دانشگاه پیام نور

بخش کشاورزی

عنوان جزوه: رابطه آب ، خاک و گیاه

انجمن علمی مهندسی کشاورزی کویر سبز
دانشگاه پیام نور رضوانشهر صدوق
www.pnu.gigfa.com
agripnu@gmail.com

مولف: دکترفرید اجلالی

رشته تحصیلی:آب و خاک

مقطع تحصیلی: کارشناسی

تهیه و تدوین سال 1390

فهرست مطالب کتاب

پیشگفتار **یازده**

فصل اول **۳**
اهداف کلی ۳
مقدمه ۳
۱-۱ دلایل مطالعهٔ روابط آب و خاک و گیاه ۴
الف) جمعیت ۴
ب) قانون دو یارد مربعی ۶
۱-۲ منحنی‌های رشد گیاه ۷
الف) اهمیت اندازه‌گیری رشد گیاه و رشد نمایی ۷
ب) منحنی رشد سیگموئیدی ۸
ج) منحنی رشد بلاک من ۹
سؤالات فصل اول ۱۰

فصل دوم **۱۳**
اهداف کلی ۱۳
۲-۱ ساختمان آب ۱۳
۲-۲ عوامل پیونددهندهٔ مولکول‌های آب به یکدیگر ۱۵
الف) پیوند هیدروژنی ۱۵
ب) نیروی واندروالز-لاندن ۱۶
۲-۳ برخی از خصوصیات آب ۱۶
۲-۳-۱گرمای ویژه ۱۶
۲-۳-۲ گرمای تبخیر ۱۷
۲-۳-۳ گرمای ذوب ۱۸
۲-۳-۴ هدایت گرما ۱۹
۲-۳-۵ شفافیت و تابش مرئی ۲۰
۲-۳-۶ تیرگی برای تابش مادون قرمز(Opaqueness to Infrared Radiation) ۲۰

۲-۳-۷ چگالی یا جرم مخصوص آب ۲۰
۲-۳-۸ یونیزاسیون و اسیدی یا بازی بودن آب (pH) ۲۱
۲-۳-۹ ثابت دی‌الکتریک ۲۲
۲-۳-۱۰ آب به‌عنوان یک حلال ۲۲
۲-۳-۱۱ جذب سطحی ۲۳
۲-۳-۱۲ گرانروی یا ویسکوزیته ۲۳
۲-۳-۱۳ کشش سطحی ۲۴
۲-۴ صعود و نزول آب در منافذ خاک ۲۹
۲-۵ خواص محلول‌ها ۳۴
۲-۵-۱ فشار بخار ۳۵
سؤالات فصل دوم ۳۸

فصل سوم **۴۱**
اهداف کلی ۴۱
۳-۱ خاک ۴۱
۳-۲ ترکیب خاک ۴۱
۳-۳ خواص فیزیکی خاک ۴۲
۳-۳-۱ بافت خاک ۴۳
۳-۳-۲ ساختمان خاک ۴۳
۳-۴ تخلخل خاک ۴۵
۳-۵ تراکم خاک ۴۶
۳-۶ شوری و سدیتهٔ خاک ۴۶
۳-۷ انواع خاک‌های شور ۴۷
مسائل فصل سوم ۴۸

فصل چهارم **۵۱**
اهداف کلی ۵۱
۴-۱ مقدمه ۵۱
۴-۲ اصطلاحات مربوط به آب خاک و کاربردهای آن ۵۲
۴-۳ روش‌های توصیف رطوبت خاک ۵۲
۴-۴ اندازه‌گیری رطوبت خاک ۵۴
۴-۴-۱ روش لمس و ظاهر خاک ۵۴
۴-۴-۲ تانسیومتر ۵۵
۴-۴-۳ بلوک‌های مقاومت ۶۳
۴-۴-۴ روش نوترون متر Neutron meter ۶۵
۴-۴-۵ روش جذب اشعه گاما ۶۷
۴-۵ خطای نمونه‌برداری ۶۸
۴-۶ محل اندازه‌گیری رطوبت خاک ۶۸
۴-۷ پتانسیل آب خاک ۶۹
۴-۷-۱ پتانسیل ماتریک (Ψ_m) ۷۰
۴-۷-۲ پتانسیل ثقلی (Ψ_m یا Ψ_g) ۷۲
۴-۷-۳ پتانسیل فشاری (Ψ_P) ۷۳

۴-۷-۴ پتانسیل اسمزی (Ψ_S) ۷۴
۴-۸ نقاط پتانسیلی مهم ۷۷
۴-۸-۱ ظرفیت مزرعه ۷۸
۴-۸-۲ نقطه پژمردگی ۸۰
۴-۹ آب قابل دسترس گیاه ۸۲
مسائل فصل چهارم ۸۴

فصل پنجم **۸۷**
اهداف کلی ۸۷
۵-۱حرکت آب در خاک‌های اشباع ۸۷
۵-۱-۱ قانون دارسی ۸۷
۵-۲ هدایت هیدرولیکی ۸۹
۵-۳ نفوذ ۹۱
۵-۳-۱ تعریف نفوذ ۹۱
۵-۳-۲ عوامل مؤثر بر نفوذ ۹۳
۵-۳-۳ مراحل نفوذ ۹۸
۵-۳-۴ روابط نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ ۹۹
۵-۳-۵ سرعت نفوذ پایه یا دائمی ۱۰۰
۵-۳-۶ تغییر زمانی و مکانی نفوذ ۱۰۱
۵-۳-۷ معادلات نفوذ ۱۰۱
۵-۳-۸ اندازه‌گیری نفوذ ۱۰۵
مسائل فصل پنجم ۱۰۷

فصل ششم **۱۱۱**
اهداف کلی ۱۱۱
۶-۱ وظایف ریشه‌ها ۱۱۱
۶-۲ آناتومی ریشه ۱۱۲
۶-۲-۱ چهار ناحیهٔ یک ریشهٔ در حال رشد ۱۱۲
۶-۲-۲ ریشه‌های موئی root hairs ۱۱۴
۶-۲-۳ ریشهٔ دولپه‌ای‌ها (Dicotyledonous Roots) ۱۱۴
۶-۲-۴ ریشهٔ تک‌لپه‌ای‌ها (Monocotyledonous Root) ۱۱۵
۶-۲-۵ جابجایی آب و املاح از طریق ریشه ۱۱۷
۶-۲-۶ اندودرم Endodermis ۱۱۷
۶-۲-۷ انواع سلول در بافت چوبی (Cell Types in Xylem Tissue) ۱۱۹
۶-۳ قانون پوازیه (POISEUILLE'S LAW) ۱۲۱
۶-۳-۱ فرضیات قانون پوازیه ۱۲۳
۶-۴ جذب آب توسط ریشه‌ها ۱۲۴
۶-۵ محاسبات جریان براساس قانون پوازیه ۱۲۵
۶-۶ معادلهٔ گاردنر برای حرکت آب به سمت ریشه‌های گیاه ۱۳۰
۶-۶-۱ فرضیات معادلهٔ گاردنر ۱۳۲
۶-۶-۲ مقادیر سرعت جذب آب توسط ریشه ۱۳۳
۶-۷ سیستم‌های ریشهٔ گیاهان ۱۳۵

۶-۸ مشخصات ریشه‌ای گونه‌های گیاهی ۱۳۷
۶-۹ عوامل مؤثر بر رشد ریشه ۱۳۸
۶-۱۰ جریان آب به داخل ریشه‌ها ۱۳۹
۶-۱۱ روابط جذب آب- پروفیل ریشه ۱۳۹
۶-۱۲ مصرف آب گیاه از سطح ایستابی کم عمق ۱۴۱
۶-۱۳ عمق طراحی جذب آب ۱۴۲
مسائل فصل ششم ۱۴۳

فصل هفتم **۱۴۷**
اهداف کلی ۱۴۷
۷-۱ تبخیر ۱۴۷
۷-۲ تعرق ۱۴۸
۷-۳ تبخیر و تعرق (ET) ۱۴۹
۷-۳-۱ عوامل مؤثر بر تبخیر و تعرق ۱۵۰
۷-۳-۲ مفاهیم تبخیر و تعرق ۱۵۲
۷-۳-۳ تعیین تبخیر و تعرق ۱۵۵
۷-۳-۴ روش‌های مستقیم تعیین تبخیر و تعرق ۱۵۶
۷-۳-۵ روش‌های محاسباتی تعیین تبخیر و تعرق گیاه ۱۵۸
۱. روش‌های آئرودینامیک ۱۶۰
۲. روش‌های توازن انرژی ۱۶۱
۳. روش‌های ترکیبی ۱۶۲
۴. معادله‌های تجربی ۱۷۰
روش تورنت وایت ۱۷۰
روش بلانی کریدل ۱۷۱
روش جنسن ـ هیز ۱۷۴
روش هارگریوز – سامانی ۱۷۶
روش تشت تبخیر ۱۷۶
۷-۴ ضریب گیاهی ۱۷۷
۷-۵ برنامه‌ریزی آبیاری ۱۷۸
۷-۵-۱ مزایای برنامه‌ریزی آبیاری ۱۷۸
۷-۵-۲ بیلان آب ۱۸۰
۷-۵-۳ تخلیهٔ مجاز آب ۱۸۰
۷-۵-۳ عمق جذب آب خاک (soil water extraction depth) ۱۸۲
۷-۵-۴ محاسبات آب خالص (net water calculations) ۱۸۳
۷-۵-۵ فرایند محاسبهٔ بیلان آب (water balance accounting procedure) ۱۸۵
۷-۵-۶ مفاهیم مبتنی بر گیاه (plant-based concepts) ۱۸۷
۷-۵-۷ اتوماسیون در برنامه‌ریزی آبیاری ۱۸۸
سؤالات فصل ۷ ۱۸۹

فصل هشتم **۱۹۳**
اهداف کلی ۱۹۳
۸-۱ تنش آبی و رشد گیاه ۱۹۳

۸-۲ رطوبت خاک و رشد گیاه ۱۹۴
۸-۳ قابلیت دسترسی نسبی رطوبت خاک ۱۹۴
۸-۴ پیشرفت تدریجی تنش‌های آبی ۱۹۴
۸-۵ تغییرات محتوای آب اندام‌های مختلف گیاه در زمان‌های مختلف ۱۹۶
۸-۶ رقابت برای آب در داخل گیاه ۱۹۶
۸-۷ دوره‌های تنش بحرانی گیاه (crop critical stress periods) ۱۹۶
۸-۸ اثرات عمومی تنش آبی بر رشد گیاه ۱۹۸
۸-۸-۱ ساختمان گیاه و تنش آبی ۱۹۹
۸-۸-۲ سلول و تنش آبی ۲۰۰
۸-۸-۳ اثرات تنش آبی بر تنفس و فتوسنتز ۲۰۱
۸-۸-۴ تنش آبی و متابولیسم کربوهیدرات‌ها ۲۰۲
۸-۸-۵ متابولیسم ازت و تنش آبی ۲۰۲
۸-۸-۶ اثر تنش آبی بر مواد تنظیم کنندهٔ رشد ۲۰۲
۸-۸-۷ جابه‌جایی مواد تحت تأثیر تنش آبی ۲۰۳
۸-۸-۹ آفات و بیماری‌ها و تنش آبی ۲۰۳
۸-۹ اثرات مفید تنش آبی ۲۰۴
۸-۱۰ مقاومت گیاهان در مقابل تنش آبی ۲۰۴
۸-۱۰-۱ مقاومت در مقابل خشکی ۲۰۴
۸-۱۰-۲ اجتناب از خشکی ۲۰۵
۸-۱۱ راندمان استفاده از آب ۲۰۶
۸-۱۲ سخت شدن ۲۰۶
۸-۱۳ اندازه‌گیری تنش آبی در گیاهان ۲۰۸
۸-۱۳-۱ چه چیزی باید اندازه‌گیری شود؟ ۲۰۸
۸-۱۳-۲ مشکلات نمونه‌برداری ۲۰۹
۸-۱۳-۳ اندازه‌گیری مستقیم آب ۲۰۹
۸-۱۳-۴ اندازه‌گیری غیرمستقیم مقدار آب ۲۱۰
۸-۱۳-۵ تخمین‌های کمّی تنش آبی ۲۱۱
۸-۱۳-۶ اندازه‌گیری پتانسیل آب ۲۱۱
۸-۱۴ روابط عملکرد - تبخیر و تعرق ۲۱۳
۸-۱۴-۱ مفاهیم توابع تولید ۲۱۴
۸-۱۴-۲ توابع تولید عملکرد-تبخیر و تعرق ۲۱۴
۸-۱۴-۳ روابط عملکرد-آب مصرفی ۲۱۵
۸-۱۴-۴ توابع تولید محصول نسبت به آب ۲۱۶
۸-۱۴-۵ اثرات شوری ۲۱۷
۸-۱۴-۶ اثرات یون‌های خاص ۲۲۱
۸-۱۴-۷ اثرات اسیدیتهٔ خاک بر رشد گیاه ۲۲۲
سؤالات فصل ۸ ۲۲۲

پیشگفتار

رشد روزافزون جمعیت و افزایش نیاز به مواد غذایی، بهره‌برداری بهینه از منابع محدود آب و خاک را ضروری نموده است. این مهم برای کشور عزیزمان ایران که در منطقه خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد و میانگین بارندگی سالانه آن کمتر از ثلث میانگین بارش سالانه کره زمین است از اهمیت اساسی برخوردار است. انسان‌ها برای تامین و تولید غذای خود به گیاهان وابسته‌اند و به‌دلیل آنکه آب مهم‌ترین عامل زیست محیطی محدود کننده رشد گیاه است، لازم است که برای تأمین غذای جمعیت رو به افزایش، روابط آب و خاک و گیاه مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به اهمیت این موضوع و فقدان کتاب درسی متناسب برای دانشجویان رشته مهندسی کشاورزی دانشگاه پیام‌نور، این کتاب براساس سرفصل‌های مصوب شورای عالی انقلاب فرهنگی برای درس رابطه آب و خاک و گیاه تدوین گردید. به‌دلیل همپوشانی برخی از موضوعات درس رابطه آب و خاک و گیاه با موضوعات درس‌های دیگر، سعی گردید به دلیل جلوگیری از اطاله کلام از ذکر مجدد این مطالب خودداری گردد ولی برای حفظ پیوستگی مطالب ذکر برخی از آن‌ها اجتناب‌ناپذیر بوده است. در فصل اول کتاب، مطالبی درباره دلایل مطالعه روابط آب و خاک و گیاه و منحنی‌های رشد گیاه گنجانده شد. در فصل دوم، خصوصیات آب و محلول‌ها و برخی از فرایندهای فیزیکی مرتبط با این خصوصیات ذکر گردید. خواصی از خاک که در مطالعه روابط آب و خاک و گیاه نقشی اساسی دارند در فصل سوم بیان گردید. اصطلاحات اساسی مرتبط با وضعیت آب در خاک و نحوه حرکت آب در خاک در فصل‌های چهارم و پنجم ارائه شد. در فصل ششم، پس

از تشریح تفاوت‌های ساختاری ریشه‌های گیاهان، نقش آن‌ها در جذب آب و املاح توصیف گردید. موضوعات مهم درباره تبخیر و تعرق و روش‌های اندازه‌گیری و محاسبه آن و نحوه استفاده از نمایه‌های مختلف برای برنامه‌ریزی آبیاری در فصل هفتم ذکر شد و در نهایت، موضوعات مختلف مرتبط با تنش‌های گیاهی در فصل هشتم تشریح گردید.

