

## معرفی انواع روش‌های برآورد تبخیر و تعرق برنج

مجتبی رضایی<sup>۱\*</sup>، مرتضی کمالی<sup>۲</sup>

۱- استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران

۲- کارشناس، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران

\* نویسنده مسئول: mrezaei@yahoo.com

### چکیده

برنج یکی از مهم‌ترین منابع غذایی ایران است و با توجه به محدودیت منابع آب، مدیریت بهینه آبیاری در شالیزارها اهمیت ویژه‌ای دارد. تبخیر و تعرق واقعی اصلی‌ترین عامل تعیین‌کننده نیاز آبی برنج است و برآورد دقیق آن برای کاهش هدررفت آب و حفظ عملکرد محصول ضروری است. هدف این نوشتار، معرفی و بررسی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق واقعی برنج، و ارائه راهنمایی عملی برای کارشناسان، پژوهشگران و کشاورزان در جهت افزایش بهره‌وری آب و پایداری تولید است. روش‌های مختلفی برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی وجود دارد که شامل روش‌های مستقیم و مزروعی، روش‌های غیرمستقیم مبتنی بر داده‌های هواشناسی و ضریب گیاهی و سنجش از دور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌شوند. این روش‌ها با توجه به شرایط مزرعه، نوع رقم برنج و مرحله رشد گیاه، امکان برنامه‌ریزی دقیق آبیاری و مدیریت منابع آب را فراهم می‌کنند. هر کدام از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند و انتخاب مناسب‌ترین روش بستگی به مقیاس مزرعه، شرایط اقلیمی و امکانات موجود دارد. ترکیب تجربه عملی کشاورزان با داده‌ها و مدل‌های علمی می‌تواند مدیریت آب را به شکل مؤثر و پایدار ممکن سازد و زمینه را برای برنامه‌ریزی دقیق‌تر آبیاری و تصمیم‌گیری‌های کلان منابع آب فراهم کند.

**واژگان کلیدی:** سنجش از دور، ضریب گیاهی، لایسیمتر، نیاز آبی

### بیان مساله

برنج با سطح زیر کشت و تولید به ترتیب ۵۲۰ هزار هکتار و ۲/۱ میلیون تن یکی از منابع غذایی مهم در ایران است. در سال‌های اخیر به دلیل کاهش منابع آبی، مناطق مستعد کشت برنج محدودتر شده و تمرکز اصلی تولید به نواحی ساحلی دریای خزر، به‌ویژه استان‌های مازندران و گیلان، که بیش از ۷۰ درصد سطح زیرکشت کشور را دربر می‌گیرند، انتقال یافته است (فائو، ۲۰۲۳). پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که ایران در سال‌های آینده با تنش آبی شدیدتری مواجه خواهد شد (کوزما و دیگران، ۲۰۲۳). لذا استمرار روش‌های مرسوم آبیاری و حفظ سطح فعلی زیرکشت می‌تواند مشکلات جدی در پایداری تولید برنج ایجاد کند. از این‌روست که در شرایط کم‌آبی، مدیریت بهینه منابع آب به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در پایداری تولید این محصول اهمیت فراوانی دارد.

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در مدیریت آب، تبخیر و تعرق (ET) است که بخش قابل توجهی از چرخه آب در طبیعت را تشکیل می‌دهد و نقش اساسی در تعیین نیاز آبی گیاهان دارد. الگوهای زمانی و مکانی تبخیر و تعرق به عوامل متعددی از جمله نوع گیاه، بافت خاک، توپوگرافی، شرایط اقلیمی و تغییرات رطوبت خاک بستگی دارد (آلن و دیگران، ۲۰۱۱). مقدار تبخیر و تعرق هر گیاه در شرایط واقعی مزرعه که از آن با عنوان تبخیر و تعرق واقعی (ETa) یاد می‌شود، اصلی‌ترین مؤلفه در تعیین نیاز آبی گیاه است. از این‌رو، برآورد دقیق آن نقش تعیین‌کننده‌ای در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه آب در کشت برنج دارد.

