آب کم در دفعات بیشتری در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. در این حالت عمق آبیاری ۵۰/۴ میلی‌متر می‌باشد. حالت سوم، با ۷ نوبت آبیاری

#### مدل عددی

در این پژوهش برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک از نرم‌افزار هایدروس یک بعدی (Šimůnek et al., 2018) استفاده شده است. هایدروس یک بعدی مدلی عددی است که به منظور شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما داده شده است. این مدل توانایی حل عددی معادله ریچاردز (Richards., 1931) برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک در محیط اشباع-غیراشباع خاک (رابطه ۱) و معادلات همرفت-انتشار برای شبیه‌سازی حرکت املاح و گرما در خاک را دارا است. معادله ریچاردز معمولاً با یک جمله تخلیه تلفیق می‌شود تا جذب آب توسط ریشه گیاه را توصیف نماید.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} - S_a \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه  $S_a$  میزان جذب آب توسط ریشه ( $s^{-1}$ )،  $K$

هدایت هیدرولیکی غیر اشباع ( $m s^{-1}$ )،  $h$  مکش ماتریک ( $m$ ) می‌باشد. جهت حل معادله ریچاردز، باید رطوبت حجمی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع به صورت تابعی از مکش ماتریک بیان شوند. معمول‌ترین رابطه مورد استفاده نرم‌افزار هایدروس برای توصیف منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع (که توابع کاملاً غیرخطی با پتانسیل ماتریک هستند) روابط van Genuchten (1980) است (روابط ۲، ۳ و ۴).

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

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

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

که در این روابط  $S_e$  درجه اشباع موثر،  $\theta_s$  رطوبت اشباع ( $m^3 m^{-3}$ )،  $\theta_r$  رطوبت باقیمانده ( $m^3 m^{-3}$ )،  $n$  و  $m$  پارامترهای شکل<sup>۱</sup> هستند. حداکثر جذب آب توسط ریشه به عوامل مختلفی از جمله طول ریشه، عمق ناحیه ریشه و طول تجمع ریشه در اعماق خاک بستگی دارد. میزان جذب آب توسط ریشه در مدل هایدروس با استفاده از رابطه (۵) نشان داده می‌شود (Šimůnek and Hopmans., 2009):

$$S_a(h, z, t) = \alpha(h, z) b(z) T_p(t) \quad (\text{رابطه ۵})$$

در این رابطه،  $\alpha(h, z)$  تابع بدون بعد واکنش به تنش خشکی (و شوری)،  $b(z)$  تابع توزیع جذب آب توسط ریشه ( $m^{-1}$ )،  $T_p(t)$  تعرق پتانسیل ( $m s^{-1}$ ) می‌باشند. با اعمال تابع واکنش به تنش خشکی در معادله (۵)، مقدار پتانسیل آب جذب شده توسط ریشه به مقدار واقعی تبدیل خواهد شد. در میان مدل‌های متنوع ارائه شده برای این تابع (Skaggs et al., 2006) مدل Feddes et al. (1978) از پرکاربردترین توابع در این زمینه

پتانسیل پوشش گیاهی منطقه می‌توان از رابطه متداول زیر استفاده نمود (Allen et al., 1998).

$$ET_p = K_c \times ET_0 \quad (\text{رابطه ۸})$$

$ET_p$  تبخیر و تعرق پتانسیل و  $K_c$  ضریب گیاهی است.

#### ویژگی لاگ‌های حفاری منطقه

خصوصیات لاگ حفاری شامل عمق، بافت خاک و تعداد لایه منطقه غیر اشباع از شرکت مهندسی مشاور هیدروتک توس مشهد جمع‌آوری و طبقه بندی شدند. اطلاعات حفاری مربوط به سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۸۰ می‌باشد. برای تعیین بافت خاک هر لاگ حفاری از مقدار درصد ترکیبات و سایر اطلاعات موجود هر لاگ استفاده شده و کلاس‌های بافت خاک منطقه مورد مطالعه بر اساس طبقه بندی وزارت کشاورزی امریکا (USDA) تهیه شده و سپس ضرایب هیدرولیکی هر کلاس (گروه) بافتی بر اساس پژوهش (Carsel and Parrish (1988) تعیین شد (جدول ۱). ۷۰ درصد لاگ‌های حفاری دارای بافتی همگن و ۳۰ درصد لاگ‌های حفاری ناهمگن (چند لایه) می‌باشند. از میان لاگ‌های حفاری دارای بافت همگن، ۱۹ درصد از نوع گروه ۱، ۲۳ درصد از نوع گروه ۳ و ۵۷ درصد از گروه ۴ می‌باشند. کمترین عمق سطح ایستایی ۱۲ متر و بیشترین عمق سطح ایستایی ۱۳۰ متر بوده و سطح ایستایی مابقی لاگ‌های حفاری بین این دو مقدار هستند. شرایط اولیه برای همه لاگ‌های حفاری یکسان و در ۳۰ سانتی‌متر اول پروفیل خاک در حد نقطه پژمردگی و برای مابقی اعماق در حد ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد.