اگرچه مؤلف سعی نمود با توجه با تجربیات چند ساله خود در تدریس درس رابطه آب و خاک و گیاه، مناسب‌ترین مطالب مرتبط با هر موضوع را که برای کلیه دانشجویان گرایشهای مختلف کشاورزی قابل فهم باشد، بیان نماید، لکن ناگفته پیداست که چاپ اول این کتاب مصون از لغزش و خطا نخواهد بود. لذا، ارائه نظرات و پیشنهادات اصلاحی خوانندگان محترم جهت بهبود چاپ‌های آتی مزید امتنان خواهد بود.

در خاتمه از مسئولان محترم دانشگاه پیام‌نور که در چاپ این کتاب همکاری صمیمانه‌ای داشته‌اند، کمال تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

فصل اول

مقدمه

اهداف کلی

۱. آشنایی با مفهوم آبیاری و دلیل انجام آن در مناطق مختلف آب و هوایی
۲. پی بردن به اهمیت مطالعه‌ی رابطهٔ آب و خاک و گیاه
۳. بررسی روند رشد جمعیت از گذشته تاکنون
۴. تعیین رشد کمی گیاه با استفاده از منحنی‌های رشد

مقدمه

آبیاری، مصرف آب به مقدار لازم برای محصولات زراعی و باغی به‌منظور برطرف نمودن نیازهای آبی گیاهان می‌باشد. در مناطق خشک، بدون انجام آبیاری، تولید مواد غذایی و الیاف امکان‌پذیر نبوده و در مناطق نیمه‌خشک هم به‌واسطهٔ عدم توزیع یکنواخت بارش امکان عملکرد پایین و خطر از بین رفتن گیاهان وجود داشته و در اغلب مواقع بایستی اراضی آبیاری شوند. به‌علاوه، در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب نیز برای اطمینان از عدم کاهش عملکرد، آبیاری اراضی اجتناب‌ناپذیر است. عموماً هدف کشاورزی، تولید عملکرد زراعی سودآور است و آبیاری تضمین‌کنندهٔ کشاورزی سودمند در مناطق نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مرطوب است درحالی که در نواحی خشک، انجام آن ضروری می‌باشد.

آب از طریق سیستم آبیاری، تنظیم سطح ایستابی یا بارندگی، وارد خاک شده و در بافت خاک ذخیره و سپس توسط ریشه‌های گیاه جذب می‌گردد تا نیازهای تبخیر و

تعرق (ET) گیاه را تأمین نماید. در این کتاب، خواص فیزیکی آب خاک و گیاه که بر جابه‌جایی، نگهداشت و استفادهٔ آب اثر دارد و مواردی که باید در طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های آبیاری حفاظتی مد نظر قرار گیرد، بررسی می‌گردد. در برنامه‌ریزی و طراحی یک سیستم آبیاری، عمدتاً با ظرفیت نگهداشت آب خاک به‌ویژه در ناحیهٔ ریشهٔ گیاه، سرعت نفوذ آب در خاک، سیستم ریشهٔ گیاهان تحت کشت و میزان آب مورد استفادهٔ گیاه، سروکار داریم.

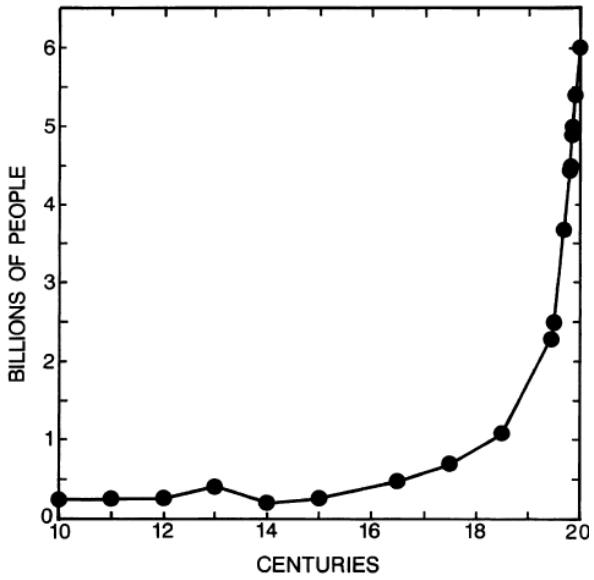
۱-۱ دلایل مطالعهٔ روابط آب و خاک و گیاه

الف) جمعیت

از میان ۴ عامل فیزیکی خاک (مقاومت مکانیکی، آب، تهویه و دما) که بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارند، آب مهم‌ترین عامل می‌باشد. بررسی‌ها نشان داده است که از توان تولید محصولات کشاورزی، سالانه ۴۰ درصد به‌دلیل خشکسالی‌ها و ۱۷ درصد به دلیل زه دار شدن و ماندابی شدن زمین‌ها کاسته می‌شود. به‌عبارت دیگر، کمبود یا زیادی آب عملا موجب می‌شود تا توان تولید محصول ۵۷ درصد کاهش یابد.

انسان‌ها برای تأمین و تولید غذا، به گیاهان وابسته‌اند و از آنجاکه آب مهم‌ترین عامل زیست محیطی محدودکنندهٔ رشد گیاه است، لازم است تا برای تأمین غذای جمعیت در حال افزایش، روابط آب- خاک- گیاه مورد مطالعه قرار گیرد. اما چالش اساسی چیست؟ جمعیت کرهٔ زمین به‌طور نمایی رو به ازدیاد است. در حال حاضر، سن جهان ۱۳ میلیارد سال و عمر زمین ۴.۵ میلیارد سال برآورد می‌شود. قدیمی‌ترین صخرهٔ زمین ۴٫۰۳ میلیارد سال پیش به‌وجود آمده است. بر اساس مطالعات باستان شناسان، اولین موجودات زنده ۳٫۷ میلیارد سال قبل، روی زمین ظاهر شدند. حیوان‌های مشابه انسان، تنها کمتر از ۸ میلیون سال پیش، روی زمین زندگی می‌کردند. تنها شواهدی که از عمر انسان روی کرهٔ زمین در دست می‌باشد مربوط به فسیل آروارهٔ پایین جمجمهٔ انسان‌هایی است که ۶ تا ۷ میلیون سال پیش در چاد و آفریقای مرکزی می‌زیسته‌اند. در زمان آغاز کشاورزی، یعنی حدود ۸۰۰۰ سال قبل از میلاد، جمعیت جهان ۵ میلیون نفر بوده است. در زمان تولد حضرت مسیح جمعیت جهان به ۲۰۰ میلیون نفر و در سال ۱۰۰۰ میلادی به ۲۵۰ میلیون نفر رسید (شکل ۱-۱). در سال

۱۳۰۰، مقدار جمعیت بیشتر شد ولی در سال ۱۴۰۰ به‌دلیل شیوع بیماری طاعون سیاه، مجدداً کاهش یافت.



شکل ۱-۱. منحنی رشد جمعیت جهان

در سال ۱۵۰۰ میلادی جمعیت جهان دوباره ۲۵۰ میلیون نفر گردید. پس از آن، مقدار جمعیت مرتباً افزایش یافت به‌طوری‌که در سال ۱۶۵۰ به ۴۷۰ میلیون نفر، درسال ۱۷۵۰ به ۶۹۴ میلیون نفر و در سال ۱۸۵۰ به یک میلیارد و نود و یک میلیون نفر رسید. جمعیت جهان در آغاز عصر هسته‌ای در سال ۱۹۴۵، ۳٫۲ میلیارد نفر؛ در سال ۱۹۵۰، حدود ۲٫۵ میلیارد نفر؛ در سال ۱۹۷۰، حدود ۳٫۶۷ میلیارد نفر؛ در سال ۱۹۸۰، حدود ۴٫۴۷ میلیارد نفر؛ در سال ۱۹۸۵، ۴٫۹ میلیارد نفر؛ در سال ۱۹۸۷، ۵ میلیارد نفر و در سال ۱۹۹۹، ۶ میلیارد نفر بوده است.

نکتهٔ جالب توجه این است که درحالی‌که بیش از ۶ میلیون سال طول کشید تا جمعیت جهان به یک میلیارد نفر برسد، در مدت ۱۲۰ سال مقدار آن دو برابر گردید، در مدت ۳۲ سال به سه میلیارد نفر و در عرض ۱۵ سال به ۴ میلیارد نفر رسید. افزایش یک میلیارد آخر، تنها ۱۲ سال طول کشید. سازمان ملل متحد پیش‌بینی کرده است که

در سال ۲۱۵۰ جمعیت دنیا رقمی بین ۳٫۶ و ۲۷ میلیارد نفر خواهد بود و تفاوت این دو پیش‌بینی تنها یک بچه به‌ازای هر زن است. اگر هر زن در عمر خود دو بچه را زایمان کند، جمعیت کنونی به ۱۰٫۸ میلیارد نفر می‌رسد اما اگر نرخ متوسط موالید ۲٫۶ بچه به‌ازای هر زن باشد، جمعیت جهان به بیش از ۲۷ میلیارد نفر خواهد رسید. درصورتی‌که نرخ متوسط موالید به ۱٫۶ بچه به‌ازای هر زن کاهش یابد، جمعیت جهان ۳٫۶ میلیارد نفر کاهش می‌یابد.

هر چند این امکان نیز وجود دارد که جمعیت دنیا با بیماری‌هایی نظیر طاعون، ایدز، سارس، جنون گاوی و امثال آن کنترل و حتی کاهش یابد، اما این وظیفهٔ انسان و حتی متخصصان است که بدون توجه به این مسائل، در تولید مواد غذایی بکوشند.

ب) قانون دو یارد مربعی

رشد جمعیت تابعی از بهره‌وری اراضی است. مقدار اراضی زراعی نیز محدود است. بسیاری از ما قانون موسوم به دویارد مربع[1] را شنیده‌ایم. بر اساس این قانون، سرانهٔ زمین زراعی در دنیا بیش از ۲ یارد مربع نمی‌باشد. مقدار انرژی که از خورشید بر این سطح می‌تابد، باید انرژی مورد نیاز برای تهیهٔ جیرهٔ غذایی روزانهٔ انسان‌ها را تأمین کند. درواقع، غذا و زندگی ما از انرژی خورشید حاصل می‌شود. برای فهم مقدار پتانسیل تولید غذا از انرژی ساطع‌شده از خورشید بر این سطح دو یارد مربعی، به محاسبات سادهٔ زیر توجه کنید:

۱. دو یارد مربع، سطحی معادل ۹۱ سانتی متر در ۱۸۳ سانتی متر یعنی تقریباً ۱۶۷۰۰ سانتی‌متر مربع می‌باشد.

۲. ثابت خورشیدی، ۲ کالری بر سانتی‌متر مربع بر دقیقه یا ۲ لانگلی[2] بر سانتی‌متر می‌باشد. ثابت خورشیدی عبارت است از مقدار انرژی دریافت شده در واحد سطح عمود بر جهت خورشید در فضای آزاد، در متوسط فاصلهٔ زمین از خورشید (عرض جغرافیایی مهم نمی‌باشد)

۳. $\left(۱۶۷۰۰\ \mathrm{cm}^{۲}\right)\left(۲\mathrm{cal.cm}^{-۲}.\mathrm{min}^{-۱}\right) = ۳۳۴۰۰\ \mathrm{cal.min}^{-۱}$

---

1. Two- square- yard rule

۲. یک لانگلی (longly) برابر با یک کالری بر سانتی‌متر مربع است.

۴. $\left(۳۳۴۰۰\ \text{cal.min}^{-۱}\right)\left(۶۰\ \text{min.h}^{-۱}\right)\left(۱۲\ \text{h.day}^{-۱}\right) = ۲۴۰۴۸۰۰۰\ \text{cal.day}^{-۱}$ یا حدود ۲۴ میلیون کالری در روز. در این محاسبات مدت تابش خورشید، ۱۲ ساعت در روز در نظر گرفته شد.

۵. در بهترین شرایط، گیاهان بیش از ۶ درصد انرژی دریافتی از خورشید را نمی‌توانند به انرژی شیمیایی تبدیل کنند. لذا:

$$\left(۲۴۰۰۰۰۰۰\ \text{cal.day}^{-۱}\right)\left(۰٫۰۶\right) = ۱۴۴۰۰۰۰\ \text{cal.day}^{-۱} = ۱۴۴۰\ \text{kcal.day}^{-۱}$$

۶. با توجه به مصرف انرژی در کشورهای مختلف (آمریکا بیش از ۳۵۰۰، آرژانتین بین ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰، مراکش بین ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰، هند بین ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ و تانزانیا کمتر از ۲۰۰۰ کیلوکالری در روز)، باید قبول کنیم که افراد زیادی در دنیا انرژی کمی دریافت می‌کنند تا متوسط برای هر نفر به رقم ۱۴۴۰ کیلوکالری در روز برسد. البته این رقم نیز خود یک رژیم گرسنگی است و تنها برای زنده ماندن میتواند کافی باشد و اگر قرار باشد همهٔ مردم دنیا ۱۴۴۰ کیلوکالری انرژی در روز دریافت کنند دیگر از فعالیت‌های فیزیکی، خلاقیت‌های فکری و تولید مثل خبری نخواهد بود.

۱-۲ منحنی‌های رشد گیاه

الف) اهمیت اندازه‌گیری رشد گیاه و رشد نمایی

به‌دلیل اینکه آب مهم‌ترین عامل فیزیکی خاک است که بر رشد گیاه تأثیر دارد، کمّی کردن رشد گیاه، برای تعیین اثرات تنش آبی اهمیت زیادی دارد. در آزمایش‌های مربوط به روابط آب-گیاه، برخی از معیارهای رشد گیاه (مانند ارتفاع، وزن ماده خشک) باید جمع‌آوری گردد. منحنی‌های رشد گیاه، روابط کمّی را نشان می‌دهند که ما برای فهم اصول اساسی روابط آب و گیاه به‌دنبال آن‌ها می‌باشیم. اگر بتوان معادلاتی برای این روابط استخراج کرد، آنگاه می‌توان رویدادهای آتی را پیش‌بینی نمود. معادلات مربوط به منحنی‌های رشد گیاه، برای کمّی کردن و پیش‌بینی رشد گیاه استفاده می‌شوند.

