

## بررسی توزیع مکانی رواناب و تغذیه آب زیرزمینی در طبقه‌های اراضی و شیب حوزه آبخیز ونک

خدایار عبدالهی\*<sup>۱</sup>، سمیرا بیاتی<sup>۲</sup> و محمدعلی نصر اصفهانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، <sup>۲</sup> کارشناس ارشد منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد و <sup>۳</sup> استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۹

### چکیده

تغییرات زیاد توزیع و نوع بارش در سطح حوضه، در کنار سایر عوامل موثر بر رواناب و تغذیه آب زیرزمینی از جمله بافت خاک، کاربری اراضی و شیب زمین در سطح حوزه آبخیز، منجر به تنوع و تغییر در توزیع مکانی و زمانی مؤلفه‌های بیلان آب می‌شود. در این پژوهش، برای بررسی توزیع مکانی بیلان آب حوضه مورد مطالعه، با استفاده از مدل WetSpas-M، نقشه‌های رستری بارش، عمق آب زیرزمینی، دما، تبخیر و سرعت باد در مقیاس ماهانه اجرا شد. نتایج این اجرا پس از واسنجی برای شبیه‌سازی جریان مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، با توجه به کوهستانی بودن حوزه آبخیز ونک، نقشه‌های پوشش سطح برف نیز برای لحاظ کردن اثر ذوب برف به مدل معرفی شد. ارزیابی کارایی مدل با استفاده از ضریب نش-ساتکلیف ۰/۶۱ و ۰/۵۴ به ترتیب در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌عنوان تابع هدف نشان داد که مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه این حوضه از دقت قابل قبولی برخوردار است. پس از حصول نتایج توزیع مکانی رواناب و تغذیه آب زیرزمینی در انواع کاربری اراضی، شیب سطح زمین بررسی شد. تجزیه و تحلیل نقشه‌های توزیع مکانی رواناب و تغذیه آب زیرزمینی ماهانه نشان داد که ضریب رواناب و سهم تغذیه آب زیرزمینی اثرپذیری محسوسی از کاربری اراضی و شیب سطح زمین دارند، به نحوی که مناطق جنگلی و شیب‌های کم حوضه، با مقادیر تقریبی ۱۳۸ و ۵۹۶ میلی‌متر رواناب و تغذیه آب زیرزمینی سالانه، ضریب رواناب کمتر و سهم تغذیه پتانسیل بالاتری دارند. بیشینه تغذیه آب زیرزمینی در مقیاس زمانی ماهانه در ماه فوریه (۸۲ میلی‌متر در جنگل‌های تنک با شیب کمتر از ۱۰ درجه) است. لذا با تأثیری که شناخت این عوامل مدیریت زمین بر توزیع مؤلفه‌های بیلان آب دارند، می‌توانند به‌طور محلی نقش مؤثری در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب سطحی و زیرزمینی ایفا کنند.

**واژه‌های کلیدی:** جریان، ضریب رواناب، طبقه کاربری اراضی، مدل توزیعی، نش-ساتکلیف

### مقدمه

Schilling, ۲۰۰۹). نتایج مطالعات در بسیاری از مناطق نشان داده که تغییرات جریان رودخانه‌ها، در ارتباط با تغییرات کاربری اراضی و عوامل اقلیمی است که هر دو به‌عنوان کلید اصلی تغییر بیلان آب هستند (Tu, ۲۰۰۹). از سویی، بررسی‌ها نشان داده که تأثیر

هیدرولوژی حوزه‌های آبخیز تحت تأثیر عوامل متعدد از جمله آب و هوا و کاربری اراضی قرار دارد و تمام این عوامل و تعاملات، تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و تغییرات آب و هوایی قرار دارند (Tomer و

امروزه کاربرد مدل‌های توزیعی به دلیل افزایش دسترسی به داده‌های سنجش از دور در مقیاس‌های نسبتاً خوب، اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فیزیکی حوزه آبخیز در مقیاس کوچک و افزایش دسترسی به منابع کامپیوتر قدرتمند افزایش یافته است (Pechlivanidis و همکاران، ۲۰۱۱). البته از آنجا که این نوع مدل‌ها به داده‌های ورودی وسیعی برای شبیه‌سازی نیاز دارند، استفاده از این مدل‌ها، زمانی سودمند است که اطلاعات گسترده‌ای از حوزه آبخیز مانند هدایت هیدرولیکی خاک، پوشش گیاهی، شیب و غیره در دسترس باشد (Afkhani و Nassiri Saleh، ۲۰۱۵).

با پدیدار شدن GIS در کاربردهای بیلان آب مدل‌های متنوعی ارائه شده که یکی از این مدل‌های توزیعی، مدل WetSpa<sup>۲</sup> است. این مدل یکپارچه GIS بر اساس زمان تابع توزیع مکانی مدل بیلان آب WetSpa تهیه شد (Batelaan و همکاران، ۱۹۹۶؛ Batelaan و De Smedt، ۲۰۰۱). از آنجا که داده‌های کاربری اراضی معمولاً از تصاویر سنجش از دور به دست آمده، اگر سلول شبکه به عنوان یک طبقه تک کاربری رفتار کند، موضوع پیکسل مختلط ممکن است عدم اطمینان و عدم دقت را افزایش دهد. برای غلبه بر این مشکل ناشی از عدم همگنی در مقیاس پیکسل رویکرد مدل WetSpa این است که بیلان آب یک سلول شبکه را با توجه به بخش‌های پوشش گیاهی، خاک لخت، مخازن آب و بخش نفوذناپذیر محاسبه می‌کند. ساختار مدل به گونه‌ای طراحی شده که برای برآورد میانگین بلندمدت الگوهای مکانی بیلان آب، مناسب است (Batelaan و De Smedt، ۲۰۰۷).

مطالعات بسیاری با استفاده از مدل WetSpa در نقاط مختلف جهان انجام شده است. به عنوان مثال، Batelaan و De Smedt (۲۰۰۷) از ترکیب مدل WetSpa و مدل آب زیرزمینی ModFlow<sup>۳</sup> برای شبیه‌سازی تغذیه آب زیرزمینی در حوضه‌های دجله، دیمر و نیت استفاده کردند. نتایج بیانگر این بود که تغذیه دارای یک الگوی پیچیده مکانی و دارای

جهانی کاربری اراضی بر چرخه هیدرولوژیکی از تغییرات اخیر آب و هوایی پیشی می‌گیرد (Vorosmarty و همکاران، ۲۰۰۴). بنابراین، اثر کاربری اراضی بر مؤلفه‌های جوی چرخه هیدرولوژیکی (منطقه‌ای و جهانی) به طور فزاینده‌ای تأیید شده، هر چند اثر آن در مورد مؤلفه‌های زیرسطحی چرخه هیدرولوژیکی، به ویژه تغذیه آب‌های زیرزمینی به همان اندازه شناخته شده نیست (Paul، ۲۰۰۶). بنابر گزارش پژوهش‌های پیشین، شرایط آب و هوایی و توسعه زمین حتی بر تغییرات بارندگی، تبخیر-تعرق و جریان رودخانه‌ها تأثیر دارد (Ponpang-Nega و Techamahasaranont، ۲۰۱۶). در بیلان آب دریاچه‌ها و حوزه‌های آبخیز معمولاً بیشترین عدم اطمینان، مربوط به مقدار مؤلفه کنترل کننده است. به عنوان مثال اغلب، برآورد جریان آب زیرزمینی و تبخیر با دقت بالا و قابل اطمینان و حتی با پژوهش‌های گسترده، دشوار است (Winter، ۱۹۸۱؛ Labaugh و همکاران، ۱۹۹۷). این در حالی است که گردآوری بیلان آب منطقه‌ای دقیق یک پیش شرط برای برنامه‌ریزی کارآمد و اجرای مراحل مدیریت تلفات آب است (Knobloch و همکاران، ۲۰۱۴). مدل‌سازی هیدرولوژیکی یک ابزار مهم برای شناخت فرایندهای هیدرولوژیکی و ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر مؤلفه‌های بیلان آب است (Dai و همکاران، ۲۰۱۷).

