

## نقش خدمت اکوسیستمی تولید آب در تأمین منابع آب حسابداری WA+ (مطالعه موردی: حوضه آبخیز دریاچه ارومیه)

فاطمه نیکوی<sup>۱</sup>، شراره پور ابراهیم<sup>۲\*</sup>، بهمن جباریان امیری<sup>۲</sup>، داودرضا عرب<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی دکتری تخصصی آمایش محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

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

۳. دانش آموخته دکتری مهندسی آب، مؤسسه پژوهشی- مهندسی راهبرد دانش پویا، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۷/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۱۰/۱۱)

### چکیده

یکی از خدمات مهم اکوسیستم‌ها، خدمت تولید آب است. خدمت تولید آب به طور مستقیم بر توسعه پایدار سیستم‌های اقتصادی-اجتماعی تأثیر می‌گذارد. هدف از انجام مطالعه حاضر، بررسی نقش خدمت اکوسیستمی تولید آب در حوضه دریاچه ارومیه در برآورد چارچوب حسابداری آب پلاس (WA+) است. در گام نخست، کاربرگ منابع آب از چارچوب WA+ برای منطقه مطالعاتی با استفاده از داده‌های هیدرولوژی و تصاویر ماهواره‌ای در سال ۲۰۱۵ محاسبه شد. در گام بعدی، به منظور کمی‌سازی خدمت تولید آب در همان سال از مدل Water Yield در نرم‌افزار InVEST استفاده شد. داده‌های ورودی این مدل شامل کاربری/پوشش سرزمین، بارش، تبخیر و تعرق، عمق محدودکننده خاک برای ریشه گیاه، میزان آب در دسترس گیاه، لایه زیرحوضه‌ها و جدول اطلاعات بیوفیزیکی می‌شود. سپس، اجرای مدل در نرم‌افزار InVEST نسخه ۳,۵,۰ میزان تولید آب در سطح حوضه و زیرحوضه به دست آمد. نتایج WA+ و InVEST نشان دادند میزان کل ورودی آب در حوضه دریاچه ارومیه در حسابداری WA+ در سال ۲۰۱۵ برابر با ۱۶/۴ میلیارد متر مکعب است که از این میزان ۷ میلیارد متر مکعب آن سهم خدمت اکوسیستمی تولید آب در این حوضه بوده است. بنابراین، اکوسیستم با تولید بیش از ۴۰ درصد از حجم ورودی‌های آب در حوضه کارکرد زیادی در تأمین منابع آب آن دارد. از این رو، دانستن کمی سهم اکوسیستم‌ها در یک حوضه می‌تواند به برنامه‌ریزی بهتر در زمینه مدیریت منابع آبی و نیز حفظ ارزش‌های اکوسیستم بینجامد. از نتایج مدل Water Yield و کاربرگ منابع آب WA+ می‌توان در مدیریت جامع منابع آبی و برنامه‌ریزی برای تخصیص عادلانه آب بهره برد.

**کلیدواژگان:** چارچوب حسابداری WA+, خدمات آبخیز، فراهم‌آوری آب، نرم‌افزار InVEST.

## مقدمه

یکی از روش‌های مدیریت منابع آبی در جهان، حسابداری آب است. فائو حسابداری آب را به صورت جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و ارتباط سیستماتیک اطلاعات مربوط به ذخایر و جریان‌های آب در محیط‌های طبیعی، غیر طبیعی و مدیریت شده توصیف می‌کند [۱]. حسابداری آب یکی از روش‌های کاربردی مدیریت منابع آبی است که رشته‌های هیدرولوژی، مدیریت آب و محیط زیست، تخصیص آب، گزارش‌دهی و ارتباطات را با یکدیگر تجمیع می‌کند [۲]. روش حسابداری آب توسط مولدن<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۷ [۳] برای درک بهتر آثار مداخلات در آبیاری در مقیاس حوضه معرفی شد [۴]. هدف این سیستم، مدیریت منابع آب در سطح حوضه، استان و کشور به صورت کارا، منصفانه و سازگار با محیط زیست و به منظور رسیدن به اهداف توسعه پایدار است.

در سال‌های اخیر، چندین سازمان ملی و بین‌المللی چارچوب‌های استاندارد را برای حسابداری آب توسعه داده‌اند. چارچوب حسابداری آب پلاس<sup>۲</sup> (WA+) به دلیل سادگی و مهم‌تر از آن، توانایی در محاسبه برخی داده‌های مورد نیاز خود از تصاویر ماهواره‌ای برای مطالعه حاضر انتخاب شده است. این چارچوب نخستین بار توسط کریمی (۲۰۱۲) تحت پوشش رساله دکتری در دانشگاه دلفت معرفی شد. فرایند اصلی این چارچوب بر میزان مصرف آب بر اساس کاربری‌های مختلف زمین و آب و مفهوم بیلان آب قرار داده شده است [۵].

در کنار حسابداری WA+ محاسبه خدمات اکوسیستمی نیز در مدیریت بهتر سرزمین و آب کارکرد زیادی دارند. با کمک تلفیق نتایج چارچوب WA+ با خدمات آبی اکوسیستم می‌توان نقش اکوسیستم‌ها را در مدیریت منابع آبی حوضه نشان داد. یکی از خدمات مهم اکوسیستمی تولیدی که نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ اکوسیستم و کارکردهای آن دارد، خدمت تولید آب است. با کمی کردن خدمت تولید آب در یک حوضه می‌توان میزان تولید آب را در کاربری‌های مختلف سرزمین مشخص کرد و از این اطلاعات برای به‌کارگیری تصمیم‌های مدیریتی بهتر در راستای توان منطقه استفاده

کرد. خدمات اکوسیستمی منافعی هستند که انسان‌ها از اکوسیستم‌ها دریافت می‌کنند. نهاد ارزیابی اکوسیستم هزاره<sup>۳</sup> خدمات اکوسیستم را در ۴ دسته عمده تقسیم کرده است: خدمات پشتیبان حیات<sup>۴</sup>، خدمات تولیدی<sup>۵</sup>، خدمات تنظیمی<sup>۶</sup>، خدمات فرهنگی<sup>۷</sup> [۶].

به‌رغم اهمیت خدمات اکوسیستمی حوضه آبخیز در برنامه‌ریزی سرزمین، به‌ندرت از این رویکرد در فرایندهای تصمیم‌گیری به‌ویژه در برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب استفاده می‌شود. مدل‌سازی مکانی خدمات آبخیز به عنوان رویکردی خلاقانه در شناسایی آثار اکوسیستم‌ها و عملکرد آنها بر روند سیاست‌گذاری‌ها شناخته می‌شود. نقشه‌سازی خدمات آبخیز و ارزیابی آنها می‌تواند دیدگاهی ارزشمند برای برنامه‌ریزی سرزمین سیستماتیک و اقدامات حفاظتی فراهم آورد. فایده اصلی نقشه‌سازی خدمات اکوسیستمی، تضمین بلندمدت کارکرد اکوسیستم‌هاست [۷].

