

## یادداشت تحلیلی

## کژباوری و کژفهمی در مدیریت آب کشاورزی: زمان برای بازبینی، تأمل و تجدید نظر فرا رسیده است!

این مقاله از متن اصلی زیر ترجمه؛ و توسط آقایان دکتر پویا شیرازی و دکتر سید محمدرضا ناقدی فراز از نظر نگارشی و ادبی، بازبینی شده است.  
Ragab, R. (2024). Misconceptions and misunderstandings in agricultural water management: Time for revisiting, reflection and rethinking. Irrigation and Drainage, 1–23. Available from: <https://doi.org/10.1002/ird.2947>

پویا شیرازی<sup>۱</sup>، سید محمدرضا ناقدی<sup>۲</sup>

۱- مدیر پژوهشی پژوهشکده آب و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

\*ایانامه: p.shirazi.a@gmail.com

## چکیده

تصور غلط (Misconception) یا «کژباوری» اساساً یک باور یا ایده نادرست است که دقیق یا درست نیست. کژباوری ممکن است ناشی از کمبود/ نبود اطلاعات و یا تفسیر نادرست اطلاعات باشد. کژباوری ممکن است منجر به تصمیمات یا اقدامات نادرست شود. در حالی که سوءتفاهم (Misunderstanding) یا «کژفهمی» به عدم درک یا تفسیر صحیح معنای مورد نظر از یک موقعیت اشاره دارد. کژفهمی ممکن است ناشی از تعبیر اشتباه یا موانع زبانی باشد. با این حال بین این دو مفهوم، تا حدودی همپوشانی وجود دارد و در برخی موارد هر دو ممکن است هم معنا شوند. بخش‌های زیر برخی از کژفهمی‌ها و کژباوری‌ها را که در حال حاضر در مدیریت آب کشاورزی اعمال می‌شود، تبیین می‌کند. در طول دهه‌های گذشته و همچنین در سال‌های اخیر، برخی مفاهیم توسعه یافته‌اند که برای بهبود مدیریت آبیاری و صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی در نظر گرفته شده بودند؛ مانند: راندمان مصرف آب (WUE)، بهره‌وری آب (WP)، حسابداری آب، کم‌آبیاری، مدیریت پایا، آبتجویی شوری و موارد دیگر. با این حال، کاربرد این مفاهیم دچار کژفهمی شده و مفاهیم گاهی اوقات بدون توجه به معنای فیزیکی واقعی و محدودیت کاربرد آنها بکار رفته‌اند؛ زیرا: ۱- برخی از این مفاهیم با دانش ناکافی از هیدرولوژی توسعه یافته‌اند؛ ۲- مقیاس کاربرد و محدودیت‌های برخی از مفاهیم به وضوح بیان نشده است؛ و ۳- نحوه بدست آوردن دقیق و درست پارامترهای موجود در برخی از این مفاهیم توصیف نشده است. در بخش‌های بعدی، تعدادی از این مفاهیم، کژفهمی‌های رایج و کاربردهای نادرست این مفاهیم توسط متخصصان، ارائه خواهد شد. همچنین، شواهد و شیوه‌هایی برای استفاده صحیح و دقیق از مفاهیم با توجه به معنای فیزیکی واقعی، مقیاس کاربرد، و نیز میزان عدم قطعیت در کاربردهای آنها ارائه خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** کم‌آبیاری، طراحی سدها و مخازن، کژباوری در مدیریت آب، عدم دقت و عدم قطعیت مدل‌ها، سنجش از دور تبخیر و تعرق و رطوبت خاک، کنترل شوری، پایداری، درشت مقیاس‌سازی، سیستم حسابداری آب، کارایی و بهره‌وری مصرف آب

## مسئله ۱- کژفهمی: معنای واقعی کم آبیاری

منابع فعلی نشان می‌دهد که بسیاری از مقالات منتشرشده در نشریات برای صرفه‌جویی در مصرف آب، مبتنی بر کاربرد کم آبیاری بوده‌اند. محققان گزارش داده‌اند که در کم آبیاری (مثلاً در ۵۰٪، ۶۰٪ یا ۷۰٪ نیاز آبیاری کامل) عملکردی برابر با عملکرد حاصل از اعمال ۱۰۰٪ نیاز آبیاری کامل به دست آمده است. اگرچه این نتایج درست هستند، اما جای تعجب است که چرا کم آبیاری همان عملکرد آبیاری کامل را به همراه داشته است. سوال اینجاست: آیا کم آبیاری واقعاً کمبود آب است یا فقط نیاز واقعی است و این نیاز آبیاری کامل تخمینی است که به دلیل بیش‌برآورد روش مورد استفاده برای تعیین نیاز آبی محصول (CWR)<sup>۱</sup> اغراق آمیز بوده است؟ برای بررسی این موضوع، باید ابتدا نحوه محاسبه CWR را بررسی کرد. این موضوع در ادامه توضیح داده خواهد شد.

### روش‌های تعیین CWR

۱. معادلات مبتنی بر داده‌های هواشناسی: دما، تابش یا ترکیبی از آنها، سرعت باد، رطوبت نسبی و معادلات تجربی (با محدودیت روایی مکانی)؛
  ۲. اندازه‌گیری‌های خاک: میزان رطوبت، کمبود رطوبت خاک<sup>۲</sup>، صفحه شار صفر، پروفیل‌های رطوبت خاک، بیلان آب خاک و غیره؛
  ۳. اندازه‌گیری‌های گیاهی: جریان شیره گیاهی؛
  ۴. لایسیمتر: لایسیمتر وسیله‌ای برای اندازه‌گیری مقدار تبخیرتغرق واقعی از سطوح کشت گیاهان است؛
  ۵. اندازه‌گیری‌های مستقیم و غیرمستقیم شار تبخیر: تشت تبخیر (کلاس A یا ...)، نسبت بوون<sup>۳</sup>، اِدی کوواریانس<sup>۴</sup>، سنتیلومترها<sup>۵</sup> (سوسوزن).
- بدیهی است که «کاربران باید از دقت قابل دستیابی، مقیاس برازنده، و محدودیت‌های این روش‌ها آگاهی داشته باشند».

### تعریف کم آبیاری

کم آبیاری معمولاً به عنوان کاهش مقدار آب آبیاری تعریف می‌شود که کسری از کل CWR یا درصدی کمتر از ۱۰۰ درصد CWR را نشان می‌دهد. همانطور که در بالا ذکر شد، نیاز آبی گیاهان را می‌توان اندازه‌گیری یا برآورد کرد (به عنوان مثال با استفاده از لایسیمترها، اندازه‌گیری SMD<sup>۶</sup> یا اندازه‌گیری‌های مستقیم/غیرمستقیم توسط نسبت بوون، اِدی کوواریانس و یا سنتیلومترها) یا از معادلاتی مانند معادله اصلاح‌شده پنمن-مانتیت سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد «FAO-56» (Allen) و همکاران، (۱۹۹۸) که تاکنون به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است، محاسبه کرد.

$$ET_c = ET_0 (K_{cb} + K_e) \quad (1)$$

که در آن  $ET_c$  تبخیرتغرق گیاه (CWR)،  $ET_0$  تبخیرتغرق مرجع،  $K_{cb}$  ضریب گیاهی بیانگر تعرق گیاه و  $K_e$  ضریب تبخیر از سطح خاک لخت است. در بخش زیر نحوه تعیین CWR، مقایسه CWR محاسبه شده از معادلات با CWR اندازه‌گیری شده و مقایسه مقاومت تاج (Canopy) فرض شده توسط معادله اصلاح شده پنمن-مانتیت فائو با مقادیر اندازه‌گیری شده، تشریح شده است. درک این موضوع، کمک می‌کند که چرا کم آبیاری در برخی موارد، حتی تا ۵۰٪ از CWR کامل، همان عملکرد ۱۰۰٪ CWR را می‌دهد. در چنین حالتی احتمالاً CWR بیش برآورد شده است؛ و اگر چنین است، چرا؟

### معادله پنمن-مانتیت ET برای تخمین CWR

در صورت وجود داده‌های مقاومت سطح روزنه/پوشش گیاهی، می‌توان از معادله معروف پنمن-مانتیت (Monteith، ۱۹۶۵) به شکل زیر استفاده کرد:

$$\lambda ET_p = \frac{\Delta(R_n - G) - \rho_a c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2)$$

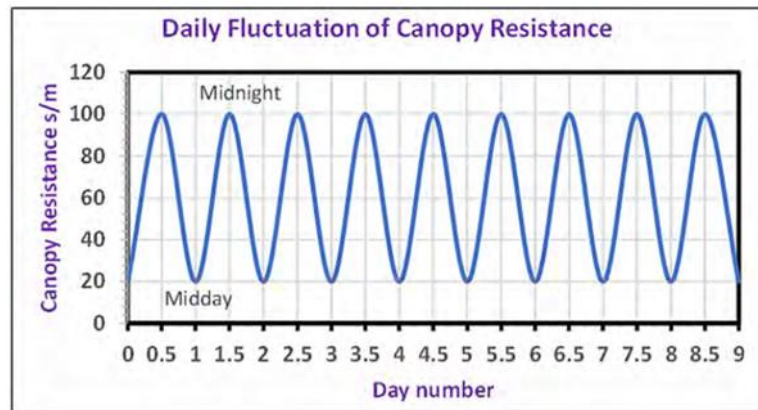
اما بدلیل دشواری در ارائه مقادیر مقاومت تاج پوشش، معادله فوق توسط Allen و همکاران (۱۹۹۸) اصلاح شد (FAO-56):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma U_2 (1 + 0.34 U_2)} \quad (3)$$

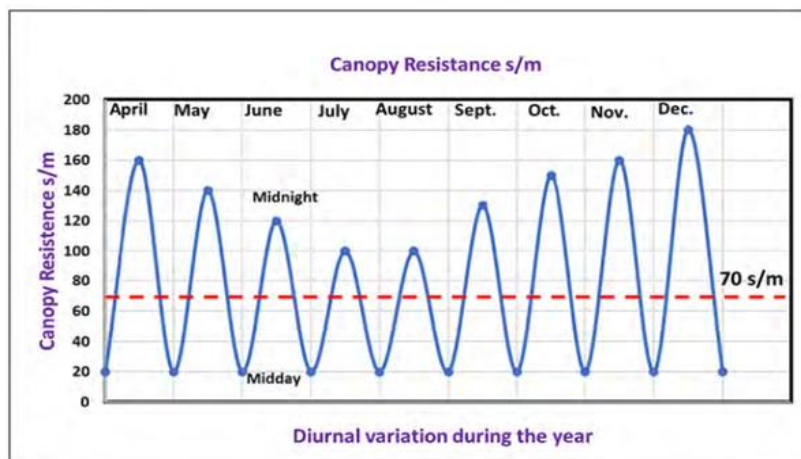
که در آن  $ET_0 (= \lambda ET_p)$  تبخیرتغرق مرجع (میلی‌متر در روز)،  $r_a$  و  $r_s$  مقاومت سطح توده و مقاومت آیرودینامیکی (s/m)،  $R_n$  تابش خالص (MJ/m<sup>2</sup>.day)،  $G$  شار حرارتی خاک (MJ/m<sup>2</sup>.day)،  $T$  میانگین دمای روزانه هوا در ارتفاع ۲ متری (درجه سانتیگراد)،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع (kPa بر درجه سانتیگراد)،  $\gamma$  ثابت سایکرومتریک (معادل ۶۶ Pa بر درجه سانتیگراد)،  $e_s$  فشار بخار اشباع در دمای هوا (kPa)،  $e_a$  فشار بخار واقعی (kPa)،  $U_2$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (m/s).  $ET_0$  محاسبه شده در اینجا برای چمن سبز کوتاه و بخوبی آبیاری شده است (یک چمن با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و آلبيدو ۰/۲۳). معادله پنمن-مانتیت یک معادله منحصر به فرد بود زیرا به جای تمرکز صرف بر داده‌های آب و هوایی (تابش و دما) برای تعیین  $ET$ ، حضور گیاه را نیز در نظر می‌گرفت. با این حال، دشواری در بدست آوردن پارامتر گیاه (مقاومت تاج) آن را در کاربرد عمدتاً محدود به پژوهشگران دانشگاهی کرد. Allen و همکاران (۱۹۹۸) با همکاری فائو و کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی (ICID)، تلاش کردند معادله پنمن-مانتیت را با فرض مقاومت تاج پوشش گیاهی  $r_s = 70 \text{ s/m}$ ، به عنوان میانگین مقدار فصلی برای محصولات کشاورزی، ساده کنند. این ساده‌سازی منجر به معادله اصلاح‌شده پنمن-مانتیت شد. با این حال، استفاده از میانگین حسابی مقاومت فصلی تاج یا روزنه که شکل تابع موج سینوسی به خود می‌گیرد، احتمالاً باعث عدم دقت در

تخمین  $ET_c$  می‌شود. مقاومت تاج پوشش گیاهی (و روزنه)،  $r_s$  در نیمه شب حداکثر است (تا تلفات آب از گیاه در طول شب به حداقل برسد)؛ و این مقاومت در ظهر کمترین مقدار را دارد (تا جذب  $CO_2$  و تابش برای فتوسنتز و تولید زیست توده به حداکثر برسد). این وضعیت در شکل (a-1) نشان داده شده است. همچنین مشخص شد که  $r_s$  در طول فصول

تغییر می‌کند (شکل b-1)، که در آن طول روز و دوره نوری بر مقاومت تاج پوشش تأثیر می‌گذارد. هرچه طول روز و دوره نوری طولانی‌تر باشد، مقاومت تاج پوشش کمتر است، یعنی مقاومت در تابستان کم است و از پاییز تا زمستان که طول روز و دوره نوری کوتاه‌تر می‌شوند، مقاومت افزایش می‌یابد.



(a)



(b)

شکل ۱- (a) تغییرات روزانه مقاومت تاج پوشش. (b) تغییرات روزانه و فصلی مقاومت تاج پوشش (در نیمکره شمالی). خط چین قرمز نشان‌دهنده میانگین مقاومت فصلی تاج پوشش (۷۰ ثانیه بر متر مربع) است که در معادله اصلاح شده فائو پنمن-مانتیت استفاده شده است.

