

مدل سازی خدمات تولیدی اکوسیستم (تولید آب) در حوضه آبخیز طالقان میانی

مرجان شفیع زاده^۱، محمدعلی زارع چاهوکی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته دکتری برنامه‌ریزی محیط زیست، پردیس البرز دانشگاه تهران

۲. استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۵/۱۴؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۲/۱۰)

چکیده

مدل سازی سیستم های منابع آب از اجزای ضروری فرایند برنامه ریزی و ارزیابی منابع آب است. ارزیابی چگونگی تغییرات تولید و عملکرد آب در گذشته و آینده مهم است. مدل InVEST توابع خدمات اکوسیستمی در قالب نقشه‌هایی با سطح داده‌های ورودی کم را تجسم می‌کند، اما حجم بالی داده‌های خروجی را دارد و به ساده‌سازی مسائل پیچیده و در نتیجه، افزایش توانایی حل مسئله می‌پردازد. در مطالعه حاضر به مدل سازی خدمات تولیدی اکوسیستم (تولید آب) در حوضه آبخیز طالقان میانی با ابزار تولید آب مدل InVEST پرداخته شد. ابتدا، نقشه های عمق لایه محدودکننده ریشه، میانگین بارندگی سالیانه، مقدار (گنجایش) آبی در دسترس گیاه، کاربری اراضی و مرز حوضه و زیرحوضه‌های آبخیز به عنوان ورودی‌های مدل وارد شدند و نقشه های مقدار حجم آب قابل تولید در هر زیرحوضه (مترمکعب/سال)، مقدار تقریبی تبخیر-تعرق واقعی با کسر مقدار بارش در هر پیکسل، نقشه تبخیر-تعرق واقعی بر حسب (میلی متر) در هر پیکسل به صورت تخمینی، نقشه تولید آب برآوردشده در هر پیکسل بر حسب (میلی متر در سال) به دست آمد. بر اساس محاسبات انجام شده توسط مدل در مجموع در حوضه آبخیز طالقان میانی، سالانه ۲۰۰/۹ میلیون مترمکعب تولید می شود که بیشترین مقدار تولید آب، در زیرحوضه حسنجون با ۵۹/۳ میلیون مترمکعب در سال و کمترین میزان تولید آب، در زیرحوضه های دنبیلید، زیدشت ۱ و زیدشت ۲ است.

کلیدواژگان: تولید آب، خدمات اکوسیستم، حوضه آبخیز طالقان میانی، مدل سازی.

مقدمه

عرضه آب یکی از اجزای مهم خدمات اکوسیستم است که به شدت به شرایط طبیعی و اقتصادی منطقه بستگی دارد [۱] و [۲]. منابع آب در سطح منطقه‌ای بر بقا و توسعه انسان تأثیر می‌گذارد [۳]. از آنجا که تولید آب به شرایط طبیعی جغرافیای منطقه و فعالیت‌های انسانی بستگی دارد [۴] و [۵]، فعالیت‌های انسانی به‌طور مستقیم بر حجم این منابع تأثیر خواهد گذاشت [۶]. همچنین، فعالیت‌های انسان بر بازده و دسترس بودن این منابع، با تأثیر بر آب‌وهوا، کاربری اراضی و کیفیت آب تأثیر می‌گذارد [۷] و [۸]. کاربرد مدل‌ها برای شبیه‌سازی اولویت‌بندی حفاظت از عملکرد آب نسبت به کاربرد مدل‌ها برای ارزیابی اجزای هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی آثار حفاظت آب و خاک در مقیاس حوضه آبخیز کمتر استفاده شده‌اند. عملکرد آب، مقدار آب موجود برای استفاده مستقیم توسط انسان است. همچنین، عملکرد آب، مقدار خالص آب (از جمله آب‌های سطحی و زیرزمینی) است که در هر زیرحوضه جریان پیدا می‌کند [۹]. مدل‌سازی سیستم‌های منابع آب از اجزای ضروری فرایند برنامه ریزی و ارزیابی منابع آب است. هدف از تجزیه و تحلیل عملکرد آب، ارزیابی کل قابلیت بلندمدت و کوتاه‌مدت منابع یا عملکرد آب در سیستم منابع آب است. عملکرد سیستم آب می‌تواند بر اساس یک تجزیه و تحلیل عملکرد تصادفی و اطمینان از عرضه (یا خطر عرضه نشدن برای انواع عملکرد) تعیین شود [۱۰]. بنابراین، ارزیابی چگونگی تغییرات تولید و عملکرد آب تحت این فشارها در گذشته و آینده مهم است. ابزارهای متعددی برای مدل‌سازی منابع آب در سراسر جهان استفاده می‌شود و اغلب براساس استفاده از تکنیک‌های تجزیه و تحلیل پیچیده و برنامه‌های (نرم‌افزارهای) کامپیوتر توسعه یافته است که رفتار سیستم‌های منابع آب را با اصول ریاضی شبیه‌سازی می‌کنند [۱۱]. Lang و همکاران تأثیرات توسعه سناریوهای آینده مربوط به عملکرد آب و بررسی تأثیر تغییرات گذشته و فعلی کاربری اراضی از طریق مدل ارزش یکپارچه خدمات اکوسیستم (InVEST) و آثار تغییر کاربری اراضی بر تولید آب را ارزیابی کردند [۱۱]. این رویکرد قادر است داده‌های مرجع برای توسعه پایدار آینده منطقه را ارائه کند. آنها با استفاده از مدل InVEST به ارزیابی کمی عملکرد آب در

