DOI: http://dx.doi.org/10.22092/wmej.2014.106267

پژوهش‌های آبخیزداری
شماره ۱۰۳، تابستان ۱۳۹۳
(پژوهش و سازندگی)

ارزیابی مدل توزیعی بیلان آبی ماهانه در برآورد رواناب حوضه در مناطق خشک با استفاده از GIS و RS، مطالعه موردی: حوزه آبخیز یزد-اردکان

• جلال برخورداری

مربی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی یزد (نویسنده مسئول)

• تراحل وارتانیان

دانشیار، دانشکده جغرافیا و زمین‌شناسی، دانشگاه دولتی ایروان، ارمنستان

تاریخ دریافت: آبان ماه ۱۳۹۱   تاریخ پذیرش: خرداد ماه ۱۳۹۲

تلفن تماس نویسنده مسئول: ۰۹۱۳۲۵۵۰۰۵۷

Email: jbarkhordary@yahoo.com

چکیده

کمبود منابع آب شیرین مهمترین محدودیت در حوزه‌های آبخیز مناطق خشک می‌باشد. بهترین راه حل برای این مشکل حفاظت بهتر منابع آب موجود می باشد، از آنجایی که مقدار بارش و تبخیر و تعرق تغییرات زیادی در سطح حوضه دارد، آب قابل استفاده نیز (در قالب رواناب سطحی و زیرسطحی) از نظر زمانی و مکانی با توجه به نوع بافت خاک و نوع پوشش اراضی در سطح حوزه آبخیز متغیر می‌باشد. در این تحقیق مدل توزیعی بیلان آبی تورنت وایت- ماتر که بر اساس نقشه‌های ماهانه بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه و نقشه ظرفیت نگهداری آب در خاک است، برای حوضه یزد-اردکان به‌صورت توزیعی استفاده شد. نتایج مدل نشان داد که مقدار متوسط ارتفاع رواناب سالانه حوضه ۶۶/۷ میلی‌متر است که نیمی از آن به‌صورت جریان زیرسطحی می‌باشد که این رواناب از ارتفاعات به سمت دشت و کویر سیاه‌کوه جریان می‌یابد. مقایسه آماری داده‌های دبی محاسبه و مشاهده شده در زیر حوضه پیشکوه نشان داد که ضریب همبستگی بین میانگین دبی محاسبه و مشاهده شده در محدوده فاصله اطمینان ۹۰ درصد داده‌های مشاهده شده قرار دارد، لذا می‌توان اظهار نمود که نتایج مدل در سطح اطمینان ۹۰ درصد قابل قبول می‌باشد. همچنین، با استفاده از این روش می‌توان، میزان رواناب ماهانه حوضه‌های مشابه حوضه مذکور را برآورد نمود.

کلمات کلیدی: آب مازاد، تبخیر و تعرق واقعی، رواناب زیرسطحی، روش تورنت وایت-ماتر، ظرفیت ذخیره آب در خاک.

Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi) No 103 pp: 154-164

Evaluation of a distributed monthly water balance model to determine catchment runoff in arid region using RS and GIS (A case study in Yazd-Ardakan basin)

By: J. Barkhordari, Scientific Board, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Yazd, Iran. (Corresponding Author; Tel: +989132550057). T. Vartanian, Associate of Prof., Geography and Geology department, Yerevan State Unversity, Armania.

Fresh water is becoming a scarce resource of the arid region. The only option left to manage with this situation is to conserve water resources. Since the amount of rainfall and evapotranspiration rate vary within a watershed, available water for surface and groundwater recharge also varies both on spatial and temporal scales. Moreover, groundwater recharge (and ultimately the total water yield) is directly influenced by the soil texture and land cover in the watershed.

In this study, the distributed Thornthwaite-Mather water balance model for the Yazd-Ardakan catchment in Iran was developed based on monthly precipitation, potential evapotranspiration maps and water holding capacity map. The amount of annual runoff from the catchment predicted by the model is 66.7 mm, which is accumulated in the plain and then salt desert. Half of discharge is contributed by the direct runoff and the groundwater contribution is significant.

A statistical comparison of the estimated and the measured stream flow of Pishkouh show the mean monthly and mean annual estimated and measured stream flows, the correlation coefficient between measured and estimated stream flows, the mean monthly and annual percentage error of estimation and the 90% confidence interval for the mean stream flow. Since the study of water balance using the TM method with the help of remote sensing and GIS was found to be very helpful in determining the amount of monthly runoff in an arid region like the Yazd-Ardakan catchment.

Keywords: Thornthwaite-Mather method, surplus water, Water Holding Capacity, actual evapotranspiration, runoff, subsurface.

.

