

## Groundwater Budget Estimation of an Over-Exploited Aquifer Located in the Arid Climate of Iran (Part Two: Calculation of Different Water Budget Components)

HAMED KETABCHI<sup>1\*</sup>, DAVOOD MAHMOODZADEH<sup>2</sup>, EHSAN JALILVAND<sup>3</sup>

1. Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

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

3. Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

(Received: March. 31, 2021- Revised: May. 7, 2021- Accepted: May. 25, 2021)

### ABSTRACT

Groundwater resources are the most important sources of water supply for various uses in the Rafsanjan study area. Over-exploitation of these resources has resulted in a continuous groundwater level depletion in the last three decades. The possibility of sustainable exploitation of these resources in the coming years requires appropriate groundwater use management. Based on the groundwater budget estimation for the Rafsanjan aquifer with an area of 4236.5 km<sup>2</sup> in the period from 2009 to 2016, the changes in groundwater storage are estimated to be -166.3 million cubic meters per year, which has led to a mean annual groundwater level depletion of 58 centimeters. Spatial estimation of evapotranspiration using the remote sensing data and simplified energy balance method of SSEB in this study, allows the calculation of groundwater recharge component while this approach stops the approximate estimates of this component by recommended coefficients for precipitation infiltration or return water from different uses. During this period, the value of evapotranspiration is estimated to be 581 million cubic meters, of which about 35 to 40 percent is evaporation from precipitation and the rest is evaporation and transpiration of irrigation (mainly from pistachio orchards). In the studied years, an average of 1157 hectares of land in the region is pistachio orchards, which has an average of 3071 cubic meters per hectare, water consumption, which indicates the conditions of low irrigation and water stress for pistachio orchards. Also, the assessments on the dominant conditions show that the condition of the aquifer is critical and indicates the need to attend to the appropriate management of groundwater use.

**Keywords:** Rafsanjan Aquifer, Remote Sensing, Evapotranspiration, Groundwater Resources Management.

---

\* Corresponding Author's Email: [h.ketabchi@modares.ac.ir](mailto:h.ketabchi@modares.ac.ir)

## برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی در یک آبخوان با برداشت بی‌رویه واقع در اقلیم خشک ایران (بخش دوم: محاسبات مؤلفه‌های مختلف بیلان آب)

حامد کتابچی<sup>۱\*</sup>، داود محمودزاده<sup>۲</sup>، احسان جلیلود<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

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

۳. دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۱۱ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۲/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۴)

### چکیده

منابع آب زیرزمینی، مهم‌ترین منبع تأمین کننده آب مورد نیاز مصارف گوناگون در محدوده مطالعاتی رفسنجان است. برداشت بی‌رویه از این منابع منجر به افت مداوم سطح آب زیرزمینی در سه دهه اخیر شده است. امکان برداشت پایدار از این منابع در سالیان آینده مستلزم مدیریت صحیح برداشت آب زیرزمینی است. بر اساس برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی انجام شده در محدوده منطبق با آبخوان رفسنجان به مساحت ۴۲۳۶/۵ کیلومترمربع، در سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵، مقدار کاهش ذخیره آب زیرزمینی برابر ۱۶۶/۳ میلیون مترمکعب در سال برآورد گردیده که منجر به افت متوسط سالانه ۵۸ سانتی‌متری آب زیرزمینی شده است. برآورد مکانی تبخیر و تعرق با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و روش بیلان انرژی ساده‌سازی شده SSEB در این مطالعه، امکان محاسبه مؤلفه تغذیه آب زیرزمینی را داده و این رویکرد از برآوردهای تقریبی این مؤلفه با استفاده از ضرایب توصیه شده برای نفوذ از بارش یا ضرایب آب برگشتی از مصارف مختلف جلوگیری می‌نماید. بر این اساس، در دوره زمانی مورد نظر، مقدار تبخیر و تعرق در حدود ۵۸۱ میلیون مترمکعب برآورد شده که حدود ۳۵ الی ۴۰ درصد آن را تبخیر از بارش و مابقی را تبخیر و تعرق آبیاری (عمدتاً از باغات پسته) تشکیل می‌دهد. در سال‌های مورد مطالعه، بطور متوسط ۱۱۵۷ هکتار از اراضی منطقه را باغات پسته تشکیل می‌دهد که حدود ۳۰۷۱ مترمکعب بر هکتار مصرف آب را داشته و تا حدودی گویای شرایط کم‌آبایی و تنش آبی برای درخت پسته است. همچنین بررسی شرایط حاکم، گویای بحرانی بودن وضعیت آبخوان و لزوم توجه به مدیریت صحیح بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی را مشخص می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** آبخوان رفسنجان، سنجش از دور، تبخیر و تعرق، مدیریت منابع آب زیرزمینی.

### مقدمه

با توجه به ماهیت مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی و داده‌های دردسترس، مقیاس مکانی و زمانی و شرایط منطقه (جغرافیایی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و غیره) در مطالعات مختلف، روش‌های مختلفی برای برآورد مؤلفه‌های تغذیه، تخلیه و ذخیره به کار گرفته شده است. دقت برآوردهای بیلان منابع آب زیرزمینی وابسته به دقت برآورد مؤلفه‌های بیلان این منابع است و هر رویکرد و روشی که به ارتقای دقت برآورد مؤلفه‌های بیلان منجر شود، دقت محاسبات بیلان را بالا می‌برد. اهمیت این موضوع بخصوص در شرایطی که کاهش پیوسته حجم منابع آب زیرزمینی در یک محدوده وابسته به این منابع از لحاظ مصارف مشاهده می‌شود، بیش از پیش احساس می‌شود (IWPRI, 2014; Ketabchi et al., 2018).

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد برآورد مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف و با اهداف مختلف انجام شده است. در جدول (۱)، تعدادی از مطالعات بین‌المللی خلاصه شده است. در مطالعات داخلی نیز برآورد این مؤلفه‌ها با رویکردها و اهداف متفاوتی انجام شده است. Sedghi et al. (2020) برای بررسی دو سناریوی بهره‌برداری از آب زیرزمینی و بهره‌برداری تلفیقی منابع آب حوضه هشتگرد، دو مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی GMS و PSO را برای محاسبه بیلان آب زیرزمینی و بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب، با هدف حداقل کردن افت سطح آب زیرزمینی آبخوان ارائه نمودند. نتایج مدل شبیه‌سازی آنها نشان داد که برای سال آبی ۱۳۹۰-۹۱، بیلان آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی هشتگرد، بطور متوسط با ذخیره منفی ۱۷ میلیون مترمکعب در سال مواجه است. یافته‌های این

دقت شود، کمتر در مطالعات پیشین مورد توجه قرار گرفته و در این راستا توصیه به بهره جستن از آن‌ها شده است (Healy, Gokmen *et al.*, 2010; IWPRI, 2014; Morgan *et al.*, 2015). (2013) یک رویکرد برآورد مکانی بیلان آب مبتنی بر روش‌های سنجش از دور را برای آزمودن در حوضه نیمه‌خشک کونیا در ترکیه استفاده نمودند. در این مطالعه، توزیع بارش ماهانه از <sup>۱</sup>TRMM، پوشش برف از سنجنده مادیس<sup>۲</sup>، توزیع تبخیر و تعرق از روش مبتنی بر سنجش از دور <sup>۳</sup>SEBS و رطوبت خاک با SEBS-SM برآورد گردید. (2017) Gemitzi *et al.* از یک معادله ساده درونبایی برای تخمین تغذیه آب زیرزمینی استفاده نمودند که آن را با بهره‌گیری از تغذیه شبیه‌سازی شده در مدل SWAT و بارش مؤثر بدست آورده بودند. در این مطالعه مقادیر تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده در مدل فوق با داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مادیس صحت‌سنجی شد. Falalakis and Gemitzi (2020) روشی را برای برآورد بیلان آب در حوضه‌های با کمبود داده‌های اندازه‌گیری توسعه دادند که مبتنی بر ارتباط داده‌های تبخیر و تعرق حاصل از سنجنده مادیس، تغذیه آب زیرزمینی و داده‌های ماهانه موجود بارش بود. روش آنها بر روی هفت حوضه در شمال شرقی یونان آزموده شد و مؤلفه‌های بیلان برآورد شده با مقادیر شبیه‌سازی شده معادل آنها مقایسه گردید. نتایج آنها، امکان بهره‌گیری از روش‌های سنجش از دور در برآورد مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی را نشان داد. (2021) Colombani *et al.* برای برآورد بیلان آب زیرزمینی در یک آبخوان کم‌عمق در ایتالیا از اطلاعات تبخیر و تعرق ماهواره‌ای سنجنده مادیس استفاده نمودند و آن را در مدل آب زیرزمینی مادفلو<sup>۴</sup> به کار بردند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از روش سنجش از دور به کار گرفته شده، می‌تواند در مشخص نمودن اثر تبخیر و تعرق از محدوده و از آب زیرزمینی بر روی بیلان راهگشا باشد.

مطالعه مشخص کرد که بیشترین افزایش ذخیره آبخوان به ترتیب مربوط به ماه‌های آبان، فروردین و بهمن می‌باشد. Bayazidi and Kaki (2021) وضعیت بهره‌برداری و تغییرات ذخیره زیرزمینی آبخوان‌های ممنوعه قروه، دهگلان و چهاردولی در استان کردستان را تا انتهای سال آبی ۱۳۹۶-۹۷ بررسی کردند. در این مطالعه نشان داده شد که هیدروگراف‌های واحد این محدوده‌ها در شرق کردستان، بیانگر روند نزولی سطح آب زیرزمینی در ۳۰ سال اخیر است و تغییرات ذخیره منفی تجمعی زیرزمینی آبخوان‌های فوق، به ترتیب ۲، ۱۷/۴، ۲/۹۸ میلیون مترمکعب می‌باشد که توجهات بیشتر را برای کنترل بیلان منفی می‌طلبد.

