چهارمین کنفرانس بین المللی توسعه پایدار
4th International Congress on Sustainable Development
sdcongress.ir

امکان سنجی تعیین رطوبت خاک در عمق زراعی به روش کُند شدن نوترون‌ها

حسین عباسعلیان[1*]، محسن رودپیما[2]، عبدالامیر بستانی[3]
[1] پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج abbasalian@yahoo.com
[2] دانشکده کشاورزی دانشگاه شاهد، تهران roodpeyma@yahoo.co.uk
[3] دانشکده کشاورزی دانشگاه شاهد، تهران bostani@shahed.ac.ir

چکیده

به منظور مدیریت آبیاری مزرعه، لازم است رطوبت خاک منطقه ریشه گیاه اندازه‌گیری شود. تعیین رطوبت خاک به روش کند شدن یا حرارتی شدن نوترون‌ها یکی از روش‌های غیر مستقیم سنجش رطوبت به شمار می‌رود. در یک تحقیق پنج ساله توسط کار گروه زبده بین‌المللی متشکل از کارشناسان ابزار، این نتیجه حاصل شد که تعیین رطوبت خاک به روش نوترونی در مقایسه با سایر روش‌های غیر مستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک صحیح‌تر و دقیق‌تر است و این تنها روش غیر مستقیم 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 خارج شده، 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 به روشنی نشان داد که در صورت کاربرد پایه‌ی کنترل، می‌توان حتی در عمق پانزده سانتیمتر به ضریب همبستگی بیش از نود و هفت درصد و خطای معیار کمتر از ۱ درصد برای نمودار واسنجی کاوشگر نوترون دست یافت.

کلمات کلیدی: رطوبت سنجی نوترونی، عمق زراعی، خطای معیار رگرسیون، ضریب همبستگی، واسنجی

۱. مقدمه

روش مستقیم اندازه‌گیری رطوبت، مخرب، پر زحمت، کُند و هزینه‌بر است و داده‌های رطوبت خاک، به هنگام، در دسترس کاربر قرار نمی‌گیرند. جایی که هزینه کار اهمیت ندارد استفاده از روش مستقیم ترجیح داده می‌شود به شرط اینکه اندازه نمونه به قدر کافی بزرگ باشد. در روش‌های غیر مستقیم، رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری نمی‌شود بلکه متغیر دیگری اندازه‌گیری می‌شود و در اثر واسنجی[۱] به مقدار احتمالی رطوبت حجمی تبدیل می‌گردد. این متغیر، جایگزین رطوبت حجمی نام دارد. جایگزین رطوبت حجمی می‌تواند شمارش نوترون‌های کند حول یک منبع نوترون‌های پر سرعت(مثلاً در کاوشگر نوترون)، باشد.

در روش نوترونی برای تعیین رطوبت خاک از اصل حرارتی شدن یا کُند شدن نوترون‌ها استفاده می‌شود. نوترون‌های پر سرعت از یک منبع پرتوزا مثل چشمه‌ی رادیم- بریلیم یا امریسیم- بریلیم گسیل شده، در اثر برخورد کشسانی با هستهٔ اتم، مقداری از انرژی جنبشی خود را از دست می‌دهند و به اصطلاح کُند می‌شوند. به این فرآیند، حرارتی شدن[۲] گفته می‌شود. در فرایند حرارتی شدن، انرژی نوترون‌ها به حدود انرژی حرارتی اتم‌های یک عنصر در دمای اطاق کاهش می‌یابد. هیدروژن دارای جرم و اندازه‌ای برابر نوترون‌هاست. از این رو، اثر کندکنندگی این عنصر بر نوترون‌های پر سرعت بیش از هر عنصر دیگر می‌باشد. آب در ترکیب ساختمانی خود هیدروژن دارد بنابراین این ماده به نحو چشمگیری نوترون‌ها را کند یا حرارتی می‌کند. تراکم نوترون‌های حرارتی به سهولت توسط یک آشکارساز قابل اندازه‌گیری است. به منظور تعیین رطوبت خاک باید این متغیر در مقابل رطوبت حجمی خاک واسنجی یا کالیبره گردد[3].

