

## تأثیر توزیع اندازه تخلخل خاک بر میزان انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی

مهدی زنگی‌آبادی<sup>1</sup>، منوچهر گرجی، سعید غالبی و محمدرضا رضانی مقدم

محقق بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و

ترویج کشاورزی، مشهد، ایران؛ [m.zangiabadi@areeo.ac.ir](mailto:m.zangiabadi@areeo.ac.ir)

استاد گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران؛ [mgorji@ut.ac.ir](mailto:mgorji@ut.ac.ir)

مریی بخش تحقیقات آبیاری و فیزیک خاک، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛ [s.ghalebi@areeo.ac.ir](mailto:s.ghalebi@areeo.ac.ir)

استادیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، مشهد، ایران؛ [mr.ramezani@areeo.ac.ir](mailto:mr.ramezani@areeo.ac.ir)

دریافت: 95/8/26 و پذیرش: 96/3/3

### چکیده

توزیع اندازه خلل و فرج خاک از عوامل مهم تأثیرگذار در کیفیت فیزیکی آن و نشان‌دهنده نوع مدیریت خاک می‌باشد. انرژی انتگرالی آب بیان‌گر مقدار انرژی مورد نیاز گیاه برای جذب واحد وزن آب خاک در یک دامنه رطوبتی مشخص است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه خلل و فرج خاک بر میزان انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی طرق در استان خراسان رضوی انجام شد. در این مطالعه پس از انجام نمونه‌برداری‌های لازم از خاک 30 نقطه ایستگاه و انجام اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و صحرایی، ضرایب منحنی مشخصه رطوبت خاک، شاخص‌های منحنی توزیع اندازه خلل و فرج، آب قابل استفاده گیاه، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت، گنجایش انتگرالی آب و انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی محاسبه و در نهایت روابط آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش قطر خلل و فرج و کاهش تنوع اندازه آنها و همچنین تمایل منحنی توزیع اندازه خلل و فرج خاک به بلندتر بودن در مرکز و کشیده‌تر بودن آن در دو انتهای منحنی نسبت به حالت لوگ نرمال می‌تواند منجر به کاهش انرژی انتگرالی آب و افزایش سهولت جذب آب توسط گیاه در دامنه‌های مختلف رطوبتی گردد.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، جذب آب توسط گیاه، گنجایش انتگرالی آب، منحنی مشخصه رطوبت خاک

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: مشهد، بزرگراه شهید کلاحتری، روبروی پلیس‌راه طرق، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، بخش تحقیقات خاک و آب

## مقدمه

دارند، لذا کیفیت فیزیکی خاک‌های تحت مدیریت بی‌خاک‌ورزی از خاک‌ورزی رایج بهتر ارزیابی شد.

با وجود این‌که کل مقدار آب قابل دسترس برای گیاهان، همبستگی خوبی با عملکرد و پاسخ گیاه دارد، ولی برای جذب واحد وزن آب موجود در خاک توسط گیاه انرژی مشخصی مورد نیاز است که میزان سهولت جذب آب توسط گیاه را توجیه می‌کند. بر این اساس میناسنی و مک‌برانتی (2003) انرژی انتگرالی<sup>9</sup> را به‌عنوان معیاری جهت برآورد آب قابل استفاده گیاه ارائه نمودند. این محققین نشان دادند که منحنی رطوبتی خاک<sup>10</sup> ابزاری مناسب در خصوص برآورد انرژی مورد نیاز گیاه جهت غلبه بر انرژی آب در خاک و جذب واحد وزن آب می‌باشد. این انرژی تابعی از مقدار آب یا به بیان دیگر تابعی از نقاط شروع و خاتمه دامنه رطوبتی در خاک می‌باشد. محققین معتقدند که در خاک‌های مشابه از نظر مقدار آب قابل استفاده، که مقدار انرژی انتگرالی متفاوت است، رشد و عملکرد گیاه و به تبع آن کارایی مصرف آب متفاوت خواهد بود (میناسنی و مک‌برانتی، 2003).

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که آب قابل استفاده گیاه، به شیوه مدیریت خاک حساسیتی ندارد یعنی اگر در شرایطی با افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک، آب قابل استفاده گیاه به دلیل افزایش متناظر رطوبت ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم ثابت بماند، اثر افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک بر آب قابل استفاده گیاه نشان داده نخواهد شد ولی در همان خاک با افزایش جرم مخصوص ظاهری، انرژی انتگرالی آب افزایش خواهد یافت (رینولدز و همکاران، 2007؛ رینولدز و همکاران، 2008)

عسگرزاده و همکاران (2011) معتقدند که وجود ارتباط قوی و معنی‌دار بین انرژی انتگرالی، گنجایش انتگرالی آب<sup>11</sup>، و مکش در نقطه دارای مقاومت فروری معادل 1/5 مگاپاسکال و همچنین بین انرژی انتگرالی، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت<sup>12</sup>، و مکش در نقطه دارای مقاومت فروری معادل دو مگاپاسکال، بیان‌گر وابستگی زیاد انرژی انتگرالی به مقاومت فروری خاک در دامنه خشک آن می‌باشد.