برای وارد شدن به بحث توابع تولید و منحنی‌های رشد گیاه، بهتر است بحث را از رشد یک باکتری نسبت به زمان آغاز کنیم زیرا در ابتدای طبقه‌بندی گیاهان و جانوران، باکتری‌ها جزء سلسلهٔ گیاهان به حساب می‌آمدند و در واقع گیاه‌شناسان بودند

که مطالعه روی باکتری‌ها را آغاز کردند. در شرایط ایده‌آل، یک سلول باکتری مانند اشیرشیاکولی در هر ۲۰ دقیقه یکبار، به دو قسمت تقسیم می‌شود. بنابراین اگر در دقیقهٔ صفر، یک باکتری داشته باشیم پس از ۲۰ دقیقه دو باکتری و پس از ۴۰ دقیقه ۴ باکتری و پس از ۶۰ دقیقه ۸ باکتری خواهیم داشت. با این روند اگر m دورهٔ ۲۰ دقیقه‌ای بگذرد، پس از زمان t=۲۰m دقیقه، به اندازهٔ ۲m باکتری خواهیم داشت که اگر به‌جای m مقدار $\frac{t}{۲۰}$ یا تعداد دوره‌ها را قرار دهیم تعداد باکتری‌ها برابر $۲^m = ۲^{\frac{t}{۲۰}}$ می‌گردد. بنابراین تعداد باکتری‌هایی که در زمان t وجود خواهد داشت (N) برابر است با:

$$N = ۲^{\frac{t}{۲۰}}$$

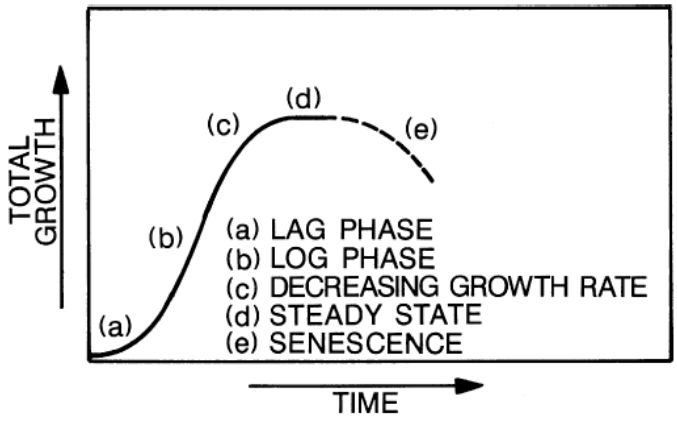
چون t در معادلهٔ بالا، به‌صورت توان ظاهر شده است این نوع منحنی‌های رشد را رشد نمایی یا توانی گویند. در ارتباط با رشد گیاهان کارلوس لینااوس (کارل فون لینه)[1] دانشمند گیاه‌شناس سوئدی، نشان داد که اگر از یک گیاه یکساله در هر سال فقط دو بذر به‌عنوان گیاه جدید به ثمر برسند، چنین گیاهی در طول ۲۰ سال یک میلیون بذر یا عامل تکثیر دیگر، تولید خواهد کرد. چون در گیاه مورد نظر لینه، دوره زمانی معادل یکسال است، برای مدت ۲۰ سال، معادلهٔ رشد به‌صورت $X = ۲^{۲۰}$ می‌باشد که با حل آن، مقدار X تقریباً برابر یک میلیون به‌دست می‌آید که منطبق با پیش‌بینی لینه است.

ب) منحنی رشد سیگموئیدی

منحنی S شکل یا سیگموئیدی، نوعی الگوی رشد است که برای نشان دادن رشد یک اندام یا کل گیاه و یا جمعیت گیاهان استفاده می‌شود (شکل ۱-۲). که این منحنی از ۵ قسمت مجزا تشکیل گردیده است: ۱- مرحلهٔ تأخیر اولیه که دورهٔ تغییرات داخلی برای شروع رشد می‌باشد. ۲- دورهٔ رشد سریع (لگاریتم سرعت رشد نسبت به زمان به‌صورت یک خط مستقیم است). ۳- مرحلهٔ سوم که سرعت رشد در آن به‌تدریج کاهش می‌یابد. ۴- دورهٔ چهارم مرحله‌ای است که گیاه به بلوغ کامل رسیده و رشد متوقف می‌گردد. ۵- مرحلهٔ آخر دوره‌ای است که مرگ گیاه یا اندام گیاهی فرا می‌رسد

1. Carolus Linnaeus (born Kal von Linne)

و پس از آن، دورهٔ جدیدی از رشد آغاز می‌گردد.



شکل ۱-۲. مراحل پنجگانهٔ منحنی رشد سیگموئیدی

ج) منحنی رشد بلاک من[1]

ازحدود سال ۱۹۰۰ میلادی، منحنی‌های رشد به‌منظور تجزیه و تحلیل رشد گیاهان، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از نظریه‌های مشهور دربارهٔ رشد گیاه، قانون بهرهٔ مرکب بلاک من می‌باشد.[2] وی روند رشد گیاه را مشابه پولی دانست که در بانک سپرده‌گذاری می‌شود. مقدار نهایی پول پس از یک مدت معین به سه عامل بستگی دارد:

۱. مقدار اولیهٔ پول

۲. نرخ بهره

۳. مدت زمانی که پول در بانک باقی می‌ماند.

بلاک‌من با مقایسهٔ این عوامل با گیاهان (۱. وزن بذر، ۲. نرخ رشد و ۳. طول دورهٔ رشد)، آن‌ها را در یک معادلهٔ نمایی با یکدیگر مرتبط ساخت:

$$W_1 = W_0 e^{rt}$$

که در این معادله: W_1 وزن نهایی، W_0 وزن اولیه، r نرخ رشد، t زمان و e مبنای

1. Blackman
2. compound interest law of Blackman

لگاریتم طبیعی ($e = ۲٫۷۱۸...$) می‌باشند.

معادلهٔ بلاک‌من، در مراحل ابتدایی رشد صادق است (مرحلهٔ دوم رشد در منحنی رشد سیگموئیدی). در مراحل رشد نهایی، سرعت نسبی کاهشی رشد، کاربرد این معادله را برای کل منحنی رشد غیرممکن می‌سازد. بلاک‌من برای رفع این مشکل، توصیه کرده است که متوسط سرعت یا نرخ رشد مراحل مختلف به‌عنوان پارامتر r در معادلهٔ فوق مورد استفاده قرار گیرد. وی این پارامتر را شاخص کارایی رشد گیاه[1] نامیده است.

معادلهٔ نمایی مشابه دیگری که‌هاموند و کرکهام[2] برای توصیف مراحل مختلف منحنی رشد سویا و ذرت مورد استفاده قرار دادند، به‌صورت زیر است:

$$W = W_{\circ} e^{r(t-t_{\circ})}$$

دراین معادله، W وزن گیاه در زمان t، $W_{\circ}$ وزن گیاه در زمان اولیه یا زمان قراردادی $t_{\circ}$، r، سرعت نسبی رشد و e مبنای لگاریتم طبیعی ($e = ۲٫۷۱۸...$) می‌باشند.

معادله‌های رشد گیاه نشان می‌دهند که می‌توان برای آنالیز کمّی رشد گیاه، از روابط ریاضی مختلفی استفاده نمود. این امر احتمالاً به دلیل آن است که رشد گیاه براساس قوانین شیمیایی و فیزیکی صورت می‌گیرد با استفاده از این معادله‌ها، می‌توان رشد گیاه را پیش‌بینی نمود.

سؤالات فصل اول

۱. براساس پیش‌بینی سازمان ملل متحد، در سال ۲۱۵۰ جمعیت دنیا رقمی بین ..... میلیارد نفر خواهد بود.

الف) ۱۰٫۸ و ۲۷ میلیارد نفر　　ب) ۳٫۶ و ۲۷ میلیارد نفر

ج) ۱۰٫۸ و ۳۶ میلیارد نفر　　د) ۳٫۶ و ۳۶ میلیارد نفر

۲. مهم‌ترین عامل فیزیکی خاک که بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارد، ..... می‌باشد.

الف) مقاومت مکانیکی　　ب) تهویه

ج) دما　　د) آب

---

1. Efficiency index
2. Hammond and Kirkham

۳. قانون ۲ یارد مربعی نشان دهنده چیست؟ در بهترین شرایط، مقدار انرژی غذایی قابل تولید از این سطح چقدر است؟

الف) سرانه زمین زراعی در دنیا- ۱۴۴۰ کیلوکالری در روز

ب) سرانه زمین زراعی در دنیا- ۳۳۴۰۰ کیلوکالری در روز

ج) سرانه زمین در دنیا- ۱۴۴۰ کیلوکالری در روز

د) سرانه زمین در دنیا- ۳۳۴۰۰ کیلوکالری در روز

۴. گیاهان می‌توانند حداکثر چند درصد از انرژی دریافتی ار خورشید را به انرژی شیمیایی تبدیل کنند.

الف) ۲ ب) ۴

ج) ۶ د) ۸

۵. معادلات مربوط به منحنی‌های رشد گیاه، برای ..... استفاده می‌شوند.

الف) کمی کردن و پیش‌بینی رشد گیاه ب) پیش‌بینی نیاز آبی گیاه

ج) پیش‌بینی شوری خاک د) پیش‌بینی انرژی مورد نیاز گیاه

۶. معادله بلاک من برای کدام مرحله رشد گیاه صادق است؟

الف) مرحله میانی ب) مرحله ابتدایی

ج) مرحله بلوغ د) مرحله مرگ

۷. در کدام‌یک از قسمت‌های منحنی رشد سیگموییدی، لگاریتم سرعت رشد نسبت به زمان به‌صورت یک خط مستقیم است؟

الف) مرحله تأخیر اولیه ب) مرحله سوم

ج) دوره رشد سریع د) مرحله آخر

فصل دوم

خصوصیات آب و محلول‌ها

اهداف کلی

۱. آشنایی با آب از نظر ساختمان، نحوهٔ پیوند مولکولی و خصوصیات مختلف آن (گرمای ویژه، گرمای تبخیر، چگالی و . . .).
۲. پی بردن به خواص آب‌هایی که به‌صورت محلول درآمده اند.
۳. آشنایی با قانون رائولت و همچنین رابطهٔ بین فشار اسمزی - غلظت محلول

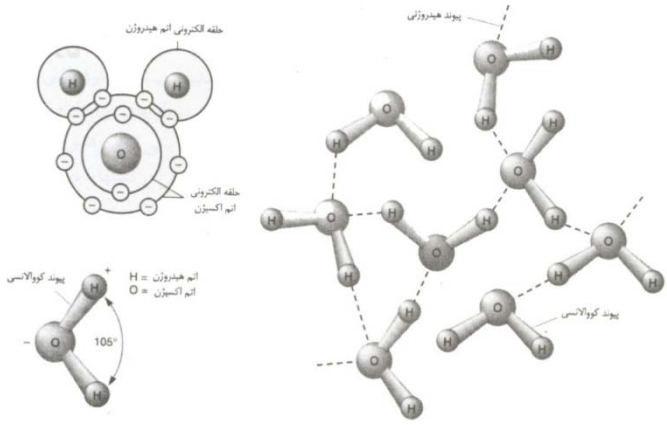
۲-۱ ساختمان آب

آب به عنوان یک منبع طبیعی محدود، منشاء و راز ماندگاری حیات در جهان است. حیات ابتدا در محیط آبی دریاها و اقیانوس‌ها شکل گرفت و به‌تدریج به مناطق خشک و خاکی انتقال یافت. البته در این مناطق نیز، تداوم حیات بدون وجود هوا و آب شیرین امکان‌پذیر نخواهد بود زیرا از یک سو بیش از ۷۵ درصد اندام موجودات زنده را آب تشکیل می‌دهد و از سوی دیگر سوخت و ساز و تبدیل مواد غذایی به انرژی، نیازمند مصرف مستمر آب است.

کرهٔ زمین را می‌توان کرهٔ آبی لقب داد زیرا قسمت اعظم آن را آب فرا گرفته است. طبق برخی منابع، حجم آب‌های کرهٔ زمین به۱٫۳۹ میلیارد کیلومترمکعب می‌رسد. ولی باید دانست که از کل آب موجود در جهان، تنها بخش بسیار کمی از آن (حدود ۲٫۵ درصد) شیرین است. بخش اعظم این آب شیرین، به‌صورت کلاهک‌های یخی در عرض‌های جغرافیایی بالا وجود دارد که با تکنولوژی امروزی، بهره‌برداری از آن اگر

غیرممکن نباشد، با هزینهٔ زیادی همراه خواهد بود و بنابراین غیر قابل دسترس است. حدود ۴ میلیون کیلومتر مکعب (معادل ۰٫۳ درصد کل آب موجود در جهان) آب شیرین است که قابل بهره‌برداری و مصرف می‌باشد. به بیان دیگر، جمعیت ۶ میلیارد نفری کنونی زمین، بیش از ۶ میلیون مترمکعب آب در اختیار ندارد.

برای آن‌که ماهیت آب در خاک و گیاهان را درک کنیم، لازم است که یک تصویر ذهنی از مولکول آب داشته باشیم. مولکول آب تنها از دو عنصر هیدروژن و یک عنصر اکسیژن ساخته شده و فرمول شیمیایی آن بسیار ساده است. طرز قرارگیری و ارتباط بین دو اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن به گونه‌ای است که اگر خط راستی از مرکز اتم‌های هیدروژن به اتم اکسیژن رسم کنیم، زاویهٔ بین این دو خط ۱۰۵ درجه می‌باشد (شکل ۲-۱). بدین ترتیب، اتم‌های هیدروژن موجود در یک طرف اتم اکسیژن، نسبت به طرف دیگر آن به یکدیگر نزدیکترند. از سوی دیگر، نیروی کششی که از هستهٔ اتم اکسیژن به هستهٔ اتم‌های هیدروژن وارد می‌شود، به‌دلیل بزرگی و سنگینی هستهٔ اکسیژن، به مراتب بیشتر از نیرویی است که از هستهٔ اتم‌های هیدروژن بر اتم اکسیژن وارد می‌شود. در اثر این کشش مداوم هستهٔ اکسیژن، مدار مشترک بین اکسیژن و هیدروژن‌ها به یکدیگر نزدیکتر شده و لذا قطبی که در آن، مولکول‌های آب هیدروژن‌ها به یکدیگر نزدیکترند قطب مثبت و طرف دیگر آن قطب منفی خواهد بود. در نتیجه آب به‌صورت مولکول دوقطبی در می‌آید. اجسامی که دارای مولکول دوقطبی هستند، در طبیعت با قدرت بیشتری در فعل و انفعالات شیمیایی عمل می‌کنند.