هدف این نوشتار معرفی و بررسی مهم‌ترین روش‌های برآورد نیاز آبی برنج با تأکید بر روش‌های مختلف تخمین تبخیر و تعرق واقعی، ارائه دیدی جامع به پژوهشگران، کارشناسان و کشاورزان برای انتخاب مناسب‌ترین روش تخمین نیاز آبی برنج در شرایط اقلیمی و مدیریتی مختلف ایران است.

## معرفی دستاورد

شناخت ETa برای مدیریت آبیاری برنج اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا برنج نسبت به سایر محصولات زراعی نیاز آبی بالایی دارد و معمولاً به صورت غرقابی کشت می‌شود. بخش عمده‌ای از آب مصرفی در مزارع برنج از طریق تبخیر و تعرق از دست می‌رود و بنابراین تعیین مقدار واقعی ETa، اساس برنامه‌ریزی آبیاری و جلوگیری از هدررفت منابع آب است. در شرایط کم‌آبی، مدیریت آبیاری بر اساس مقادیر واقعی تبخیر و تعرق می‌تواند به کاهش مصرف آب بدون کاهش قابل توجه عملکرد کمک کند. تعیین دقیق ETa این امکان را فراهم می‌کند که آب در زمان مناسب به مزرعه داده شود، راندمان مصرف آب افزایش یابد، مدل‌های شبیه‌سازی رشد و عملکرد برنج به درستی تنظیم شوند و سیاست‌گذاری‌های آبی در سطح حوضه آبریز بر پایه داده‌های علمی انجام گیرد. در بسیاری از مناطق برنج‌خیز ایران، محدودیت منابع آب و تغییر الگوی بارش، اهمیت استفاده از روش‌های دقیق تخمین ETa را بیش از پیش نشان می‌دهد. در ادامه انواع این روش‌ها توضیح داده می‌شود.

۱- روش‌های مستقیم و مزرعه‌ای: یکی از دقیق‌ترین روش‌ها در تعیین ETa، نصب و استفاده از لایسیمتر در مزرعه است. در این روش گیاه و خاک درون یک محفظه کنترل‌شده قرار می‌گیرد و میزان آب ورودی و خروجی اندازه‌گیری می‌شود. طبق توصیه فائو ۳۹ برای کار گذاشتن لایسمتر داخل مزرعه باید حداقل ۵ متر از مرزهای مزرعه فاصله گرفته شود و توصیه می‌شود از خاک شالیزار جهت پر کردن آن استفاده شود (ابوخاله و دیگران، ۱۹۸۲). کاشت نشا داخل لایسیمتر نیز طبق فاصله ردیف‌های کشت داخل مزرعه (معمولاً ۲۰×۲۰ سانتی‌متر) انجام می‌شود. از لایسیمتر می‌توان در تعیین نیاز آبی انواع ارقام برنج با مدیریت‌های مختلف آبیاری نظیر آبیاری غرقاب یا تناوبی استفاده کرد (شکل ۱). نیاز است که در هر لایسمتر یک خط‌کش چوبی نصب شود و کاهش ارتفاع آب با افزودن میزان لازم آب به کمک ظرف مدرج جبران شود، به گونه‌ای که ارتفاع آب داخل لایسمتر به ۵ سانتی‌متر برسد که این ارتفاع مطابق با مقدار توصیه‌شده برای شالیزار است. با توجه به داشتن سطح مقطع لایسیمتر، ارتفاع آبی که صرف تبخیر و تعرق می‌شود نیز قابل محاسبه است.

اگرچه دقت این روش بسیار بالاست، اما اندازه‌گیری مستقیم ETa برای هر گیاه در مزرعه دشوار، پرهزینه و زمان‌بر و محدود به کارهای تحقیقاتی است. پندی و دیگران (۱۴۰۲) با کار گذاشتن لایسیمترها در داخل شالیزارهای موسسه تحقیقات برنج کشور، تبخیر و تعرق واقعی برنج رقم هاشمی را ۳۹۵/۳۸ میلیمتر در طول فصل زراعی تعیین کردند.



