

## مدل‌سازی مکانی عرضه و تقاضای خدمت تولید آب سطحی در

### حوضه آبریز هراز

زهرا املائی<sup>۱</sup>؛ شراره پورابراهیم<sup>۲\*</sup>؛ مجید مخدوم<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد محیط زیست، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳- استاد گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت ۰۲/۰۵/۰۰- تاریخ پذیرش ۲۰/۰۹/۰۰)

#### چکیده:

تبادل بین عرضه و تقاضای آب و خدمات مرتبط با آن، مسئله اصلی برنامه‌ریزی سرزمین با رویکرد مدیریت منابع آبی است. هدف پژوهش حاضر، برقراری جریان مناسب عرضه از طریق نقشه‌سازی خدمت تولید آب سطحی در آبریز با استفاده از مدل Water Yield به‌عنوان عرضه منابع آب آبریز و تقاضای آن بر مبنای آب قابل برنامه‌ریزی است. در این پژوهش براساس لایه‌های ورودی عمق محدودکننده ریشه، میانگین بارندگی سالانه، مقدار آب در دسترس گیاه، تبخیر و تعرق مرجع، کاربری/پوشش اراضی، جدول بیوفیزیکی و مرز حوضه و زیرحوضه‌های آبریز عرضه خدمت تولید آب سطحی مدل‌سازی شد. سپس نقشه تقاضای حوضه براساس آب قابل برنامه‌ریزی در مدل Water Yield تهیه و جریان بین عرضه و تقاضا برای محاسبه تعادل‌ها و عدم تعادل‌ها نقشه‌سازی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که زیرحوضه پایاب هراز با تولید سالانه ۶۹ میلیون متر مکعب رواناب به‌واسطه ۶۱۸ میلی‌متر بارش در سال و تمرکز کاربری کشاورزی و شهری بیشترین تولید رواناب را در سال ۱۳۹۶ داشته است و زیرحوضه‌های پایاب تالار و سیاه‌رود به‌واسطه تمرکز بخش عمده فعالیت‌های صنعتی افزون‌بر کاربری‌های کشاورزی و تمرکز جمعیت دارای بیشترین مقدار تقاضا با میانگین سالانه ۸۰۰ میلیون متر مکعب هستند. همچنین در حوضه آبریز هراز، عدم تعادل جریان بین عرضه و تقاضا سبب فشار بسیار بر منابع آب می‌شود، به‌صورتی که ادامه وضع موجود به کاهش شدید منابع آب در سطح حوضه آبریز می‌انجامد. برای تعادل‌بخشی و حفظ پایداری در دو بخش تقاضا و عرضه، هدایت جمعیت به سمت زیرحوضه‌های کمتر مطلوب از طریق ایجاد انگیزه و امکانات در این مناطق و بازتعریف مجدد جمعیت با هدف کاهش تقاضا در زیرحوضه‌های تحت فشار و چیدمان پوشش/ کاربری سرزمین برای افزایش عرضه و نگهداشت منابع آب پیشنهاد شده است.

**کلید واژگان:** حوضه آبریز هراز، خدمات اکوسیستم، خدمت تولید آب سطحی، عرضه و تقاضای آب

## ۱. مقدمه

نظام‌های انسانی هستند ضروری محسوب می‌شود (Wagener *et al.*, 2010). نقشه‌سازی خدمات اکوسیستم از روش‌هایی است که میزان پایداری توسعه انسانی و تعادل در استفاده از منابع را ارزیابی و به مدیران در حصول تعادل کمک خواهد کرد (Asadolahi *et al.*, 2015).

بررسی تغییرات رفتاری در سیستم‌های منابع آب تحت تأثیر سناریوهای مختلف می‌تواند به بهره‌برداری بهینه و برنامه‌ریزی سرزمین کمک کند (Kadkhodahosseini *et al.*, 2016). به دلیل ناهمگنی مکانی و تفاوت در عرضه و تقاضای خدمات، برای تصمیم‌گیری براساس تعادل و توازن سرزمینی، به نقشه‌سازی دقیق خدمات اکوسیستم نیاز است (KhosraviMashizi, 2016; Malinga *et al.*, 2015). برای درک تغییرات زمانی تقاضای خدمات اکوسیستم، پیشرانان تقاضا باید بررسی شوند (Wolff *et al.*, 2015). مقاله حاضر به شناسایی شاخص‌های اثرگذار در تعیین خدمت فراهمی تولید آب و ارزیابی تعادل میان عرضه و تقاضای خدمت تولید آب می‌پردازد و نقشه‌سازی عرضه و تقاضای خدمت تولید آب را با استفاده از نرم‌افزار InVEST انجام می‌دهد تا در نهایت سناریوی برتر در مدیریت سرزمین را برای ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا ارائه کند. براساس تعریف فائو در سال ۲۰۱۴، تولید آب طبیعی به معنای مجموع میانگین بلندمدت جریان سالانه رودخانه‌ها و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی توسط بارش است. قسمتی از آب ذخیره‌شده در خاک را گیاهان مصرف می‌کنند (Brauman *et al.*, 2014; FAO, 2007) و بقیه آن با تغذیه آب‌های زیرزمینی به تدریج برای پایداری جریان رودخانه‌ها وارد آب‌های سطحی می‌شود (Dominati *et al.*, 2009).

ایران با پراکندگی بارش بسیار متفاوت و حتی با وجود جاری بودن ۹۲ رودخانه دائمی و شش حوضه آبریز، از کشورهای نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود؛ چنانکه حدود ۸۰ درصد کشور در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک قرار دارد (Barzeali *et al.*, 2017). از طرفی به دلیل قرارگیری در کمربند خشک جهان، ایران نسبت به بسیاری از کشورهای دیگر به‌طور جدی‌تری با مسئله بحران آب روبه‌روست. این موضوع برخلاف خشکسالی که ناشی از تغییرات اقلیمی است، بیشتر در اثر مدیریت نامناسب سرزمین در درازمدت رخ می‌دهد (Sabater & Barceló, 2010; VanLoon & VanLanen, 2012). بیش از دو دهه است که جهان پی برده در مدیریت منابع آب باید به مدیریت تقاضا و عرضه توجه کرد. بنابراین یکی از اهداف بلندمدت مدیریت راهبردی آب کشور، برقراری تعادل بین تقاضای آب و منابع آب موجود (عرضه) با رعایت ملاحظات اجتماعی، اقتصادی، محیط‌زیستی و پایداری منابع و مصارف آب است (Kumasizadeh *et al.*, 2013). استفاده از خدمات اکوسیستم در سیاستگذاری و برنامه‌ریزی‌های کلان می‌تواند مانع بروز صدمات جبران‌ناپذیر به محیط زیست شود. تأثیرات متقابل نظام‌های آبی و نظام‌های زیستی، فیزیکی و اجتماعی و پیچیدگی‌های مربوط به آنها، چالش‌های بزرگی در زمینه کمی‌سازی چنین نظام‌هایی ایجاد می‌کند (Gleick & Palaniappan, 2010; Rockström *et al.*, 2009). برای درک مشکلات مدیریت آب در این‌گونه نظام‌های پیچیده، بسط مدل‌ها و روش‌هایی که قادر به پردازش نظام‌های طبیعی و همچنین کنش‌ها و واکنش‌های متقابل و بازخوردهای آنها با

حوضه آبریز موسمی شرق آسیا در جنوب چین عامل بارش را اثرگذارترین عامل در مدل تولید آب دانسته است (Yang *et al.*, 2019).

Canqiang و همکاران (2012) با هدف برنامه‌ریزی، مدیریت منابع آب و ساخت نیروگاه‌های آبی به مدل‌سازی تولید آب در رودخانه زیاکسی با استفاده از InVEST پرداختند و با به‌کارگیری داده‌هایی شامل کاربری- پوشش زمین و همچنین متوسط بارندگی سالانه و تبخیر و تعرق بالقوه نشان دادند که مناطق جنوب و جنوب غربی حوضه آبریز بیشترین عرضه تولید آب را دارند (Canqiang *et al.*, 2012).

