

Estimation of Groundwater Recharge Rate Using a Distributed Model (Case Study of Rafsanjan Aquifer, Kerman Province)

MOHAMMAD BABAIE¹, HAMED KETABCHI^{1*}

1. Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

(Received: Jan. 4, 2020- Revised: Feb. 19, 2020- Accepted: March. 7, 2020)

ABSTRACT

Water balance estimation techniques are one of the main issues in hydrology and the tools to face the important hydrological problems. One of the most important challenges to estimate the groundwater balance components is uncertainty in the proposed inflow and outflow parameters, such as recharge rate. The recharge rate is varied temporally and spatially and its direct measurement is very difficult. For this purpose, in this study to accurately estimate the recharge rate component of groundwater balance, WetSpss-M distributed model was applied using the meteorological data, landuse map, soil texture map, leaf area index map using Landsat8 images and operation wells data (irrigation of gardens and agricultural lands, industrial and drinking uses) in the study area of Rafsanjan plain, Kerman province. The model was run monthly for 8 years. In order to calibrate and validate the model, monthly surface flow measured data of the hydrometric station was used. Due to the negligible surface flow rates in the study area, actual evapotranspiration data estimated by remote sensing techniques were also used to evaluate and control the reliability of the data and different components of the water balance. According to the previous studies, the mean total precipitation and the average withdrawal from the operation wells during the simulation period are 300 and 683 MCM/year, respectively. The estimated evapotranspiration and groundwater recharge rate were averagely 564.7 and 422.1 MCM/year, respectively. The model results indicated that the two components of recharge and evapotranspiration rates contribute a large portion in the water balance of the plain.

Keywords: Groundwater Balance, Recharge Rate, WetSpss-M Model, Evapotranspiration.

برآورد نرخ تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از یک مدل توزیعی (مطالعه موردی آبخوان رفسنجان، استان کرمان)

محمد بابائی^۱، حامد کتابچی^{۱*}

۱. گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۲/۱۷)

چکیده

تکنیک‌های برآورد بیلان آب زیرزمینی، یکی از موضوعات اصلی در هیدرولوژی و ابزارهایی برای مواجهه با مشکلات مهم هیدرولوژیکی است. یکی از چالش‌های مهم پیش روی برآورد بیلان آب زیرزمینی، وجود عدم قطعیت‌ها در پارامترهای ورودی و خروجی آن است. از جمله این عدم قطعیت‌ها می‌توان به نرخ تغذیه آب زیرزمینی اشاره کرد. نرخ تغذیه به‌طور فزاینده‌ای در مکان و زمان‌های مختلف، متفاوت و اندازه‌گیری آن به‌طور مستقیم بسیار دشوار است. در همین راستا در مطالعه حاضر به‌منظور برآورد مؤلفه تغذیه آب زیرزمینی از مدل توزیعی WetSpas-M با استفاده از داده‌های هواشناسی، نقشه کاربری اراضی، نقشه بافت خاک، نقشه شاخص سطح برگ با استفاده از تصویر لندست ۸ و داده‌های چاه‌های بهره‌برداری در محدوده آبخوان رفسنجان در استان کرمان استفاده شد و مدل برای ۸ سال به‌صورت ماهانه اجرا گردید. به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل ابتدا از داده‌های دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری به‌عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده شد. با توجه به مقادیر ناچیز جریان سطحی در محدوده مورد مطالعه به‌منظور بررسی اطمینان به داده‌ها و تفکیک مؤلفه‌های بیلان آب از یکدیگر از داده‌های تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده توسط تکنیک‌های سنجش از دور نیز جهت کنترل محاسبات استفاده شد. طبق بررسی‌های انجام‌شده، متوسط بارش کل و متوسط تخلیه از چاه‌های محدوده مورد مطالعه در دوره شبیه‌سازی به ترتیب معادل ۳۰۰ و ۶۸۳ میلیون مترمکعب بر سال است که سهم تبخیر-تعرق و تغذیه آب زیرزمینی به‌طور متوسط به ترتیب ۵۶۵ و ۴۲۲ میلیون مترمکعب بر سال برآورد گردید. نتایج اجرای مدل، نشان‌دهنده سهم بسیار زیاد دو مؤلفه تبخیر-تعرق و تغذیه در بیلان محدوده است.

واژه‌های کلیدی: بیلان آب زیرزمینی، نرخ تغذیه، مدل WetSpas-M، تبخیر-تعرق.

مقدمه

(*et al.*, 2018). استفاده پایدار از آب‌های زیرزمینی به اطمینان از برآورد نرخ تغذیه متکی است. اندازه‌گیری نرخ تغذیه به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی برای یک محدوده مکانی بزرگ یک امری مهم در مدل‌سازی است (Delottier *et al.*, 2017) و ناهمگونی پوشش زمین و تغییرات ناشی از آن در فرایندهای سطح زمین، مانع استفاده از داده‌های با مقیاس نقطه‌ای برای ارزیابی منابع آب می‌شوند (Khalaf and Donoghue, 2012). تغییرات نرخ تغذیه به‌طور فزاینده‌ای در مکان و زمان‌های مختلف، متفاوت و اندازه‌گیری نرخ تغذیه به‌طور مستقیم بسیار دشوار است و (Canora *et al.*, 2018). علاوه بر این چالش، محاسبه مؤلفه‌های بیلان آب در مقیاس‌های منطقه‌ای و بزرگ‌تر با اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای به دلیل جمع شدن خطاها اغلب بیش از حد ناقص و دارای عدم قطعیت زیادی است (Crosbie *et al.*, 2018). همچنین برآورد درست از تغذیه و تبخیر-تعرق با استفاده از سنجش از دور که مبتنی بر بیلان آب است، به لحاظ بررسی خطاها در بیلان آب

به‌علت کاهش منابع آب سطحی و خشکسالی‌های پی‌درپی، به‌ناچار بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی فزونی یافته است. در این میان اطلاع از وضعیت بیلان آب زیرزمینی می‌تواند در مدیریت مناسب منابع آب منطقه کمک کند. بررسی مستندات موجود و همچنین برآوردهای بیلان انجام‌شده برای دشت‌های کشور ایران نشان می‌دهد که روش‌های مرسوم در ایران به جهت برآورد بیلان آب‌های زیرزمینی، منابع عدم قطعیت زیادی حتی تا چند برابر را به همراه دارند که در محاسبات بیلان در نظر گرفته نمی‌شوند. همچنین شدت اثر این عدم قطعیت‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای به محدوده مورد مطالعه وابسته است. از جمله این عدم قطعیت‌ها می‌توان به نرخ تغذیه آبخوان، ضریب آب برگشتی مصارف کشاورزی، ورودی و خروجی آبخوان، قابلیت انتقال و ضریب ذخیره آبخوان و حتی آب‌های محاسبه نشده مانند برداشت‌های ثبت‌نشده، دزدی آب و غیره اشاره کرد (Ketabchi

سنجنده TRMM و داده‌های رواناب از سنجنده TM و همچنین برآورد تبخیرتعرق با استفاده از سنجنده MODIS صورت گرفت و نتایج، دقت مناسب برآورد تغذیه توسط تصاویر ماهواره‌ای مبتنی بر بیلان آب را نشان داد (Coelho et al., 2017).

در مطالعه‌ای تأثیر تغییر کاربری اراضی بر اساس مدل WetSpas^۱ و GIS را در حوضه رودخانه گویشو چین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغذیه آب زیرزمینی شامل ۲۱٪ از مقدار بارش است در حالی که ۷۳٪ در قالب تبخیرتعرق از دست می‌رود و مجموع نرخ تغذیه آب‌های زیرزمینی سالانه در گروه گندم‌زار، علف‌زار، زمین‌های شهری و جنگل کاهش یافته است. نتیجه تغییر کاربری اراضی، کاهش ۴ میلیون مترمکعب تغذیه آب‌های زیرزمینی سالانه در منطقه مورد مطالعه با نرخ متوسط مکانی ۱۰۰ و ۹۸ میلی‌متر بر سال به ترتیب در سال‌های ۱۹۸۰ و ۲۰۰۵ بود. این اختلاف در درجه اول به دلیل افزایش مناطق شهری، روستایی و همچنین کاهش زمین‌های زراعی بوده است (Yan et al., 2018).

