



بررسی تغییرات مکانی - زمانی بهره‌وری آب کشاورزی در حوضه دریاچه ارومیه

ایمان حاجی‌راد^{۱*}، ساناز محمدی^۲، خالد احمدآلی

*۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- دکتری گروه مهندسی و مدیریت آب دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، تهران، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

چکیده

پایش تغییرات بهره‌وری آب محصول ابزاری سودمند در مدیریت منابع آب و خاک است که چنانچه بر اساس داده برداری‌های زمینی باشد و یا در مقیاس وسیع انجام گیرد، امری بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. استفاده از تکنیک سنجش از دور، با دقت مناسب، هزینه بسیار کم و در زمان کوتاه قادر به تهیه نقشه بهره‌وری است. در این مطالعه، برای تهیه نقشه بهره‌وری که حاصل تقسیم دو نقشه عملکرد و تبخیر-تعرق است، از دو محصول پایگاه WaPOR یعنی تبخیر - تعرق واقعی (ETia) و تولید خالص اولیه (NPP) استفاده شد. محاسبات و تجزیه و تحلیل‌ها در سامانه Google Earth Engine در یک بازه زمانی ۱۰ روزه (داده‌های دهه‌ای) با وضوح مکانی ۲۵۰ متر انجام شد. مقادیر ETia و NPP برای دوره شش ساله محاسبه شد. نتایج نشان داد که بهره‌وری آب کشاورزی در مناطق شمال شرقی حوضه بالاترین مقدار را دارا است. همچنین روند تغییرات زمانی بهره‌وری نشان داد که بهره‌وری تا سال ۲۰۱۹ روند نزولی و از آن به بعد روند صعودی با شیب ملایم دارد. میانگین بهره‌وری در بازه مورد مطالعه ۱/۵۲ کیلوگرم بر متر مکعب است. در کل بررسی تغییرات مکانی-زمانی بهره‌وری نشان داد که قسمت قابل ملاحظه‌ای از حوضه دارای بهره‌وری نزدیک به میانگین است و درصد کمی دارای بهره‌وری بالاتر از سه گیلوگرم بر متر مکعب (مناطق حاصلخیز با مدیریت مناسب آبیاری) و کمتر از ۰/۵ کیلوگرم بر متر مکعب (مناطق با خاک نامناسب و مدیریت ضعیف آبیاری) است.

واژگان کلیدی: تبخیر - تعرق، آب مصرفی، بهره‌وری آب.



مقدمه

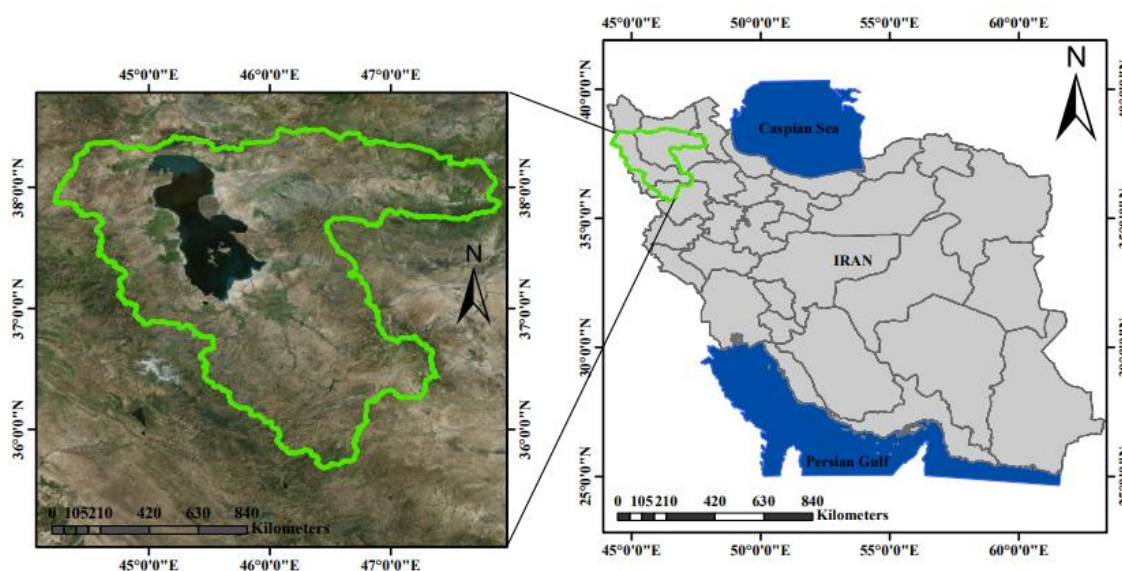
آب، یکی از مهم‌ترین عوامل برای تولید محصولات کشاورزی به حساب می‌آید و به عنوان یکی از موارد حیاتی برای زندگی، از اهمیت بسیاری برخوردار است. با این حال، در بسیاری از مناطق دنیا، منابع آبی محدود هستند و به دلیل رشد جمعیت و تغییرات آب و هوایی، استفاده از منابع آبی به یک چالش بزرگ تبدیل شده است. در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران، ۹۲ درصد از کل آب‌های قابل دسترس در بخش کشاورزی و به صورت تبخیر - تعرق مصرف می‌گردد (FAO, 2008). مدیریت آب در بخش کشاورزی یکی از جدیدترین کاربردهای سنجش از دور است که در دو دهه گذشته تحولات زیادی در آن رخ داده است. مدیریت آب کشاورزی شامل نظارت بر آب مصرفی به منظور ارزیابی عملکرد است که در سال‌های اخیر استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در این امر پرنگ شده است. یکی از اهداف توسعه پایدار این است که با افزایش بهره‌وری آب به صورت پایدار، تعداد افرادی را که از کمبود آب رنج می‌برند، کاهش دهد (Karimi et al., 2018). به منظور ارتقای بهره‌وری آب، نظارت بر میزان آب مصرفی در مقیاس‌های مختلف، به خصوص در مقیاس حوضه آبریز بسیار حائز اهمیت است (Vorosmarty et al., 2000). از این رو نظارت و آگاهی از تغییرات مکانی و زمانی آب در دسترس، سطح زیر کشت آبی و مصرف آب در سطح مزرعه نقش مهمی در حصول اطمینان از تخصیص مناسب آب به روش پایدار خواهد داشت (Bastiaanssen et al., 2014). یکی از مولفه‌های اصلی در تعیین بهره‌وری آب محصول، تبخیر - تعرق واقعی می‌باشد. همچنین تبخیر - تعرق واقعی یکی از مؤلفه‌های مؤثر در چرخه هیدرولوژی، نقش قابل ملاحظه‌ای در اقلیم منطقه‌ای و جهانی دارد (Rodell et al., 2015). روش‌های مختلفی برای تخمین این پارامتر وجود دارد. روش‌های مبتنی بر سنجش از دور به دلیل پوشش گسترده و قابل مقایسه با مدل‌های آب و هوایی عددی، محبوب‌تر از روش‌های کلاسیک هستند. چندین رویکرد مختلف سنجش از دور برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی وجود دارد که شامل روش‌های بیلان انرژی سطح (Bastiaanssen et al., 1998)، روش‌های پنمن-مانتیت (FAO, 2018) و روش‌های تجربی مبتنی بر شاخص‌های گیاهی (Nagler et al., 2013) می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد استفاده از مدل‌های مبتنی بر سنجش از دور برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی نیازمند صحت‌سنجی و واسنجی است که ممکن است به دلیل کمبود داده‌های مشاهداتی با مشکلاتی روبه‌رو باشند. در این راستا اخیراً محصولات تبخیر-تعرق واقعی WaPOR توسط سازمان خواروبار جهانی فائو (FAO) ارائه شده است. میزان تبخیر-تعرق واقعی در محصول WaPOR فائو از طریق الگوریتم ETLook اندازه‌گیری می‌گردد که معادلات و نحوه محاسبات میزان تبخیر-تعرق واقعی در این الگوریتم در تحقیقی توسط (Bastiaanssen et al., 2012) به تفصیل بیان شده است. اما جهت معرفی این الگوریتم می‌توان این گونه توضیح داد که مدل ETLook، برپایه معادله پنمن-مانتیت بنا گردیده است که کاربرد عمومی این معادله، برآورد میزان تبخیر-تعرق پتانسیل کل (شامل دو جز تبخیر و تعرق) با استفاده از داده‌های هواشناسی معمول (همانند: تابش خورشیدی، دمای هوا، مقادیر بخار و سرعت باد) است (Allen et al., 1998). سازمان جهانی غذا و کشاورزی ملل متحد (FAO) سامانه دسترسی آزاد به بهره‌وری آب را با هدف پوشش دادن کشورهای دچار بحران آب در آفریقا و خاورمیانه ایجاد کرده است که تخمین تبخیر - تعرق واقعی (ETa) در WaPOR یکی از مهم‌ترین محصولات این سامانه است (Javadian et al., 2019). WaPOR فائو دسترسی به لایه‌های داده‌های مکانی مربوط به آب و استفاده از زمین برای تولیدات کشاورزی را علاوه بر تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی و آمار منطقه فراهم می‌کند (FAO, 2018). WaPOR به عنوان نسخه WaPOR 1.1 راه‌اندازی شد و بعداً نسخه WaPOR 2.1 اصلاح شده اضافه شد و در حال حاضر در دسترس است. مدل WaPOR یک دوره زمانی تقریباً ۱۲ ساله از سال ۲۰۰۹ تا به امروز را دربر می‌گیرد و کل آفریقا و منطقه خاور نزدیک را پوشش می‌دهد (FAO, 2018). WaPOR دارای سه سطح تفکیک مکانی مختلف است که شامل سطح ۱ (لایه قاره‌ای با وضوح ۲۵۰ متری)، سطح ۲ (لایه ملی با وضوح ۱۰۰ متری) و سطح ۳ (لایه استانی با وضوح ۳۰ متری) است. به طور خاص، سطح ۱ تمام آفریقا و خاور نزدیک را پوشش می‌دهد، در حالی که سطح ۲ کشورهای خاصی از جمله مراکش، تونس، مصر، غنا، کنیا، سودان جنوبی، مالی، بنین، اتیوپی، رواندا، بوروندی، موزامبیک، اوگاندا، کرانه باختری و نوار غزه، یمن، اردن، سوریه و لبنان و سطح ۳ پوشش طرح‌های آبیاری و آبیاری تحت فشار در مصر، اتیوپی (مالی، لبنان) را شامل می‌شود (FAO, 2018).