کوه‌های کارستی چین و به بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی در شرایط آب‌وهوایی ثابت و همچنین، ارزیابی تأثیر تغییر کاربری اراضی با توجه به سناریوهای مختلف توسعه برای تولید آب پرداختند. InVEST توابع خدمات اکوسیستمی کمی در قالب نقشه‌هایی با سطح داده‌های ورودی کم را ایجاد می‌کند. این روش قابلیت ساده سازی مسائل پیچیده، تولید داده‌های خروجی متعدد و در نتیجه، افزایش توانایی حل مسئله را دارد [۱۱]. در مطالعه حاضر نیز به مدل سازی خدمات تولیدی اکوسیستم (تولید آب) در حوضه آبخیز طالقان میانی با ابزار تولید آب مدل InVEST پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه شده

منطقه مطالعه شده در حوضه آبخیز طالقان (۹۰ کیلومتری شمال غرب تهران) واقع شده است. این منطقه در موقعیت جغرافیایی $36^{\circ} 43' 50''$ تا $50^{\circ} 53' 20''$ طول شرقی و $36^{\circ} 51' 19''$ تا $36^{\circ} 19' 19''$ عرض شمالی در بخش میانی حوضه آبخیز طالقان قرار دارد و مساحت آن $37487/28$ هکتار است (شکل ۱). مرتفع‌ترین نقطه منطقه با ارتفاع ۴۱۲۰ متر در مرز شمالی و پایین‌ترین سطح ارتفاعی، در بخش غربی با ارتفاع ۱۶۸۴ متر از سطح دریا قرار دارد. متوسط شیب حوضه ۳۰ درصد و متوسط بارش سالانه ۵۰۰ میلی‌متر است. اقلیم منطقه با روش دمارتن فراسرد است. از نظر زمین‌شناسی بخش عمده منطقه مطالعه شده از سنگ‌های مربوط به سازند کرج و ماسه‌سنگ‌های مقاوم، کنگلومرای آهکی و برش، مارن آهکی ریزدانه و مارن دارای املاح گچ و نمک تشکیل شده است. خاک منطقه در رده‌های انتیسول و اینسپتیسول قرار می‌گیرد.

مدل‌سازی تولید آب در منطقه مطالعه شده

برآورد کمی آب تولیدشده در یک منطقه با استفاده از داده‌های میانگین بارش سالانه، تبخیر و تعرق سالانه و عامل اصلاحی پوشش گیاهی، عمق لایه محدودکننده ریشه، مقدار آب در دسترس گیاه، عمق ریشه‌دوانی، ارتفاع از سطح دریا، ضریب اشباع‌شده هیدرولوژیک و مصرف آب انجام می‌شود. مدل تولید آب InVEST می‌تواند میانگین سالانه محصول آبی یک چشم‌انداز را با تعیین سهم نسبی هر سلول از چشم‌انداز به نقشه تبدیل کند.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز طالقان میانی در استان البرز و کشور

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) * P(x) \quad (1)$$

که در رابطه یادشده، $AET(x)$: تبخیر و تعرق واقعی سالانه برای پیکسل x و $P(x)$: بارش سالانه در پیکسل x است. برای پوشش گیاهی، میزان تبخیر و تعرق در تعادل آبی $\frac{AET(x)}{P(x)}$ ، مدل تولید آب بر اساس منحنی بودپکو^۲ که توسط Baw-puh [۱۲] و Zhang و همکاران [۱۳] بیان شده است، محاسبه می شود (رابطه ۲):

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)\omega\right] \frac{1}{\omega} \quad (2)$$

که در رابطه یادشده، $P(x)$: تبخیر و تعرق پتانسیل و $\omega(x)$: پارامتر غیرفیزیکی است که به نوع خاک بستگی

این مدل روی یک نقشه شبکه ای (رستری) اجرا می شود. مدل، کمیت تولید آب را در هر زیرحوضه برآورد می کند. مقدار رواناب موجود در هر پیکسل، از تفاضل مقدار بارش از آبی که به واسطه تبخیر و تعرق از دست می رود، برآورد می شود. مدل تفاوتی بین آب سطحی، آب زیرزمینی و جریان پایه نمی گذارد، اما فرض می کند که همه محصول آبی به دست آمده از یک پیکسل از طریق یکی از این مسیرها به نقطه مد نظر رسیده است. سپس، مدل حاصل جمع و میانگین محصول آبی را در سطح هر زیرحوضه محاسبه می کند. محاسبات پیکسل - مقیاس این امکان را فراهم می کند که عدم تجانس^۱ عوامل محرکه در محصول آبی از جمله نوع خاک، بارش، پوشش گیاهی و... مشخص شود. در این مدل عملکرد آب $Y(x)$ برای هر پیکسل در چشم انداز x از رابطه ۱ به دست می آید:

2. Plant Available Water Capacity

1. Heterogeneity

عامل فصلی و گاهی با توجه به الگوهای معمول بارش و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی در نظر گرفته می‌شود. این عامل همبستگی مثبت با تعداد رویدادهای بارندگی در هر سال (N) دارد که Donohue و همکاران مقدار آن را ۰/۲ بیان کردند [۱۴]. حداقل این مقدار ۱/۲۵ و حداکثر آن تا ۵ تغییر می‌کند.

