



## ارزیابی تغییرات زمانی - مکانی بیلان رطوبتی خاک به روش تورنت وایت - ماتر (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بهشت آباد)

الهام داودی<sup>۱</sup>، هدی قاسمیه<sup>۲\*</sup>، خدایار عبدالمهی<sup>۳</sup>، اکه بتلان<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه کاشان

۲. دانشیار دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

۳. استادیار دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

۴. استاد دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه فیلیپینرز، آدلاید، استرالیا

### مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۱۲ شهریور ۱۳۹۶

پذیرش: ۲۸ اسفند ۱۳۹۶

دسترسی اینترنتی: ۱ خرداد ۱۳۹۷

واژه‌های کلیدی:

بیلان رطوبتی خاک

رواناب سطحی

نفوذ سطحی

تبخیر و تعرق

تورنت وایت - ماتر

بهشت آباد

### چکیده

به منظور مدیریت پایدار منابع آب، تعیین بیلان آب و اجزای آن، امری ضروری است. در این تحقیق، با هدف به دست آوردن یک دید کلی نسبت به وضعیت بیلان و اجزای تشکیل دهنده آن، بیلان رطوبتی خاک با استفاده از مدل تورنت وایت - ماتر در حوزه آبخیز بهشت آباد طی سال‌های ۲۰۱۵ - ۲۰۰۳ محاسبه شد. نقشه‌های توزیعی شامل بارش، دما، تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی، ذخیره رطوبتی خاک، نفوذ سطحی، رواناب سطحی و شاخص سطح برگ تهیه گردید. نتایج نشان داد که از نظر توزیع مکانی، در بهار و تابستان بیشترین رواناب در ارتفاعات (8/98 mm) و کمترین مقادیر آن در خروجی حوزه و در پاییز و زمستان بیشترین رواناب در خروجی حوزه (46/72 mm) و کمترین آن در ارتفاعات اتفاق می‌افتد. بین رواناب مشاهده شده و محاسبه شده همبستگی 53 درصدی وجود دارد. میزان نفوذ سطحی در ماه‌های خشک کاهش می‌یابد، بیشترین نفوذ سطحی (محدوده بین 16 mm تا 31) در محدوده خاک‌های با بافت لومی شنی و لومی رسی و در کاربری‌های اراضی کشاورزی و مراتع با پوشش خوب و متوسط اتفاق افتاده است. از نظر توزیع مکانی، کاربری‌های کشاورزی، مراتع خوب و متوسط دارای تبخیر و تعرق واقعی بیشتری دارند که این مناطق، غالباً منطبق بر نقاطی است که بیشترین شاخص سطح برگ را دارند. به طور کلی نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌تواند در شناسایی وضعیت رطوبتی خاک و زوایای مختلف این سیستم پیچیده و همچنین مدیریت حوزه آبخیز مفید باشد.

\* H.Ghasemieh@kashanu.ac.ir: پست الکترونیکی مسئول مکاتبات

## مقدمه

با توجه به شرایط تغییر اقلیم در دهه گذشته، ایجاد شرایط خشک‌سالی و کاهش نزولات آسمانی، حفظ و نگهداری از منابع آب برای شرایط بحرانی امری ضروری است. به‌منظور مدیریت پایدار منابع آب، بایستی از بیلان آب اطلاع داشته تا بتوان به شیوه صحیح از آب استفاده نموده و از هدر رفت آن جلوگیری شود. بیلان آب اختلاف بین جریان ورودی و خروجی و نیز میزان تغییرات در ذخیره آب (در مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت) را نشان می‌دهد (۵ و ۲۵). در برآورد بیلان آب، با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی، عدم امکان اندازه‌گیری برخی از فاکتورهای بیلان آب و همچنین وجود خطاهای ناشی از اندازه‌گیری‌ها و تغییرات در برخی عوامل طبیعی، مشکلات فراوانی از نظر زمانی و مکانی وجود دارد (۱۱). مدل تورنت وایت-ماتر، یکی از مدل‌های تجربی بیلان آب و خاک است که توسط تورنت وایت در سال ۱۹۵۰ معرفی شد و توسط تورنت وایت و ماتر در سال‌های ۱۹۵۵ تا ۱۹۷۷ مورد بازبینی و اصلاح قرار گرفت (۱ و ۳۲) و با استفاده از مقادیر بارش، دما، تبخیر و تعرق پتانسیل، عمق ریشه، درصد رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی خاک، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی، رواناب و میزان نفوذ تخمین زده می‌شود (۲ و ۱۳). این مدل به‌صورت کلی و یکپارچه، وضعیت منابع آب را در حوزه ارزیابی می‌کند.

در شرایط با داده‌های محدود در اکثر کاربردها، استفاده از مدل‌های ساده‌تر اولویت دارد. مدل تورنت وایت-ماتر، به علت سادگی، نیاز به ورودی‌های کم و جنبه‌های کاربردی آن در هیدرولوژی حوزه‌ها، مدیریت آبخیزها، مدیریت منابع آب و مدیریت عرضه و تقاضا از سطوح مزرعه تا قاره‌ها و کل دنیا به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات متعددی در زمینه بیلان آب و برآورد اجزای آن با استفاده از مدل تورنت وایت-ماتر در سطح جهان انجام شده است که به برخی از شاخص‌ترین آن‌ها اشاره شده است. جسروتیا و همکاران (۲۷) به‌منظور برآورد رواناب در منطقه جامو کشمیر هندوستان، از مدل بیلان آبی ماهانه تورنت وایت-ماتر استفاده

کردند و نقاط مناسب برای اجرای طرح‌های ذخیره رواناب را تعیین نمودند. دوآردو-نتو و همکاران (۲۳)، روش تورنت وایت-ماتر را به‌عنوان روشی عمومی در برآورد بیلان آب و خاک معرفی کردند و به‌منظور تعیین دقیق‌تر ذخیره آب خاک از رابطه Mendonca استفاده کردند. بکانداکر و همکاران (۲۰) در تخمین تغذیه آب زیرزمینی در منطقه بوگسرا (Bugesera) از روش بیلان رطوبتی خاک استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل بیلان تورنت وایت-ماتر در مقیاس ماهانه نتایج قابل قبول‌تری ارائه می‌دهد.

مهدوی و آذرخشی (۱۷) در تعیین بیلان آبی مناسب ماهانه در حوزه‌های آبخیز کوچک کشور از مدل تورنت وایت-ماتر استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که بین رواناب ماهانه محاسبه‌شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. برخوردار و سمساریزدی (۲۱) به بررسی بیلان آبی ماهانه با استفاده از روش تورنت وایت-ماتر و GIS در مناطق خشک (حوزه آبخیز پیشکوه) پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل تورنت وایت-ماتر در برآورد متوسط جریان ماهانه و نقشه رواناب در مناطق خشک کارآمد است. برخوردار و همکاران (۲) بیلان ماهانه آب خاک را به روش تورنت وایت-ماتر در حوزه آبخیز یزد- اردکان بررسی کردند و مناطق تغذیه آب زیرزمینی و میزان آن را حوزه محاسبه نمودند. گودرزی و همکاران (۱۳) به‌منظور ایجاد مدل تجربی تغذیه از روش تورنت وایت-ماتر استفاده و مقادیر ماهانه تغذیه را برای دشت نجف‌آباد تعیین نمودند.

بررسی تغییرات بیلان آب به‌منظور شناسایی تغییرات هیدرولوژیکی محلی و منطقه‌ای، تعیین عوامل ایجادکننده آن و همچنین پاسخ جامعه و اکوسیستم (۲۴) امری اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به نکته مذکور و جمع‌بندی سوابق، داشتن دید کلی از وضعیت آبی در هر منطقه ضروری است. لذا هدف از این تحقیق، برآورد تغییرات زمانی و مکانی بیلان رطوبتی خاک حوزه آبخیز بهشت‌آباد به روش تورنت وایت ماتر است. برای رسیدن به این هدف ابتدا از مدل تورنت وایت ماتر استفاده

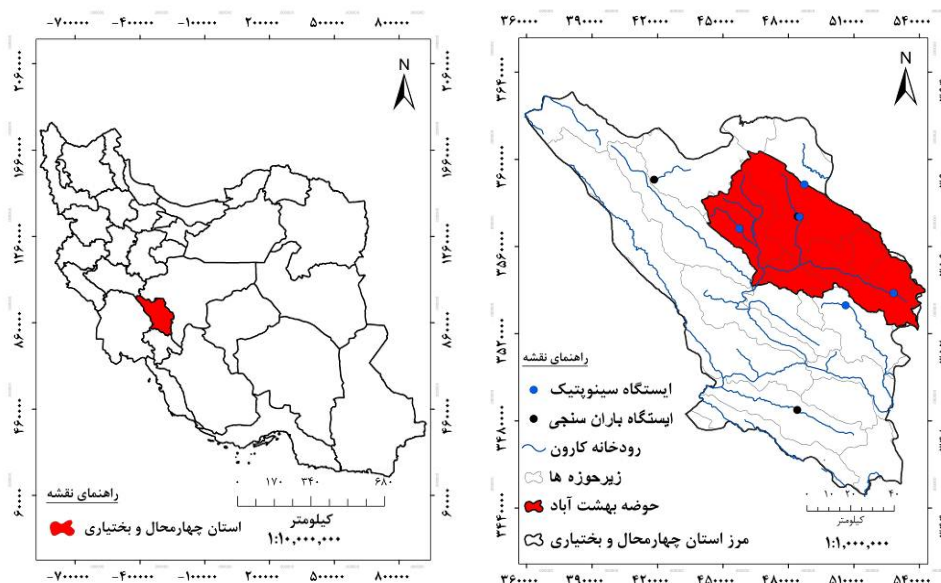
شمال و شمال شرقی حوزه آبخیز کارون شمالی در حدفاصل طول‌های جغرافیایی  $23^{\circ} 50'$  تا  $25^{\circ} 51'$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $31^{\circ} 49'$  تا  $32^{\circ} 34'$  شمالی واقع شده است (شکل ۱). این حوزه تمام یا قسمتی از مناطق بن، تنگ گزی، قهفرخ، چغاخور، حومی بروجن، شلمزار، دستگرد، فارسان، جونقان، حومی شهرکرد، هفتشجان و پشتکوه را در برمی‌گیرد و شامل ۲۷ درصد حوزه آبخیز شمالی رودخانه کارون می‌شود. از کل مساحت حوزه بهشت‌آباد، ۷۹ درصد در ارتفاع ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. کمترین ارتفاع این حوزه ۱۶۶۰ متر در محل خروجی و بیشترین ارتفاع آن ۳۶۲۰ متر در کوه سالداران است. این حوزه، شامل ۴۲ درصد اراضی مرتعی، ۴۶ درصد اراضی زراعی و ۱۲ درصد رخنمون سنگی است (۱۵).