کاوشگر نوترون دارای یک منبع پرتوزای هسته‌ای است که نوترون‌های پُرسرعت گسیل می‌کند. این منبع پرتوزا در مرکز شمارنده‌ای لوله‌ای شکل قرار دارد. شمارنده فقط نوترون‌های کُند را می‌شمارد. چشمهٔ نوترون مخلوطی از امریسیم-دویست و چهل و یک(ایزوتوپ امریسیم با جرم اتمی دویست و چهل و یک) و بریلیم است. امریسیم- دویست و چهل و یک، ذره‌ی آلفا تولید می‌کند. این ذره با هستهٔ اتم بریلیم برخورد کرده و در نتیجهٔ انجام واکنش(۱)، نوترون تولید می‌شود.

$$^{4}_{2}\alpha + ^{9}_{4}Be \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{12}_{6}C \qquad (۱)$$

که در این رابطه:

α = ذره‌ی آلفا

Be = اتم بریلیوم

n = نوترون

C = اتم کربن

نوترون‌های تولید شده از واکنش(۱) دارای متوسط انرژی ۴/۵ مگا الکترون ولت می‌باشند. از آنجایی که انرژی این چشمهٔ پرتوزا بالاست، چشمه در حفاظ قرار دارد. قدرت چشمه به میزان فعالیت عامل مولد ذرات آلفا بستگی داشته و بر حسب میلی‌کوری یا بکرل بیان می‌شود. چشمه‌های نوترون نوعاً دارای فعالیتی بین سیصد و هفتاد تا هزار و هشتصد و پنجاه مگابکرل(ده تا پنجاه میلی‌کوری) هستند[4,5].

برای تعیین رطوبت در عمق‌های مختلف، لوله‌ای با قطر اسمی ۱/۵ یا ۲ اینچ تا عمق مورد نظر در خاک نصب می‌شود این لوله که اصطلاحا لوله دسترسی نامیده می‌شود، می‌تواند از جنس آلومینیوم، فولاد یا پی وی سی باشد. در بیشتر موارد از لولهٔ آلومینیوم با جدار نازک استفاده می‌شود. چون

---

[۱] - Calibration

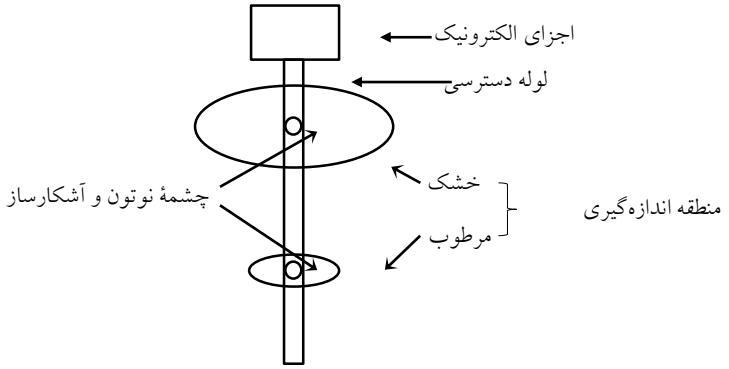
[۲] - Thermalization

آلومینیوم بیشترین نفوذپذیری را نسبت به نوترون دارا بوده و در خاک نمی‌پوسد. لوله‌های فولادی و پی وی سی دارای آهن، کلر و هیدروژن هستند و از آنجایی که این عناصر، نوترون‌ها را جذب می‌کنند بر حساسیت کاوشگر تاثیر می‌گذارند. هنگامی که یک ماده خاص انتخاب می‌شود باید واسنجی و همهٔ آزمایشات با لوله‌هایی از همان جنس انجام پذیرد[1] .

برای نصب لوله، چاهکی با قطر مناسب و تا عمق مورد نظر در خاک حفر می‌شود. الس[c] و گریسن[d] انواع لولهٔ دسترسی و روش نصب آنها را با جزئیات کامل شرح داده‌اند[6,7] .

برای اندازه‌گیری رطوبت خاک، کاربر چشمه را تا عمق مورد نظر در لوله پایین می‌آورد. برخورد نوترون‌های سریع با هستهٔ اتم‌های مجاور و به خصوص هیدروژن باعث کاهش انرژی جنبشی نوترون‌ها یا به اصطلاح کند شدن آنها می‌شود. آشکارساز نوترون‌های کند محتوی تری فلورید بر (BF_3) غنی از بُر-ده (ایزوتوپ بُر با جرم اتمی ده) یا گاز هلیم-۳ (ایزوتوپ هلیوم با جرم اتمی ۳) است. چشمهٔ نوترون‌های سریع و آشکارساز نوترون‌های کند در کنار هم در کاوشگر جاسازی شده‌اند. بنابراین هنگام انتقال چشمهٔ نوترون به عمق مورد نظر، آشکارساز نوترون‌های کند هم با آن منتقل می‌شود. تعداد نوترون‌های حرارتی ثبت شده توسط آشکارساز در واحد زمان(نرخ شمارش) معیاری از تراکم هیدروژن و در نتیجه مقدار رطوبت خاک مجاور کاوشگر است.

