

## برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از بیلان آب - خاک توزیعی در حوضه کرخه

بهزاد حصاری<sup>۱\*</sup>، ناهید میرحاجی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲- دانشجوی دکتری رشته علوم و مهندسی آب-مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

### چکیده

در این تحقیق بیلان آبی حوضه کرخه به روش بیلان آب خاک یا رطوبت خاک بر اساس روش تورنت وایت ماطر اصلاح شده در محیط نرم‌افزار ArcGIS به صورت توزیعی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که از این مدل می‌توان با دقت قابل قبول برای برآورد آب‌دهی سطحی و زیرزمینی رودخانه‌های بدون داده، بهره جست. نقشه‌های حاصله که "نقشه رواناب" خوانده می‌شوند توزیع مکانی جریان را به خوبی نشان می‌دهند. در این تحقیق نقشه‌های آب مازاد، با استفاده از ابزار بیلان آب ارائه شده توسط دانشگاه اوهایو، برآورد و نقشه‌های رواناب تأخیری حاصل از پیوستن آب مازاد به آب‌های زیرزمینی با استفاده از ابزار تهیه شده در این تحقیق، محاسبه و مجموع رواناب خروجی از حوضه ارائه گردید. در نهایت واسنجی نقشه‌های رواناب مدل با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه‌های هیدرومتری صورت پذیرفت. نتایج نشان‌دهنده برآورد خوب آب‌دهی حوضه کرخه در شرایط داده‌ای موجود حوضه می‌باشد. در این تحقیق مدل توزیعی در مقابل مدل‌های توده‌ای بکار گرفته شده و روش شناسی و نحوه پیاده‌سازی آن با ابزار تهیه شده در محیط نرم‌افزار ArcGIS به صورت گام به گام ارائه شده است. کاربرد این مدل در مکان‌های بدون داده بسیار مفید بوده و در شبیه‌سازی سلولی رسوب و کیفیت آب به راحتی می‌توان از آن بهره جست. برای پروژه‌های آبی سطح حوضه واقع در ارتفاعات که معمولاً فاقد اطلاعات مکفی اقلیمی بوده و از نظر آب‌دهی فاقد آمار می‌باشند، نیز می‌توان با این روش، اطلاعات جریان ماهانه رودخانه و دبی پایه رودخانه را با دقت قابل قبولی تخمین زد.

**کلمات کلیدی:** تبخیر و تعرق واقعی، بیلان آب- خاک، تورنت وایت ماطر اصلاح شده، مدل توزیعی

### ۱. مقدمه

برای برآورد بیلان آبی درازمدت و مقیاس بزرگ، سه مدل مستقل جهت مدل‌سازی اجزاء مختلف سیکل هیدرولوژی ایجاد شده است: بیلان آب اتمسفری، بیلان آب و خاک و بیلان آب سطحی که در هر سه این مدل‌ها، می‌توان از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده نمود. GIS، چارچوب کاری برای ذخیره، مدیریت داده‌های مکانی و امکانات مدل‌سازی برای حجم کنترل را به ازای اندازه و اشکال مختلف تأمین می‌کند (حصاری و همکاران، ۱۳۹۰). در بیلان آب و خاک که موضوع این تحقیق می‌باشد و در ایران بیشتر تحت عنوان "بیلان رطوبت خاک" شناخته می‌شود، شبیه‌سازی میزان تبخیر از خاک با استفاده از تابع استخراج رطوبت خاک، انجام می‌گیرد. روش بیلان آب - خاک، روش چگونگی تقسیم بارش به رواناب، تبخیر واقعی و ذخیره رطوبت خاک را مهیا می‌سازد. این مدل بر پایه این اصل استوار است که خاک به عنوان لایه اول مثل یک مخزن یا سطل عمل کرده که دارای ظرفیت مشخصی است و رواناب وقتی روی خواهد داد که بارش بیشتر از تبخیر بوده و ظرفیت خاک پر باشد. اگر بارش متناظر با ماه خاصی بیش از تبخیر

<sup>1</sup> Corresponding author: توضیحات مربوط به نویسنده اول

Email: b.hessari@urmia.ac.ir



و تعرق پتانسیل باشد، آنگاه تبخیر و تعرق واقعی مساوی تبخیر و تعرق پتانسیل است. کویرها و مناطق خشک نسبت به مناطق مرطوب دارای تبخیر و تعرق پتانسیل بالایی بوده و تبخیر و تعرق واقعی کمتری دارند چرا که آبی برای تبخیر وجود ندارد. همین وضعیت در دشت‌ها که بارش کمتری دارند و معمولاً گرم‌تر هستند نسبت به مناطق کوهستانی که مرطوب‌تر هستند و هوای آن‌ها سردتر است، وجود دارد (حصاری و همکاران، ۱۳۹۰).

یکی از مواردی که در سال‌های اخیر توسعه چشمگیری یافته، بحث بیلان منطقه‌ای و به تبع آن تهیه نقشه هم‌جریان است. تجمعی کردن نقشه هم‌جریان که هدف از آن، تعیین دبی در مسیر آبراهه‌ها و مسیر رودخانه اصلی و مابین ایستگاه‌های هیدرومتری و حوضه‌های بدون ایستگاه است (میدمنت و الیورا، ۱۹۹۷، حصاری و همکاران ۱۳۸۸)، نیاز پروژه‌های آبی خصوصاً مدیریت و برنامه ریزی خشکسالی‌ها و پروژه‌های استحصال آب است. در مدل توزیعی، بیلان هر سلول در گام زمانی معین تهیه می‌گردد و خصوصیات اقلیمی، خاک، آب سطحی و زیرزمینی هر سلول نقش آفرینی می‌کند. برای بررسی بیلان آبی به صورت سلولی و توزیعی، ابزاری توسط دانشگاه اوهایو تحت عنوان *Water Balance Toolbox for ArcGIS* تهیه شده است (دییر، ۲۰۰۹). در تحقیق حاضر از این ابزار با اعمال تغییراتی استفاده و قسمت ارتباط آب سطحی و آب زیرزمینی آن تکمیل گردید. در این پژوهش، ابتدا وضعیت هیدرولوژیکی حوضه کرخه هم از نظر زمانی و هم از نظر مکانی با پیاده کردن مدل توزیعی بیلان آب - خاک مورد بررسی قرار گرفته که شامل پردازش‌های مدل رقومی ارتفاعی  $DEM^1$ ، انتخاب ایستگاه‌های هیدرومتری در سطح حوضه که دارای آمار مناسب در دوره آماری معین دراز مدت باشند و ترسیم مرز حوضه ایستگاه‌های منتخب می‌باشد.

## ۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

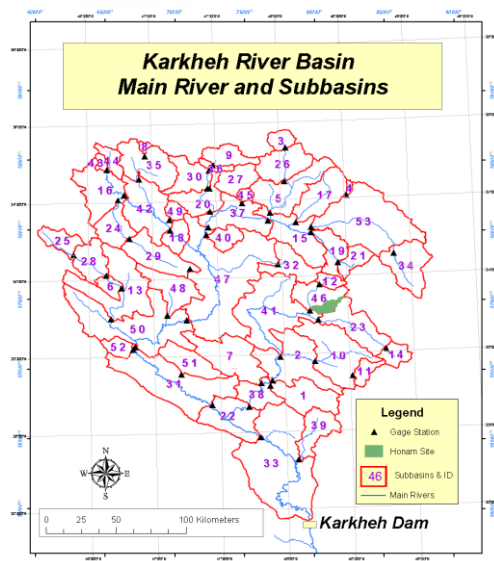
رودخانه کرخه سومین رودخانه بزرگ ایران بوده که حوضه آبریز آن به وسعت حدود ۴۳ هزار کیلومتر مربع، شامل استان‌های همدان، کرمانشاه، کردستان، ایلام، لرستان و خوزستان می‌باشد. سرشاخه‌های اصلی تشکیل دهنده رودخانه کرخه، رودخانه‌های سیمره، کشکان، قره سو، گاماسیاب و چرداول هستند. آمار بلند مدت و ثبت شده ماهانه جریان رودخانه‌ها در ۵۳ ایستگاه هیدرومتری، برای حوضه کرخه، از بانک اطلاعات تماب جمع آوری گردید. مرز حوضه هر ایستگاه هیدرومتری و زیرحوضه مستقیم هر ایستگاه، به صورت لایه رقومی از روی نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰ تهیه و به محیط GIS انتقال داده شد. در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری، حوضه و زیر حوضه هر ایستگاه نشان داده شده است.

## ۳. روش تحقیق

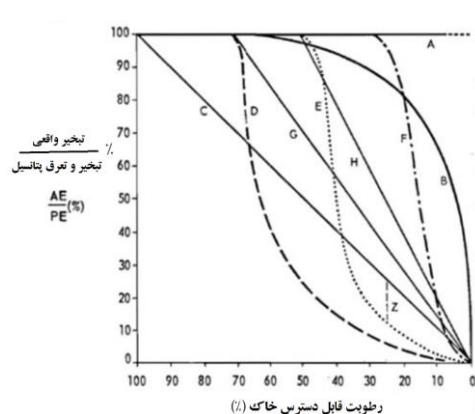
برای بررسی تحلیل مکانی آب‌دهی یک حوضه، نیاز به یک سری مدل‌های توزیعی بیلان آب - خاک است تا تغییرات مکانی آب‌دهی را نشان دهد. در این تحقیق یک مدل سه لایه که لایه اول، لایه ۱ متری خاک، لایه دوم، لایه جریان بین قشری یا زیر سطحی و لایه سوم، لایه آب زیرزمینی است، در نظر گرفته شد. داده‌های ورودی مدل بیلان آب شامل ۱۲ نقشه سلولی تبخیر ماهانه، ۱۲ نقشه سلولی بارش و مقدار *AWC* به صورت سلولی می‌باشد. پس از محاسبات مربوطه، مدل مقدار رطوبت خاک و رواناب را ارائه خواهد داد.

شمای کلی بیلان آب - خاک توزیعی با گام زمانی ماهانه در شکل ۲ ارائه شده است.

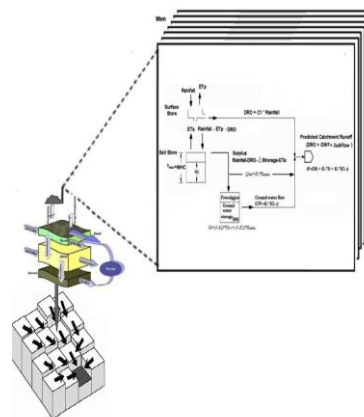
<sup>1</sup>Digital elevation model



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و رودخانه‌های اصلی حوضه کرخه



ب



الف

اقتباس از (Fu G, 2005, 2005)

شکل ۲- (الف : شمای کلی و اجزاء مدل بیلان آب خاک توزیعی، ب : پیشنهادهای مختلف ارتباط بین نسبت تبخیر تعرق واقعی به تبخیر پتانسیل و درصد رطوبت خاک (توابع رطوبت قابل استخراج))