(۲۰۲۰) اندازه‌گیری‌های شار ایدی کوواریانس دو ساله را در بالای یک جنگل درختان سرو تجزیه و تحلیل کردند. آنها مقاومت تاج گیاهی را در حدود ۱۹۰ ثانیه بر متر مربع برای دو فصل گرم و مقاومت تاج پوشش گیاهی را در حدود ۶۷۰ و ۳۲۰ ثانیه بر متر مربع برای دو فصل سرد مشاهده کردند. Hsieh و همکاران (۲۰۲۳) اندازه‌گیری‌های  $ET$  را با استفاده از روش ایدی کوواریانس در سه مکان انجام دادند: یک علفزار در ایرلند جنوبی، یک جنگل سرو در شمال تایوان و یک جنگل کرپتومریا در مرکز تایوان. آنها دریافتند که میانگین مقاومت تاج پوشش گیاهی برای علفزار، جنگل سرو و جنگل کرپتومریا به ترتیب ۱۶۳، ۳۴۶ و ۳۲۱ ثانیه بر متر مربع بود. آنها متوجه شدند که برای علفزار، مقاومت تاج پوشش گیاهی

روندهای مشابهی با آنچه در شکل (۱) ارائه شده است، توسط Han و همکاران (۲۰۲۲) گزارش شده است. تغییرات روزانه در رسانایی روزنه، صرف نظر از دوره رشد، معمولاً به دلیل وابستگی به تابش خورشیدی، مقادیر کمتری را در صبح و عصر و مقادیر بیشتری را در ظهر نشان می‌دهد. نتایج Zheng و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که مقاومت روزانه تاج تاکستان‌ها در طول دو فصل رشد بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ ثانیه بر متر مربع حفظ شده است. آنها همچنین دریافتند که معادله اصلاح شده پنمن-مانتیت، تعرق را در مرحله اولیه رشد بیش از حد و در مراحل میانی و پایانی رشد، کمتر از حد تخمین زده است. مقاومت تاج در مرحله اولیه رشد به طور قابل توجهی بالاتر از مرحله میانی و پایانی رشد بود. Lin و همکاران

گیاهی Kc کمتر از مقادیر گزارش شده توسط Allen و همکاران (۱۹۹۸) بود. مقادیر بالای ETo و Kc محاسبه شده منجر به بیش‌برآورد CWR محصول سیب‌زمینی در هند در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده گردید. همچنین Amayreh و AlAbed (۲۰۰۵) از اِدی کوواریانس برای تخمین Kc و ETo گوجه‌فرنگی آبیاری قطره‌ای در دره اردن استفاده کردند. سپس Kc به عنوان نسبتی بین ETo و ETo حاصل از نسخه اصلاح‌شده پنمن-مانتیت محاسبه شد. آنها دریافتند که مقادیر Kc بدست آمده با استفاده از اِدی کوواریانس بطور متوسط ۳۶٪ کمتر از مقادیر گزارش شده توسط پنمن-مانتیت اصلاح شده بود. بدیهی است مقادیر بالاتر Kc منجر به تخمین بیش از حد CWR محصول گوجه‌فرنگی می‌شود. در پرتغال Paço و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از اِدی کوواریانس، تبخیر-تعرق را در یک باغ ۳-۴ ساله اندازه‌گیری کردند. آنها گزارش دادند که معادله پنمن-مانتیت اصلاح شده در مقایسه با اِدی کوواریانس، ETo را بیش از حد تخمین می‌زند.

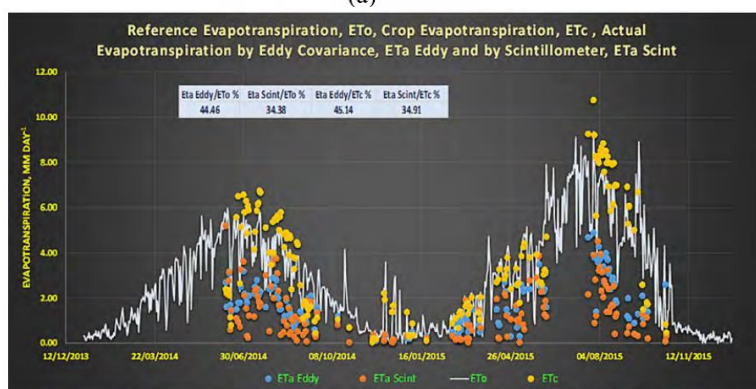
در اوایل صبح بیشتر بود و سپس در ساعت ۱۲:۰۰ به کمترین مقدار خود یعنی حدود ۱۵۰ ثانیه بر متر مربع کاهش یافت و سپس این مقدار را تا ساعت ۱۸:۰۰ حفظ کرد.

از شکل (۱-ب) مشخص است که مقدار ثابت فرض شده برای مقاومت تاج پوشش گیاهی ۷۰ ثانیه بر متر مربع، تقریبی غیرواقعی از روند روزانه و فصلی مقاومت تاج پوشش است. بدیهی است که بهتر بود مقاومت با معادله موج سینوسی نشان داده می‌شد. لذا انتظار می‌رود این تقریب خام، عدم دقت زیادی در محاسبات ET ایجاد کند. بطور کلی می‌توان موج سینوسی را با استفاده از تابع  $y = a * \sin(bx)$  توصیف کرد، که در آن a به عنوان دامنه موج سینوسی و b به عنوان تناوب شناخته می‌شود.

Panda و Kashyap (۲۰۰۱) دریافتند که ETo به دست آمده با روش‌های مختلف از جمله Penman-Monteith، FAO، Turc و Blaney-Criddle، Hargreaves، Penman بالاتر از ETo به دست آمده از لایسیمترها بود. علاوه بر این، آنها همچنین گزارش دادند که مقادیر اندازه‌گیری شده ضریب



(a)



(b)

شکل ۲- (a) ابزار دقیق میدانی برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی (ETa) اندازه‌گیری شده توسط اِدی کوواریانس و سنتیلومتر SMD اندازه‌گیری شده توسط COSMOS<sup>۲</sup> در مزرعه آزمایشی نزدیک بولونیا، ایتالیا. (b) مقایسه بین ETa اندازه‌گیری شده توسط اِدی کوواریانس و سنتیلومتر، تبخیر و تعرق مرجع (ETo) تخمین زده شده از معادله پنمن-مانتیت و تبخیر و تعرق محصول (ETc) محاسبه شده از ETo و میانگین وزنی ضریب گیاهی Kc (Ragab و همکاران، ۲۰۱۷)

در مطالعه Ragab و همکاران (۲۰۱۷a, ۲۰۱۷b)، با استفاده از اِدی کوواریانس و یک سنتیلومتر (شکل ۲-ا) در یک سایت آزمایشی در شمال ایتالیا، مشخص شد که ETo و ETc بدست آمده با معادله اصلاح شده پنمن-مانتیت، مقادیر بالاتری نسبت به ET واقعی بدست آمده با اِدی کوواریانس و سنتیلومتر دارد. نتایج (شکل ۲-ب) نشان می‌دهد که بطور متوسط، ET واقعی اِدی کوواریانس و سنتیلومترها برای فصل‌های زراعی ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ به ترتیب برابر با ۴۵٪ و ۳۵٪ مقادیر بدست آمده از معادله اصلاح شده پنمن-مانتیت را نشان می‌دهد؛ که تفاوتی فاحش است!

### نتیجه‌گیری

استفاده از کم‌آبیری به عنوان درصدی از ET پتانسیل صحیح نیست. برخی از روش‌ها و معادلات منجر به تخمین بیش از حد CWR می‌شوند؛ و به همین دلیل است که برخی از محققان توانسته‌اند با درصد کاهش یافته قابل توجهی از آبیاری کامل (مثلاً ۵۰٪) به عملکردی مشابه آبیاری کامل دست یابند. کم‌آبیری واقعی باید کسری یا درصدی از ET واقعی را نشان دهد که به طور قابل اعتمادی اندازه‌گیری یا محاسبه شده باشد؛ و البته در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها کالیبره شده باشد. معادلاتی که فقط بر اساس داده‌های هواشناسی برای برآورد مقادیر ET هستند، باید در مقایسه با مقادیر ET اندازه‌گیری شده کالیبره شوند. معادله اصلاح‌شده پنمن-موننتیت (Allen و همکاران، ۱۹۹۸)، همانطور که توسط چندین دانشمند گزارش شده است، ET را به دلیل مقدار کم فرض شده برای مقاومت تاج (۷۰ ثانیه بر متر مربع) بسیار بیش از حد تخمین می‌زند. همچنین باید توجه داشت که این مقدار فرضی ثابت، منعکس کننده تغییرات روزانه یا فصلی نیست. حتی به نظر نمی‌رسد میانگین حسابی مقاومت تاج در طول فصل، نماینده خوبی از روند موج سینوسی مقاومت تاج باشد. با توجه به اینکه معادله اصلاح‌شده پنمن-موننتیت فائو ۲۵ سال قدمت دارد و در سال‌های گذشته چندین ارزیابی روی آن انجام شده است که

ثابت کرده این معادله تبخیر و تعرق را به طور دقیق تخمین نمی‌زند، زمان آن رسیده است که راهکار تخمین خام مقاومت تاج دوباره بررسی گردد. این مقدار باید توسط FAO و ICID اصلاح شود تا با مقادیر پویاتر، واقع‌بینانه‌تر و از نظر فیزیکی صحیح‌تر که نشان‌دهنده تغییرات روزانه و فصلی هستند، جایگزین شود. از آنجایی که این پارامتر بخشی از اندازه‌گیری‌های میدانی معمول نیست و بیشتر توسط محققان اندازه‌گیری می‌شود، باید یک پایگاه داده که این مقادیر را برای گونه‌های مختلف فهرست می‌کند، ایجاد گردد تا لاقل بعنوان یک جدول برای میانمایی استفاده شود. یک «تابع دینامیکی ساده» یا «مقدار مقاومت تاج مبتنی بر مرحله رشد» (مشابه منحنی KC) بعنوان تقریب خام به همراه یک جدول مرجع، می‌تواند اولین قدم به جلو باشد. علاوه بر این و از طرف دیگر، باید در نظر داشت که محاسبه ETo یا ETc صرفاً بر اساس داده‌های هواشناسی، بدون در نظر گرفتن گیاه، می‌تواند ET پتانسیل بدست دهد که نشان‌دهنده تقاضای جوی برای آب باشد، نه تقاضای گیاه برای آب. بدیهی است که CWR دقیق (ETa) بر اساس شرایط و نیاز گیاه بدست می‌آید، و نه بر اساس تقاضای جوی برای آب.

### مسئله ۲- کژفهمی: تفاوت بین WUE و WP

برخی از متخصصان هنوز از «بازده کاربرد آب» (WUE)<sup>۸</sup> و «بهره‌وری آب» (WP)<sup>۹</sup> بجای یکدیگر استفاده می‌کنند. این یک تصور غلط است. نباید بین معانی مختلف این دو اصطلاح سردرگمی وجود داشته باشد. در دهه ۱۹۶۰، نویسندگان تمایل داشتند از «بازده کاربرد آب» برای توصیف «بهره‌وری آب» استفاده کنند. از اوایل دهه ۱۹۸۰، مجلات معتبر، دیگر مقالاتی که در آنها «بازده کاربرد آب» و «بهره‌وری آب» به درستی استفاده نشده باشند را نمی‌پذیرند. در بخش بعدی تعریف WUE و WP و نحوه استفاده از آنها برای عدم اشتباه گرفتن بین دو عبارت، آمده است.

### بازده آبیاری

بازده (راندمان) آبیاری اجزای مختلفی دارد:

|                                                                                                                                                                                 |                |                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|
| نسبت بین حجم آب منتقل شده برای آبیاری (Vd) و حجم آب ورودی به مخزن ذخیره (Ve) برای همان هدف                                                                                      | $Es = Vd / Ve$ | ۱: بازده ذخیره‌سازی  |
| نسبت بین حجم آب تحویل داده شده به قطعات آبیاری (Vp) و حجم آب منتقل شده از منبع تأمین (Vd)                                                                                       | $Ec = Vp / Vd$ | ۲: بازده انتقال      |
| نسبت بین حجم آب استفاده شده توسط گیاهان در طول فرآیند تبخیر و تعرق (Vu) و حجمی که به قطعه آبیاری می‌رسد (Vp)                                                                    | $Eu = Vu / Vp$ | ۳: بازده مصرف آبیاری |
| $efficiency\ of\ any\ process = (useful\ output / total\ input) * 100$                                                                                                          |                |                      |
| توجه: Vu برابر است با حجم تبخیر و تعرق توسط گیاهان منهای حجم بارندگی مؤثر؛ و همچنین توجه داشته باشید که بازده واحد ندارد (بدون بعد است)، زیرا نسبت دو عدد با واحدهای یکسان است. |                |                      |



برعکس. بنابراین افزایش WP به دنبال افزایش WUE و سایر انواع کارایی (performance)، مانند کنترل آفات و بیماری‌ها، کنترل علف‌های هرز، کوددهی مناسب و ... رخ می‌دهد.

### مسئله ۳- کژفهمی: نیازی به بهبود بازده آبیاری نیست زیرا آنچه در بالادست از دست می‌رود، در پایین دست به دست می‌آید

مفهومی که ادعا می‌کند «نیازی به بهبود کارایی آبیاری نیست، زیرا آنچه در بالادست از دست می‌رود در پایین دست جبران خواهد شد»، هیدرولوژی، شرایط محیطی و زمین‌شناسی لایه‌های زیرسطحی حوضه‌های آبریز را نادیده می‌گیرد. همچنین این موضوع را نادیده می‌گیرد که آیا حوضه در منطقه خشک، نیمه‌خشک یا مرطوب قرار دارد یا خیر. بعلاوه، تا حد زیادی ناپیوستگی احتمالی جریان‌های زیرسطحی بین بالادست و پایین دست را به دلیل تغییرات زمین‌شناسی و وجود شکستگی‌ها نادیده می‌گیرد.

همچنین این مفهوم با توسعه سیستم‌ها و استراتژی‌های آبیاری کارآمد برای صرفه‌جویی در آب مانند نانو آبیاری، آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، نیم‌آبیاری<sup>۱</sup>، آبیاری با متغیر نرخ<sup>۱</sup> و سنتریپوت با نازل کم-ارتفاع، خشک-کاشتی برنج و یا آبیاری قطره‌ای برنج، همخوانی ندارد.

این دیدگاه فرض می‌کند که لایه‌های زیرسطحی همگن هستند و هیچ مانع، شکستگی یا تغییری در زمین‌شناسی وجود ندارد. با این حال، آنچه در بالادست از دست می‌رود ممکن است در پایین دست ظاهر نشود. حتی اگر در پایین دست جبران شود، این جبران یا به صورت فوری نبوده یا با همان مقدار معادل نیست و یا به دلیل شست‌وشوی نمک‌ها و مواد شیمیایی کشاورزی از بالادست به پایین دست، از همان کیفیت برخوردار نخواهد بود.