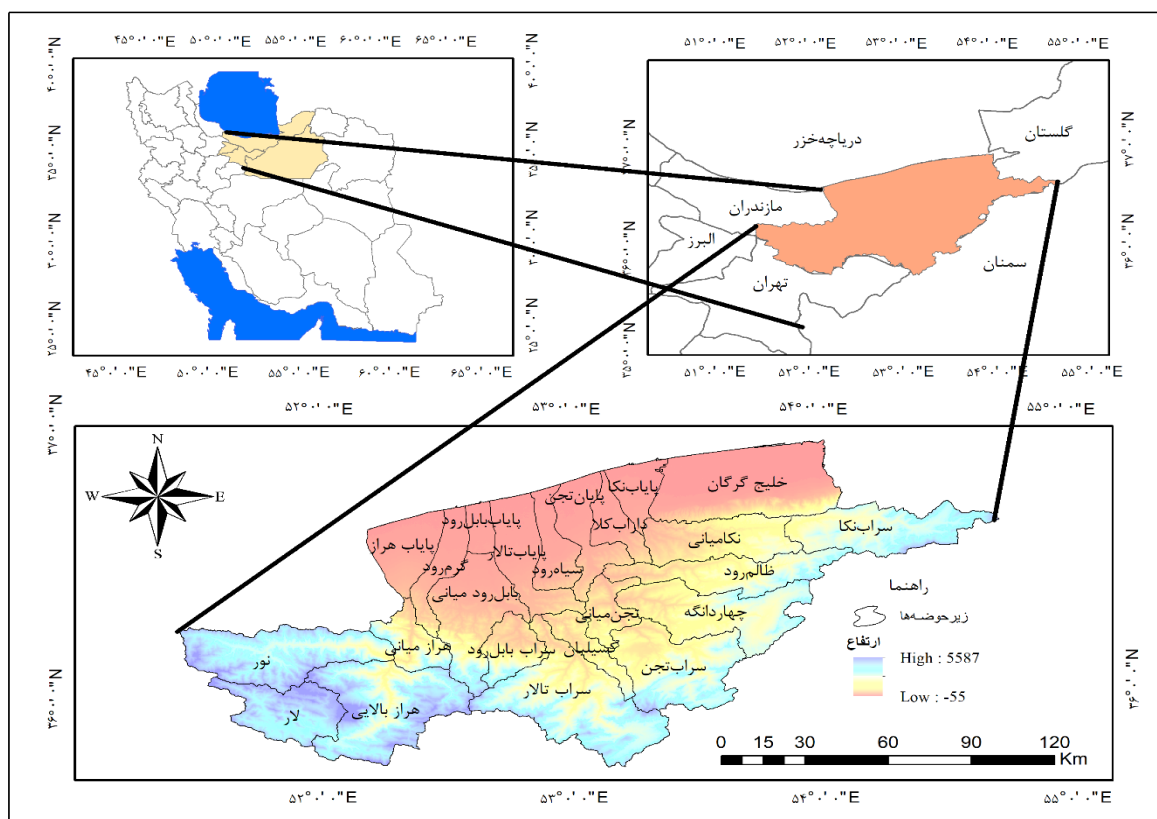
Haghdadi و همکاران (2018) با هدف بررسی تأثیر بهره‌برداری‌های مختلف از اراضی و مقدار تولید آب به بررسی و نقشه‌سازی مقدار تولید آب در کاربری‌های مختلف اراضی از جمله مرتع، کشاورزی، مناطق مسکونی، زمین بایر و ذخیره‌گاه ارس پرداختند تا براساس آن بتوان تصمیم‌های مدیریتی مناسب‌تری در راستای توان منطقه اتخاذ و توان هر کاربری اراضی در مقدار تولید آب را مشخص کرد (Haghdadi *et al.*, 2018).

Barzeali و همکاران (2017) برای بررسی عرضه خدمت نگهداشت خاک و تولید آب در سطح کاربری‌های مختلف اراضی و مقایسه میزان آنها به ارزیابی خدمات اکوسیستم‌های مرتعی از منظر تولید آب و نگهداشت خاک با استفاده از نرم‌افزار InVEST پرداختند و نشان دادند که پوشش گیاهی نقش بسزایی در حفظ آب و خاک دارد و تخریب پوشش گیاهی به‌طور فزاینده‌ای موجب افزایش رواناب و فرسایش خاک خواهد شد (Barzeali *et al.*, 2017).

2010). پژوهش‌های بسیاری به تعیین روش‌های اصولی اندازه‌گیری کمی، مدل‌سازی و نقشه‌سازی و ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستم پرداخته‌اند (KhosraviMashizi, 2016 ; Malinga *et al.*, 2015) که در بسیاری از آنها به رابطه بین عرضه و تقاضا پرداخته شده است. Chen و همکاران (2020) برای مدیریت پایدار سرزمین و بررسی رابطه بین عرضه و تقاضا و توزیع مکانی خدمت تولید آب از نرم‌افزار InVEST برای نقشه‌سازی عرضه و تقاضا استفاده کردند و نتیجه گرفتند که بیشترین تقاضای آب مربوط به بافت شهری است و همچنان تراکم جمعیت، سرانه فضای سبز و مناطق صنعتی موجب افزایش تقاضا برای منابع آب می‌شود و تصمیم‌گیران باید با حفاظت از منابع آبی برای بهبود بهره‌وری از منابع آب تلاش کنند (Chen *et al.*, 2020).

Sahle و همکاران (2019) برای ارتقای امنیت زنجیره آب- غذا- انرژی به کمی‌سازی و نقشه‌سازی خدمت تولیدی آب و خدمت تنظیمی فرسایش خاک برای تشریح تقاضا و عرضه در مفهوم فضایی با استفاده از نرم‌افزار InVEST پرداختند. نتایج بررسی‌ها مناطق فرسایش‌پذیر را مشخص کرد و رابطه فصلی عرضه و تقاضا برای تأمین آب و فرسایش خاک را شرح داد و از این طریق چالش‌های مرتبط با آب را شناسایی کرد و گزینه‌های مدیریتی را برای افزایش امنیت ارتباطات به برنامه‌ریزان در حوضه آب پیشنهاد داد (Sahle *et al.*, 2019).

Yang و همکاران (2019) برای تخمین خدمت تولید آب در حوضه‌های موسمی جنوب چین از مدل InVEST استفاده کردند و نتیجه گرفتند که برای مدیریت خدمات اکوسیستم، شناخت ارزش خدمات ضروری است. همچنین ارزیابی حساسیت مدل در



