



وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان

نشریه فنی

بر آورد تغییرات زمانی - مکانی مولفه‌های
بیان آب با استفاده از مدل Wetspass-M

نویسندگان:
الهام داودی، رضا چمن‌پیرا، خدایار عبدالمهی

شماره ثبت: ۶۹۹۹۴

۱۴۰۵

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان

نشریه فنی:

برآورد تغییرات زمانی- مکانی مولفه‌های بیلان آب با استفاده از مدل Wetspass-M

نویسندگان:

الهام داودی، رضا چمن‌پیرا، خدایار عبدالهی

شماره ثبت: ۶۹۹۹۴

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان

عنوان پروژه: برآورد تغییرات زمانی- مکانی مولفه‌های بیلان آب با استفاده از مدل Wetspass-M

نام و نام خانوادگی نویسندگان: الهام داودی، رضا چمن‌پیرا، خدایار عبدالمهی

ویراستار: سعید نبی‌پی لشکریان

صفحه‌آرایی و طراحی جلد: عباس صدیق

ناشر: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

شمارگان: ۱۰ نسخه

تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۵

این اثر در مورخه ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ با شماره ۶۹۹۹۴ در مرکز آمار اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است. حق چاپ محفوظ است. نقل مطالب، تصاویر، جداول، منحنی‌ها و نمودارها با ذکر مأخذ بلامانع است.

فهرست مطالب

چکیده	۱
مقدمه	۲
مدل سازی بیلان آب	۶
فرایندهای هیدرولوژیکی مدل WetSpas-M	۷
الف- برگاب	۷
ب- رواناب سطحی	۷
ج- رواناب ناشی از ذوب برف	۱۰
د- تبخیر و تعرق	۱۱
ه- تغذیه	۱۳
اجرای مدل WetSpas-M	۱۴
الف- ورودی های مورد نیاز	۱۴
ب- اجرای مدل	۱۴
- نقشه رقومی ارتفاع، نقشه شیب	۱۵
- نقشه خاک	۱۷
- نقشه کاربری اراضی	۱۹
- نقشه های متغیر مدل	۲۲
ج- ارزیابی مدل	۲۸
د- تعیین کمی اجزای بیلان آب ماهانه در حوزه آبخیز خرم آباد و زیرحوضه های وابسته به آن با استفاده از مدل ماهانه WetSpas-M	۲۸
- تفکیک آب پایه و رواناب مستقیم	۲۹
- واسنجی، آنالیز حساسیت و صحت سنجی مدل	۳۰

۳۲	- جریان پایه و رواناب شبیه‌سازی شده
۳۳	- برآورد اجزای بیلان حوزه آبخیز مدل ماهانه WetSpa-M
۳۴	- تبخیر و تعرق پتانسیل
۳۵	- تبخیر و تعرق واقعی
۳۷	- برگاب
۳۹	- رواناب سطحی
۴۲	تغذیه
۴۵	نتایج تعیین کمی اجزای بیلان آب ماهانه در حوزه آبخیز خرم‌آباد
۴۸	ملاحظات اخلاقی
۴۸	منابع
۵۲	Abstract

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز خرم‌آباد در ایران و استان لرستان ۱۵
- شکل ۲- نقشه رقومی ارتفاع ورودی مدل Wetspass-M ۱۶
- شکل ۳- نقشه شیب ورودی مدل Wetspass-M ۱۶
- شکل ۴- نقشه بافت خاک حوزه آبخیز خرم‌آباد ۱۷
- شکل ۵- نقشه بافت خاک ورودی به مدل Wetspass-M ۱۹
- شکل ۶- نقشه کاربری اراضی ورودی به مدل Wetspass-M ۲۰
- شکل ۷- نقشه رستری LAI ماهانه در سال ۲۰۲۲ ۲۴
- شکل ۸- نقشه رستری پوشش سطح برف ماهانه در سال ۲۰۲۲ ۲۵
- شکل ۹- نقشه رستری آب آبیاری ماهانه در سال ۲۰۲۲ ۲۶
- شکل ۱۰- نمودار تفکیک دبی کل، رواناب سطحی و جریان پایه همراه با تغییرات بارندگی ۲۹
- شکل ۱۱- نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل Wetspass-M الف- جریان پایه ب- رواناب سطحی ۳۱
- شکل ۱۲- سری زمانی جریان پایه شبیه‌سازی شده و جریان پایه مشاهده شده در مقابل بارش ۳۲
- شکل ۱۳- سری زمانی جریان پایه شبیه‌سازی شده و رواناب مشاهده شده در مقابل بارش ۳۳
- شکل ۱۴- نمودار اجزای بیلان سالانه در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ در حوزه آبخیز خرم‌آباد در مدل ماهانه Wetspass-M ۳۴
- شکل ۱۵- تغییرات زمانی تبخیر و تعرق پتانسیل و بارش در حوزه آبخیز خرم‌آباد ۳۵
- شکل ۱۶- تغییرات مکانی میانگین ماهانه تبخیر و تعرق واقعی (میلی‌متر) ۳۶
- شکل ۱۷- تغییرات زمانی LAI و میانگین ماهانه تبخیر و تعرق واقعی (میلی‌متر) ۳۷
- شکل ۱۸- تغییرات زمانی بارش، LAI و میانگین ماهانه برگاب (میلی‌متر) ۳۷
- شکل ۱۹- تغییرات مکانی میانگین ماهانه برگاب (میلی‌متر) ۳۸
- شکل ۲۰- تغییرات زمانی بارش و میانگین ماهانه رواناب (میلی‌متر) ۴۰
- شکل ۲۱- رابطه خطی بارش و تغییرات زمانی میانگین ماهانه رواناب (میلی‌متر) ۴۰
- شکل ۲۲- تغییرات مکانی میانگین ماهانه رواناب سطحی (میلی‌متر) ۴۱
- شکل ۲۳- تغییرات زمانی بارش و تغذیه آب زیرزمینی در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ (میلی‌متر) ۴۲

شکل ۲۴- رابطه بین مقادیر تغذیه با بارش (میلی متر بر ماه)..... ۴۳

شکل ۲۵- تغییرات مکانی میانگین ماهانه تغذیه (میلی متر)..... ۴۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱- پارامترهای پیش‌فرض کلاس بافت خاک (Abdollahi، ۲۰۱۵) ۱۸
- جدول ۲- خصوصیات مربوط به کاربری اراضی واسنجی‌شده در مدل (Abdollahi و همکاران، ۲۰۱۲) ۲۱
- جدول ۳- مقادیر بهینه‌شده پارامترهای واسنجی‌شده مدل WetSpas-M ۳۰
- جدول ۴- نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل WetSpas-M ۳۲

چکیده

بررسی تغییرات زمانی- مکانی مؤلفه‌های بیلان آب، نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع آب، کنترل تنش‌های هیدرولوژیکی و برنامه‌ریزی بهره‌برداری از منابع آبی، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک، ایفا می‌کند. در این پژوهش، به‌منظور برآورد اجزای بیلان آب در حوزه آبخیز خرم‌آباد، از مدل توزیعی ماهانه WetSpas-M در دوره زمانی اکتبر ۲۰۰۰ تا سپتامبر ۲۰۲۳ استفاده شد. ورودی‌های مدل شامل داده‌های اقلیمی، توپوگرافی، خاک، کاربری اراضی، شاخص سطح برگ، عمق آب زیرزمینی، پوشش برف و تبخیر و تعرق بود که در محیط GIS و با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر تهیه شدند. همچنین تصاویر ماهواره‌ای MODIS و داده‌های تحت وب سامانه Google Earth Engine برای استخراج برخی لایه‌های ورودی به‌کار گرفته شد. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل، داده‌های دبی ایستگاه هیدرومتری چمانجیر به رواناب سطحی و جریان پایه تفکیک و سپس مدل با استفاده از ضرایب تعیین و نش- ساتکلیف واسنجی (۷۰ درصد داده‌ها) و صحت‌سنجی (۳۰ درصد داده‌ها) شد. نتایج نشان داد که مدل WetSpas-M از دقت مناسبی در شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب برخوردار است؛ به‌طوری‌که ضرایب تعیین و نش- ساتکلیف برای جریان پایه به‌ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۶۷ و برای رواناب سطحی ۰/۷۵ و ۰/۶۹ به‌دست آمد. نتایج همچنین نشان داد که حدود ۷۱ درصد جریان خروجی حوضه مربوط به جریان پایه بوده و میانگین ماهانه رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی رابطه مستقیم و معنی‌داری با بارش دارند. از نظر توزیع مکانی، بیشترین تبخیر و تعرق واقعی در اراضی کشاورزی و مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم مشاهده شد. در مجموع، نتایج پژوهش بیانگر توانایی بالای مدل WetSpas-M در شبیه‌سازی زمانی- مکانی اجزای بیلان آب و کاربرد مؤثر آن در مدیریت منابع آب و ارزیابی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌های نیمه‌خشک است.

واژگان کلیدی: بیلان آب، حوزه آبخیز خرم‌آباد، مدل توزیعی ماهانه WetSpas-M.

مقدمه

آب به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین منابع طبیعی، نقش تعیین‌کننده‌ای در توسعه پایدار، امنیت غذایی و حفظ بوم‌سازگان‌های طبیعی دارد. در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت، توسعه فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، همراه با تغییرات اقلیمی، موجب افزایش فشار بر منابع آب و بروز ناپایداری در چرخه هیدرولوژیکی شده است. در این میان، شناخت دقیق مولفه‌های بیلان آب و بررسی تغییرات زمانی و مکانی آن‌ها، از مهم‌ترین ابزارهای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی محیطی محسوب می‌شود. مولفه‌های بیلان آب شامل بارش، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، نفوذ و تغذیه آب زیرزمینی هستند که تعامل میان آن‌ها وضعیت هیدرولوژیکی یک حوزه آبخیز را مشخص می‌کند. بررسی تغییرات زمانی- مکانی مولفه‌های بیلان آب به دلیل پیچیدگی فرآیندهای هیدرولوژیکی و تأثیر عوامل اقلیمی، توپوگرافی، کاربری اراضی و ویژگی‌های خاک، نیازمند استفاده از مدل‌های توزیعی و مکانی است. در این راستا، مدل‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS¹) به‌عنوان ابزارهایی کارآمد برای شبیه‌سازی فرآیندهای چرخه آب شناخته می‌شوند. یکی از مدل‌های برآورد بیلان آب و خاک، مدل ماهانه WetSpa-M² است. به‌منظور برآورد بیلان، باید از مدل‌هایی استفاده کرد که به‌طور کامل، مقادیر بارش، رواناب، تبخیر و تعرق، برگاب، نگهداشت رطوبتی خاک و نفوذ عمقی را در نظر گیرد. باقیمانده بارش پس از کسر رواناب، تبخیر و تعرق، برگاب و نگهداشت رطوبتی خاک، تحت عنوان نفوذ عمقی در نظر گرفته می‌شود. مدل WetSpa، یک مدل بر مبنای ساختار مدل بیلان آب توزیعی مکانی- زمانی Wetspa³ (Batelaan و همکاران، ۱۹۹۶؛ Wang و همکاران، ۱۹۹۷) است که ابتدا در ساختمان هیدرولوژی و مهندسی هیدرولیک دانشگاه Vrije بروکسل تهیه و جزئیات استفاده از آن، توسط Wang و همکاران (۱۹۹۷)، Batelaan و De Smedt (۲۰۰۱) و Batelaan و همکاران (۲۰۰۳) منتشر شد. مدل براساس فهم روابط بین جو، آب سطحی و زیرزمینی و کمی‌سازی کردن آن‌ها،

1 GIS: Geographic Information System

2 WetSpa-M: Water and Energy Transfer between Soil, Plants and the Atmosphere under quasi-Steady State-Monthly

3 Wetspa: Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere

اجزای هیدرولوژیکی نظیر تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی، رواناب سطحی، برگاب و نفوذ را به صورت فصلی برآورد می‌کند. ورودی‌های مدل، شامل داده‌های آب و هواشناسی و پارامترهای فیزیکی مانند نوع خاک، توپوگرافی، کاربری اراضی و عمق آب زیرزمینی است. مدل WetSpas، از معادله کلی بیلان آب استفاده می‌کند که در آن بارش (P) برابر مجموع رواناب سطحی (RO)، تبخیر و تعرق (ET) و میزان تغذیه (RCH) است.

این مدل، سطح زمین را به چهار طبقه متفاوت شامل سطح پوشیده از پوشش گیاهی، آب، خاک لخت و سطح غیرقابل نفوذ تقسیم می‌کند و معادله بیلان آب را برای هر بخش به طور جداگانه تعریف می‌کند (Park, 2012). لذا این مدل بر مبنای پارامترهای فیزیکی و آب و هواشناسی نظیر توپوگرافی، شیب، خاک، کاربری اراضی، بارش، سرعت باد، تبخیر و تعرق، برگاب، رواناب، عمق آب زیرزمینی و تعداد روزهای بارانی، مقدار تغذیه ورودی به آب زیرزمینی را برآورد می‌کند (Abdollahi و همکاران، 2017، سلیمانی مطلق، 1395).

نوع توسعه یافته این مدل با نام مدل ماهانه WetSpas-M شناخته می‌شود که توسط عبدالهی در سال 2015 تولید شد. چارچوب کلی آن بر اساس نسخه قبلی است، ولی اغلب معادلات و فرمول‌های ریاضی این نسخه تغییر کرده است. علاوه بر این، این نسخه از محیط Arcview که برای تهیه لایه‌های مورد نیاز آن بسیار زمان‌بر بوده، خارج شده و تمام لایه‌های مورد نیاز در محیط ArcGis تهیه می‌شوند (عبدالهی، 2015). در این تحقیق مدل مذکور به عنوان مدل بیلان آب و خاک استفاده شده است.

در مناطق نیمه خشک و خشک، که منابع آب محدود و نوسانات اقلیمی شدید است، شناخت رفتار زمانی و مکانی مؤلفه‌های بیلان آب اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. تغییر در الگوی بارش، افزایش دما و تغییر کاربری اراضی می‌تواند باعث کاهش تغذیه آب زیرزمینی، افزایش رواناب و تشدید تنش آبی شود. از این رو، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی دقیق برای شناسایی روند تغییرات بیلان آب، می‌تواند نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع آب و برنامه‌ریزی بهره‌برداری از منابع آب ایفا کند. با توجه به اهمیت بررسی مؤلفه‌های بیلان آب و نقش مدل‌های هیدرولوژیکی در تحلیل فرآیندهای چرخه آب، پژوهش‌های متعددی در داخل و خارج از کشور به ارزیابی کارایی مدل WetSpas-M در شبیه‌سازی اجزای بیلان آب پرداخته‌اند. Amiri و همکاران در سال 2022 با استفاده از

----- برآورد تغییرات زمانی- مکانی مؤلفه‌های بیلان آب با استفاده از مدل WetSpa-M/ ۴

مدل WetSpa-M، تغییرات زمانی و مکانی اجزای بیلان آب را در حوضه Moulouya در مکزیک را برآورد کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که بین تغذیه آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و جریان پایه همبستگی بسیار بالایی وجود داشته (مقدار ضریب تعیین ۰/۹۸) و میانگین بلندمدت بارش سالانه حوضه برابر ۲۹۸ میلی‌متر بوده که از این مقدار، ۱۵/۱ درصد به تغذیه آب زیرزمینی، ۱۴/۸ درصد به رواناب سطحی و ۷۰/۱ درصد از طریق تبخیر و تعرق از دست می‌رود. در نهایت به این نتیجه رسیدند که این مدل از دقت و کارایی بالایی در شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب برخوردار بوده و قادر است الگوی توزیع زمانی و مکانی این مؤلفه‌ها را به خوبی نمایش دهد. همچنین Sabri و Khayyun در سال ۲۰۲۳ با به کارگیری مدل WetSpa-M، میانگین بارش ماهانه، رواناب سطحی و تبخیر و تعرق واقعی را در مناطق کم ارتفاع عراق تخمین زدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که میانگین سالانه تغذیه آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق واقعی و رواناب سطحی به ترتیب برابر با ۱۲۸، ۱۳۱ و ۷۲ میلی‌متر است. بر این اساس، ۳۹ درصد از بارش سالانه به تغذیه آب زیرزمینی اختصاص یافته، در حالی که ۴۰ درصد از آن از طریق تبخیر و تعرق و ۲۱ درصد به صورت رواناب سطحی از دست می‌رود. این نتایج بیانگر عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی اجزای بیلان آب و ارائه درک دقیق‌تری از تغییرات زمانی و مکانی این مؤلفه‌ها بود. در مطالعات داخلی نیز نتایج مشابهی گزارش شده است. سلیمانی مطلق (۱۳۹۵) با استفاده از مدل بیلان آب ماهانه WetSpa-M در مقیاس حوضه، نشان داد که این مدل توانایی شبیه‌سازی جریان پایه و رواناب را به ترتیب با ضرایب تعیین ۸۲ و ۸۰ درصد و ضرایب نش-ساتکلیف ۸۰ و ۷۸ درصد نسبت به داده‌های مشاهداتی دارا است. وی همچنین بیان کرد که مدل WetSpa-M در تلفیق با مدل‌های آب زیرزمینی، ابزاری مناسب برای برآورد اجزای بیلان آب زیرزمینی و ارزیابی اثرات ناشی از تنش‌های طبیعی و انسانی بر منابع آب محسوب می‌شود. بیاتی و همکاران (۱۳۹۷) نیز با استفاده از مدل توزیعی WetSpa-M، بیلان آب ماهانه، جریان پایه فیلتر شده و جریان کل را در حوزه آبخیز ونک ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیش‌ترین سهم مؤلفه‌های بیلان آب از بارش سالانه حوضه مربوط به تغذیه پتانسیل آب زیرزمینی بوده و عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان کل، نسبت به جریان پایه، از دقت بیشتری برخوردار است. بشیریان و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از مدل توزیعی WetSpa-M، مؤلفه‌هایی نظیر رواناب،

تبخیر، برگاب و تغذیه آب زیرزمینی را در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره‌های مرطوب و خشک شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که مدل دارای عملکرد خوب تا رضایت‌بخش در برآورد اجزای بیلان آب بوده و دقت آن در دوره‌های ترسالی نسبت به دوره‌های خشکسالی بیشتر است. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که کاهش رواناب در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر عواملی نظیر خشکسالی، تغییر کاربری اراضی و انتقال بین‌حوضه‌ای آب قرار دارد. دولت‌آبادی و همکاران (۱۴۰۱) کارایی مدل WetSpa-M را در ارزیابی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه نیشابور-رخ به تغییر اقلیم آینده بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از آن بود که این مدل می‌تواند ابزار مؤثری برای کمک به مدیران و سیاست‌گذاران منابع آب در جهت اتخاذ راهکارهای مناسب به‌منظور کاهش اثرات تغییر اقلیم بر منابع آبی باشد.