ابزار InVest مجموعه‌ای از مدل‌ها با منبع باز است که برای نقشه‌سازی و ارزشیابی خدمات آبخیز به کار می‌رود. InVest از لایه کاربری سرزمین و اطلاعات مدیریت سرزمین به همراه شرایط محیط زیستی به عنوان داده‌های ورودی توابع تولید تولید خدمات اکوسیستمی استفاده کرده و آن را به صورت مکانی پیش‌بینی می‌کند [۸]. به دلیل کارایی زیاد و سادگی مدل تولید آب در نرم‌افزار InVEST از این مدل در مطالعات زیادی استفاده شده است. از جمله کانکیانگ و همکاران (۲۰۱۲) [۹]، سونگ و همکاران (۲۰۱۵) [۱۰]، ردهد و همکاران (۲۰۱۶) [۱۱]، یانگ و همکاران (۲۰۱۹) [۱۲] و باستولا و همکاران (۲۰۱۹) [۱۳] در مطالعات مختلفی به مدل‌سازی خدمت تولید آب با استفاده از نرم‌افزار InVEST پرداختند. در ایران نیز مطالعاتی در این زمینه انجام گرفته است. اسدالهی و همکاران (۱۳۹۵) [۱۴] در حوضه آبخیز گرگانرود؛ احمدی و همکاران (۱۳۹۶) [۱۵] در حوضه آبخیز قره‌سو؛ حق‌دادی و همکاران (۱۳۹۷) [۱۶] در حوضه آبخیز دلیچای و کریمی و همکاران (۱۳۹۸) [۱۷] در

3. Millennium Ecosystem Assessment

4. Supporting Services

5. Provisioning Services

6. Regulating Services

7. Cultural Services

1. Molden

2. Water Accounting Plus

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعه شده

حوضه آبخیز دریاچه ارومیه (شکل ۱) واقع در شمال غرب ایران با مساحت ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع یکی از شش حوضه آبخیز اصلی کشور است. این حوضه ۱۵/۳ درصد از کل مساحت کشور را شامل می‌شود [۲۵]. حوضه دریاچه ارومیه بین استان‌های آذربایجان غربی (۴۶ درصد)، آذربایجان شرقی (۴۳ درصد) و کردستان (۱۱ درصد) قرار دارد. دریاچه ارومیه به‌عنوان بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و از مهم‌ترین و بالارزش‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران و جهان، در این حوضه قرار دارد. اکوسیستم این دریاچه نمونه‌ای شاخص از یک حوضه آبخیز بسته است که تمامی رواناب‌های جاری در رودخانه‌های حوضه در آن تخلیه می‌شود. اکوسیستم فعال در این حوضه شامل دریاچه و حوضه آبخیز آن است. در نتیجه، مرز حوضه آبخیز دریاچه ارومیه، مرز دقیقی را برای مدیریت عوامل مؤثر بر دریاچه و زیستگاه‌های مهم در حوضه به‌وجود آورده است [۲۶].

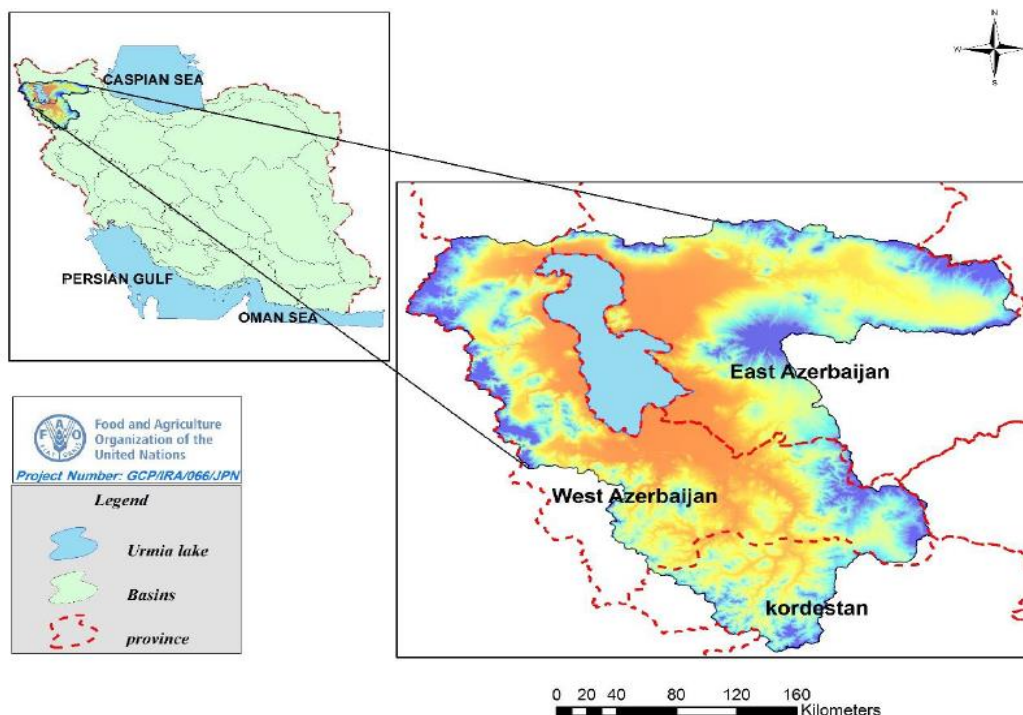
مهم‌ترین منابع تأمین آب دریاچه، بارش مستقیم روی دریاچه و همچنین، منابع آب ورودی به آن از طریق رودخانه‌های حوضه آبخیز است. این حوضه ۱۷ رودخانه دائمی و ۱۲ رودخانه فصلی دارد. مهم‌ترین رودهای این حوضه، آجی‌چای، زرینه‌رود و سیمینه‌رود هستند. بر اساس آمار آبدی رودخانه‌های منتهی به دریاچه ارومیه، سهم رودخانه‌های ورودی از جنوب دریاچه در تأمین آب مورد نیاز آن، ۶۵ درصد و سهم رودخانه آجی‌چای نیز ۱۰ درصد است. بنابراین، رودخانه‌های جنوبی به‌ویژه زرینه‌رود سهم درخور توجهی در تأمین آب دریاچه دارد [۲۶].

دبی ورودی رودخانه‌ها در بهار به دلیل ذوب شدن برف‌ها در بالاترین میزان خود است. آب ورودی به دریاچه ارومیه به باران و شرایط اقلیمی حوضه، به‌خصوص بارش، دما و رطوبت وابسته است [۲۷].