در این مدل ۱۲ نقشه بارش موثر از تبخیر پتانسیل کم می‌شود که به صورت  $Peff - PET_{01}$  نامیده می‌شود. در ابتدا مقدار ذخیره رطوبت خاک  $Storage_{i-1}$  برابر با مقدار ظرفیت قابل استخراج خاک (AWC) فرض می‌شود. این مدل از ماهی شروع می‌شود که خاک پر و اشباع باشد، یعنی ماهی که مقدار تبخیر کمتر از میزان بارش باشد. در این حالت ذخیره ماه قبل، برابر ظرفیت قابل استخراج خاک بوده که این امر در حوضه کرخه در فروردین ماه رخ می‌دهد، لذا مدل از فروردین شروع و ذخیره اسفند برابر Soil\_AWC در نظر گرفته شد. از ماه بعد، ذخیره حاصله از ماه‌های قبل بجای storage قرار گرفته و ادامه می‌یابد و این فرآیند به تعداد ماه‌های سال تکرار می‌گردد. تخلیه رطوبت خاک از روابط تجربی تابع تخلیه خاک محاسبه می‌گردد که در شکل ۳ نمودارهای ماتر برای آن ارائه شده است. چنانچه از این شکل مشاهده می‌شود، وقتی خاک اشباع است (رطوبت خاک ۱۰۰٪) تبخیر واقعی برابر تبخیر پتانسیل بوده و وقتی خاک کاملاً خشک است هر دو تبخیر واقعی و پتانسیل صفر است (ماتر ، ۱۹۷۴).

1-Moisture extraction function

#### ۴. روابط و ساختار مدل بیلان آب و خاک:

رواناب مستقیم درصدی از بارش را تشکیل می‌دهد که با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$DirectRunoff = C_1 \times P_i \quad (1)$$

که در آن:  $C_1$  ضریب جریان و  $P$  بارش و  $i$  شماره ماه مورد نظر است. بارش موثر ( $P_{eff}$ ) اختلاف بارش ماه مورد نظر از جریان مستقیم است که به لایه اول نفوذ می‌کند و با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$DirectRunoff_i - P_{eff}_i = P_i \quad (2)$$

میزان ذخیره و تخلیه رطوبت خاک از روابط ۳ و ۴ (تابع استخراج رطوبت خاک) محاسبه می‌گردد. تابع استخراج رطوبت خاک مورد استفاده در این تحقیق یک تابع نمائی است و تخلیه خاک از هر ماه به ماه دیگر با یک تابع زمانی شبه روزانه نمائی برآورد می‌گردد. اگر بجای گام زمانی ماهانه از ضریب روزانه استفاده شود، انحنای نمودار بهتر شده و نتایج تخلیه رطوبت خاک دقیق‌تر خواهد بود؛ لذا در این قسمت به نسبت روزهای هر ماه این ضریب اعمال می‌گردد:

$$exp[(P_{eff} - Storage_{i+1} = if\{P_{eff}_i > ETPt_i, Min(P_{eff}_i - ETPt_i + Storage_{i, Soil} - awc), Storage_i, ETP/AWC\})] \quad (3)$$

$$Storage[Day t + 1] = Storage[Day t] + [(Storage[Day t] \times (P_{eff} - ETPt) / (\#Days in month / AWC))] \quad (4)$$

که در آن:  $Storage_i$  ذخیره رطوبت خاک در ماه مورد نظر،  $Storage_{i+1}$  ذخیره رطوبت خاک در ماه بعدی و  $Storage[day t]$  ذخیره رطوبت خاک در روز  $t$  از ماه مورد نظر می‌باشد. تبخیر و تعرق واقعی بخشی از رطوبت موجود آن ماه خواهد بود که با بدست آمدن ذخیره رطوبت هر سلول در هر ماه، می‌توان از روابط شرطی ۵ تبخیر و تعرق واقعی، کمبود رطوبت خاک و آب مازاد را تعیین کرد. وقتی بارش بیش از تبخیر و تعرق پتانسیل باشد، تبخیر و تعرق واقعی برابر تبخیر پتانسیل بوده و در غیر این صورت برابر کل (بارش+اختلاف ذخیره رطوبت مانده از ماه قبل و این ماه) خواهد بود:

$$AET = if[P_{eff} > ETPt, ETPt, P_{eff} + abs(Storage_i - Storage_{i+1})] \quad (5)$$

که در آن:  $AET$  تبخیر و تعرق واقعی و  $abs$  تابع قدر مطلق می‌باشد.

کمبود آبیاری (Deficit) به عنوان اختلاف تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد؛ یعنی آن مقدار آبی که می‌بایست از طریق آبیاری و ... برای تأمین نیاز آبی گیاه اضافه گردد که با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$Defocit = ETP_i - AET_i \quad (6)$$

آب ورودی به خاک که تبخیر نمی‌شود، به صورت آب مازاد در ماههائی که خاک پر است به لایه بعدی نفوذ می‌نماید. چنانچه رطوبت خاک برابر حداکثر گنجایش خاک ( $S_{max}$  یا  $Soil\_AWC$ ) باشد؛ در آن صورت، هر آبی که وارد خاک شود (بارش، ورودی ذخیره رطوبت از ماه قبل و مازاد تبخیر و تعرق واقعی) آب مازاد خواهد بوده و در این صورت ورودی بیش از خروجی خواهد بود:

$$if\ Storage_i = Soil_{awc}\ then\ Surplus = P_{eff}_i - [Storage_i - Storage_{i+1}] - AET\ else\ Surplus = 0 \quad (6)$$

$$Surplus_i = P_{eff}_i - [\Delta Storage - ATE_i] \quad (7)$$

قسمتی از آب مازاد عبور کرده از خاک، منجر به ایجاد جریان زیر سطحی ( $Q_{sub}$ ) شده (رابطه ۸) و مابقی آن به عنوان نفوذ عمقی (Percolation) شناخته می‌شود که در لایه آب زیرزمینی (لایه سوم) وارد می‌گردد و از رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$Q_{sub}_i = K_1 \times Surplus_i \quad (8)$$