هدف از مطالعه حاضر تهیه نقشه‌های بهره‌وری آب و تبخیر - تعرق واقعی برای بررسی روند تغییرات بهره‌وری آب و آب مصرفی در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه در طی شش سال و ارائه راه کارهای مدیریتی برای افزایش بهره‌وری آب در سطح حوضه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعتی در حدود ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع (معادل ۳/۱۵ درصد مساحت کل ایران)، واقع در شمال غربی ایران است که در تقسیم‌بندی حوضه‌های آبریز ایران، جزو حوضه‌های اصلی به شمار می‌رود (شکل ۱). مهم‌ترین رودخانه‌های آن نازلوچای، باراندوزچای، آجی چای، زرینه‌رود، سیمینه‌رود، مهاباد چای و زولا چای هستند. این حوضه در استان‌های آذربایجان غربی، کردستان و آذربایجان شرقی قرار دارد. حداکثر ارتفاع این حوضه ۴۸۱۱ متر (سبلان) و حداقل ارتفاع آن ۱۲۶۸ متر (تراز کف دریاچه ارومیه) است. این منطقه از نظر اقلیمی، دارای آب و هوای عمومی زمستان‌های سرد و تابستان‌های نسبتاً معتدل است (khazaei et al., 2019).

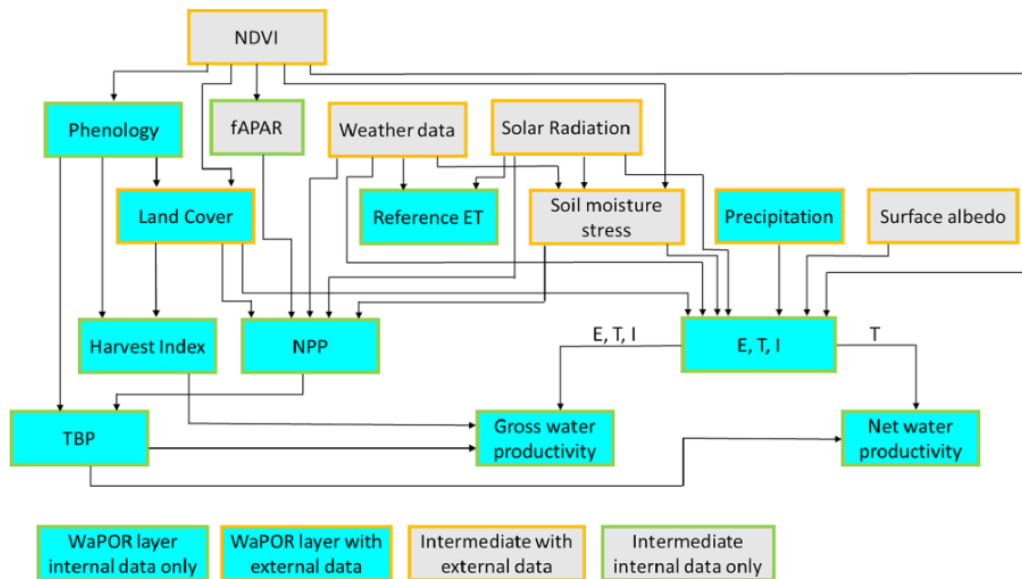


شکل ۱. منطقه مورد مطالعه.

پایگاه داده WaPOR

پایگاه داده‌های مربوط به ۲۱ پارامتر از جمله زیست‌توده بالای زمین و تبخیر - تعرق واقعی را در وضوح‌های مکانی ۳۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ متر در فاصله زمانی ۱۰ روزه ارائه می‌کند. ویرایشی مختلفی روی این سامانه انجام گرفته و بر اساس ارزیابی‌های کیفی متعددی که صورت گرفته، نسخه بتا، در ورژن‌های ۱/۰، ۱/۱، ۲/۰، ۲/۱ بهبودهایی در سامانه و لایه‌های آن انجام شده است (FAO and IHE Delft, 2019; FAO, 2020a). در این مطالعه، از سامانه WaPOR نسخه ۲/۱ استفاده شد.

لایه‌های اطلاعاتی مختلف این سامانه، در وضوح‌های مختلف مکانی و برای مناطق مختلف در دسترس است. داده‌های سطح یک با وضوح ۲۵۰ متر برای آفریقا و خاور نزدیک، داده‌های سطح دو دارای وضوح ۱۰۰ متر برای مجموعه‌ای از کشورها و حوضه‌های رودخانه‌ای می‌باشند و داده‌های سطح سه دارای وضوح ۳۰ متر برای مناطق کشاورزی در آفریقا و خاور نزدیک انتخاب شده، هستند. داده‌های WaPOR در بازه‌های زمانی روزانه، دهه‌ای، ماهانه و سالانه در دسترس می‌باشند (FAO, 2020a). زمان بین اکتساب داده و در دسترس بودن، نسبتاً کوتاه است. داده‌های متوسط WaPOR، ظرف ۱۰ روز در دسترس هستند و این داده‌ها با محصول نهایی ظرف شش هفته به‌روزرسانی می‌شوند. شکل (۲) اجزای داده‌های ورودی و خروجی پایگاه داده WaPOR را نشان می‌دهد.



شکل ۲. اجزای داده ورودی و مجموعه داده‌های خروجی پایگاه داده WaPOR. که خطوط سبز نشان دهنده اجزای داده از داده‌های داخلی است، خطوط نارنجی تنها بر اساس داده‌های خارجی است (FAO, 2020b).

که در آن: NDVI، تفاوت شاخص گیاهی نرمال شده^۱، fAPAR، کسر فعال فتوسنتزی سبز^۲، E تبخیر^۳، T تعرق^۴، I باران گیرش^۵، NPP تولید خالص اولیه^۶ و TBP کل بایومس تولیدی^۷ می‌باشد. شکل (۲) نشان می‌دهد که کدام اجزا در این سامانه برای استخراج بهره‌وری آب زیست‌توده استفاده می‌شوند. باکس‌های خاکستری، اجزای داده میانی از داده‌های خارجی هستند، باکس‌های آبی متغیرهای داده‌ای هستند که توسط WaPOR تولید می‌شوند. در این پژوهش از دو محصول تولید خالص اولیه (NPP) و تبخیر - تعرق واقعی (ETIa)^۸ از پایگاه WaPOR استفاده شد.