شکل ۱- لایسیمتر کار گذاشته شده در شالیزار برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق واقعی برنج

و کمک به مدیریت بهینه آب در شالیزار (رضایی، ۱۴۰۳)

۲- **روش‌های غیرمستقیم:** در روش‌های غیرمستقیم از روابط فیزیکی مبتنی بر توازن انرژی و آیرودینامیک و روابط تجربی استفاده می‌شود. در این روش‌ها معمولاً ابتدا تبخیر و تعرق مرجع ( $E_{To}$ ) محاسبه می‌شود و سپس با ضرب آن در عددی به نام ضریب گیاهی ( $K_c$ )، مقدار  $E_{Ta}$  به دست می‌آید. تبخیر و تعرق مرجع، در واقع میزان آبی است که از سطح یک گیاه فرضی (معمولاً چمن کوتاه، سبز و سالم) در شرایط ایده‌آل و بدون محدودیت آب تبخیر و تعرق می‌شود. ضریب گیاهی نیز در واقع پلی است بین شرایط مرجع و شرایط واقعی رشد گیاه و نشان می‌دهد که گیاه مورد نظر چه مقدار بیشتر یا کمتر از گیاه مرجع تبخیر و تعرق دارد. این ضریب با توجه به عواملی نظیر نوع و گونه گیاه، مرحله رشد گیاه و وضعیت رطوبتی خاک مقادیر مختلفی دارد که برای برنج رقم هاشمی (رقم غالب در استان گیلان) از ۰/۹۹ در مرحله ابتدایی رشد و ۱/۳۵ در مرحله میانی و توسعه تا ۱/۱۴ در مرحله انتهایی متغیر است (پیرمردیان و دیگران، ۱۳۹۲).

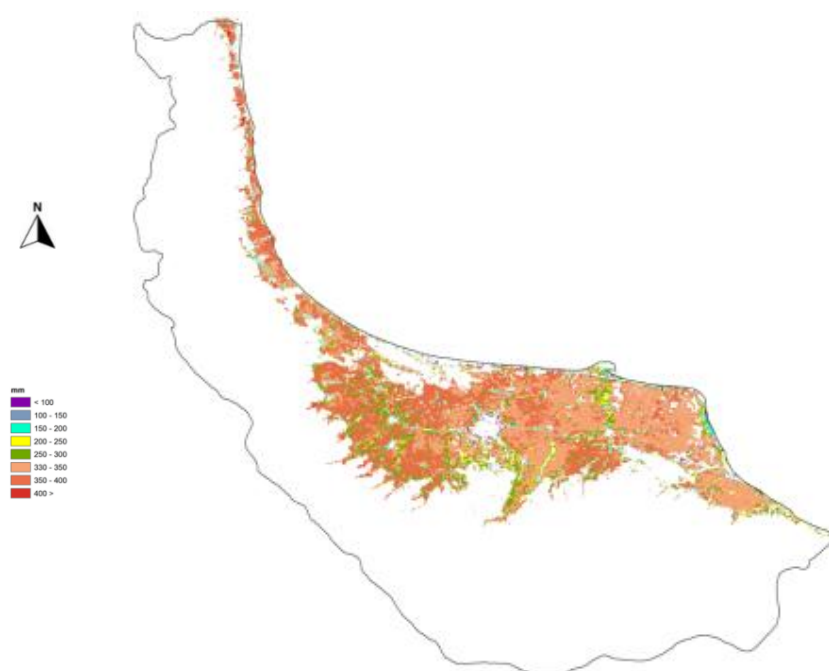
در روش‌های غیرمستقیم، مقدار تبخیر و تعرق بر اساس ترکیب چند متغیر هواشناسی مانند دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشید محاسبه می‌شود، بدون اینکه نیازی به اندازه‌گیری مستقیم میزان آب در مزرعه باشد. این روش‌ها برای مدیریت آبیاری و برآورد نیاز آبی برنج، به‌ویژه در مناطقی که امکانات اندازه‌گیری دقیق وجود ندارد، بسیار مفید هستند.