با وجود نتایج ارزشمند مطالعات پیشین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون ارزیابی جامع تغییرات زمانی و مکانی مؤلفه‌های بیلان آب در حوزه آبخیز خرم‌آباد با استفاده از مدل WetSpa-M انجام نشده است. حوزه آبخیز خرم‌آباد به دلیل قرارگیری در منطقه نیمه‌خشک، تنوع توپوگرافی، وابستگی به منابع آب زیرزمینی و نوسانات اقلیمی، از ویژگی‌های هیدرولوژیکی متفاوتی نسبت به سایر مناطق برخوردار است؛ بنابراین، تعمیم نتایج مطالعات انجام‌شده در سایر حوضه‌ها به این منطقه با عدم قطعیت همراه خواهد بود. بسیاری از پژوهش‌های پیشین بر برآورد میانگین‌های بلندمدت یا ارزیابی یک یا چند مؤلفه بیلان آب متمرکز بوده‌اند و تحلیل هم‌زمان تغییرات زمانی و الگوی توزیع مکانی تمامی مؤلفه‌های اصلی بیلان آب در یک دوره بلندمدت کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل WetSpa-M و داده‌های ماهانه دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳، به ارزیابی جامع تغییرات زمانی و مکانی بارش، تبخیر و تعرق واقعی، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی در حوزه آبخیز خرم‌آباد می‌پردازد. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت منابع آب، تحلیل پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌ها و برنامه‌ریزی بهره‌برداری پایدار از منابع آبی مورد استفاده قرار گیرد.

مدل سازی بیلان آب

از آن جایی که مدل ماهانه WetSpas-M یک مدل توزیعی است، محاسبه بیلان آب در هر سلول رستری اجرا می‌شود. بیلان آب کل یک محدوده یا حوضه از جمع کل بیلان آب در هر سلول رستری محاسبه می‌شود (عبدالهی، ۲۰۱۵). نقشه‌های رستری شامل کاربری اراضی، شاخص سطح برگ، بافت خاک، عمق آب زیرزمینی، شیب و داده‌های اقلیمی (شامل بارش، دما، تبخیر از تشتک، تعداد روزهای بارانی، سرعت باد در ارتفاع دو متری)، ورودی‌های مورد نیاز برای مدل WetSpas-M هستند. لایه‌های هر ماه پس از رستری کردن به صورت ASCII در پوشه‌هایی با پیشوند هر پارامتر که برای مدل WetSpas-M قابل تعریف هستند، تهیه می‌شوند. با خواندن داده‌ها، مدل شروع به پردازش می‌کند. محاسبه بیلان اجزای آب در هر سلول برای هر گام زمانی (ماهانه) طی چهار فرآیند برگاب، رواناب سطحی، تبخیر و تعرق و تغذیه صورت می‌گیرد (عبدالهی، ۲۰۱۵). معادلات اجزای بیلان آب در هر سلول رستری به صورت زیر هستند (Abdollahi و همکاران، ۲۰۱۲).

$$ET_{raster} = a_v ET_v + a_s ET_s + a_o ET_o + a_i ET_i \quad (۱)$$

$$S_{raster} = a_v S_v + a_s S_s + a_o S_o + a_i S_i \quad (۲)$$

$$R_{raster} = a_v R_v + a_s R_s + a_o R_o + a_i R_i \quad (۳)$$

که در این روابط، ET_{raster} ، S_{raster} ، R_{raster} به ترتیب تبخیر و تعرق، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی یک سلول رستری و a_v ، a_s ، a_o ، a_i به ترتیب جزء مساحت پوشش گیاهی، خاک لخت، آب آزاد و مناطق غیرقابل نفوذ هستند. بارندگی نیز به عنوان نقطه شروع برای محاسبه بیلان آب هر یک از اجزای بیلان ذکر شده در روابط بالا در هر سلول رستری محسوب می‌شود.

فرایندهای هیدرولوژیکی مدل WetSpass-M

الف- برگاب

بسته به نوع کاربری اراضی، برگاب ماهانه به عنوان بخشی از بارش در نظر گرفته می شود. تغییرات کاربری اراضی می تواند شاخص سطح برگ را تغییر دهد که روی مقدار برگاب و تبخیر و تعرق اثر می گذارد (Peters, ۲۰۰۳؛ Batelaan, ۲۰۰۶؛ Abdollahi, ۲۰۱۵). مقدار کل برگاب در مدل WetSpass-M ماهانه مطابق رابطه ۴ محاسبه می شود.

$$I_m = P_m I_R \quad (4)$$

که I_m برگاب ماهانه بر حسب میلی متر، P_m بارندگی ماهانه بر حسب میلی متر و I_R نسبت برگاب است. برای محاسبه نسبت برگاب ماهانه، از معادله De Groen و Savenije (۲۰۰۶) استفاده می شود.

$$I_R = \frac{I_m}{P_m} = 1 - \exp\left(\frac{-I_D dp}{P_m}\right) \quad (5)$$

که در این رابطه dp تعداد روزهای بارانی در ماه و I_D آستانه برگاب روزانه است که بستگی به کاربری اراضی دارد (Sutanto و همکاران، ۲۰۱۲).

$$I_D = aLAI \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{P_m[1 - \exp(-0.463LAI)]}{aLAI}} \right) \quad (6)$$

که در این رابطه، LAI شاخص سطح برگ و a پارامتر برگاب است که مقدار واقعی آن در طی فرایند واسنجی تعیین می شود.

ب- رواناب سطحی

مقدار رواناب سطحی در مدل ماهانه WetSpass-M با استفاده از رابطه ۷ تعیین می شود.

$$SR_m = C_{sr} C_h (P_m - I_m) \quad (7)$$

که در این رابطه، SR_m رواناب سطحی ماهانه بر حسب میلی متر، C_{sr} ضریب رواناب واقعی بدون واحد و C_h ضریب بی بعد نماینده شرایط رطوبتی خاک است که از رابطه زیر محاسبه می شود (Bahremmand و همکاران، ۲۰۰۷).

$$C_h = \left(\frac{\theta_s}{\theta_{sat}} \right)^b \quad (8)$$

که در این رابطه θ_s مقدار رطوبت خاک برحسب $\left(\frac{m^3}{m^3} \right)$ ، θ_{sat} تخلخل خاک برحسب $\left(\frac{m^3}{m^3} \right)$ و b توان بی‌بعد (نماینده اثر شدت بارش) هستند (Abdollahi، ۲۰۱۵). Bahremand و همکاران (۲۰۰۷) مقدار بهینه این ضریب را از طریق واسنجی مدل با استفاده از سری زمانی دبی جریان تعیین کردند. با ورود C_h در معادله رواناب سطحی (رابطه ۷) از خطای بیش‌برآورد رواناب سطحی در مناطقی نظیر مناطق نیمه‌خشک که رطوبت خاک کم و تبخیر و تعرق پتانسیل بالا است، اجتناب می‌شود. از آنجایی که داده‌های رطوبت خاک در مقیاس زمانی ماهانه کمیاب هستند، C_h (بین صفر و یک) با استفاده از انتگرال‌گیری نسبت کارایی تبخیری روش Turc در مقیاس ماهانه برآورد می‌شود (عبدالهی، ۲۰۱۵).

$$C_h = \frac{\text{Rainfall}}{LP(\text{Rainfall}^\alpha + ETP^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}}} \quad \text{if } ETP > \text{Rainfall} \quad (9)$$

$$C_h = 1 \quad \text{if } ETP \leq \text{Rainfall}$$

که در این رابطه، ETP تبخیر و تعرق پتانسیل به میلی‌متر در ماه و LP یک پارامتر واسنجی بی‌بعد کاهنده تبخیر و تعرق پتانسیل است که بستگی به شرایط رطوبت خاک دارد. مقدار فرضی آن، ۰/۶۵ تعریف شده است (Abdollahi و همکاران، ۲۰۱۷). مقدار α نیز در تحقیق Pistocchi و همکاران (۲۰۰۸) و Abdollahi (۲۰۱۵) به ترتیب ۱/۵ و ۱/۱ برآورد شد. در این تحقیق مقادیر LP و α در واسنجی تعیین می‌شوند.

برای تخمین بهتر ضریب رواناب پتانسیل، مقدار آن از ضرایب رواناب محدوده‌های قابل نفوذ (C_{per}) و غیرقابل نفوذ (C_{imp}) محاسبه می‌شود. C_{per} از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود که در این رابطه، w_1 ، w_2 و w_3 به ترتیب ضرایب وزنی سه عامل مؤثر در تعیین ضریب رواناب سطوح نفوذپذیر هستند. این سه عامل عبارت‌اند از عامل کاربری اراضی که بیانگر اثر زبری سطح و ویژگی‌های پوشش زمین بر تولید رواناب است؛ عامل خاک که بر اساس رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی دائم تعیین می‌شود و عامل شیب که تأثیر توپوگرافی و شیب زمین را بر تشکیل رواناب نشان می‌دهد. این ضرایب وزنی سهم نسبی هر یک از عوامل فوق را در محاسبه ضریب رواناب

سطوح نفوذپذیر مشخص می‌کنند و مجموع آن‌ها برابر با ۱ است. در مدل WetSpass، مقادیر ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۳ برای این ضرایب به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بهترین تطابق را با ضرایب رواناب ارائه‌شده در جداول مرجع مدل فراهم کنند (Abdollahi, ۲۰۱۵).

$$C_{per} = w_1 \left(\frac{0.02}{n} \right) + w_2 \left(\frac{\theta_w}{1 - \theta_w} \right) + w_3 \left(\frac{S_p}{10 + S_p} \right) \quad (10)$$

در این معادله، n ضریب زبری مانینگ است که بستگی به کاربری اراضی دارد. مقدار آن برای هر کاربری اراضی با استفاده از پایگاه ملی پوشش اراضی^۱ (NLCD) در سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۲ (USGS) در دسترس است. این داده‌ها، نیازمند بررسی بصری تصاویر ماهواره‌ای و بازدید میدانی کاربری‌های مختلف با لحاظ کردن دقت مکانی ضریب‌های مانینگ است (Kalyanapu و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین θ_w رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی (Gonzalez و همکاران، ۲۰۱۶) و S_p شیب کاربری اراضی به درصد است. مقدار ضریب وزنی رواناب پتانسیل C_{WP} در هر سلول با احتساب سطوح قابل نفوذ و غیرقابل نفوذ از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$C_{wp} = \left(1 - \frac{A_{imp}}{100} \right) C_{per} + \frac{A_{imp}}{100} C_{imp} \quad (11)$$

که در این رابطه، C_{imp} ضریب رواناب در سطوح غیرقابل نفوذ است که مدل WetSpass-M مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می‌کند (NURP US EPA، ۱۹۸۳).

$$C_{imp} = 0.9 \exp(0.024 A_{imp}) \quad (12)$$

در این رابطه، A_{imp} درصد سطح غیرقابل نفوذ در هر پیکسل است. از آنجایی که مقدار ضریب رواناب با عمق بارندگی تغییر می‌کند (Li و همکاران ۲۰۱۶)، برای تبدیل مقدار رواناب پتانسیل به واقعی، میانگین بارندگی روزانه (میانگین بارندگی ۲۴ ساعته $(\bar{P}_{24})$ برحسب میلی‌متر در روز در هر ماه) در تعداد روزهای بارندگی در نظر گرفته می‌شود.

$$C_{sr} = \frac{C_{wp} \bar{P}_{24}}{(C_{wp} \bar{P}_{24} - RCD \times C_{wp}) + RCD} \quad (13)$$

-
1. NLCD: National Land Cover Dataset
 2. USGS: United States Geological Survey
 3. NURP: Nationwide Urban Runoff Program

این رابطه، براساس مقادیر تصحیح اثر بارندگی روی ضریب رواناب در روش شماره منحنی استوار است. ترکیب شدت بارندگی و تعداد روزهای متوالی آن به‌عنوان RCD^۱ (سطح خشکی متوالی منطقه‌ای برحسب میلی‌متر) برای مدل تعریف می‌شوند. مقدار RCD بین یک (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. چنانچه مقدار بارندگی کمتر از RCD شود، نیازی به تصحیح ضریب رواناب پتانسیل نیست و در واقع ضریب رواناب پتانسیل (C_{sr}) با ضریب رواناب واقعی (C_{wp}) برابر است (عبدالهی، ۲۰۱۵). به‌منظور تصحیح رواناب به‌دلیل اثر ذخیره سطحی ماهانه، مقدار ماهانه رواناب ماه قبل در رواناب حجمی ماه بعد (مترمکعب در ماه) تأثیر می‌گذارد که با رابطه ۱۴ بیان می‌شود (عبدالهی، ۲۰۱۵).

$$Q_t = xQ_{t-1} + 0.001(1 - x)A SR_m \quad (14)$$

که در این رابطه، x فاکتور تأخیر بوده که مقدار آن، بین صفر تا یک متغیر است. Q_{t-1} رواناب حجمی ماه قبل برحسب مترمکعب در ماه و A سطح منطقه به مترمربع است.

فاکتور تأخیر صفر به این معنی است که در طی یک ماه با مقدار بارندگی صفر، روانابی اتفاق نخواهد افتاد. فاکتور تأخیر، شبیه فاکتور وزنی در روش ماسکینگام اما با دامنه بین صفر تا یک است. زمان تمرکز و ذخیره در حوزه آبخیز ممکن است روی فاکتور تأخیر، تأثیر مهمی داشته باشد. ثابت ۰/۰۰۱ نیز برای تبدیل واحد استفاده می‌شود.

ج- رواناب ناشی از ذوب برف

بخشی از بارش حوضه‌های کوهستانی، به صورت برف است و در نتیجه، نقش مهمی در ایجاد رواناب سطحی، تغذیه آب‌های زیرزمینی و ایجاد سیل ایفا می‌کند (فتاحی و وظیفه‌دوست، ۱۳۹۰). لذا محاسبه پوشش سطح برف و رواناب و تغذیه حاصل از ذوب برف در این‌گونه مناطق، ضروری است. معمولاً عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی با

1. RCD: Regional Consecutive Dryness level

در نظر گرفتن این پارامتر در برآورد اجزای بیلان (رواناب و تغذیه) تا حدودی افزایش می‌یابد. در مدل توزیعی WetSpa-M، بخش ذوب برف می‌تواند مقدار ذوب برف را در ماه‌های برفی برآورد کند. پارامترهای مورد نیاز این قسمت عبارتند از پوشش سطح برف، درجه حرارت، فاکتور درجه روز و ضرایب مدل. روابط ۱۵ و ۱۶ مبنای معادلات ذوب برف در مدل WetSpa-M هستند (Dunne و Leopold ۱۹۸۷؛ Knight و همکاران، ۲۰۰۰).

$$\text{PerSW} = 100 / (1 \cdot 35^T \times 1 \cdot 61 + 1) \quad (15)$$

$$\text{SM} = C_m \times T_a \times D_n \quad (16)$$

که در این روابط، PerSW درصد پوشش برف، T دمای هوای ماهانه، SM مقدار ذوب برف بر حسب میلی‌متر، C_m فاکتور درجه روز بر حسب میلی‌متر در درجه سانتی‌گراد در روز، T_a میانگین دمای هوای روزانه و D_n تعداد روزها در هر ماه است.

در این تحقیق، پوشش سطح برف از تصاویر MODIS استخراج شد. اما در مورد فاکتور درجه‌روز در کشور با توجه به اینکه اندازه‌گیری کافی و درستی از سال‌های گذشته در دسترس نیست و از آن جا که این فاکتور، تابع عوامل زیادی از جمله ارتفاع، درجه حرارت و خصوصیات برف است؛ لذا مقدار اولیه‌ای برای مدل براساس مقادیر اندازه‌گیری شده در منطقه یا مناطق مجاور آن در نظر گرفته می‌شود و سپس در مدل واسنجی می‌شود. همچنین فاکتور درجه‌روز، با استفاده از پوشش سطح برف از تصاویر روزانه MODIS، عمق برف و آمار بارش ثبت شده هم‌زمان با روزهای برفی نیز قابل محاسبه است (He و همکاران، ۲۰۱۴).

د- تبخیر و تعرق

تبخیر و تعرق واقعی در مدل WetSpa-M در هر سلول شبکه، از جمع تبخیر و تعرق واقعی در مناطق دارای پوشش گیاهی (ET_v)، آب آزاد (ET_o)، خاک لخت (ET_s) و سطوح غیر قابل نفوذ (ET_i) محاسبه می‌شود. در یک روش مشابه، مدل WetSpa-M ماهانه از تبخیر و تعرق پتانسیل در مقیاس زمانی ماهانه و ضرایب پوشش برای تبخیر و تعرق واقعی استفاده می‌کند. برای برآورد تعرق گیاه مرجع از تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_p)، یک ضریب پوشش گیاهی براساس معادله پنمن-مانتیت و رابطه ۱۷ برآورد می‌شود (Batellan، ۲۰۰۶؛ Abdollahi، ۲۰۱۵).

$$C = \frac{1 + \frac{\gamma}{\Delta}}{1 + \frac{\gamma}{\Delta} + \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (۱۷)$$

که در این رابطه، γ ثابت psychrometric بر حسب $\frac{\text{Kpa}}{^\circ\text{C}}$ ، Δ شیب مشتق اول منحنی فشار بخار اشباع (شیب فشار بخار اشباع در دمای اتمسفر) بر حسب $\frac{\text{Kpa}}{^\circ\text{C}}$ ، r_c مقاومت سطحی بر حسب sm^{-1} و r_a مقاومت آئرو دینامیکی است و از رابطه ۱۸ به دست می‌آید.

$$r_a = \frac{1}{K^2 U_a Z_a} \left(\ln \left(\frac{Z_a - Z_d}{Z_0} \right) \right)^2 \quad (۱۸)$$

که در این رابطه، K ثابت Von Karman ($۰/۴۱$)، U_a (m/s) سرعت باد در ارتفاع Z_a (m)، Z_d ارتفاع جابه‌جایی (m) و Z_0 ارتفاع زبری دینامیکی سطح (m) است. بنابراین تعرق مرجع (T_{rv}) به صورت رابطه ۱۹ محاسبه می‌شود.

$$T_{rv} = cET_p \quad (۱۹)$$

برای مناطق دارای پوشش گیاهی که سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از عمق ریشه باشد، تعرق واقعی از روش معادله ۲۰ اصلاح می‌شود:

$$T_v = \left(1 - A_1^{w/T_{rv}}\right) T_{rv} \quad (۲۰)$$

که A_1 یک پارامتر واسنجی شده در مدل Wetspass-M است که به مقدار شن خاک بستگی دارد (Huybrechts و همکاران، ۱۹۹۰؛ Batellan، ۲۰۰۶؛ Abdollahi، ۲۰۱۵). w آب در دسترس برای تعرق است که به صورت رابطه ۲۱ محاسبه می‌شود.

$$w = P_m + (\theta_{fc} - \theta_{pmp})R_d \quad (۲۱)$$

که در این رابطه، R_d عمق ریشه، $\theta_{fc} - \theta_{pmp}$ مقدار آب در دسترس گیاه در هر گام زمانی (اختلاف بین ظرفیت آب مزرعه و نقطه پژمردگی) و P_m بارش ماهانه است. مجموع برگاب و تعرق، تبخیر و تعرق واقعی محسوب می‌شود (Batellan و De Smit، ۲۰۰۷؛ Abdollahi، ۲۰۱۵) و از رابطه ۲۲ به دست می‌آید.

$$ET_m = a_v ET_v + a_s ET_s + a_o ET_o + a_i ET_i \quad (۲۲)$$

که به ترتیب جزء مساحت و تبخیر و تعرق برای پوشش گیاهی به صورت a_v و ET_v ، برای خاک به صورت a_s و ET_s ، برای آب آزاد به صورت a_o و ET_o و برای مناطق غیرقابل نفوذ به صورت a_i و ET_i هستند (De Smit و Batellan، ۲۰۰۱؛ Batellan، ۲۰۰۶؛ De Smit و Batellan، ۲۰۰۷؛ Abdollahi، ۲۰۱۵).