در مطالعه‌ای مدل WetSpas با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای از کاربری اراضی، بافت خاک، شیب توپوگرافی و همچنین داده‌های آب و هوایی مثل بارش، سرعت باد و تبخیر از تشت، برای دشت گافسا (دشت شمالی در تونس) آماده شد (Melki et al., 2017). به این منظور در بررسی تأثیر بارش باران بر تغذیه آب زیرزمینی در دشت گافسا تجزیه و تحلیل بارش بر اساس داده‌های بارش سالانه ثبت‌شده در ۶ ایستگاه بارش باران در یک دوره ۵۶ ساله (۲۰۱۵-۱۹۶۰) انجام شد و بعد از محاسبه تبخیرتعرق پتانسیل از سال ۱۹۶۰ تا سال ۲۰۱۱ (۵۲ سال)، مدل توزیع‌شده هیدرولوژیکی WetSpas برای تخمین تغذیه آب زیرزمینی استفاده شد. واسنجی مدل بر اساس ارزیابی مجموع تغذیه و رواناب برآورد شده توسط مدل هیدرولوژیکی WetSpas انجام گردید.

در مطالعه‌ای برای برآورد تغییرات مکانی و زمانی تغذیه آب‌های زیرزمینی از بارش باران در آبخوان دلتای نیل، انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر تحت مدل دائمی WetSpas برای دلتای نیل، داده‌های هواشناسی بارش، دما، سرعت باد و تبخیر از تشت را برای منطقه در سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۰۰ جمع‌آوری شد. خصوصیات ژئومورفولوژیکی مانند نوع خاک، توپوگرافی، عمق آب زیرزمینی و شیب نیز به‌عنوان داده‌های ورودی برای مدل WetSpas نیز گردآوری شد. همچنین نرم‌افزار ENVI برای طبقه‌بندی کاربری اراضی بر اساس تصاویر پوشش

می‌تواند بسیار مفید باشد. این امر به‌ویژه برای تحلیل ریسک یا عدم قطعیت مدل مهم است که تبدیل به یک بسته استاندارد در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی شود (Doble and Crosbie, 2017). بررسی و مرور مطالعات انجام شده، نشان‌دهنده توسعه روش‌های مختلفی برای برآورد مؤلفه تغذیه بیلان آب زیرزمینی است، اما در سال‌های اخیر برآورد دقیق تبخیرتعرق به‌منظور تدقیق مؤلفه تغذیه اهمیت بیشتری یافته است.

در مطالعه‌ای به‌منظور برآورد تغذیه ناشی از بارندگی و آبیاری، سه مجموعه لایسیمتر در مزارع کانتربری نیوزیلند نصب و از نتایج آن استفاده شد. این مطالعه در سه مزرعه که خاک دو مزرعه بیشتر از نوع ماسه کم‌عمق و خاک مزرعه سوم از نوع لوم سیلتی بود انجام گرفت. نتایج حاکی از این بود که با توجه به میانگین بارندگی سالانه و مدیریت آبیاری مزرعه‌ها، نرخ تغذیه برای خاک‌های دو مزرعه اول (ماسه کم‌عمق)، ۳۳ درصد از کل بارندگی و آبیاری و برای مزرعه سوم با خاک لوم سیلتی برابر ۱۸ درصد از کل بارندگی و آبیاری است (Duncan et al., 2016).

به‌منظور ارزیابی سهم تغذیه آب زیرزمینی از جریان بارندگی و آبیاری در دشت موسیان در غرب ایران، رویکرد مدل‌سازی معکوس و تکنیک سنجش از دور را برای تعیین نرخ تغذیه انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. بعد از تهیه نقشه کاربری اراضی برای محدوده مطالعاتی با استفاده از تکنیک سنجش از دور، برای برآورد تغذیه در شرایط پایدار از بسته تغذیه MODFLOW استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مطالعه نشان داد نرخ تغذیه آب زیرزمینی از بارندگی و آبیاری ۰/۱۵ میلی‌متر در روز و تغذیه به آب زیرزمینی از بارندگی حدود ۰/۰۸ میلی‌متر در روز (۱۰/۸ درصد کل بارندگی) می‌باشد. در این مطالعه آمده است که میانگین سهم تغذیه در منطقه مورد مطالعه حدود ۰/۳۹ میلی‌متر در روز بوده که شامل ۱۵/۲ درصد کل آب مورد استفاده در مزارع آبی می‌باشد. نتایج حاکی از این امر است که آبیاری مهم‌ترین منبع تغذیه آب‌های زیرزمینی در این ناحیه است و در نتیجه باید در مدل‌های هیدرولوژیکی مربوطه به‌عنوان ورودی اعمال گردد (Ebrahimi et al., 2016).

در مطالعه‌ای به تخمین توزیع مکانی تغذیه از تصاویر ماهواره‌ای در حوضه رودخانه ایپانما در ایالت Pernambuco در شمال شرقی برزیل پرداخته شد. داده‌های سنجش از دور از جمله نقشه‌های ماهانه (۲۰۱۱-۲۰۱۲) بارش، رواناب، تبخیر و تعرق، به‌عنوان ورودی برای روش بیلان آب در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های بارش از

(شکل ۱). مساحت محدوده در حدود ۱۲۵۱۳/۷ کیلومتر مربع می‌باشد که ۵۷۵۴/۱ کیلومتر مربع آن دشت و مابقی ۶۷۵۹/۵ کیلومتر مربع آن ارتفاعات است. این محدوده مطالعاتی بین طول-های جغرافیایی ۵۲° ۵۴' تا ۳۳° ۵۶' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۹° ۵۲' تا ۳۱° ۳۰' شمالی واقع است. همچنین آبخوان آبرفتی در این محدوده وسعت حدود ۴۳۰۰ کیلومتر مربع را به خود اختصاص داده است. سطح آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی توسط ۹۴ حلقه چاه مشاهده‌ای اندازه‌گیری شده است (Iran Water Resources Management Company, 2015). بر اساس اطلاعات استخراج‌شده حجم آب زیرزمینی تخلیه‌شده از طریق چاه‌ها و قنوات به‌طور متوسط سالانه ۶۸۳ میلیون مترمکعب در بین سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵ است و یکی از بحرانی‌ترین مناطق از نظر برداشت آب زیرزمینی در کشور است. نقشه کاربری اراضی و بافت خاک محدوده رفسنجان در شکل (۲) آمده است.

مدل شبیه‌سازی

WetSpas-M یک مدل توزیعی بیلان آب برای شبیه‌سازی میانگین سالانه یا فصلی تغذیه آب زیرزمینی، تبخیر-تعرق، رواناب و برگاب با استفاده از روابط فیزیکی و تجربی است. این مدل به‌ویژه برای مطالعه اثرات بلندمدت تغییرات کاربری اراضی در نوسانات آب زیرزمینی در یک حوضه مناسب است (Batelaan and Smedt, 2001). این مدل، بیلان آب را در یک محیط اطلاعات جغرافیایی (GIS) ادغام می‌کند و به برآورد توزیع زمانی و مکانی تغذیه در بلندمدت می‌پردازد. بررسی به‌صورت توزیعی و وابسته به مکان یکی از مهم‌ترین مزایای این مدل است. در مدل WetSpas-M، بیلان آب برای سلول‌های شطرنجی به‌صورت بیلان‌های آبی مستقل گیاهی، خاک لخت، مخازن آب و قسمت نفوذناپذیر هر سلول تقسیم می‌شود (Batelaan and Smedt, 2001).