روش‌های غیرمستقیم از معادلات پیچیده مثل روش پنمن-مانتیت (روش استاندارد FAO) که به داده‌های هواشناسی زیادی نیاز دارند تا معادلات ساده‌تر مثل روش‌های بلانی-کریدل که به داده‌های کمتری نیاز دارند را در بر می‌گیرند. مزیت اصلی روش‌های غیرمستقیم، سادگی، سرعت و نیاز کم به تجهیزات است. این ویژگی باعث شده در بسیاری از پروژه‌های کشاورزی، منابع آب و مدل‌سازی‌های بزرگ‌مقیاس از این روش‌ها استفاده شود. با این حال، دقت این روش‌ها به شدت وابسته به شرایط اقلیمی و منطقه‌ای است؛ به عنوان مثال، رابطه‌ای که در یک منطقه مرطوب تنظیم شده، ممکن است در منطقه خشک یا نیمه‌خشک کارایی مطلوبی نداشته باشد. پوریزدان‌خواه و دیگران (۱۳۹۷) با مقایسه ۱۶ معادله تجربی مختلف برای تخمین تبخیر و تعرق در منطقه رشت به این نتیجه رسیدند که معادله‌های تجربی هارگریوز و پریستلی-تیلور و پنمن (فائو)، مناسب‌ترین روش‌ها برای این منطقه هستند.

یکی دیگر از روش‌های غیرمستقیم که استفاده زیادی در برآورد تبخیر و تعرق گیاه دارد، به‌کارگیری داده‌های حاصل از تشت تبخیر است. تشت تبخیر یک ظرف باز پر از آب است که میزان تبخیر آب از سطح آن در طول زمان اندازه‌گیری می‌شود. تبخیر از تشت می‌تواند به عنوان یک شاخص ساده و قابل اعتماد برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و در نهایت گیاه مورد نظر استفاده شود. استفاده از تشت تبخیر به دلیل سادگی روش، سهولت در تفسیر داده‌ها و دقت مناسب، به‌ویژه در مناطق مرطوب، گزینه‌ای مناسب برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع محسوب می‌شود. برای تبدیل مقادیر تبخیر اندازه‌گیری شده از تشت به تبخیر و تعرق گیاه مرجع، از ضریب تشت ( $K_{pan}$ ) استفاده می‌شود. ضریب تشت یک عدد اصلاحی است که تفاوت شرایط تبخیر از سطح تشت و سطح گیاه واقعی را نشان می‌دهد. با فرض اینکه میزان تبخیر اندازه‌گیری شده از تشت در یکی از روزهای فصل رشد برنج برابر با ۵ میلی‌متر باشد و ضریب تشت ۰/۸ باشد، میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع در آن روز معادل  $4 \text{ mm/day} = 5 \times 0.8$  است. حال چنانچه ضریب گیاهی را در همان دوره برابر ۱/۳ در نظر بگیریم، مقدار تبخیر و تعرق واقعی برنج معادل  $5.3 \text{ mm/day} = 4 \times 1.3$  خواهد شد. یعنی برای هر هکتار شالیزار، این میزان تبخیر و تعرق برابر با حدود ۵۲ متر مکعب آب در روز است و اگر کشاورز بخواهد برنج در این مرحله آب کافی داشته باشد، باید حدود ۵/۲ میلی‌متر آب در روز به شالیزار اضافه کند.

