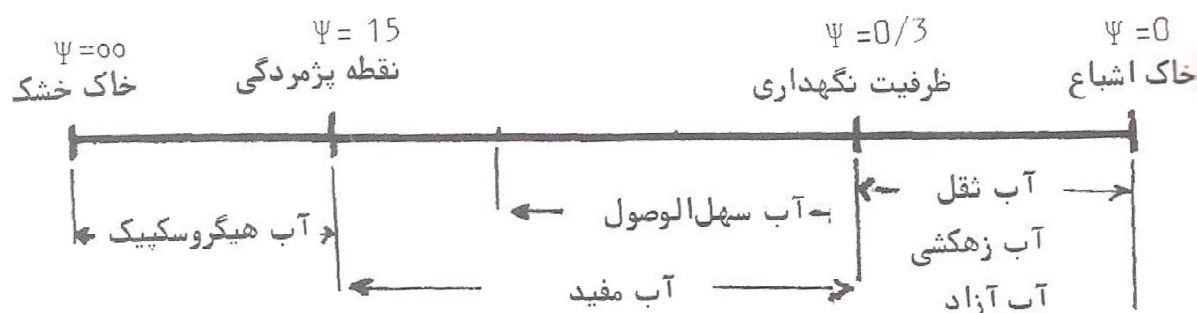


موجودیت آب در خاک

موجودیت آب در خاک مربوط به توانایی خاک در نگهداری آب می باشد. اگر یک خاک را اشباع و سپس آن را بحال خود قرار دهیم، بخشی از آب موجود در بین ذرات خاک در اثر نیروی ثقل از آن خارج می شود که به آن آب ثقلی گفته می شود. بنابراین آب ثقلی آبی است که به ذرات خاک نچسبیده و می تواند آزادانه در لابلای ذرات حرکت نماید. زمان خروج آب ثقلی از خاک در مورد خاکهای شنی ۲۴ ساعت یا کمتر و در مورد خاکهای رسی ۴۸ ساعت و یا بیشتر می باشد. پس از آنکه آب ثقلی از خاک خارج شد مقدار دیگری از آب در خاک وجود دارد که فقط با نیروی بزرگتر از ثقل مثل نیروی جذب ریشه ها می تواند از خاک خارج شود. به این بخش از آب موجود در خاک آب کاپیلاری یا آب موئینگی گفته می شود. در واقع آب کاپیلاری آبی است که می تواند مورد استفاده گیاه قرار گیرد. پس از خارج شدن آب های ثقلی و موئینگی هنوز هم مقدار دیگری آب در خاک باقی می ماند که با نیروی زیادی به اطراف ذرات خاک چسبیده و معمولاً با نیروهای موجود در طبیعت از خاک خارج نمی شود. به این آب اصطلاحاً آب غشائی یا هیگروسکپی گفته می شود. آب هیگروسکپی را ممکن است با خشک کردن خاک در گرمخانه ها خارج ساخت ولی توسط ریشه قابل جذب نمی باشد. مقدار رطوبتی که پس از خارج شدن آب ثقلی در خاک باقی می ماند ظرفیت زراعی و یا ظرفیت نگهداری آب در خاک نام دارد که یکی از نمایه های مهم در طراحی سیستم های آبیاری بشمار می آید.



موجودیت آب در خاک

پتانسیل آب در خاک

بهتر است مفهوم پتانسیل آب در خاک را با چند مثال ساده توصیف کنیم. اکثراً مشاهده می شود که در خاکهای مختلف حتی اگر درصد رطوبت آن ها یکسان باشد گیاهان رشد یکسانی ندارند. یعنی یکسان بودن رطوبت خاک دلیل بر یکسان بودن رشد نمی تواند باشد. این امر می رساند که در خاکهای مختلف رطوبت بطور یکسان در اختیار گیاه قرار نمی گیرد. مثال دیگر اینکه اگر دو نوع خاک با رطوبت اولیه یکسان را به مدت مساوی در گرمخانه ای قرار دهیم و سپس رطوبت آن ها را اندازه گیری کنیم ملاحظه می شود که مقدار رطوبت باقی مانده در این دو مساوی نخواهد بود. به عبارت دیگر خاک ها در مقابل نیروهایی که باعث خارج کردن رطوبت می شوند یکسان عمل نمی کنند. حال مورد دیگری را مثال بزنیم. چنانچه دو نوع خاک

را که درصد رطوبت آن ها مساوی ولی از نظر بافت مختلف باشند در مجاورت هم قرار دهیم مشاهده خواهد شد که رطوبت از خاکی که بافت درشت دارد به سمت خاکی که بافت آن ریز می باشد حرکت خواهد نمود. این پدیده ها از روی مقدار رطوبت قابل توصیف نیستند بلکه برای توجیه آن ها باید از معیار دیگری استفاده شود که همان پتانسیل آب در خاک است

بر حسب تعریف پتانسیل ، توانایی انجام کار است و لذا پتانسیل آب مقدار کاری است که باید روی یک گرم آب موجود در خاک انجام گیرد تا آن را از وضعیت خود خارج و در وضعیتی مشابه با وضعیت یک گرم آب موجود در سطح آب آزاد قرار دهد. به عبارت ساده تر پتانسیل، نیروهایی است که آب در خاک با آن درگیر بوده و برای اخذ آب از خاک باید بر آن نیروها غلبه کنیم.

از نظر ریاضی هنگامی که صحبت از پتانسیل سیستم آب و خاک می شود منظور مقدار انرژی است که واحد وزن آب در داخل یک خاک می تواند دارا باشد. از طرفی انرژی یا کار ، حاصلضرب نیرو در فاصله است. یعنی:

$$\text{فاصله} \times \text{نیرو} = \text{انرژی} \quad (3-4)$$

معادله ابعادی نیرو Kg.m.sec^{-2} و معادله ابعادی فاصله m است لذا خواهیم داشت:

$$\text{انرژی} = \text{Kg.m.sec}^{-2} \cdot m$$

$$\text{انرژی} = \text{Kg.m}^2 \cdot \text{sec}^{-2}$$

چنانچه این مقدار انرژی را برای یک واحد وزن آب (Kg.m.sec^{-2}) در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$\text{انرژی در واحد وزن} = \frac{\text{Kg.m}^2 \cdot \text{sec}^{-2}}{\text{Kg.m.sec}^{-2}} = m$$

لذا مشاهده می شود که برای توصیف پتانسیل می توان از معادله ابعادی طول (m) استفاده نمود. به همین دلیل اکثراً گفته می شود که مثلاً پتانسیل فشاری خاک در یک نقطه ۵۰ سانتی متر آب و یا فرضاً پتانسیل ماتریک خاک در یک نقطه ۴۲۰ - سانتی متر آب است.