۵- تغذیه

برآورد مقدار تغذیه، یکی از اهداف مدل WetSpa-M بوده که طراحان این مدل (De Smit و Batellan، ۲۰۰۱؛ Abdollahi، ۲۰۱۵) به دنبال آن بوده‌اند. در واقع این مدل، میزان عدم قطعیت مقدار تغذیه ورودی به آب زیرزمینی را با دخالت مجموع پارامترهای مختلف به کمینه رسانده است. مقدار تغذیه (R_m) در مدل WetSpa-M ماهانه به عنوان جزء باقیمانده بیلان آب از رابطه ۲۳ محاسبه می‌شود.

$$R_m = P_m - SR_m - ET_m \quad (23)$$

از آن جایی که تغذیه یک فرآیند نسبتاً آهسته است، جریان پایه ماهانه در هر سلول براساس ذخیره ماه قبل و تغذیه آب زیرزمینی در ماه بررسی شده، با استفاده از رابطه ۲۴ محاسبه می‌شود (Abdollahi، ۲۰۱۵).

$$Q_{b(t)} = \beta Q_{b(t-1)} + 0.001 N_m (1 - \beta) \emptyset R_m \quad (24)$$

که در این رابطه β پارامتر ذخیره است که مقدار آن بین ۰ و ۱ است، $Q_{b(t-1)}$ جریان پایه از ماه قبل برحسب مترمکعب در ماه، N_m تعداد روزهای هر ماه و $\emptyset$ پارامتر مشارکت کننده در تغذیه برای جریان پایه در ماه مورد بررسی است. مقدار $\emptyset$ برای سطح سلولی A (مترمربع) با شاخص خشکیدگی K (روز) طبق رابطه ۲۵ محاسبه می‌شود.

$$\emptyset = \frac{1 \cdot 15A}{K} \quad (25)$$

اجرای مدل WetSpas-M

الف- ورودی‌های مورد نیاز

ورودی‌های موردنیاز در این مدل به دو دسته تقسیم می‌شوند: داده‌ها و نقشه‌ها. داده‌ها به‌صورت سری زمانی و در قالب فایل نوت‌پد به مدل معرفی می‌شوند. داده‌های موردنیاز عبارتند از: تعداد روزهای بارانی در هر ماه و درجه روز به ازای هر ماه. نقشه‌های ورودی به مدل WetSpas-M به دو گروه تقسیم می‌شوند: نقشه‌های ثابت و نقشه‌های متغیر. نقشه‌های ثابت نقشه‌هایی هستند که با گذشت زمان تغییر نمی‌کنند مانند شیب، نقشه رقومی ارتفاع، نقشه خاک و کاربری. نقشه‌های متغیر نقشه‌هایی هستند که به ازای هر ماه تغییر می‌کنند و ثابت نیستند که شامل شاخص سطح برگ، عمق آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق، بارندگی، پوشش سطح برف، دما و سرعت باد و پساب آبیاری. البته قابل ذکر است که همه نقشه‌های ورودی به مدل بایستی دارای سیستم مختصات تصویر، اندازه پیکسل^۱ و مساحت یکسانی باشند در غیراین‌صورت اجرای مدل با مشکل مواجه خواهد شد. علاوه‌براین کلیه نقشه‌ها باید به فرمت ASCII و دارای ارزش^۲ باشند.

ب- اجرای مدل

به‌منظور اجرای مدل WetSpas-M و بررسی تغییرات زمانی- مکانی مؤلفه‌های بیلان آب، حوزه آبخیز خرم‌آباد به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. حوزه آبخیز خرم‌آباد واقع در استان لرستان یکی از زیرحوزه‌های آبریز کرخه با مساحت ۱۶۱۹۱۳ هکتار در برگیرنده زیرحوضه‌های مشرف به شهر خرم‌آباد و رودخانه چم‌انجیر است. این محدوده بین طول‌های ۳۶°۴۸' تا ۱۲'۴۶°۴۸ شرقی و عرض‌های ۳۶'۳۳° تا ۴۴'۴۳°۳۳ واقع شده و شامل دشت‌های کمالوند و دشت مرکزی خرم‌آباد است. نقشه ۱ موقعیت حوضه را نشان می‌دهند. برای اجرای مدل نقشه‌های محدوده مورد مطالعه با ابعاد ۲۵۰ در ۲۵۰ متر (با تعداد ۲۶۰ ستون و ۲۱۲ سطر) در بازه

1. Pixel Size

2. Value

زمانی اکتبر ۲۰۰۰ تا سپتامبر ۲۰۲۳ تهیه شدند. تعداد ۲۷۶ لایه رستری ماهانه به فرمت ASCII برای هر یک از پارامترهای ذکر شده در محیط GIS ساخته شدند.

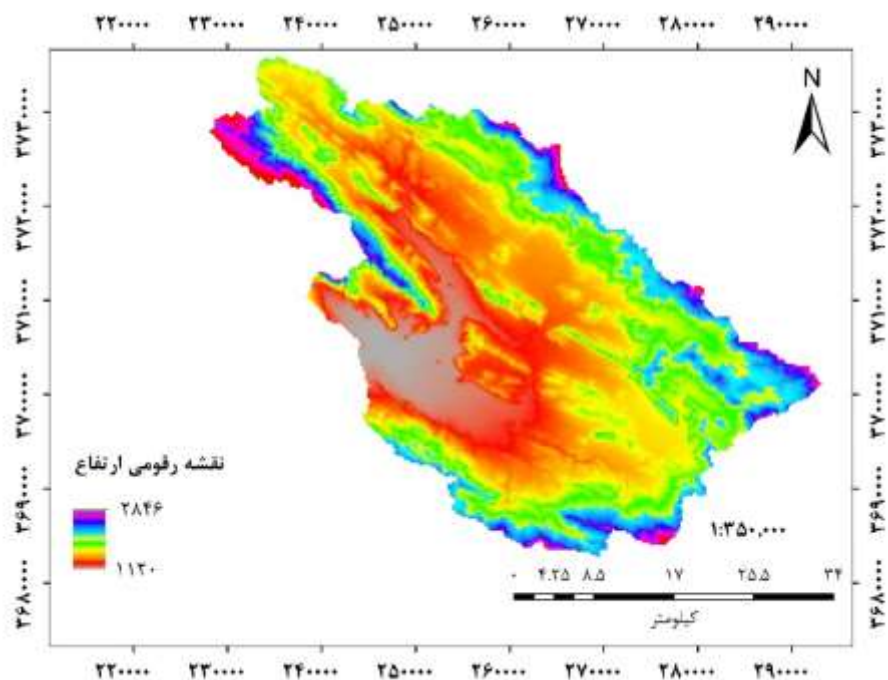


شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز خرم آباد در ایران و استان لرستان

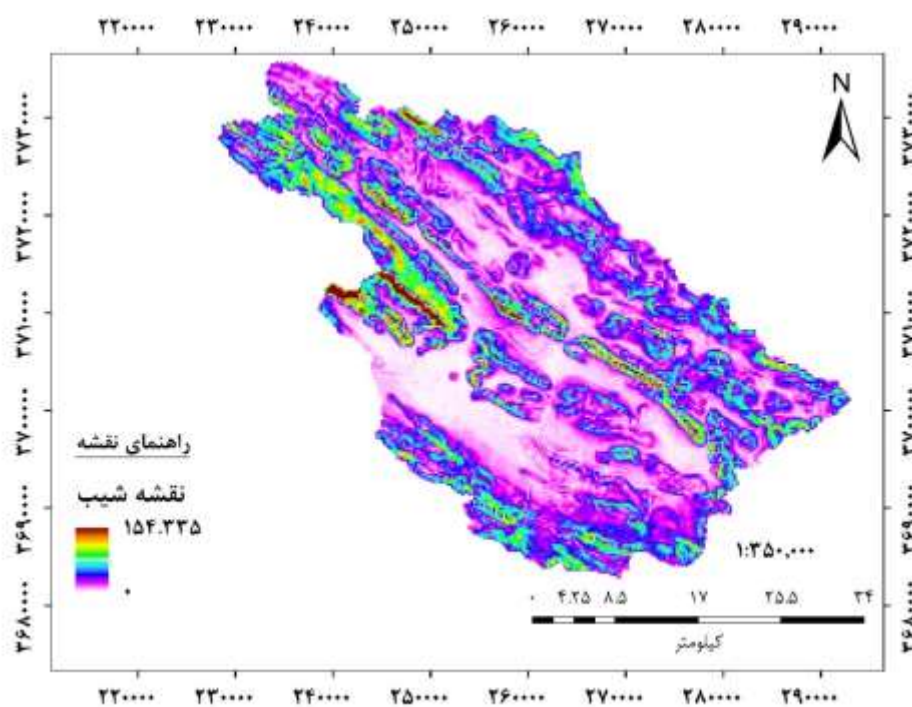
نقشه‌های تهیه‌شده برای فراخوانی در مدل شامل موارد زیر هستند:

- نقشه رقومی ارتفاع، نقشه شیب

نقشه رقومی ارتفاع و نقشه شیب حوزه آبخیز خرم آباد ورودی به مدل به ترتیب در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است.



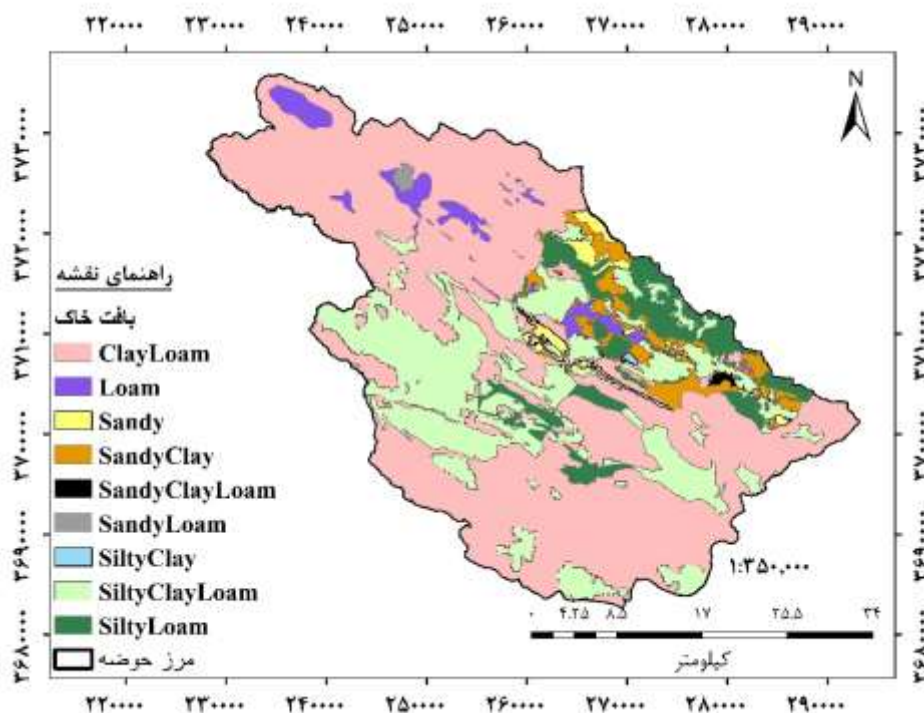
شکل ۲- نقشه رقومی ارتفاع ورودی مدل Wetspass-M



شکل ۳- نقشه شیب ورودی مدل Wetspass-M

- نقشه خاک

نقشه خاک منطقه براساس مطالعات خاک‌شناسی منطقه و نقشه‌های کاغذی و رقومی موجود در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی لرستان و تصاویر ماهواره‌ای تهیه شد (شکل ۴). مطابق با این شکل خاک‌های حوزه آبخیز خرم‌آباد دارای تنوع بافتی قابل توجهی هستند که ناشی از شرایط زمین‌شناسی، توپوگرافی و فرایندهای تشکیل خاک در منطقه است. براساس کدبندی ارائه‌شده در مدل Wetspass (Abdollahi, ۲۰۱۵)، (جدول ۱)، هر بافت خاک با یک کد نام‌گذاری شد و در نهایت نقشه بافت خاک براساس این کدها به مدل معرفی شد (شکل ۵). البته لازم به ذکر است که این کلاس‌بندی‌ها در قالب فایل اکسل تعریف شده و باید به مدل وارد شود.

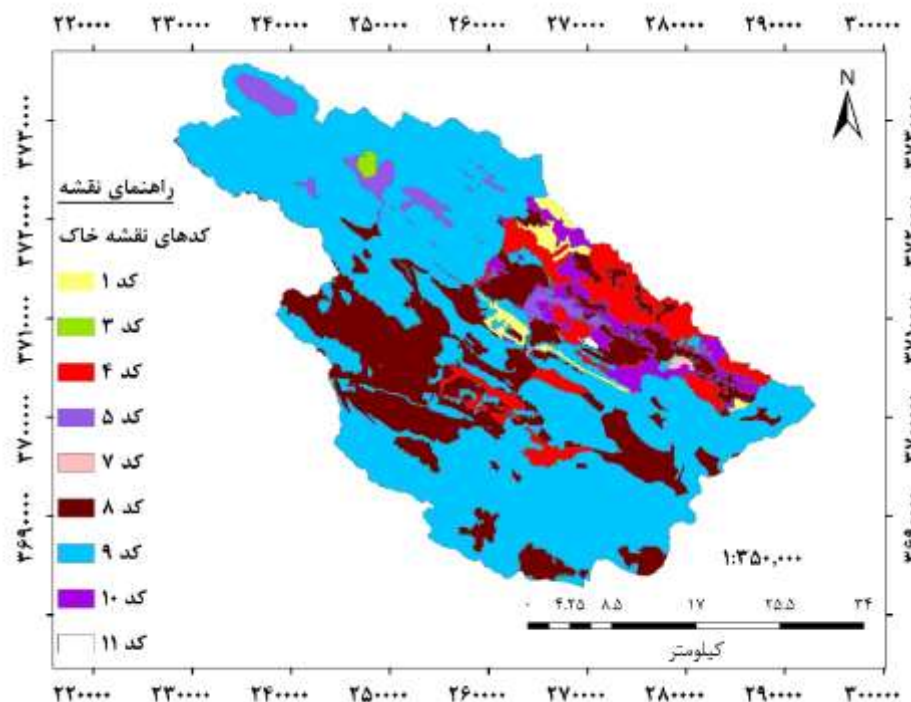


شکل ۴- نقشه بافت خاک حوزه آبخیز خرم‌آباد

جدول ۱- پارامترهای پیش فرض کلاس بافت خاک (Abdollahi, ۲۰۱۵)

کد	کلاس بافت خاک	ظرفیت مزرعه ($\frac{m^3}{m^3}$)	نقطه پژمردگی ($\frac{m^3}{m^3}$)
۱	شنی ^۱	۰/۱۲	۰/۰۵
۲	لوم شنی ^۲	۰/۱۵	۰/۰۷
۳	شنی لومی	۰/۲۱	۰/۰۹
۴	سیلتی لومی	۰/۲۹	۰/۱۰
۵	لومی	۰/۲۵	۰/۱۲
۶	سیلتی	۰/۳۰	۰/۱۰
۷	شنی رسی لومی ^۳	۰/۲۶	۰/۱۶
۸	سیلتی رسی لومی ^۴	۰/۳۶	۰/۱۹
۹	رسی لومی	۰/۳۳	۰/۱۹
۱۰	شنی رسی ^۵	۰/۳۲	۰/۲۳
۱۱	سیلتی رسی ^۶	۰/۴۳	۰/۲۷
۱۲	رسی	۰/۴۶	۰/۳۳

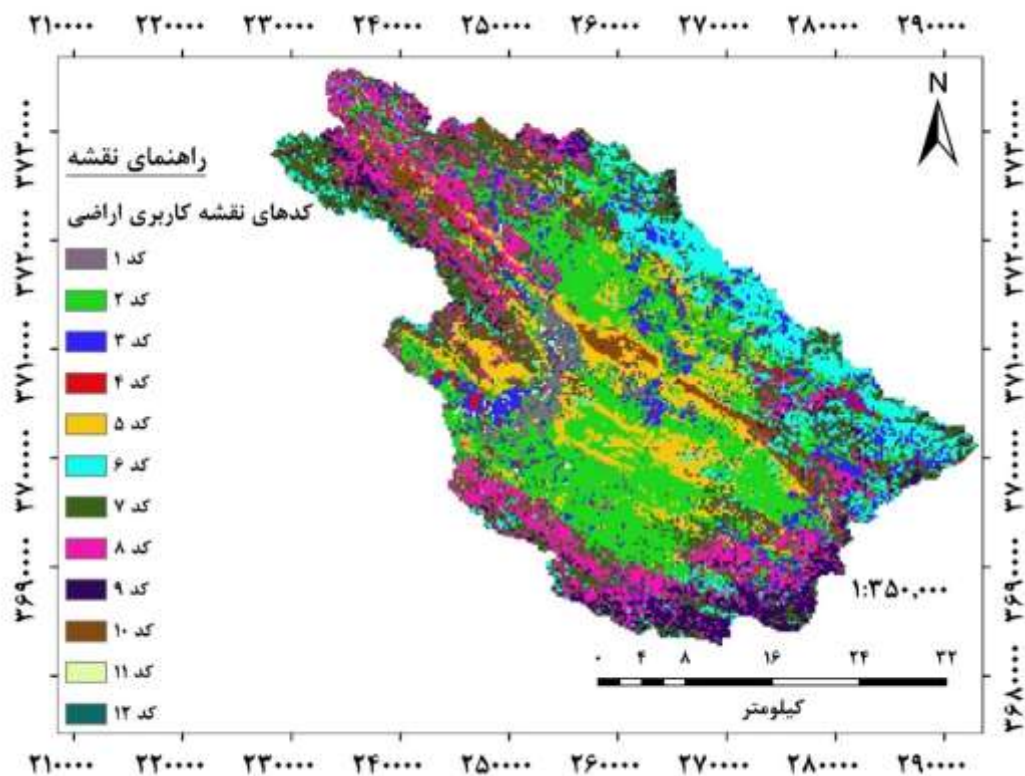
-
1. Sand
 2. Loamy sand
 3. Sandy clay Loam
 4. Silty clay Loam
 5. Sandy clay
 6. Silty clay



شکل ۵- نقشه بافت خاک ورودی به مدل Wetspass-M

- نقشه کاربری اراضی

برای ارزیابی تغییرات کاربری اراضی، درصد سطح هر نوع کاربری تعیین شد و نقشه‌های کاربری اراضی و خصوصیات مربوط به هر طبقه‌بندی براساس استانداردهای مدل، تنظیم شد. با مراجعه به منطقه در هر کاربری، درصد سطح پوشش گیاهی، خاک لخت، آب آزاد و مناطق غیرقابل نفوذ به‌طور تقریبی مشخص شد و علاوه‌براین، متوسط ارتفاع پوشش گیاهی در هر کاربری تعیین و عمق ریشه گیاه در کاربری‌های زراعی و در ارتفاعات به‌دست آمد (شکل ۶). جدول ۲ خصوصیات مربوط به کاربری اراضی را نشان می‌دهد که در مدل تعریف و واسنجی شده است.