حوزهٔ تاثیر کاوشگر نوترون تقریباً کروی شکل است. بررسی‌ها نشان داده‌اند که شعاع این کره تابعی از رطوبت یا هیدروژن خاک است[8] شکل ۱. شعاع تاثیر کاوشگر نوترون مدل "هیدروپروب پانصد و سه دی آر"[e] در رطوبت حجمی ۰/۱ سانتیمتر مکعب بر سانتیمتر مکعب، که رطوبت بسیار کمی از دیدگاه کشاورزی است، حدود نوزده سانتیمتر و در رطوبت حجمی ۰/۳ حدود سیزده سانتیمتر است[9].



شکل ۱. نمایش کاوشگر نوترون در یک لولهٔ دسترسی. تاثیر مقدار رطوبت خاک بر حوزهٔ تاثیر کاوشگر یا منطقهٔ اندازه‌گیری

کاوشگر نوترون فقط نوترون‌های کند را می‌شمارد. از آنجایی که توصیف اثر متقابل نوترون‌های 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 کالیبراسیون، نمودار شمارش در دقیقه[f] یا ثانیه در مقابل تغییرات درصد حجمی رطوبت خاک تهیه می‌شود. معادلهٔ واسنجی، خطی و به شکل زیر است:

$$\theta = a + b\left(\frac{R}{R_S}\right) \qquad (۲)$$

که در این رابطه:

θ = رطوبت حجمی خاک(سانتیمتر مکعب بر سانتیمتر مکعب)

a = عرض از مبداء نمودار

b = شیب نمودار

R = نرخ شمارش واقعی

---

[c] - Eles
[d] - Greason
[e] - Hydro probe 503 DR
[f] - Count per minute (cpm)

R_s = نرخ شمارش استاندارد

R/R_s = نسبت شمارش نوترون

هر روشی که در تعیین رطوبت خاک برای مدیریت آبیاری استفاده می‌شود باید این توانایی را داشته باشد که رطوبت را با دقت ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ سانتیمتر مکعب آب بر سانتیمتر مکعب خاک اندازه‌گیری کند. در تعیین رطوبت خاک به روش نوترونی در عمق‌های کمتر از سی سانتیمتر، بخشی از ابر نوترونی چشمه پرتوزا خارج از محیط خاک قرار می‌گیرد. از این رو روش یاد شده، در تعیین رطوبت لایه‌های سطحی خاک خطا دارد. بسیاری از محققین استفاده از کاوشگر عمقی نوترون را برای تعیین رطوبت لایه‌های سطحی خاک توصیه نمی‌کنند. برای رفع مشکل، راهکارهای مختلف پیشنهاد شده است:

یکی از روش‌ها استفاده از صفحه منحرف کننده نوترون[g] یا صفحه جاذب نوترون است. منحرف کننده نوترون، صفحه ضخیمی از جنس پارافین یا پلی‌اتیلن است که دارای منفذی در وسط بوده و روی سطح خاک قرار داده می‌شود[10]. اگر چه با استفاده از این روش می‌توان به نمودار واسنجی مطمئنی دست یافت اما استفاده از صفحه منحرف کننده برای اندازه‌گیری‌های معمول در بسیاری از موارد عملی نیست. گریسن[h]، گرنت[i]، پارکس و سیام[j] معتقدند که برای لایه‌های سطحی خاک، باید از منحنی واسنجی جداگانه استفاده شود. این محققین روش‌های خاص کالیبراسیون برای لایه‌های سطحی خاک را شرح داده‌اند[7,11,12]. هاورکمپ[k] و همکاران چشمه نوترون را در عمق ده سانتیمتری خاک قرار دادند و پس از انجام شمارش، در عمق صفر تا پانزده سانتیمتر، از خاک نمونه‌برداری کردند در این حالت برای عمق صفر تا پانزده سانتیمتر یک معادله واسنجی جداگانه به دست آمد[13]. اوت[l] معتقد است برای هر عمق در سی سانتیمتر خاک سطحی باید واسنجی جداگانه انجام شود[14].

هنگام تعیین رطوبت لایه‌های سطحی خاک، قرارگیری چشمه‌ی پرتوزا در عمق صحیح از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش از پایه‌ی کنترل عمق استفاده شد تا تاثیر آن بر تعیین رطوبت خاک سطحی بررسی شود. نقش پایه‌ی کنترل این است که به درستی عمق اندازه‌گیری را تعریف می‌کند. پایه‌ی کنترل از آلومینیوم ساخته می‌شود تا حمل و نقل آن آسان باشد این پایه به شکل خاصی طراحی شده است و هنگام اندازه‌گیری، در زیر کاوشگر قرار داده شود(شکل ۲).

