تعیین میزان آب قابل استفاده خاک برای گیاه

آب، اکسیژن، دما و مقاومت مکانیکی، ویژگی‌های فیزیکی خاک هستند که به طور مستقیم رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. علاوه بر تاثیر مستقیم، آب سایر عوامل فیزیکی خاک مرتبط با رشد گیاه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. عوامل شیمیایی و بیولوژیکی مانند انتقال مواد غذایی و فعالیت جانداران خاک نیز تحت تاثیر میزان آب خاک قرار می‌گیرد؛ از این رو از دیرباز اندازه‌گیری مقدار آب خاک و تعیین مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه مورد توجه پژوهش‌گران بخش کشاورزی بوده است.

اولین مفهومی که در رابطه با میزان آب قابل استفاده خاک، در علوم کشاورزی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت، آب قابل دسترس گیاه (PAW) می‌باشد که بیان می‌دارد تمامی آب خاک در محدوده گنجایش زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) قابل دسترس گیاهان می‌باشد (ویهمایر و هندریکسون، ۱۹۴۹؛ کرخام، ۲۰۰۵):

$$PAW = FC - PWP$$

PAW تنها بر اساس انرژی آب خاک است و کمبود میزان اکسیژن (تهویه) خاک، توانایی ریشه گیاه برای فروروی در خاک (مقاومت مکانیکی خاک)، کاهش هدایت هیدرولیکی غیراشباع با خشک‌شدن خاک و قدرت تبخیرکنندگی جوّ که بر میزان آب قابل استفاده خاک برای گیاه مؤثر است را در نظر نمی-گیرد. برای رفع این کاستی‌ها امروزه مفاهیم دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR) و گنجایش آب انتگرالی (IWC) مورد استفاده قرار می‌گیرد که در ادامه چگونگی تعیین آنها شرح داده می‌شود.

دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)

LLWR دامنه‌ای از رطوبت خاک است که محدودیت برای رشد گیاه در ارتباط با پتانسیل ماتریک، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک، حداقل باشد. برای محاسبه LLWR، لازم است حد بالایی (UL) و حد پایینی (LL) آن مشخص شود. داسیلوا و همکاران (۱۹۹۴) حد بالایی LLWR را میزان رطوبت در گنجایش زراعی ۰/۰۱ MPa (۰/۰۳۳ MPa) یا در تخلخل تهویه‌ای (AFP) برابر ۱۰ درصد، هر کدام که کم‌تر باشد، و حد پایینی آن را میزان رطوبت در نقطه پژمردگی دائم یا در مقاومت مکانیکی خاک (SMR) برابر ۲ MPa، هر کدام که بیش‌تر باشد، تعیین کرد.

در صورت پذیرش این حدود بحرانی، مراحل محاسبه LLWR به شکل زیر است:

۱- تعیین رطوبت حجمی نمونه خاک در مکش ماتریک ۰/۰۱ MPa (۰/۰۳۳ MPa) با استفاده از یک مدل منحنی مشخصه رطوبتی خاک، اندازه‌گیری مستقیم یا توابع انتقالی خاک

۲- تعیین رطوبت حجمی نمونه خاک در تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد با استفاده از منحنی مشخصه رطوبتی خاک یا به کمک رابطه بین چگالی ظاهری (D_b) و چگالی حقیقی (D_p):

$$\theta_{AFP} = (1 - D_b/D_p) - 0.1 \qquad (۱)$$

۳- انتخاب رطوبت حجمی کم‌تر نمونه خاک در مکش ماتریک ۰/۰۱ MPa (۰/۰۳۳ MPa) یا در تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد به عنوان حد بالایی LLWR

۴- تعیین رطوبت حجمی نمونه خاک در مکش ماتریک ۱/۵ MPa با استفاده از یک مدل منحنی مشخصه رطوبتی خاک، اندازه‌گیری مستقیم یا توابع انتقالی خاک