مدل ETLook

معادله پنمن - مانیت به عنوان یک معادله ترکیبی شناخته می‌شود زیرا دو معادله اساسی را برای محاسبه تبخیر با هم ادغام می‌سازد که شامل معادله تعادل سطح انرژی و معادله آیرودینامیکی هستند:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (1)$$

که در آن: λ گرمای نهان تبخیر (Jkg^{-1})، E تبخیر ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)، T تعرق ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)، R_n تابش ورودی خالص (Wm^{-2})، G شار حرارتی خاک (Wm^{-2})، ρ_a چگالی هوا (kgm^{-3})، C_p ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)، e_a فشار بخار واقعی هوا (Pa)، e_s فشار بخار اشباع (Pa) که تابعی از دمای هوا است، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع نسبت به دما (K^{-1})، γ ثابت سایکرومتریک (K^{-1})، r_a مقاومت آیرودینامیک (s m^{-1}) و r_s مقاومت جسم سطحی (s m^{-1}) است (Allen et al., 1998).

¹ Normalised Difference Vegetation Index

² Green active photosynthetic fraction

³ Evaporation

⁴ Transpiration

⁵ Interception

⁶ Net primary production

⁷ Total Biomass production

⁸ Actual Evapotranspiration and Interception

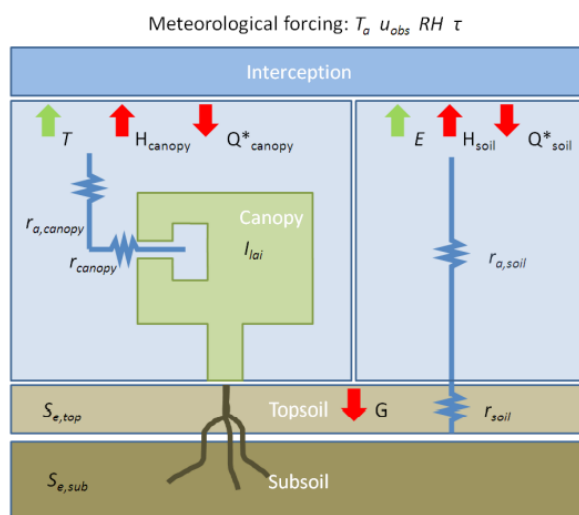
مدل ETLook به دو صورت معادله پنمن - مانیتث را حل می‌کند: یکی برای تبخیر از سطح خاک (E) و دیگری برای تعرق از پوشش تاج گیاه (T). در این صورت خواهیم داشت:

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_{n,soil} - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_{a,soil}}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_{s,soil}}{r_{a,soil}})} \quad (2)$$

و

$$\lambda T = \frac{\Delta(R_{n,canopy}) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_{a,canopy}}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_{s,canopy}}{r_{a,canopy}})} \quad (3)$$

این دو معادله با توجه به تابش خالص موجود ($R_{n,canopy}$ و $R_{n,soil}$) و همچنین مقاومت آبرودینامیکی و سطح جسم ($r_{s,soil}$, $r_{a,soil}$ و $r_{s,canopy}$, $r_{a,canopy}$) متفاوت هستند. علاوه بر این، شار حرارتی خاک (G) برای تعرق در نظر گرفته نمی‌شود (Mannaerts et al., 2020). مفاهیم اصلی مدل ETLook به صورت شماتیکی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. شماتیک مدل ETLook (FAO, 2020b).

تولید خالص اولیه (NPP)^۹

تولید خالص اولیه (NPP) به دلیل اهمیت آن در تعیین عوامل مختلفی نظیر: مصرف آب، بهره‌وری آب، واکنش محصول به شرایط آب و هوایی (Jans et al., 2021; Jones et al., 2017a)، و عملکرد اکوسیستم، یکی از رایج‌ترین متغیرهای مدل‌سازی گیاهی است. از نظر تئوری، NPP تبدیل کربن به زیست‌توده گیاهی، در طول فتوسنتز را کمی می‌کند (Baslam et al., 2020). با این وجود، بخشی از کربن جذب شده توسط گیاهان برای استفاده گیاه صرفه‌جویی می‌شود و به زیست‌توده تبدیل نمی‌شود. براساس آن، Running et al. (2004)، NPP را به عنوان مجموع فتوسنتز خالص روزانه، منهای هزینه رشد و نگهداری سلول‌های زنده در بافت چوبی دائمی تعریف کردند. از آنجایی که NPP به طور مستقیم با کربن در ارتباط است، به ما بینشی در مورد دریافت کربن توسط گیاهان ارائه می‌دهد، که بعداً تا حدی به عنوان غذا، سوخت و خوراک در دسترس قرار می‌گیرد (Pan et al., 2014).

مهم‌ترین ویژگی یک اکوسیستم، تولید خالص اولیه آن (NPP) است که توضیح می‌دهد چگونه فتوسنتز، دی‌اکسید کربن را به زیست‌توده تبدیل می‌کند. اصطلاح NPP به تبادل کربن بین یک اکوسیستم و جو اشاره دارد. Veroustraete et al. (2002) توضیح مفصلی از مفاهیم اساسی روش ارائه می‌دهند، و Eerens et al. (2004) اطلاعاتی در مورد نحوه اجرای آن در عمل ارائه می‌کنند. NPP برای هر سه

⁹ Net Primary Production (NPP)

سطح براساس دکاد^{۱۰} ارائه می شود، که در آن مقادیر پیکسل نشان دهنده میانگین تولید خالص اولیه روزانه برای آن دکاد خاص در kg/ha/day است. در برخی موارد، به عنوان مثال برای اهداف کشاورزی، اندازه گیری تولید ماده خشک (DMP) برحسب kg/ha/day مناسب تر است. NPP را می توان با استفاده از ضریب مقیاس ثابت 0.45 gC/gDM به DMP تبدیل کرد. $1 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ (NPP) برابر با $22/222 \text{ kgMD/ha/day}$ (DMP) است. مقادیر معمول برای NPP بین 0 تا $5/4 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ (NPP) یا بین 0 تا 320 kgMD/ha/day (DMP) متغیر است، اگرچه مقادیر بالاتری ممکن است رخ دهد (از لحاظ نظری تا 320 kgMD/ha/day (DMP)). در این مطالعه، داده های تولید خالص اولیه (NPP) از سیستم های WaPOR و GEE (Google Earth Engine) با وضوح پیکسل 250 متر داندود شد (FAO, 2018).

بهره وری آب محصول (WP_c)

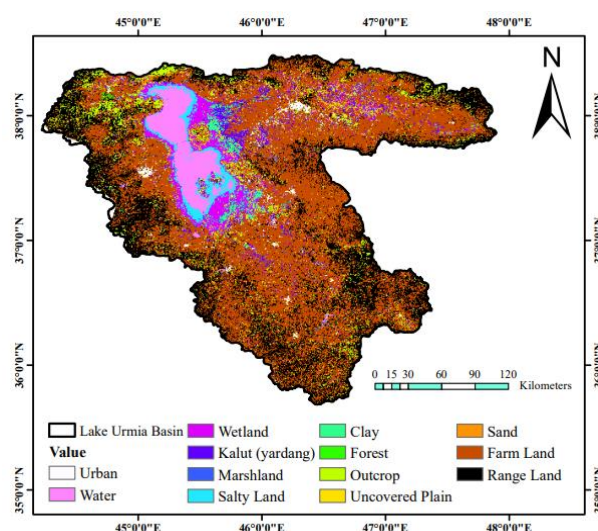
بهره وری آب محصول به عنوان نسبت عملکرد (Y) بر تبخیر - تعرق واقعی (ETIa) تعریف می شود. تبخیر - تعرق کم و عملکرد بالا موجب افزایش بهره وری آب می شود زیرا گیاه در این حالت آب زیادی را مصرف نمی کند، ولی مقدار تولید افزایش می یابد. از طرفی تبخیر - تعرق بالا و عملکرد پایین باعث کاهش بهره وری آب می شود زیرا در این حالت تولید عملکرد توسط گیاه در مقابل مصرف زیاد آب کاهش یافته است. در این پژوهش بهره وری آب محصول از تقسیم نقشه رستری عملکرد (NPP) به نقشه رستری تبخیر - تعرق واقعی (ETIa) توسط رابطه (۴) محاسبه شد.

$$WP_c (\text{kg/m}^3) = \frac{Y (\text{kg/ha})}{ETIa (\text{mm})} \quad (4)$$

داده های تبخیر - تعرق واقعی با وضوح 250 متر از سامانه WaPOR و GEE استخراج شد (Poudel et al., 2021؛ 2018؛ FAO).