حوضه رودخانه کرج با استفاده از مدل تولید آب در نرم‌افزار InVest خدمت آبخیز تولید آب را کمی کردند. کریمی (۲۰۱۲) برای نخستین بار به معرفی WA+ در حوضه آبریز ایندوس<sup>۱</sup> در کشور هند پرداخت [۵]. در سال‌های بعد، مطالعاتی با کمک این چارچوب در حوضه‌های مختلف انجام شد، از جمله داست و همکاران (۲۰۱۳) در حوضه رودخانه آواش<sup>۲</sup> کشور اتیوپی [۱۸]، باستیانس و همکاران (۲۰۱۴) در حوضه نیل در مصر [۱۹]، باستیانس و همکاران (۲۰۱۵) در حوضه رود کا<sup>۳</sup> در ویتنام [۲۰]، پیسر و همکاران (۲۰۱۵) در حوضه رود هلمند<sup>۴</sup> در افغانستان [۲۱]، دین و همکاران (۲۰۱۶) در حوضه‌های نیجر و مکرو در غرب آفریقا [۲۲]، ترن و همکاران (۲۰۱۹) در حوضه لیتانی [۲۳] و فائو و دلفت (۲۰۲۰) در حوضه رودخانه اردن [۲۴] از چارچوب WA+ استفاده کردند. در ایران دلاور و همکاران (۲۰۲۰) مطالعه‌ای با عنوان «حسابداری آب در مقیاس حوضه با استفاده از مدل ابزار ارزیابی آب و خاک SWAT و WA+» را به منظور سیاست‌گذاری بهتر انجام دادند [۱].

جدی‌ترین مطالعه انجام‌شده در زمینه چارچوب WA+ در ایران، پروژه همکاری مشترک فائو و ستاد احیای دریاچه ارومیه به منظور مدیریت جامع و پایدار منابع آب در حوضه دریاچه ارومیه است که در حال اجراست. با استفاده از چارچوب WA+ در حسابداری منابع آب و ارزیابی خروجی‌های مدل در InVest، می‌توان اطلاعات مفیدی را در اختیار مدیران و تصمیم‌گیران سرزمین قرار داد تا مدیریت به‌هم‌پیوسته منابع آبی در سطح حوضه محقق شده و امکان تعادل بین عرضه و تقاضای منابع آب فراهم شود. این موضوع بر تأثیرات تصمیم‌ها و اقدامات انجام‌شده بر تولید و ارزش خدمات اکوسیستمی نیز قابل مشاهده است. هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی نقش خدمت اکوسیستمی تولید آب در تأمین منابع پایه آب در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از کاربرگ منابع پایه آب چارچوب WA+ است.

1. Indus  
2. Awash  
3. Ca  
4. Helmand



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه دریاچه ارومیه در کشور ایران [۲۷]

که در آن  $\Delta S_f^{SW}$  تغییر ذخایر آبهای سطحی،  $\Delta S_f^{GW}$  تغییر ذخایر آبهای زیرزمینی،  $\Delta S_f^{SM}$  ذوب برف و یخچال، و  $\Delta S_p$  تغییر ذخایر آبهای آلوده هستند.

چارچوب WA+ در ابتدای معرفی در سال ۲۰۱۲ توسط کریمی، دارای چهار کاربرد حسابداری شامل کاربرد منابع پایه آب<sup>۱</sup>، کاربرد تبخیر و تعرق<sup>۲</sup>، کاربرد تولیدکنندگی<sup>۳</sup> و کاربرد برداشت<sup>۴</sup> [۵] بود. کاربرد پایه منابع آب، اطلاعاتی را در زمینه حجم آب موجود در حوضه، منابع تأمین آب و فرایندهای مصرف آب در اختیار قرار می‌دهد. به طور خلاصه، این کاربرد چرخه اتمسفری آب را در حوضه کمی می‌کند. جدول ۱ داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز کاربرد منابع پایه آب در چارچوب WA+ را نشان می‌دهد. اجرای WA+ شامل ۳ گام اساسی می‌شود. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌کنید، مراحل اجرای WA+ شامل:

- (۱) جمع‌آوری، تولید و تهیه داده‌های ورودی؛
- (۲) اجرای مدل WaterPix؛
- (۳) تولید کاربرد های WA+ می‌شود [۲۷].

#### چارچوب WA+

مفهوم بیلان آب که اساس روش WA+ محسوب می‌شود، به این صورت است که جریان خروجی در یک حوضه آبخیز به دو بخش جریان خالص آب و مصرف آب در فرایندهای تبخیر-تعرق تقسیم می‌شود. در این روش نیازی به محاسبه برداشت و جریان برگشتی نیست و مقدار مصرف از داده‌های ماهواره‌ای اندازه‌گیری می‌شود [۲۸]. داده‌های مکانی ET، اطلاعات شفاف از مصرف آب در هر طبقه کاربری سرزمین ارائه می‌کند.

بیلان کلی آب در یک حوضه و در یک زمان معین می‌تواند این‌گونه باشد (رابطه ۱) [۵]:

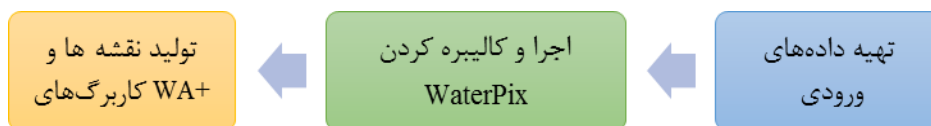
$$P + (Q_{in}^{SW} + Q_{in}^{GW}) - ET - (Q_{out}^{SW} + Q_{out}^{GW}) + \Delta S = 0 \quad (1)$$

در این معادله P بارش،  $(Q_{in}^{SW} + Q_{in}^{GW})$  جریان ورودی به آبهای سطحی و زیرزمینی به حوضه است،  $(Q_{out}^{SW} + Q_{out}^{GW})$  جریان خروجی آبهای سطحی و زیرزمینی و  $\Delta S$  تغییر ذخایر است.

تغییر ذخایر نیز به این صورت است (رابطه ۲):

$$\Delta S = \Delta S_f^{SW} + \Delta S_f^{GW} + \Delta S_f^{SM} + \Delta S_p \quad (2)$$

1. Resource Base Sheet
2. Evapotranspiration Sheet
3. Productivity Sheet
4. Withdrawal Sheet



شکل ۲. مراحل اصلی اجرای چارچوب WA+ [۲۷]

پردازش‌های مورد نیاز برای چارچوب WA+ داشتند که در محیط Python 2.7 و QGIS انجام شد. دستورهای پایتون از سایت Github تهیه شدند. با استفاده از ابزار Water Accounting Tools موجود چارچوب wa+ با استفاده از داده‌های ورودی و مدل WaterPix تهیه شدند.