که بطور معمول در مزارع دشت نیشابور استفاده می‌شود، در نظر گرفته شد. در این سناریوها گندم در اواسط آبان ماه کشت می‌شود و در اواخر خرداد ماه برداشت می‌شود و بعد از برداشت، زمین تا آبان ماه سال بعد در حالت آیش قرار می‌گیرد و این روند برای سال‌های آتی (۷ سال) ادامه دارد. در سناریوی دوم بعد از برداشت گندم (با ۷ نوبت آبیاری و عمق آبیاری ۷۲ میلی‌متر)، محصول تابستانه گوجه فرنگی با دوره رشد ۱۳۲ روز و نیاز خالص آبیاری ۷۱۱ میلی‌متر با دور آبیاری ۱۰ روز در زمین کاشته می‌شود. دلیل انتخاب ۷ نوبت آبیاری گندم در این سناریو، رایج بودن آن در دشت نیشابور می‌باشد.

#### تبخیر و تعرق

با توجه به ایستگاه سینوپتیک منطقه و دسترسی به داده‌های هواشناسی از روش فائو پنمن-مانتیت (Allen et al., 1998) برای بدست آوردن تبخیر و تعرق گیاه مرجع استفاده شد:

(رابطه ۷)

$$ET_0 = \frac{0/408 \Delta (Rn - G) + \gamma [890(T + 273)]U2(es - ea)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U2)}$$

در این رابطه،  $ET_0$  تبخیر تعرق مرجع ( $\text{mm day}^{-1}$ )،  $Rn$  تابش خالص در سطح زمین ( $\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$ )،  $T$  متوسط دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین ( $^{\circ}\text{C}$ )،  $U2$  متوسط سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $\text{m s}^{-1}$ )،  $es - ea$  کمبود فشار بخار در ارتفاع دو متری ( $\text{KPa}$ )،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار ( $\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )،  $\gamma$  ضریب ثابت سایکرومتری ( $\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )،  $G$  شار گرما به داخل خاک ( $\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ) است. به منظور محاسبه تبخیر و تعرق

جدول ۱- طبقه بندی بافت خاک بر اساس پژوهش (Carsel and Parrish (1988)

$K_s(m/d)$	$n$	$\alpha(1/m)$	$\theta_s$	$\theta_r$	بافت خاک	گروه
۷/۱۲۸	۲/۶۳	۱۴/۵	۰/۴۳	۰/۰۴۵	شن	۱
۰/۰۶	۱/۳۷	۱/۶	۰/۴۶	۰/۰۳۴	سیلت <sup>۱</sup>	۲
۰/۲۴۹۶	۱/۵۶	۳/۶	۰/۴۳	۰/۰۷۸	لوم	۳
۰/۳۱۴۴	۱/۴۸	۵/۹	۰/۳۹	۰/۱	لوم رسی شنی	۴
۰/۰۲۸۸	۱/۲۳	۲/۷	۰/۳۸	۰/۱	رس شنی <sup>۲</sup>	۵
۰/۰۴۸	۱/۰۹	۰/۸	۰/۳۸	۰/۰۶۸	رس <sup>۳</sup>	۶

پتانسیل در سناریوی کشت گندم-آیش با ۷ نوبت آبیاری و سناریو کشت گندم-محصول تابستانه (گوجه فرنگی) را نشان می‌دهد. در سناریوی کشت گندم-آیش مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه گندم در فصل کشت و تبخیر و تعرق خاک بدون پوشش گیاهی (مطابق دستورالعمل‌های موجود در نشریه فائو ۵۶) در زمان آیش

داده‌های مربوط به لاگ‌های حفاری به صورت فایلی جداگانه از طریق لینک زیر قابل دانلود خواهد بود:

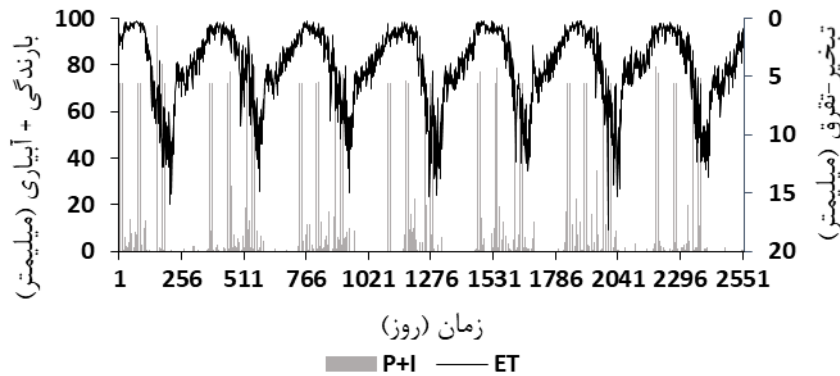
<https://drive.google.com/uc?export=download&id=18ncpd8IIIFDjzqiM4f96GJAXgCKKrh7bV>

#### بحث و نتایج

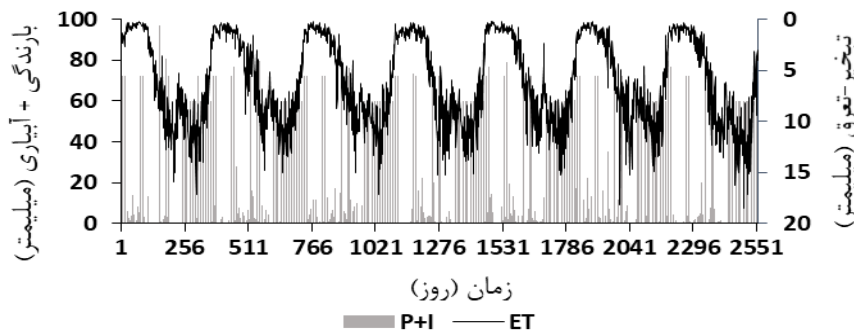
شکل (۲) تغییرات بارندگی و آبیاری به همراه تبخیر و تعرق

پاییز و تبخیر و تعرق گوجه‌فرنگی برای کشت فصل تابستان در نظر گرفته شد.

