نشریه علمی مدیریت اراضی/ جلد ۱۰ / شماره ۲ / ۱۴۰۱
DOI:10.22092/LMJ.2022.125641

برخی روش‌های هسته‌ای اندازه‌گیری رطوبت خاک برای بهبود مدیریت آبیاری

مهدی قمقامی، جواد پیرولی بیرانوند[1] و ابراهیم مقیسه

پژوهشگر پسادکتری پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران.**mghamghami@ut.ac.ir**

استادیار پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران. **jpirvali@aeoi.org.ir**

استادیار پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران.**emoghiseh@aeoi.org.ir**

دریافت: تیر ۱۴۰۰ و پذیرش: آذر ۱۴۰۰

چکیده

هرگونه سیاست‌گذاری در بخش کشاورزی، به عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب، باید منجر به افزایش راندمان مصرف و کاهش هدررفت آب گردد. استفاده از فناوری‌های نوین مانند فناوری هسته‌ای کمک شایانی به بهبود مدیریت آبیاری و کاهش هدررفت می‌کند. تحقیقات مختلفی نشان داده‌اند که با پایش غیرچشمی رطوبت خاک و زیست‌توده می‌توان زمان و میزان آبیاری را تعیین نمود. سامانه‌های هسته‌ای مانند کاوشگر نوترونی و حسگر نوترونی اشعه کیهانی با استقرار در مزرعه می‌توانند به صورت نقطه‌ای و یا شبکه‌ای، نوترون‌های کُند شده را اندازه‌گیری و محتوای رطوبتی خاک را برآورد کنند. با برآورد رطوبت خاک، زمان احتمالی ورود گیاه به تنش رطوبتی تعیین و آبیاری لازم انجام می‌شود. این امر منجر به بهبود راندمان جذب آب و افزایش عملکرد محصول خواهد شد. مقالهٔ حاضر با توصیف روش‌های هسته‌ای روز دنیا در زمینهٔ پایش غیرچشمی رطوبت خاک، یک بررسی اجمالی در زمینه کاربرد فناوری‌های هسته‌ای برای بهبود مدیریت آبیاری و روش‌های واسنجی ابزارهای هسته‌ای ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: راندمان مصرف آب، کاوشگر نوترونی، حسگر نوترونی اشعه کیهانی، پایش غیرچشمی رطوبت خاک

[1]- آدرس نویسنده مسئول: پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران.

مقدمه

کشور ایران جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود (بابائیان و همکاران، ۲۰۱۵). عواملی همچون رشد روزافزون جمعیت، برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی و خشکسالی‌های اخیر، بحران آب را در کشور تشدید کرده است (قمقامی و ایران‌نژاد، ۲۰۱۹). بسیاری از این آسیب‌ها به‌طور مستقیم به تغییر اقلیم مربوط بوده و یا در اثر آن تشدید می‌شوند (گاین و همکاران، ۲۰۱۱). با این وجود، برای حفظ و تقویت امنیت غذایی کشور، بخش کشاورزی –به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب تا حدود ۹۰٪ (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۶)– نباید دچار نقصان در کمیت و کیفیت تولید شود. از این رو برای غلبه بر کمبود آب باید سیاست‌های افزایش راندمان مصرف آب و کاهش هدررفت در بخش کشاورزی اتخاذ و پیگیری شود.

سیاست‌گذاری در برنامهٔ ششم توسعه که به‌طور صریح دولت را مکلف به کاهش ۱۱ میلیارد مترمکعبی مصرف آب در بخش کشاورزی کرده است (برنامه پنج‌سالهٔ ششم توسعه، ۱۳۹۶)، مؤید بحران آب در کشور است. کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی به میزان قیدشده در برنامهٔ ششم توسعه منجر به کاهش به‌طور تقریبی ۱۵٪ مصرف آب در این بخش خواهد شد. کاهش ۱۵٪ مصرف آب در بخش کشاورزی اتخاذشده در برنامهٔ ششم توسعه می‌تواند به‌جای کاهش سطح زیر کشت و یا کاهش تولیدات راهبردی کشاورزی از طریق افزایش راندمان مصرف آب و کاهش هدررفت تحقق یابد. بر اساس گزارش‌های رسمی وزارت جهاد کشاورزی راندمان مصرف آب آبیاری در کشور از ۲۲٫۵ تا ۸۵٫۵٪ متغیر و میانگین آن ۵۶٪ است. متوسط راندمان مصرف آب آبیاری در سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار و سطحی به ترتیب حدود ۶۶٫۶ و ۵۳٫۶٪ است. همچنین با مقایسه روش‌های مختلف آبیاری تحت‌فشار نیز ملاحظه می‌شود که میانگین راندمان کاربرد آب آبیاری در روش‌های آبیاری بارانی حدود ۶۲٫۱ و در روش‌های آبیاری قطره‌ای ۷۱٫۱٪ است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۴).

مهم‌ترین گام برای دستیابی به افزایش راندمان مصرف آب، به‌کارگیری فناوری‌های نوین در فرآیند آبیاری است (لام و همکاران، ۲۰۰۷). بکارگیری فناوری‌های نوین می‌تواند با بهینه‌سازی شیوه‌های آبیاری، به توسعهٔ روش‌های کشاورزی دقیق[1] کمک کند. استفاده از روش‌های هسته‌ای و ایزوتوپی (NITs[2]) در مدیریت آبیاری با هدف بهینه‌سازی راندمان مصرف آب می‌تواند برای این منظور مناسب باشد. زیر برنامهٔ مدیریت خاک و آب و تغذیه گیاهان[3] مربوط به بخش مشترک بین سازمان خواروبار و کشاورزی (FAO[4]) و سازمان بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA[5]) بر توسعهٔ فناوری‌ها و روش‌های ارتقای مدیریت خاک، آب و گیاهان به‌منظور تقویت کشاورزی پایدار با تلفیق تکنیک‌های هسته‌ای و غیره تمرکز دارد. از این رو، مقاله حاضر قصد دارد یک بررسی اجمالی در زمینهٔ کاربست NITs در مدیریت آبیاری و کاهش هدررفت ارائه دهد.

منابع هدررفت آب در کشاورزی

به‌طور معمول، نیاز آبی گیاه معادل تبخیر–تعرق بالقوه (PET[6]) گیاه در نظر گرفته می‌شود. تبخیر–تعرق بالقوه شامل سه مؤلفهٔ تعرق گیاه، تبخیر از سطح خاک و تبخیر از سطح اندام‌های هوایی است (لاورنس و همکاران، ۲۰۰۷). مؤلفه تأثیرگذار و لازم برای رشد گیاه مؤلفهٔ تعرق گیاه است و دو مؤلفه دیگر به‌عنوان هدررفت آب اطلاق می‌شوند. در سامانه‌های آبیاری اعم از غرقابی و تحت‌فشار، بخش قابل‌توجهی از آب آبیاری صرفِ تبخیر از سطح خاک و اندام‌های هوایی گیاه می‌شود (برت و همکاران، ۲۰۰۱). هرچند توسعهٔ برخی سامانه‌های تحت‌فشار نظیر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی تا حد قابل‌توجهی بر اتلاف منابع آب مؤثر بوده است (احمدزاده و همکاران، ۱۳۸۶)، با این وجود

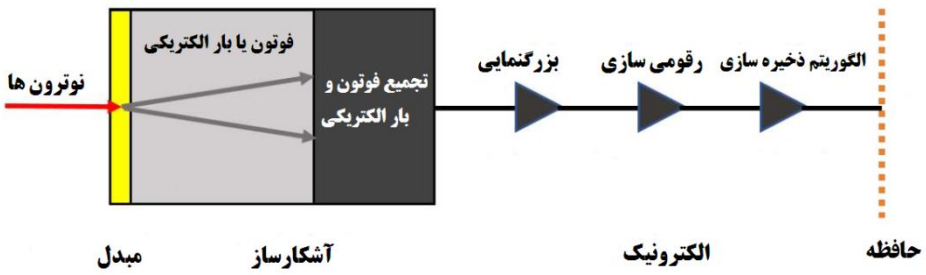
1- Precision agriculture
2 -Nuclear and Isotopic Techniques
3 -Soil and Water Management and Crop Nutrition Subprogramme
4 -Food and Agriculture Organization
5 -International Atomic Energy Agency
6 -Potential Evapotranspiration

می‌توان با توسعه و بکارگیری فناوری، سهم دو مؤلفهٔ دیگر را باز هم تقلیل داد.

تعیین هوشمند زمان و میزان آبیاری می‌تواند باعث افزایش بهره‌وری مصرف آب در مزارع شود (توکلی و عبدالرحمانی، ۱۳۸۶). چنین سامانه‌ای مبتنی بر تعیین میزان آب در خاک بوده و زمان ورود گیاه به تنش رطوبتی را تعیین و هشدار لازم را برای آغاز آبیاری می‌دهد. از NITs می‌توان برای پایش غیرچشمی رطوبت در اندام هوایی گیاه استفاده نمود (بوگنا و همکاران، ۲۰۱۳). در NITs، از ایزوتوپ‌های پایدار (نشاندار) و رادیواکتیو (ساطع کننده اشعه) و همچنین منابع تابشی مانند کاوشگرهای نوترون و گاما استفاده می‌شود. ایزوتوپ‌ها به‌عنوان ردیاب‌هایی عمل می‌کنند که آگاهی منحصر به فرد و دقیقی در مورد میزان مواد مغذی و آب موجود در گیاهان و خاک ارائه می‌دهند. مطالعات انجام‌شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی با استفاده از NITs نشان داده است که پتانسیل قابل‌توجهی برای بهبود راندمان استفاده از آب و بهره‌وری محصول در کشاورزی آبی و دیم وجود دارد (آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، ۲۰۰۱). در این مقاله، به کارکرد ایزوتوپ پایدار هیدروژن سبک یا ^{1}H اشاره می‌شود.