بعد از تعیین پارامترهای زیر و تهیه داده‌های ورودی برای مدل‌سازی تولید آب در محدوده مطالعه‌شده با استفاده از نرم‌افزار InVEST، مدل اجرا شد:

- **تعیین عمق لایه محدودکننده ریشه:** عمق لایه محدودکننده ریشه عبارت است از: عمقی از خاک که نفوذ ریشه گیاهان به واسطه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک ناگهان با محدودیت مواجه می‌شود. در منطقه مطالعه‌شده بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از بررسی‌ها، عمق خاک برای اراضی باغی ۸۵۰ میلی‌متر، اراضی زراعی ۴۵۰ میلی‌متر، اراضی دیم و آیش ۴۰۰ میلی‌متر، بستر رودخانه ۷۰۰ میلی‌متر، دیمزار رهاشده ۳۰۰ میلی‌متر و مرتع ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

- **محاسبه میانگین بارش سالانه:** برای تعیین داده‌های میانگین بارش سالانه در محدوده مطالعه‌شده از اطلاعات موجود در طالقان استفاده شد. متوسط بارندگی سالانه با توجه به گرادیان بارش از رابطه ۶ محاسبه شد.

$$P = 0.3007H - 104.4 \quad (۶)$$

که در رابطه یادشده، P: میانگین بارش سالانه و H: ارتفاع از سطح دریا (متر) است.

بر اساس رابطه ۶، حداکثر و حداقل بارش سالانه در محدوده مطالعه‌شده به ترتیب ۱۱۳۴/۴۸ و ۴۰۱/۸۸ میلی‌متر برآورد شد و عدد ۶۲۷/۳۴ میلی‌متر به عنوان متوسط بارندگی سالانه برآورد شد.

- **محاسبه میانگین سالانه تبخیر و تعرق مرجع:** تبخیر و تعرق مرجع عبارت است از: پتانسیل اتلاف آب از خاک که به واسطه تبخیر از خاک و تعرق از گیاه، در شرایطی که آب کافی در دسترس باشد، تعریف می‌شود. تبخیر یکی از پارامترهای اساسی در برنامه‌ریزی منابع آب در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک است. به منظور برآورد این پدیده در منطقه مطالعه‌شده، ضمن بررسی آمار تبخیر

دارد. PET(x) یا تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$PET(x) = K_c(l_x) * ET_0(x) \quad (۳)$$

که در رابطه یادشده، $ET_0(x)$: تبخیر و تعرق مرجع در پیکسل x و $K_c(l_x)$: ضریب تبخیر و تعرق گیاه یا پوشش در ارتباط با کاربری اراضی l_x در پیکسل x است.

$ET_0(x)$ نشان‌دهنده شرایط اقلیمی محلی بر مبنای تبخیر و تعرق از پوشش گیاهی در محل است. $K_c(l_x)$

بر اساس ویژگی‌های پوشش گیاهی در کاربری اراضی در یک پیکسل تعیین می‌شود [۹]. K_c مقدار عددی ET_0 را

برای هر نوع پوشش گیاهی در هر پیکسل نقشه کاربری اراضی تعدیل می‌کند. $\omega(x)$ پارامتر تجربی است که می‌تواند به صورت تابع خطی $\frac{AWC * N}{P}$ بیان شود که در آن

N: تعداد رویداد بارندگی در هر سال و AWC: میزان آب در دسترس گیاه است. در تحقیق حاضر رابطه پیشنهادشده توسط Donohue و همکاران [۱۴] در مدل InVEST اجرا شد:

$$\omega(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (۴)$$

که در رابطه یادشده، $AWC(x)$: آب در دسترس گیاه (میلی‌متر) است که مقدار آن بر اساس بافت خاک و عمق مؤثر ریشه‌دوانی تعریف می‌شود و به معنای مقدار آبی است که در خاک نگهداری شود و مورد استفاده گیاه قرار گیرد. این مقدار به عنوان ظرفیت آبی در دسترس گیاه (PAWC)، حداقل عمق لایه محدودکننده ریشه و عمق ریشه پوشش گیاهی تعیین می‌شود:

$$AWC(x) = \text{Min}(Rest * layer * depth_{root} * depth) * PAWC \quad (۵)$$

عمق لایه محدودکننده ریشه، عمقی از خاک است که نفوذ ریشه به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی با مانع روبه‌روست. عمق ریشه پوشش گیاهی به عنوان عمقی در نظر گرفته می‌شود که ۹۵ درصد زیست‌توده ریشه در آن عمق وجود داشته باشد.