پس از تهیه نقشه‌های پایه، معادلات مربوط به این مدل در نرم‌افزار ILWIS فرمول‌نویسی شد تا خروجی‌های مدل شامل نفوذ سطحی، بارش مؤثر، رواناب مستقیم و تبخیر و تعرق واقعی به صورت توزیعی و تفکیکی شده در مقیاس زمانی و مکانی به دست آید. استفاده از نقشه‌های توزیعی، امکان تعیین رواناب اضافی و یا کمبود رطوبت را در هر منطقه و در هر ماه فراهم می‌کند تا از این طریق مدیریت بهتری در مناطق اعمال شود (۱). همچنین علاوه بر این، در این تحقیق برای به دست آوردن رواناب مستقیم از معادله جدیدی که شامل پارامترهای مؤثر بر رواناب بوده استفاده گردید.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز بهشت‌آباد با مساحت ۳۸۶۰ کیلومتر مربع در



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان چهارمحال و بختیاری

تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل، نفوذ، رواناب، ذخیره رطوبتی خاک و آب مازاد را تخمین زد (۱۳). هدف از این تحقیق نمایش توزیعی اجزای بیلان به صورت میانگین ماهانه در طول ۱۳ سال دوره آماری (با توجه با دسترسی اطلاعات ورودی)

## روش تحقیق

در این تحقیق، ارزیابی بیلان رطوبتی خاک در حوزه آبخیز بهشت‌آباد با استفاده از مدل تورنت وایت-ماتر در دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ انجام شد. در این روش می‌توان

است که برای این منظور نیاز به تهیه نقشه‌های بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل، عمق ریشه، ظرفیت مزرعه و درصد رطوبت در نقطه پژمردگی گیاه است، اولین مرحله در این تحقیق، تهیه نقشه‌های مورد نیاز است.

**نقشه‌های بارش حوزه آبخیز بهشت‌آباد دارای ۵ ایستگاه سینوپتیک** که شامل ایستگاه‌های بروجن، کوه‌رنگ، لردگان، شهرکرد و سامان است (شکل ۱). داده‌های روزانه بارندگی از ایستگاه‌های مذکور تهیه شد اما با توجه به وسعت بالای حوزه، عدم پراکنش مناسب، محدوده وسیع تغییرات بارش در ماه‌ها و سال‌های مختلف و تعداد کم ایستگاه‌ها، به منظور تهیه نقشه‌های بارندگی با دقت بالا در حوزه مطالعاتی از روش WLS

است که برای این منظور نیاز به تهیه نقشه‌های بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل، عمق ریشه، ظرفیت مزرعه و درصد رطوبت در نقطه پژمردگی گیاه است، اولین مرحله در این تحقیق، تهیه نقشه‌های مورد نیاز است.

است که برای این منظور نیاز به تهیه نقشه‌های بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل، عمق ریشه، ظرفیت مزرعه و درصد رطوبت در نقطه پژمردگی گیاه است، اولین مرحله در این تحقیق، تهیه نقشه‌های مورد نیاز است.

جدول ۱. معادلات گرادیان بارش - ارتفاع در سال ۲۰۱۵

ماه‌ها	رابطه گرادیان بارش - ارتفاع	همبستگی	ماه‌ها	رابطه گرادیان بارش - ارتفاع	همبستگی
ژانویه	$P = ۳۲/۶ - ۰/۰۱۲۸H$	۰/۷۶	ژوئیه	$P = ۱۷۵ - ۰/۰۷۵۲H$	۰/۵۹
فوریه	$P = ۱۷۴/۳ - ۰/۰۴۵۴H$	۰/۵۲	اوت	بارش در این ماه صفر	-
مارس	$P = ۲۳۸ - ۰/۰۸۳۷H$	۰/۹۲	سپتامبر	$P = (-۱۵/۴۲) + ۰/۰۹۷۲H$	۰/۸۵
آوریل	$P = (-۱۴۶) + ۰/۱H$	۰/۵۲	اکتبر	$P = ۱۷۶/۲ - ۰/۰۶۷۷H$	۰/۹۴
می	$P = (-۱۶۷) + ۰/۰۸۸H$	۰/۶۱	نوامبر	$P = ۳۲/۲ - ۰/۰۱۳۵۵H$	۰/۷۲
ژوئن	$P = ۱۱/۹۹ - ۰/۰۰۵۱۹۶H$	۰/۸۹	دسامبر	$P = ۴۰۴ - ۰/۰۱۶۸۵H$	۰/۹۲

ابتدا نمایه حرارتی  $i_m$  برای هر یک از ماه‌های سال از رابطه ۱ محاسبه می‌شود که در این رابطه  $i_m$  نمایه حرارتی هرماه و  $T_m$  متوسط دمای هوا به درجه سانتی‌گراد در ماه مورد نظر است.

$$i_m = (T_m/5)^{1.51} \quad [1]$$

در صورتی که متوسط دما در یک ماه منفی باشد، نمایه حرارتی برای آن ماه صفر در نظر گرفته می‌شود. نمایه حرارتی هر سال (I) از جمع نمایه حرارتی ماهانه طی سال به دست می‌آید (رابطه ۲). با داشتن نمایه حرارتی سال I ضریب a از رابطه ۳ محاسبه گردید.

$$I = \sum_1^{12} i_m \quad [2]$$

$$a = ۰/۵ + ۰/۰۱۶ \times I \quad [3]$$

**نقشه‌های متوسط دما** داده‌های دما برای حوزه آبخیز بهشت‌آباد از ایستگاه‌های بروجن، اردل، سامان، فرخ‌شهر و فارسان تهیه شد. موقعیت ایستگاه‌ها و نحوه پراکنش آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تهیه نقشه‌های متوسط دما، به علت پایین بودن محدوده تغییرات متوسط دما در ماه‌ها و سال‌های مختلف، از روش درونیابی کریجینگ استفاده گردید که علت استفاده از این روش، پایین بودن میانگین خطا نسبت به سایر روش‌های درونیابی بود (۱۲). آنگاه نقشه‌های میانگین سالانه متوسط دما در هرماه، تهیه گردید.

**نقشه‌های تبخیر و تعرق پتانسیل** حوزه برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل در هر یک از ماه‌های سال، از روش تورنت وایت استفاده شد که یک روش مبتنی بر دمای متوسط ماهانه است (۷). روش محاسبه آن به این صورت است که

منهای رواناب مستقیم به دست می‌آید (۱، ۲ و ۳۰). در این تحقیق به منظور برآورد رواناب مستقیم از روابط زیر، به جای استفاده از مدل تورنت وایت ماتر، استفاده شد (۱۸).

$$SR_M = (1/LP) \cdot (C_{sr} \cdot C_h) \cdot (P_m - I_m) + \text{Snowmelt} \quad [9]$$

در این رابطه؛  $SR_m$  رواناب سطحی برحسب میلی‌متر،  $C_{sr}$  ضریب رواناب واقعی بدون واحد و  $C_h$  ضریب بی‌بعد (نماینده شرایط رطوبتی خاک) است.  $C_h$  (بین صفر و یک) با استفاده از روش فو در مقیاس ماهانه برآورد می‌شود (۱۸).  $I_m$  برگاب ماهانه برحسب میلی‌متر،  $P_m$  بارندگی ماهانه برحسب میلی‌متر است. بارندگی ماهانه از کسر بارش ماهانه از مقدار رواناب حاصل از ذوب برف محاسبه می‌شود.

$$C_h = [1 + (PET/P_m)^W]^{1/W} - (PET/P_m) \quad \text{if } PET > P_m \quad [10]$$

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

که در این رابطه،  $PET$  تبخیر و تعرق پتانسیل به میلی‌متر و  $LP$  یک پارامتر واسنجی بی‌بعد کاهنده تبخیر و تعرق پتانسیل است که بستگی به شرایط رطوبت خاک دارد و  $1/85$  و مقدار  $W$  نیز  $2/69$  فرض شده است.

$$C_{sr} = C_{wp} \cdot P_{24} / (C_{wp} \cdot P_{24} - RCD \cdot C_{wp}) + RCD \quad [11]$$

در این رابطه،  $C_{wp}$  ضریب رواناب واقعی،  $P_{24}$  میانگین بارندگی ۲۴ ساعته برحسب میلی‌متر در روز در هرماه و  $RCD$  (Regional Consecutive Dryness level) سطح خشکی متوالی منطقه‌ای برحسب میلی‌متر برای مدل تعریف می‌شوند. مقدار  $RCD$  بین ۱ (برای بارندگی خیلی سنگین و سیلابی و تعداد روزهای بارندگی بیش از ۱۰ روز در ماه) و ۱۰ (شدت بارندگی کم با تعداد روزهای بارندگی کمتر از ۲ روز در ماه) متغیر است. رواناب حاصل از ذوب برف نیز از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود (۱۸).

$$SWM = P_m / (S_1^T \cdot S_2) + 1 \quad [12]$$

با توجه به این که تعداد روزهای هرماه و تعداد ساعات روشنایی در ماه‌های مختلف سال متفاوت است، لذا جهت به دست آوردن تبخیر و تعرق پتانسیل ( $PET$ )، ضریب اصلاحی  $N_m$  (۷) با توجه به منطقه و عرض جغرافیایی محاسبه می‌شود (رابطه ۴). در نهایت، نقشه‌های میانگین سالانه متوسط تبخیر و تعرق پتانسیل در هرماه تهیه شد (شکل ۳).

$$PET = 16N_m(10T_m/I)^a \quad [4]$$

**نقشه ذخیره رطوبتی خاک** مقدار ذخیره رطوبتی خاک (Water holding capacity) برحسب میلی‌متر بر اساس رابطه ۵ تخمین زده می‌شود (۲، ۱۳ و ۲۳).

$$WHC = (\theta_f - \theta_w) Z_e \quad [5]$$

در این رابطه؛  $L$  تلفات پتانسیل تجمعی آب برحسب میلی‌متر است که به صورت  $P$  مجموع اختلاف بین بارش برحسب میلی‌متر و  $PET$  تبخیر و تعرق پتانسیل برحسب میلی‌متر محاسبه می‌شود،  $WHC$  مقدار ذخیره رطوبتی خاک برحسب میلی‌متر،  $Z_e$  عمق مؤثر ریشه برحسب میلی‌متر و  $\theta_f$  و  $\theta_w$  به ترتیب درصد رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی خاک است.