از نظر هیدرولوژی، جریان زیرسطحی معمولاً فقط زمانی ایجاد می‌شود که لایه خاک زیرسطحی اشباع شده باشد. اشباع لایه‌های زیرسطحی در مناطق خشک یا نیمه‌خشک ممکن است اتفاق نیفتد، مگر در مواقع بارش زیاد. در مناطقی با آب‌های زیرزمینی عمیق، آب از دست رفته در اثر آبیاری ناکارآمد، ممکن است به دلایل متعدد در نیمه‌راه آبخوان، به مصرف دیگری رسیده باشد و هرگز به آبخوان ملحق نشود.

علاوه بر این، ناپیوستگی جریان زیرسطحی به دلیل شکستگی‌ها و زمین‌شناسی ناهمگن می‌تواند جریان زیرسطحی را مختل کرده و مانعی برای حرکت افقی آب به پایین دست ایجاد کند (شکل ۳-۱b). آزمایش‌های هیدرولیکی (آزمایش‌های پمپاژ) در چندین گمانه از یک حوضه رودخانه (در فلات بنگلور) در حوضه کاوری، جنوب هند انجام شد. آزمایش‌های پمپاژ ۱۸ ساعته، مرزهای «بدون جریان» را نشان دادند، زیرا سطح آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای در نزدیکی

بازده کاربرد آب (WUE) در کشاورزی یعنی چه درصدی از آبی که به گیاه داده می‌شود، بطور مؤثر توسط گیاه جذب و تعرق می‌شود (یا به عبارت دیگر یعنی آبی که به دلیل زهکشی، نفوذ عمقی، تبخیر از خاک لخت یا هرزآب از دست نمی‌رود). اگر، به عنوان مثال، ۱۰ میلی‌متر آب به گیاه داده شود و گیاه فقط ۸ میلی‌متر را از طریق جذب آب توسط ریشه استفاده کند (این مقدار صرف تعرق شود)؛ و ۲ میلی‌متر آب باقیمانده از طریق زهکشی زیر ناحیه ریشه یا از طریق تبخیر از سطح خاک لخت از دست می‌رود، آنگاه بازده کاربرد آب ۸۰٪ خواهد بود.

### بهره‌وری آب

بهره‌وری یعنی «چه مقدار ستانده به ازای یک واحد نهاده، تولید می‌شود» (Molden و همکاران، ۲۰۱۰). توجه داشته باشید که ورودی و خروجی نیازی به واحدهای یکسان ندارند. بهره‌وری آب کشاورزی بعنوان عملکرد (محصول تولید شده: حاصل مفید برای منظور کشاورز از کاشت گیاه) به ازای هر واحد آب داده شده تعریف می‌شود؛ به عنوان مثال، ۵۰ کیلوگرم غلات به ازای هر ۱ متر مکعب آب. با برجسته شدن محدودیت منابع آب در دهه‌های اخیر، کشاورزی مدرن به دنبال افزایش «عملکرد تولید به ازای هر واحد آب مصرفی»، چه در شرایط دیم و چه در شرایط آبی، بوده است.

برخلاف WUE، بهره‌وری می‌تواند به مزایای کاربرد چند منظوره آب نیز اشاره داشته باشد. بعنوان مثال، افرادی که از آب هم برای آبیاری و هم برای شیلالت استفاده می‌کنند، مانند مزارع تولید ترکیبی برنج و میگو، به وضوح با افزایش بهره‌وری آب، نه لزوماً با افزایش WUE، به معیشت خود و اقتصاد منطقه کمک می‌کنند. در واقع بهره‌وری به تمامی مزایای حاصل از کاربرد آب (درآمد، شغل، تولید محصول) به نسبت حجم آب استفاده شده اشاره دارد. بهره‌وری بیانگر خروجی «زیستی-اقتصادی» حاصل از مقدار ناخالص آب مصرفی است. لذا برخلاف کارایی مصرف آب (WUE)، بهره‌وری آب (WP) را می‌توان به روش‌های مختلفی مانند عملکرد بر حسب تن بر متر مکعب، درآمد بر حسب دلار بر متر مکعب، مقدار پروتئین بر حسب گرم بر متر مکعب، کالری‌های غذا بر متر مکعب نیز بیان کرد. جزئیات بیشتر را در یادداشتی که به صورت آنلاین (Ragab 2014) بعنوان بخشی از پروژه Water4Crops منتشر شده است، بخوانید. متن مزبور را می‌توانید در این آدرس زیر بیابید: <https://www.google.com/search?q=Ragab++A+note+on+water+use+efficiency+and+productivity>

### نتیجه‌گیری

واضح است که هر دو اصطلاح WUE و WP در واقعیت وجود دارند؛ و علی‌رغم معانی متفاوت، به هم مرتبط هستند. بعنوان نمونه، برای افزایش WP، WUE باید افزایش یابد؛ و نه

دست رفته است، در دسترس نخواهد بود؛ علاوه بر اینکه مقدار و کیفیت آب بالادست در پایین دست نخواهد شد. در هر حال باید «سیاست افزایش کارایی کاربرد آب و صرفه‌جویی در کاربرد آب در هر مقیاسی، از مزرعه تا حوضه» اتخاذ گردد. بدیهی است از منظر هیدرولوژیک و در مقیاس حوضه، باید به تعارض تخصیص‌های بالادست و پایین‌دست توجه گردد.

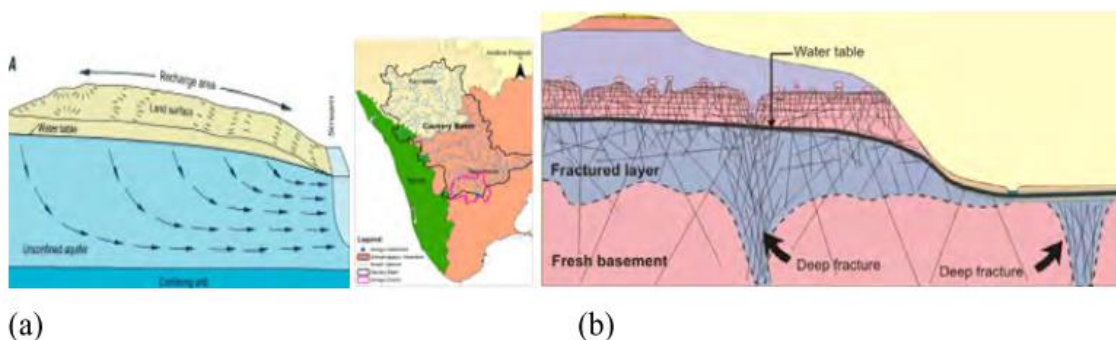
#### مسئله ۴- کژفهمی: معنای واقعی عناصر حسابداری آب

ایده حسابداری آب، ابتدا برای برنامه‌ریزی منابع آب مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، حسابداری آب در چرخه هیدرولوژیکی می‌تواند با مشکلات متعددی روبرو شود، بویژه که برخی از اجزاء و مولفه‌های حسابداری آب، توسط متخصصان غیر هیدرولوژی، به اشتباه درک می‌شوند. شکل (۴) عناصر بیلان آب را نشان می‌دهد.

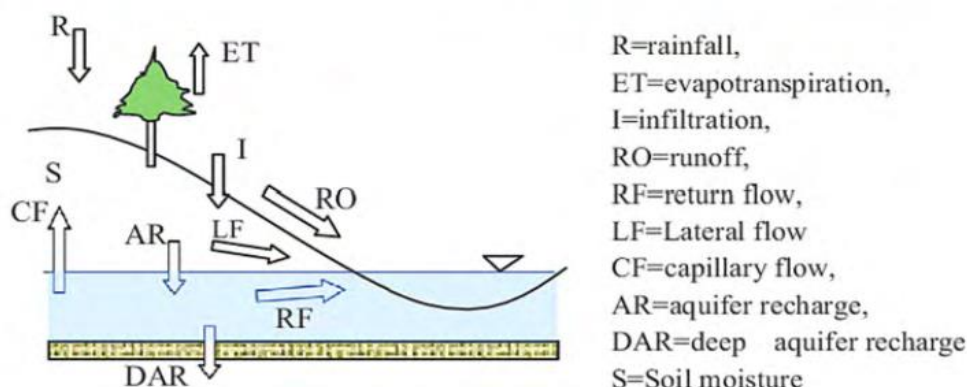
گمانه آزمایش پمپاژ، تغییر نکرد (Maréchal و همکاران، ۲۰۰۹). آنها همچنین دریافتند که سطح ایستابی همیشه از رودخانه جدا است. این امر با مشاهدات مبتنی بر عدم وجود چشمه‌ها در حوضه رودخانه و عدم وجود جریان پایه قابل اندازه‌گیری، تأیید می‌شود. در چنین سیستم دارای شکستگی، تغذیه موضعی از طریق شکستگی‌ها را نمی‌توان نادیده گرفت. وجود شکستگی‌ها (شکل ۳-ب) به عنوان یک مانع زیرزمینی عمل می‌کند. با قطع شدن سفره آب زیرزمینی، هیچ برگشتی به پایین دست از طریق جریان پایه رودخانه وجود ندارد (Maréchal و همکاران، ۲۰۰۹).

#### نتیجه‌گیری

بطور کلی، کارایی مصرف آب در مقیاس مزرعه و حوضه رودخانه باید بدون توجه به فرض «آنچه در بالادست از دست می‌رود در پایین‌دست به دست می‌آید»، بهبود یابد؛ زیرا ممکن است این فرض اصلاً رخ ندهد. حتی اگر این اتفاق بیفتد، آب از دست رفته در پایین‌دست در همان زمانی که از



شکل ۳- (a) موقعیت فرضی که در آن زمین‌شناسی زیرسطحی همگن ایده‌آل، جریان زیرسطحی از بالادست به پایین دست را تسهیل می‌کند. (b) موقعیت واقعی در حوضه کآوری هند، با لایه‌های زیرسطحی دارای شکستگی که مانع انتقال نفوذ عمقی از بالادست به پایین دست می‌شوند (Maréchal و همکاران، ۲۰۰۹).



شکل ۴- اجزاء بیلان آب حوضه

محدوده و مدت دوره بیلان، باید دقت اجزاء معادله بیلان افزایش یابد در مقیاس حوضه و سال، دقت کمتر؛ و در مقیاس منطقه ریشه گیاه و روز، دقت بسیار بیشتر مورد نیاز

بیلان آب یعنی: «نرخ تغییر در ذخایر آب حوضه ( $\Delta S$ )»، برابر است با «نرخ جریان ورودی آب به حوضه (I)» منهای «نرخ جریان خروجی آب از حوضه (O)». با خردتر شدن وسعت

## مسئله ۵- کژباوری: با سنجش از دور می‌توان مستقیماً CWR را اندازه‌گیری نمود

در حال حاضر، تصاویر ماهواره‌ای به طور گسترده برای کاربردهای مختلفی در دسترس هستند. برخی از این تصاویر برای فعالیت‌های کشاورزی مفید هستند و برای به دست آوردن توزیع مکانی ET، رطوبت خاک، شاخص سطح برگ (LAI)، زیست توده، پوشش زمین و سطح تنش آبی گیاهان استفاده می‌شوند. با این حال، باید توجه نمود که این پارامترهای حاصل از سنجش از دور، مبتنی بر اندازه‌گیری مستقیم نیستند. بعنوان مثال، ET یا رطوبت خاک از تبدیل/پردازش سایر پارامترهای سنجش از دور (مانند دما) بدست می‌آید. فرآیند تبدیل شامل الگوریتم‌ها، مدل‌ها و معادلات تجربی است.

در طول این فرآیند تبدیل/پردازش، از برخی تقریب‌ها و فرضیات برای به دست آوردن نتایج معنادار استفاده می‌شود. این فرآیند می‌تواند منجر به درجه خاصی از بی‌دقتی و رشد عدم قطعیت در نتایج شود؛ لذا لازم است در برابر داده‌های واقعی زمینی کالیبره شود. همچنین، این کالیبراسیون اغلب در مقیاس کوچکتری انجام می‌شود؛ که خود این عدم تطابق بین مقیاس‌ها موجب رشد بیشتر بی‌دقتی و عدم قطعیت در اینگونه داده‌ها (حاصل از سنجش از دور) می‌شود. در این بخش علت عدم دقت برآوردهای تبخیرتعرق (ET) و کمبود رطوبت خاک (SMD) حاصل از سنجش از دور بررسی می‌شود.

### برآورد تبخیرتعرق از تصاویر ماهواره‌ای

دمای سطح زمین (LST) و طول زبری<sup>۱۲</sup> ( $Z_0$ ) در تصاویر ماهواره (سنجش از دور) برای محاسبه شار گرمای محسوس و نهان لحظه‌ای استفاده می‌شوند. تخمین مقاومت سطح، مسئله مهمی در اکثر مدل‌های برآورد سنجش از دور ET، به ویژه برای تخمین مقاومت‌های تاج گیاهان و آیرودینامیکی است. همچنین در بسیاری از روش‌های تجربی، داده‌های سنجش از دور مستقیماً در مدل‌های نیمه تجربی برای تخمین ET با استفاده از داده‌های مادون قرمز حرارتی (TIR) استفاده می‌شود. بعلاوه، میزان مصرف آب گیاه با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای براساس محاسبه اختلاف دمای تجمعی ( $T_s - T_a$ ) برآورد می‌گردد ( $T_s$  بدست آمده از LST و  $T_a$  دمای هوا بدست آمده از اندازه‌گیری‌های زمینی).

است.}. معادله زیر بیان بیلان محدوده ریشه گیاه است؛ که در آن P بارندگی {یا آبیاری}، R رواناب، G تغذیه آب‌های زیرزمینی (نفوذ عمقی) و ET تبخیرتعرق می‌باشند:

$$\Delta S = P - R - G - ET \quad (4)$$

### عوامل نادرستی حسابداری آب (در محدوده ریشه گیاهان)

P: بارشی که معمولاً در حسابداری آب استفاده می‌شود، کل بارش است؛ که شامل برگاب (خیس‌شدگی تاج گیاهان از بارش) نیز هست. برگاب می‌تواند قابل توجه باشد، به خصوص در مزارع با کشت متراکم و یا در جنگل‌ها. اما آنچه در بیلان باید استفاده شود، سهمی از بارش است که در سطح خاک برای نفوذ و/یا رواناب فراهم می‌شود؛ یعنی «بارش خالص» ( $P_{net} = P$ ) که معادل است با «بارش کل منهای برگاب». با این حال، اکثر متخصصان از کل بارندگی به جای بارندگی خالص استفاده می‌کنند. این امر منجر به تخمین بیش از حد ورودی اصلی به معادله تعادل آب/محاسبه آب می‌شود.