شکل ۲. کاوشگر نوترون و پایه‌ی کنترل عمق

۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق از سه نوع بافت خاک استفاده شد. ترکیب اجزای تشکیل دهنده خاک به روش هیدرومتر تعیین گردید. نتایج در جدول ۱ آمده‌اند.

---

[g] - Neutron deflector
[h] - Greason
[i] - Grant
[j] - Siam
[k] - Haverkamp
[l] - Evett

جدول ۱. نتایج آنالیز خاک

نمونه خاک	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	بافت	ماده آلی (درصد وزنی)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (دسی زیمنس بر متر)	رطوبت حجمی خاک در ظرفیت مزرعه (درصد)
۱	۵۸	۲۶	۱۶	لوم شنی	۰/۵	۰/۵	۲۰
۲	۴۴	۲۶	۳۰	لوم رسی	۱/۵۴	۰/۶۵	۳۱
۳	۸۲	۱۲	۶	شن لومی	۰/۳	۰/۴	۹

تعیین بافت خاک و نیز برآورد درصد رطوبت حجمی خاک در ظرفیت مزرعه به کمک مدل ساکستون انجام شد. برای تعیین رطوبت خاک در عمق‌های مختلف از کاوشگر نوترون مدل "هیدروپروب پانصد و سه دی-آر" استفاده گردید.

تعداد سه چاهک با سطح مقطع دایره‌ای شکل به عمق هفتاد سانتیمتر و قطر پنجاه سانتیمتر آماده شدند. در میان هر چاهک یک قطعه لوله‌ی آلومینیومی با قطر اسمی ۵ سانتیمتر و طول نود سانتیمتر قرار داده شد. سپس نمونه خاک‌های ۱ تا ۳ به درون چاهک‌ها منتقل شدند. با توجه به حجم خاک در هر واحد آزمایشی و داده‌های درصد رطوبت حجمی خاک در ظرفیت مزرعه برای خاک لوم شنی، لوم رسی و شن لومی، به ترتیب سی و چهار، پنجاه و دو و پانزده لیتر آب به طور یکنواخت روی سطح پروفیل خاک توزیع شد تا رطوبت خاک به حدود ظرفیت مزرعه برسد. بدیهی است چنانچه رطوبت پروفیل خاک بیش از ظرفیت مزرعه باشد، مقدار اضافه‌ی رطوبت که اصطلاحا به آن آب ثقلی گفته می‌شود طی بیست و چهار تا چهل و هشت ساعت (بسته به بافت خاک) زهکش شده، از انتهای پروفیل خارج می‌شود. به منظور توزیع یکنواخت رطوبت و به تعادل رسیدن پروفیل خاک، عملیات شمارش نوترون و نمونه‌برداری از خاک سه روز پس از آبیاری آغاز شد.

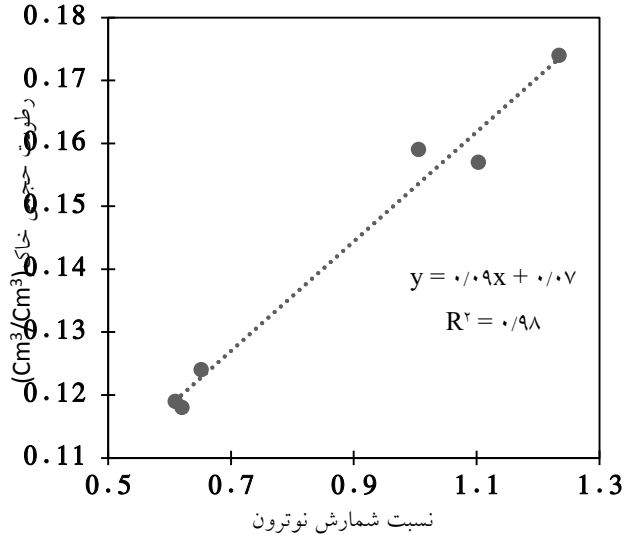
شمارش نوترون در شش نوبت تا رسیدن میانگین رطوبت پروفیل خاک به حدود "سی و پنج درصد کمتر از ظرفیت مزرعه" ادامه یافت. در هر نوبت شمارش، ابتدا کاوشگر به محلی که حداقل ۹ متر از هر منبع هیدروژن دور باشد منتقل و روی پایه‌ی کنترل مستقر شد تا شمارش استاندارد انجام شود. سپس پایه‌ی تثبیت به همراه کاوشگر به محل واحدهای آزمایشی منتقل و در عمق پانزده سانتیمتری خاک، شمارش نوترون انجام گردید. از تقسیم شمارش در عمق بر شمارش استاندارد، نسبت شمارش نوترون محاسبه شد. سپس به کمک استوانه نمونه‌برداری حجمی اِجل کمپ[m] در عمق پانزده سانتیمتر، از خاک نمونه‌برداری شد. نمونه‌های خاک توزین و به مدت بیست و چهار ساعت در آون(دمای صد و پنج درجه سانتیگراد) قرار داده شدند تا خشک شده و به وزن ثابت برسند. سپس برای بار دوم نمونه‌ها توزین و رطوبت حجمی آن‌ها محاسبه گردید. از برازش داده‌های نسبت شمارش نوترون در برابر رطوبت حجمی خاک، در محیط صفحه گسترده‌ی مایکروسافت اکسل، نمودار واسنجی کاوشگر به دست آمد. سپس تجزیه واریانس رگرسیون انجام شد تا معنی‌دار بودن ضرایب رگرسیون و مقدار خطای معیار واسنجی[n] بررسی شوند[2]. خطای معیار واسنجی تنها آماره‌ای است که به کمک آن می‌توان کارآیی روش نوترونی را درتعیین رطوبت لایه سطحی خاک آزمود.