مقایسه نحوه مدیریت منابع آب در ایران با استانداردهای جهانی نشان می‌دهد که مدیریت منابع و ذخایر آب کشور از وضعیت مطلوبی بهره‌مند نیست. از

منحنی زنگوله‌ای شکل توزیع اندازه خلل و فرج خاک حاصل قراردادن مقادیر شیب منحنی رطوبتی خاک (در شرایطی که این منحنی بر اساس رطوبت حجمی خاک در برابر لگاریتم طبیعی مکش ماتریک رسم شده باشد) در مقابل قطر معادل خلل و فرج (میکرومتر) در مقیاس لگاریتمی می‌باشد (رینولدز و همکاران، 2009). جهت ارزیابی و مقایسه منحنی‌های توزیع اندازه خلل و فرج خاک از شاخص‌های مختلف موقعیت<sup>1</sup> و شکل<sup>2</sup> منحنی استفاده می‌شود. در این خصوص سه شاخص مُد<sup>3</sup>، میانه<sup>4</sup> و میانگین<sup>5</sup> قطر معادل خلل و فرج خاک به عنوان شاخص‌های موقعیت (تمایل به مرکز) و سه شاخص انحراف معیار<sup>6</sup>، کشیدگی<sup>7</sup> و افراستگی<sup>8</sup> به عنوان شاخص‌های شکل در نظر گرفته می‌شوند (رینولدز و همکاران، 2009).

نتایج مطالعه کاستلینی و همکاران (2014) در راستای بررسی تغییرات کیفیت فیزیکی خاک تحت دو نوع مدیریت بقایای گیاهی در خاک‌های رسی نشان داد که همه تیمارها دارای مقادیر بیشتر میانه و میانگین قطر معادل خلل و فرج و مقادیر کمتر انحراف معیار منحنی توزیع اندازه خلل و فرج نسبت به حدود بهینه پیشنهاد شده در منابع (رینولدز و همکاران، 2009) بوده و تنها شاخص مُد قطر معادل خلل و فرج در محدوده بهینه این شاخص قرار داشت (کاستلینی و همکاران، 2014).

شهاب و همکاران (2013) تعدادی نمونه خاک را بر اساس حدود بهینه (رینولدز و همکاران، 2009) هشت خصوصیت فیزیکی خاک دسته‌بندی نمودند. آنها دامنه تغییرات شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه خلل و فرج در خاک‌های دسته اول را که بیشترین تعداد ویژگی فیزیکی در حدود بهینه را دارا بودند، به عنوان حدود بهینه برای این شاخص‌ها در اقلیم نیمه‌خشک ایران اعلام نمودند.

نتایج مطالعه کاستلینی و همکاران (2013) نشان داد که شاخص‌های موقعیت منحنی توزیع اندازه خلل و فرج در خاک‌های رسی تحت مدیریت بی‌خاک‌ورزی در دامنه حدود بهینه پیشنهادی (رینولدز و همکاران، 2009) قرار

<sup>1</sup>. Location

<sup>2</sup>. Shape

<sup>3</sup>. Mode

<sup>4</sup>. Median

<sup>5</sup>. Mean

<sup>6</sup>. Standard deviation

<sup>7</sup>. Skewness

<sup>8</sup>. Kurtosis

<sup>9</sup>. Integral energy (EI)

<sup>10</sup>. Soil moisture release curve (SMRC)

<sup>11</sup>. Integral water capacity (IWC)

<sup>12</sup>. Least limiting water range (LLWR)

انجا که کیفیت فیزیکی خاک یکی از مهم‌ترین مباحث مطرح در ارتقاء کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی محسوب می‌گردد، لذا در این مطالعه سعی شده است تا ارتباط بین توزیع اندازه خلل و فرج در خاک با میزان انرژی مورد نیاز گیاه جهت جذب واحد وزن آب خاک در دامنه‌های مختلف رطوبتی مورد بررسی قرار گیرد.

### مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در طی سالهای 1392-1393 در ایستگاه تحقیقات طرق مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی با متوسط ارتفاع 1010 متر از سطح دریا و در مختصات جغرافیایی 59 درجه و 37 دقیقه تا 59 درجه و 39 دقیقه طول شرقی و 36 درجه و 12 دقیقه تا 36 درجه و 14 دقیقه عرض-شمالی، انجام شد. خاک اراضی این ایستگاه در دو رده انتی سول و اریدی سول طبقه‌بندی شده است و عموماً در لایه سطحی دارای بافت متوسط رو به سبک و خیلی سبک می‌باشد (صاحب‌جمع، 1381).

بر اساس اطلاعات موجود (صاحب‌جمع، 1381)، 30 نقطه با بافت، ساختمان و ماده آلی متفاوت انتخاب شد. برای اندازه‌گیری خصوصیات مختلف خاک از هر نقطه دو نمونه از عمق 0-30 سانتی‌متری، شامل یک نمونه دست-خورده و یک نمونه دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌های فلزی با قطر 5 و ارتفاع 5/3 سانتی‌متر تهیه شد.