مقدمه

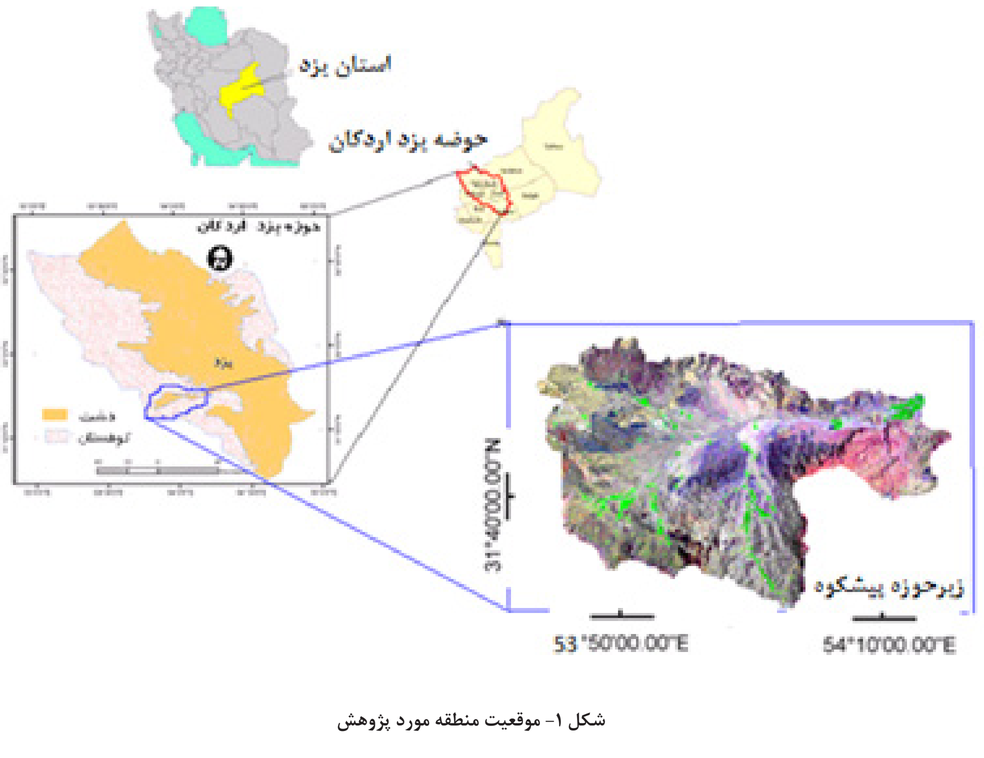
ایران در یکی از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان قرار گرفته است. تغییرات زیاد مکانی و زمانی بارش، میزان تبخیر و تعرق پتانسیل بالا، گستردگی حوزه‌های آبخیز و کمبود داده‌های دبی در زیر حوضه‌های کوچک بالادستی از خصوصیات این مناطق می‌باشد. لازم است، برای مدیریت پایدار منابع آب، از بیلان آب اطلاع کاملی وجود داشته باشد، استفاده از آب بهتر صورت گیرد و از هدر رفت منابع آب جلوگیری شود. بیلان آب در واقع بررسی میزان ورود و خروج، هدر رفت به‌صورت‌های مختلف و ذخیره آب از هنگام ورود به سامانه آبخیز به‌صورت بارش، رواناب، تبخیر و تعرق و ذخیره آب در خاک و اتفاقاتی که در مورد آن رخ می‌دهد، را در بر می‌گیرد و دانستن آن از ابزارهای لازم و اساسی مدیریت اصولی حوزه آبخیز است. بیلان آب و خاک با کار شایسته تورنت وایت در سال ۱۹۵۰ شروع و از آن به بعد محققین زیادی از سراسر دنیا سعی در به‌کارگیری و توسعه آن به‌کار بسته‌اند. این روش به خاطر سادگی و جنبه‌های مختلف و کاربردی آن در هیدرولوژی حوضه‌ها، مدیریت آبخیزها، آبیاری اراضی کشاورزی، مدیریت منابع آب و موازنه عرضه و تقاضا و پایش تغییرات منابع آب در سطوح مزرعه‌ای تا قاره‌ها و کل دنیا مورد استفاده قرار گرفته است (Barkhordari، ۲۰۱۳). البته در سال‌های اخیر با کاربرد سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی و جهت‌گیری بحث توزیعی آن، دقت و کارایی مدل به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. Jasrotia و همکاران (۲۰۰۹) در منطقه جامو کشمیر از مدل بیلان آبی ماهانه تورنت وایت-ماتر برای تهیه نقشه نیمه توزیعی پتانسیل رواناب استفاده نمودند و نقاط مناسب برای اجرای طرح‌های ذخیره رواناب‌های مازاد حاصل از بارش‌های موسمی را با دقت مناسبی برای زیر حوضه‌های مختلف تعیین نمودند. Giskeh و Kumar Sen (۲۰۰۵) در حوزه آبخیز روکسو در کشور پرتقال با استفاده از مدل بیلان‌آبی تورنت وایت-ماتر به‌صورت نیمه توزیعی، مقدار رواناب ماهانه هر محدوده را برآورد نمود و مجموع رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده را با تغییرات حجم آب دریاچه سد پایین‌دست، ارزیابی کرد که نتایج به‌دست آمده از دقت مناسب برخوردار بوده‌است. Mahdavi و Azarashi (۲۰۰۴) از مدل بیلان‌آبی ماهانه تورنت وایت به‌صورت یکپارچه برای برآورد دبی ماهانه ۱۲ حوضه منطقه آذربایجان و شمال خراسان در اقلیم نیمه‌خشک استفاده نمود. سپس داده‌های پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل و داده‌های مشاهده شده با استفاده از آزمون

t استیودنت مورد آزمون و تجزیه تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که از نظر آماری در سطح اعتماد پنج درصد اختلافی بین داده‌های مشاهده شده و محاسبه شده، وجود ندارد. لذا، می‌توان استفاده از مدل بیلان‌آبی ماهانه مذکور را برای برآورد رواناب ماهانه حوضه‌های فاقد آمار مشابه توصیه نمود. Hessari (۲۰۱۱) در تحقیقی در حوضه نازلو چای ارومیه با روش تورنت وایت-ماتر به‌صورت توزیعی در محیط نرم‌افزار ArcGIS بیلان‌آبی ماهانه دراز مدت حوضه را برآورد نمود و رواناب ماهانه برآورد شده را با آمار مشاهده شده در ایستگاه هیدرومتری مقایسه نمود که نتایج در سطح پنج درصد معنی‌دار بوده است. حوزه آبخیز یزد-اردکان با توجه به اهمیت زیاد آن از نظر قرار گرفتن در محدوده شهرهای مهم استان یزد، تاکنون مطالعات مختلفی برای برآورد رواناب و بررسی بیلان آبی صورت گرفته است، از آن جمله طرح جامع سیل به‌وسیله مهندسین مشاور عمران کویر یزد (۱۳۷۲) که برای هر یک از زیر حوضه‌های هفت‌گانه حوزه آبخیز یزد- اردکان از روش سازمان‌حفاظت خاک آمریکا به‌صورت یکپارچه میزان رواناب، برآورد شده است. همچنین Eslamian و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از روش منطقی ضریب رواناب زیر حوضه‌های یزد-اردکان را تعیین و حجم کل رواناب موجود را برآورد نمودند و از روی میزان بارش میزان تغذیه طبیعی دشت یزد-اردکان را به‌طور یکپارچه برآورد نمود.

در این تحقیق با توجه به کمبودهای آماری عوامل بیلان‌آبی از مدل چهار پارامتره تورنت وایت-ماتر (دما و بارش ماهانه، نقشه کاربری اراضی، نقشه بافت خاک) برای برآورد دبی خروجی از حوضه استفاده شد. هدف اصلی از این تحقیق تعیین مدلی ساده برای بازسازی و پیش‌بینی دبی ماهانه در حوضه‌های مرکزی کشور با استفاده از مدل توزیعی بیلان‌آبی ماهانه است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز یزد-اردکان با وسعت ۱۵۹۵۰ کیلومتر مربع بزرگ‌ترین حوزه آبخیز استان یزد می‌باشد. ارتفاع متوسط ۱۵۰۰ متر از سطح دریا و در محدوده جغرافیایی طول '۵۷ °۵۲ تا '۵۹ °۵۴ و عرض '۱۳ °۳۱ تا '۴۸ °۳۲ و اکثریت اراضی منطقه مورد مطالعه، دشتی بوده که به‌وسیله ارتفاعات احاطه شده و با شیب عمومی از جنوب غرب به شمال شرق گسترده شده است (شکل ۱). اقلیم غالب منطقه با استفاده از روش دومارتن اصلاح شده، خشک و سرد و متوسط بارندگی منطقه از ۴۲۰ میلی‌متر در ارتفاعات شیرکوه تا ۵۰ میلی‌متر در محدوده کویر سیاه‌کوه متغیر است. منطقه مورد مطالعه دارای زیر حوضه‌های مختلفی بوده که پیشکوه، پشتکوه و خضرآباد مهمترین آن‌ها از نظر تامین رواناب دشت یزد-اردکان می‌باشند.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش

روش پژوهش: در این تحقیق از مدل تورنت وایت-ماتر (۱۹۵۵)، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندســـت و نسخه‌نویسی در محیط نرم‌افزار ILWIS به‌صورت توزیعی برای برآورد بیلان‌آبی حوزه‌آبخیز یزد-اردکان توسعه یافته اســـت. داده‌های ورودی به مدل شامل ۱۲ نقشه متوسط بارش ماهانه، ۱۲ نقشه متوسط دمای ماهانه و نقشه ظرفیت آب موجود در خاک می‌باشد. در این تحقیق برای رسیدن به اهداف مورد نظر، چهار مرحله کاری انجام شد.