در نظر گرفته شد. در سناریو کشت گندم-محصول تابستانه (گوجه‌فرنگی) مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل گندم برای کشت فصل



(الف)



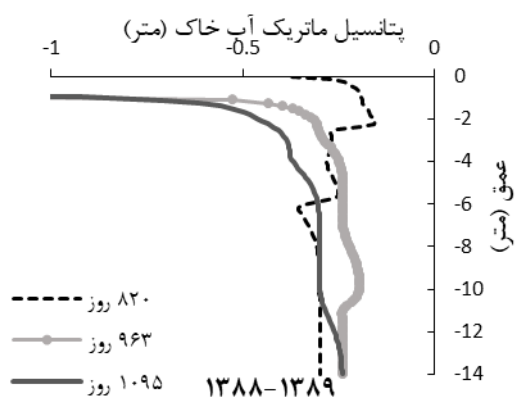
(ب)

شکل ۲- تغییرات بارندگی + آبیاری و تبخیر و تعرق در سناریوهای (الف) گندم-آیش و (ب) گندم- محصول تابستانه (گوجه‌فرنگی)

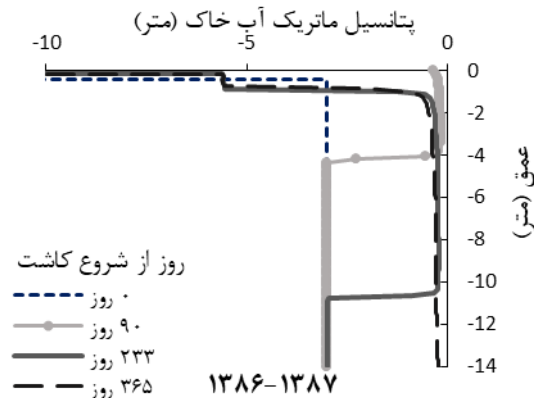
حرکت جبهه رطوبتی تحت تاثیر شرایط اولیه فرضی قرار دارد اما در سال‌های بعدی الگوی پروفیل رطوبتی بیشتر تحت تاثیر آبیاری، بارندگی و تبخیر و تعرق می‌باشد که در هر سال الگوی تقریباً یکسانی را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که جبهه رطوبتی حرکت رو به پائین خود را تا انتهای لاگ حفظ کرده است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در حالت ۵ نوبت آبیاری در لاگ حفاری ۸۰۴۷۳۸، چرخه هیدرولوژیکی پایدار بوده و احتمالاً تجمع نمک بر روی زمین ایجاد نخواهد شد. اظهار نظر قطعی در این مورد نیاز به اندازه‌گیری میدانی و یا انجام شبیه‌سازی مواد محلول از طریق معادله همرفت-انتشار را دارد که این بحث خارج از موضوع مقاله می‌باشد. نمودارهای مربوط به تغییرات مکش نیز نتایج مربوط به تغییرات رطوبت را تایید می‌کند. دلیل حداکثر بودن میزان تغذیه این لاگ حفاری در این سناریو نسبت به دو سناریوی ۷ و ۱۰ نوبت آبیاری را می‌توان توزیع حجم آب آبیاری در دفعات کمتر که خود باعث کاهش در تبخیر-تعرق می‌شود، دانست.

نتایج مدل‌سازی برای حالت کشت گندم پاییزه-آیش در این حالت از شبیه‌سازی، برای تحلیل تغییرات رطوبتی منطقه غیر اشباع، لاگ حفاری که بیشترین مقدار نفوذ عمقی را در طول دوره مطالعاتی داشته در نظر گرفته شد. شکل (۴) تغییرات پتانسیل ماتریک در عمق مربوط به لاگ حفاری با شماره اشتراک ۸۰۴۷۳۸ (شکل ۱-ب\*) در سناریو ۵ نوبت آبیاری، را در سال‌های فرد نشان می‌دهد. مقدار تغذیه این لاگ حفاری در طول ۷ سال دوره شبیه‌سازی ۲۲۷۶/۶۷ میلی‌متر که بطور متوسط ۳۲۵/۲۳ میلی‌متر در سال می‌باشد.

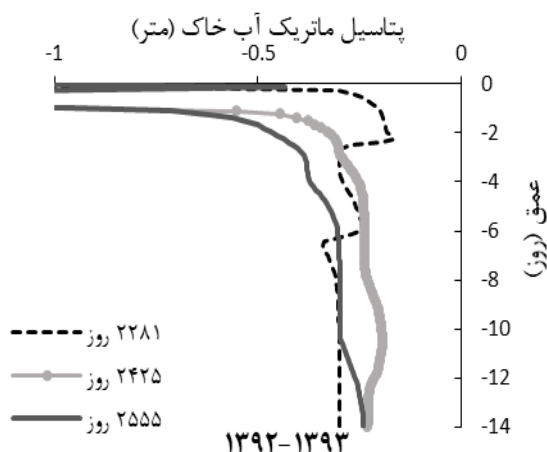
لاگ حفاری با شماره اشتراک ۸۰۴۷۳۸ دارای سطح ایستابی در عمق ۱۵ متری از سطح زمین است و منطقه غیر اشباع آن دارای بافت شنی می‌باشد. با توجه به منحنی‌های مکش در عمق مشاهده می‌شود که جبهه‌ی رطوبتی در سال اول تغییرات قابل توجهی داشته است و با سرعت متوسط ۰/۰۳۸ متر بر روز به عمق سطح ایستابی ۱۴ متر می‌رسد و در سال‌های آتی تغییرات رطوبتی تقریباً از الگوی یکسانی پیروی می‌کند. در سال اول