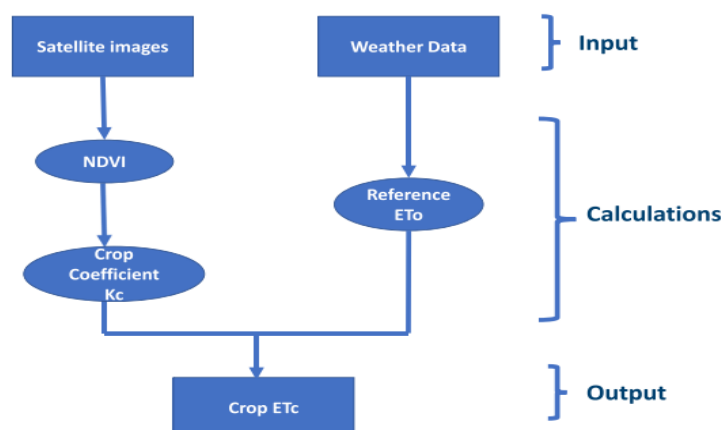
G: تعیین کمیت تغذیه آب‌های زیرزمینی (نفوذ عمقی بدون بازگشت) دشوار است. اکثر متخصصان، تغذیه آب‌های زیرزمینی را بعنوان پارامتر مجهول معادله تعادل آب یا به عنوان تفاوت بین بارندگی ناخالص و تبخیر و تعرق پتانسیل در نظر می‌گیرند، که نادرست است. روش‌های درست برای تعیین کمیت تغذیه شامل تعادل جرم کلرید، نوسانات آب‌های زیرزمینی، تحقیقات ژئوفیزیکی، آزمایش‌های پمپاژ و مدل‌های جریان آب‌های زیرزمینی است. اینها اندازه‌گیری‌های مستقیم نیستند؛ زیرا هیچ دستگاهی برای اندازه‌گیری تغذیه آب‌های زیرزمینی در دسترس نیست. تخمین نادرست تغذیه، تأثیر منفی بر دقت بیلان دارد.

ET: اغلب تبخیرتعرق برای معادله بیلان و حسابداری آب بر اساس تبخیرتعرق پتانسیل (PET) برآورد می‌شود؛ اما، آنچه باید استفاده شود ET واقعی است نه پتانسیل. در بیشتر مناطق خشک و نیمه‌خشک، تبخیرتعرق واقعی ( $ET_a$ ) بسیار پایین‌تر از PET است. حتی در مناطق مرطوب هم بین این دو تفاوت قابل توجه وجود دارد.

### نتیجه‌گیری

درک اشتباه و برآورد نادقیق از سه عنصر بارش، تبخیرتعرق و تغذیه آب‌های زیرزمینی، بویژه توسط غیر هیدرولوژیست‌ها، اشتباه در محاسبات حسابداری آب را در پی دارد. برآورد درست بارش خالص، تبخیرتعرق واقعی (نه پتانسیل) و نیز نفوذ عمقی در محدوده ریشه گیاه برای برنامه‌ریزی صحیح آبیاری (بر اساس حسابداری آب در منطقه ریشه) مورد نیاز است.





شکل ۵- مثالی از محاسبه غیرمستقیم تبخیرتعرق گیاهان با استفاده از داده‌های آب‌وهوا و داده‌های ماهواره‌ای «شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده» (NDVI)

رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه ( $\theta_{FC}$ ) بعنوان SMD (کمبود رطوبت خاک) شناخته می‌شود.

مقدار آبیاری که SMD را به صفر می‌رساند، محاسبه و بعنوان CWR معرفی می‌شود. اما، آیا می‌توان علی‌رغم عدم قطعیت پارامترهای آب و خاک (ناشی از تغییرات مکانی طبیعی: ناهمگنی‌های خاک، رطوبت خاک، توپوگرافی، پوشش زمین و بارندگی)، یک مقدار SMD را بعنوان نماینده مزرعه/منطقه معلوم و معرفی نمود؟

اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک، به ترتیب از مقیاس نقطه‌ای تا مقیاس بزرگتر شامل موارد مندرج در جدول (۱) و شکل (۶) است.

داده‌های ماهواره‌ای توزیع مکانی آلبیدو، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده تفاضلی (NDVI) و دمای سطح برای تخمین ET روزانه استفاده می‌شوند (شکل ۵)؛ اما برای کنترل صحت، نتایج باید با اندازه‌گیری‌های زمینی اعتبارسنجی متقابل شوند. نقش سرعت باد و تأثیر آن بر مقادیر ET باید به طور کامل بررسی شود، زیرا ممکن است بیشترین تأثیر را بر ET و قابلیت اطمینان روش‌های مبتنی بر ورودی‌های سنجنش از دور داشته باشد.

#### بدست آوردن SMD از داده‌های سنجنش از دور

گاهی اوقات از رطوبت خاک برای تخمین CWR استفاده می‌شود. اختلاف بین رطوبت موجود/واقعی خاک ( $\theta_i$ ) و

جدول ۱- روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک، در مقیاس نقطه‌ای تا مقیاس بزرگتر

| نمونه‌برداری خاک                                       | اندازه‌گیری نقطه‌ای، مستقیم، با تفاضل وزن خاک تر و خشک<br>نیازمند نمونه‌برداری از خاک (دست‌خورده و یا نمونه استوانه‌ای دست‌نخورده)          |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TDR                                                    |                                                                                                                                             |
| پروپ نوترون                                            | اندازه‌گیری نقطه‌ای، غیرمستقیم، در محل، دست‌نخورده، نیازمند واسنجی                                                                          |
| انواع محیط متخلخل<br>(بلوک گچی، پروپ پروفیل)           |                                                                                                                                             |
| توموگرافی مقاومت<br>الکترومغناطیسی (ERT)               | اندازه‌گیری، غیرمستقیم، در آزمایشگاه (کمی بزرگتر از نقطه‌ای)<br>نمونه با حجم بزرگ و دست‌نخورده، نیازمند واسنجی                              |
| پرتوهای کیهانی<br>(شعاع اندازه‌گیری $\approx 500$ متر) | اندازه‌گیری، غیرمستقیم، محدوده‌ای، نیازمند واسنجی                                                                                           |
| از تصاویر ماهواره                                      | اندازه‌گیری، غیرمستقیم، محدوده‌ای تا منطقه‌ای، نیازمند واسنجی<br>مقیاس وابسته به قدرت تفکیک تصویر، و مقیاس‌های خردتر نیازمند واسنجی دقیق‌تر |

بالای خاک (و برعکس) است. باید افزود که COSMOS غیرمخرب و کاملاً غیرفعال است. رطوبت خاک با این روش نقطه‌ای نیست؛ بلکه نماینده یک مساحت حدوداً ۱۰۰ هکتاری است ( $\approx$  یک کیلومتر مربع؛ محدوده‌ای با شعاع بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ متر). برآورد رطوبت خاک برای چنین مساحتی، البته نیاز به اندازه‌گیری‌ها در مقیاس نقطه‌ای را (به دلیل وجود ناهمگنی‌های احتمالی) برطرف نمی‌کند. تاکنون روش COSMOS با موفقیت بکار گرفته شده است که برای مثال

نمونه‌ای از نتایج بدست آمده توسط COSMOS در ادامه آمده است. در این سیستم، سرعت نوترون‌هایی که توسط پرتوهای کیهانی در هوا تولید می‌شوند، اندازه‌گیری می‌شود. نوترون‌های پرنرژی تولید شده توسط پرتوهای کیهانی توسط اتم‌های هیدروژن موجود در آب خاک کند و تا حدی جذب می‌شوند، در حالی که برخی از نوترون‌ها از خاک پراکنده شده و توسط سنجنده‌ها شمارش می‌شوند. تعداد کمتر نوترون‌های سریع شناسایی شده توسط کاوشگر، نشان‌دهنده رطوبت

علاوه بر این، رویکردهای دیگری مانند روش‌های «وارونه‌سازی» برای محاسبه رطوبت سطحی خاک از اندازه‌گیری‌های دمای سطح زمین (LST) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) توسعه یافته‌اند. با این حال، این روش‌ها دارای ضعف‌ها و خطاهایی بوده‌اند، زیرا با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری نقطه‌ای رطوبت خاک مانند نوترون‌متر، PR2، TDR، نمونه‌گیری از خاک یا سایر روش‌های مقیاس نقطه‌ای کالیبره شده‌اند. این موضوع نمونه‌ای روشن از عدم تطابق بین مقیاس‌های سنجش از دور و اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای است.

می‌توان به پژوهش Ragab و همکاران (2017b) اشاره نمود. این سامانه اکنون سراسر بریتانیا را پوشش می‌دهد و ایستگاه‌هایی نیز در بخش‌هایی از هند و چین مستقر شده‌اند که اخیراً در ۱۶ نوامبر ۲۰۲۳ توسط شبکه خبری بین‌المللی CNN گزارش شده است (لینک: <https://edition.cnn.com/world/cosmic-radiation-monitor-floods-droughtscn-spc/index.html>). همچنین پژوهشی که توسط انتشارات wiley به چاپ رسید، از COSMOS و سنتیلومتر استفاده شده است<sup>۱۳</sup>.



شکل ۶- روش‌های تعیین رطوبت در خاک

حرارتی است و نشان دهنده پایداری زمانی دمای مواد است. اینرسی حرارتی برای تخمین رطوبت خاک لایه زیرسطحی استفاده شده است، زیرا مقدار اینرسی حرارتی آب و سایر مواد به اندازه کافی با یکدیگر متفاوت است و از نظر تئوری می‌توان نشان داد که اینرسی حرارتی و محتوای آب خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری دارند. اینرسی حرارتی را می‌توان از یک مدل بیلان حرارتی با LST اندازه‌گیری شده توسط ماهواره‌های مدار قطبی و داده‌های هواشناسی، برآورد نمود.

#### سنجش از دور با امواج میکرو (Microwave)

طول موج‌های معمول، فقط چند سانتی‌متر بالای آب خاک و آب تاج گیاهان را مشاهده می‌کنند (و نه تمامی پروفیل خاک را). در رویکردهای برآورد رطوبت خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های رادیومتری مایکروویو، مهم‌ترین عاملی که بر دقت تأثیر می‌گذارد، پوشش گیاهی (بویژه پوشش گیاهی متراکم مانند ذرت و جنگل) است. مایکروویوهای فعال به امواج برگشتی وابسته هستند و این به مقدار ثابت دی‌الکتریک خاک مربوط می‌شود. در مقابل، مایکروویوهای غیرفعال به تابش یا دمای روشنایی وابسته هستند. مورد دوم به قابلیت انتشار و دمای فیزیکی بستگی دارد. اینرسی حرارتی، جذر حاصل ضرب ظرفیت گرمایی حجمی و رسانایی

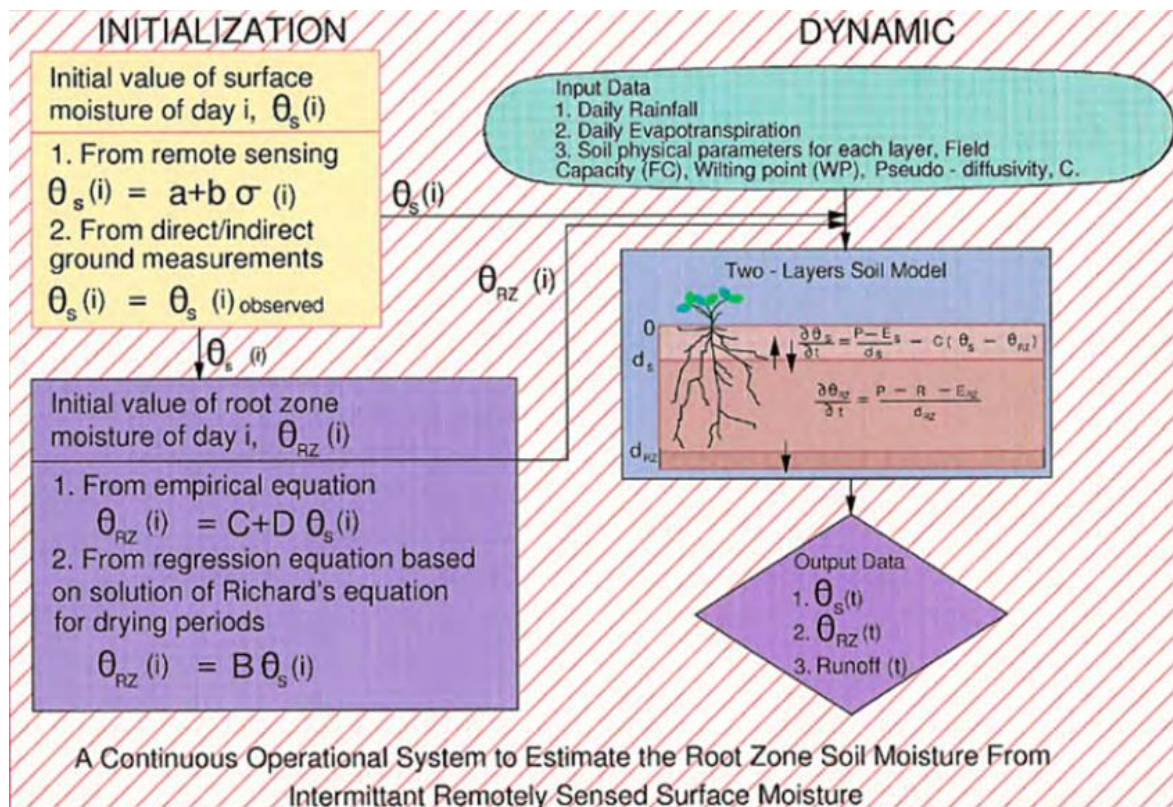


## مشکلات و محدودیت‌های مقیاس ET و SMD در سنجش از دور

عدم تطابق مقیاس بین داده‌های سنجش از دور در مقیاس بزرگ، و اندازه‌گیری‌های میدانی تبخیرتعرق یا رطوبت خاک در مقیاس نقطه‌ای، یک چالش جدی در کالیبراسیون محصولات سنجش از دور است. محصولات سنجش از دور (مانند تبخیرتعرق یا رطوبت خاک) در مقیاس بزرگ، معمولاً با کاربرد الگوریتم‌ها، معادلات تجربی و مدل‌ها بدست می‌آیند. در طول این فرآیند، تقریب‌ها و فرضیاتی وجود دارد که سطح دیگری از عدم قطعیت و بی‌دقتی را ایجاد می‌کند. محدودیت دیگر، رطوبت خاک سنجش از دور است که حداکثر به عمق ۱۰ تا ۱۲ سانتی‌متر بالایی خاک محدود می‌شود. در حالیکه برآورد SMD/CWR برای آبیاری به رطوبت خاک منطقه ریشه نیاز دارد. به منظور تخمین رطوبت خاک زیرسطحی (منطقه ریشه) مدلی با استفاده از رطوبت خاک سنجش از دور (در لایه بالایی) توسعه یافته است (شکل ۸) که در بریتانیا و ایالات متحده واسنجی و اعتبارسنجی شده است.