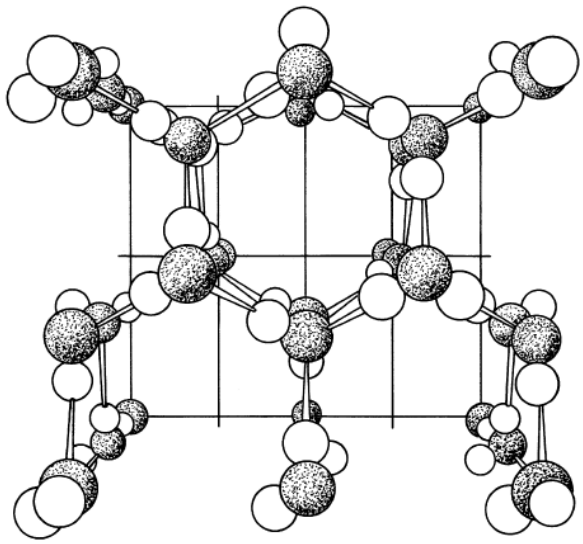


شکل ۲-۱. ساختمان مولکولی آب (سمت چپ) و طرز قرارگیری مولکـول هـای آب در کنار یکدیگر (سمت راست)

۲-۲ عوامل پیونددهندهٔ مولکول‌های آب به یکدیگر

الف) پیوند هیدروژنی

دو نوع نیروی جاذبه بین مولکول‌های آب وجود دارد: نیروی پیوند هیدروژنی و نیروی واندروالز-لاندن. پیوند هیدروژنی از ساختار الکتریکی مولکول‌های آب ناشی می‌شود که آن‌ها را به روش خاصی به همدیگر متصل می‌نماید. جفت و تک الکترون‌های منفی یک مولکول آب، سبب جذب پروتون یا سمت مثبت یک مولکول دیگر آب می‌شوند. بنابراین هر گوشه از چهار گوشهٔ مولکول چهاروجهی آب می‌تواند با استفاده از جاذبهٔ الکترواستاتیک، به چهار مولکول آب در محلول بچسبد (شکل ۲-۲). این نوع پیوند را پیوند هیدروژنی می‌نامند.



شکل ۲-۲. نحوهٔ ترکیب مولکول‌های آب با یکدیگر توسط پیوند هیدروژنی در ساختار مشبک یخ

پیوند هیدروژنی در پیوند مولکول‌های آب به یکدیگر اهمیت زیادی دارد. پیوندهای هیدروژنی، نیروی پیوندی در حدود ۱٫۳ تا ۴٫۵ کیلوکالری بر مول در آب دارند. تنها بخشی از پیوندهای هیدروژنی ساختمان آب، به‌وسیلهٔ گرما از بین می‌رود و در حدود ۷۰ درصد پیوندهای هیدروژنی موجود در یخ، در آب ۱۰۰ درجه سانتیگراد

به‌صورت دست نخورده باقی می‌مانند. در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد تقریباً همه پیوندهای هیدروژنی شکسته می‌شوند.

ب) نیروی واندروالز-لاندن[1]

نیروی واندروالز-لاندن، نیرویی است که بین مولکول های غیرقطبی خنثی وجود دارد و بنابراین به بار الکتریکی خالص بستگی ندارد. این نیرو اولین بار توسط واندروالز (فیزیکدان هلندی) معرفی گردید. لاندن از علم مکانیک کوانتوم، برای توصیف کمّی نیروی جاذبه واندروالز استفاده کرد. سهم این نیروی جاذبه در جذب مولکول های آب دقیقاً مشخص نیست ولی به نظر می‌رسد سهم اندکی در جذب مولکول های آب به یکدیگر داشته باشد.

۲-۳ برخی از خصوصیات آب

۲-۳-۱گرمای ویژه

یک ماده با وزن مولکولی مشابه با آب، در دمای معمولی باید به حالت گاز بوده و نقطهٔ ذوب آن زیر ۱۰۰- درجه سانتیگراد باشد. درحالی‌که آب در دمای معمولی به‌صورت مایع و نقطهٔ ذوب آن صفر درجه می‌باشد. آب بعد از آمونیاک مایع، بالاترین گرمای ویژه را داراست که دلیل آن، پیوند هیدروژنی گستردهٔ آب است. انرژی لازم برای شکستن پیوند هیدروژنی بین مولکول های آب، در سیال‌های دیگر مستقیما توسعه یافته و سبب حرکت مولکولی و تغییر درجه حرارت می‌شود. گرمای ویژهٔ آمونیاک، ۱۳ درصد بیشتر از آب است. واحد استاندارد حرارت یا کالری (۱۸٫۴ ژول)، برمبنای آب سنجیده می‌شود و آن عبارت است از مقدار انرژی که لازم است به یک گرم آب داده شود تا دمای آن از ۱۴٫۵ درجه سانتیگراد به ۱۵٫۵ درجه سانتیگراد برسد. این مقدار حرارت، همان گرمای ویژهٔ آب می‌باشد که به مراتب بیشتر از گرمای ویژهٔ سایر اجسام است.

با افزایش درجه حرارت، گرمای ویژهٔ آب تا ۳۵ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد ولی با افزایش بیشتر درجه حرارت، مقدار گرمای ویژه افزایش می‌یابد. بیشتر حیوانات،

1. Van der Waals-London

دمای بدن خود را در حدود ۳۶ درجه سانتیگراد ثابت نگه می‌دارند زیرا گرمای ویژهٔ آب در ۳۵ درجه سانتی‌گراد، حداقل (۴٫۱۷۷۹ ژول بر گرم بر درجه سانتی‌گراد) است.

بالا بودن گرمای ویژهٔ آب، موجب تثبیت درجه حرارت در محیط می‌گردد. یکنواختی درجه حرارت در جزایر و سواحلی که در مجاورت توده‌های بزرگ آب قرار گرفته‌اند نیز به همین دلیل می‌باشد. این موضوع از نظر کشاورزی و پوشش طبیعی بسیار با اهمیت است.

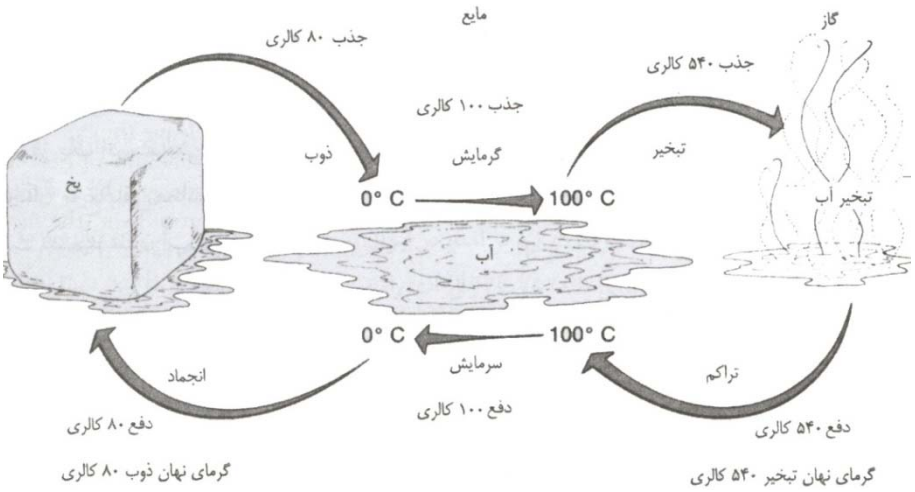
جدول ۲-۱. خواص فیزیکی آب در دماهای مختلف

Temperature (°C)	Density (g cm^{-3})	Surface tension (g s^{-2})	Dynamic viscosity (g cm^{-1} s^{-1}) × 10^{-2}	Heat of vaporization (cal g^{-1})	Specific heat (cal g^{-1}°C^{-1})	Thermal conductivity (cal cm^{-1} s^{-1}°C^{-1}) x 10^{-3}
−10	0.99794	...	...	603.0	1.02	...
−5	0.99918	76.4	...	...	...	...
0	0.99987	75.6	1.7921	597.3	1.0074	1.34
4	1.00000	...	...	...	...	...
5	0.99999	74.8	1.5188	594.5	1.0037	1.37
10	0.99973	74.2	1.3077	591.7	1.0013	1.40
15	0.99913	73.4	1.1404	588.9	0.9998	1.42
20	0.99823	72.7	1.0050	586.0	0.9988	1.44
25	0.99708	71.9	0.8937	583.2	0.9983	1.46
30	0.99568	71.1	0.8007	580.4	0.9980	1.48
35	0.99406	70.3	0.7225	577.6	0.9979	1.50
40	0.99225	69.5	0.6560	574.7	0.9980	1.51
45	0.99024	68.7	0.5988	571.9	0.9982	1.53
50	0.98807	67.9	0.5494	569.0	0.9985	1.54

۲-۳-۲ گرمای تبخیر

گرمای تبخیر عبارت است از مقدار گرمای مورد نیاز برای اینکه یک گرم مایع تبدیل به بخار شود بدون آنکه دمای مایع افزایش یابد. واحد گرمای تبخیر، کالری بر گرم می‌باشد و مقادیر آن برای آب، در جدول ۲-۱ داده شده است. آب دارای بالاترین گرمای تبخیر می‌باشد به‌طوری‌که برای تبخیر هر گرم آب با دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد، ۵۴۰ کالری گرما مورد نیاز است. گرمای تبخیر، یک گرمای نهان می‌باشد. گرمای نهان، گرمای اضافی مورد نیاز برای تغییر حالت ماده از جامد به مایع در نقطهٔ ذوب آن یا از مایع به گاز در نقطهٔ جوش آن، بعد از اینکه دما به این نقاط رسید، می‌باشد. نکتهٔ مهم این است که گرمای نهان هیچ ارتباطی با تغییر دما ندارد و فقط تغییر حالت، مورد نظر می‌باشد. به دلیل بالا بودن گرمای تبخیر آب، عمل تبخیر اثر خنک‌کنندگی قابل‌توجهی دارد و میعان گرمازاست. اثر خنک‌کنندگی تبخیر در مناطق

نیمه‌خشک اهمیت زیادی دارد. در شکل ۳-۳ فرایند مربوط به تغییر حالات آب نشان داده شد.



شکل ۲-۳. تبدیل حالات مختلف آب به یکدیگر، گرفتن و از دست دادن انرژی در این تغییر حالات

۲-۳-۳ گرمای ذوب

گرمای ذوب آب، به‌طور غیرعادی بالاست. گرمای ذوب، مقدار گرمای مورد نیاز برای تغییر یک گرم جامد به مایع بدون تغییر دما می‌باشد. این گرما نیز نوعی گرمای نهان است و گاه، گرمای نهان ذوب نیز گفته می‌شود. مقدار آن برای آب ثابت است (۸۰ کالری بر گرم) زیرا دمای انجماد آب فقط یک عدد و آن‌هم صفر درجه سانتیگراد می‌باشد.

گرمای ذوب زیاد آب، برای کنترل یخبندان کاربرد دارد. آب آبیاری استخراجی از زیرزمین غالباً درجه حرارت یکنواختی دارد. به‌عنوان مثال اگر درجه حرارت آب زیرزمینی ۱۲ درجه سانتیگراد باشد، هر گرم آن می‌تواند ۱۲ کالری گرما به هوایی که با آن تماس می‌یابد، وارد نماید. با این وجود، این اثر حرارتی در مقایسه با مقدار گرمای آزاد شده در زمان یخ زدن (۸۰ کالری بر گرم) کوچک می‌باشد. آب آبیاری

می‌تواند در فرایند خنک شدن و یخ زدن، بیش از ۹۰ کالری بر گرم گرما آزاد نماید (۱۲ به‌علاوهٔ ۸۰ کالری بر گرم).

آبپاشی، استفادهٔ مؤثرتر از آب آبیاری برای محافظت از یخبندان می‌باشد. با شروع درجه حرارت یخبندان، آبپاشی گیاهان آغاز می‌گردد. با یخ زدن آب در اندام‌های گیاه، مقداری گرما آزاد می‌گردد. با طولانی شدن یخ‌زدگی، دمای یخ در صفر درجه سانتیگراد باقی خواهد ماند. آبپاشی باید تا زمانی که دمای هوا به قدری بالا رود که شروع به ذوب یخ‌ها نماید ادامه یابد. اگر آبپاشی زودتر قطع شود، دمای اندام‌های گیاه، یخ را ذوب نموده و امکان خسارت یخبندان وجود خواهد داشت.

۲-۳-۴ هدایت گرما

آب در مقایسه با سایر مایعات و جامدات غیرفلزی،هادی حرارتی خوبی می‌باشد ولی در مقایسه با فلزات، هادی ضعیف است. هدایت حرارتی عبارت است از مقدار گرما برحسب کالری که در هر ثانیه از یک صفحه به ضخامت یک سانتی متر در امتداد سطحی معادل یک سانتی‌متر مربع منتقل می‌شود در شرایطی که اختلاف دما یک درجه سانتیگراد باشد. واحد هدایت حرارتی، کالری بر سانتی‌متر ثانیه درجه سانتیگراد می‌باشد. مقادیر هدایت حرارتی آب در دماهای مختلف در جدول ۲-۱ ارائه گردیده است.

سبز شدن گیاهان در بهار می‌تواند به هدایت حرارتی بستگی داشته باشد. در برخی موارد مدیریت سطح خاک، از یخ‌زدن گیاهان ردیفی جلوگیری می‌نماید. در بهار سال ۱۹۹۳ تعدادی از کشاورزان ایالت کانزاس امریکا گزارش کردند که مزارع ذرت آن‌ها دچار یخ‌زدگی گردیده است درحالی‌که مزارع کشت نشدهٔ اطراف چنین مشکلی نداشته‌اند. در این مورد، دست خورده شدن خاک به‌واسطهٔ عملیات کشت، هدایت حرارتی را کاهش داده و از آزاد شدن گرمای ذخیره شده در خاک به طرف سطح زمین جلوگیری کرده است. اگر کانال‌های پیوستهٔ آب در داخل خاک تخریب شوند، انتقال گرما توسط جریان روبه بالای آب از اعماق پایین‌تر، کاهش می‌یابد. گرمای ذخیره شده در لایه‌های داخلی پروفیل خاک در اوایل بهار می‌تواند به سمت سطح خاک سردتر حرکت نماید.

۲-۳-۵ شفافیت و تابش مرئی

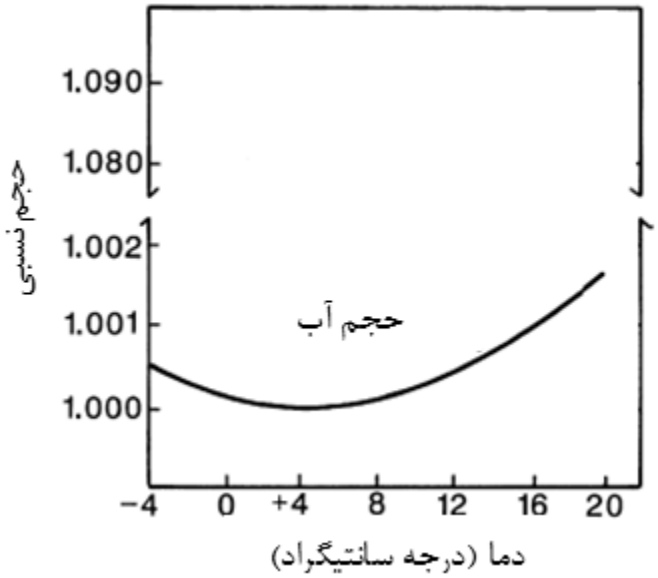
تابش نور مرئی (طول موج بین ۰٫۳۹ تا ۰٫۷۸ میکرون) از آب عبور می‌کند. نفوذ نور به داخل آب، امکان فتوسنتز و رشد را برای جلبک‌ها تا اعماق قابل توجهی فراهم می‌سازد.

