نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۶، ص. ۳۹۸-۳۸۶

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 2, May.-Jun. 2017, p. 386-398

ارتباط انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی با شاخص S در خاک‌های با بافت متوسط و سبک

مهدی زنگی‌آبادی[1*] – منوچهر گرجی[2] – مهدی شرفا[3] – پیمان کشاورز[4] – سعید سعادت[5]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۱۷

چکیده

کیفیت فیزیکی خاک یکی از مهم‌ترین مباحث مطرح در ارتقاء کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی محسوب می‌گردد. شاخص انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی به‌عنوان یکی از شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک، بیان‌گر مقدار انرژی مورد نیاز گیاه برای جذب واحد حجم آب خاک است. این پژوهش با هدف بررسی ارتباط انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی با شاخص S در پنج کلاس بافتی خاک شامل لوم، لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رسی و لوم رسی سیلتی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی طرق در استان خراسان‌رضوی انجام شد. در این مطالعه پس از انجام نمونه‌برداری‌های لازم از خاک ۳۰ نقطه ایستگاه و انجام اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و صحرایی، پارامترهای منحنی رطوبتی، شاخص S، آب قابل استفاده گیاه، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت، گنجایش انتگرالی آب و انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی محاسبه و در نهایت رابطه آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده با شاخص انرژی انتگرالی آب مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش شاخص S، با کاهش معنی‌دار مقدار انرژی انتگرالی آب در دامنه آب قابل استفاده گیاه (ظرفیت مزرعه در مکش ۱۰۰ سانتی‌متر آب) و گنجایش انتگرالی آب و به بیان دیگر کاهش مقدار انرژی مورد نیاز گیاه جهت جذب واحد حجم آب خاک همراه بود. بر اساس نتایج این مطالعه، عامل شکل منحنی رطوبتی خاک و شاخص S مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده مقدار شاخص انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی بودند. در مجموع این مطالعه نشان داد که با استفاده از شاخص انرژی انتگرالی آب، امکان تمایز کیفیت فیزیکی خاک‌های با مقادیر یکسان دامنه رطوبتی میسر می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آب قابل استفاده گیاه، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت، گنجایش انتگرالی آب

مقدمه

مطالعات مختلف نشان داده است که آب خاک نه تنها می‌تواند وضعیت فیزیکی خاک را مدیریت نماید بلکه می‌تواند وضعیت شیمیایی و زیستی خاک مانند جذب عناصر غذایی توسط گیاه و همچنین فعالیت ریزجانداران را نیز تحت تأثیر قرار دهد (۱). لتی (۱۱) معتقد است که آب، تهویه، مقاومت فروروی[6] و دما چهار عامل فیزیکی خاک هستند که رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با وجود این‌که کل مقدار آب قابل دسترس برای گیاهان، همبستگی خوبی با عملکرد و پاسخ گیاه دارد، ولی برای جذب واحد حجم آب موجود در خاک توسط گیاه انرژی مشخصی مورد نیاز است که میزان سهولت جذب آب توسط گیاه را توجیه می‌کند. میناسنی و مک‌براتنی (۱۲) انرژی انتگرالی[7] را به‌عنوان معیاری جهت برآورد آب قابل استفاده گیاه خاک ارائه نمودند. آنها نشان دادند که منحنی رطوبتی خاک[8] ابزاری مناسب درخصوص برآورد انرژی مورد نیاز گیاه جهت غلبه بر انرژی آب در خاک و جذب واحد حجم آب می‌باشد. مفاهیم قبلی آب قابل استفاده گیاه به‌طور مستقیم مقادیر انرژی مورد نیاز گیاه جهت جذب آب را نشان نمی‌دهند. این انرژی تابعی از مقدار آب یا به بیان دیگر تابعی از نقاط شروع و خاتمه دامنه رطوبتی در خاک می‌باشد. انرژی انتگرالی، بیان‌گر مقدار انرژی مورد نیاز گیاه برای

۱ و ۴- به ترتیب محقق و دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email:m.zangiabadi@areeo.ac.ir
۲ و ۳- استادان گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
۵- استادیار بخش تحقیقات اصلاح خاک و مدیریت پایدار اراضی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران

DOI: 10.22067/jsw.v31i2.53472

6- Penetration resistance (PR)

7- Integral energy (EI)

8- Soil moisture release curve (SMRC)

Archive of SID
www.SID.ir

جذب واحد حجم آب خاک در محدوده ظرفیت آب قابل دسترس می‌باشد (البته با علم بر این‌که گیاهان برای جذب آب، انرژی مصرف نمی‌کنند، باید بیان نمود که منظور اختلاف انرژی بین آب خاک و کل آب جذب شده توسط گیاه می‌باشد). در محاسبه انرژی انتگرالی فرض بر این است که زمان کافی برای جذب آب توسط گیاه وجود داشته و شرایط دما و خشکی خیلی زیاد و همچنین تفاوت گیاهان در جذب آب و مراحل رشد گیاه در نظر گرفته نشده است. با این وجود، شاخص انرژی انتگرالی به عنوان شاخصی مناسب برای آب قابل استفاده گیاه توصیه شده است. میناسنی و مک‌براتنی (۱۲) معتقدند که در خاک‌های مشابه از نظر مقدار آب قابل استفاده، که مقدار انرژی انتگرالی متفاوت است، رشد و عملکرد گیاه و به‌تبع آن کارایی مصرف آب متفاوت خواهد بود. نتایج مطالعه آنها نشان داد که این شاخص با مقدار شن و عامل شکل منحنی رطوبتی (n) خاک دارای همبستگی منفی و معنی‌دار و با مقدار رس خاک دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار می‌باشد و به عبارت دیگر گیاهان برای جذب واحد حجم آب در محدوده ظرفیت آب قابل استفاده گیاه در خاک‌های ریز بافت باید انرژی بیشتری صرف کنند.

نتایج مطالعه عسگرزاده و همکاران (۲) که با هدف محاسبه و ارزیابی انرژی انتگرالی برای مقادیر آب قابل استفاده گیاه (اختلاف رطوبت در نقاط ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم)، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت[1] و گنجایش انتگرالی آب[2] در همدان انجام شد نشان داد که بیشترین و کمترین انرژی انتگرالی به‌ترتیب برای آب قابل استفاده گیاه و گنجایش انتگرالی آب حاصل شده است. وجود ارتباط قوی و معنی‌دار بین انرژی انتگرالی، گنجایش انتگرالی آب، و مکش در نقطه دارای مقاومت فروروی معادل ۱/۵ مگاپاسکال و همچنین بین انرژی انتگرالی، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت، و مکش در نقطه دارای مقاومت فروروی معادل دو مگاپاسکال، بیان‌گر وابستگی زیاد انرژی انتگرالی به مقاومت فروروی خاک در دامنه خشک آن می‌باشد.