مبانی فیزیکی روش نوترونی

در روش نوترونی برای تعیین رطوبت خاک از اصل حرارتی شدن یا کُند شدن نوترون‌ها استفاده می‌شود. کاوشگر نوترون‌متری دارای یک چشمهٔ پرتوزای هسته‌ای است که نوترون‌های پُرسرعت گسیل می‌کند. نوترون‌های پر سرعت از یک منبع پرتوزا مثل چشمهٔ رادیم-بریلیم یا امریسیم-بریلیم گسیل می‌شوند و در اثر برخورد کشسانی با هستهٔ اتم هیدروژن، مقداری از انرژی جنبشی خود را از دست می‌دهند و به اصطلاح کُند می‌شوند. به این فرآیند، حرارتی شدن[1] گفته می‌شود. در فرآیند حرارتی شدن، انرژی نوترون‌ها به حدود انرژی حرارتی اتم‌های یک عنصر در دمای اتاق کاهش می‌یابد. هیدروژن سبک (^{1}H) دارای جرم و اندازه‌ای برابر نوترون‌هاست. از این رو، اثر کُندکنندگی این عنصر بر نوترون‌های پر سرعت بیش از هر عنصر دیگر می‌باشد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹). آب در ترکیب ساختمانی خود هیدروژن دارد، بنابراین این ماده به نحو چشمگیری نوترون‌ها را کُند یا حرارتی می‌کند (اندریسن و همکاران، ۲۰۱۷؛ واهبی و همکاران، ۲۰۱۸). تراکم نوترون‌های حرارتی به سهولت توسط یک آشکارساز قابل اندازه‌گیری است. نوترون‌های کُند شده توسط مبدل به فوتون‌های نوری تبدیل می‌شوند و پس از تقویت در داخل آشکارساز، رقومی می‌شوند. با پیاده‌سازی الگوریتم واسنجی[2] می‌توان شمار نوترون‌ها را به یک کمیت در حال تغییر و قابل نمایش تفسیر کرد. شکل ۱ اجزای مختلف کاوشگر نوترونی را نشان می‌دهد (آژانس بین-المللی انرژی اتمی، ۲۰۲۰). به‌منظور تعیین رطوبت خاک باید این متغیر در مقابل رطوبت حجمی خاک واسنجی گردد.



شکل ۱- نمای کلی اجزای آشکارساز کاوشگر نوترونی (برگرفته از آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، ۲۰۲۰)

[1]- Thermailzation

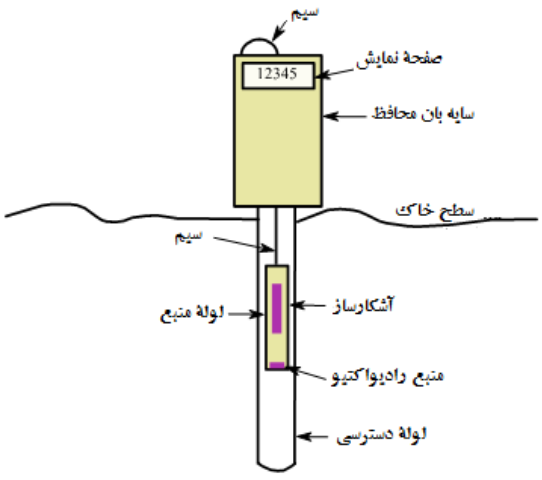
[2]-Calibration

کاوشگر نوترون‌متری برای پایش رطوبت خاک در مقیاس خُرد

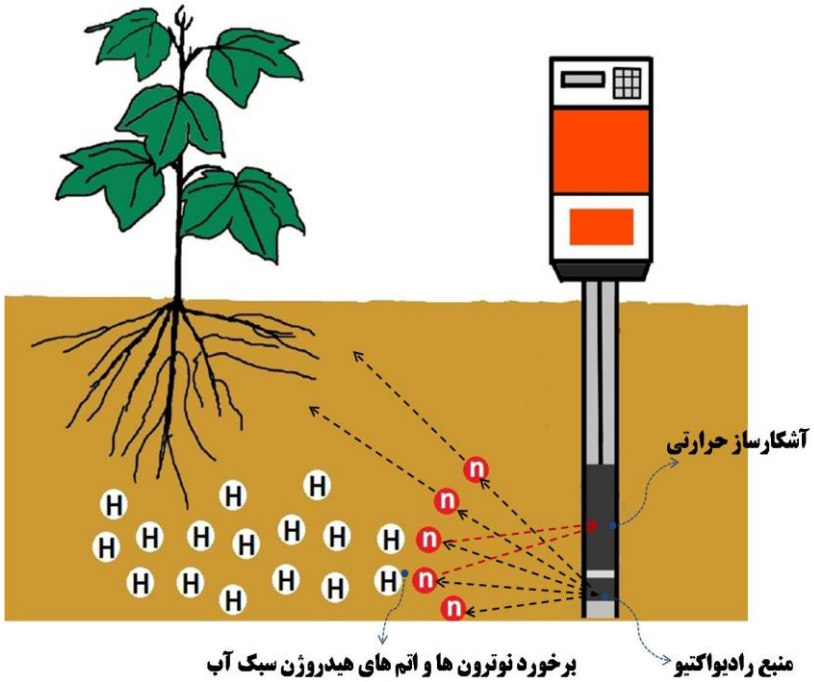
چنانچه گفته شد، روش کاوشگر نوترون‌متری قادر به تخمین رطوبت خاک است. تجهیزات این روش قابل‌حمل است و برای پایش تغییرات محتوای آب خاک با هدف ایجاد تعادل آبی در مزرعه و تعیین برنامه زمان‌بندی آبیاری استفاده می‌شود (شکل ۲). روش مستقیم اندازه-گیری رطوبت خاک، مخرب، پر زحمت، کُند و هزینه‌بر است و داده‌های رطوبت، به هنگام، در دسترس کاربر قرار نمی‌گیرند. در روش غیرمستقیم، رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری نمی‌شود بلکه متغیر دیگری اندازه‌گیری می‌شود و در اثر واسنجی به مقدار معادل رطوبت حجمی تبدیل می‌گردد. این متغیر، جایگزین رطوبت حجمی نام دارد (ژاکوبی و همکاران، ۲۰۱۸).

برای تعیین رطوبت در عمق‌های مختلف، لوله-ای با قطر اسمی ۱/۵ تا ۲ اینچ تا عمق مورد نظر در خاک نصب می‌شود. این لوله که اصطلاحاً لولهٔ دسترسی نامیده می‌شود (شکل ۲)، می‌تواند از جنس آلومینیوم، فولاد یا پی‌وی‌سی باشد. در بیشتر موارد از لولهٔ آلومینیوم با جدار نازک استفاده می‌شود. چون آلومینیوم بیشترین نفوذپذیری را نسبت به نوترون دارا بوده و در خاک نمی‌پوسد (آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، ۲۰۰۰).

کاربر به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت خاک، چشمهٔ رادیواکتیو را تا عمق مورد نظر در لوله پایین می‌آورد. برخورد نوترون‌های سریع با هستهٔ اتم‌های مجاور و به‌خصوص غنی از هیدروژن باعث کاهش انرژی جنبشی نوترون‌ها یا به اصطلاح کُند شدن آن‌ها می‌شود (شکل ۳). آشکارسازِ نوترون‌های کند محتوی تری فلورید بُر (BF_3) یا گاز هلیم-۳ است (آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، ۲۰۲۰). چشمهٔ نوترون‌های سریع و آشکارسازِ نوترون-های کُند در کنار هم در کاوشگر جاسازی شده‌اند؛ بنابراین هنگام انتقال چشمهٔ نوترون به عمق مورد نظر، آشکارسازِ نوترون‌های کند هم با آن منتقل می‌شود. تعداد نوترون‌های حرارتی ثبت‌شده توسط آشکارساز در واحد زمان (نرخ شمارش) معیاری از تراکم هیدروژن و در نتیجه مقدار رطوبت خاک مجاور کاوشگر است. عمده-ترین منبع خطا در کار با کاوشگر نوترونی وجود اتم‌های هیدروژن موجود در خاک و بی‌ارتباط با آب است و از این رو باید از توابع واسنجی (مقایسهٔ خاک کاملاً خشک و مرطوب) برای برآورد دقیق میزان رطوبت خاک در مواقع آبیاری استفاده نمود.