شکل ۱- منطقه پژوهش

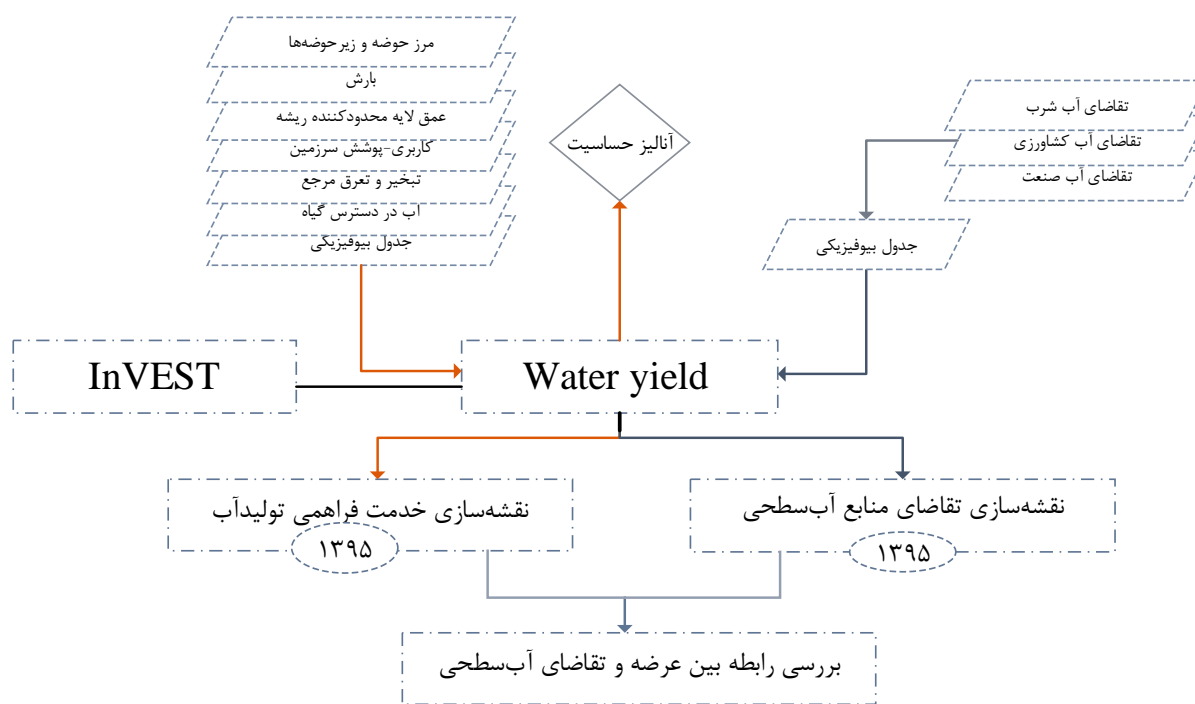
حوضه آبریز هراز در دامنه‌های شمالی بخش مرکزی رشته‌کوه البرز در مختصات  $10^{\circ} 26' 51''$  تا  $23''$   $44' 44''$  طول شرقی و  $18^{\circ} 44' 35''$  تا  $55' 5''$  عرض شمالی قرار گرفته است. این حوضه از حوضه‌های درجه دو حوضه آبریز دریای مازندران محسوب می‌شود.

حجم بارش‌های حوضه آبریز هراز- قره‌سو در سال ۱۳۹۶ نسبت به متوسط بلندمدت کاهش داشته که سبب کمبود آب تالاب‌ها و مشکل تأمین نیاز شرب شده است (Liang & Liu, 2014). رودخانه‌های مهم این حوضه هراز، جویبار، تجن و نکا هستند. حوضه آبریز رودخانه هراز و دیگر رودخانه‌های بین هراز و قره‌سو با نام اختصاری هراز-نکا شناخته شده‌اند. مساحت این حوضه برابر با ۱۸۱۷۹ کیلومترمربع است. چهار محدوده مطالعاتی درجه ۳ شامل بابل- آمل، قائم‌شهر- جویبار، ساری- نکا و

در این پژوهش با مدل‌سازی مکانی خدمت تولید آب سطحی و محاسبه مقدار عرضه در سطح آبریز و مقایسه با میزان تقاضا و مصرف، به بررسی عدم تعادل و توازن منطقه‌ای و شکاف میان عرضه و تقاضا پرداخته شده است. با توجه به اینکه مقیاس‌های متفاوت سیاسی برای محاسبه تقاضا و اکوسیستم محور برای محاسبه تولید و عرضه آب در سطح حوضه آبریز وجود دارد، پژوهش حاضر با مدل‌سازی مکانی اطلاعات عرضه توسط نرم‌افزار Invest و جمع‌آوری اطلاعات استانی در قالب زیرحوضه‌ها می‌تواند در بهبود تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی سرزمین با معرفی مدل مناسب برقراری جریان خدمت تولید و عرضه آب در اکوسیستم‌ها مؤثر باشد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. منطقه پژوهش



شکل ۲- فلوجارت روش تحقیق

(Budyko, 1961). تولید آب سالیانه ( $y_x$ ) برای هر پیکسل از منطقه پژوهش از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود که در آن ( $AET_x$ ) تبخیر و تعرق واقعی سالیانه و ( $P_x$ ) بارش سالیانه است.

(۱)

$$y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \cdot P_x$$

نسبت تبخیر و تعرق از تعادل آبی منطقه با استفاده از رابطه ۲ برآورد می‌شود. رویکرد مدل WaterYield در تولید آب سالیانه به رابطه بین تبخیر تعرق واقعی به تبخیر و تعرق پتانسیل وابسته است که ابتدا توسط Budyko (1974)، سپس توسط Fu (1981) و در نهایت توسط Zhang و همکاران (2001) بسط داده شد (Budyko, 1974 ; Fu, 1981 ; Zhang, 2001).

(۲)

$$\frac{AET_x}{P_x} = 1 + \frac{PET_x}{P_x} - \left[\left(\frac{PET_x}{P_x}\right)^w\right]^{1/w}$$

در این رابطه ( $w$ ) پارامتری تجربی است که توسط رابطه بین تبخیر و تعرق واقعی و تبخیر و تعرق

بهبهر- بندرگز و بیست‌وسه حوضه درجه ۴ در این حوضه واقع است. شکل ۱ موقعیت منطقه پژوهش را نشان می‌دهد.

## ۲-۲. استفاده از مدل WaterYield در

### نقشه‌سازی خدمت تولید آب سطحی

ابزار WaterYield یکی از ابزارهای موجود در بسته نرم‌افزاری InVEST<sup>۱</sup> است که مقدار تولید آب را در نقاط مختلف یک چشم‌انداز تخمین می‌زند و چگونگی تغییر مقدار تولید آب در اثر استفاده از زمین را نشان می‌دهد. این مدل بر پایه منحنی بادیکو است که طبق تعریف، تولید آب مقدار آبی است که از خروجی حوضه آبریز خارج می‌شود و از تفریق مقدار بارش از تبخیر و تعرق و نفوذ سطحی حاصل می‌شود. منحنی بادیکو، نوعی تابع تجربی است که ارتباط نسبت تبخیر و تعرق واقعی به بارش را نسبت به تبخیر و تعرق پتانسیل به بارش نشان می‌دهد

<sup>۱</sup><https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

استفاده از نرم افزار InVEST، به شرح زیر و در اندازه سلول ۲۵۰ متری تهیه شده‌اند.

-نقشه بارش: برای تهیه نقشه بارش از داده‌های تأییدشده شرکت مدیریت منابع آب ایران و برای بازسازی داده‌ها از تابع Missing data در نرم‌افزار XLSTAT استفاده شد. سپس با استفاده از تابع Kriging در نرم‌افزار ArcMap نقشه بارش در سال ۱۳۹۵ ساخته شد.

- نقشه کاربری/پوشش اراضی: داده‌ها از سایت Esa در سال ۱۳۹۵ تهیه و بعد از بررسی صحت و ضریب کاپا استفاده شد. برای محاسبه ضریب کاپا و صحت‌سنجی نقشه کاربری/پوشش اراضی از ۶۶ نقطه تصادفی در بررسی میدانی استفاده شد که ضریب کاپا برابر ۰/۶۱ و صحت‌سنجی نقشه برابر ۸۱ درصد به دست آمد.

- نقشه ظرفیت آب در دسترس گیاه: ظرفیت آب موجود در گیاه کسری بین ۰ و ۱ است و تفاوت بین ظرفیت حجمی زمین و نقطه پژمردگی دائمی تعریف شده است. برای تجزیه و تحلیل‌ها از داده‌های خاک در عمق ۳۰ سانتی‌متری استفاده شد، زیرا یک نقطه انتقال مناسب بین رواناب و تغذیه مجدد آب‌های زیرزمینی است (Sahle et al., 2019). داده‌های مورد نیاز شامل بافت خاک (درصد رس و شن)، درصد مواد آلی خاک (کربن آلی)، درصد تراکم خاک (وزن خاک خشک بر حجم کل خاک)، درصد گراول (ذرات بزرگ‌تر از شن که در نگهداری و حرکت آب نقشی ندارند) و درصد شوری خاک است. ظرفیت آب در دسترس گیاه با استفاده از داده‌های استاندارد جهانی خاک که در سایت‌های Faو و Soilgrid در دسترس است و نرم‌افزار SPAW محاسبه شد.