### تهیه و پردازش داده‌های ورودی WA+

برای به دست آوردن داده‌های جمع‌آوری‌شده، اعم از مکانی و غیرمکانی، از منابع مختلفی استفاده شد که در جدول ۱ به آن اشاره شده است. برخی از این داده‌ها نیاز به پردازش‌های مکانی مانند طبقه‌بندی مجدد، و

جدول ۱. داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز کاربرگ منابع پایه آب در چارچوب WA+

متغیر	پارامتر	منبع	قدرت تفکیک مکانی	قدرت تفکیک زمانی
بارش	P	FAO	۱۰۰۰ متر	روزانه
تبخیر و تعرق واقعی	ET <sub>a</sub>	FAO	۳۰ متر	ماهانه
تبخیر مرجع	ET <sub>ref</sub>	FAO	۲۵۰ متر	ماهانه
کاربری/پوشش سرزمین	LULC	FAO	۳۰ متر	ثابت
عمق ریشه		FAO		ثابت
نقشه دیجیتالی ارتفاع	DEM	نقشه DEM ایران	۳۰ متر	ثابت
تولید اولیه ناخالص	NPP	WaPOR	۲۵۰ متر	ماهانه
شاخص سطح برگ	LAI	مودیس ۱۵	۵۰۰ متر	۸ روزه
نسبت رواناب	r	FAO	۲۵۰۰۰ متر	سالانه
دبی رودخانه‌ها		ULRP		سالانه

### مدل تولید آب

تولید آب به معنای مجموع میانگین بلندمدت جریان سالانه رودخانه‌ها و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی به وسیله بارش است [۱۵]. مدل تولید و فراهم‌آوری آب در InVest سهم آب‌ها از بخش‌های مختلف یک سیمای سرزمین را برآورد کرده و نتایج میزان کل تولید آب سالانه را در سطح زیرحوضه تولید می‌کند که بر پایه منحنی Budyko و بارش سالانه میانگین قرار دارد. تولید آب سالانه  $Y(x)$  برای هر پیکسل سیمای سرزمین با رابطه ۳ برآورد می‌شود [۲۹]:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x) \quad (3)$$

در این فرمول  $AET(x)$ ، میزان تبخیر و تعرق سالانه پیکسل  $x$  و  $P(x)$ ، میزان بارش سالانه پیکسل  $x$  است.

برای کاربری‌های سرزمین دارای پوشش گیاهی، سهم تبخیر و تعرق تعادل آب  $\frac{AET(x)}{P(x)}$ ، بر پایه منحنی Budyko که توسط فو (۱۹۸۱) [۳۰] و ژانگ و همکاران (۲۰۰۴)

[۳۱] پیشنهاد شده است، قرار دارد (رابطه ۴):

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^w\right]^{1/w} \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $PET(x)$  بیانگر تبخیر و تعرق بالقوه و  $w(x)$  یک پارامتر غیر فیزیکی است که ویژگی‌های خاک-اقلیمی طبیعی را نشان می‌دهد. تبخیر و تعرق بالقوه  $PET(x)$  با رابطه ۵ تعریف می‌شود [۲۹]:

$$PET(x) = K_c(l_x) \cdot ET_0(x) \quad (5)$$

$ET_0(x)$  تبخیر و تعرق مرجع پیکسل  $x$  و  $K_c(l_x)$  ضریب تبخیر و تعرق گیاه است که با  $l_x$  کاربری/پوشش سرزمین مرتبط است.  $ET_0(x)$  شرایط اقلیم محلی را نشان می‌دهد و بر اساس تبخیر و تعرق گیاه مرجع مانند آلفا که در آن شرایط رشد کرده، تعیین می‌شود.  $K_c(l_x)$  به میزان زیادی به خصوصیات پوشش سرزمین هر پیکسل بستگی دارد [۳۲].  $K_c$  مقدار  $ET_0$  را با نوع پوشش گیاهی یا

با  $N$  (تعداد بارش‌ها در یک سال) مرتبط است.  $1/25$  حداقل مقدار  $w(x)$  و نماینده خاک بایر است که در آن عمق مؤثر ریشه برابر با صفر است [۳۳]. بر اساس مطالعات انجام گرفته، مقادیر  $w(x)$  در نهایت به ۵ می‌رسد. برای دیگر کاربری‌های سرزمین (آب‌های آزاد، شهر، تالاب‌ها) تبخیر و تعرق واقعی  $AET(x)$  به طور مستقیم از تبخیر و تعرق مرجع  $ET_0(x)$  محاسبه می‌شود (رابطه ۸) و حد بالای تعریف شده با بارش دارد [۲۹]:

$$AET(x) = \min(Kc(lx), ET_0(x), P(x)) \quad (8)$$

که در آن  $ET_0(x)$  تبخیر و تعرق مرجع،  $Kc(lx)$  فاکتور تبخیر برای هر کاربری سرزمین است.

#### داده‌های مورد نیاز برای مدل تولید آب

در مطالعه حاضر از مدل Water Yield نرم‌افزار InVest نسخه ۳,۵,۰ استفاده شد. سال ۲۰۱۵ به عنوان سال مطالعه انتخاب شده و تمامی داده‌ها با توجه به سال مطالعه تهیه شدند. داده‌های مورد نیاز به همراه چگونگی تولید آنها به شرح زیر است (جدول ۲):

محصول زراعی در هر پیکسل نقشه کاربری/پوشش سرزمین هماهنگ می‌کند.

$w(x)$  یک پارامتر تجربی است که می‌تواند به صورت تابع خطی  $\frac{AWC \cdot N}{P}$  تعریف شود، که  $N$  تعداد وقایع هر سال، و  $AWC$  محتوای آب در دسترس گیاه است. در مدل  $InVEST$ ،  $w(x)$  از رابطه ۶ محاسبه می‌شود [۲۹]:

$$\omega = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (6)$$

$AWC(x)$  میزان آبی که توسط گیاه در خاک نگهداری و آزاد می‌شود را نشان می‌دهد. بافت خاک و عمق مؤثر ریشه  $AWC(x)$  را تعریف می‌کنند.  $AWC(x)$  به عنوان تولید ظرفیت آب در دسترس گیاه و حداقل عمق محدودکننده ریشه و عمق ریشه گیاه برآورد می‌شود (رابطه ۷) [۲۹]:

$$AWC(x) = \min(Rest.layer.depth, root.depth).PAWC \quad (7)$$

$Z$  یک عدد ثابت تجربی است که به صورت فاکتور فصلی در نظر گرفته می‌شود. این عدد الگوی بارندگی محلی و دیگر خصوصیات هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد.  $Z$

جدول ۲. داده‌های مورد نیاز مدل Water Yield در نرم‌افزار InVest

داده‌های مورد نیاز	فرمت	منبع	توضیحات
کاربری/پوشش سرزمین (شکل ۴)	رستر	FAO	در این لایه به هر پیکسل یک کد اختصاص داده می‌شود که باید با کد کاربری/پوشش سرزمین در جدول بیوفیزیکی (جدول ۱) یکی باشند.
محدوده حوضه (شکل ۴)	وکتور	ULRP	-
زیرحوضه‌ها (شکل ۴)	وکتور	ULRP	-
متوسط بارندگی سالانه (شکل ۴)	رستر	CHIRPS	این لایه باید فاقد مقادیر زیر صفر باشد [۲۹].
ذخیره آب در دسترس برای گیاهان (شکل ۴)	رستر	Soilgrids	با استفاده از اطلاعات درصد رس، سیلت و شن از پایگاه داده‌های جهانی Soilgrids در محیط QGIS لایه بافت خاک تهیه شد. با استفاده از بافت خاک، میزان مواد آلی و شوری، لایه رستری ذخیره آب در دسترس گیاه با نرم‌افزار SPAW و AecGIS به دست آمد.
تبخیر و تعرق متوسط سالانه (شکل ۴)	رستر	FAO	-
عمق محدودکننده ریشه گیاه (شکل ۴)	رستر	FAO	-
فاکتور $Z$	-	-	با استفاده از رابطه ۶ روش [۳۱] به صورت عدد $10/2$ محاسبه شد.
جدول اطلاعات بیوفیزیکی (جدول ۳)	-	-	نشان دهنده ویژگی‌های هر طبقه کاربری سرزمین شامل کد کاربری/پوشش سرزمین، نوع کاربری، حداکثر عمق ریشه برای طبقات کاربری سرزمین دارای پوشش گیاهی به میلی‌متر (طبقاتی که فاقد پوشش گیاهی هستند، باید کمترین مقدار را بگیرند)، و ضریب تبخیر و تعرق گیاهی ( $K_c$ ) برای هر طبقه کاربری سرزمین است [۲۹].