کمیت Z یک ثابت تجربی است که گاهی به عنوان

نتایج آن باید در مقیاس زیرحوضه آبخیز تفسیر شود. بنابراین، شیب فایل های پلیگونی مربوط به زیرحوضه های حوضه آبخیز طالقان میانی در نرم افزار Arc GIS و با کمک مدل رقومی ارتفاع (DEM) تهیه شد. بر این اساس، منطقه مطالعه شده به یک حوضه و ۶ زیرحوضه تقسیم شد.

- **تهیه جدول بیوفیزیکال:** جدولی از کلاس های کاربری اراضی که شامل اطلاعات مربوط به ضرایب بیوفیزیکی (حداکثر عمق ریشه دوانی) و K_e : ضریب تبخیر و تعرق گیاه برای هر کلاس کاربری اراضی است.

- **تعیین پارامتر Z:** یک ثابت تجربی است که با توجه به الگوهای معمول بارش و ویژگی های هیدروژئولوژیکی در نظر گرفته می شود و مقدار آن مربوط به توزیع فصلی بارش است که $0.2n$ در نظر گرفته می شود (n: تعداد رویدادهای بارش در سال است که در تحقیق حاضر تعداد کل رویداد بارش سالانه حداکثر ۷۷ بود).

در نهایت، داده های یادشده در نرم افزار InVEST وارد شد. بعد از تجزیه و تحلیل داده ها، نتایج در ادامه توضیح داده می شود.

نتایج

بر اساس نتایج مدل سازی تولید آب در حوضه آبخیز طالقان میانی، سالانه $200/9$ میلیون مترمکعب آب تولید می شود. شکل ۳ حجم تولید آب بر اساس مترمکعب در سال در هر یک از زیرحوضه های حوضه آبخیز طالقان میانی را نشان می دهد. حجم آب تولیدشده و سایر اطلاعات داده شده توسط مدل در وضعیت فعلی، در هر یک از زیرحوضه ها در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه به خروجی مدل و حجم آب تولیدشده در هر زیرحوضه مشاهده می شود که بیشترین تولید آب در هر پیکسل ($30 \text{ متر}^2 * 30 \text{ متر}$) مربوط به زیرحوضه حسنجون است. البته، این زیرحوضه بیشترین میانگین بارش را نیز دارد، ولی کمترین میزان تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر و تعرق واقعی سالیانه را دارد. زیرحوضه شهرک نیز با تولید $22/6$ میلیون مترمکعب دومین زیرحوضه از نظر تولید آب است. البته، بارندگی این زیرحوضه نیز $712/86$ میلی متر است، ولی این زیرحوضه هم تبخیر و تعرق واقعی سالانه $49/01$ میلی متر و تبخیر و تعرق پتانسیل $73/26$ میلی متر در هر پیکسل دارد که نسبت به سایر زیرحوضه ها مقادیر

در ایستگاه های مجاور محدوده مطالعاتی مشاهده شد که بین میزان تبخیر و دمای متوسط رابطه Y وجود دارد.

$$y = 15.903X - 27.441 \quad (7)$$

که در آن، y : میزان میانگین سالانه تبخیر و تعرق بر حسب میلی متر و X : دمای متوسط هوا بر حسب سانتی گراد است. مقدار X نیز بر اساس مطالعات انجام شده توسط جهانگیر با رابطه خطی با همبستگی $R=0.85$ بر اساس رابطه ۸ محاسبه شد [۱۵]:

$$X = 25.879 - 0.068H \quad (8)$$

که در آن، H : ارتفاع از سطح دریا (بر حسب متر) است. با محاسبات انجام شده، حداکثر و حداقل تبخیر و تعرق سالانه برای محدوده مطالعه شده به ترتیب $202/04$ و $118/90$ میلی متر برآورد شد.