در این مطالعه ضرایب منحنی رطوبتی خاک، با برازش معادله وان‌گونختن در برنامه RETC<sup>1</sup> به داده‌های رطوبتی خاک در مکش‌های 0، 10، 30، 60 و 90 سانتی‌متر (با استفاده از دستگاه جعبه شن<sup>2</sup>) و مکش‌های 330، 1000، 10000 و 15000 سانتی‌متر (با استفاده از صفحات فشاری) به‌دست آمد (رینولدز و تاپ، 2007؛ عسگرزاده و همکاران، 2010). این ضرایب شامل رطوبت حجمی اشباع ( $\theta_{vs}$ ) (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)، رطوبت حجمی باقی‌مانده ( $\theta_{vr}$ ) (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)، عکس مکش ماتریک در نقطه ورود هوا ( $\alpha$ ) (بر سانتی‌متر)، عامل شکل و تعیین‌کننده شیب منحنی برازش شده ( $n$ ) و  $m$  که معادل  $(1 - 1/n)$  هستند (وان‌گونختن، 1980). توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری دو زمانه (کروش و وانگ، 2007) و اجزاء شن بر اساس طبقه‌بندی آمریکایی<sup>3</sup> با استفاده از الک‌های مطبق (هاو و همکاران، 2007)، اندازه‌گیری شد. جهت

تعیین مقاومت فروروی خاک از فروسنج<sup>4</sup> مخروطی مارک Eijkelkamp با دقت یک سانتی‌متر و مخروط دارای زاویه 60 درجه و سطح مقطع یک سانتی‌متر مربع، استفاده شد. این اندازه‌گیری 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 میزان رطوبت تهیه و پس از تعیین درصد رطوبت وزنی، با استفاده از ضرایب منحنی رطوبتی همان خاک، مکش متناظر با هر مقدار مقاومت فروروی خاک تعیین گردید. به‌منظور تعیین یک تابع پیوسته از مقاومت فروروی خاک، با استفاده از نرم‌افزار اکسل یک مدل توانی (رابطه شماره 1) به داده‌های به‌دست آمده، برازش گردید.

$$PR(h) = ah^b \quad (1)$$

در این رابطه،  $PR(h)$ : مقاومت فروروی خاک به عنوان تابعی از مکش (مگا پاسکال)،  $h$ : مکش خاک (سانتی-متر)،  $a$  و  $b$ : ضرایب تجربی مدل می‌باشد (گرانولت و همکاران، 2001).

جهت دستیابی به منحنی توزیع اندازه خلل و فرج باید شیب منحنی رطوبتی خاک (در شرایطی که این منحنی بر اساس درصد رطوبت حجمی خاک در برابر لگاریتم طبیعی مکش ماتریک رسم شده باشد) و قطر معادل خلل و فرج (میکرومتر) تعیین گردد. شیب منحنی رطوبتی و قطر معادل خلل و فرج خاک با استفاده از معادله صعود موئینه به ترتیب با استفاده از روابط شماره 2 و 3 تعیین گردید (رینولدز و همکاران، 2009).

$$S_v(h) = d(\theta_v)/d(\ln h) = -mn(\theta_{vs} - \theta_{vr})\alpha^n h^n [1 + (\alpha h)^n]^{-(m+1)} \quad (2)$$

$$d_e = 4\gamma \cos \omega / \rho_w g h \approx 2980/h \quad (3)$$

در این روابط،  $\theta_v$ : رطوبت حجمی در مکش ماتریک  $h$ ،  $d_e$ : قطر معادل خلل و فرج (میکرومتر)،  $\gamma$ : کشش سطحی آب درون خلل و فرج معادل 72/8 (گرم بر مجذور ثانیه)،  $\rho_w$ : وزن مخصوص آب معادل 0/998 (گرم بر سانتی‌متر مکعب)،  $g$ : شتاب ثقل معادل 980 (سانتی‌متر بر مجذور ثانیه) و  $\omega$ : زاویه تماس آب با خلل و فرج خاک که تقریباً معادل صفر در نظر گرفته می‌شود.

جهت محاسبه شاخص‌های توزیع اندازه خلل و فرج لازم است ابتدا اشباع مؤثر که مقدار آن بین صفر و یک متغیر می‌باشد، تعیین گردد. در این خصوص می‌توان

<sup>1</sup> Retention Curve Program

<sup>2</sup> Sand Box

<sup>3</sup> United states department of agriculture (USDA) system

<sup>4</sup> Penetrometer

آن در دو انتهای منحنی نسبت به حالت لوگ نرمال است و مقادیر کمتر از یک نشان‌دهنده کوتاه‌تر بودن منحنی در مرکز و دنباله‌های کوتاه‌تر آن در دو انتهای منحنی نسبت به حالت لوگ نرمال است (رینولدز و همکاران، 2009).