تمام ورودی‌های مدل به‌جز تعداد روزهای بارانی که متوسط گیری مکانی می‌شود، به‌صورت نقشه‌های رستری بوده که در محیط ArcGIS تهیه می‌شوند. خروجی‌های مدل نیز به‌صورت نقشه و شامل یک فایل خلاصه از متوسط‌گیری حوضه‌ای است. در این مطالعه همه نقشه‌های رستری ورودی به مدل با ابعاد سلول ۹۰×۹۰ متر و تعداد ستون ۱۲۹۱ و تعداد سطر ۱۰۸۶ در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. با توجه به دوره آماری ۸ ساله برای هر پارامتر تعداد ۹۶ نقشه به‌صورت رستری برای هر پارامتر در هر ماه ساخته شد (جدول ۱).

زمینی موجود در دلتا نیل برای سال‌های ۱۹۷۲، ۱۹۸۴، ۱۹۹۰، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۹ مورد استفاده قرار گرفت. مدل WetSpas با مقایسه تغذیه شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل معادلات بیلان آب، واسنجی شد. مدل WetSpas در سال‌های ۱۹۷۰، ۱۹۸۰، ۱۹۹۰ و ۲۰۱۰ به‌منظور اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که WetSpas به‌خوبی در شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان هیدرولوژیکی در دلتا نیل عمل نموده است (Armanuos et al., 2016).

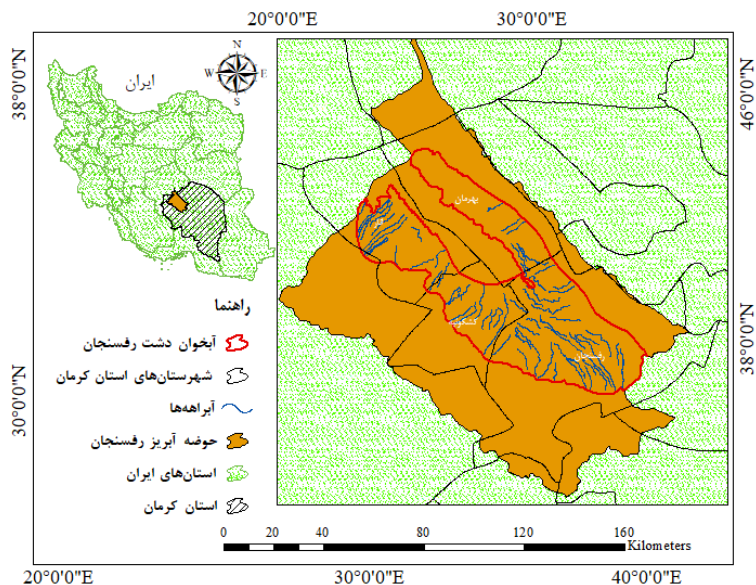
به‌منظور برآورد تغذیه در مطالعات دیگری از روش‌های CRD^۱ و RIB^۲ (Ahmadi et al., 2015; Baalousha, 2005)، WTF^۳ (Obuobie et al., 2012) و تکنیک‌های ردیاب بر اساس بیلان جرمی کلراید و دیگر ردیاب‌های زیست‌محیطی از قبیل Tritium یا CFC (Crosbie et al., 2018; Han et al., 2017; Subyani, 2004) بهره گرفته شده است.

با توجه به چالش‌های زیادی که در برآورد مؤلفه تغذیه به لحاظ دقت، زمان و هزینه وجود دارد، هدف از پژوهش حاضر برآورد توأم تغییرات مکانی و زمانی تغذیه آب زیرزمینی آبخوان رفسنجان در استان کرمان با استفاده از مدل توزیعی بیلان آب WetSpas-M (نسخه به‌روز شده WetSpas) است. با توجه به اینکه در بهره‌گیری از مدل WetSpas-M در مطالعه حاضر از نقشه کاربری اراضی، بافت خاک و نقشه شیب سطح زمین برای محاسبه مؤلفه تغذیه به لحاظ مکانی و زمانی استفاده می‌شود. این امر می‌تواند بخش قابل توجهی از عدم قطعیت در برآورد این مؤلفه را کاهش دهد که علاوه بر تدقیق بیلان محدوده مورد مطالعه به مدیریت مناسب منابع آب منطقه نیز کمک می‌کند. برقراری بیلان آب محدوده مورد مطالعه به‌صورت توزیع مکانی و زمانی یکی دیگر از اهداف مطالعه حاضر است. با توجه به اینکه در مطالعات صورت گرفته با مدل WetSpas-M تنها از داده‌های باران به‌عنوان ورودی مدل استفاده گردیده و داده‌های آبیاری در سطح حوضه اعمال نشده، در مطالعه حاضر برای تفکیک مؤلفه‌های بیلان از آبیاری و باران، داده‌های آبیاری از چاه‌های محدوده نیز در مدل لحاظ گردیده است.

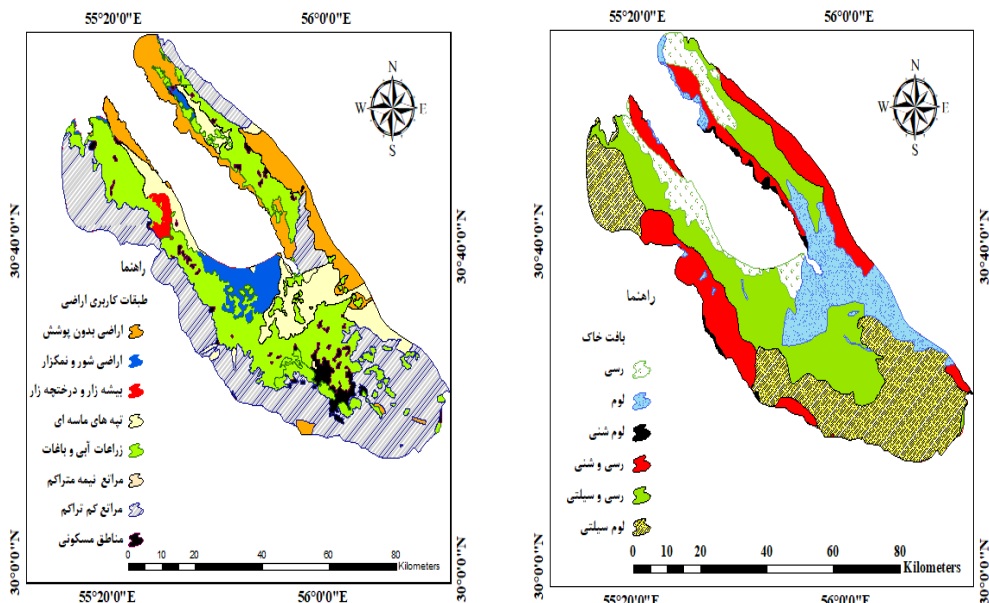
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

محدوده مطالعاتی رفسنجان یکی از ۱۲ محدوده مطالعاتی حوضه آبریز درانجیر و ساغند بوده و در غرب این حوضه آبریز قرار دارد



شکل ۱- نقشه موقعیت آبخوان رفسنجان



شکل ۲- نقشه بافت خاک و کاربری اراضی محدوده آبخوان رفسنجان

جدول ۱- نقشه‌های ورودی مدل WetSpa-M

ابعاد	تعداد	روش پردازش	ورودی مدل
۹۰×۹۰	۱	تهیه نقشه رستری	نقشه کاربری اراضی
۹۰×۹۰	۱	تهیه نقشه رستری	نقشه بافت خاک
۹۰×۹۰	۹۶	متوسط ماهانه ایستگاه‌های باران‌سنجی	نقشه‌های بارندگی
۹۰×۹۰	۹۶	بر اساس برداشت از چاه‌های کشاورزی برای باغات	نقشه‌های آبیاری
۹۰×۹۰	۹۶	کریجینگ	نقشه‌های عمق آب زیرزمینی
۹۰×۹۰	۹۶	رگرسیون بین ارتفاع و دما	نقشه‌های دما
۹۰×۹۰	۹۶	متوسط ماهانه ایستگاه سینوپتیک	نقشه‌های سرعت باد
۹۰×۹۰	۹۶	رگرسیون بین ارتفاع و تبخیر از تشت	نقشه‌های تبخیر از تشت
۹۰×۹۰	۹۶	برآورد شده با تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸	نقشه‌های شاخص سطح برگ

گیاهی دارد که به صورت زیر محاسبه می‌گردد (Abdollahi, 2015).