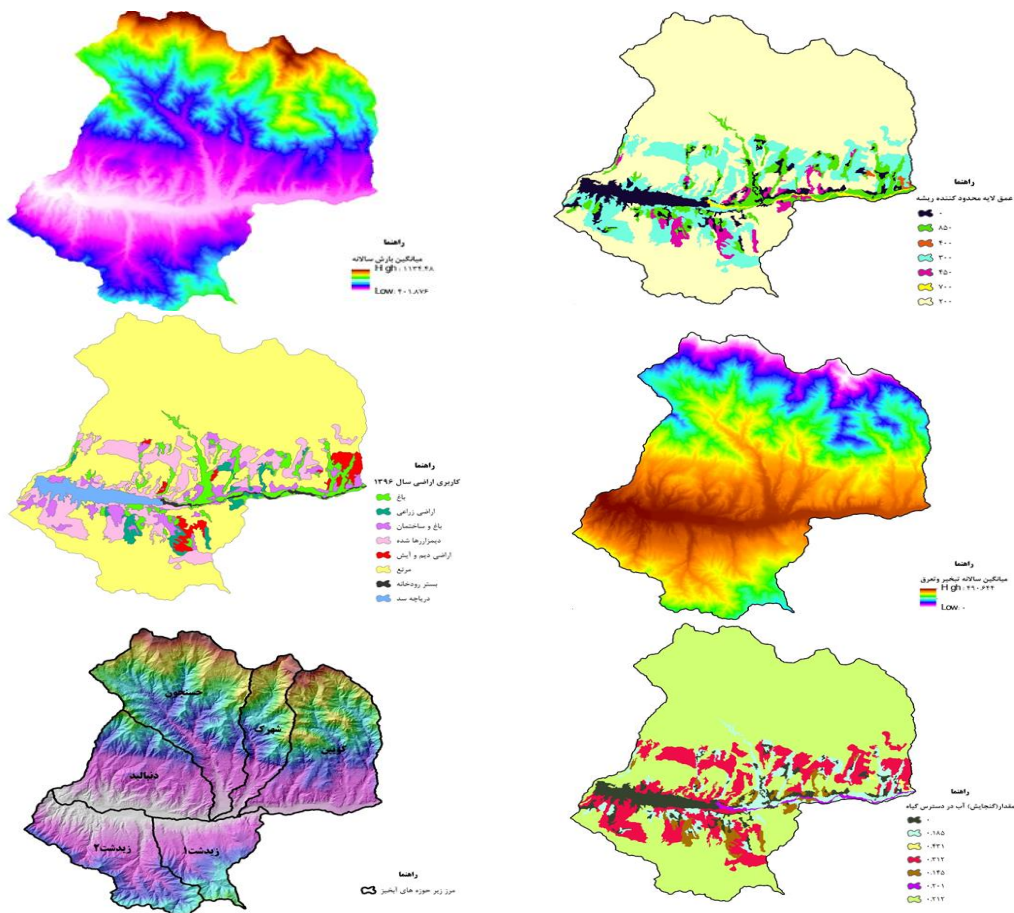
- **تعیین مقدار (گنجایش) آبی در دسترس گیاه (PAWC):** مقدار (گنجایش) آبی در دسترس گیاه، بخشی از آب است که می تواند در پروفیل خاک ذخیره شود تا برای استفاده گیاه در دسترس باشد. مقدار عددی این پارامتر می تواند از طریق تقسیم مقدار حجمی آب در دسترس گیاه بر عمق خاک محاسبه شود. ظرفیت حجم آب در دسترس گیاه معمولاً به صورت میلی متر در داده های خاک شناسی است. بر اساس اطلاعات خاک شناسی، گنجایش آبی در دسترس گیاه برای کاربری مرتع با عمق 200 میلی متر 0.212 ، برای کاربری باغ با 850 میلی متر عمق خاک برابر 0.185 و با در نظر گرفتن عمق خاک در کاربری اراضی دیم و آیش با 400 میلی متر عمق 0.431 ، در کاربری دیمزار رهاشده با عمق خاک 300 میلی متر برابر 0.312 ، برای کاربری اراضی زراعی با 450 میلی متر برابر 0.145 و برای کاربری بستر رودخانه با 700 میلی متر برابر با 0.201 محاسبه شد.

- **تهیه نقشه پوشش/کاربری اراضی محدوده مطالعه شده:** از نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز طالقان میانی که توسط نگارنده برای سال ۱۳۹۶ تهیه شده است، در اینجا استفاده شد.

- **تهیه نقشه های وکتوری حوضه و زیرحوضه های آبخیز:** با توجه به اینکه فرضیات مدل بر مبنای فرایندهای هیدرولوژیکی در مقیاس زیرحوضه بنا شده است، به رغم تدارک نقشه رستری ظرفیت تولید آب در هر پیکسل،

زیدشت ۲ از نظر تولید آب تقریباً در یک سطح هستند، ولی تبخیر و تعرق واقعی سالانه در زیرحوضه زیدشت ۱ کمتر از بقیه است، اما میزان تبخیر و تعرق پتانسیل هر سه زیرحوضه تقریباً با هم برابر است.

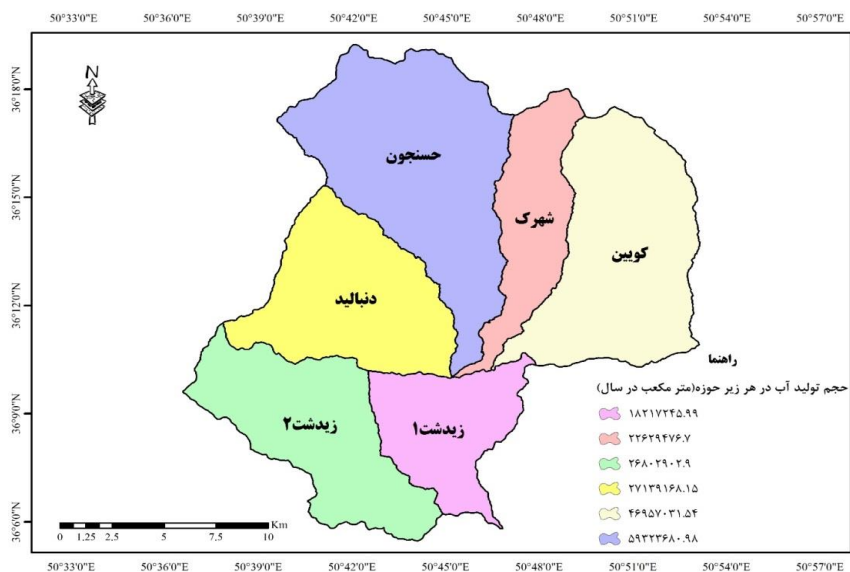
کمتری هستند. زیرحوضه کوبین تولید ۴۶/۹ میلیون مترمکعب آب دارد که مشاهده می شود میزان تبخیر و تعرق این زیرحوضه نسبت به زیرحوضه های دنبلید و زیدشت کمتر است. زیرحوضه های دنبلید، زیدشت ۱ و