$$Percolation = (1 - K_1) \times Surplus_i \quad (9)$$

مقدار جریان زیرزمینی (GWF) از رابطه ۱۰ محاسبه می‌گردد:

$$GWF_i = K_2 \times GWS_{i-1} \quad (10)$$

$GWS_{i-1}$  ذخیره آب زیرزمینی در ماه قبل است. این بدان معنی است که جریان زیرزمینی به نسبت  $K_2$  از ذخیره ماه قبل جریان می‌یابد. چون ذخیره ماه اول نامعلوم است؛ این قسمت نیاز به فرایند آزمون و خطا خواهد داشت. برای اولین قدم آزمون و خطا، ذخیره ماه قبل برابر صفر  $GWF_{i-1}=0$  منظور می‌گردد. ذخیره مقادیر آب زیرزمینی برای ماه‌های بعد به صورت رابطه ۱۱ محاسبه خواهد شد:

$$GWS_t = (1 - K_1) \times Surplus_t + (1 - K_2) \times GWS_{t-1} \quad (11)$$

رواناب کل، متشکل از جریان سریع، جریان زیرقشری و جریان آب زیرزمینی می‌باشد (رابطه ۱۲). این رواناب بایستی برابر رواناب مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری حوضه آبخیز باشد که جهت اعتبارسنجی آن لازم است با مقادیر مشاهداتی، مقایسه گردد:

$$Rest_i = DirectRunoff_i + K_1 \times Surplus_i + K_2 \times GWS_{i-1} \quad (12)$$

این مدل سه پارامتر منطقه ای  $C_1$ ،  $K_1$  و  $K_2$  دارد. محاسبه مستقیم بارش موثر از روابط تجربی امکان‌پذیر می‌باشد. در برخی مطالعات خود بارش بدون احتساب رواناب مستقیم، وارد چرخه محاسبات بیلان آب شده است. (پیرا و همکاران، ۲۰۲۰). ضرایب  $k_1$  و  $k_2$  از طریق روش‌های بهینه سازی بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر برآوردی رواناب هر زیر حوضه، با به حداقل رساندن شاخص‌های آماری نظیر ضریب ناش و ... تعیین خواهد شد.

این مدل حرکت افقی آب بر روی سطح زمین یا در خاک به وسیله مدل را در نظر نمی‌گیرد. همچنین ذوب برف در محاسبات اعمال نمی‌شود اگر چه احتمالاً در بعضی از مطالعات این مورد تولید خطای معنی داری نخواهد کرد. ویل موت و همکاران یک روش ساده برای در نظر گرفتن ذوب برف ارائه نموده‌اند. در نگاه اول مشاهده خواهد شد که بیشترین اثر مکانی از طبیعت که در بیلان آب - خاک بکار برده می‌شود نقشه واحد خاک است. اما این نقشه، دارای اشکال نامنظم با دامنه تغییرات زیاد در اندازه آن‌ها است و به خاطر اینکه داده‌های اقلیم، نقش مهمی در بیلان آب - خاک ایفا می‌کنند، لذا سلول‌های ایجاد شده در داده‌های اقلیم در شبکه منظم که دارای اندازه مناسب برای مدل بندی واحدهای آب - خاک هستند مینا قرار می‌گیرد (ون و همکاران، ۲۰۲۲). منشاء اصلی عدم اطمینان در ارزیابی مدل معادله بیلان، تخمین تبخیر می‌باشد. تخمین تبخیر، از تبخیر تعرق پتانسیل، ظرفیت نگهداری آب - خاک و تابع استخراج رطوبت حاصل می‌شود (رئید و همکاران، ۱۹۹۷).

مقایسه بین مقادیر رواناب محاسبه شده و مشاهده شده برای داده‌های ماهانه در بعضی مطالعات نسبتاً ضعیف ارزیابی شده است ولی برای داده‌های سالانه بهتر می‌باشد. اگر چه ماتر پالایش بیشتر این روش حتی برای مقادیر سالانه را نیز پیشنهاد می‌نماید. در شکل ساده، مدل بیلان آب - خاک، حالت‌هایی که نرخ بارش بیشتر از نفوذپذیری ظرفیت خاک باشد را به حساب نمی‌آورد. ماتر یک روش برای اصلاح این مشکل را به شرح زیر ارائه کرده است:

در بحث مدل‌های بیلان آب ماهانه ذکر شده که اساساً این روش‌ها جزو روش‌های بر پایه روش تورنت وایت و ماتر است که با موازنه<sup>۱</sup> مقادیر ماهانه بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل به برآورد تبخیر و تعرق واقعی منجر می‌شود. از این نوع مدل‌ها برای تخمین تغذیه آب زیرزمینی و رواناب نیز استفاده می‌شود و همچنین برآوردهای تبخیر و تعرق واقعی با مقایسه رواناب مشاهده شده و اندازه گیری شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. علیرغم ساختار فوق‌العاده ساده مدل‌ها و روش‌های نوع تورنت وایت رواناب ماهانه را به طور معقولی خوب برآورد می‌کنند (هوانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

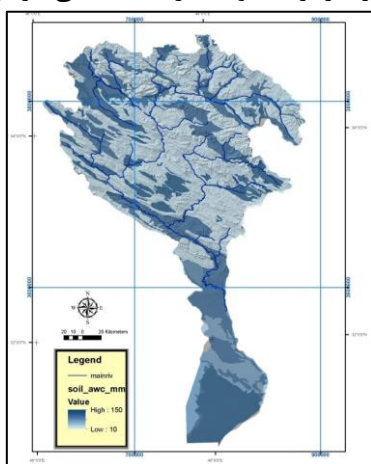
<sup>1</sup> - Book keeping



در این تحقیق از نقشه‌های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، بانک اطلاعات حوزه کرخه استفاده شده است. نقشه‌های بارش ماهانه (مجموع باران و آب معادل برف) از روی داده‌های نقطه‌ای آب و هواشناسی سازمان آب و سازمان هواشناسی کشور برای یک دوره ۲۵ ساله از ۱۹۹۸ - ۱۹۷۳ تهیه شده است. البته این روش برای هر سال یا هر دوره قابل پیاده کردن است و بعنوان نمونه این دوره استفاده شده است و هدف بررسی روش شناسی موضوع بود. طبق ساختار مدل بیلان آب - خاک تورنت وایت - ماتر و ابزار تهیه شده در GIS برای بیلان آب - خاک حوزه، ورودی‌ها و خروجی‌های این مدل عبارتند از:

○ ورودی‌ها:

**الف) نقشه سلولی ظرفیت نگهداری آب در خاک (WHC یا Smax):** که از روی نقشه‌های خاک‌شناسی حوزه با توجه به بافت خاک و در عمق یک متری خاک به صورت سلولی تعیین می‌گردد. این کمیت حداکثر ظرفیت خاک (به عنوان مخزن خطی) را بیان می‌کند. توزیع مکانی گنجایش نگهداری حوزه آبریز مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. براساس این نقشه مقدار متوسط این پارامتر برای حوزه کرخه ۶۸ میلی‌متر می‌باشد.



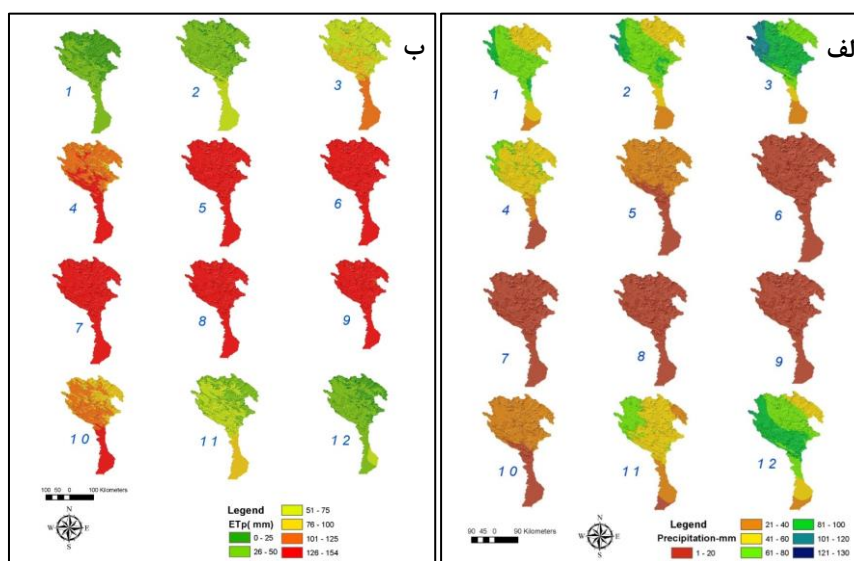
شکل ۳ - ظرفیت نگه‌داشت خاک WHC حوزه کرخه

**ب) نقشه‌های سلولی تبخیر و تعرق پتانسیل حوزه به صورت ماهانه:** تبخیر از سطوح با فرض اینکه محدودیت آب وجود نداشته باشد و تحت تأثیر عناصر اقلیمی مثل دما و تابش، باد، کمبود رطوبت و ... روی دهد، تبخیر و تعرق پتانسیل نامیده می‌شود. ابزار بیلان آب مورد استفاده بر اساس روش تورک با استفاده از نقشه‌های سلولی ماهانه درجه حرارت حوزه و تشعشع خالص رسیده حوزه تعیین می‌گردد. با توجه به اقلیم هر منطقه می‌توان از نقشه‌های تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس سایر روش‌های تجربی مثل پنمن مانیتث، بلانی کریدل، پرایستلی - تیلاور، پنمن و تورنت وایت و ... استفاده کرد. در شکل ۵-الف مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه حوزه ارائه شده است. نقشه‌های تبخیر و تعرق ماهانه با ایجاد گرادیان دمائی در حوزه و با استفاده از اطلاعات نقطه‌ای با روش پنمن مانیتث و معیارها و روش‌های درون‌یابی فوق‌الذکر در بحث بارش تهیه شده است.

**ج) نقشه‌های سلولی بارش حوزه به صورت ماهانه:** نقشه‌های رستری بارش از برازش صفحات هموار اسپلاین روش هوتچینسون<sup>۱</sup> و با استفاده از نرم افزار ANUSPLIN تهیه شده است. در روش هموار سازی هوتچینسون با استفاده از مقادیر ارتفاعی DEM به عنوان متغیر مشترک استفاده و بهترین برازش با استفاده از شاخص‌های حداقل سازی خطا و معیار ارزیابی تقاطعی بوده است ( فصیحی و همکاران، ۲۰۲۲). اعتبار سنجی روش‌های درون‌یابی و انتخاب روش بهینه

<sup>1</sup> -Thin-plate smooths spline- Method of Hutchinson

درون‌یابی، بر اساس معیار ارزیابی تقاطعی<sup>۱</sup> و شاخص خطا (ریشه دوم میانگین مربعات خطا RMSE) صورت می‌گیرد که در آن کم‌ترین مربعات خطای هر برازش تعیین می‌گردد. در این روش ابتدا یکی از نقاط اندازه‌گیری را حذف نموده و سپس با استفاده از سایر نقاط و اعمال روش درون‌یابی مورد نظر برای نقطه حذف شده، برآورد آماری صورت می‌گیرد، در مرحله بعد این نقطه به محل خود برگردانده شده و نقطه بعدی حذف می‌گردد و به همین ترتیب برای تمام نقاط مشاهده‌ای یک برآورد نیز صورت می‌گیرد و نتایج در قالب دو ستون مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی ارائه می‌گردد (دش، ۲۰۲۱). در شکل ۵-ب نقشه‌های ماهانه بارش حوضه کرخه ارائه شده است. حداکثر بارش حوضه در اسفند (مارچ) اتفاق می‌افتد. نقشه‌ها از زمستان و ماه دی (ژانویه) با شماره (۱) آغاز و تا آذر (دسامبر) سال بعد با شماره (۱۲) تنظیم شده است.