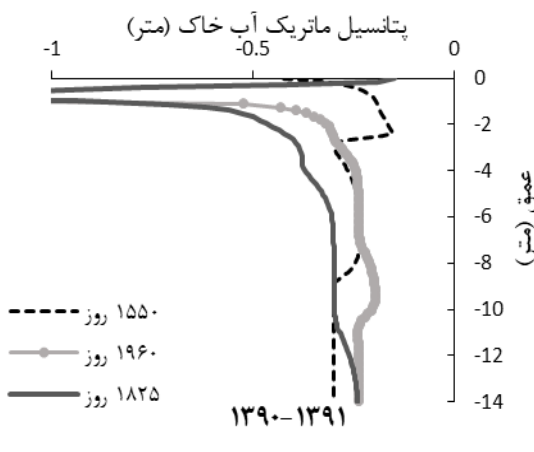
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۳- منحنی‌های مکش لاگ حفاری ۸۰۴۷۳۸ با ۵ نوبت آبیاری

### بافت لوم-رسی-شنی

با توجه به نتایج شبیه‌سازی مشاهده شد که مقدار تغذیه به‌دست-آمده برای لاگ‌های حفاری با بافت لوم رسی شنی در عمق‌های بیشتر از ۲۰ متر (۱۳ لاگ)، مقدار یکسان و بطور میانگین در حدود ۱/۰۴ میلی‌متر در سال می‌باشد ولی برای عمق‌های مساوی و کمتر از ۲۰ متر (۶ لاگ) مقدار تغذیه در حالت ۱۰ نوبت آبیاری به طور میانگین ۱۶/۷ میلی‌متر در سال، مقدار تغذیه در حالت ۵ نوبت آبیاری به طور میانگین ۶ میلی‌متر در سال و مقدار تغذیه در حالت ۷ نوبت آبیاری به طور میانگین ۲۱ میلی‌متر در سال می‌باشد، این امر نشان‌دهنده تاثیر زیاد عمق بلوک خاک بر مقدار تغذیه در این نوع بافت خاک می‌باشد. دلیل کاهش مقدار تغذیه در حالت ۵ نوبت آبیاری نسبت به دو حالت دیگر را می‌توان افزایش تعرق در گیاه به‌موجب قرار دادن مقدار آب بیشتر در فاصله زمانی طولانی‌تر دانست. با توجه به تغییرات فلاکس در طول دوره شبیه‌سازی (شکل ۴) برای لاگ حفاری با بافت لوم-

### تغذیه شبیه‌سازی شده در بافت‌های متفاوت خاک

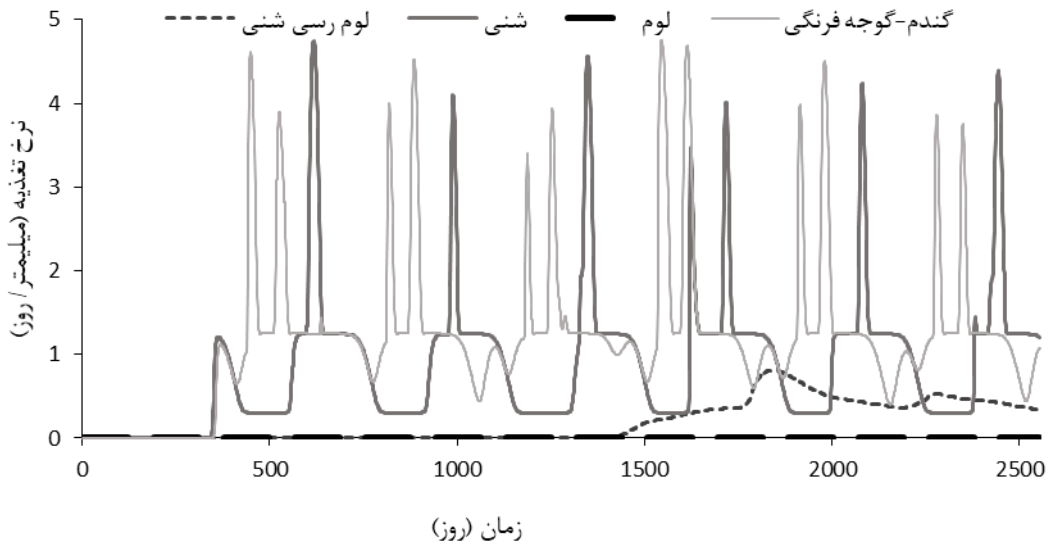
#### بافت لومی

با توجه به نتایج شبیه‌سازی مشاهده شد که لاگ‌های حفاری با بافت لومی (۶ لاگ) دارای مقدار تغذیه یکسان و بطور میانگین در حدود ۲/۹۶ میلی‌متر در سال هستند و سناریوهای آبیاری تاثیری در میزان تغذیه نداشته‌اند. علت این امر را می‌توان عمق زیاد بلوک خاک در لاگ‌های حفاری با بافت لومی دانست. با توجه به تغییرات فلاکس به همراه تغییرات میزان آب کاربردی (بارندگی+آبیاری)، تبخیر و تعرق در طول دوره شبیه‌سازی برای لاگ حفاری با بافت لومی (عمق سطح ایستابی ۲۲ متر) مشاهده شد که مقدار آب کاربردی و تعرق در طول هفت سال زراعی ابتدا حالت صعودی و سپس روند نزولی دارد و این روند در طول ۷ سال دوره شبیه‌سازی تکرار می‌شود و نرخ تغذیه (شکل ۴) در طول دوره شبیه‌سازی مقدار ثابتی داشته است که به علت عمق زیاد بلوک خاک و نگهداشت بالای خاک لومی می‌باشد.