جدول ۳. جدول اطلاعات بیوفیزیکی برای مدل تولید آب

lucode	LULC	LULC_veg	Root_depth (mm)	K <sub>c</sub>
54	Agri fall	1	750	0.8
55	Agri spring	1	750	0.8
45	Fallow	1	570	0.5
27	Bare land	0	0	0
58	Orchard	1	750	0.8
20	Good range	1	230	0.9
26	Salt Lake	0	0	0
63	Reservoirs	1	750	1
30	Wetland	0	0	1.1
72	Urban	0	0	0.4
35	Rainfed	1	570	0.7
14	Mid Range	1	910	0.8
15	Poor range	1	230	0.7
24	Lakes	0	0	1.1

تغییر ذخایر برف و یخچال گزارش شده است. نتایج این کاربرد نشان می‌دهد کاهش ذخایر (ΔS) کمی بیشتر از ۰/۰۱ کیلومتر مکعب بوده است. همچنین، ۲۰ درصد از بارندگی کل به همراه آبی که از ذخایر مصرف می‌شوند، آب قابل بهره‌برداری را تشکیل می‌دهد. در سال ۲۰۱۵، ۳/۱ کیلومتر مکعب آب قابل بهره‌برداری برآورد شده است.

در گام دوم مطالعه، لایه‌های ورودی به نرم‌افزار InVest آماده‌سازی شدند. لایه‌های تهیه‌شده در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند.

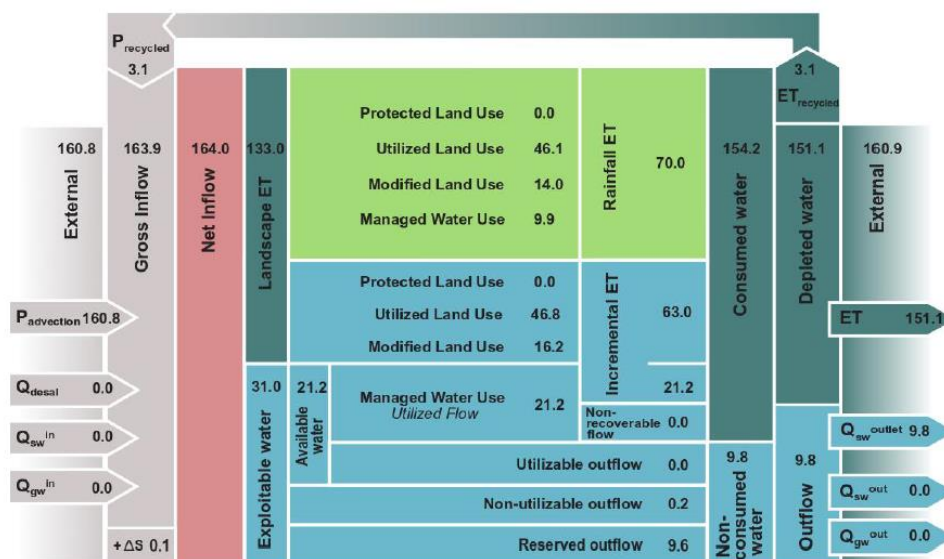
**یافته‌ها**

کاربرگ منابع پایه آب از چارچوب WA+ را در شکل ۳ مشاهده می‌کنید. واحد استفاده‌شده در این کاربرد ۰/۱ کیلومتر مکعب در نظر گرفته شده است.

طبق کاربرد منابع پایه آب در سال ۲۰۱۵ در حوضه دریاچه ارومیه، میزان کل ورودی آب (Net Inflow) به حوضه تقریباً برابر با ۱۶/۴ کیلومتر مکعب در سال (به بیانی دیگر، معادل ۱۶/۴ میلیارد متر مکعب در سال) برآورد شده است. از این میزان ۱۶ میلیارد متر مکعب آن، سهم بارندگی و بقیه، سهم جریان بازیافت‌شده و