γ ثابت سایکرومتری برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتی گراد، Δ گرادیان مشتق اول از منحنی فشار بخار اشباع (شیب فشار بخار اشباع در دمای جو) برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد، r_c مقاومت سطحی توده‌ای برحسب ثانیه بر متر و r_a مقاومت آیرودینامیکی است (Abdollahi et al., 2017).

$$T_v = (1 - A_1^{w/Trv}) T_{rv} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

برای مناطق با پوشش گیاهی که در آن سطح آب‌های زیرزمینی زیر منطقه ریشه است تعرق واقعی به صورت زیر تصحیح شده است (Abdollahi et al., 2017).

مدل WetSpa-M نقشه‌های توزیع مکانی تغذیه را به‌عنوان خروجی ارائه می‌دهد (Abdollahi et al., 2017). در مدل WetSpa-M، P_m معادل آب‌های ورودی از جمله بارش، آبیاری و آب انتقالی می‌باشد و تغذیه ماهانه R_m برحسب میلی‌متر در ماه به‌عنوان باقی‌مانده بیلان آب محاسبه می‌شود:

$$R_m = P_m - SR_m - ET_m \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

با توجه به اینکه مدل WetSpa-M به‌عنوان یک مدل توزیعی معادله فوق را در هر سلول در نظر می‌گیرد و ورودی و خروجی را برای هر سلول خاص لحاظ می‌کند در نتیجه درصد خطای بیلان را در هر سلول ارائه داده و بدین صورت (۸) امکان بررسی خطای بیلان در هر یک از سلول‌ها وجود دارد. به‌منظور برآورد تغییرات سالانه حجم مخزن، مقادیر جریان ورودی و خروجی آبخوان به‌صورت سالانه از رابطه داری برآورد می‌گردد (Study for Accurate Groundwater Resources) (Balance of Rafsanjan Plain, 2019).

$$q = T \times W \times i \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

که در رابطه فوق، q حجم جریان ورودی یا خروجی آب زیرزمینی ($L^3 \cdot T^{-1}$)، T ضریب قابلیت انتقال ($L^2 \cdot T^{-1}$)، W طول جبهه ورودی و یا خروجی جریان (L)، i گرادیان هیدرولیکی آب زیرزمینی در محل مورد نظر است.

نتایج و بحث

در مطالعه حاضر واسنجی مدل هیدرولوژیکی بر اساس پارامترهای جدول (۲) صورت گرفت. مطابق با این روش، مقادیر پارامترها تا جایی تغییر داده می‌شوند و مدل اجرا می‌شود که مقادیر پارامترهای حوضه به مقادیر بهینه خود نزدیک‌تر شوند. در

به‌این ترتیب در هر سلول، محاسبه تبخیرتعرق، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی صورت گرفته و برای کل محدوده با هم جمع می‌شوند که در روابط زیر نشان داده شده است.

ET_{raster} ، S_{raster} و R_{raster} به ترتیب معادل تبخیرتعرق، رواناب سطحی، تغذیه آب زیرزمینی برای یک شبکه سلولی می‌باشد که هر کدام دارای قسمت‌های گیاهی، سطح خاک، سطح آب و سطح نفوذناپذیر (به ترتیب av ، as ، ao و ai نشان داده می‌شود) می‌باشد.

$$ET_{raster} = avET_v + asE_s + aoE_o + aiE_i \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$S_{raster} = avS_v + asS_s + aoS_o + aiS_i \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$R_{raster} = avR_v + asR_s + aoR_o + aiR_i \quad (\text{رابطه ۳})$$

روند محاسبه مقدار رواناب سطحی در مدل WetSpa-M به صورت زیر است:

$$SR_m = C_{sr} C_h (P_m - I_m) \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن، SR_m مقدار رواناب سطحی (میلی‌متر)، C_h ضریب رطوبت خاک (بی‌بعد) و C_{sr} ضریب رواناب واقعی (بی‌بعد) است که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$C_{sr} = \frac{C_{wp} \bar{P}_{24}}{C_{wp} \bar{P}_{24} - RCD * C_{wp} + RCD} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$C_{wp} = \left(1 - \frac{A_{imp}}{100}\right) C_{per} + \frac{A_{imp}}{100} C_{imp} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$C_{per} = W1 \left(\frac{0.02}{n}\right) + W2 \left(\frac{\theta_w}{1-\theta_w}\right) + W3 \left(\frac{S_p}{10+S_p}\right) \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$C_{imp} = 0.9 \exp(0.024 A_{imp}) \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$C_h = \frac{P_m}{LP(P_m^{\alpha} + ET_m^{\alpha})^{\frac{1}{\alpha}}} \quad \text{if } ET_m > P_m \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$C_h = 1 \quad \text{if } ET_m \leq P_m$$

که در آن‌ها، C_{wp} ، \bar{P}_{24} ، RCD ، A_{imp} ، C_{per} ، C_{imp} ، θ_w و S_p به ترتیب ضریب رواناب پتانسیل، میانگین بارش روزانه (میلی‌متر بر روز در هر ماه)، سطح خشکی ناحیه‌ای^۱ (میلی‌متر)، درصد سطح نفوذناپذیر در هر سلول، ضریب رواناب مناطق نفوذپذیر، ضریب رواناب مناطق نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ، مقدار رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی و شیب زمین (درصد) هستند. $W1$ ، $W2$ و $W3$ نیز وزن‌های سه مؤلفه تشکیل‌دهنده C_{per} هستند که به ترتیب $0/4$ ، $0/3$ و $0/3$ بهترین تطابق را با ضرایب رواناب ذکر شده در مدل WetSpa-M دارند (Abdollahi et al., 2017).

$$C = \frac{1 + \frac{\gamma}{\Delta}}{1 + \frac{\gamma}{\Delta} \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در مدل WetSpa-M، برآورد تبخیرتعرق واقعی همانند سایر مؤلفه‌ها در هر سلول صورت می‌پذیرد. برای محاسبه تعرق گیاه مرجع از تبخیرتعرق پتانسیل (ET_p)، نیاز به ضریب پوشش

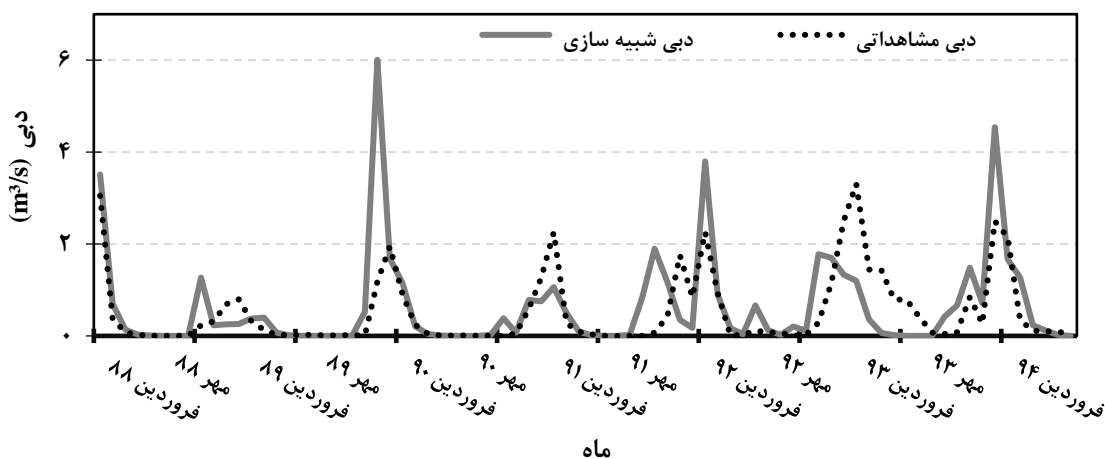
میانگین خطای مطلق برای دوره ۲ ساله صحت‌سنجی محاسبه شده به ترتیب برابر با ۰/۹ و ۰/۶۸ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر بهینه پارامترهای واسنجی شده مدل

مقدار بهینه	پارامتر	اجزای بیلان آب
۰/۱۲	a	برگاب
۵	α	تبخیر تعرق
۵	Lp	رواناب سطحی
۰/۲۳	X	رواناب سطحی
۰/۱۵	β	جریان سطحی
۰/۱	\emptyset	مشارکت‌کننده تغذیه

شبیه‌سازی دبی رودخانه، میانگین خطای مطلق^۱، میانگین مربعات خطا^۲ به‌عنوان معیارهای آماری نکویی برازش در دوره واسنجی و صحت‌سنجی انتخاب شدند. طبق نتایج به‌دست‌آمده میانگین خطای مربعات و میانگین خطای مطلق دبی برای دوره ۵ ساله واسنجی مدل به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۳۸ مترمکعب بر ثانیه است.