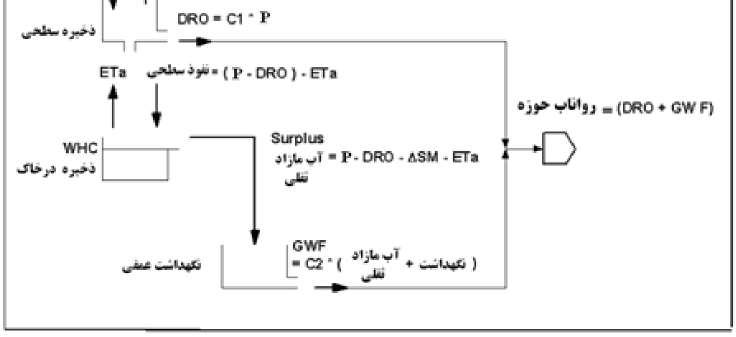
۱-تهیه و تنظیم داده‌های اقلیمی: این مرحله شـــامل جمع‌آوری داده‌ها، کنترل کیفیت آمار به روش آزمون توالی و بازســـازی آمار به روش نســـبت نرمال بوده است و برای بازسازی داده‌های بارش و دما، از روش تفاضل و گرادیان اســـتفاده شده است. سپس با استفاده از میانگین ماهانه داده‌ها و ارتفاع ایستگاه‌ها از سطح دریا، معادله گرادیان ماهانه بارش و دما در حوضه یزد- اردکان برای ماه‌های مختلف محاسـبه شد که در جداول ۱ و ۲ آمده است.

جدول ۱- معادلات گرادیان ماهانه بارش

ماه‌ها	معادلات‌گرادیان‌بارش	همبستگی	ماه‌ها	معادلات‌گرادیان‌بارش	همبستگی
مهر	P=0.0016H-0.48	۰/۷۰۱	فروردین	P=0.033H-33.12	۰/۸۷۴
آبان	P=0.0047H-2.78	۰/۷۷۳	اردیبهشت	P=0.011H-9.06	۰/۸۰۴
آذر	P=0.016H-10.84	۰/۹۱۷	خرداد	P=0.003H-2.78	۰/۷۴۹
دی	P=0.018H-9.01	۰/۸۸۵	تیر	P=0.0007H-0.49	۰/۶۰۲
بهمن	P=0.021H-11.26	۰/۸۸۱	مرداد	P=0.0004H-0.31	۰/۴۵۶
اسفند	P=0.017H-0.05	۰/۷۷۲	شهریور	P=0.0002H-0.21	۰/۵۵۴

جدول ۲- معادلات گرادیان ماهانه دما

ماه‌ها	معادلات‌گرادیان‌بارش	همبستگی	ماه‌ها	معادلات‌گرادیان‌بارش	همبستگی
مهر	T=0.0048-H26.01+	-۰/۹۴۲	فروردین	T=0.0072-H+27.35	-۰/۹۴۲
آبان	T=0.0035-H18.01+	-۰/۹۰۴	اردیبهشت	T=0.0073-H+33.06	-۰/۹۶۸
آذر	T=0.003-H12.31+	-۰/۹۴۵	خرداد	T=0.0079-H+39.01	-۰/۹۸۵
دی	T=0.0029-H9.68+	-۰/۹۶	تیر	T=0.0076-H+41.37	-۰/۹۸۷
بهمن	T=0.0051-H14.24+	-۰/۹۸۸	مرداد	T=0.0069-H+38.97	-۰/۹۷۱
اسفند	T=0.0057-H18.89+	-۰/۸۹۸	شهریور	T=0.0057-H+33.83	-۰/۹۵۷



شکل ۲- نمای شماتیک مدل

۲- تهیه نقشه تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه حوضه: نقشه‌های ماهانه تبخیر و تعرق ماهانه حوضه از روش تورنت وایت با استفاده از معادله زیر در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد.

$$ET_P = 16.2\left(\frac{10T_i}{I}\right)^a \quad (۱)$$

که در آن، ETP نقشه تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه حوضه (میلی‌متر)، Ti نقشه دمای متوسط ماهانه (سانتی‌گراد) که با استفاده از معادلات گرادیان دما و نقشه مدل ارتفاعی در محدوده حوضه تهیه شد و I شاخص حرارتی سالانه که عبارتست از مجموع شاخص‌های حرارتی ماهانه و مقدار a نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$a = \left(6.75\times10^{-7}\right)10^3 + \left(7.71\times10^{-5}\right)I^2 + \left(1.792\times10^{-2}\right)I \times 0.49239 \quad (۲)$$

$$I = \sum_{i=0}^{i=12}\left(\frac{T_i}{5}\right) \quad (۳)$$

۳- تهیه نقشه ظرفیت آب موجود در خاک (AWC): نقشه ظرفیت آب موجود در خاک با استفاده از نقشه بافت خاک، نقشه عمق ریشه و استفاده از جداول ارائه شده به وسیله سازمان حفاظت خاک آمریکا (۱۹۶۴) تهیه شد. این جداول ظرفیت نگهداری رطوبت قابل دسترس در خاک های با بافت مختلف را نشان می دهد. نقشه عمق ریشه نیز از روی نقشه پوشش اراضی و استفاده از جدول ۳ که از روی منابع موجود و کنترل زمینی تهیه شده، تعیین شد.

- محاسبات مدل توزیعی بیلان آبی تورنت وایت-ماتر: ساخت بیلان آبی، اولین گام در فهم رژیم آب در یک ناحیه مشخص است. گام زمانی به‌صورت دراز مدت سالانه، سری زمانی سالانه، متوسط دراز مدت ماهانه، سری زمانی ماهانه و روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Mehta و همکاران، ۲۰۰۶). در زیر ساختار و نحوه محاسبه آورد حوضه در گام ماهانه و سالانه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۲ نمایی کلی از این مدل را ارائه می‌نماید. پس از وقوع بارندگی قسمتی از بارش به‌صورت رواناب مستقیم از منطقه خارج می‌شود که مقدار آن از ضرب میزان بارش P در ضریب رواناب به‌دست می‌آید. در این تحقیق، نقشه بارش از معادلات گرادیان ماهانه بارش و نقشه ضریب رواناب (C1) با استفاده از نقشه‌های شیب و پوشش اراضی تهیه و مورد استفاده قرار گرفته است. سپس نقشه بارش موثر (Peff) از کسر میزان بارش از میزان رواناب مستقیم (DRO) به دست آمد. (ماه‌های سال= i)

$$DRO_i = C_1 \times P_i \quad (۴)$$

$$P_{eff} = P_i - DRO_i \quad (۵)$$

جدول ۳- تعیین میانگین عمق ریشه بر اساس نوع پوشش اراضی

ردیف	نوع پوشش اراضی	عمق ریشه (m)
۱	مناطق جنگل‌کاری شده	۱/۲- ۱
۲	اراضی کشاورزی	۰/۴-۱
۳	اراضی بایر	۰/۱-۰/۲
۴	باغات	۱-۱/۵
۵	مراتع	۰/۱-۰/۳
۶	مناطق سنگی	۰/۱-۰/۲
۷	اراضی شور و مرطوب	۰/۷۵-۱
۸	اراضی مسکونی	۰/۱۵-۰/۲۵