بررسی وضعیت بیلان برآورد شده در مطالعات ارائه شده بین‌المللی و داخلی نشان می‌دهد که عوامل متعددی بر مؤلفه‌های ورودی و خروجی تأثیرگذار هستند که در رقم زدن ذخیره زیرزمینی مثبت یا منفی نقش دارند. وضعیت توسعه بهره‌برداری (برای مصارف مختلف نظیر کشاورزی، شرب و صنعت)، اندرکنش با آب‌های سطحی (رودخانه‌ها، کانال‌ها و خطوط انتقال)، اندرکنش با اکوسیستم‌های طبیعی (مانند تالاب‌ها) و در مقیاس‌های محلی، اندرکنش با آبخوان‌های مجاور یا لایه‌های زیرین خود، شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی، مجموعه عواملی هستند که در بیلان آب زیرزمینی در یک آبخوان نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کنند (Healy, 2010; Coelho *et al.*, 2017).

به‌طورکلی منابع کاهش دقت در برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی بسیار است. پایش ضعیف و خطا در پایش منابع آب زیرزمینی، منجر به عدم دسترسی به داده‌های مشاهداتی و معرف آبخوان می‌شود و درک درستی از وضعیت آبخوان را نمی‌دهد. به تبع این مسئله، مؤلفه‌های بیلان به دقت تخمین زده نشده و دقت در برآوردهای بیلان کم می‌شود. به کارگیری روش‌های نوین مانند روش‌های سنجش از دور و رویکردهایی که سبب افزایش

جدول ۱- خلاصه ای از مطالعات بیلان منابع آب زیرزمینی

مرجع	کشور	مساحت (کیلومتر مربع)	دوره زمانی بیلان	بر حسب میلیون مترمکعب		
				تغذیه	تخلیه	ذخیره
Heilweil and Brooks (2010)	ایالات متحده آمریکا	۲۴۸۸۹۹	۶۵ ساله (۱۹۴۰-۲۰۰۶)	۷۷۶	۳۶۹۰	-۲۹۱۴
Marillier (2012)	استرالیا	۴۲	۳۰ ساله (۱۹۷۷-۲۰۰۷)	۱۲/۹	۱۲/۸	۰/۱
Schuler and Margane (2013)	لبنان	۴۰۶	۸ ساله (۱۹۶۷-۱۹۷۵)	۴۷۲	۴۹۳	-۲۱
Morgan <i>et al.</i> (2015)	استرالیا	۲۸۰۰۰	۹ ساله (۲۰۰۱-۲۰۱۰)	۱۰۴۰	۷۶۶	۲۷۴
Molle <i>et al.</i> (2016)	مصر	۲۲۰۰۰	میانگین‌های بلندمدت	۶۷۸۰	۸۹۹۰	-۲۲۱۰

<sup>۲</sup>. Surface Energy Balance System

<sup>۴</sup>. MODFLOW

<sup>۱</sup>. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Rainfall Product

<sup>۲</sup>. MODIS

Babaei and Ketabchi (2020) برآورد مؤلفه تغذیه آب زیرزمینی در این محدوده را با بهره‌گیری از مدل توزیعی WetSpas-M انجام دادند و برای یک دوره هشت ساله این مدل را به صورت ماهانه اجرا نمودند. در این برآورد از داده‌های هواشناسی، نقشه کاربری اراضی، نقشه بافت خاک، نقشه شاخص سطح برگ و داده‌های چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان محدوده مطالعاتی رفسنجان استفاده شد و برآورد بیلان آب زیرزمینی محدوده با استفاده از آن محاسبه گردید که مؤید مقدار ذخیره منفی آب زیرزمینی در این آبخوان بود.

نگاهی به مطالعات مرور شده در محدوده مطالعاتی رفسنجان نشان می‌دهد که این محدوده، ضمن اهمیت فراوان از نظر تولیدات کشاورزی و مسائل اقتصادی و اجتماعی، با وابستگی شدید به منابع آب زیرزمینی و کاهش شدید متداوم این منابع مواجه است که لزوم بررسی‌های بیشتر برای فراهم نمودن الزامات مدیریت و برنامه‌ریزی بهتر منابع آب زیرزمینی را مشهود می‌سازد. در در مطالعه حاضر با هدف افزایش دقت برآورد بیلان آب زیرزمینی در آبخوان رفسنجان، از روش سنجش از دور برای برآورد تبخیر و تعرق با توزیع مکانی از سطح محدوده مورد بررسی استفاده می‌شود و برای این منظور، مدل مفهومی متناسب تهیه می‌گردد. با برآورد این مؤلفه، امکان محاسبه مؤلفه تغذیه از روابط بیلان مهیا شده و می‌توان بدون رجوع به ضرایب توصیه شده نفوذ از بارش و آب برگشتی از مصارف مختلف نسبت به محاسبه آن اقدام نمود. استفاده از این ضرایب توصیه شده، بخصوص در شرایطی که مقدار بارش یا آب برگشتی، کمیت بزرگی است، می‌تواند، منبع خطای بزرگی باشد. رویکرد مطالعه حاضر در راستای افزایش دقت برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی در این محدوده است که می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های بهتر منابع آب در آینده نیز مورد استفاده قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

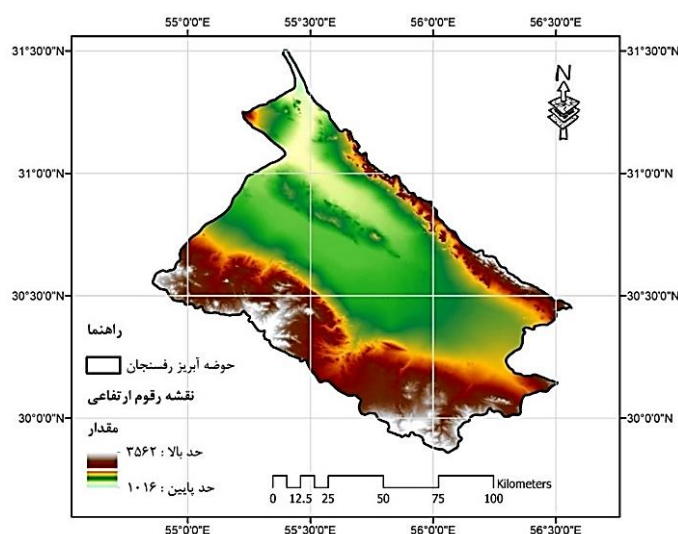
### محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی رفسنجان با قرارگیری در اقلیم خشک در غرب حوضه آبریز درانجیر - ساغند بین طول جغرافیایی ۵۲° - ۵۴° تا ۳۳° - ۵۶° شرقی و عرض جغرافیایی ۵۲° - ۲۹° تا ۳۰° - ۳۱° شمالی در جنوب شرقی ایران قرار گرفته است. مساحت این محدوده مطالعاتی حدود ۱۲۵۱۳/۸ کیلومترمربع است که ۵۷۵۴/۲ کیلومترمربع آن دشت و مابقی آن ارتفاعات می‌باشد. بالاترین ارتفاع منطقه ۳۵۶۲ متر و کمترین ارتفاع ۱۰۱۶ متر است. نقشه

محدوده مطالعاتی رفسنجان در استان کرمان یکی از بحرانی‌ترین مناطق از نظر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در کشور است (IWPRI, 2014). (Mortazavi et al. (2011). اضافه برداشت سالانه حدود ۲۵۰ میلیون مترمکعب در این محدوده اشاره نمودند که عامل اصلی کاهش کیفیت آب زیرزمینی، نشست خاک، از بین رفتن زمین‌های کشاورزی و خرابی مناطق مسکونی به دلیل فرونشست است. Motagh et al. (2017) به بررسی ارتباط زمانی و ناحیه‌ای فرونشست و داده‌های سطح آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی رفسنجان پرداختند و یکی از دلایل اصلی فرونشست را برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی شناسایی نمودند. در مطالعه آنها، به اضافه برداشت متوسط سالانه حدود ۳۰۰ میلیون مترمکعب برای دوره ۱۰ ساله ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۶ اشاره شده است. همچنین در این پژوهش، سری زمانی فرونشست در این دوره زمانی با داده‌های ماهواره‌ای Farzaneh et al. Sentinel و ALOS Envisat بدست آمده‌اند. (2019) با تمرکز بر مشکلات منابع آب زیرزمینی این محدوده و با بهره‌گیری از رویکرد نهادی به آسیب‌شناسی طرح احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی پرداختند. نتایج آنها گویای وابستگی شدید این محدوده مطالعاتی به بخش کشاورزی و منابع آب زیرزمینی با سابقه‌ای طولانی است. براساس یافته‌های این مطالعه، در شرایط بازگشت به سال ۱۳۸۰ وضعیت آبخوان رفسنجان، سطح زیر کشت ۴۰۰ کیلومترمربع با شرایط تعادلی منابع آب زیرزمینی منطبق خواهد بود اما در حال حاضر و در شرایط بدتر آبخوان، سطح زیر کشت بیش از دو برابر مقدار فوق است. (Jamalizadeh et al. (2020) به پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی تحت تأثیر مدل‌های سری زمانی در محدوده رفسنجان پرداختند. بارش با استفاده از مدل ARIMA پیش‌بینی گردید و افت سطح آب زیرزمینی نیز با استفاده از مدل عددی آب زیرزمینی شبیه‌سازی شد. با بررسی بیلان آب زیرزمینی در آینده با استفاده از مدل توسعه داده شده در این مطالعه، حدود ۱۳۰ میلیون مترمکعب اضافه برداشت از آب زیرزمینی تعیین گردید. (Bagheri and Babaeian (2020) با استفاده از چارچوب حسابداری آب SEEA-W به بررسی مؤلفه‌های مختلف آبی، اجتماعی، اقتصادی در محدوده مطالعاتی رفسنجان پرداختند و شاخص‌های امنیت آبی را بر اساس این چارچوب و مدل پویایی سیستم مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه، حساسیت بالای این شاخص‌ها به کمبود منابع آب، منابع آب زیرزمینی و مصرف در بخش کشاورزی را نشان داد که دلیل اصلی آن، روند تغییرات ذخیره منفی زیرزمینی آبخوان و تنش‌های آبی موجود می‌باشد.