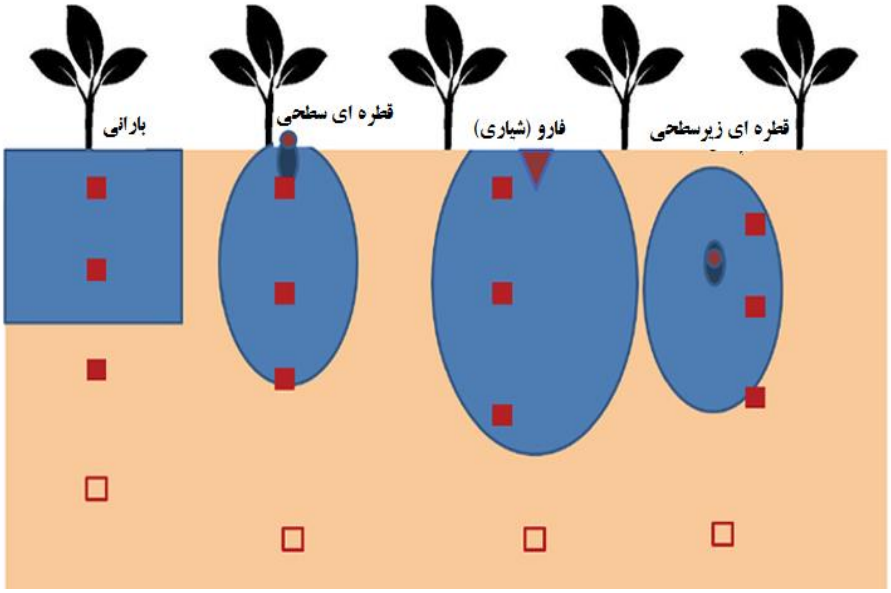
شکل ۲- تصویر یک کاوشگر نوترون‌متری مستقر در مزرعهٔ زعفرانیه پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای واقع در کرج (تصویر سمت راست)؛ شماتیک اجزای کاوشگر و نحوهٔ استقرار در سطح خاک (تصویر سمت چپ)



شکل ۳- نمای کلی اثر برخورد نوترون‌ها با اتم‌های هیدروژن سبک موجود در مولکول‌های آب در خاک، نوترون‌ها در برخورد با اتم‌ها حرارتی شده و توسط آشکارساز نوترون‌متری اندازه‌گیری می‌شوند

حوزهٔ تأثیر کاوشگر نوترون تقریباً کروی شکل است (آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، ۲۰۰۸). بررسی‌ها نشان داده‌اند که شعاع این کره تابعی از رطوبت یا هیدروژن خاک است. کاوشگر نوترون فقط نوترون‌های کند را می‌شمارد. از آنجایی که توصیف اثر متقابل نوترون-های کند و خاک مشکل است به یک منحنی واسنجی نیاز خواهد بود تا بر اساس آن شمارش نوترون به رطوبت حجمی خاک تبدیل شود. برای ایجاد رابطهٔ واسنجی، نمودار شمارش در دقیقه یا ثانیه تغییرات درصد حجمی رطوبت خاک تهیه می‌شود (عباسعلیان و همکاران، ۱۳۹۷). برای این منظور، این متغیر در مقابل مقادیر مختلف رطوبت حجمی خاک برآورد و سپس منحنی واسنجی به دست می-آید.

نحوهٔ قرارگیری حسگر آشکارساز در خاک در روش‌های مختلف آبیاری به‌منظور افزایش دقت پایش نوترون‌ها می‌تواند تغییر کند. این امر منطق زیست‌شناختی دارد چرا که ریشهٔ گیاه تمایل دارد در بخشی از خاک که دائماً خیس می‌گردد، مستقر شود (آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، ۲۰۰۸). شکل ۴ برخی گزینه‌های قرارگیری حسگر (مربع‌های توپر) را در چهار روش مرسوم آبیاری (بارانی، قطره‌ای سطحی، فارو یا شیاری و قطره‌ای زیرسطحی) نشان می‌دهد.



شکل ۴- نحوه قرارگیری حسگرهای کاوشگر نوترون‌متری در خاک براساس روش‌های مختلف مرسوم آبیاری

نفوذ آب در خاک طی آبیاری بارانی ازنظر فضایی نسبتاً یکنواخت و کم عمق است. از این رو، حسگرها می‌توانند در کنار گیاه قرار گیرند. نفوذ در خاک تحت آبیاری شیاری می‌تواند عمیق و گسترده باشد و نیاز است که حسگرها بین ردیف شیار و گیاه قرار گیرند (در شیب بین گیاه و شیار). در مورد آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی نفوذ آب به‌صورت عمیق و محلی خواهد بود، از این رو بسته به عمق قرارگیری لوله قطره‌ای نسبت به گیاهان و سطح خاک، حسگرها می‌توانند در زیر یا کنار لوله‌ها قرار بگیرند. در برخی از سامانه‌های کنترل آبیاری، حسگرهای عمیق‌تری نیز نصب می‌شوند (مربع‌های توخالی در شکل ۴) که هدف آن‌ها تشخیص میزان نفوذ عمقی در اثر آبیاری بیش از حد یا شستشوی عمدی نمک‌ها است. روند رو به ازدیاد تعداد نوترون‌های حرارتی ثبت‌شده توسط این حسگرها به معنای رسیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی و قطع عملیات آبیاری خواهد بود.

حسگر نوترونی اشعه کیهانی برای پایش غیر چشمی رطوبت در مقیاس بزرگ

کاوشگر نوترون‌متری یک روش نقطه‌ای تخمین رطوبت است. حسگر نوترونی اشعه کیهانی (CRNS[1]) یکی دیگر از فناوری‌های جدید در حوزه NITs است که از طریق تشخیص هیدروژن سبک درون مولکول‌های H_2O خاک قادر به تخمین رطوبت خاک در مقیاس میدانی (تقریباً ۲۰ هکتار) است (فرانز و همکاران، ۲۰۱۳). در روش CRNS برخلاف روش کاوشگر نوترون‌متری، نوترون‌ها منشأ طبیعی دارند. نوترون‌های اشعه کیهانی محصول جانبی زنجیره واکنش‌های انجام‌شده در بالای جو هستند. ذرات اولیه اشعه کیهانی که منشأ کیهانی دارند شامل پروتون و هستهٔ هلیم هستند. با رسیدن به جو زمین با مولکول‌های هوا برخورد می‌کنند و هسته‌های هلیم به پروتون، نوترون و سایر ذرات زیر-اتمی تجزیه می‌شوند. این نوترون‌ها با باران به زمین می‌آیند و حاوی انرژی جنبشی بالایی هستند و در برخورد با زمین از انرژی آن‌ها کاسته می‌شود (دسیلتز و زردا، ۲۰۱۳). فناوری CRNS قادر به برداشت اطلاعات رطوبت خاک در مکان‌هایی است که توسط حسگرهای نقطه‌محور نظیر کاوشگر نوترون‌متری مغفول مانده‌است. از آنجا که تکنیک CRNS به‌عنوان آشکارساز جرم هیدروژن عمل می‌کند و از سوی دیگر منابع متعدد هیدروژنی در محیط وجود دارند، لازم است که یک تابع واسنجی جهت تعیین کمیت سایر منابع هیدروژن در محیط تعریف شود و

[1]- Cosmic Ray Neutron Sensor

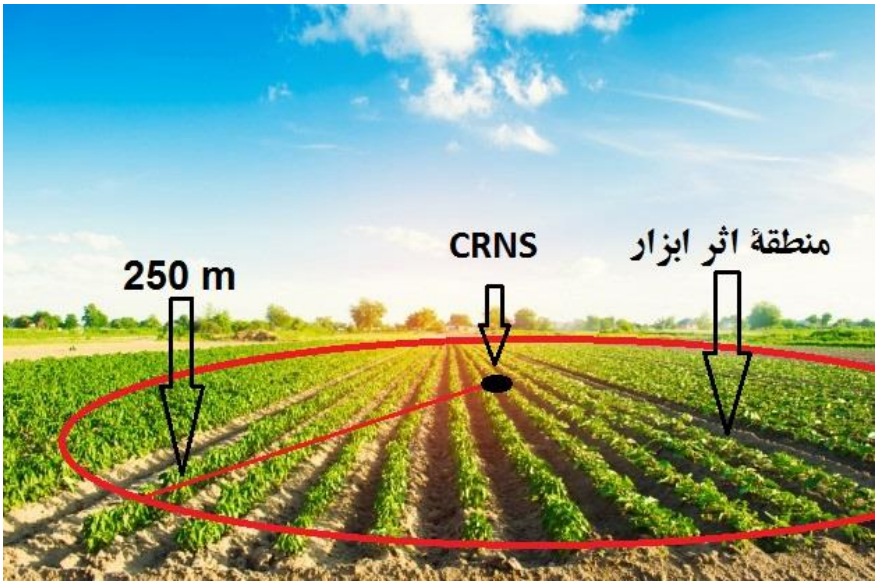
این منابع به‌عنوان سیگنال خطا تلقی می‌گردند (زردا و همکاران، ۲۰۱۲؛ هورن‌باکل و همکاران، ۲۰۱۲).