در منابع شاخص‌های فیزیکی مختلفی جهت ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک‌های کشاورزی پیشنهاد شده است که از این بین، شاخصی که توسط دکستر و برد (۴) و دکستر (۵) پیشنهاد شد، توانست به بررسی کیفیت خاک (قابلیت کار بر روی آن، نفوذ آب در خاک، پایداری ساختمان و ...) کمک شایانی نماید. این شاخص که شاخص S نام گرفته است عبارت است از شیب منحنی رطوبتی خاک در نقطه عطف آن. این شاخص از طریق تعیین منحنی رطوبتی خاک با استفاده از رطوبت وزنی به عنوان تابعی از مکش ماتریک (با استفاده از معادله وان گنوختن) که در برابر لگاریتم طبیعی مکش رسم شده است، محاسبه می‌شود. دکستر (۵) معتقد است که این عامل به بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، میزان مواد آلی و رشد ریشه گیاه در خاک ارتباط دارد. رینولدز و همکاران (۱۴) عقیده دارند که شاخص S با بسیاری از خصوصیات مهم خاک مانند هدایت هیدرولیکی، تراکم، میزان بهینه آب خاک جهت انجام عملیات خاک‌ورزی، مقاومت فروروی، آب قابل استفاده، رشد ریشه و پایداری ساختمان خاک مرتبط است. امامی و همکاران (۷) جهت بررسی کیفیت خاک، شاخص S، مقاومت فروروی، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و آب قابل استفاده گیاه در خاک‌های تحت کشت گندم در جنوب‌شرقی تهران را اندازه‌گیری و مطالعه نمودند. نتایج آنها نشان داد که شاخص S را می‌توان به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری ساختمان خاک در نظر گرفت. بر اساس نظر این محققین، شاخص S ابزاری مناسب جهت مقایسه خاک‌های مختلف و همچنین بررسی اثر مدیریت‌های مختلف بر خصوصیات فیزیکی خاک محسوب می‌گردد. بیگی و بنی‌طالبی (۳) در مطالعه‌ای پیرامون اثر کاربرد پساب شهری بر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، گزارش نمودند که شاخص S دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار با تخلخل کل، آب قابل استفاده گیاه و گنجایش هوایی کل و همبستگی منفی و معنی‌دار با جرم مخصوص ظاهری و محتوای نسبی آب بود. امامی و همکاران (۶) رابطه بین شاخص S و برخی ویژگی‌های فیزیکی کیفیت خاک در دشت مشهد را بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار شاخص S در خاک‌های مطالعه شده دارای دامنه بین ۰/۱۷۰-۰/۱۰۳ و میانگین ۰/۱۳۳ بود. ضرایب همبستگی حاکی از وجود رابطه معکوس بین شاخص S با درصد رس، جرم مخصوص ظاهری، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع، نسبت جذب سدیم و مقاومت فروروی خاک و رابطه مستقیم با میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، ماده آلی، آهک، آب قابل استفاده گیاه و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت بود. عسگرزاده و همکاران (۲) معتقدند که وجود رابطه منفی و معنی‌دار بین انرژی انتگرالی دامنه آب قابل استفاده گیاه و شاخص S نشان‌دهنده امکان استفاده از شاخص S جهت تخمین مقدار انرژی مورد نیاز گیاه برای جذب واحد وزن آب خاک در دامنه آب قابل استفاده گیاه می‌باشد.

مشکل اصلی آب در ایران، بهره‌وری کم آب به خصوص در بخش کشاورزی و عدم برنامه‌ریزی برای افزایش آن است. از آنجا که کیفیت فیزیکی خاک یکی از مهم‌ترین مباحث مطرح در ارتقاء کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی محسوب می‌گردد، لذا نتایج مطالعاتی که با هدف بررسی ارتباط خصوصیات فیزیکی کیفیت خاک و مصرف آب توسط گیاه انجام شود، می‌تواند کمک شایانی در جهت بهبود کارایی مصرف آب و افزایش بهره‌وری از اراضی کشاورزی کشور نماید.

با توجه به معدود بودن مطالعات انجام شده در مورد شاخص انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی به‌عنوان یکی از

1- Least limiting water range (LLWR)
2- Integral water capacity (IWC)

Archive of SID

www.SID.ir

شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک، در این مطالعه سعی شده است تا با اندازه‌گیری این شاخص در خاک‌های با بافت متوسط و سبک در استان خراسان‌رضوی و تعیین ارتباط آماری آن با ویژگی‌های فیزیکی و به طور ویژه شاخص S، کارایی شاخص انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی، در ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

این مطالعه در طی سالهای ۱۳۹۳-۱۳۹۲ در ایستگاه تحقیقات طرق مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی انجام شد. این ایستگاه با متوسط ارتفاع ۱۰۱۰ متر از سطح دریا، در مختصات جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۹ دقیقه طول‌شرقی و ۳۶ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۴ دقیقه عرض‌شمالی واقع شده است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ایستگاه ذکر شده جهت انجام این مطالعه، وجود تنوع در خصوصیات خاک و به طور ویژه بافت خاک می‌باشد. با توجه به توزیع کلاس‌های بافت خاک در استان خراسان‌رضوی، بیش از ۹۰ درصد خاک‌های این استان در قالب پنج کلاس بافتی لوم، لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رسی و لوم رسی سیلتی قرار می‌گیرند و ویژگی بارز ایستگاه تحقیقات طرق، طبقه‌بندی بافت خاک آن در پنج کلاس بافتی ذکر شده می‌باشد. به‌بیان دیگر، ایستگاه تحقیقات طرق از این منظر به‌عنوان نمونه‌ای بسیار جامع از مجموعه خاک‌های کشاورزی استان خراسان رضوی محسوب می‌گردد.

نمونه‌برداری از خاک

بر اساس اطلاعات موجود در خصوص ویژگی‌های خاک قسمت‌های مختلف اراضی ایستگاه (۱۵)، ۳۰ نقطه با بافت، ساختمان و ماده آلی متفاوت انتخاب شد. برای اندازه‌گیری خصوصیات مختلف خاک از هر نقطه دو نمونه از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری، شامل یک نمونه دست‌خورده و یک نمونه دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌های فلزی با قطر ۵ و ارتفاع ۵/۳ سانتی‌متر تهیه شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی

در این مطالعه پارامترهای منحنی رطوبتی خاک، با برازش معادله وان‌گنوختن در برنامه RETC[1] به داده‌های رطوبتی خاک در مکش‌های ۰ ، ۱۰ ، ۳۰ ، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر (با استفاده از دستگاه جعبه شن[2]) و مکش‌های ۳۳۰ ، ۱۰۰۰ ، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر (با استفاده از صفحات فشاری) به‌دست آمد (۱۳ و ۱). این پارامترها شامل رطوبت حجمی اشباع (θ_{vs}) (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)، رطوبت حجمی باقی‌مانده (θ_{vr}) (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)، عکس مکش ماتریک در نقطه ورود هوا (α) (بر سانتی‌متر)، عامل شکل و تعیین‌کننده شیب منحنی برازش شده (n) و m که معادل $(1-1/n)$ بودند (۱۴). توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری دو زمانه (۱۰)، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی به‌ترتیب با استفاده از نمونه دست‌نخورده و روش پیکنومتر (۹) و کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۱۶) اندازه‌گیری شد. جهت تعیین مقاومت فروروی خاک از فروسنج[3] مخروطی مارک Eijkelkamp با دقت یک سانتی‌متر و مخروط دارای زاویه ۶۰ درجه و سطح مقطع ۱ سانتی‌متر مربع، استفاده شد. این اندازه‌گیری در پنج مرتبه با رطوبت‌های مختلف در محل‌هایی نزدیک به محل برداشت نمونه خاک دست‌خورده و دست‌نخورده انجام شد. هم‌زمان با هر اندازه‌گیری، یک نمونه خاک جهت تعیین رطوبت به روش وزنی تهیه گردید.

جهت تعیین یک تابع پیوسته از مقاومت فروروی خاک، با استفاده از نرم‌افزار اکسل یک مدل نمایی (رابطه شماره ۱) به داده‌های به‌دست آمده، برازش گردید.

$$PR(h) = ah^b \qquad (۱)$$

که در آن PR(h): مقاومت فروروی خاک به عنوان تابعی از مکش (مگاپاسکال)، h: مکش خاک (سانتی‌متر)، a و b: ضرایب تجربی مدل می‌باشد (۸).

