



## Estimation of Water Balance Components and Analysis of Variations Using Modeling and Remote Sensing Approaches (Hashtgerd Study Area, Alborz Province)

M. Babaei<sup>1</sup>, D. Mahmoodzadeh<sup>2</sup>, H. Ketabchi<sup>3</sup>, and T. Saadi<sup>4</sup>

### Abstract

In management and planning of water resources, hydrological models are suitable tool that can be very effective in simulating hydrological processes such as water balance. Distributed hydrological models simulate each of the water balance parameters by discretization and solving equations in each cell. In the present study, the WetSpas-M distributed model is used to estimate and evaluate the components of the water balance in Hashtgerd study area in Alborz province. The model was implemented in monthly basis and for a 20 year period. In order to calibrate and validate the model, first the monthly flow data of the hydrometric station were used as observational data. The remote sensing approach (SEBAL algorithm) was applied to re-estimate evapotranspiration. Then, the results of the two approaches were evaluated and compared. According to the model results in the Hashtgerd study area, the mean annual values of evapotranspiration and groundwater recharge were estimated to be 347.3 and 272.6 MCM, respectively. Furthermore, the mean annual values of evapotranspiration for plains and mountains were respectively 241 and 106.3 MCM. The mean annual recharge rate in the plains was equal to 197 MCM, while it was estimated to be 75.6 MCM for mountains. The variations analysis of model outputs was performed based on the standard deviation for the water balance parameters in plains and mountains. The results showed that the most variations during the simulation period were observed respectively in the irrigation component, evapotranspiration, recharge, and rainfall.

**Keywords:** Water Balance, Variations Analysis, Groundwater Recharge, WetSpas-M Model, SEBAL Algorithm.

Received: January 5, 2022

Accepted: April 3, 2022

## برآورد اجزای بیلان منابع آب و تحلیل تغییرات با رویکرد مدل سازی و سنجش از دور (محدوده مطالعاتی هشتگرد، استان البرز)

محمد بابایی<sup>۱</sup>، داود محمودزاده<sup>۲</sup>، حامد کتابچی<sup>۳\*</sup> و توفیق سعدی<sup>۴</sup>

### چکیده

به منظور مدیریت و برنامه ریزی منابع آب، استفاده از مدل های هیدرولوژیکی به عنوان ابزاری مناسب در شبیه سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی مانند بیلان آب، می تواند بسیار مؤثر باشد. مدل های هیدرولوژیکی توزیعی با گسسته سازی و حل معادلات در هر سلول، شبیه سازی هر یک از اجزای بیلان آب را انجام می دهند. در مطالعه حاضر به منظور برآورد و بررسی اجزای بیلان از مدل توزیعی WetSpas-M در محدوده مطالعاتی هشتگرد واقع در استان البرز استفاده شد و مدل برای ۲۰ سال به صورت ماهانه اجرا گردید. به منظور واسنجی و صحت سنجی مدل ابتدا از داده های دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری به عنوان داده های مشاهداتی استفاده شد. رویکرد سنجش از دور و الگوریتم SEBAL نیز به منظور برآورد مجدد تبخیر و تعرق استفاده شد و نتایج حاصل از دو رویکرد مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج مدل در محدوده مطالعاتی هشتگرد، میزان متوسط تبخیر و تعرق حقیقی و تغذیه آب زیرزمینی به ترتیب معادل ۳۴۷/۳ و ۲۷۲/۶ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد. همچنین، مقادیر متوسط تبخیر و تعرق در دشت و ارتفاعات به ترتیب ۲۴۱ و ۱۰۶/۳ میلیون مترمکعب محاسبه شد. حجم متوسط تغذیه سالانه در دشت معادل ۱۹۷ میلیون مترمکعب شبیه سازی شد که این میزان برای ارتفاعات معادل ۷۵/۶ میلیون مترمکعب برآورد شده است. تحلیل تغییرات خروجی های مدل بر اساس انحراف معیار برای اجزای بیلان به تفکیک دشت و ارتفاعات نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان می دهد که پس از مؤلفه آبیاری، تبخیر و تعرق، تغذیه و بارندگی بیشترین تغییرات در طول دوره شبیه سازی را دارند.

**کلمات کلیدی:** بیلان آب، تحلیل تغییرات، تغذیه آب زیرزمینی، مدل WetSpas-M، الگوریتم SEBAL.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱/۱۴

1- M.Sc. Graduate, Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Researcher, Research Institute of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: h.ketabchi@modares.ac.ir

4- Ph.D. in Climatology, Regional Water Company of Alborz, Karaj, Iran.

\*- Corresponding author

Dor: [20.1001.1.17352347.1401.18.1.3.1](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1401.18.1.3.1)

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- پژوهشگر، پژوهشکده مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۴- دکتری اقلیم شناسی در برنامه ریزی محیطی، شرکت آب منطقه ای البرز.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۱ امکان پذیر است.



## ۱- مقدمه

آب و تغییرات زمانی و فصلی آنها در دره کتمانندو واقع در نپال توسط مطالعه (Thapa et al., 2017) استفاده شده است. اجرای بیلان آب با استفاده از بارش یکنواخت، داده‌های اقلیمی و تبخیر و تعرق پتانسیل به عنوان متغیرهای ورودی برای هر مدل مورد بررسی قرار گرفت. شاخص‌های عملکرد NS، PBIAS و  $R^2$  مقادیر مشابهی در سه مدل مورد استفاده در این مطالعه داشتند و این مدل‌ها عملکرد رضایت‌بخشی برای شبیه‌سازی رواناب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی را نشان دادند. علیرغم نتایج قابل قبول مدل‌های مورد نظر اما قادر به ارائه نقشه‌های با توزیع مکانی و زمانی اجزای بیلان، از جمله نقشه نرخ تغذیه نیستند.

در مطالعه (Ghafari et al., 2021)، روش  $CRD^1$  که بر اصل بیلان آب استوار است، به منظور برآورد تغذیه آب زیرزمینی آبخوان اردبیل مورد استفاده قرار گرفت. در این روش با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی با کمینه کردن میانگین مربعات خطا بین تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، مقادیر تغذیه برآورد گردید. نتایج نشان داد که در دوره‌ی آماری ۱۰ ساله (مهر ۱۳۸۰ تا شهریور ۱۳۹۰) میزان متوسط آبدهی ویژه برای آبخوان اردبیل ۰/۱ و کسری از آب بارندگی و آبیاری که موجب تغذیه‌ی آبخوان می‌گردد به ترتیب برابر ۱۶/۱۹ و ۱۷/۴۶ درصد می‌باشد. به طور کلی میزان تغذیه آب زیرزمینی با روش حرکت تجمعی بارش، ۱۷۲ میلیون مترمکعب در سال بدست آمد که حداقل مقدار تغذیه در سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ با ۱۵۸ میلیون مترمکعب و حداکثر آن در سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۱ با ۱۸۳ میلیون مترمکعب بود. این روش بر این اصل استوار است که فقط رخداد بارندگی موجب تغذیه آب زیرزمینی می‌شود و تاثیر تغذیه حاصل از آبیاری در نظر گرفته نمی‌شود.

در مطالعه (Babaei and Ketabchi (2020) با هدف برآورد نرخ تغذیه بیلان آب زیرزمینی در آبخوان دشت رفسنجان از مدل WetSpass- $M^2$  استفاده گردید. به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل ابتدا از داده‌های دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری به عنوان داده‌های مشاهده‌ای استفاده شد. با توجه به مقادیر ناچیز جریان سطحی در محدوده مورد مطالعه به منظور بررسی اطمینان به داده‌ها و تفکیک اجزای بیلان آب از یکدیگر از داده‌های تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده توسط تکنیک‌های سنسجش از دور نیز استفاده شد. طبق بررسی‌های انجام شده، متوسط بارش کل و متوسط تخلیه از چاه‌های محدوده مورد مطالعه در دوره شبیه‌سازی به ترتیب معادل ۳۰۰ و ۶۸۳ میلیون مترمکعب بر سال می‌باشد که سهم تبخیر و تعرق و تغذیه آب زیرزمینی به طور متوسط به ترتیب ۵۶۵ و ۴۲۲ میلیون مترمکعب بر سال برآورد

برآورد اجزای بیلان آب همواره با خطا و عدم قطعیت‌های زیادی همراه است، به طوری که در برآوردهای انجام شده بیلان آب در کشور و تخمین آب تجدیدپذیر و قابل برنامه‌ریزی، تفاوت‌های زیادی ملاحظه می‌شود (Ketabchi et al., 2018). از این رو برآورد بیلان با دقت مناسب، با هدف ارزیابی صحیح از وضعیت فعلی این منابع و برنامه‌ریزی به جهت توسعه پایدار، ضروری و مهم می‌باشد. با توجه به عدم قطعیت‌هایی که در تخمین برخی از اجزای بیلان وجود دارد، مطالعات بیلان، نیازمند شناخت و نحوه برآورد اجزای آن است. در این راستا بر اساس بررسی مراجع، لزوم توجه به دو مقیاس مکانی و زمانی، یکپارچه دیدن منابع آب زیرزمینی با منابع آب سطحی، تحلیل محدوده تغییرات موجود در برآورد بیلان با توجه به گستره وسیع اثرگذاری آن، بررسی و امکان‌سنجی استفاده از روش‌های نوین از جمله سنسجش از دور در برآورد برخی از اجزای بیلان با امکان کنترل و واسنجی نتایج کسب شده با داده‌های مشاهداتی، به عنوان راهکارهای مهم برای به حداقل رساندن خطاها و ارائه برآورد بیلان با دقت مناسب پیشنهاد شده است. همچنین، برآورد با دقت مناسب نرخ تغذیه آب زیرزمینی به عنوان یکی از اجزای مهم بیلان آب کمک بسیاری به افزایش دقت در بیلان منابع آب می‌کند (Ketabchi et al., 2018; Babaei and Ketabchi, 2020; Ghafari et al., 2021; MacDonald et al., 2021).

تغییرات کاربری اراضی در بسیاری از مناطق نرخ تغذیه آب زیرزمینی را تغییر می‌دهد که در نتیجه تاثیر مستقیم بر حجم منابع آب زیرزمینی می‌گذارد (Barua et al., 2021). برآورد درست از تغذیه و تبخیر و تعرق با استفاده از رویکرد مدل‌سازی و سنسجش از دور، به لحاظ بررسی خطاها در بیلان آب می‌تواند مفید باشد. این امر به‌ویژه برای تحلیل تغییرات و عدم قطعیت مدل مهم است که تبدیل به یک بسته استاندارد در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی شود (Doble and Crosbie, 2017; Karamouz et al., 2020). ارزیابی توزیع مکانی و زمانی اجزای بیلان آب برای مدیریت کارآمد و پایدار منابع آب زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و فقیر به لحاظ داده، ضروری است (Aslam et al., 2021).

عموم مطالعات بیلان انجام‌شده در سطوح بین‌المللی و داخلی، از انواع مختلفی از مدل‌ها جهت برآورد اجزای بیلان استفاده نموده‌اند. یکی از ابزارهای مناسب برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی از جمله بیلان آب، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی است. از سه مدل هیدرولوژیکی SWAT، HBV و BTOPMC در تحلیل اجزای بیلان

گردید. به منظور ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی بیلان آب سطحی و زیرزمینی در حوضه بیلاته واقع در اتیوپی از مدل توزیعی WetSpass با داده‌های ورودی شامل نقشه‌های کاربری اراضی، بافت خاک، توپوگرافی، عمق آب زیرزمینی و شیب استفاده گردید. نتایج حاکی از دقت مناسب مدل در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی می‌باشد. برای رواناب سطحی و جریان زیرسطحی، به ترتیب مدل ضریب تبیین  $0/79$  و  $0/81$  و میانگین خطای مربعات  $8/3$  میلی‌متر و  $8/4$  میلی‌متر برای سال‌های  $1989$  و  $2019$ ، را برآورد نمود. طبق نتایج بدست آمده میانگین برگاب سالانه، تغذیه آب زیرزمینی، رواناب سطحی و تبخیر و تعرق واقعی به ترتیب  $36/4$  میلی‌متر،  $127/3$  میلی‌متر،  $614/9$  میلی‌متر و  $517/6$  میلی‌متر بود. این مطالعه نیز همانند مطالعه Babaei and Ketabchi (2020) نشان داد که مدل توزیعی WetSpass در شبیه‌سازی اجزای بیلان آب دقت قابل توجهی را ارائه می‌کند (Nannawo et al., 2021). همچنین، لازم به ذکر است که این مدل به داده‌های ورودی زیادی از جمله متوسط بارش بلندمدت نیاز دارد (Wang et al., 2015). مدل WetSpass به منظور برآورد توزیعی مکانی و زمانی متوسط تغذیه بلندمدت برای حوضه‌های مختلفی از جمله حوضه Jafar استفاده شده است. در مطالعه Al Kuisi and El-Naqa (2013) نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان‌دهنده توزیع مکانی مقادیر متوسط تبخیر و تعرق واقعی سالانه، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی در دوره  $30$  ساله  $1976-2005$  تعیین شده است. نتایج مدل WetSpass با مطالعات قبلی سازگار بوده و صحت و اعتبار تغذیه شبیه‌سازی شده را نشان داد.

در مطالعه دیگر برای برآورد توزیع مکانی تغذیه آبخوان، از تصاویر سنجش از دور، سنجنده MODIS در کرانه باختری فلسطین اشغالی استفاده شد. تبخیر و تعرق ماهانه از الگوریتم  $SEBAL^3$  و بارش از مجموعه داده‌های  $TRMM^4$  حاصل شد. نتایج نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین داده‌های موجود در مطالعات قبلی صورت گرفته و تجزیه و تحلیل مبتنی بر سنجش از دور وجود دارد (Khalaf and Donoghue, 2012). همچنین به منظور تخمین توزیع مکانی تغذیه از تصاویر ماهواره‌ای در حوضه رودخانه ایپانما واقع در شمال شرقی برزیل استفاده شده است. داده‌های سنجش از دور از جمله نقشه‌های ماهانه ( $2012-2011$ ) بارش، رواناب، تبخیر و تعرق، به‌عنوان ورودی برای روش بیلان آب در سیستم اطلاعات جغرافیایی  $GIS^5$  مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های بارش از سنجنده TRMM و داده‌های رواناب از سنجنده TM و همچنین برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از سنجنده MODIS صورت گرفت و نتایج، دقت مناسب برآورد تغذیه توسط تصاویر ماهواره‌ای مبتنی بر بیلان آب را نشان می‌دهد

(Coelho et al., 2017). همچنین به منظور برآورد تغذیه واقعی آب زیرزمینی حاصل از تبخیر و تعرق با استفاده از سنجش از دور در جنوب استرالیا، نتایج نشان داد که از یک روش بیلان آب با تخمین‌های ماهواره‌ای تبخیر و تعرق، برآوردهای تغذیه را می‌توان از یک مجموعه داده مستقل بدست آورد. سپس نتایج با روش  $WTF^6$  مورد مقایسه قرار گرفت (Crosbie et al., 2018).