۳. نتایج و بحث

تجزیه واریانس رگرسیون در خاک شن لومی نشان داد که با اطمینان نود و نه درصد رابطه خطی معنی‌داری بین نسبت شمارش نوترون و رطوبت حجمی خاک در عمق پانزده سانتیمتری خاک وجود دارد(مقدار آماره‌ی F حدود صد و نود و یک و احتمال آن۰/۰۰۰۲ بود) شکل ۳ و جدول ۲. ضرایب رگرسیون شامل عرض از مبدا و شیب نمودار در سطح احتمال ۱درصد معنی‌دار شدند(جدول ۳). ضریب همبستگی دو متغیر، نود و نه درصد و مقدار خطای معیار ۰/۰۰۴ به دست آمد[2].

---

[m] - Eijkelkamp Agrisearch Equipment
[n] - Standard Error



شکل ۳. واسنجی کاوشگر نوترون برای عمق ۱۵ سانتیمتر در خاک شن لومی

جدول ۲. تجزیه واریانس رگرسیون برای نسبت شمارش نوترون(متغیر مستقل) و رطوبت خاک(متغیر وابسته)

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره‌ی **F**	احتمال
رگرسیون	۱	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۲۹	۱۹۱/۷۱	۰/۰۰۰۲
خطا	۴	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۱۵		
کل	۵	۰/۰۰۳			

ضریب همبستگی = ۰/۹۹

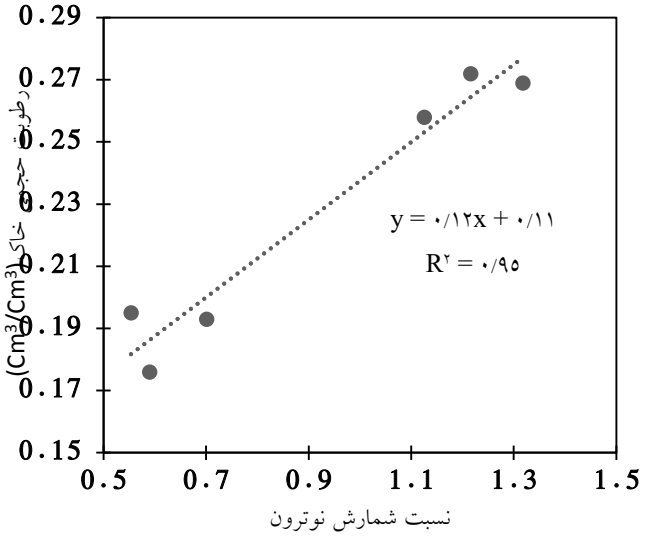
خطای معیار = ۰/۰۰۴

جدول ۳. ضرایب رگرسیون

	ضرایب	خطای معیار	آماره‌ی **t**	احتمال
عرض از مبدا	۰/۰۶۶۱	۰/۰۰۵۷	۱۱/۶	۰/۰۰۰۳
شیب نمودار	۰/۰۸۷۱	۰/۰۰۶۳	۱۳/۸۵	۰/۰۰۰۲

تجزیه واریانس رگرسیون در خاک لوم شنی نشان داد که با اطمینان نود و نه درصد رابطه خطی معنی‌داری بین نسبت شمارش نوترون و رطوبت حجمی خاک در عمق پانزده سانتیمتری خاک وجود دارد(مقدار آماره‌ی F حدود هفتاد و پنج و احتمال آن ۰/۰۰۰۹۷ بود)شکل ۴ و جدول ۴. ضرایب رگرسیون شامل عرض از مبدا و شیب نمودار در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شدند(جدول ۵).