در سیستم آب و خاک علاوه بر طول (مانند متر یا سانتی متر آب) برای توصیف پتانسیل آب از واحد های معادل دیگری مانند بار، کیلوپاسکال و یا پوند بر اینچ مربع نیز استفاده می شود که برخی روابط بین آن ها به شرح زیر است:

$$100 \text{ کیلو پاسکال (kPa)} = 1 \text{ بار (bar)}$$

$$0.99 \text{ اتمسفر (atm)} = 1 \text{ بار (bar)}$$

$$10.2 \text{ متر ارتفاع (head)} = 1 \text{ بار (bar)}$$

۹/۸ کیلو پاسکال = ۱ متر ارتفاع (head) آب

نیروهای آب در خاک

آب با نیروهای مختلفی در خاک نگهداری می شود که برای خارج کردن و یا جابجا کردن آن می بایست بر این نیروها فائق آییم. این نیروها به دلیل موقعیت ثقلی آب، چسبندگی آب به خاک و خصوصیات شیمیایی آب است که هر کدام پتانسیل مخصوص به خود را اعمال کرده و پتانسیل آب در خاک، که معمولاً آن را با حروف یونانی Ψ (سای) یا ϕ (فی) نشان می دهند، در واقع مجموع این نیروها یا پتانسیل هاست.

پتانسیل ثقلی: پتانسیل ثقلی از نیروی جاذبه زمین (g) نشأت می گیرد. همانطور که هر نقطه مادی به سمت مرکز زمین کشیده می شود، هر یک واحد وزن آب نیز دارای پتانسیل ثقل است. اگر m گرم آب را در نقطه A در خاک در نظر بگیریم و بخواهیم آن را به نقطه B که به اندازه h_1 در بالای آن قرار دارد برسانیم، باید کاری معادل $m \cdot h_1$ برخلاف نیروی ثقل انجام دهیم. چنانچه مقدار این کار را با علامت Ψ_g نشان دهیم خواهیم داشت:

$$\Psi_g = -m \cdot h_1$$

علامت- در جلو پتانسیل ثقل به این دلیل است که کار برخلاف نیروی ثقل صورت گرفته است. یعنی جهت حرکت و نیروی کشش ثقلی عکس یکدیگر بوده اند. حال اگر همین نقطه به اندازه h_2 در زیر نقطه A واقع بود نیاز به انجام کار اضافی نبوده بلکه خود آب این کار را انجام می دهد که مقدار آن برابر است با:

$$\Psi_g = +m \cdot h_2$$

در اینجا نیز علامت + به دلیل انجام شدن کار در جهت نیروی ثقل است. حال اگر مقدار کار را برای یک واحد جرم آب ($m=1$) در نظر بگیریم، پتانسیل ثقلی در حالت اول برابر $-h_1$ و در حالت دوم برابر $+h_2$ خواهد بود. در اینجا نیز مشاهده می شود که پتانسیل ثقلی برحسب واحد طول بدست آمد. بطور کلی پتانسیل ثقلی آب ثابت نبوده و مقدار آن بستگی به فاصله عمودی نقطه مورد نظر نسبت به سطح مقایسه دارد. از نظر علامت اگر این نقطه بالای سطح مقایسه باشد پتانسیل را مثبت (+) و اگر در پایین سطح مقایسه باشد، آن را منفی (-) در نظر می گیریم و برای نقاطی که روی سطح مقایسه باشند پتانسیل ثقلی صفر در نظر گرفته می شود.

مثال: دو نقطه را که یکی ۱۵ سانتی متر بالای ریشه و دیگری ۱۰ سانتی متر زیر ریشه قرار دارد در نظر بگیرید. مقادیر پتانسیل ثقلی آب در این نقاط با توجه به نقطه ای که ریشه قرار دارد چقدر است و اختلاف پتانسیل ثقلی بین این دو نقطه چند سانتی متر می باشد؟

حل

$$\Psi_{gA} = +15 \text{ cm}$$

$$\Psi_{gB} = -10 \text{ cm}$$

$$\Delta\Psi = \Psi_{gA} - \Psi_{gB}$$

$$\Delta\Psi = (+15) - (-10) = +25 \text{ Cm}$$

توجه شود که سطح مقایسه به صورت اختیاری انتخاب می شود و گر چه انتخاب محل آن مقادیر پتانسیل ثقلی را تغییر می دهد، اما اختلاف پتانسیل ثقلی بین نقاط، مستقل از محل سطح مقایسه بوده و همواره ثابت است.

مثال

دو نقطه A و B در مثال ۵-۷ را با تغییری که در محل ریشه داده شده است در نظر گرفته و مقادیر پتانسیل ثقلی و اختلاف آن ها را مقایسه کنید. فرض کنید در وضعیت جدید نقطه A به اندازه ۵ سانتی متر بالای ریشه و نقطه B به اندازه ۲۰ سانتی متر زیر ریشه قرار گرفته است. سطح مقایسه، محل ریشه ها در نظر گرفته شود.

$$\Psi_{gA} = +5 \text{ cm}$$

$$\Psi_{gB} = -20 \text{ cm}$$

$$\Delta\Psi = \Psi_{gA} - \Psi_{gB}$$

$$\Delta\Psi = (+5) - (-20) = +25 \text{ Cm}$$

بطور خلاصه آب در هر موقعیتی که در داخل خاک قرار گیرد (چه در خاک اشباع و چه در خاک غیر اشباع) دارای مقداری پتانسیل ثقلی است که مقدار آن از نظر عددی برابر است با فاصله آن نقطه تا سطح مقایسه ای که خود انتخاب می کنیم و از نظر علامت، بسته به محل انتخاب سطح مقایسه، مقداری مثبت، منفی و یا صفر است.