است. آبراهه اصلی این محدوده، رودخانه بزرگ شور رفسنجان می‌باشد که به سمت کویر درانجیر امتداد می‌یابد. عمده آب مصرفی (شرب، کشاورزی و صنعتی) از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. سالانه به طور میانگین نزدیک به ۸۰۰ میلیون مترمکعب از آب زیرزمینی برداشت می‌شود که بیش از مقدار مجاز برداشت از آبخوان است. بیشتر آب برداشتی در این محدوده، صرف آبیاری باغات پسته می‌شود. میزان افت سطح آب زیرزمینی آبخوان رفسنجان در طی دوره آماری سال‌های آبی ۶۳-۱۳۶۲ لغایت ۹۶-۱۳۹۵ حدود ۲۱ متر است که کاهش متوسط سالانه ۰/۶۳ متر را نشان می‌دهد (IWRMC, 2015).

رقوم ارتفاعی<sup>۱</sup> این محدوده در شکل (۱) نشان داده شده است. به جهت تعیین مقادیر بارش از دو ایستگاه باران‌سنجی رفسنجان و تبخیرسنجی جهان‌آبادنوق به عنوان ایستگاه‌های معرف آبخوان رفسنجان استفاده می‌شود. بارش‌ها در این محدوده غالباً از آبان ماه شروع شده و تا اردیبهشت ماه سال بعد ادامه دارد. بیشترین میزان بارش در این محدوده در دی‌ماه و بهمن‌ماه رخ می‌دهد. همین‌طور توزیع بارش نیز در سال‌های مختلف، بسیار ناهمگون بوده، غالباً کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در سال است و در تعداد روزهای اندکی، بخش اعظم بارش یک سال رخ می‌دهد. تقریباً کل بارش‌ها در محدوده به صورت باران گزارش شده و به ندرت به شکل برف



شکل ۱- نقشه رقم ارتفاعی محدوده مطالعاتی رفسنجان در حوضه آبریز درانجیر - ساغند

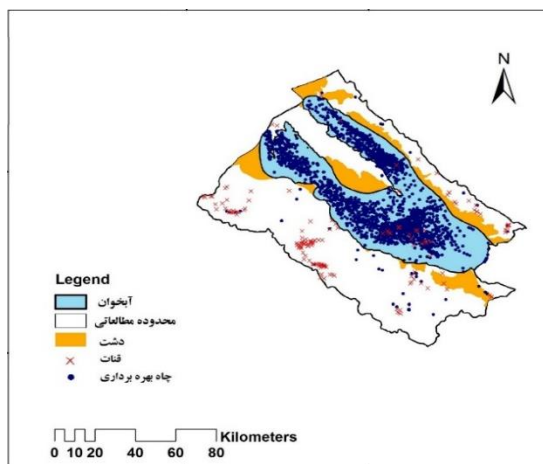
است. سایر منحنی‌های بسته قابل مشاهده شده، گویای وجود شرایط خاص هیدروژئولوژیکی از جمله ضخامت آبخوان و نوع و اندازه نهشته‌های آبرفتی به جا گذاشته شده در این مناطق است (IWRMC, 2015).

کاربری اراضی محدوده مطالعاتی رفسنجان برای تابستان در دوره زمانی ۹۵-۱۳۸۸ در هر سال در مطالعه RIWEM (2019) با استفاده از روش‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای لندست<sup>۲</sup> با هدف اندازه‌گیری نحوه گسترش سطح باغات پسته در گستره آبخوان رفسنجان تولید شده است. براساس این مطالعه، مقایسه نقشه کاربری این سال‌ها نشان می‌دهد که تغییرات عمده‌ای در نحوه پراکنش کاربری‌ها در محدوده وجود ندارد و عمده بخش‌های کشاورزی را باغات پسته تشکیل می‌دهد و تراکم آن‌ها در اطراف شهر رفسنجان و در دو بخش نوق و انار مشهود است. سطح زیر کشت پسته در این سال‌ها از ۱۰۹۱ تا ۱۱۹۹ کیلومترمربع متغیر بوده است و بطور متوسط ۱۱۵۷ کیلومترمربع

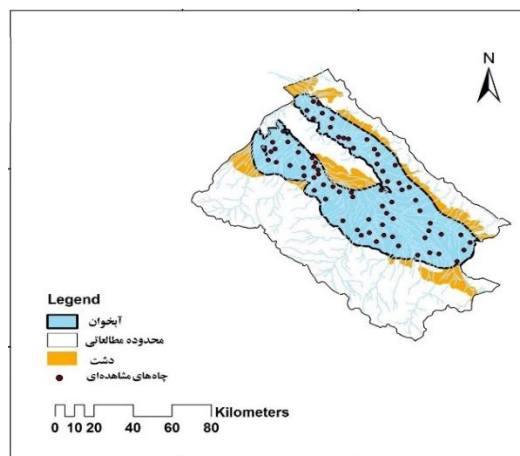
در شکل (۲-الف)، موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای نشان داده شده است که تراز آب زیرزمینی در آن‌ها بصورت ماهانه ثبت می‌شود. پراکنش چاه‌های برداشت آب زیرزمینی (۱۴۹۵ حلقه) در شکل (۲-ب) نشان داده شده است که بیشترین مقدار تخلیه آب از آبخوان در این محدوده از طریق آن‌ها است. در شکل (۲-ج)، نقشه متوسط تراز آب زیرزمینی در دوره زمانی ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵ بر اساس اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای، تهیه و ارائه شده است. حداکثر تراز سطح آب زیرزمینی در بخش جنوب شرقی آبخوان و حداقل آن در بخش شمال غربی بوده و جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از جنوب شرق به شمال غرب می‌باشد. در شکل (۲-د)، نقشه قابلیت انتقال و موقعیت چاه‌های اکتشافی آمده است. منحنی ۱۰۰ مترمربع بر روز در حد فاصل ارتفاعات با دشت گسترده شده و تقریباً حاشیه دشت رفسنجان را به خود اختصاص داده است. منحنی ۲۵۰ مترمربع بر روز تقریباً به موازات منحنی ۱۰۰ مترمربع بر روز در ادامه و به سمت میان دشتی کشیده شده

مختلف در محدوده مطالعاتی رفسنجان به عنوان نمونه برای سال ۱۳۹۵ ارائه شده است.

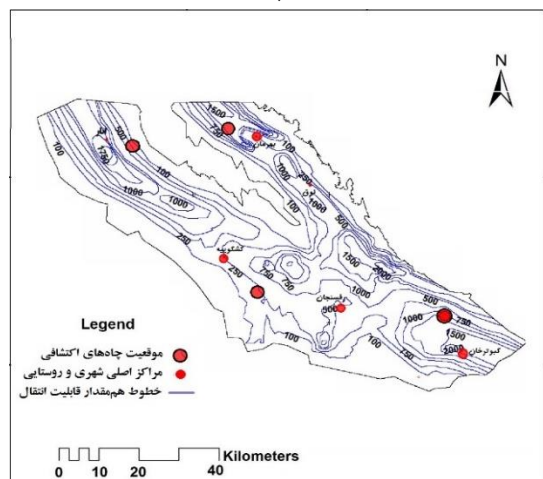
۲۷ درصد مساحت آبخوان محدوده مطالعاتی رفسنجان را باغات پسته تشکیل می‌دهد. در شکل (۳)، نحوه پراکنش کاربری‌های



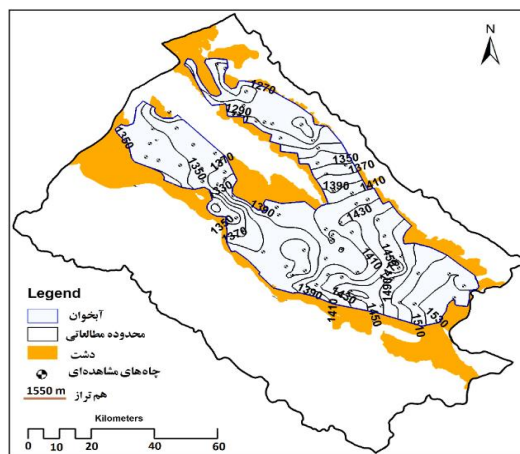
(ب)



(الف)

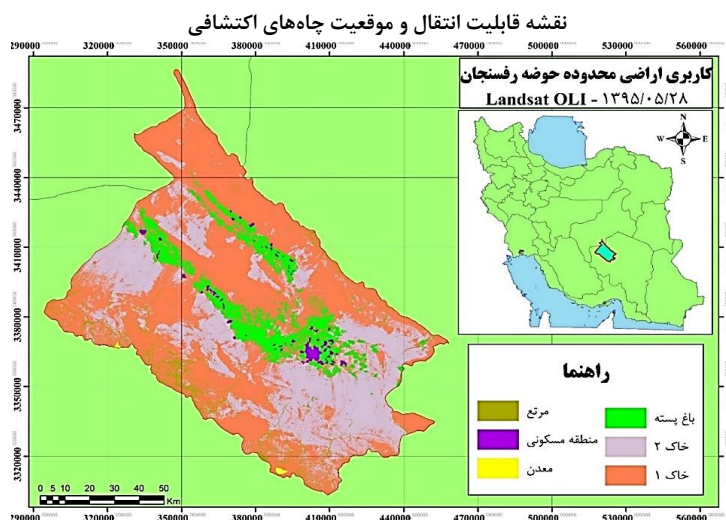


(د)