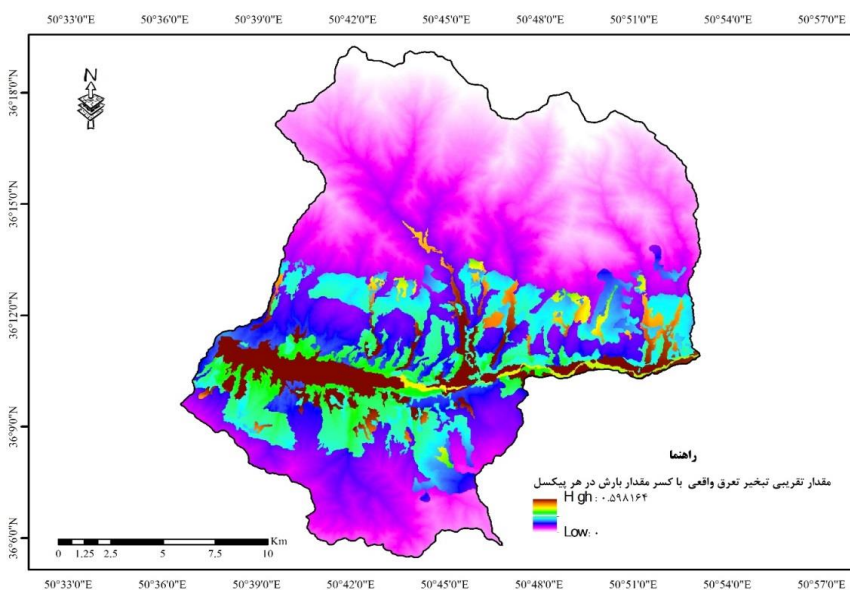
شکل ۲. داده های اولیه ورودی برای مدل سازی تولید آب در محدوده مطالعه شده با استفاده از نرم افزار InVEST

جدول ۱. حجم آب تولید شده و سایر اطلاعات ارائه شده توسط مدل InVEST در هر یک از زیرحوضه های حوضه آبخیز طالقان میانی

زیرحوضه	میانگین بارش (میلی متر در سال)	تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی متر در هر پیکسل)	تبخیر و تعرق واقعی سالانه (میلی متر در هر پیکسل)	تولید آب (میلی متر در هر پیکسل)	تعداد پیکسل (۳۰ متر * ۳۰ متر)	حجم تولید آب در هر زیرحوضه (میلیون مترمکعب در سال)
زیدشت ۱	۵۵۲/۴۳	۱۴۸/۳۱	۸۴/۳۹	۴۶۷/۹۷	۴۳۲۵۶	۱۸/۲
زیدشت ۲	۵۲۸/۳۰	۱۴۶/۵۴	۹۲/۵۲	۴۳۵/۷۱	۶۸۳۵۰	۲۶/۸
دنبالید	۵۲۶/۲۵	۱۴۸/۴۷	۹۱/۵۹	۴۳۴/۶۲	۶۹۳۸۱	۲۷/۱
کوبین	۶۷۱/۴۵	۱۰۷/۲۰	۶۷/۳۵	۵۹۵/۲۲	۸۷۶۵۶	۴۶/۹
شهرک	۷۱۲/۸۶	۷۳/۲۶	۴۹/۰۱	۶۴۴/۴۵	۳۹۰۱۶	۲۲/۶
حسنجون	۷۲۵/۸۶	۶۱/۶۸	۴۴/۸۷	۶۶۱/۱۴	۹۹۷۰۰	۵۹/۳
کل حوضه	۶۲۹/۲۲	۱۰۹/۹۷	۶۹/۸۱	۵۴۸/۴۳	۴۰۷۳۵۷	۲۰۰/۹