با توجه به شکل (۳) ملاحظه می‌گردد که دبی شبیه‌سازی شده روند قابل قبولی با جریان رودخانه دارد. همچنین دبی شبیه‌سازی شده در ماه‌هایی که بارندگی در روزهای پایانی ماه صورت گرفته و تأثیر بارندگی بر دبی مشاهداتی ماه بعد اعمال گردیده، عامل خطا در شبیه‌سازی دبی است. میانگین خطای مربعات و



شکل ۳- نمودار دبی ماهانه شبیه‌سازی شده با مدل WetSpas-M با دبی مشاهداتی رودخانه شاهزاده عباس

شبیه‌سازی برآورد گردیده است. این امر موجب تدقیق بیشتر سایر مؤلفه‌ها از جمله تغذیه آب زیرزمینی در مدل مذکور می‌شود.

نتایج برآورد سالانه مؤلفه‌های بیلان آب در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که به‌طور متوسط تبخیر تعرق ۵۶ درصد، تغذیه آب زیرزمینی ۴۲ درصد، رواناب ۲ درصد و برگاب سهم بسیار ناچیزی از کل آب را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین مقادیر تغییرات ذخیره آب سطحی می‌تواند صرف رطوبت خاک شود. مطابق با Iran Water Resources Management Company (2015) در این آبخوان که از محدوده-های حوضه آبریز کویرهای درانجیر و ساغند است، در سال ۱۳۸۹-۱۳۹۰ میزان تبخیر تعرق واقعی معادل ۴۱۸/۶ و میزان رواناب معادل ۹/۴ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده که این ارقام در مطالعه حاضر برای متوسط دوره شبیه‌سازی شده (۱۳۸۸-۱۳۹۵) به ترتیب معادل ۵۶۴/۷ و ۱۵ میلیون مترمکعب

داده‌های مشاهداتی از ایستگاه هیدرومتری حاکی از حجم بسیار اندک دبی رودخانه در این محدوده بوده و به‌منظور کنترل و کاهش عدم قطعیت مؤلفه‌های بیلان به‌خصوص تغذیه آب زیرزمینی، از داده‌های تبخیر تعرق واقعی برآورد شده با الگوریتم SSEB^۳ (Study for Accurate Groundwater Resources Balance of Rafsanjan Plain, 2019) نیز بهره گرفته شد تا کنترل لازم برای فرآیند انجام شده برای واسنجی مدل انجام شود.

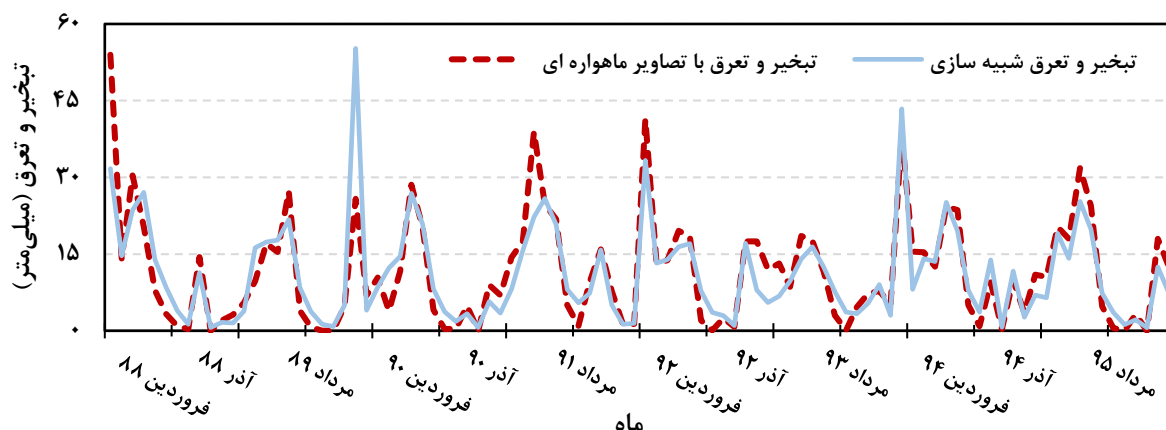
کنترل مدل براساس تبخیر تعرق با در نظر گرفتن ضریب تبیین، ضریب کارایی نش-ساتکلیف، میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق به عنوان تابع هدف انجام شد. این نتایج برای دوره کنترل به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۷۳ (بی‌بعد)، ۳/۴۵ و ۵/۴۵ (میلی‌متر) می‌باشد. مطابق با شکل (۴) مدل WetSpas-M روند تغییرات ماهانه تبخیر تعرق را با دقت مناسبی برای کل دوره

3. Simplified surface energy balance model

1. Mean Absolute Error
2. Root Mean Square Error

در سال است. آبخوان است. به طوری که در مطالعه حاضر حجم متوسط سالانه تغذیه و تخلیه به ترتیب ۴۲۲ و ۶۸۳/۳ میلیون مترمکعب در سال است. کسری مخزن محاسبه شده در این مطالعه با در نظر گرفتن ورودی‌ها و خروجی‌های آبخوان برآورد و معادل ۱۷۶/۳ میلیون مترمکعب محاسبه گردید.

از طرفی مطابق با Iran Water Resources Management Company (2015) در آبخوان دشت رفسنجان حجم تغذیه ۵۸۴/۶ و حجم تخلیه ۷۳۸/۵ میلیون مترمکعب است. این ارقام مبین کسری مخزن معادل با ۱۵۳/۹ میلیون مترمکعب در این



شکل ۴- نرخ تبخیر تعرق شبیه سازی شده با مدل WetSpas-M و تبخیر تعرق با الگوریتم SSEB (Study for Accurate Groundwater Resources Balance) در دوره ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵

جدول ۳- مؤلفه‌های بیلان آب (میلیون مترمکعب) آبخوان رفسنجان

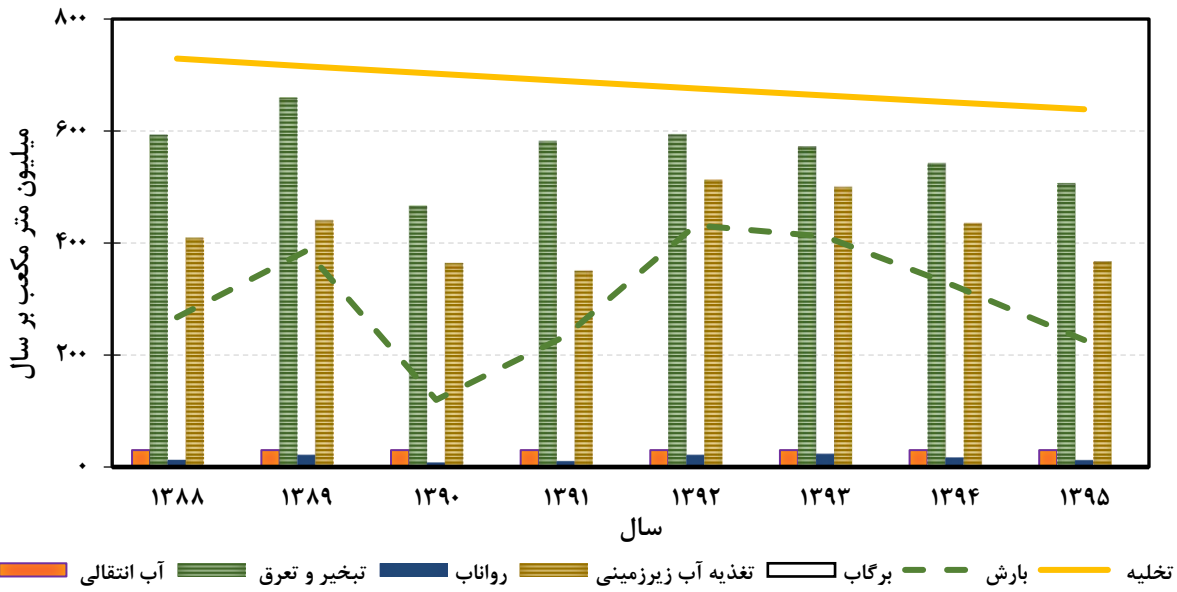
سال	۱۳۹۵	۱۳۹۴	۱۳۹۳	۱۳۹۲	۱۳۹۱	۱۳۹۰	۱۳۸۹	۱۳۸۸	متوسط دوره
بارش	۲۲۷	۳۲۳/۵	۴۱۱/۵	۴۳۱/۷	۲۳۴/۴	۱۱۹/۹	۳۸۶/۱	۲۶۷/۳	۳۰۰/۲
تخلیه	۶۲۸/۸	۶۵۱/۱	۶۶۳/۵	۶۷۶/۲	۶۸۹/۱	۷۰۲/۳	۷۱۵/۷	۷۲۹/۴	۶۸۳/۳
آب انتقالی	۳۰/۲	۳۰/۲	۳۰/۲	۳۰/۲	۳۰/۲	۳۰/۲	۳۰/۲	۳۰/۲	۳۰/۲
ورودی زیرزمینی	۸۶/۸	۸۷/۴	۸۵/۴	۸۷/۶	۸۷/۵	۸۷/۶	۸۸/۸	۸۸/۳	۸۷/۴
خروجی زیرزمینی	۲/۳	۲/۷	۲/۷	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۳	۲/۶
بارش	۰/۳۱	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۸۲	۰/۷۸	۰/۳۵	۰/۸۲	۰/۵۸	۰/۵۸
برگاب	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
کل	۰/۳۱	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۸۲	۰/۷۸	۰/۳۵	۰/۸۲	۰/۵۸	۰/۵۸
بارش	۶/۴	۱۱/۱	۱۴/۴	۱۳/۵	۶/۷	۳/۳	۱۴/۸	۷/۵	۹/۷
رواناب	۵/۲	۵/۴	۸/۲	۷/۴	۳/۳	۴/۸	۶/۴	۵	۵/۷
کل	۱۱/۶	۱۶/۵	۲۲/۶	۲۰/۹	۱۰	۸/۱	۲۱/۲	۲۱/۵	۱۵/۴
بارش	۸۹/۳	۱۳۷/۴	۱۲۲/۸	۱۵۲/۵	۸۷/۸	۴۹/۱	۹۷	۹۱/۶	۱۰۳/۴
تغذیه آب	۲۷۷/۷	۲۹۷/۴	۳۷۶/۵	۳۵۹/۶	۲۶۲/۶	۳۱۴/۷	۳۴۲/۸	۳۱۷/۵	۳۱۸/۶
زیرزمینی	۳۶۷	۴۳۴/۸	۴۹۹/۳	۵۱۲/۱	۳۵۰/۳	۳۶۳/۸	۴۳۹/۹	۴۰۹/۱	۴۲۲
بارش	۱۳۱/۳	۱۷۵	۲۷۴/۷	۲۶۵/۸	۱۴۰/۱	۶۵/۵	۲۷۴/۷	۱۶۸/۲	۱۸۶/۹
تبخیر تعرق	۳۷۵/۷	۳۶۷/۷	۲۹۷/۶	۳۲۷/۹	۴۴۲/۲	۴۰۱/۴	۳۸۴/۵	۴۲۵/۲	۳۷۷/۸
کل	۵۰۷	۵۴۲/۷	۵۷۲/۳	۵۹۳/۷	۵۸۲/۳	۴۶۶/۹	۶۵۹/۲	۵۹۳/۴	۵۶۴/۷
خطای محاسبات بیلان (%)	۱/۱۰	۰/۹۵	۱/۵	۱/۰۸	۰/۹۳	۰/۹۵	۱/۰۳	۱/۱۳	۱/۰۹
تغییرات ذخیره آب زیرزمینی	-۱۸۸/۲	-۱۳۱/۶	-۸۱/۵	-۷۸/۹	-۲۵۳/۷	-۲۵۳/۴	-۱۸۹/۴	-۲۳۴/۲	-۱۷۶/۳

داده شده است. با توجه به شکل (۵) و جدول (۳) مشاهده می شود که به طور متوسط در کل دوره شبیه سازی ۱۰۰ درصد برگاب از بارندگی حاصل شده و آبیاری هیچ سهمی در برگاب ندارد. از طرفی رواناب از بارش ۶۳ درصد از کل رواناب را به خود اختصاص داده است. همچنین ۶۷ درصد از تبخیر تعرق و ۷۵ درصد از تغذیه،

با توجه به نتایج خروجی مدل (جدول ۳) به طور متوسط تبخیر تعرق ۶۲ درصد، تغذیه آب زیرزمینی ۳۴ درصد، رواناب ۳ درصد و برگاب ۰/۱ درصد از بارش را به خود اختصاص داده اند. تغییرات مؤلفه های بیلان آب به صورت سالانه در شکل (۵) قرار

میزان تبخیر در این سال ۴۶۶/۹ و میزان تغذیه ۳۶۳/۷ میلیون مترمکعب برآورد گردیده است و با توجه به اینکه بیشترین مصارف در بین مؤلفه‌های بیلان ناشی از تبخیر تعرق و تغذیه آب زیرزمینی است باید مدیریت بهینه آبیاری باغات و مزارع کشاورزی بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد.

حاصل از آبیاری می‌باشد. مطابق با شکل (۵) کم‌ترین میزان بارش محدوده در سال ۹۰، معادل ۱۲۰ میلیون متر مکعب گزارش شده است. همچنین میزان تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری در این سال ۷۰۲/۳ میلیون مترمکعب و میزان آب انتقالی به محدوده معادل ۳۰/۲ میلیون مترمکعب بوده است، با در نظر گرفتن همه ورودی‌ها در مدل از جمله آبیاری، بارندگی و آب انتقالی در این شرایط