به علت اهمیت مؤلفه‌های مکان محور در بیلان آب، یکی از فن‌های عصر حاضر، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)<sup>۱</sup> بوده که با رقومی کردن موقعیت‌های جغرافیایی و اعمال توابع مختلف، موجب تسریع در تهیه نقشه‌های مورد نیاز می‌شود و دارای قابلیت تحلیل، نتیجه‌گیری، گزارش و تهیه نقشه‌های دقیق تر در مقایسه با روش‌های دستی است (Kabir و همکاران، ۲۰۱۰). GIS در بررسی داده‌های ورودی و خروجی از مدل و ایجاد یک محیط متعارف برای مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (De Smedt و Batelaan، ۲۰۰۱).

<sup>۲</sup> Water and energy transfer between Soil, plants and atmosphere under quasi-steady state

<sup>۳</sup> Modular three dimensional finite-difference groundwater Flow

<sup>۱</sup> Geographic Information System

منطقه را فراهم می‌آورد. همچنین، بررسی توزیع مکانی تغذیه آب زیرزمینی در هر کاربری اراضی و شیب سطح زمین، می‌تواند کمک قابل توجهی در شناسایی مناطق مناسب تغذیه مصنوعی کند.

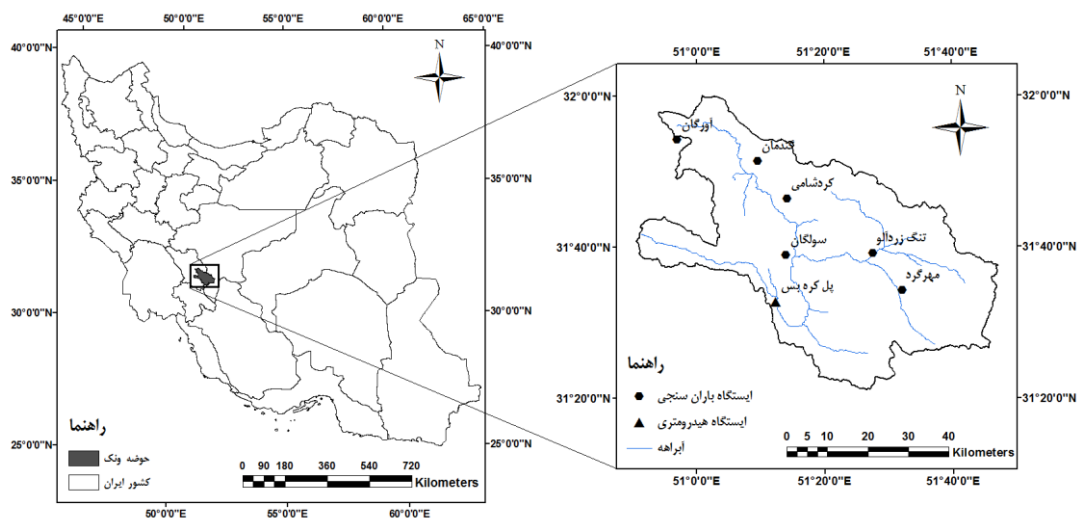
### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد پژوهش:** حوزه آبخیز ونک، یکی از زیرحوضه‌های کارون است که در استان‌های چهارمحال و بختیاری و اصفهان قرار دارد. این حوضه، منطقه‌ای نسبتاً کوهستانی بوده که با مساحت حدود ۳۰۷۴ کیلومتر مربع در محدوده بین ۵۰' ۵۰° تا ۴۷' ۵۱° طول شرقی و ۲۱' ۳۱° تا ۰۱' ۳۲° عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱).

تنوع شیب در این حوضه بسیار زیاد است و شامل اراضی مسطح تا شیب‌های بسیار تند بیش از ۶۰ درصد است (شکل ۲). انواع بافت خاک در این حوضه مطابق با طبقه‌بندی فائو شامل شنی، رسی، لوم رسی، لومی، رسی شنی، لوم شنی، رسی سیلتی و لوم سیلتی است که حدود ۳۱ درصد از مساحت حوضه را بافت خاک لوم شنی تشکیل می‌دهد. همچنین، عمده‌ترین کاربری اراضی در این حوضه جنگل نیمه انبوه (حدود ۲۶ درصد) است (شکل ۳).

وابستگی بسیار به بافت خاک و پوشش زمین است. در مطالعه‌ای دیگر، Pandian و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل WetSpas به برآورد آب زیرزمینی و درصد توزیع تغذیه آن در بخش‌هایی از هند (کومباتور و تیروپور) پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرات مکانی تغذیه آب زیرزمینی با توجه به توزیع کاربری اراضی، بافت خاک، شیب، سطح آب زیرزمینی، شرایط اقلیمی و غیره می‌تواند قابل توجه باشد.

در برخی پژوهش‌های صورت گرفته، تغییرات مکانی تغذیه آب زیرزمینی با توجه به توزیع کاربری اراضی، بافت خاک و سایر عوامل بررسی شده است، اما هدف از پژوهش حاضر برآورد توأم اثر تغییرات مکانی رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی در مقیاس زمانی ماهانه با توجه به توزیع طبقات کاربری اراضی و شیب سطح زمین در حوزه آبخیز ونک با استفاده از مدل توزیعی بیلان آب WetSpas-M است. نتایج چنین بررسی‌هایی، این امکان را فراهم می‌کند که پتانسیل جمع‌آوری رواناب در هر کاربری اراضی برای استحصال آب با کمترین هزینه و زمان بررسی شود. در شیب‌ها و کاربری‌های اراضی که مقدار رواناب نسبتاً زیاد باشد، می‌تواند باعث سیل‌خیزی در منطقه شود. شناخت بهتر شرایط، فرصت کاهش خسارات ناشی از سیل در



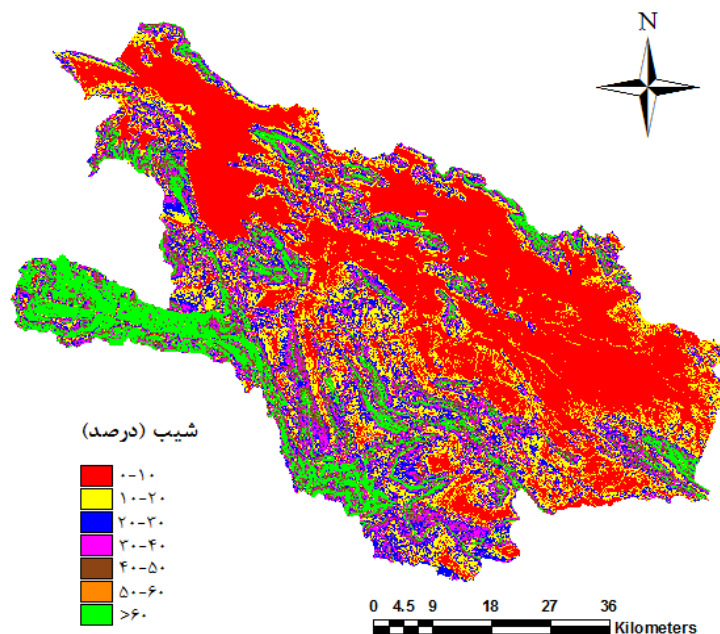
شکل ۱- موقعیت حوضه ونک و ایستگاه‌های داخل حوضه و شبکه آبراهه‌ها