بخشی از بارش موثر به‌صورت تبخیر و تعرق به جو باز می‌گردد و باقی‌مانده آن به‌صورت نفوذ سطحی (SRECH) وارد خاک می‌شود. اختلاف میزان بارش موثر و تبخیر و تعرق پتانسیل، میزان نفوذ سطحی به خاک را تعیین می‌نماید. (اگر Peff >ETp)

$$SRECH_{(i)} = P_{eff(i)} - ET_{P(i)} \quad (۶)$$

در زمان و محل‌هایی که میزان نفوذ سطحی مثبت است. بارش موثر بیشتر از مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل است و ظرفیت نگهداری آب خاک پر نشده است، مقداری از نفوذ سطحی صرف اضافه شدن رطوبت خاک (SM) می‌شود که مقدار آن به وسیله معادله ذیل به دست می آید.

$$SM_{(i)} = SM_{(i-1)} + SRECH_{(i)} \quad (۷)$$

پس از پر شدن ظرفیت نگهداری آب در خاک به وسیله رواناب نفوذ یافته سطحی، قسمتی از رواناب باقی‌مانده به‌صورت رواناب زیرسطحی شکل می‌گیرد. محاسبه رواناب زیرسطحی باید از اولین ماه مرطوب سال صورت پذیرد. در زمان و محل‌هایی که میزان نفوذ سطحی منفی است. بارش موثر

کمتر از مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل است، آبی برای افزایش رطوبت خاک وجـود ندارد. در این حالت تخلیه رطوبت خاک توانی انجام می‌شـود که با معادله زیر قابل برآورد است.

$$SM_{(i)} = WHC \times \exp^{(APWL(i)/WHC)} \qquad (۸)$$

در اینجا مجموع پتانسـیل کاهش آب APWL همیشـه مقداری منفی است که نشـان‌دهنده تغییرات خشکی خاک اسـت. برای ماه‌های خشک (SRECH<۰) مقدار مجموع پتانسیل کاهش آب از معادله زیر به دست می‌آید.

$$APWL_{(i)} = APWL_{(i-1)} - SRECH_{(i)} \qquad (۹)$$

برای ماه‌های مرطوب (SRECH>۰) مقدار مجموع پتانسـیل کاهش آب برابر صفر می‌باشد که نشـان‌دهنده عدم خشکی خاک می‌باشد. اگر بارش موثر بیشـتر از تبخیر و تعرق پتانسـیل باشـد، مقدار تبخیر تعرق واقعی (ETa) را برابـر تبخیر و تعرق پتانسـیل (ETp) در نظر می‌گیرند و گرنه مقدار تبخیر و تعرق واقعی از معادله زیر به دست می‌آید.

$$ET_a = P_{eff} - SM_{(i)} \qquad (۱۰)$$

در اینجا میـزان تغییرات رطوبت خـاک (ΔSM) معادل اختلاف میزان رطوبت‌خـاک در این ماه به میـزان رطوبت خاک در ماه قبل که از معادله زیر به‌دست می‌آید.

$$SM_{(i)} = SM_{(i)} - SM_{(i-1)} \qquad (۱۱)$$

کسـری رطوبت‌خاک نیز از اختلاف میان، مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی در ماه‌های مشابه از طریق معادله زیر به‌دست می‌آید.

$$Deficit_{(i)} = ETp_{(i)} - ET_{a(i)} \qquad (۱۲)$$

روانـاب اضافی خاک از حاصل اختلاف میان بـارش موثر و مجموع تغییر ذخیـره رطوبت خـاک در هر ماه و مقدار تبخیر و تعـرق واقعی از معادله زیر به‌دسـت می‌آید. آب‌مازاد، پـس از پرکردن خلل و فرج لایه‌های خاک به‌صورت ثقلی به‌طرف پایین حرکت می‌کند.

$$Surplus_{(i)} = P_{eff(i)} - \left[SM_{(i)} + ET_{a(i-1)}\right] \qquad (۱۳)$$

آب مـازاد نفوذ کردـه از لایه‌های بالایی خاک اضافه می‌شـود به رطوبت نگه‌داشته شده از ماه قبل در خاک و مجموع آب قابل دسترس (TARO) هر ماه است که جریان زیرسطحی را ایجاد می‌نماید و از معادله زیر به‌دست می‌آید.

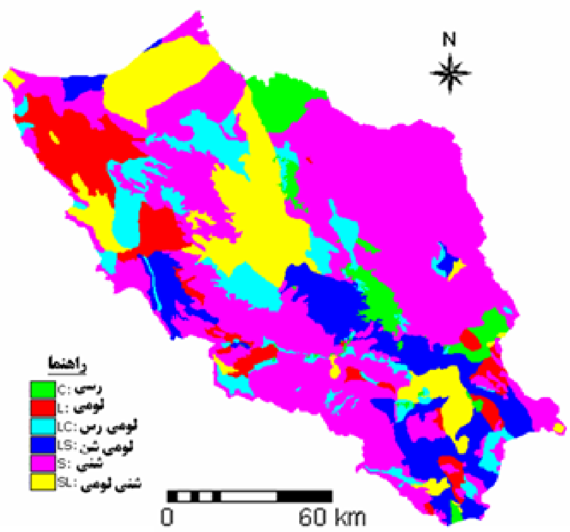
$$TARO_{(i)} = Surplus_{(i)} + Detention_{(i-1)} \qquad (۱۴)$$

ذخیره زیرسـطحی رواناب (TARO) مهمترین نقش را در شـکل دادن جریان زیرسـطحی دارد. قسمتی از ذخیره زیرسطحی آب به‌صورت جریان زیرسطحی خارج می‌شود و مقداری از آن تا ماه‌های بعد نگه‌داشته می‌شود. درصدی از آب ذخیره شـده که به‌صورت جریان زیرقشری از منطقه خارج می‌شود، متغییر بوده که در منابع مختلف معمولا ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود (Assari، ۲۰۱۱، Kumar Sen و Gieske، ۲۰۰۵). مابقی آب به‌صورت نگه‌داشت در خاک باقی می‌ماند که به رواناب مازاد ماه قبل اضافه می شـود و هر ماه به همین منوال ادامه می‌یابد. در نهایت مجموع رواناب مستقیم (DRO)و رواناب زیرسطحی (GWF) هر ماه، میزان کل رواناب حوضه را مشخص می‌نماید.