پتانسیل ماتریک و فشاری:

در خاک های غیر اشباع مولکول های آب با یک نیروی جاذبه به جسم یا ماتریکس (matrix) خاک می چسبند و لذا جدا کردن آن ها از خاک مستلزم کاری است که باید در جهت عکس به آن وارد شود. این نیرو را پتانسیل ماتریک (matric potential) گویند. پتانسیل ماتریک Ψ_m در خاک های اشباع که در آن آب می تواند آزادانه حرکت کند صفر است. اما هرچه خاک خشک شود، مقدار پتانسیل ماتریک کمتر می گردد (بیشتر منفی می شود). زیرا آب باقی مانده در خاک خشک با نیروی بیشتری به ذرات خاک می چسبد. بدین ترتیب پتانسیل ماتریک همیشه منفی یا حداکثر صفر است. چنانچه خاک اشباع باشد، مولکول های آب نه تنها به ذرات خاک نچسبیده اند، بلکه ممکن است تحت فشار مثبت نیز باشند (مانند خاک های زهدار یا برخی لایه های آبدار زیرزمینی). در این صورت بجای پتانسیل ماتریک، پتانسیل فشاری Ψ_p وجود خواهد داشت که مقدار آن مثبت می باشد. پتانسیل فشاری برای تمام نقاطی که زیر سطح آزاد آب قرار دارند مثبت و برابر فاصله عمودی آن نقطه تا سطح آزاد آب است. همانطور که پتانسیل ماتریک نیز برای تمام نقاطی که در بالای سطح ایستابی قرار دارند منفی است.

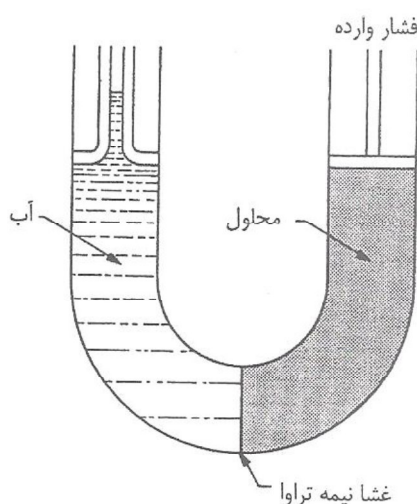
باید توجه داشت که آب در خاک نمی تواند هم پتانسیل ماتریک و هم دارای پتانسیل فشاری باشد. زیرا پتانسیل ماتریک از نظر علامت منفی و پتانسیل فشاری مثبت است. از طرف دیگر خاک یا اشباع است که

در این صورت پتانسیل آب در آن مثبت یا حداقل صفر می باشد و یا غیر اشباع که در غیر این صورت پتانسیل آب در آن منفی و یا حداکثر صفر می باشد.

پتانسیل اسمزی:

آب در داخل خاک بصورت محلول بوده و همین امر باعث ایجاد پتانسیل اسمزی Ψ_s در آب می شود که آن را از آب خالص متمایز می سازد. پتانسیل مربوط به اجسام حل شدنی موجود در آب که آن را پتانسیل مواد حل شدنی (solute potential) و یا اصطلاحاً پتانسیل اسمزی (osmotic potential) می گوئیم مربوط به بخشی از پتانسیل آب است که به دلیل جذب مولکول های آب توسط مواد حل شده در آب بوجود می آید. اگر یک لوله U شکل را انتخاب کرده و با یک صفحه غشایی نیمه تراوا که فقط مولکول های آب بتوانند از منافذ آن عبور کنند آن را به دو قسمت تقسیم کنیم و در یک طرف آن آب خالص و در سمت دیگر محلول نمک (آب به اضافه جسم حل شدنی) را طوری بریزیم که سطوح مایع در دو طرف یکسان باشد اتفاقی رخ خواهد داد که با آن می توان پتانسیل اسمزی را توضیح داد. اتفاقی که رخ می دهد آن است مولکول های آب از غشا عبور کرده و از سمت چپ شکل وارد قسمتی که محلول نمک ریخته شده است می شود.

برای آنکه از عبور مولکول های آب جلوگیری شود لازم است فشاری را روی محلول نمک اعمال کنیم. این فشار همان فشار اسمزی است و دستگاهی که با آن فشار اسمزی اندازه گیری می شود اسمومتر (osmometer) نام دارد. در داخل خاک که هیچگونه غشایی وجود ندارد عملاً از پتانسیل اسمزی صرف نظر می شود. اما اگر آب بخواهد از خاک وارد گیاه شود با غشایی مانند دیواره سلول های ریشه مواجه می شود که در این صورت نمی توان از آن صرف نظر کرد. از دلایلی که در حرکت آب در خاک از پتانسیل اسمزی صرف نظر می شود این نیست که اصولاً چنین پتانسیلی در آب وجود ندارد بلکه چون مقدار آن در نقاط مختلف خاک یکسان است در محاسبه اختلاف پتانسیل بین دو نقطه برای محاسبه حرکت آب همدیگر را خنثی می کنند و لذا می توان از آن صرف نظر کرد.



با توجه به اینکه هرچه خاک خشک تر باشد به دلیل غلظت زیادتر املاح در محلول خاک، پتانسیل اسمزی افزایش می یابد، تخمین مقدار آن در خاک مشکل است.

یکی از راه های عملی اندازه گیری پتانسیل اسمزی آن است که ابتدا خاک را با آب مقطر اشباع کرده و هدایت الکتریکی عصاره اشباع (EC_{sat}) را بدست آوریم. با داشتن این مقدار و از روی معادله تجربی $\Psi_s = -0.36 (EC_{sat})$ ، پتانسیل اسمزی عصاره اشباع بدست می آید. در این معادله EC_{sat} هدایت الکتریکی بر حسب میلی موس بر سانتی متر، Ψ_s پتانسیل اسمزی بر حسب بارمی باشد.