شکل ۶- نقشه کاربری اراضی ورودی به مدل Wetspass-M

جدول ۲- خصوصیات مربوط به کاربری اراضی واسنجی شده در مدل (Abdollahi و همکاران، ۲۰۱۲)

کد	نوع کاربری	سطح پوشش (نسبتی)	سطح خاک لغت (نسبتی)	سطح نفوذناپذیر (نسبتی)	سطح آب آزاد (نسبتی)	عمق ریشه	شاخص سطح برگ	کمینه روزه برگ	ارتفاع گیاه	ضریب مانینگ	فاکتور اراضی	مقاومت آترویدینامیکی
۱	اراضی دیم	۰/۷	۰/۳	۰	۰	۰/۵	۲/۵	۱۸۰	۰/۵	۰/۰۳۵	۰/۴۶	۱۲۴/۲
۲	مرتع با تاج پوشش خوب	۰/۵۵	۰/۴۵	۰	۰	۰/۶	۱/۷	۱۵۰	۰/۷	۰/۰۵	۰/۳۶	۱۰۷/۵
۳	جنگل با تاج پوشش کم	۰/۴۵	۰/۵۵	۰	۰	۱/۲	۲/۲	۱۷۰	۱/۷	۰/۳۵	۰/۱۵	۷۱/۶
۴	بیشه زار و بوته زار	۰/۵	۰/۵	۰	۰	۱/۱	۲	۱۶۰	۱/۳	۰/۲۲	۰/۲۲	۸۱/۳
۵	ترکیب مراتع با تاج پوشش کم، متوسط و خوب	۰/۶	۰/۴	۰	۰	۰/۴۵	۱/۵	۱۲۰	۰/۵	۰/۰۴۵	۰/۳۹	۱۲۴/۲
۶	جنگل با تاج پوشش متوسط	۰/۶	۰/۴	۰	۰	۱/۵	۳	۱۹۰	۳	۰/۴	۰/۱۲	۵۴/۷
۷	مرتع با تاج پوشش فقیر	۰/۴۵	۰/۵۵	۰	۰	۰/۴	۱/۴	۱۱۰	۰/۵۵	۰/۰۴۲	۰/۴	۱۱۹/۴
۸	مرتع با تاج پوشش متوسط	۰/۶	۰/۴	۰	۰	۰/۵	۱/۶	۱۴۰	۰/۶	۰/۰۴۷	۰/۳۸	۱۱۵
۹	اراضی آبی	۰/۸	۰/۲	۰	۰	۰/۶	۳/۵	۲۰۰	۰/۸	۰/۰۳۷	۰/۴۳	۱۰۱/۴
۱۰	مناطق مسکونی	۰/۲	۰	۰/۸	۰	۰/۳	۱	۱۰۰	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۶۶	۲۱۲
۱۱	باغ	۰/۸	۰/۲	۰	۰	۱/۷	۴/۵	۱۵۰	۴/۵	۰/۰۵	۰/۳	۴۵/۳
۱۲	جاده ها	۰/۶	۰/۱	۰/۳	۰	۰/۳	۲	۱۰۰	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۵	۲۱۲/۰۱

- نقشه‌های متغیر مدل

همان‌گونه که اشاره شد نقشه‌های متغیر مدل شامل شاخص سطح برگ (LAI)، پوشش سطح برف، دما، پساب آبیاری، عمق آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق پتانسیل، بارندگی و سرعت باد است. نقشه‌های LAI، پوشش سطح برف و NDVI دانلود شدند. تصاویر LAI از سنجنده MOD15A2H ماهواره مودیس با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین دریافت شد. این تصاویر، دارای دقت مکانی ۵۰۰ متری و به ازای هر هشت روز یکبار وجود دارند (سایت Earth Engine Data Catalog، ۲۰۲۵).

علاوه بر تصاویر LAI، به منظور تهیه سطح پوشش برف نیز، از تصاویر مودیس نوع MOD10A1 استفاده شد. این تصاویر نیز با سامانه گوگل ارث انجین دریافت شد. این تصاویر دارای دقت مکانی ۵۰۰ متری و به صورت روزانه وجود دارند (سایت Earth Engine Data Catalog، ۲۰۲۵).

همچنین با هدف تهیه لایه‌های سطح پوشش گیاهی از تصاویر NDVI استفاده شد. برای این منظور از تصاویر مودیس نوع MCD43A4_006_NDVI استفاده شد. این تصاویر نیز با سامانه گوگل ارث انجین دریافت شد. این تصاویر دارای دقت مکانی ۵۰۰ متری و به صورت روزانه وجود دارند (سایت Earth Engine Data Catalog، ۲۰۲۵).

نقشه‌های LAI و پوشش سطح برف در شکل‌های ۷ و ۸ برای سال ۲۰۲۲ به صورت متوسط ماهانه ارائه 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 شد که علت استفاده از این روش، پایین بودن میانگین خطا نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی بود (گلشن و همکاران، ۱۳۹۴). نقشه‌های آب آبیاری به روش زیر تهیه شدند.

۱- استخراج لایه‌های ماهانه ضریب پوشش ماهانه (K_c)

$$K_c = 0.9914 NDVI + 0.3754 \quad (26)$$

۲- استخراج لایه‌های ماهانه تبخیر و تعرق پتانسیل (ETP)

$$ETP = 0.33 (1 + C) (ET_{pan}) \quad (27)$$

$$ETP = 0.594 (ET_{pan}) \quad (28)$$

$$ETP = 0.396 (ET_{pan}) \quad (29)$$

فرمول کلی محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل به صورت رابطه ۲۷ است که در آن C درصد پوشش زمین توسط گیاه است (علیزاده، ۱۳۸۹). اما برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه‌های فروردین تا شهریور از رابطه ۲۸ و برای ماه‌های مهر تا اسفند از رابطه ۲۹ استفاده می‌شود.

۳- استخراج لایه‌های ماهانه تبخیر و تعرق گیاه (ETC)

$$ETC = ETP * K_c \quad (30)$$

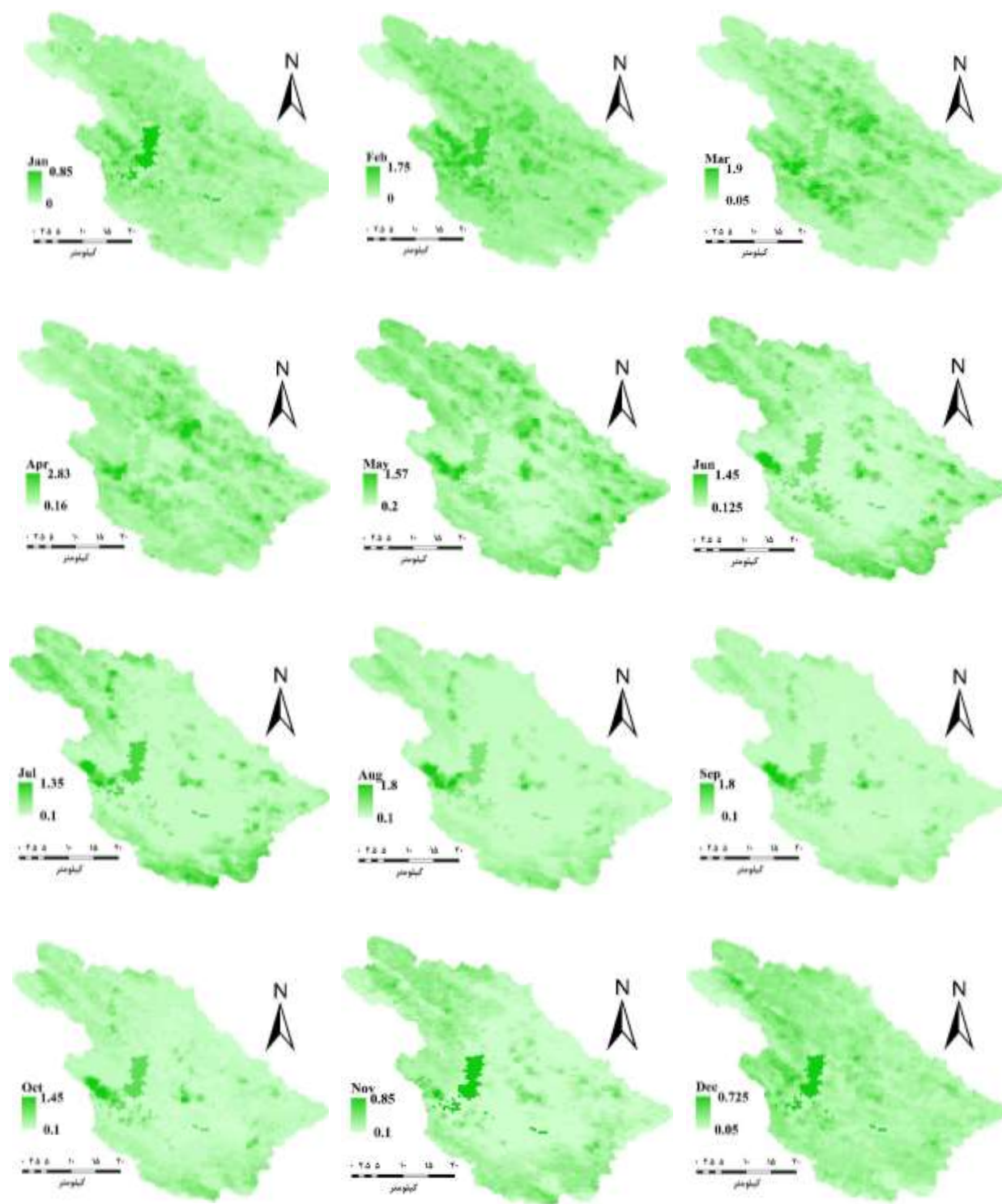
۴- استخراج لایه‌های ماهانه بارش موثر (P_e)

$$P_e = 0.75 * P \quad (31)$$

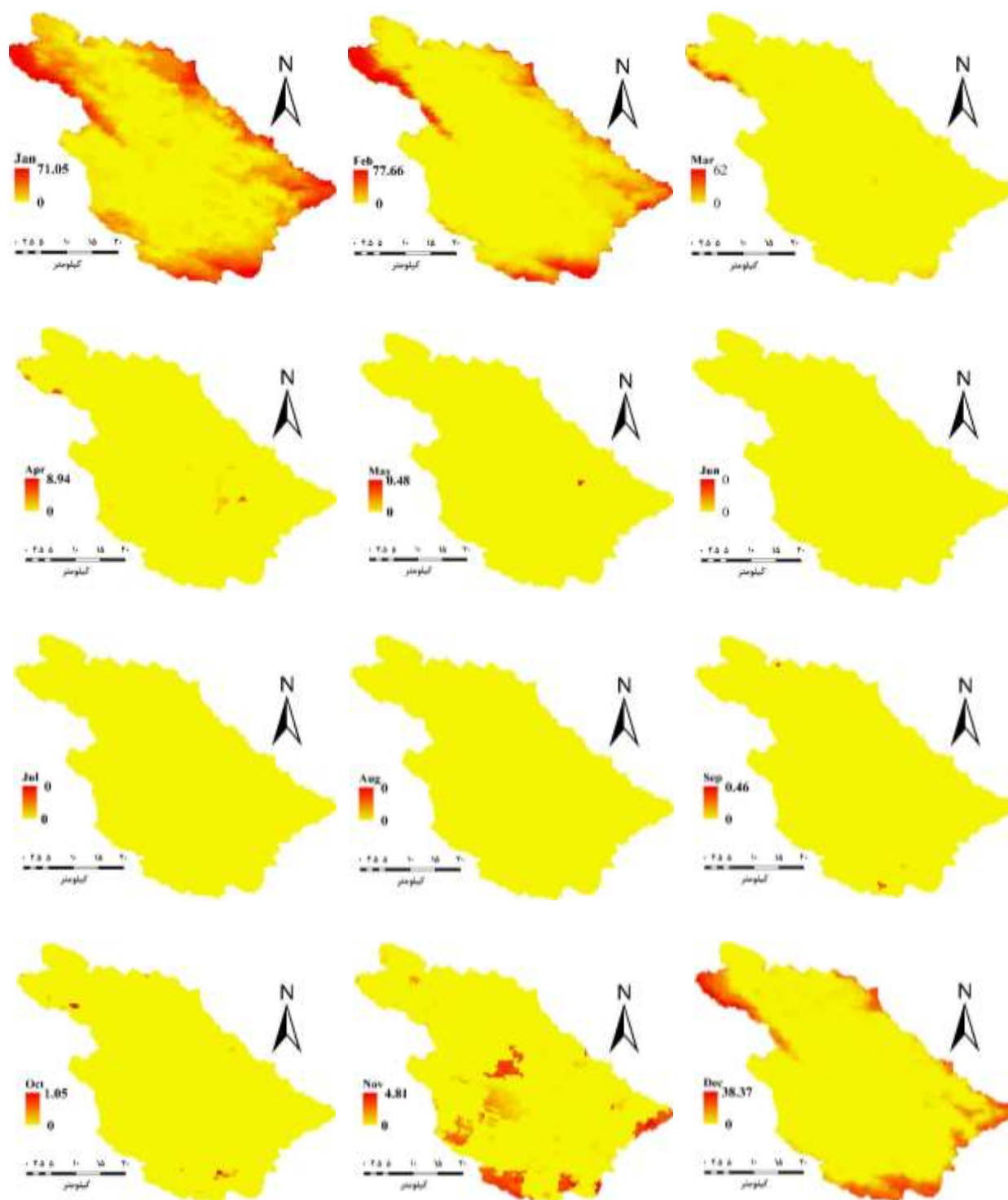
۵- استخراج لایه‌های ماهانه نیاز آبی گیاه (I)

$$I = ETC - P_e \quad (32)$$

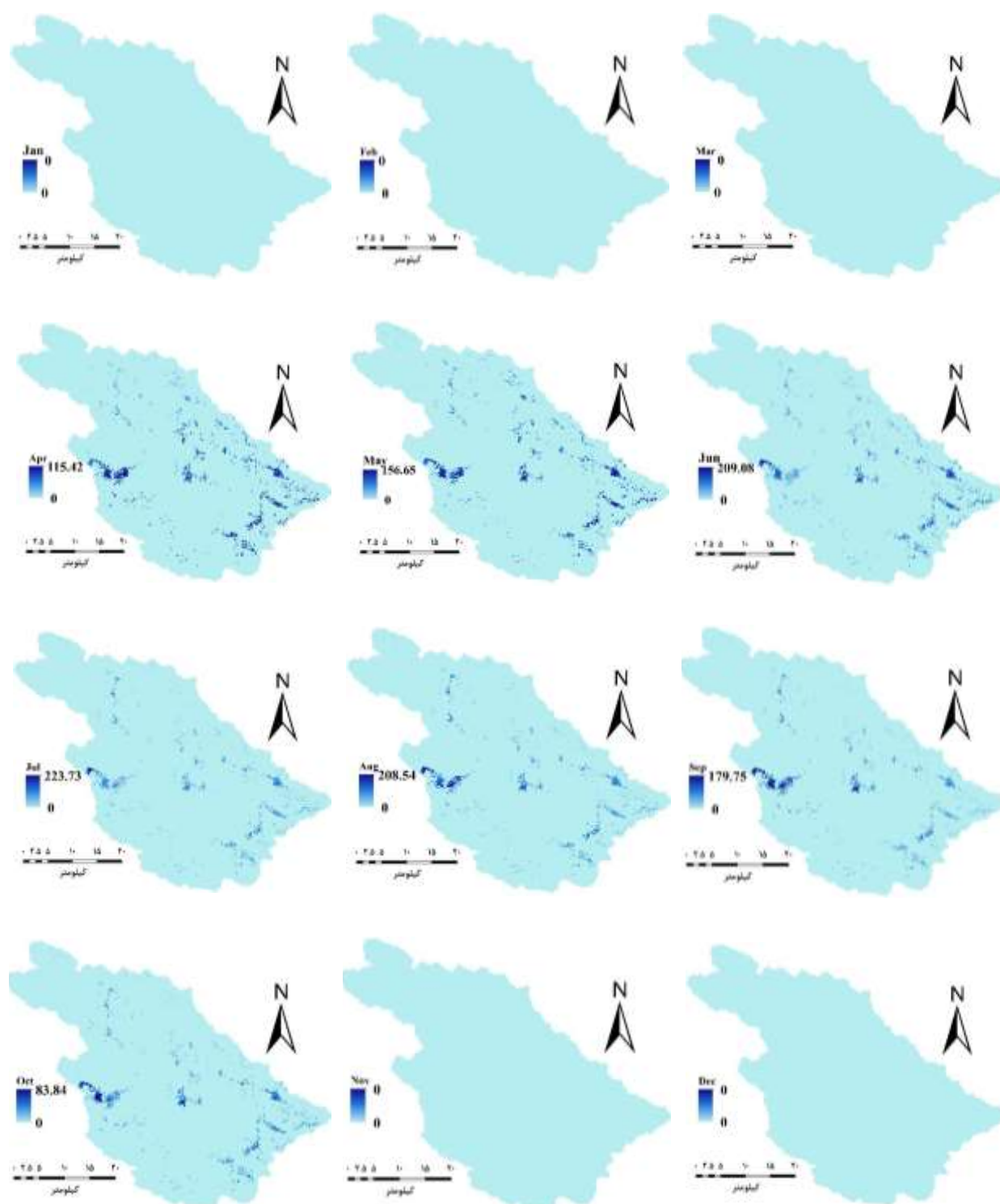
در شکل ۹ تصاویر مربوط به نیاز آب آبیاری برای سال ۲۰۲۲ ارائه شده است. نقشه‌های عمق آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق، بارندگی، دما و سرعت باد با توجه به داده‌های دریافتی تهیه شدند. نکته قابل ذکر این است که این نقشه‌ها، با ابعاد سلولی ۲۵۰ متر در ۲۵۰ متر، به مانند سایر نقشه‌های ورودی مدل، در بازه زمانی اکتبر ۲۰۰۰ تا سپتامبر ۲۰۲۳ در حوزه آبخیز خرم‌آباد در مقیاس زمانی ماهانه (۲۷۶ نقشه به ازای هر پارامتر) تهیه شدند.



شکل ۷- نقشه رستری LAI ماهانه در سال ۲۰۲۲



شکل ۸- نقشه رستری پوشش سطح برف ماهانه در سال ۲۰۲۲



شکل ۹- نقشه رستری آب آبیاری ماهانه در سال ۲۰۲۲

پس از تهیه همه داده‌ها و نقشه‌ها، مدل برای کل دوره آماری (اکتبر ۲۰۰۰ تا سپتامبر ۲۰۲۳)، اجرا شد. پس از اجرای مدل و بررسی مقادیر برآوردی و نتایج به‌دست‌آمده، واسنجی دستی (آزمون و خطا) و آنالیز حساسیت صورت گرفت. هفت پارامتر مورد استفاده در آنالیز حساسیت عبارتند از فاکتورهای تبخیر (α)، رواناب (Lp)، برگاب (a)، تأخیر در رواناب (x)، جریان پایه (β)، مشارکت در تغذیه ($\emptyset$) و ذوب برف (MF). برای این منظور ابتدا پارامترها به‌تدریج از یک مقدار پایه که در اولین اجرای مدل صورت گرفت، افزایش داده شد و اثر آن روی خروجی مدل بررسی و درصد آن نسبت به اجرای قبلی تعیین شد.

داده‌های دبی به‌عنوان داده‌های مشاهداتی برای ارزیابی کارایی مدل، موردنیاز است. لذا داده‌های روزانه دبی ثبت‌شده در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ (بازه زمانی مشابه با سایر داده‌ها) از ایستگاه هیدرومتری چمن‌انجیر که در خروجی حوضه قرار دارد، تهیه شد. داده‌های دبی با استفاده از نرم‌افزار تحت وب WHAT^۱ (Lim و همکاران، ۲۰۰۵) و با سه روش کمینه محلی^۲، فیلتر دیجیتالی تک‌پارامتره^۳ و فیلتر دیجیتالی برگشتی^۴ به رواناب سطحی و جریان پایه تفکیک شد. انتخاب بهترین روش براساس برآورد مقادیر کمترین و بیشترین جریان پایه و رواناب مستقیم صورت گرفت. بدین‌صورت که در فصل‌های خشک رواناب مستقیم صفر و تنها جریان بصورت پایه است. یا در فصول تر متناسب با وقوع رگبار در زمان‌های متفاوت، جریان پایه یا رواناب مستقیم افزایش یا کاهش می‌یابد. علاوه‌براین، انحراف معیار کمتر جریان پایه هم می‌تواند ملاک انتخاب بهترین روش تفکیک باشد. در این تحقیق روش فیلتر دیجیتالی تک‌پارامتره که به‌عنوان بهترین روش تفکیک جریان پایه انتخاب شد. در نهایت براساس نتایج دقیق‌ترین روش، رواناب روزانه از طریق میانگین‌گیری به رواناب ماهانه تبدیل شدند. لازم به ذکر است که ۷۰ درصد از این آمار برای ارزیابی مرحله واسنجی و ۳۰ درصد باقیمانده برای مرحله صحت‌سنجی استفاده و مدل برای دو حالت جریان سطحی (رواناب مستقیم) و جریان پایه، واسنجی شد.