بررسی و مرور مطالعات انجام شده بیانگر توسعه روش‌های مختلف برای برآورد اجزای بیلان بخصوص تغذیه آب زیرزمینی است. در این مطالعه بررسی مطالعات انجام شده به ترتیب در سه محور روش‌های بیلان، مدل‌های هیدرولوژیکی، برآورد تبخیر و تعرق واقعی و سایر روش‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین در این مطالعه، مدل توزیعی بیلان آب WetSpass-M برای برآورد تغییرات مکانی و زمانی اجزای بیلان آب از جمله تغذیه و تبخیر و تعرق استفاده شده است. در این راستا، داده‌های چاه‌های بهره‌بردار، نقشه کاربری اراضی، بافت خاک و نقشه شیب سطح زمین برای محاسبات مکانی و زمانی استفاده می‌شود. همچنین، از رویکرد سنجش از دور برای برآورد مؤلفه تبخیر و تعرق نیز استفاده می‌گردد که در قالب کنترل مدل شبیه‌سازی بهره‌گیری می‌شود. این چارچوب و استفاده از مدل توزیعی WetSpass-M علاوه بر این که نقشه‌های با دقت قابل قبولی از اجزای بیلان از جمله تغذیه آب ارائه می‌دهد، همچنین بخش قابل توجهی از عدم قطعیت در برآورد این مؤلفه و سایر اجزای بیلان را کاهش می‌دهد که منجر به افزایش دقت برآورد بیلان آب محدود مورد مطالعه شده و به مدیریت مناسب منابع آب منطقه نیز کمک می‌کند.

## ۲- مواد و روش‌ها

چارچوب مفهومی توسعه داده شده در مطالعه حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. در ادامه به اجزای این چارچوب پرداخته شده است.

### ۲-۱- محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی هشتگرد در نیمه شمالی حوضه آبریز دریاچه نمک واقع شده است، این محدوده مطالعاتی از شمال به محدوده طالقان-الموت از جنوب به اشتهارد، از غرب به محدوده قزوین و از شرق به محدوده تهران-کرج محدود شده است. این محدوده بین طول‌های جغرافیایی  $48^{\circ}$  تا  $22^{\circ}$  /  $51^{\circ}$  تا  $7^{\circ}$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $35^{\circ}$  /  $36^{\circ}$  شمالی واقع شده است. در جدول ۱ اطلاعات بیلان هیدروکلیماتولوژی محدوده مطالعاتی هشتگرد به تفکیک دشت و

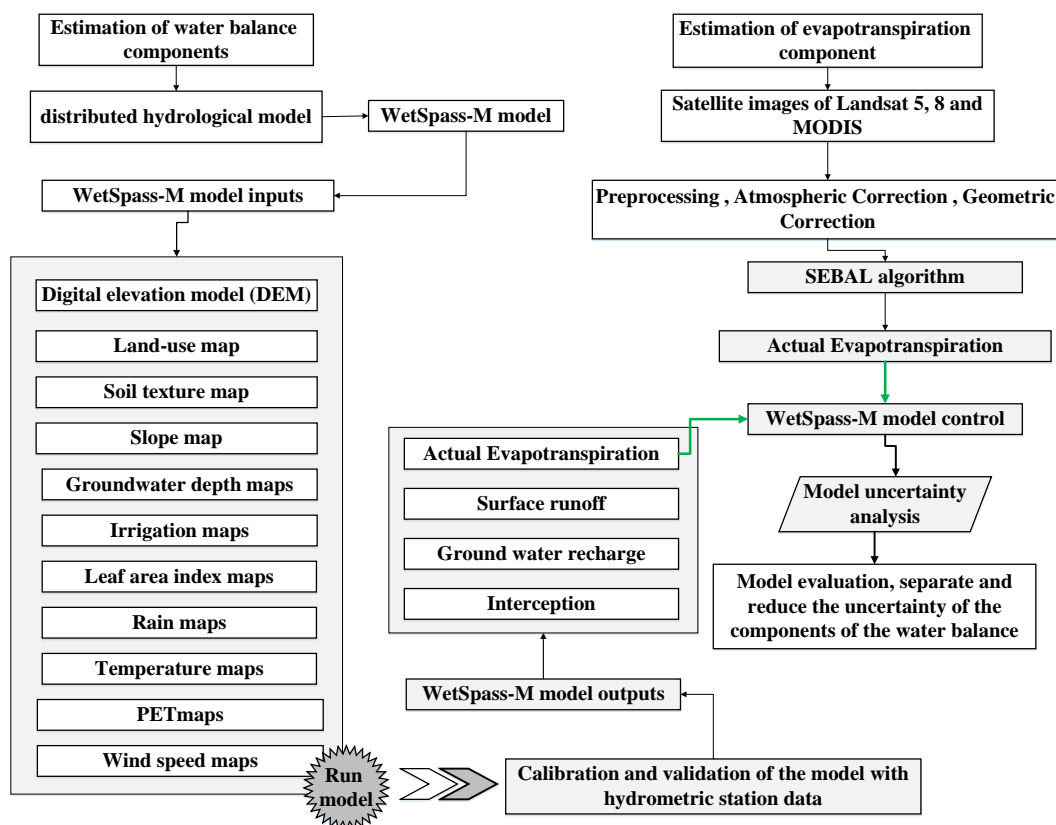


Fig. 1- Conceptual model for simulating water balance components

شکل ۱- مدل مفهومی شبیه‌سازی اجزای بیلان آب

Table 1- Hydroclimatology and water balance of plains and mountains for Hashtgerd study area

جدول ۱- بیلان هیدروکلیماتولوژی و بیلان آبی دشت‌ها و ارتفاعات محدوده مطالعاتی هشتگرد

Effective rainfall (MCM)		Evapotranspiration (from rainfall) (MCM)	Rainfall volume (MCM)	Area (km <sup>2</sup> )	Range
Runoff	Recharge				
13.2	39.4	115.0	255.8	579	Plain
99.0	33.0	123.7	167.5	591.6	Mountains

می‌باشد که آبدهی سالانه حدود ۹۱ میلیون مترمکعب را دارا می‌باشد (Shahbazi et al., 2020; RIWEM, 2021). حجم آب مصرفی در این محدوده مطالعاتی برابر با ۳۶۳/۱ میلیون مترمکعب در سال است که ۳۲۰/۳ میلیون مترمکعب از آب‌های زیرزمینی (چاه و قنات) و ۴۲/۷ میلیون مترمکعب در سال از جریان‌های سطحی و چشمه است که به ترتیب ۳۳۰/۸ میلیون مترمکعب به مصرف کشاورزی، ۲۴/۳ میلیون مترمکعب مصرف شرب و ۷/۹ میلیون مترمکعب به صرف صنعت می‌رسد (RIWEM, 2021). همچنین در شکل ۲ موقعیت محدوده مطالعاتی هشتگرد مشاهده می‌گردد.

ارتفاعات قرار داده شده است (Iran Water Resources Management Company, 2013).

در سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ تخلیه سالانه آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی هشتگرد به حدود ۳۲۸/۴ میلیون مترمکعب رسیده که چاه‌های بهره‌برداری با اختصاص ۹۷ درصد تخلیه سالانه (۳۱۸ میلیون مترمکعب)، اصلی‌ترین منبع زیرزمینی در این محدوده محسوب می‌گردند. قنات و چشمه‌های موجود در این محدوده به ترتیب ۳/۴ و ۶ میلیون مترمکعب از تخلیه سالانه آب زیرزمینی را به خود اختصاص می‌دهند. مهم‌ترین رودخانه موجود در این محدوده، رودخانه کردان

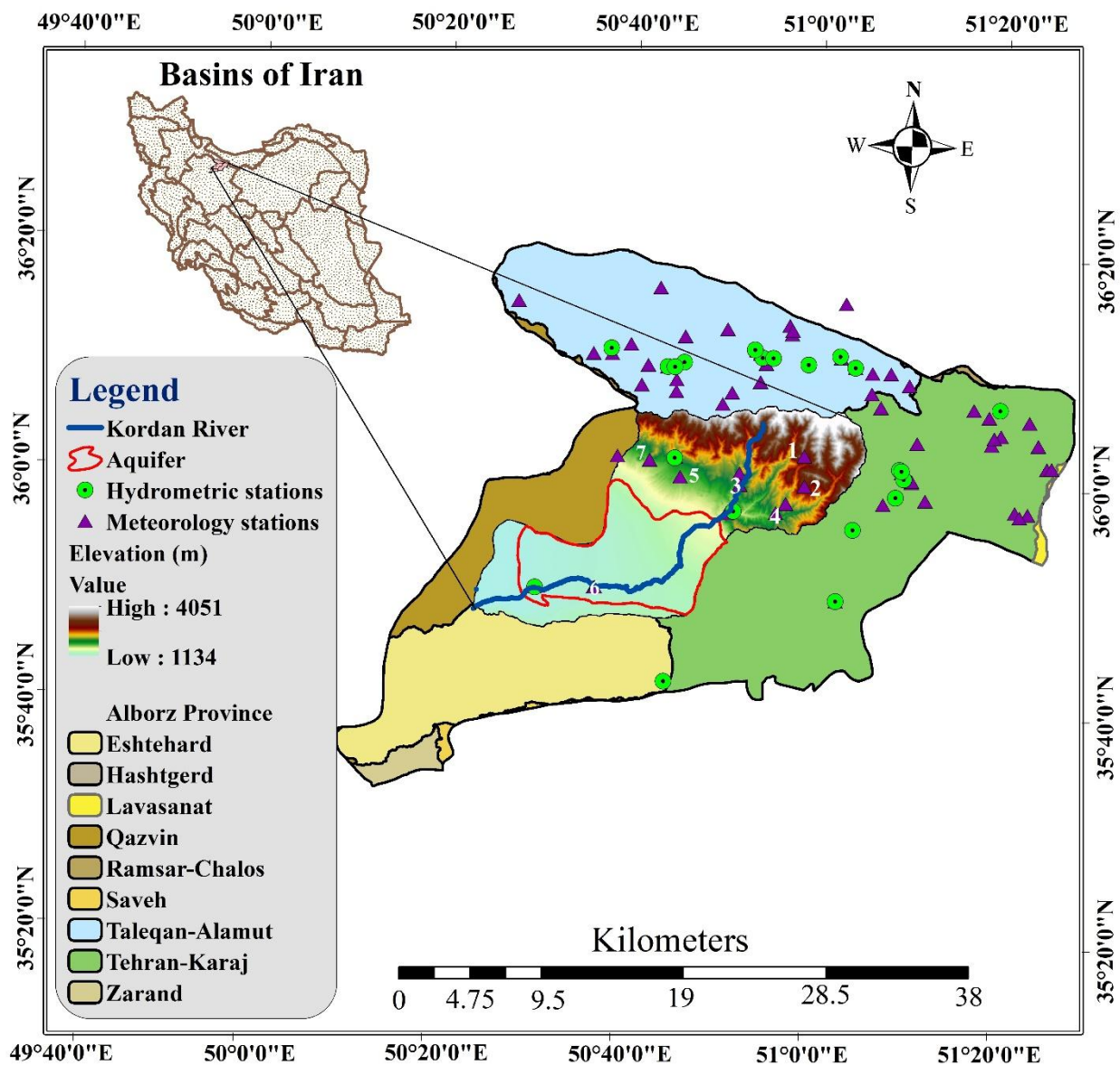


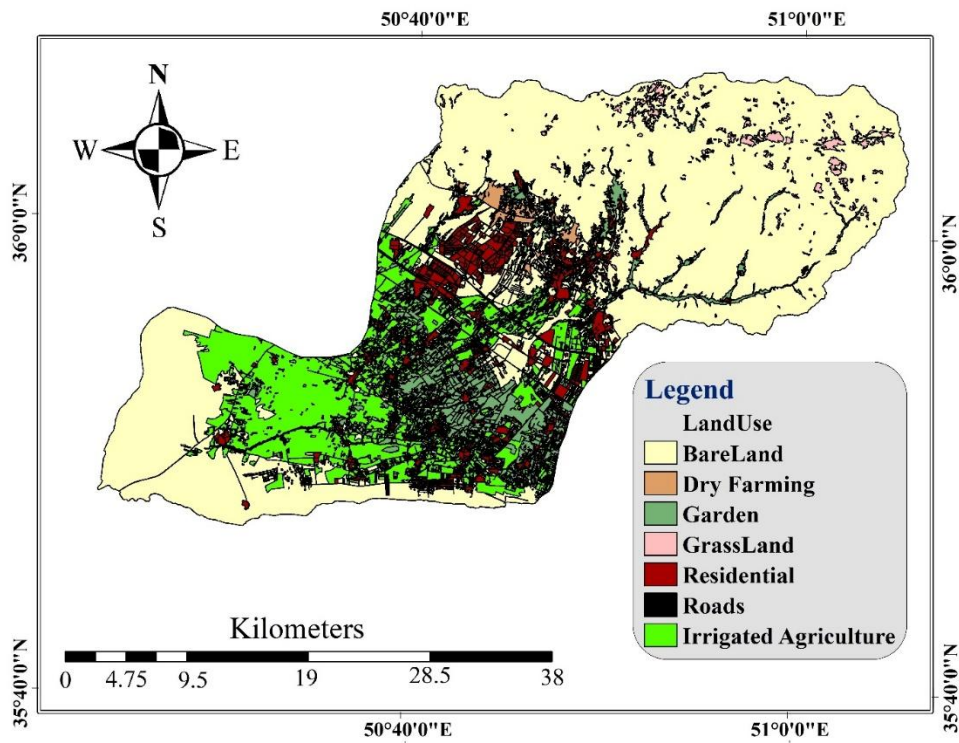
Fig. 2- Location of Hashtgerd study area