(ج)

شکل ۲- (الف) موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای، (ب) پراکنش چاه‌های برداشت آب زیرزمینی، (ج) نقشه متوسط تراز آب زیرزمینی در دوره زمانی ۹۵-۱۳۸۸، (د)



شکل ۳- کاربری اراضی محدوده مطالعاتی رفسنجان برای سال ۱۳۹۵

مفهومی مورد نظر در شکل (۴) ارائه شده است. در بیلان آب سطحی، مؤلفه‌های ورودی و خروجی آن، شامل رودخانه و آب‌های انتقالی به این محدوده از حوضه‌های دیگر یا به سایر حوضه‌ها

مدل مفهومی برآورد بیلان آب زیرزمینی روش‌شناسی مدنظر در این مطالعه مبتنی بر به کارگیری داده‌های سنجش از دور برای برآورد مؤلفه تبخیر و تعرق است. شمای



می‌باشد. بارش از سطح و تبخیر و تعرق و همچنین میزان ذخیره آب در سطح سایر مؤلفه‌های بیلان را تشکیل می‌دهند. در بخش بیلان آب زیرزمینی، بخشی از آب از طریق چاه‌ها، قنات و چشمه‌ها تخلیه می‌شود و بخشی دیگر نیز از طریق جریان خروجی و تبخیر از سطح آب زیرزمینی خارج می‌شود. مؤلفه‌های ورودی آب زیرزمینی شامل تغذیه آبخوان (نفوذ از بارش و جریان‌های سطحی و آب برگشتی از مصارف در بخش‌های مختلف) و همچنین جریان ورودی زیرزمینی از طریق منابع آبی بالادست می‌باشد.

براساس مدل مفهومی ارائه شده در شکل (۴)، بیلان آب سطحی با رابطه زیر بررسی می‌شود (Healy, 2010):

(رابطه ۱)

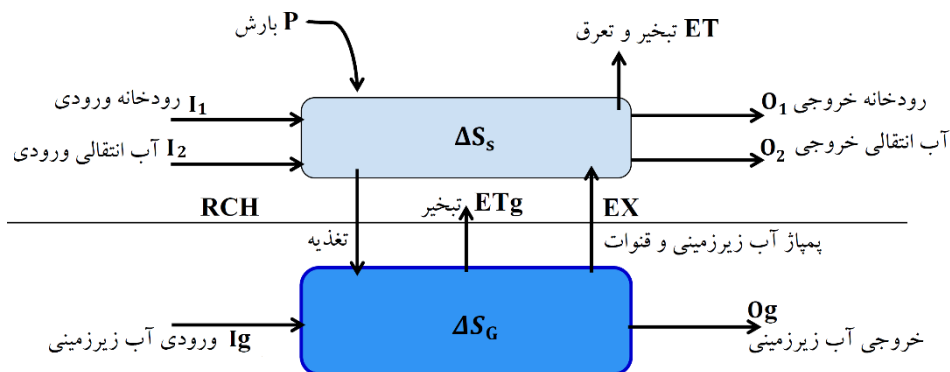
$$\Delta S_s = P + EX + I_1 + I_2 - O_1 - O_2 - ET - RCH$$

که در رابطه فوق RCH مقدار تغذیه، P مقدار بارش، EX برداشت از منابع آب زیرزمینی  $I_1$  جریان ورودی از طریق رودخانه‌ها،  $I_2$  جریان ورودی انتقالی،  $O_1$  جریان خروجی از طریق

از رابطه ۲، می‌توان تغییرات ذخیره زیرزمینی محاسباتی را برآورد نمود (Healy, 2010):

$$\Delta S_{G-calc} = RCH + I_g - O_g - ET_g \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در رابطه فوق،  $I_g$  جریان ورودی آب زیرزمینی و  $O_g$  جریان خروجی آب زیرزمینی و  $ET_g$  تبخیر از سطح آب زیرزمینی می‌باشد. برآورد  $I_g$  و  $O_g$  با قانون دارسی و بهره‌گیری از رابطه  $T.W.\Delta h/L$  انجام می‌گیرد که پس از تعیین جبهه‌های ورودی و خروجی جریان آب زیرزمینی در نقشه‌های تهیه شده سطح آب زیرزمینی محقق می‌شود. T ضریب قابلیت انتقال آبخوان برآورد شده برای هر یک از جبهه‌های ورودی و خروجی جریان آب زیرزمینی (شکل ۲، د)، W طول جبهه ورودی و یا خروجی جریان آب زیرزمینی و  $\Delta h/L$  گرادیان هیدرولیکی جریان در جبهه مربوطه است.



شکل ۴- مدل مفهومی بیلان آب سطحی و زیرزمینی

بزرگی در روابط بیلان باشد، این ضرایب تقریبی می‌تواند خطای زیادی را در برآوردهای بیلان ایجاد نماید.

#### روش برآورد تبخیر و تعرق

در مطالعه حاضر از روش بیلان انرژی ساده سازی شده SSEB<sup>۱</sup> برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود. روش SSEB نسخه ساده سازی شده روش‌های بیلان انرژی برای برآورد تبخیر و تعرق بوده که با تعداد ورودی کمتر، قادر به تخمین تبخیر و تعرق با دقت قابل قبول و نزدیک به روش‌های پیچیده‌تری مانند SEBAL یا METRIC می‌باشد. در این روش پس از محاسبه تبخیر و تعرق از گیاه مرجع در منطقه مورد مطالعه با استفاده از رابطه ۴، مقدار تبخیر و تعرق واقعی

از رابطه ۳، می‌توان به صورت مستقل و براساس هیدروگراف معرف آبخوان که در دوره زمانی مورد نظر بدست آمده، تغییرات ذخیره زیرزمینی مشاهداتی ( $\Delta S_{G-obs}$ ) را برآورد نمود:

$$\Delta S_{G-obs} = A \times S \times \Delta h \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در رابطه فوق، A مساحت محدوده مورد نظر برای بیلان، S ضریب ذخیره و  $\Delta h$  تغییرات سطح آب زیرزمینی است. در این مطالعه، مقدار ET در رابطه ۱ از طریق داده‌های ماهواره‌ای برآورد می‌شود و با این رویکرد، می‌توان مقدار تغذیه را تخمین زد که در روش‌های مرسوم برآورد بیلان مانند IWRMC (2010)، مقدار آن را براساس ضرایب توصیه شده مانند ضریب نفوذ از بارش یا ضرایب آب برگشتی از مصارف مختلف و بصورت تخمینی برآورد می‌نمایند. در شرایطی که مقدار RCH، مؤلفه

محاسبه می‌گردد (Senay et al., 2013).

$$ET_a = ET_f \times k \times ET_0 \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه  $ET_0$  تبخیر و تعرق پتانسیل از گیاه مرجع،  $k$  ضریبی برای تبدیل تبخیر و تعرق مرجع به تبخیر و تعرق گیاه مورد نظر در منطقه که برابر با  $1/2$  در نظر گرفته شده است،  $ET_f$  نسبت تبخیر و تعرق برای تبدیل تبخیر و تعرق مرجع به تبخیر و تعرق واقعی و  $ET_a$  مقدار تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد (Senay et al., 2013). در حقیقت فرض موجود این است که نسبت تبخیر و تعرق در طول روز (بازه زمانی مورد نظر) ثابت مانده، بنابراین با محاسبه  $ET_0$  در مقیاس زمانی مورد نظر (محاسبه مقدار تجمعی  $ET_0$ ) می‌توان با یک اندازه‌گیری لحظه‌ای مقدار تبخیر و تعرق واقعی را در بازه زمانی مورد نظر محاسبه نمود (Nishida et al., 2003). در این مطالعه از داده‌های جهانی GDAS<sup>۱</sup> برای محاسبه  $ET_0$  استفاده شده است. این داده‌ها توسط NOAA<sup>۲</sup> از سال ۲۰۰۱ در مقیاس زمانی شش ساعته و قدرت تفکیک مکانی یک درجه برای کل جهان تولید شده است. برای انجام محاسبات در این مدل از الگوریتم پنمن - مانیتث برای مقیاس زمانی شش ساعته استفاده شده است (Senay et al., 2008). در مقایسه با مطالعات پیشین مانند Allen et al. (2007) و Bastiaanssen et al. (1998)، اصلاحاتی در نحوه محاسبه  $ET_f$  در این مطالعه اعمال شده است.  $ET_f$  در روش SSEB طبق رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$ET_f = \frac{T_h - T_s}{T_h - T_c} \quad (\text{رابطه ۵})$$

در این رابطه  $T_c$  دمای پیکسل در زمان حداکثر تبخیر و تعرق (دمای سرد)،  $T_h$  دما در حالت حداقل تبخیر بوده که دمای گرم نامیده می‌شود و  $T_s$  دمای سطح زمین می‌باشد که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آید. در این روش با فرض این که در دمای  $T_c$  تبخیر با نرخ حداکثر (تبخیر پتانسیل) اتفاق می‌افتد، فرض شده که دمای هوا برابر با دمای سطح است به این ترتیب شار دمای مخصوص نزدیک به صفر و تبخیر و تعرق حداکثر خواهد شد که در شرایط تبخیر پتانسیل رخ می‌دهد. اما از آنجایی که این دو دما از دو روش مختلف محاسبه شده‌اند و زمان برداشت ماهواره‌ای دمای سطح ( $T_s$ ) با سنجنده مادیس قبل از ظهر بوده ولی حداکثر معمولاً در زمان بعدازظهر اتفاق می‌افتد نیاز به تصحیحی در مقدار دمای هوا برای جایگذاری برای  $T_c$  می‌باشد. لذا  $T_c$  با ضریبی اصلاحی به صورتی که در رابطه ۶ نشان داده شده، به دمای هوا ( $T_a$ ) مرتبط می‌گردد.