آن در سازمان مهندسی هیدرولوژیک و هیدرولیک دانشگاه بروکسل به‌منظور پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاه و جو تحت حالت شبه ماندگار

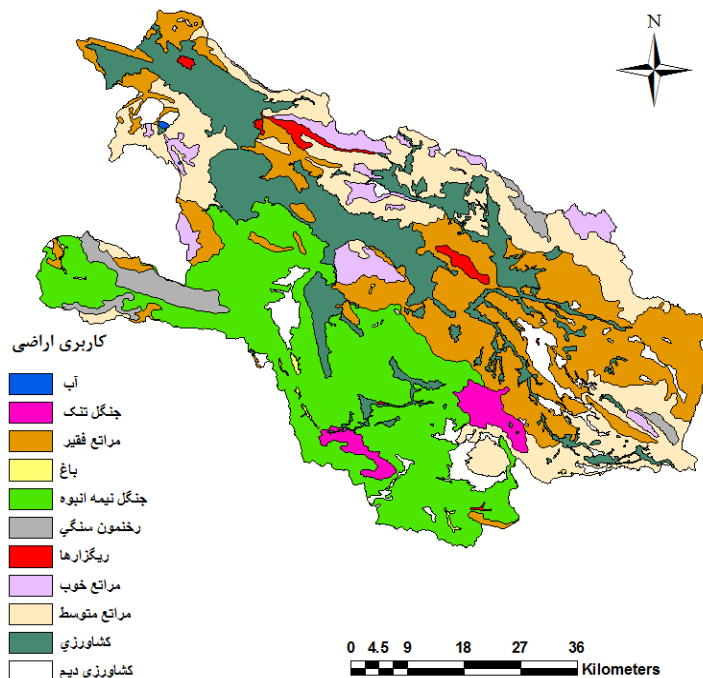
**مدل WetSpas-M:** با توجه به هدف توزیع مکانی و اهمیت بیلان آب در این ارتباط، مدل مورد استفاده این پژوهش مدل WetSpas-M است که نسخه اولیه

قابلیت برآورد رواناب برای طبقات کاربری اراضی مختلف نیز است (Abdollahi, ۲۰۱۵؛ Abdollahi و همکاران، ۲۰۱۷).

تهیه شده بود. نسخه جدید این مدل، با قابلیت استفاده در مناطق خشک و نیمه‌خشک و توانایی شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب در مقیاس زمانی ماهانه توسعه یافته و دارای یک ضریب رواناب کلی با



شکل ۲- نقشه شیب حوزه ونک



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی حوزه ونک

مزایای مدل یاد شده این است که به دلیل استفاده از داده‌های ماهانه، تطبیق زمانی خوبی برای مطالعات

به دلیل ساختار انعطاف‌پذیر، این مدل در حوزه‌های متوسط و بزرگ نیز قابل اجرا است. از

بارش روزانه (میلی‌متر بر روز در هر ماه)، سطح خشکی متوالی منطقه (میلی‌متر)، درصد سطح نفوذناپذیر در هر پیکسل، ضریب رواناب مناطق نفوذناپذیر، ضریب رواناب مناطق نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ، مقدار رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی و شیب سطح زمین (درصد) هستند.  $W_1$ ،  $W_2$  و  $W_3$  نیز وزن سه مؤلفه تشکیل‌دهنده  $C_{per}$  (کاربری اراضی، بافت خاک و شیب سطح زمین) است که به ترتیب با مقادیر  $0/4$ ،  $0/3$  و  $0/3$  بهترین تطابق را با ضرایب رواناب یاد شده در جداول مراجعه‌ای مدل WetSpss دارند (Abdollahi, 2015). همچنین،  $C_h$  در رابطه (۵) ضریب توصیف‌کننده وضعیت رطوبت خاک (بدون بعد) است که به دلیل نادر بودن داده‌های برداشت شده زمینی رطوبت خاک در مقیاس ماهانه از رابطه زیر برآورد می‌شود (Bahremand و همکاران، 2007).

$$C_{\square} = \frac{P_m}{LP(P_m^{\alpha} + ET_m^{\alpha})^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (10)$$

که در آن،  $LP$ ،  $ET_m$  و  $\alpha$  به ترتیب تبخیر-تعرق پتانسیل (میلی‌متر در ماه)، ضریب واسنجی بدون بعد اثر تبخیر-تعرق بر رواناب سطحی و ضریب تبخیر و تعرق هستند. رابطه فوق در شرایطی است که مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل بیشتر از بارش ماهانه باشد، در غیر این صورت مقدار  $C_h$  برابر با یک خواهد بود. پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی  $R_m$  نیز در این مدل به عنوان باقی‌مانده رابطه بیلان آب محاسبه می‌شود (Abdollahi و همکاران، 2017).

$$R_m = P_m - SR_m - ET_m \quad (11)$$

**داده‌های ورودی مدل:** شکل ۴، شماتیکی از ورودی‌ها و خروجی‌های مدل WetSpss را نشان می‌دهد. ابتدا نقشه‌های مرز حوضه، موقعیت ایستگاه‌ها و شبکه آبراهه‌ها، مدل رقومی ارتفاع (DEM)<sup>۱</sup> و شیب منطقه، با استفاده از نرم‌افزار ILWIS<sup>۲</sup> و ArcGis تهیه شد. نقشه‌های بافت خاک و کاربری اراضی حوضه کارون بزرگ به ترتیب از وزارت نیرو و اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان چهارمحال و بختیاری تهیه و متناسب با مرز حوضه، نقشه کاربری اراضی و

بیلان آب دارد، ضمن آن‌که نتایج ماهانه به مقیاس‌های دیگر زمانی چون فصل و سال قابل تبدیل هستند. مدل WetSpss حوضه را به صورت یک الگوی منظم از سلول‌های شطرنجی در آورده، کاربری اراضی در هر سلول شطرنجی را به چهار قسمت پوشش گیاهی، خاک لخت، مخازن آب و قسمت نفوذناپذیر تقسیم کرده و سپس محاسبه مؤلفه‌های بیلان آب را برای این قسمت‌ها انجام می‌دهد (Yun و همکاران، 2011).

$$ET_{raster} = a_v ET_v + a_s ET_s + a_o ET_o + a_i ET_i \quad (1)$$

$$S_{raster} = a_v S_v + a_s S_s + a_o S_o + a_i S_i \quad (2)$$

$$R_{raster} = a_v R_v + a_s R_s + a_o R_o + a_i R_i \quad (3)$$

که در آن‌ها،  $ET_{raster}$ ،  $S_{raster}$  و  $R_{raster}$  به ترتیب نشان دهنده تبخیر-تعرق، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی (میلی‌متر) و  $a_v$ ،  $a_s$ ،  $a_o$  و  $a_i$  نیز به ترتیب مساحت مربوط به بخش‌های پوشش گیاهی، خاک لخت، مخازن آب و سطح نفوذناپذیر در هر سلول شطرنجی هستند. رابطه بیلان آب نیز در این مدل به صورت زیر است.