یکی از اصلی‌ترین منابع خطا، آب موجود در زیست‌توده گیاه است. از این رو، تخمین زیست‌توده گیاه در واسنجی مناسب ابزار CRNS مهم است. مقدار آب موجود در پوشش‌گیاهی در حال رشد که به معادل آب زیست‌توده (BWE[1]) مشهور است، بخش قابل توجهی از هیدروژن موجود در منطقهٔ اثر یا ردپای[2] CRNS را به خود اختصاص می‌دهد. از این رو، سیگنال BWE برای تعیین سهم خالص رطوبت خاک باید از سیگنال کلی دریافتی توسط ابزار جدا شود. روش‌های سنتی تخمین زیست‌توده عمدتاً شامل برداشت فیزیکی گیاهان در مزرعه است که در ابتدا وزن آن‌ها به دست می‌آید، سپس خشک می‌شوند و دوباره وزن می‌شوند تا درصد وزن آب تعیین شود. در حالی که این روش از نظر مقیاس گیاه به گیاه دقیق است، اما این روش قادر نیست ناهمگونی مکانی[3] زیست‌توده را مورد سنجش قرار دهد؛ به عبارت دیگر، روش نمونه‌برداری تخریبی یک روش نقطه‌ای است و نمی‌تواند معرف یک مزرعه بزرگ‌مقیاس باشد. چنانچه این روش بخواهد برای یک مزرعه به کار گرفته شود نمونه‌برداری‌های متعدد باید انجام شود که مستلزم صرف وقت و هزینه قابل توجه برای تعیین کمیت BWE است (واهبی و همکاران، ۲۰۱۸). به‌منظور تولید یک رهیافت منطقه‌ای می‌توان از فناوری سنجش از دور (RS[4]) مبتنی بر ماهواره برای غلبه بر مشکلات ذاتی نمونه‌گیری تخریبی[5] بهره برد. تصاویر برداشت شده از سطح زمین در اثر بازتاب نور و یا گسیل تابشی زمین توسط ماهواره برای این منظور مفید هستند. این داده‌ها روابط تنگاتنگی با زیست‌تودهٔ روی سطح دارند (قمقامی و همکاران، ۲۰۲۰) و به همین ترتیب می‌توانند به‌جای نمونه‌برداری تخریبی از آن استفاده کرد؛ بنابراین تلفیق دو فناوری هسته‌ای (NIT) و سنجش‌ازدور (RS) می‌تواند کاربرد مناسبی برای تخمین محتوای رطوبتی خاک و گیاه و در نتیجه، بهبود مدیریت آبیاری و کاهش هدررفت داشته باشد. بعلاوه، اندازه‌گیری نوترون‌ها از طریق CRNS به‌تنهایی پتانسیل خوبی برای تخمین زیست‌توده گیاه (و در نهایت BWE) دارد. آنچه که مهم است محاسبهٔ سیگنال BWE و حذف آن از سیگنال کلی دریافتی توسط حسگر CRNS است. در ادامه به توصیف هر کدام از روش‌ها و معایب و مزایای آن پرداخته می‌شود.

روش نمونه‌گیری تخریبی

ابزار CRNS به‌عنوان ردیاب هیدروژن، دارای منطقهٔ اثر به‌صورت یک دایره با شعاع ~ ۲۵۰ متر است (شکل ۵). در منابع علمی از فرآیند واسنجی به کار رفته در تکنیک CRNS به‌عنوان یک نمونه اصلی مدیریت ناهمگونی مکانی پوشش‌گیاهی در اراضی کشاورزی یاد می‌شود (فرانز و همکاران، ۲۰۱۶؛ آوری و همکاران، ۲۰۱۶). روش واسنجی CRNS اولین بار توسط دسیلتز و همکاران (۲۰۱۰) ارائه‌شده است. در مرحلهٔ اول در اطراف ابزار یک دایره (با شعاع ~ ۲۵۰ متر) ترسیم می‌شود که به این دایره منطقهٔ اثر یا ردپای ابزار گفته می‌شود. شش قطاع با زاویه ۶۰ درجه از هم تفکیک می‌شوند و در امتداد هر قطاع سه محل نمونه‌برداری در فاصله ۲۵، ۷۵ و ۲۰۰ متر از نقطه مرکز در نظر گرفته می‌شود (شکل ۶)؛ بنابراین درمجموع ۱۸ نقطه نمونه‌برداری وجود دارد.

[1] -Biomass Water Equivalent
[2] -Footprint
[3] -Spatial heterogeneity
[4] -Remote sensing
[5] -Destructive sampling



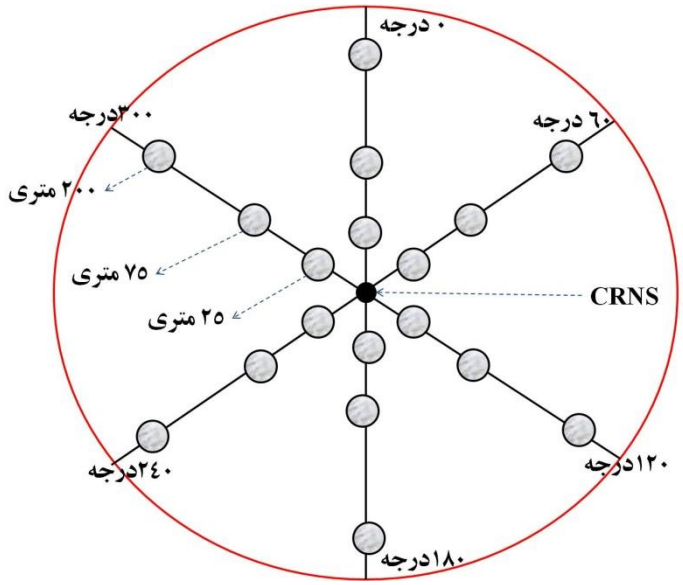
شکل ۵- نحوه استقرار و منطقهٔ اثر حسگر نوترونی اشعه کیهانی (CRNS)

از هر سایت نمونه‌برداری، نمونه‌های خاک به همراه نمونه‌های گیاهی برداشت می‌شود. به‌طور متداول، یک تا سه گیاه به‌طور تصادفی انتخاب و از خاک جدا می‌شوند. برای اطلاع از جزئیات بیشتر از نحوهٔ نمونه‌گیری به فرانز و همکاران (۲۰۱۵) مراجعه شود. اساساً، ابزار CRNS تمام هیدروژن‌های محیطی موجود در منطقهٔ اثر خود را که هیدروژن موجود در مولکول‌های رطوبت خاک نیز شامل آن می‌شود، ردیابی می‌کند. منابع مختلف هیدروژن محیطی به دو دسته کلی از نقطه‌نظر تغییر با زمان تقسیم‌بندی می‌شوند: گذرا[1] و مانا[2] (واهبی و همکاران، ۲۰۱۸). منابع گذرا شامل رطوبت خاک، آب بین‌سلولی و بخار آب جو است. منابع مانا شامل آب داخل مواد معدنی خاک، جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی، آب‌های مصرف شهری و ... است. به این ترتیب، مؤلفه اصلی زیست‌توده گیاهان که نوسانات زیادی به سیگنال CRNS وارد کند، آب بین‌سلولی است. اصطلاح معادل آب زیست‌توده (BWE) که برحسب میلی‌متر H_2O بیان می‌شود، در توابع واسنجی CRNS برای توصیف میزان آبی استفاده می‌شود که برای حیات زیست‌توده گیاهان مورد نیاز است. مقدار BWE به شرح زیر به دست می‌آید که در آن SWB و SDB به ترتیب زیست‌توده مرطوب و خشک بر حسب کیلوگرم در متر مربع است:

$$BWE = SWB - SDB + f_{WE} \times SDB \quad (۱)$$

و f_{WE} = 0.494 فرض شده و نسبت استوکیومتری[3] نام دارد. نسبت استوکیومتری در واقع نسبت مولکول H_2O به مولکول‌های کربن در ساختار آلی سلولزی در گیاه است (آوری و همکاران، ۲۰۱۶). واحدهای اجزای موجود در معادله برحسبِ کیلوگرم بر واحد سطح بوده که می‌توانند به ارتفاع آب بر حسب میلی‌متر تبدیل شوند. در طی نمونه‌برداری تخریبی از یک پلات ۱ مترمربعی بین یک تا سه گیاه انتخاب می‌شود. در ادامه عملیات توزین و محاسبه اجزای معادله (۱) و تبدیل واحدها انجام خواهد شد. بدین ترتیب، میزان آب معادل زیست‌توده به‌دست‌آمده و می‌تواند از شمارش کلی نوترون‌های کند شده کسر شده و حجم یا ارتفاع رطوبت خاک به دست آید.

[1]- Transient
[2]- Static
[3] -Stoichiometric ratio



شکل ۶- الگوی نمونه‌برداری تخریبی از منطقهٔ اثر حسگر نوترونی اشعه کیهانی (CRNS)

چنانچه روشن است، فرآیند واسنجی ابزار CRNS شامل نمونه‌برداری درجا از زیست‌توده بوده و هدف آن تعیین کمیت هیدروژن در ساختار سلولی است. نمونه‌گیری تخریبی از زیست‌توده، یک روشی سنتی برای غلبه بر مسئله ناهمگونی مکانی پوشش‌گیاهی در اراضی کشاورزی است و تغییرات مکانی خاک، آب و ویژگی‌های پوشش‌گیاهی را بوسیلهٔ یک الگوی نمونه‌گیری شعاعی کنترل می‌کند. با وجود دقت روش در مقیاس اندازه‌گیری یک گیاه، محدودیت اصلی این شکل از نمونه‌گیری صرفِ زمان زیاد برای آن است. بعلاوه این روش برای مزارعی که ابزار به‌صورت ثابت در آن مستقر شود و بخواهد تنها BWE مربوط به آن مزرعه محاسبه شود، ممکن است کارکرد خوبی داشته باشد؛ اما هنگامی‌که نسخه‌های سیار ابزار CRNS استفاده شوند (چه زمانی که برای چند مزرعه به‌صورت هم‌زمان استفاده شود و چه برای مزارع بسیار بزرگ یا بیش از ۲۰ هکتار)، استفاده از این روش نمونه-گیری با مشکلات عدیده‌ای همراه است.