شکل ۲- موقعیت محدوده مطالعاتی هشتگرد

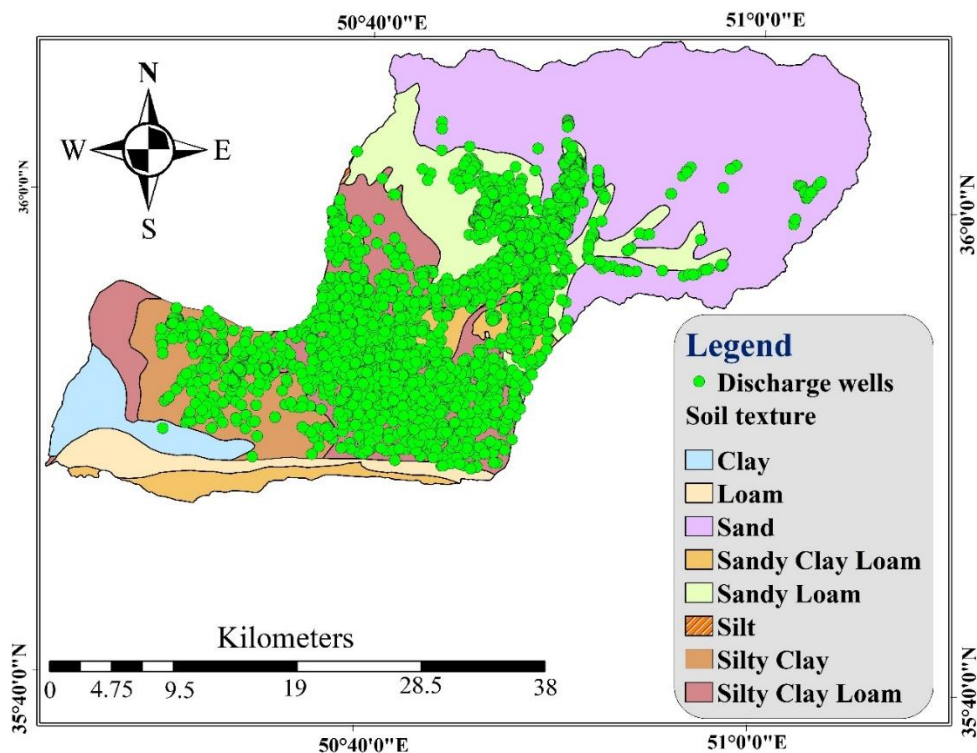
نقشه کاربری اراضی یکی از اساسی‌ترین نقشه‌های مورد نیاز مدل توزیعی می‌باشد و استخراج دقیق آن منجر به افزایش دقت نتایج خروجی مدل می‌گردد. مطابق نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی هشتگرد (شکل ۳a) مشاهده می‌شود که این محدوده به لحاظ کاربری اراضی در ۷ دسته خاک لخت، زمین‌های دیم، باغات، مراتع، مناطق مسکونی، جاده و مزارع آبی طبقه‌بندی شده است. باغات و مزارع آبی در بخش‌های مرکزی محدوده مطالعاتی قرار گرفته‌اند و قسمتی از

باغات در ارتفاعات واقع شده است. نقشه بافت خاک نیز از نقشه‌های پایه مدل توزیعی می‌باشد که طبق نقشه بافت خاک محدوده مطالعاتی هشتگرد ملاحظه می‌گردد که بافت خاک در ارتفاعات شنی و در دشت اغلب رس می‌باشد. همچنین چاه‌های بهره‌برداری در شکل ۳b ارائه شده است که بیانگر تراکم زیاد چاه‌ها در باغات و مزارع آبی است (RIWEM, 2021).

a)



b)



**Fig. 3- a) Land-use map of Hashtgerd study area, b) Soil texture and discharge wells (RIWEM, 2021)**

شکل ۳- a) نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعاتی هشتگرد، b) بافت خاک و چاه‌های بهره‌برداری (RIWEM, 2021)

## ۲-۲- مدل شبیه‌سازی

در این پژوهش از مدل WetSpas-M به‌عنوان یک ابزار مدل‌سازی برای برآورد ماهانه و میانگین بلندمدت الگوهای مکانی رواناب سطحی، تبخیر و تعرق واقعی، تغذیه آب‌های زیرزمینی و برگاب استفاده شده است. این مدل علاوه بر شبیه‌سازی میانگین سالانه یا ماهانه اجزای بیلان قابلیت شبیه‌سازی اجزای بیلان آب در نقشه‌های رستری در مقیاس زمانی ماهانه را دارد. قابلیت دیگر آن استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در قالب نقشه‌های رستری است. همچنین برای مطالعه درباره اثرات بلندمدت تغییرات کاربری اراضی در هرکدام از اجزای بیلان آب و نوسانات آب زیرزمینی در یک حوضه مناسب است (Batelaan and Smedt, 2001). مدل توزیعی، ورودی‌های بیلان آب را در محیط Arc GIS ادغام می‌کند و به برآورد توزیع زمانی و مکانی اجزای بیلان می‌پردازد. در جدول ۲ پارامترهای ورودی مدل محدوده مطالعاتی هشتگرد، ارائه شده است. در مدل WetSpas-M، براساس نقشه کاربری اراضی و بافت خاک، بیلان آب برای سلول‌های هر نقشه به‌صورت بیلان‌های آبی مستقل گیاهی، خاک، مخازن آب و

قسمت نفوذناپذیر هر سلول تقسیم می‌شود (Batelaan and Smedt, 2001). از جمله داده‌های مورد نیاز مدل توزیعی WetSpas-M علاوه بر داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، داده‌های رقمی نیز می‌باشد. تمام ورودی‌های مدل به‌جز تعداد روزهای بارانی که متوسط‌گیری مکانی می‌شود، به‌صورت نقشه‌های رستری بوده و در محیط Arc GIS تهیه شده است. نقشه‌های آبیاری به‌عنوان یکی دیگر از ورودی‌های مدل می‌باشد که با استفاده از تجمیع برداشت از چاه‌های بهره‌برداری (شکل ۳a) و اعمال آن در محدوده هر یک از باغات و مزارع کشاورزی به‌عنوان ورودی به مدل توزیعی تهیه شد. خروجی‌های مدل (تبخیر و تعرق، تغذیه آب زیرزمینی، رواناب و برگاب) نیز به‌صورت نقشه و شامل یک فایل خلاصه از متوسط‌گیری حوضه‌ای است. در این پژوهش همه نقشه‌های رستری ورودی به مدل با ابعاد پیکسل ۱۰۰ × ۱۰۰ متر و تعداد ستون ۳۶۴ و تعداد سطر ۶۲۶ در محیط نرم‌افزار Arc GIS تهیه شده است. همچنین، دوره زمانی نقشه‌های ورودی تهیه شده و اطلاعات کامل آن در جدول ۲ قرار داده شده است.

Table 2- Input parameters of WetSpas-M model for Hashtgerd study area

جدول ۲- پارامترها/متغیرهای ورودی مدل WetSpas-M محدوده مطالعاتی هشتگرد

Input parameter/variables	Source	Processing tool/method	Number	Resolution	Time (year)
Digital elevation model (DEM)	Shuttle Radar Topography Mission	-	1	100×100	1398
Slope map	Calculated from DEM	DEM processing	1	100×100	1398
Land-use map	Extracted by processing the satellite images in three sections PCA, Indices and Classification	Lookup according to WetSpas-M model	1	100×100	1395
Soil texture map	(RIWEM, 2021)	Lookup according to WetSpas-M model	1	100×100	1395
Rain maps	Observed rainfall	Interpolation using Kriging and CoKriging	228	100×100	1379-1398
Irrigation maps	(RIWEM, 2021)	According to the pumping from wells	228	100×100	1379-1398
Groundwater depth maps	Observed groundwater depth	Interpolation using Kriging	228	100×100	1379-1398
Temperature maps	Observed temperature	Regression; elevation and temperature	228	100×100	1379-1398
Wind speed maps	Observed wind speed	Average monthly synoptic station	228	100×100	1379-1398
potential ET maps	Observed potential ET	Regression; elevation and potential ET	228	100×100	1379-1398
Leaf area index maps	Landsat 8 and Landsat 5 satellite images	Estimated from Landsat 8 and Landsat 5 satellite images	228	100×100	1379-1398

## ۲-۱- واسنجی و صحت‌سنجی مدل

در مطالعه حاضر به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل از داده‌های دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری رودخانه کردان به عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده گردید. با توجه به این که داده‌های دبی مشاهداتی رودخانه موردنظر تا گام زمانی ۲۰۴ (شهریور ۱۳۹۶) در دسترس بود و همچنین برای سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۲ و ۱۳۹۲-۱۳۹۳ داده دبی رودخانه ثبت نشده است. بر این مبنا گام زمانی ۱ تا ۱۳۲ به عبارت دیگر از مهر ۱۳۷۹ تا شهریور ۱۳۹۰ به عنوان دوره واسنجی و گام ۱۳۱ تا گام ۲۰۴ به عبارت دیگر از مهر ۱۳۹۰ تا شهریور ۱۳۹۶ به عنوان دوره صحت‌سنجی مدل انتخاب شد. برای ارزیابی دقت مدل در برآورد اجزای بیلان از پارامترهای واسنجی مدل استفاده گردید. فرآیند صحت‌سنجی نیز با ثابت نگه داشتن مقادیر بهینه بدست آمده پارامترها در فرآیند واسنجی اجرا می‌شود و معیارهای ارزیابی دقت مدل که در مرحله واسنجی انجام گرفت، برای دوره زمانی صحت‌سنجی نیز انجام می‌گردد.

## ۲-۳- تحلیل تغییرات

به منظور بررسی تحلیل تغییرات اجزای بیلان، در مطالعه حاضر از شاخص انحراف معیار برای خروجی‌های مدل استفاده گردید. انحراف معیار نشان می‌دهد به طور میانگین داده‌ها چه مقدار از میانگین فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند. این مفهوم به صورت بررسی پارامتر/ متغیر با دامنه تغییرات کم، قابل تحلیل است. در حالی که انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها می‌باشد و عملاً به نوعی بزرگی آن بیانگر خطا و دامنه تغییرات بیشتر عامل مورد بررسی است. از طرفی با توجه با اینکه در مطالعه حاضر برای برآورد انحراف معیار از متوسط سالانه هریک از نقشه‌های اجزای بیلان استفاده شده است و توزیع اجزای بیلان در مکان و زمان مختلف، بسیار متغیر است. این امر بیانگر تغییرات زیاد و بالابودن میزان انحراف معیار برای هر یک از اجزای بیلان می‌باشد. بررسی تحلیل تغییرات در دوره آماری از سال آبی ۱۳۷۹-۱۳۸۰ تا سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ مدنظر است.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (12)$$

که در معادله فوق  $\sigma$  معادل انحراف معیار،  $x_t$  مقادیر متوسط سالانه اجزای بیلان در سال آبی مورد نظر ( $t$ )،  $\bar{x}$  متوسط سالانه اجزای بیلان و  $n$  تعداد دوره زمانی مورد بررسی را نشان می‌دهد.

دوره آماری از سال آبی ۱۳۷۹-۱۳۸۰ تا سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ بوده و تعداد ۲۲۸ نقشه به صورت رستری با فرمت Ascii ساخته شده است. در هر سلول، محاسبه تبخیر و تعرق، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی صورت گرفته و برای کل محدوده با هم جمع می‌شوند که در روابط زیر نشان داده شده است:

$$ET_{raster} = avET_v + asE_s + aoE_o + aiE_i \quad (1)$$

$$S_{raster} = avS_v + asS_s + aoS_o + aiS_i \quad (2)$$

$$R_{raster} = avR_v + asR_s + aoR_o + aiR_i \quad (3)$$

که  $ET_{raster}$ ،  $S_{raster}$  و  $R_{raster}$  به ترتیب معادل تبخیر و تعرق، 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. روند کلی محاسبه اجزای بیلان به همراه معادلات آن در مدل WetSpas-M در جدول ۳ ارائه شده است. جزئیات بیشتر از نحوه برآورد بیلان در این مدل با استفاده از روابط اشاره شده در مرجع Abdollahi et al. (2012) آمده است.

در پژوهش حاضر برای بررسی عملکرد مدل از ضریب تبیین (رابطه ۸)، ضریب کارایی نش- ساتکلیف (رابطه ۹)، میانگین مربعات خطا (رابطه ۱۰) و میانگین خطای مطلق (رابطه ۱۱) به عنوان معیارهای آماری نکویی برازش در دوره واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شده است.

$$R^2 = \left( \frac{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 - \sum(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \right) \quad (8)$$

$$ENS = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{n}} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |Q_{sim} - Q_{obs}|}{n} \quad (11)$$

که  $R^2$  ضریب تبیین، ENS ضریب کارایی نش- ساتکلیف، میانگین مربعات خطا، MAE میانگین خطای مطلق،  $Q_{obs}$  دبی مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری،  $Q_{sim}$  دبی شبیه‌سازی شده،  $\overline{Q_{obs}}$  و  $\overline{Q_{sim}}$  به ترتیب دبی میانگین مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشند.



**Table 3- Equations used in the WetSpas-M model to simulate the water balance components**

جدول ۳- معادلات مورد استفاده در مدل WetSpas-M برای شبیه‌سازی اجزای بیلان آب

Equation	Parameter definitions
<p>Interception</p> $I_m = P_m I_R \quad (4)$ <p>Where</p> $I_R = \frac{I_m}{P_m} = 1 - \exp\left(\frac{-I_D dp}{P_m}\right)$ $I_D = a \cdot LAI \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{P_m(1 - \exp(-0.463LAI))}{a \cdot LAI}}\right)$	<p><math>I_m</math>: Monthly interception (mm/month)  <math>P_m</math>: Monthly precipitation (mm/month)  <math>I_R</math>: Interception ratio  <math>dp</math>: Number of rainy days per month (day/ month)  <math>I_D</math>: Daily interception threshold  <math>LAI</math>: Leaf area index</p>
<p>Surface runoff</p> $SR_m = C_{sr} C_h (P_m - I_m) \quad (5)$ <p>Where</p> $C_{sr} = \frac{C_{wp} \bar{P}_{24}}{C_{wp} \bar{P}_{24} - RCD * C_{wp} + RCD}$ $C_{wp} = \left(1 - \frac{A_{Imp}}{100}\right) C_{per} + \frac{A_{Imp}}{100} C_{Imp}$ $C_{per} = W1 \left(\frac{0.02}{n}\right) + W2 \left(\frac{\theta_w}{1 - \theta_w}\right) + W3 \left(\frac{S_p}{10 + S_p}\right)$ $C_{Imp} = 0.9 \exp(0.024 A_{Imp})$ $C_h = \frac{P_m}{LP(P_m^\alpha + ET_m^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}}} \quad \text{if } ET_m > P_m$ $C_h = 1 \quad \text{if } ET_m \leq P_m$	<p><math>SR_m</math>: Monthly surface runoff  <math>C_h</math>: Soil moisture coefficient (-)  <math>C_{sr}</math>: Actual runoff coefficient (-)  <math>C_{wp}</math>: Weighted potential runoff coefficient  <math>\bar{P}_{24}</math>: Average daily rainfall (mm/day per month)  <math>RCD</math>: Regional consecutive dryness level (mm)  <math>A_{Imp}</math>: Percentage of impervious surface in each cell  <math>C_{per}</math>: Runoff coefficient for permeable area  <math>C_{Imp}</math>: Runoff coefficient of the impervious area,  <math>n</math>: Manning's roughness coefficient  <math>\theta_w</math>: Volumetric soil water content at wilting point  <math>S_p</math>: Land surface slope (%)  <math>W1, W2</math> and <math>W3</math> are the weights of the three components contributing to <math>C_{per}</math>, which are 0.4, 0.3 and 0.3, respectively, in line with the runoff coefficients mentioned in the WetSpas-M model.  <math>LP, \alpha</math>: Calibration parameters (-)</p>
<p>Evapotranspiration</p> $C = \frac{1 + \frac{\gamma}{\Delta}}{1 + \frac{\gamma}{\Delta} \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (6)$ <p>Where</p> $r_a = \frac{1}{k^2 u_a} \left(\ln\left(\frac{z_a - z_d}{z_0}\right)\right)^2$ $T_{rv} = cET_p$ $T_v = (1 - A_1^{w/T_{rv}}) T_{rv}$ $W = P_m + (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) R_d$	<p><math>\gamma</math>: Psychrometric constant (kPa/°C) which is the slope of the first derivative of the saturated vapor pressure curve  <math>r_c</math>: Canopy resistance (sm<sup>-1</sup>)  <math>r_a</math>: Aerodynamic resistance (sm<sup>-1</sup>)  <math>K</math>: Von Karman constant (0.41)  <math>u_a</math>: Wind speed at elevation <math>z_a</math> (m/s)  <math>z_d</math>: Zero displacement elevation (m)  <math>z_0</math>: Aerodynamic roughness height of surface (m)  <math>T_{rv}</math>: Reference transpiration  <math>T_v</math>: Actual transpiration  <math>ET_p</math>: Potential evaporation of open water  <math>c</math>: Vegetation coefficient (-)  <math>W</math>: Available water for transpiration  <math>R_d</math>: Rooting depth  <math>\theta_{fc} - \theta_{pwp}</math>: Plant available water content per time step, stated as the difference in water content at field capacity and at permanent wilting point</p>
<p>Groundwater recharge</p> $R_m = P_m - SR_m - ET_m \quad (7)$	<p><math>SR_m</math>: Monthly surface runoff  <math>P_m</math>: Monthly precipitation  <math>ET_m</math>: Actual evapotranspiration  <math>R_m</math>: Groundwater recharge</p>