انرژی انتگرالی آب در هر دامنه رطوبتی حاصل انتگرال قدرمطلق شیب منحنی رطوبتی خاک در همان دامنه رطوبتی می‌باشد (میناسنی و مک‌برانتی، 2003). مقدار انرژی انتگرالی آب خاک بر حسب ژول بر کیلوگرم با استفاده از رابطه شماره 12 محاسبه شد (عسگرزاده و همکاران، 2011).

$$E_I = 1/10 W \int_{h_i}^{h_f} h(\prod_{i=1}^m \omega_i(h)) C(h) dh \quad (12)$$

در این رابطه،  $h_i$ : 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<sup>1</sup> (جهت وزن‌دهی به محدودیت‌های فیزیکی مختلف به عنوان تابعی از مکش خاک) و عدد 10 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 100 و 330 سانتی‌متر) و پژمردگی دائم (مکش 15000 سانتی‌متر) به عنوان 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 10 درصد) و حد پائین (مقدار بزرگ‌تر بین رطوبت پژمردگی دائم و مقاومت فروری دو مگاپاسکال) تعیین گردید.

مکش در نقاط شروع و پایان دامنه رطوبتی برای آب قابل استفاده 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 در نظر گرفته شده است. حال این حد بالا و پائین در نمونه خاک‌های مختلف متفاوت بود. در بعضی از خاک‌ها پژمردگی دائم و در بعضی دیگر مقاومت فروری دو مگاپاسکال حد پائین قرار گرفت. مقادیر توابع وزن‌دهی برای محدوده داخل این دو دامنه رطوبتی یک و در خارج

مکش را بر اساس اشباع مؤثر با استفاده از رابطه شماره 4 محاسبه و در رابطه شماره 3 قرار داده و رابطه شماره 5 را جهت محاسبه قطر معادل خلل و فرج خاک در اشباع مؤثر متناظر بدست آورد.

$$S_e = [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \quad (4)$$

$$d_{se} = 2980\alpha / (S_e^{-1/m} - 1)^{1/n} \quad (5)$$

در این رابطه،  $S_e$ : اشباع مؤثر می‌باشد.

بر اساس رابطه اخیر شاخص‌های میانه، مُد، میانگین، انحراف معیار، ضریب کشیدگی و ضریب افراستگی منحنی توزیع اندازه خلل و فرج خاک با استفاده از روابط شماره 6 الی 11 قابل محاسبه است (رینولدز و همکاران، 2009).

$$d_{median} = d_{0.5} = 2980\alpha / (0.5^{-1/m} - 1)^{1/n} \quad (6)$$

$$(7)$$

$$d_{mode} = 2980\alpha / (S_i^{-1/m} - 1)^{1/n} = 2980\alpha / m^{-1/n}$$

در این رابطه،  $S_i$ : اشباع نسبی در نقطه عطف منحنی رطوبتی خاک (نقطه اوج منحنی توزیع اندازه خلل و فرج) می‌باشد.

$$d_{mean} = \exp(\ln d_{0.16} + \ln d_{0.5} + \ln d_{0.84} / 3) \quad (8)$$

$$(9)$$

$$SD = \exp((\ln d_{0.84} - \ln d_{0.16} / 4) + (\ln d_{0.95} - \ln d_{0.05} / 6.6)) \quad 1 \leq SD \leq \quad (10)$$

$$Skewness = 1/2 \left[ \frac{\ln d_{0.16} + \ln d_{0.84} - 2(\ln d_{0.5})}{\ln d_{0.05} + \ln d_{0.95} - 2(\ln d_{0.5})} \right] + \frac{(\ln d_{0.84} - \ln d_{0.16})}{(\ln d_{0.95} - \ln d_{0.05})} \quad -1 \leq Skewness \leq +1 \quad (11)$$

$$Kurtosis = (\ln d_{0.05} - \ln d_{0.95}) / (2.44(\ln d_{0.25} - \ln d_{0.75})) \quad 0.41 \leq Kurtosis \leq \infty$$

در این روابط، انحراف معیار برابر با یک به معنای یکسان بودن قطر خلل و فرج در کل نمونه خاک بوده و مقادیر بیش از یک بیان‌گر وجود تنوع بیشتر در اندازه‌های مختلف خلل و فرج در خاک است.

ضریب کشیدگی برابر صفر بیان‌گر توزیع لوگ نرمال اندازه خلل و فرج، ضریب کشیدگی منفی بیان‌گر زیادی خلل و فرج کوچک و ضریب کشیدگی مثبت بیان‌گر زیادی خلل و فرج بزرگ در نمونه خاک می‌باشد.

ضریب افراستگی برابر با یک نیز نشان‌گر توزیع لوگ نرمال اندازه خلل و فرج بوده و مقادیر بزرگتر از یک نشان‌دهنده بلندتر بودن منحنی در مرکز و دنباله‌های بلندتر

<sup>1</sup> Weighting functions

EI(IWC) نشان داده شده است. برای انجام محاسبات انتگرالی در راستای تعیین مقدار شاخص انرژی انتگرالی آب، از نرم‌افزار 3 Mathcad Prime استفاده شد. جهت تعیین رابطه آماری بین شاخص‌های شکل و موقعیت منحنی توزیع اندازه خلل و فرج با انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی، از همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی چندمتغیره در نرم‌افزار آماری JMP نسخه 9/02 استفاده گردید.