ضریب همبستگی دو متغیر، نود و هفت صدم و مقدار خطای معیار ۰/۰۱ به دست آمد. جهت رعایت اختصار از ذکر جداول صرف نظر شده است[2].



شکل ۴. واسنجی کاوشگر نوترون برای عمق ۱۵ سانتیمتر در خاک لوم شنی

جدول ۴. تجزیه واریانس رگرسیون برای نسبت شمارش نوترون(متغیر مستقل) و رطوبت خاک(متغیر وابسته)

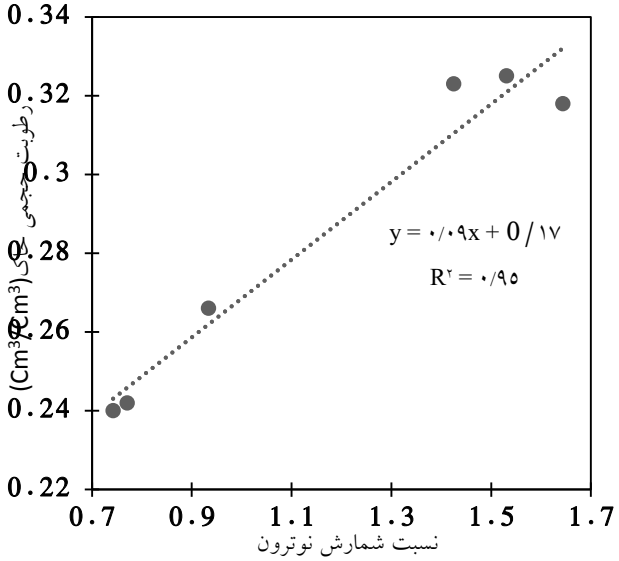
منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره‌ی F	احتمال
رگرسیون	۱	۰/۰۰۹۰۵	۰/۰۰۹۰۵	۷۵/۴۵۹	۰/۰۰۰۹۷
خطا	۴	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۱۲		
کل	۵	۰/۰۰۹۵۳			

ضریب همبستگی = ۰/۹۷ خطای معیار = ۰/۰۱

جدول ۵. ضرایب رگرسیون

	ضرایب	خطای معیار	آماره‌ی t	احتمال
عرض از مبدا	۰/۱۱۳	۰/۰۱۴	۸/۰۷۳	۰/۰۰۱
شیب نمودار	۰/۱۲۵	۰/۰۱۴	۸/۶۸۷	۰/۰۰۱

تجزیه واریانس رگرسیون در خاک لوم رسی نشان داد که با اطمینان نود و نه درصد رابطه خطی معنی‌داری بین نسبت شمارش نوترون و رطوبت حجمی خاک در عمق پانزده سانتیمتری خاک وجود دارد(مقدار آماره‌ی F برابر هفتاد و هفت و احتمال آن ۰/۰۰۰۹ بود) شکل ۵ و جدول ۶. ضرایب رگرسیون شامل عرض از مبدا و شیب نمودار در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شدند(جدول ۷). ضریب همبستگی دو متغیر نود و هفت صدم و مقدار خطای معیار ۰/۰۱ به دست آمد[2].



شکل ۵. واسنجی کاوشگر نوترون برای عمق ۱۵ سانتیمتر در خاک لوم رسی

جدول ۶. تجزیه واریانس رگرسیون برای نسبت شمارش نوترون(متغیر مستقل) و رطوبت خاک(متغیر وابسته)

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره‌ی F	احتمال
رگرسیون	۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۷۷/۳۶	۰/۰۰۰۹
خطا	۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱		
کل	۵	۰/۰۰۸۴			

ضریب همبستگی = ۰/۹۷ خطای معیار = ۰/۰۱

جدول ۷. ضرایب رگرسیون

	ضرایب	خطای معیار	آماره‌ی t	احتمال
عرض از مبدا	۰/۱۶۹۹	۰/۰۱۳۸	۱۲/۳۱	۰/۰۰۰۳
شیب نمودار	۰/۰۹۸۶	۰/۰۱۱۲	۸/۷۹	۰/۰۰۰۹