حوضه رواناب=DRO+GWF (۱۵)

نتایج و بحث

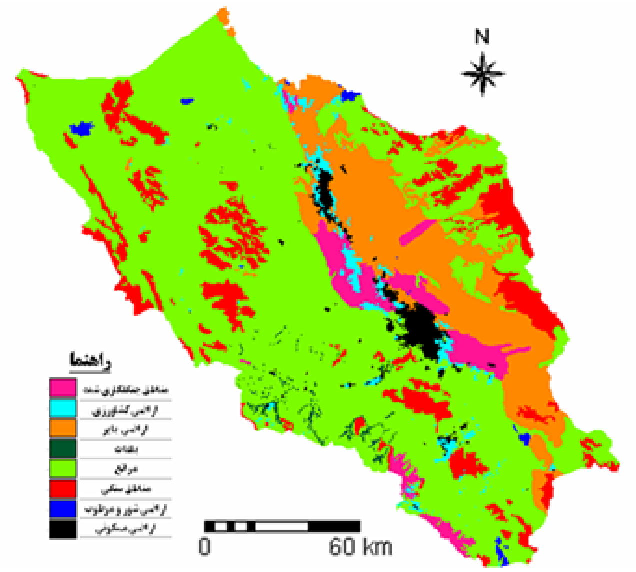
نقشـه بافت خاک و حجم ذخیره رطوبت: بر اساس نقشه طبقه‌بندی خاک اسـتان، نوع خاک‌های موجود در محدوده مورد مطالعه شـامل لیتوسل ، رگوسل و کمبیسـل می‌باشد. خاک‌های لیتوسل دارای بافت‌های شنی و شـنی‌لومی و عمق کم بوده که می‌تواند ۱۰۰ میلی‌متر بر متر، توان ذخیره رطوبت (TAM) داشته باشد. این خاک‌ها در مناطق شرق و جنوب غرب منطقه گسترش دارد. خاک‌های رگوسل که غالب منطقه را پوشش می‌دهد از جنوب غرب تا شـمال غرب دیده می‌شـود. عمق این خاک‌ها متوسط و بافت لومی‌رسـی و لومی و دارای توان ذخیره رطوبت ۲۰۰ میلی‌متر بر متر هسـتند. خاک‌های کمبیسل که بیشتر در مناطق شـور مرکزی و شمال حوضه گسـترش دارد. عمق این خاک‌ها زیاد و دارای توان ذخیره رطوبت بالای ۲۵۰ میلی‌متر بر متر هستند (Doorenbos و Kassam، ۱۹۸۶). شـکل ۳ نقشـه تغییرات مکانی بافت خاک حوضه مورد مطالعه را نشـان می‌دهد.



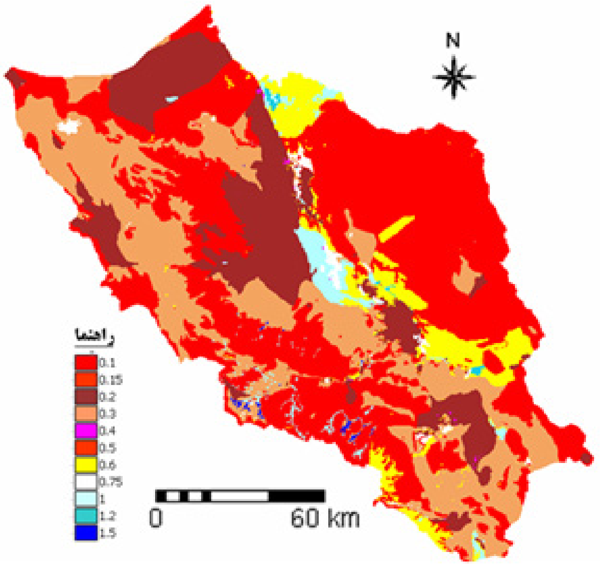
شکل ۳- نقشه بافت خاک در حوضه یزد-اردکان

نقشه پوشش اراضی و عمق ریشه: نقشه پوشش اراضی حوضه (شکل ۴) با استفاده از تصاویر لندست تاریخ جولای ۲۰۰۷ و جمع‌آوری داده‌های زمینی با اسـتفاده از روش ترکیبی طبقه‌بندی تهیه شـد. عمق ریشه در انواع پوشـش اراضی حوضه، رابطه مستقیمی با مقدار آب موجود در خاک دارد. مراتع، اراضی بایر و مسکونی دارای عمق ریشه بسیار کمی (بین ۰/۱ تا ۰/۴ متر) هستند و مقدار آبی که می‌توانند در داخل خود ذخیره نمایند، کم است. از سوی دیگر مناطق جنگل‌کاری شده، اراضی کشاورزی و باغات

دارای عمق ریشـــه نســـبتا زیاد (بین یک تا ۱/۵ متر) هستند که مقدار آب ذخیره شده در آن‌ها هم زیاد است (شکل ۵).



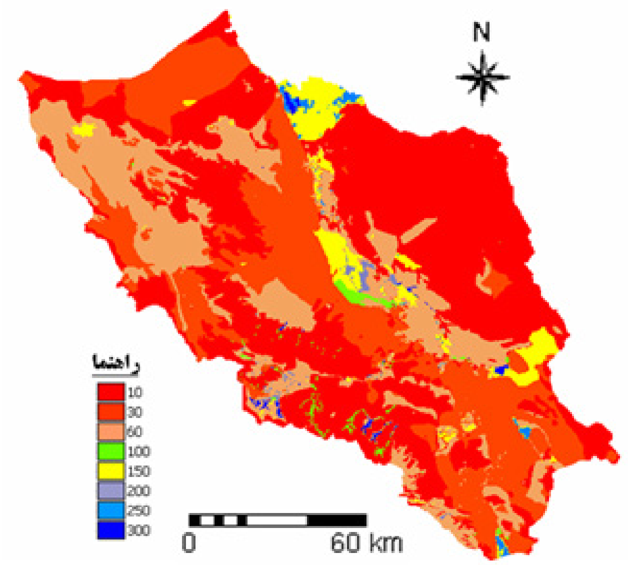
شکل ۴- نقشه پوشش اراضی در حوضه یزد-اردکان



شکل ۵- نقشه عمق ریشه در حوضه یزد-اردکان(به متر)

نقشه ظرفیت آب موجود در خاک : ظرفیت آب موجود در خاک بستگی به بافت خاک و نوع پوشش اراضی دارد. بافت‌های متفاوت خاک دارای توان ذخیره آب متفاوت در واحد عمق هســـتند. در شرایط مشابه، پوشش‌های اراضی مختلف دارای عمق ریشه متفاوت هستند که می‌توانند آب را در خود ذخیره کنند. از این‌رو ظرفیـــت آب موجود در خاک (WHC) می‌تواند از حاصل‌ضرب کل ذخیره آب خاک (TAM) در عمق ریشه که با نوع پوشش اراضی هر محدوده تعیین شود (شکل ۶).