$$P = I + S_v + T_v + R_v \quad (4)$$

که در آن،  $P$ ،  $I$ ،  $S_v$ ،  $T_v$  و  $R_v$  به ترتیب مقدار بارش، برگاب، رواناب سطحی، تبخیر-تعرق و تغذیه آب زیرزمینی (میلی‌متر) را نشان می‌دهند (Abdollahi و همکاران، 2017). همچنین، مقدار رواناب سطحی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$SR_m = C_{sr} C_{\square} (P_m - I_m) \quad (5)$$

که در آن،  $SR_m$ ،  $P_m$  و  $I_m$  به ترتیب مقدار رواناب سطحی، بارش و برگاب ماهانه (میلی‌متر) هستند و  $C_{sr}$  ضریب رواناب واقعی (بدون بعد) است که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$C_{sr} = \frac{C_{wp} \bar{P}_{24}}{C_{wp} \bar{P}_{24} - RCD \times C_{wp} + RCD} \quad (6)$$

$$C_{wp} = \left(1 - \frac{A_{Imp}}{100}\right) C_{per} + \frac{A_{Imp}}{100} C_{Imp} \quad (7)$$

$$C_{per} = W1 \left(\frac{0.02}{n}\right) + W2 \left(\frac{\theta_w}{1-\theta_w}\right) + W3 \left(\frac{S_p}{10+S_p}\right) \quad (8)$$

$$C_{Imp} = 0.9 \exp(0.024 A_{Imp}) \quad (9)$$

که در آن‌ها،  $C_{wp}$ ،  $\bar{P}_{24}$ ،  $RCD$ ،  $A_{Imp}$ ،  $C_{per}$ ،  $C_{Imp}$ ،  $n$  و  $S_p$  به ترتیب ضریب رواناب پتانسیل، میانگین

<sup>1</sup> Digital Elevation Model

<sup>2</sup> Integrated Land and Water Information System

هرچه مقدار این شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل بهتر است (Nash و Sutcliffe، ۱۹۷۰).

$$R^2 = \left( \frac{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 - \sum(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \right) \quad (12)$$

$$ENS = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{sim}})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \times 100 \quad (13)$$

$$MBE = \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})}{n} \quad (14)$$

که در آن‌ها،  $Q_{sim}$ ،  $Q_{obs}$ ،  $n$  به ترتیب نشان دهنده مقدار جریان مشاهداتی، جریان شبیه‌سازی شده، میانگین جریان مشاهده‌ای، میانگین جریان شبیه‌سازی شده و تعداد مشاهده هستند.

### نتایج و بحث

#### نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل: به‌منظور

شبیه‌سازی جریان، سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۴ برای دوره واسنجی و سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۰۰ برای دوره اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. در فرآیند واسنجی مدل از داده‌های ماهانه جریان در ایستگاه هیدرومتری پل کره‌بس و ضریب نش-ساتکلیف به‌عنوان تابع هدف استفاده شد. واسنجی اولیه مدل به روش دستی و با استفاده از روش سعی و خطا و سپس برای ضرایب ذخیره سطحی و زیرسطحی به روش جستجوی هدف (Goal Seek) صورت گرفت. بدین منظور، ابتدا با انتخاب مقادیر متوسط پارامترها مدل اجرا شد، سپس با توجه به مقدار ضریب نش-ساتکلیف و مقایسه عددی و چشمی هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، تغییر مقادیر پارامترهای مدل تا جایی ادامه یافت که پارامترهای مدل به مقدار بهینه خود نزدیک‌تر شد (جدول ۱). نتایج مقدار معیارهای ارزیابی مدل در جدول ۲ ارائه شده است. مقدار ضریب نش-ساتکلیف ۰/۶۱ و ۰/۵۴ و ضریب تبیین ۰/۶۴ و ۰/۵۹ به ترتیب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد که مدل با دقت مورد پذیرشی از نظر کارایی جریان ایستگاه پل کره‌بس را شبیه‌سازی کرده است. شاخص انحراف مدل نیز نشان داد که مدل جریان حوضه را در دوره واسنجی بهتر شبیه‌سازی کرده، در دوره اعتبارسنجی دارای خطای کم برآوردی است.

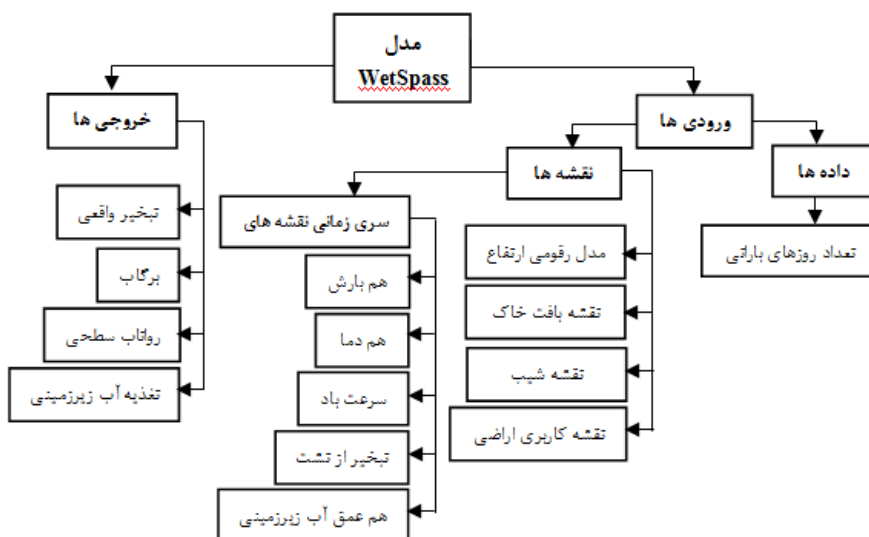
بافت خاک حوضه ونک استخراج شد. داده‌های اقلیمی-هیدرولوژیکی نیز از سازمان هواشناسی کشور، شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری و سازمان آب منطقه‌ای استان اصفهان جمع‌آوری شد. سپس، سری زمانی نقشه‌های رستری بارش و عمق آب زیرزمینی با استفاده از روش کریجینگ ساده و سری زمانی نقشه‌های هم‌میزان تبخیر از تشت و دما با استفاده از رابطه رگرسیون این پارامترها با ارتفاع به‌صورت رستری با قالب ASCII و اندازه سلولی ۱۰۰×۱۰۰ متر تهیه شد.

در این مدل، تمام نقشه‌های تهیه شده باید دارای تعداد سطر و ستون و اندازه پیکسل یکسان باشند. در مدل یاد شده تغییرات فصلی پوشش گیاهی از طریق نقشه‌های شاخص برگ بر بیلان آب تأثیر می‌گذارد، لذا با استفاده از تصاویر شاخص سطح برگ (LAI)<sup>۱</sup> اخذ شده از سایت مودیس، نقشه‌های ماهانه LAI و نقشه‌های پوشش سطح برف نیز به‌دلیل کوهستانی بودن منطقه و اهمیت رواناب ناشی از ذوب برف، با استفاده از روش خط هم‌دمای صفر و کنترل وجود بارش با نقشه‌های رستری بارندگی تهیه شد. دوره آماری این پژوهش ۱۴ سال است که ۱۰ سال برای دوره واسنجی و چهار سال برای دوره اعتبارسنجی انتخاب شد. به‌دلیل در دسترس نبودن داده‌های ماهانه آوریل ۲۰۱۱ تا مارس ۲۰۱۲ این ماه‌ها از بین دوره آماری حذف شد.