۲-۳-۶ تیرگی برای تابش مادون قرمز(Opaqueness to Infrared Radiation)

آب، طول موج‌های بلند در محدودهٔ مادون قرمز را جذب می‌کند (همانند جسم تیره عمل می‌نماید). به همین دلیل است که صافی‌های آبی، جذب‌کنندهٔ خوبی برای حرارت به‌شمار می‌آیند.

۲-۳-۷ چگالی یا جرم مخصوص آب

به‌طورکلی، چگالی به‌عنوان جرم بر واحد حجم تعریف می‌شود و چگالی آب معمولاً برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب بیان می‌گردد. آب دارای جرم مخصوص بالایی است و برخلاف تصور، در حالت انجماد دارای بالاترین جرم مخصوص نمی‌باشد بلکه در دمای ۴ درجه، حداکثر جرم مخصوص را دارد (یک گرم بر سانتی‌متر مکعب). بدین‌ترتیب که اگر آب را حرارت دهیم چگالی آن به‌تدریج افزایش پیدا می‌کند و در دمای ۴ درجه، به حداکثر می‌رسد و سپس دوباره کاهش می‌یابد. لذا دمای آب کف دریاها در مناطق سردسیر از ۴ درجه پایین‌تر نخواهد رفت و این امر، تداوم حیات موجودات آبزی را در این اکوسیستم‌ها میسر می‌سازد. زیرا امکان زندگی در آب با دمای ۴ درجه، برای آن‌ها فراهم است. در حالت انجماد، حجم آب افزایش می‌یابد به‌طوری‌که حجم یخ، ۹ درصد بیشتر از آبی می‌باشد که از آن ایجاد شده است (شکل ۲-۴). این خاصیت، علت شناور بودن قطعات یخ و ترکیدن لوله‌ها و رادیاتورها را هنگامی‌که آب داخل آن‌ها یخ می‌زند روشن می‌سازد. در ضمن، چنانچه یخ‌ها در آب فرو می‌رفتند، توده‌های آب مناطق سرد جهان همواره از یخ پر بودند که این پدیده، اثرات فجیعی بر اقلیم و موجودات آبزی بجا می‌گذاشت.



شکل ۲-۴. تغییر حجم آب در اثر تغییر دما: حداقل حجم آب، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد است و در دمای کمتر از آن، به‌دلیل قرار گرفتن تعداد بیشتری از مولکول‌ها در ساختار مشبک، حجم آب کمی افزایش می‌یابد. با یخ زدن آب، حجم آن به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد زیرا کلیه مولکول‌های آب، در ساختار مشبک و به فاصلهٔ زیادی از هم قرار می‌گیرند. در دمای بالاتر از ۴ درجه سانتی‌گراد، به‌دلیل آشفتگی حرارتی مولکول‌های آب، حجم آب افزایش می‌یابد.

۲-۳-۸ یونیزاسیون و اسیدی یا بازی بودن آب (pH)

کم یا زیاد شدنpH، واکنش شیمیایی آب را تضعیف یا تشدید می‌کند به‌طوری‌که بعضی از فعل و انفعالات شیمیایی، تنها در محیط‌های مشخصی از pH صورت می‌گیرد. به همین دلیل میزانpH، نشان‌دهندهٔ محیطی است که در آن واکنش شیمیایی انجام می‌شود.

قدرت یونیزه شدن آب بسیار کم است و از هر ۵۵۵ میلیون مولکول آب، تنها یک مولکول آن تجزیه می‌شود. به عبارت دیگر، آب عملا تجزیه‌ناپذیر است. در این مورد، چون یون هیدروژن فاقد پروتون است و نمی‌تواند به تنهایی وجود داشته باشد لذا با مولکول‌های آب ترکیب شده و یون هیدرونیوم را ایجاد می‌کند. از آنجا که آب

به‌مقدار کم یونیزه می‌شود، ثابت دی‌الکتریک آن بالا بوده و به همین دلیل، به‌عنوان عمده‌ترین حلال برای اجسام مطرح است.

۲-۳-۹ ثابت دی‌الکتریک

از آنجا که آب یک جسم دو قطبی است، بنابراین دارای خاصیت الکتریکی می‌باشد. ضریب دی‌الکتریک هر ماده، ظرفیت آن را برای خنثی کردن نیروی جاذبهٔ بین بارهای الکتریکی مشخص می‌کند. مثلاً وقتی کلرید سدیم درآب حل می‌شود، مولکول‌های آب یون‌های مثبت سدیم و منفی کلر را از یکدیگر دور نگه می‌دارند و نیروی جاذبهٔ بین یون‌های کلر و سدیم به کمتر از یک درصد مقدار اولیه تقلیل می‌یابد. برای اندازه‌گیری این خاصیت آب، ابتدا ظرفیت یک خازن الکتریکی را در خلاء اندازه‌گیری نموده و سپس با استفاده از آب در بین صفحات ذخیره کننده، ظرفیت آن مجدداً تعیین می‌شود.

$$E = \frac{C_v}{C_w} \qquad (۱-۲)$$

در این رابطه: C_v ظرفیت الکتریکی در خلاء، C_w ظرفیت الکتریکی با آب، E ظرفیت دی‌الکتریک آب می‌باشند.

مقدار ضریب دی‌الکتریک آب حدود ۸۰ است در نتیجه آب عایق خوبی است. البته اگر ما در آب بایستیم و انگشت خود را در خروجی الکتریکی وارد نماییم، دچار برق‌گرفتگی خواهیم شد. دلیل این امر آن است که آب به‌صورت خالص نیست و مقداری نمک در آن وجود دارد. بنابراین زمانی‌که گفته می‌شود آب دی‌الکتریک خوبی است، منظور آب خالص است.

۲-۳-۱۰ آب به‌عنوان یک حلال

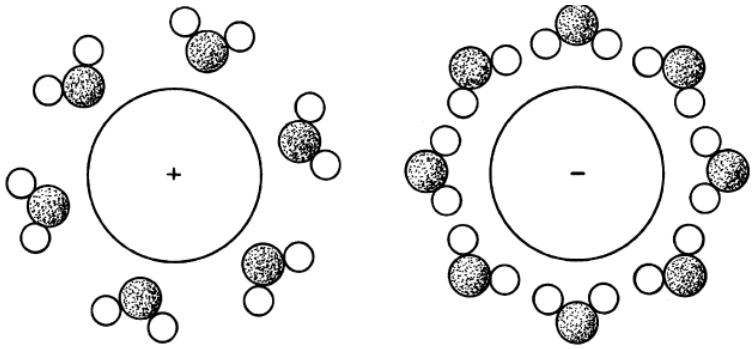
آب به‌دلایل زیر، حلال خوبی است:

۱. آب یک جسم دوقطبی است که قطب منفی آن، جذب قطب مثبت جسم و قطب مثبت آن، جذب قطب منفی جسم محلول در آب می‌شود (شکل ۲-۵).

۲. ضریب دی‌الکتریک آب، بالا است (۸۰) زیرا برای از بین بردن پیوند هیدروژنیف انرژی قابل ملاحظه‌ای مورد نیاز است. این امر سبب می‌شود که جذب الکتریکی

بین یون‌های محلول، کاهش یابد. پس از حل شدن جسم در آب، اجتماع یون‌ها به دشواری صورت می‌گیرد.

۳. پیوند هیدروژنی مولکول‌های آب با سایر اجسام، باعث پیدایش میل ترکیبی فراوان آن با ترکیبات مختلف می‌شود.



شکل ۲-۵. نحوه قرارگیری مولکول های آب در پوستهٔ اطراف یون‌ها: این پوسته‌ها، سبب جداشدن یون‌های دارای بار مخالف شده و آن‌ها را قادر می‌سازند تا به صورت محلول وجود داشته باشند. آن‌ها همچنین ساختمان معمول آب را تخریب نموده و حجم آن را اندکی افزایش می‌دهند.

آب برای بسیاری از غیرالکترولیت‌ها نیز حلال خوبی است زیرا با اکسیژن گروه کربونیل‌ها و با ازت گروه آمینو، پیوند هیدروژنی برقرار می‌کند.

۲-۳-۱۱ جذب سطحی

آب می‌تواند با سطوح اجسامی مانند کانی‌های رس، خاک، سلولز، مولکول‌های پروتئین و بسیاری اشیاء دیگر ترکیب شده و پیوندهای قوی برقرار کرده و به اصطلاح جذب آن‌ها شود، یعنی آن‌ها را خیس می‌کند. این امر، یکی از خصوصیات مهم آب در رابطه با خاک و گیاه است که در تئوری چسندگی، اهمیت آن مشخص می‌گردد.

۲-۳-۱۲ گرانروی یا ویسکوزیته[1]

آب گرانروی بالایی دارد، یعنی حرکت یک لایهٔ آب روی لایهٔ دیگر، با مقاومت همراه

1. viscositeh

است. کلیهٔ سیالات، مقاومت معینی در برابر تغییر شکل نشان می‌دهند و بیشتر جامدات، در برابر نیروهایی که تمایل به ایجاد تغییر در شکل آن‌ها دارند، به‌تدریج تسلیم می‌شوند. این خاصیت که یک نوع اصطکاک داخلی است، ویسکوزیته نامیده می‌شود و برحسب دین ثانیه بر سانتی‌متر مربع یا پواز[1] بیان می‌گردد. گرانروی مایعات به‌علت نیروهای بین‌مولکولی مایع می‌باشد، یعنی هرچه مایعی دارای نیروی بین‌مولکولی قوی‌تری باشد در برابر تنش برشی، مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال در یک دمای معین، گرانروی روغن بیشتر از گرانروی آب می‌باشد. در جدول ۲-۱، مقادیر ویسکوزیتهٔ آب برحسب گرم بر سانتی‌متر بر ثانیه (معادل دین ثانیه بر سانتی‌متر مربع) در دماهای مختلف ارائه گردیده است.

۲-۳-۱۳ کشش سطحی

به‌دلیل فراوان بودن نیروهای چسبندگی داخلی بین مولکول‌های آب، کشش سطحی آب در مقایسه با بسیاری از مایعات بیشتر است. کشش سطحی زیاد آب، عامل مهمی جهت صعود شیره (آب) از آوندهاست (تئوری چسبندگی). تئوری چسبندگی، فقط یک تئوری است ولی به‌نظر می‌رسد که بهترین توصیف برای بالارفتن آب در گیاهان باشد. کشش سطحی، برحسب واحدهای نیرو در واحد طول بیان می‌گردد. جدول ۲-۱، نشان‌دهندهٔ مقادیر کشش سطحی آب در درجه حرارت‌های مختلف می‌باشد. لازم به ذکر است که واحد مقادیر کشش سطحی ارائه شده در جدول ۲-۱، گرم بر مجذور ثانیه است که معادل دین بر سانتی‌متر می‌باشد.

$$\begin{aligned} &F = ma \\ &1\,dyne = 1\,gram \times 1\,cm/s^2 \\ &Gram/s^2 = dyne/cm \end{aligned} \qquad (۲-۲)$$

اصطلاح کشش سطحی (surface tension) را نباید با تنش (tension) اشتباه گرفت. کشش سطحی یا ضریب کشش سطحی، انرژی در واحد سطح، معادل با نیرو در واحد طول است درحالی‌که تنش، نیرو در واحد سطح می‌باشد. کشش سطحی را با علامت سیگما (σ) نشان می‌دهند.

---

1. poise

$$\sigma = \frac{\text{انرژی}}{\text{مساحت}} = \frac{\text{(فاصله) (نیرو)}}{\text{مساحت}} \qquad (۳-۲)$$

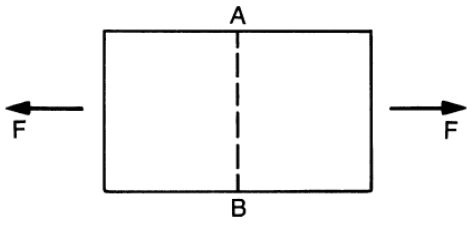
یا

$$\sigma = \frac{\text{نیرو}}{\text{طول}} \qquad (۴-۲)$$

کشش سطحی را می‌توان با نیرویی مقایسه کرد که بر لبه‌های مقابل یک ورقهٔ کاغذ وارد می‌شود. در شکل ۲-۶، نیروی F زمانی که بر طول AB تقسیم می‌شود، حاصل ضریب کشش سطحی (σ) است که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma = \frac{F}{(۲AB)} \qquad (۵-۲)$$

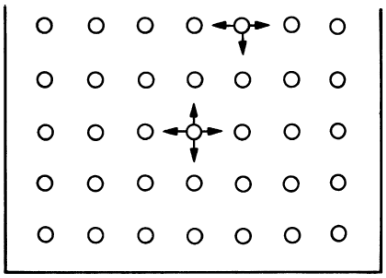
در رابطهٔ فوق، ضریب ۲ در مخرج کسر به این دلیل استفاده شده است که ورقهٔ کاغذ حتی اگر نازک باشد، دارای دو سطح بالایی و پایینی می‌باشد.



شکل ۲-۶. کشش سطحی در یک صفحه کاغذ

یک مولکول در داخل یک سیال (شکل ۲-۷)، به‌طور مساوی از جهات مختلف تحت کشش می‌باشد. ولی مولکولی که در سطح سیال قرار دارد چون مولکولی در بالای آن وجود ندارد که آن را به سمت خود بکشد، برآیند نیروهای جذب کننده، نیرویی خواهد بود که آن را به سمت داخل سیال می‌کشد. بنابراین، تمایل مولکول‌های سطحی برای حرکت به سمت داخل، بیشتر از تمایل مولکول‌های داخلی برای حرکت به سطح می‌باشد. نتیجه این است که تودهٔ مایع، تمایل دارد که سطح خود را به حداقل برساند. یک مولکول در سطح مایع، تحت تأثیر جاذبهٔ مولکولی (cohesion) با نیرویی عمود بر سطح، به سمت داخل کشیده می‌شود. بنابراین برای حرکت مولکول‌ها به

طرف سطح، باید کاری در خلاف جهت این نیروها انجام شود یعنی مولکول‌های سطح مایع نسبت به مولکول‌های داخلی، دارای انرژی بیشتری می‌باشند.



شکل ۲-۷. تئوری لاپلاس در مورد کشش سطحی

این تمایل به کاهش سطح، اغلب در خلاف جهت نیروهای خارجی وارد بر تودهٔ سیال مانند نیروی ثقل یا نیروهای (adhesive forces) بین آب و مواد دیگر می‌باشد. بنابراین سطح واقعی یک تودهٔ مایع ممکن است حداقل مطلق نباشد، بلکه حداقلی باشد که سطح مایع با توجه به شرایط پیدا کرده است.