**محاسبات مدل تورنت وایت-ماتر** با استفاده از روش تورنت وایت-ماتر و از طریق مقایسه تبخیر و تعرق پتانسیل و مقدار بارش مؤثر، تبخیر و تعرق واقعی ( $AET$ ) برحسب میلی‌متر بر اساس رابطه‌های زیر محاسبه شدند (۳۰).

$$AET = PET \quad \text{اگر } P_{eff} > PET, \text{ آنگاه} \quad [6]$$

$$AET = P_{eff} \quad \text{اگر } P_{eff} < PET, \text{ آنگاه} \quad [7]$$

$$AET = P_{eff} - \Delta SM \quad [8]$$

$$\Delta SM_i = SM_i - SM_{i-1}$$

در این رابطه؛  $\Delta SM$  تغییرات رطوبتی خاک است. هایز و بوئل (۲۶) بارش مؤثر را قسمتی از بارندگی می‌دانند که برای رشد گیاه قابل دسترس است (۶). بارش مؤثر از کسر بارندگی

بخشی از بارش مؤثر به صورت تبخیر و تعرق به جو بازمی‌گردد و مابقی آن به صورت نفوذ سطحی وارد خاک می‌شود در نتیجه اختلاف بین بارش مؤثر و تبخیر و تعرق پتانسیل میزان نفوذ سطحی به خاک را نشان می‌دهد (۳۱) البته در زمان‌هایی نفوذ سطحی رخ می‌دهد که بارش مؤثر بیشتر از تبخیر و تعرق پتانسیل باشد. در مواردی که میزان نفوذ مثبت است ظرفیت نگهداری آب خاک پر نشده است، به طوری که مقداری از نفوذ سطحی صرف اضافه شدن رطوبت خاک می‌شود که مقدار رطوبت خاک از رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود. در زمان‌هایی که میزان نفوذ سطحی منفی است (بارش مؤثر کمتر از تبخیر و تعرق پتانسیل) آبی برای افزایش رطوبت خاک وجود ندارد (۳۰)، در این حالت رطوبت خاک از رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود. Accumulated Potential Water ( APWL ) مجموع توان کاهش آب است و همواره مقداری منفی دارد و نشان‌دهنده تغییرات خشکی خاک است. مقدار APWL برای ماه‌های مرطوب، صفر و برای ماه‌های خشک از رابطه ۱۹ محاسبه می‌شود (۳۰).

$$SM = SM_{i-1} + \text{Surface Infiltration} \quad [17]$$

$$SM = WHC \cdot \text{Exp} (APWL / WHC) \quad [18]$$

$$APWL = APWL_{i-1} - \text{Surface Infiltration} \quad [19]$$

### نتایج و بحث

نتایج محاسبات انجام شده به منظور شناسایی و بررسی کلی تغییرات هیدرولوژیکی حوزه آبخیز بهشت‌آباد با استفاده از بازنگری مدل توزیعی روش بیلان رطوبتی آب خاک تورنت وایت - ماتر انجام شد. تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولوژیکی حوزه در جدول ۲ ارائه شده است که شامل میانگین ماهانه دما، بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل، رواناب سطحی، بارش مؤثر، نفوذ سطحی، مجموع توان کاهش آب، تغییرات رطوبتی خاک و تبخیر و تعرق واقعی در هر دوره است.

در این رابطه؛  $P_m$  بارندگی ماهانه برحسب میلی‌متر،  $T$  متوسط دمای هوا به درجه سانتی‌گراد،  $S_1$  و  $S_2$  به ترتیب ۱ و ۲ فرض شده است. به منظور تصحیح رواناب به دلیل اثر ذخیره سطحی ماهانه، مقدار ماهانه رواناب ماه قبل در رواناب حجمی ماه بعد تأثیر می‌گذارد که از رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود (۱۸).

$$Q_{SRM} = X Q_{SRM(t-1)} + (1-X) SRM \quad [13]$$

در این رابطه؛  $X$  فاکتور تأخیر ( $0 < X < 1$ ) و  $Q_{SRM(t-1)}$  رواناب حجمی ماه قبل برحسب مترمکعب بر ثانیه است. برگاب بر اساس رابطه دی‌گرون و سونیچ (۲۲) (رابطه ۱۴) تعیین شد.

$$I_m = P_m I_R \quad [14]$$

$$I_R = 1 - \text{Exp}(-I_D \cdot dp / P_m) \quad [15]$$

در این رابطه؛  $I_m$  برگاب ماهانه برحسب میلی‌متر،  $P_m$  بارندگی ماهانه برحسب میلی‌متر و  $I_R$  نسبت برگاب است. برای محاسبه نسبت برگاب ماهانه، از رابطه دی‌گرون و سونیچ (۲۲) (رابطه ۱۶) استفاده شد. در این رابطه  $dp$  تعداد روزهای بارانی در ماه و  $I_D$  آستانه برگاب روزانه است که بستگی به کاربری اراضی دارد (۱۸).

$$[16]$$

$$I_D = a \cdot \text{LAI} [1 - (1 / 1 + (P_m (1 - \text{Exp} (-0.463 \cdot \text{LAI})) / a \cdot \text{LAI}))]$$

در این رابطه؛  $\text{LAI}$  شاخص سطح برگ و  $a$  پارامتر برگاب است و برابر ۶/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

تصاویر شاخص سطح برگ از ماهواره مودیس سنجنده MOD15A2H (دارای قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر) در طول بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ از وب سایت USGS (۲۹) تهیه شد.

جدول ۲. متوسط ماهانه پارامترهای بیلان آبی (mm) حوزه آبخیز بهشت آباد در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۰۳

ماه ها	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالیانه
P	۲۸	۴۱/۰۱	۶۵/۶۷	۶۷/۷۷	۱۸/۵۰	۱/۲۵	۰/۴۵	۰/۶۰	۱/۶۷	۱۷/۴۶	۴۳/۱۶	۳۶/۴۴	۳۲۲
T <sub>m</sub>	-۰/۶۶	۲/۶۴	۷/۱۷	۱۱/۴۸	۱۶/۱۰	۲۱/۲۹	۲۴/۵۳	۲۳/۱۸	۱۹/۲۱	۱۴/۰۹	۷/۱۴	۱/۸۲	۱۲/۳۳
PET	۲/۰۶	۵/۲۲	۲۳/۱۵	۴۶/۵۸	۸۲/۳۲	۱۲۱/۱۶	۱۴۹/۶۴	۱۳۰/۴۶	۸۹/۴۲	۵۴/۹۳	۱۹/۱۶	۴/۷۹	۷۲۸/۸۹
SR <sub>M</sub>	۱/۵۸	۱۰/۸۰	۷/۶۴	۳/۹۴	۰/۰۴	۰	۰	۰	۰	۰/۹۹	۴/۳۶	۵/۹۶	۳۵/۳۰
P <sub>eff</sub>	۲/۸۰	۱۴/۹۷	۵۴/۹۹	۶۳/۵۴	۱۸/۴۶	۱/۲۵	۰/۴۵	۰/۶۰	۱/۶۷	۱۶/۴۷	۳۶/۴۸	۵/۶۳	۲۱۷/۳۱
SINF	۰/۷۴	۹/۷۶	۳۱/۸۴	۱۶/۹۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۷/۳۲	۱/۱۸	۷۷/۸۰
APWL	-۲/۱۲	۰	-۲/۶۹	-۱۳/۷۰	-۷۷/۵۶	-۱۹۷/۴۸	-۳۴۶/۶۶	-۴۷۶/۵۲	-۵۶۴/۲۷	-۵۵۵/۹۵	-۲۴۲/۹۴	-۱/۰۶	-۲۴۸۰/۹۶
ΔSM	-۷/۳۲	۵/۱۵	۴/۶۵	۵/۸۱	-۱۲/۵۸	-۱۹/۶۹	-۳/۷۱	-۰/۴۰	-۰/۰۵	۲/۰۲	۱۹/۳۱	۱۲/۰۵	۴۸/۹۸
AET	۰/۸۷	۴/۵۴	۲۰/۴۶	۲۹/۴۴	۱۲/۶۷	۱/۲۵	۰/۴۵	۰/۶۰	۱/۶۷	۱۴/۴۴	۱۴/۵۳	۱/۹۳	۱۰۲/۸۷

P: متوسط بارش (میلی متر)، T<sub>m</sub>: متوسط دمای هوا (درجه سانتی گراد)، PET: تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی متر)، SR<sub>M</sub>: رواناب سطحی (میلی متر)، P<sub>eff</sub>: بارش مؤثر (میلی متر)، SINF: نفوذ سطحی (میلی متر)، APWL: مجموع توان کاهش آب (میلی متر)، ΔSM: تغییرات رطوبتی خاک (میلی متر) و AET: تبخیر و تعرق واقعی (میلی متر)

## بارش

نقشه‌های بارش حاصل از روش WLS در شکل ۲ ارائه شده است. متوسط بارندگی سالانه در حوزه برابر ۳۲۲ میلی متر است (۴) که از این مقدار، نزدیک به ۷۰ درصد بارندگی‌ها در فصل‌های بهار و زمستان دریافت می‌شود. بیشترین میزان بارندگی در ماه آوریل به میزان ۶۸ میلی متر و بعد از این ماه، روند کاهش آغاز شده که در ماه ژوئیه به کمترین مقدار خود برابر با ۰/۴۵ میلی متر رسیده که در پژوهش‌های مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد (۱۴ و ۱۵) و مهندسین مشاور سامان آبراه (۱۶) به نتیجه مشابه اشاره شده است.

## دما

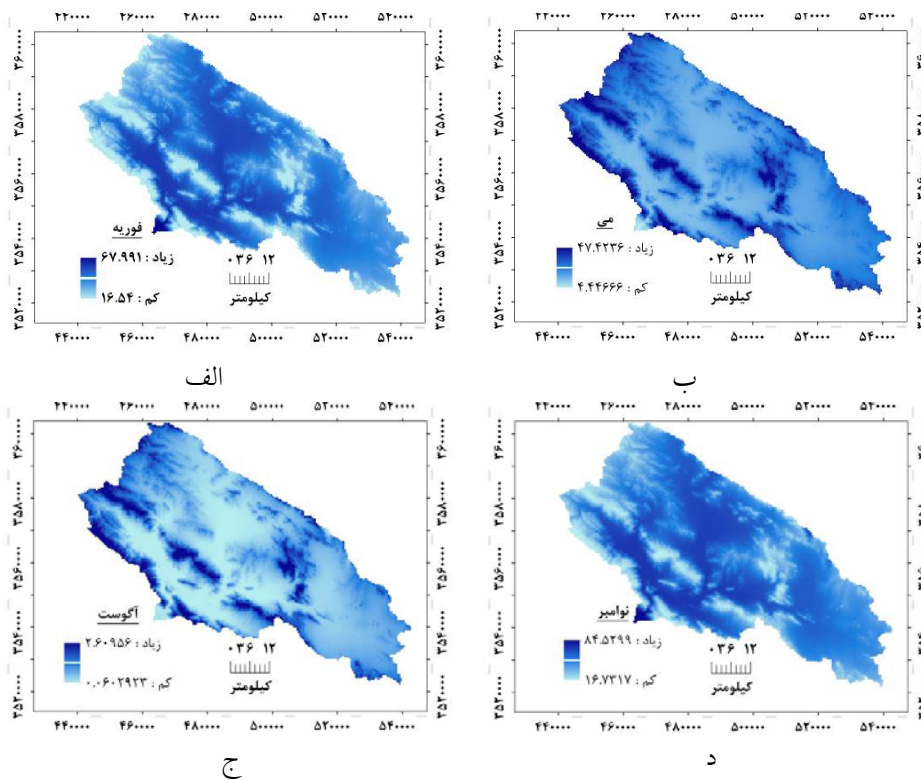
متوسط دمای سالانه در حوزه برابر ۱۲/۳۳، بیشترین میزان دما مربوط به ماه ژوئیه با دمای ۲۴/۵۳ درجه سانتی گراد و کمترین مقدار مربوط به ماه ژانویه با دمای -۰/۶۶ است که در پژوهش‌های مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد (۱۴ و ۱۵) و مهندسین مشاور سامان آبراه (۱۶) به آن اشاره شده است.