با توجه به پتانسیل های مختلفی که آب می تواند داشته باشد، برای هر واحد جرم آب در هر موقعیتی که قرار داشته باشد، پتانسیل کل آب در خاک (Ψ)، مجموع پتانسیل های مختلف آن است. بدین ترتیب که:

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_s + (\Psi_p \text{ یا } \Psi_m)$$

در این معادله باید به علائم + یا - در مورد هر کدام از پتانسیل ها توجه داشت. بطوری که پتانسیل اسمزی و ماتریک همواره منفی و پتانسیل ثقلی بسته به محل سطح مقایسه منفی، مثبت یا صفر است. در صورتی پتانسیل فشاری داشته باشیم، مقدار آن نیز مثبت است که در این وضعیت دیگر پتانسیل ماتریک نخواهیم داشت (هرچند در بعضی شرایط پتانسیل فشاری می تواند منفی هم باشد)

نظر به این که حرکت آب در خاک براساس اختلاف پتانسیل صورت می گیرد و پتانسیل اسمزی بین نقاط خاک یکسان است (اختلاف پتانسیل اسمزی صفر است)، در نتیجه در مطالعات آب و خاک تنها مجموع پتانسیل های ثقلی و فشاری (یا ماتریک) هر نقطه در نظر گرفته می شود که به آن پتانسیل هیدرولیکی (hydraulic potential) گفته می شود:

$$\Psi_{hyd} = \Psi_g + (\Psi_p \text{ یا } \Psi_m)$$

با توجه به مفهوم پتانسیل هیدرولیکی، مشخص می شود که شیب هیدرولیکی یا گرادیان هیدرولیکی (hydraulic gradient) بین دو نقطه از خاک عبارت است از اختلاف پتانسیل هیدرولیکی آن دو نقطه تقسیم بر فاصله آن ها از یکدیگر. مثلاً چنانچه پتانسیل هیدرولیکی در دو نقطه ای که به فاصله ۳۰ سانتی متری از هم واقع اند به ترتیب ۱۲- و ۴۸- سانتی متری باشد اختلاف پتانسیل هیدرولیکی ۳۶- سانتی متری و شیب هیدرولیکی از نظر عددی ۱.۲ (سانتی متری بر سانتی متری، cm/cm) است.

اندازی گیری پتانسیل آب خاک

پتانسیل ثقلی به صورت ساده و از روی فاصله عمودی نقطه تا سطح مقایسه قابل اندازه گیری است. پتانسیل فشاری نیز از روی فاصله نقطه مورد نظر تا سطح ایستابی اندازه گیری می شود. برای اندازه گیری پتانسیل فشاری در خاک معمولاً از لوله پیزومتر (piezometer) استفاده می شود. پیزومتر یک لوله ساده است که دو سر آن باز می باشد. اگر یک سر لوله را در خاک و نقطه مورد نظر قرار دهیم، در صورت وجود پتانسیل فشاری، آب در لوله بالا خواهد آمد. ارتفاعی که آب در لوله بالا می آید، برابر پتانسیل فشاری در آن نقطه است. در صورتی که در پیزومتر آب وجود نداشته باشد به این معنی است که نقطه مورد نظر فاقد پتانسیل فشاری بوده بلکه پتانسیل آن از نوع ماتریک است و باید به روش دیگر اندازه گیری می شود

اندازه گیری پتانسیل ماتریک با وسیله ساده ای به نام تانسیومتر (tensiometer) انجام می گردد. تانسیومترها

یا از نوع جیوه ای هستند و یا از نوع فلزی. تانسیومتر جیوه ای، لوله ساده و خمیده ای است پر از آب که یک طرف آن منتهی به کلاهک سرامیکی می باشد. طرف دیگر لوله وارد وارد یک مخزن جیوه می شود. حال اگر کلاهک سرامیکی در داخل یک خاک قرار گیرد، پس از مدتی، توازن پتانسیل رطوبتی بین آب داخل لوله تانسیومتر و آبی که در بیرون از آن، در داخل خاک وجود دارد برقرار می گردد. برقراری تعادل با وارد شدن یا خارج شدن آب به داخل لوله تانسیومتر از طریق کلاهک آن که نسبت به آب نفوذپذیر است انجام می شود. اگر خاک خشک باشد، آب را از داخل تانسیومتر به طرف خود خواهد کشید. در این وضعیت خلا ایجاد شده در داخل تانسیومتر، موجب می شود که در طرف دیگر لوله، جیوه صعود نماید

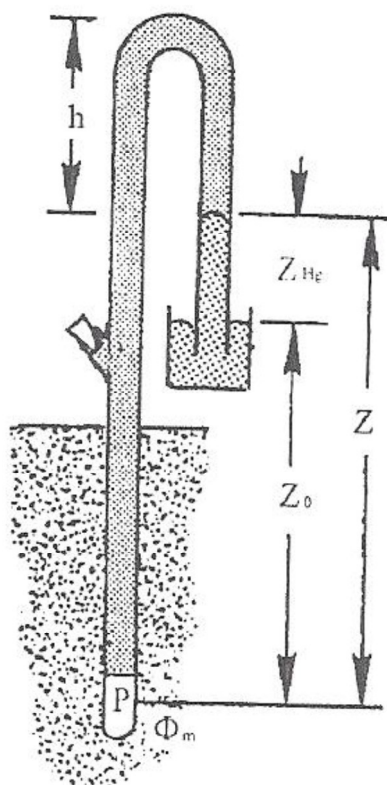
مقدار بالا آمدن جیوه متناسب با پتانسیل آب در خاک خواهد بود اگر به شکل زیر توجه شود، در حالت تعادل، پتانسیل آب در بیرون از تانسیومتر (ϕ_m) برابر فشار آب در داخل کلاهک تانسیومتر (p) است. فشار آب داخل کلاهک نیز با در نظر گرفتن وزن مخصوص آب (γ_w) و جیوه γ_{Hg} برابر است با:

$$P = \psi_m = Z(\gamma_w) + h(\gamma_w) - h(\gamma_w) - Z_{Hg}(\gamma_{Hg})$$

چون $Z = Z_o + Z_{Hg}$ و $\gamma_w = 1$ و $\gamma_{Hg} = 13.6$ است. لذا خواهیم داشت:

$$\psi_m = Z(\gamma_w) - Z_{Hg}(\gamma_{Hg}) = Z - Z_{Hg}(13.6) = Z_o + Z_{Hg} - Z_{Hg}(13.6)$$

$$\psi_m = Z_o - Z_{Hg}(13.6 - 1) = Z_o - 12.6(Z_{Hg})$$



تانسیومتر جیوه ای

مثال

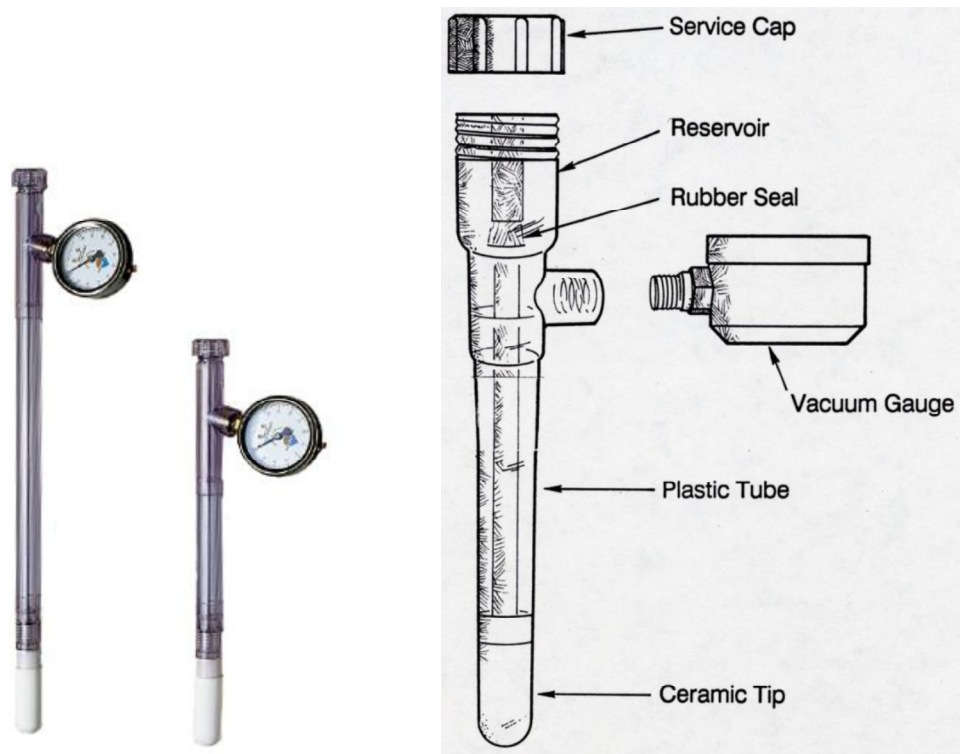
یک تانسیومتر جیوه‌ای در داخل خاک نصب شده است. اگر فاصله سطح مخزن جیوه تا مرکز کلاهک تانسیومتر 20 سانتی متر و جیوه به ارتفاع 14.2 سانتی متر در لوله بالا آمد باشد، پتانسیل ماتریک خاک چقدر است؟

$$Z_0 = 20 \text{ cm}$$

$$Z_{Hg} = 14.2 \text{ cm}$$

$$\psi_m = Z_0 - 12.6 Z_{Hg} = 20 - 12.6(14.2) = -159 \text{ cm}$$

تانسیومتر جیوه‌ای بیشتر در کارهای آزمایشگاهی و تحقیقی مورد استفاده می باشد و چون کاربرد آن در صحرا مشکل است. در عمل از نوعی دیگر از تانسیومتر به نام تانسیومتر فلزی استفاده می شود. این تانسیومترها نیز اساساً مشابه تانسیومترهای جیوه‌ای هستند. با این تفاوت که در آن ها به جای مخزن جیوه از خلاسنج فلزی استفاده شده است تا حمل و نقل آن ساده باشد، تانسیومتر فلزی مطابق شکل زیر از یک لوله پر آب تشکیل شده است که قسمت پایین آن از یک کلاهک سرامیکی درست شده و قسمت بالای آن مسدود است، به طوری که اگر آب از کلاهک سرامیکی خارج شود در داخل لوله خلا ایجاد می شود. به همین منظور در کنار لوله تانسیومتر، خلاسنجی (vacume gauge) به آن متصل است که قادر می باشد مقدار خلا یا فشار منفی را اندازه گیری کند. اگر کلاهک سرامیکی در داخل خاک قرار گیرد، با خروج یا ورود آب به تانسیومتر، تعادل پتانسیلی بین آب داخل و خارج تانسیومتر برقرار می شود. بنابراین با تعادل پتانسیل رطوبتی بین آب داخل و خارج کلاهک، ممکن است مقداری آب از لوله تانسیومتر خارج شود که این عمل باعث ایجاد خلا و کاهش فشار در لوله می شود. مقدار خلا یا فشار منفی توسط خلا سنج قابل قرائت است. معمولاً درجه بندی خلا سنج بین صفر تا ۱۰۰ بوده که هر کدام از درجات آن معادل ۱۰ سانتی متر فشار منفی است. بنابراین اگر عقربه خلا سنج روی عدد ۲۴ باشد، نشان می دهد که فشار در خلا سنج منفی ۲۴۰ سانتی متر است. اگر فاصله عمودی خلا سنج تا محل کلاهک تانسیومتر Z_0 باشد، آن چه در فشارسنج قرائت می شود برابر خواهد بود با $\Psi_m - Z_0$. بدین ترتیب مقدار پتانسیل ماتریک خاک نیز قابل محاسبه است