نقشه ظرفیت آب موجود در خاک : ظرفیت آب موجود در خاک بستگی به بافت خاک و نوع پوشـــش اراضی دارد. بافت‌های متفاوت خاک دارای توان ذخیره آب متفاوت در واحد عمق هســـتند. در شرایط مشابه، پوشش‌های اراضی مختلف دارای عمق ریشه متفاوت هستند که می‌توانند آب را در خود ذخیره کنند. از این‌رو ظرفیـــت آب موجود در خاک (WHC) می‌تواند از حاصل‌ضرب کل ذخیره آب خاک (TAM) در عمق ریشه که با نوع پوشش اراضی هر محدوده تعیین شود (شکل ۶).



شکل ۶- نقشه ظرفیت آب موجود در خاک (به میلی‌متر)

بیـــلان آبی حوضه: مقـــدار پارامترهای بیلان آبی حوضه بـــرای هر یک از ســـلول‌های ۶۰×۶۰ متر داخل محدوده مـــورد مطالعه تعیین که به‌صورت نقشـــه‌های توزیعی ارائه شـــد. در نهایت میانگین اعداد نقشه برای تعیین پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه، به‌صورت خلاصه در جدول ۴ ارائه شـــد. میزان ماهانه رواناب ســـطحی، زیرســـطحی و کل روانـــاب خروجی حوضه مهمترین نتایج مدل بوده اســـت. به‌منظور محاسبه رواناب سطحی از نقشه ضریب رواناب (C_1) که از نقشـــه شـــیب و کاربری اراضی اســـتفاده شد و متوسط ضریب رواناب حوضه یزد-اردکان در این روش ۰/۳۱ به‌دست آمده که با نتایج مطالعه Eslamian و همکاران (۲۰۰۷) تقریبا نزدیک اســـت، علاوه بر این که تأثیر تغییرات مکانی مقدار ضریب رواناب را در محاســـبات لحاظ و دقت محاسبات را افزایش می‌دهد.

جدول ۴- متوسط ماهانه و سالانه پارامترهای بیلان آبی در حوزه آبخیز یزد-اردکان (میلی‌متر)

ماه‌ها	P	DRO	ETp	SRECH	APWL	ΔSM	ETa	Deficit	Surplus	WGL	TRO
دی	۳۴/۹	۵/۲۳۵	۷/۴۲	۱۸/۰۱	۰	۶/۷۸	۳/۱	۱۱/۷۳	۱۷/۰۲	۵/۲۲	۱۰/۴۵
بهمن	۳۹/۷	۵/۹۵۵	۱۲/۱۱	۱۸/۸	-۱۱/۴۱	۶/۴۴	۱۹/۱	۶/۰۳	۱۵/۶۸	۵/۹۴	۱۱/۸۹
اسفند	۴۱/۵	۶/۲۲۵	۲۱/۰۵	۱۰/۸۶	-۲۹/۷۸	۶/۲۷	۲۵/۶۲	۱۵/۲۹	۷/۹۹	۶/۲۲	۱۲/۴۴
فروردین	۴۲/۹	۶/۴۳۵	۴۳/۴۷	۰	-۶۸/۰۶	۰	۳۱/۸۸	۴۶/۲۵	۰	۶/۲۰	۱۲/۶۳
اردیبهشت	۱۷/۹	۲/۶۸۵	۷۵/۹	۰	-۱۵۵/۷۷	۰	۳۳/۳۵	۷۹/۹۴	۰	۲/۴۴	۵/۱۲
خرداد	۴/۷	۰/۷۰۵	۱۱۱/۴۶	۰	-۲۸۴/۷	۰	۲۵/۹۲	۱۳۰/۹۴	۰	۰/۶۱	۱/۳۱
تیر	۱/۳	۰/۱۹۵	۱۳۳/۵۵	۰	-۴۳۶/۷۱	۰	۱۸/۷۳	۱۵۷/۶۴	۰	۰/۱۷	۰/۳۶
مرداد	۰/۷	۰/۱۰۵	۱۲۰/۷۲	۰	-۵۷۱-۲۸	۰	۱۱/۸۴	۱۴۳/۶۷	۰	۰/۰۹	۰/۱۹
شهریور	۰/۳	۰/۰۴۵	۹۷/۴۷	۰	-۶۷۶/۰۵	۰	۷/۳۷	۱۱۴/۶۱	۰	۰/۰۴	۰/۰۸
مهر	۳/۵	۰/۵۲۵	۵۴/۴۳	۰	-۷۳۰/۶۹	۰	۴/۹۴	۶۳/۲۵	۰	۰/۴۸	۱
آبان	۸/۹	۱/۳۳۵	۲۸/۴۴	۰	-۷۵۷/۰۲	۰	۵/۵۷	۲۹/۲	۰	۱/۱۸	۲/۵۱
آذر	۲۸/۷	۴/۳۰۵	۱۱/۵۵	۸/۲۲	-۱۰۱۱/۲	۱۴/۱۳	۸/۲۷	۱۳/۶۳	۸/۵۳	۴/۲۹	۸/۵۹
سالانه	۲۲۵	۳۳/۷۵	۷۱۷/۵۷	۵۵/۸۹	-۴۷۳۲/۷	۳۳/۶۲	۱۹۵/۷	۸۱۲/۱۸	۴۹/۲۲	۳۲/۸۲	۶۶/۵۷