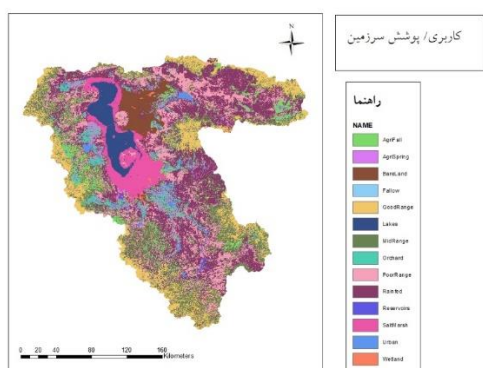
Sheet 1: Resource Base

Basin : Urmia  
Period: Oct 2014- Sep 2015  
Unit : 0.1 km<sup>3</sup>/year

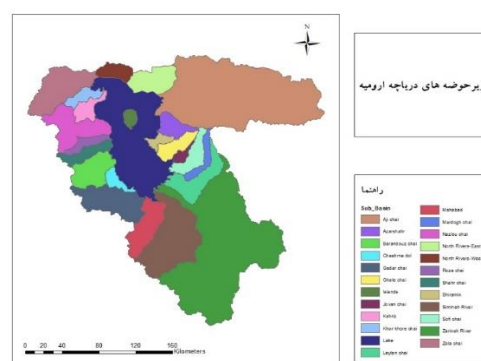


شکل ۳. کاربرد منابع پایه آب WA+

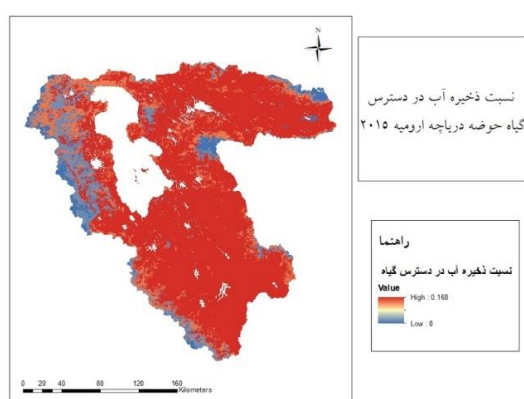




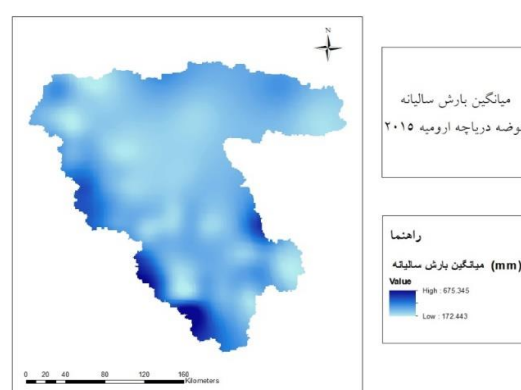
کاربری / پوشش سرزمین در سال ۲۰۱۵



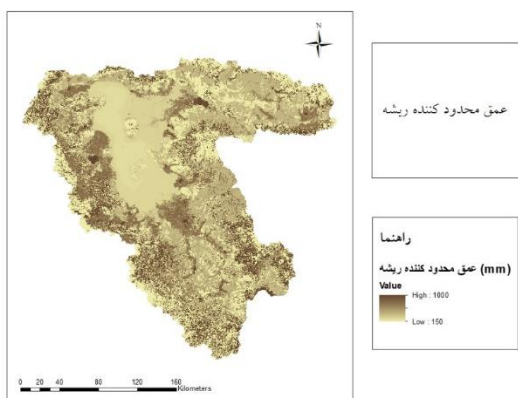
زیرحوضه های دریاچه ارومیه



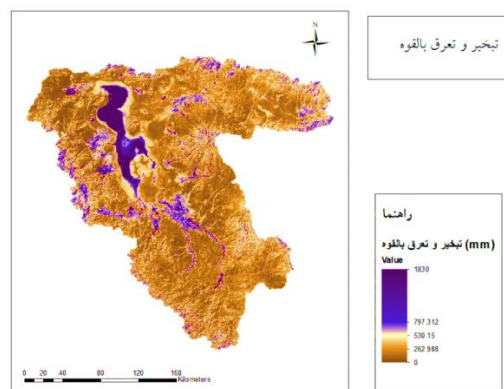
نسبت ذخیره آب در دسترس گیاه سال ۲۰۱۵



میانگین بارش سالیانه (mm) سال ۲۰۱۵



عمق محدودکننده ریشه حوضه دریاچه ارومیه سال ۲۰۱۵



تبخیر و تعرق بالقوه (mm) حوضه دریاچه ارومیه ۲۰۱۵

شکل ۴. لایه های ورودی تهیه شده به عنوان ورودی نرم افزار InVest

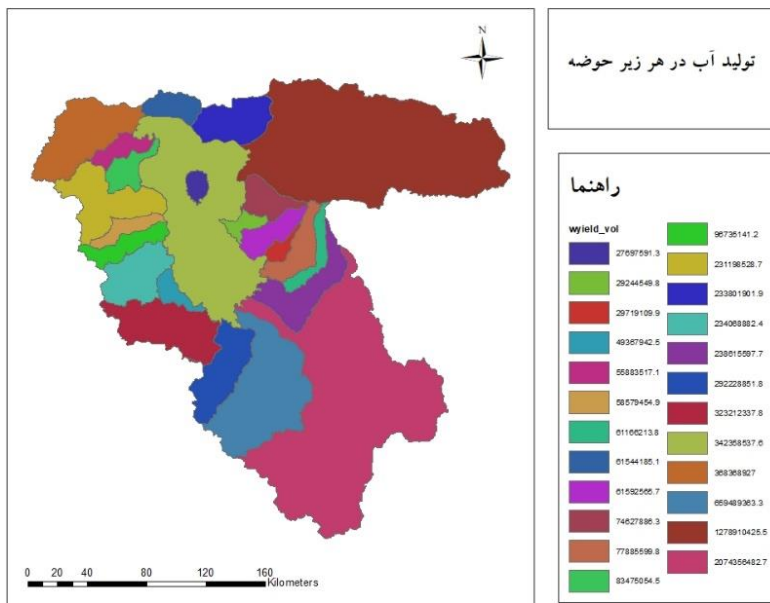
نشان می دهند. شکل ۵ تولید آب را در سطح زیرحوضه ها و شکل ۶ در کل سطح حوضه آبخیز نشان می دهد. در سطح حوضه، میزان تولید آب توسط اکوسیستم حدود ۷ میلیارد متر مکعب در سال ۲۰۱۵ برآورد شده است.

همچنین، نتایج مدل Water Yield در نرم افزار InVest به شکل لایه های وکتوری تولید آب در سطح حوضه و زیرحوضه، جدول های اطلاعاتی و نقشه های رستری تولید آب ارائه می شوند. جدول ۴ میزان آب تولیدی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۵ را

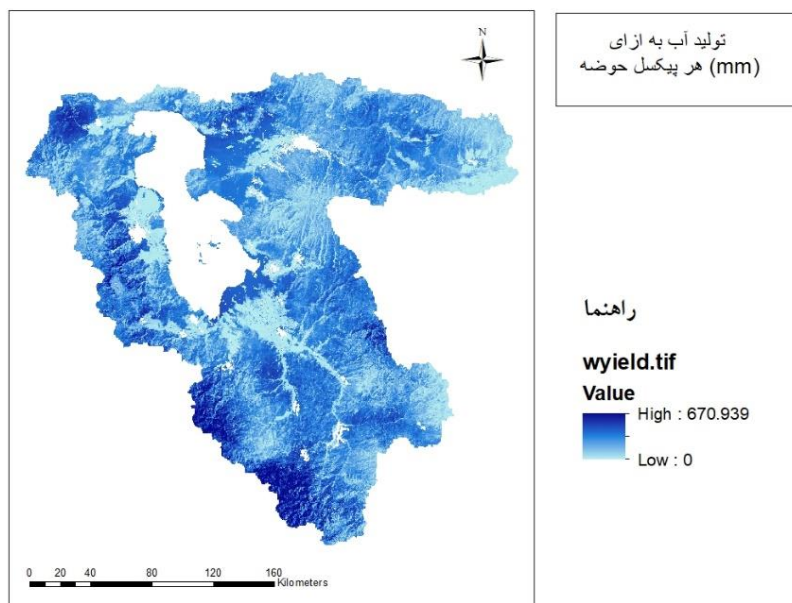


جدول ۴. اطلاعات به دست آمده از مدل تولید آب InVest در حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۵

نام حوضه	میانگین تبخیر و تعرق بالقوه در هر پیکسل (mm)	میانگین تبخیر و تعرق واقعی در هر پیکسل (mm)	میانگین تولید آب در هر پیکسل (mm)	حجم آب تولیدی در حوضه (m <sup>3</sup> )
دریاچه ارومیه	۲۶۶,۲۹	۱۳۳,۱۲	۱۳۶,۰۸	۷۰۴۴۱۸۶۶۳۶,۹۷