کاربردی صرف ذخیره رطوبت در پروفیل خاک می‌شود و با افزایش رطوبت خاک (و در نتیجه افزایش هدایت هیدرولیکی غیراشباع)، حرکت آب به عمق‌های زیرین تسریع می‌شود.

رسی-شنی (عمق سطح ایستابی ۱۲ متر) مشاهده شد که در چهار سال اول نرخ تغذیه صفر است و تغییرات در سه سال آخر رخ می‌دهد. چنین به نظر می‌رسد که در سال‌های اول مقدار آب



شکل ۴- تغییرات نرخ تغذیه نسبت به زمان در لاگ‌هایی با بافت‌های متفاوت و تحت سناریوهای مختلف

دارای تغییرات رطوبتی بیشتری نسبت به حالت آیش‌بندی زمین بوده است و این امر به دلیل وجود آبیاری در فصل کاشت محصول تابستانه می‌باشد. بیشترین مقدار نفوذ عمقی در این سناریو در طول ۷ سال حدود  $3083/3$  میلی‌متر که بطور متوسط  $440/47$  میلی‌متر در سال می‌باشد.

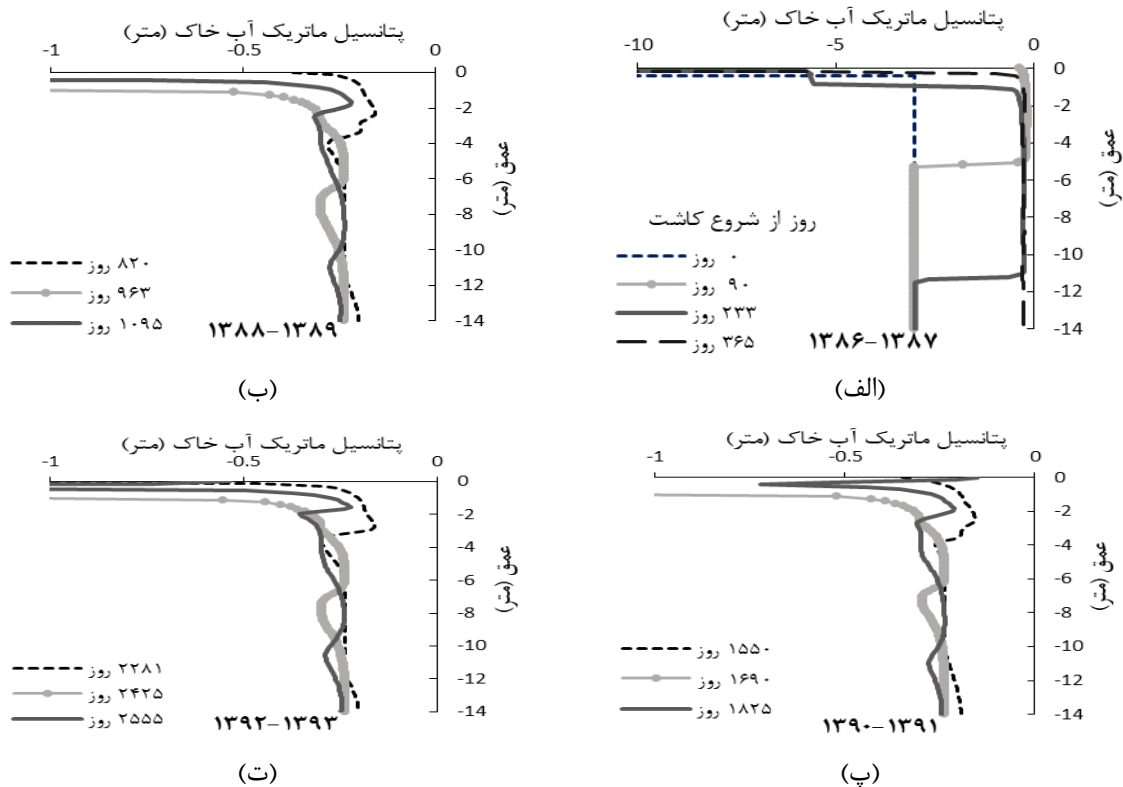
با توجه به تغییرات فلاکس به همراه تغییرات میزان آب کاربردی (بارندگی+آبیاری)، تبخیر و تعرق در طول دوره شبیه-سازی برای لاگ حفاری با شماره اشتراک  $804738$  (عمق سطح ایستابی ۱۵ متر) مشاهده شد که میزان تبخیر و تعرق در این سناریو دارای مقدار بیشتری نسبت به سناریو کشت گندم-آیش می‌باشد که به دلیل کشت گوجه‌فرنگی در فصل تابستان می‌باشد. به‌علاوه مشاهده می‌شود که نرخ تغذیه (شکل ۴) در این سناریو در سال اول صفر و از سال دوم به بعد ابتدا روند صعودی و در آخر هر سال بصورت کاهشی است. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که آب مصرفی گندم کمتر و قسمت عمده زمان کشت آن در فصل پاییز، زمستان و اوایل بهار است که دمای هوا پایین‌تر و در نتیجه تبخیر و تعرق کمتر بوده و نسبت به گوجه‌فرنگی که در فصل تابستان کشت می‌شود (که به دلیل دما بالای هوا، تبخیر و تعرق بیشتر است) نرخ تغذیه ناشی از کشت گندم بیشتر خواهد بود.