۵- تعیین رطوبت حجمی نمونه خاک در مقاومت مکانیکی برابر ۲ MPa با استفاده از منحنی مشخصه مقاومت مکانیکی خاک یا توابع انتقالی خاک

۶- انتخاب رطوبت حجمی بیش‌تر نمونه خاک در مکش ماتریک ۱/۵ MPa یا در مقاومت مکانیکی ۲ MPa به عنوان حد پایینی LLWR

۷- محاسبه مقدار LLWR با استفاده از رابطه زیر:

$$LLWR = UL - LL \qquad (۲)$$

باید توجه شود که مقادیر منفی برای LLWR بی‌معنی بوده و در صورت بدست‌آمدن مقدار منفی آن را برابر صفر می‌گیریم.

در روش ذکرشده، LLWR با فرض ثابت‌بودن چگالی ظاهری برای یک خاک مشخص، و با استفاده از هر نوع مدل منحنی مشخصه رطوبتی و مقاومت مکانیکی خاک قابل محاسبه می‌باشد. هنگام بررسی تاثیر سیستم‌های مختلف مدیریتی بر کیفیت فیزیکی یا تغییرات ساختمانی خاک، چگالی ظاهری خاک بایستی وارد مدل‌های منحنی مشخصه رطوبتی و مقاومت مکانیکی خاک شود تا تاثیر چگالی ظاهری بر نگهداشت آب در خاک و مقاومت مکانیکی خاک در نظر گرفته شود. برای این منظور، داسیلوا و همکاران (۱۹۹۴) از مدل‌های غیرخطی زیر استفاده کردند:

$$\theta = \exp(a + b.D_b).h^c \qquad (۳)$$

$$SMR = d.\theta^e.D_b^f \qquad (۴)$$

در این روابط h مکش ماتریک خاک بر حسب MPa، θ مقدار رطوبت خاک بر حسب ($cm^3\ cm^{-3}$)، D_b بر حسب $g\ cm^{-3}$، SMR بر حسب MPa و a، b، c، d، e و f ضرایب تجربی مدل‌ها می‌باشند. روش محاسبه LLWR با توجه به تغییرات چگالی ظاهری به صورت زیر است:

۱- برداشت نمونه‌های خاک دست‌نخورده از منطقه مورد ارزیابی با سیلندرهای نمونه‌برداری

۲- اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی، مقدار رطوبت و چگالی ظاهری نمونه‌ها پس از به تعادل رساندن نمونه‌ها در مکش‌های ماتریک مختلف (نتیجه کار به‌دست آمدن مجموعه‌ای از داده‌های مقاومت مکانیکی، مقدار رطوبت، چگالی ظاهری و مکش ماتریک برای نمونه‌های دست‌نخورده می‌باشد)

۳- برازش روابط ۳ و ۴ بر داده‌ها و به دست آوردن ضرایب تجربی a، b، c، d، e و f

۴- تعیین تغییرات گنجایش زراعی (θ_{FC}) و نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) با افزایش چگالی ظاهری با استفاده از روابط زیر:

$$\theta_{FC} = \exp(a + bD_b)\ 0.01^c \qquad (۵)$$

$$\theta_{PWP} = \exp(a + bD_b)\ 1.5^c \qquad (۶)$$

۵- تعیین تغییرات رطوبت خاک با افزایش چگالی ظاهری، در شرایطی‌که مقاومت مکانیکی خاک برابر ۲ MPa (θ_{SMR}) باشد:

$$\theta_{SMR} = (2/(d.D_b^f))^{(1/e)} \qquad (۷)$$

۶- تعیین تغییرات رطوبت خاک با افزایش چگالی ظاهری، در شرایطی‌که تخلخل تهویه‌ای برابر ۱۰ درصد (θ_{AFP}) باشد:

$$\theta_{AFP} = (1 - D_b/D_p) - 0.1 \qquad (۸)$$

۷- تعیین حدود بالایی و پایینی و محاسبه LLWR با استفاده از معادله ۲ در چگالی‌های ظاهری مورد نظر

با استفاده از این روش می‌توان چگالی ظاهری بحرانی (D_{bc}) را نیز بدست آورد. D_{bc} چگالی ظاهری است که در آن LLWR برابر صفر می‌شود.