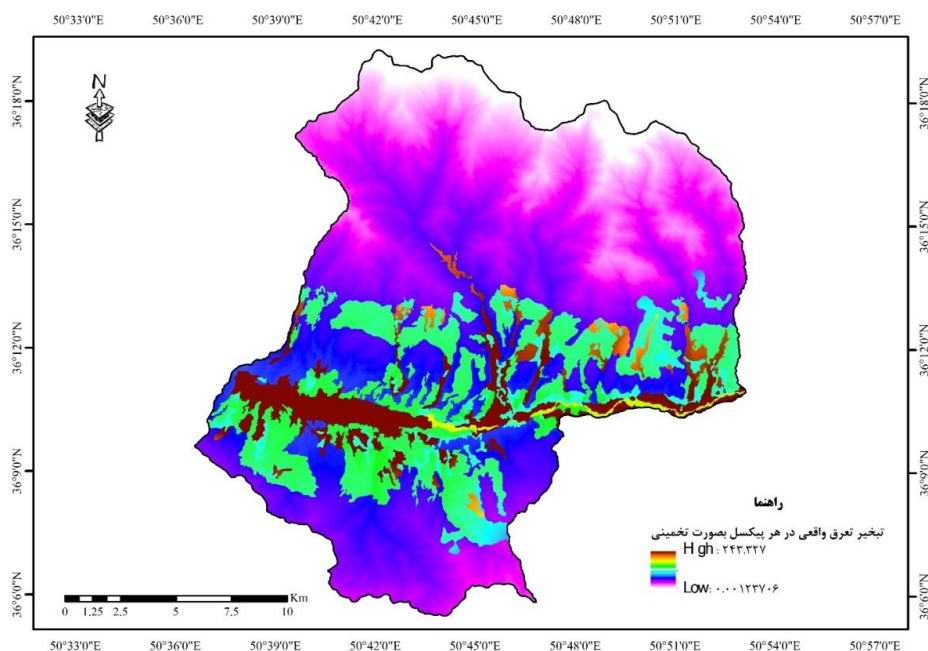
شکل ۳. حجم آب قابل تولید در سال ۱۳۹۶ (مترمکعب/سال) در زیرحوضه‌های حوضه آبخیز طالقان میانی بر اساس خروجی مدل InVEST و پردازش شده در نرم‌افزار Arc GIS



شکل ۴. مقدار تقریبی تبخیر و تعرق واقعی با کسر مقدار بارش در هر پیکسل (تبخیر واقعی / بارش) در حوضه آبخیز طالقان میانی بر اساس خروجی مدل InVEST و پردازش شده در نرم‌افزار Arc GIS

یادشده، برآورد می‌شود. پس می‌توان با در نظر گرفتن آب تولیدشده و تبخیر و تعرق در هر پیکسل به مقایسه عوامل اثرگذار بر میزان تولید آب و تبخیر و تعرق در هر زیرحوضه پرداخت. شکل ۵ نشان‌دهنده مقدار کسری از بارش است که در واقع در سطح پیکسل تبخیر می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار در دریاچه سد و اراضی کنار رودخانه با مقدار عددی ۰/۵۹۸ است.

کمترین حجم آب قابل تولید در زیرحوضه زیدشت ۱ با مقدار ۱۸/۲ میلیون مترمکعب در سال و بیشترین حجم آب قابل تولید در زیرحوضه حسن‌جون با ۵۹/۳ میلیون مترمکعب در سال است. حجم تولید آب در هر زیرحوضه به عوامل زیادی از جمله مساحت زیرحوضه، میزان بارندگی، نوع خاک، میزان تبخیر و تعرق و... بستگی دارد که در این مدل این عوامل هم در نظر گرفته شده و برای هر پیکسل نیز میزان تولید آب با در نظر گرفتن عوامل



شکل ۵. تبخیر و تعرق واقعی بر حسب (میلی‌متر) در هر پیکسل به صورت تخمینی در حوضه آبخیز طالقان میانی بر اساس خروجی مدل InVEST و پردازش شده در نرم‌افزار Arc GIS

طریق تدارک آب شرب، آب برای آبیاری مزارع و تولید برق آبی که از متداول‌ترین نوع انرژی تجدیدپذیر در جهان است، تأثیر دارد. این خدمات اکوسیستمی در برابر تغییرات شدید ناشی از تغییرات اراضی آسیب‌پذیر است [۳]، بنابراین مدل سازی خدمات تولیدی اکوسیستم (تولید آب) در حوضه آبخیز و زیرحوضه‌های آبخیز توسط مدل InVEST می‌تواند گامی مؤثر به منظور مدیریت و برنامه‌ریزی محیط زیست باشد. می‌توان با در نظر گرفتن شرایط وضعیت آینده برای سال‌های آتی به مدل سازی تولید آب در حوضه و زیرحوضه‌های آبخیز پرداخت و زیرحوضه‌هایی که شرایط تولید آب بیشتر دارند را شناسایی کرد و برای آینده برنامه ریزی مناسبی ارائه کرد. همچنین، با شناسایی زیرحوضه‌هایی که تولید آب کمتر و تبخیر و تعرق بیشتری دارند، گامی مؤثر در حفاظت از منابع آبی و مدیریت صحیح منابع آب برداشت. ارزش خدمات اکوسیستم به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم توسط آب‌وهوا، کاربری اراضی و دیگر عوامل اقتصادی و اجتماعی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بشر طی ۵۰ سال گذشته تغییرات در خدمات اکوسیستم را سریع‌تر از هر دوره‌ای سرعت بخشیده است. یکی از فعالیت‌های مهم انسانی در ارزش خدمات اکوسیستم، تغییرات کاربری اراضی است.