## نتیجه‌گیری

محصولات سنجش از دور رطوبت خاک یا ET در مقیاس بزرگ، مبتنی بر اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم هستند و نیاز به کالیبره شدن دارند. معمولاً داده‌های دما به ET تبدیل می‌شوند و داده‌های ضرایب پراکندگی برگشتی/ثابت دی‌الکتریک (مبتنی بر مایکروویو) به رطوبت خاک تبدیل می‌شوند. روش‌ها/مدل‌ها/آلگوریتم‌های تولید محصولات سنجش از دور (ET و SMD)، سهم عمده‌ای در بی‌دقتی و عدم قطعیت نتایج بدست آمده از فناوری سنجش از دور دارند. استفاده از اندازه‌گیری‌های واقعی ET در مقیاس بزرگ با استفاده از سنتیلومترها (تا ۱۰ کیلومتر) و COSMOS (منطقه شعاع ۳۰۰-۷۰۰) به ترتیب برای واسنجی ET و رطوبت خاک می‌تواند عدم قطعیت و بی‌دقتی این محصولات سنجش از دور را کاهش دهد. لذا نتایج حاصل را برای برنامه‌ریزی آبیاری بطور کلی نامناسب سازد. روش ارائه شده در شکل ۸، تا حدودی برخی از این ایرادها را تعدیل می‌کند.



شکل ۸- پیش‌بینی رطوبت خاک لایه زیرسطحی با استفاده از داده‌های سنجش از دور لایه بالایی (Ragab, ۱۹۹۵)

این حال، شوری مزرعه را نمی‌توان به طور دقیق با این روش‌ها (بویژه روش‌های آزمایشگاهی) اندازه‌گیری کرد. شوری بیان شده به عنوان رسانایی الکتریکی (EC) که در آزمایشگاه با استفاده از عصاره خمیر اشباع (ECe) اندازه‌گیری می‌شود، نشان دهنده شوری مزرعه نیست؛ زیرا رطوبت خاک مزرعه در آزمایشگاه تغییر می‌کند. شوری مزرعه با رطوبت خاک که

## مسئله ۶ الف- کژباوری: شوری مزرعه در آزمایشگاه قابل اندازه‌گیری دقیق است

شوری خاک در مزرعه، با استفاده از روش‌های مختلف (از جمله حسگرهای شوری درجا، یا با نمونه‌گیری از خاک و سپس تعیین شوری در آزمایشگاه) قابل اندازه‌گیری است. با

## مسئله ۶ ب- کژفهمی: آبتشویی ثابت در هر آبیاری

بطور کلاسیک، و در متون درسی، کسر آبتشویی باید به هر آبیاری افزوده شود. بسیاری از متخصصان آبیاری هم بطور خودکار کسر آبتشویی را در کل نیاز آبیاری اضافه لحاظ می کنند. حتی از آن هم ضعیف تر اینکه برخی از متخصصان مقدار ثابتی، مانند ۱۵٪ آب اضافی در هر آبیاری به عنوان کسر آبتشویی، صرف نظر از سطح شوری خاک یا سطح تحمل محصول و بدون نظارت بر شوری خاک، اضافه می کنند. ظاهراً منظور ایشان، اقدام پیشگیرانه است! با این حال، راه های بهتری برای جلوگیری از تجمع نمک در منطقه ریشه و مهار شوری خاک وجود دارد. این موضوع در زیر مورد کنکاش قرار گرفته است.

کسر آبتشویی معمولاً براساس نسبت شوری آب آبیاری به شوری آب زهکشی یا شوری خاک منطقه ریشه محاسبه می شود. با این حال همانطور که قبلاً توضیح داده شد، شوری منطقه ریشه اگر در آزمایشگاه اندازه گیری شود، ممکن است نماینده شوری مزرعه نباشد و می تواند منجر به برآورد نادرست کسر آبتشویی شود. رایج ترین معادله برای CWR که شامل کسر آبتشویی نیز هست، عبارت است از:

$$IR = [K_c \times ET_0] / E_i - R + LR \quad (6)$$

که در آن IR نیاز آبیاری، میلی متر؛  $ET_0$  تبخیر و تعرق مرجع، میلی متر؛  $K_c$  ضریب گیاهی (Allen و همکاران، ۱۹۹۸)؛  $E_i$  راندمان آبیاری، اعشار؛ R آب دریافتی گیاه از منابعی غیر از آبیاری (بعنوان نمونه: بارندگی)، میلی متر؛ و LR مقدار آب مورد نیاز برای آبتشویی نمک ها، میلی متر، هستند.

### کژفهمی در مورد زمان، چگونگی و میزان آبتشویی

**چه زمانی؟** آبتشویی تنها زمانی لازم است که شوری خاک از حد تحمل گیاه فراتر رود. در واقع، آبتشویی باید کمی قبل از وقوع این وضعیت انجام گیرد تا به گیاه تنش وارد نگردد.

**چگونه؟** در شرایطی که بازده (راندمان) آبیاری ضعیف باشد و در منطقه ای که وقوع گاهگاه بارش ها معمول است، استفاده از آب آبتشویی فقط بصورت فصلی توصیه می شود؛ و آبتشویی پس از هر آبیاری توصیه نمی شود، مگر اینکه در صورت عدم آبتشویی، شوری خاک از حد تحمل گیاه فراتر رود.

در شرایطی که آب آبیاری لب شور و آبیاری بی دقت باشد، افزودن آب بیشتر (بازده ضعیف، کاربرد نایجای آبتشویی) به معنای افزودن نمک بیشتر است؛ کاربرد مواد مغذی و کودها این وضعیت را پیچیده تر می کند. همچنین، افزودن آب بیشتر WP و WUE را کاهش می دهد. علاوه بر این، استفاده از آب برای آبتشویی، به معنای: آب کمتر برای آبیاری در محدودیت منابع آب؛ هدررفت منابع آب، نیروی کار، انرژی و پول و نیز افزایش حجم زهاب است. بنابراین برآورد دقیق CWR، بویژه هنگام آبیاری با آب های لب شور/شور، بسیار مهم است.

معمولاً کمتر از رطوبت اشباع است، مرتبط است. شوری خاک در مزرعه به تناسب کاهش رطوبت خاک، افزایش می یابد و لذا از آنچه در عصاره خمیر خاک اشباع اندازه گیری می شود، بیشتر است. به همین دلیل است که متخصصان دریافتند گیاهانی که در مزرعه رشد می کنند می توانند سطوح شوری بالاتری را نسبت به آنچه در چندین دستورالعمل گزارش شده است، تحمل کنند. دلیل این امر این است که دستورالعمل ها عمدتاً بر اساس مقدار « $E_{ce}$ » که به عنوان شوری عصاره خمیر خاک اشباع شناخته می شود، تدوین شده اند؛ که شوری رقیق شده و کمتر از شوری واقعی مزرعه در رطوبت های واقعی خاک مزرعه (پایین تر از اشباع) است.

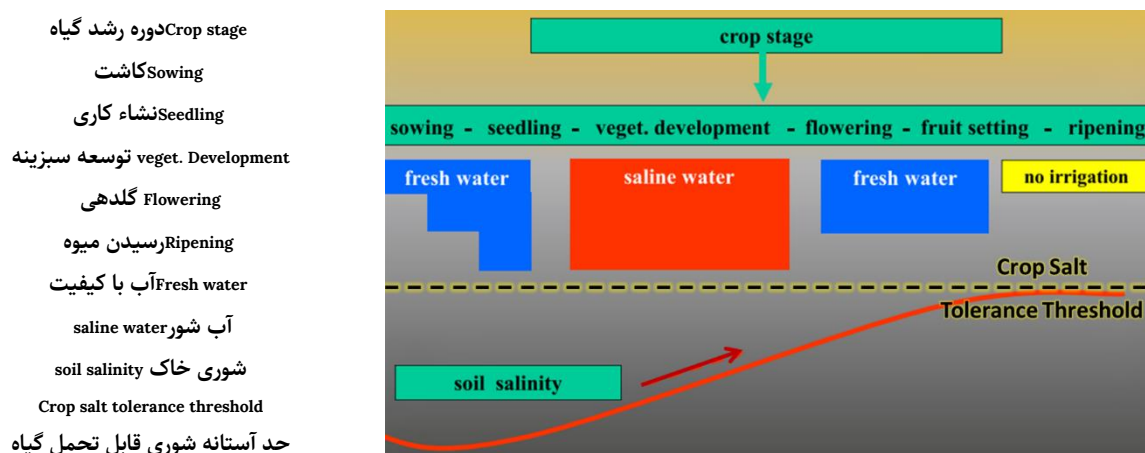
شوری و رطوبت خاک باید همزمان و در عمق یکسان اندازه گیری شوند. تلاش هایی برای معرفی یک ضریب اصلاحی بر اساس نسبت رطوبت خاک مزرعه به رطوبت اشباع خاک برای اصلاح مقادیر  $E_{ce}$  انجام یافته است. باید در نظر داشت که گیاهان در دامنه رطوبتی بین رطوبت خاک در حال پژمردگی ( $\theta_{wp}$ ) و نزدیک به رطوبت خاک اشباع ( $\theta_{fc}$ ) رشد می کنند. در این محدوده، شوری از کم در نقطه اشباع به زیاد در نقطه پژمردگی می رسد. نمایش این مقادیر با اندازه گیری های آزمایشگاهی دشوار است. دقیق ترین اندازه گیری های شوری مزرعه باید با استفاده از حسگرهای شوری همراه با حسگرهای رطوبت خاک انجام شود تا اندازه گیری های مداوم شوری و رطوبت خاک در اعماق مختلف فراهم شود. با این حال، تغییرپذیری مکانی و ناهمگنی خاک، اندازه گیری های بزرگ مقیاس را مطلوب تر می کند. بنابراین، مقادیر شوری خاک با مقدار رطوبت خاک درهم تنیده است. کاربران مدل ها اغلب در مقایسه شوری خاک مدل با شوری آزمایشگاهی اندازه گیری شده از عصاره خمیر اشباع، دچار اشتباه می شوند. علاوه بر این، رابطه شوری با عملکرد یا سایر پارامترهای محصول با استفاده از روابط تناسبی بهتر توصیف می شود (بعنوان نمونه: عملکرد نسبی در مقابل شوری به جای عملکرد مطلق در مقابل شوری).

### نتیجه گیری

اندازه گیری های پیوسته و درجا از رطوبت و شوری خاک به طور همزمان، دقیق تر از روش های آزمایشگاهی هستند. دقیق ترین اندازه گیری های شوری میدانی با استفاده از حسگرهای شوری همراه با حسگرهای رطوبت خاک انجام می شود تا اندازه گیری های پیوسته شوری و رطوبت خاک را در عمق یکسان فراهم کند. با این حال، تغییرپذیری مکانی و ناهمگنی خاک، اندازه گیری های بزرگ مقیاس برای شوری میدانی را مطلوب تر می سازد (بعنوان مثال: استفاده از دستگاه القای الکترومغناطیسی (EMI) نصب شده روی وسیله نقلیه همراه با GPS، برای اندازه گیری شوری میدانی در پهنه مزرعه).

وقتی دو منبع آب (آب شیرین و آب شور) در دسترس باشند، استفاده از آب شیرین در ابتدای فصل رشد، وقتی جوانه‌ها حساس به شوری هستند؛ و سپس آبیاری با آب شور در مرحله بعدی، زمانی که گیاه حساسیت کمتری دارد، توصیه می‌شود (شکل ۹). همچنین (وقتی دو منبع آب شیرین و آب شور در دسترس باشند) با آبیاری تحت فشار، برای جلوگیری از تجمع نمک در سطح خاک، در هر آبیاری ابتدا کاربرد آب شور و در انتهای آن کاربرد آب شیرین توصیه می‌شود. با این روش، جریان پیستونی<sup>۱۴</sup> شکل می‌گیرد که موجب انتقال آب شور به عمق بیشتر خاک، و لذا کاهش خطر تجمع نمک‌ها در سطح خاک، می‌شود.

برای کاهش تجمع نمک در خاک و در عین حال کاهش آبشویی، بکارگیری برخی رویکردهای دیگر در مدیریت مزرعه و مدیریت آبیاری ضروری است؛ مانند انتخاب مناسب‌ترین سیستم آبیاری و نیز مدیریت صحیح خاک. استفاده از آب شور نیاز به یک سیستم آبیاری مناسب دارد. در آبیاری بارانی کاربرد آبپاش‌های نزدیک سطح خاک (زیر تاج گیاهان) و در آبیاری قطره‌ای استفاده از نوارهای زیرسطحی توصیه می‌شوند. با این حال، آبیاری زیرسطحی نانو قطره‌ای (بسیار کم جریان؛ حدود ۰/۱ تا ۰/۳ لیتر در ساعت) با جریان مداوم، گزینه خوبی برای حفظ رطوبت خاک (رقیق کردن نمک‌ها و کاهش خطر تنش شوری) و حتی صرفه‌جویی در آب آبیاری است.



شکل ۹ - مدیریت (کاربرد توأم آب شیرین و آب شور) برای آبیاری طی دوره رشد گیاه نسبتاً متحمل به شوری

می‌توانند به عنوان یک ابزار مدیریتی خوب برای پیش‌بینی تأثیر شوری بلندمدت بر خاک، گیاه، آب‌های زیرزمینی و نیاز به آبشویی بدون نیاز به انجام آزمایش‌های میدانی استفاده شوند.