مطابق با جدول ۲ دما از ماه می تا ماه اکتبر بالاتر از مقدار

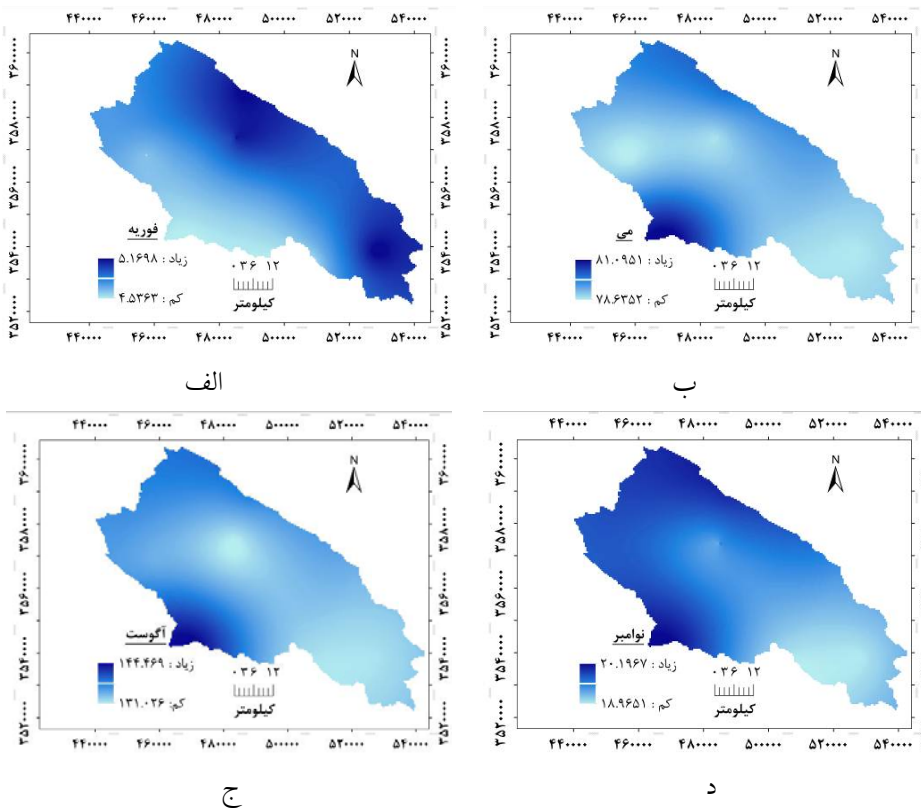
میانگین سالانه قرار دارد.

## تبخیر و تعرق پتانسیل

در حوزه آبخیز بهشت آباد مانند اغلب حوزه‌های کشور، بین دما و بارش رابطه معکوس وجود دارد. حداکثر بارش، زمانی دریافت می‌شود که محدودیت دمایی، اجازه رشد به محصولات زراعی و کشاورزی نمی‌دهد (۶) این مطلب با مشاهده ارقام تبخیر و تعرق پتانسیل به خوبی آشکار می‌شود. تبخیر و تعرق پتانسیل تابعی از دما است و برخلاف بارندگی، رابطه مستقیمی با دما دارد؛ به این معنی که هم‌زمان با افزایش دما، تبخیر و تعرق پتانسیل افزایش یافته است و بالعکس. میزان متوسط تبخیر و تعرق پتانسیل در حوزه از ماه مارس افزایش شدیدی پیدا کرده و این افزایش تا ماه ژوئیه ادامه پیدا می‌کند. پس از ماه ژوئیه روند نزولی یافته است. مطابق با جدول ۲، مقدار متوسط سالانه، بیشترین و کمترین تبخیر و تعرق پتانسیل در حوزه به ترتیب برابر با ۷۲۸/۸۹، ۱۴۹/۶۴ و ۲/۰۶ میلی متر است. شکل ۳ تغییرات مکانی تبخیر و تعرق پتانسیل را در حوزه مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۲. تغییرات مکانی میانگین ماهانه بارش؛ ماه فوریه نماینده فصل زمستان (الف)، ماه می نماینده فصل بهار (ب)، ماه آگوست نماینده فصل تابستان (ج) و نوامبر نماینده فصل پاییز (د)



شکل ۳. تغییرات مکانی میانگین ماهانه تبخیر و تعرق پتانسیل؛ ماه فوریه (الف)، می (ب)، آگوست (ج) و نوامبر (د)

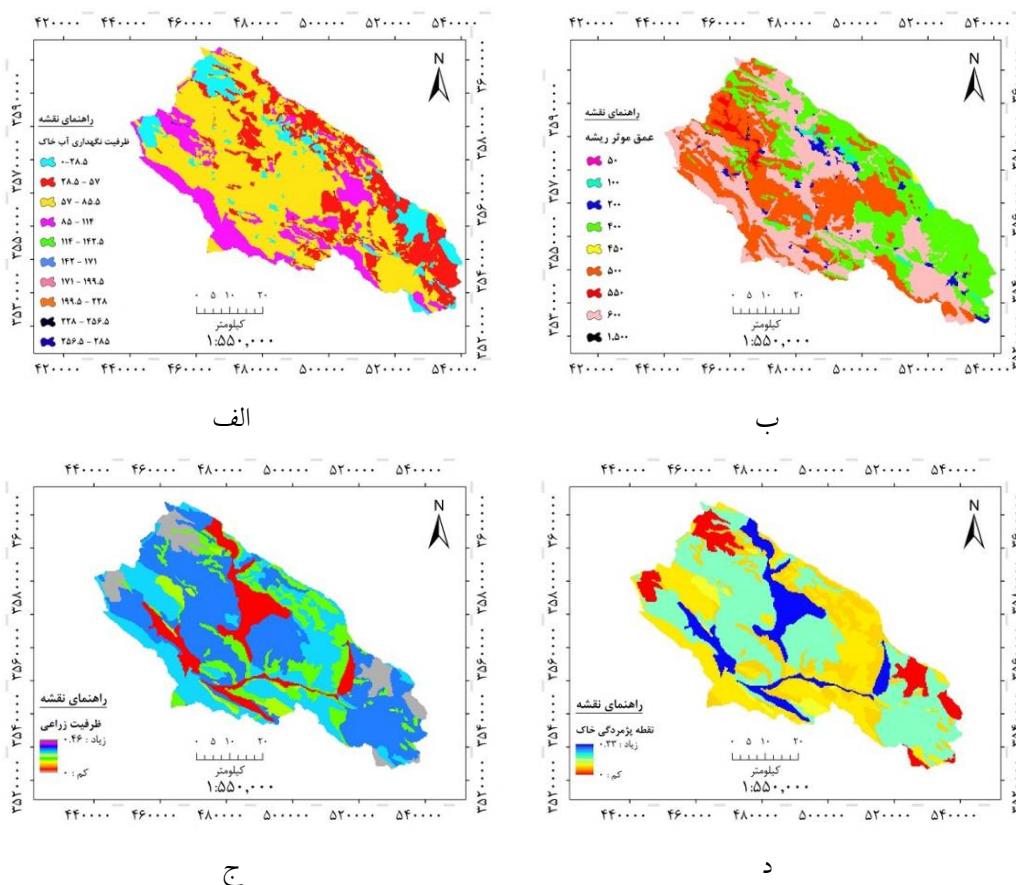


### ظرفیت نگهداری آب خاک

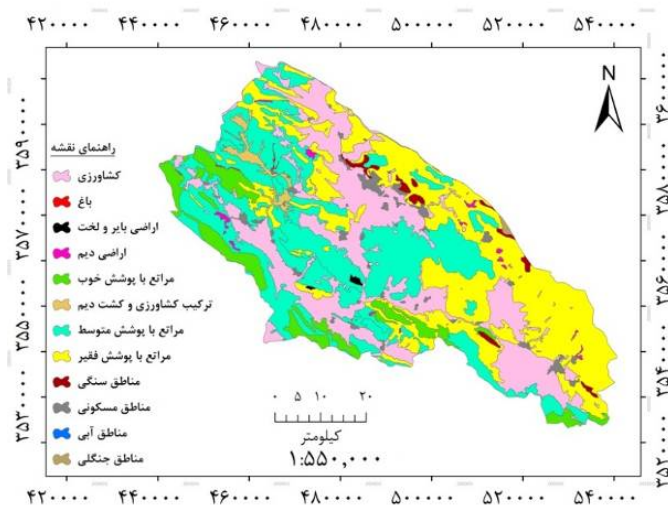
پس از آماده‌سازی داده‌ها و تهیه نقشه‌های موردنیاز، نقشه ظرفیت نگهداری آب خاک (شکل ۴-الف) از روی نقشه‌های عمق مؤثر ریشه (شکل ۴-ب) و مقدار رطوبت در ظرفیت زراعی (شکل ۴-ج) و نقطه پژمردگی خاک (شکل ۴-د) با استفاده از رابطه ۵ تهیه شد. نقشه عمق مؤثر ریشه، با توجه به بازدیدهای صحرایی از منطقه، نقشه کاربری حوزه بهشت‌آباد (شکل ۵) و با استفاده از جدول مربوطه (۸، ۱۸ و ۱۹) تعیین شد. مقدار رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی خاک با استفاده از نقشه خاک (اداره منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری) و جداول مربوط به ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی

(۱۹) تهیه شد.

برای تهیه نقشه کاربری (شکل ۵)، در شرایط متوسط کاربری اراضی در منطقه، طی دوره مورد مطالعه از تصویر لندست ۸ سنجنده OLI (دارای دقت مکانی ۳۰ متر) مربوط به تاریخ ۲۰ ژوئن ۲۰۱۵ و نرم‌افزار ENVI<sup>®</sup>5.3 استفاده شد. سپس تصحیحات رادیومتری و اتمسفری به منظور حذف خطاهای مربوط به سنجنده و اثرات جوی بر روی تصاویر انجام شد (۱۰). آنگاه طبقه‌بندی کاربری اراضی بر اساس الگوریتم حداکثر احتمال در روش‌های طبقه‌بندی تصاویر است (۲۵)، انجام شد و صحت نتایج طبقه‌بندی با استفاده از ضریب کاپا (۰/۷۹) مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۴. نقشه ظرفیت نگهداری آب خاک (الف)، نقشه عمق مؤثر ریشه به میلی‌متر (ب)، ظرفیت زراعی خاک (ج) و نقطه پژمردگی خاک (د)