بیشترین تبخیر و تعرق واقعی بر حسب (میلی‌متر) در هر پیکسل به صورت تخمینی در حوضه آبخیز طالقان میانی ۲۴۳/۳۲۷ میلی‌متر و کمترین میزان تبخیر و تعرق واقعی، ۰/۰۰۱۲ میلی‌متر در هر پیکسل بر اساس خروجی مدل InVEST برآورد شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

از بین خدمات اکوسیستم، تولید آب در بخش اقتصاد و توسعه کشاورزی، از طریق عرضه آب در آبیاری، شرب و نیروگاه برق آبی مهم است [۶]. در پژوهش حاضر میزان تولید آب حوضه آبخیز طالقان میانی بر اساس متغیرهای مختلف محیطی مدل سازی شد. در دسترس بودن منابع آب می‌تواند توسط عملکرد و تولید آب به‌عنوان تفاوت بین بارش دریافت‌شده و تبخیر و تعرق تعریف شود که ناشی از عملکرد بسیاری از عوامل محرک مانند آب‌وهوا، کاربری اراضی و نوع خاک است [۴ و ۱۶]. از آنجا که عدم سازگاری بین تأمین و تقاضای آب، توسعه پایدار و اقتصاد منطقه را محدود می‌کند [۵]، مدل سازی خدمات تولید آب در InVEST دارای سه جزء عملکرد آب، مصرف آب و ارزش آب است. تولید آب یکی از خدمات مهم اکوسیستم است که در رفاه جامعه به شیوه‌های گوناگون از جمله از

- County in China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2017; 102, 10-20.
- [9]. Fan, M., Shibata, H., & Chen, L. Spatial conservation of water yield and sediment retention hydrological ecosystem services across Teshio watershed, northernmost of Japan. *Ecological Complexity*, 2018; 33, 1-10.
- [10]. Nkwonta, O. I., Dzwireo, B., Otieno, F. A. O., & Adeyemo, J. A. A review on water resources yield model. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2017; 23, 107-115.
- [11]. Lang, Y., Song, W., & Deng, X. Projected land use changes impacts on water yields in the karst mountain areas of China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2017.
- [12]. Baw-puh, F. On the calculation of the evaporation from land surface, *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1981; 1, 002.
- [13]. Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G.R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001; 37(3), 701-708.
- [14]. Donohue, R.J., Roderick, M.L. & McVicar, T.R. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology*, 2012; 436, 35-50.
- [15]. Jahangir, L. *Air and Climatology and Mapping Studies (Case Study of Taleghan Watershed)*, Department of Rehabilitation of Arid and Mountainous Regions of the Faculty of Natural Resources, University of Tehran; 2017.
- [16]. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah R.S. & Williams J.R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 1998; 34(1), 73-89.
- اندازه‌گیری تغییرات ارزش خدمات اکوسیستم در تولید آب در پاسخ به تغییر کاربری اراضی یک راه مؤثر برای ارزیابی هزینه‌های زیست‌محیطی و مزایای تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی کاربری اراضی است. پس با مدل‌سازی خدمات تولیدی اکوسیستم (تولید آب) در حوضه آبخیز می‌توان از طریق برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری مناسب توسط دولت‌مردان، سیاست توسعه اقتصادی و تغییرات کاربری اراضی را تحت نظارت قرار داد [۱۱] و با توجه به تغییراتی که در کاربری اراضی در آینده به وجود می‌آید، به مدل‌سازی میزان تولید آب در آینده پرداخت.
- ### منابع
- [1]. Jie X., Yu, X. Na, L. & Hao W. A.N.G. Spatial and temporal patterns of supply and demand balance of water supply services in the Dongjiang Lake Basin and its beneficiary areas. *Journal of resources and ecology*, 2015; 6(6), 386-396.
- [2]. Lique C., Maes, J., La Notte A., & Bidoglio G. Securing water as a resource for society: an ecosystem services perspective. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2011; 11(3-4), 247-259.
- [3]. Tao J.I.N., Xiaoyu Q. & Liyan H. Changes in grain production and the optimal spatial allocation of water resources in China. *Journal of resources and ecology*, 2016; 7(1), 28-35.
- [4]. Sun S., Sun G., Cohen E., McNulty S.G., Caldwell P.V., Duan K. & Zhang Y. Projecting water yield and ecosystem productivity across the United States by linking an ecohydrological model to WRF dynamically downscaled climate data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016; 20(2), 935.
- [5]. Yang, X., Zhou, Z., Li, J., Fu, X., Mu, X., & Li, T. Trade-offs between carbon sequestration, soil retention and water yield in the Guanzhong-Tianshui Economic Region of China. *Journal of Geographical Sciences*, 2016; 26(10), 1449-1462.
- [6]. Smith, E. J. The balance between public water supply and environmental needs. *Water and Environment Journal*, 1997; 11(1), 8-13.
- [7]. Chen, M., Qin, X., Zeng, G., & Li, J. Impacts of human activity modes and climate on heavy metal "spread" in groundwater are biased. *Chemosphere*, 2016; 152, 439-445.
- [8]. Liu, Y., Song, W., & Mu, F. Changes in ecosystem services associated with planting structures of cropland: A case study in Minle