کاربرد سنجش از دور

سنجش از دور مبتنی بر ماهواره بر اصول دریافت امواج الکترومغناطیسی از پوشش‌گیاهی توسط سنجنده‌های مستقر بر ماهواره استوار است. بیشتر سنجش از دور به آشکارسازی بازتابش خورشید از سطح زمین و بخشی از آن به تابش گسیل‌شده از سطح زمین متکی است و در بسیاری از رشته‌ها کاربرد دارد. مزیت اصلی سنجش از دور به‌عنوان یک تکنیک این است که مقیاس بزرگ مکانی را می‌تواند پوشش دهد.

انرژی بازتابی یا گسیل‌شده از سطح زمین به‌تنهایی نمی‌تواند معیاری از پارامترهای بیوفیزیکی فرآیندهای زیست‌کره باشد، چرا که فرآیندهای انتقال انرژی در سطوح مختلف اعم از سطوح پوشش‌گیاهی، خاک لخت و غیره پیچیده هستند. این مسئله تا حدی با ترکیب دو یا چند باند طیفی حل می‌شود که شاخص به‌دست‌آمده به‌عنوان یک شاخص سنجش از دور محسوب می‌شود. ترکیب باندها می‌تواند تجربی یا نیمه‌تجربی باشد. در تحقیقی، توکر و همکاران (۱۹۸۱) نشان دادند که زیست-توده گیاهان با شاخص‌های پوشش‌گیاهی[1] مستخرج از اندازه‌گیری‌های رادیومتریک در دامنه امواج کوتاه مرتبط است. بر این اساس، این شاخص‌ها با پارامترهای مختلف گیاهی اعم از فرآیند نمو گیاه، شاخص سطح برگ، زیست-توده و ... همبستگی دارند.

[1] -Vegetation Indices

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، ابزار CRNS همه اَشکال هیدروژن را در منطقهٔ اثر خود آشکار می‌کند. هیدروژن موجود در زیست‌تودهٔ در حال رشد یکی از منابع هیدروژن است. از این رو، برای دستیابی به واسنجی مناسب، باید معادل آب زیست‌توده (BWE) در منطقهٔ اثر ابزار CRNS مستقر در مزرعه تعیین شود. مطالعات نشان داده‌اند که می‌توان از شاخص‌های پوشش‌گیاهی مستخرج از تصاویر سنجش از دور برای تخمین قابل قبول BWE استفاده کرد (نگی‌رابرتسون و جیتلسون، ۲۰۱۵؛ نگی‌رابرتسون و همکاران، ۲۰۱۲). فناوری سنجش از دور به‌تازگی در زمینه واسنجی CRNS توسعه‌یافته است. آوری و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که تصویربرداری ماهواره‌ای، ضرورت انجام کارهای زمان‌بر و هزینه‌بر در زمینه نمونه‌گیری تخریبی را مرتفع می‌کند. بعلاوه، فناوری سنجش از دور امکان به‌کارگیری دستگاه‌های سیار CRNS برای پایش رطوبت خاک در مناطق بزرگ‌تر بدون نیاز به چندین عملیات گستردهٔ نمونه‌برداری تخریبی را فراهم می‌کند.

بر اساس مطالعات نگی‌رابرتسون و جیتلسون (۲۰۱۵) و نگی‌رابرتسون و همکاران (۲۰۱۲) شاخص پوشش‌گیاهی GrWDRVI[1] به‌عنوان نسخهٔ اصلاح‌شده شاخص NDVI[2]، بهترین رابطهٔ شناخته‌شده تاکنون برای بیان ارتباط بین شاخص سنجش از دور و زیست‌تودهٔ گیاه است که برای ذرت و سویا آزمایش شده است. توسعهٔ این شاخص حاصل از تلاش برای بهبود روابط تجربی بین داده‌های ماهواره‌ای و زیست‌تودهٔ سطح (که از طریق نمونه‌گیری تخریبی به دست می‌آیند) بوده است. در این شاخص به‌جای استفاده از کل باند مرئی از طول موج مربوط به سبز (۵۴۵ تا ۵۶۵ نانومتر) استفاده می‌شود:

$$GrWDRVI = \frac{0.1 \times NIR - Green}{0.1 \times NIR + Green} \qquad (۲)$$

که در این معادله، NIR باند فروسرخ نزدیک و $Green$ باند سبز است. توجه به این نکته مهم است که این شاخص، زیست‌توده مرطوب را محاسبه می‌کند اما زیست‌توده خشک به دست نمی‌آید. از این رو، استفاده از سنجش از دور برای محاسبه BWE به دانش اولیه از مرحله رشد محصول و مدل‌های زراعی وابسته است که قادر است تخمینی از نسبت زیست‌توده مرطوب به خشک ارائه دهد. از آنجایی که شدت بازتاب امواج الکترومغناطیسی از تاج‌پوشش گیاه در طول دورهٔ رشد تغییرات زمانی دارد، روابط بین زیست‌توده و شاخص سنجش از دور نیز باید از آغاز رشد (سبزینگی) تا میانه‌های فصل رشد (اوج فتوسنتز) و تا انتهای فصل رشد، متغیر باشد. از این رو محاسبات باید بر اساس معادلات مجزا انجام شود:

$$SWB_i \propto GrWDRVI \qquad (۳)$$

که i اشاره به مرحلهٔ فنولوژی رشد دارد. هر معادله شامل ضرایبی است که برای یک نوع محصول خاص به دست آمده است. این ضرایب برای سایر محصولات متفاوت بوده و مجموعه داده‌های جدید از مقادیر GrWDRVI و زیست‌توده (بر اساس نمونه‌گیری تخریبی) باید برای هر نوع محصول، احتمالاً ضرایب و در نتیجه معادلات جدیدی به وجود آورند. همچنین ضرایب و معادلات برای یک محصول در شرایط دیم یا آبیاری متفاوت است (نگی‌رابرتسون و جیتلسون، ۲۰۱۵؛ نگی‌رابرتسون و همکاران، ۲۰۱۲). برای تبدیل زیست‌تودهٔ مرطوب به زیست‌تودهٔ خشک سه رویه وجود دارد: ۱) فرض کنیم حدود ۷۰ الی ۸۰٪ زیست‌توده از آب تشکیل‌شده است (بر اساس وزن نهایی محصول)؛ ۲) با کمک نمونه‌گیری تخریبی در هر مرحلهٔ فنولوژی، این نسبت محاسبه شود؛ و ۳) از مدل‌های زراعی برای برآورد این نسبت استفاده شود. با برآورد زیست‌تودهٔ خشک، معادل آب زیست‌توده یا BWE برای واسنجی مناسب ابزار CRNS به‌راحتی با استفاده از معادلهٔ (۱) به دست خواهد آمد.

قابلیت خود ابزار CRNS برای محاسبهٔ BWE

بیشتر تحقیقات فعلی و گذشته در مورد ابزار CRNS در محیط‌های کشاورزی بر استفاده از آن به‌عنوان حسگر رطوبت خاک استوار است. با این حال، تحقیقاتی

[1] -Green Wide Dynamic Range Vegetation Index

[2] -Normalized Difference Vegetation Index

در مورداستفاده از آن به‌عنوان ابزاری برای تخمین زیست-تودهٔ در حال رشد نیز انجام‌شده است (هودان و همکاران، ۲۰۱۴؛ باتز و همکاران، ۲۰۱۵). مک‌جانت و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که رطوبت خاک بیشترین سهم هیدروژن در سیگنال CRNS است و زیست‌توده در حال رشد سهم کمی دارد. همچنین یافته‌های این محققین نشان داد که بیشترین خطای واردشده به سیگنال از آب موجود در ساختارهای معدنی خاک (آبی که در دمای بیش از ۱۰۰ درجه نیز تا ۲۴ ساعت بخار نمی‌شود) و بخار آب جو نشئت می‌گیرد. با این وجود، سیگنال زیست‌توده عامل اصلی ایجاد نوسانات در تعداد نوترون‌ها بوده و به‌خصوص برای یک زیست‌تودهٔ با رشد سریع، عدم‌قطعیت بالایی دارد. به این دلیل، حذف آن از سیگنال رطوبت خاک موضوعی چالش‌برانگیز است.

طی فرآیند واسنجی CRNS، متغیر N_0 برای هر نقطه در یک آزمایش معین محاسبه می‌شود. کمیت N_0 میزان شمارش نظری نوترون‌های تشخیص داده‌شده توسط CRNS در محیطی عاری از پوشش گیاهی با خاک سیلیس خشک است که در منطقهٔ اثر دستگاه وجود دارد. سپس این مقدار با شمار نوترون‌های مراحل مختلف رشد گیاه مقایسه می‌شود.

نقش کمیت N_0 در عملکرد واسنجی توسط دسیلتز و همکاران (۲۰۱۰) توضیح داده‌شده است. هودان و همکاران (۲۰۱۴) از CRNS به‌عنوان ابزاری برای نقشه‌برداری مکانی زیست‌توده به‌جای رطوبت خاک استفاده کردند. این محققان در مطالعه خود تعیین کردند که در حدود ۸۰٪ از تغییر در N_0 به دلیل همین زیست‌توده است که پس از کمّی‌سازی، سایر منابع هیدروژن نظیر رطوبت موجود در خاک به‌دست‌آمده است.