اوت[۵] و همکاران نشان دادند که به کمک پایه‌ی کنترل عمق می‌توان حتی در عمق ۱۰ سانتیمتر خاک به ضریب همبستگی بیش از ۰/۹۸ و خطای معیار کمتر از ۰/۰۱ برای نمودار واسنجی کاوشگر نوترون دست یافت. جدول ۸. همانگونه که مشاهده می‌شود این مطالعه در عمق‌های مختلف خاک، در دو نوبت و با کاوشگرهای متفاوت انجام شده است[5]. در جدول ۸، θ_v و C_R به ترتیب رطوبت حجمی خاک و نسبت شمارش نوترون می‌باشند.

۵ - Evett

جدول ۸. واسنجی کاوشگر نوترون ضمن استفاده از پایه کنترل عمق در دو مطالعه جداگانه

ضریب همبستگی	خطای معیار	معادله واسنجی	مدل کاوشگر	سریال ابزار	عمق خاک (سانتیمتر)
۰/۹۹۱	۰/۰۰۳	$CR = ۰/۰۱۴ + ۰/۲۳۴۴\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۵۴۴۶	۱۰
۰/۹۸۷	۰/۰۰۷	$CR = -۰/۰۸۶ + ۰/۲۶۳۵\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۵۴۴۶	۱۱۰-۳۰
۰/۹۸۲	۰/۰۰۷	$CR = -۰/۰۳ + ۰/۲۱۹۳\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۵۴۴۶	۲۳۰-۱۳۰
۰/۹۹۸	۰/۰۰۳	$CR = ۰/۰۲ + ۰/۲۱۱۵\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۵۴۴۷	۱۰
۰/۹۸۷	۰/۰۰۷	$CR = -۰/۰۸۲ + ۰/۲۴۲۰\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۵۴۴۷	۱۱۰-۳۰
۰/۹۸۱	۰/۰۰۸	$CR = -۰/۰۳ + ۰/۲۰۲۳\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۵۴۴۷	۲۳۰-۱۳۰
۰/۹۹۸	۰/۰۰۳	$CR = ۰/۰۰۹ + ۰/۲۲۷۸\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۶۱۹۰	۱۰
۰/۹۸۷	۰/۰۰۷	$CR = -۰/۰۹۵ + ۰/۲۶۰۴\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۶۱۹۰	۱۱۰-۳۰
۰/۹۸۱	۰/۰۰۸	$CR = -۰/۰۳۴ + ۰/۲۱۳۲\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۶۱۹۰	۲۳۰-۱۳۰
۰/۹۹۲	۰/۰۰۷	$CR = ۰/۰۲۱ + ۰/۲۳۷۴\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۶۵۰۳	۱۰
۰/۹۸۶	۰/۰۰۷	$CR = -۰/۰۹۸ + ۰/۲۸۱۳\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۶۵۰۳	۱۱۰-۳۰
۰/۹۸۳	۰/۰۰۸	$CR = -۰/۰۴ + ۰/۲۳۳۴\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۶۵۰۳	۲۳۰-۱۳۰
		مطالعات قبلی(اوت[p] و استینر[q])			
۰/۹۹۲	۰/۰۰۶	$CR = ۰/۰۵۴ + ۰/۵۲۷۰\theta_v$	۳۳۳۱	۳۸۶	۱۰
۰/۹۹۷	۰/۰۰۴	$CR = ۰/۰۲۸ + ۰/۵۳۸۸\theta_v$	۳۳۳۱	۳۸۵	۱۰
۰/۹۹۹	۰/۰۰۲	$CR = ۰/۰۰۱ + ۰/۴۹۴۳\theta_v$	۴۳۰۱	۳۲۶	۱۰
۰/۹۹۹	۰/۰۰۲	$CR = ۰/۰۰۱ + ۰/۲۱۹۶\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۶۱۹۰	۱۰
۰/۹۹۶	۰/۰۰۵	$CR = ۰/۰۲۱ + ۰/۲۱۰۵\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۰۶۹۸	۱۰
۰/۹۹۷	۰/۰۰۴	$CR = ۰/۰۱۴ + ۰/۲۱۷۲\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۵۴۴۷	۱۰
۰/۹۸۸	۰/۰۰۸	$CR = -۰/۰۶۶ + ۰/۲۴۲۱\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۵۴۴۷	۳۰-۹۰
۰/۹۹۲	۰/۰۰۶	$CR = -۰/۰۵۷ + ۰/۲۲۹۹\theta_v$	۵۰۳ دی آر	۵۴۴۷	۱۱۰-۱۹۰