- نقشه عمق لایه محدودکننده ریشه: عمق لایه

پتانسیل تعریف می‌شود و  $(PET_x)$  تبخیر و تعرق پتانسیل است و با استفاده از تبخیر و تعرق مرجع  $(ET_0)$  و ضریب اصلاحی هر محصول  $(K_c)$  برای هر سلول محاسبه می‌شود. پارامتر  $(w)$  نیز به آب در دسترس گیاه، مقدار بارش و ثابت تجربی  $(Z)$  مربوط است.

پارامتر  $(Z)$  پارامتری هیدروژئولوژیکی و یک عدد ثابت تجربی است که گویای الگوی بارش محلی، شدت بارش، تغییرات فصلی آب‌وهوا و ویژگی‌های توپوگرافی حوضه بوده و مقدار آن عددی بین ۱ تا ۳۰ است. سه روش برای محاسبه پارامتر  $(Z)$  وجود دارد (Sharp et al., 2014):

۱- به صورت  $N * 0/2$  که در آن  $N$  تعداد روزهای بارانی در یک سال است (Donohue et al., 2012)؛ ۲- براساس تخمین جهانی  $w$  (Liang & Xu et al., 2013 ; Liu, 2014)؛ ۳- تخمین با استفاده از کالیبراسیون داده‌های واقعی مربوط به رواناب (Canqiang et al., 2012 ; Pessacg et al., 2015). براساس رابطه ۳، پارامتر  $(Z)$  به دست می‌آید.

(۳)

$$w = Z \frac{AWC_x}{P_x} + 1/25$$

در این رابطه،  $AWC_x$  مقدار آب در دسترس گیاه در عمق است. برای اجرای مدل به داده‌های مختلفی نیاز است، از جمله نقشه‌های بارش، نقشه تبخیر و تعرق پتانسیل، نقشه عمق محدودکننده ریشه، نقشه آب قابل دسترس گیاه، نقشه کاربری اراضی- پوشش گیاهی در قالب رستری و نقشه مرز حوضه و زیرحوضه‌ها در قالب وکتوری و همچنین جدول زیست‌فیزیکی با فرمت cvs. داده‌های ورودی برای مدل‌سازی تولید آب در محدوده بررسی‌شده با

به‌دست آمد (Murphy, Canadell *et al.*, 1996; 2010; Nippert & Holdo, 2015).

- پارامتر ( $Z$ ): با استفاده از مقادیر متوسط بارندگی و ظرفیت آب قابل در دسترس گیاه پارامتر ( $Z$ ) براساس رابطه ۳ محاسبه شد (Sharp *et al.*, 2014). شکل ۲ مراحل روش تحقیق را نشان می‌دهد.

### ۳-۲. محاسبه تقاضای آب

تقاضای منابع آب اغلب به‌دلیل مصرف آب شرب، مصرف آب برای کشاورزی، مصرف آب برای صنعت و خدمات و همچنین برای حقایق محیط زیست است که براساس رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Chen *et al.*, 2020).

$$D = D_{urb} + D_{arg} + D_{ind} + D_{env} \quad (4)$$

در رابطه بالا،  $D$  تقاضای آب،  $D_{urb}$  تقاضای آب شرب،  $D_{arg}$  تقاضای آب کشاورزی،  $D_{ind}$  تقاضای آب صنعت و خدمات و  $D_{env}$  تقاضای حقایق محیط زیست است.

براساس آمار آب قابل برنامه‌ریزی تخصیص‌یافته وزارت نیرو در سال ۱۳۹۵ برای مصارف مختلف نیاز آبی کاربری‌های مختلف برآورد می‌شود، به این صورت که برای محاسبه نیاز آبی شرب از اطلاعات تراکم جمعیت سال ۱۳۹۵ استفاده می‌شود. در حوضه آبریز هزار در کاربری پهنه شهری، شهرهای نوشهر، نور، آمل، بابل، محمودآباد، فریدون‌کنار، بابلسر، سوادکوه، قائمشهر، جویبار، ساری، نکا، بهشهر و گلوگاه در استان مازندران و شهرهای بندرگز و کردکوی در استان گلستان واقع شده‌اند. تراکم استان مازندران ۱۳۷/۷ نفر در هر کیلومتر مربع و استان گلستان ۹۱/۸ نفر در هر کیلومتر مربع است. براساس

محدودکننده ریشه، عمقی از خاک است که نفوذ ریشه گیاهان به‌واسطه ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک با محدودیت روبه‌رو می‌شود. در صورت در دسترس نبودن اطلاعات عمق محدودکننده ریشه می‌توان از لایه عمق خاک استفاده کرد. در این تحقیق از لایه جهانی عمق خاک استفاده شد.

-نقشه وکتوری مرز حوضه و زیرحوضه‌ها: در این بخش از تقسیمات و لایه‌های ملی استفاده شد.

-نقشه تبخیر و تعرق مرجع ( $ET_0$ ): تبخیر و تعرق مرجع توانایی جو برای گرفتن آب از طریق فرایندهای تبخیر و تعرق است. برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع از روش فائو-پنمن مونث استفاده شد که به‌دلیل به‌کارگیری عوامل متعدد اقلیمی از دقت زیادی نسبت به همه روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق برخوردار است و در همه نواحی و اقلیم‌ها به‌ویژه نواحی مرطوب و بارانی قابل استفاده است. در حال حاضر روش FAO-PM<sup>2</sup> به‌طور گسترده به‌عنوان روشی استاندارد در نظر گرفته شده است (Walter *et al.*, 2000). این روش نیازمند داده‌های هواشناسی، رطوبت نسبی، تابش و سرعت باد است که نقشه‌های مورد نیاز از سایت Worldclime تهیه شد.

- جدول بیوفیزیکی: جدول بیوفیزیکی به‌کاررفته در مدل تولید آب سالیانه، نشان‌دهنده ویژگی‌های هر طبقه پوشش/کاربری اراضی و شامل کد هر طبقه، نام، حداکثر عمق ریشه‌دوانی (میلی‌متر)، وجود یا نبود پوشش گیاهی و ضریب تبخیر و تعرق برای هر طبقه (kc) است. در این تحقیق برای محاسبه حداکثر عمق ریشه و ضریب kc پوشش غالب گیاهی هر طبقه بررسی شد و بر اساس آن این شاخص‌ها

<sup>۲</sup>FAO Penman-Monteith method

جدول ۱- مجموع حجم آب قابل برنامه‌ریزی از منابع آب سطحی (میلیون متر مکعب) (منبع: وزارت نیرو، ۱۳۹۵)

مجموع	کشاورزی	صنعت	فضای سبز	شرب	استان	حوضه آبریز
۳۳۱۹/۶	۳۰۱۹	۳۸/۴	۰	۲۶۲/۳	مازندران	هراز- قره‌سو
۶۲/۷	۱۲/۸	۰/۱	۰	۴۹/۸	گلستان	هراز- قره‌سو

حجم تقاضا را در میان زیرحوضه‌های هر از دارد. شکل ۶ جریان میان عرضه و تقاضای آب را در زیرحوضه‌ها نشان می‌دهد. در زیرحوضه‌های هر از بالایی، سراب تالار، کسلیان، نور، لار و سراب بابل‌رود، عرضه بیشتر از تقاضاست؛ اما در زیرحوضه‌های دیگر مانند زیرحوضه پایاب تالار، سیاه‌رود، تقاضا چندبرابر عرضه و تولید آب است. مطابق جدول ۲ که نشان‌دهنده نتایج مدل تولید آب در هر زیرحوضه است، بیشترین تبخیر و تعرق معادل ۵۹۷/۲۴ میلی‌متر و مربوط به زیرحوضه بابل‌رود میانی است.

نتایج این تحقیق نشان داد که با توجه به نبود تعادل در عرضه و تقاضای آب در سطح حوضه آبریز ادامه وضع موجود به کاهش شدید منابع آب در سطح حوضه آبریز می‌انجامد. بنابراین راهکارهایی برای تعادل بخشی در راستای ایجاد پایداری باید در نظر گرفته شود. این راهکارها باید در هر دو بخش تقاضا و عرضه اجرایی شود.