### نتایج و بحث

نتایج حاصل از اندازه‌گیری و تعیین بافت خاک و مقادیر پنج جزء شن در نمونه‌های مورد مطالعه به اختصار در جدول 1 نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که 40 درصد از نمونه خاک‌های مورد مطالعه دارای بافت لوم، 23 درصد بافت لوم سیلتی، 17 درصد بافت لوم رسی سیلتی، 13 درصد بافت لوم رسی و 7 درصد بافت لوم شنی بودند.

جرم مخصوص ظاهری و کربن آلی در نمونه خاک-های مطالعه شده به ترتیب دارای دامنه‌ای بین 1/29-1/56 و میانگین 1/45 گرم بر سانتی‌متر مکعب و 0/05-0/26 و میانگین 0/53 درصد بود. با استفاده از ضرایب منحنی رطوبتی خاک، شاخص‌های منحنی توزیع اندازه خلل و فرج نمونه‌های خاک محاسبه گردید. جدول 2 به اختصار مقادیر شاخص‌های مذکور در نمونه‌های خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

از آن صفر در نظر گرفته شد. مکش در نقاط شروع و پایان دامنه رطوبتی برای گنجایش انتگرالی آب نیز با تعیین این‌که چه موقع یکی از توابع وزن‌دهی در یکی از دو انتهای مرطوب و خشک صفر خواهد بود، در نظر گرفته شد. مقدار شاخص گنجایش انتگرالی آب نیز بر اساس رابطه شماره 13 محاسبه شد (گرانولت و همکاران، 2001).

$$IWC = \int_0^{\infty} (\prod_{i=1}^m \omega_i(h)) C(h) dh \quad (13)$$

در این رابطه،  $C(h)$ : قدر مطلق شیب منحنی رطوبتی خاک (بر سانتی‌متر)، و  $\omega_i(h)$ : 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 در مطالعات قبلی ارائه شده است (گرانولت و همکاران، 2001؛ عسگرزاده و همکاران، 2010).

در این مطالعه انرژی انتگرالی آب برای آب قابل استفاده گیاه و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (ظرفیت مزرعه در مکش 100 و 330 سانتی‌متر) و همچنین گنجایش انتگرالی آب به ترتیب به صورت  $EI(PAW_{100})$ ،  $EI(LLWR_{330})$ ،  $EI(LLWR_{100})$  و  $EI(PAW_{330})$

جدول 1- نتایج حاصل از اندازه‌گیری و تعیین بافت و مقادیر پنج جزء شن خاک

رس	اجزاء شن							
	شن	سیلت	خیلی درشت				خیلی درشت	
			خیلی ریز	ریز	متوسط	درشت		
			(% )					
34	66	54	18/7	22/5	14/4	14/5	10	حداکثر
11	17	23	5/1	2/6	2/8	2/9	0/8	حداقل
25	30	45	8/6	7/3	6/1	5/2	3/1	میانگین

جدول 2- مقادیر شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی‌های توزیع اندازه خلل و فرج خاک

خصوصیات	شاخص‌های موقعیت			شاخص‌های شکل		
	میانگین	مُد	میانگین	انحراف معیار		افراستگی
				کشیبگی	کشیبگی	
				- (µm)		
حداکثر	25/1	486/9	25/1	254/36	-0/21	1/16
حداقل	0/5	19/4	0/5	5/17	-0/41	1/14
میانگین	6/5	60/3	6/5	71/56	-0/36	1/15

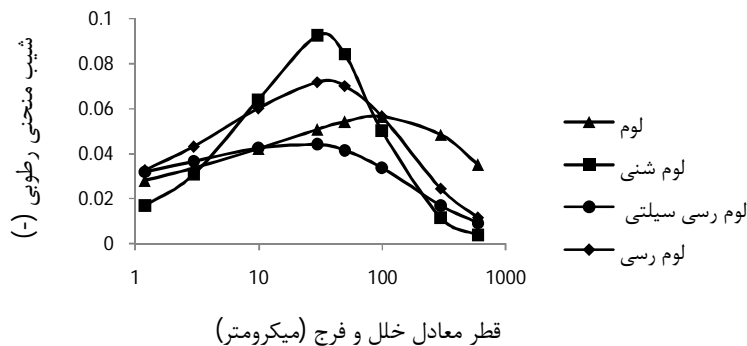
خاک بررسی شده دارند. تفاوت بین حداقل و حداکثر میانگین قطر خلل و فرج (24/62 میکرومتر) و همچنین

نتایج نشان داد که به طور میانگین خلل و فرج با قطر معادل 60 میکرومتر بیشترین فراوانی را در نمونه‌های

خاک با بافت‌های لوم، لوم شنی، لوم رسی سیلتی و لوم رسی به عنوان نمونه انجام و منحنی‌های آنها ترسیم گردید. شکل و موقعیت منحنی‌ها در شکل 1 و مقادیر شاخص‌های شکل و موقعیت منحنی توزیع اندازه خلل و فرج در نمونه خاک‌های اشاره شده در جدول 3 ارائه شده است.