p - Evett
q - Steiner

با توجه به یافته‌ها این نتیجه حاصل می‌شود که به کمک پایه‌ی کنترل عمق در روش نوترونی می‌توان رطوبت خاک سطحی را با خطای معیار قابل قبول برآورد کرد. تمرکز بخش فعال ریشه اغلب گیاهان زراعی در عمق صفر تا سی سانتیمتر خاک است. این پژوهش مشکل استفاده از روش نوترونی برای تعیین رطوبت در عمق کمتر از بیست سانتیمتر نیمرخ خاک را منتفی نموده و دامنه‌ی کاربرد رطوبت سنجی نوترونی را در حوزه‌ی تحقیقات کشاورزی گسترش می‌دهد.

۴. منابع

[1] حسین عباسعلیان، ۱۳۹۱، کاربرد کاوشگرهای نوترون و گاما در علوم کشاورزی، انتشارات پلک.

[2] حسین عباسعلیان، ۱۳۹۵، بررسی توزیع رطوبت خاک در سیستم درختکاری محصور با استفاده از رطوبت‌سنج نوترونی، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شاهد.

[3] Hignett C and Evett S., 2002. Neutron Thermalization. Methods of Soil Analysis. (Part 4- Physical Methods), Soil Science Society of America, 5, 501–521.

[4] Evett S., 2003. Measuring soil water by neutron thermalization. Encyclopedia of Water Science. Marcel Dekker, Inc. New York, pp. 889–893.

[5] Evett S., 2003. A Depth Control Stand for Improved Accuracy with the Neutron Probe. Vadose Zone Journal, 2, 642-649

[6] Eeles C., 1969. IH Report No 7, Installation of access tubes and calibration of neutron moisture probes [On Line]. Available at http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/5605. Institute of Hydrology, Howbery Park, Wallingford, Berkshire United Kingdom.

[7] Greacen E., 1981. Soil Water Assessment by the Neutron Method. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Melbourne, Australia 140 p.

[8] IAEA.,1970. Technical Reports Series No.112, Neutron moisture gauges. Available at www.iaea.org/inis/collection/NCLCCollection Store/_public/01/001/1001730.pdf. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

[9] Parkes M and Siam N., 1979. Error associated with measurement of soil moisture change by neutron probe. Agricultural Engineering, 24, 87–93.

[10] Arslan A., 1997. The performance and radiation exposure of some neutron probes in measuring the water content of the topsoil layer. Soil Research, 35, 1397-1407.

[11] Evett S, Heng L and Moutonnet P and Nguyen M., 2008. Field Estimation of Soil Water Content: A Practical Guide to Methods, Instrumentation, and Sensor Technology. IAEA-TCS-30. International Atomic Energy Agency. ISSN 1018–5518: 1-54

[12] Grant D., 1975. Measurement of soil moisture near the surface using a moisture meter. Soil Science, 26, 124–129.

[13] Haverkamp R., 1984. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurement. Soil Science, 137, 78-90.

[14] Evett S., 2003. Measuring soil water by neutron thermalization. Encyclopedia of Water Science, Marcel Dekker, Inc. New York, pp. 889–893.

چهارمین کنفرانس بین المللی توسعه پایدار
4th International Congress on Sustainable Development
sdcongress.ir

Feasibility of Soil Moisture Monitoring at Crop rooting depth by Neutron Thermalization Method

Hossein Abbasalian
Alborz Research Center for Health and Agriculture
Karaj, Iran
abbasalian@yahoo.com

Mohsen Roodpeyma
Shahed University
Tehran, Iran

Abdolamir Bostani
Shahed University
Tehran, Iran

Abstract - **In irrigation management it is necessary to determine soil moisture content at plant root zone. Soil moisture measurement through neutron thermalization is one of the indirect method of moisture monitoring. In a five-year study by international experts, it is concluded that neutron method is by far more accurate and precise than other indirect methods of soil moisture determination and this is the only indirect method which can be used to study water balance and water use efficiency. In shallow depth of soil profile, because of radioactive source positioning, considerable number of fast neutron escape from the soil and this is a source of Error in soil moisture measurement. In the past use of neutron method to determine water content at surface soil layers was a challenge. This study clearly demonstrated that in case of using depth control stand, a Correlation Coefficient of above ninety-seven percent and standard error below 1 percent can be achieved in Neutron probe calibration even at 15 centimeter soil depth.**

Keywords: Neutron Moisture Monitoring; Crop Rooting Depth; Standard error of regression; Correlation Coefficient; Calibration