گنجایش آب انتگرالی (IWC)

برای در نظر گرفتن واقعیت تدریجی‌بودن تغییرات رشد گیاه و جذب آب با تغییر مکش ماتریک، مقاومت مکانیکی، تهویه و کاهش هدایت هیدرولیکی خاک، گرونولت و همکاران (۲۰۰۱) روش نوینی برای محاسبه آب قابل استفاده خاک برای گیاه ارائه دادند. برای این منظور توابع وزنی با توجه به دامنه تغییر

محدودیت‌ها، به عنوان ضریب، در مقدار آب لایه خاک ضرب شده و سپس انتگرال‌گیری برای تعیین کل آب قابل استفاده انجام می‌گیرد. معادله کلی گرونولت و همکاران (۲۰۰۱) به صورت زیر است:

$$\mathrm{IWC} = \int_0^{\infty} \left(\prod_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \omega_{\mathrm{i}}(h) \right) C(h) \mathrm{d}h \qquad (۹)$$

که در اینجا $C(h) = -\mathrm{d}\theta/\mathrm{d}h$، گنجایش ویژه رطوبتی برحسب cm^{-1} برابر شیب منحنی مشخصه رطوبتی خاک بوده و ω_{i} توابع وزنی (۰ تا ۱) برای انواع محدودیت‌های فیزیکی از i تا n، h مکش ماتریک بر حسب cm و Π نشان‌دهنده این است که توابع وزنی مورد نظر ضرب‌پذیرند. روشی را که گرونولت و همکاران (۲۰۰۱) برای محاسبه IWC به کارگرفتند به ترتیب زیر است:

۱- برازش مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده منحنی مشخصه رطوبتی خاک و تعیین پارامترهای مربوط به آن (می‌توان از مدل های دیگر نیز استفاده کرد)

مدل منحنی مشخصه رطوبتی خاک ون‌گنوختن (۱۹۸۰) به صورت زیر است:

$$\theta = \theta_{\mathrm{r}} + \left(\theta_{\mathrm{s}} - \theta_{\mathrm{r}}\right)\left[1 + \left(\alpha h\right)^{n}\right]^{\left[\frac{1}{n}-1\right]} \qquad (۱۰)$$

که در اینجا $\theta(h)$ مقدار رطوبت حجمی خاک به عنوان تابعی از مکش ماتریک (h) بوده و α، n، θ_{r} و θ_{s} پارامترهای برازش مدل می‌باشند.

۲- مشتق‌گیری از مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) (معادله ۱۰) برای ایجاد تابع $C(h)$:

$$C(h) = \left(\theta_{\mathrm{s}} - \theta_{\mathrm{r}}\right)(n-1)h^{-1}\left(\alpha h\right)^{n}\left[1 + \left(\alpha h\right)^{n}\right]^{\left[\frac{1}{n}-2\right]} \qquad (۱۱)$$

۳- ضرب‌کردن $C(h)$ در توابع وزنی، $\omega_{\mathrm{i}}(h)$، تا عبارت گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر، $E_{\mathrm{i}}(h)$، به صورت زیر ایجاد شود:

$$E_{\mathrm{i}}(h) = \omega_{\mathrm{i}}(h)\, C(h) \qquad (۱۲)$$

ضرایب وزنی $\omega_{\mathrm{i}}(h)$، که تمام محدودیت‌های فیزیکی برای رشد گیاه را به عنوان تابعی از مکش ماتریک در نظر می‌گیرند، در دامنه صفر تا ۱ قرار می‌گیرند.