#### معیارهای ارزیابی مدل: به‌منظور ارزیابی کارایی

مدل در شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب از جمله رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی شاخص‌های آماری نش-ساتکلیف، ضریب تبیین  $R^2$  و انحراف مدل (Bias) مورد استفاده قرار گرفت. MBE معیاری است که کم برآوردی و یا بیش برآوردی مدل را نشان می‌دهد (Yaghoubi و Massah Bavani، ۲۰۱۴). دامنه تغییرات ضریب تبیین بین صفر و یک است و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان می‌دهد که همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بیشتر است (Gebre، ۲۰۱۵). محدوده تغییرات ضریب نش-ساتکلیف هم از منفی بی‌نهایت تا یک است و

<sup>۱</sup> Leaf Area Index



شکل ۴- شماتیکی از ورودی‌ها و خروجی‌های مدل WetSpass

جدول ۱- پارامترهای نیازمند واسنجی در مدل

پارامتر	مشخصه پارامتر	مقدار بهینه
برگاب	a	۲/۵
تبخیر-تعرق	$\alpha$	۰/۸
روتاب سطحی	LP	۲/۸
عامل ذوب برف	MF	۰/۰۲
روتاب سطحی	X	۰/۷
جریان پایه	$\beta$	۰/۶۸
مشارکت کننده تغذیه	$\emptyset$	۰/۲۱

جدول ۲- مقادیر معیارهای ارزیابی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی

دوره	طول دوره آماری	ENS	R <sup>2</sup>	Bias
واسنجی	۱۰ سال	۰/۶۱	۰/۶۴*	۰/۷۱
اعتبارسنجی	۴ سال	۰/۵۴	۰/۵۹*	-۲/۳۴

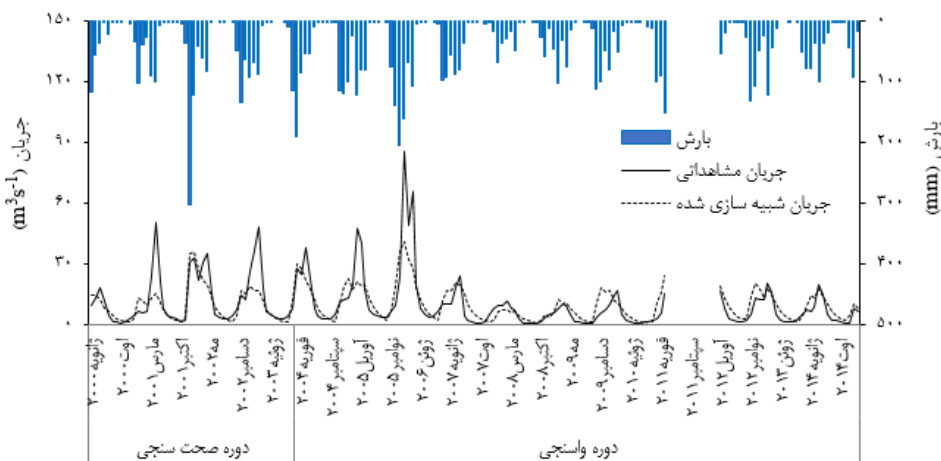
\* معنی‌داری در سطح یک درصد

مدل زمان رسیدن به اوج جریان را که در ماه فوریه سال ۲۰۰۶ به‌طور مناسبی شبیه‌سازی کرده است. پس از خلاصه‌سازی نتایج درازمدت، ملاحظه می‌شود که بیشترین مقدار اختلاف بین مقادیر جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در ماه‌های مارس و آوریل است (شکل ۶). همچنین، در این ماه‌ها مقدار جریان، کمتر از جریان مشاهداتی شبیه‌سازی شده است و به نظر می‌رسد، اثر رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده از رابطه درجه روز مورد استفاده در

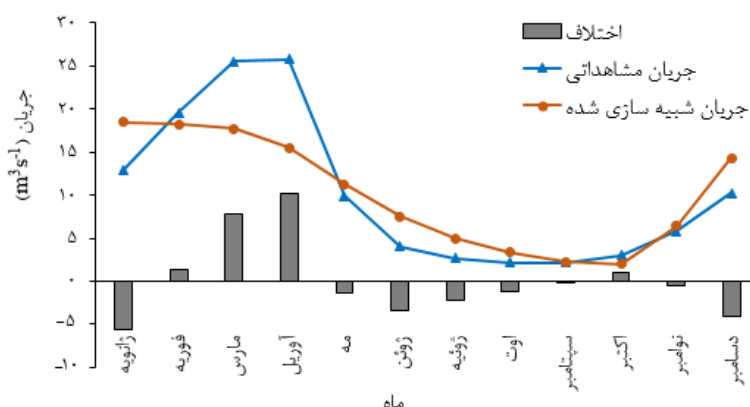
شکل ۵، هیدروگراف جریان مشاهده شده ایستگاه هیدرومتری پل کره‌بس و جریان شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل WetSpass-M را نشان می‌دهد. قسمت نمودار منقطع مربوط به زمانی است که داده‌های ایستگاه هیدرومتری پل کره‌بس در دسترس نبود. در این شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش بارش، مقدار رواناب افزایش یافته است. همچنین، با وجود این‌که نقاط پیک هیدروگراف (جریان‌های سیلابی) به‌وسیله مدل با اختلاف زیادی شبیه‌سازی شده است، ولی

واقعی خود شبیه‌سازی کرده است. علاوه بر این، می‌توان گفت به‌طور متوسط در بیشتر ماه‌ها مقدار جریان مشاهداتی سطحی بیشتر از مقدار مشاهداتی شبیه‌سازی شده است.

فرمول‌های داخلی مدل، به‌خوبی شبیه‌سازی نشده است. کمترین اختلاف بین جریان مشاهده شده و شبیه‌سازی شده نیز مربوط به ماه سپتامبر بوده، مدل با اختلاف بسیار کمی مقدار جریان را بیشتر از مقدار