تانسیومتر فلزی

مثال

یک تانسیومتر که درجه بندی آن ۰ تا ۱۰۰ است در خاک نصب و عقربه آن روی عدد ۳۴ می باشد. پتانسیل ماتریک خاک چقدر است؟ کلاhek تانسیومتر در عمق یک متری نصب است (فاصله کلاhek تا خلا سنج یک متر فرض شده است)

$$\psi_m - Z_o = -34(10)$$

$$\psi_m - 100 = -340$$

$$\psi_m = -340 + 100$$

$$\psi_m = -240 \text{ cm}$$

سوال : چرا تانسیومتر در پتانسیل های بیش از یک بار (bar) کارائی ندارد؟

پاسخ

علت این امر آن است که خلا سنج یا فشار سنج جیوه ای اندازه نسبی خلا را در مقابل فشار اتمسفر که مقدار آن حدوداً معادل یک بار است اندازه گیری می کند. بنابراین در صورت که پتانسیل آب خاک از این یک بار بیشتر شود، هوا از کلاhek وارد تانسیومتر شده و فشار آن را با فشار اتمسفر متعادل می سازد. در عمل، کارائی تانسیومتر فقط تا پتانسیل ماتریک ۰/۸۵ اتمسفر (۸۵۰ سانتی متر آب) است

نقاط پتانسیلی مهم

مناسب ترین وضعیت برای استفاده گیاه از رطوبت خاک حد ظرفیت زراعی (field capacity) است که اختصاراً با علامت FC نشان داده می شود.

ظرفیت زراعی (FC)

مقدار رطوبتی که یک خاک اشباع شده پس از خارج شدن آب ثقی در خود نگه می دارد ظرفیت زراعی نام دارد. در خاکهای زراعی این حالت معمولاً ۲۴ تا ۴۸ ساعت پس از آنکه خاک اشباع شده بحال خود رها شود رخ می دهد. ظرفیت زراعی تابعی از بافت و ساختمان خاک است. در کشاورزی فرض می شود حد ظرفیت زراعی ثابت باشد و آن حالتی است که آب خاک تقریباً تحت تنش معادل ۱ متر (برای خاکهای شنی) تا ۴ متر (برای خاکهای سنگین رسی) قرار گیرد. در عملیات طراحی آبیاری ظرفیت زراعی بطور متوسط حدود یک سوم اتمسفر یا یک سوم بار یعنی ۳۰۰ سانتی متر در نظر گرفته می شود.

چون اکثراً لگاریتم پتانسیل خاک (بر حسب سانتی متر) بعنوان نمایه ای در تشخیص وضعیت رطوبتی خاک مصطلح بوده و با علامت pF نشان داده می شود در حد ظرفیت زراعی pF خاک حدود ۲/۴ می باشد زیرا:

$Pf = \log | \text{پتانسیل آب در خاک بر حسب سانتی متر} |$

بنابراین در حد ظرفیت زراعی خواهیم داشت:

$$pF = \log |-300| = 2.4$$

ظرفیت زراعی بالاترین حد رطوبت موجود در خاک برای استفاده گیاه می باشد. پائین ترین حدی که رطوبت خاک بتواند قابل استفاده گیاه باشد نقطه پژمردگی است که بعنوان یک نقطه پتانسیلی دیگر در زیر به تشریح آن می پردازیم.

نقطه پژمردگی

محدوده دیگر طیف رطوبتی خاک که از نظر طراحی سیستم های آبیاری حائز اهمیت است اصطلاحاً نقطه پژمردگی دائم (permanent wilting point) نام دارد که به اختصار با علامت PWP نشان داده می شود. این نقطه حدی است که گیاه حتی در طول شب نیز قادر نخواهد بود جبران آبی را که در روز تعلق نموده است بنماید. پتانسیل آب در این حد بر اساس آزمایشات گلخانه ای حدود ۱۰۲ تا ۲۰۴ متر (۱۰ تا ۲۰ بار) و یا بطور متوسط ۱۵۰ متر (۱۵۰۰۰ سانتی متر یا تقریباً ۱۵ بار) است. مقدار pF خاک در این وضعیت برابر ۴/۱۸ می باشد. باید توجه داشت که نقطه پژمردگی دائم نه تنها تابعی از نوع خاک بلکه دمای هوا، کمبود رطوبت در هوا، توزیع ریشه ها در خاک و از همه مهمتر نوع گیاه می باشد. از نظر تئوری مقدار رطوبتی که بین دو حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم در خاک وجود دارد بنام ظرفیت آبی موجود برای گیاه

(Available Water) معروف بوده و با علامت AW نشان داده می شود. که گاهی به آن رطوبت کل قابل دسترس گیاه (Total Available Moisture) نیز می گویند که با علامت TAM نشان داده می شود

چنانچه درصد حجمی (نه وزنی) رطوبت خاک در ظرفیت زراعی (FC) و در پژمردگی دائم (PWP) باشد ظرفیت رطوبت موجود در عمق توسعه ریشه های گیاه (D_{rz}) برابر خواهد بود با:

$$TAM \text{ یا } AW = D_{rz} (FC - PWP) / 100$$

که در آن AW بر حسب سانتی متر ارتفاع آب است.

مثال

خاکی را در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار داده که مقادیر رطوبت جرمی آن در حد ظرفیت زراعی ۲۲ و پژمردگی دائم ۱۰ درصد بوده است. اگر وزن مخصوص ظاهری خاک ۱/۴ گرم بر سانتی متر مکعب باشد مقدار رطوبت قابل ذخیره در خاک را در عمق توسعه ریشه ها (۰/۵ متر در نظر گرفته شود) محاسبه کنید.

حل

$$FC = (1.4)(22) = 30.8\% \text{ (درصد حجمی)}$$

$$PWP = (1.4)(10) = 14\%$$

$$D_{rz} = 0.5 \text{ m} = 50 \text{ cm}$$

$$AW = D_{rz}(FC - PWP)/100$$

$$AW = 50(30.8 - 14)/100$$

$$AW = 8.4 \text{ cm}$$

یعنی مقدار آب قابل ذخیره در لایه ۰/۵ متری عمق توسعه ریشه ها که برای استفاده گیاه موجود خواهد بود برابر ۸/۴ سانتی متر می باشد.