-
1. WHAT: Web Based Hydrograph Analysis Tool
 2. Local Minimum method
 3. One Parameter Digital Filter
 4. Recursive Digital Filter

ج- ارزیابی مدل

به‌منظور ارزیابی مدل WetSpss، ضریب تعیین^۱ و ضریب نش- ساتکلیف در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شد. که آن‌ها به‌صورت روابط ۳۳ و ۳۴ است.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_{oi} - \bar{x}_o)(x_{si} - \bar{x}_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (x_{oi} - \bar{x}_o)^2 \sum_{i=1}^n (x_{si} - \bar{x}_s)^2} \quad (33)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (x_{si} - x_{oi})^2}{\sum_{t=1}^n (x_{oi} - \bar{x}_o)^2} \quad (34)$$

که در این روابط، x_{si} مقادیر برآورد شده متغیر، x_{oi} مقادیر مشاهداتی، n تعداد نمونه‌ها، $\bar{x}_o$ میانگین داده‌های مشاهداتی و $\bar{x}_s$ میانگین داده‌های برآورد شده، R^2 ضریب تعیین و NSE ضریب نش- ساتکلیف است. مقدار ضریب تعیین از صفر تا +۱ متغیر است که هر چه به +۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برازش بهتر مدل و مقدار +۱ نشان‌دهنده شبیه‌سازی کامل است. مقدار ضریب نش- ساتکلیف بین $-\infty$ تا +۱ متغیر بوده که هر چه به +۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برازش بهتر مدل است (Su و همکاران، ۲۰۱۵؛ McCabe و Legates، ۱۹۹۹).

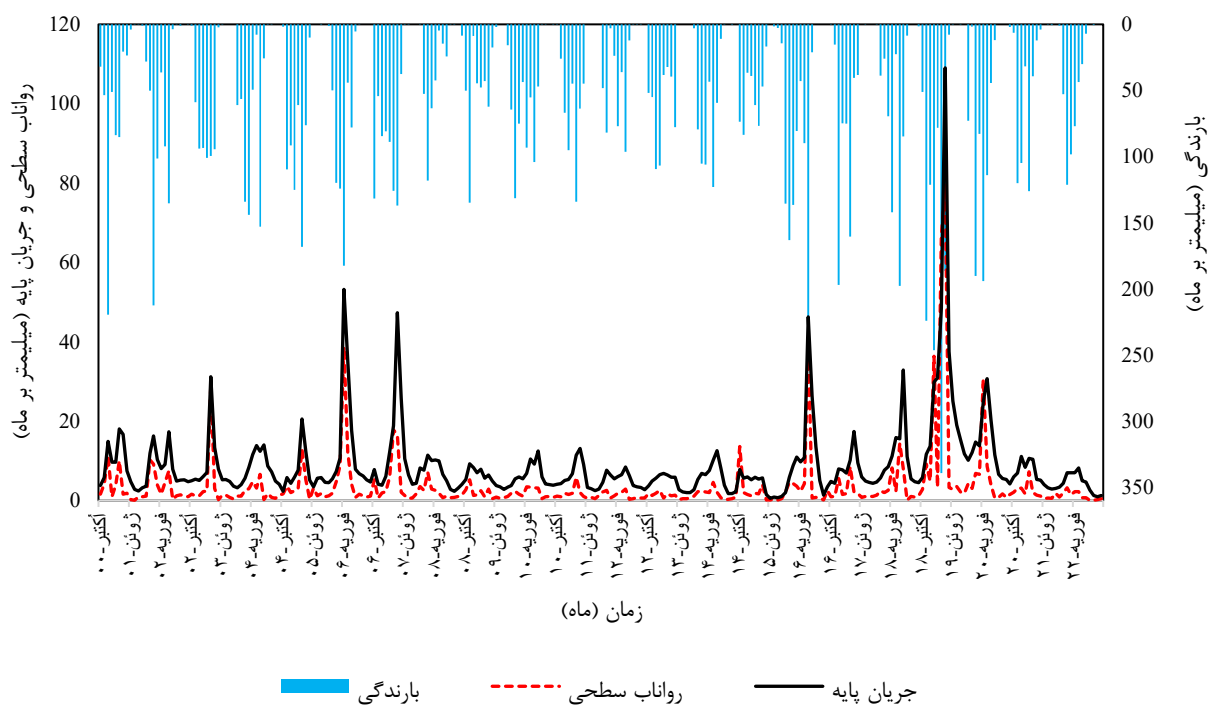
د- تعیین کمی اجزای بیلان آب ماهانه در حوزه آبخیز خرم‌آباد و زیرحوضه‌های وابسته به آن با استفاده از

مدل ماهانه WetSpss-M

پس از اطمینان از صحت و دقت مدل مورد استفاده، اجزای مختلف بیلان آب در حوضه استخراج شدند. این اجزا که شامل مقادیر تبخیر و تعرق واقعی، تغذیه، برگاب، رواناب سطحی و ضریب رواناب می‌شد، به‌صورت مکانی (در پهنه حوضه) و زمانی (در مقیاس ماهانه) تهیه شدند. هم‌چنین به منظور درک بصری و تحلیل الگوهای توزیع مکانی، نقشه‌های موضوعی برای کلیه پارامترهای مذکور تهیه شد. این نقشه‌ها هم برای کل حوضه به‌صورت یکپارچه و هم به تفکیک هر یک از زیرحوضه‌ها تهیه شدند که امکان مقایسه و سنجش دقیق‌تر رفتار هیدرولوژیکی در هر واحد را فراهم می‌کند. با تأکید بر هدف این پژوهش، ضریب رواناب به‌صورت میانگین ماهانه و هم به‌صورت توزیع مکانی استخراج شد تا تغییرات این پارامتر مهم نیز به‌خوبی نمایان شود.

– تفکیک آب پایه و رواناب مستقیم

داده‌های دبی مربوط به ایستگاه هیدرومتری چمنجیر واقع در خروجی حوضه به‌عنوان مقادیر مشاهداتی برای ارزیابی در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل Wetspass-M به دو سری روزانه رواناب سطحی و جریان پایه تفکیک شد. همان‌طور که در فصل سوم ذکر شد، این جداسازی با استفاده از نرم‌افزار تحت وب WHAT صورت گرفت. نتایج تفکیک جریان پایه از رواناب سطحی با استفاده از سه روش کمینه محلی، فیلتر دیجیتالی تک‌پارامتره و فیلتر دیجیتالی برگشتی نشان داد که روش فیلتر دیجیتالی تک‌پارامتره به‌علت برآورد بهتر مقادیر حدی جریان پایه و رواناب سطحی متناسب با وقوع یا عدم وقوع رگبار و همچنین انحراف معیار کمتر در داده‌های جریان پایه، بهترین روش است. نتایج جداسازی با استفاده از نرم‌افزار WHAT و براساس فیلتر دیجیتالی تک‌پارامتره ۰/۹۲۵ در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱۰- نمودار تفکیک دبی کل، رواناب سطحی و جریان پایه همراه با تغییرات بارندگی

براساس شکل ۱۰، تفکیک داده‌های دبی براساس روش فیلتر تک‌پارامتره نشان می‌دهد که با افزایش بارش، دبی هم روند افزایشی گرفته و نقطه اوج آن، تقریباً مطابق با مقدار بیشینه بارش است. به این معنی که در بسیاری از نقاط، بلافاصله پس از وقوع بارش، دبی به تغییرات پاسخ داده است. در زمان‌هایی که فراوانی وقوع بارش کم شده و مجموع دریافت مقادیر بارش کاهش یافته است، مقدار رواناب سطحی، جریان پایه و دبی کل کم شده است. به‌طور مثال مقدار رواناب مستقیم و دبی پایه در ابتدای دوره آماری مورد بررسی کم بوده و به‌تدریج افزایش پیدا می‌کند و در فوریه ۲۰۰۶ با شروع یک بارش به میزان ۱۸۲/۴۸ میلی‌متر، مقدار جریان رودخانه حدود ۹۱/۹۳ میلی‌متر بوده است. در اواسط دوره مورد بررسی (از آگوست ۲۰۰۷ تا فوریه ۲۰۱۶) که فراوانی وقوع بارش روزانه کم شده و مجموع دریافت مقدار بارش کاهش یافته است، مقدار رواناب مستقیم و جریان پایه کم شده است. با افزایش بارش از فوریه ۲۰۱۶ به بعد، پاسخ متغیرهای هیدرولوژیکی به مقادیر بارش افزایش یافته؛ البته مقدار آن نسبت به ابتدای دوره آماری بیشتر است. روند تغییرات بارش آوریل ۲۰۱۹ سیر نزولی به خود گرفته و تا پایان دوره مورد مطالعه روند نزولی را حفظ کرده است؛ این تغییرات اثر مستقیم در مقدار رواناب مستقیم و دبی پایه داشته است.

- واسنجی، آنالیز حساسیت و صحت‌سنجی مدل

واسنجی مدل براساس روش آزمون و خطا و آنالیز حساسیت هفت پارامتر (α , Lp, a, x, β , $\emptyset$ و MF) انجام شد. نتایج آنالیز حساسیت برخی پارامترها که عمدتاً حساسیت بیشتری روی خروجی مدل داشتند، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر بهینه‌شده پارامترهای واسنجی‌شده مدل Wetspass-M

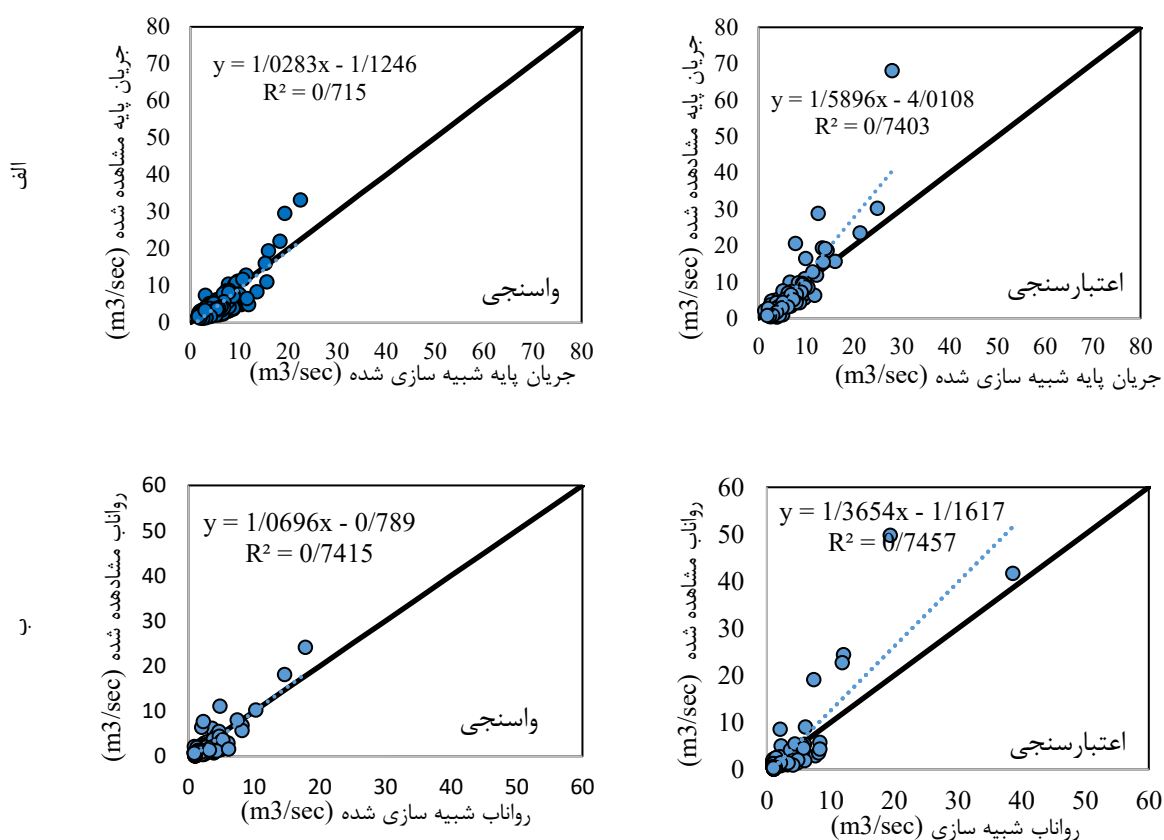
پارامتر	اجزای بیلان	مقدار بهینه‌شده	دامنه تغییرات
Lp	رواناب سطحی	۰/۸۵	۰/۴ - ۵/۵
A	تبخیر و تعرق	۱/۸۰	۰/۳ - ۶/۵
A	برگاب	۴/۵۰	۰/۳ - ۶/۵

پارامتر	اجزای بیلان	مقدار بهینه شده	دامنه تغییرات
X	تاخیر در رواناب	۰/۸۵	۰ - ۱
B	جریان پایه	۰/۷۵	۰ - ۱
$\emptyset$	مشارکت در تغذیه	۰/۳۰	۰ - ۱
MF	فاکتور ذوب برف	۰/۱۵	۰ - ۰/۱۵

۷۰ درصد داده‌ها برای واسنجی و مابقی داده‌ها در صحت‌سنجی به کار برده شد. نتایج واسنجی مدل در شکل

۱۱ و جدول ۴ ارائه شده است. مطابق با این شکل، مقادیر بالای R^2 و Nash و همچنین برازش مناسب مقادیر

شبیه‌سازی شده با مشاهداتی، مبین دقت مدل در برآورد اجزای بیلان حوضه مورد مطالعه است.



شکل ۱۱- نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل Wetspass-M الف- جریان پایه ب-

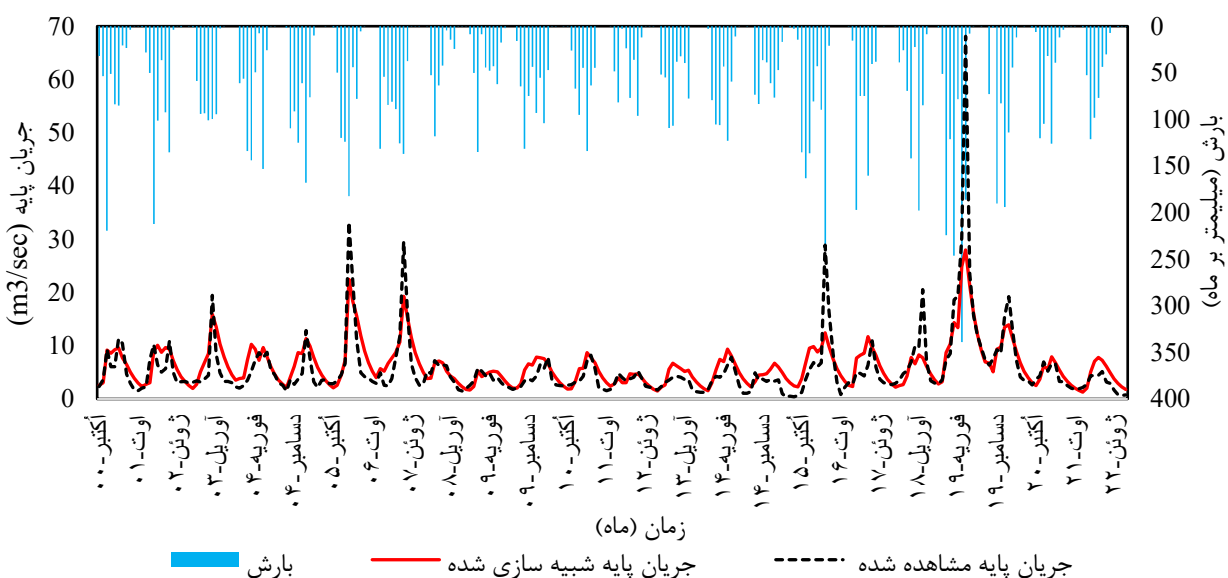
رواناب سطحی

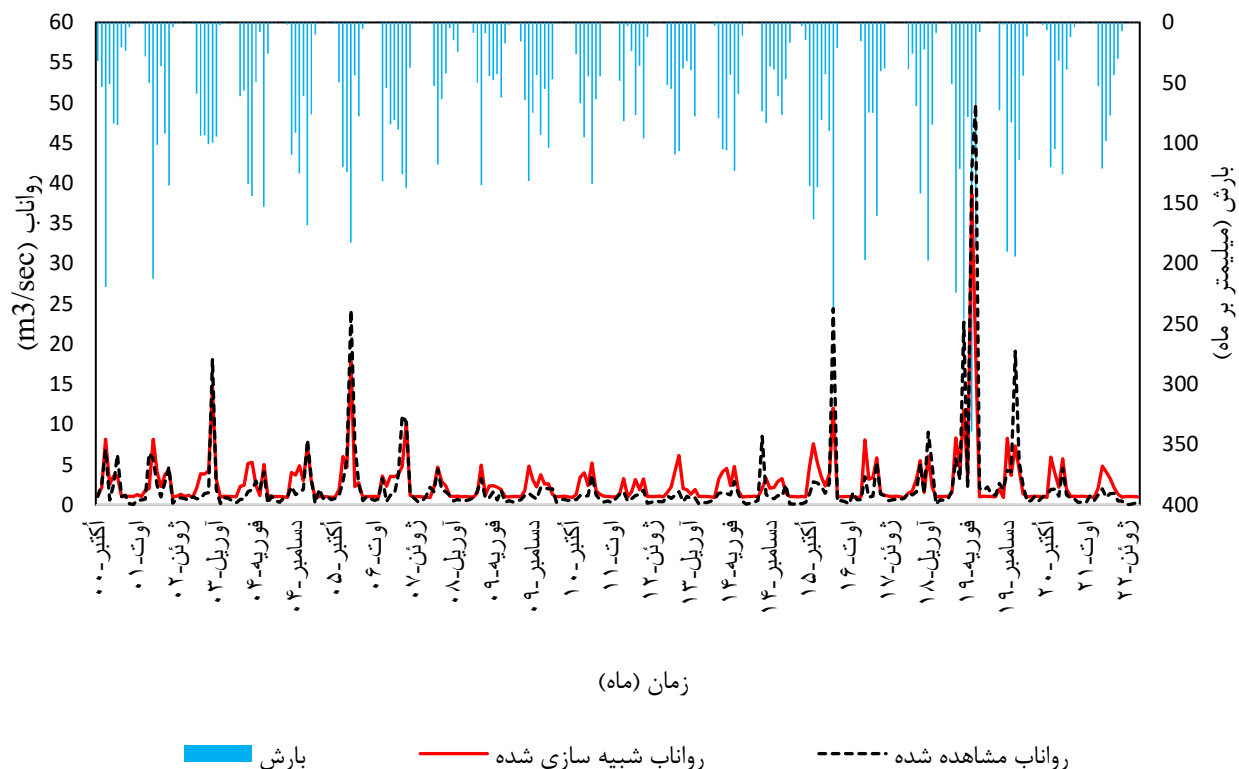
جدول ۴- نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل WetSpas-M

پارامتر	واسنجی		صحت‌سنجی	
	Nash	R ²	Nash	R ²
جریان پایه	۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۶۷	۰/۷۴
رواناب	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۶۹	۰/۷۰

جریان پایه و رواناب شبیه‌سازی شده

همان‌گونه که در شکل ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است رابطه قابل قبولی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. تغییرات سری زمانی جریان پایه و رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده نشان می‌دهد که مدل توانسته به‌خوبی این مقادیر را در حوضه شبیه‌سازی کند.