انرژی انتگرالی آب

انرژی انتگرالی آب در هر دامنه رطوبتی حاصل انتگرال قدرمطلق شیب منحنی رطوبتی خاک در همان دامنه رطوبتی می‌باشد (۲). مقدار انرژی انتگرالی آب خاک بر حسب ژول بر کیلوگرم با استفاده از رابطه ارائه شده توسط میناسنی و مک‌براتنی (۱۲) و به صورت رابطه شماره ۲ محاسبه شد.

$$E_I = 1/10\, W \int_{h_i}^{h_f} h(\prod_{i=1}^{m} \omega_i(h)) C(h) dh \qquad (۲)$$

که در آن h_i: مکش در نقطه شروع دامنه رطوبتی (مرطوب) (سانتی‌متر)، h_f: مکش در نقطه خاتمه دامنه رطوبتی (خشک) (سانتی‌متر)، W: مقدار رطوبت حجمی در دامنه رطوبتی مربوطه (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)، C(h): قدرمطلق شیب منحنی رطوبتی خاک (بر سانتی‌متر)، $\omega_i(h)$: توابع وزن‌دهی[4] (جهت وزن‌دهی به محدودیت‌های فیزیکی مختلف به عنوان تابعی از مکش

1- Retention curve program

2- Sand box
3- Penetrometer
4- Weighting functions

Archive of SID

www.SID.ir

خاک) و عدد ۱۰ نیز جهت تبدیل واحد از (سانتی‌متر) به (ژول بر کیلوگرم) می‌باشد.

از آنجا که اندازه دامنه‌های مختلف رطوبتی در محاسبه انرژی انتگرالی لحاظ می‌شود، لذا ابتدا مقادیر دامنه آب قابل استفاده، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و گنجایش انتگرالی آب تعیین گردید. به این صورت که اختلاف رطوبت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه (مکش ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی‌متر) و پژمردگی دائم (مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر) به‌عنوان آب قابل استفاده گیاه در نظر گرفته شد. دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت از طریق محاسبه اختلاف حد بالا (مقدار کوچک‌تر بین رطوبت ظرفیت مزرعه یا رطوبت تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد) و حد پائین (مقدار بزرگ‌تر بین رطوبت پژمردگی دائم و مقاومت فروروی دو مگاپاسکال) تعیین گردید. مقدار شاخص گنجایش انتگرالی آب نیز بر اساس رابطه شماره ۳ که توسط گرانولت و همکاران (۸) ارائه شده است، محاسبه شد.

$$IWC = \int_0^{\infty} (\prod_{i=1}^{m} \omega_i(h)) C(h) dh \qquad (۳)$$

که در آن C(h): قدر مطلق شیب منحنی رطوبتی خاک (بر سانتی‌متر)، و ω_i(h): توابع وزن‌دهی که محدودیت‌های فیزیکی مختلف را به عنوان تابعی از مکش خاک وزن‌دهی می‌کنند. مقدار تابع وزن‌دهی وقتی که محدودیت کامل در مقابل جذب آب توسط گیاه وجود داشته باشد معادل صفر و به صورت پیوسته تا یک افزایش پیدا می‌کند و وقتی که هیچ‌گونه محدودیتی برای جذب آب توسط گیاه وجود نداشته باشد به یک می‌رسد. نحوه محاسبه توابع وزن‌دهی مفصلاً توسط گرانولت و همکاران (۸) و عسگرزاده و همکاران (۱) ارائه شده است.

در محاسبه انرژی انتگرالی، مقادیر مکش در نقاط شروع و پایان دامنه رطوبتی برای آب قابل استفاده گیاه به ترتیب مکش در نقاط ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم و برای دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت مکش در حد بالا و حد پائین این دامنه می‌باشد. مقادیر توابع وزن‌دهی برای محدوده داخل این دو دامنه رطوبتی یک و در خارج از آن صفر در نظر گرفته می‌شود.

مکش در نقاط شروع و پایان دامنه رطوبتی برای گنجایش انتگرالی آب با تعیین این‌که چه موقع یکی از توابع وزن‌دهی در یکی از دو انتهای مرطوب و خشک صفر خواهد بود، در نظر گرفته می‌شود.

در این مطالعه انرژی انتگرالی آب برای آب قابل استفاده گیاه و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (ظرفیت مزرعه در مکش ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی‌متر) و همچنین گنجایش انتگرالی آب به‌ترتیب به صورت $EI(PAW_{100})$، $EI(PAW_{330})$، $EI(LLWR_{100})$، $EI(LLWR_{330})$ و EI(IWC) نشان داده شده است. برای انجام محاسبات انتگرالی در راستای تعیین مقدار شاخص انرژی انتگرالی آب، از نرم‌افزار Mathcad Prime 3 استفاده شد.

شاخص S

یکی از پرکاربردترین روش‌های محاسبه شاخص S، استفاده از معادله وان‌گنوختن (۱۹۸۰) می‌باشد. در این روش، شاخص S با استفاده از رابطه شماره ۴ محاسبه می‌گردد.

$$S = \left|-n(\theta gs - \theta gr)[1 + 1/m]^{-(m+1)}\right| \qquad (۴)$$

که در آن θgs و θgr به‌ترتیب رطوبت وزنی اشباع (کیلوگرم بر کیلوگرم) و رطوبت وزنی باقی‌مانده (کیلوگرم بر کیلوگرم) می‌باشند. با توجه به این‌که مقدار شاخص S همواره منفی است لذا از قدر مطلق آن استفاده می‌شود.

تجزیه‌های آماری

جهت تعیین رابطه بین شاخص انرژی انتگرالی آب در دامنه آب قابل استفاده، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و گنجایش انتگرالی آب و خصوصیات اندازه‌گیری شده در این مطالعه، از همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی چند متغیره در نرم‌افزار آماری JMP نسخه ۹/۰۲ استفاده گردید.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از اندازه‌گیری ویژگی‌ها و محاسبه پارامترهای منحنی رطوبتی خاک در نمونه‌های مورد مطالعه به اختصار در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که ۴۰ درصد از نمونه خاک‌های مورد مطالعه دارای بافت لوم، ۲۳ درصد بافت لوم سیلتی، ۱۷ درصد بافت لوم رسی سیلتی، ۱۳ درصد بافت لوم رسی و ۷ درصد بافت لوم شنی بودند.

جدول۱- جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی و پارامترهای منحنی رطوبتی در خاک‌های مورد مطالعه

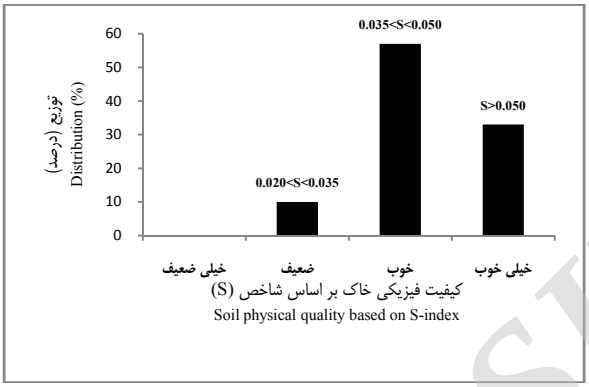
Table 1- Soil bulk density, organic carbon and soil moisture release curve parameters of studied soils

	D_b (gr cm^{-3})	OC %	θ_r (cm^{3}cm^{-3})	θ_s (cm^{3}cm^{-3})	α (cm^{-1})	n -
Max حداکثر	1.56	1.05	0.08	0.51	0.74	1.66
Min حداقل	1.29	0.26	0	0.40	0.02	1.16
Mean میانگین	1.45	0.53	0.01	0.45	0.08	1.27
SD انحراف معیار	0.064	0.222	0.023	0.026	0.129	0.121
CV ضریب تغییرات	4.46	41.87	161.48	5.69	159.00	9.53