نقشه پوشش زمین (LCM)^{۱۱}

کاربری زمین یا پوشش زمین یکی از عوامل موثر بر تعیین تبخیر - تعرق (ET) و چرخه هیدرولوژیکی است. در این تحقیق از نقشه پوشش زمین تهیه شده توسط Ghorbanian et al., (2020) که شامل ۱۳ کلاس است، برای ارزیابی تبخیر - تعرق در مکان های مختلف و در کاربری های مختلف آن استفاده شد. نقشه پوشش اراضی حوضه مورد مطالعه در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴. نقشه پوشش زمین حوضه آبریز دریاچه ارومیه.

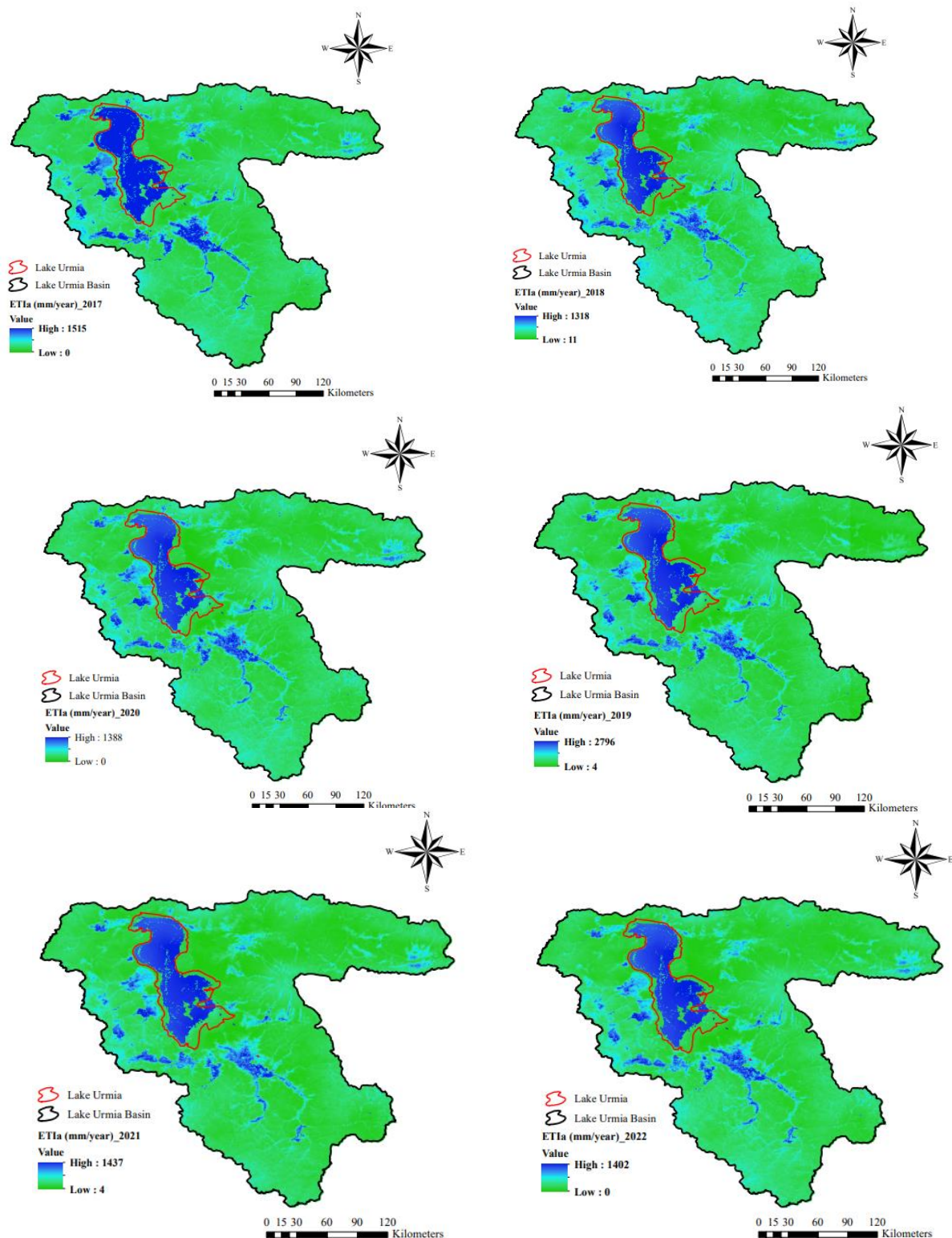
¹⁰ Dekad

¹¹ Land Cover Map

نتایج و بحث

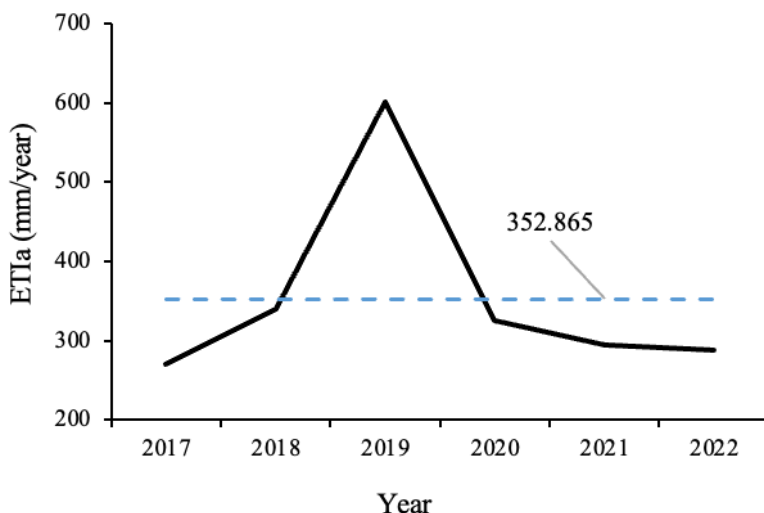
تبخیر - تعرق واقعی (ET_a)

برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی تبخیر - تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در بازه زمانی مورد بررسی (۲۰۱۷ الی ۲۰۲۲)، نقشه‌های سالانه تبخیر - تعرق برای کل حوضه ترسیم و در شکل (۵) نشان داده شده است. زمین‌های تحت آبیاری با سایه آبی تا فیروزه‌ای از هم متمایز می‌شوند درحالی که زمین‌های دیم کم‌ترین تبخیر - تعرق (پیکسل‌های سبز) را نشان می‌دهند.



شکل ۶. نقشه‌های تبخیر - تعرق واقعی سالانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در بازه زمانی مورد بررسی

شکل (۶) روند تغییرات میانگین تبخیر - تعرق سالانه را برای دوره مورد بررسی نشان می‌دهد.