شکل ۱۳- سری زمانی جریان پایه شبیه سازی شده و رواناب مشاهده شده در مقابل بارش

- برآورد اجزای بیلان حوزه آبخیز مدل ماهانه WetSpas-M

پس از تأیید دقت مدل با استفاده از معیارهای ارزیابی آماری، مدل قادر به ارائه اجزای مختلف بیلان شد. نتایج اجزای بیلان سالانه شامل تغذیه، رواناب، تبخیر و تعرق واقعی و برگاب حوزه آبخیز خرم آباد به صورت نمودار در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

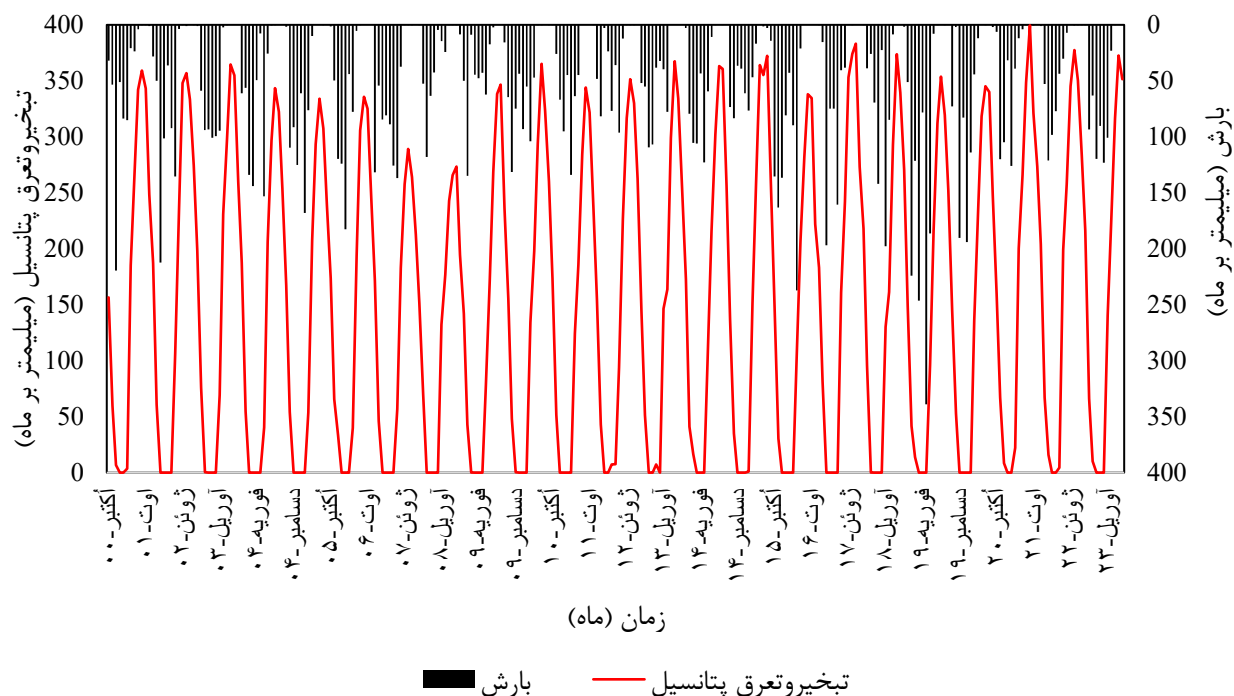


شکل ۱۴- نمودار اجزای بیلان سالانه در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ در حوزه آبخیز خرم‌آباد در مدل ماهانه

WetSpass-M

-تبخیر و تعرق پتانسیل

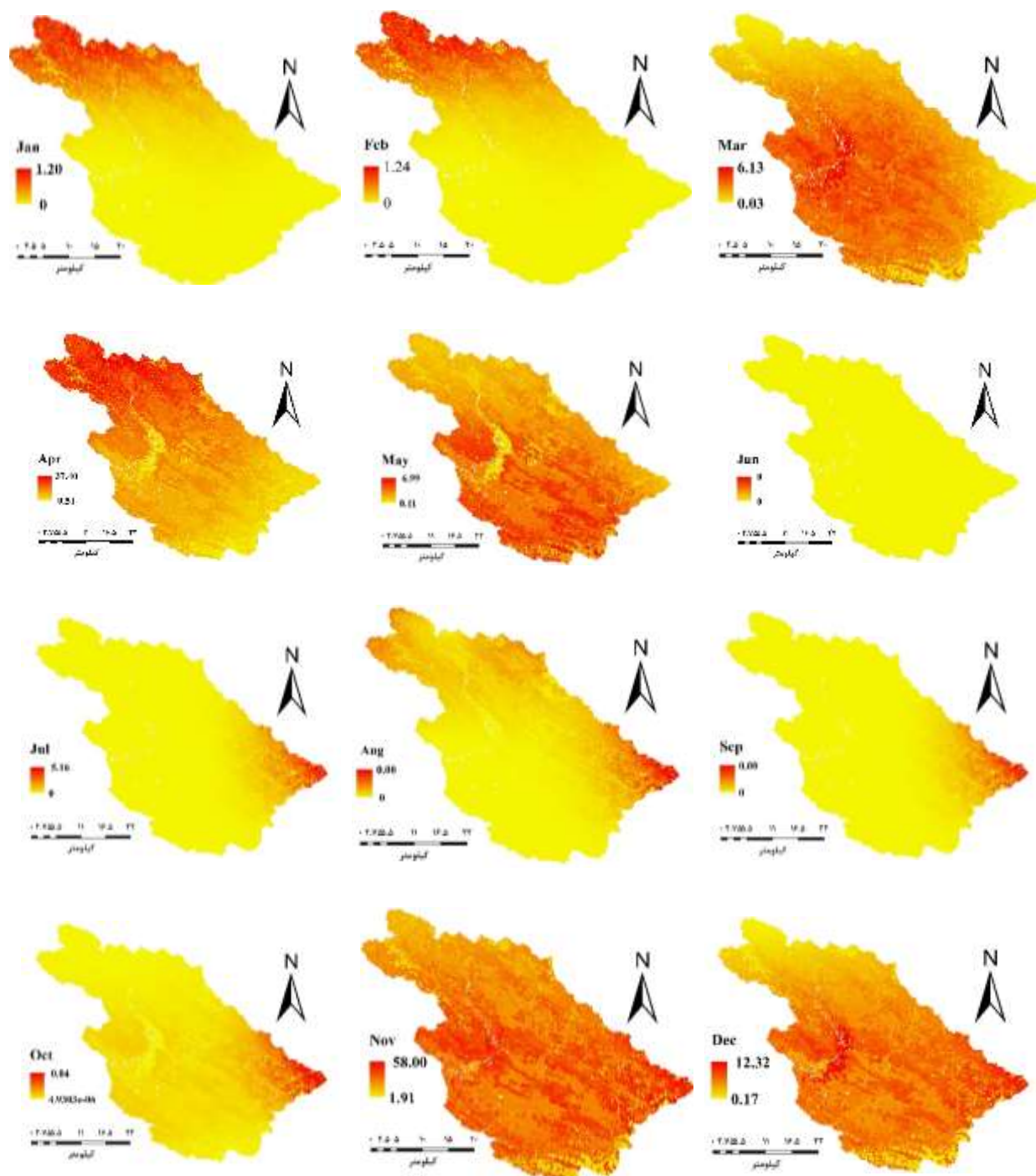
به دلیل رخ دادن بارش در فصل سرد، در حوزه آبخیز خرم‌آباد مانند اغلب حوضه‌های کشور، بین دما و بارش رابطه معکوس وجود دارد. حداکثر بارش، زمانی دریافت می‌شود که محدودیت دمایی، اجازه رشد به محصولات زراعی و کشاورزی نمی‌دهد (عزیزی، ۱۳۷۹). این مطلب با مشاهده ارقام تبخیر و تعرق پتانسیل به خوبی آشکار می‌شود. تبخیر و تعرق پتانسیل تابعی از دما است و با بارندگی، رابطه غیرمستقیمی دارد؛ به این معنی که با افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل، بارندگی کاهش یافته است و بالعکس (شکل ۱۵).



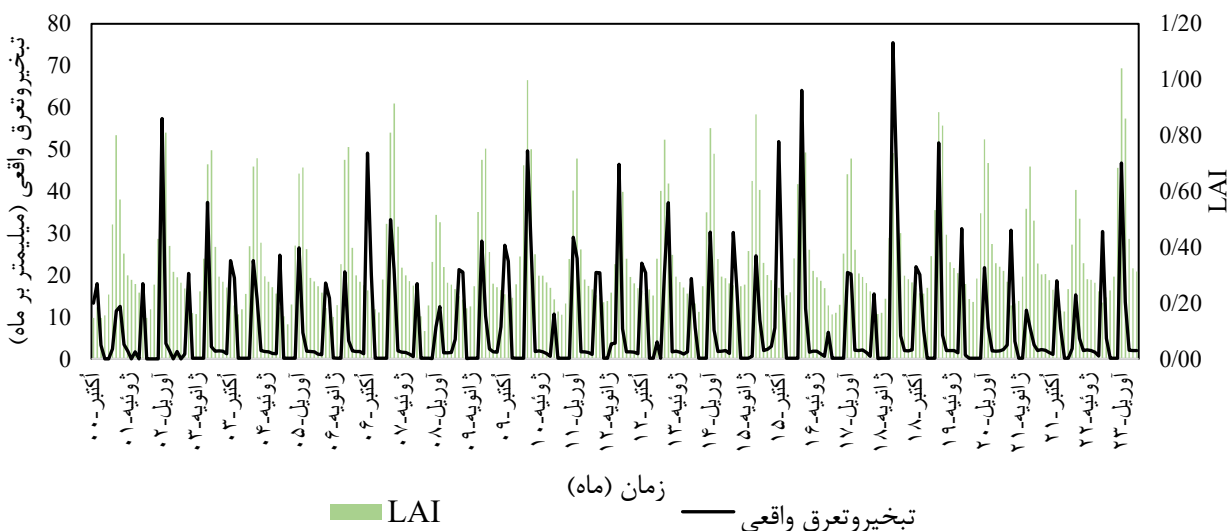
شکل ۱۵- تغییرات زمانی تبخیر و تعرق پتانسیل و بارش در حوزه آبخیز خرم‌آباد

- تبخیر و تعرق واقعی

تبخیر و تعرق واقعی، از جمله مهم‌ترین اجزای بیلان در حوضه محسوب می‌شود و محاسبه این فاکتور به منظور انجام محاسبات و برنامه‌ریزی‌های مربوط به نیاز آبی اهمیت بالایی دارد (عظیمی و همکاران، ۱۳۹۴). شکل ۱۶، تغییرات مکانی میانگین ماهانه تبخیر و تعرق واقعی در حوزه آبخیز خرم‌آباد را برای سال ۲۰۲۲ نمایش داده است. با توجه به شکل، قسمت‌های پوشیده از کاربری کشاورزی و گیاهان طبیعی حوضه مقدار تبخیر و تعرق واقعی بیشتری را نسبت به مکان‌هایی با پوشش گیاهی کمتر و یا فاقد پوشش گیاهی نشان می‌دهند. از نظر توزیع مکانی و با توجه به نقشه کاربری اراضی (شکل ۱۷)، کاربری‌های کشاورزی، جنگل با پوشش متوسط و اراضی دیم دارای بیشترین میزان تبخیر و تعرق واقعی هستند. علت این امر ممکن است بالاتر بودن تراکم گیاهی باشد. به عنوان دلیلی مرتبط با توجه به نقشه‌های شاخص سطح برگ (شکل ۷) بیشترین مقدار تبخیر و تعرق واقعی دقیقاً منطبق بر مناطقی است که بیشترین شاخص سطح برگ را دارند؛ شکل ۱۷ از نظر توزیع زمانی نیز این امر را تأیید می‌کند.



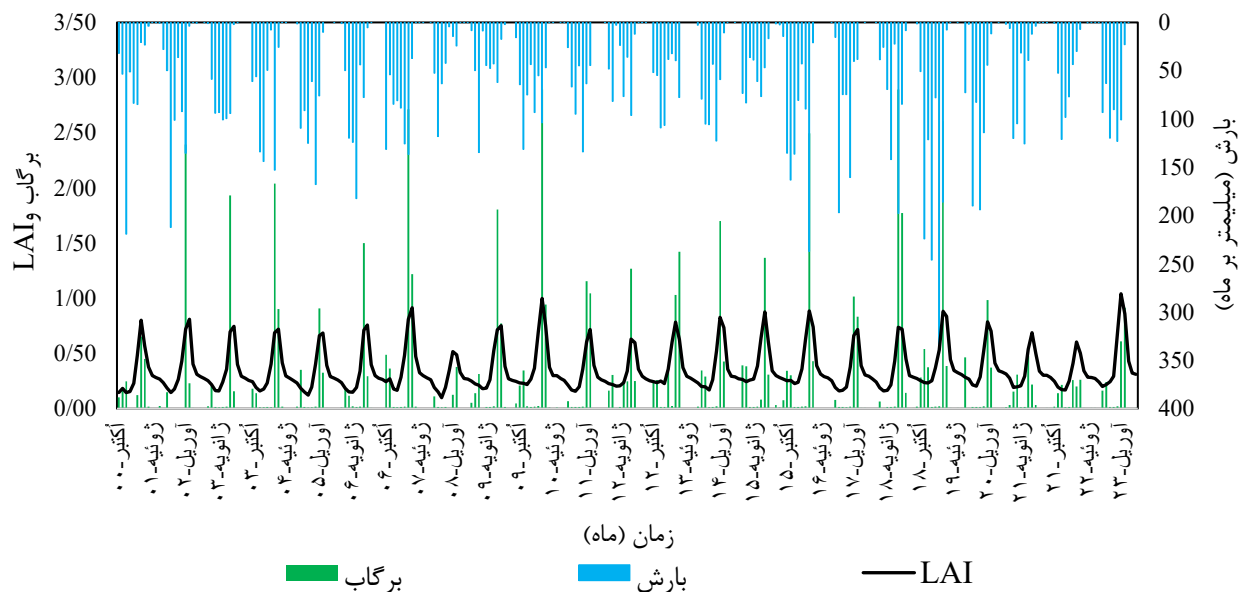
شکل ۱۶- تغییرات مکانی میانگین ماهانه تبخیر و تعرق واقعی (میلی‌متر)



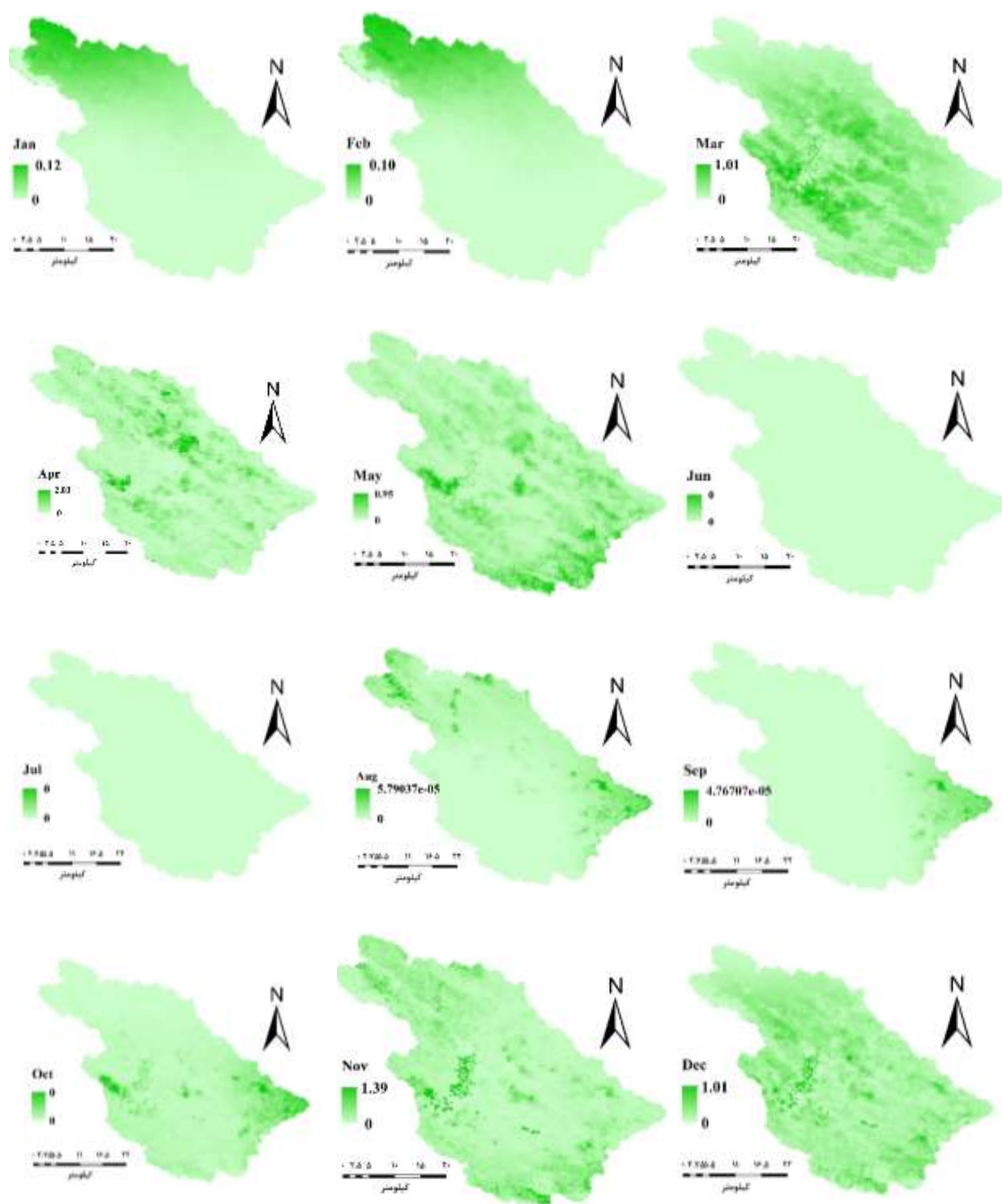
شکل ۱۷- تغییرات زمانی LAI و میانگین ماهانه تبخیر و تعرق واقعی (میلی متر)

- برگاب

با توجه به شکل ۱۸، به دلیل روش فرموله کردن برگاب، تغییرات آن از نوسانات بارش و شاخص سطح برگ تبعیت می کند و نسبت به تغییرات باران و LAI پاسخ سریعی نشان داده است. شکل ۱۹ تغییرات مکانی میانگین ماهانه برگاب در حوزه آبخیز بهشت آباد نمایش داده است.