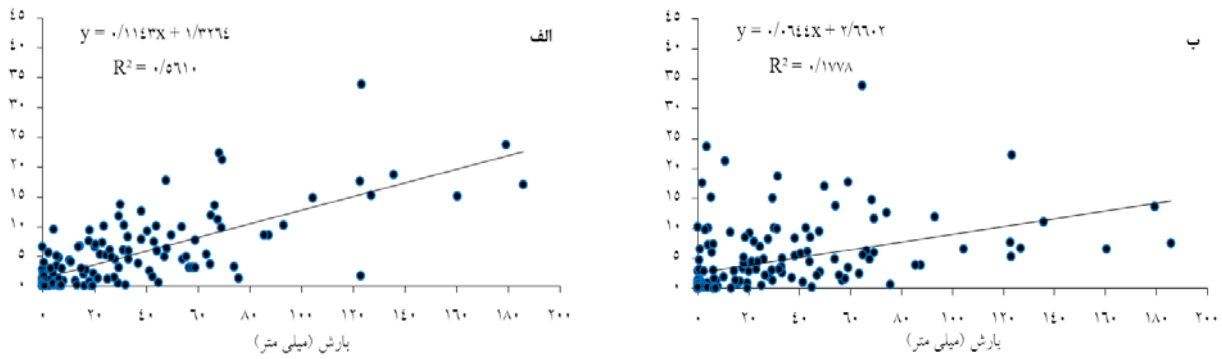


شکل ۵. نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز بهشت آباد

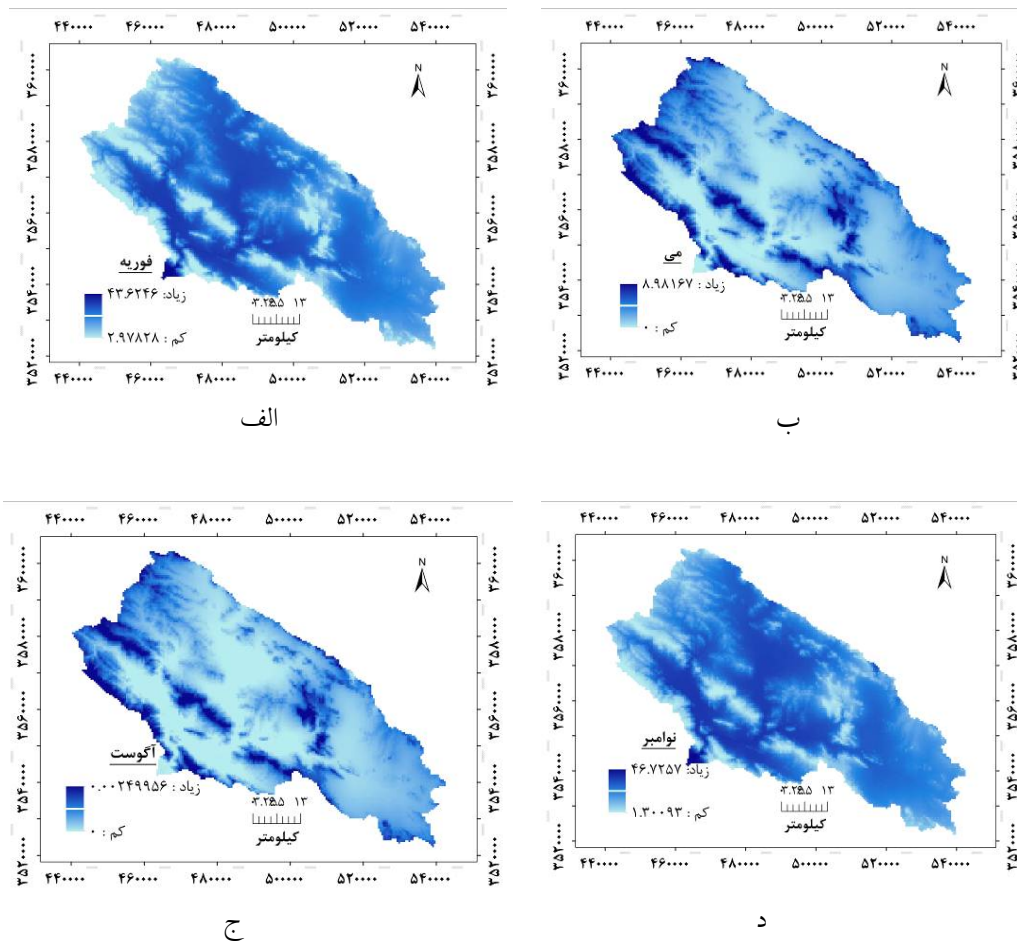
### نتایج مدل تورنت وایت-ماتر

بر اساس نتایج بیلان برآورد شده توسط مدل تورنت وایت ماتر در دوره زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۵ تغییرات رواناب سطحی در مقیاس ماهانه، از روند تغییرات بارندگی تبعیت می‌کند (شکل ۶-الف). به منظور بررسی این فرضیه، رابطه بین بارندگی و رواناب سطحی با یک ماه تأخیر بررسی شد (شکل ۶-ب) و نتیجه نشان داد که بین بارندگی و رواناب سطحی با تأخیر یک‌ماهه همبستگی کمی برقرار است ( $R^2$  برابر با ۰/۱۷). در نتیجه می‌توان بیان کرد که بلافاصله پس از وقوع بارش، رواناب سطحی جریان پیدا می‌کند و بارندگی‌های ماه گذشته تأثیری در رواناب سطحی ماه بعد ندارد. رواناب سطحی از تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل پیروی نمی‌کند؛ به این معنی که در ماه‌هایی که بیشترین میزان تبخیر و تعرق پتانسیل مشاهده می‌گردد، کمترین مقدار رواناب سطحی رخ داده است. این امری بدیهی است که در ماه‌هایی که بیشترین مقدار بارندگی دریافت شده، بیشترین میزان رواناب سطحی را خواهیم داشت و برعکس که از دلایل مهم این مسئله شیب تند حوزه آبخیز مورد مطالعه است (۳۰). در بین ماه‌های می تا اکتبر، رواناب سطحی بسیار کم بوده که علت آن، بالاتر بودن نرخ تبخیر و تعرق در مقایسه با میزان بارش در منطقه است. شکل ۷ تغییرات زمانی و مکانی رواناب سطحی را در حوزه آبخیز

بهشت‌آباد نمایش می‌دهد. بر اساس شکل ۷، کمترین مقدار رواناب سطحی در فصول بهار و تابستان (شکل ۷-ب و ۷-ج) در خروجی حوزه و بیشترین مقدار در ارتفاعات به وقوع پیوسته است. در فصول پاییز و زمستان (شکل ۷-الف و ۷-د) کمترین میزان رواناب سطحی در ارتفاعات و بیشترین مقدار آن در خروجی حوزه رخ داده است. در فصول پاییز و زمستان به دلیل این‌که بیشتر بارش در ارتفاعات به شکل برف است و از طرف دیگر کاهش دما در این فصول، شرایط لازم برای ذوب برف را فراهم نمی‌کند؛ لذا، میزان رواناب برای ارتفاعات کم است. در جدول ۳ به ازای هر کلاس شیب مقدار متوسط رواناب سطحی به روش Cross کردن در نرم‌افزار ILWIS ارائه شده است. بررسی نتایج حاصل از کراس نقشه شیب حوزه و رواناب در ماه‌های مختلف (جدول ۳) نیز این نتایج را تأیید نموده است. شکل ۸ رواناب سطحی مشاهده شده در خروجی حوزه آبخیز بهشت‌آباد و رواناب سطحی محاسبه شده با استفاده از روش فوق (با در نظر گرفتن تأثیر رواناب‌های ماه‌های قبل)، را نشان می‌دهد که بیانگر برازش مناسب بین این دو است. نتایج نشان داد که بین میانگین رواناب سطحی مشاهده شده و رواناب سطحی محاسبه شده همبستگی ۰/۵۳ برقرار است که در مقایسه با نتایج برخورداری و همکاران (۲) این مقدار در حوزه مورد بررسی آن‌ها ۰/۵۱ گزارش شده است.



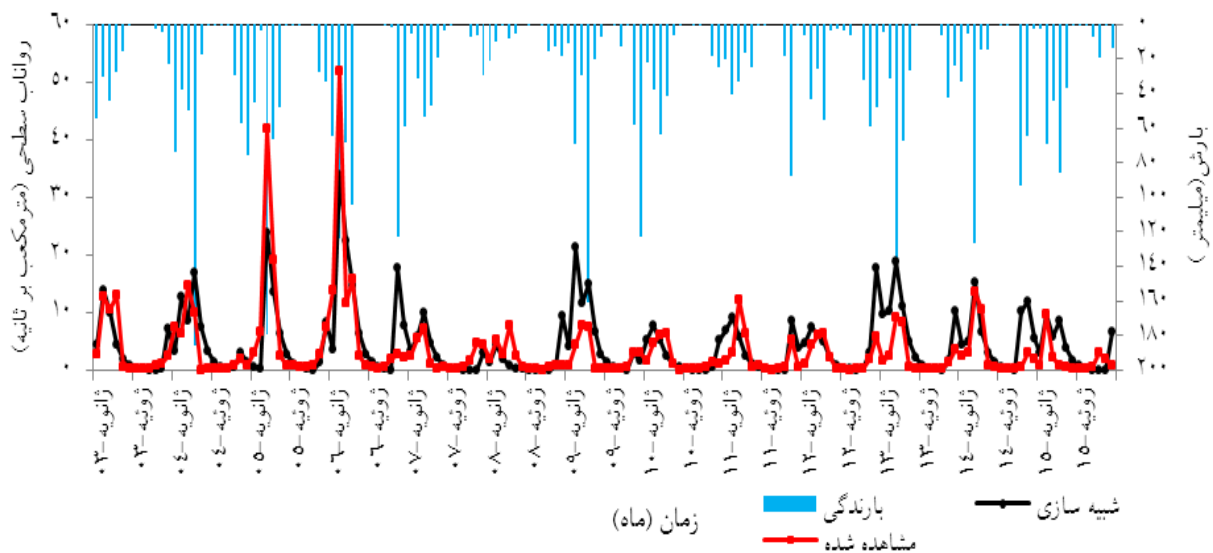
شکل ۶. رابطه خطی بین بارش و رواناب سطحی ماهانه (الف)، رابطه خطی بین بارش و رواناب سطحی ماهانه با تأخیر یک ماهه در حوزه آبخیز بهشت آباد (ب)



شکل ۷. تغییرات مکانی میانگین ماهانه رواناب سطحی؛ فوریه (الف)، می (ب)، آگوست (ج) و نوامبر (د)

جدول ۳. میزان میانگین ماهانه رواناب سطحی (mm) در شیب‌های مختلف حوزه آبخیز بهشت آباد