نتایج مدل نشـان می‌دهـد، حجم کل روانـاب برآورد شـده از مطالعات Eslamian و همکاران (۲۰۰۷) و طرح جامع سیل استان Consulting) Engineers of Yazd Omran Kavir، ۱۹۹۳) بیشـتر اسـت. از آن‌جایی که در روش‌های قبلی از روش یکپارچه استفاده شده و تنها رواناب سـطحی برآورد شده، رواناب زیرسـطحی در نظر گرفته نشده که می‌تواند این اختـلاف را موجه نماید. مطالعه بیلان آبی با اسـتفاده از مدل تورنت وایت-ماتر به‌صورت توزیعی و نیمه توزیعی که با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و سـنجش از دور انجام شده، نشان داد که نتایج رضایت بخشی به‌دسـت خواهد آمد که با نتایج Mahdavi و Azarakhshi (۲۰۰۴)، Jasrotia و همـکاران (۲۰۰۹) و Kumar Sen و Giskeh (۲۰۰۵) تشـابه دارد. وجه تمایـز این تحقیق با تحقیقـات Hessari (۲۰۱۱) در خصوصیـات و محدودیت‌های اقلیمی حوضه یزد-اردکان در منطه خشـک مرکزی کشـور، استفاده از روش نسخه‌نویسی در محیط نرم‌افزار ILWIS و استفاده از سلول‌های کوچک‌تر برای بالابردن دقت محاسبات بوده است. لذا قریب نیمی از رواناب حوضه به صورت جریان زیر سـطحی است (۳۲/۸ میلی متر) که از مناطق کوهستانی به طرف دشت جریان دارد. آب حاصل از بارش به‌صورت طبیعی باعث پرشدن خلل و فرج خاک تا میزان ظرفیت نگه‌داشت (WHC) آن ها می‌شود. ولی در ماه‌های خشک، معمولا میزان رطوبت خاک کمتر از این میزان است. بنابراین مقداری از بارندگی و رطوبت ذخیره شـده در خاک از ماه قبل، رواناب حوضـه را ایجاد می‌نماید. برای اطمینـان از این نظریه داده‌های میانگین بارندگی حوضه با داده‌های دبی اندازه‌گیری شده در ایسـتگاه هیدرومتری اسلامیه (زیرحوضه پیشکوه) با تاخیر صفر، یک و دو ماهه مشـخص و ضریب همبستگی آن ها تعیین شد. نتایج نشـان داد که بیشترین میزان همبسـتگی مربوط به تاخیر یک‌ماهه (R^2=۰/۸۱۸۸)، سـپس تأخیر صفرماهه (R^2=۰/۸۰۴۳) و تاخیر دوماهه (R^2=۰/۴۶۶۶) اسـت. لذا می‌توان اسـتنباط نمود کـه بارندگی ماهانه و رطوبت ذخیره شـده از ماه قبل مهمترین نقش دـر رواناب ماهانه حوضه دارند. همچنین، رواناب ذخیره شده درخاک به‌طور مشخص تنها در رواناب یک ماه بعد نقش دارد. طبق نتایج مدل بیشترین میزان جریان زیرسطحی (۱۲ میلی‌متر) مربوط به اسـفند تا فروردین ماه می‌باشد و بیشترین میزان بارندگی ماهانه (۴۲ میلی‌متر) مربوط به ماه‌های اسفند و فروردین می‌باشد. در طول ماه‌های خشک (اردیبهشـت تا آبان ماه) میزان بارندگی و به‌طبع آن میـزان رواناب کاهش زیادی دارد. لذا میزان بارش هر ماه و ماه قبل آن مهمترین عامل در تعیین میزان رواناب خواهد بود. ولی استفاده از نقشه‌های توزیعی این امکان را می‌دهد که در هر ماه در چه مناطقی رواناب اضافی و یا کمبود رطوبت وجود دارد که امکان مدیریت بهتر آن فراهم خواهد شد. در حوزه آبخیز مناطق خشـک (مشابه حوضه یزد-اردکان) به‌علت گستردگی زیاد و بالا بودن میزان تبخیر و تعرق پتانسـیل فرصت کمی برای مدیریت جامع رواناب و تمرکز آن‌ها وجود دارد و بایستی در وضعیت زمان و مکانی، رواناب اضافی را قبل از دسترس خارج شدن، حفاظت نمود.

در ماه‌های اسـفند و فروردین رواناب به نسـبت بالا بودن میزان بارندگی افزایش نداشـته است که مربوط به بالا بودن میزان تبخیر و تعرق پتانسیل

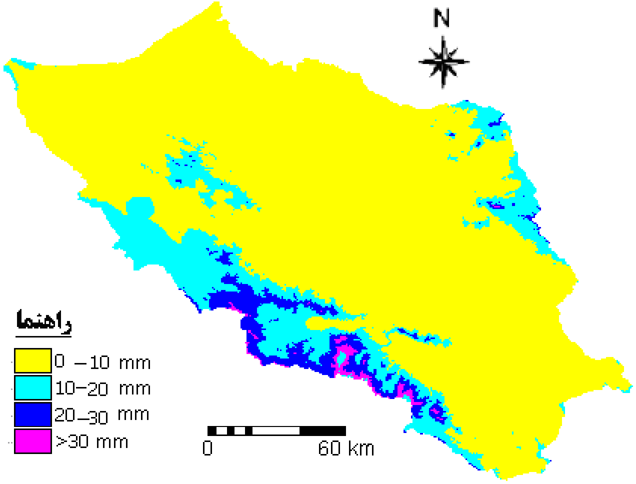
بالا می‌باشـــد. طبق اطلاعات جدول ۴ میزان تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه از ماه فروردین افزایش شـدیدی داشته است. بنابراین نقش تبخیر و تعرق در میزان رواناب در ماه های شروع فصل خشک بسیار موثر است. نقشه‌های خروجی مدل نشـــان می‌دهد که جریان زیرســـطحی از ارتفاعات به‌سمت دشــت امتداد دارد که با تمرکز زیاد قنات‌های کوهستانی در این مناطق تطابق دارد.

ارزیابی دقت مدل: به‌منظور ارزیابی دقت مدل، از میانگین ماهانه داده‌های دراز مدت اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری اسلامیه که در خروجی زیرحوضه پیشکوه قرار دارد، استفاده شد. مقایسه آماری داده‌های محاسبه شده و مشاهده شـده در این زیرحوضه به‌صورت خلاصه در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که ضریب همبستگی بین میانگین دبی محاسبه و مشـــاهده شده، در محدوده فاصله اطمینان ۹۰ درصد داده‌های مشاهده شده قرار دارد. لذا می‌توان اظهار نمود که نتایج مدل در سطح اطمینان ۹۰ درصد قابل قبول می‌باشد.

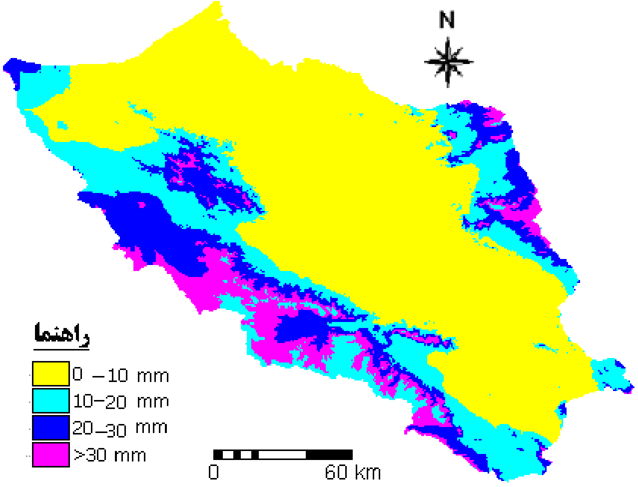
جدول ۵- مقایسه داده‌های رواناب ماهانه مشاهده شده و محاسبه شده در زیر حوضه پیشکوه