شکل ۱۸- تغییرات زمانی بارش، LAI و میانگین ماهانه برگاب (میلی متر)

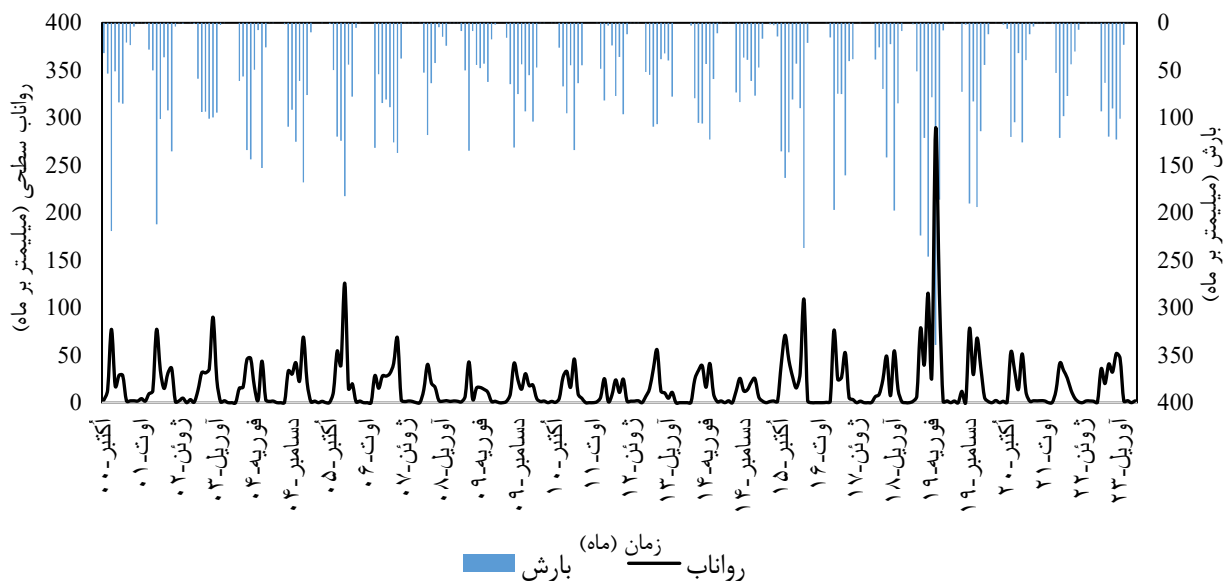


شکل ۱۹- تغییرات مکانی میانگین ماهانه برگاب (میلی‌متر)

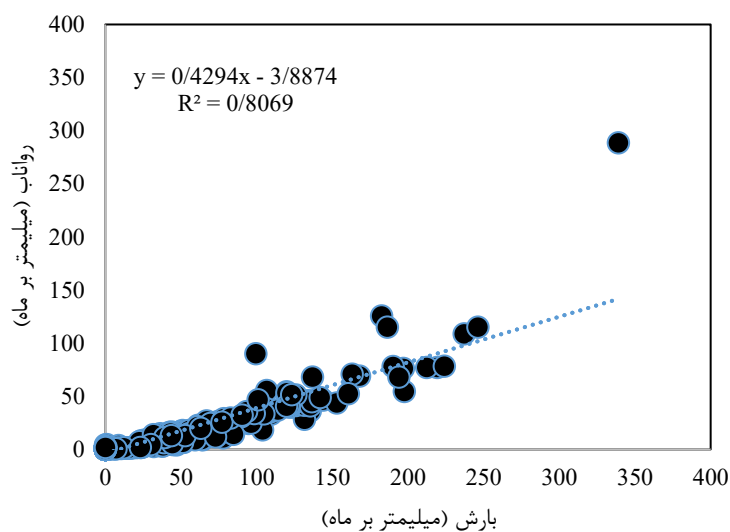
- رواناب سطحی

رابطه بین بارش و تغییرات زمانی میانگین ماهانه رواناب از الگوی پیچیده، اما قابل پیش‌بینی تبعیت می‌کند که تحت تأثیر مستقیم ویژگی‌های حوضه آبریز قرار دارد. در مقیاس ماهانه، افزایش میانگین بارش به‌طور کلی منجر به افزایش رواناب می‌شود. مطابق با شکل ۲۰ افزایش بارش در هر ماه بلافاصله و به‌صورت مستقیم باعث افزایش میانگین رواناب در همان ماه می‌شود. این پاسخ آنی نشان‌دهنده شرایط خاص هیدرولوژیکی منطقه است که امکان انتقال سریع آب را فراهم می‌کنند. در ماه‌های پربارش، رواناب به سرعت به اوج خود می‌رسد و در ماه‌های خشک بلافاصله کاهش می‌یابد. این رفتار مستقیم و بدون تأخیر، مدیریت منابع آب و پیش‌بینی سیلاب را در منطقه تسهیل می‌کند، چرا که منحنی رواناب ماهانه به‌طور دقیق الگوی بارش همان ماه را بازتاب می‌دهد. شکل ۲۱ نشان می‌دهد که در حوزه آبخیز خرم‌آباد رابطه بین بارش و تغییرات زمانی میانگین ماهانه رواناب از الگوی فوری و بدون تأخیر پیروی می‌کند ($R^2 = 0.80$). علاوه بر میزان بارش، شدت و مدت آن نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارد، به‌طوری که بارش‌های سنگین و کوتاه‌مدت حتی در ماه‌های نسبتاً خشک نیز می‌توانند باعث ایجاد اوج‌های ناگهانی در منحنی رواناب ماهانه شوند. در مقابل، در ماه‌های گرم و با تبخیر و تعرق بالا، حتی در صورت وقوع بارش، مقدار رواناب به‌دلیل تلفات رطوبتی زیاد، به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین، تحلیل تغییرات زمانی میانگین ماهانه رواناب نه تنها بازتابی از الگوهای بارش، بلکه تلفیقی از شرایط هیدرولوژیک حوضه از جمله وضعیت رطوبتی خاک، پوشش گیاهی و ویژگی‌های زمین‌شناسی است.

در منطقه مورد مطالعه، الگوی مکانی رواناب به‌طور مستقیم از توزیع جغرافیایی بارش و ویژگی‌های فیزیکی حوضه تبعیت می‌کند (شکل ۲۲). مناطقی با میانگین بارش ماهانه بیشتر، کانون‌های اصلی تولید رواناب هستند، اما این الگو به سادگی کپی‌برداری از نقشه بارش نیست. عواملی مانند شیب تند توپوگرافی، نفوذپذیری کم خاک، و تراکم شبکه زهکشی طبیعی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تشدید تولید رواناب ایفا می‌کنند.



شکل ۲۰- تغییرات زمانی بارش و میانگین ماهانه رواناب (میلی‌متر)



شکل ۲۱- رابطه خطی بارش و تغییرات زمانی میانگین ماهانه رواناب (میلی‌متر)

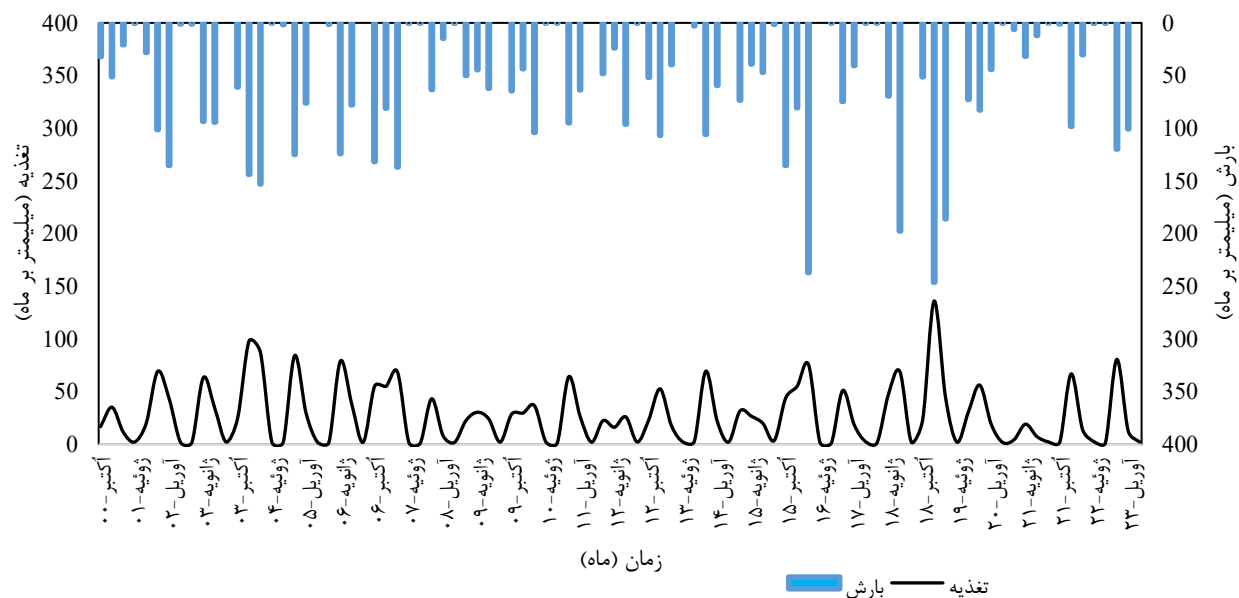


شکل ۲۲- تغییرات مکانی میانگین ماهانه رواناب سطحی (میلی متر)

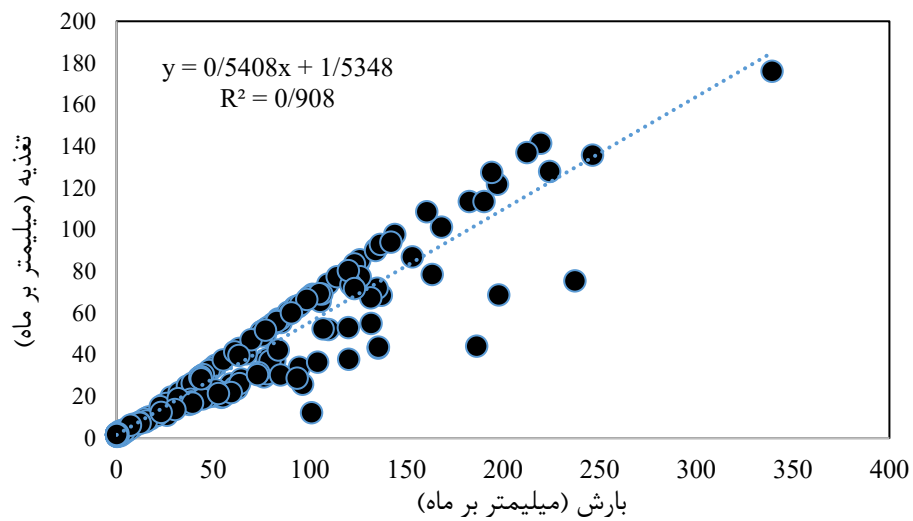
تغذیه

در حوزه آبخیز خرم‌آباد، رابطه بین بارش و تغییرات زمانی میانگین ماهانه تغذیه، یک همبستگی مستقیم را نشان می‌دهد. در این سیستم، بارش به عنوان محرک اصلی، بلافاصله بر تغذیه تأثیر می‌گذارد، به طوری که نوسانات ماهانه بارش به صورت هم‌زمان در میانگین ماهانه تغذیه کرد می‌یابد. اوج‌گیری بارش در یک ماه خاص، منجر به اوج‌گیری مقدار تغذیه در همان ماه می‌شود. مطابق با شکل ۲۳ الگوی زمانی تغذیه از الگوی بارش ماهانه تبعیت می‌کند و شکل ۲۴ نشان‌دهنده وجود ارتباط آماری قوی بین این دو متغیر در مقیاس ماهانه است.

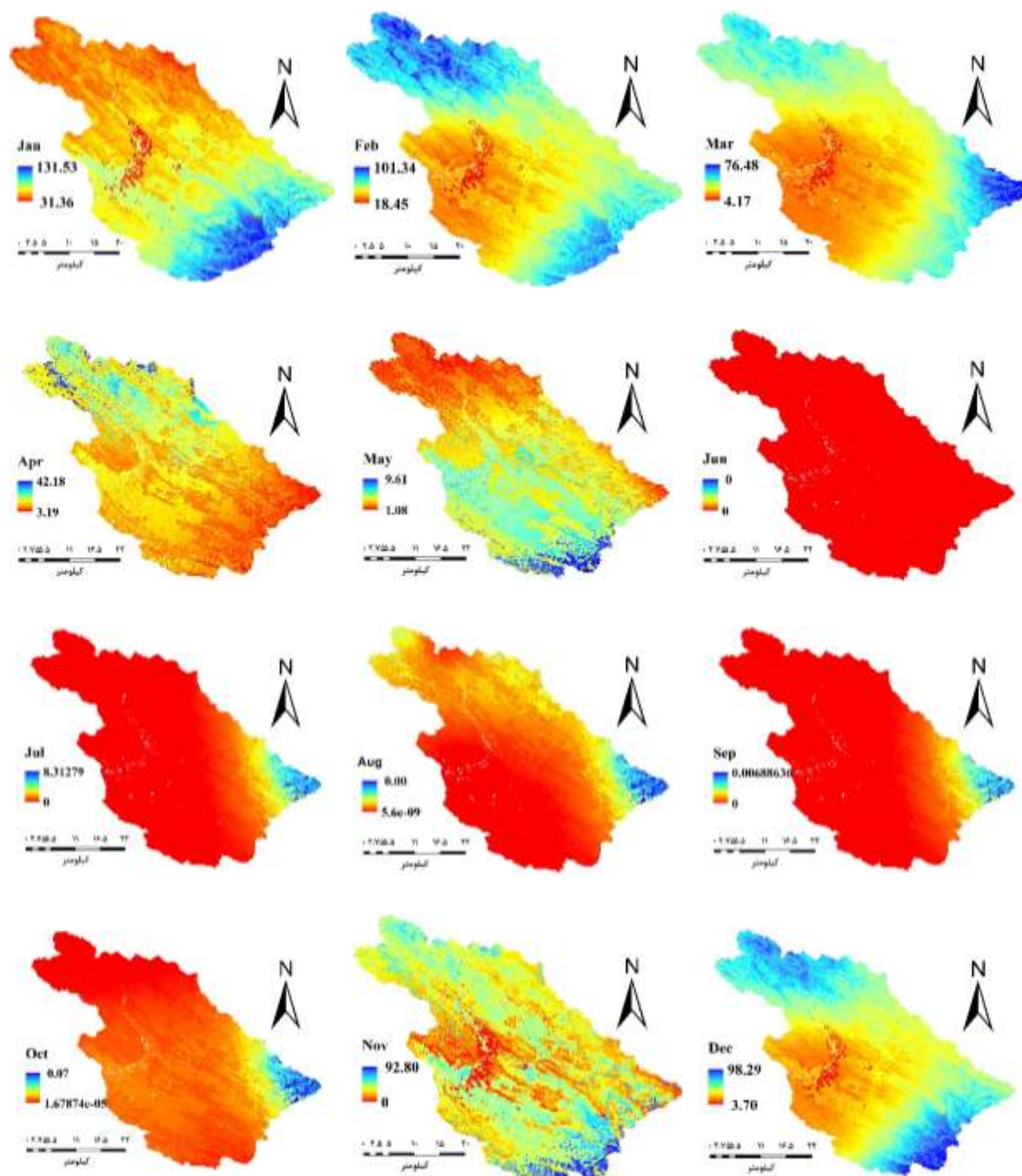
بررسی توزیع مکانی تغذیه نیز به وضوح نشان می‌دهد (شکل ۲۵) که تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی از یک الگوی فصلی و مکانی آشکاری پیروی می‌کند. در ماه‌های گرم و خشک سال، با کاهش محسوس بارش، میزان تغذیه در سرتاسر منطقه به حداقل خود می‌رسد؛ این کاهش در تمامی عرصه‌ها مشهود است. در مقابل، با آغاز فصل پربارش، میزان تغذیه در کل منطقه افزایش می‌یابد. باین‌حال، توزیع مکانی این تغذیه یکنواخت نیست.



شکل ۲۳- تغییرات زمانی بارش و تغذیه آب زیرزمینی در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ (میلی‌متر)



شکل ۲۴- رابطه بین مقادیر تغذیه با بارش (میلی متر بر ماه)



شکل ۲۵- تغییرات مکانی میانگین ماهانه تغذیه (میلی‌متر)

نتایج تعیین کمی اجزای بیلان آب ماهانه در حوزه آبخیز خرم آباد

مدل‌های هیدرولوژیکی متنوعی به‌منظور برآورد دقیق اجزای بیلان آب، طراحی و توسعه یافته‌اند، اما یک مدل کارآمد است که توانایی شبیه‌سازی، ارزیابی و پیش‌بینی رفتار سامانه موردنظر را با دقت و قابلیت اطمینان بالا داشته باشد. هرچند مدل‌های یکپارچه در سطح کلان می‌توانند وضعیت کلی یک سامانه هیدرولوژیک را بازنمایی کنند، غالباً فاقد توانایی لازم برای بازتولید جزئیات مکانی و زمانی فرآیندهای درون سامانه‌ای هستند. براین اساس، در پژوهش حاضر از مدل مدل ماهانه WetSpa-M استفاده شد تا اجزای بیلان محاسبه شده به واقعیت نزدیک‌تر شوند. نتایج تعیین مؤلفه‌های بیلان آب در حوزه آبخیز خرم‌آباد به شرح زیر است:

الف- بررسی نتایج تفکیک جریان پایه و رواناب سطحی از دبی خروجی در حوضه مطالعه نشان داد که ۷۱ درصد جریان سطحی در حوضه خرم‌آباد، مربوط به آب پایه است. این مقدار که با استفاده از روش فیلتر دیجیتالی تک‌پارامتره انجام شد. میزان جریان پایه، بسته به خصوصیات فیزیکی و زمین‌شناسی و همچنین شدت و مدت بارندگی حوزه آبخیز، متفاوت است. این بخش از نتایج با نتایج Batelaan و DeSmidt (۲۰۰۷) و Van Camp و همکاران (۲۰۱۰) سازگار است. آن‌ها، مقدار جریان پایه در حوضه‌های مورد مطالعه خود را بین ۶۰ تا ۸۹ درصد برآورد کرده‌اند. در هر حال می‌توان اظهار داشت حوضه خرم‌آباد ذخیره حوضه‌ای قابل توجهی دارد. همچنین تبعیت هیدروگراف جریان، رواناب مستقیم و دبی پایه از بارندگی، مبین دقت روش اجرا شده (فیلتر دیجیتالی تک‌پارامتره) در جداسازی جریان است. Nathan و McMahon (۱۹۹۰)، Eckhardt (۲۰۰۸) و سلیمانی مطلق (۱۳۹۵) روش‌های فیلتر دیجیتالی را دقیق‌ترین و سریع‌ترین روش‌های جداسازی آب پایه در تحقیقات خود معرفی کرده‌اند که نتایج این بخش را تأیید می‌کند.

ب- ارزیابی دقت مدل WetSpa-M در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد که بین مقادیر شبیه‌سازی شده و تفکیک شده جریان پایه، ضریب تعیین ۷۲ درصد و نش‌ساتکلیف ۶۷ درصد وجود دارد. همچنین ارزیابی دقت مدل در مورد رواناب شبیه‌سازی شده و تفکیک شده نشان‌دهنده ضریب تعیین ۷۵ درصد و نش‌ساتکلیف ۶۹ درصد

----- برآورد تغییرات زمانی- مکانی مؤلفه‌های بیلان آب با استفاده از مدل WetSpa-M/ ۴۶

است. مشابه با این مطالعه، عبدالهی (۲۰۱۵) در منطقه بلک‌ولتا، ضریب تعیین و ضریب کارایی نش‌ساتکلیف را در برآورد جریان پایه به‌ترتیب ۹۰ و ۸۲ درصد به‌دست آورد. هم‌چنین مقدار این دو معیار در برآورد رواناب منطقه Black Volta به‌ترتیب ۸۴ و ۷۷ درصد به‌دست آمد. بنابراین نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل WetSpa-M تطبیق‌پذیری و توانایی بالایی در برآورد اجزای بیلان به‌صورت زمانی و مکانی در مناطق مختلف دنیا به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد که عبدالهی (۲۰۱۵) نیز در تحقیق خود این موضوع را تأیید کردند.