#### بافت شنی

با توجه به نتایج شبیه‌سازی مشاهده شد که مقدار تغذیه به‌دست آمده در لاگ‌های حفاری با بافت شنی (۵ لاگ) در حالت ۱۰ نوبت آبیاری به طور میانگین  $109/86$  میلی‌متر در سال، مقدار تغذیه در حالت ۷ نوبت آبیاری به طور میانگین  $131/5$  میلی‌متر در سال و مقدار تغذیه در حالت ۵ نوبت آبیاری به طور میانگین  $142/11$  میلی‌متر در سال می‌باشد. با توجه به تغییرات فلاکس به همراه تغییرات میزان آب کاربردی (بارندگی+آبیاری)، تبخیر و تعرق در طول دوره شبیه‌سازی برای لاگ حفاری با بافت شنی (عمق سطح ایستابی ۱۵ متر) مشاهده شد تغییرات فلاکس (شکل ۴) در لاگ حفاری با بافت شنی از سال دوم شروع شده و در سال‌های بعدی دارای روند یکسانی می‌باشد. هدایت هیدرولیکی بافت شنی زیاد و نگهداشت آب در خاک آن بسیار کم است، که خود دلیلی بر نفوذ عمقی زیاد در بافت شنی می‌باشد.

#### نتایج مدل سازی برای حالت کشت گندم پاییزه-محصول تابستانه

با توجه به شکل (۵) که پروفیل‌های پتانسیل ماتریک خاک لاگ حفاری با شماره اشتراک  $804738$  (عمق سطح ایستابی ۱۵ متر، بافت شنی) را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که عمق‌های زیرین



شکل ۵- منحنی‌های مکش لاگ حفاری با شماره اشتراک ۸۰۴۷۳۸ در سناریو کشت گندم-گوجه فرنگی

**توزیع تغذیه و پهنه‌بندی**

با توجه به شکل (۶) که در آن لاگ‌های حفاری با نوع بافت لوم، شن و لوم-رسی-شنی (SC) و مقدار عمق سطح ایستابی (متر) نشان داده شده‌اند، نمودار میله‌ای مقدار تغذیه در چهار سناریو در طول ۷ سال در سطح آبخوان را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار تغذیه مربوط به سناریو کشت گندم-محصول تابستانه می‌باشد و در لاگ‌های حفاری بدون نمودار میله‌ای، تغذیه در طول دوره شبیه‌سازی صفر می‌باشد.

جدول (۲) مقدار آب برگشتی ناشی از کشت گندم در سطح حوضه در طول دوره شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به جدول اگر تراز سطح آب در عمق کمتر از ۲۰ متر باشد، تغذیه حاصل از زمین تحت کشت گندم با سیستم آبیاری سطحی از نوع کرتی در طول ۷ سال، برابر با ۱۴/۹۰ میلیون مترمکعب خواهد بود. میزان تغذیه کل دشت ناشی از کشت گندم در طول ۷ سال برابر ۷۳/۰۴ میلیون مترمکعب می‌باشد.

**آنالیز حساسیت**

برای اینکه آنالیز حساسیت سه نوع بافت خاک موجود را در بر بگیرد، لاگ‌های حفاری از هر سه نوع بافت انتخاب شدند. مقدار اولیه هدایت هیدرولیکی اشباع برای سه نوع بافت لوم (عمق ۱۵ متر)، شن (عمق ۱۲ متر) و لوم رسی شن (عمق ۲۲ متر) به ترتیب ۰/۲۴۹۶ متر ب روزه، ۷/۱۲۸ متر بر روز و ۰/۳۱۴۴ متر بر روز می‌باشد. مقدار اولیه عمق آبیاری ۷۲ میلی‌متر از ۷ نوبت

آبیاری به دلیل متداول بودن در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. مقدار رطوبت اولیه برای حالت مبنا به صورت ۳۰ سانتی‌متر اول در حد نقطه پژمردگی و مابقی در حد ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد. در این روش، مدل با استفاده از داده‌های ورودی مذکور اجرا گردید. میزان تغذیه‌ای که در این حالت به دست آمد به عنوان حالت مبنا در نظر گرفته شد. سپس در هر نوبت یکی از داده‌های ورودی (عمق آبیاری، رطوبت اولیه و  $K_s$ ) را ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ و ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ تغییر داده و بقیه داده‌ها ثابت نگه داشته شدند و مدل با استفاده از شرایط جدید اجرا گردید و نتایج به دست آمده با نتایج در حالت مبنا مقایسه شدند.