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج محاسبه شاخص S با استفاده از پارامترهای منحنی رطوبتی خاک نشان داد که مقدار این شاخص در خاک‌های محدوده مورد مطالعه، دارای دامنه‌ای بین ۰/۰۷۰-۰/۰۲۹ و میانگین ۰/۰۴۶ می‌باشد. رینولدز و همکاران (۱۴) معتقدند که با استفاده از این شاخص، می‌توان خاک‌ها را از منظر کیفیت فیزیکی در قالب چهار دسته کیفیت فیزیکی خیلی‌خوب، خوب، ضعیف و خیلی‌ضعیف طبقه‌بندی نمود. نتایج این مطالعه نشان داد که هیچ‌یک از نمونه‌های خاک در دسته ساختمان خیلی‌ضعیف (شاخص کوچک‌تر از ۰/۰۲۰) قرار نگرفته است. نمودار توزیع خاک‌های مطالعه شده بر اساس شاخص S در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمودار توزیع نمونه خاک‌های مطالعه شده بر اساس شاخص S

Figure 1- Soil samples distribution based on S-index

جدول۲- پارامترهای منحنی رطوبتی در خاک شماره ۳۰

Table 2- Parameters of moisture release curve for soil No. 30

			α	n
		(cm^3cm^{-3})	(cm^{-1})	-
مقدار (Value)	0.00	0.471	0.076	1.238

جدول ۳- مقادیر رطوبت حجمی در دامنه‌های مختلف رطوبتی خاک شماره ۳۰

Table 3- Volumetric water content in different soil water ranges for soil No. 30

	IWC	$LLWR_{330}$	$LLWR_{100}$	PAW_{330}	PAW_{100}
			(cm^3cm^{-3})		
مقدار (Value)	0.224	0.150	0.193	0.159	0.201

جدول٤- عوامل مورد نیاز در محاسبات شاخص گنجایش انتگرالی و انرژی انتگرالی آب در خاک شماره ۳۰

Table 4- Required factors for calculation of integral water capacity and integral energy indices for soil No. 30

محدودیت (Limitation)	عامل (Factor)	محدودیت (Limitation)	عامل (Factor)
هدایت هیدرولیکی زیاد (High soil hydraulic conductivity)	K_r (330) = 6.75×10^{-6}	مقاومت فروروی (Penetration resistance)	a = 0.316 (Mpa cm^{-1}) b = 0.197 $h_{1.5\ MPa}$ = 2713 (cm) $h_{2.5\ MPa}$ = 36279 (cm)
K			
تهویه (Soil aeration)	h_{10} = 24 (cm) h_{15} = 53 (cm) A = 2.98	هدایت هیدرولیکی کم (Low soil hydraulic conductivity)	d = -2.545
		α	

$\omega_k(h)$: تابع وزنی‌دهی محدودیت هدایت هیدرولیکی زیاد، $\omega_a(h)$: تابع وزن‌دهی محدودیت تهویه، $\omega_R(h)$: تابع وزن‌دهی محدودیت مقاومت فروروی و $\omega_{kdry}(h)$: ت تابع وزن‌دهی محدودیت هدایت هیدرولیکی کم

$\omega_k(h)$: High soil hydraulic conductivity weighting function, $\omega_a(h)$: Soil aeration weighting function, $\omega_R(h)$: Soil penetration resistance weighting function, $\omega_{kdry}(h)$: Low soil hydraulic conductivity weighting function

Archive of SID

www.SID.ir

$$E_I(PAW_{100}) = 1/10 * 0.201 \left(\int_{100}^{15000} (h)C(h)dh\right) = \mathbf{200.278}\ (\mathrm{J\ kg^{-1}}) \quad (۵)$$

$$E_I(PAW_{330}) = 1/10 * 0.159 \left(\int_{330}^{15000} (h)C(h)dh\right) = \mathbf{245.080}\ (\mathrm{J\ kg^{-1}}) \quad (۶)$$

$$E_I(LLWR_{100}) = 1/10 * 0.193 \left(\int_{100}^{11688} (h)C(h)dh\right) = \mathbf{171.550}\ (\mathrm{J\ kg^{-1}}) \quad (۷)$$

$$E_I(LLWR_{330}) = 1/10 * 0.150 \left(\int_{330}^{11688} (h)C(h)dh\right) = \mathbf{212.139}\ (\mathrm{J\ kg^{-1}}) \quad (۸)$$

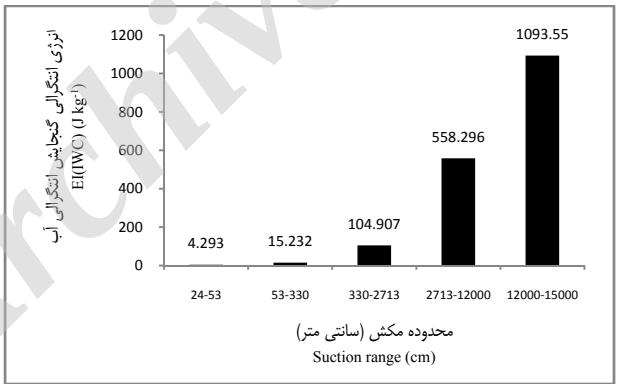
(۹)

$$E_I(IWC) = 1/10 * 0.224 \left(\int_{24}^{53}(h)\big(\omega_a(h) * \omega_k(h)\big)C(h)dh + \int_{53}^{330}(h)\big(\omega_k(h)\big)C(h)dh + \int_{330}^{2713}(h)C(h)dh + \int_{2713}^{12000}(h)\big(\omega_R(h)\big)C(h)dh + \int_{12000}^{15000}(h)\left(\omega_R(h) * \omega_{kdry}(h)\right)C(h)dh\right) = 1/2.24\ (0.687 + 13.709 + 89.171 + 167.489 + 21.871) = \mathbf{130.771}\ (\mathrm{J\ kg^{-1}})$$

بر این اساس، کیفیت فیزیکی خاک در ۹۰ درصد نمونه‌های بررسی شده در شرایط خوب و خیلی‌خوب قرار دارد.

قبل از محاسبه شاخص انرژی انتگرالی آب، عوامل مورد نیاز در محاسبات مربوط به توابع وزن‌دهی و محدودیت‌ها با استفاده از پارامترهای منحنی رطوبتی خاک در قالب نرم‌افزار اکسل محاسبه و تعیین گردید. در ادامه محاسبات مربوط به توابع وزن‌دهی محدودیت‌ها و در نهایت تعیین شاخص انرژی انتگرالی آب برای خاک شماره ۳۰ با بافت لوم به عنوان نمونه آورده شده است. جداول ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب پارامترهای منحنی رطوبتی، مقادیر رطوبت حجمی در دامنه‌های مختلف رطوبتی و مقادیر عوامل مورد نیاز در محاسبات شاخص گنجایش انتگرالی و انرژی انتگرالی آب مربوط به نمونه خاک شماره ۳۰ را نشان می‌دهند. روابط شماره ۵ الی ۹ نیز نشان‌دهنده نحوه محاسبه انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی خاک هستند.