فرانز و همکاران (۲۰۱۵) یک رابطه خطی بین معادل آب زیست‌توده (BWE) و N_0 با استفاده از یک CRNS سیّار در مزرعه ذرت کشاورزی در نبراسکا، ایالات‌متحده تعریف کردند. این محققان به ازای هر یک کیلوگرم کاهش BWE در مترمربع یک درصد کاهش در کمیت N_0 مشاهده کردند (R^2 از ۰٫۵۱ به بالا). علاوه بر این، نتایج، باتز و همکاران (۲۰۱۵) رابطه مشابهی بین زیست‌توده زمینی و نرخ شمارش CRNS نشان دادند.

تعیین زیست‌توده گیاهان از طریق ابزار CRNS به بررسی‌های میدانی اولیه نیازمند است. چنانچه در نقاط مشخصی از مزرعه موردمطالعه برای هر پروژه تحقیقاتی، باید بین نرخ شمارش N_0 اندازه‌گیری شده توسط CRNS و معادل آب زیست‌توده که از طریق نمونه‌گیری تخریبی یا روش سنجش از دور (که پیش‌تر هر دو توضیح داده شده است) تعیین می‌شود، ارتباطی برقرار کرد. پس از ایجاد چندین مجموعه داده طی چند سال، می‌توان بین دو متغیر رابطه تجربی برقرار کرد. در ادامه، کمیت N_0 می‌تواند به‌عنوان یک متغیر پیش‌بینی کننده برای زیست‌توده همان محصول و در همان شرایط دیم یا آبی مورد استفاده قرار گیرد.

برخی محققان مانند اندریسن و همکاران (۲۰۱۶ و ۲۰۱۷) قابلیت CRNS را برای محاسبهٔ مستقیم BWE مورد آزمایش قرار داده‌اند. غالباً عضو حساس آشکارساز CRNS یا بدون حفاظ است و یا دارای حفاظ پلاستیکی و یا از جنس کادمیوم می‌باشد. ثابت شده است که نسبت شمارش نوترون‌ها در حالت بدون حفاظ و در حالت حفاظ پلاستیکی همبستگی مستقیم با برآوردهای BWE دارد (اندریسن و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین بر اساس گزارش واهبی و همکاران (۲۰۱۸) با آگاهی از محتوای رطوبت خاک در عمق پنج سانتی‌متر (بدون نیاز به تخریب) و شمارش نوترون‌ها در حالت بدون حفاظ و دارای حفاظ پلاستیکی می‌توان تغییرات BWE را با زمان تخمین زد:

$$BWE = a + b \times M + c \times BM \qquad (۴)$$

که در آن، a، b و c ضرایب مدل دو متغیره هستند، M شمارش نوترون‌ها تعدیل‌شده بر اساس اطلاعات رطوبت خاک و BM نسبت شمارش نوترون‌ها در حالت بدون حفاظ به حفاظ پلاستیکی است. ترکیب ابزار CRNS با مدل‌های زراعی موجود می‌تواند به‌دقت عملکرد نهایی مدل و بهینه‌سازی مصرف آب کمک شایانی کند.

در این مقاله، سه روش برای جداسازی حجم واقعی رطوبت خاک از سایر منابع هیدروژنی و نهایتاً برآورد واقعی آن در یک مزرعه بزرگ (حداکثر تا ۲۰ هکتار) برای واسنجی ابزار حسگر نوترونی اشعه کیهانی (CRNS) مورد تحلیل قرار گرفت. در جدول ۱ معایب و مزایای هر کدام از روش‌ها آورده شده است.

مقایسهٔ روش‌های NITs برای پایش غیر چشمی رطوبت خاک

در جدول ۲، ویژگی‌های هر دو روش کاوشگر نوترون‌متری (خردمقیاس و بزرگ‌مقیاس) برای پایش میزان رطوبت خاک به‌صورت مقایسه‌ای آورده شده است (عباسعلیان و همکاران ۱۳۹۷؛ واهبی و همکاران ۲۰۱۸).

جدول ۱- جمع‌بندی مقایسه سه روش اندازه‌گیری BWE در واسنجی پارامترهای CRNS

روش‌ها	مزایا	معایب
روش نمونه‌گیری تخریبی	دقت بالا در مقیاس اندازه‌گیری هر گیاه	زمان‌بر و هزینه‌بر؛ باقی‌ماندن معضل ناهمگونی مکانی پارامترهای محیطی؛ محدودیت پیاده‌سازی در مزارع بسیار بزرگ؛ محدودیت استفاده در ابزارهای سیار CRNS
روش سنجش از دور	عدم نیاز به نمونه‌گیری تخریبی؛ دقت مناسب در مقیاس بزرگ مکانی؛ دسترسی راحت به اطلاعات؛ حل مسئله ناهمگونی مکانی پارامترهای محیطی؛ مناسب برای مزارع بزرگ؛ مناسب برای ابزارهای سیار CRNS؛ قابلیت لینک به مدل‌های زراعی	کارایی ضعیف در مزارع کوچک (کمتر از ۱۰۰۰ مترمربع)
روش ابزار CRNS به‌تنهایی	دقت مناسب در مقیاس بزرگ و کوچک؛ مناسب برای مزارع کوچک و بزرگ؛ مناسب برای ابزارهای سیار CRNS؛ قابلیت لینک به مدل‌های زراعی	نیاز به نمونه‌گیری تخریبی دارد؛ نیازمند دسترسی به شبکهٔ سنجش رطوبت خاک در مزرعه است؛ بسته به تعداد نقاط در شبکه، بخش از ناهمگونی مکانی ممکن است باقی بماند

جدول ۲- مقایسه روش‌های NITs

صفات	کاوشگر نوترونی	حسگر نوترونی اشعه کیهانی
مقیاس در مزرعه	خرد (مزرعه زیر ۱۰۰۰ مترمربع)؛ از این رو توزیع مکانی الگوهای حجم رطوبت خاک را در بر نمی‌گیرد	بزرگ مقیاس تا ۲۰ هکتار و بیشتر؛ قابلیت برآورد توزیع مکانی الگوهای حجم رطوبت خاک را دارد
قابلیت پرتابل	دارد	دارد (با قابلیت پرتابل امکان پایش رطوبت در مزارع بزرگ‌تر نیز وجود دارد)
دقت واسنجی	بسیار دقیق، زیرا حسگرها مستقیم در خاک مستقر هستند؛ هرچند هیدروژن موجود در ساختمان آلی خاک باید محاسبه شود	دقت آن بستگی به نحوهٔ محاسبهٔ سهم BWE از رطوبت محیطی دارد: بر اساس معایب و مزایای شرح داده‌شده در جدول ۱
قابلیت تعیین زمان‌بندی آبیاری	در مزرعه کوچک کاربرد دارد	در مزارع وسیع کشت و صنعتی کاربرد خواهد داشت
تأمین انرژی نمونه‌های موجود	عمدتاً مصرف برق	طراحی اولیه با پنل‌های خورشیدی
تداخل پارامترهای بیرونی نظیر شوری و دما در محاسبهٔ حجم رطوبتی	ندارد	ندارد

تحقیقات بیشتر در زمینهٔ کاربرد فناوری هسته‌ای برای افزایش راندمان مصرف آب

در داخل کشور مطالعات معدودی در ارتباط با کاربرد فناوری هسته‌ای در سامانه‌های آبیاری و افزایش راندمان مصرف آب وجود دارد. در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. عباسعلیان (۱۳۸۷) با توزیع مستقیم کودهای ازت، فسفر و پتاس در خاک به‌صورت محلول در آب آبیاری قطره‌ای، کارکرد تکنیک‌های هسته‌ای در توزیع آب و کود را بررسی کرد و راندمان مصرف آب، کارآیی بازیافت نیتروژن کود و سایر عناصر غذایی و نیز مقدار محصول

تولیدشده، مورد مقایسه قرار گرفتند. بر اساس تحقیقات انجام‌شده در این مطالعه، راندمان بازیافت نیتروژن کود در سیستم کود آبیاری بیش از روش‌های کشت سنتی به دست آمد، بدون اینکه کمیت و کیفیت محصول تحت تأثیر قرار گیرد.

خراسانی و همکاران (۱۳۹۰) به‌منظور بررسی کارکرد روش پراکندگی نوترون در اندازه‌گیری رطوبت خاک، آزمایش مزرعه‌ای در قالب طرح بلوک کامل تصادفی، به‌صورت کرت دو بار خردشده، در سه تکرار (مجموعاً دوازده کرت)، در مزرعهٔ تحقیقاتی مرکز آزمایشگاه‌های آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در سایبرزدورف اتریش بر روی گیاه گوجه‌فرنگی اجرا کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که کاوشگر نوترون‌متری یک وسیلهٔ قابل قبول و مورد اعتماد با فناوری جدید و دقت ±۲ میلی‌متر در ۴۵۰ میلی‌متر آب خاک تا عمق ۵,۱ متری و روش پراکندگی نوترون، کاربردی‌ترین روش برای اندازه‌گیری نیمرخ رطوبتی خاک و برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد.