## ۴-۲- الگوریتم SEBAL

$R_n$  تابش خالص،  $G$  شار گرمای خاک،  $H$  شار گرمای محسوس و  $\lambda ET$  شار گرمای نهان بوده و تمامی واحدها بر حسب  $W/m^2$  می‌باشند. جزئیات بیشتر از فرآیند محاسبه تبخیر و تعرق در مطالعه Waters et al. (2002) آمده است. به منظور صحت‌سنجی مقادیر تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل SEBAL از مقادیر تبخیر و تعرق واقعی بدست آمده از روش فائو- پنمن مانیتیت استفاده گردید (Bastiaanssen et al., 2002).

برای برآورد تبخیر و تعرق روزانه ماهواره از مقدار لحظه‌ای (برای یک ساعت)، از نسبت تبخیر و تعرق گیاه مرجع روزانه به ساعتی استفاده می‌گردد. به این منظور تبخیر و تعرق گیاه مرجع (حاصل از روش پنمن- مانیتیت- فائو در مقیاس ساعتی (میلی‌متر در ساعت) در لحظه گذر ماهواره ( $ET_{r-inst}$ ) و همچنین میزان آن در مقیاس روزانه بر حسب میلی‌متر در روز ( $ET_{r-24}$ ) برای ایستگاه هواشناسی معرف منطقه محاسبه می‌شود. سپس از رابطه ۱۴ میزان تبخیر و تعرق واقعی روزانه مدل‌های ماهواره‌ای ( $ET_{act-24}$ ) بر حسب میلی‌متر در روز برآورد می‌گردد (Bastiaanssen et al., 2002).

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} \left( \frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}} \right) \quad (14)$$

برای دوره‌های زمانی بزرگ‌تر مانند دوره‌های ده روزه، یک ماهه و سالانه نیز با همین روش تبخیر و تعرق واقعی برآورد می‌گردد.

الگوریتم SEBAL ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای را به همراه اطلاعات و برداشت‌های زمینی معمول هواشناسی بطور مستقیم و غیرمستقیم مورد استفاده قرار می‌دهد. قابل ذکر است که در الگوریتم SEBAL اهمیت خطاهای تولیدی توسط عدم قطعیت پارامترهای ورودی نسبتاً کم بوده و این خطای تخمینی اثر زیادی بر روی محاسبات شار گرمای محسوس نخواهد داشت. داده‌های مورد نیاز این مدل شامل: باندهای مرئی، و مادون قرمز نزدیک و حرارتی یک تصویر ماهواره‌ای به همراه نقشه DEM و داده‌های ثانویه هواشناسی مثل دما، رطوبت، فشار و سرعت باد می‌باشد. در این پژوهش تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر Landsat 5-8، و در صورت عدم وجود این تصاویر برای برخی از ماه‌ها، با استفاده از تصاویر MODIS محاسبه شده‌اند.

همچنین به منظور همسان‌سازی کردن تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این مطالعه از روش تصویر- نقشه در سطح زیر پیکسل استفاده شد. این روش اختلاف جزئی موجود در موقعیت مکانی سلول‌های تصاویر را برطرف نمود. مشخصات باندهای سنجنده‌های Landsat 5-8 و MODIS به ترتیب در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. معادله کامل بیلان انرژی به صورت ذیل محاسبه می‌گردد:

$$\lambda ET = R_n - H - G \quad (13)$$

Table 4- Characteristics of Landsat 5 and 8 satellite image bands

جدول ۴- مشخصات باندهای تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸

	Band number	1	2	3	4	5	6	7
		Wavelength ( $\mu m$ )	0.45-0.52	0.52-0.6	0.63-0.69	0.76-0.9	1.55-1.75	10.4-12.5
Resolution (m)		30	30	30	30	30	120	30
Landsat 5 (TM)	Band number	2	3	4	5	6	7	10
	Wavelength ( $\mu m$ )	0.45-0.51	0.53-0.59	0.64-0.67	0.85-0.88	1.57-1.65	2.11-2.29	10.6-11.19
	Resolution (m)	30	30	30	30	30	120	100

Table 5- Characteristics of MODIS satellite image bands

جدول ۵- مشخصات باندهای تصاویر ماهواره‌ای MODIS

MODIS	Band number	1	2	3	4	5	6	7	31	32
		Wavelength ( $\mu m$ )	0.62-0.67	0.84-0.87	0.46-0.48	0.54-0.56	1.23-1.25	1.63-1.65	2.11-2.15	10.8-11.3
Resolution (m)		250	250	500	500	500	500	500	1000	1000

در این مطالعه، مقدار تبخیر و تعرق پیکسل سرد، ۵ درصد بیشتر از تبخیر و تعرق گیاه مرجع در نظر گرفته شد و در بدست آوردن مقدار تبخیر و تعرق واقعی از روش فائو- پنمن مانیتیت نیز مقدار ضریب گیاهی Bastiaanssen et al. (2002) نیز مدنظر بوده است.

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

دوره آماری از سال آبی ۱۳۸۰-۱۳۷۹ تا سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ به عنوان دوره شبیه‌سازی این مطالعه انتخاب شده است. در مرحله واسنجی مدل از پارامترهای جدول ۶ استفاده گردید. مقادیر بهینه این پارامترها با استفاده از اجرای مکرر مدل توزیعی و مقایسه نتایج حاصل از تغییرات پارامترهای مختلف صورت گرفت. به طوری که مقادیر شبیه‌سازی شده تا حد امکان به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک شوند.

باتوجه به توپوگرافی منطقه و توزیع ایستگاه‌های باران‌سنجی، دقت نقشه‌های ماهانه بارش برآورد شده با درون‌یابی به روش کوکریجینگ (متغیر همبسته ارتفاع ایستگاه بوده که از نقشه DEM استفاده شده و مدل واریوگرام ساده استفاده شده است) برای کل دوره شبیه‌سازی در جدول ۷ ارائه گردیده است. این روش پس از بررسی نتایج حاصل از روش‌های دیگر به عنوان مناسب‌ترین روش برای درون‌یابی بارش ماهانه در محدوده مطالعاتی انتخاب شده و مورد استفاده قرار گرفت.

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل توزیعی از داده‌های دبی شبیه‌سازی و مشاهداتی استفاده شده است (شکل ۴). طبق نتایج به‌دست‌آمده این مقادیر ضریب تبیین، ضریب کارایی نش- ساتکلیف، میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق برای دوره ۱۱ ساله واسنجی مدل به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۷۴ (بی‌بعد)، ۲/۳ و ۱/۵ (مترمکعب بر ثانیه) می‌باشد. همچنین این مقادیر برای دوره صحت‌سنجی نیز به ترتیب معادل ۰/۷۰ و ۰/۶۹ (بی‌بعد)، ۱/۵ و ۱/۱ (مترمکعب بر ثانیه) محاسبه شده است (شکل ۴). در جمع‌بندی قابل ذکر است که دبی شبیه‌سازی شده روند قابل قبولی با جریان رودخانه در دوره صحت‌سنجی نیز دارد. همچنین، میانگین دبی سالانه و کل دوره زمانی قابل قبول می‌باشد.

مطابق با نتایج بدست آمده از مدل مشخص گردید که تبخیر و تعرق بیشترین سهم را در بیلان آب محدوده مورد مطالعه به خود اختصاص داده است. از طرفی به منظور کنترل تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی با مدل توزیعی تشریح شده در بخش روش‌شناسی، از داده‌های تبخیر و تعرق برآورده شده با الگوریتم SEBAL نیز استفاده گردید. در این راستا، ابتدا برای اعتبارسنجی تبخیر و تعرق برآورده شده با الگوریتم SEBAL از روش فائو- پنمن مانیتیت استفاده گردید. با توجه به دقت بالا و همبستگی مناسب نتایج (شکل ۵)، در مرحله بعد داده‌های محاسبه شده تبخیر و تعرق با الگوریتم SEBAL و داده‌های تبخیر و تعرق برآورده شده با مدل توزیعی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۶).

**Table 6- Optimal values of the measured parameters for Wetspass-M model in Hashtgerd study area**  
جدول ۶- مقادیر بهینه پارامترهای اندازه‌گیری شده برای مدل Wetspass-M محدوده مطالعاتی هشترگرد

Water balance components	Parameter	Variation range	Optimized value
Interception	a	0.3-8.5	6.5
Evapotranspiration	$\alpha$	0.3-8.5	6.5
Surface runoff	Lp	0.4-5.5	1.9
Surface runoff	X	0-1	0.45
Base flow	$\beta$	0-1	0.97
Recharge contribution parameter	$\emptyset$	0-1	0.19

**Table 7- Evaluation of the accuracy of monthly precipitation maps in Hashtgerd study area**  
جدول ۷- ارزیابی دقت نقشه‌های بارش ماهانه محدوده مطالعاتی هشترگرد

Meteorological stations*	R <sup>2</sup> (-)	RMSE (mm)	MAE (mm)	ENS (-)
1	0.98	4.6	2.2	0.98
2	0.97	5.6	2.5	0.98
3	0.95	6.1	3.6	0.96
4	0.98	2.3	1.4	0.98
5	0.98	3.1	1.6	0.98
6	0.94	6.4	4.1	0.95
7	0.97	6.8	3.6	0.96

\* Meteorological station's number is shown in Fig 2.

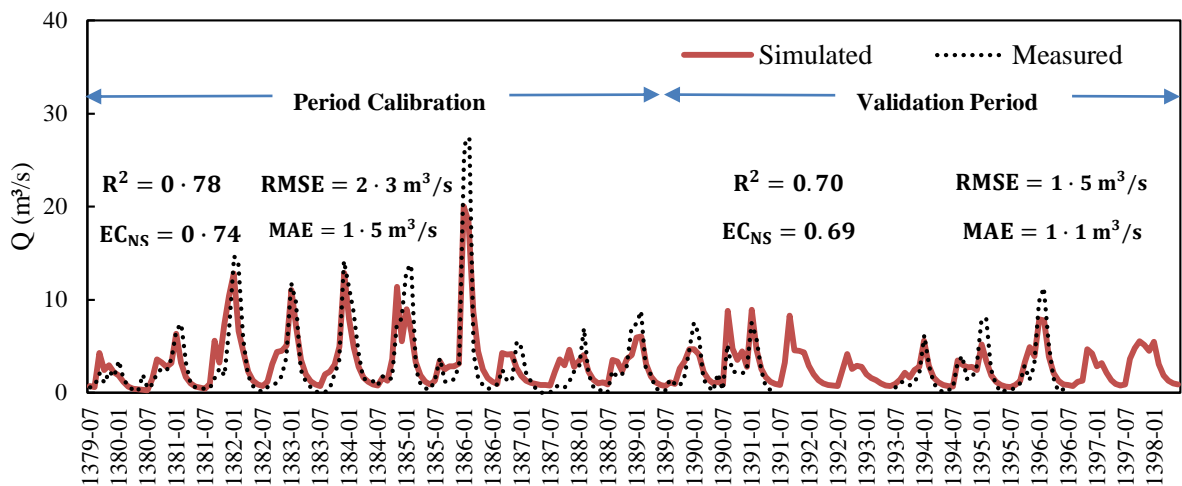


Fig. 4- Comparison of observed and simulated discharges in Kordan river hydrometric station for calibration and validation period from 1379 to 1398

شکل ۴- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی در ایستگاه هیدرومتری رودخانه کردان برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸

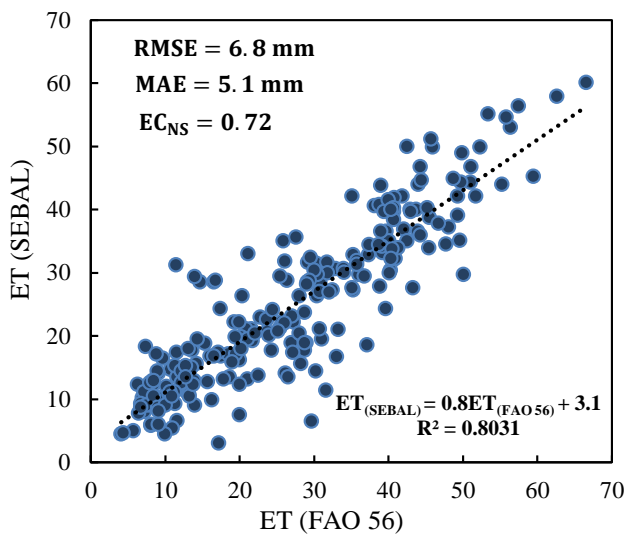


Fig. 5- Scatter plot of FAO 56 evapotranspiration and evapotranspiration estimated by SEBAL algorithm for Hashtgerd study area

شکل ۵- نمودار پراکنش تبخیر و تعرق ماهانه FAO 56 با تبخیر و تعرق برآورد شده توسط الگوریتم SEBAL در محدوده مطالعاتی هشتگرد

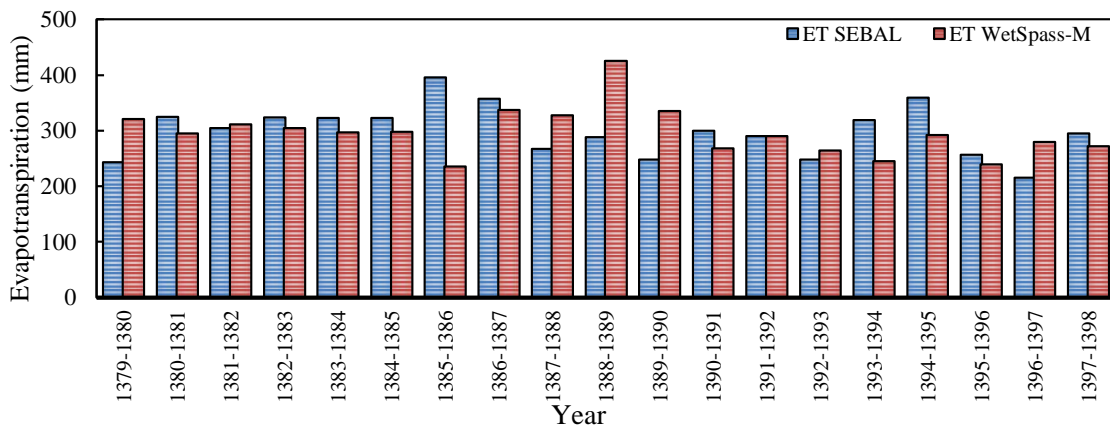


Fig. 6- Annual evapotranspiration (ET) of the simulated distributed model and evapotranspiration estimated by SEBAL algorithm Hashtgerd study area

شکل ۶- مقادیر تبخیر و تعرق سالانه (ET) شبیه‌سازی شده مدل توزیعی و تبخیر و تعرق برآورد شده توسط الگوریتم SEBAL محدوده مطالعاتی هشتگرد

بیشترین تبخیر و تعرق به لحاظ گسترده مکانی در باغات، مزارع و در مناطقی که تراکم چاه‌های بهره‌برداری زیاد است رخ داده است.