۴- وارد کردن تابع وزنی هدایت هیدرولیکی زیاد، $\omega_{\mathrm{K}}(h)$، به عنوان اولین عامل محدودکننده جذب آب توسط گیاه در انتهای مرطوب محدوده آب قابل استفاده، برای ایجاد گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر هدایت هیدرولیکی زیاد، $E_{\mathrm{K}}(h)$، به صورت زیر:

$$E_{\mathrm{K}}(h) = \omega_{\mathrm{K}}(h)\, C(h) \qquad (۱۳)$$

که $\omega_{\mathrm{K}}(h)$ و هدایت هیدرولیکی نسبی، $K_{\mathrm{r}}(h)$، از توابع زیر به دست می‌آیند:

$$\omega_{\mathrm{K}}(h) = \left[\frac{K_{\mathrm{r}}(330)}{K_{\mathrm{r}}(h)}\right]^{0.08} \qquad (۱۴)$$

$$K_{\mathrm{r}}(h) = \frac{\left[1-(\alpha h)^{n-1}\left[1+(\alpha h)^{n}\right]^{\left[\frac{1}{n}-1\right]}\right]^{2}}{\left[1+(\alpha h)^{n}\right]^{\left[\frac{n-1}{2n}\right]}} \qquad (۱۵)$$

۵- وارد کردن تابع وزنی تخلخل تهویه‌ای، $\omega_{\mathrm{a}}(h)$، به عنوان دومین عامل محدودکننده جذب آب توسط گیاه در انتهای مرطوب محدوده آب قابل استفاده، برای ایجاد گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر تخلخل تهویه‌ای، $E_{\mathrm{a}}(h)$، به صورت زیر:

$$E_{\mathrm{a}}(h) = \omega_{\mathrm{a}}(h)\ C(h) \qquad (۱۶)$$

که $\omega_{\mathrm{a}}(h)$ از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\omega_{\mathrm{a}}(h) = A\ \log\left[\frac{h}{h_0}\right] \qquad (۱۷)$$

$$A = \frac{1}{\log\left[\frac{h_{\mathrm{f}}}{h_0}\right]} \qquad (۱۸)$$

که در این روابط h_0 و h_{f} به ترتیب مکش ماتریک در تخلخل تهویه‌ای ۱۰ و ۱۵ درصد می‌باشند.

در هر مکش ماتریکی (یا دامنه مکش ماتریکی) که دو محدودیت ذکرشده هم‌زمان وجود داشته باشند، گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر، حاصل‌ضرب توابع وزنی مربوط به هدایت هیدرولیکی زیاد و تخلخل تهویه‌ای در گنجایش ویژه رطوبتی می‌باشد:

$$E_{\mathrm{Ka}}(h) = \omega_{\mathrm{K}}(h)\ \omega_{\mathrm{a}}(h)\ C(h) \qquad (۱۹)$$

۶- وارد کردن تابع وزنی مقاومت مکانیکی زیاد، $\omega_{\mathrm{R}}(h)$، به عنوان اولین عامل محدودکننده جذب آب توسط گیاه در انتهای خشک محدوده آب قابل استفاده، برای ایجاد گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر مقاومت مکانیکی، $E_{\mathrm{R}}(h)$، به صورت زیر:

$$E_{\mathrm{R}}(h) = \omega_{\mathrm{R}}(h)\ C(h) \qquad (۲۰)$$

که $\omega_{\mathrm{R}}(h)$ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\omega_{\mathrm{R}}(h) = 2.5 - (ah^{b}) \qquad (۲۱)$$