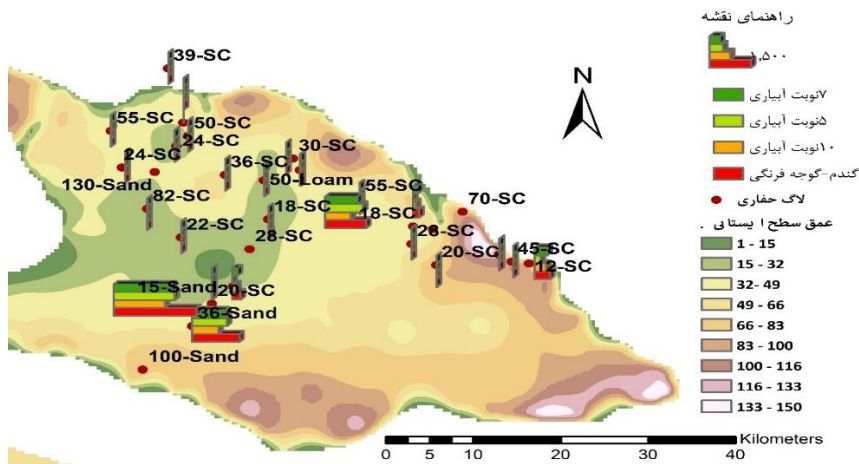
آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف ورودی به روش Lane and Frirra 1990 برای چند نمونه لاگ حفاری در شکل (۷) مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد رطوبت اولیه بیشترین حساسیت را در هر سه گروه داشت علت این حساسیت زیاد می‌تواند عمق زیاد لاگ‌های حفاری باشد. بدین ترتیب که با افزایش درصدی اندک به رطوبت اولیه، مقدار زیادی از آب در کل پروفیل خاک ذخیره شده و در مدت زمان طولانی به آبخوان آب زیرزمینی می‌پیوندد. حساسیت مدل به  $K_s$  در بافت شن دارای کمترین درجه حساسیت و در بافت لومی و لوم رسی شن از درجه متوسط می‌باشد. این تفاوت را می‌توان چنین توضیح داد که هدایت هیدرولیکی بالای بافت شن عامل محدودکننده‌ای برای میزان تغذیه نمی‌باشد اما در مورد خاک‌های لومی و لوم-

مدل برای عمق آبیاری در بافت لومی هیچ حساسیتی نشان نداد و در بافت شنی و لوم-رسی-شنی دارای درجه حساسیت زیاد می‌باشد.

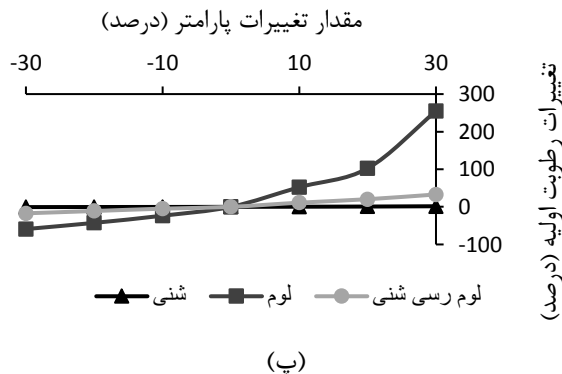
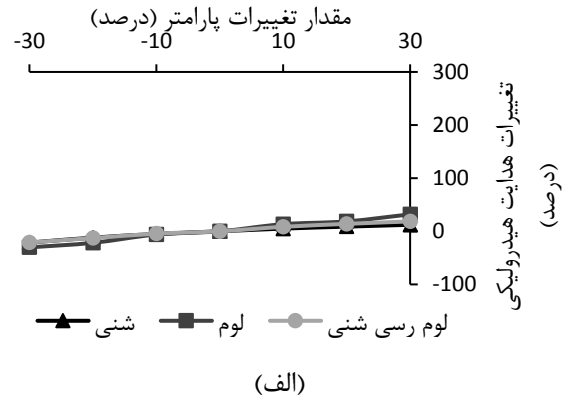
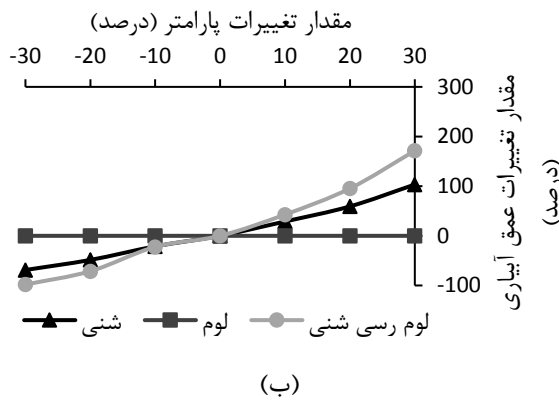
رسی-شنی هدایت هیدرولیکی نسبت به بافت شنی پایین‌تر است و تغییرات آن می‌تواند بر میزان تغذیه تاثیر چشم‌گیری داشته باشد.