بازتعریف مجدد جمعیت برای کاهش تقاضا در زیرحوضه‌های تحت فشار: مطابق نتایج زیرحوضه‌های دارای کاربری شهری، با بیشترین تقاضا مواجه‌اند. زیرحوضه پایاب تالار دارای بیشترین تقاضا در حوضه آبریز است و شهرهای قائمشهر و بخش‌هایی از بابل، بابلسر، جویبار و سوادکوه در این زیرحوضه قرار گرفته است. زیرحوضه سیاه‌رود و بخش‌هایی از پهنه‌های شهری قائمشهر، جویبار و ساری در مقام دوم و زیرحوضه خلیج گرگان و پهنه‌های شهری نکا،

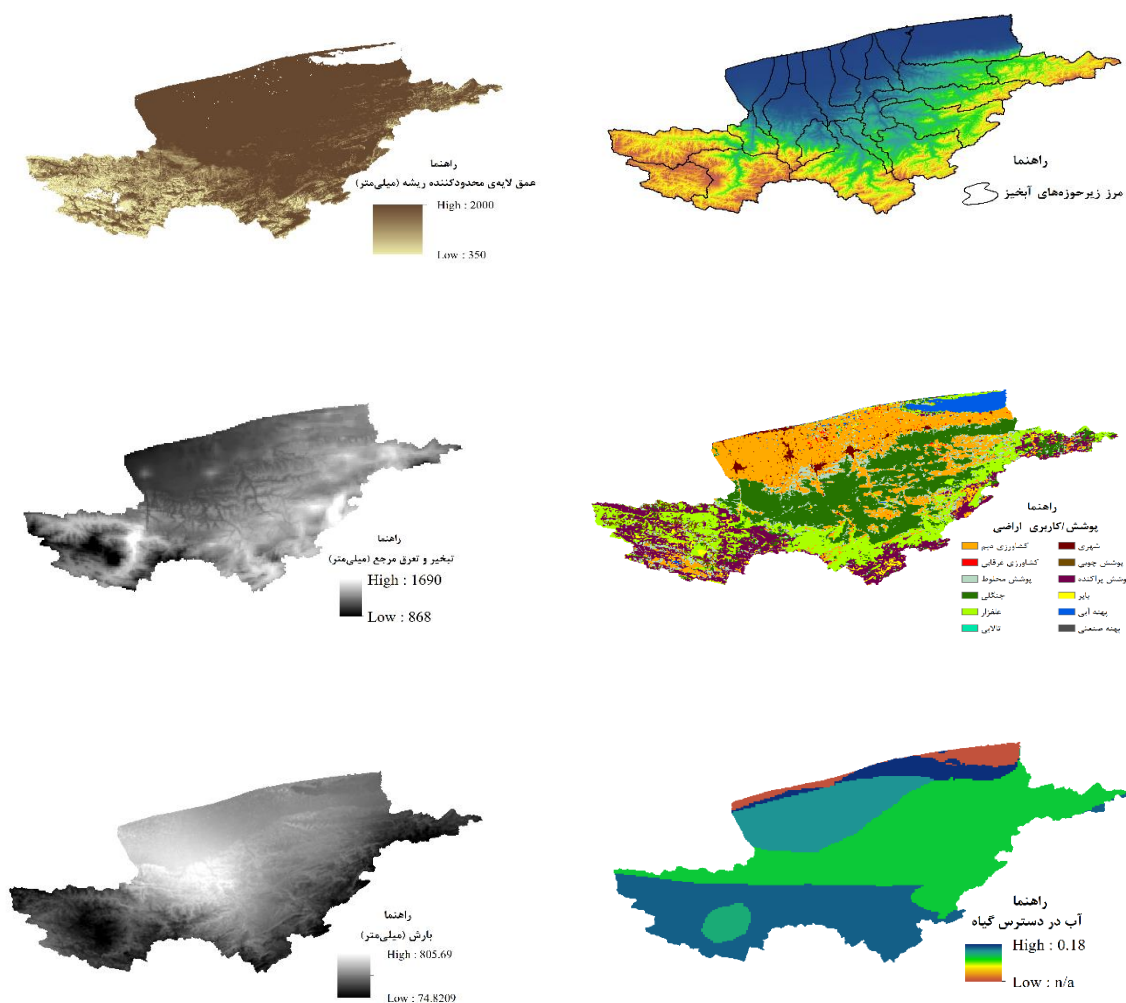
حجم آب تخصیص‌یافته برای شرب، تقاضای آب شرب برای هر هکتار از مساحت شهری به‌دست آمد و برای برآورد تقاضای بخش کشاورزی نیز مقدار آب تخصیص‌یافته در این بخش‌ها بر سطح زیر کشت تقسیم و تقاضای آب در هر هکتار محاسبه شد و در بخش صنعت نیز (شهرک‌ها و نواحی صنعتی) حجم آب تخصیص‌یافته بر مساحت ناحیه صنعتی به‌منظور برآورد تقاضای آب در هر هکتار تقسیم شد. در نهایت به دلیل اینکه ورودی نرم‌افزار باید مقدار تقاضا در هر پیکسل باشد، عدد به‌دست‌آمده در مساحت هر پیکسل ضرب شد و جدول تقاضای به‌دست‌آمده با فرمت cvs. وارد مدل Water yield شد. در جدول ۱ حجم آب قابل برنامه‌ریزی از منابع آب سطحی در بخش‌های مختلف آورده شده است.

### ۳. نتایج

#### ۳-۱. نتایج مدل تولید آب سطحی سالانه

براساس نتایج مدل‌سازی تولید آب در حوضه آبریز هر از به‌طور متوسط سالانه ۳۲۵/۲ میلیون متر مکعب آب تولید می‌شود. شکل ۴ مقدار تولید آب در هر زیرحوضه را نشان می‌دهد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین حجم تولید آب مربوط به زیرحوضه پایاب هر از و کمترین حجم تولید آب مربوط به زیرحوضه سراب نکا است. از طرفی شکل ۵ نشان‌دهنده حجم تقاضای آب زیرحوضه‌های حوضه آبریز هر از است. در مورد تقاضای آب زیرحوضه لار و سراب بابل‌رود کمترین تقاضای آب و زیرحوضه پایاب تالار بیشترین





شکل ۳- ورودی‌های اولیه مدل تولید آب INVEST

تأثیر بسزایی در تولید آب دارند. به صورتی که با افزایش ۱۵ درصدی بارش، حجم تولیدی آب ۴۰ درصد افزایش پیدا می‌کند و با افزایش ۱۵ درصد تبخیر و تعرق، حجم تولیدی آب سالیانه حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین پارامتر  $Z$  حساسیت کمتری در مدل ایجاد می‌کند و با تغییر پارامتر ورودی  $Z$ ، تولید آب سالیانه ۴ درصد کاهش پیدا می‌کند.