در این رابطه a و b ضرایب تجربی مدل توانی زیر برای بیان رابطه مقاومت مکانیکی و مکش ماتریک می‌باشند:

$$\mathrm{SMR}(h) = a h^{b} \qquad (۲۲)$$

۷- وارد کردن تابع وزنی هدایت هیدرولیکی کم، $\omega_{\mathrm{Kdry}}(h)$، به عنوان دومین عامل محدودکننده جذب آب توسط گیاه در انتهای خشک محدوده آب قابل استفاده، برای ایجاد گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر هدایت هیدرولیکی کم، $E_{\mathrm{Kdry}}(h)$، به صورت زیر:

$$E_{\mathrm{Kdry}}(h) = \omega_{\mathrm{Kdry}}(h)\, C(h) \qquad (۲۳)$$

$\omega_{\mathrm{Kdry}}(h)$ از روابط زیر بدست می‌آید:

$$\omega_{\mathrm{Kdry}}(h) = \left[\frac{12000}{h}\right]^{-d} \qquad (۲۴)$$

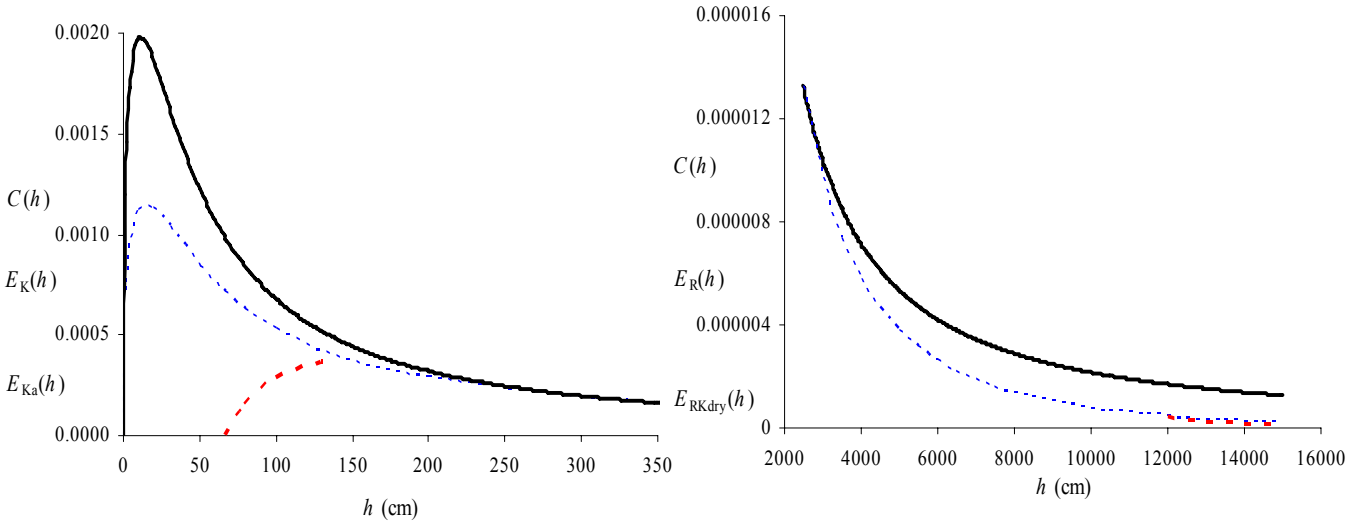
که d ضریب تجربی مدل توانی زیر برای نشان‌دادن رابطه هدایت هیدرولیکی نسبی و مکش ماتریک از مکش ماتریک ۱۲۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ cm می‌باشد:

$$K_{\mathrm{r}}(h) = c h^{d} \qquad (۲۵)$$

در هر مکش ماتریکی (یا دامنه مکش ماتریکی) که دو محدودیت ذکرشده هم‌زمان وجود داشته باشد، گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر، حاصل‌ضرب توابع وزنی مربوط به مقاومت مکانیکی زیاد و هدایت هیدرولیکی کم می‌باشد:

$$E_{\mathrm{RKdry}}(h) = \omega_{\mathrm{R}}(h)\, \omega_{\mathrm{Kdry}}(h)\, C(h) \qquad (۲۶)$$