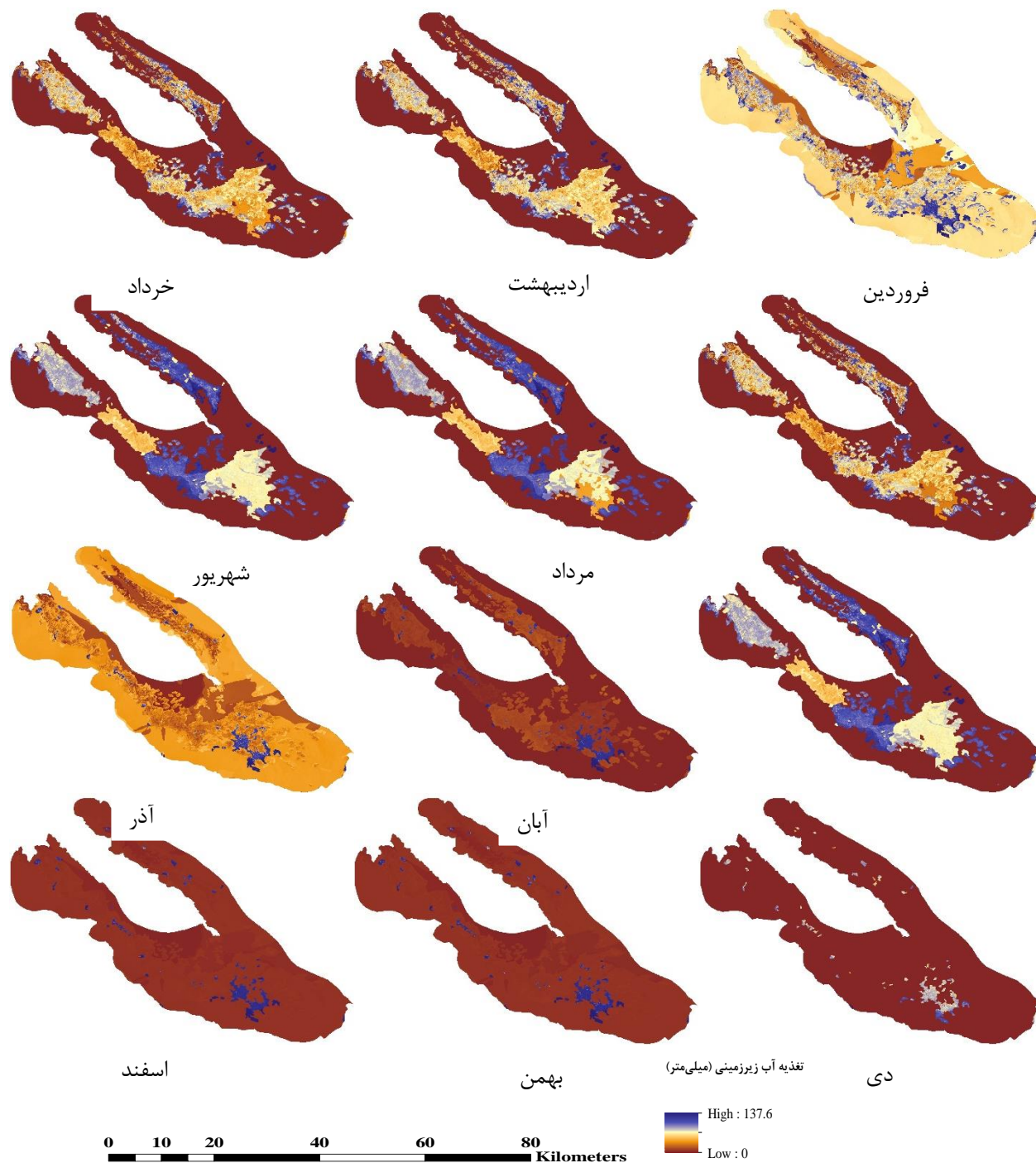


شکل ۵- نمودار تغییرات سالانه مؤلفه‌های بیلان آب شبیه‌سازی شده

مذکور است.

مطابق با رویکرد مدل‌سازی مورد استفاده در مطالعه حاضر ضرایب آب برگشتی برای محدوده مورد مطالعه به صورت توزیع زمانی و مکانی با استفاده از نقشه‌های تغذیه آب زیرزمینی برآورد گردید. نتایج حاکی از این امر است که متوسط ضریب آب برگشتی برای بخش کشاورزی از آبیاری و بارندگی به ترتیب ۳۴ و ۲۵ درصد است. کم‌ترین میزان ضریب آب برگشتی در شوره-زارها معادل صفر تا ۵ درصد و در بخش شرب و صنعت معادل ۴۰ تا ۷۰ درصد برآورد گردید. این ضرایب در طول دوره شبیه‌سازی و برای هر یک از سلول‌ها در مدل WetSpas-M متغیر و وابسته به سایر مؤلفه‌های تأثیرگذار در میزان تغذیه برای هر سلول است.

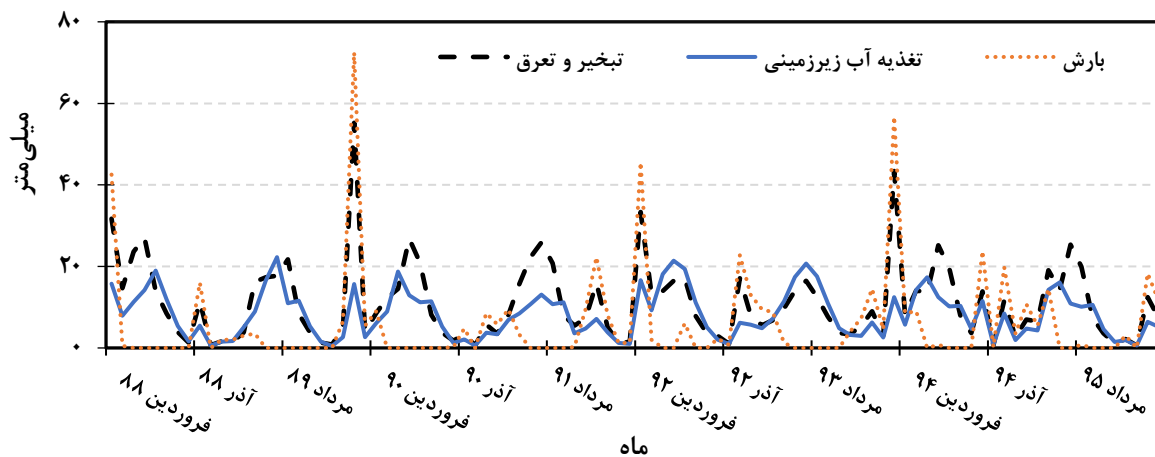
تغییرات مکانی تغذیه آب زیرزمینی برای سال ۱۳۸۸ (به‌عنوان نمونه) در شکل (۶) ارائه شده است. مطابق با نقشه‌های ماهانه مؤلفه تغذیه آب زیرزمینی، مشاهده می‌گردد که تغذیه آب زیرزمینی مطابق با درصد تخصیص آب برای آبیاری باغات پسته رفسنجان طبق (Study for Accurate Groundwater Resources Balance of Rafsanjan Plain (2019) در ماه‌های آبیاری (فروردین تا آبان) دارای بیش‌ترین مقدار است. همچنین در ماه‌های پایانی سال میزان تغذیه از مناطق شهری بیشتر بوده که شامل مصارف شرب، صنعت است. لازم به ذکر است در ماه‌های فروردین و آذر سال نمونه ارائه‌شده (شکل ۵) بارندگی به ترتیب ۴۲/۵ و ۱۶ میلی‌متر بوده که تغذیه از کل محدوده آبخوان صورت گرفته و دلیل تغذیه از همه بخش‌های آبخوان، بارندگی در ماه‌های



شکل ۶- تغییرات مکانی مؤلفه تغذیه آب زیرزمینی در ماه‌های یک سال نمونه (سال ۱۳۸۸)

از بافت سنگین خاک دشت و یا متأثر از عمق زیاد آب زیرزمینی (بیش از ۱۳۰ متر) در بسیاری از مناطق دشت باشد. به طوری که بارش کمی از بافت سنگین دشت و عمق زیاد تا تراز آب زیرزمینی نفوذ کرده و آبخوان را تغذیه می‌کند. اما با توجه به نقشه‌های هم‌عمق آب زیرزمینی دشت، در مناطق کشاورزی عمق آب زیرزمینی کمتر بوده و شرایط برای نفوذ و تغذیه آبخوان بهتر است.