### مسئله ۷ الف- کژفهمی: نتایج مدل‌های بخوبی واسنجی و اعتبارسنجی شده، بی‌دقتی و عدم قطعیت ذاتی ندارند!

برخی از کاربران مدل‌ها، بر این باورند که نتایج مدل‌های خوب واسنجی‌شده و معتبر فاقد عدم قطعیت هستند. اگرچه مدل‌ها در سالیان اخیر بدلیل افزایش دسترسی به داده‌ها و بهبود دقت اندازه‌گیری (با فناوری‌های جدید) بهبود یافته‌اند، اما باید توجه نمود که حتی با وجود کارایی خوب آن‌ها طی فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی، این مدل‌ها دارای منابع «خطای ذاتی» هستند. بنابراین، نتایج شبیه‌سازی‌ها توسط این مدل‌ها همچنان دارای عدم قطعیت هستند. عدم قطعیت و دقت مدل ممکن است با توجه به مقیاس مکانی، گام زمانی و دقت داده‌ها تغییر کند. لذا، بهترین شیوه آن است که در کنار نتایج شبیه‌سازی شده، عدم قطعیت آنها نیز گزارش گردد.

مدیریت خاک نیز هنگام استفاده از آب شور برای آبیاری مهم است. آماده‌سازی زمین برای اطمینان از توزیع یکنواخت آب آبیاری، و نفوذپذیری، در جهت کنترل بهتر شوری ضروری است. زیرشکنی و شخم زدن، فشردگی را از بین می‌برد و نفوذپذیری و آبشویی آب را بهبود می‌بخشد. عملیات ویژه مانند شخم عمیق، افزودن و مخلوط کردن شن و ماسه با لایه خاک و افزودن مواد آلی، گچ یا کود سبز، نفوذپذیری خاک را بهبود می‌بخشد. خاک‌ورزی حفاظتی (بدون خاک‌ورزی یا حداقل خاک‌ورزی) مزایایی دارد، زیرا تبخیر خاک را کاهش می‌دهد، دسترسی به آب را افزایش می‌دهد، شوری سطح را کاهش می‌دهد، مواد آلی را افزایش می‌دهد، فرسایش خاک را کاهش می‌دهد، دسترسی به مواد مغذی را افزایش می‌دهد، استفاده از مواد شیمیایی کشاورزی و ماشین‌آلات را کاهش می‌دهد و نهایتاً موجب کاهش نیاز به نیروی کار می‌شود. همچنین وجود یک سیستم زهکشی کارآمد برای کنترل سطح آب زیرزمینی، ضروری است. شور شدن یک فرآیند آهسته است و لذا خطر آن ممکن است دست کم گرفته شود. اما، مدل‌ها برای پیش‌بینی‌های بلندمدت مفید هستند و به کمک آنها می‌توان عواقب این مخاطره را آشکار نمود. مدل‌های کالیبره شده و اعتبارسنجی شده (مانند SALTMED)



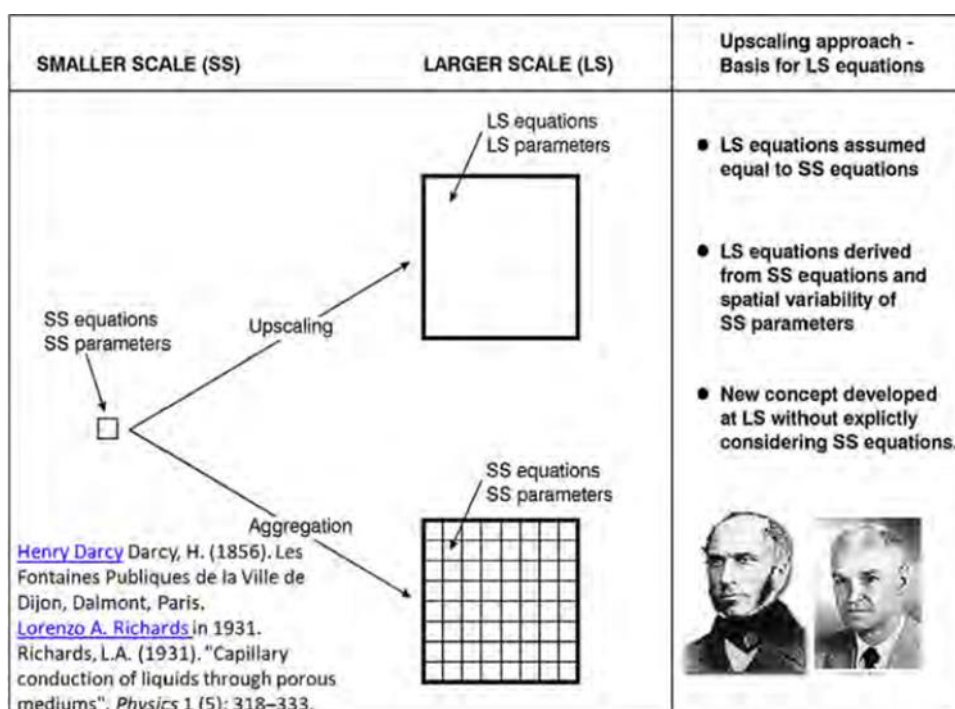
فرآیندهای فعال در مقیاس حوضه رودخانه داشته باشد (شکل ۱۰ را ببینید).

۳. عدم قطعیت نتایج را می توان به فرضیات مدل سازی، صورت بندی فرآیندها در مدل (سازوکار)، فرمول های ریاضی و حتی طرح عددی حل مسئله نسبت داد. علاوه بر این، در واقعیت تمامی فرآیندها بطور یکپارچه و همزمان عمل می کنند. اما مدل ها چنین نیستند؛ آن ها از ترتیب برنامه کامپیوتری پیروی می کنند. اینکه تبخیر بعد از نفوذ محاسبه شود یا قبل از آن، احتمالاً نتایج متفاوتی به بار می آورد. در نهایت اغلب با ساده سازی، فرآیندهای مدل خطی فرض می شوند؛ در حالیکه در طبیعت هیچ چیز خطی نیست.

در هر حال، عدم قطعیت و بی دقتی در نتایج مدل می تواند به دلایل متعددی نسبت داده شود:

۱. شبیه سازی فرآیندهای فیزیکی در مقیاس مزرعه: اغلب مدل ها براساس معادلاتی با مقیاس نقطه ای کار می کنند. لذا، «چگونگی نمایش ناهمگنی های خاک و پوشش گیاهی»، اغلب یک چالش جدی در بکارگیری این مدل ها است. این مشکل در واسنجی مدل ها نیز رخ می نماید؛ بخصوص بدلیل وجود یا عدم وجود داده کافی و ناسازگاری مقیاس ها (بین خروجی مدل با اندازه گیری ها یا مشاهدات).

۲. فرآیندهای هیدرولوژیکی با مقیاس های زمانی و مکانی مختلف مرتبط هستند. توصیف این فرآیندها در مقیاس نقطه ای ممکن است تفسیر متفاوتی از



شکل ۱۰- مسئله مقیاس در هیدرولوژی. Adapted from Refsgaard and Butts (1999).

- درشت مقیاس سازی - انتقال اطلاعات / پارامترها از سلول (های) داده شده به سلولی بزرگتر (خُرد به کلان) است. برای نمونه از یک قطعه زمین به حوضه رودخانه، یا از یک برگ به تاج گیاه.
- ریزمقیاس سازی - انتقال اطلاعات از یک سلول داده شده به سلول های کوچکتر (کلان به خُرد) Digital Zoom.
- برچینش - حل مسئله با معادلات در سلول های کوچک (با معادلات برازنده همان مقیاس) و سپس تجمیع نتایج (مجموع، میانگین، ...) و انتقال به سلول بزرگتر. بر این اساس، پارامترهای سلول های خُرد (میدانی) به درستی بکار گرفته می شوند {مثال: مدل SWAT}.

### مسئله ۷ ب- کژفهمی: «معنای واقعی درشت مقیاس سازی» و سردرگمی در «تفاوت درشت مقیاس سازی با برچینش»

در برخی از کاربردهای مدل، در مورد استفاده از عبارت «درشت مقیاس سازی» برای توصیف فرایندی که در واقع افزایش مقیاس نیست بلکه یک فرآیند تجمیع اجزا خُردتر در یک کل است، سردرگمی وجود دارد. این تصور غلط عمدتاً ناشی از یک کژفهمی است. برای وضوح بیشتر، شرح اصطلاحات مربوط به مقیاس سازی در زیر آمده است:

- مقیاس سازی - استفاده از اطلاعات در یک مقیاس مکانی یا زمانی، برای استنباط خصوصیات در مقیاسی دیگر.

در فرآیند درشت‌مقیاس‌سازی، پارامترها و معادلات فرآیند در انتقال از مقیاس کوچکتر به مقیاس بزرگتر اصلاح یا جایگزین می‌شوند. این فرآیند به سه روش انجام می‌یابد:

۱. معادلات خرد قابل کاربرد در سلول‌های کوچکتر، بدون تغییر برای سلول‌های بزرگتر معتبر فرض می‌شوند. در این حالت، فقط «پارامترهای موثر» (بر اساس خصوصیات محیط ناهمگن و رفتار توده خردمقیاس) برآورد می‌شوند. در چنین حالتی باید برای تجویز مقادیر پارامترهای کلیدی (متناظر با سلول محاسباتی در مقیاس بزرگتر)، واسنجی انجام گیرد.
۲. معادلات مقیاس کوچک در چارچوب نظری بسط داده می‌شوند؛ تا به گونه‌ای دربرگیرنده «تغییرپذیری مکانی» پارامترهای خردمقیاس باشند. این کار اغلب با توسعه یک چارچوب تصادفی انجام می‌شود. در این حالت،

امکان برآورد مستقیم پارامترهای سلول‌های بزرگ از داده‌های میدانی وجود دارد. با این حال بهتر است، روایی پارامترهای موثر با واسنجی ارزیابی شود.

۳. معادلات جدیدی برای مقیاس سلول‌های بزرگتر توسعه داده می‌شوند؛ با پارامترهای جدید.

مسئله مقیاس‌سازی نه تنها یک چالش علمی، بلکه یک مشکل عملی در مدیریت منابع آب و مدل‌سازی هیدرولوژیکی است. از آنجا که فرآیندها دارای مقیاس‌های مختلفی هستند، مدل‌های کاربردی عموماً برای مقیاسی مشخص توسعه می‌یابند؛ که مدل‌سازی هیدرولوژیکی برای آن مورد نیاز است. امروزه اهمیت اثرات مقیاس توسط کارشناسان هیدرولوژی، مدیران منابع آب و سایر متخصصان شناخته شده است (در مقیاس‌های مکانی نقطه‌ای تا دنیا؛ جدول ۲ را ببینید).

جدول ۲- مقیاس‌های مکانی در هیدرولوژی براساس Butts و Refsgaard (۱۹۹۹)

| مقیاس مکانی              | طول         | مساحت                      |
|--------------------------|-------------|----------------------------|
| مقیاس نقطه‌ای            | < 10 cm     |                            |
| مزرعه یا کوهپایه         | 100 m       |                            |
| مقیاس حوزه آبریز رودخانه | 3-100 km    | $10 - 10^4 \text{ km}^2$   |
| مقیاس منطقه‌ای           | 100-1000 km | $10^4 - 10^6 \text{ km}^2$ |
| مقیاس قاره‌ای یا جهانی   | > 1000 km   | $> 10^6 \text{ km}^2$      |

پرسش‌های مباحثه برانگیز عبارتند از:

۱. آیا معادلات ریاضی هیدرولوژیک برازنده اندازه‌های خرد (که اغلب بر اساس تجارب آزمایشگاهی یا مشاهدات در مقیاس قطعه زمین به دست آمده‌اند)، قابل بکارگیری در مقیاس حوضه رودخانه هستند؟
۲. چگونه می‌توان ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده در نقاط ایزوله (مانند هدایت هیدرولیکی یا نفوذ نهایی) را در مدل‌سازی جریان‌های آب در مقیاس حوضه رودخانه (مانند تغذیه آب زیرزمینی یا جریان‌های آلاینده‌ها، مانند جریان‌های نیترات) استفاده نمود؟
۳. چگونه می‌توان تغییرپذیری مکانی این ویژگی‌ها را در شبکه‌بندی حوضه گنجانند، تا توسط مدل با سلول‌های بزرگ، به درستی استفاده شود؟ به عبارت دیگر، دقت مکانی اندازه‌گیری شده داده‌ها، چه نسبتی با اندازه تفکیک شبکه دارد؟

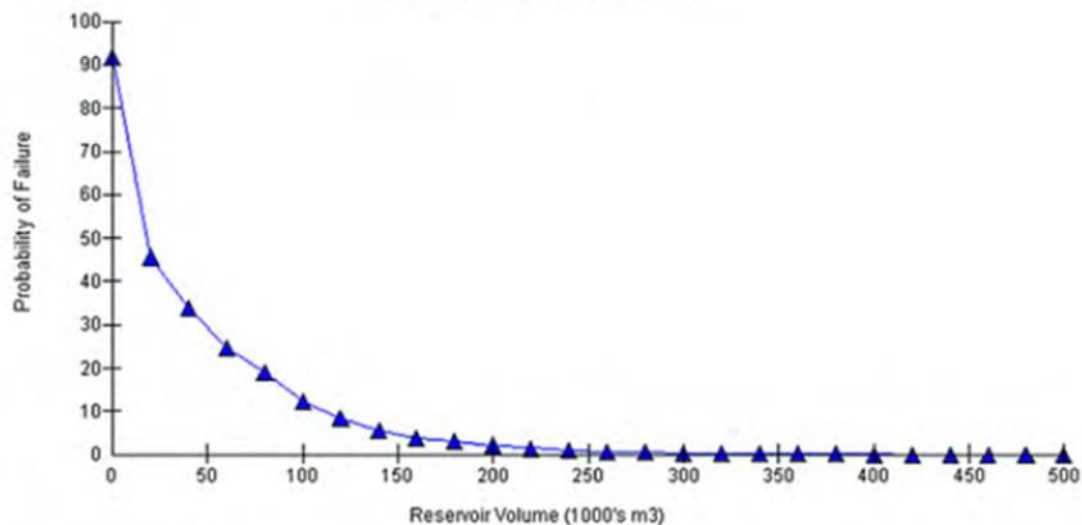
برخی معادلات توسعه یافته برای مقیاس نقطه‌ای (ریز)، در مقیاس‌های درشت‌تر نیز به کار می‌روند؛ با این فرض که در مقیاس‌های درشت‌تر روایی دارند. معادلات معروف Darcy (۱۸۵۶) و Richards (۱۹۳۱) نمونه‌هایی از این دست هستند. این معادلات در مقیاس‌های ریزتر (در هر سلول شبکه‌بندی حوضه رودخانه) با پارامترهای همان مقیاس بکار گرفته می‌شوند، سپس از تجمیع یا برچینش نتایج، مقادیر میانگین یا مجموع برای حوضه رودخانه مشخص می‌شوند (شکل ۱۰). تلاش‌هایی برای بهبود نتایج، با لحاظ نمودن ناهمگنی درون

شبکه (با توصیف احتمالاتی پارامترها) و نیز تلاش‌هایی برای بدست آوردن پارامترهای موثر بعنوان نماینده هر ناحیه (در مقیاس درشت‌تر) انجام شده است. اغلب معادلات برای مقیاس حوضه رودخانه (مانند مدل‌های مفهومی بارش - رواناب) تجربی هستند؛ این مدل‌ها مختص منطقه مورد مطالعه هستند. هیدرولوژیست‌ها روش‌های مختلف انتقال آب را نیز توسعه داده‌اند و پارامترهای معرف (مشتق شده از ناهمگنی خاک و پوشش اراضی در سلول‌ها) را محاسبه کردند (Ragab و همکاران، ۲۰۱۰؛ Ragab و Bromley، ۲۰۱۰).