شکل ۵- هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حوزه ونک



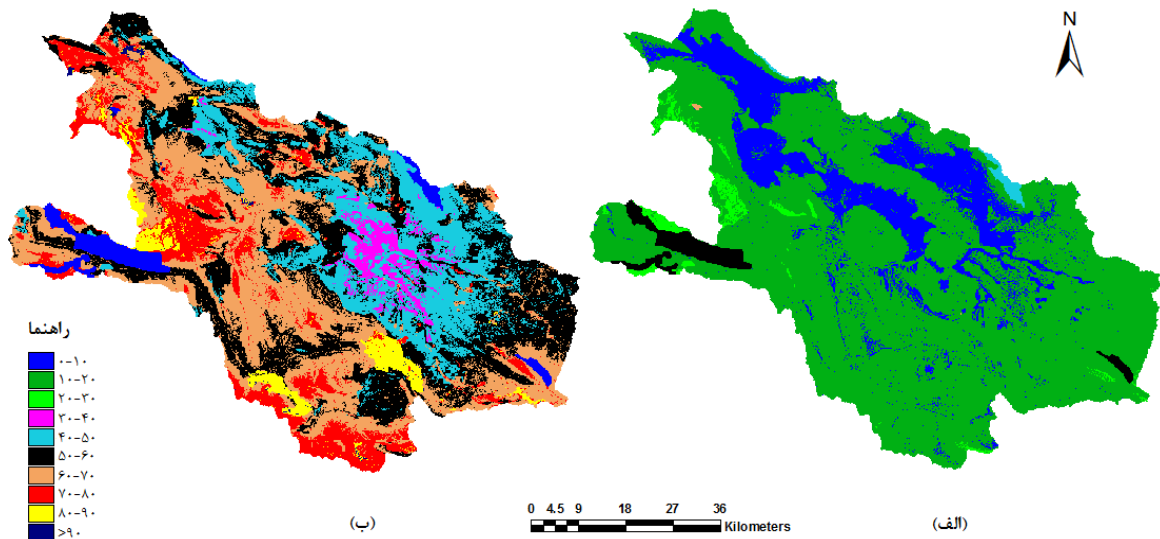
شکل ۶- میانگین ماهانه جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و مقدار اختلاف آن‌ها

اراضی کشاورزی نیز کم است. با توجه به نقشه تغذیه آب زیرزمینی مقدار تغذیه در جنگل‌های تنک ۸۰ تا ۹۰ میلی‌متر در ماه و در مراتع فقیر و متوسط و جنگل‌های نیمه انبوه ۵۰ تا ۷۰ میلی‌متر در ماه است. همچنین، در قسمت غربی حوزه ونک با شیب بیشتر از ۶۰ درجه (با توجه به نقشه شیب حوزه)، مقدار تغذیه آب زیرزمینی نسبتاً ناچیز است. مقایسه نقشه کاربری اراضی و میانگین توزیع مکانی تغذیه آب زیرزمینی نیز نشان می‌دهد که تغذیه آب زیرزمینی به پوشش زمین وابسته است که با پژوهش Batelaan و De Smedt (۲۰۰۷) هم‌خوانی دارد.

### نتایج توزیع مکانی رواناب و تغذیه آب زیرزمینی:

پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل یک سری زمانی از نقشه‌های مؤلفه‌های بیلان آب تولید شد. به‌عنوان نمونه، نقشه میانگین توزیعی مکانی رواناب و تغذیه آب زیرزمینی حوزه آبخیز ونک در ماه فوریه در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل، مشاهده می‌شود که در قسمت‌هایی از حوزه با کاربری رخنمون سنگی (به نقشه کاربری اراضی در شکل ۳ مراجعه شود) مقدار تغذیه آب زیرزمینی بسیار ناچیز (در محدوده صفر تا ۱۰ میلی‌متر) و مقدار رواناب نسبتاً زیاد (محدوده ۵۰ تا ۶۰ میلی‌متر) است. مقدار رواناب در





شکل ۷- میانگین توزیع مکانی (الف) رواناب و (ب) تغذیه آب زیرزمینی حوزه آبخیز ونک در ماه فوریه برحسب میلی‌متر در ماه

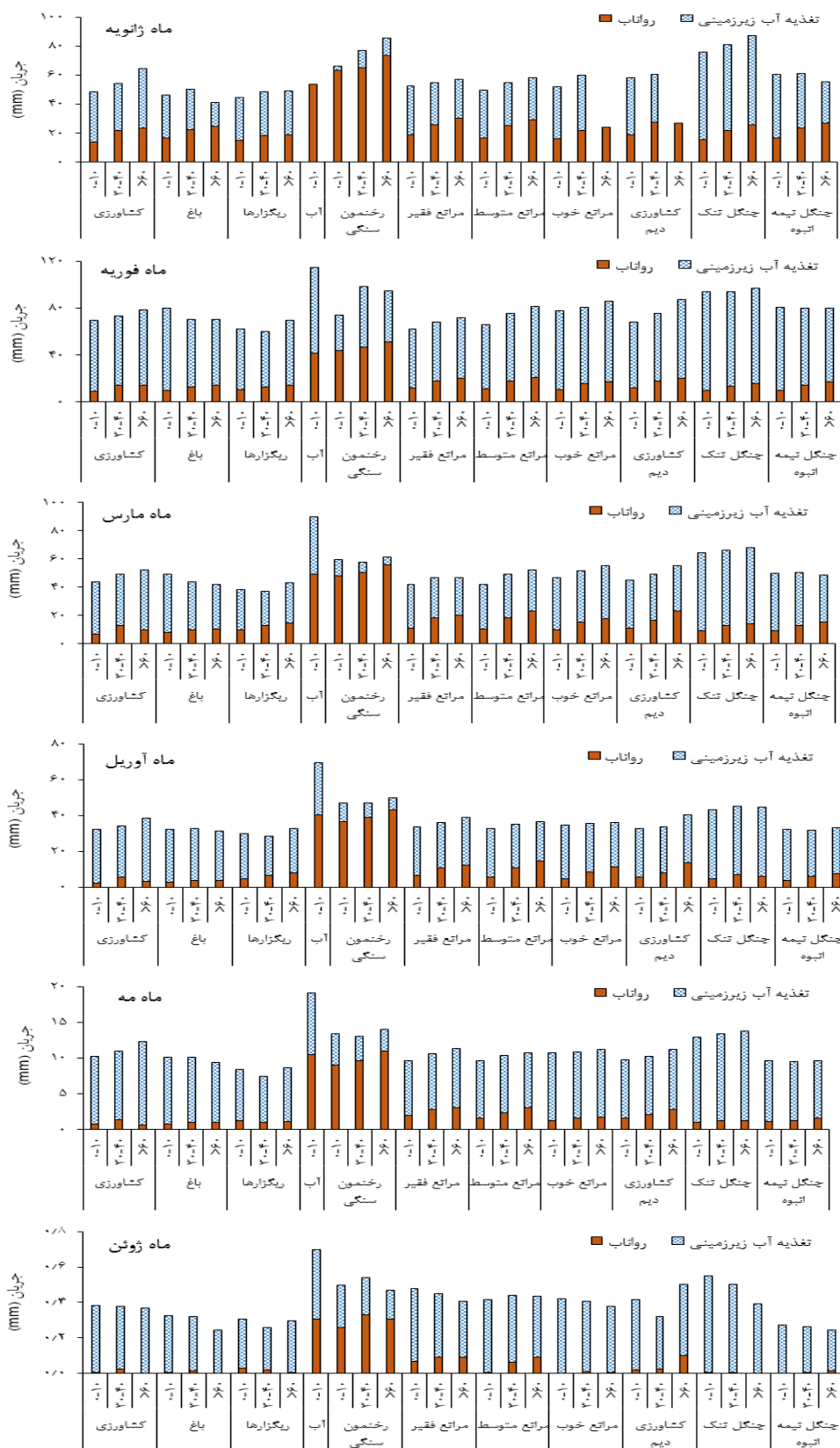
و دسامبر که معمولاً بیشترین مقدار بارش را دارند، مقدار رواناب در انواع کاربری اراضی نسبت به سایر ماه‌ها بیشتر بوده و در ماه‌های با بارش کمینه، به‌خصوص ماه‌های ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر به شدت کاهش یافته است. همچنین، در ماه ژانویه، مقدار تغذیه آب زیرزمینی، برای مراتع خوب و کشاورزی دیم در شیب‌های بیشتر از ۶۰ درجه، تقریباً ناچیز است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مکانی تغذیه آب زیرزمینی با توجه به توزیع کاربری اراضی، شیب سطح زمین می‌تواند قابل توجه باشد که با نتایج مطالعه Pandian و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد.