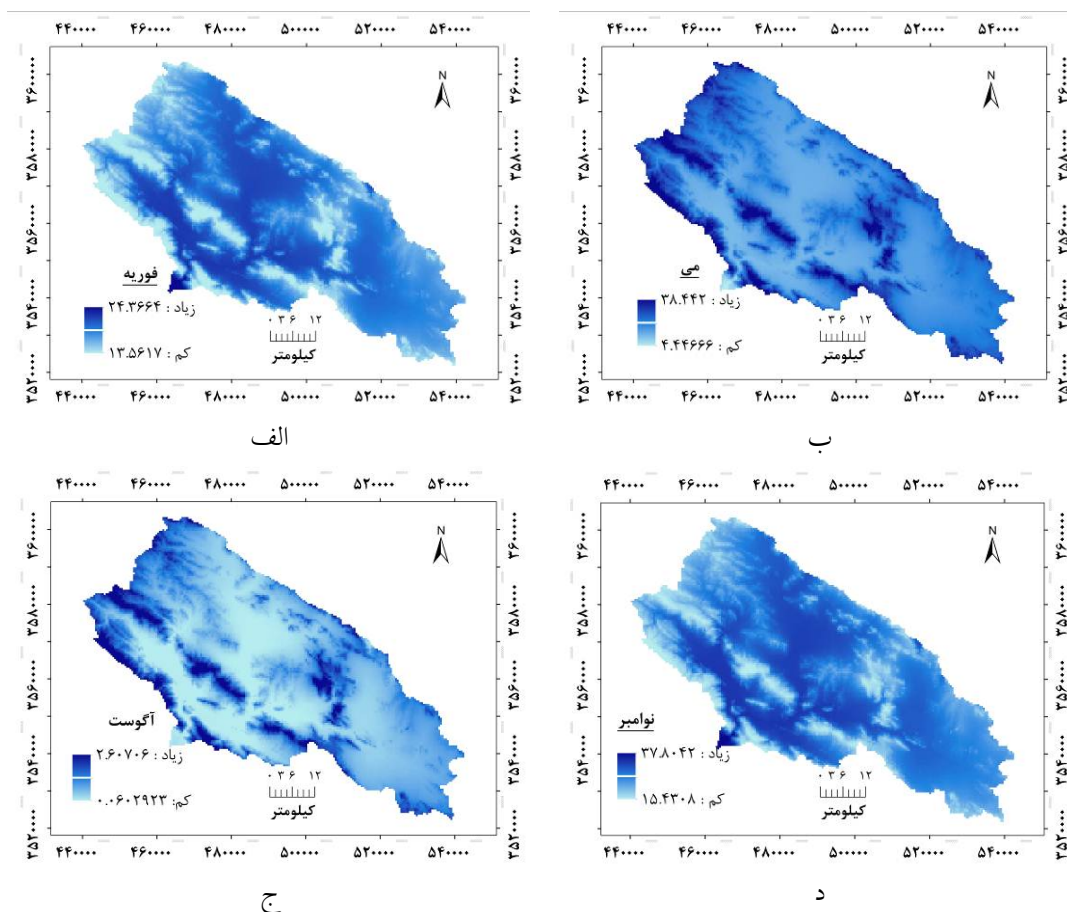
کلاس شیب (%)	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
۰-۲	۱۹/۱	۲۱/۶۶	۳۵/۱۳	۲۶/۹۱	۱/۰۴	۰	۰	۰	۰	۲/۳۸	۲۴/۲	۲۴/۸
۲-۵	۱۷/۱	۱۹/۹۱	۳۶/۱۱	۲۸/۹۳	۱/۳۱	۰	۰	۰	۰	۲/۵۹	۲۲/۲۵	۲۲/۹۱
۵-۸	۱۵/۸۹	۱۸/۹۱	۳۶/۷۲	۳۰/۲	۱/۵۱	۰	۰	۰	۰	۲/۶۷	۲۱/۱۴	۲۱/۸۸
۸-۱۲	۱۵/۱۵	۱۷/۷	۳۷/۵۱	۳۱/۷۳	۱/۶۷	۰	۰	۰	۰	۲/۸۲	۱۹/۸	۲۰/۷۸
۱۲-۱۵	۱۴	۱۶/۷۳	۳۸/۱۱	۳۲/۹۲	۱/۸۱	۰	۰	۰	۰/۰۱	۲/۹	۱۸/۷۱	۱۹/۷۵
۱۵-۳۰	۱۳/۸۴	۱۳/۲۸	۴۱/۲۷	۳۸/۶۴	۲/۶۶	۰	۰	۰	۰/۰۱	۳/۴۸	۱۴/۸۶	۱۷/۶۳
۳۰-۶۵	۱۳/۸۶	۱۱/۹۶	۴۳/۲۳	۴۱/۸۵	۳/۱۱	۰	۰	۰	۰/۰۱	۳/۸	۱۳/۲۶	۱۶/۹۸
>۶۵	۱۱/۵۳	۱۱/۸۱	۴۲/۳۹	۴۰/۷۵	۲/۹۴	۰	۰	۰	۰/۰۱	۳/۶۸	۱۳/۱۹	۱۶/۲۳



شکل ۸. رواناب سطحی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده (m<sup>3</sup>/s) در حوزه آبخیز بهشت آباد

بیشترین مقدار بارش مؤثر در ماه آوریل (۶۳/۵۴ میلی‌متر) و کمترین میزان در ماه ژوئیه (۰/۴۵ میلی‌متر) رخ داده است. تغییرات بارش مؤثر از تغییرات بارندگی تبعیت می‌کند. نقشه‌های بارش مؤثر در شکل ۹ نشان داده شده است.

برآورد واقع‌گرایانه مقادیر بارش مؤثر، به‌عنوان قسمتی از بارش که مستقیماً جوابگوی نیاز آبی گیاه است، برنامه‌ریزان را قادر می‌سازد تا از منابع آبی محدود به‌صورت بهینه استفاده کنند. در حوزه آبخیز بهشت‌آباد طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵،



شکل ۹. تغییرات مکانی میانگین ماهانه بارش مؤثر؛ فوریه (الف)، می (ب)، آگوست (ج) و نوامبر (د)

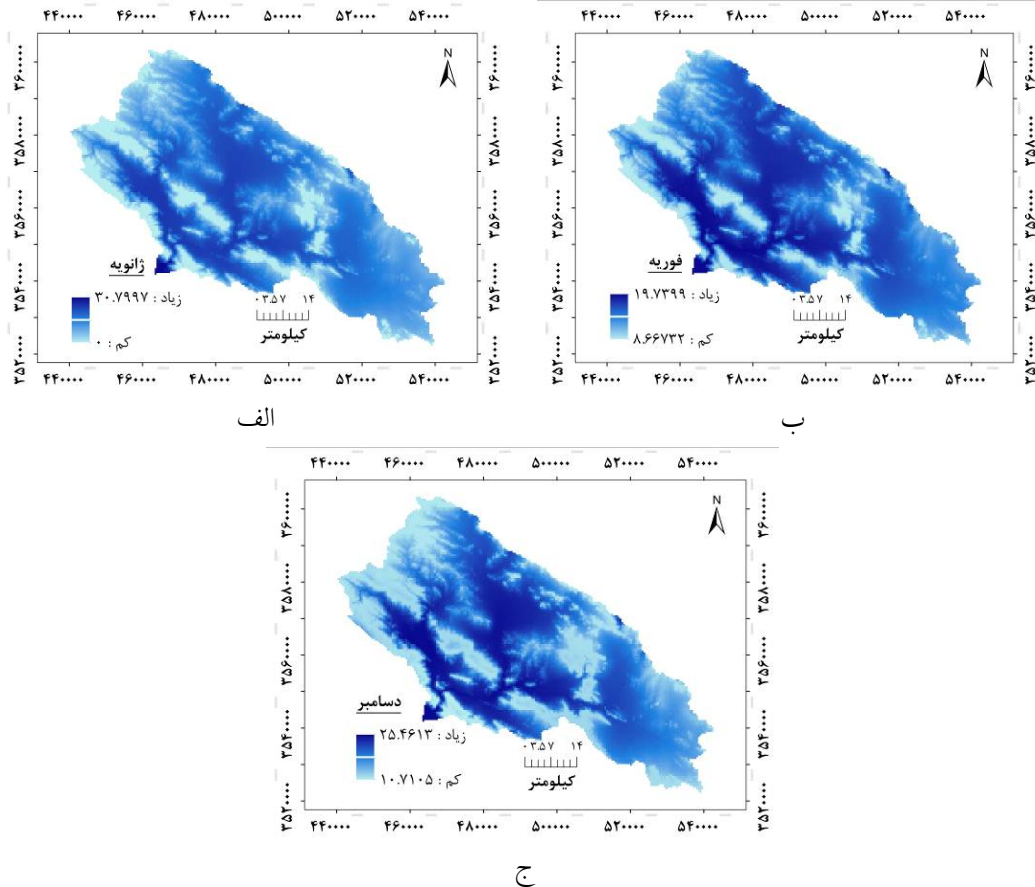
رطوبت خاک در زمان و مکان بسیار متغیر است و تغییرات آن ناشی از بافت خاک، شرایط آب و هوایی و توپوگرافی است (۳). تغییرات رطوبت خاک تنها در فصول زمستان و اواخر پاییز (فصول تر) مقداری مثبت دارد و در بقیه ایام، مقداری منفی است. بیشترین مقدار تغییرات رطوبت خاک در ماه نوامبر (۱۹/۳۱ میلی متر) و کمترین مقدار در بین ماه‌های می تا سپتامبر رخ داده است (جدول ۲). نتایج نشان داد که زمانی که بارندگی صفر و یا نزدیک به صفر است (فصول خشک)، تغییرات رطوبت خاک مقدار منفی را نشان می‌دهد، که بیان‌کننده کسری رطوبت خاک است. بررسی تغییرات زمانی رطوبت خاک نشان داد که در زمان‌هایی که مقدار تغییرات رطوبت خاک منفی است، مقدار نفوذ سطحی و رواناب سطحی کمترین مقدار خود را نشان می‌دهند. در ماه‌هایی که کمترین مقدار رطوبت خاک مشاهده می‌شود تبخیر و تعرق پتانسیل و

در طول بازه زمانی مورد بررسی، بیشترین میزان نفوذ سطحی مربوط به ماه‌های مارس (۳۱/۸۴ میلی متر) (شکل ۱۰-۱) و آوریل (۱۶/۹۵ میلی متر) (شکل ۱۰-ب) و نوامبر (۱۷/۳۲ میلی متر) (شکل ۱۰-ج) است (جدول ۲). در طول ماه‌های خشک، میزان نفوذ سطحی به علت کاهش بارندگی (محدودیت آب) و همچنین بالا بودن تبخیر و تعرق کاهش می‌یابد که این امر، در شکل ۱۰ و جدول ۲ مشهود است. با توجه به نقشه‌های نفوذ تهیه شده و مقایسه آن با نقشه تلفیقی بافت خاک و کاربری حوزه (شکل ۱۱)، مشخص شد که بیشترین نفوذ سطحی در کاربری کشاورزی با بافت لوم شنی (درصد شن، سیلت و رس به ترتیب ۶۱، ۲۶ و ۱۳)، لوم رسی (درصد شن، سیلت و رس به ترتیب ۳۱، ۳۹ و ۳۰) و کاربری مرتع با پوشش خوب و پوشش متوسط با بافت لوم شنی، لوم رسی و رسی رخ می‌دهد.

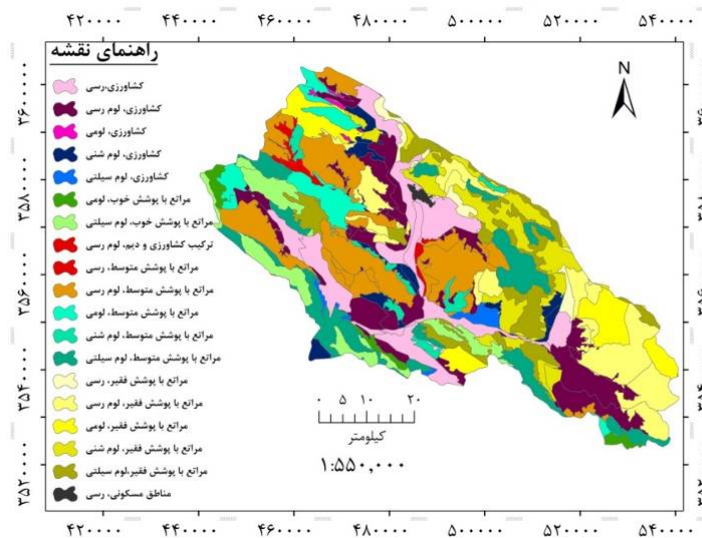


سطحی و کمترین مقدار تبخیر و تعرق رخ داده است (فصول زمستان و بهار).