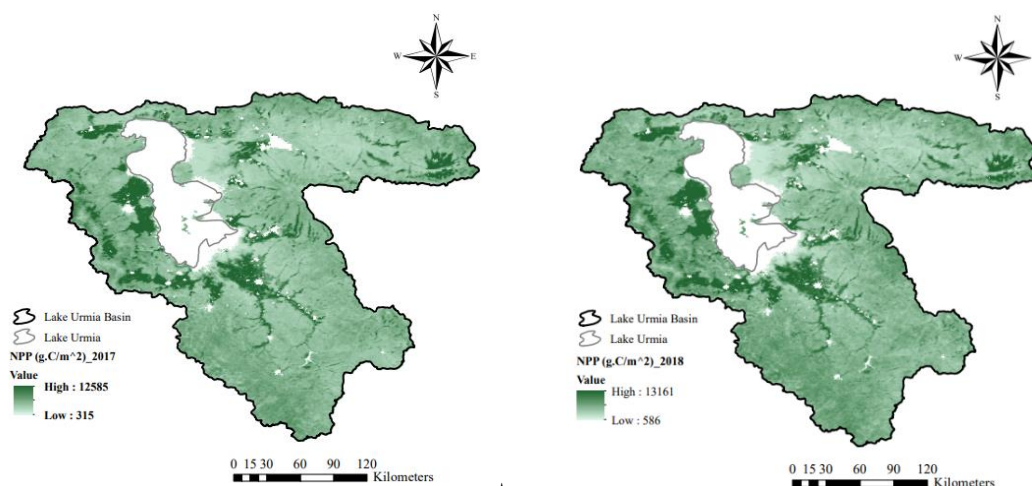


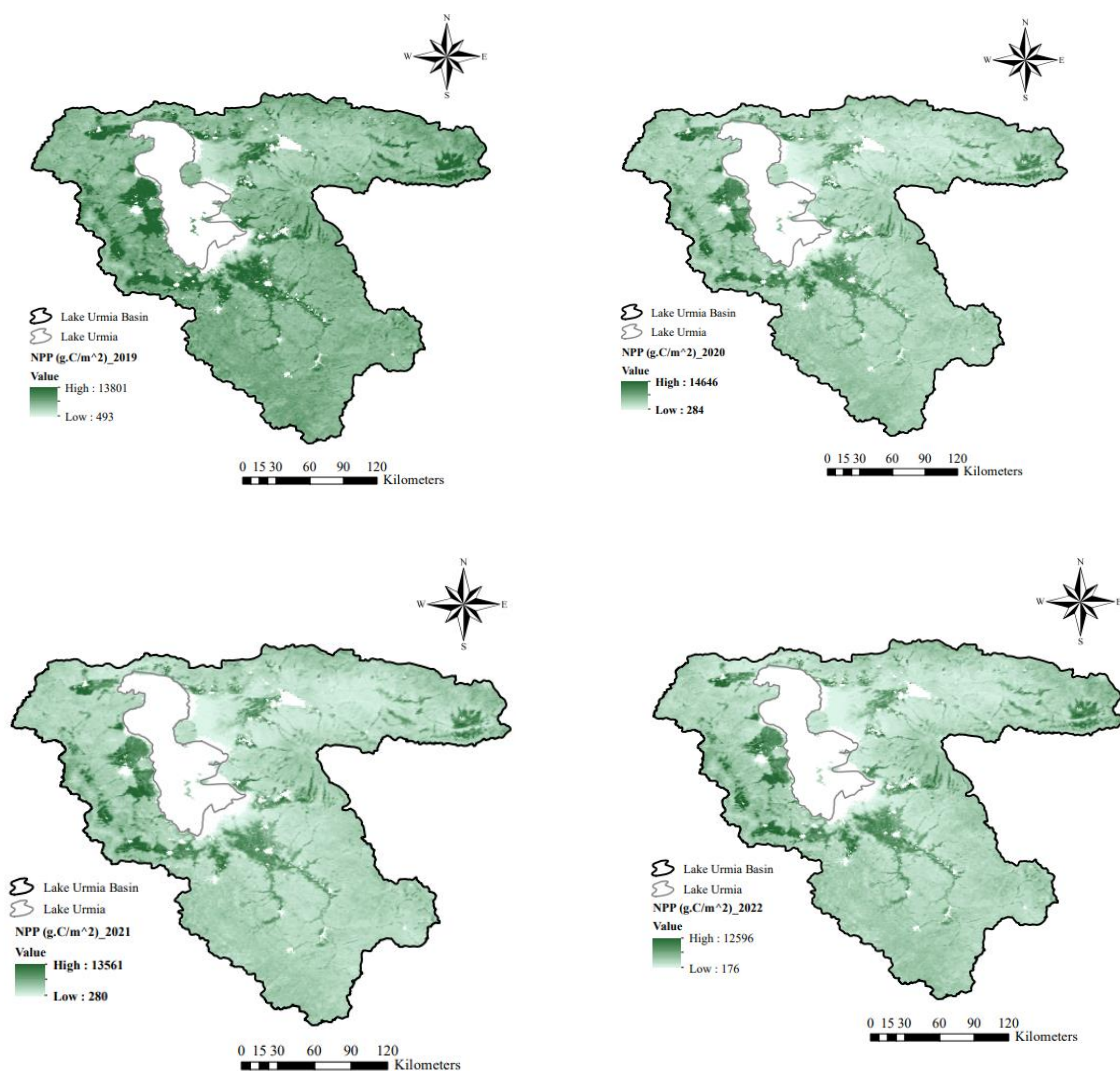
شکل ۵. مقادیر میانگین تبخیر - تعرق واقعی سالانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در طی ۶ سال.

با توجه به شکل ملاحظه می‌گردد که روند تغییرات تا سال ۲۰۱۹ صعودی، سپس تقریباً نزولی است. بیشترین مقدار تبخیر - تعرق واقعی برای سال ۲۰۱۹ و کمترین تبخیر - تعرق مربوط به سال ۲۰۱۷ است. همچنین میانگین سالانه تبخیر-تعرق واقعی در پهنه مورد بررسی و در بازه زمانی مورد مطالعه برابر ۳۵۲/۸۶ میلیمتر است.

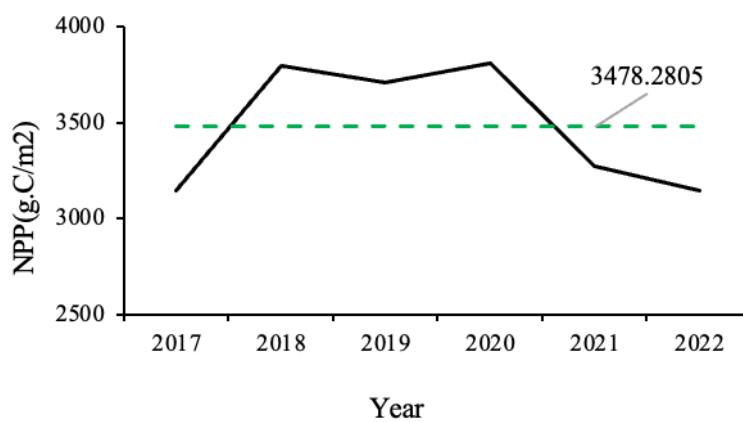
تولید خالص اولیه (NPP)

شکل (۷) تغییرات مکانی و زمانی تولید خالص اولیه را در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه در بازه مورد بررسی نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً ذکر شد تولید خالص اولیه بیانگر تبدیل دی‌اکسید کربن ناشی از فتوسنتز به زیست توده می‌باشد. نقاط سبز رنگ دارای بیشترین NPP (مناطق غربی و جنوبی دریاچه که منطبق بر اراضی زیر شبکه آبیاری مهاباد، میاندوآب است) و نقاط کم رنگ‌تر دارای کمترین NPP در سطح حوضه هستند. بیشترین عملکرد مربوط به سال ۲۰۲۰ و کم‌ترین عملکرد مربوط به سال ۲۰۱۷ به‌دست آمد. از نقشه‌های میانگین محصول می‌توان برای تعیین اهداف تولید بهره‌گرفت با این حال، در مناطقی با انحراف معیارهای بالا باید در استفاده از مقادیر میانگین دقت نمود. نقشه‌های انحراف معیار در شناسایی مناطقی که نیاز به اقدامات اصلاحی دارند، بسیار کارآمد هستند. با مقایسه نقشه‌های تولید و انحراف معیار می‌توان هزینه‌های مرتبط با عدم اجرای اقدامات اصلاحی را محاسبه نمود. شکل (۸) روند تغییرات زمانی تولید خالص اولیه در محدوده مورد بررسی را نشان می‌دهد.