ضریب کشش سطحی، برحسب نیرو در واحد طول بیان می‌شود. نیروی مورد نیاز برای اینکه سیمی به‌طول L و ضریب کشش سطحی σ که به‌صورت افقی روی سطح سیال قرار دارد به اندازهٔ d از سطح سیال به بیرون کشیده شود (ولی هنوز به ورقهٔ آب چسبیده باشد، شکل ۲-۸)، به طول سیم بستگی دارد:

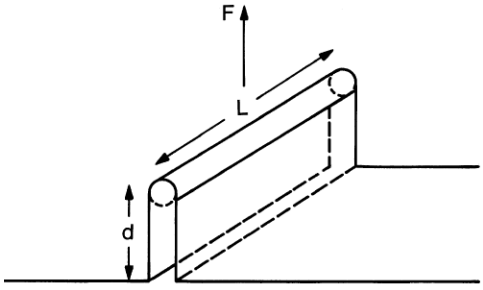
$$F = ۲(\sigma L) \qquad (۸-۲)$$

وارد کردن عدد ۲ در سمت راست این معادله، به این دلیل است که کشش سطحی در دو طرف سیم عمل می‌کند (باید توجه شود که سیم به شکل دایره‌ای است و آب از دو طرف به آن چسبیده است). مقدار کاری (W) که لازم است در مقابل نیروهای کشش سطحی انجام شود تا سیم به فاصلهٔ d از سیال قرار گیرد برابر است با:

$$W = f.d \qquad (۹-۲)$$

با توجه به روابط ۲-۸ و ۲-۹ داریم:

$$W = \sigma(۲\ Ld) \quad or \quad \sigma = \frac{W}{(۲\ Ld)} \tag{۱۰-۲}$$



شکل ۲-۸ . بیرون کشیدن یک سیم نازک از سطح مایع و اعمال کشش سطحی از دو طرف سیم

کشش سطحی، سبب بالا رفتن یا پایین آمدن مایعات در لوله‌های موئین می‌شود. برای مرتبط ساختن صعود آب در خاک به صعود آب در لوله‌های موئین، نیاز به فهم صعود آب در لوله‌های موئین داریم. معادلهٔ مربوط به ارتفاع صعود آب (h) در لولهٔ موئین به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$h = \frac{(۲\sigma \cos\alpha)}{(r\rho g)} \tag{۱۱-۲}$$

در این رابطه؛ σ کشش سطحی مایع، r شعاع لوله موئین، ρ چگالی سیال، α زاویه تماس بین مایع و لوله (زاویه خیس‌شدگی) و g شتاب ثقل می‌باشد. برای اثبات این معادله، به شکل ۲-۹ توجه کنید. سطح مایع در داخل لوله، بالاتر از سطح مایع خارجی می‌باشد. نیروهای عمودی (رو به بالا یا پایین) مؤثر بر مایع، باید در تعادل باشند. نیروی رو به پایین، وزن مایع است و به‌صورت w=mg نشان داده می‌شود که m جرم جسم و g شتاب ثقل می‌باشد.

وزن مایع داخل لوله = وزن واحد حجم × حجم (۱۲-۲)

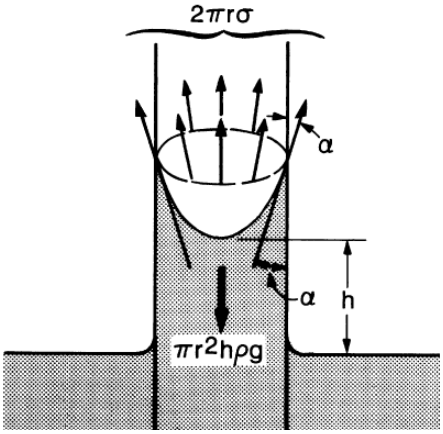
$$= \pi r^{۲} h \times \frac{mg}{V} = \pi r^{۲} h \times (\frac{m}{v})g = \pi r^{۲} h\rho g \tag{۱۳-۲}$$

نیروی رو به بالا، به علت کشش سطحی می‌باشد. همان‌طورکه اشاره شد، کشش سطحی به‌صورت نیرو در واحد طول نشان داده می‌شود که طول لوله، محیط آن ($۲\pi r$) است. با توجه به اینکه مؤلفهٔ عمودی نیروی کشش سطحی مورد نظر می‌باشد، مقدار $۲\pi r$ باید در $\cos\alpha$ ضرب گردد. در نتیجه نیروی رو به بالا به‌صورت $۲\pi r\sigma\cos\alpha$ است. در حالت تعادل نیروهای عمودی داریم:

نیروی رو به پایین= نیروی رو به بالا (۱۴-۲)

$$۲\pi r\sigma\cos\alpha = \pi r^{۲} h\rho g \qquad (۱۵-۲)$$

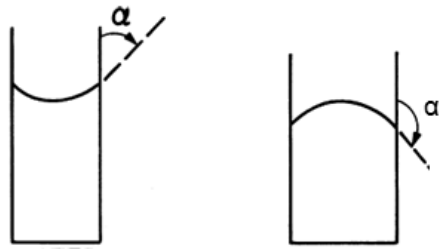
$$h = \frac{(۲\sigma\cos\alpha)}{(r\rho g)} \qquad (۱۶-۲)$$



شکل ۲-۹. صعود سیال در لولهٔ موئین

سطح هلالی شکل در لولهٔ موئین می‌تواند به‌صورت محدب (convex) یا مقعر (concave) باشد. در شکل ۲-۱۰ مشاهده می‌شود که سطح جیوه در داخل لولهٔ شیشه‌ای به‌صورت محدب و سطح آب در داخل لوله، به شکل مقعر در آمده است. زاویه تماس جیوه با جدار شیشه حدود ۱۳۰ تا ۱۴۰ درجه می‌باشد. زاویه تماس آب با ذرات خاک، نزدیک به صفر است بنابراین در معادلهٔ مربوط به صعود آب در لولهٔ

موئین، می‌توانیم به‌جای α، صفر قرار دهیم. با این وجود در خاک‌های بسیار دفع کننده (highly repellent)، زاویه تماس بزرگ خواهد بود.



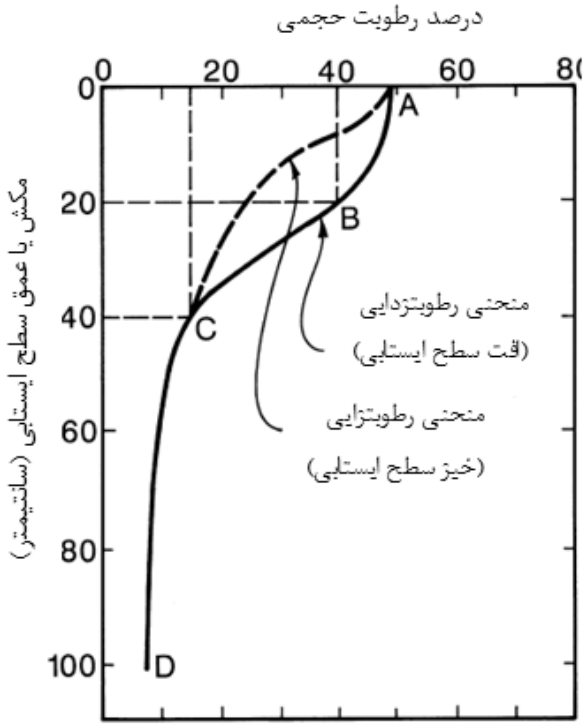
شکل ۲-۱۰. زاویه تماس مایع با جدار لوله (آب در سمت چپ و جیوه در سمت راست)

۲-۴ صعود و نزول آب در منافذ خاک

به‌خاطر جذب سطحی (adhesion) آب به سطوح دیگر و به علت پدیدهٔ مویینگی (capillarity)، آب جذب منافذ خاک می‌شود. کشش سطحی بالا و پایین رفتن آب در لوله‌های موئین، خاک را کنترل می‌کند. در قسمت‌های قبل، در مورد کشش سطحی و ارتفاع صعود آب در لوله‌های موئین بحث شد. در این بخش، در مورد صعود و نزول آب در منافذ خاک (لوله‌های موئین) و نحوهٔ تأثیر صعود و نزول آب بر منحنی مشخصهٔ رطوبتی خاک، بحث می‌گردد. تفاوتی که لوله‌های موئین شیشه‌ای با منافذ خاک دارند این است که منافذ خاک، قطر یکنواخت ندارند لذا یک لولهٔ منفذی ممکن است در قسمتی باریک و در قسمت دیگر گشاد و حفره‌ای باشد. این امر سبب می‌شود که پر و خالی شدن منافذ خاک از آب، به همان سادگی لوله‌های شیشه‌ای نباشد.

اگر روند کاهش رطوبت خاک از یک نمونه خاک اشباع، با افزایش تدریجی مکش دنبال گردد و نتایج حاصله در یک محور مختصات به گونه‌ای رسم گردد که محورxها نشان‌دهندهٔ رطوبت خاک (درصد رطوبت حجمی باقیمانده در خاک) و محوریها بیانگر بار مکش (با اعداد مثبت) یا پتانسیل ماتریک (با اعداد منفی) باشد، منحنی حاصله را در اصطلاح، منحنی مشخصهٔ رطوبتی خاک می‌گویند (ABCD در شکل ۲-۱۱) درصد رطوبت مربوط به این منحنی ممکن است براساس وزن خشک نمونه باشد اما در کارهای زهکشی، منحنی مشخصهٔ رطوبتی زمانی مفیدتر خواهد بود

که رطوبت به‌صورت حجمی بیان شود زیرا می‌توان عمق آب آبیاری مورد نیاز برای پر کردن مجدد رطوبت خاک در نمونه را با استفاده از منحنی مشخصه به‌دست آورد. به‌عنوان مثال، مقدار رطوبت حجمی ۳۰ درصد در حالت اشباع، به این معنی است که برای یک لایه خاک خشک به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر، عمق آب آبیاری باید ۳ سانتی‌متر باشد تا لایه خاک ۱۰ سانتی‌متری را اشباع نماید.



شکل ۲-۱۱. یک نمونه منحنی مشخصهٔ رطوبتی برای خاک لومی

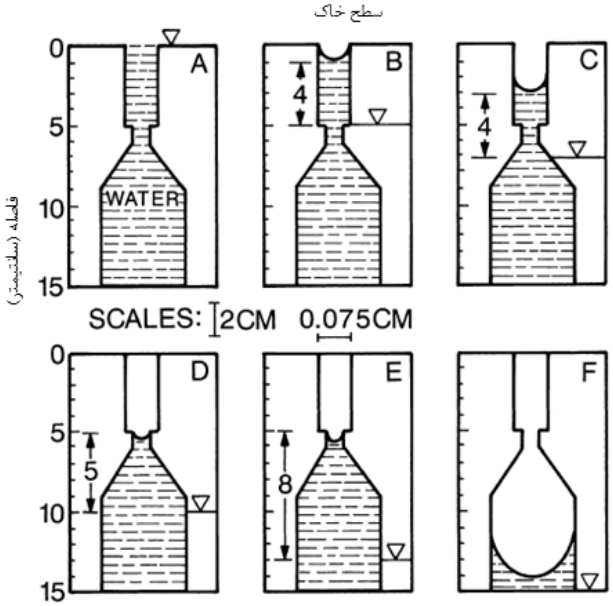
با توجه به شکل ۲-۱۱، اگر سطح ایستابی منطبق با سطح خاک باشد، خاک اشباع بوده و میزان رطوبت حجمی در سطح خاک ۵۰ درصد (نقطه A) خواهد بود. اگر سطح ایستابی به اندازهٔ ۲۰ سانتی‌متر پایین آورده شود، بخشی از منافذ خاک به‌دلیل تنش، وارده قسمتی از رطوبت خود را از دست داده و رطوبت خاک سطحی به ۴۰ درصد (نقطه B) می‌رسد. به همین ترتیب با نزول سطح ایستابی به اعماق ۴۰ (نقطه C)

و ۱۰۰ سانتی‌متر (نقطه D)، رطوبت خاک سطحی به ترتیب به ۱۵ و ۸ درصد می‌رسد. اگر سطح ایستابی بعد از اینکه به عمق ۴۰ سانتی‌متری رسید، مجدداً به‌تدریج تا سطح خاک بالا بیاید، قاعدتاً باید منحنی برگشت برای مرطوب شدن همان مسیر اولیه را طی کند ولی مشاهده می‌شود که به‌جای آن، مسیری که با خط چین مشخص شده است طی می‌شود (در شکا ۲-۱۱، درصد رطوبت خاک در مکش‌های مختلف مطابق با خط چین خواهد شد) عدم قرارگیری منحنی برگشت روی منحنی اولیه را اصطلاحاً پسماند (hysteresis) می‌نامند. این پدیده که اکثراً در هنگام آبیاری (مرطوب شدن خاک) و زهکشی (خشک کردن خاک) به‌وقوع می‌پیوندد، به‌علت محبوس شدن هوا در برخی منافذ خاک می‌باشد. هر چند پدیدهٔ پسماند، در بسیاری از پدیده‌های فیزیکی قابل مشاهده بوده و دلایل متعددی برای آن ذکر می‌شود، اما در مورد خاک مهم‌ترین دلیل پسماند این است که اولاً در یک منفذ مشخص، قطر آن در نقاط مختلف متفاوت بوده و لذا اگر سطح آب در نقاط مختلف لولهٔ منفذی به یک اندازهٔ معین پایین یا بالا برود، تخلیه یا پر شدن آن منفذ از آب متفاوت خواهد بود. ثانیاً، منافذ مختلف مشابه نیستند.

از آنجا که پسماند به سیستم فیزیکی مرتبط است، منحنی پسماند تکرارپذیر است (به‌عنوان مثال، منحنی‌های نشان داده شده در شکل ۲-۱۱ برای یک خاک لومی). استفاده از این منحنی، برای توصیف سیستم بیولوژیکی باید با احتیاط صورت گیرد. برای نمونه، منحنی‌هایی که پتانسیل آب برگ را با تبخیر و تعرق مرتبط می‌کنند و هیسترتیک (hysteretic) نامیده می‌شوند قابل تکرار نمی‌باشند و به عوامل بیوفیزیکی مانند بسته بودن روزنه‌ها بستگی دارند.

اگر خاک تا سطح آن کاملاً اشباع بوده و توسط یک لایهٔ نازک آب پوشیده شده باشد، هیچ مکشی در منافذ خاک وجود ندارد. اگر سطح ایستابی از سطح خاک پایین‌تر رود، مکش در منافذ خاک پدیدار می‌شود. اگر قطر منافذ یکسان باشد، آن‌ها زهکشی خواهند شد و نزول سطح آب در آن‌ها مساوی میزان افت سطح ایستابی خواهد بود. حداکثر مقدار مکشی که از طریق نزول سطح ایستابی، بر منافذ سطح خاک وارد می‌شود برابر ρwgh می‌باشد که h عمق سطح ایستابی (فاصله سطح ایستابی تا سطح خاک) می‌باشد. اگر قطر منفذ خیلی بزرگ‌تر از حدی باشد که بتواند این مکش را تحمل کند، این منفذ در معرض مکش حداکثر قرار نخواهد گرفت.