#### نتیجه‌گیری

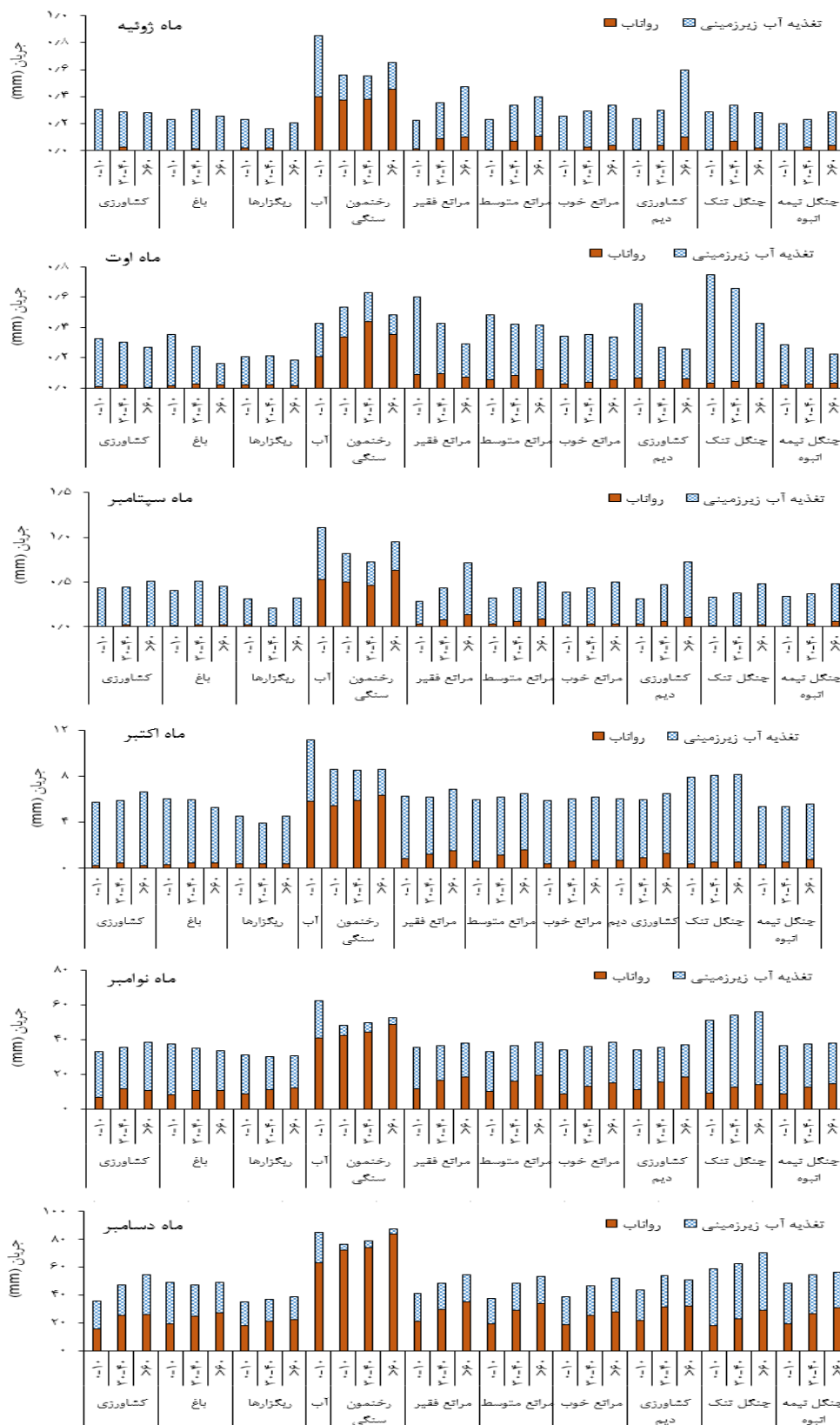
مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده و شبیه‌سازی شده نشان داد که دقت مدل، در شبیه‌سازی جریان حوزه آبخیز ونک مناسب، ولی جریان‌های سیلابی را به‌خوبی شبیه‌سازی نکرده است. بیشترین اختلاف بین مقادیر جریان مشاهده و شبیه‌سازی شده نیز مربوط به جریان‌های سیلابی در حوضه است که در ماه‌های مارس و آوریل است. با توجه به این‌که حوضه ونک منطقه‌ای نسبتاً کوهستانی است و بارش در این حوضه در ماه‌های سرد عمدتاً به‌صورت برف است، با افزایش دما، به سبب ذوب شدن برف و موجب ایجاد رواناب بهاره می‌شود.

میانگین رواناب و تغذیه آب زیرزمینی ماهانه حوضه ونک در انواع کاربری اراضی و شیب‌های طبقه ۰-۱۰، ۳۰-۴۰ و شیب‌های بیشتر از ۶۰ درجه در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. در تفسیر این نتایج باید دقت داشت که تغذیه یاد شده در اینجا پتانسیل است که حاصل باقی‌مانده رواناب، تبخیر و تعرق و برگاب از بارش است. از ویژگی‌های قابل توجه این نمودار این است که به راحتی می‌توان مشاهده کرد که مقدار میانگین ماهانه رواناب و تغذیه آب زیرزمینی در کاربری اراضی و شیب‌های مختلف چه مقدار است. این شکل نشان می‌دهد که در همه ماه‌ها، در بیشتر کاربری اراضی موجود در منطقه، مقدار تغذیه آب زیرزمینی بیشتر از رواناب است. به‌جز رخنمون‌های سنگی و مناطق دارای آب (دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و غیره) مقدار رواناب در شیب‌های مختلف، نسبت به تغذیه آب زیرزمینی بیشتر است.

در رابطه با مقادیر رواناب در انواع شیب نیز با افزایش شیب، مقدار رواناب در بیشتر کاربری‌های اراضی افزایش محسوس می‌یابد. همان‌طور که مطرح شد، جنگل‌های نیمه انبوه حدود یک چهارم از حوضه ونک را پوشش می‌دهند. در این نوع کاربری اراضی در بیشتر ماه‌ها مقدار تغذیه آب زیرزمینی بیشتر از مقدار رواناب است، زیرا پوشش جنگلی از اثر مستقیم آب حاصل از باران کاسته و سبب کاهش رواناب و افزایش نفوذ و تغذیه آب زیرزمینی می‌شود. در ماه‌های ژانویه



شکل ۸- میانگین رواناب و تغذیه آب زیرزمینی ماهانه در انواع کاربری اراضی و شیب حوزه آبخیز ونک برای ماه‌های ژانویه تا ژوئن



شکل ۹- میانگین رواناب و تغذیه آب زیرزمینی ماهانه در انواع کاربری اراضی و شیب حوضه برای ماه‌های ژوئیه تا دسامبر