رحمانی ثقیه و قائمی (۱۳۹۲) عملکـرد چندین سنجندهٔ هوشمند تعیین مقدار رطوبت خاک در شرایط کاربرد آب شور در عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری را مورد ارزیابی قرار دادند. در بین روش‌های متداول، نوترون‌متر دارای دقت مناسب در اندازه‌گیری رطوبت سطح خاک ارزیابی شد. عباسعلیان و همکاران (۱۳۹۷) در یک تحقیق پنج ساله به‌منظور مدیریت آبیاری مزرعه، رطوبت خاک منطقه ریشه گیاه را به روش کاوشگر نوترون‌متری اندازه-گیری کردند. از تحقیق آن‌ها، این نتیجه حاصل شد که تعیین رطوبت خاک به روش نوترون‌متری در مقایسه با سایر روش‌های غیر مستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک صحیح‌تر و دقیق‌تر است و این تنها روش غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت است که با استناد به داده‌های آن می‌توان به مطالعات بیلان آب و کارآیی مصرف آب پرداخت. در عمق‌های کم نیمرخ خاک، به علت قرارگیری منبع پرتوزای نوترون در مجاورت سطح خاک، شمار چشمگیری از نوترونها از خاک خارج‌شده و این یک منبع خطا در اندازه‌گیری رطوبت محسوب می‌شود. در گذشته تعیین رطوبت لایه‌های سطحی خاک به روش نوترونی چالش جدی به شمار می‌رفت. این پژوهش به‌روشنی نشان داد که می‌توان حتی در عمق پانزده سانتیمتر به ضریب همبستگی بیش از ۹۷٪ و خطای معیار کمتر از ۱٪ برای نمودار واسنجی کاوشگر نوترون دست‌یافت.

مطالعات متعددی در زمینه کاربرد روش‌های هسته‌ای در بهبود مدیریت آبیاری و کاهش هدررفت آب در خارج از کشور انجام‌شده است. لیب و همکاران (۲۰۰۳) به‌منظور تعیین بهتر زمان‌بندی آبیاری چند حسگر رطوبتی خاک مبتنی بر داده‌های نوترون‌متر واسنجی شده را مورد ارزیابی قرار دادند که نتایج به دست آمده از این تحقیق، دقت مناسب حسگرها از جمله کاوشگر نوترونی (RMSE در حدود ۷٪) را از نظر اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک نشان می‌دهد. هورن‌باکل و همکاران (۲۰۱۲) بررسی کردند که آیا حضور پوشش‌گیاهی در تخمین CRNS از مقدار آب خاک تأثیر می‌پذیرد یا خیر. این محققین نتیجه گرفتند که در تحقیقات بیشتری باید منابع مختلف هیدروژن را بررسی کرد. فرانز و همکاران (۲۰۱۳) از CRNS برای تخمین زیست‌توده با اندازه‌گیری و حذف سایر منابع هیدروژن در محدودهٔ اندازه‌گیری حسگر استفاده کردند. بوگنا و همکاران (۲۰۱۳) دقت CRNS را برای برآورد محتوای آب خاک در یک جنگل مرطوب بررسی کردند. این مطالعه به این نتیجه رسید که هیدروژن موجود در زیست‌توده، شدت نوترون و دقت کلی CRNS را کاهش می‌دهد.

ژاکوبی و همکاران (۲۰۱۸) از فناوری CRNS برای اندازه‌گیری هم‌زمان محتوای رطوبت خاک و آب معادل زیست‌توده (BWE) استفاده کردند. این محققین ارتباط خطی بین نسبت نوترونی و زیست‌تودهٔ روی سطح زمین یافتند که به پایش مستمر زیست‌تودهٔ خشک‌روی سطح زمین کمک می‌کرد. این محققین توصیه کردند که برای افزایش دقت تخمین محتوای رطوبتی خاک، سایر منابع هیدروژنی مانند برگاب، برف و غیره نیز تخمین و از

سیگنال کلی دریافت شده حذف شوند. واتر و همکاران (۲۰۲۰) همچنین از فناوری CRNS برای تخمین محتوای رطوبتی خاک در حضور زیست‌توده استفاده کردند. آن‌ها جمع‌بندی کردند که وجود زیست‌توده منجر به کاهش ۱۲٫۴۳٪ شدت نوترون‌های حرارتی و کاهش ۱۳٫۸٪ شمارش نوترون‌های اولیه می‌شود. همچنین این محققین ارتباط بسیار قوی بین نسبت نوترون‌ها با شاخص‌های پوشش گیاهی نظیر NDVI[1] پیدا کردند.

نتیجه‌گیری

برای پاسخگویی به چالش امنیت غذایی در کشور، تولیدات کشاورزی باید افزایش یابد. این امر باعث فشار مضاعف بر منابع آب سطحی و زیرزمینی خواهد شد. استفاده از فناوری‌های جدید در مدیریت منابع آب در کشاورزی به بهبود و تقویت توانایی کشاورزان، محققان و سیاست‌گذاران در تأمین پایدار امنیت غذایی کمک می‌کند. این مقاله یک بررسی اجمالی از کاربرد فناوری‌های هسته‌ای و ایزوتوپی (NITs) در بهبود مدیریت آبیاری ارائه داده است. این دستاورد با تعیین میزان آب موجود در بدنه‌های آبی در یک مزرعه و تفکیک آن‌ها با تلفیق فناوری‌های نوین محقق می‌شود. بهبود مدیریت آبیاری نقش زیادی در نیل به امنیت غذایی پایدار حتی در زمان کمبود آب دارد. مقاله حاضر تأکید زیادی بر تلفیق فناوری‌های کاربردی در کشاورزی دقیق جهت کاهش اثرات تغییر اقلیم دارد. ایجاد یک سامانه پشتیبان تصمیم (DSS[2]) که زمان و میزان آبیاری را اعلام کند، می‌تواند به کاربردی شدن این فناوری‌ها در مزرعه، بالأخص در مزارع بزرگ منتهی شود.

فهرست منابع

۱. احمدزاده ک. میرلطیفی س م. و دهقانی سانیج ح. ۱۳۸۶. ارزیابی فنی و هیدرولیکی عملکرد یک سیستم آبیاری قطره‌ای (مطالعه موردی: منطقه حسن‌آباد شهر ری). مجموعه مقالات سمینار علمی طرح ملی آبیاری تحت‌فشار و توسعه پایدار. ۲ اسفندماه ۱۳۸۶ مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج.

۲. برنامه ملی پنج‌ساله ششم توسعه ۱۳۹۶. قابل‌دسترس از سایت اینترنتی https://shenasname.ir/laws/tosee/plan6.

۳. توکلی ا. و عبدالرحمانی ب. ۱۳۸۶. افزایش بهره‌وری آب (WP) و تعیین مقدار و زمان بهینه تک آبیاری برای کلزای بهاره دیم. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۸(۲): ۷۹-۹۲.

۴. خراسانی ع. موسوی شلمانی م. و پیرولی بیرانوند ن. ۱۳۹۰. مقایسه روش‌های انعکاس سنجی زمانی و ظرفیت سنجی با روش پراکندگی نوترون در اندازه‌گیری رطوبت خاک. مجله علوم و فنون هسته‌ای. ۳(۵۷): ۱-۷.

۵. رحمانی ثقیه ج. و قائمی ع. ۱۳۹۲. اثر شوری بر کاربرد حسگرهای هوشمند در تعیین رطوبت خاک. نشریه مدیریت آب و آبیاری. ۳(۲): ۱۳۵-۱۴۶.

۶. عباسعلیان ح. رودپیما م. و بستانی ع. ۱۳۹۷. امکان‌سنجی تعیین رطوبت خاک در عمق زراعی به روش کند شدن نوترون‌ها. چهارمین کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار.

۷. عباسعلیان ح. ۱۳۸۷. استفاده از فن‌آوری هسته‌ای در ارزیابی راندمان مصرف آب و کود تحت سیستم کود آبیاری قطره‌ای، دهمین کنگره علوم زراعت و اصلاح نباتات، تهران، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، https://www.civilica.com/Paper-NABATAT10-NABATAT10_1110.html

۸. عباسی ف، سهراب ف، و عباسی ن. ۱۳۹۴. راندمان‌های آبیاری تغییرات زمانی و مکانی آن در ایران. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. ویراست سوم.

[1] -Normalized Difference Vegetation Index

[2] -Decision Support System

۹. مرکز آمار ایران ۱۳۹۶. تحلیل آمار و اطلاعات منابع آب کشور. سازمان برنامه و بودجه کشور.