با این وجود، منافذ خاک دارای قطر یکسانی نمی‌باشند. در شکل ۲-۱۲، نحوهٔ عکس‌العمل منافذ دارای اندازه‌های مختلف، نسبت به افت سطح ایستابی نشان داده شده است. عمق خاک و طول مسیر هر منفذ، در حالت‌های مختلف ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به ارتفاع‌های صعود موئینگی نشان داده شده در شکل مذکور، قطر نزدیک‌ترین قسمت لوله به سطح، ۰٫۰۷۵ سانتی‌متر محاسبه گردید. بنابراین مقیاس در جهت افقی، همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود ۲۷ (۲/۰.۷۵) برابر جهت عمودی است. در شکل A، خاک کاملاً اشباع است و سطح ایستابی منطبق بر سطح خاک می‌باشد. در شکل‌های B، C، D، E و F، عمق سطح ایستابی به‌ترتیب افزایش می‌یابد. در شکل‌های B و C ارتفاع ستون آب، به میزان ۴ سانتی‌متر نگه‌داشته شد. در شکل C که سطح ایستابی به ۷ سانتی‌متری زیر سطح خاک رسیده است، چون هنوز قطر لولهٔ موئین از ۰٫۰۷۵ سانتی‌متر بیشتر نشده است (اگرچه شکل آن تغییر کرده است)، باز هم ارتفاع صعود موئینه‌ای همان ۴ سانتی‌متر است. در شکل‌های D و E، سطح ایستابی به‌ترتیب تا ۱۰ و ۱۳ سانتی‌متر زیر سطح خاک پایین آمده و تنش زیادتری ایجاد گردیده ولی این تنش به اندازه‌ای نبوده است که بتواند اثر کشش سطحی آب را در گلوگاه (محل باریک شدن لوله) خنثی کند. در شکل F، سطح ایستابی به ۱۵ سانتی‌متری زیر سطح خاک رسیده است. در این حالت، تنش وارده خاصیت یا اثر گلوگاهی (bottle neck) را خنثی کرده و لذا ارتفاع صعود موئینه‌ای در قسمت گشادتر لولهٔ موئین، حدود یک سانتی‌متر است. با افزایش عمق سطح ایستابی از ۱۳ به ۱۵ سانتی‌متر، دیگر اثر گلوگاهی قادر به نگهداری ۲ سانتی‌متر اخیر نبوده است و منفذ به یکباره و به‌طور ناپیوسته، تا نزدیک عمق سطح ایستابی از آب تخلیه گردید. این مثال، نشان می‌دهد که خالی شدن منافذ مختلف به‌طور ناپیوسته رخ می‌دهد. زمانی‌که آب از تعداد زیادی از منافذ خارج گردد، منحنی درصد رطوبت نسبت به تنش (یا پتانسیل ماتریک)، ماهیت ناپیوستهٔ فرایند تخلیه شدن منافذ را نشان نمی‌دهد. این مثال همچنین نشان می‌دهد که منافذ خاک را می‌توان با آب پر (اشباع) کرد، حتی اگر آب در داخل منافذ تحت مکش باشد.

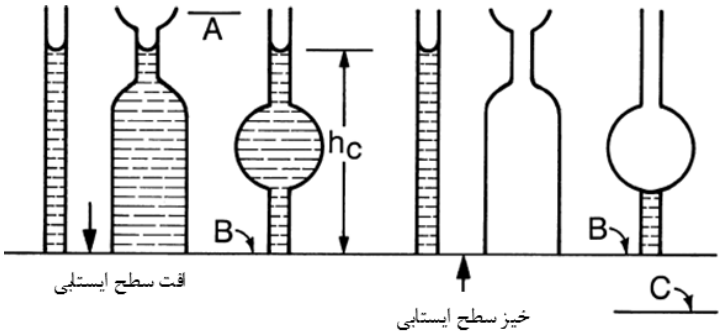


شکل ۲-۱۲. افت سطح ایستابی در یک لولهٔ موئین با قطر متغیر، به اختلاف بین مقیاس‌های افقی و عمودی توجه شود. موقعیت سطح ایستابی در عکس با علامت دلتا نشان داده شد.

در شکل ۲-۱۳، در سمت چپ، سه لولهٔ منفذی با شکل‌های مختلف نشان داده شده است که سطح ایستابی در آن‌ها از A تا B نزول می‌نماید. سه لولهٔ مشابه در سمت راست این شکل قرار دارند که در آن‌ها سطح ایستابی از تراز C به B صعود می‌کند. در سمت چپ، منافذ تا ارتفاع hC (ارتفاع صعود موئینگی) پر شده‌اند. در سمت راست تنها یک منفذ تا hC پر شده است، یک منفذ خالی است و در منفذ وسط آب فقط تا قسمت گشادشدگی بالا آمده است. خاک سمت چپ که شرایط افت سطح ایستابی را نشان می‌دهد، درصد رطوبت بیشتری نسبت به خاک سمت راست دارد که معرف شرایط خیز سطح ایستابی است.

به‌علاوه، شکل ۲-۱۳ تصویر فیزیکی از پدیدهٔ پسماند را نشان می‌دهد که در شکل ۲-۱۱ ارائه گردیده است. یک خاک در شرایط خیز سطح ایستابی نسبت به زمانی که سطح ایستابی افت می‌کند، رطوبت کمتری را در خود نگه می‌دارد. آب تنها در

صورت وجود لوله‌های موئین پیوسته و بدون هیچ گشادشدگی، می‌تواند به بالای سطح ایستابی صعود نماید. از این‌رو آب بیشتری در نوار موئینگی[1] (capillary fringe) در شرایط نزول سطح ایستابی نگه‌داشته می‌شود. با توجه به شکل ۲-۱۳، واضح است که استفاده از سیستم آبیاری زیرزمینی برای بالا آوردن سطح ایستابی در مقایسه یا آبیاری، سطحی، درصد رطوبت مشابهی را در نوار موئینگی ایجاد نمی‌کند. آبیاری زیرزمینی در مقایسه با آبیاری سطحی، شرایط تهویهٔ مناسب‌تری را در خاک فراهم می‌کند که این امر می‌تواند در برخی موارد مفید باشد.



شکل ۲-۱۳. وضعیت منافذ موئین خاک در هنگام افت و خیز سطح ایستابی

۲-۵ خواص محلول‌ها

در روابط آب و خاک و گیاه، ما به‌ندرت با آب خالص سر و کار داریم زیرا آب محتوی مواد حل‌شدهٔ مختلف می‌باشد. بنابراین لازم است بین خصوصیات آب خالص و آبی که محتوی مواد خارجی بوده و ما آن‌را محلول می‌نامیم، تمایز قائل شویم. مثلاً نقطهٔ جوش و انجماد آب خالص، به‌ترتیب ۱۰۰ و صفر درجه سانتیگراد است اما با وارد کردن یک مول از یک نوع نمک به آن، نقطهٔ جوش آن بالا رفته و به ۱۰۰٫۵۱۸ درجه می‌رسد و نقطهٔ انجماد آن تا ۱٫۸۶- درجه تنزل می‌یابد. فشار اسمزی آب خالص که صفر می‌باشد در این محلول تا ۲٫۲۸ مگاپاسکال (۲۲٫۸ بار یا اتمسفر (افزایش می‌یابد.

---

۱. ضخامت لایهٔ اشباع واقع در بالای سطح ایستابی که به‌واسطهٔ پدیدهٔ موئینگی ایجاد می‌شود.

۲-۵-۱ فشار بخار

در یک فضای بسته، فشار جزئی ناشی از مولکول‌های بخار آب را فشار بخار آب می‌نامند. براساس تئوری سینتیک[1] یک جریان پیوستهٔ مولکول ها از سطح مایع به فضای اطراف و به‌طور همزمان یک جریان پیوستهٔ برگشتی مولکول‌ها به سطح مایع وجود دارد. مقدار نسبی این دو جریان، به غلظت بخار بستگی داشته و تعادل هنگامی به‌وجود می‌آید که مقدار دو جریان فوق‌الذکر برابر باشد. در این نقطهٔ تعادل، فشار اعمال شده توسط بخار آب بر سطح مایع، به فشار بخار اشباع موسوم است. فشار بخار اشباع به دما بستگی دارد و با زیاد شدن دما افزایش می یابد.

بین آب خالص و آب محتوی مواد حل‌شده، از نظر فشار بخار تفاوت وجود دارد. بنابراین چون آب در داخل سلول‌های گیاهی و یا خاک به‌صورت محلول بوده و محتوی اجسام حل‌شده می‌باشد، لذا فشار بخار آن با فشار بخار آب خالص متفاوت است. مقدار این تفاوت، بستگی به غلظت مادهٔ حل‌شده دارد. اگر تعداد مول‌های آب در یک حجم معین n_w باشد و n_s مول از یک جسم حل شدنی را وارد آن کرده باشیم در این صورت تعداد کل مول‌های موجود در این مجموعه $n_w + n_s$ خواهد شد. متعاقب این عمل، فشار بخار محلول در سطح آن در مقایسه با آب خالص، به نسبت $\frac{n_w}{(n_w + n_s)}$ کاهش می‌یابد. به‌طوری که اگر فشار بخار آب خالص $e_\circ$ باشد، فشار بخار محلول (e) براساس قانون رائولت[2] برابر است با:

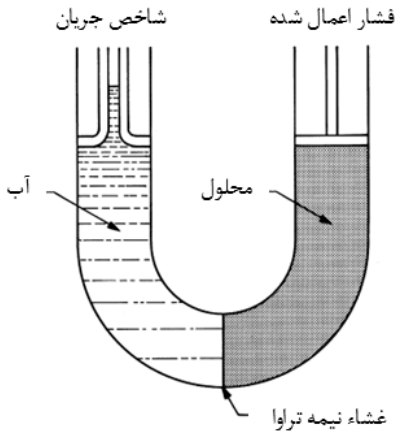
$$e = e_\circ \frac{n_w}{n_w + n_s} \qquad (۱۷-۲)$$

نسبت $\frac{n_w}{(n_w + n_s)}$ را، جزء مولی حلال در این محلول می‌گویند. براساس معادلهٔ فوق، فشار بخار آب در یک محلول، متناسب با جزء مولی آن محلول کاهش پیدا می‌کند. علت بالابردن نقطهٔ جوش و کاهش نقطهٔ انجماد آب بتوسط مواد حل‌شدنی، تأثیر این مواد بر فشار بخار است. زیرا مواد خارجی، باعث کاهش فشار بخار و در نتیجهٔ پایین آمدن نقطهٔ انجماد می‌شوند. قابل ذکر است که این رابطه فقط در مورد

1. Kinetic Theory
2. Raoult

محلول‌های رقیق که غلظت آن‌ها کمتر از یک مول در هر لیتر آب باشد صادق است و نباید آن را برای محلول‌های بسیار غلیظ به‌کار برد.

قانون رائولت نشان می‌دهد که با افزایش اجسام حل شدنی در آب، فشار بخار آب در محلول پایین می‌آید. اگر غشایی که نسبت به آب خالص تراوا ولی در برابر اجسام حل‌شدنی غیرقابل نفوذ است در بین آب خالص و محلول قرار دهیم، آب خالص به طرف محلول حرکت خواهد کرد (شکل ۲-۱۴) این حرکت تا زمانی‌که فشار بخار آب خالص و محلول برابر شوند، ادامه خواهد یافت. مقدار فشاری که لازم است روی محلول اعمال شود تا جلوی حرکت آب خالص گرفته شود برابر فشار اسمزی (OP) می‌باشد. بنابراین اساس پیدایش فشار اسمزی، رقیق شدن مولکولی آب در اثر افزایش مواد حل‌شدنی در محلول است و لذا فشار اسمزی در تمام محلول‌ها وجود دارد.



شکل ۲-۱۴. دستگاه اسمومتر: در این دستگاه، یک غشاء نیمه‌تراوا که نسبت به آب، نفوذپذیر و نسبت به محلول، غیر قابل نفوذ می‌باشد، آب خالص را از محلول جدا کرده است. فشار اسمزی محلول، برابر فشاری است که باید برای جلوگیری از حرکت آب بر سطح محلول وارد شود. حرکت آب از طریق جابجایی سطح آب در لولهٔ موئین سمت چپ قابل مشاهده است.

هنگامی‌که ما برای جلوگیری از حرکت آب، به سطح محلول فشاری معادل OP وارد می‌کنیم مثل آن است که بگوییم مولکول‌های آب دارای پتانسیلی می‌شوند که از

نظر مقدار، برابر OP اما از نظر علامت، عکس آن (منفی) می‌باشد. این پتانسیل را پتانسیل اسمزی می‌نامند و با علامت Ψs نشان می‌دهند. پس فشار اسمزی و پتانسیل اسمزی از نظر مقدار برابر و فقط از نظر علامت، عکس یکدیگرند. (OP=-Ψs) وانت‌هوف[1] فرمولی ارائه کرده است که رابطهٔ بین فشار اسمزی و غلظت محلول را نشان می‌دهد:

$$(OP)(V) = n_s \cdot R \cdot T \qquad (۱۸-۲)$$

در این رابطه؛ OP فشار اسمزی (مگاپاسکال)، V حجم حلال یا آب (مترمکعب)، ns تعداد مولهای جسم حل شدنی، T دما (درجه کلوین) و R ثابت گازها ($۸/۳۲\times۱۰^{-۶}$ $MPa.m^{۳}\cdot mole^{-۱}\cdot k^{-۱}$) می‌باشند.

این فرمول در مورد محلول‌های رقیق و غیرقابل تجزیه، صادق است. برای الکترولیت‌ها که تجزیه شده و نسبت به اجسام غیرقابل تجزیه ذرات زیادتری تولید می‌کنند، اختلاف زیادی بین آنچه که به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود با نتیجهٔ حاصل از فرمول وانت‌هوف وجود دارد.

مطابق معادلهٔ وانت‌هوف، درصورتی‌که یک مول از جسم حل شدنی را در یک لیتر آب حل نماییم، در دمای صفر درجه سانتیگراد (۲۷۳کلوین) مقدار فشار اسمزی آن برابر ۲٫۲۷ مگاپاسکال خواهد بود.

در محاسبهٔ پتانسیل اسمزی محلول توسط رابطهٔ وانت‌هوف، ضریب یونیزاسیون جسم حل‌شدنی نیز در نظر گرفته می‌شود. لذا شکل عملی‌تر این رابطه به‌صورت زیر است:

$$\Psi_s = m.i.R.T \qquad (۱۹-۲)$$

که در آن؛ Ψ_s پتانسیل اسمزی (بار)، R عدد ثابت گازها ($۰/۰۸۳۳$ $bar.lit.mole^{-۱}.k^{-۱}$)، ضریب یونیزاسیون (برای شکر ۱، برای نمک طعام ۲ و برای سولفات سدیم ۳ است)، T دمای محلول (درجه کلوین) و m مولاریته محلول (مول ماده حل شده در هر لیتر آب) می‌باشند.