ماه‌ها	رواناب مشاهده شده (mm)		رواناب محاسبه شده (mm)		فاصله اطمینان ۹۰ درصد برای دبی مشاهده شده		درصد خطا	ضریب همبستگی (R^2)
	میانگین	استاندارد معیار	میانگین	استاندارد معیار	حد بالایی	حد پایینی		
دی	۱/۱۰	۰/۳۵	۱/۰۵	۰/۲۴	۱/۳۰	۰/۹۸	-۸/۶۱	۰/۶۳
بهمن	۱/۵۰	۰/۳۶	۱/۳	۰/۱۸۵	۱/۶۹	۱/۳۷	-۱۴/۶۱	۰/۴۹
اسفند	۱/۵۴	۰/۳۸	۱/۳۵	۰/۲۱	۱/۷۱	۱/۳۷	-۱۰/۶۶	۰/۳۷
فروردین	۱/۵۰	۰/۳۷	۱/۴	۰/۱۹	۱/۶۷	۱/۳۴	-۶/۵۵	۰/۴۴
اردیبهشت	۱/۱۰	۰/۲۶	۱/۱۵	۰/۲۰۵	۱/۲۲	۰/۹۸	۴/۹۶	۰/۴۷
خرداد	۱/۲۳	۰/۹۶	۰/۸۵	۰/۳۵۵	۱/۶۷	۰/۸۰	-۲۰/۰۱	۰/۸۷
تیر	۰/۶۶	۰/۳۰	۰/۵۵	۰/۲۳	۰/۷۹	۰/۵۲	-۱۰/۴۸	۰/۷۴
مرداد	۰/۴۳	۰/۱۹	۰/۳۵	۰/۱۴۵	۰/۵۲	۰/۳۵	۲۰/۰۴	۰/۵۷
شهریور	۰/۳۱	۰/۱۱	۰/۲	۰/۱	۰/۳۶	۰/۲۷	-۳۴/۸۷	۰/۷۲
مهر	۰/۴۱	۰/۴۵	۰/۲	۰/۲۱۵	۰/۶۲	۰/۲۱	-۴۶/۶۰	۰/۷۶
آبان	۰/۶۴	۰/۳۸	۰/۶۵	۰/۲۲۵	۰/۸۱	۰/۴۷	۲/۰۱	۰/۴۰
آذر	۱/۱۵	۰/۳۹	۰/۹۵	۰/۲۵۵	۱/۳۲	۰/۹۷	۱۳-۰۱	۰/۷۲
سالانه	۱۱/۶۵	۲/۴۵	۱۰/۱۹	۱/۴۴	۱۲/۷۶	۱۰/۵۵	-۱۲/۵۵	۰/۵۱

مناطق تغذیه آب زیر زمینی دشـــت: در منطقه مورد مطالعه، در دوره فروردیـــن تا آبان ماه معمولا رواناب اضافی وجود ندارد. در این ماه‌ها میزان بارش کمتر از تبخیر و تعرق پتانســیل است. از ماه آذر تا اسفند ماه مقدار تغذیـــه آب زیرزمینی در مناطق جنوب غرب و غرب حوضه وجود دارد که می‌توان با حفاظـت بهتر، بهره‌وری آن‌ها را افزایش داد. میزان و مناطق تغذیه آب زیرزمینـــی حوضه در ماه‌های مختلف متغیر بوده که بین ۲۰ تا ۵۰ درصد از ســـطح حوضه تغییر می‌نماید. شـکل ۷ و ۸ محدوده و میزان رواناب اضافی در ماه‌های آذر و بهمن که صرف تغذیه آب زیرزمینی می‌شود را نشـــان می‌دهد. تغذیه آب زیرزمینی تنها در ماه‌های آذر تا اسفند اتفاق می‌افتـد که مقدار آن بین ۸/۵ میلی‌متر در آذر ماه تا ۱۷ میلی‌متر در دی ماه متغیر می‌باشد.



شکل ۷- میزان و محدوده تغذیه آب زیر زمینی حوضه در آذر ماه



شکل ۸- میزان و محدوده تغذیه آب زیر زمینی حوضه در بهمن ماه

نتیجه‌گیری

پژوهندگان دیگری با بهره‌گیری از مدل‌های مختلف سعی بر شبیه‌سازی بارش-رواناب نموده اند. در این خصوص بیش از ۱۰ روش در ادبیات فنی ذکر شده که به تناسب هر منطقه، یکی از روش‌های مورد اشاره دارای قابلیت کاربردی است (Naseri و Zahraei، ۲۰۱۱). ولی محدودیت داده آماری مورد نیاز مدل‌ها و گستردگی حوضه‌های مناطق خشک، استفاده از این مدل‌ها را محدود کرده است. در این تحقیق با استفاده از کمینه داده‌های ورودی شامل بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل و ظرفیت نگهداری آب در خاک، بیلان‌آبی ماهیانه دراز مدت حوزه آبخیز یزد-اردکان با حدود ۱۶۰۰۰ کیلومتر مربع مساحت، بر اساس روش تورنت وایت–ماتر به‌صورت توزیعی در محیط GIS تهیه شده است. ارزیابی نتایج نشان داد که داده‌های شبیه‌سازی شده به وسیله مدل، تطابق خوبی با داده‌های ماهانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه اسلامیه در خروجی زیرحوضه پیشکوه داشته است. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، متوسط ارتفاع رواناب سالانه حوضه یزد-اردکان ۶۶/۷ میلی متر می‌باشد.

با توجه به این که مدل قابلیت شبیه‌سازی رواناب در تمام شبکه سلولی حوضه را دارد، این قابلیت مدل برای مدیران و کارشناسان، این امکان را فراهم می‌نماید که قبل از اجرای هر گونه عملیات، مناطق مختلف را از نظر پتانسیل ایجاد رواناب شناسایی نمایند. مدل مورد استفاده در این پژوهش را می‌توان برای سایر آبخیزهای با وضعیت هیدرولوژیک مشابه مورد استفاده قرار داد. همچنین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده این مدل را در گام‌های زمانی کوتاه‌تر به‌کار برد تا توانایی مدل بهتر بررسی شود.

منابع مورد استفاده

1. Barkhordari, J. 2013. The calculation of potential Runoff and Selection of the sites for underground dams in Yazd region of Iran (with use of RS, GIS and DSS). PhD Thesis, Yerevan State University, 151 pages.
2. Eslamian, S., A. Khatounabadi and H. Houzi. 2007. Estimation of natural aquifer recharge in Yazd Ardakan plain. proceeding of 9th national Irrigation and reduce evaporation conference, Shaid Bahonar University.
3. Hessari, B. 2012. Evaluation of soil water balance model using GIS, case study: Nazlouchai Watershed. Final Research Report, No.39414, Technical and Engineering Agricultural Research Institute, 126 pages.
4. Mahdavi, M. and M. Azarakhshi. 2004. A determination of an appropriate monthly water balance in small watershed of Iran. Natural Research Journal, 427-415 :(3)57.
5. Consulting Engineers of Yazd Omran Kavir. 1993. The master plan for flood in Yazd, Yazd-Ardakan watershed, 86 pages.
6. Naseri, M. and B. Zahraie. 2011. Evaluation of uncertainty monthly water balance model using self-organizing in the watershed. Proceedings of the 4th Iran Water Resources Management Conference, University of Amir Kabir.
7. Doorenbos, J. and A.H. Kassam. 1986. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33, FAO, Rome, Italy.
8. Jasrotia, A.S., A. Majhi and S. Singh. 2009. Water balance approach for rainwater harvesting using remote sensing and GIS techniques. Jammu Himalaya, India. Water Resource Manage, DOI: 10.1007/s-11269 5-9422-009.

9. Kumar Sen, P. and A. Gieske. 2005. Use of GIS and remote sensing in identifying recharge zones in an arid catchment: a case study of Roxo River basin, Portugal. Journal of Nepal Geological Society, 32–25 :31.

10. Mehta, V.K., M. Todd Walter and S.D. DeGloria. 2006. A simple water balance model. Arghyam/ Cornell University. http://www.indiawaterportal.org/ node/1043. Visit: 2010.