نمودار شکل (۷) نشان‌دهنده سهم تبخیر تعرق و تغذیه آب زیرزمینی به‌عنوان دو مؤلفه با بیشترین عدم قطعیت در بین مؤلفه‌های بیلان آب است. بر اساس نتایج حاصل از بررسی توزیع مکانی و زمانی مؤلفه‌ها، تبخیر تعرق از بارش سهم بیشتری نسبت به تبخیر تعرق حاصل از آبیاری در هر ماه و سال دارد. این امر در مورد مؤلفه تغذیه بدین صورت است که بیشینه تغذیه در ماه‌های با بیشترین آبیاری برآورد گردیده است. این موضوع می‌تواند متأثر



شکل ۷- سری زمانی تبخیر تعرق و تغذیه شبیه سازی شده با مدل WetSpss-M با روند بارندگی در محدوده مورد مطالعه

در مطالعه حاضر در واسنجی و صحت سنجی مدل از داده های دبی ایستگاه هیدرومتری استفاده گردید و سپس از داده های برآورد شده تبخیر تعرق از تصاویر ماهواره ای برای کنترل مدل نیز بهره گرفته شد. نتایج مدل حاکی از آن است که مدل WetSpss-M قادر به شبیه سازی مناسبی از مؤلفه های بیلان است. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل بر اساس معیارهای آماری نکویی برازش در دوره واسنجی و صحت سنجی حاکی از دقت قابل قبول مدل در WetSpss-M در برآورد دبی خروجی و تبخیر تعرق واقعی است. با ارزیابی مقادیر خروجی از مؤلفه های بیلان در مدل مشخص می گردد که به طور متوسط تبخیر تعرق ۵۶ درصد، تغذیه آب زیرزمینی ۴۲ درصد، رواناب ۲ درصد و برگاب سهم بسیار ناچیزی از کل آب را به خود اختصاص داده اند. همچنین با توجه به نقشه های خروجی از مدل WetSpss-M تغذیه آب زیرزمینی از باغات پسته و مناطق شهری به ترتیب بیشترین نقش را در ورودی به آبخوان دارند.

سپاس گذاری

نویسندگان این مقاله از شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت آب منطقه ای کرمان و اندیشکده تدبیر آب ایران به جهت همکاری در تأمین بخشی از داده ها و اطلاعات این مطالعه سپاس گذاری می نمایند.

به جهت اینکه محدوده رفسنجان به عنوان یکی از مناطقی است که تنها منبع آب برای کشاورزی از چاه های بهره برداری است، سهم زیاد تغذیه آب زیرزمینی در مصارف به دلیل برداشت از چاه های کشاورزی و آبیاری باغات پسته است. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر علاوه بر استفاده از داده های دبی مشاهداتی از داده های برآورد شده تبخیر تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره ای نیز جهت کنترل واسنجی و صحت سنجی مدل بهره گرفته شد، نتایج مدل قابل قبول و عدم قطعیت در برآورد سایر مؤلفه های بیلان از جمله تغذیه کاهش یافته است. همچنین با در نظر گرفتن کلیه مؤلفه های ورودی از قبیل آبیاری و آب انتقالی به محدوده رفسنجان، خروجی های مدل نزدیک به سایر مطالعات صورت گرفته می باشد. لازم به ذکر است با توجه به اینکه مدل WetSpss-M بیلان را برای هر سلول اجرا می کند دقت در برآورد مؤلفه ها برای هر سلول و در هر بازه زمانی در مقایسه با سایر مطالعات پیشین که اغلب برای کل محدوده بوده است، مطلوب است.

نتیجه گیری

در این مطالعه، جهت برآورد، تدقیق و کاهش عدم قطعیت مؤلفه تغذیه بیلان آب زیرزمینی از مدل توزیعی WetSpss-M در آبخوان رفسنجان بهره گرفته شد. در راستای ضرورت این مسئله

REFERENCES

- Abdollahi, K. (2015). Basin scale water balance modeling for variable hydrological regimes and temporal scales (Doctoral dissertation, Ph. D. Vrije Universiteit Brussel, Belgium).
- Abdollahi, K., Bashir, I., Verbeiren, B., Harouna, M. R., Van Griensven, A., Huysmans, M., & Batelaan, O. (2017). A distributed monthly water balance model: formulation and application on Black Volta Basin. *Environmental Earth Sciences*, 76(5), 198.
- Ahmadi, T., Ziaei, A. N., Rasoulzadeh, A., Davary, K., Esmaili, K., & Izady, A. (2015). Mapping groundwater recharge areas using CRD and RIB methods in the semi-arid Neishaboob Plain, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(5), 2921-2935.
- Armanuos, A. M., Negm, A., Yoshimura, C., & Valeriano, O. C. S. (2016). Application of WetSpss model to estimate groundwater recharge

- variability in the Nile Delta aquifer. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(10), 553.
- Baalousha, H. (2005). Using CRD method for quantification of groundwater recharge in the Gaza Strip, Palestine. *Environmental Geology*, 48(7), 889-900.
- Batelaan, O., & De Smedt, F. L. O. R. I. M. O. N. D. (2001). WetSpa: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modelling. *IAHS PUBLICATION*, 11-18.
- Canora, F., Musto, M. A., & Sdao, F. (2018, May). Groundwater recharge assessment in the carbonate aquifer system of the Lauria Mounts (southern Italy) by GIS-based distributed hydrogeological balance method. In International Conference on Computational Science and Its Applications (pp. 166-181). Springer, Cham.
- Coelho, V. H. R., Montenegro, S., Almeida, C. N., Silva, B. B., Oliveira, L. M., Gusmão, A. C. V., ... & Montenegro, A. A. (2017). Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data. *Journal of Hydrology*, 548, 1-15.
- Crosbie, R. S., Peeters, L. J., Herron, N., McVicar, T. R., & Herr, A. (2018). Estimating groundwater recharge and its associated uncertainty: Use of regression kriging and the chloride mass balance method. *Journal of Hydrology*, 561, 1063-1080.
- Delottier, H., Pryet, A., & Dupuy, A. (2017). Why should practitioners be concerned about predictive uncertainty of groundwater management models?. *Water Resources Management*, 31(1), 61-73.
- Doble, R. C., & Crosbie, R. S. (2017). Current and emerging methods for catchment-scale modelling of recharge and evapotranspiration from shallow groundwater. *Hydrogeology journal*, 25(1), 3-23.
- Duncan, M. J., Srinivasan, M. S., & McMillan, H. (2016). Field measurement of groundwater recharge under irrigation in Canterbury, New Zealand, using drainage lysimeters. *Agricultural Water Management*, 166, 17-32.
- Ebrahimi, H., Ghazavi, R., & Karimi, H. (2016). Estimation of groundwater recharge from the rainfall and irrigation in an arid environment using inverse modeling approach and RS. *Water resources management*, 30(6), 1939-1951.
- Han, D., Currell, M. J., Cao, G., & Hall, B. (2017). Alterations to groundwater recharge due to anthropogenic landscape change. *Journal of hydrology*, 554, 545-557.
- Iran Water Resources Management Company. (2015). Report of Daranjir and Saghand river basin. Water resources balance report of the Rafsanjan study area. Yekom Consulting Engineers Company. (In Farsi).
- Ketabchi, H., Mahmoudzadeh, D., Ghadimi, S., Saghi Jadid, M. (2018). A review of evaluating groundwater balance in Iran: Methods and suggestions. Islamic Parliament Research Center of The Islamic Republic Of Iran, Head of Research and production, Department of Water and Environment. (In Farsi).
- Khalaf, A., & Donoghue, D. (2012). Estimating recharge distribution using remote sensing: a case study from the West Bank. *Journal of Hydrology*, 414, 354-363.
- Obuobie, E., Diekkrueger, B., Agyekum, W., & Agodzo, S. (2012). Groundwater level monitoring and recharge estimation in the White Volta River basin of Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 71, 80-86.
- Melki, A., Abdollahi, K., Fatahi, R., & Abida, H. (2017). Groundwater recharge estimation under semi arid climate: Case of Northern Gafsa watershed, Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 132, 37-46.
- Study for Accurate Groundwater Resources Balance of Rafsanjan Plain. (2019). Water Engineering Research Institute, Tarbiat Modares University, Iranian Water Policy Research Institute at Kerman Chamber of Commerce, Industries, Mines & Agriculture. (In Farsi).
- Subyani, A. M. (2004). Use of chloride-mass balance and environmental isotopes for evaluation of groundwater recharge in the alluvial aquifer, Wadi Tharad, western Saudi Arabia. *Environmental Geology*, 46(6-7), 741-749.
- Yan, S. F., Yu, S. E., Wu, Y. B., Pan, D. F., & Dong, J. G. (2018). Understanding groundwater table using a statistical model. *Water Science and Engineering*, 11(1), 1-7.