نتایج محاسبه شاخص گنجایش انتگرالی آب در خاک شماره ۳۰ نشان داد که مقدار حجمی آب در مقاطع شامل محدودیت‌های هدایت هیدرولیکی زیاد همراه با محدودیت تهویه، هدایت هیدرولیکی زیاد، بدون محدودیت، مقاومت فروروی، و هدایت هیدرولیکی کم همراه با محدودیت مقاومت فروروی به‌ترتیب ۰/۰۱۶، ۰/۰۹، ۰/۰۸۵، ۰/۰۳ و ۰/۰۰۲ و مجموعاً ۰/۲۲۴ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب است. شکل ۲ مقادیر انرژی مورد نیاز جهت جذب واحد حجم آب خاک در پنج مقطع منحنی رطوبتی (گنجایش انتگرالی آب) خاک شماره ۳۰ را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مقادیر انرژی مورد نیاز جهت جذب واحد حجم آب خاک در پنج مقطع منحنی رطوبتی (دامنه گنجایش انتگرالی آب) خاک شماره ۳۰

Figure 2- The energy requirements of soil No. 30 to take up a unit mass of soil water in integral water capacity range

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در خاک شماره ۳۰ مقدار انرژی جهت جذب واحد حجم آب در مکش ۱۵۰۰۰–۱۲۰۰۰ سانتی‌متر بیش از ۲۵۰ برابر مقدار انرژی مورد نیاز در مکش ۵۳–۲۴ سانتی‌متر می‌باشد. عسگرزاده و همکاران (۲) نیز در مطالعه‌ای مشابه نشان دادند که مقدار انرژی مورد نیاز جهت جذب واحد حجم آب در مکش‌های انتهایی بیش از ۱۰۰ برابر مقدار آن در مکش‌های ابتدایی (مرطوب) خاک است.

مقایسه مقادیر حجمی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی و انرژی انتگرالی مربوط به هر دامنه در نمونه خاک‌های مطالعه شده نشان داد که در تعدادی از نمونه‌های خاک با وجود یکسان بودن مقدار حجمی آب در دامنه‌های رطوبتی متناظر، مقدار انرژی انتگرالی آب در همان دامنه‌ها متفاوت می‌باشد. به بیان دیگر در صورت استفاده از ویژگی

Archive of SID

www.SID.ir

اندازه دامنه رطوبتی (یکی از تعاریف) به‌عنوان شاخص کیفیت فیزیکی خاک، تعداد زیادی از نمونه‌ها مشابه هم بوده و لذا اختلافی از نظر کیفیت فیزیکی خاک در این نمونه‌ها مشاهده نخواهد شد ولی با استفاده از شاخص انرژی انتگرالی در همان نمونه‌ها می‌توان خاک‌ها را از منظر کیفیت فیزیکی متمایز ساخت. به طور مثال اندازه دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۱۰۰) در دو نمونه خاک شماره ۷ و ۱۹ یکسان و معادل ۰/۲۱ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب بود ولی نتایج محاسبه انرژی انتگرالی در همین دامنه رطوبتی نشان داد که مقدار این شاخص در خاک شماره ۷، ۱/۷ برابر بیشتر از خاک شماره ۱۹ بوده و لذا می‌توان بیان نمود که خاک شماره ۱۹ از نظر کیفیت فیزیکی در شرایط بهتری قرار دارد.

مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین انرژی انتگرالی آب در دامنه آب قابل استفاده، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و همچنین گنجایش انتگرالی آب در نمونه خاک‌های مورد بررسی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول۵- مقادیر انرژی جمعی آب در دامنه آب قابل استفاده، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و گنجایش انتگرالی آب

Table 5- Integral energy of plant available water, least limiting water range and integral water capacity

	EI(IWC)	EI($LLWR_{330}$)	EI($LLWR_{100}$)	EI(PAW_{330})	EI(PAW_{100})
			($J\ kg^{-1}$)		
حداکثر (Max)	224	270	236	306	236
حداقل (Min)	74	47	45	156	99
میانگین (Mean)	135	184	154	237	197

نتایج حاکی از آن است که میانگین مقدار انرژی انتگرالی آب در دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت که در آن علاوه بر رطوبت در نقاط ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم، محدودیت‌های تهویه و مقاومت فروروی خاک نیز لحاظ شده است، از میانگین مقدار این عامل در محدوده آب قابل استفاده گیاه (ظرفیت مزرعه متناظر) کمتر می‌باشد. به بیان دیگر در دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت گیاه با صرف انرژی کمتری جهت غلبه بر پتانسیل آب در خاک می‌تواند آب را جذب نماید. نکته دیگر قابل توجه، میانگین مقدار انرژی انتگرالی آب در محدوده گنجایش انتگرالی آب است که از مقدار این شاخص در دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت نیز کمتر می‌باشد و نشان‌گر آن است که لحاظ نمودن محدودیت‌های جذب آب توسط گیاه به صورت تابعی پیوسته از مکش آب در خاک و محاسبه انرژی انتگرالی با توجه به اثر این محدودیت‌ها، نتیجه مطلوب‌تری حاصل می‌کند. این موضوع در محاسبات شاخص انرژی انتگرالی آب مربوط به خاک شماره ۳۰ کاملاً مشهود است. نتایج مطالعه عسگرزاده و همکاران (۲) نیز نشان داد که به طور متوسط مقدار انرژی انتگرالی در دامنه گنجایش انتگرالی آب کمترین و در دامنه آب قابل استفاده گیاه بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد.

جدول ٦- ضرائب همبستگی و سطوح معنی‌داری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک با مقادیر شاخص انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی

Table 6- Correlation coefficients of soil measured properties with integral energy of different soil water ranges

ویژگی‌های خاک (Soil properties)	EI(IWC)	EI($LLWR_{330}$)	EI($LLWR_{100}$)	EI(PAW_{330})	EI(PAW_{100})
شن (Sand)	-0.26^{ns}	-0.17^{ns}	-0.02^{ns}	-0.50^{**}	-0.59^{***}
سیلت (Silt)	0.18^{ns}	0.20^{ns}	0.07^{ns}	0.48^{**}	0.57^{**}
رس (Clay)	0.32^{ns}	0.07^{ns}	0.05^{ns}	0.41^{*}	0.49^{**}
کربن آلی (OC)	0.47^{**}	0.24^{ns}	0.34^{ns}	0.25^{ns}	0.46^{*}
جرم مخصوص ظاهری (D_b)	-0.17^{ns}	-0.12^{ns}	-0.03^{ns}	-0.47^{**}	-0.17^{ns}
رطوبت حجمی اشباع (θ_{vs})	-0.22^{ns}	0.11^{ns}	0.03^{ns}	0.53^{**}	0.21^{ns}
رطوبت حجمی باقی‌مانده (θ_{vr})	-0.51^{**}	-0.17^{ns}	-0.41^{*}	-0.45^{*}	-0.88^{***}
عکس مکش در نقطه ورود هوا (α)	-0.02^{ns}	0.14^{ns}	0.23^{ns}	-0.06^{ns}	0.17^{ns}
عامل شکل منحنی رطوبتی (n)	-0.58^{***}	-0.18^{ns}	-0.46^{**}	-0.47^{**}	-0.97^{***}

*** : معنی‌دار در سطح ۰/۱٪ ** : معنی‌دار در سطح ۱٪ * : معنی‌دار در سطح ۵٪ ns : غیرمعنی‌دار

***: significant (P < 0.001), **: significant (P < 0.01), *: significant (P < 0.05), ns: non-significant

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج بررسی مقادیر انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی در خاک‌های مطالعه شده نشان داد که به طور متوسط خاک‌های دارای بافت لوم شنی و لوم سیلتی کمترین و خاک‌های با بافت لوم رسی سیلتی بیشترین مقدار این شاخص را به خود اختصاص دادند.

ارتباط آماری بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر شاخص انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی در قالب ضریب همبستگی پیرسون در جدول ۶ ارائه شده است.