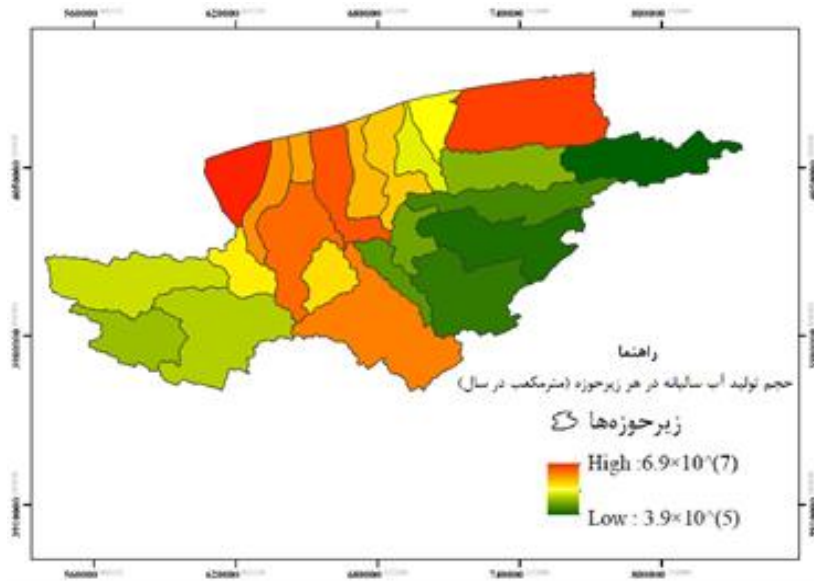
#### ۴. بحث و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش بیانگر تأثیر چشمگیر عوامل

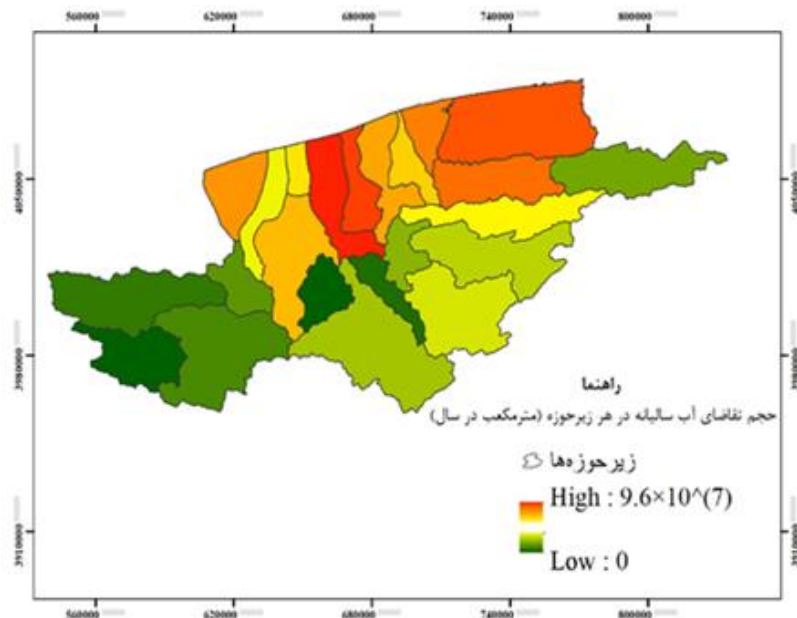
بهشهر، گلوگاه، بندرگز و کردکوی در رتبه سوم تقاضا در بین زیرحوضه‌های هراز قرار دارند. در دو زیرحوضه لار و سراب بابلرود، عرضه برابر با تقاضا و در زیرحوضه‌های نور و هراز بالایی و کسلیان و سراب تالار عرضه بیشتر از تقاضاست. در توزیع جمعیت آینده باید به این موضوع توجه شود.

#### ۳-۲. آنالیز حساسیت مدل

نتایج آنالیز حساسیت مدل WaterYield به منظور بررسی درصد اثرگذاری ورودی‌های مدل در تولید آب توسط نرم‌افزار Invest انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای بارش و تبخیر و تعرق مرجع،



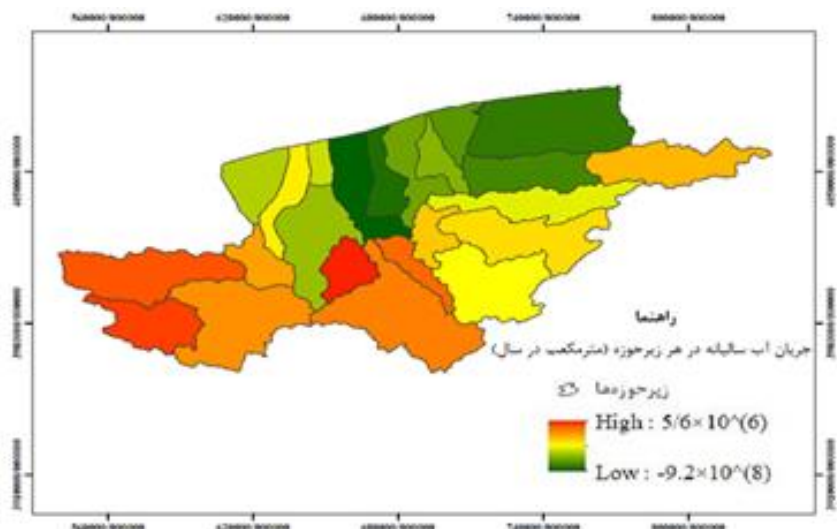
شکل ۴- حجم تولید آب در هر زیرحوضه



شکل ۵- حجم تقاضای آب در هر زیرحوضه

به رواناب شده است. این نتیجه که پهنه‌هایی با کاربری کشاورزی و شهری جزو مناطقی با تولید رواناب زیادند، با پژوهش‌های Haghdaei و همکاران (2018) دربارهٔ خدمت اکوسیستمی تولید آب با نرم‌افزار InVEST در حوضهٔ دلیچای و Jafarzadeh و همکاران (2019) مطابقت دارد. همچنین نتایج پژوهش نشان‌دهندهٔ اثر پوشش‌های مرتعی در جذب و کاهش رواناب به دلیل وجود ریشهٔ گیاهان نسبت به

اقلیمی به‌ویژه بارش و تبخیر و تعرق در خدمت تولید آب سطحی است. این موضوع توجه به عوامل تغییر اقلیم را که سبب کاهش بارش و افزایش تبخیر و تعرق می‌شود جدی‌تر می‌کند. همچنین نتایج حاضر بیان می‌کند که سرزمین‌هایی با کاربری انسان‌ساخت بیشترین تولید رواناب را در حوضهٔ آبریز هراز داشته‌اند، زیرا پوشش گیاهی کم در این مناطق، موجب کاهش نفوذ آب در زمین و تبدیل آب سطحی



شکل ۶- حجم جریان آب در هر زیرحوضه

همکاران (2019) دربارهٔ رابطهٔ عرضه و تقاضای خدمات چندگانهٔ اکوسیستمی مطابقت دارد. آنها دریافتند که به دلیل نبود تعادل در عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستم در منطقه، باید در برنامه‌های آبی سرزمینی به ایجاد انگیزه و امکانات در مناطق کمتر مطلوب برای جذب جمعیت پرداخت تا بتوان تعادلی میان عرضه و تقاضا در مناطق پرجمعیت ایجاد کرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در سیاست‌های کلان تخصیص آب توجه به خدمات اکوسیستم ارائه‌شده در حوضه، کلید اصلی حل مشکل در ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا خواهد بود. مدل‌سازی خدمت تولید آب در اکوسیستم و همچنین نقشه‌سازی تقاضای آب سطحی سالیانه در حوضهٔ آبریز، موضوعی اجتناب‌ناپذیر در برنامه‌ریزی و سیاستگذاری تخصیص آب حوضه خواهد بود. در حوضه‌های پایاب تالار، سیاه‌رود، خلیج گرگان، نکا میانی، پایاب نکا، پایاب تجن، داراب‌کلا، بابل‌رود میانی، پایاب هراز، پایاب بابل‌رود، ظالم‌رود، سراب تجن، گرم‌رود، چهاردانگه، تجن میانی، سراب نکا و هراز میانی، تقاضا بسیار بیشتر از عرضهٔ طبیعی حوضهٔ آبریز است. این حوضه‌ها به بازتوزیع فعالیت و