در دو شکل زیر گنجایش ویژه رطوبتی و گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر ناشی از وارد نمودن اثر چهار تابع وزنی (محدودیت) برای دامنه مرطوب و دامنه خشک آب قابل استفاده برای یک خاک برای نمونه نشان داده شده است (عسگرزاده و همکاران، ۲۰۱۰):



پس از واردکردن تمام توابع وزنی، IWC از رابطه ۹ قابل محاسبه است. چگونگی محاسبه IWC برای خاک با منحنی‌های گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر ارائه‌شده در شکل‌های مذکور به صورت زیر است (عسگرزاده و همکاران، ۲۰۱۰):

$$IWC = \int_{67}^{140} E_{Ka}(h)dh + \int_{140}^{330} E_K(h)dh + \int_{330}^{2480} C(h)dh + \int_{2480}^{12000} E_R(h)dh + \int_{12000}^{15000} E_{RKdry}(h)dh =$$

$$0.01984 + 0.04933 + 0.0905 + 0.02821 + 0.00065 = 0.1885 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

برای آشنایی بیش‌تر با چگونگی محاسبه PAW، LLWR و IWC به نمونه‌های موجود در فایل‌های Excel توجه فرمایید. سپس با استفاده از داده‌هایی که در اختیار شما قرار می‌گیرد، PAW ، LLWR و IWC را برای خاک(ها) محاسبه کرده، در مورد دلیل تفاوت آنها بحث نموده و گزارش تهیه کنید.

در صورت نیاز، برای شرح بیش‌تر مفاهیم و روش‌ها به منابع علمی ذکرشده مراجعه نمایید.

منابع علمی مورد استفاده:

Asgarzadeh H, Mosaddeghi MR, Mahboubi AA, Nosrati A, Dexter AR (2010) Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. Plant Soil. 335(1-2):229–244

da Silva AP, Kay BD, Perfect E (1994) Characterization of the least limiting water range of soils. Soil Sci Soc Am J 58:1775–1781

da Silva AP, Kay BD (1997) Estimating least limiting water range of soils from properties and management. Soil Sci Soc Am J 61: 877–883

Groenevelt PH, Grant CD, Semetsa S (2001) A new procedure to determine soil water availability. Aust J Soil Res 39:577–598

Kirkham MB (2005) Principles of soil and plant water relations. Elsevier Academic Press. pp. 500.

Leao TP, da Silva AP (2004) A simplified Excel algorithm for estimating the least limiting water range of soils. Sci Agric 61:649–654

Leao TP, da Silva AP, Perfect E, Tormena CA (2005) An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. Agron J 97:1210–1215

Letey J (1985) Relationship between soil physical properties and crop production. Adv Soil Sci 1:277–294

van Genuchten MTh (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci Soc Am J 44:892–898

Veihmeyer FJ, Hendrickson AH (1949) Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. Soil Sci 68:75–94

Measured data for PAW and LLWR Calculations			
D_b (g cm^{-3})	θ (cm^3 cm^{-3})	SMR (MPa)	h (MPa)
1.23	0.450	0.340	0.002
1.53	0.391	1.010	0.005
1.61	0.380	1.345	0.008
1.43	0.305	1.189	0.010
1.34	0.298	1.255	0.033
1.38	0.283	1.856	0.100
1.49	0.244	2.467	0.500

Measured data for PAW, LLWR and IWC Calculations	
h (cm)	θ_v
0	0.6054
2	0.5716
5	0.5576
10	0.5468
20	0.5263
50	0.4805
70	0.4668
100	0.426
300	0.3783
1000	0.3507
2000	0.3237
5000	0.2832
10000	0.2524
15000	0.2266

h (cm)	SMR (MPa)
300	0.983
2000	1.4757
5000	2.145
10000	2.4186
15000	3.4218