نتایج نشان داد که توزیع اندازه ذرات، کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری خاک تأثیر معنی‌داری بر انرژی انتگرالی آب در دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ندارد. در این تحقیق با افزایش مقدار کربن آلی خاک، انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی افزایش یافت و این رابطه مثبت در خصوص آب قابل استفاده گیاه (۱۰۰) و گنجایش انتگرالی آب به‌ترتیب در سطح پنج و یک درصد معنی‌دار شد. ارتباط مثبت مقدار کربن آلی خاک و انرژی انتگرالی آب را می‌توان به خصوصیت آب‌دوستی مواد آلی و جذب آب توسط این مواد ارتباط داد به‌گونه‌ای که با افزایش ماده آلی، مقدار آب جذب شده توسط آن افزایش یافته و در نتیجه انرژی مورد نیاز گیاه جهت غلبه بر انرژی آب خاک و جذب آب افزایش می‌یابد.

انرژی انتگرالی آب در دامنه آب قابل استفاده گیاه (۳۳۰) با کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک افزایش معنی‌دار نشان داد. با توجه به ضریب همبستگی منفی و معنی‌دار بین مقدار کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری خاک در این مطالعه، می‌توان تأثیر معکوس جرم مخصوص ظاهری بر انرژی انتگرالی آب در دامنه آب قابل استفاده گیاه (۳۳۰) را به طور غیر مستقیم از طریق تأثیر کربن آلی بر این شاخص توجیه نمود. نتیجه‌ای مشابه در خصوص دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت توسط عسگرزاده و همکاران (۲) نیز گزارش شده است. این محققین بیان می‌دارند که با افزایش جرم مخصوص ظاهری، مقاومت فروروی خاک افزایش یافته و باعث می‌شود که مقاومت فروروی معادل دو مگاپاسکال در مکش‌های کمتری حاصل گردد. لذا انرژی انتگرالی آب در دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت به دلیل قرارگیری آب قابل استفاده گیاه در مکش‌های کمتر، کاهش می‌یابد. به بیان دیگر ایشان معتقدند که با وجود این‌که افزایش تراکم و فشردگی خاک باعث کاهش اندازه دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت می‌گردد ولی میزان کاهش انرژی انتگرالی آب در این دامنه رطوبتی بیشتر است.

نتایج این مطالعه نشان داد که شن خاک دارای رابطه منفی و معنی‌دار با انرژی انتگرالی آب در دامنه آب قابل استفاده گیاه بوده ولی در خصوص سیلت و رس خاک رابطه مثبت و معنی‌دار مشاهده شد. با توجه به این‌که حداقل میزان جذب و نگهداشت آب به‌وسیله جزء شن خاک صورت می‌گیرد، لذا کاهش انرژی انتگرالی آب در نتیجه افزایش میزان شن منطقی به نظر می‌رسد. درخصوص اجزاء سیلت و رس خاک که به‌دلیل سطح ویژه زیاد موجب افزایش ظرفیت نگهداشت آب خاک و جذب و حبس آب درون خلل و فرج می‌گردند، میزان انرژی مورد نیاز جهت غلبه بر انرژی آب خاک در راستای جذب توسط گیاه افزایش می‌یابد. میناسنی و مک‌براتنی (۱۲) نیز گزارش نمودند که انرژی انتگرالی با مقدار شن دارای همبستگی منفی و معنی‌دار و با مقدار رس خاک دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار می‌باشد. ضرایب منفی برای درصد شن و ضرایب مثبت برای درصد رس خاک در روابط رگرسیونی تخمین‌گر مقدار انرژی انتگرالی آب در دامنه آب قابل استفاده گیاه که توسط عسگرزاده و همکاران (۲) ارائه شده است نیز مؤید این مطلب است.

بررسی ضرایب همبستگی بین پارامترهای منحنی رطوبتی خاک و انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی نشان داد که از چهار پارامتر منحنی رطوبتی در نمونه خاک‌های مطالعه شده، تنها دو پارامتر رطوبت حجمی باقی‌مانده و عامل شکل منحنی، دارای ارتباط منفی و معنی‌دار با انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی به جز دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۳۳۰) می‌باشند. بر این اساس در خاک‌های با رطوبت باقی‌مانده بیشتر و عامل شکل بزرگتر، مقدار انرژی انتگرالی آب کاهش یافته و گیاه با سهولت بیشتری آب را جذب می‌کند. عسگرزاده و همکاران (۲) معتقدند در خاک‌های با شیب تند منحنی رطوبتی در محدوده غیراشباع که عمدتاً خاک‌های درشت بافت یا دارای ساختمان مناسب می‌باشند، مقدار انرژی انتگرالی آب در دامنه آب قابل استفاده گیاه کمتر بوده و به تبع آن کیفیت فیزیکی خاک مناسب‌تر می‌باشد. نتایج بررسی مقادیر عامل شکل منحنی رطوبتی در نمونه خاک‌های مورد مطالعه نیز نشان داد که به طور متوسط بیشترین مقدار این عامل مربوط به بافت لوم شنی و کمترین آن مربوط به بافت لوم رسی و لوم رسی سیلتی بود که با نتایج ارائه شده در خصوص مقدار انرژی انتگرالی مطابقت دارد. در این مطالعه همبستگی بسیار قوی بین عامل شکل منحنی رطوبتی خاک و انرژی انتگرالی در دامنه آب قابل استفاده گیاه (۱۰۰) مشاهده شد و نشان داد که این پارامتر را می‌توان به‌عنوان تخمین‌گر مناسبی برای انرژی انتگرالی در دامنه آب قابل استفاده گیاه (۱۰۰) در نظر گرفت. این نتیجه با نتایج مطالعات میناسنی و مک‌براتنی (۱۲) و عسگرزاده و همکاران (۲) مطابقت دارد.

رابطه خطی بین انرژی انتگرالی در دو دامنه آب قابل استفاده گیاه (۱۰۰) و گنجایش انتگرالی آب و شاخص S به‌ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. بر این اساس افزایش مقدار شاخص S کاهش انرژی انتگرالی در دامنه‌های رطوبتی ذکر شده را به دنبال دارد. به بیان دیگر با افزایش کیفیت فیزیکی خاک‌های مطالعه شده بر

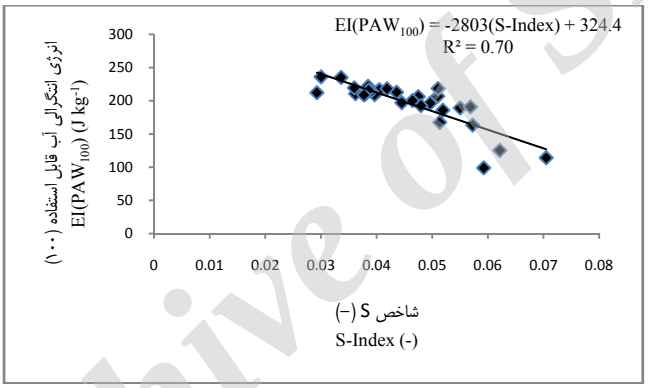
Archive of SID

www.SID.ir

اساس شاخص S، مقدار انرژی انتگرالی در دامنه آب قابل استفاده گیاه (۱۰۰) و گنجایش انتگرالی آب کاهش یافته است و حاکی از آن است که افزایش شاخص S، منجر به سهولت بیشتر جذب آب توسط گیاه شده است. این نتیجه تأییدی بر قابلیت استفاده از شاخص S به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی کیفیت خاک بود. در این مطالعه رابطه منطقی بین شاخص S و انرژی انتگرالی در دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و آب قابل استفاده گیاه (۳۳۰) مشاهده نشد. عسگرزاده و همکاران (۲) نیز رابطه خطی بین انرژی انتگرالی دامنه آب قابل استفاده گیاه (۱۰۰ و ۳۳۰) و شاخص S با ضریب تبیین به‌ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۴۶ را گزارش نموده‌اند.