$$T_c = C \times T_a \quad (\text{رابطه ۶})$$

برای این کار، نواحی که احتمال می‌رود تبخیر و تعرق در آن‌ها حداکثر باشد مانند نواحی با تراکم پوشش گیاهی بالا ( $NDVI > 0.8$ ) که دچار تنش آبی نمی‌باشند انتخاب شده و نسبت  $T_s/T_a$  در آن‌ها محاسبه و برابر  $C$  در نظر گرفته شده است. یافته‌های Senay et al. (2013) نشان می‌دهد که  $C$  در ماه‌ها و فصل‌های مختلف در سطح ایالات متحده آمریکا تقریباً ثابت و به طور میانگین برابر با  $0.993$  بدست آمده است. بنابراین می‌توان از این ضریب ثابت در زمان‌ها و مکان‌های مختلف با اعتمادپذیری قابل قبولی استفاده نمود. برای محاسبه  $T_h$  این فرض انجام شده که  $T_h$  به اندازه  $\Delta T$  کمتر از  $T_c$  است. این مقدار بر اساس مطالعات Senay et al. (2011) در ایالات متحده آمریکا، آفریقا و افغانستان به طور میانگین  $20$  درجه سانتیگراد به دست آمده است. در این مطالعه  $\Delta T$  به طور فصل به فصل و برای هر پیکسل به صورت جداگانه با رابطه ۷ محاسبه شده است.

$$\Delta T = \frac{R_n \times r_{ah}}{\rho_a \times c_p} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در این رابطه  $\rho_a$  چگالی هوا بوده که با توجه به نقشه رقوم ارتفاعی و بر اساس میزان ارتفاع از زمین محاسبه می‌گردد.  $c_p$  گرمای مخصوص هوا می‌باشد.  $R_n$  معادل شار گرمایی محسوس حاصل از تابش خورشید،  $r_{ah}$  در این مطالعه با سعی و خطا و براساس مقادیر معلوم  $\Delta T$  و  $R_n$  محاسبه شده است، نتایج نشان می‌دهد  $r_{ah}$  با تقریب خوبی بین  $100$  تا  $120$  تغییر می‌کند. لذا در این مطالعه از مقدار  $110$  برای آن استفاده شده است. با این فرض  $T_h$  مطابق رابطه ۸ قابل محاسبه می‌باشد.

$$T_h = T_c + \Delta T \quad (\text{رابطه ۸})$$

با این روند می‌توان مقدار  $ET_a$  را با بهره‌گیری از رابطه ۴ برآورد نمود.

برآورد نرخ تبخیر و تعرق در زمان بارش از طریق روش SSEB به دلیل اختلال در تصویربرداری ماهواره‌ای در شرایط ابری با محدودیت همراه است. برای محاسبات بیلان سالانه نیاز است تا روشی کمکی برای محاسبه میزان تبخیر و تعرق از بارش در فصول بارش به کار گرفته شود. در این مطالعه، بر اساس روش تورنت وایت، مقدار تبخیر حقیقی از بارش متوسط دو ایستگاه رفسنجان و جهان‌آبادنوق به عنوان معرف منطقه مورد مطالعه، محاسبه می‌شود که در تصحیح تبخیر و تعرق سالانه به کار می‌رود. مازاد بارش از تبخیر حقیقی (بارش غیر مؤثر)، بارش مفید یا مؤثر است که معادل مجموع رواناب و نفوذ به خاک می‌باشد. با

<sup>۱</sup>. National Oceanic and Atmospheric Administration

<sup>۲</sup>. Global Data Assimilation System



۱۳۷/۱ میلیمتر است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، الگوی تغییرات ماهانه تبخیر و تعرق به دست آمده، تقریباً روند یکسانی را در سال‌های مختلف نشان می‌دهد. این روند با الگوی آبیاری پسته که در فروردین آغاز و تا شهریور ادامه پیدا می‌کند، تطابق دارد. همچنین بالاترین نرخ تبخیر عمدتاً در ماه تیر مشاهده شده که زمان تشکیل مغز پسته و از دوره‌های اصلی آبیاری می‌باشد. اضافه شدن تبخیر و تعرق در آبان ماه نسبت به مهر و همین‌طور مشاهده تبخیر و تعرق در ماه‌های آذر تا اسفند عمدتاً با بارش‌های صورت گرفته منطبق است. همین‌طور در مهر ماه در مقایسه با سایر ماه‌ها مقدار تبخیر و تعرق کمتری مشاهده می‌شود که از مهم‌ترین دلایل آن می‌توان به نبود بارش، کاهش آبیاری و کاسته شدن از دما اشاره کرد.

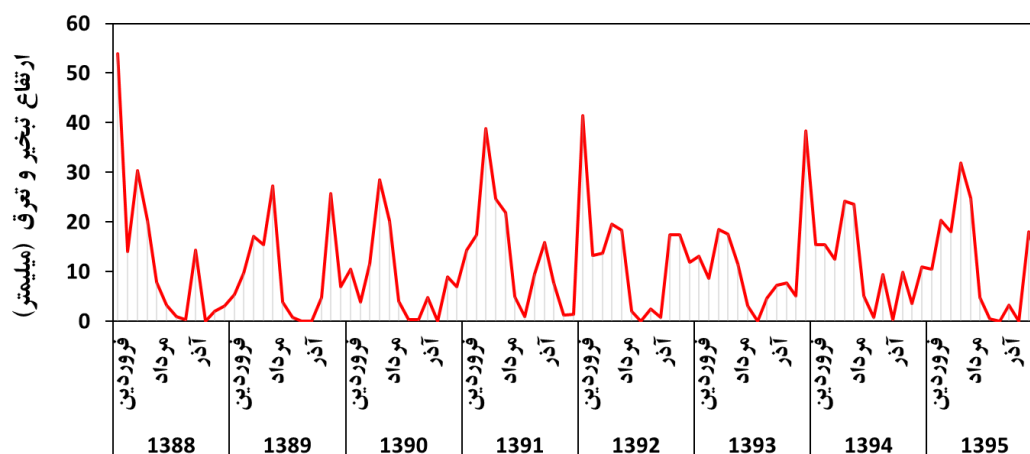
چنین تخمینی، می‌توان تبخیر و تعرق آبیاری در هر سال را نیز برآورد نمود.

## نتایج و بحث

محدوده بیلان در این مطالعه منطبق بر آبخوان محدوده مطالعاتی رفسنجان با مساحت ۴۲۳۶/۵ کیلومترمربع است که در بازه زمانی سال ۱۳۸۸ و ۱۳۹۵ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### تبخیر و تعرق

مقادیر تبخیر و تعرق واقعی به دست آمده برای آبخوان محدوده مطالعاتی رفسنجان از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵ بر پایه نتایج مستخرج از روش SSEB و تصحیحات لازم تورنت وایت در شکل (۵) ارائه شده است. متوسط سالانه تبخیر و تعرق در این بازه زمانی ۸ ساله،



شکل ۵- ماه-سال

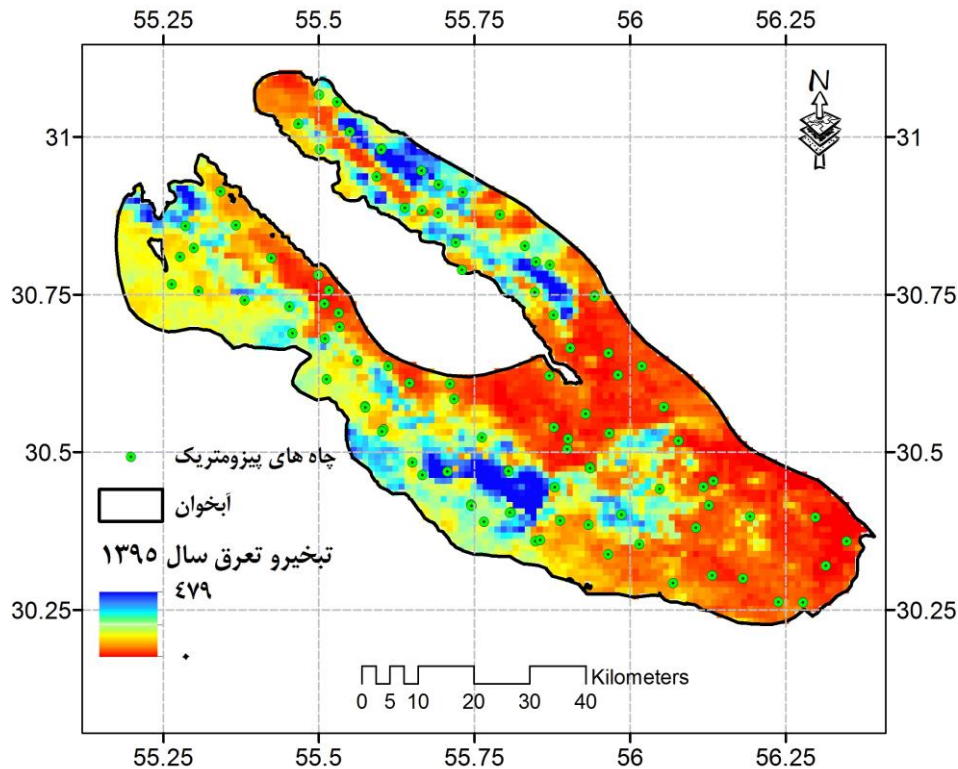
شکل ۵- سری زمانی نرخ ماهانه تبخیر و تعرق در طول ۸ سال از ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵ در محدوده آبخوان رفسنجان

فصل رشد را در فروردین و پایان آن را در مهر ماه نشان می‌دهد، تطابق با نیاز آبی سند ملی آب دارد. مطابق سند ملی آب، فصل آبیاری و رشد باغات پسته تا آذر ادامه پیدا کرده که با محاسبات داده‌های ماهواره‌ای و اطلاعات موجود از منطقه تطابق کامل ندارد. همچنین وجود باغاتی که در آنها نیاز آبی باغات به طور کامل تأمین نشده، می‌تواند عاملی برای افت میانگین تبخیر و تعرق در محدوده مکانی انتخاب شده باشد، بنابراین محاسبه تبخیر کمتر از نیاز آبی قابل انتظار است. در بیشتر سال‌ها مقدار تبخیر و تعرق حد اکثر در اواخر بهار و اوایل تابستان مشاهده شده است که با نیاز آبی پسته تطابق دارد. تطابق سنجی هندسی نقشه کاربری اراضی شکل (۳) با نقشه توزیع مکانی تبخیر و تعرق محاسبه شده نشان می‌دهد مکان‌های دارای تبخیر و تعرق بیشتر با نواحی دارای آبیاری (کاربری باغات پسته) کاملاً منطبق است که گویای تأثیر برجسته‌تر آبیاری در نرخ تبخیر و تعرق نیز می‌باشد.