شکل ۵. حجم آب تولیدی (m<sup>3</sup>) در زیر حوضه های دریاچه ارومیه



شکل ۶. تولید آب به ازای هر پیکسل در حوضه دریاچه ارومیه

### بحث و نتیجه‌گیری

کاربرگ منابع پایه آب با استفاده از چارچوب حسابداری آب WA+ در حوضه دریاچه ارومیه برای سال ۲۰۱۵، مطابق شکل ۳ محاسبه شد. این کاربرگ اطلاعات فراوانی را در زمینه چرخه اتمسفری آب در حوضه مطالعه‌شده در اختیار ما قرار می‌دهد. به طور مثال، اطلاعات حاصل از این کاربرگ نشان می‌دهد از کل بارندگی در حوضه حدود ۸۰ درصد آن (۱۳/۳ میلیارد متر مکعب) به تبخیر و تعرق سیمای سرزمین تبدیل می‌شود که نشان می‌دهد کل تبخیر و تعرق از طریق فرایندهای طبیعی اتفاق می‌افتد؛ به این معنا که میزان آبی که به حوضه اختصاص داده می‌شود، به طور خطی با بارندگی کل در ارتباط است. دیگر اطلاعات قابل استخراج از این کاربرگ، شامل آب قابل بهره‌برداری (آب در دسترس حوضه، آب مصرف‌شده، آب قابل استفاده، آب غیر قابل استفاده، حقابه‌های محیط‌زیستی می‌شود)، آب غیر مصرفی، جریان خروجی از حوضه و کل آب مصرف‌شده در حوضه می‌شود. هریک از این اطلاعات در مدیریت منابع آبی در سطح حوضه کاربرد دارند و می‌توانند به مدیران آب در برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر منابع آبی در سطح حوضه کمک شایانی کنند.

مدل تولید آب InVest حجم تولید آب توسط اکوسیستم را در حوضه دریاچه ارومیه با مساحت تقریبی ۵۲ هزار کیلومتر مربع در حدود ۷ میلیارد متر مکعب در سال برآورد کرد. این میزان با توجه به نتایج ۴۲ میلیون مکعب در سال در حوضه آبخیز دلیچای با مساحت ۳۴۰ کیلومتر مربع [۱۶] معنادار است. نتایج نشان می‌دهند میزان تولید آب در زیرحوضه‌های مختلف با یکدیگر متفاوت هستند که وابسته به نوع پوشش/کاربری‌ها در هر زیرحوضه و نیز ویژگی‌های هیدرولوژیکی آنهاست. زیرحوضه زرینه‌رود با تولید بیش از تقریباً ۲ میلیارد متر مکعب در سال ۲۰۱۵ بیشترین سهم را در تولید آب در حوضه دارا بوده است. طبق گزارش ستاد احیای دریاچه ارومیه [۲۶] زرینه‌رود بیشترین سهم را در تأمین حقابه دریاچه ارومیه در بین سایر رودهای حوضه دارد.

دلاور و همکاران (۲۰۲۰) [۱] نیز سعی در برقراری پیوند بین WA+ و مدل SWAT به منظور ارزیابی استراتژی‌های مدیریت آب پرداختند. از SWAT برای شبیه‌سازی و ارزیابی تأثیرات رژیم‌های مختلف مدیریت

آب بر کیفیت و کمیت آب استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد مدل تلفیقی WA+ و SWAT توانایی حمایت از برنامه‌ریزی برای آب را از طریق ارائه سیستماتیک وضعیت تأمین و تقاضا برای آب را در گذشته، حال و آینده دارد. مقایسه پژوهش حاضر با پژوهش حاضر نشان داد تلفیق WA+ و InVest نیز می‌تواند با ارائه گزینه‌های مدیریتی جایگزین با هدف حفظ خدمت اکوسیستمی از برنامه‌ریزی برای آب حمایت کند. به دلیل کمبود داده‌های مکانی در زمینه خدمت تولید آب در حوضه مطالعه‌شده، نتایج به‌دست‌آمده از InVest بسیار ارزشمند هستند و می‌توان با آنالیز حجم تولید آب در کاربری‌های مختلف حوضه سهم هر یک از کاربری‌ها را در تأمین آب حوضه بررسی کرد. از مزایای مدل ترکیبی تحقیق حاضر داشتن مقیاس انعطاف‌پذیر و خروجی اکولوژیک و اقتصادی در کنار هم است. مدل Invest، توان ارزیابی خدمات متعدد را دارد [۲۹].

این مطالعه اهمیت خدمت اکوسیستمی آب در تأمین بخش بزرگی از آب تولیدی در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه را نشان داد. مدل ترکیبی WA+ و خدمات آبخیز می‌تواند به طور مستقیم موجودی اکوسیستم را در محاسبات عرضه آب وارد کند و چارچوب WA+ منجر به برآورد پارامترهای هیدرولوژیکی شده است که وضعیت حوضه مطالعه‌شده را از نظر منابع آبی نشان می‌دهند. یکی از این پارامترها میزان کل آب ورودی به حوضه در سال آبی مشخص (در اینجا ۲۰۱۵) است که به‌خوبی توسط WA+ برآورد شده است. میزان تولید آب توسط خدمت تولید آب در این حوضه به طور تقریبی ۴۳ درصد از حجم کل جریان ورودی به حوضه را تشکیل می‌دهد. این موضوع اهمیت توجه به برنامه‌ریزی سرزمین در حفظ شرایط پایدار حوضه از نظر منابع آب را مشخص می‌کند و بر چیدمان صحیح کاربری‌ها و تغییرات سرزمین متناسب با خدمت تولید آب تأکید دارد.

### پیشنهادها

به منظور دسترسی بهتر به داده‌های دقیق‌تر در زمینه منابع آب و بررسی وضعیت آن در حوضه‌های مختلف آبخیز، پیشنهاد می‌شود از چارچوب حسابداری آب WA+ در مطالعات بیشتری استفاده شود. این چارچوب با توانایی

- [4]. Dutta D, Vaze J, Kim S, Hughes J, Yang A, Teng J, et al. Development and Application of a Large Scale River System Model for National Water Accounting in Australia. *Hydrology*. 2017;(457): 124-142.
- [5]. Karimi P, 2012. Water Accounting Plus for Water Resources Reporting and River Basin Planning. Ph.D. Thesis, Technological University of Delft. Pp. 174.
- [6]. Reid WV, Mooney HA, Cropper A, Capistrano D, Carpenter SR, Chopra K, et al. Ecosystems and Human Well-being; A Report of the Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC. 2005.
- [7]. Egoh B, Reyers B, Rouget M, Richardson DM, Le maître DC, Van Jaarsveld AS. Mapping Ecosystem Services for Planning and Mmagement. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 2008; 127(1-2):135-140.
- [8]. Bai Y, Zheng H, Ouyang Zh, Zhuang Ch. Modeling Hydrological Ecosystem Services and Tradeoffs: a Case Study in Baiyangdian Watershed, China. *Environ Earth Sci*. 2012; (33)3.
- [9]. Canqiang Zh, Li Wenhua Li, Zhang Biao Zh, Liu Moucheng Liu. Water Yield of Xitiaoxi River Basin Based on InVEST Modeling. *Resources and Ecology*, 2012; 3(1):50-54.
- [10]. Song Ch, Lee WK, Choi HA, Jeon SW, Kim JU, Kim JS, et al. Application of InVEST Water Yield Model for Assessing Forest Water Provisioning Ecosystem Service. *Korean Association of Geographic Information Studies*. 2015; 18(1):120-134.
- [11]. Redhead JW, Stratford C, Sharps K, Jones L, Ziv G, Clarke D, et al. Empirical Validation of the InVEST Water Yield Ecosystem Service Model at a National Scale. *Science of The Total Environment*. 2016; 569: 1418-1426.
- [12]. Yang D, Liu W, Tang L, Chen L, Li X, Xu X. Estimation of Water Provision Service for Monsoon Catchments of South China: Applicability of the InVEST Model. *Landscape and Urban Planning*. 2019; 182:133-143.
- [13]. Bastola Sh, Seong YJ, Lee SH, Jung Y. Water Yield Estimation of the Bagmati Basin of Nepal Using GIS Based InVEST Model. *Korea Water Resources Association*. 2019; 52(9): 637-645.
- [14]. Asadolahi Z, Salmanmahiny A and Sakieh Y. Hyrcanian Forests Conservation Based on Ecosystem Services Approach, *Environ Earth Sci.*, 2017; (76) :365