جدول ۲-مقادیر تغذیه ناشی از آب کاربردی (بارندگی+آبیاری)

عمق تراز سطح آب(متر)	مساحت(کیلومترمربع)	آب برگشتی (متر)	تغذیه(میلیون مترمکعب)
≤۲۰	۴/۹	۳/۰۴	۱۴/۹۰
۵۰-۲۰	۲۴۷/۳۴	۰/۱۹	۴۷/۸۶
۱۰۰-۵۰	۲۰۲/۳۵	۰/۰۵	۱۰/۲۷
>۱۰۰	۱۶/۱۳	۰	۰



شکل ۶- نمودار میله‌ای تغذیه لاگ حفاری‌ها در سناریوهای مختلف آبیاری در سطح آبخوان



شکل ۷- درصد اختلاف هدایت هیدرولیکی (الف) عمق آب آبیاری (ب) و رطوبت اولیه (پ) نسبت به همان مولفه در شرایط مبنا

## نتیجه‌گیری

است، علت آن را می‌توان عمق زیاد بلوک خاک دانست. از نتایج حاصل از مدل‌سازی و با توجه به نمودار رطوبت حجمی در عمق-های مختلف مشاهده می‌شود که از سطح زمین تا عمق یک متری پروفیل‌های پتانسیل ماتریک دارای نوسانات بیشتری نسبت به سایر عمق‌ها هستند. در سناریو کشت گندم-محصول تابستانه، به دلیل آبیاری گیاه گوجه‌فرنگی در فصل تابستان افزایش میزان تغذیه در لاگ‌های حفاری مشاهده می‌شود که به‌موجب آن بیشترین مقدار تغذیه در لاگ حفاری با بافت شنی و عمق بلوک خاک ۱۵ متر بطور متوسط برابر با ۴۴۰/۴۷ میلی‌متر در سال (۶۰ درصد آب کاربردی) می‌باشد.

بررسی میزان تغذیه در سناریو کشت گندم-آیش نشان داد که بسته به نوع بافت، رفتار آن نسبت به تعداد نوبت‌های آبیاری متفاوت خواهد بود. حداکثر مقدار تغذیه در بافت شنی مربوط به سناریوی ۵ نوبت آبیاری (در بلوک خاکی با عمق ۱۵ متر)، در بافت لوم-رسی-شنی مربوط به سناریوی ۷ نوبت آبیاری (در بلوک خاکی با عمق ۱۲ متر) است که به‌ترتیب به‌طور متوسط برابر ۳۲۵/۲۳ میلی‌متر در سال (۴۵ درصد آب کاربردی)، ۶۸/۸۶ میلی‌متر در سال (۹/۵ درصد مقدار آب کاربردی) می‌باشد. در لاگ‌های حفاری با بافت لومی مقدار تغذیه در سناریوهای مختلف یکسان و برابر ۳/۵ میلی‌متر در سال (۰/۰۵ درصد آب کاربردی)

## REFERENCES

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., (1998). Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56 300. FAO, Rome, pp. 1-159 D05109.
- Beykzadeh, E., Ziaei, A. N., Ansari H. and Lak R., Zaki M. (2016). Comparison of groundwater recharge in a sprinkler- and furrow-irrigated field using unsaturated zone modeling. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 47(1), 147-158. (In Farsi)
- Carsel, R.F. and Parrish, R.S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*. 24, 755-769.
- Ebrahimian, H. and Hassanli, M. (2016) *Irrigation and groundwater recharge*. Tehran: Iran Water Resources Management Company, Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID). (In Farsi)
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J. and Zaradny, H. (1978). *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*. John Wiley and Sons, New York, NY.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., and Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250.
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process* (pp. 6-A16). Reston, VA: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Izady, A. (2011). Application and Assessment of a Developed Coupled-Groundwater-Surface Water Model in the Neishaboer Watershed. Ph.D. dissertation, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad. (In Farsi)
- Jafari, H., Raeisi, E., Hoehn, E. and Zare, M. (2012). Hydrochemical characteristics of irrigation return flow in semi-arid regions of Iran. *Hydrological sciences journal*, 57(1), 173-185.
- Jiménez-Martínez, J., Skaggs, T. H., Van Genuchten, M. T. and Candela, L. (2009). A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *Journal of Hydrology*, 367(1-2), 138-149.
- Lak, R. (2014). Estimation of groundwater recharge in irrigated farms using unsaturated zone modeling, case study: Neyshabour Plain. MSc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad. (In Farsi)
- Min, L., Shen, Y. and Pei, H. (2015). Estimating groundwater recharge using deep vadose zone data under typical irrigated cropland in the piedmont region of the North China Plain. *Journal of Hydrology*, 527, 305-315.
- Naghedifar, S. M., Ziaei, A. N. and Ansari, H. (2018). Simulation of irrigation return flow from a Triticale farm under sprinkler and furrow irrigation systems using experimental data: A case study in arid region. *Agricultural water management*, 210, 185-197.
- Nazarieh, F., Ansari, H., Ziaei, A. N., Izady, A., Davari, K. and Brunner, P. (2018). Spatial and temporal dynamics of deep percolation, lag time and recharge in an irrigated semi-arid region. *Hydrogeology Journal*, 26(7), 2507-2520.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*, 1(5), 318-333.
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.T., (2018). The HYDRUS- 1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple Solutes in variably-saturated Media, Version 4.17. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA.
- Šimůnek, J. and Hopmans, J. W. (2009). Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecological modelling*, 220(4), 505-521.

- Skaggs, T. H., van Genuchten, M. T., Shouse, P. J. and Poss, J. A. (2006). Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agricultural Water Management*, 86(1-2), 140-149.
- Szymkiewicz, A., Savard, J. and Jaworska-Szulc, B. (2019). Numerical Analysis of Recharge Rates and Contaminant Travel Time in Layered Unsaturated Soils. *Water*, 11(3), 545.
- Twarakavi, N. K. C., Šimůnek, J., and Seo, S. (2008). Evaluating interactions between groundwater and vadose zone using the HYDRUS-based flow package for MODFLOW. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 757-768.
- van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Zaki, M. (2013). *Estimation of groundwater recharge from irrigated fields using zero flux method*. MSc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad. (In Farsi)