شکل ۴- (الف: مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه حوضه به روش پنمن ماتیت، ب: مقدار بارش ماهانه حوضه از ژانویه (دی) (۱) تا دسامبر (آذر) (۱۲))

داده‌های فوق حداقل داده‌های لازم برای اجرای مدل است. در صورت داشتن اطلاعات اضافی مثل نقشه آب معادل برف سلولی، مدل رقمی ارتفاعی، زیر حوضه‌های هیدرومتری، نقشه آبراه‌ها می‌توان از آن در مدل سود جست.

#### خروجی‌ها: نقشه‌های سلولی بارش موثر بصورت ماهانه: برای محاسبه بارش موثر نیاز به تعیین درصد جریان

مستقیم است. در این تحقیق به دلیل وجود داده‌های روزانه رواناب، از روش BFI استفاده گردید. برای جداسازی دبی پایه و دبی جریان مستقیم از آمار روزانه دبی، از نرم افزار HydroOffice استفاده شده و با انتخاب فیلتر حداقل موضعی<sup>۲</sup> با مقادیر پیش فرض (N=5) روز و ضریب آزمون نقطه بازگشت<sup>۳</sup> (f=0.9)، ضرایب شاخص دبی پایه برای ایستگاه پای پل تعیین و برای مقایسه، مقادیر سراب صید علی نیز اضافه گردید. در این روش برای هر روز، مشخص می‌گردد که دبی آن روز در بازه زمانی  $[0.5(2N-1)]$  حداقل است و برای تعیین نقطه عطف از ضریب آزمون نقطه بازگشت استفاده می‌شود (دان، ۱۹۹۶). در این حالت مابین نقاط حداقل منتخب را خطی فرض نموده و جدا سازی انجام می‌شود. با توجه به بارش ماهانه، ضرایب معادل رواناب ساز آن‌ها تعیین گردیده و در نهایت برای فروردین مقدار ۲۰٪، برای اردیبهشت ۱۰٪ و برای بقیه ماه‌ها مقدار ۵٪ به عنوان یک عدد میانگین در نظر گرفته شد. مقدار ۲۰٪ فروردین ماه را می‌توان معادل حداکثر