در جدول ۸ میانگین سالانه اجزای بیلان آب در محدوده مطالعاتی هشتگرد ارائه شده است. مطابق با این جدول، در این دوره ۱۹ سال، سال‌های آبی نرمال، تر و خشک به ترتیب سال آبی ۸۱-۱۳۸۰، ۸۶-۱۳۸۵ و ۸۷-۱۳۸۶ می‌باشد. مطابق نتایج بدست آمده از مدل در محدوده مطالعاتی هشتگرد میزان تبخیر و تعرق حقیقی و تغذیه آب زیرزمینی به عنوان دو مؤلفه‌ای که بیش از ۸۰ درصد از بیلان را به خود اختصاص دادند مقادیر آن در سال‌های آبی نرمال، تر و خشک برای مؤلفه تبخیر و تعرق حقیقی به ترتیب ۳۴۴/۷، ۲۷۵/۶ و ۳۵۴/۹ میلیون مترمکعب در سال و برای مؤلفه تغذیه آب زیرزمینی به ترتیب ۳۴۰/۱، ۴۱۴/۵ و ۱۷۱/۳ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است.

مطابق با شکل ۶ مشاهده می‌گردد که تبخیر و تعرق مدل و الگوریتم SEBAL همخوانی قابل قبولی دارد. مدل WetSpas-M تأثیرپذیری بسیاری را از بارندگی و آبیاری دارد اما این موضوع در کار با الگوریتم SEBAL کمتر در نظر گرفته می‌شود. می‌توان گفت در این الگوریتم، بارندگی در یک ماه و تبخیر و تعرق حاصل از بارندگی که در هر روز از یک ماه می‌تواند اتفاق بیفتد کمتر در نظر گرفته می‌شود و از این رو این تفاوت در نتایج قابل مشاهده است. این امر نشان دهنده کارایی بهتر مدل WetSpas-M در محاسبه مؤلفه تبخیر و تعرق می‌باشد.

شکل ۷ تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده با الگوریتم SEBAL مربوط به سال آبی ۹۶-۹۷ (برای نمونه) را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل،

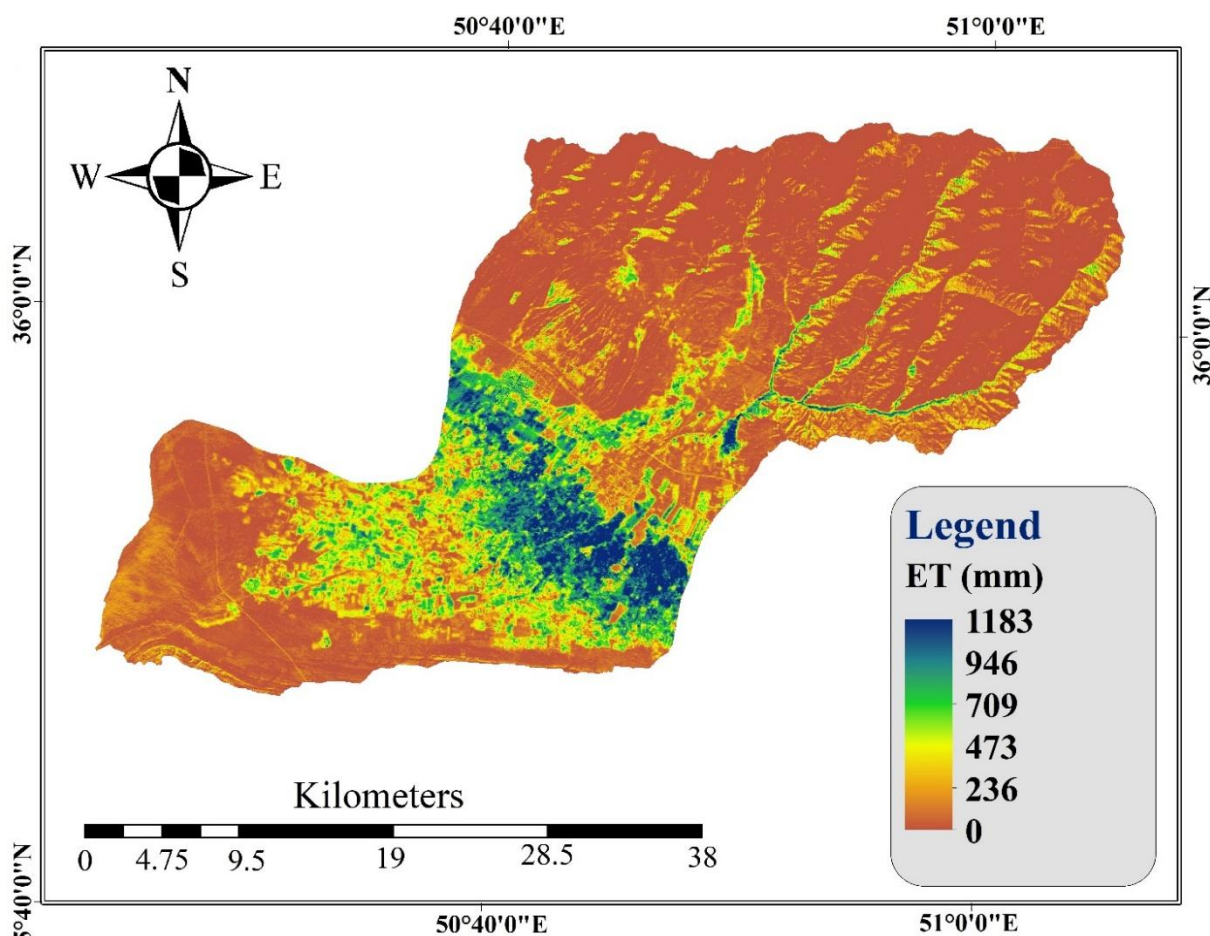


Fig. 7- Evapotranspiration map estimated by SEBAL algorithm using Landsat 8 satellite images in Hashtgerd study area in the year of 1396-1397

شکل ۷- نقشه تبخیر و تعرق برآورد شده با الگوریتم SEBAL با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 در محدوده مطالعاتی هشتگرد سال آبی ۹۶-۹۷

و مزارع آبی اختصاص داده شده است. محدوده تغییرات آبیاری در دوره ۱۹ سال در ارتفاعات ۱۴۵/۳ تا ۱۹۹/۲ میلی‌متر بوده و مقدار متوسط سالانه آن ۱۷۲/۳ میلی‌متر محاسبه شده است.

بخش اعظم باغات و مزارع در دشت قرار دارد و بخشی از آن در ارتفاعات قرار گرفته است. محدوده این تغییرات در دشت نیز ۴۰۹/۸ تا ۵۶۱/۶ میلی‌متر محاسبه شده و مقدار متوسط سالانه آن ۴۸۵/۸ میلی‌متر است. کمترین تأثیر در اجزای بیلان مربوط به برگاب می‌باشد. محدوده تغییرات آن به ترتیب برای ارتفاعات و دشت ۲/۰ تا ۴/۱ میلی‌متر و ۲/۶ تا ۶/۱ میلی‌متر محاسبه شده است. همچنین پس از مؤلفه آبیاری، تبخیر و تعرق، تغذیه، بارندگی و سپس رواناب به ترتیب بیشترین محدوده تغییرات را داشته است که در شکل ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، این مهم می‌تواند عدم قطعیت بیشتر این مؤلفه را نیز نشان دهد.

بطور کلی در کل دوره شبیه‌سازی نتایج برآورد سالانه اجزای بیلان آب حاکی از آن است که به طور متوسط تبخیر و تعرق ۴۶ درصد، تغذیه آب زیرزمینی ۳۶ درصد، رواناب ۱۷ درصد و برگاب سهم بسیار ناچیزی (۱ درصد) را به خود اختصاص داده‌اند. تغییرات توزیع بارش و آبیاری در سطح حوضه در کنار سایر عوامل مؤثر بر اجزای بیلان از جمله بافت خاک، کاربری اراضی و شیب سطح زمین در سطح حوضه، منجر به تنوع و تغییر در توزیع مکانی و زمانی اجزای بیلان آب می‌شود.

شکل ۸ و ۹ به ترتیب محدوده تغییرات برای اجزای بیلان آب در ارتفاعات و دشت را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها مقادیر متوسط سالانه و انحراف معیار برای اجزای ورودی (آبیاری و بارندگی) و خروجی (تبخیر و تعرق، تغذیه، رواناب و برگاب) بیلان در کل دوره شبیه‌سازی (۱۹ سال) نشان داده شده است. مطابق نتایج بدست آمده، آبیاری در مدل بیشترین تأثیر را در اجزای خروجی دارد به طوری که میزان آبیاری از کل آب برداشت شده از چاه‌های بهره‌برداری به باغات

Table 8- Annual average of water balance components (MCM) in Hashtgerd study area  
جدول ۸- میانگین سالانه اجزای بیلان آب (MCM) در محدوده مطالعاتی هشترگرد

Year	Rainfall	Discharge	Evapotranspiration	Runoff	Recharge	Interception	Water balance error (%)
1379-1380	360.3	426.5	375.9	125.7	291.6	4.1	-1.3
1380-1381 (Normal)	384.5	416.7	344.7	120.0	340.1	4.1	-0.96
1381-1382	486.5	406.9	364.4	254.1	290.3	2.9	-2.0
1382-1383	415.4	397.2	356.0	170.7	295.9	3.2	-1.6
1383-1384	464.9	384.2	348.0	179.8	330.2	4.9	-1.6
1384-1385	363.4	374.4	349.1	162.7	244.9	2.4	-2.8
1385-1386 (Wet)	548.7	364.6	275.6	224.4	414.5	4.5	-0.63
1386-1387 (Dry)	258.9	354.9	394.2	51.7	171.3	3.0	-1
1387-1388	380.4	345.1	382.8	109.6	242.7	4.9	-2
1388-1389	458.9	335.3	497.5	121.4	193.5	3.8	-2.7
1389-1390	416.8	325.6	392.1	92.7	267.3	5.9	-2.1
1390-1391	478.0	315.8	313.2	131.1	362.1	4.9	-2.2
1391-1392	359.8	306.0	340.0	130.0	200.2	4.5	-1.3
1392-1393	297.5	299.5	309.7	72.5	216.8	4.8	-1.1
1393-1394	274.0	289.7	286.5	76.6	212.2	3.5	-2.6
1394-1395	388.4	280.0	342.1	80.7	247.3	7.2	-1.3
1395-1396	373.1	270.2	280.4	121.8	259.1	2.1	-3.1
1396-1397	353.2	263.7	327.1	59.7	233.5	5.8	-1.5
1397-1398	524.9	253.9	318.8	91.5	365.3	8.7	-0.69
Annual Average	399.3	337.4	347.3	125.1	272.6	4.5	-1.7
Max	548.7	426.5	497.5	254.1	414.5	8.7	-0.63
Min	258.9	253.9	275.6	51.7	171.3	2.1	-3.1
$\sigma$	77.4	52.7	49.4	52.5	64.2	1.6	0.71

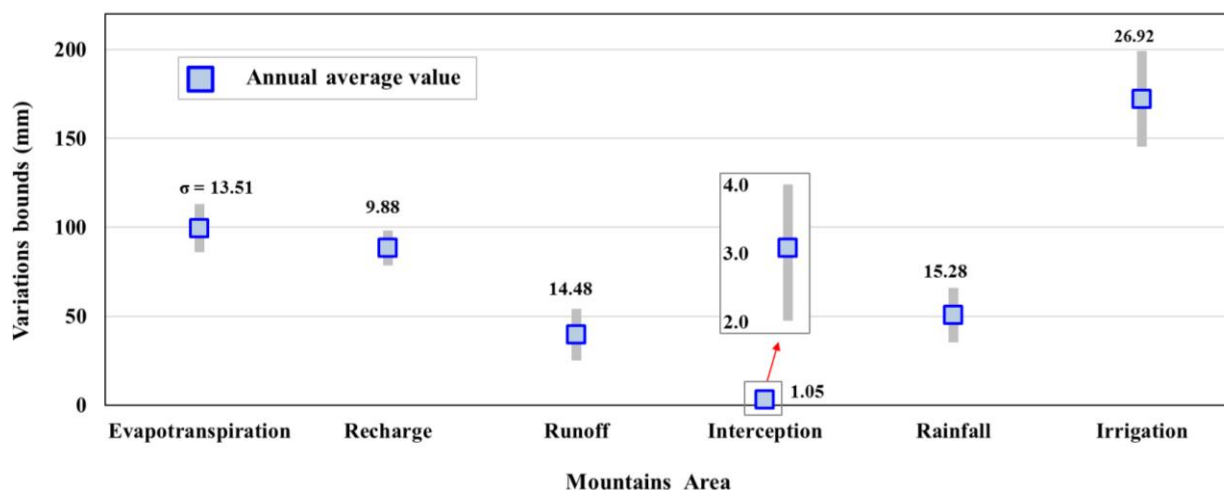


Fig. 8- Variations bounds for water balance components in mountains in Hashtgerd study area