دامنه تغییرات انحراف معیار محاسبه شده، حاکی از تنوع اندازه خلل و فرج در نمونه‌های خاک یا به بیان دیگر وجود خلل و فرج با اندازه‌های متفاوت در خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد.

جهت مقایسه شکل و موقعیت منحنی توزیع اندازه خلل و فرج در خاک‌های مختلف، محاسبات لازم برای 4



شکل 1- شکل و موقعیت منحنی‌های توزیع اندازه خلل و فرج در چهار نمونه خاک با بافت مختلف

جدول 3- مقدار شاخص‌های منحنی توزیع اندازه خلل و فرج در چهار نمونه خاک با بافت مختلف

بافت خاک	شاخص‌های موقعیت			شاخص‌های شکل		
	میان	مد	میانگین	انحراف معیار	کشیدگی	افراستگی
	(μm)			(μm)		
لوم	13/6	101/8	5/3	104/39	-0/39	1/15
لوم شنی	21/4	31/1	17/9	5/17	-0/21	1/16
لوم رسی سیلتی	1/7	22/3	0/5	254/36	-0/41	1/14
لوم رسی	11/6	34/0	6/9	21/18	-0/33	1/15

محدودیت و همچنین گنجایش انتگرالی آب در نمونه خاک‌های مورد بررسی در جدول 4 ارائه شده است. 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.

همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد در بین نمونه‌های مورد بررسی، بیشترین میانگین و کمترین انحراف معیار (تنوع کمتر اندازه خلل و فرج) در بافت لوم شنی و کمترین میانگین و بیشترین انحراف معیار (تنوع بیشتر اندازه خلل و فرج) در بافت لوم رسی سیلتی مشاهده گردید.

مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین انرژی انتگرالی آب در دامنه آب قابل استفاده، دامنه رطوبتی با حداقل

جدول 4- مقادیر انرژی انتگرالی آب در دامنه آب قابل استفاده، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت

و گنجایش انتگرالی آب (n=30)

EI(IWC)	EI(LLWR <sub>330</sub> )	EI(LLWR <sub>100</sub> )	EI(PAW <sub>330</sub> )	EI(PAW <sub>100</sub> )	
(J kg <sup>-1</sup> )					
224	270	236	306	236	حداکثر
74	47	45	156	99	حداقل
135	184	154	237	197	میانگین

پیوسته از مکش آب در خاک و محاسبه انرژی انتگرالی با توجه به اثر این محدودیت‌ها، معیار بهتری برای بیان فراهمی آب برای گیاه می‌باشد. نتایج محققین دیگر 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 (عسگرزاده و همکاران، 2011).

ارتباط آماری بین شاخص‌های منحنی توزیع اندازه خلل و فرج با مقادیر انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی در قالب ضریب همبستگی پیرسون در جدول 5 ارائه شده است.

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. 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. بر این اساس می‌توان بیان نمود که شاخص گنجایش انتگرالی آب با لحاظ نمودن محدودیت‌های جذب آب توسط گیاه به صورت تابعی

جدول 5- ضرائب همبستگی شاخص‌های منحنی توزیع اندازه خلل و فرج خاک با انرژی انتگرالی آب

در دامنه‌های مختلف رطوبتی (n=30)

خصوصیات	EI PAW <sub>100</sub>	EI PAW <sub>330</sub>	EI LLWR <sub>100</sub>	EI LLWR <sub>330</sub>	EI IWC
میانہ	-0/35 <sup>ns</sup>	-0/20 <sup>ns</sup>	-0/01 <sup>ns</sup>	0/11 <sup>ns</sup>	-0/35 <sup>ns</sup>
مُد	0/10 <sup>ns</sup>	-0/06 <sup>ns</sup>	0/20 <sup>ns</sup>	0/15 <sup>ns</sup>	-0/06 <sup>ns</sup>
میانگین	-0/71 <sup>***</sup>	-0/36 <sup>*</sup>	-0/19 <sup>ns</sup>	0/04 <sup>ns</sup>	-0/51 <sup>**</sup>
انحراف معیار	0/63 <sup>***</sup>	-0/03 <sup>ns</sup>	0/48 <sup>**</sup>	0/19 <sup>ns</sup>	0/70 <sup>***</sup>
کشیدگی	-0/96 <sup>***</sup>	-0/40 <sup>*</sup>	-0/50 <sup>**</sup>	-0/20 <sup>ns</sup>	-0/63 <sup>***</sup>
افراستگی	-0/36 <sup>*</sup>	0/18 <sup>ns</sup>	-0/37 <sup>*</sup>	-0/18 <sup>ns</sup>	-0/57 <sup>***</sup>

<sup>\*\*\*</sup>: معنی دار در سطح 0/1% ؛ <sup>\*\*</sup>: معنی دار در سطح 1% ؛ <sup>\*</sup>: معنی دار در سطح 5% ؛ <sup>ns</sup>: غیر معنی دار

حالت لوگ نرمال می‌باشد (رینولدز و همکاران، 2009)، کاهش معنی‌دار انرژی انتگرالی آب در PAW<sub>100</sub>، LLWR<sub>100</sub> و IWC را به دنبال داشت.