چنانچه مقادیر FC و PWP بر حسب درصد جرمی توصیف شوند (اعشار) و ρ_b جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی متر مکعب) باشد ظرفیت نگهداری آب در خاک در عمق توسعه ریشه ها بر حسب میلی متر عبارت خواهد بود از:

$$AW = TAW = D_r \times (FC - PWP) \times \rho_b$$

مثال

در یک مزرعه یونجه که عمق توسعه ریشه های آن ۱/۵ متر است اگر درصد جرمی رطوبت در حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم به ترتیب ۳۰ و ۱۰ و وزن مخصوص خاک ۱/۲ گرم بر سانتی متر مکعب باشد و در هر آبیاری خاک را تا حد ظرفیت زراعی آبیاری کرده باشیم جمعاً چند میلی متر آب در ناحیه توسعه ریشه قابل ذخیره است.

حل

$$FC = \frac{30}{100} = 0.3$$

$$PWP = 10/100 = 0.1$$

$$D_{rz} = 1.5m = 150 \text{ cm}$$

$$\rho_b = 1.2 \text{ gr/cm}^3$$

$$AW = D_{rz} (FC - PWP) \rho_b$$

$$AW = (150) (0.3 - 0.1) \times 1.2$$

$$AW = 36cm = 360m$$

در جدول زیر چگونگی موجودیت آب در خاکهای مختلف نشان داده شده است که از آن می توان در طراحی سیستم های آبیاری استفاده کرد.

معمولاً گیاه در مزرعه نمی تواند از نظر تنش رطوبتی تا حد آب قابل استخراج خشکی را تحمل کند. بخصوص این که زارعین علاقه ندارند محصولشان به دلیل صرف انرژی توسط گیاه برای دریافت آب کاهش یابد. بنابراین تمام مقدار آبی که بین دو حد ظرفیت زراعی و نقطه PWP است به آسانی قابل استفاده گیاه نبوده بلکه بسته به نوع گیاه فقط ۴۰ تا ۷۵ درصد آن می تواند به سهولت جذب گیاه شود که به آن آب سهل الوصول (Readily Available Water) گفته می شود و با علامت (RAW) نشان داده می شود. مقدار آب سهل الوصول برای گیاهان مختلف متفاوت است بطوری که بعضی گیاهان قادر به جذب مقادیر زیادی آب از خاک هستند و پاره ای دیگر این توانایی را ندارند.

سرعت تبخیر -تعرق بستگی به درصد رطوبت خاک داشته و از FC تا PWP بتدریج کاهش پیدا می کند. اما کاهش سرعت تبخیر -تعرق تا یک نقطه مشخص مثلاً θ_c کم و سپس از آن نقطه به بعد شدید است. بعبارت دیگر از نقطه رطوبتی FC تا θ_c آب به سهولت جذب گیاه می شود ولی از θ_c به بعد برای جذب آن باید انرژی زیادی توسط گیاه اعمال شود. نقطه θ_c همان حد رطوبت سهل الوصول است که با θ_{RAW} نشان می دهیم برای هر گیاه مقدار آن متفاوت می باشد. بنابراین اگر بخواهیم مقدار کل آب سهل الوصول را در منطقه توسعه ریشه ها بدست آوریم لازم خواهد بود فرمول مذکور را بصورت زیر اصلاح نمائیم.

$$RAW = D_{rz}(FC - \theta_{RAW})/100$$

که θ_c حد آب سهل الوصول (درصد حجمی) است

مقادیر ظرفیت زراعی، حد آب قابل جذب و ظرفیت نگهداری آب در خاکهای مختلف، اعداد داخل پرانتز دامنه تغییرات را نشان می دهد.

بافت خاک	مقدار رطوبت حجمی (%)		مقدار آب قابل دسترسی	
	حد ظرفیت زراعی	حد آب قابل جذب	درصد حجمی	میلی متر در هر متر خاک
شن	۱۵ (۱۰-۲۰)	۷ (۳-۱۰)	۸ (۶-۱۰)	۸۰ (۶۰-۱۰۰)
لوم شنی	۲۱ (۱۵-۲۷)	۹ (۶-۱۲)	۱۲ (۹-۱۵)	۱۲۰ (۹۰-۱۵۰)
لیم	۳۱ (۲۵-۳۶)	۱۴ (۱۱-۱۷)	۱۷ (۱۴-۲۰)	۱۷۰ (۱۴۰-۲۰۰)
نرم رسی	۳۱ (۳۱-۴۲)	۱۸ (۱۵-۲۰)	۱۹ (۱۶-۲۲)	۱۹۰ (۱۶۰-۲۲۰)
رسی سیلتی	۴۰ (۳۵-۴۵)	۲۰ (۱۷-۲۲)	۲۰ (۱۸-۲۳)	۲۰۰ (۱۸۰-۲۳۰)
رسی	۴۴ (۳۹-۴۹)	۲۱ (۱۹-۲۴)	۲۳ (۲۰-۲۵)	۲۳۰ (۲۰۰-۲۵۰)

مثال: اگر حد آب سهل الوصول برای یک گیاه ۱۴ و حد ظرفیت زراعی ۲۲ درصد جرمی باشد چه مقدار رطوبت بصورت سهل الوصول در عمق توسعه ریشه ها وجود خواهد داشت؟ اگر جرم مخصوص ظاهری خاک ۱/۴ گرم بر سانتی متر مکعب باشد و عمق توسعه ریشه ها ۰/۵ متر در نظر گرفته شود.