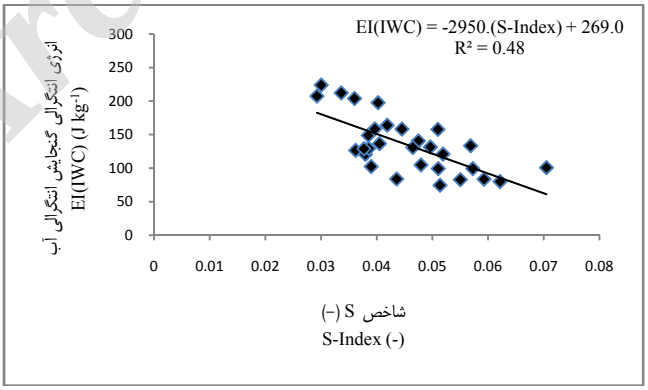
در این پژوهش با استفاده از تجزیه رگرسیون خطی چند متغیره گام‌به‌گام، مقدار شاخص انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده، تخمین زده شد. به این صورت که شاخص انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی به‌عنوان متغیر وابسته و ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد. نتایج این تجزیه در جدول ۷ ارائه شده است.

نتیجه تجزیه رگرسیون چند متغیره نشان داد که انرژی انتگرالی در دامنه آب قابل استفاده گیاه (۱۰۰) از طریق عامل شکل منحنی رطوبتی خاک با ضریب تبیین ۰/۹۵ قابل تخمین است. در خصوص انرژی انتگرالی دامنه آب قابل استفاده گیاه (۳۳۰)، نتایج حاکی از ورود رطوبت حجمی اشباع و درصد شن خاک به رابطه تخمین‌گر این شاخص می‌باشند. بر اساس این رابطه ۴۳ درصد تغییرات انرژی انتگرالی در این دامنه رطوبتی توسط رطوبت حجمی اشباع با ضریب مثبت و درصد شن خاک با ضریب منفی تبیین می‌گردد. با توجه به این که مقدار رطوبت اشباع در خاک‌های ریزبافت بیشتر بوده و بر اساس آنچه که گفته شد مقدار انرژی انتگرالی نیز در این‌گونه خاک‌ها بیشتر است، لذا تأثیر مثبت این ویژگی بر مقدار انرژی انتگرالی در دامنه آب قابل استفاده گیاه (۳۳۰) منطقی به نظر می‌رسد.



شکل ۳- رابطه خطی بین انرژی انتگرالی آب قابل استفاده گیاه (۱۰۰) و شاخص S

Figure 3- Linear relation between integral energy of plant available water (100) and S-index



شکل ٤- رابطه خطی بین انرژی انتگرالی گنجایش انتگرالی آب و شاخص S

Figure 4- Linear relation between integral energy of integral water capacity and S-index

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۷- تجزیه رگرسیون چند متغیره بین مقادیر شاخص انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی و ویژگی‌های فیزیکی خاک
Table 7- Multivariate regression analysis between integral energy of different soil water ranges and soil physical properties

متغیر وابسته (Dependent variable)	متغیر مستقل (Independent variable)	واحد (Unit)	ضریب (Coefficient)	ضریب تبیین جزئی (Partial R^2)	ضریب تبیین تجمعی (Cumulative R^2)	سطح معنی‌داری (Signification)
$EI(PAW_{100})$	عامل شکل منحنی رطوبتی (n)	-	-265.23	0.95	0.95	0.000
	عرض از مبداء (Intercept)	($J\ kg^{-1}$)	534.01	--	--	--
$EI(PAW_{330})$	رطوبت حجمی اشباع (θ_{vs})	($cm^3\ cm^{-3}$)	449.94	0.28	0.28	0.002
	شن (Sand)	(%)	-0.82	0.15	0.43	0.012
	عرض از مبداء (Intercept)	($J\ kg^{-1}$)	57.18	--	--	--
$EI(LLWR_{100})$	عامل شکل منحنی رطوبتی (n)	-	-236.39	0.22	0.22	0.009
	عرض از مبداء (Intercept)	($J\ kg^{-1}$)	454.70	--	--	--
EI(IWC)	شاخص S (S-Index)	-	-2557.52	0.48	0.48	0.000
	کربن آلی (OC)	(%)	58.84	0.09	0.57	0.025
	عرض از مبداء (Intercept)	($J\ kg^{-1}$)	57.18	--	--	--

نتایج نشان داد که عامل شکل منحنی رطوبتی خاک تنها ویژگی وارد شده به رابطه تخمین‌گر انرژی انتگرالی در دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۱۰۰) بوده و ۲۲ درصد تغییرات این شاخص توسط عامل شکل منحنی قابل توجیه است. در این مطالعه شاخص S و درصد کربن آلی خاک مجموعاً ۵۷ درصد تغییرات انرژی انتگرالی در دامنه گنجایش انتگرالی آب خاک را توجیه نمودند که ۴۸ درصد این تغییرات توسط شاخص S تبیین می‌شود.

در مجموع می‌توان بیان نمود که عامل شکل منحنی رطوبتی خاک و شاخص S، مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر انرژی انتگرالی آب در دامنه آب قابل استفاده گیاه (۱۰۰) و گنجایش انتگرالی آب می‌باشند.

نتایج ارائه شده در این پژوهش حاصل مطالعه بر روی خاک‌های دارای بافت متوسط رو به سبک می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌گردد جهت بررسی‌های جامع‌تر مطالعاتی مشابه بر روی خاک‌های دارای بافت‌های متنوع انجام گردد.

نتیجه‌گیری کلی

پژوهش حاضر با هدف بررسی ارتباط انرژی انتگرالی آب خاک در دامنه‌های مختلف رطوبتی به‌عنوان یکی از شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک، با شاخص S در خاک‌های با بافت متوسط و سبک در استان خراسان‌رضوی انجام شد. در این مطالعه فرض بر این بود که در خاک‌های با مقادیر شاخص S بزرگتر، انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی کمتر است. به بیان دیگر در خاک‌های با کیفیت فیزیکی مناسب، انرژی مورد نیاز گیاه جهت جذب واحد حجم آب خاک کمتر می‌باشد. در این مطالعه کیفیت فیزیکی خاک بر اساس شاخص S در ۹۰ درصد نمونه‌های خاک در شرایط خوب و خیلی‌خوب ارزیابی شد. نتایج بررسی مقادیر انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی در خاک‌های مطالعه شده نشان داد که به طور متوسط خاک‌های دارای بافت لوم شنی و لوم سیلتی کمترین و خاک‌های با بافت لوم رسی سیلتی بیشترین مقدار این شاخص را به خود اختصاص دادند. مقایسه مقدار انرژی انتگرالی در دامنه‌های مختلف رطوبتی حاکی از آن بود که میانگین مقدار انرژی انتگرالی آب در محدوده گنجایش انتگرالی آب از مقدار این شاخص در دامنه آب قابل استفاده گیاه و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت کمتر بوده و نشان‌گر آن است که لحاظ نمودن محدودیت‌های جذب آب توسط گیاه به صورت تابعی پیوسته از مکش آب در خاک و محاسبه انرژی انتگرالی با توجه به اثر این محدودیت‌ها، نتیجه مطلوب‌تری حاصل می‌کند. تحلیل آماری نتایج، نشان داد که شاخص S مقدار انرژی انتگرالی آب در دامنه آب قابل استفاده گیاه (۱۰۰) و گنجایش انتگرالی آب را به طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داده و با افزایش این شاخص و به بیان دیگر کیفیت فیزیکی خاک، مقدار انرژی موردنیاز گیاه جهت جذب واحد حجم آب خاک در این دو دامنه رطوبتی کاهش یافت. در مجموع می‌توان بیان نمود که عامل شکل منحنی رطوبتی خاک و شاخص S تعیین‌کننده مقدار شاخص انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های رطوبتی ذکر شده می‌باشند.