10. Andreasen, M., Jensen, K.H., Desilets, D., Franz, T., Zreda, M., Bogena, H.R., and Looms, M.C. 2017. Status and perspectives of the cosmic-ray neutron method for soil moisture estimation and other environmental science applications. Vadose Zone Journal. 16(8). https://doi.org/10.2136/vzj2017.04.0086
11. Andreasen, M., Jensen, K.H., Zreda, M., Desilets, D., Bogena, H., Looms, M.C. 2016. Modeling cosmic ray neutron feld measurements. Water Resourse Research. 52:6451
12. Avery, W.A., Finkenbiner, C., Franz, T.E., Wang, T., Nguy-Robertson, A.L., Suyker, A., Arkebauer, T., Munoz-Arriola, F. 2016. Incorporation of globally available datasets into the roving cosmic ray neutron probe method for estimating feld-scale soil water content. Hydrology and Earth System Sciences. 20:3859.
13. Baatz, R., Bogena, H.R., Hendricks Franssen, J., Huisman, A., Montzka, C., and Vereecken, H. 2015. An empirical vegetation correction for soil water content quantifcation using cosmic ray probes. Water Resourse Research. 51:2030
14. Babaeian, I., Modirian, R., Karimian, M., and Zarghami, M. 2015. Simulation of climate change in Iran during 2071–2100 using PRECIS regional climate modelling system. Desert. 20(2):123–134.
15. Bogena, H.R., Huisman, J.A., Baatz, R., Hendricks Franssen, H.J., and Vereecken, H. 2013. Accuracy of the cosmic-ray soil water content probe in humid forest ecosystems: The worst case scenario. Water Resources Research. 49: 5778–5791. https://doi.org/10.1002/wrcr.20463
16. Burt, C.M., Howes, D.J., and Mutziger, A. 2001. Evaporation estimates for irrigated agriculture in califonia. Presented at the 2001 Irrigation Association Conference, San Antonia, Texas, Nov. 4-6, 2001.
17. Desilets, D., Zreda, M., and Ferre, T.P.A. 2010. Nature's neutron probe: land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. Water Resourse Research. 56:W11505.
18. Desilets. D. and Zreda M. 2013. Footprint diameter for a cosmic ray soil moisture sensor: theory and Monte Carlo simulations. Water Resources Research. 49: 35-66.
19. Franz, T.E., Wahbi, A., Vreugdehil, M., Weltin, G., Heng, L., Oismueller, M., Strauss, P., Dercon, G., Desilets, D. 2016. Using cosmic ray neutron probes to monitor landscape scale soil water content in mixed land use agricultural ecosystems. Applied and Environmental Soil Sciences. 2016:11
20. Franz, T.E., Wang, T., Avery, W., Finkenbiner, C., and Brocca, L. 2015. Combined analysis of soil moisture measurements from roving and fxed cosmic ray neutron probes for multiscale real-time monitoring. Geophysic Research Letters. 42:3389
21. Franz, T.E., Zreda, M., Rosolem, R., Hornbuckle, B.K., Irvin, S.L., Adams, H., Kolb, T.E., Zweck, C., and Shuttleworth, W.J. 2013. Ecosystem-scale measurements of biomass water using cosmic ray neutrons. Geophysic Research Letters. 40: 3929–3933.
22. Ghamghami, M., Ghahreman, N., Irannejad, P., and Pezeshk, H. 2020. A parametric empirical Bayes (PEB) approach for estimating maize progress percentage at field scale. Agricultural and Forest Meteorology. 281 (2020) 107829. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107829
23. Ghamghami, M., and Irannejad, P. 2019. An analysis of droughts in Iran during 1988-2017. SN Applied Sciences. 1:1217–1221. https://doi.org/10.1007/s42452-019-1258-x
24. Hawdon A, McJannet D, Wallace J (2014) Calibration and correction procedures for cosmic ray neutron soil moisture probes located across Australia. Water Resourse Research. 50:5029.
25. Hornbuckle, B., Irvin, S., Franz, T., Rosolem, R., and Zweck, C. 2012. The Potential of The Cosmos Network to be a Source of New Soil Moisture Information for SMOS and SMAP. In Proceedings of the 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 22–27 July 2012.
26. IAEA, 2000. Comparison of soil water measurement using the neutron scattering, time domain reflectometry and capacitance methods. ISSN 1011-4289, Vienna, Austria: IAEA.

27. IAEA, 2001. Use of Isotope and Radiation Methods in Soil and Water Management and Crop Nutrition. IAEA Training Course Series No. 14. Vienna, Austria: IAEA.
28. IAEA, 2008. Field Estimation of Soil Water Content: A Practical Guide to Methods, Instrumentation and Sensor Technology. ISSN 1018–5518, Vienna, Austria: IAEA.
29. IAEA, 2020. Modern Neutron Detection Proceedings of a Technical Meeting. ISSN 1011–4289, Vienna, Austria: IAEA.
30. Jakobi, J., Huisman, J.A., Vereecken, H., Diekkrüger, B., and Bogena, H.R. 2018. Cosmic ray neutron sensing for simultaneous soil water content and biomass quantification in drought conditions. Water Resources Research. 54: 7383–7402. https://doi.org/10.1029/2018WR022692
31. Lawrence, D.M., Thornton, P.E., Oleson, K.W., and Banon, G.B. 2007. The Partitioning of Evapotranspiration into Transpiration, Soil Evaporation, and Canopy Evaporation in a GCM: Impacts on Land–Atmosphere Interaction. Journal of Hydrometeorology. 8: 862-880.
32. Leib, B.G., Jabro, J.D., and Mtthews, G.R. 2003. Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. Soil Science. 168: 396-408.
33. McJannet, D., Franz, T.E., Hawdon, A., Boadle, D., Baker, B., Almeida, A., Silberstein, R., Lambert, T., and Desilets, D. 2014. Field testing of the universal calibration function for determination of soil moisture with cosmic ray neutrons. Water Resourse Research. 50:5235
34. Nguy-Robertson, A.L., Gitelson, A.A. 2015. Algorithms for estimating green leaf area index in C3 and C4 crops for MODIS, Landsat TM/ETMC, MERIS, Sentinel MSI/OLCI, and Venus sensors. Remote Sensing Letters. 6:1336.
35. Nguy-Robertson, A.L., Gitelson, A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T., Rundquist, D. 2012. Green leaf area index estimation in maize and soybean: combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. Agronomy Journal. 104:360.
36. Nguyen, M.L., Zapata, F., Lal, R., and Dercon, G. 2011. Role of isotopic and nuclear techniques in sustainable land management: Achieving food security and mitigating impacts of climate change. In: World Soil Resources and Food Security, Advances in Soil Science, Vol. 18; eds. R. Lal, and B.A. Stewart, 345–418, Boca Raton, FL: CRC Press.
37. Lamm FR, Ayars JE, Nakayama FS (2007) Microirrigation for Crop Production, Sec. 13: Subsurface Drip Irrigation. Elsevier B.V.
38. Toukiloglou, P. 2007. Comparison of AVHRR, MODIS and VEGETATION for Land Cover Mapping and Drought Monitoring at 1 km Spatial Resolution. Ph.D. Thesis, Cranfield University, Bedford, UK.
39. Tucker C.J., B.N. Holben, J.H. Elgin, and J.E. McMurtrey. 1981. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. Remote Sensing of Environment. 11: 171-189.
40. Vather, T., Everson, C.S., and Franz, T.E. 2020. The Applicability of the Cosmic Ray Neutron Sensor to Simultaneously Monitor Soil Water Content and Biomass in an Acacia mearnsii Forest. Hydrology. 7, 48, doi:10.3390/hydrology7030048
41. Wahbi, A., Heng, L., and Dercon, G. 2018. Cosmic Ray Neutron Sensing: Estimation of Agricultural Crop Biomass Water Equivalent. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69539-6
42. Zhang, Y., Shi, P., Song, J., and Li, Q. 2019. Application of Nitrogen and Oxygen Isotopes for Source and Fate Identification of Nitrate Pollution in Surface Water: A Review. Applied Science. 9(18): 2-17. doi:10.3390/app9010018
43. Zreda, M., Schuttleworth, W.J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T., Rosolem, R. 2012. COSMOS: the cosmic ray soil moisture observing system. Hydrology and Earth System Sciences. 16:4079.

Nuclear Techniques for Soil Moisture Measurement Used to Improve Irrigation Management: An Overview

M. Ghamghami, J. Pirvali Beiranvand[1], and E. Moghiseh

Post-Doc Researcher, Nuclear Agriculture Research Center, Nuclear Science and Technology Research Institute, Karaj, Iran**. mghamghami@ut.ac.ir**
Assistant Prof., Nuclear Agriculture Research Center, Nuclear Science and Technology Research Institute, Karaj, Iran. **jpirvali@aeoi.org.ir**
Assistant Prof., Nuclear Agriculture Research Center, Nuclear Science and Technology Research Institute, Karaj, Iran. **emoghiseh@aeoi.org.ir**

Received: June 2021 and Accepted: December 2021

Abstract

Adopting novel policies in the agricultural sector as the largest consumer of water should undeniably lead to increased water use efficiency and reduced water loss. New technologies including nuclear techniques can be of great help in improving irrigation management through optimized water use efficiency. Study has shown that instrumental monitoring of soil moisture and biomass can be exploited to determine the required irrigation timing and volume. In this regard, such nuclear tools as neutron meter and cosmic ray neutron sensor (CRNS) as novel technologies, installed on farms either in spot installations or in networks, are capable of estimating soil moisture through detecting hydrogen within soil H_2O molecules and decelerated neutrons. It has been confirmed that these technologies are beneficially effective in scheduling irrigation by predicting the incidence of imminent moisture stress and, thereby, determining proper irrigation timing, which will evidently enhance both water use efficiency and crop yield. This article provides an overview of the development and application of nuclear and isotopic techniques (NITs) in irrigation management and introduces methods of NITs tool calibration.

Keywords: Nuclear Techniques, Cosmic Ray Neutron Sensor, Water Use Efficiency, Soil Moisture Monitoring

[1]. - Corresponding author: Nuclear Agriculture Research Center, Nuclear Science and Technology Research Institute, Karaj 31465-1498, Iran.