حل

$$FC = (1.4)(22) = 30.8\% \quad (\text{درصد حجمی})$$

$$\theta_c = (1.4)(14) = 19.6\%$$

$$D_{rz} = 0.5\text{m} = 50\text{ cm}$$

$$RAW = 50(30.8 - 19.6)/100$$

$$RAW = 5.6\text{ cm}$$

برای آنکه بتوانیم مقدار آب سهل الوصول را تخمین بزنیم از مفهوم حداکثر کمبود مجاز رطوبتی (Maximum Allowable Deficiency) استفاده می شود که به آن MAD گفته می شود. در برخی نوشته

ها برای MAD حداکثر تخلیه مجاز (Maximum Allowable Depletion) نیز بکار رفته است. مقدار MAD برابر است با:

$$MAD = \frac{RAW}{TAM}$$

بنابراین MAD یک عدد بدون بعد می باشد که مقدار آن بستگی به خصوصیات گیاه دارد. اگر برای یک خاک TAM ثابت فرض شود آنچه MAD را تغییر می دهد نوع گیاه است. گرچه در طراحی های آبیاری مقدار MAD معمولاً ۰/۶۵ در نظر گرفته می شود اما مقدار دقیق تر آن برای گیاهان مختلف در جدول زیر ارائه شده است. در این جدول حداکثر عمق توسعه ریشه های گیاه نیز داده شده است. بطوریکه در این جدول مشاهده می شود مقدار MAD برای درختان میوه ۰/۶۵ و برای سبزیجات که نسبت به کم آبی حساس می باشند حدود ۰/۵ می باشد. حال با در نظر گرفتن مفهوم MAD می توان آب سهل الوصول را بصورت زیر محاسبه نمود.

$$RAW = (MAD)(TAM)$$

$$RAW = (MAD)(D_{rz})(FC - PWP)/100$$

مقادیر حداکثر تخلیه مجاز (MAD) و حداکثر عمق توسعه ریشه‌ها
در مورد برخی از گیاهان زراعی و باغی

نوع گیاه	MAD	حداکثر عمق توسعه ریشه‌ها (cm)
اسفناج	0.50	60
یونجه	0.65	180
سیب	0.65	180
زردآلو	0.65	180
لوبیا	0.50	90
هویج	0.50	90
گیلاس	0.65	180
شیدر	0.65	60
ذرت دانه‌ای	0.65	120
ذرت شیرین	0.65	120
خیار	0.50	120
انگور	0.65	180
پیاز	0.50	60
هلو	0.65	180
نخود	0.65	60
آلو و گلابی	0.65	180
سیب زمینی	0.30	60
تریچه	0.50	60
گلرنگ	0.65	180
سورگوم	0.65	90
سوزا	0.65	90
گوجه‌فرنگی	0.50	180
گندم	0.65	96
چغندرند	0.65	105
توت‌فرنگی	0.65	30
آفتاب‌گردان	0.65	180

مثال : می‌خواهیم یک باغ سیب را آبیاری کنیم. اگر رطوبت خاک در ظرفیت زراعی ۲۸ درصد حجمی و در حد پژمردگی ۱۲ درصد حجمی باشد مقدار آب سهل الوصول را که می‌تواند مورد استفاده درختان قرار بگیرد محاسبه کنید؟

حل

از جدول مقادیر حداکثر عمق توسعه ریشه‌ها و MAD را برای سیب استخراج می‌کنیم:

$$MAD = 0.65$$

$$D_{rz} = 180 \text{ cm}$$

$$FC = 28(\text{volume \%})$$

$$PWP = 12 (\text{volume \%})$$

$$RAW = (MAD)(D_{rz})(FC - PWP)/100$$

$$RAW = (0.65)(180)(28 - 12)/100$$

$$RAW = 18.72 \text{ cm}$$

لذا در عمق توسعه ریشه ۱۸/۷۲ سانتی متر آب بصورت سهل الوصول می تواند ذخیره شود.

اگر آبیاری را زمانی انجام دهیم که رطوبت خاک به θ_{RAW} برسد در این صورت گیاه فقط از رطوبت سهل الوصول استفاده می کند در چنین شرایطی گفته می شود که آبیاری بصورت کامل (full irrigation) صورت گرفته است اما اگر اجازه دهیم رطوبت خاک از حد θ_{RAW} کمتر شود و گیاه برای دریافت رطوبت از خاک انرژی بیشتری مصرف کند در این صورت گفته می شود کم آبیاری (deficit irrigation) اعمال شده است. انتخاب این که کدام روش آبیاری به صلاح خواهد بود نیاز به تجزیه و تحلیل اقتصادی و مقایسه مقدار محصول در مقابل آب مصرفی خواهد داشت.

نفوذ آب در خاک

سرعت وارد شدن آب به خاک یا به عبارت دیگر سرعت نفوذ از پارامترهای بسیار مهم در طراحی آبیاری است. برحسب تعریف آب وارد شده به داخل خاک را نفوذ گویند. مقدار آبی که در یک دوره زمانی مشخص (مثلاً یک ساعت، یک شبانه روز...) در خاک نفوذ می کند، نفوذ تجمعی (accumulated infiltration) و میانگین سرعت وارد شده آب به داخل خاک را طی یک دوره زمانی، متوسط سرعت نفوذ (average infiltration rate) و سرعت نفوذ آب به داخل خاک را در هر لحظه از زمان را سرعت نفوذ لحظه‌ای (instantaneous infiltration rate) در آن زمان گویند. در نفوذ آب عمدتاً حرکت عمودی آب به داخل خاک مورد نظر می باشد و اگر همانند آنچه در شیارها و جوی و پشته ها و یا آبیاری قطره‌ای مشاهده می شود، آب علاوه بر حرکت عمودی، در جهات جانبی نیز نفوذ نماید، به جای واژه نفوذ (infiltration) از واژه نفوذ جانبی یا نشت (intake) استفاده میشود.

مکانیسم نفوذ

ورود آب به داخل خاک در نتیجه تاثیر توأم نیروهای ثقلی و موینگی صورت می گیرد. نیروی ثقل فقط در جهت قائم عمل می کند. اما نیروی موینگی در ابتدا که خاک خشک بود و منافذ موین خالی از آب است، هم در جهت عمودی و هم جهات افقی عمل می کند ولی بتدریج که منافذ از آب اشباع شد تنها نیروی ثقل دخالت کرده و جریان نفوذ عمدتاً قائم می باشد. به همین دلیل سرعت نفوذ در ابتدای وارد شدن آب به سطح خاک زیاد و سپس بتدریج تقلیل یافته و به مقدار ثابتی که فقط نتیجه عمل نیروی ثقل است می رسد. بنابراین مقدار آبی که در زمین نفوذ می کند، صرف نظر از وضعیت سطح خاک به صورت تجمعی