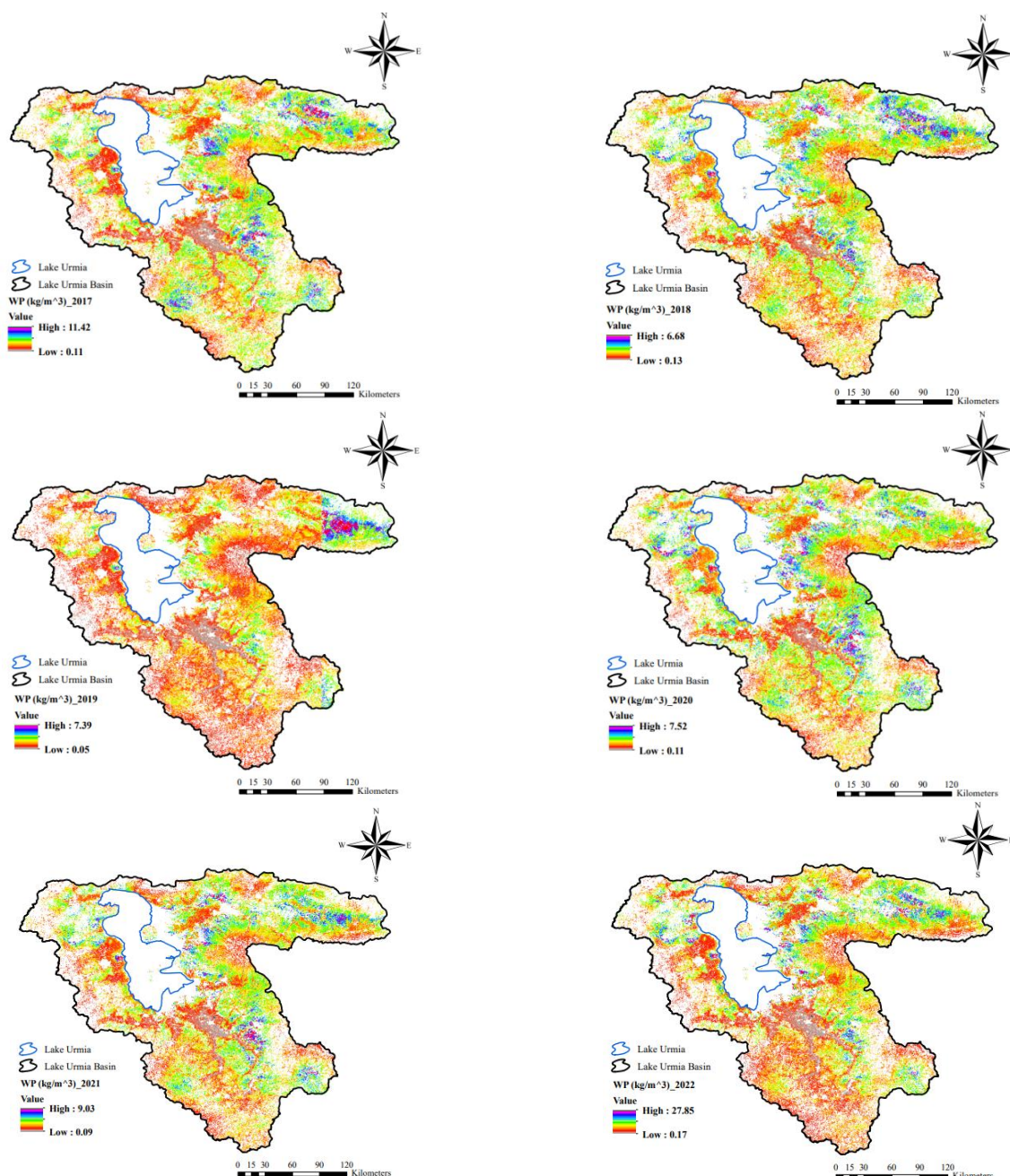
شکل ۷. نقشه‌های NPP سالانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در طی ۶ سال.



شکل ۸. تغییرات زمانی میانگین NPP در سطح حوضه.

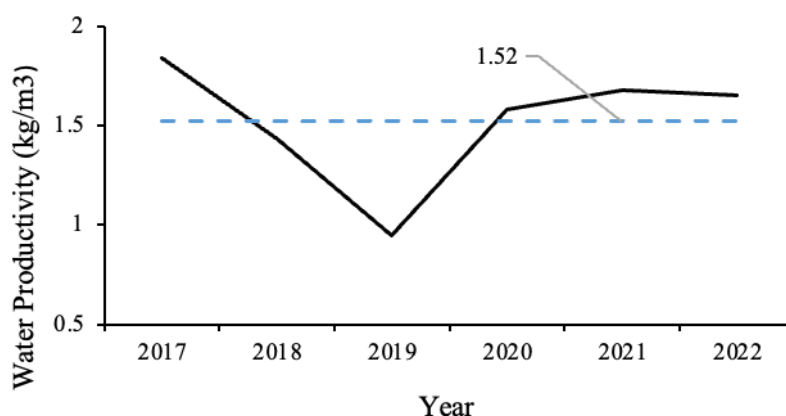
نقشه بهره‌وری آب محصول

در شکل (۹)، تغییرات مکانی و زمانی بهره‌وری آب محصول در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه برای سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ نشان داده شده است. نقاط قرمز رنگ نشان‌دهنده مقادیر پایین WP می‌باشند. پایین بودن بهره‌وری می‌تواند به دلایل مختلفی باشد اما مهمترین دلایل عبارتند از پایین بودن راندمان آبیاری، فقیر بودن خاک، ارقام نامناسب محصول ... همچنین مناطقی که با سایه آبی مشخص شده‌اند، زمین‌های را نشان می‌دهد که دارای WP بالایی هستند. از طرفی نقشه بهره‌وری آب ثابت می‌کند که شیوه‌های درون مزرعه‌ای می‌توانند تأثیرات قابل توجهی در بهبود بهره‌وری آب داشته باشد. نقاط آبی رنگ نشان‌دهنده‌ی این است که شیوه‌های مدیریتی در مزرعه توسط کشاورزان برای به حداکثر رساندن محصول به‌ازای هر قطره آب، به خوبی لحاظ شده است.



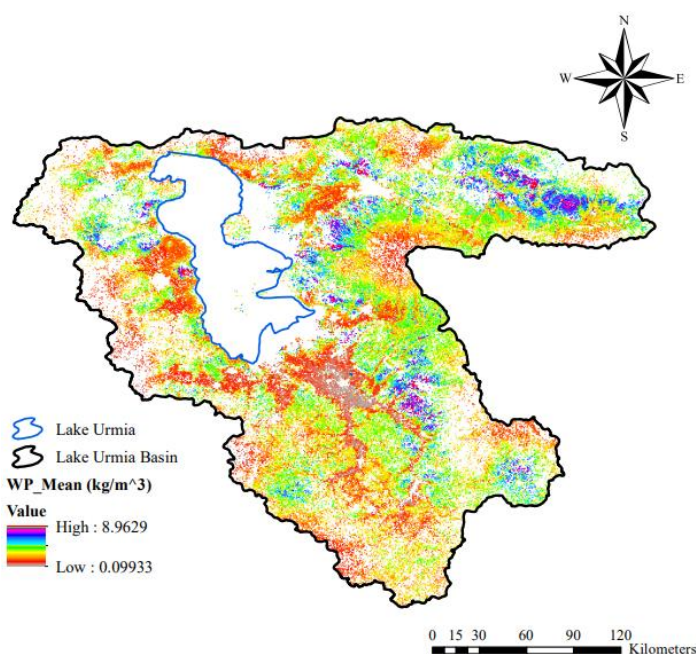
شکل ۹. نقشه‌های بهره‌وری آب محصول حوضه آبریز دریاچه ارومیه در طی ۶ سال.

شکل (۱۰) تغییرات زمانی میانگین بهره‌وری آب محصول را در بازه مورد بررسی، نشان می‌دهد. روند تغییرات مقادیر میانگین بهره‌وری آب محصول در ابتدا تا سال ۲۰۱۹ کاهشی و بعد روند افزایشی پیدا کرد. این روند عکس روند تغییرات تبخیر-تعرق واقعی است. بیشترین مقدار بهره‌وری آب مربوط به سال ۲۰۱۷ و کمترین مقدار بهره‌وری آب برای سال ۲۰۱۹ به دست آمد. نتایج نشان‌دهنده این است که مقدار تبخیر - تعرق در این سال نسبت به سال‌های دیگر خیلی بالا بود و مقدار آن به‌طور میانگین ۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین مقدار میانگین بهره‌وری آب محصول برای سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ برابر ۱/۵۲ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد.