۳- روش‌های سنجش از دور: استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های سنجش از دور از روش‌های نسبتاً جدید برای برآورد تبخیر و تعرق است که می‌تواند مناطق وسیع را تحت پوشش خود قرار داده و سرعت تخمین را افزایش دهند. داده‌های سنجش از دور علاوه بر دسترسی آسان و ارزان بودن آن‌ها، از دقت بالا، پوشش گسترده و تنوع طیفی فراوان برخوردارند. همین ویژگی‌ها باعث شده که این روش در مقایسه با بسیاری از روش‌های سنتی جمع‌آوری اطلاعات، کارآمدتر و جذاب‌تر باشد. همچنین استفاده از داده‌های ماهواره‌ای این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان نقشه‌های دقیق تبخیر و تعرق را در سطح دشت‌ها و حوضه‌های آبریز بزرگ با حداقل نیاز به داده‌های زمینی تهیه کرد. این قابلیت، نقش مهمی در مدیریت بهینه آبیاری و برنامه‌ریزی کلان منابع آب کشور دارد و می‌تواند به تصمیم‌گیران کمک کند تا الگوهای مصرف آب در کشاورزی را بهتر بشناسند و کنترل کنند.

ماهواره‌ها معمولاً با استفاده از حسگرهای حرارتی و نوری، دمای سطح زمین، شدت تابش خورشید، میزان سبزی‌گی گیاه (شاخص‌های گیاهی مانند NDVI) و دیگر ویژگی‌های سطحی را اندازه‌گیری می‌کنند. این اطلاعات وارد مدل‌های ریاضی یا فیزیکی خاصی می‌شود که بر پایه تعادل انرژی سطح زمین کار می‌کنند. در این مدل‌ها فرض بر این است که بخشی از انرژی خورشید صرف تبخیر آب از سطح برگ‌ها و خاک می‌شود، بنابراین با بررسی مقدار انرژی بازتاب‌شده و حرارت سطح، می‌توان میزان ETa را برآورد کرد. رضایی (۱۴۰۳) با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس، تبخیر و تعرق برنج را در فصول مختلف زراعی برآورد کرد (شکل ۲). تصاویر خروجی نشان دادند که مقدار ETa به‌دست آمده با سنجش از دور در استان گیلان عمدتاً در محدوده ۳۵۰ تا ۴۰۰ میلیمتر در طول فصل قرار دارند. باید توجه داشت که در انتخاب نوع ماهواره برای برآورد میزان تبخیر و تعرق در یک منطقه، ویژگی‌های سنجنده نصب شده روی هر ماهواره اهمیت بالایی دارند. به‌عنوان مثال، تصاویر سنجنده مودیس دارای قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر هستند که برای مزارع کوچک مناسب نیستند. در مقابل، تصاویر ماهواره سنتینل ۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر قادر به پوشش مزارع کوچکتر بوده و دقت بالاتری در برآورد ET ارائه می‌دهند.



شکل ۲- تبخیر و تعرق واقعی برنج (بر حسب میلیمتر) در طول فصل زراعی ۱۴۰۳  
برای استان گیلان (رضایی، ۱۴۰۳)

## توصیه‌های ترویجی

برای مدیریت صحیح آب در کشت برنج، استفاده از روش‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی می‌تواند برنامه‌ریزی آبیاری را دقیق‌تر و بهینه‌تر کند. در مزارع تحقیقاتی و مقیاس کوچک، لایسیمترها می‌توانند اطلاعات دقیق درباره نیاز آبی ارقام مختلف ارائه دهند، اما در مزارع وسیع، بهتر است از روش‌های غیرمستقیم مبتنی بر داده‌های هواشناسی استفاده شود تا آبیاری به‌صورت زمان‌بندی شده و کارآمد انجام شود و از هدررفت آب جلوگیری شود. در صورت عدم دسترسی به ایستگاه هواشناسی محلی، کشاورزان می‌توانند با کارشناسان جهاد کشاورزی استان تماس گرفته و مقدار میانگین تبخیر و تعرق گیاه مرجع ( $ET_o$ ) منطقه را دریافت کنند. سپس با توجه به مرحله رشد برنج (کاشت، گل‌دهی، رسیدن بذر)، ضریب گیاهی ( $K_c$ ) مناسب از جدول محلی انتخاب می‌شود و تبخیر و تعرق واقعی ( $ET_a$ ) با رابطه  $ET_a = ET_o \times K_c$  محاسبه می‌شود. این مقدار نشان می‌دهد که در هر ۱۰ روز چه میزان آب مؤثر لازم است و می‌تواند برای زمان‌بندی آبیاری غرقاب یا تناوبی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از دور این امکان را می‌دهد که نقشه‌های تبخیر و تعرق را برای دشت‌ها و حوضه‌های آبریز تهیه کرده و برنامه‌ریزی کلان منابع آب را بهبود بخشید (جدول ۱). توصیه می‌شود برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس مرحله رشد گیاه و نوع رقم برنج انجام شود تا مصرف آب بهینه شود و عملکرد محصول کاهش پیدا نکند. در نهایت، برگزاری کارگاه‌های آموزشی و ترویج روش‌های علمی مدیریت آب به کشاورزان کمک می‌کند تا ضمن بهره‌گیری از تجربیات حاصل شده خود، تصمیمات آبیاری را بر اساس داده‌های واقعی و علمی اتخاذ کنند و پایداری تولید برنج را افزایش دهند.