مقدار رواناب در منطقه کاهش یافته است. از دیگر دلایل کاهش رواناب را می‌توان کاهش بارش در منطقه مطرح کرد که تا ماه اکتبر نیز ادامه یافته است. شیب سطح زمین نیز از جمله عوامل مؤثر بر توزیع رواناب و تغذیه آب زیرزمینی است. با افزایش درصد شیب در انواع کاربری اراضی، مقدار رواناب افزایش یافته است که دلیل آن را می‌توان افزایش سرعت رواناب و فرصت کمتر برای نفوذ آب در شیب‌های بالا ارایه کرد. از آنجا که با افزایش شیب، نفوذپذیری کاهش می‌یابد، در مورد تغذیه آب زیرزمینی انتظار می‌رود، با افزایش شیب، مقدار تغذیه آب زیرزمینی در انواع کاربری اراضی کاهش یابد. ولی نتایج در برخی طبقات کاربری اراضی متفاوت است که ممکن است به دلیل خطای مدل یا اثر مهمتر کاربری اراضی باشد. از طرفی عوامل دیگری از جمله ضخامت ناحیه غیر اشباع، آبدهی ویژه، میزان نیاز آبیاری و به‌خصوص بارش و بافت خاک بر توزیع تغذیه آب زیرزمینی اثر دارند.

تحلیل نتایج نشان داد که کمترین اختلاف بین مقادیر جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نیز مربوط به ماه سپتامبر بود. توزیع مکانی رواناب و تغذیه آب زیرزمینی نیز نشانگر بیشتر بودن مقدار رواناب در رخنمون‌های سنگی و شیب‌های تند و مقدار تغذیه آب زیرزمینی در جنگل‌های تنک و شیب‌های ملایم فراوان است. از آنجا که وجود پوشش گیاهی سبب افزایش نفوذپذیری آب در خاک و کاهش سرعت رواناب می‌شود، یکی از دلایل بیشتر بودن مقدار تغذیه آب زیرزمینی در مناطق جنگلی عامل پوشش گیاهی بوده که منجر به کاهش مقدار ضریب رواناب در این مناطق شده است. کمبود پوشش گیاهی در برخی ماه‌ها نیز افزایش ضریب رواناب و کاهش تغذیه آب زیرزمینی را در بر دارد.

در ماه‌های نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه با کاهش پوشش گیاهی در منطقه (طبق نقشه‌های شاخص سطح برگ) مقدار رواناب افزایش یافته است. ولی با شروع فصل بهار (ماه آوریل) و افزایش پوشش گیاهی

#### منابع مورد استفاده

1. Abdollahi, K. 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 Brusel, 176 pages.
2. Abdollahi, K., I. Bashir, B. Verbeiren, M.R. Harouna, A.V. Griensven, M. Husmans and O. Batelaan. 2017. A distributed monthly water balance model: formulation and application on Black Volta Basin. *Environmental Earth Science*, 76: 1-18.
3. Afkhami, M. and F. Nassiri Saleh. 2015. Evaluation of the application distributed and lumped hydrologic models in simulation of mean daily flow discharge in Gharasoo River Basin in Ardebil. *Modares Civil Engineering Journal*, 15: 31-40.
4. Bahreman, A., F. De Smedt, J. Corluy, Y.B. Liu, J. Poorova, L. Velcicka and E. Kunikova. 2007. WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods in Margecany-Hornad Watershed, Slovakia. *Water Resources Management*, 21: 1373-1391.
5. Batelaan, O., Z.M. Wang and F. De Smedt. 1996. An adaptive GIS toolbox for hydrological modeling. *International Association of Hydrological Sciences Publications*, 9 pages.
6. Batelaan, O. and F. De Smedt. 2001. WetSpa: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional ground water modeling. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 269: 11-18.
7. Batelaan, O. and F. De Smedt. 2007. GIS-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances. *Journal of Hydrology*, 337: 337-355.
8. Dai, J., J. Chen, G. Lu, L. Brown, L. Gan and Q. Xu. 2017. Application of SWAT 99.2 to sensitivity analysis of water balance components in unique plots in a hilly region. *Water Science and Engineering*, 10: 209-216.
9. De Smedt, F. and O. Batelaan. 2001. The impact of land-use changes on the groundwater in the Grote Nete River Basin, Belgium. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources at Risk, Lisbon, Portugal, 151-158.
10. Gebre, S.L. 2015. Application of the HEC-HMS Model for runoff simulation of upper Blue Nile River Basin. *Hydrology Current Research*, 6(2): 1-8.
11. Kabir, A., M. Mahdavi, A. Bahreman and N. Nora. 2010. Application of spatially-distributed hydrological model of WetSpa for runoff simulation, case study: Kachik Watershed, Golestan

- Province. 6th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering and 4th Erosion and Sediment National Conference. 8-9 May 2010, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
12. Knobloch, A., N. Guth and P. Klingel. 2014. Automated water balance calculation for water distribution systems. *Procedia Engineering*, 89: 428-436.
  13. Labaugh, J.W., T.C. Winter, D.O. Rosenberry, P.F. Schuster, M.M. Reddy and G.R. Aiken. 1997. Hydrological and chemical estimates of the water balance of a closed-basin lake in north central Minnesota. *Water Resources Research*, 33: 2799-2812.
  14. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part 1: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.
  15. Pandian, M., R. Balasubramaniam and J. Saravanel. 2014. Identification of groundwater potential recharge zones using WetSpa model in parts of Coimbatore and districts in Tamil Nadu, India. *International Journal of Water Research*, 2: 27-32.
  16. Paul, M.J. 2006. Impact of land-use patterns on distributed groundwater recharge and discharge, case study: Western Jilin, China. *Chinese Geographical Science*, 16: 229-235.
  17. Pechlivanidis, I., B. Jacson, N. McIntyre and H. Wheeler. 2011. Catchment scale hydrological modeling. A review of model types, calibration approaches and uncertainty methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global Network Environmental Science Technology Journal*, 13: 193-214.
  18. Ponpang-Nga, P. and J. Techamahasaranont. 2016. Effects of climate and land use changes on water balance in upstream in the Chao Phraya River Basin, Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 50: 310-320.
  19. Tomer, M.D. and K.E. Schilling. 2009. A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology. *Journal of Hydrology*, 376: 24-33.
  20. Tu, J. 2009. Combined impact of climate and land use changes on streamflow and water quality in eastern Massachusetts, USA. *Journal of Hydrology*, 379: 268-283.
  21. Vorosmarty, C., D. Lettenmaier, C. Leveque, M. Meybeck, C. Pahl-Wostl, J. Alcamo, W. Cosgrove, H. Grassl, H. Hoff, P. Kabat, F. Lansigan, R. Lawford and R. Naiman. 2004. Humans transforming the global water system. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 85: 509-514.
  22. Winter, T.C. 1981. Uncertainties in estimating the water balance of lakes. *Journal of the American Water Resources Association*, 17: 82-115.
  23. Yaghoubi, M. and A.R. Massah Bavani. 2014. Sensitivity analysis and comparison of capability of three conceptual models HEC-HMS, HBV and IHACRES in simulating continuous rainfall-runoff in semi-arid basins. *Journal of the Earth and Space Physics*, 40: 153-172.
  24. Yun, P., G. Huili, Z. Demin, L. Xiaojuan and N. Nobukazu. 2011. Impact of land use change on groundwater recharge in Uishui River Basin, China. *Chinese Geographical Science*, 21: 734-743.