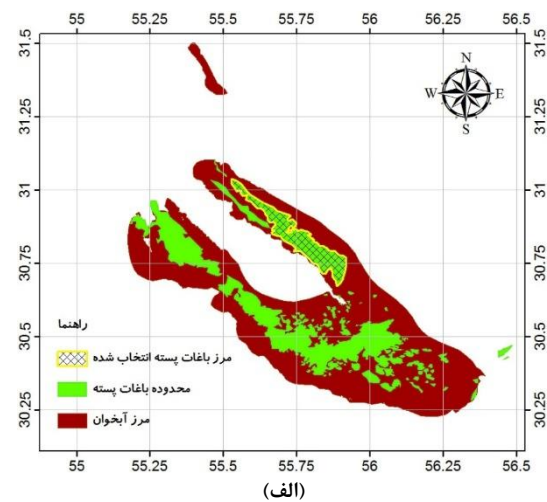
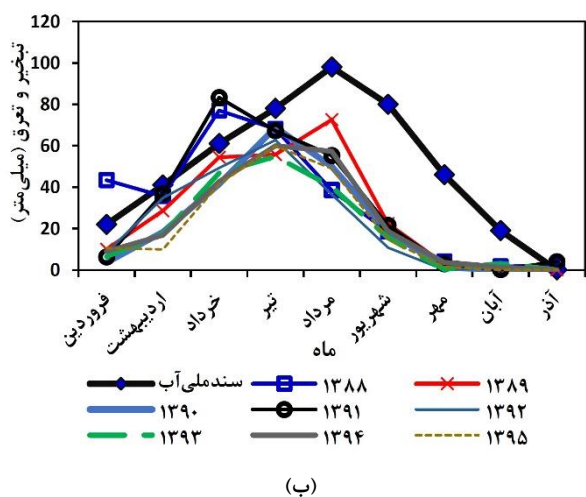
در شکل (۶)، توزیع مکانی مقدار تبخیر و تعرق در محدوده آبخوان رفسنجان به عنوان نمونه برای سال ۱۳۹۵ ارائه شده است. با توجه به استفاده مقادیر محاسبه شده تبخیر و تعرق در بیلان منابع آب محدوده، صحت‌سنجی این مقادیر نیز انجام شده است. برای این کار، مقایسه تبخیر و تعرق محاسبه شده در سطح باغات با نیاز آبی پسته در محدوده آبخوان رفسنجان مطابق با سند ملی آب، تطابق سنجی هندسی نقشه کاربری اراضی با نقشه توزیع مکانی تبخیر و تعرق محاسبه شده و مقایسه مقدار تبخیر و تعرق با بارش در کاربری مرتع و خاک بایر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و مقادیر محاسبه شده، مورد تأیید قرار گرفتند. برای مقایسه با سند ملی آب، ابتدا نیاز آبی پسته در محدوده آبخوان رفسنجان استخراج و با سری زمانی تبخیر و تعرق محدوده شمالی باغات پسته (شکل ۷ الف) مقایسه گردیده و در شکل (۷ ب) ارائه شده است. الگوی تغییرات تبخیر و تعرق محاسبه شده که شروع

افزایش رطوبت آنها وجود ندارد، مقدار تبخیر و تعرق کمتر از مقدار بارش باشد، چرا که بخشی از بارش به داخل زمین نفوذ کرده یا تبدیل به رواناب می‌شود.

همچنین مقدار تبخیر و تعرق محاسبه شده در تعدادی نقطه انتخاب شده در کاربری مرتع و خاک بایر با بارش مقایسه شده است. انتظار می‌رود در کاربری‌هایی که منبعی غیر از بارش برای



شکل ۶- توزیع مکانی مقدار تبخیر و تعرق برحسب میلی‌متر در محدوده آبخوان رفسنجان در سال ۱۳۹۵



شکل ۷- (الف) محدوده انتخاب شده (منطقه هاشور خورده در محدوده شمالی باغات پسته) جهت مقایسه تبخیر و تعرق محاسبه شده با نیاز آبی پسته در محدوده آبخوان رفسنجان مبتنی بر سند ملی آب، (ب) تغییرات ماهانه تبخیر و تعرق از فروردین تا آذر در سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵

ایستگاه‌های زمینی و نرخ تبخیر و تعرق برآورد شده با رویکرد سنجش از دور مدنظر در این پژوهش، بطور متوسط در آبخوان رفسنجان در بازه سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۵، حجم بارش برابر ۲۹۹/۷ میلیون مترمکعب (۷۰/۸ میلیمتر)، تبخیر و تعرق ۵۸۱ میلیون مترمکعب (۱۳۷/۱ میلیمتر)، تبخیر حقیقی یا بارش

### برآورد بیلان آب زیرزمینی

بر اساس بررسی‌های به عمل آمده از منطقه مورد مطالعه، ذخیره قابل توجه آب سطحی وجود ندارد ( $\Delta S_s \approx 0$ ) و بنابراین می‌توان مقادیر ورودی و خروجی آب سطحی در محدوده را مطابق با رابطه ۱ برابر هم دانست. بر اساس مقدار بارش برآورد شده از

از آب برگشتی (زراعی، شرب و صنعت) در محدوده داشت که معادل ۳۶۲/۸ میلیون مترمکعب می‌شود. نکته لازم به توجه این است که تغییرات مکانی ضریب نفوذ از بارش در این محدوده بسیار متغیر است و این مقدار با شدت و دوره زمانی بارش‌ها در طول سال ارتباط مستقیم دارد. به عنوان مثال، مشاهده می‌شود که در سال ۱۳۸۹ به دلیل بارش ۷۲/۵ میلیمتر در بهمن ماه و طی چند روز کوتاه، مقدار ضریب نفوذ به بیش از ۴۵ درصد هم رسیده اما در سال‌هایی مانند ۱۳۹۰، این مقدار برابر با صفر می‌باشد. لذا می‌توان این نتیجه‌گیری را داشت که استفاده از یک ضریب ثابت نفوذ از بارش که رویکردی رایج در مطالعات پیشین بوده است، خطای زیادی را وارد برآوردها می‌کند.

برای دوره زمانی برآورد بیلان مطالعه حاضر، حجم تخلیه از منابع آب زیرزمینی به طور میانگین برابر ۶۸۳/۳ میلیون مترمکعب است. باید توجه داشت که در طول دوره هشت ساله مورد بررسی، سالانه حدود ۲ درصد کاهش برداشت روی داده است. حجم برآورد شده مصرف گیاه (عمدتاً درختان پسته) در منطقه مطالعه حاضر معادل ۳۶۲/۸ میلیون مترمکعب است و با توجه به سطح زیر کشت ۱۱۵۷ کیلومترمربعی، مقدار آب مصرفی بر حسب مترمکعب بر هکتار گیاه، به طور متوسط برابر ۳۰۷۱ مترمکعب بر هکتار (۳۰۷ میلیمتر) در آمده است که کمتر بودن آن از نیاز آبی پسته در این محدوده (۴۳۹۰ مترمکعب بر هکتار بر اساس سند ملی آب ایران)، انطباق آن را نشان می‌دهد و بیانگر این موضوع است که شرایط کم آبیاری و تنش گیاهی در طول دوره زمانی مطالعات، تا حدودی وجود داشته است. همین‌طور برخی باغات در محدوده کل دشت در شرایط کم آبیاری و فقط جهت زنده نگه‌داشتن درختان آبیاری می‌شوند که این امر نیز به کاهش متوسط مصرف در سطح کل دشت منجر می‌شود. حجم آبیاری در محدوده باغات محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی مورد بررسی، به طور متوسط برابر ۶۲۸۵ مترمکعب بر هکتار است که علاوه بر مصرف گیاه (تعرق گیاه و تبخیر از خاک و آب آبیاری)، مقدار آب برگشتی و نفوذ یافته از آن به خاک را شامل می‌شود. این کمیت معادل مقدار آبی است که باغداران منطقه در طول سال بطور متوسط، باغات خود را آبیاری می‌نمایند و در بازه سال‌های بررسی به طور متوسط ۶۲۸ میلیمتر است.