اراضی کشاورزی است. پوشش جنگلی حوضهٔ هراز نیز به دلیل داشتن ریشه‌های عمیق موجب کند شدن سرعت رواناب جاری می‌شود و آب را جذب می‌کند و مانع حرکت رواناب در سطح حوضهٔ آبریز می‌شود. Azimi و همکاران (2013) نیز دربارهٔ تأثیر پوشش جنگل‌ها و مراتع در کاهش رواناب تحقیق کرده‌اند. در زیرحوضه‌های شمالی حوضهٔ آبریز هراز، با پهنهٔ شهری و صنعتی، تقاضای آب بسیار بیشتر از عرضهٔ آن بوده است که با نتیجهٔ پژوهش Chen و همکاران (2020) در زمینهٔ ارزیابی عرضه و تقاضای آب همسو است. آنها نشان دادند که در پهنه‌های کشاورزی و مناطق شهری و صنعتی با تراکم جمعیت زیاد، تقاضا بیش از عرضه است و میان عرضه و تقاضا در این مناطق تناقض وجود دارد. کشاورزی و وجود مناطق انسان‌ساخت، نیروهای محرک اصلی در مصرف منابع آب هستند. بنابراین با افزایش تدریجی تقاضای آب زیرساخت‌های شهری و فضای سبز، سیاستگذاران باید برنامه‌هایی برای افزایش مشارکت محلی با هدف صرفه‌جویی، بازجانمایی فعالیت‌ها و همچنین بررسی روش‌های بازیافت و بازچرخانی در صنعت اتخاذ کنند. نتایج این پژوهش با یافته‌های Schirpke و

جدول ۲- نتایج مدل تولید آب سطحی (Water Yield) سال ۱۳۹۵

نام زیرحوضه	میانگین بارش در سال (میلی متر در پیکسل)	تبخیر و تعرق واقعی (میلی متر در پیکسل)	حجم تولید آب در هر زیرحوضه (مترمکعب)	حجم تقاضای آب در هر زیرحوضه (مترمکعب)	حجم جریان آب در هر زیرحوضه (مترمکعب)
خلیج گرگان	۴۳۵/۷۱۹۳۸۴۱	۴۱۷/۴۶۰۵۴۲۵	۵۱۴۲۵۰۱۹/۱۳	۶۶۸۰۱۸۲۷۲	-۶۱۶۵۹۳۲۵۲/۹
پایاب نکا	۴۷۴/۹۸۶۱۸۰۳	۴۶۲/۲۹۱۹۷۶۵	۴۵۶۷۴۵۳/۴۳۳	۵۰۶۸۱۹۴۸۸	-۵۰۲۲۵۲۰۳۴/۶
پایاب بابلرود	۵۹۲/۰۹۸۳۵۹۳	۴۹۶/۸۰۹۲۹۵۹	۱۷۹۶۹۸۵۹/۵۲	۲۸۳۲۵۱۰۰۸	-۲۶۵۲۸۱۱۴۸/۵
سراب نکا	۲۵۶/۶۹۹۱۸۵۸	۲۵۶/۳۱۴۸۷۴۸	۳۹۸۱۶۳/۴۲۹۶	۱۱۹۰۴۳۷۵	-۱۱۵۰۶۲۱۱/۵۷
داراب کلا	۴۹۳/۳۷۱۹۷۹۴	۴۸۱/۷۸۲۰۷۶۷	۴۱۰۶۸۶۰/۹۳۵	۲۹۴۵۴۳۱۳۶	-۲۹۰۴۳۶۲۷۵/۱
نکا میانی	۴۵۹/۶۹۲۰۹۴۷	۴۵۶/۷۹۴۸۴۹۷	۲۵۱۷۷۴۲/۹۷۸	۵۱۹۴۴۶۲۷۲	-۵۱۶۹۲۸۵۲۹
سیاهرود	۵۷۸/۴۰۵۴۳۱۶	۵۳۹/۲۲۹۳۲۱۴	۱۷۶۶۲۶۶۹/۴۷	۷۶۰۷۰۵۲۷۴	-۷۴۳۰۴۲۶۰۴/۵
پایاب هراز	۶۱۸/۵۷۷۰۵۲۱	۵۰۳/۵۶۵۷۹۲	۶۹۰۲۲۲۵۳/۹۵	۳۴۰۹۸۴۸۶۴	-۲۷۱۹۶۲۶۱۰
ظالم رود	۴۰۲/۱۷۵۳۷۳۶	۴۰۰/۲۱۹۱۱۱	۱۷۶۰۶۴۱/۵۶۵	۱۰۳۱۷۱۲۴۴	-۱۰۱۴۱۰۶۰۲/۴
پایاب تجن	۵۱۷/۸۹۷۹۳۶۶	۵۰۲/۳۱۰۱۷۱	۹۶۷۴۸۱۹/۵۵	۳۳۰۵۴۷۶۱۶	-۳۲۰۸۷۲۷۹۶/۵
پایاب تالار	۶۱۱/۳۷۲۴۶۱۳	۵۵۲/۸۷۶۹۸۰۸	۴۳۶۷۶۴۶۳/۲۶	۹۶۷۷۳۶۱۵۲	-۹۲۴۰۵۹۶۸۸/۷
گرمرود	۶۳۳/۷۷۶۸۰۹۷	۵۹۰/۴۷۴۵۷۷۳	۱۹۱۴۵۶۳۰/۸۴	۸۸۵۴۰۵۰۴	-۶۹۳۹۶۸۷۳/۱۶
تجن میانی	۵۳۵/۳۹۷۹۶۳۴	۵۲۹/۷۶۴۷۳۰۶	۲۰۴۰۵۳۵/۳۵۸	۲۰۱۹۹۶۲۵	-۱۸۱۵۹۰۸۹/۶۴
چهاردانگه	۳۴۱/۴۴۵۶۳۲۶	۳۴۰/۴۳۰۶۱۷	۱۲۲۳۴۴۸/۳۸۳	۵۱۵۹۸۵۰۰	-۵۰۳۷۵۰۵۱/۶۲
هراز میانی	۵۰۰/۵۷۳۳۹۹۵	۴۸۹/۷۷۳۰۶۶۳	۴۶۶۴۰۸۹/۳۵	۵۰۴۵۱۲۵	-۳۸۱۰۳۵/۶۴۹۶
سراب بابلرود	۶۰۲/۷۲۴۳۷۶	۵۸۹/۶۵۱۸۳۴۴	۵۶۹۶۳۹۱/۰۷	.	۵۶۹۶۳۹۱/۰۷
نور	۲۷۸/۹۸۶۶۵۴۱	۲۷۷/۰۱۴۷۲۰۴	۳۴۶۸۰۶۵/۹۵۷	۱۷۹۵۰۰۰	۱۶۷۳۰۶۵/۹۵۷
بابلرود میانی	۶۳۰/۷۴۱۲۲۳۷	۵۹۷/۲۴۳۸۱۵۹	۳۵۷۳۰۱۲۳/۷۴	۳۳۶۰۵۲۷۵۲	-۲۹۰۳۲۲۶۲۸/۳
کسیلیان	۵۵۱/۷۸۶۰۶۵۱	۵۴۶/۴۷۸۳۰۶۳	۱۸۲۶۰۶۱/۴۹۸	۳۵۹۰۰۰	۱۴۶۷۰۶۱/۴۹۸
سراب تجن	۳۳۲/۱۷۴۵۷۱۳	۳۳۰/۵۷۹۲۳۲۳	۱۵۹۱۵۷۶/۰۰۲	۷۲۸۰۳۲۴۸	-۷۱۲۱۱۶۷۲
لار	۲۶۶/۴۲۹۸۷۲۶	۲۶۶/۲۸۳۷۸۵۱	۳۰۱۷۳۵۱/۵۸۹	.	۳۰۱۷۳۵۱/۵۸۹
هراز بالایی	۲۶۶/۰۹۳۹۵۹۷	۲۶۵/۵۳۴۳۶۵۹	۳۰۸۸۶۱۸/۶۲۱	۲۸۱۳۰۰۰	۲۷۵۶۱۸/۶۲۰۷
سراب تالار	۳۹۶/۳۸۷۲۰۰۹	۳۸۱/۹۱۹۳۴۳۶	۲۵۳۵۳۵۷۷/۷	۲۵۰۴۴۰۰۰	۳۰۹۵۷۷/۷۰۴۶

برنامه ریزان و سیاستگذاران در چیدمان آمایشی کاربری‌ها به این مهم توجه کنند و استفاده پایدار چندجانبه از مراتع غنی در زیرحوضه‌های با عرضه بیشتر مانند لار و نور را در دستور کار قرار دهند و تعادل تقاضا با عرضه خدمت تولیدی آب را در پیش گیرند.