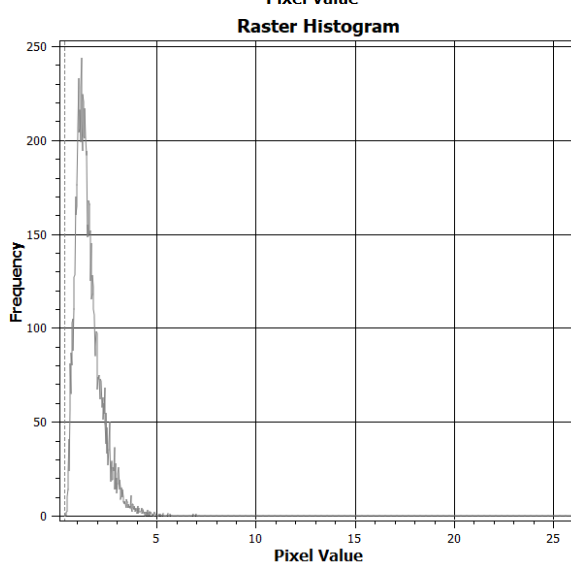
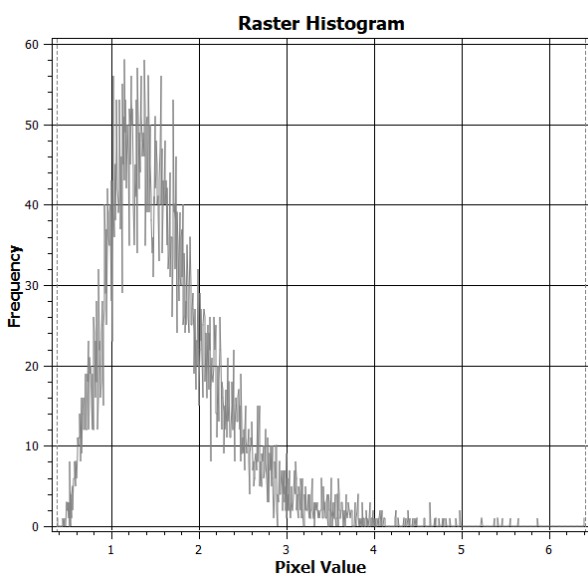
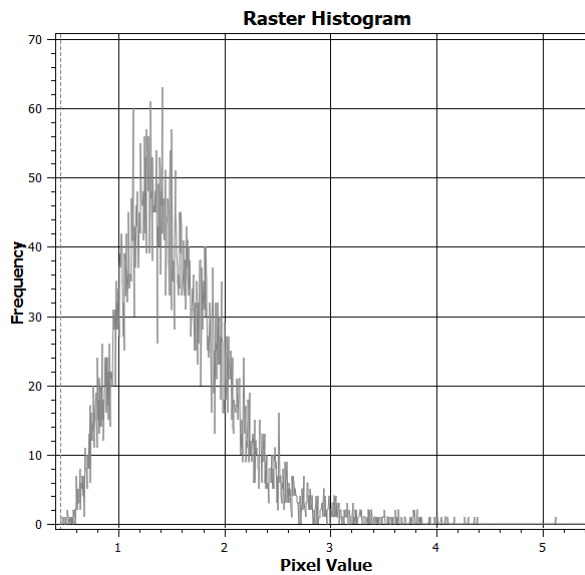
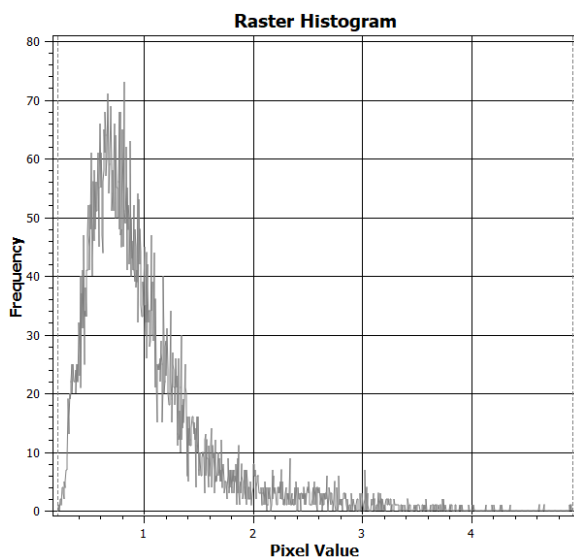
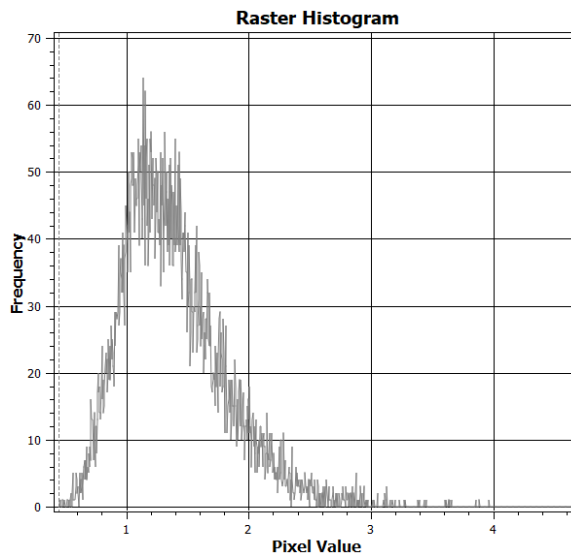
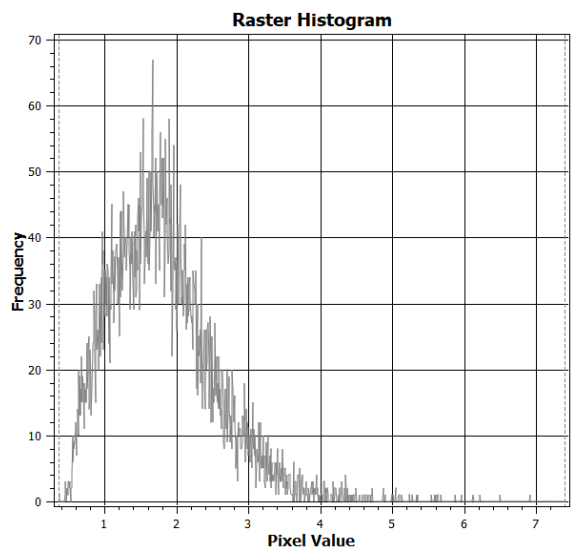
شکل ۱۰. تغییرات زمانی میانگین بهره‌وری آب در سطح حوضه.

شکل (۱۱) میانگین بهره‌وری آب محصول را در طول شش سال نشان می‌دهند. همانطور در شکل ملاحظه می‌گردد بیشترین میانگین - بهره‌وری مربوط به بخش شمال غربی حوضه آبریز دریاچه ارومیه و کمترین مقدار آن مربوط به بخش جنوبی حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد.



شکل ۱۱. نقشه میانگین بهره‌وری در بازه مورد مطالعه.

در شکل (۱۲) هیستوگرام بهره‌وری مصرف آب را در سال‌های مورد بررسی نشان داده شده است.



شکل ۱۲. هیستوگرام بهره‌وری مصرف آب در سال‌های مورد بررسی.

با توجه به شکل (۱۲) ملاحظه می‌گردد که در سالهای مورد بررسی عمده پهنه مورد بررسی (درصد زیادی از مساحت حوضه) دارای بهره‌وری حدود ۱/۵ کیلوگرم بر متر مکعب است و نقاط با بهره‌وری بیشتر از ۳ (یعنی مناطق حاصلخیز با مدیریت مناسب آبیاری) و یا کمتر از ۰/۵ (مناطق با خاک نامناسب و مدیریت ضعیف آبیاری) مساحت بسیار کمی را به خود اختصاص داده است.

نتیجه‌گیری

حوضه آبریز دریاچه ارومیه به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آبی در ایران و جهان، در برابر تغییرات آب و هوایی و کاهش منابع آبی با چالش‌هایی مواجه است. برای مدیریت بهینه منابع آبی در این حوضه آبریز، بایستی به بهره‌وری آب کشاورزی توجه ویژه‌ای شود. به همین منظور، استفاده از سامانه‌های داده‌برداری مانند سامانه WaPOR می‌تواند به بهره‌وری بهتر آب کشاورزی و کاهش تلفات آب کمک کند. در بررسی وضعیت بهره‌وری آب کشاورزی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از سامانه WaPOR، می‌توان از داده‌های ماهواره‌ای مربوط به میزان تبخیر، تعرق و مصرف آب کشاورزی در این حوضه آبریز استفاده کرد. با تحلیل و مقایسه این داده‌ها، می‌توان به بررسی وضعیت بهره‌وری آب کشاورزی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداخت و راهکارهایی برای بهبود وضعیت بهره‌وری آب کشاورزی در این حوضه آبریز ارائه کرد. بهره‌وری بهتر آب کشاورزی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌تواند به کاهش تلفات آب و افزایش بهره‌وری منابع آبی کمک کند و در نتیجه به حفظ و بهبود وضعیت این حوضه آبریز کمک کند. در این پژوهش وضعیت بهره‌وری آب محصول و مقدار آب مصرفی (تبخیر - تعرق واقعی) در طی شش سال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار بهره‌وری آب برای سال ۲۰۱۷، بیشترین تبخیر - تعرق واقعی برای سال ۲۰۱۹ و بیشترین عملکرد برای سال ۲۰۲۰ می‌باشد. سال ۲۰۱۹ دارای کمترین بهره‌وری در بین سال‌های دیگر بود که این موضوع بیان‌کننده مدیریت نادرست درون مزرعه می‌باشد. لذا برای افزایش بهره‌وری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، راهکارهای مدیریتی زیر پیشنهاد می‌شود:

(۱) استفاده از دستگاه‌های هوشمند برای کنترل و مدیریت منابع آبی: استفاده از دستگاه‌های هوشمند مانند سامانه‌های هوشمند سنجش آب دریاچه، سامانه‌های هوشمند آبیاری و سامانه‌های هوشمند مدیریت منابع آبی، می‌تواند به کاهش ضایعات آب و افزایش بهره‌وری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه کمک کند، (۲) ارتقاء زیرساخت‌های آبیاری: ارتقاء زیرساخت‌های آبیاری مانند ایجاد سیستم‌های آبیاری قطره‌ای، سیستم‌های آبیاری مکانیزه و سیستم‌های آبیاری شبکه‌ای، می‌تواند به کاهش ضایعات آب و افزایش بهره‌وری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه کمک کند، (۳) افزایش آگاهی عمومی و آموزش: افزایش آگاهی عمومی و آموزش در زمینه مدیریت منابع آبی و استفاده بهینه از آن، می‌تواند به کاهش ضایعات آب و افزایش بهره‌وری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه کمک کند، (۴) تنظیم برنامه‌های مدیریتی مناسب: تنظیم برنامه‌های مدیریتی مناسب به منظور بهره‌گیری بهینه از منابع آبی و کاهش ضایعات آب، می‌تواند به افزایش بهره‌وری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه کمک کند.