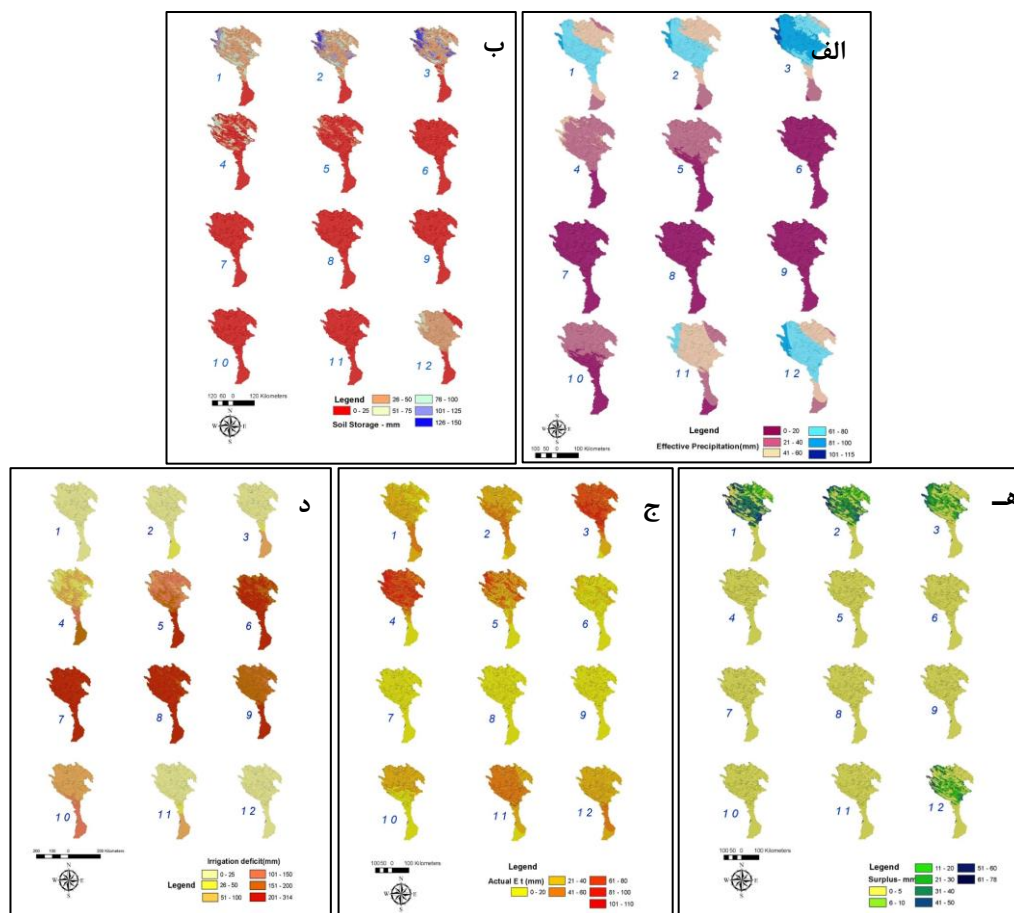
<sup>1</sup> - Cross validation

<sup>2</sup> -Local minimum method

<sup>3</sup> - Turning point test factor

ضریب سیلاب روش استدلالی نیز قلمداد نمود. در احتساب ضریب جریان فصل زمستان، یخبندان و ذخیره برف را نیز بایستی مد نظر قرار داد. با اعمال این ضرایب، نقشه رواناب مستقیم محاسبه و از تفاضل این نقشه از نقشه بارش، نقشه های ماهانه بارش موثر، تهیه گردید که به لایه خاک نفوذ می‌نماید. در شکل ۶-الف نقشه بارش موثر نشان داده شده است. نقشه‌های سلولی ذخیره رطوبت خاک بصورت ماهانه: کار با حجم زیاد داده و روند تکراری و همراه با سعی و خطا منجر به تهیه مدل خاص برای محاسبه بیلان آب-خاک شده است. کارهای مدل بیلان آب و خاک با استفاده از مدل توسعه یافته (الی، ۱۹۸۴) انجام شد. مدل تهیه شده توسط ایشان تا محاسبه لایه‌های ماهانه Surplus پیش می‌رود. در شکل ۶-ب نقشه ذخیره رطوبت خاک ماهانه نشان داده شده است.

نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی ماهانه، نقشه‌های کمبود رطوبت خاک و نقشه آب مازاد ماهانه: با تولید رواناب مستقیم که از بارش تولید می‌شود، توسط نقشه آب مازاد، دبی پایه رودخانه تخمین زده شده و با جمع زدن این دو دبی رودخانه که توسط ایستگاه‌های هیدرومتری اندازه‌گیری می‌شود بدست می‌آید (کالوو، ۱۹۸۶). در شکل های ۶-ج، ۶-د و ۶-ه به ترتیب نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی ماهانه، نقشه‌های کمبود رطوبت خاک و نقشه آب مازاد ماهانه نشان داده شده است.



شکل ۵- (الف: مقدار بارش موثر ماهانه حوضه، ب: مقدار ذخیره خاک ماهانه حوضه، ج: مقدار تبخیر و تعرق واقعی ماهانه حوضه، د: کمبود رطوبت خاک ماهانه حوضه، ه: مقدار آب مازاد ماهانه حوضه از ژانویه (دی) (۱) تا دسامبر (آذر) (۱۲))



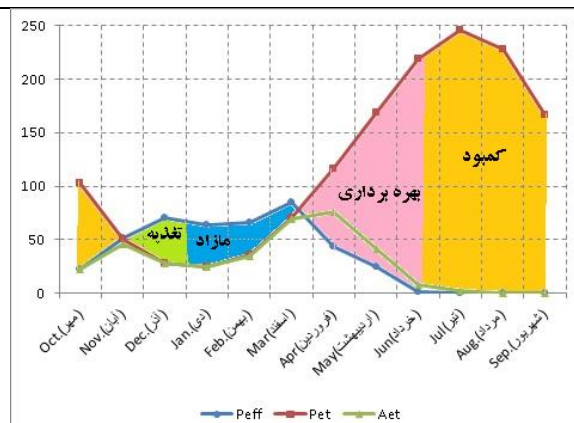
## ۷. نتایج

نتایج این مرحله از بیلان آب و خاک برای این حوضه مورد مطالعه از روی نقشه‌های رستری استخراج و در جدول ۱ ارائه شده است و در شکل ۷ بیلان کلی و سالانه حوضه نشان داده شده است.

**جدول ۱- نتایج بیلان آب حوضه کرخه علیا در ایستگاه پای پل بر حسب میلی‌متر**

در ۱ متر خاک  $soil\_awc = ۶۷/۹۷$

عامل	مهر (Oct.)	آبان (Nov.)	آذر (Dec.)	دی (Jan.)	بهمن (Feb.)	اسفند (Mar.)	فروردین (Apr.)	اردیبهشت (May.)	خرداد (Jun.)	تیر (Jul.)	مرداد (Aug.)	شهریور (Sep.)	سالانه
بارش	۲۳/۵۷	۵۴/۶۱	۷۴/۶۳	۶۷/۳۵	۶۹/۷۶	۸۹/۸۲	۵۳/۹۶	۲۷/۸۲	۱/۲	۰/۵۹	۰/۲۸	۰/۲۲	۴۶۳/۸۱
C ضریب جریان	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
رواناب مستقیم	۱/۱۸	۲/۷۳	۳/۷۳	۳/۳۷	۳/۴۹	۴/۴۹	۱۰/۷۹	۲/۷۸	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
بارش موثر	۲۲/۳۹	۵۱/۸۸	۷۰/۸۹	۶۳/۹۸	۶۶/۲۷	۸۵/۳۳	۴۳/۱۷	۲۵/۰۴	۱/۱۴	۰/۵۶	۰/۲۷	۰/۲۱	۲۲۷/۳۹
تبخیر و تعرق پتانسیل	۱۰۲/۹۴	۵۰/۶۷	۲۸/۵۴	۲۴/۳۳	۳۵/۳۴	۷۰/۳۴	۱۱۶/۳۱	۱۶۹/۰۲	۲۱۹/۵۶	۲۴۶/۲۹	۲۲۷/۴۷	۱۶۶/۴	۱۴۵۷/۲۱
ذخیره خاک	۰/۰۱	۵/۴۵	۳۴/۷۲	۴۹	۵۶/۹۳	۵۷/۴۹	۲۴/۲۶	۸/۱۷	۱/۶۲	۰/۲۷	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۲
تبخیر و تعرق واقعی	۲۲/۴	۴۶/۴	۲۸/۵۴	۲۴/۳۳	۳۵/۲۶	۶۸/۹۹	۷۶/۳۹	۴۱/۱۵	۷/۷۱	۱/۹۱	۰/۴۹	۰/۲۵	۳۴۳/۹۵
کمبود آبیاری	۸۰/۵۶	۴/۲۷	۰	۰	۰	۰/۰۸	۱/۳۵	۳۹/۹۴	۱۲۷/۹۱	۲۱۱/۸۹	۲۴۴/۴۱	۱۶۶/۱۸	۱۱۰۳/۶۲
آب مازاد	۰	۰/۰۲	۱۳/۰۷	۲۵/۳۵	۲۳/۰۵	۱۵/۷۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷۷/۲۳