شکل ۸- محدوده تغییرات برای اجزای بیلان آب در ارتفاعات محدوده مطالعاتی هشنگرد

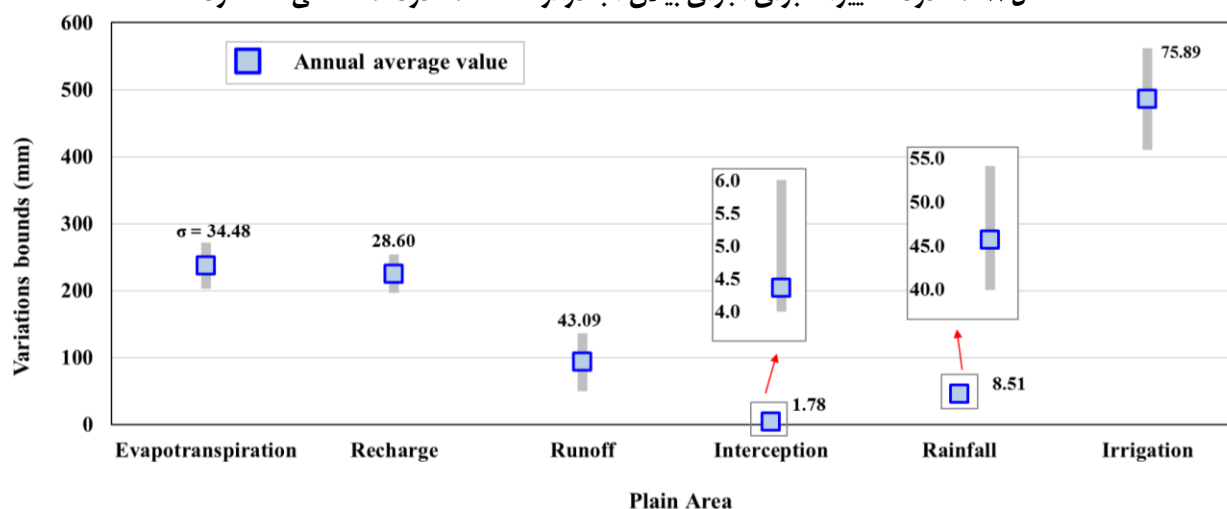


Fig. 9- Variations bounds for water balance components in the plain of Hashtgerd study area

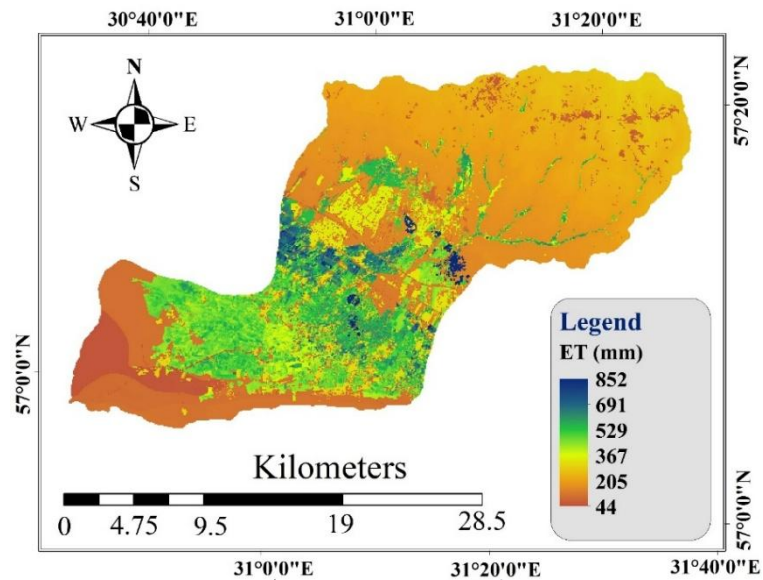
شکل ۹- محدوده تغییرات برای اجزای بیلان آب در دشت محدوده مطالعاتی هشنگرد

آماري کنترل گردید. نتایج مکانی اجزای خروجی مدل WetSpas-M برای سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

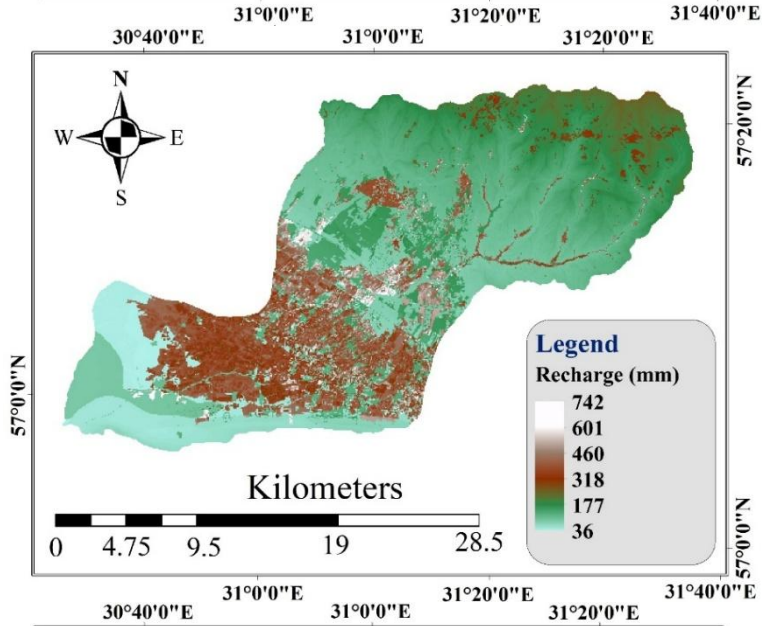
در شکل ۱۰a نقشه تبخیر و تعرق سالانه ارائه شده است. مطابق با این شکل، میزان تبخیر و تعرق در باغات به مراتب بیشتر از ارتفاعات است. متوسط تبخیر و تعرق برای دشت و ارتفاعات در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ به ترتیب معادل ۳۳۳/۷ و ۲۲۲/۳ میلی‌متر برآورد گردید. همچنین نقشه سالانه تغذیه آب زیرزمینی در شکل ۱۰b ارائه شده و مشاهده می‌شود که بیشترین میزان تغذیه آب زیرزمینی در مزارع آب و باغات است که به دلیل آبیاری در این مناطق کشاورزی می‌باشد. تغذیه در ارتفاعات تنها از بارندگی صورت می‌پذیرد که مقادیر به مراتب کمتری نسبت به دشت دارد.

بررسی نقشه‌های بارش نشان می‌دهد که میزان بارندگی در ارتفاعات نسبت به دشت مقادیر بیشتری داشته و انحراف معیار برای دشت و ارتفاعات به ترتیب معادل ۴۵/۶ و ۵۰/۷ میلی‌متر است. این در حالی که میانگین بارش معادل ۲۹۱/۳ و ۴۱۱/۴ میلی‌متر به ترتیب برای دشت و ارتفاعات محاسبه شده است. همچنین بررسی نقشه‌های تبخیر و تعرق، رواناب و برگاب نشان می‌دهد که حداکثر مقادیر آنها در ناحیه دشت می‌باشد. ارزیابی نتایج با استفاده از میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل متوسط نقشه‌ها بیانگر این است که بیشترین میزان تغییرات در بین اجزای بیلان را تبخیر و تعرق دارد که می‌تواند بیانگر عدم قطعیت بیشتر این مؤلفه در محاسبات بیلان باشد. در راستای ضرورت این مسئله تبخیر و تعرق شبیه‌سازی با مدل توزیعی با استفاده از تبخیر و تعرق برآورد شده با الگوریتم SEBAL برای کل دوره

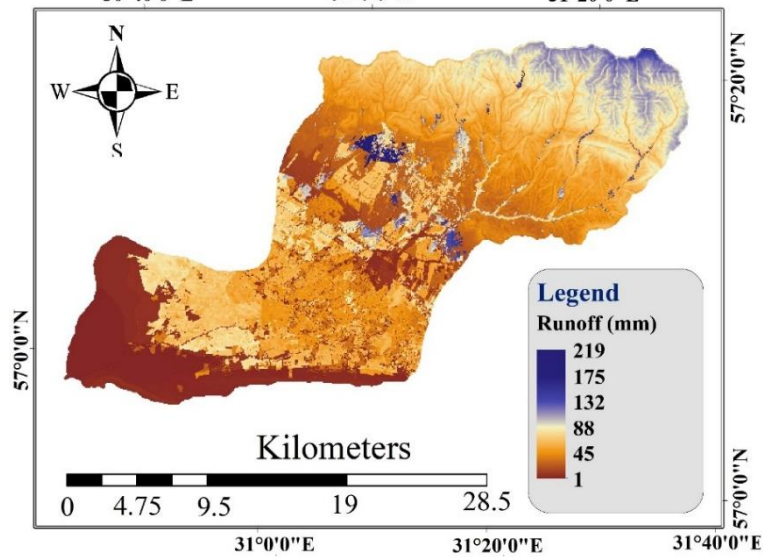
a)



b)



c)





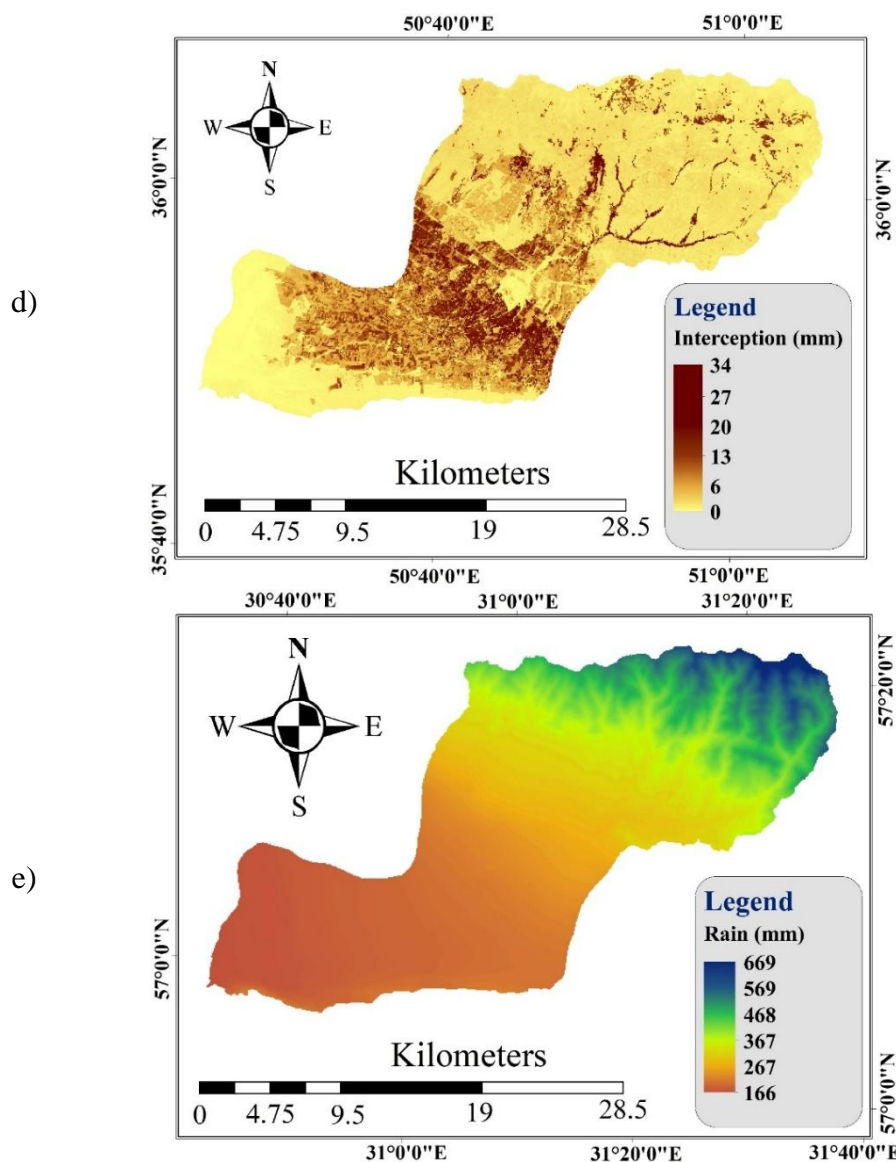


Fig. 10- Map of water balance components of Hashtgerd study area in the year of 1396-1397, a) ET, b) Recharge, c) Runoff, d) Interception, e) Rainfall

شکل ۱۰- نقشه اجزای بیلان آب محدوده مطالعاتی هشتگرد در سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۷، (a) تبخیر و تعرق، (b) تغذیه، (c) رواناب، (d) برگاب، (e) بارش

خود اختصاص داده و متوسط برگاب در دشت ۶/۵ میلی‌متر از بارندگی در سال برآورد شده است (شکل ۱۰d).

تغییرات توزیع بارش و آبیاری در سطح حوضه در کنار سایر عوامل مؤثر بر اجزای بیلان از جمله بافت خاک، کاربری اراضی و شیب سطح زمین، منجر به تنوع و تغییر در توزیع مکانی و زمانی اجزای بیلان آب می‌شود. مطابق با روند تغییرات تبخیر و تعرق (شکل ۱۱) ملاحظه می‌گردد که بیشترین میزان تبخیر و تعرق از دشت به ترتیب در ماه‌های تیر، مرداد، شهریور، خرداد، اردیبهشت، فروردین، مهر، آبان، آذر

متوسط تغذیه آب زیرزمینی برای دشت و ارتفاعات در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ به ترتیب معادل ۲۳۱/۳ و ۱۵۸/۲ میلی‌متر برآورد گردید. مقادیر رواناب تأثیرپذیری بالایی از شیب دارد و با توجه به اینکه شیب در ارتفاعات محدوده مطالعاتی بیشتر است، بنابراین در ماه‌های پر بارش میزان رواناب در ارتفاعات بیشتر از دشت است (شکل ۱۰c). متوسط رواناب در دشت و ارتفاعات نیز به ترتیب معادل ۳۹/۹ و ۶۵/۶ میلی‌متر برآورد شد. میزان مقادیر برگاب به مقدار شاخص سطح برگ (LAI) در هر سلول بستگی دارد. با توجه به اینکه بیشترین مقادیر شاخص سطح برگ در باغات می‌باشد، این مؤلفه در باغات مقادیر حداکثر را به

به ترتیب بافت‌های لوم رسی سیلتی، شن لومی و سیلت رسی بیشترین فراوانی را دارند و زمینه برای تغذیه آب زیرزمینی به لحاظ بافت خاک مهیا می‌باشد. در محدوده مطالعاتی هشتگرد مطابق با نتایج حاصل از مدل بیشترین میزان تغذیه در ارتفاعات در ماه‌های پایانی هر سال می‌باشد که به دلیل بارندگی زمستانی و کاهش متوسط دما در این ماه‌ها شرایط برای تبخیر و تعرق فراهم نبوده و تغذیه آب زیرزمینی سهم بیشتری از تبخیر را به خود اختصاص داده است در حالی که در سایر ماه‌های سال به دلیل افزایش متوسط دمای ماهانه همواره تبخیر و تعرق به لحاظ سهم در بیلان محدوده مطالعاتی بالاتر از تغذیه می‌باشد. مطابق با شکل ۱۲ بیشترین میزان تغذیه ماهانه در آبان‌ماه ۱۳۹۰ بوده که برای دشت و ارتفاعات به ترتیب معادل ۱۴۴ و ۱۲۹ میلی‌متر برآورد گردیده است. لازم به ذکر است که میزان بارندگی ماهانه برای دشت و ارتفاعات در این ماه به ترتیب ۱۷۳ و ۲۰۶ میلی‌متر می‌باشد و تقریباً ۷ درصد از کل تخلیه در سال ۱۳۹۰ به این ماه اختصاص داده شده است. مطابق با رویکرد مدل‌سازی مورد استفاده، ضرایب آب برگشتی برای محدوده مورد مطالعه به صورت توزیع زمانی و مکانی با استفاده از نقشه‌های تغذیه آب زیرزمینی برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد که متوسط ضریب آب برگشتی برای بخش کشاورزی از طریق آبیاری و بارندگی ۳۸ درصد می‌باشد. کمترین میزان ضریب آب برگشتی در زمین‌های بدون پوشش معادل صفر تا ۵ درصد و در مناطق مسکونی معادل ۴۰ تا ۷۳ درصد برآورد گردید. این ضرایب در طول دوره شبیه‌سازی و برای هر یک از سلول‌ها در مدل WetSpas-M متغیر و وابسته به سایر اجزای تأثیرگذار در میزان تغذیه برای هر سلول می‌باشد.