نتایج نشان داد که بهره‌وری آب کشاورزی در برخی مناطق بهبود یافته است که این امر ناشی از اجرای طرح‌های مدیریت آبیاری است که در سال‌های اخیر برای نجات دریاچه ارومیه انجام شده است. همچنین بررسی روند تغییرات بهره‌وری آب نشان‌دهنده وجود مناطقی است که طی شش سال مطالعاتی میزان بهره‌وری آن‌ها تغییر چندانی نداشته یا تغییرات آن کم بوده است و میزان آب مصرفی (تبخیر - تعرق واقعی) آن‌ها نیز نسبت به سایر مناطق بالاتر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که چنین مناطقی با ضعف مدیریت آبیاری و زراعی مواجه بوده‌اند و نیاز به اجرای طرح‌های کاهش مصرف آب و ارتقاء بهره‌وری در این مناطق می‌باشد. تهیه نقشه‌های تبخیر - تعرق و بهره‌وری آب و تعیین نقاطی با بالاترین میزان بهره‌وری می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان و کشاورزان محلی کمک کند تا بهترین شیوه‌های مدیریت آبیاری و زراعی بکار گرفته شده در این مناطق را تشخیص داده و در نتیجه رویکرد مشابهی را در مناطق کم بازده برای افزایش بهره‌وری اعمال کنند.

منابع

- 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.
- Baslam, M., Mitsui, T., Hodges, M., Priesack, E., Herritt, M. T., Aranjuelo, I., & Sanz-Sáez, Á. (2020). Photosynthesis in a changing global climate: Scaling up and scaling down in crops. *Frontiers in Plant Science*, 11, 882.
- Bastiaanssen, W. G. M., Cheema, M. J. M., Immerzeel, W. W., Miltenburg, I. J., & Pelgrum, H. (2012). Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. *Water Resources Research*, 48(11).



4. Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R., & Holtslag, A. A. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213(1998), 198–212.
5. Bastiaanssen, W. G., Karimi, P., Rebelo, L. M., Duan, Z., Senay, G., Muthuwatte, L., & Smakhtin, V. (2014). Earth observation based assessment of the water production and water consumption of Nile Basin agro-ecosystems. *Remote Sensing*, 6(11), 10306-10334.
6. Eerens, H., Piccard, I., Royer, A., Orlandi, S., & Genovese, G. (2004). Methodology of the MARS crop yield forecasting system. Vol. 3: Remote sensing information, data processing and analysis. Eds. Royer A. and Genovese G., EUR, 21291.
7. FAO, (2008) Food and agriculture organization of the united nations. Aquastat Database from Water Report 34:220-232
8. FAO. WaPOR Database Methodology: Level 1. Remote Sensing for Water Productivity Technical Report: Methodology Series; FAO: Rome, Italy, 2018; 72p.
9. Ghorbanian, A., Kakooei, M., Amani, M., Mahdavi, S., Mohammadzadeh, A., & Hasanlou, M. (2020). Improved land cover map of Iran using Sentinel imagery within Google Earth Engine and a novel automatic workflow for land cover classification using migrated training samples. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 167, 276-288.
10. Jans, Y., von Bloh, W., Schaphoff, S., & Müller, C. (2021). Global cotton production under climate change–Implications for yield and water consumption. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(4), 2027-2044.
11. Javadian, M., Behrangi, A., Gholizadeh, M., & Tajrishy, M. (2019). METRIC and WaPOR estimates of evapotranspiration over the Lake Urmia Basin: comparative analysis and composite assessment. *Water*, 11(8), 1647.
12. Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., Godfray, H. C. J., Herrero, M., Howitt, R. E., & Janssen, S. (2017a). Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural systems*, 155, 240-254.
13. Karimi, P., Pareeth, S., & Fraiture, C. D. (2018). REMOTE SENSING FOR AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT (RS4AWM) EDUCATIONAL COURSE WITHIN POST-GRADUATE PROGRAM FOR WATER PROFESSIONALS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
14. Khazaei, B., Khatami, S., Alemohammad, S. H., Rashidi, L., Wu, C., Madani, K., ... & Aghakouchak, A. (2019). Climatic or regionally induced by humans? Tracing hydro-climatic and land-use changes to better understand the Lake Urmia tragedy. *Journal of hydrology*, 569, 203-217.
15. Mannaerts, C. M., Blatchford, M. L., Njuki, S. M., Zeng, Y., Nouri, H., & Maathuis, B. H. P. (2020). WaPOR quality assessment: Technical report on the data quality of the WaPOR FAO database version 2.
16. Nagler, P. L., Glenn, E. P., Nguyen, U., Scott, R. L., & Doody, T. (2013). Estimating riparian and agricultural actual evapotranspiration by reference evapotranspiration and MODIS enhanced vegetation index. *Remote Sensing*, 5(8), 3849–3871.
17. Pan, S., Tian, H., Dangal, S. R., Ouyang, Z., Tao, B., Ren, W., Lu, C., & Running, S. (2014). Modeling and monitoring terrestrial primary production in a changing global environment: toward a multiscale synthesis of observation and simulation. *Advances in Meteorology*, 2014.
18. Poudel, U., Stephen, H., & Ahmad, S. (2021). Evaluating irrigation performance and water productivity using EEFlux ET and NDVI. *Sustainability*, 13(14), 7967.
19. Rodell, M., Beaudoin, H. K., L'ecuyer, T. S., Olson, W. S., Famiglietti, J. S., Houser, P. R., ... & Wood, E. F. (2015). The observed state of the water cycle in the early twenty-first century. *Journal of Climate*, 28(21), 8289-8318.
20. Running, S. W., Nemani, R. R., Heinsch, F. A., Zhao, M., Reeves, M., & Hashimoto, H. (2004). A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 54(6), 547-560.
21. Veroustraete, F., Sabbe, H., & Eerens, H. (2002). Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data. *Remote sensing of environment*, 83(3), 376-399.
22. Vorosmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *science*, 289(5477), 284-288.
23. FAO, 2020b. WaPOR Database Methodology: Version 2 Release. FAO, Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9894en>

Investigating Spatial-Temporal Changes of Agricultural Water Productivity in Urmia Lake Basin

Iman Hajirad^{1*}, Sanaz Mohammadi², Khaled Ahmadaali

1. Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran,
2. PhD, Water Management and Engineering Department, Collage of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran,
3. Assistant Professor. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran,

ABSTRACT

Monitoring changes in product water productivity is a useful tool in the management of water and soil resources, which is very time-consuming and expensive if it is based on ground data collection or is done on a large scale. The use of remote sensing technique, with proper accuracy, very low cost and in a short time, is able to prepare a productivity map. In this study, two products of the WaPOR database, namely actual evapotranspiration (ETIa) and net primary production (NPP), were used to prepare the productivity map, which is the result of dividing the performance and evapotranspiration maps. Calculations and analyzes were performed in the Google Earth Engine system in a 10-day period (decadal data) with a spatial resolution of 250 meters. ETIa and NPP values were calculated for the six-year period. The results showed that agricultural water productivity is the highest in the north-eastern areas of the basin. Also, the trend of productivity changes over time showed that productivity has a downward trend until 2019 and an upward trend with a gentle slope from then on. The average productivity in the studied period is 1.52 kg/m³. In general, the study of spatio-temporal productivity changes showed that a significant part of the basin has productivity close to the average and a small percentage has productivity higher than three kilograms per cubic meter (fertile areas with proper irrigation management) and less than 0.5 kg/m³ (areas with poor soil and poor irrigation management).

Keywords: Water consumption, Evapotranspiration, Water Productivity