جدول ۱- مقایسه دقت، معایب، مقیاس و هزینه‌های روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق

| روش                  | دقت          | هزینه                   | نیاز به تجهیزات                         | مقیاس مناسب             | توصیه عملی                                                                                              |
|----------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مستقیم<br>(لایسیمتر) | بسیار خوب    | هزینه و زمان‌بری زیاد   | بالا (لایسیمتر، نصب، نگهداری)           | مزرعه کوچک / تحقیقاتی   | مناسب مراکز تحقیقاتی و آزمایشگاه‌های مزرعه‌ای برای تعیین دقیق نیاز آبی ارقام برنج                       |
| غیرمستقیم            | متوسط تا خوب | هزینه و زمان‌بری متوسط  | کم (داده‌های هواشناسی یا تشت تبخیر)     | مزرعه متوسط تا بزرگ     | مناسب کارشناسان منطقه‌ای و کشاورزان با دسترسی به داده‌های محلی، برای برنامه‌ریزی آبیاری تقریبی          |
| سنجش از دور          | خوب          | بدون هزینه و بسیار سریع | نیاز به نرم‌افزار و داده‌های ماهواره‌ای | مناطق وسیع / حوضه آبریز | مناسب مراکز تحقیقاتی، سازمان‌های منابع آب و برنامه‌ریزی کلان، برای تهیه نقشه‌های $ET$ در مقیاس منطقه‌ای |

## فهرست منابع

- پندی، ح.، اسدی کپورچال، ص.، وظیفه‌دوست، م.، رضایی، م. ۱۴۰۲. برآورد تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی برنج با استفاده از مدل SWAP با و بدون تلفیق تصاویر ماهواره‌ای. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۴(۸):۱۲۱۳-۱۱۹۷.
- پیرمردیان، ن.، ذکری، ف.، رضایی، م.، عبدالمهی، و. ۱۳۹۲. استخراج ضرایب گیاهی سه رقم برنج بر پایه روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع در منطقه رشت. تحقیقات غلات. ۳(۲):۹۵-۱۰۶.
- پوریزدان‌خواه، ه.، خالدیان، م.، رضوی پور، ت.، رضایی، م. ۱۳۹۷. انتخاب مناسب‌ترین معادله‌های تجربی تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع و واسنجی ضرایب آن‌ها برای منطقه رشت. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲(۱):۱۹۹-۲۰۸.
- رضایی، م. ۱۴۰۳. کاربرد فناوری سنجش از دور در برآورد نیاز آبی برنج در شرایط مختلف آبیاری. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی. موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.
- Aboukhaled, A. Alfaro, A and Smith, M. 1982. Lysimeters. FAO Irrigation and Drainage Paper, No 39.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A., & Jensen, M.E. 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. Agricultural Water Management, 98 (6): 899-920.
- FAO. 2023. Food and Agricultural Organization of the United Nations (sited in: <http://www.fao.org/index.en.html>, 15/11/2023)
- Kuzma, S., Saccoccia, L., Chertock, M., (2023). 25 Countries, Housing One-quarter of the Population, Face Extremely High-Water Stress. World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries>.