تبخیر و تعرق از آب زیرزمینی به عمق آب، نوع بافت خاک، درجه حرارت محیط، پوشش گیاهی، رطوبت نسبی و غلظت املاح آب بستگی دارد و هر چه سطح آب زیرزمینی به سطح زمین نزدیک‌تر باشد مقدار تبخیر از آب زیرزمینی بیشتر می‌شود. بررسی نقشه تراز آب زیرزمینی در آبخوان رفسنجان در بازه سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۵ نشان می‌دهد که عمق سطح آب کمتر

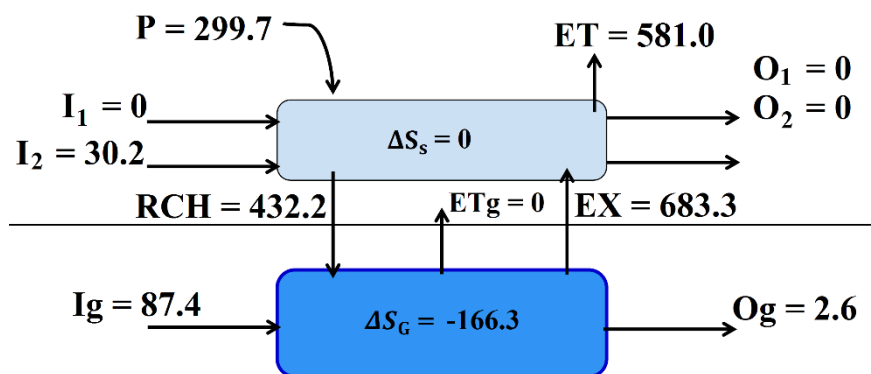
غیرمؤثر برابر ۲۱۸/۱ میلیون مترمکعب (۵۱/۵ میلیمتر)، بارش مؤثر ۸۱/۶ میلیون مترمکعب (۱۹/۳ میلیمتر) و تبخیر و تعرق از آبیاری یا آب مصرفی گیاه معادل ۳۶۲/۸ میلیون مترمکعب (۸۵/۷ میلیمتر) است. میزان نفوذ آب به خاک از بارش مؤثر بر اساس (IWRMC, 2015) حدود ۸۵ درصد برآورد شده است که معادل ۶۹/۴ میلیون مترمکعب می‌شود (بقیه رواناب و ذخیره در ناحیه غیراشباع خاک است). حجم جریان‌های سطحی ورودی و خروجی در بازه زمانی مطالعه حاضر (۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵) بسیار ناچیز است. همچنین با توجه به اینکه آب سطحی قابل توجهی در محدوده آبخوان رفسنجان در بازه زمانی مورد نظر وجود ندارد، عملاً نفوذی از رودخانه‌ها و آبراهه‌های سطحی نیز به آبخوان نمی‌توان متصور شد. آب انتقالی به محدوده رفسنجان شامل طرح انتقال آب شرب بردسیر به رفسنجان و طرح انتقال آب از محدوده مطالعاتی خاتون‌آباد واقع در حوضه آبریز ابرقو - سیرجان به مجتمع مس سرچشمه رفسنجان برای مصارف صنعتی است که در مجموع حجمی معادل ۳۰/۲ میلیون مترمکعب را دارد. همچنین بررسی اطلاعات نشان می‌دهد که به صورت انتقالی و با استفاده از تأسیسات، آبی از این محدوده مطالعاتی به محدوده دیگر انتقال نمی‌یابد (IWRMC, 2015).

جهت تخمین جریان زیرزمینی ورودی و خروجی به آبخوان رفسنجان در دوره هشت ساله مورد بررسی، با استفاده از طول جبهه‌های ورودی آب زیرزمینی، گرادیان هیدرولیکی، ضریب قابلیت انتقال (شکل ۲ د)، میزان حجم آب ورودی و خروجی زیرزمینی برآورد شده است. در آبخوان رفسنجان حجم جریان‌های ورودی از مقاطع به محدوده بیلان بطور متوسط در حدود ۸۷/۴ میلیون مترمکعب و حجم جریان‌های خروجی از محدوده بیلان معادل ۲/۶ میلیون مترمکعب می‌باشد. بیشترین حجم ورودی به آبخوان از جبهه جنوبی و جنوب شرقی و منطقه بردسیر است. جریان‌های اندک خروجی نیز غالباً از دو بخش شمالی نوق و انار می‌دهد.

بر اساس روش‌شناسی مطالعه حاضر، مقدار تغذیه به عنوان مجهول از محاسبات بیلان آب سطحی مطابق با رابطه ۱ برآورد می‌شود. این مقدار شامل احجام حاصل از نفوذ از بارش، نفوذ از آب برگشتی زراعی، شرب و صنعت و نفوذ از رودخانه‌ها و آبراهه‌های سطحی است و معادل ۴۳۲/۲ میلیون مترمکعب محاسبه می‌شود. در دوره زمانی مطالعات حاضر، به دلیل نبود رواناب، رودخانه و آبراهه‌های سطحی، عملاً نفوذی از آن‌ها وجود ندارد. مقدار نفوذ از بارش بر اساس برآوردهای انجام شده از بارش مؤثر در این مطالعه تخمین زده شده و برابر با ۶۹/۴ میلیون مترمکعب است. با توجه به این مقادیر، می‌توان تخمینی از نفوذ

گردیده است. این ضریب در (IWRMC 2015) برابر ۵ درصد گزارش شده است. بر اساس رابطه ۳ در مساحت  $۴۲۳۶/۵$  کیلومترمربع محدوده بیلان این مطالعه؛ کاهش حجم تغییرات ذخیره زیرزمینی مشاهداتی برابر  $۱۶۷/۰$  میلیون مترمکعب برآورد شده است که اختلاف ناچیزی با مقدار محاسباتی این کمیت ( $۱۶۶/۳$  - میلیون مترمکعب) دارد. بنابراین می‌توان جمع‌بندی نمود که تغییرات ذخیره منفی آبخوان رفسنجان جمعی در حدود  $۱۶۶$  تا  $۱۶۷$  میلیون مترمکعب است که منجر به افت متوسط  $۵۸$  سانتی‌متری آب زیرزمینی در سال شده و باید برای جبران آن چاره‌اندیشی نمود.

از ۵ متر در آبخوان مشاهده نمی‌شود. بنابراین تبخیری از آب زیرزمینی در این محدوده نمی‌توان متصور شد. با برآورد شدن مؤلفه‌های فوق و بهره‌گیری از رابطه ۲ می‌توان مقدار تغییرات ذخیره زیرزمینی محاسباتی را ارائه نمود. در شکل (۸)، این مؤلفه‌ها نشان داده شده است. بر این اساس، مقدار کاهش ذخیره زیرزمینی در این دوره، بطور متوسط برابر  $۱۶۶/۳$  میلیون مترمکعب محاسبه می‌شود. تغییرات ذخیره زیرزمینی مشاهداتی با رابطه ۳ و بر اساس بررسی هیدروگراف معرف آبخوان رفسنجان در طول سال‌های  $۱۳۸۸$  تا  $۱۳۹۵$  قابل برآورد است. در این دوره مقدار متوسط افت سالیانه برابر  $۰/۵۸$  متر است (RIWEM, 2019). همچنین در (RIWEM (2019) مقدار ضریب ذخیره برابر  $۶/۸$  درصد برآورد



شکل ۸- حجم متوسط مؤلفه‌های بیلان آب سطحی و زیرزمینی بر حسب میلیون مترمکعب در بازه زمانی  $۱۳۸۸$  و  $۱۳۹۵$

محاسباتی برابر  $۱۷۶/۳$  میلیون مترمکعب برآورد شده بود که مقدار برآورد شده در این مطالعه به آن نزدیک و دارای اختلاف ۶ درصد است.

در رویکرد مطالعه حاضر، یکی از مؤلفه‌های دارای با دقت کم در بیلان آب زیرزمینی که از آن به عنوان مؤلفه تغذیه آبخوان یاد می‌شود با بهره‌گیری از داده سنجش از دور برای برآورد تبخیر و تعرق از محدوده، محاسبه گردید. به کارگیری این تکنیک توانست افزایش اطمینان برآورد این مؤلفه را باعث شود. در رویکرد رایج برآوردهای بیلان که در کارهای پیشین بر اساس دستورالعمل نحوه تهیه گزارش بیلان آب (IWRMC, 2010) از آن بهره‌گیری شده، تغذیه با استفاده از ضریب نفوذ از بارش، ضریب آب برگشتی زراعی، شرب و صنعت برآورد شده است. نتایج این مطالعات نشان داد که بکارگیری این ضرایب بخصوص برای نفوذ از بارش می‌تواند خطای زیادی را وارد محاسبات کند. تغییرات این ضرایب در طول سالیان مختلف بر اساس الگوی بارش و نحوه آبیاری، بسیار متغیر است و در واقع به کارگیری یک ضریب متوسط توصیه شده برای آن، فقط در بیلان‌های بلندمدت شاید قابل قبول باشد (Healy, 2010; Ketabchi et al., 2018).