نتایج تجزیه رگرسیون چند متغیره بین انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی به عنوان متغیر وابسته و شاخص‌های توزیع اندازه خلل و فرج خاک به عنوان متغیرهای مستقل در جدول 6 ارائه شده است.

با توجه به این که هیچ‌یک از شاخص‌های منحنی توزیع اندازه خلل و فرج با مقدار انرژی انتگرالی آب در LLWR<sub>330</sub> رابطه معنی‌داری ندارند، لذا تخمین این شاخص با استفاده از شاخص‌های منحنی توزیع اندازه خلل و فرج میسر نشد. نتایج نشان داد که شاخص کشیدگی منحنی توزیع اندازه خلل و فرج خاک تنها عامل تعیین‌کننده مقدار انرژی انتگرالی آب در PAW<sub>100</sub>، LLWR<sub>100</sub> و PAW<sub>330</sub> می‌باشد. بیشترین تأثیر این شاخص بر انرژی انتگرالی آب در PAW<sub>100</sub> حاصل شد به گونه‌ای که 93 درصد تغییرات انرژی انتگرالی آب در این دامنه رطوبتی به وسیله شاخص کشیدگی قابل توجیه است. این شاخص به ترتیب 16 و 25

نتایج نشان داد دو شاخص میانہ و مُد قطر خلل و فرج خاک هیچ‌گونه ارتباط آماری معنی‌داری با مقادیر انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی ندارند و از سه شاخص موقعیت منحنی توزیع اندازه خلل و فرج خاک، تنها شاخص میانگین قطر خلل و فرج دارای ارتباط منفی و معنی‌دار با انرژی انتگرالی آب در PAW<sub>100</sub>، PAW<sub>330</sub> و IWC می‌باشد. در همین راستا شاخص کشیدگی نیز با تأثیر منفی و معنی‌دار بر انرژی انتگرالی آب در PAW<sub>100</sub>، PAW<sub>330</sub>، LLWR<sub>100</sub> و IWC نشان داد که افزایش قطر خلل و فرج خاک منجر به کاهش انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های رطوبتی ذکر شده و تسهیل جذب آب توسط گیاه می‌شود. نتایج بررسی رابطه انحراف معیار منحنی توزیع اندازه خلل و فرج یا تنوع اندازه منافذ با مقادیر انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی نشان داد که با کاهش تنوع قطر خلل و فرج در خاک، انرژی انتگرالی آب در PAW<sub>100</sub>، LLWR<sub>100</sub> و IWC کاهش می‌یابد. افزایش شاخص افراستگی منحنی توزیع اندازه خلل و فرج خاک در نمونه خاک‌های مورد مطالعه که به معنی بلندتر بودن منحنی در مرکز و دنباله‌های بلندتر آن در دو انتهای منحنی نسبت به

درصد تغییرات انرژی انتگرالی آب در PAW<sub>330</sub> و LLWR<sub>100</sub> را توجیه می‌کند.

جدول 6- تجزیه رگرسیونی بین انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی با شاخص‌های توزیع اندازه خلل و فرج خاک (n=30)

متغیر وابسته	متغیر مستقل	واحد	ضریب	ضریب تبیین	سطح معنی‌داری
EI PAW <sub>100</sub>	کشیدگی	-	-628/525	0/93	0/000
	عرض از مبدا	-	-26/855	-	-
EI PAW <sub>330</sub>	کشیدگی	-	-212/789	0/16	0/029
	عرض از مبدا	-	161/462	-	-
EI LLWR <sub>100</sub>	کشیدگی	-	-614/601	0/25	0/004
	عرض از مبدا	-	-64/553	-	-
EI IWC	انحراف‌معیار	-	0/486	0/49	0/000
	عرض از مبدا	-	100/070	-	-

می‌گردد جهت بررسی‌های جامع‌تر مطالعاتی مشابه بر روی خاک‌های دارای بافت‌های متنوع انجام گردد.

#### نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش قطر خلل و فرج و کاهش تنوع اندازه آنها و همچنین تمایل منحنی توزیع اندازه خلل و فرج خاک به بلندتر بودن در مرکز و دنباله‌های بلندتر آن در دو انتهای منحنی نسبت به حالت لوگ نرمال می‌تواند منجر به کاهش انرژی انتگرالی آب و افزایش سهولت جذب آب توسط گیاه در دامنه‌های مختلف رطوبتی گردد.