محاسبه ورودی‌های مورد نیاز خود از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های سنجش از دور می‌تواند مسئله داده‌های ناکافی در زمینه هیدرولوژی را در کشور ما تا حد زیادی مرتفع سازد. چارچوب WA+ دارای ۸ کاربرد اصلی (منابع پایه، تبخیر و تعرق، خدمات کشاورزی، آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، آب استفاده‌شده، پایداری، خدمات آبی اکوسیستم) است که هر یک برای اهداف مختلف کاربران طراحی شده‌اند. با توجه به فواید زیاد چارچوب WA+، پیشنهاد می‌شود محققان رشته‌های مختلف مطابق با اهداف خود، اقدام به تهیه دیگر کاربرگ‌های آن کنند.

بررسی رابطه بین دیگر خدمات اکوسیستمی با شاخص‌ها و پارامترهای چارچوب WA+ به عنوان یک مطالعه ارزشمند پیشنهاد می‌شود. از آنجا که InVEST توانایی تبدیل ارزش‌های خدمات اکوسیستمی به نقشه‌های مکانی را دارد، از نتایج چنین مطالعاتی در زمینه‌های مختلفی به خصوص مطالعات مرتبط با منابع طبیعی، حفظ محیط زیست و مدیریت و توسعه پایدار آن می‌توان بهره برد.

### تقدیر و تشکر

تحقیق حاضر بخشی از رساله دکتری در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران بوده است که به این‌وسیله از امکانات و شرایط مهیاشده برای انجام این تحقیق در دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران تشکر می‌شود.

### منابع

- [1]. Delavar M, Morid S, Morid R, Farohknia A, Babaeian F, Srinivasan R, et al. Basin-Wide Water Accounting Based on Modified SWAT Model and WA+ Framework for Better Policy Making. *Journal of Hydrology*. 2020; (585): 124762.
- [2]. Karimi P, Bastiaanssen WGM, Sood A, Hoogeveen J, Peiser L, Bastidas-Obando E, et al. spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting –Part 2: Reliability of Water Accounting Results for Policy Decisions in the Awash Basin, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013; (11): 1-44.
- [3]. Molden D. Accounting for Water Use and Productivity, *International Irrigation Management Institute SWIM*. 1997. Paper No. 1, Colombo, Sri Lanka, PP: 26.

- [15]. Ahmadi M, Mahini A, Mohammadzade M, Mirkarimi H. Water Yield Modeling in Ecosystems of Gharahsoo Watershed Based on Land Use and Land Cover Pattern. *Environmental science and Technology*. 2017; (Persian)
- [16]. Haghdaei M, Heshmati gh, Azimi M. Assessment of Water Yield Service on the Basis of InVEST Tool (Case Study: Delichai Watershed). *Water and soil conservation*. 2018; 25(4): 275-290. (Persian)
- [17]. Karimi S. Sustainable Planning for Land Uses in Order to Provide Environmental Water Based on Ecosystem Services (Case Study: Karaj River). PhD Thesis. 2019. University of Tehran. Pp: 110. (Persian)
- [18]. Dost R, Obando EB and Bastiaanssen WGM. Background Report: Water Accounting+ in the Awash River Basin, Awash River Basin Water Audit (ARBWA) Project. 2013. pp: 58.
- [19]. Bastiaanssen WGM, Karimi P, Rebelo LM, Duan Zh, Senay G, Mutuwatte L, et al. Earth Observation Based Assessment of the Water Production and Water Consumption of Nile Basin Agro-Ecosystems. *Remote Sens*. 2017; (6): 10306-10334.
- [20]. Bastiaanssen WGM, Lan Than H, and Fenn M. Water Accounting Plus (WA+) for Reporting Water Resources Conditions and Management: A Case Study in the Ca River Basin, Vietnam. 2015.
- [21]. Peiser L, Bastiaanssen WGM, Hoozeveld J, Khanal P, Sijapati S and Shobair SS. Water Accounting Through Remote Sensing (WA+) in Helmand River Basin, 2015.
- [22]. Deanne Prior A. WA+ as a Technical Tool for Transboundary Water Governance: The Potential of Satellite Data for Water Accounting in Ungauged Basins. Ms.C. Thesis. 2016. pp. 110.
- [23]. FAO and IHE Delft. 2019. Water Accounting in the Litani River Basin – Remote sensing for water productivity. Water accounting series. Rome.
- [24]. FAO and IHE Delft. 2020. Water Accounting in the Jordan River Basin. FAO WaPOR water accounting reports. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9181en>.
- [25]. Fanni Z. Investigation of the Effects of Lake Urmia Drought on the Natural and Human Environmental Vulnerability of the Surrounding Area. *Environment & Cross-sectoral development*. 2018; (2) 58: 1-16. (Persian).
- [26]. Urmia Lake Restoration Program. [www.urlp.ir](http://www.urlp.ir). Viewed in 3 June 2017.
- [27]. Karimi P, Pareeth S, Michailovsky C. Rapid Assessment of the Water Accounts in Urmia Lake Basin. Project Report, 2019. IHE Delft, The Netherland.
- [28]. Anderson MC, Allen RG, Morse A, and Kustas WP, Use of Landsat Thermal Imagery in Monitoring Evapotranspiration and Managing Water Resources. *Remote Sens. Environ.*, 2011; (122): 50–65.
- [29]. Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, Guerry AD, Wood SA, Chaplin-Kramer, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide. The Natural Capital Project. Stanford. 2015.
- [30]. Fu BP. On the Calculation of the Evaporation from Land Surface. *Sci. Atmos. Sin.*, 1981; (5): 23–31.
- [31]. Zhang L, Hickel K, Dawes WR, Chiew FHS, Western AW, Briggs PR. A Rational Function Approach for Estimating Mean Annual Evapotranspiration. *Water Resources Research*. 2004; 40 (2).
- [32]. Allen RG, Pereira LS, Raes D, and Smith M. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 1998.
- [33]. Donohue RJ, Roderick ML, and McVicar TR. Roots, Storms and Soil Pores: Incorporating Key Ecohydrological Processes into Budyko's Hydrological Model, *Journal of Hydrology*. 2012; (436-437): 35-50.