**شکل ۶- بیلان آب خاک حوضه کرخه (محدوده زمانی وقوع تغذیه خاک، زمان وقوع آب مازاد، زمان بهره برداری (دوره مصرف آب) از رطوبت موجود خاک و کمبود آب)**

همچنانکه محاسبات نشان میدهد با بیلان هیدروکلیماتی میتوان نقشه‌های توزیعی تبخیر تعرق واقعی که یکی از چالش‌های اساسی در هیدرولوژی است بدست آورد و این نقشه‌ها، ورودی مدل‌های برآورد رواناب حوضه بصورت سلولی و محاسبات آب مصرفی واقعی در دشت‌ها است. این ابزار برای هر سال یا در دوره‌های دراز مدت قابل کاربرد است. نتایج صحت‌سنجی این تحقیق، دقت بالای این روش را در برآورد رواناب در محل ایستگاه‌های هیدرومتری در داخل حوضه را نشان میدهد. این روش با داشتن حداقل داده‌های ممکن که شامل نقشه‌های بارش و تبخیر پتانسیل ماهانه و نقشه



نگهداشت خاک، قابلیت برآورد آبدهی ماهانه را بخوبی دارد. این روش در حوضه های نرمال (بدون برداشت زیاد) و بدون سد های بزرگ، جواب خوبی میدهد. نتایج جدول ۱ و شکل ۶ برای هر سلول یا هر محدوده هیدرولوژیک یا محدود های سیاسی در داخل حوضه؛ قابل استخراج است و این قابلیت این مدل را نشان میدهد. از این روش بخاطر مبنای فرایند فیزیکی و سادگی مدل، میتوان برای هر زیرحوضه بدون داده نتایج فوق و خصوصا آبدهی را برآورد کرد و نیاز به مدلهای بسیار پیچیده ای نیست.

## ۸. منابع

- ۱- حصاری ب. نیکان فر ر. خانی ج. سکوتی ر و نجفی ا. ۱۳۹۰، تهیه مدل بیلان آب خاک با استفاده از GIS (مطالعه موردی حوضه آبریز نازلو چای). گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کرج، ۱۱۸ صفحه.
- ۲- حصاری ب. آخوند علی ع. م. قرمز چشمه ب. ۱۳۸۸. اصلاح DEM جهت تهیه نقشه پیوسته جریان آب رودخانه (مطالعه موردی حوضه بالادست سد کرخه). دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان. اصفهان.
- ۳- فصیحی. بهشتی. ضیایی. علی نقی. (۲۰۲۲). برآورد نفوذ خالص و سایر اجزای بیلان آب خاک براساس روش تورنت وایت ماتر با کد SWB\_2، (مطالعه موردی: حوضه آبریز نیشابور). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۱۶(۱)، ۱۶۵-۱۸۰.
- 1) Alley W. M. 1984. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models. *Water Resource Research*. 20:1137-1149.
- 2) Calvo J. C. 1986. An evaluation of Thornthwaite's water balance technique in predicting stream runoff in Costa Rica. *Hydrological sciences Journal*. 31:51-60.
- 3) Dash, S. S., Sahoo, B., & Raghuwanshi, N. S. 2021. How reliable are the evapotranspiration estimates by Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and Variable Infiltration Capacity (VIC) models for catchment-scale drought assessment and irrigation planning?. *Journal of Hydrology*, 592, 125838
- 4) Dunne K. A. and Willmott C. J. 1996. Global Distribution of Plant-extractable Water Capacity of Soil. *International Journal of Climatology*. 16, 841-859.
- 5) Dyer J. M. 2009. Assessing topographic patterns in moisture use and stress using a water balance approach. *Landscape Ecology* 24. 391-403. <http://oak.cats.ohiou.edu/~dyer/index.html>. Visit: 2010.
- 6) ESRI, 2022, ArcGIS10.X and Geostatistical analyst documentation help, ESRI, Inc . <http://www.esri.com>
- 7) FU G., 2005. Modeling water availability and its response to climate change for the Spokane river watershed. Ph.D dissertation. Washington state university. Department of Biological Systems Engineering.
- 8) Huang, D., Wang, J., & Khayatnezhad, M. 2021. Estimation of actual evapotranspiration using soil moisture balance and remote sensing. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(4), 2779-2786
- 9) Maidment R. D., Olivera F. 1997. Water balance of Niger River Basin in West Africa. 17th Annual ESRI User Conference. San Diego. C. 4. <http://crwr.utexas.edu/gis/gishyd98/atlas/esri97/ESRI.htm>. Visit: 2011.
- 10) Mather. 1974. *Climatology: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill. NY.
- 11) Reed S., Maidment R. D., Patoux J. 1997. Spatial water balance of Texas. [www.crwr.utexas.edu/gis/gishyd98/library/wbtexas.htm](http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishyd98/library/wbtexas.htm)
- 12) Pereira, L. S., Paredes, P., & Jovanovic, N. 2020. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural water management*, 241, 106357.
- 13) Wen, Z., Wu, J., Yang, Y., Li, R., Ouyang, Z., & Zheng, H. 2022. Implementing intercropping maintains soil water balance while enhancing multiple ecosystem services. *CATENA*, 217, 106426.