## مسئله ۸- کژباوری: استفاده از جریان متوسط بلندمدت برای طراحی سدها و مخازن

مهندسان سد و مخزن بر این باور بوده‌اند که یک جریان متوسط بلندمدت، معتبرترین عنصر در طراحی ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن است؛ و هرچه طول آمار بیشتر باشد، نتایج بیشتر قابل اعتماد است. این امر جریان‌های اوج سیلابی و شدید را نادیده می‌گیرد که در حال حاضر بدلیل تغییرات آب و هوایی، بیشتر تکرار می‌شوند. برخی از سدها که در طراحی آنها ظرفیت ذخیره‌سازی برای وقایع حدی در نظر گرفته نشده، به تازگی در رخدادهای سیلابی شدید (ناشی از تغییر اقلیم) دچار سررفتگی (overtop) شده و از بین رفته‌اند (شکل ۱۱).

## Probability of Failure



شکل ۱۱- احتمال تخریب سد بدلیل سرفترگی، با افزایش حجم مخزن کاهش می‌یابد.

۱. برآورد دقیق حجم مخزن با هدف «حداقل ریسک و احتمال شکست» با تحلیل و آزمون شکست صورت پذیرد (Ragab و همکاران، ۲۰۰۱a؛ Ragab و همکاران، ۲۰۰۱b؛ Ragab و همکاران، ۲۰۰۱). البته طراحان سعی می‌کنند هزینه‌ها را به حداقل برسانند، اما این کار با ریسک همراه است (همانطور که در شکل ۱۱ مشهود است).

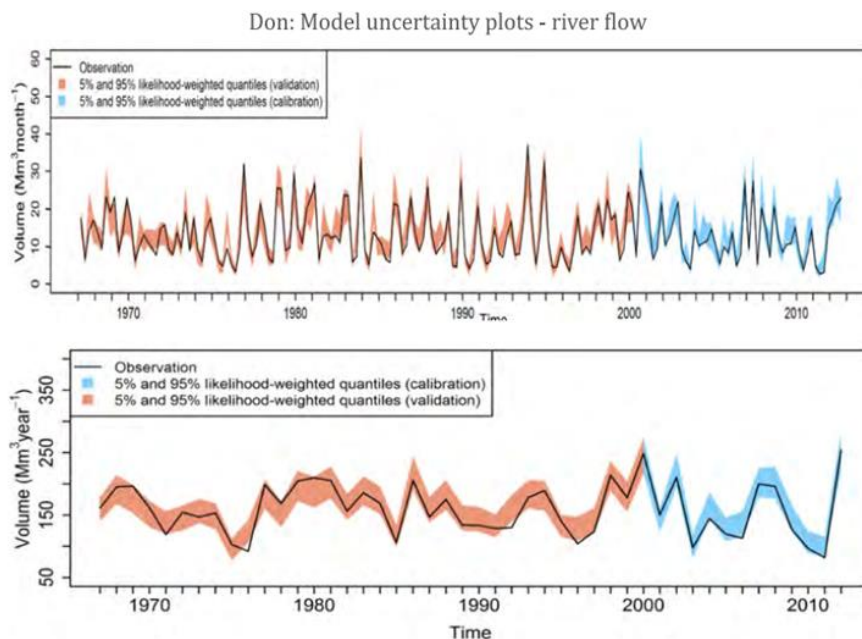
۲. انجام تجزیه و تحلیل عدم قطعیت برای جریان رودخانه؛ زیرا سطح عدم قطعیت از روزانه تا ماهانه تا فصلی تا سالانه متغیر است (Ragab و همکاران، ۲۰۲۰).

شکل (۱۲) نشان می‌دهد که چگونه تغییرات شدید مقدار آلاینده کروم در جریان‌های ماهانه با فرآیند میانگین‌گیری ناپدید می‌شوند و منحنی صاف‌تری برای سالانه ایجاد می‌شود. جزئیات گزارش شده در مقاله Ragab و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهد که سطح عدم قطعیت در نتایج در جابجایی از «روزانه به ماهانه به فصلی به سالانه»، به تدریج کاهش می‌یابد. پارامتر CR نشان داده شده در شکل (۱۲)، نشان‌دهنده آن است که چه درصدی از جریان‌های مشاهده شده رودخانه، در دامنه نتایج پیش‌برآورد (prediction) با حدود اطمینان ۵٪ و ۹۵٪ (Q5 % - Q95 %) احاطه شده‌اند. بنابراین مقدار CR بالا، نشان دهنده یک پیش‌برآورد موفق است. تحلیل جریان رودخانه دن (انگلستان) نشان داد که کاهش سطح عدم قطعیت ناشی از میانگین‌گیری، موجب بهبود تدریجی پیش‌برآورد «مقدار کروم در جریان رودخانه»، برای جریان‌های روزانه (۵۷٪)، ماهانه (۷۰٪)، فصلی (۷۶٪) و سالانه (۸۵٪) می‌گردد.

آبیاری برای تولید غذا نیازمند جریان مداوم طی فصل کشت است؛ سدها با تنظیم جریان طبیعی در مخازن خود، این نیاز را برآورده می‌سازند. اگرچه ساخت سدها، عمدتاً یک فعالیت حوزه مهندسی عمران است؛ اما طراحی مخازن سدها، نیازمند متخصصین هیدرولوژی، اقتصاد، محیط‌زیست و حتی اجتماعی است. در طراحی مخازن، ظرفیت ذخیره‌سازی باید تعیین و مشخص گردد؛ که معمولاً با استفاده از «جریان متوسط سالانه» بلندمدت صورت می‌پذیرد. سدها همچنین یک سرریز برای آزاد کردن آب مازاد (بیش از پیش‌بینی)، دارند. در سال‌های اخیر، تحت شرایط تغییر اقلیم، حوادث شدید سیل و تخریب برخی سدها بدلیل سرفترگی مشاهده شده است.

### مسئله چیست؟

آیا استفاده از «جریان متوسط بلندمدت» برای ایمنی سدها و طراحی مخازن بسنده و قابل اعتماد است؟ اگر چه جریان متوسط بلندمدت یک شاخص مفید است، اما جریان‌های اوج وقایع شدید را نمایندگی نمی‌کند. آمار جریان رودخانه برای بازه‌های روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه، به ترتیب میل به مقادیر متوسط می‌کنند (مقادیر اوج را پنهان می‌کنند). از نظر هیدرولوژی، اگر چه سوابق تاریخی طولانی‌مدت باید در نظر گرفته شوند اما در حال حاضر، بیش از پیش، به دلیل تغییر اقلیم باید به رخدادهای فرین (وقایع شدید حدی) توجه شود. توجه به وقایع حدی و جریان‌های بیشینه برای ایمنی سدها و جلوگیری از مخاطره سرفترگی (overtopping) ضروری است. در مجموع، برای امنیت سدها باید:



**Don Catchment CR**  
**Daily: 57%**  
**Monthly 70%**  
**Seasonal 76%**  
**Annual 85%**

شکل ۱۲- تحلیل عدم قطعیت جریان ماهانه و سالانه؛ مثال: رودخانه دن انگلستان (Ragab و همکاران، ۲۰۲۰)

CR: Containment Ratio

کمپسیون بین‌المللی سدهای بزرگ با ثبت جهانی سدها، چندین گزارش در مورد ایمنی و شکست سدها با ارایه موارد گزارش شده در دنیا منتشر کرده است (ICOLD، ۲۰۲۳). برخی کشورها نیز ثبت سدها را در سطح ملی ایجاد کرده‌اند، که فهرستی از رویدادهای شکست سد را ارایه می‌نماید (بعنوان نمونه انجمن مسئولین ایالتی ایمنی سد در آمریکا). بر اساس گزارش این نهادها، شایع‌ترین علت شکست سدها، ناکافی بودن ارتفاع سد در مواجهه با حوادث سیل شدید، بوده است.

### نتیجه‌گیری

طراحی ایمن سد و مخزن مستلزم توجه به جنبه‌های هیدرولوژیکی، بویژه جریان اوج در وقایع سیلابی شدید (تحت شرایط تغییر اقلیم) است. در طراحی سدها و مخازن، پیشنهاد می‌شود که تنها به تحلیل بر اساس جریان‌های متوسط سالانه بلندمدت بسنده نشود؛ بلکه حتماً تجزیه و تحلیل شکست سد برای وقایع حدی نیز انجام گیرد. در طراحی و ساخت سد، به حداقل رساندن هزینه‌ها نباید اولیوی بیش از ایمنی سد داشته باشد.

### مسئله ۹- کژباوری: پایایی مترادف با ابدیت است، یعنی زمان نامحدود است!

مدیریت منابع آب با واژه پایایی (sustainability) آمیختگی ذاتی دارد. نکته این است که «پایایی، یک باید برای مدیریت منابع آب است؛ نه خود منابع آب». تردیدهایی در مورد پایایی منابع آب (یا منابع آب ابدی) وجود دارد! تاریخ نشان

این معضلی برای طراحان سد و مخزن است که چگونه ضمن در نظر گرفتن میانگین جریان سالانه (با عدم قطعیت کمتر)، به جریان‌های روزانه یا ماهانه (با اوج‌ها و وقایع حدی مشهود، دارای عدم قطعیت نسبتاً بیشتر) بپردازند؛ در حالیکه معیارهای توجیه‌پذیری فنی-اقتصادی-اجتماعی را باید رعایت کنند. به نظر می‌آید، ایمنی سدها نیازمند توجه بیشتر به جریان‌های اوج و رخداد‌های فرین (با عدم قطعیت‌های بالا) است؛ و نادیده گرفتن این موارد معمولاً منجر به وقوع فجایع می‌شود. چند نمونه از شکست و تخریب سدها ناشی از سررفتگی (overtopping) عبارتند از:

۱. شکست سد یرنا (لیبی)، در شب ۱۰ سپتامبر ۲۰۲۳ (پس از طوفان دانیل) و مرگ و میر فراوان!
۲. سررفتگی سد پائو برانکو (برزیل) بلافاصله در پایین‌دست یک زمین لغزش، در ۸ ژانویه ۲۰۲۲!
۳. شکست «سد ۱» در یک معدن سنگ آهن (برزیل)، در سال ۲۰۱۹ بدلیل روان‌گرایی استاتیک!
۴. زمین‌لغزش به دریاچه سد واجونت (شمال ایتالیا) و سپس سررفتگی و فروریزش سد، ۹ اکتبر ۱۹۶۳، موجب پدیداری موجی شد که منجر به ویرانی چندین روستا و حدود ۲۰۰۰ نفر کشته گردید!
۵. شکست سد اِدنویل (میشیگان، آمریکا)، و سپس انتقال حجم بزرگ به دریاچه سد سنفورد (بلافاصله در پایین‌دست)، باعث شد سد سنفورد در ۱۹ می ۲۰۲۰ تخریب شود!
۶. سد بانکیائو در چین که در سال ۱۹۷۵ فرو ریخت و موجب مرگ و میر حدود ۱۷۱،۰۰۰ نفر شد (بدترین شکست سد در تاریخ)!



می‌دهد که تعداد زیادی از رودخانه‌ها ناپدید شده‌اند و تعدادی از رودخانه‌ها ممکن است در دهه‌های بعدی ناپدید شوند. در گزارشی با عنوان «۱۰ رودخانه که در سال ۲۰۲۳ خشک شده‌اند!» (Haase, ۲۰۲۳)، به ده رودخانه مهم دنیا اشاره شده و آمده است که این ۱۰ رودخانه می‌توانند در چند دهه آینده کاملاً بی‌آب شوند. این رودخانه‌ها عبارتند از:

۱. رودخانه کلرادو که به سرعت و با ناپایایی در حال خشک شدن است؛
۲. ریو گرانده، که برای اولین بار در چهار دهه در تابستان ۲۰۲۲ موقتاً بی‌آب شد؛
۳. رودخانه ایندوس که در چند سال گذشته بارش کمتر از میانگین را تجربه کرده است، و اکنون خشک‌ترین وضعیت در ۶۰ سال اخیر را دارد - جریان رودخانه در پاکستان در حال حاضر بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته است؛
۴. جریان رودخانه تیستا که بدلیل کاهش بارندگی در منطقه طی سال‌های اخیر، بطور چشمگیری کاهش یافته است؛
۵. آبدی رودخانه آرکانزاس بدلیل خشکسالی شدید و استفاده بیش از حد، در حال کاهش است؛
۶. رودخانه سرخ، نیز بدلیل تغییر اقلیم و استفاده بیش از حد از منابع آب رودخانه، خشک می‌شود؛
۷. رودخانه موراوی که بدلیل بارندگی ناکافی در معرض خطر است و در سال ۲۰۰۶ به دلیل خشکسالی بی‌امان بسیار کم آب شده بود، در سال ۲۰۰۷ بطور کلی از جریان باز ایستاد؛ همچنین در سال ۲۰۲۲ حوضه موراوی-دارلینگ نیز در معرض خطر شدید خشک شدن دائمی قرار گرفت.
۸. جریان رودخانه آمودریا در آسیای میانه، بدلیل تغییر اقلیم و افزایش تقاضا برای آبیاری به شدت کاهش یافته است؛
۹. رودخانه زرد در آسیای میانه، اخیراً بدلیل تغییر اقلیم و استفاده بیش از حد از رودخانه به خشکی گراییده است؛ و
۱۰. رودخانه کانادایی که بدلیل خشکسالی چندین ساله (که هنوز ادامه دارد)، تغییر اقلیم، و نیز افت آبخوان اگالالا در حال خشک شدن است.