نتایج این مطالعه نشان داد که از بین شاخص‌های منحنی توزیع اندازه خلل و فرج خاک، تنها شاخص انحراف‌معیار حدود نیمی از تغییرات مقدار انرژی انتگرالی در IWC را کنترل می‌کند. بنابراین می‌توان این‌گونه بیان نمود که در تعیین و محاسبه انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی تنها دو شاخص شکل منحنی توزیع اندازه خلل و فرج خاک یعنی کشیدگی و انحراف‌معیار تعیین‌کننده هستند. این نتایج حاصل مطالعه بر روی خاک‌های دارای بافت متوسط رو به سبک می‌باشد. لذا پیشنهاد

#### فهرست منابع:

1. صاحب‌جمع ع. ا. 1381. مطالعات تفصیلی دقیق خاکشناسی و طبقه‌بندی اراضی ایستگاه تحقیقات کشاورزی طرق - استان خراسان رضوی. گزارش نهایی. شماره 1146. مؤسسه تحقیقات خاک و آب.
2. Asgarzadeh, H., M. R. Mosaddeghi, A. A. Mahboubi, A. Nosrati, and A. R. Dexter. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant and Soil* 335: 229–244.
3. Asgarzadeh, H., M. R. Mosaddeghi, A. A. Mahboubi, A. Nosrati, and A. R. Dexter. 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.
4. Castellini, M., M. Niedda, M. Pirastru, and D. Ventrella. 2014. Temporal changes of soil physical quality under two residue management systems. *Soil Use and Management* 30: 423–434.
5. Castellini, M., M. Pirastru, M. Niedda, and D. Ventrella. 2013. Comparing physical quality of tilled and no-tilled soils in an almond orchard in South Italy. *Italian Journal of Agronomy* 8:149–157.
6. Groenevelt, P. H., C. D. Grant, and S. Semetsa. 2001. A new procedure to determine soil water availability. *Australian Journal of Soil Research* 39: 577–598.



7. Hao, X., B. C. Ball, J. L. B. Culley, M. R. Carter, and G. W. Parkin. 2007. Soil density and porosity. p. 743–760. In Carter, M. R., and E. G. Gregorich (Ed.) Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Taylor and Francis.
8. Kroetsch, D., and C. Wang. 2007. Particle size distribution. p. 713–725. In Carter, M. R., and E. G. Gregorich (Ed.) Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Taylor and Francis.
9. Minasny, B., and A. B. McBratney. 2003. Integral energy as a measure of soil–water availability. *Plant and Soil* 249: 253–262.
10. Reynolds, W. D., and G. Clarke Topp. 2007. Soil water desorption and imbibition: tension and pressure techniques. p. 981–997. In Carter, M. R., and E. G. Gregorich (Ed.) Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Taylor and Francis.
11. Reynolds, W. D., C. F. Drury, C. S. Tan, C. A. Fox, and X. M. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152: 252–263.
12. Reynolds, W. D., C. F. Drury, X. M. Yang, and C. S. Tan. 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma* 146: 466–474.
13. Reynolds, W. D., C. F. Drury, X. M. Yang, C. A. Fox, C. S. Tan, and T. Q. Zhang. 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil and Tillage Research* 96: 316–330.
14. Shahab, H., H. Emami, G. H. Haghnia, and A. Karimi. 2013. Pore size distribution as a soil physical quality index for agricultural and pasture soils in north-eastern Iran. *Pedosphere* 23(3): 312–320.
15. Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892–898.

## Effects of Soil Pore Size Distribution on Integral Energy of Different Soil Water Ranges

**M. Zangiabadi,<sup>1</sup> M. Gorji, S. Ghalebi and M. R. Ramezani Moghaddam**

Researcher of Soil and Water Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran; E-mail: m.zangiabadi@areeo.ac.ir

Professor of Soil Science Engineering Department, University of Tehran, Karaj, Iran;  
E-mail: mgorji@ut.ac.ir

Instructor of Irrigation and Soil Physics Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran; E-mail: s.ghalebi@areeo.ac.ir

Assistant Professor of Crop and Horticultural Science Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran;  
E-mail: mr.ramezani@areeo.ac.ir

Received: November, 2016 and Accepted: May, 2017

### Abstract

Soil pore size distribution (SPSD) is one of the most important soil physical quality indices which reflect soil inherent characteristics and its management system. The soil water integral energy (EI) is an index that represents the amount of energy needed to uptake a mass unit of soil water by plants. In this research, we studied the effects of SPSD curves location and shape parameters on EI index of different soil water ranges in medium to coarse-textured soils of Torogh Agricultural and Natural Resources Research and Education Station in Khorasan-Razavi province. Thirty points with different soil textures and organic carbon contents were selected. After conducting required laboratory and field measurements using standard methods, the soil moisture release curve (SMRC) parameters, the SPSD curve parameters, plant available water (PAW) and least limiting water range (LLWR) which were measured in matric heads of 100 and 330 cm for the field capacity, integral water capacity (IWC) and EI of the mentioned soil water ranges were calculated and the relationships between the SPSD curve location and shape parameters and EI values (for PAW<sub>100</sub>, PAW<sub>330</sub>, LLWR<sub>100</sub>, LLWR<sub>330</sub> and IWC) were statistically analyzed. The results showed that, in medium to coarse-textured soils, increasing the equivalent pore diameter and reducing the diversity of soil pore sizes along with the tendency of the SPSD curves to be more peaked in the center and more tailed at the two ends compared with lognormal distribution could lead to lower EI and easier uptake of water by plants in different soil water ranges.

**Keywords:** Integral water capacity, Plant water uptake, Soil moisture release curve, Soil texture

---

<sup>1</sup> Corresponding author: Soil and Water Research Dept., Khorasan-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Mashhad, Iran.