## References

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.

جمعیت نیازمندان تا با توزیع منابع آب در دسترس همخوانی پیدا کنند. در پژوهش حاضر با مدل‌سازی مکانی عرضه و تقاضای خدمت تولیدی آب در سطح حوضه و زیرحوضه‌ها، الگویی برای برنامه‌ریزی آمایشی در همه زیرحوضه‌ها با هدف دستیابی به تعادل و توازن منطقه‌ای معرفی شد. پیشنهاد می‌شود

Asadolahi, Z., Salmanmahiny, A., Mirkarimi, H., 2015. Modeling the supply of sediment retention ecosystem service (case study: eastern part of Gorgan-rud watershed). Environmental Erosion Research Journal 5(3), pp.61-75. (In Persian)

- Azimi, M., Heshmati, G.A., Farahpour, M., Faramarzi, M., Abbaspour, K.C., 2013. Modeling the impact of rangeland management on forage production of sagebrush species in arid and semi-arid regions of Iran. *Ecological modelling* 250, 1-14.
- Barzeali, M., Sadatazimi, M., Lotfi, E., 2017. Evaluation of rangeland ecosystem services from the perspective of water production and soil maintenance using InVEST software (Atrak watershed - Golestan province). Msc Thesis, Faculty of Range and Watershed Management, University of Gorgan. (In Persian)
- Brauman, K.A., Daily, G.C., Duarte, T.K.E., Mooney, H.A., 2007. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources* 32, 67-98.
- Budyko, M.I., 1961. The heat balance of the earth's surface. *Soviet Geography* 2(4), 3-13.
- Budyko, M.I., 1974. *Climate and Life* (New York: Academic). *Europe-wide Reduction in Primary Productivity Caused by the Heat and Drought*. 437, 529-533.
- Canadell, J., Jackson, R.B., Ehleringer, J.B., Mooney, H.A., Sala, O.E., Schulze, E.D., 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108(4), 583-595.
- Canqiang, Z., Wenhua, L., Biao, Z., Moucheng, L., 2012. Water yield of Xitiaoxi river basin based on InVEST modeling. *Journal of Resources and Ecology* 3(1), 50-54.
- Chen, X., Li, F., Li, X., Hu, Y., Hu, P., 2020. Evaluating and mapping water supply and demand for sustainable urban ecosystem management in Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production* 251, 119754.
- Dominati, E., Patterson, M., Mackay, A., 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics* 69(9), 1858-1868.
- Donohue, R.J., Roderick, M.L. and McVicar, T.R., 2012. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology* 436, 35-50.
- FAO. 2014. (<http://data.fao.org/measure?entryId%4afb484eb-3a92-4b22-b657a4c575ae52b1&tab%4metadata>) (25/08/14)
- Fu, B.P., 1981. On the calculation of the evaporation from land surface *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* 5(1), 23-31.
- Gleick, P.H., Palaniappan, M., 2010. Peak water limits to freshwater withdrawal and use. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(25), 11155-11162.
- Haghdadi, M., Heshmati, GH. And Azimi, M., 2018. Assessment of Water yield service on the basis of InVEST tool (case study: Delichai watershed). *Journal of Water and Soil Conservation* 25(4), 275-290. (In Persian)
- Jafarzadeh, A.A., Mahdavi, A., FallahShamsi, R., Yousefpour, R., 2019. Annual Water Yield Estimation for Different Land Uses by GIS-Based InVEST Model (Case Study: Mish-khas Catchment, Ilam Province, Iran). *Journal of Rangeland Science* 9(1), 1-12.
- Kadkhodahosseini, M., Shamohammadi, S., Nozari, H., Mirabbasi, R., 2016. Evaluate the Performance of SVR and GEP Models in Predicting the Monthly Fluctuations in Water Level of Urmia Lake. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 10(2), 199-207. (In Persian)
- Khosravi Mashizi, A., 2016. Ecosystem services as a new criterion to assess ecosystem capability and land use planning. *The Second National Conference on New Approaches to Spatical Planning in Iran*, 30/01/2016, Shahrood, Iran, pp: 228-240. (In Persian)
- Kumasizadeh, Z., Faridhoseini, A., Davari, K., Alizadeh, A., Salvitabar, A., 2013. Sustainable development and environment of Atrak catchment area. *The Second National Conference on Planning and Environmental Protection*, 15/8/2013, Hamedan, Iran, pp: 309-318. (In Persian)

- Liang, L., Liu, Q., 2014. Streamflow sensitivity analysis to climate change for a large water-limited basin. *Hydrological Processes* 28(4), 1767-1774.
- Malinga, R., Gordon, L.J., Jewitt, G., Lindborg, R., 2015. Mapping ecosystem services across scales and continents—A review. *Ecosystem Services* 13, 57-63.
- Mokhtarpour, A., Edrisi, E., 2019. National Conference on the Perspective of Caspian Sea to Desert Areas, 23/12/2019, Rasht, Iran, pp: 56-62. (In Persian)
- Murphy, S.R., 2010. Tropical perennial grasses—root depths, growth and water use efficiency. NSW Department of Primary Industries, Primefacts 1027.
- Nippert, J.B., Holdo, R.M., 2015. Challenging the maximum rooting depth paradigm in grasslands and savannas. *Functional Ecology* 29(6), 739-745.
- Pessacq, N., Flaherty, S., Brandizi, L., Solman, S. Pascual, M., 2015. Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data. *Science of the Total Environment* 537, 225-234.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F., Lambin, E., Lenton, T., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., De Wit, C., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sorlin, S., Snyder, P., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R., Fabry, V., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J., 2009. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Nature* 461(7263), pp. 472-475.
- Sabater, S. and Barceló, D. (eds.) 2010. Water scarcity in the Mediterranean: Perspectives under global change (Vol. 8). Springer Science & Business Media.
- Sahle, M., Saito, O., Fürst, C., Yeshitela, K., 2019. Quantifying and mapping of water-related ecosystem services for enhancing the security of the food-water-energy nexus in tropical data-sparse catchment. *Science of the Total Environment* 646, 573-586.
- Schirpke, U., Candiago, S., Vigl, L.E., Jäger, H., Labadini, A., Marsoner, T., Meisch, C., Tasser, E., Tappeiner, U., 2019. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. *Science of the Total Environment* 651, 928-941.
- Scordo, F., Lavender, T.M., Seitz, C., Perillo, V.L., Rusak, J.A., Piccolo, M., Perillo, G.M., 2018. Modeling water yield: assessing the role of site and region-specific attributes in determining model performance of the InVEST seasonal water yield model. *Water* 10(11), 1496.
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., 2014. InVEST user's guide. The Natural Capital Project, Stanford 161.
- Van Loon, A.F., Van Lanen, H.A., 2012. A process-based typology of hydrological drought. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(7), 1915-1946.
- Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P.A., McGlynn, B.L., Harman, C.J., Gupta, H.V., Kumar, P., Rao, P.S.C., Basu, N.B., Wilson, J.S., 2010. The future of hydrology: An evolving science for a changing world. *Water Resources Research* 46(5).
- Walter, I.A., Allen, R.G., Elliott, R., Jensen, M.E., Itenfisu, D., Mecham, B., Howell, T.A., Snyder, R., Brown, P., Echings, S., Spofford, T., 2000. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. In *Watershed Management and Operations Management 2000*. pp: 1-11.
- Wolff, S., Schulp, C.J.E., Verburg, P.H., 2015. Mapping ecosystem services demand: A review of current research and future perspectives. *Ecological Indicators* 55, 159-171.
- Xu, X., Liu, W., Scanlon, B.R., Zhang, L., Pan, M., 2013. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework. *Geophysical Research Letters* 40(23), 6123-6129.

Yang, D., Liu, W., Tang, L., Chen, L., Li, X., Xu, X., 2019. Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model. *Landscape and Urban Planning* 182: 133-143.

Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37(3), 701-708.