Archive of SID

www.SID.ir

منابع

1- Asgarzadeh H., Mosaddeghi M.R., Mahboubi A.A., Nosrati A., and Dexter A.R. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. Plant Soil, 335: 229–244.
2- Asgarzadeh H., Mosaddeghi M.R., Mahboubi A.A., Nosrati A., and Dexter A.R. 2011. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. Geoderma, 166: 34– 42.
3- Beigi Harchegani H., and Banitalebi G. 2013.The effect of long-term application of municipal wastewater on soil physical quality indices: A case study in the Taqanak farms, Shahrekord. Journal of Water and Soil, 27(5): 1046–1056. (in Persian with English abstract)
4- Dexter A.R., and Bird N.R.A. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. Soil & Tillage Research, 57: 203–212.
5- Dexter A.R. 2004. Soil physical quality: Part I, Theory, effects of soil texture density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 120: 201–214.
6- Emami H., Lakzian A., and Mohajerpour M. 2010. Study of the relationship between slope of retention curve and some physical properties of soil quality. Journal of Water and Soil, 24(5): 1027–1035. (in Persian with English abstract)
7- Emami H., Neyshabouri M.R., and Shorafa M. 2012. Relationships between some soil quality indicators in different agricultural soils from Varamin, Iran. Journal of Agricultural Science and Technology, 14: 951–959.
8- Groenevelt P.H., Grant C.D., and Semetsa S. 2001. A new procedure to determine soil water availability. Australian Journal of Soil Research, 39: 577–598.
9- Hao X., Ball B.C., Culley J.L.B., Carter M.R., and Parkin G.W. 2007. Soil density and porosity. p. 743-760. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
10- Kroetsch D., and Wang C. 2007. Particle size distribution. p. 713–725. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
11- Letey J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. Advanced Soil Science, 1: 277–294.
12- Minasny B., and McBratney A.B. 2003. Integral energy as a measure of soil–water availability. Plant Soil, 249: 253–262.
13- Reynolds W.D., and Clarke Topp G. 2007. Soil water desorption and imbibition: tension and pressure techniques. p. 981-997. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
14- Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A., and Yang X.M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. Geoderma, 152: 252– 263.
15- Sahebjame A.A. 2002. The precise detailed study of soil and land classification of Torogh (Khorasan-Razavi) agricultural research station. Final report, 1146. Soil and Water Research Institute. (in Persian)
16- Skjemstad J.O., and Baldock J.A. 2007. Total and organic carbon. p. 225-237. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.

Archive of SID

www.SID.ir

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 2, May.-Jun. 2017, p. 386-398

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۶، ص. ۳۹۸-۳۸۶

The Relationship Between Integral Energy (EI) of Different Soil Moisture Ranges and S-Index in Medium to Coarse-textured Soils

M. Zangiabadi[1*]- M. Gorji[2]- M. Shorafa[3]- P. Keshavarz[4]- S. Saadat[5]

Received: 05-04-2016
Accepted: 06-06-2016

Introduction: Soil physical quality isone of the most important factors affects plants water use efficiency in agricultural land uses. In the literature, some soil physical properties and indices such as S-index, Pore Size Distribution (PSD), porosity, Air Capacity (AC), Plant Available Water (PAW) content, Least Limiting Water Range (LLWR) and Integral Water Capacity (IWC) were mentioned as the soil physical quality indicators. It has been reported that the soils with the same PAW, LLWR and IWC may have different physical qualities. The index of Integral Energy (EI) of the soil moistureranges may differ between the soils with equal soilmoistureover a defined water content range. This index is defined as the required energy to uptake the unit mass of soil moistureby plants. According to this definition, the soils with low EI would have better physical quality for plants roots growth. In this research, we hypothesized that EI of different soil moistureranges were negatively related to S-index which means the plants required energy to uptake the soil water in the soils with high S-index, is lower than the soils with poor physical quality (less S-index). So we examined our hypothesis in medium to coarse-textured soils of Khorasan-Razavi province (Iran).

Materials and Methods: This research was conducted in Torogh Agricultural and Natural Resources Research and Education Station in Khorasan-Razavi province, north-eastern Iran (59° 37' 33"-59° 39' 10" E, 36° 12' 31"-36° 13' 56" N). Soil textures of this research station, are classified into loam, silt loam, silty clay loam, clay loam, and sandy loam which is as the same in more than 90% of agricultural soils in Khorasan-Razavi province. Thirty points with different soil textures and organic carbon contents were selected. In order to measure different properties of the soil, two soil samples (5 cm diameter × 5.3 cm length core sample and a disturbed soil sample) were collected from 0-30 cm depth of each point. After conducting required laboratory and field measurements using standard methods, the Soil Moisture Release Curve (SMRC) parameters (RETC program), S-index, PAW and LLWR (measured in matric heads of 100 and 330 cm for the field capacity), IWC and EI of mentioned soil moisture ranges were calculated. In this regard, integration calculations were done by Mathcad Prime 3 software. Finally, the relationships between the measured properties and EI values (for PAW_{100}, PAW_{330}, $LLWR_{100}$, $LLWR_{330}$ and IWC) were analyzed using Pearson correlation coefficient and stepwise multivariate linear regression by JMP (9.02) statistical software.

Results and Discussion: The S-index of 30 soil samples were between 0.029-0.070 with average of 0.046. These results showed that 90% of studied soil samples had good and very good and 10% had poor physical quality. The lowest average EI values of different soil moisture ranges were observed in sandy loam and silt loam and the highest was observed in silty clay loam soil textures. The EI(IWC) mean value was lower than EI(PAW) and EI(LLWR) mean values which indicated that calculating the EI values based on continuous effects of water uptake physical limitations, resulted in lower required energy for plants to uptake the unit mass of soil moisture . Statistical analysis resulted in significantly negative relations between S-index and two indices of EI(PAW_{100}) and EI(IWC). Multivariate regression analysis showed that EI(PAW_{100}) and EI($LLWR_{100}$) could be estimated by shape parameter (n) of SMRC by regression coefficients of 0.95 and 0.22, respectively and the value of EI(IWC) could be estimated by S-index and organic carbon content by regression coefficient of 0.57. The parameter of saturated volumetric water content (θ_{vs}) of SMRC and sand percentage were determining factors of EI(PAW_{330}). In this research, it was not obtained the significant relationship between EI($LLWR_{330}$) values and measured soil physical properties. According to the results, increment of the shape parameter (n) of SMRC and S-index led to reducing the plants required energy to uptake the unit mass of soil moisture in

1 and 4- Researcher and Associated Professor of Soil and Water Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Mashhad, Iran, Respectively
(*- Corresponding Author Email: m.zangiabadi@areeo.ac.ir)
2 and 3- Professors of Soil Science Engineering Department, University of Tehran, Karaj, Iran
5- Assistant Professor of Soil Conservation and Sustainable Land Management Department, Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran

Archive of SID

www.SID.ir

PAW_{100} and IWC ranges. We found that EI of different soil moisture ranges could be used to evaluate the soil physical quality between the soils with equal soilmoisture contents.

Conclusion: This Research investigated the relationship of PAW, LLWR and IWC EI values with soil physical properties and S-Index in medium to coarse-textured soils. The results indicated that increment of S-index led to decreasing EI(PAW_{100}) and EI(IWC) indices. According to the results, the shape parameter of SMRC and S-index could be accounted for determining factors of EI(PAW_{100}) and EI(IWC) indices values.

Keywords: Integral Water Capacity, Least Limiting Water Range, Plant Available Water

Archive of SID

www.SID.ir