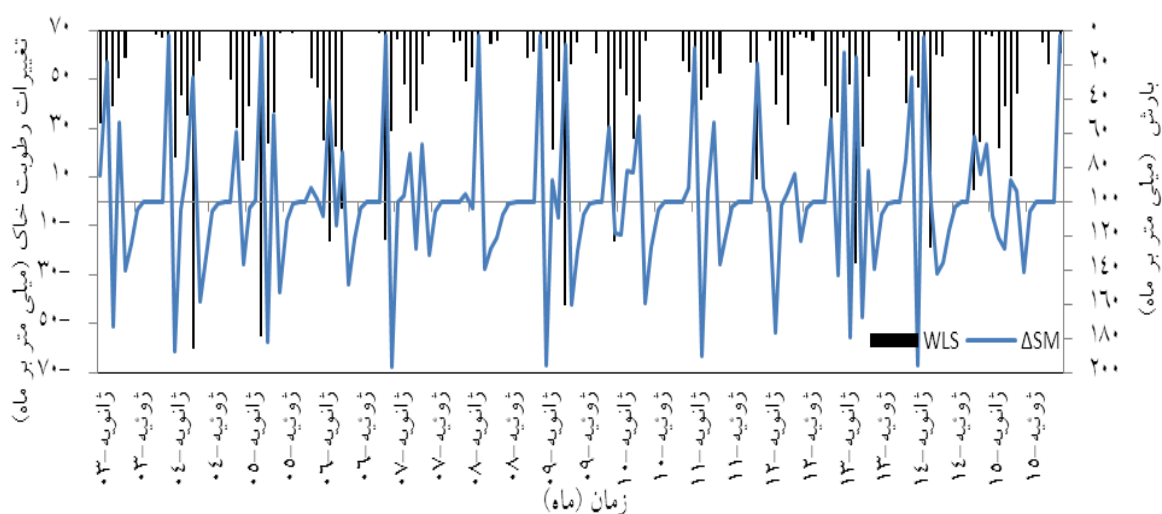
دما بیشترین مقدار را دارد (شکل ۱۲). تغییرات رطوبت خاک در زمانی مثبت است که بیشترین میزان بارندگی، رواناب



شکل ۱۰. تغییرات مکانی میانگین ماهانه نفوذ سطحی؛ ژانویه (الف)، فوریه (ب) و دسامبر (ج)



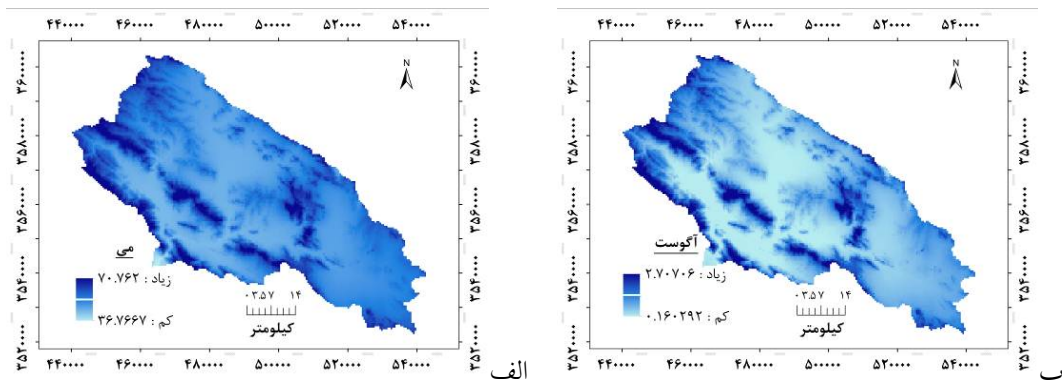
شکل ۱۱. نقشه تلفیق بافت خاک و کاربری در حوزه آبخیز بهشت آباد



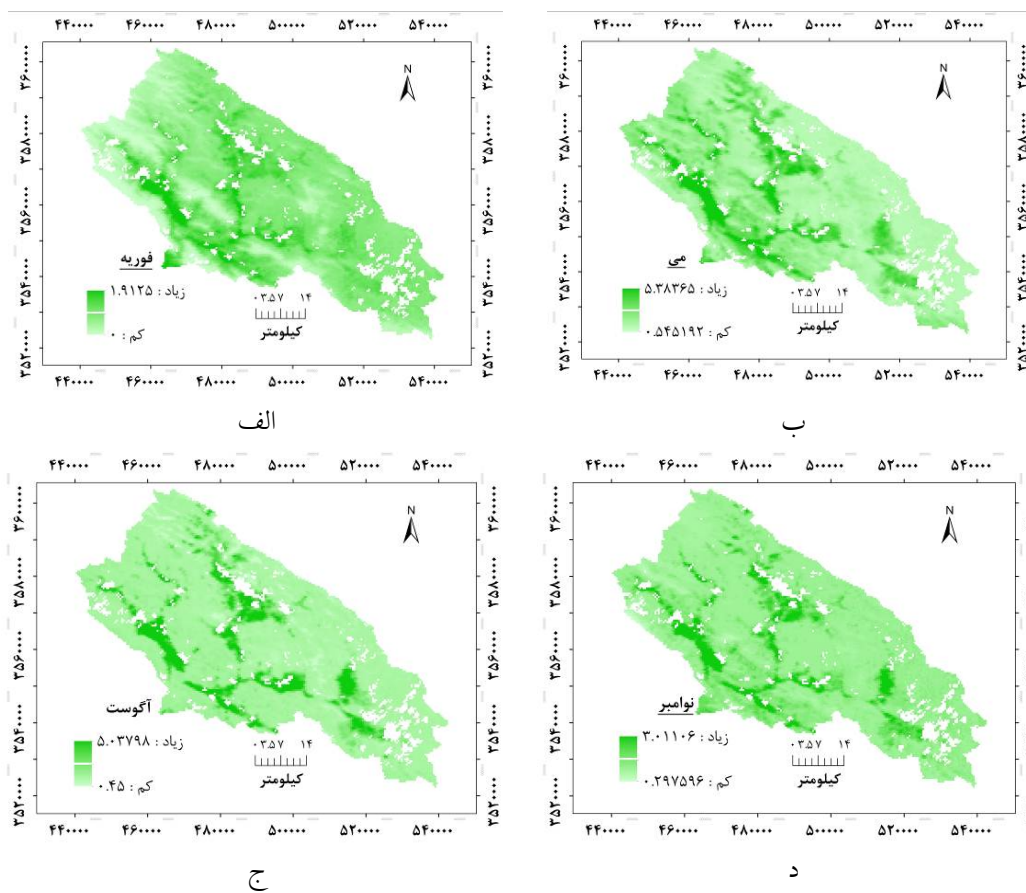
شکل ۱۲. تغییرات زمانی رطوبت خاک و بارش در حوزه آبخیز بهشت آباد

واقعی در حوزه آبخیز بهشت آباد را برای ماه‌های می به نمایندگی از فصل بهار (شکل ۱۳-الف) و اوت به نمایندگی از فصل تابستان (شکل ۱۳-ب) نمایش داده است (مقدار تبخیر و تعرق واقعی در ماه‌های فوریه و نوامبر برابر با تبخیر و تعرق پتانسیل بوده و در شکل ۳ نشان داده شده است). با توجه به شکل ۱۳، قسمت‌های پوشیده از کاربری کشاورزی و گیاهان طبیعی حوزه مقدار تبخیر و تعرق واقعی بیشتری را نسبت به مکان‌هایی با پوشش گیاهی کمتر و یا فاقد پوشش گیاهی نشان می‌دهند. با توجه به نقشه کاربری اراضی (شکل ۵)، نقاط دارای تبخیر و تعرق واقعی بیشتر، دارای کاربری کشاورزی، مراتع خوب و متوسط هستند. علت این امر ممکن است بالاتر بودن تراکم گیاهی باشد. به‌عنوان دلیلی مرتبط با توجه به نقشه‌های شاخص سطح برگ (شکل ۱۴) بیشترین مقدار تبخیر و تعرق واقعی دقیقاً منطبق بر مناطقی است که بیشترین شاخص سطح برگ را دارند.

تبخیر و تعرق واقعی، از جمله مهم‌ترین اجزای بیلان در حوزه محسوب می‌شود و محاسبه این فاکتور به منظور انجام محاسبات و برنامه‌ریزی‌های مربوط به نیاز آبی اهمیت بالایی دارد (۹). همان‌طور که اشاره شد در ماه‌هایی که مقدار بارش مؤثر بیشتر از تبخیر و تعرق پتانسیل باشد، مقدار تبخیر و تعرق واقعی با تبخیر و تعرق پتانسیل یکسان خواهد بود. اما در ماه‌هایی که بارش مؤثر از تبخیر و تعرق پتانسیل کمتر باشد (ماه‌های خشک)، مقدار تبخیر و تعرق واقعی از ترکیب بارش مؤثر و تغییرات رطوبت خاک به دست می‌آید. با در نظر گرفتن این معیار؛ در ماه‌های می، ژوئن، ژوئیه، اوت، سپتامبر و اکتبر مقدار تبخیر و تعرق واقعی از رابطه ۷ و در بقیه ماه‌ها از رابطه ۶ به دست می‌آید. با توجه به نتایج به دست آمده از مدل تورنت وایت - ماتر در حوزه بهشت آباد، متوسط تبخیر و تعرق واقعی برابر با  $102/87$  میلی‌متر، کمترین مقدار در ماه ژوئیه با  $0/45$  میلی‌متر و بیشترین در ماه آوریل با  $29/44$  میلی‌متر روی داده است. شکل ۱۳، تغییرات مکانی میانگین ماهانه تبخیر و تعرق



شکل ۱۳. تغییرات مکانی میانگین ماهانه تبخیر و تعرق واقعی در حوزه آبخیز بهشت آباد در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۰۳؛ می (الف)، آگوست (ب)



شکل ۱۴. تغییرات مکانی میانگین ماهانه شاخص سطح برگ در حوزه آبخیز بهشت آباد در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۰۳؛ فوریه نماینده فصل زمستان (الف)، می نماینده فصل بهار (ب)، آگوست نماینده فصل تابستان (ج) و نوامبر نماینده فصل پاییز (د)

بررسی‌ها نشان داد که میانگین ماهانه رواناب سطحی در حوزه آبخیز بهشت‌آباد طی سال‌های ۲۰۱۵ - ۲۰۰۳، از الگوی بارندگی تبعیت می‌کند. از نظر توزیع مکانی رواناب سطحی، در فصول بهار و تابستان بیشترین مقدار رواناب سطحی در

نتیجه‌گیری  
این تحقیق باهدف برآورد زمانی و مکانی اجزای بیلان رطوبتی خاک (شامل رواناب، تبخیر و تعرق و نفوذ) حوزه آبخیز بهشت‌آباد به روش تورنت وایت-ماتر انجام شد. نتایج



تشکیل دهنده آن به دست آورد.