می‌باشد که مطابق با میزان تخصیص آب برای آبیاری باغات محدوده مطالعاتی هشتگرد می‌باشد. با توجه به این که بیشترین میزان برداشت از چاه‌های کشاورزی در ماه‌های تیر و خرداد می‌باشد و همچنین میزان دما و تابش خورشیدی در این ماه‌ها بیشتر از سایر ماه‌های سال است، در نتیجه تبخیر و تعرق برآورد شده در این ماه‌ها بیشتر از سایر ماه‌های سال است. همچنین میزان تخصیص آب آبیاری برای هر باغ و مزارع کشاورزی مطابق با تعداد چاه و میزان تخلیه آن چاه‌ها متفاوت است. هر چه تعداد چاه‌های بهره‌بردار و میزان برداشت آب برای باغات و مزارع بیشتر باشد میزان تبخیر و تعرق نیز بیشتر برآورد می‌شود. تبخیر و تعرق در ارتفاعات تنها از بارندگی صورت گرفته و در مناطق مسکونی چاه‌های برداشت به‌منظور تأمین آب مورد نیاز فضای سبز، شرب و صنعت نیز در مدل لحاظ شده است. در این مناطق، تبخیر و تعرق علاوه بر بارندگی از آب برداشتی از چاه‌ها نیز صورت گرفته است. مقادیر تبخیر و تعرق در دشت و ارتفاعات به ترتیب ۲۴۱ و ۱۰۶/۳ میلیون مترمکعب برآورد شده است. نتایج حاکی از آن است که ۶۹ درصد تبخیر و تعرق در دشت و ۳۱ درصد آن را ارتفاعات به خود اختصاص داده است.

تغییرات مکانی و زمانی تغذیه آب زیرزمینی با توجه به توزیع کاربری اراضی و شیب زمین، می‌تواند کمک قابل توجهی در شناسایی مناطق مناسب تغذیه مصنوعی کند. از این رو روند تغییرات این مؤلفه مهم و با تغییرات زیاد، برای دشت و ارتفاعات به صورت تفکیک شده در شکل ۱۲ قرار داده شده است. مطابق با نقشه بافت خاک (شکل ۳) ملاحظه می‌گردد که بافت خاک در ارتفاعات عمدتاً شنی و در مناطق کشاورزی

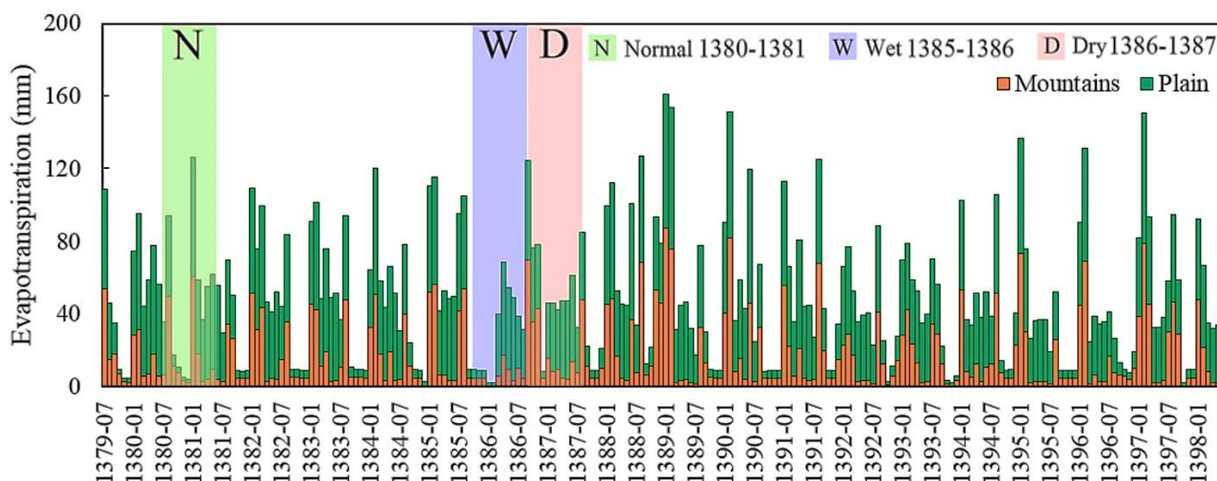


Fig. 11- Monthly values of evapotranspiration component of water balance for plains and mountains in the Hashtgerd study area from 1379 to 1398

شکل ۱۱- مقادیر ماهانه مؤلفه تبخیر و تعرق بیلان آب برای دشت و ارتفاعات در محدوده مطالعاتی هشتگرد از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸

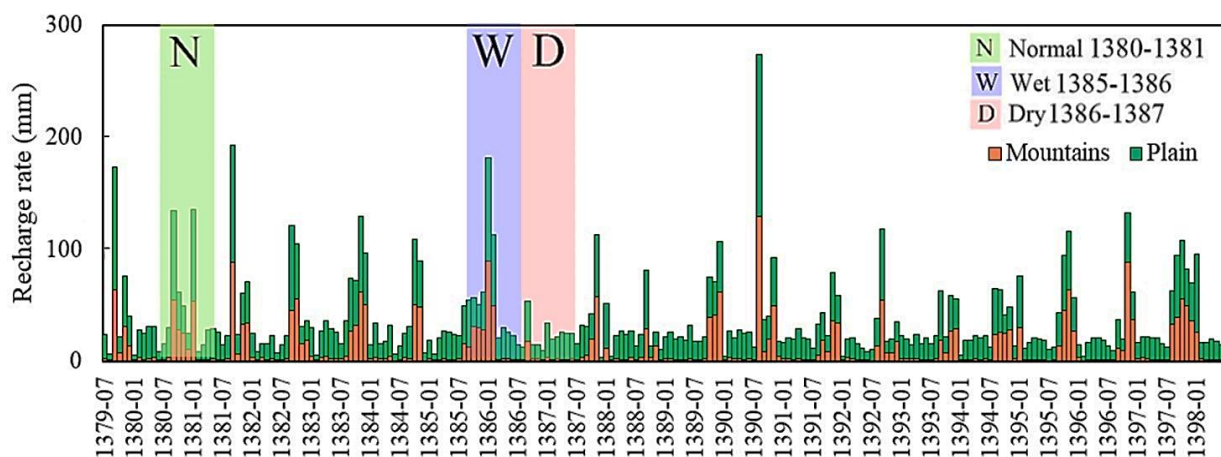


Fig. 12- Monthly values of groundwater recharge component for plains and mountains in the Hashtgerd study area from 1379 to 1398

شکل ۱۲- مقادیر ماهانه مؤلفه تغذیه آب زیرزمینی برای دشت و ارتفاعات در محدوده مطالعاتی هشتگرد از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸

شکل ۱۵ و ۱۶، حجم سالانه اجزای بیلان آب در محدوده مطالعاتی به تفکیک دشت و ارتفاعات برای سال‌های نرمال (۸۱-۱۳۸۰)، تر (۸۶-۱۳۸۵) و خشک (۸۷-۱۳۸۶) را نشان می‌دهد. بررسی‌ها بیانگر این است که در سطح دشت و برای سال تر (نسبت به سال نرمال)، حجم بارش، رواناب، تغذیه و برگاب به ترتیب ۴۴، ۶۹، ۱۳ و ۱۴ درصد بیشتر بوده و مقادیر حجم تخلیه و تبخیر و تعرق حدود ۱۳ و ۲۲ درصد کاهش داشته است. تحلیل مشابه در سطح دشت برای مقایسه سال خشک (نسبت به سال نرمال) نیز انجام شده که نشان می‌دهد در این سال، حجم بارش، تخلیه، رواناب، تغذیه و برگاب به ترتیب ۲۹، ۱۵، ۵۷، ۳۸ و ۳۱ درصد کاهش داشته و این در صورتی است که مؤلفه تبخیر و تعرق ۱۱ درصد افزایش یافته است.

تغییرات مؤلفه‌های رواناب و برگاب نیز در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ قرار داده شده است. مطابق با شکل ۱۳ متوسط رواناب ماهانه در دشت معادل ۹ میلی‌متر و این مقدار برای ارتفاعات معادل ۸ میلی‌متر می‌باشد. مطابق با نقشه‌های بارندگی این امر در رواناب حاصل از بارندگی نیز کاملاً مشهود است. در شکل ۱۴ میزان برگاب برای کل حوضه تأثیر گرفته از نقشه شاخص سطح برگ می‌باشد. مطابق با نقشه شاخص برگ به عنوان یکی از ورودی‌های مدل مشاهده می‌گردد که این مؤلفه بیشترین مقادیر را در باغات، مزارع کشاورزی و مراتع شمالی و شرقی داشته است. به همین دلیل برگاب در این مناطق بیشتر از سایر مناطق حوضه است. همچنین با توجه به اینکه باغات و مزارع کشاورزی در دشت قرار دارد، مقدار این مؤلفه در دشت به مراتب بیشتر از ارتفاعات است.

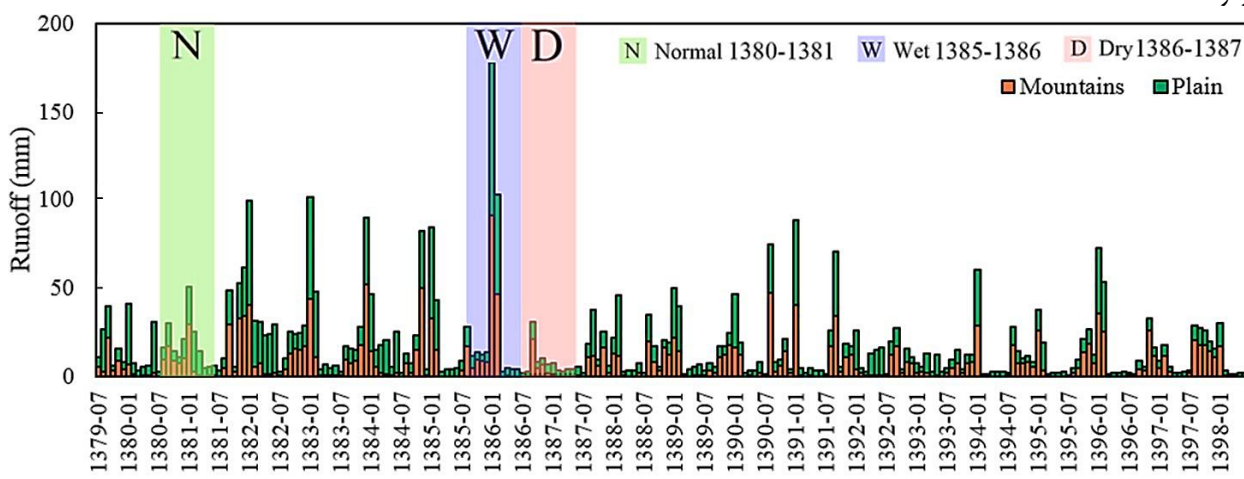


Fig. 13- Monthly values of runoff component for plain and mountains in the Hashtgerd study area from 1379 to 1398

شکل ۱۳- مقادیر ماهانه مؤلفه رواناب برای دشت و ارتفاعات در محدوده مطالعاتی هشتگرد از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸

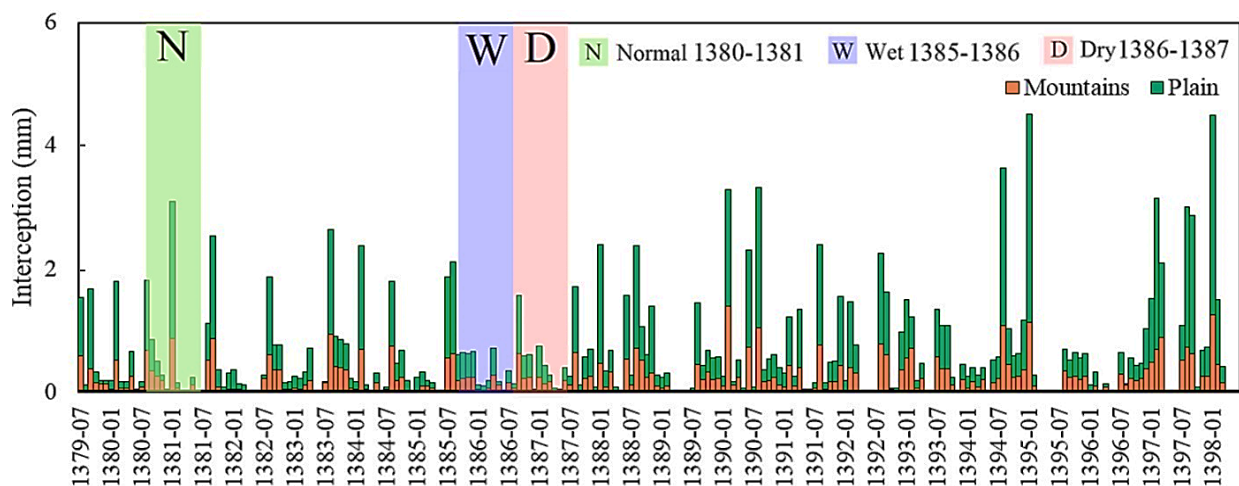


Fig. 14- Monthly values of interception component for plains and mountains in the Hashtgerd study area from 1379 to 1398

شکل ۱۴- مقادیر ماهانه مؤلفه برگاب برای دشت و ارتفاعات در محدوده مطالعاتی هشترگرد از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸

رواناب در ارتفاعات حاصل از بارندگی به مراتب بیشتر از دشت می‌باشد. همچنین در دشت به دلیل برداشت از چاه‌های بهره‌برداری میزان رواناب در ماه‌های با آبیاری زیاد، افزایش یافته است. مؤلفه برگاب بطور متوسط در کل دوره شبیه‌سازی ۱۰۰ درصد آن از بارندگی حاصل شده و آبیاری هیچ سهمی در برگاب ندارد و سهم ناچیزی در بیلان حوضه دارد که ۷۱ درصد در دشت و ۲۹ درصد از ارتفاعات حاصل می‌شود. با توجه به اینکه بیشترین مصارف در بین اجزای بیلان ناشی از تبخیر و تعرق و تغذیه آب زیرزمینی است باید مدیریت بهینه آبیاری باغات و مزارع کشاورزی بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد.