بیلان آب زیرزمینی و نیز تغییرات ذخیره زیرزمینی محاسباتی بر اساس رویکرد توصیه شده در دستورالعمل نحوه تهیه گزارش بیلان آب (IWRMC, 2010) نیز برآورد شده است که همان رویکرد مورد استفاده در (IWRMC 2015) هم بوده است. در (IWRMC 2015)، مقدار ضریب نفوذ از بارش ۱۱ درصد، ضریب آب برگشتی کشاورزی برای برآورد نفوذ از آب زراعی برابر ۳۳ درصد و ضریب نفوذ از آب شرب و صنعت هم برای مقدار تخصیص یافته از آب زیرزمینی بدین منظور برابر ۶۰ درصد فرض شده است. با به کارگیری این ضرایب و برآورد مؤلفه‌های بیلان آب سطحی و زیرزمینی، نفوذ از بارش، معادل  $۶۹/۴$  میلیون مترمکعب و نفوذ از آب‌های مصرفی برابر  $۲۳۹$  میلیون مترمکعب برآورد می‌شود و کاهش ذخیره زیرزمینی محاسباتی برابر  $۲۹۰/۰$  میلیون مترمکعب را سبب می‌شود که بیش از واقعیت مشاهداتی است که مؤید تقریبی بودن استفاده از ضرایب توصیه شده فوق در بازه‌های زمانی و شرایط مختلف محدوده است. در مطالعه Babaei and Ketabchi (2020) هم که با بهره‌گیری از مدل WetSpas-M در بازه زمانی مشابه همین مطالعه، برآورد مؤلفه‌های بیلان انجام گرفت، مقدار کاهش ذخیره زیرزمینی

## نتیجه‌گیری

بارش، شدت آن و طول دوره بارندگی است که در محدوده رفسنجان این ویژگی‌ها بسیار متغیر است و لذا به کارگیری ضریب نفوذ از بارش در تخمین‌های بیلان توصیه نمی‌شود. در بازه زمانی مورد بررسی این ضریب حدود ۲۳ درصد برآورد گردید. در سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵، مقدار کاهش ذخیره آب زیرزمینی ۱۶۶/۳ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد که موجب افت متوسط سالانه ۵۸ سانتیمتری سطح آب زیرزمینی شده است. این برآوردها و مشاهده این افت در این آبخوان، لزوم توجه بیش از پیش به مدیریت مصرف آب زیرزمینی و ارتقای امکانات برآوردهای بهتر و دقیق‌تر برای مدیریت صحیح این منابع در آینده را ضروری می‌سازد.

## سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از پژوهشکده مهندسی و مدیریت آب دانشگاه تربیت مدرس، شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت آب منطقه‌ای کرمان و اندیشکده تدبیر آب ایران به جهت در اختیار قرار دادن بخشی از مراجع، داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده در این مطالعه تشکر می‌نمایند. همچنین از حمایت مالی طرح (قرارداد پژوهشی شماره ۳۶۰/۴۹۷۶ با پژوهشکده مهندسی و مدیریت آب دانشگاه تربیت مدرس) از سوی اندیشکده تدبیر آب ایران، سپاس و قدردانی به عمل می‌آید. دیدگاه‌ها و تحلیل‌های ارائه‌شده نویسندگان مقاله حاضر، لزوماً دیدگاه‌های تأمین‌کنندگان داده‌ها و اطلاعات لازم و حامیان این تحقیق نیست.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(4), 380-394.
- 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), 1457-1468. (In Farsi).
- Bagheri, A., & Babaeian, F. (2020). Assessing water security of Rafsanjan Plain, Iran—Adopting the SEEA framework of water accounting. *Ecological Indicators*, 111, 105959.
- Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212, 198-212.
- Bayazidi, M., & Kaki, M. (2021). Storage volume and exploitation changes of aquifers in the eastern plains of Kurdistan province. *Iranian journal of Ecohydrology*, 8(1), 57-72. (In Farsi).
- 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.
- Colombani, N., Gaiolini, M., Busico, G., & Postacchini, M. (2021). Quantifying the Impact of Evapotranspiration at the Aquifer Scale via Groundwater Modelling and MODIS Data. *Water*, 13(7), 950.
- Falalakis, G., & Gemtzi, A. (2020). A simple method for water balance estimation based on the empirical method and remotely sensed evapotranspiration estimates. *Journal of Hydroinformatics*, 22(2), 440-451.
- Farzaneh, M. R., Bagheri, A., & Momeni, F. (2019). A criticism to framework of groundwater resources reclamation and suggesting alternative method to the implement in Rafsanjan region around. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(1), 169-185. (In Farsi).
- Gemtzi, A., Ajami, H., & Richnow, H. H. (2017).

به کارگیری روش‌های نوین مانند سنجش از دور در این مطالعه در راستای افزایش اطمینان محاسبات بیلان آب زیرزمینی آبخوان رفسنجان مورد توجه قرار گرفت. مؤلفه تبخیر و تعرق به عنوان یکی از مؤلفه‌های مؤثر در بیلان آب که به طور مستقیم نیز قابل اندازه‌گیری نیست، از طریق روش سنجش از دور SSEB برآورد شد و مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. تعیین این مؤلفه در روابط بیلان باعث شد که دیگر مؤلفه بزرگ و پراهمیت تغذیه که در مطالعات پیشین بنا به دستورالعمل‌های رایج کشور با بهره‌گیری از ضرایب نفوذ از بارش یا ضرایب آب برگشتی از مصارف شرب، زراعی و صنعت یا ضرایب نفوذ از رودخانه‌ها و آبراهه‌های سطحی تخمین زده می‌شد، قابل محاسبه باشد. لذا از خطاهای وارد به دلیل استفاده از ضرایب توصیه شده متوسط و تقریبی ممانعت به عمل آمد. در این مطالعه، بر اساس داده‌های سنجش از دور، مقدار متوسط تبخیر و تعرق از محدوده آبخوان رفسنجان (مشمول بر تبخیر و تعرق از آبیاری و خاک، تبخیر از بارش و آبراهه‌ها) در سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵، برابر ۱۳۷/۱ میلی‌متر معادل ۵۸۱ میلیون مترمکعب تخمین زده شد. در تبخیر و تعرق از آبخوان، تبخیر و تعرق از آبیاری (عمدتاً از باغات پسته) سهم زیادی داشته و در حدود ۳۰۷ میلی‌متر از سطح باغات (۳۶۳ میلیون مترمکعب) است. مصرف خالص باغات پسته در سطح ۱۱۵۷ کیلومترمربعی، برابر ۳۰۷۱ مترمکعب بر هکتار است که گویای شرایط کم‌آبیاری در سال‌های مورد بررسی است. بررسی‌ها نشان داد که ضریب نفوذ از بارش در دوره مورد بررسی به‌شدت متغیر بوده و تابعی از الگوی

- Developing empirical monthly groundwater recharge equations based on modeling and remote sensing data—Modeling future groundwater recharge to predict potential climate change impacts. *Journal of hydrology*, 546, 1-13.
- Gokmen, M., Vekerdy, Z., Lubczynski, M. W., Timmermans, J., Batelaan, O., & Verhoef, W. (2013). Assessing groundwater storage changes using remote sensing-based evapotranspiration and precipitation at a large semiarid basin scale. *Journal of hydrometeorology*, 14(6), 1733-1753.
- Healy, R. W. (2010) *Estimating groundwater recharge*. Cambridge University Press.
- Heilweil, V. M., & Brooks, L. E. (2010). Conceptual model of the Great Basin carbonate and alluvial aquifer system. *US Geological Survey Scientific Investigations Report*, 5193(2011), 191.
- IWPRI (Iranian water policy research institute). (2014). *Groundwater Sustainability Plan, Case Study of Rafsanjan Plain, Part 1*. (In Farsi).
- IWRMC (Iran Water Resources Management Company). (2010). *Instruction for preparation of water resources balance report*. (In Farsi).
- IWRMC (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).
- Jamalizadeh, M., Bazrafshan, O., Mahdavi, R., Azareh, A., & Rafiee Sardoei, E. (2020). Forecasting of Groundwater Fluctuations Using Stochastic Models and GMS (Case Study: Rafsanjan Plain). *Iranian journal of Ecohydrology*, 7(1), 97-109. (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).
- Marillier, B. (2012). *Nambeelup groundwater modelling report*, Water science technical series, report no.47, Department of Water, Western Australia.
- Molle, F., Gaafar, I., El-Agha, D. E., & Rap, E. (2016). Irrigation efficiency and the Nile Delta water balance. *Water and Salt Management in the Nile Delta Project Report*, (9).
- Morgan, L. K., Harrington, N., Werner, A. D., Hutson, J. L., Woods, J., & Knowling, M. (2015). South East Regional Water Balance Project—Phase 2. Development of a Regional Groundwater Flow Model. *Goyder Institute for Water Research Technical Report Series*, (15/38), 138.
- Mortazavi, S. M., Soleimani, K., & Ghafari Movafagh, F. (2011). Water resource management and land sustainable, the case study in Rafsanjan in Iran. *Journal of Water and Wastewater (Ab va Fazilab)*, 22(2), 126-131. (In Farsi).
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghighi, M. H., Wetzel, H. U., Akbari, B., Nahavandchi, H., ... & Arabi, S. (2017). Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Engineering Geology*, 218, 134-151.
- Nishida, K., Nemani, R. R., Running, S. W., & Glassy, J. M. (2003). An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D9).
- RIWEM (Research Institute of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University). (2019). *Study for Accurate Groundwater Resources Balance of Rafsanjan Plain*. Iranian Water Policy Research Institute at Kerman Chamber of Commerce, Industries, Mines & Agriculture. (In Farsi).
- Schuler, P., & Margane, A. (2013). Water Balance for the Groundwater Contribution Zone of Jeita Spring using WEAP-Including Water Resources Management Options & Scenarios.—Technical Cooperation Project ‘Protection of Jeita Spring’. *German-Lebanese Technical Cooperation Project Protection of Jeita Spring, BGR*.
- Sedghi, H., Alaviyany, F., Asghari moghaddam, A., Babazadeh, H. (2020). Optimization of conjunctive use of surface water, groundwater and wastewater resources in Hashtgerd plain. *Hydrogeology*, 4(2), 48-62. (In Farsi).
- Senay, G. B., Bohms, S., Singh, R. K., Gowda, P. H., Velpuri, N. M., Alemu, H., & Verdin, J. P. (2013). Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(3), 577-591.
- Senay, G. B., Budde, M. E., & Verdin, J. P. (2011). Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) approach for estimating landscape ET: Validation with the METRIC model. *Agricultural Water Management*, 98(4), 606-618.
- Senay, G. B., Verdin, J. P., Lietzow, R., & Melesse, A. M. (2008). Global daily reference evapotranspiration modeling and evaluation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 44(4), 969-979.