### منابع مورد استفاده

۱. برخورداری، ج. ۱۳۹۳. ارزیابی مدل توزیعی بیلان آبی ماهانه در برآورد رواناب حوزه در مناطق خشک با استفاده از GIS و RS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز یزد اردکان). پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، ۲۷(۴): ۱۶-۲۶.
۲. برخورداری، ج، ت. وارتانیان و ح. خسروی. ۱۳۹۴. تهیه مدل توزیعی بیلان ماهانه آب خاک به روش تورنت وایت-ماتر (مطالعه موردی: حوزه آبخیز یزد اردکان). فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۲(۳): ۴۶۶ - ۴۸۰.
۳. رضایی مقدم، ح، م. حسینی زاده، و. بردی شیخ و ر. جعفری. ۱۳۹۴. برآورد رطوبت خاک با استفاده از مدل رقومی پستی و بلندی زمین. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۳): ۶۱-۷۲.
۴. سعیدی‌نیا، م، ح. صمدی بروجنی، ع. ملکی و ع. ایزدی. ۱۳۹۰. بررسی تأثیر خشک‌سالی هیدروژئولوژیکی بر منابع آب زیرزمینی و توسعه کشاورزی در حوزه بهشت‌آباد با استفاده از مدل ویپ. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۱۸(۳): ۱۷-۳۶.
۵. شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران دفتر مطالعات پایه منابع آب. ۱۳۹۰. دستورالعمل نحوه تهیه گزارش بیلان، محدوده‌های مطالعاتی در سطح حوزه‌های آبریز درجه ۲. ۸۵ صفحه.
۶. عزیزی، ق. ۱۳۷۹. برآورد بارش مؤثر در رابطه با کشت گندم دیم (مورد: دشت خرم‌آباد). پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۹: ۱۱۵-۱۲۳.
۷. علیزاده، ا. ۱۳۹۴. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، چاپ هجدهم، ۸۱۶ صفحه.
۸. علیزاده، ا. ۱۳۹۴. رابطه آب، خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، ۷۹۷ صفحه.
۹. عظیمی، ع، ک. رنگزن، م. کابلی زاده و م. خرمیان. ۱۳۹۴. برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از سنجش‌ازدور، شبکه‌های عصبی مصنوعی و مقایسه نتایج آن با روش پنمن-مانتیت-فائو در باغات مرکبات شمال خوزستان. سنجش‌ازدور و

ارتفاعات و کمترین مقدار در خروجی حوزه، و در فصول پاییز و زمستان بیشترین مقدار رواناب سطحی در خروجی حوزه و کمترین مقدار در ارتفاعات رخ داده است. نفوذ سطحی در طول ماه‌های خشک کاهش می‌یابد، بیشترین نفوذ سطحی در محدوده لوم شنی و لوم رسی و در کاربری‌های کشاورزی و مراتع با پوشش خوب و متوسط اتفاق افتاده است. بنابراین در مراتع فقیر ضمن تند بودن شیب، دیگر شرایط تولید رواناب هم تشدید می‌شود و حساسیت مدیریتی بیشتری در مورد این نوع کاربری اراضی توصیه می‌شود. تبخیر و تعرق واقعی در قسمت‌هایی از حوزه که پوشیده از مناطق کشاورزی و گیاهان طبیعی است، مقدار بیشتری را نسبت به مکان‌هایی با پوشش گیاهی کمتر و یا فاقد پوشش گیاهی نشان می‌دهند. همچنین از نظر توزیع مکانی، کاربری‌های کشاورزی، مراتع خوب و متوسط دارای تبخیر و تعرق واقعی بیشتری هستند که این مناطق، غالباً منطبق بر نقاطی است که بیشترین شاخص سطح برگ را دارند. لذا نتایج این تحقیق می‌تواند با تأکید بر اثر پوشش گیاهی، ارتباط بین مدیریت منابع آب و پوشش گیاهی را مورد تأکید قرار دهد. با توجه به نتایج کاربرد روش مدل تورنت وایت-ماتر در این تحقیق، در یک جمع‌بندی کلی از ارزیابی تغییرات زمانی- مکانی بیلان رطوبتی خاک بدین ترتیب می‌توان گفت تلفیق مدل تورنت وایت ماتر با معادلات جدید، می‌تواند نقش بسیار مؤثری در بهبود ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی بیلان رطوبتی خاک داشته باشد. لذا این نکته حائز اهمیت است که با وجود ساده بودن روابط مدل تورنت وایت ماتر، خروجی به صورت جزئی و دقیق در اختیار محقق قرار می‌گیرد؛ بنابراین پیچیده بودن روابط مورد استفاده در چرخه هیدرولوژی همیشه به معنای کاربردی بودن روابط نیست. نتایج به دست آمده از این تحقیق، به محققان کمک می‌کند تا مدیریت و برنامه‌ریزی دقیق‌تری در مورد پیش‌بینی رواناب مستقیم، میزان بارش مؤثر، تبخیر و تعرق، نیاز آبی گیاهان و در نهایت اصلاح الگوی کشت داشته باشند. از نتایج کلی این مطالعه چنین نتیجه می‌شود که با استفاده از این مدل می‌توان یک دید کلی نسبت به وضعیت بیلان و اجزای

19. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome 300(9):D05109.
20. Bakundukize C, Marc V, Walraevens K. 2011. Estimation of groundwater recharge in Bugesera region (Burundi) using soil moisture budget approach. *Geologica belgica*, 14(1-2): 85-102.
21. Barkhordari J, Semsar Yazdi AA. 2015. Assessment of the monthly water balance in an arid region using TM model and GIS (Case study: Pishkouh Watershed, Iran). *Journal of Rangeland Science*, 5(2):83-93.
22. De Groen MM, Savenije HH. 2006. A monthly interception equation based on the statistical characteristics of daily rainfall. *Water Resources Research*, 42(12): W12417- W12427.
23. Dourado-Neto D, Van Lier J, Metselaar K, Reichardt K, Nielsen DR. 2010. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. *Scientia Agricola*, 67(1):87-95
24. Germer S, Kaiser K, Bens O, Hüttl RF. 2011. Water balance changes and responses of ecosystems and society in the Berlin-Brandenburg region-a review. *DIE ERDE-Journal of the Geographical Society of Berlin*, 142(1-2):65-95.
25. Giupponi C. 2007. Decision support systems for implementing the European water framework directive: the MULINO approach. *Environmental Modelling & Software*, 22(2):248-258.
26. Hayes G, Buell JH. 1955. Trees also need water at the right time and place. *Yearbook of Agriculture*, 219-228.
27. Jasrotia A, Majhi A, Singh S. 2009. Water balance approach for rainwater harvesting using remote sensing and GIS techniques, Jammu Himalaya, India. *Water Resources Management*, 23(14):3035-3055.
28. Jensen JR. 2005. *Introductory Digital Image Processing*, 3<sup>rd</sup> Edition. Prentice Hall. PTR Upper Saddle River, NJ, USA, 544 pp.
29. MODIS Web. Available online: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod15.php> (accessed on 21 November 2017).
30. Sen PK. 2004. Diagnosing Irrigation Water Resources with Multi-Sensor Remote Sensing and GIS Techniques. Msc Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, 112 pp.
31. Walton WC. 1970. *Groundwater Resource Evaluation*. McGraw Hill Book Co, New York, 664 pp.
32. Xu CY, Singh VP. 1998. A review on monthly water balance models for water resources investigations. *Water Resources Management*, 12(1):20-50.
- سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۴): ۶۱-۷۵.
۱۰. عظیمی نجارکلایی، ا.، ع. ا. جمالی و ز. حسینی. ۱۳۹۶. مقایسه دقت طبقه‌بندی سری زمانی تصاویر لندست در پایش تغییرات کاربری اراضی. *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۸(۲): ۳۳-۴۷.
۱۱. قلعه‌بان، م. ۱۳۹۱. مدل‌سازی مفهومی بیلان آب در مقیاس حوزه آبخیز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد. ۱۱۰ صفحه.
۱۲. گلشن، م.، پ. ابراهیمی و ا. اسمعیلی عوری. ۱۳۹۴. انتخاب بهترین روش میان‌بندی برای پهنه‌بندی متوسط دمای سالانه ایران. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۵(۱۴): ۵۷-۷۱.
۱۳. گودرزی، م.، ج. عابدی‌کوپایی، م. حیدرپور و ح. ر. صفوی. ۱۳۹۴. آنالیز اثرات پارامترهای مختلف بر تغذیه آب‌های زیرزمینی با استفاده از یک روش هیبریدی. *نشریه آب‌و‌خاک*، ۱۹(۷۳): ۲۸۷-۲۹۹.
۱۴. مرکز تحقیقات منابع آب. ۱۳۸۶. ضرورت بازنگری در سیمای طرح انتقال آب بین‌حوزه‌ای بهشت‌آباد با توجه به ملاحظات حوزه مبدأ (در استان چهارمحال و بختیاری). دانشگاه شهرکرد، ۸۸ صفحه.
۱۵. مرکز تحقیقات منابع آب. ۱۳۹۱. طرح احیا و مدیریت مرغزار شهرکرد، جلد اول: مطالعات هواشناسی. اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان چهارمحال و بختیاری. ۳۲ صفحه.
۱۶. مهندسین مشاور سامان آبراه. ۱۳۸۸. تلفیق مطالعات منابع آب و به هنگام سازی حوزه آبریز کارون بزرگ. جلد سوم: تجزیه و تحلیل آمار و اطلاعات بیلان آب، بخش اول: هواشناسی (درجه حرارت، رطوبت نسبی و باد). شرکت مدیریت منابع آب ایران. سازمان آب و برق استان خوزستان، معاونت مطالعات پایه و طرح‌های جامع منابع آب. ۳۲۸ صفحه.
۱۷. مهدوی، م. و م. آذرخشی. ۱۳۸۳. تعیین بیلان آبی مناسب ماهانه در حوزه‌های آبخیز کوچک کشور (مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی و خراسان شمالی). *مجله منابع طبیعی ایران*، ۵۷(۳): ۴۱۵-۴۲۷.
18. Abdollahi K. 2015. Basin scale water balance modeling for variable hydrological regimes and temporal scales. PhD Dissertation, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium, 173 pp.



## Evaluation of temporal-spatial variations of soil moisture balance by Thorenthwaite Matter method (Case study: Behesht Abad basin)

E. Davoodi<sup>1</sup>, H. Ghasemieh<sup>2\*</sup>, Kh. Abdollahi<sup>3</sup>, O. Batelaan<sup>4</sup>

1. PhD. Student of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan
2. Assoc. Prof. College of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan
3. Assis. Prof. College of Natural Resources and Earth Sciences, University of Shahrekord
4. Prof. College of Science and Engineering, Flinders University, Adelaide, Australia

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 3 September 2017  
Accepted 19 March 2018  
Available online 22 May 2018

#### Keywords:

Soil moisture balance  
Surface runoff  
Surface infiltration  
Evapotranspiration  
Thorenthwaite-Matter  
Behesht Abad

### ABSTRACT

For the sustainable management of water resources, it is necessary to determine the water balance and its components for the correct use of water. In this study, to obtain a general overview of the water balance and its components, the soil moisture balance was calculated using the Thorenthwaite Matter model in the Behesht Abad basin during 2003-2015. Distribution maps, including rainfall, temperature, actual and potential evapotranspiration, soil moisture, infiltration, surface runoff and leaf area index were prepared. The results showed that in spatial distribution, in spring and summer, the highest (8.98 mm) and the lowest runoff occurs at the altitudes and in the basin outlet, and in autumn and winter, the highest (46.72 mm) and the lowest runoff occurs at the outlet and in the altitudes, respectively. The correlation coefficient between observed and simulated surface runoff is 53%. The amount of infiltration decreases during dry months, the highest infiltration (range from 16 to 31 mm) has occurred in the range of sandy loam and clay loam textures and in agricultural areas and rangeland with good and medium coverage. In terms of spatial distribution, agriculture land and good and medium rangeland have more actual evapotranspiration, which often consistent with regions have the highest leaf area index. In general, the results of this research can be useful in identifying the soil moisture condition and various aspects of this complex system and also watershed management.

\* Corresponding author e-mail address: H.Ghasemieh@kashanu.ac.ir