ارزیابی دقت مدل WetSpa-M در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد که بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و تفکیک‌شده جریان پایه، ضریب تعیین و ضریب نش-ساتکلیف به‌ترتیب برابر با ۷۲ و ۶۷ درصد است. هم‌چنین، ارزیابی رواناب شبیه‌سازی‌شده و تفکیک‌شده نشان‌دهنده ضریب تعیین ۷۵ درصد و ضریب نش-ساتکلیف ۶۹ درصد بود. نتایج این پژوهش با یافته‌های عبدالهی (۲۰۱۵) در حوضه بلک‌ولتا هم‌خوانی دارد؛ به‌طوری که وی برای جریان پایه مقادیر ضریب تعیین و ضریب نش-ساتکلیف را به‌ترتیب ۹۰ و ۸۲ درصد و برای رواناب ۸۴ و ۷۷ درصد گزارش کرد. البته باید توجه داشت که حوضه بلک‌ولتا از نظر شرایط اقلیمی، ویژگی‌های فیزیوگرافی، پوشش اراضی و خصوصیات هیدروژئولوژیکی با حوزه آبخیز خرم‌آباد تفاوت‌هایی دارد و همین تفاوت‌ها می‌تواند بر عملکرد مدل و مقادیر شاخص‌های ارزیابی تأثیرگذار باشد. با این وجود، دستیابی به مقادیر قابل قبول شاخص‌های آماری در هر دو مطالعه نشان می‌دهد که مدل WetSpa-M از قابلیت مناسبی برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب در شرایط محیطی متفاوت، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، برخوردار است.

د- در حوزه آبخیز خرم‌آباد تبخیر و تعرق پتانسیل تابعی از دما است و با بارندگی، رابطه غیرمستقیمی دارد؛ به این معنی که با افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل، بارندگی کاهش یافته است و بالعکس. بیشینه بارش زمانی دریافت می‌شود که محدودیت دمایی، اجازه رشد به محصولات زراعی و کشاورزی نمی‌دهد، این مطلب با مشاهده ارقام تبخیر و تعرق پتانسیل به خوبی آشکار می‌شود که با مطالعات عزیزی (۱۳۷۹) هم‌خوانی دارد.

د- نتایج بررسی‌ها نشان داد که تبخیر و تعرق واقعی در قسمت‌های پوشیده از کاربری کشاورزی و گیاهان طبیعی حوضه مقدار بیشتری را نسبت به مکان‌هایی با پوشش گیاهی کمتر و یا فاقد پوشش گیاهی نشان می‌دهند. از

نظر توزیع مکانی و با توجه به نقشه کاربری اراضی کاربری‌های کشاورزی، جنگل با پوشش متوسط و اراضی دیم دارای بیشترین میزان تبخیر و تعرق واقعی هستند. علت این امر ممکن است بالاتر بودن تراکم گیاهی باشد. به عنوان دلیلی مرتبط با توجه به نقشه‌های شاخص سطح برگ بیشترین مقدار تبخیر و تعرق واقعی دقیقاً منطبق بر مناطقی است که بیشترین شاخص سطح برگ را دارند.

ه- نتایج بررسی‌ها نشان داد که تغییرات برگاب به‌طور مستقیم تحت تأثیر نوسانات بارش و شاخص سطح برگ قرار دارد. این وابستگی موجب شده که برگاب نسبت به تغییرات بارندگی و وضعیت پوشش گیاهی واکنش سریعی نشان دهد که در مطالعه Wang و Guo (۲۰۲۴) اشاره شده است. چنین رفتاری بیانگر حساسیت بالای این شاخص به تغییرات کوتاه‌مدت شرایط هیدرواقليمی بوده و آن را به شاخصی مناسب برای پایش سریع تغییرات پوشش گیاهی و رخدادهای خشکسالی کوتاه‌مدت تبدیل می‌کند.

و- نتایج بررسی‌ها نشان داد که میانگین ماهانه رواناب سطحی در حوزه آبخیز خرم‌آباد طی دوره ۲۰۲۳-۲۰۰۰ دارای رابطه خطی و مستقیم با بارش ماهانه است. به‌طوری که با افزایش بارش، مقدار رواناب ماهانه نیز افزایش می‌یابد و در ماه‌های کم‌بارش، رواناب کاهش پیدا می‌کند. این نتایج بیانگر وجود یک ارتباط آماری قوی بین بارش و رواناب در مقیاس زمانی ماهانه است و نشان می‌دهد که تغییرات رواناب تا حد زیادی از الگوی تغییرات بارش تبعیت می‌کند.

ح- بررسی‌ها نشان داد که در حوزه آبخیز خرم‌آباد، تغییرات میانگین ماهانه تغذیه به‌طور مستقیم تحت تأثیر نوسانات بارش قرار دارد، به‌طوری که افزایش یا کاهش بارش به‌ترتیب موجب افزایش یا کاهش میزان تغذیه شده و وجود همبستگی مستقیم بین این دو متغیر را تأیید می‌کند (ضریب تبیین برابر ۰/۹۰).

ملاحظات اخلاقی

تضاد منافع نویسندگان: نویسندگان اعلام می‌دارند که این اثر با رعایت کامل اخلاق نشر تهیه شده و هیچ‌گونه

سرقت ادبی، رفتار سوء، جعل داده‌ها، ارسال یا انتشار هم‌زمان در جای دیگر صورت نپذیرفته است.

مشارکت نویسندگان: نویسنده اول، تهیه و نگارش نشریه، اجرای مدل و تهیه جدول‌ها و شکل‌ها؛ نویسنده دوم،

همکاری در تحلیل داده‌ها و نتایج؛ نویسنده سوم، مشارکت در مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها و نتایج.

بیانیه استفاده از هوش مصنوعی: در فرآیند نگارش این دستورالعمل، از ابزارهای هوش مصنوعی به عنوان ابزار

کمکی برای بهبود روان‌نویسی متون فارسی و ویرایش نگارشی استفاده شده است. کلیه محتوای علمی،

فرمول‌بندی‌های ریاضی، تحلیل داده‌ها و نتیجه‌گیری‌های نهایی، براساس دانش تخصصی نویسندگان و با تکیه بر

منابع معتبر علمی صورت پذیرفته و هوش مصنوعی نقشی در تولید محتوای اصلی، تحلیل‌های کمی و کیفی، یا

تصمیم‌گیری‌های علمی اثر نداشته است. تمامی مطالب ارائه‌شده توسط نویسندگان بازبینی، ویرایش و تأیید نهایی

شده و مسئولیت کامل صحت محتوای علمی و فنی نشریه بر عهده نویسندگان است.

خوداظهاری: منشأ این نشریه فنی گزارش پروژه تحقیقاتی تحت عنوان " اثر دوره‌های خشکسالی و ترسالی بر

تغییرات ضریب رواناب در حوزه آبخیز خرم‌آباد" است، که در آن از مدل Wetspass-M برای برآورد اجزای بیلان

استفاده شده و نتایج عددی در گزارش موجود است. در این نشریه آموزش گام به گام، تشریح مبانی نظری و

راهنمای اجرایی برای کاربران ارائه شد.

منابع

- بیاتی، س.، نصر اصفهانی، م.، عبدلهی، خ. ۱۳۹۷. ارزیابی بیلان آب ماهانه و بررسی مقدار حجمی جریان پایه

فیلتر شده و جریان کل در حوضه آبخیز ونک. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۹(۱۸): ۱۴۶-۱۵۶.

- بشیریان، ف.، رحیمی، د.، موحدی، س.، ذاکری نژاد، ر. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی رواناب، تبخیر، برگاب و تغذیه آب

زیرزمینی دریاچه ارومیه در دوره‌های مرطوب و خشک. مجله پژوهش آب ایران، ۱۵(۲ (۳۸ پیاپی)): ۸۵-۹۵.

- دولت‌آبادی، س.، امیرآبادی‌زاده، م.، زارعی، م. ۱۴۰۱. ارزیابی مدل WetSpa-M در برآورد پاسخ

هیدرولوژیکی حوضه نیشابور-رخ به تغییر اقلیم سال‌های آتی. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۶(۵): ۶۴۴-۶۲۹.

- سلیمانی‌مطلق، م. ۱۳۹۵. ارزیابی بیلان آب زیرزمینی با تأکید بر تفکیک کسری ناشی از خشکسالی و بهره‌برداری بیش از حد مجاز آبخوان. رساله دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری. دانشگاه کاشان، ۲۲۰ ص.
- عظیمی، ع.، رنگزن، ک.، کابلی‌زاده، م.، خرمیان، م. ۱۳۹۴. برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از سنجش از دور، شبکه‌های عصبی مصنوعی و مقایسه نتایج آن با روش پنمن-مانتیت-فائو در باغات مرکبات شمال خوزستان. مجله سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۴): ۶۱-۷۵.
- علیزاده، ا. ۱۳۸۹. رابطه آب و خاک و گیاه (ویرایش سوم- چاپ یازدهم). انتشارات دانشگاه امام رضا. ۶۱۵ صفحه.
- عزیزی، ق. ۱۳۷۹. برآورد بارش مؤثر در رابطه با کشت گندم دیم (مورد: دشت خرم‌آباد). مجله پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۹: ۱۲۳-۱۱۵.
- فتاحی، ا. و وظیفه‌دوست، م. ۱۳۹۰. برآورد دمای سطح برف و گستره پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS (مطالعه موردی: حوضه‌های استان گلستان). فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی. ۲۶: ۱۶۸-۱۴۹.
- گلشن، م.، ابراهیمی، پ.، اسمعیلی عوری، ا. ۱۳۹۴. انتخاب بهترین روش میانبایی برای پهنه‌بندی متوسط دمای سالانه ایران. مجله جغرافیا و پایداری محیط، (۱۴): ۷۱-۵۷.
- Abdollahi, K.H., Bashir, I., Batelaan, O. 2012. WetSpas Graphical user interface. Department of hydrology and hydraulic engineering, Vrije Universiteit Brussel. 10 pp.
- 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: 1-18. DOI:10.1007/s12665-017-6512-1.
- Abdollahi, K.H. 2015. Basin scale water balance modelling for variable hydrological regimes and temporal scales. PhD thesis. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Faculty of Engineering, Vrije Universiteit Brussel. Brussel. 176 pp.
- Amiri, M., Salem, A., Ghzal, M. 2022. Spatial-Temporal Water Balance Components Estimation Using Integrated GIS-Based Wetspass-M Model in Moulouya Basin, Morocco. ISPRS International Journal of Geo-Information. 11(2):139.
- Bahremand, A., F. De Smedt, J. Corluy, Y.B. Liu, J. Poorova, L. Velcicka., E. Kunikova. 2007. WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods in Margecany-Hornad Watershed, Slovakia. Water Resources Management, 21: 1373-1391.
- Batelaan, O., Wang, Z. M., de Smedt, F. 1996. An adaptive GIS toolbox for hydrological modelling. In: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water

- Resources Management. International Association of Hydrological Sciences, 235: 3–9.
- Batelaan, O., De Smedt, F. 2007. GIS-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances. *Journal of Hydrology*, 337(3): 337-355.
 - Batelaan, O., De Smedt, F. 2001. WetSpas: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modelling. International Association of Hydrological Sciences Publication, 269: 11-18.
 - Batelaan, O., De Smedt, F., Triest, L. 2003 Regional groundwater discharge: phreatophyte mapping, groundwater modelling and impact analysis of land-use change. *Journal of Hydrology*, 275: 86–108.
 - Batelaan, O. 2006. Characterizing groundwater recharge and discharge using remote sensing, GIS, ecology, hydrochemistry and groundwater modelling. Faculty of Engineering. Ph.D. thesis, Vrije Universiteit Brussel. 351pp.
 - De Groen, M.M., Savenije, H.H. 2006. A monthly interception equation based on the statistical characteristics of daily rainfall. *Water Resources Research* 42(12), W12417- W12427.
 - Dunne, T., Leopold, L. B. 1978. *Water in environmental planning*. San Francisco: W. H. Freeman and Company. 818 pp.
 - Eckhardt, K. 2008. A comparison of base flow indices, which were calculated with seven different base flow separation methods. *Journal of Hydrology*. 352: 168–173.
 - Gonzalez, P R., Camacho, P.E., Montesinos, P., Rodríguez, D, J.A. 2016. Optimization of irrigation scheduling using soil water balance and genetic algorithms. *Water Resources Management*. 30: 2815–2830.
 - He, Z.H., Parajka, J., Tian, F.Q., Blöschl, G. 2014. Estimating degree-day factors from MODIS for snowmelt runoff modeling *Hydrology and Earth System Sciences*. 18: 4773–4789.
 - https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MOD15A2H.
 - https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MOD10A1.
 - <http://engineering.purdue.edu/mapserve/> WHAT.
 - Huybrechts, W., Van der Beken, A., Vandewiele, G.L. 1990. Water balance computations for larger regions based on calibrated models of gauged catchments. In: Hooghart JC, Posthumus CWS, Warmerdam PMM (Eds.). *Hydrological research basins and the environment: Proceedings of the International Conference, 24-28 September 1990 at Wageningen*. Vol. Proceedings and Information no. 44. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, 21–28.
 - Kalyanapu, A.J., Burian, S.J., McPherson, T.N. 2010. Effect of land usebased surface roughness on hydrologic model output. *Journal of Spatial Hydrology*, 9(2): 51-71.
 - Knight, C.G., Chang, H., Staneva, M.P., Kostov, D. 2001 A Simplified Basin Model for Simulating Runoff: The Struma River GIS. *Professional Geography*, 53 (4): 533–545
 - Li, Z., Liu, D., Li, X.Y., Wu, H., Li, G.y., Li, Y. t. 2016. Runoff coefficient characteristics and its dominant influencing factors in a riparian grassland in the Qinghai Lake watershed, NE Qinghai-Tibet Plateau. *Arabian Journal of Geosciences* 9: 397.

- Lim, K.J. Engel, B.A. Tang, Z. Choi, J. Kim, K. Muthukrishnan, S. Tripathy. D. 2005. Web GIS-based hydrograph analysis tool, WHAT. Journal of the American water resources association (JAWRA). 41(6): 1407-1416.
- Legates, D.R., McCabe, G.J. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resource Research. 35: 233–241.
- Nathan, R.J., McMahon, T.A. 1990. Evaluation of Automated Techniques for Baseflow and Recession Analysis. Water Resources Research. 26(7): 1465-1473.
- NURP US EPA. 1983. Results of the Nationwide Urban Runoff Program. Vol 1-Final report. Water Planning Division, National Technical Information Services, PB 84 (185552). 24 pp.
- Peters, E. 2003. Propagation of drought through groundwater systems- Illustrated in the Pang (UK) and Upper-Guadiana (ES) catchments. Ph.D. thesis, Wageningen University, The Netherlands. 203 pp.
- Park, G.h. 2012. Velase: A Fully-Distributed Daily Hydrologic Feedback Model Wiyh emphasis On Vegetation, Land Cover, And Soil Water Dynamics. University of Missouri, Kansas City, 178 pp.
- Pistocchi, A., Bouraoui, F., Bittelli, M. 2008. A simplified parameterization of the monthly topsoil water budget. Water Resources Research 44(12): 1-21.
- Sabri, N.Q., Khayyun, T.S. 2023. Average monthly recharge, surface runoff, and actual evapotranspiration estimation using WetSpa-M model in Low Folded Zone, Iraq. Open Engineering 13(1):1-15. DOI:10.1515/eng-2022-0451.
- Su, L., Wang, Q., Wang, C., Shan, Y., 2015. Simulation models of leaf area index and yield for cotton grown with different soil conditioners. PLoS ONE. 10 (11): 19 pp.
- Sutanto, S.J., Wenninger, J., Coenders-Gerrits, A.M.J., Uhlenbrook, S., 2012. Partitioning of evaporation into transpiration, soil evaporation and interception: a comparison between isotope measurements and a HYDRUS-1D model. Hydrology and Earth System Sciences. 16(8): 2605–2616.
- Van Camp, M., Radfar, M., Walraevens, K. 2010. Assessment of groundwater storage depletion by overexploitation using simple indicators in an irrigated closed aquifer basin in Iran. Agricultural Water Management, 97(11): 1876–1886.
- Wang, Z.M., Batelaan, O., de Smedt, F. 1997. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). Physics and Chemistry of the Earth, 21(3): 189–193.
- Wang, Q., Guo, J. 2024. Rainfall interception loss as a function of leaf area index and rainfall by soybean. Theoretical and Applied Climatology, 155: 289–297

Abstract

Investigating the spatio-temporal variations of water balance components plays a significant role in sustainable water resources management, hydrological stress control, and water utilization planning, particularly in semi-arid regions. In this study, the distributed monthly WetSpa-M model was applied to estimate water balance components in the Khorramabad watershed during the period from October 2000 to September 2023. Model inputs included climatic data, topography, soil, land use, leaf area index (LAI), groundwater depth, snow cover, and evapotranspiration, which were prepared in a GIS environment with a spatial resolution of 250 m. MODIS satellite imagery and Google Earth Engine datasets were also used to extract several input layers. To evaluate model performance, discharge data from the Cham-Anjir hydrometric station were separated into surface runoff and baseflow, and the model was calibrated and validated using the coefficient of determination (R^2) and Nash–Sutcliffe efficiency (NSE). The results indicated that the WetSpa-M model had satisfactory performance in simulating water balance components, with R^2 and NSE values of 0.72 and 0.67 for baseflow, and 0.75 and 0.69 for surface runoff, respectively. The findings also revealed that approximately 71% of the watershed outflow was related to baseflow, while monthly surface runoff and groundwater recharge showed a strong direct relationship with precipitation. Spatial analysis demonstrated that the highest actual evapotranspiration occurred in agricultural lands and densely vegetated areas. Overall, the results confirmed the high capability of the WetSpa-M model in simulating the spatio-temporal dynamics of water balance components and highlighted its effectiveness for water resources management and hydrological assessment in semi-arid watersheds.

Keywords: Water Balance, Distributed Monthly WetSpa-M Model, Khorramabad Watershed

Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI)
Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of Lorestan

Title: Estimation of Spatio-Temporal Variations of Water Balance Components Using the WetSpass-M Model

Authors: Elham Davoudi, Reza Chamanpira, Khodayar Abdollahi

Editor: Saeed Nabipay Lashkarian

Document Formatting: Abbas Seddigh

Publisher: Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Circulation: 10 Copies

Date of publication: Summer 2026

This scientific work has been registered with the series number of **69994** at the date of **2026-09-13** the Agriculture Information and Scientific Documents Center. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or translated without the original reference.

Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of
Lorestan

Technical Manuscript:

Estimation of Spatio-Temporal Variations of Water Balance Components Using
the WetSpass-M Model

Authors:

Elham Davoudi, Reza Chamanpira, Khodayar Abdollahi

Series Number: 69994

2026



Ministry of Agriculture - Jihad

Agriculture Research, Education and Extension Organization

Soil Conservation and Watershed Management Research Institute



Agricultural and natural resources research and training center of Lorestan province

Technical Manuscript

Estimation of Spatio-Temporal Variations of Water Balance Components Using the WetSpass-M Model

Authors:

Elham Davoudi, Reza Chamanpira, Khodayar Abdollahi

Series Number: 69994

2026