این تغییرات در سطح ارتفاعات نیز برآورد شده است که در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

بطور کلی برای دوره ۱۹ سال، حجم متوسط تغذیه سالانه در دشت معادل ۱۹۷ میلیون متر مکعب شبیه‌سازی شده که این میزان برای ارتفاعات معادل ۷۵/۶ میلیون مترمکعب برآورد شده است. مؤلفه رواناب که ۱۷ درصد از بیلان را شامل می‌شود میزان آن در دشت و ارتفاعات به ترتیب ۷۶/۲ و ۴۸/۹ میلیون مترمکعب برآورد شده است. همچنین، از کل میزان رواناب برآورد شده در مدل، ۵۸ درصد از بارندگی و ۴۲ درصد از آبیاری در باغات و مزارع کشاورزی حاصل شده است. سهم

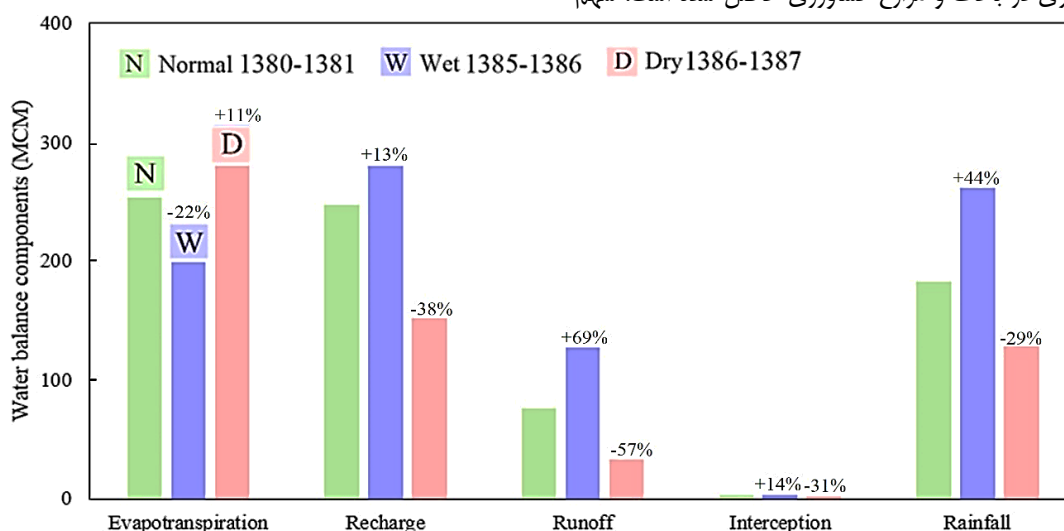
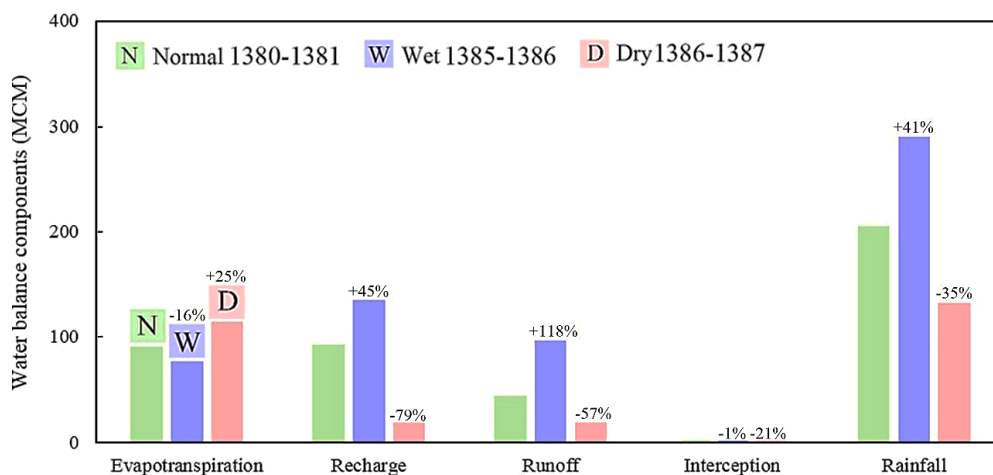


Fig. 15- Components of water balance in plains for normal, wet and dry years for Hashtgerd study area

شکل ۱۵- اجزای بیلان آبی دشت برای محدوده مطالعاتی هشترگرد در سال‌های نرمال، تر و خشک



**Fig. 16- Components of water balance in mountains for normal, wet and dry years for Hashtgerd study area**  
 شکل ۱۶- اجزای بیلان آبی ارتفاعات برای محدوده مطالعاتی هشتگرد در سال‌های نرمال، تر و خشک

تعرق، ۶۶ درصد تغذیه، ۵۶ درصد رواناب و ۷۷ درصد از برگاب در دشتهای کل حوضه و ۹۳ درصد از آبیاری و ۴۸ درصد بارندگی را به خود اختصاص داده است. همچنین، از جمله اهداف اصلی مطالعه حاضر برآورد نقشه‌های تغذیه آب زیرزمینی با دقت مناسب به لحاظ مکانی و زمانی بوده که این امر با برآورد ۲۲۸ نقشه تغذیه آب زیرزمینی به صورت ماهانه به تفکیک دشت و ارتفاعات و با دقت قابل قبولی انجام گردید. با توجه به تغییرات کاربری اراضی توسط بشر طی دوره آماری بلندمدت و تغییرات گسترده کاربری اراضی در منطقه پیشنهاد می‌شود که مطالعاتی در جهت پیش‌بینی اثر تغییر کاربری اراضی بر اجزای بیلان آب نیز در محدوده آبخوان مورد مطالعه انجام شود. در این مطالعه بررسی تغییرات اجزای بیلان در دوره ۱۹ سال برآورد بیلان نیز انجام شده و نتایج نشان داد که در محدوده مطالعاتی هشتگرد مؤلفه آبیاری، تبخیر و تعرق، تغذیه، بارندگی و سپس رواناب به ترتیب بیشترین محدوده تغییرات را دارد. روش‌شناسی توسعه داده شده در این مطالعه می‌تواند برای سایر محدوده‌های مطالعاتی نیز بکار گرفته شود.

#### ۵- تشکر

نویسندگان این مقاله از پژوهشکده مهندسی و مدیریت آب دانشگاه تربیت مدرس، شرکت مدیریت منابع آب ایران و شرکت آب منطقه‌ای البرز برای در اختیار قرار دادن داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده در این مطالعه تشکر می‌نمایند. از حمایت مالی طرح (قرارداد پژوهشی شماره ۰۵/۹۸/۴۷۴۸/۱۰۱ با پژوهشکده مهندسی و مدیریت آب دانشگاه تربیت مدرس) از سوی شرکت آب منطقه‌ای البرز نیز سپاس و قدردانی به عمل می‌آید. تحلیل‌های ارائه‌شده نویسندگان مقاله حاضر، لزوماً دیدگاه‌های تأمین‌کنندگان داده‌ها و اطلاعات لازم و حامیان این طرح نیست.

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

در پژوهش حاضر برای برآورد بیلان آب از رویکرد مدل‌سازی و سنجش از دور با در نظر گرفتن مقیاس مکانی و زمانی استفاده شده است. مدل توزیعی WetSpas-M برای برآورد اجزای بیلان در یک دوره زمانی ۱۹ سال مدنظر بوده و علاوه بر واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از دبی‌های مشاهده‌ای ایستگاه هیدرومتری، به منظور کاهش خطا در محاسبات بیلان، ۲۲۸ تصویر ماهواره‌ای Landsat 8 استخراج گردیده است. در این راستا برای برآورد مؤلفه تبخیر و تعرق از الگوریتم SEBAL استفاده شده است. روش‌شناسی ارائه شده در پژوهش حاضر به دلیل کنترل تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده با تبخیر و تعرق برآورده شده از تصاویر ماهواره‌ای، منجر به برآورد با دقت مناسب و تفکیک مؤلفه تغذیه آب زیرزمینی در مدل WetSpas-M شده است. همچنین با توجه انحراف معیار برآورد شده برای اجزای ورودی و خروجی بیلان، عدم قطعیت هر یک از این اجزا تحلیل شده است. پیاده‌سازی روش‌شناسی ارائه شده در پژوهش حاضر بر روی محدوده مطالعاتی هشتگرد نشان می‌دهد که ارزیابی عملکرد مدل بر اساس معیارهای آماری نکویی برازش در دوره واسنجی و صحت‌سنجی حاکی از دقت قابل قبول مدل در برآورد دبی خروجی و تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد. با ارزیابی مقادیر خروجی از اجزای بیلان در مدل مشخص می‌گردد که طی دوره زمانی از سال آبی ۱۳۷۹-۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸-۱۳۹۷ به طور متوسط تبخیر و تعرق ۴۶ درصد، تغذیه آب زیرزمینی ۳۶ درصد، رواناب ۱۷ درصد و برگاب ۱ درصد از مصارف کل را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین، با توجه به نقشه‌های خروجی از مدل توزیعی، تغذیه آب زیرزمینی از باغات، مزارع کشاورزی و مناطق شهری به ترتیب بیشترین نقش را در ورودی به آبخوان دارند. مطابق با نتایج حاصل از مدل مشاهده گردید که دشت هشتگرد به تنهایی ۶۸ درصد تبخیر و

## بی نوشتها

- 1- Cumulative Rainfall Departure
- 2- Water and Energy Transfer Between Soil, Plants and Atmosphere Under Quasi-Steady State
- 3- Surface Energy Balance Algorithm for Land
- 4- Tropical Rainfall Measuring Mission
- 5- Geographic Information System
- 6- Water-Table Fluctuation

## ۶- مراجع

- 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, & Batelaan O (2012) WetSpa graphical user interface. Cartography of Higher Swiss Education
- 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
- Al Kuisi M & El-Naqa A (2013) GIS based spatial groundwater recharge estimation in the Jafr basin, Jordan: Application of WetSpa models for arid regions. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 30(1):96-109
- Aslam M, Salem A, Singh V, & Arshad M (2021) Estimation of spatial and temporal groundwater balance components in Khadir Canal Sub-Division, Chaj Doab, Pakistan. *Hydrology* 8(4):178
- Babaei M, & Ketabchi, H (2020) Estimation of groundwater recharge rate using a distributed model (Case study of Rafsanjan Aquifer, Kerman Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 51(6):1457-68 (In Persian)
- Barua S, Cartwright I, Dresel PE, & Daly E (2021) Using multiple methods to investigate the effects of land-use changes on groundwater recharge in a semi-arid area. *Hydrology and Earth System Sciences* 25(1):89-104
- Bastiaanssen WGM, Waters R, Allen R, Tasumi M, & Terzza R (2002) Advanced training and user's manual of surface energy balance algorithms for land. Nasa EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company through the Idaho Department of water Resources. 1:1-98
- Batelaan O, De Smedt F (2001) WetSpa: A flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modelling. IAHS Publication 11-8
- Crosbie RS, Peeters LJ, Herron N, McVicar TR, & Herr A (2018) Estimating groundwater recharge and its associated uncertainty: Use of regression kriging and the chloride mass balance method. *Journal of Hydrology* 561:1063-80
- Doble RC, & Crosbie RS (2017) Current and emerging methods for catchment-scale modelling of recharge and evapotranspiration from shallow groundwater. *Hydrogeology Journal* 25(1):3-23
- Ghafari H, Rasoulzadeh A, Raoof M, & Esmeali A (2021) Estimation of natural recharge of Ardabil aquifer using CRD method. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, doi: 10.22034/JCEE.2021.37698.1893
- Iran Water Resources Management Company (2013) Water balance studies of the Namak Lake, Hashtgerd study area. Water Balance Report (In Persian)
- Karamouz M, Mahmoodzadeh D, & Essink GHO (2020) A risk-based groundwater modeling framework in coastal aquifers: a case study on Long Island, New York, USA. *Hydrogeology Journal* 28(7):2519-41
- 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 Persian)
- Khalaf A, & Donoghue D (2012) Estimating recharge distribution using remote sensing: a case study from the West Bank. *Journal of Hydrology* 414:354-63
- MacDonald AM, Lark RM, Taylor RG, Abiye T, Fallas HC, Favreau G, ... & West C (2021) Mapping groundwater recharge in Africa from ground observations and implications for water security. *Environmental Research Letters* 16(3):034012
- Nannawo AS, Lohani TK, & Eshete AA (2021) Exemplifying the effects using WetSpa model depicting the landscape modifications on long-term surface and subsurface hydrological water balance in Bilate Basin, Ethiopia. *Advances in Civil Engineering* 2021
- RIWEM (Research Institute Water Engineering Management) (2021) Study for identification of uncertainties and errors in estimation of water balance components and providing the appropriate solutions. Research Institute Water Engineering Management, Tarbiat Modares University, Regional Water Company of Alborz (In Persian)

- Shahbazi A, Safari F, Ketabchi H (2020) Modeling of management measures taken to control groundwater level depletion (Hashtgerd plain- Alborz province). *Iran-Water Resources Research* 16(1):116-134 (In Persian)
- Thapa BR, Ishidaira H, Pandey VP, & Shakya NM (2017) A multi-model approach for analyzing water balance dynamics in Kathmandu Valley, Nepal. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 9:149-62
- Wang Y, Liao W, Ding Y, Wang X, Jiang Y, Song X, & Lei X (2015) Water resource spatiotemporal pattern evaluation of the upstream Yangtze River corresponding to climate changes. *Quaternary International* 380:187-96
- Waters R, Allen R, Bastiaanssen W, Tasumi M, & Trezza R (2002) *Sebal (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Idaho Implementation. Advanced Training and Users Manual, Idaho, USA*
- Zarei M, Ghazavi R, Vali A, & Abdollahi K (2016) Estimating groundwater recharge, evapotranspiration and surface runoff using land-use data: A case study in northeast Iran. *In Biol. Forum Int. J* 8:196-202