در مجموع، در این حوضه‌ها، تغییر اقلیم موجب افزایش تبخیر و کاهش بارش شده، که در کنار نبود چابکی کافی در مدیریت منابع آب (برای رصد تغییرات و سازگاری با آن)، منجر به کاهش جریان در رودخانه‌ها شده است. زمانی بود که رودخانه‌ها به دریا می‌رسیدند؛ اما اکنون دیگر تضمینی برای رسیدن آنها به دریا وجود ندارد (حتی دیگر نمی‌توان از رسیدن بزرگترین رودخانه‌های دنیا به دریا اطمینان حاصل نمود!). برای نمونه، جریان آب در رودخانه ریو گرانده / ریو براوو اغلب نمی‌تواند به خلیج مکزیک برسد؛ زیرا توان آن توسط سدها، انحراف آب به مزارع کشاورزان، و تأمین آب

شهری به شدت تضعیف شده است. ایندوس، نیل، موراوی-دارلینگ و کلرادو چند رودخانه قدرتمندی هستند که هنوز جریان آنها دریا/ اقیانوس را لمس می‌کند (Wong و همکاران، ۲۰۰۷). نویسندگان همچنین گزارش دادند که ۱۰ رودخانه دنیا که برترین‌ها در معرض خشکیدن هستند، عبارتند از: سلوین، لاپلاتا، دانوب، ریوگرانده، گنگ، موراوی-دارلینگ، ایندوس، نیل، یانگ تسه و مکونگ. اطلاعات بالا نشان می‌دهد که شناسایی یک منبع آب با پایایی نامحدود، بسیار دشوار است.

شواهد تاریخی گویای آن است که حدود ۱۰۰,۰۰۰ سال پیش، سه رودخانه بزرگ وجود داشت که از میان صحرای شمال آفریقا (بیابان خشک امروزی) عبور می‌کردند؛ که قابل مقایسه با میسوری، راین یا حتی نیل بودند (Ghose, ۲۰۱۳). یک مطالعه اخیر نشان داد که حدود ۵۵٪ از ۶۴ میلیون کیلومتر رودخانه‌ها و جریان‌های روی زمین، بصورت دوره‌ای/ فصلی جریان ندارند و یا برای بخشی از سال خشک می‌شوند. این نشان می‌دهد که اغلب رودخانه‌ها گاهی خشک می‌شوند (Messenger و همکاران، ۲۰۲۱). این اطلاعات به‌وضوح نشان می‌دهد که کاربرد واژه پایایی، به ویژه برای منابع آب سطحی و زیرزمینی، نامناسب است؛ زیرا پیش‌بینی دوام و ثبات وضعیت کنونی رواناب‌های سطحی و تغذیه آب‌های زیرزمینی (که هر دو به بارندگی وابسته هستند)، برای یک دوره زمانی طولانی، تقریباً ناممکن است. معمولاً بارندگی را می‌توان با دقت منطقی برای یک دوره زمانی کوتاه پیش‌بینی کرد؛ با این حال، برای یک دوره زمانی طولانی پیش‌بینی بارندگی ممکن نیست. حتی برای دوره زمانی کوتاه، پیش‌بینی با عدم قطعیت همراه است (که معمولاً شدت آن برای پیش‌بینی‌های بیشتر از ۱۴ روزه، غیرقابل قبول است). به همین دلیل، پایایی نباید مترادف با ابدیت در نظر گرفته شود! بلکه باید برای یک طول زمان معین و محدود تعریف شود.

### نتیجه‌گیری

پایایی در فرهنگ لغت مدیریت آب، همواره با یک بازه زمانی مرتبط است؛ که نشان می‌دهد تا دامنه‌ای از آینده مد نظر است (۵، ۱۰، یا ۵۰ سال)؟ از آنجا که منابع آب با پیش‌بینی بارندگی مرتبط هستند، دقت برآوردها نیز تابع عدم قطعیت بارش‌ها خواهد بود؛ که مقدار عدم قطعیت‌ها برای بازه‌های زمانی کوتاه‌تر، کمتر است (= دقت بیشتر در کتی‌کردن برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب). البته این به معنای نفی پیش‌نگری‌های بلندمدت نیست؛ اما باید دانست روش کار با نتایج این نوع پیش‌نگری و آینده‌پژوهی در مدیریت آب، بسیار متفاوت از شیوه‌های مرسوم هیدرولوژیکی است.

### نتیجه‌گیری کلی

در طول سال‌ها مفاهیم متعددی برای مدیریت آب کشاورزی پیشنهاد شده است. با این حال، برخی از این مفاهیم دچار

- [cigb.org/GB/dams/dams\\_safety.asp](http://cigb.org/GB/dams/dams_safety.asp) [Accessed 7th December 2023].
- Kashyap, P.S. & Panda, R.K. (2001) Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, 50(1), 9-25. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00102-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00102-0)
- Lin, B., Lei, H., Hu, M., Visessri, S. & Hsieh, C. (2020) Canopy resistance and estimation of evapotranspiration above a humid cypress forest. *Advances in Meteorology*, 2020, 4232138, 16 pages. Available from: <https://doi.org/10.1155/2020/4232138>
- Maréchal, J.C., Murari, R.R.V., Riotte, J., Vouillamoz, J.M., Kumar, M.S.M., Ruiz, L., et al. (2009) Indirect and direct recharges in a tropical forested watershed: Mule Hole India. *Journal of Hydrology*, 369(3-4), 272-284. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.006>
- Maruyama, A. & Kuwagata, T. (2008) Diurnal and seasonal variation in bulk stomatal conductance of the rice canopy and its dependence on developmental stage. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(6-7), 1161-1173. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.03.001>
- Messenger, M.L., Lehner, B., Cockburn, C., Lamouroux, N., Pella, H., Snelder, T., et al. (2021) Global prevalence of nonperennial rivers and streams. *Nature*, 594(7863), 391-397. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03565-5> PMID: 34135525.
- Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Munir, A., Hanjra, M.A., et al. (2010) Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. *Agricultural Water Management*, 97(4), 528-535. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.023>
- Monteith, J.L. (1965) Evaporation and the environment. XIXth symposia of the Society for Experimental Biology. In: *The state and movement of water in living organisms*. Swansea, Cambridge, United Kingdom: University Press, pp. 205-234.
- Paço, T.A., Ferreira, M.I. & Conceição, N. (2006) Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach. *Agricultural Water Management*, 85(3), 305-313. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.05.014>
- Ragab, R. (1995) Towards a continuous operational system to estimate the root zone soil moisture from کُزفهمی و برخی دُچار کاربرد نابجا بوده‌اند. مهم‌ترین مفاهیم مورد کُزفهمی شامل کم‌آبیاری، بهره‌وری آب (WP) در برابر کارایی کاربرد آب (WUE)، حسابداری آب (در منطقه ریشه)، پایایی، آبشویی برای کنترل شوری خاک، درشت‌مقیاس‌سازی در برابر برچینش، و نهایتاً طبیعت زمان‌مند جریان رودخانه و مخاطره استفاده از جریان متوسط بلندمدت برای طراحی سدها و مخازن می‌باشد. این مقاله بر این مفاهیم، استفاده نابجا، و کُزفهمی آن‌ها تاکید کرده و معنای واقعی و کاربرد هر یک را توضیح داده است. این مقاله نه تنها توضیح می‌دهد که چرا این مفاهیم دُچار کُزفهمی شده‌اند؛ بلکه رویکردهایی برای بهبود درک این مفاهیم و چگونگی کاربرد دقیق آن‌ها، پیشنهاد کرده است.
- منابع (برگرفته از متن مقاله اصلی)**
- 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. Rome, Italy: FAO.
- Amayreh, J. & Al-Abed, N. (2005). Developing crop coefficients for field-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under drip irrigation with black plastic mulch. *Agricultural Water Management*, 73(3), 247-254.
- Association of State Dam Safety Officials (ASDSO). (2023) The ASDSO dam incident database provides. Available from: <https://damsafety.org/Incidents> [Accessed 7th December 2023].
- Ghose, T. (2013) Buried Saharan rivers may have led humans out of Africa. Available from: <https://www.livescience.com/39575-ancient-saharan-rivers-existed.html> [Accessed 9th December 2023].
- Haase, J. (2023) 10 rivers that are running dry in 2023. Available from: <https://a-z-animals.com/blog/10-rivers-that-arerunning-dry/>
- Han, H., Feng, Q., Yu, T., Yang, X., Zhang, X. & Li, K. (2022) Characteristic of stomatal conductance and optimal stomatal behaviour in an arid oasis of Northwestern China. *Sustainability*, 14(2), 968. Available from: <https://doi.org/10.3390/su14020968>
- Hsieh, C.-I., Huang, I.-H. & Lu, C.-T. (2023) Estimating canopy resistance using machine learning and analytical approaches. *Watermark*, 15(21), 3839. Available from: <https://doi.org/10.3390/w15213839>
- International Commission on Large Dams (ICOLD). (2023) Dams' safety is at the very origin of the foundation of ICOLD. Available from: <https://www.icold->

- Ragab, R., Evans, J.G., Battilani, A. & Solimando, D. (2017b) The cosmic-ray soil moisture observation system (Cosmos) for estimating the crop water requirement: new approach. *Irrigation and Drainage*, 66(4), 456-468. Available from: <https://doi.org/10.1002/ird.2152>
- Ragab, R., Kaelin, A., Afzal, M. & Panagea, I. (2020) Application of generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) at different temporal scales to reduce the uncertainty level in modelled river flows. *Hydrological Sciences Journal*, 65(11), 1856-1871. Available from: <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1764961>
- Ragab, R., Moidinis, D., Albergel, J., Khouri, J., Drubi, A. & Nasri, S. (2001) The HYDROMED model and its application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. 2-rainfall-runoff model application to three Mediterranean hill reservoirs. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4), 554-562. Available from: <https://doi.org/10.5194/hess-5-554-2001>
- Refsgaard, J.C. & Butts, M.B. (1999) Determination of grid scale parameters in catchment modeling by upscaling local scale parameters. In: Feyen, J. & Wiyono, K. (Eds.) *Modeling of transport processes in soils: at various scales in time and space*. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Academic Publishers, pp. 650-665.
- Wong, C.M., Williams, C.E., Pittock, J., Collier, U. & Schelle, P. (2007) World's top 10 rivers at risk. WWF International. Gland, Switzerland. Pp. 1-53. Available from: <https://www.awsassets.panda.org/downloads/worldstop10riversatriskfinalmarch13.pdf> [Accessed 9th December 2023].
- Zheng, S., Wang, T. & Wei, X. (2022) Estimating grapevine transpiration in greenhouse with three different methods in a Penman-Monteith model in Northeast China. *Irrigation Science*, 40(2022), 13-27. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00271-021-00753-z>
- intermittent remotely sensed surface moisture. *Journal of Hydrology*, 173(1-4), 1-25. Available from: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02749-F](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02749-F)
- Ragab, R. (2014) A note on water use efficiency and water productivity. Available from: [http://www.water4crops.org/wpcontent/uploads/2014/08/RR\\_Water-use-efficiency-and-waterproductivity.pdf](http://www.water4crops.org/wpcontent/uploads/2014/08/RR_Water-use-efficiency-and-waterproductivity.pdf) [Accessed 9th December 2023].
- Ragab, R. (2015) Integrated management tool for water, crop, soil and N-fertilizers: the SALTMED model. *Irrigation and Drainage*, 64(1), 1-12. Available from: <https://doi.org/10.1002/ird.1907>
- Ragab, R. (2023). Report on new advances in water saving in irrigation, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), New Delhi, India. pp. 93-125. Available from: [https://icid-ciid.org/icid\\_data\\_web/25CongWorkshopReportNewAdvances.pdf](https://icid-ciid.org/icid_data_web/25CongWorkshopReportNewAdvances.pdf) [Accessed 9th December 2023].
- Ragab, R., Austin, B. & Moidinis, D. (2001a) The HYDROMED model and its application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. 1-the rainfall-runoff model using a genetic algorithm for optimisation. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4), 543-553. Available from: <https://doi.org/10.5194/hess-5-554-2001>
- Ragab, R., Austin, B. & Moidinis, D. (2001b) The HYDROMED model and its application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. c-reservoir storage capacity and probability of failure model. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 5: (4)(4), 563-568. Available from: <https://doi.org/10.5194/hess-5-563-2001>
- Ragab, R. & Bromley, J. (2010) IHMS-Integrated Hydrological Modelling System. Part 1. The hydrological processes and general structure. *Hydrological Processes*, 24(19), 2663-2680. Available from: <https://doi.org/10.1002/hyp.7681>
- Ragab, R., Bromley, J., Dörflinger, G. & Katsikides, S. (2010) IHMS-Integrated Hydrological Modelling System. Part 2. Application of linked unsaturated, DiCaSM and saturated zone, MODFLOW models on Kouris and Akrotiri catchments in Cyprus. *Hydrological Processes*, 24(19), 2681-2692. Available from: <https://doi.org/10.1002/hyp.7682>
- Ragab, R., Evans, J.G., Battilani, A. & Solimando, D. (2017a) Towards accurate estimation of crop water requirement without the crop coefficient Kc: new approach using modern technologies. *Irrigation and Drainage*, 66(4), 469-477. Available from: <https://doi.org/10.1002/ird.2153>

#### پی‌نوشت‌ها

1. Crop Water Requirement: CWR
2. Soil Moisture Deficit: SMD
3. Bowen Ratio
4. Eddy Covariance
5. Scintillometers
6. Soil Moisture Deficit
7. Cosmic Ray Soil Moisture Observing System
8. Water Use Efficiency

[ess-release-details/2017/Research-May-Lead-to-Improvements-in-Water-Use-for-Crop-Irrigation/default.aspx](https://ess-release-details/2017/Research-May-Lead-to-Improvements-in-Water-Use-for-Crop-Irrigation/default.aspx)

۱۴. جریان پیستونی (Piston Flow): یک مدل حرکت آب در خاک که در آن آب جدیدی که وارد خاک می‌شود (آب شیرین)، آب قبلی (آب شور) را به صورت دسته‌ای و یکنواخت به سمت پایین می‌راند.

9. Water Productivity

10. Partial Root Drying (PRD)

11. Variable Irrigation Rate (VIR)

۱۲. بیانگر ارتفاع عمودی عوارض سطحی (مانند گیاهان و درختان و ساختمان‌ها) است که باد را کند کرده و بر انتقال جرم و حرارت تأثیر دارد.

13.

<https://johnwiley2020news.q4web.com/pressreleases/pr>