1. Vant Hoff

در مطالعات روابط آب و گیاه که برای ساختن محلول‌های اسمزی، غالباً از ساکارز یا پلی‌اتیلن گلایکول استفاده می‌شود، ضریب i برای این محلول‌ها که غیریونیزه شونده می‌باشند، یک در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به اینکه در معادله وانت‌هوف مقادیر i، R و T ثابت هستند، لذا بین محلول‌هایی که مولاریته مختلف دارند از نظر پتانسیل اسمزی رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{m_۱}{\Psi_{s۱}} = \frac{m_۲}{\Psi_{s۲}} = \frac{m_۳}{\Psi_{s۳}} = \cdots \qquad (۲۰-۲)$$

با این رابطه می‌توان مولاریته محلول‌های مختلف را برای داشتن مقادیر پتانسیل اسمزی مختلف به‌دست آورد و محلول‌هایی تهیه نمود که پتانسیل اسمزی مورد نظر را داشته باشند.

سؤالات فصل دوم

۱. تنها حدود ..... درصد از کل آب موجود در جهان شیرین است که از این مقدار حدود ..... میلیون کیلومتر مکعب قابل بهره‌برداری و مصرف می‌باشد.

الف) ۲۵، ۴۰ ب) ۲/۵، ۴۰

ج) ۲۵، ۴ ب) ۲/۵، ۴

۲. در دمای ..... درجه سانتیگراد تقریباً همه پیوندهای هیدروژنی بین ملکول‌های آب شکسته می‌شوند.

الف) ۴۰۰ ب) ۱۰۰

ج) صفر د) ۸۰

۳. کدام‌یک از خواص فیزیکی آب سبب تثبیت درجه حرارت محیط می‌شود؟

الف) نیروی چسبندگی زیاد بین ملکولی ب) یونیزاسیون آب

ج) گرمای ویژه آب د) حلالیت آب

۴. کدام‌یک از ویژگی‌های آب سبب استفاده از آب در کنترل یخبندان می‌شود؟

الف) گرمای ویژه آب ب) گرمای ذوب زیاد آب

ج) حلالیت آب د) یونیزاسیون آب

۵. بالاترین چگالی آب در دمای ..... درجه سانتیگراد رخ می‌دهد.

الف) صفر ب) ۴
ج) ۹ د) ۱۰۰

۶. با کاهش درجه حرارت آب، لزوجت آب .....
الف) کاهش می‌یابد
ب) ثابت می‌ماند
ج) ابتدا افزایش سپس به‌تدریج کاهش می‌یابد
د) افزایش می‌یابد

۷. کدام‌یک از خواص آب سبب بالا رفتن یا پایین آمدن مایعات در لوله‌های موئین می‌شود؟
الف) کشش سطحی ب) چگالی
ج) گرمای ویژه د) یونیزاسیون آب

۸. براساس پدیده کشش سطحی، سطح جیوه در داخل لوله شیشه‌ای به صورت .....
و سطح آب در داخل لوله به شکل ..... می‌باشد.
الف) محدب – محدب ب) محدب) مقعر
ج) مقعر- مقعر د) مقعر- محدب

۹. منحنی خصوصیات رطوبتی خاک چیست؟
الف) منحنی تغییرات رطوبت خاک با زمان
ب) منحنی تغییرات مکش خاک با زمان
ج) منحنی تغییرات رطوبت خاک نسبت به مکش وارده
د) منحنی تغییرات رطوبت خاک نسبت به رشد گیاه

۱۰. علت پدیده پسماند در خاک چیست؟
الف) ثابت نبودن قطر یک منفذ در نقاط مختلف
ب) تهویه بهتر خاک در خاک‌های سبک
ج) مشابه نبودن منافذ مختلف خاک
د) ثابت نبودن قطر یک منفذ در نقاط مختلف و مشابه نبودن منافذ مختلف خاک

۱۱. بر اساس قانون رائولت:
الف) فشار بخار محلول بیشتر از فشار بخار آب خالص است

ب) فشار بخار آب در یک محلول متناسب با جزء ملی آن کاهش می‌یابد
ج) فشار بخار محلول برابر فشار بخار آب خالص است
د) فشار بخار محلول منفی فشار بخار آب خالص است

۱۲. افزودن مواد حل‌شدنی در آب خالص سبب ..... فشار بخار، ..... نقطه انجماد و ..... نقطه جوش می‌شود.

الف) افزایش- افزایش-افزایش ب) کاهش-کاهش-کاهش
ج) کاهش-کاهش-افزایش د) افزایش-افزایش-کاهش

۱۳. مقدار ۱۵۰ گرم ساکارز را در یک لیتر آب که دمای آن ۲۵ درجه سانتیگراد است حل می‌کنیم، پتانسیل اسمزی محلول چند بار خواهد بود؟ R=0.083

الف) ۰/۴۲ ب) ۴/۱
ج) ۱/۴ د) ۱۰/۴

۱۴. محلولی که ملالیته آن ۰/۴۲ است، دارای پتانسیل اسمزی ۱۰/۴ بار می‌باشد. اگر بخواهیم محلولی با پتانسیل ۲۰ بار داشته باشیم، ملالیته آن چقدر باید باشد.

الف) ۰/۰۸ ب) ۰/۸
ج) ۸ د) ۸۰

۱۵. فشار اسمزی محلول ۰٫۰۱ مولار کلرور سدیم با فرض تجزیه کامل آن در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد چند بار است؟ R=0.083

الف) ۴۸٫۵ ب) ۴۸۵
ج) ۴٫۸۵ د) ۰٫۴۸۵-

فصل سوم

خاک و خصوصیات آن

اهداف کلی

۱. تبیین دلیل اهمیت خاک برای گیاه
۲. آشنایی با خصوصیات فیزیکی خاک به‌عنوان محیط استقرار گیاه و چگونگی تأثیرگذاری این خصوصیات بر گیاه

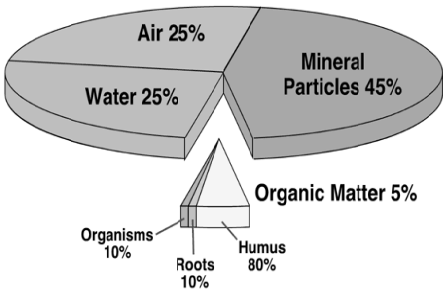
۳-۱ خاک

خاک‌ها به‌عنوان محل ذخیرهٔ مواد غذایی گیاه، مسکن طبیعی موجودات زندهٔ خاک و ریشه‌های گیاه و مخزن ذخیره آب جهت تأمین نیازهای تبخیر و تعرق می‌باشند. مقدار آبی که یک خاک می‌تواند جهت استفاده گیاه نگه دارد متأثر از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن است. مقدار نگهداشت آب، تعیین‌کنندهٔ مدت زمانی است که یک گیاه می‌تواند در فاصلهٔ بین دو آبیاری یا بارندگی، به طور مناسب ادامه حیات دهد. همچنین، این مقدار تعیین‌کننده تناوب آبیاری، میزان آب مصرفی و ظرفیت مورد نیاز سیستم آبیاری برای رشد بهینه و دائمی گیاه می‌باشد.

۳-۲ ترکیب خاک

خاک ترکیبی از مواد معدنی، مواد آلی و خلل و فرج است. مواد معدنی متشکل از ذرات شن، سیلت و رس می‌باشد. از نظر ترکیب مکانیکی، اندازهٔ ذرات تشکیل‌دهنده خاک‌های کشاورزی در مقیاس طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا شامل شن درشت

(۰٫۲–۲ mm)، شـــن نـــرم (۰٫۰۲–۰٫۲ mm)، ســـیلت (۰٫۰۰۲–۰٫۰۲ mm) و رس (۰٫۰۰۲ mm>) می‌باشد. مواد آلی، شامل موجودات زندهٔ خاک و بقایای گیاهی و جانوری آن‌ها است. مواد آلی تقریباً ۱ تا ۵ درصد کل خاک را تشکیل می‌دهند. ترکیب مواد معدنی و آلی خاک را، قسمت جامد خاک گویند. باقیماندهٔ خاک را منافذ آن تشکیل می‌دهد. منافذ خود متشکل از آب و هوا می‌باشند. این اجزاء در ارتباط نزدیکی با یکدیگر هستند به‌طوری‌که جدا کردن آن‌ها مشکل است. حجم نسبی این اجزاء که برای رشد گیاه مناسب باشد، شامل ۵۰ درصد مواد جامد (۴۵ درصد مواد معدنی و ۵ درصد مواد آلی) و ۵۰ درصد خلل و فرج (محتوی آب و هوا) است. البته این نسبت آب و هوا بسیار متغیر بوده و تحت تأثیر شرایط خاک و جو قرار می‌گیرد. (شکل ۳–۱)



شکل ۳–۱. اجزاء تشکیل‌دهندهٔ خاک

۳–۳ خواص فیزیکی خاک

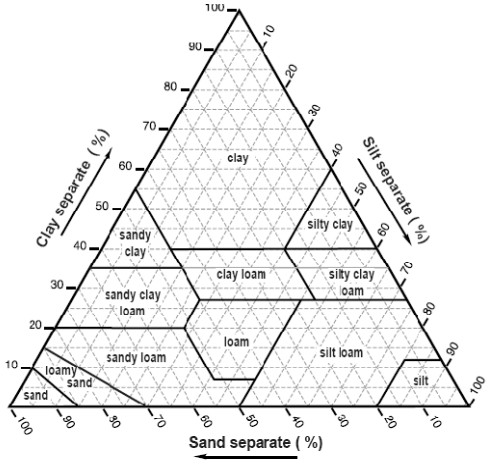
خاک‌های معدنی، ترکیبات متخلخلی (porous mixtures) از ذرات غیر آلی، مادهٔ آلی تجزیه‌شونده (decaying organic matter)، هوا و آب می‌باشند. آن‌ها همچنین دربردارندهٔ ارگانیسم‌های مختلفی می‌باشند. مواد مادری خاک های معدنی، متشکل از لس (loose)، ذرات تحکیم نشدهٔ (unconsolidated fragments) سنگ‌های هوازده و رسوبات تحکیم نشده می‌باشند. هوازدگی فیزیکی و شیمیایی همراه با جابه‌جایی و تجمع ذرات مختلف، منجر به لایه‌بندی افقی توده خاک می‌شود که به‌وضوح در ترانشه‌ها و دیوارهٔ جاده‌ها مشخص است. در مجموع، این افق‌ها یا لایه‌ها را پروفیل خاک می‌نامند. خصوصیات لایه‌های پروفیل خاک بر رشد ریشه و نگهداشت و انتقال آب در داخل خاک تأثیر می‌گذارند. دو خاصیت فیزیکی مهم خاک‌ها، بافت و ساختمان می‌باشند.

۳-۳-۱ بافت خاک

بافت خاک، معرف نسبت اختلاط و حضور هر یک از ذرات رس، لای و شن در نمونهٔ مورد نظر است. به خاک‌هایی که دارای بافت ریز هستند خاک سنگین و به خـاک‌هـایی که دارای بافت درشت هستند، خاک سبک اطلاق می‌گردد. همچنین به خـاک‌هـایی کـه لومی هستند از نظر کشاورزان، بافت متوسط اطلاق می‌شود. بافت خاک، دائمی است و کشاورز نمی‌تواند آن را اصلاح یا تغییر دهد.

به‌منظور یافتن نسبت ذرات خاک، نمونهٔ خاک در آزمایشگاه مورد تجزیهٔ مکانیکی قرار می‌گیرد و سپس برای تعیین بافت خاک، از مثلث بافت خاک (شکل ۳-۲) استفاده می‌شود.

شناسایی بافت خاک اهمیت زیادی در ارزیابی زمین دارد. معمولاً بهترین خاک‌های مزروعی دارای ۱۰ تا ۲۰ درصد رس، ۵ تا ۱۰ درصد مادهٔ آلی و به مقدار مساوی لای و شن می‌باشند. در مطالعات تشکیل و طبقه‌بندی خاک، تعیین بافت الزامی است و بایستی از سطح خاک تا سنگ بستر، تغییرات و نوع آن مشخص گردد.



شکل ۳-۲. مثلث بافت خاک

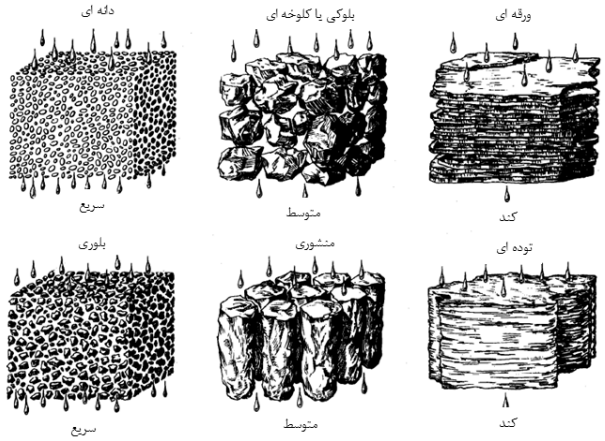
۳-۳-۲ ساختمان خاک

به نحوهٔ قرار گرفتن ذرات خاک در واحدهای طبیعی تودهٔ خاک که خاکشناسان به آن خاکه (peds) می‌گویند، ساختمان خاک اطلاق می‌گردد. ساختمان خـاک بـر ورود آب و هـوا بـه

درون خاک و حرکت در داخل خاک، نفوذ ریشه و منبع غذایی خاک تأثیر می‌گذارد.

نوع ساختمان (شکل ۳-۳) بر شکل خاص گروه‌بندی ذرات خاک که در افق خاک غالب است، دلالت دارد. خاک‌های دانه‌دانه (single grained) و خاک‌های توده‌ای (massive soils)، فاقد ساختمان می‌باشند. در خاک‌های دانه‌دانه، مانند شن خشک، آب به‌سرعت نفوذ می‌کند. درحالیکه در داخل خاک‌های توده‌ای مانند برخی رس‌ها، حرکت آب به‌کندی صورت می‌گیرد. نفوذ آب در خاک‌های دارای ساختمان منشوری، بلوکی و بلوری یا دانه‌ای، بهتر از خاک‌های دارای ساختمان ورقه‌ای می‌باشد که از حرکت رو به پایین آب ممانعت می‌کنند.

ساختمان خاک برخلاف بافت، آن در اثر عملیات زراعی تغییر می‌کند. اهمیت ساختمان خاک از این نظر مهم است که روی عوامل رشد و نمو گیاه مثل تهویه، ظرفیت نگهداری آب، دمای محیط ریشه، حرکت املاح، فعالیت‌های بیولوژیک و نفوذ ریشه اثر می‌گذارد. در لایه‌های سطحی خاک‌های دارای مقدار زیاد مواد آلی و در خاک‌هایی که گیاهان علوفه‌ای دائمی رشد می‌کنند، بهترین ساختمان شکل می‌گیرد. چرخه‌های خشک و مرطوب شدن یا یخ‌زدگی و ذوب یخ، ساختمان لایهٔ شخم را بهبود می‌بخشد. به عبارت دیگر، زراعت در خاک متوسط یا ریز بافت در شرایط رطوبت زیاد، عامل مخرب ساختمان می‌باشد. آبیاری با آب شور باعث تغییر ساختمان خاک می‌شود. آب‌های آبیاری دارای سدیم زیاد از طریق جدا کردن خاکدانه‌ها، بر ساختمان خاک تأثیر منفی بجا می‌گذارند.



شکل ۳-۳. انواع ساختمان خاک و تأثیر آن‌ها بر حرکت روبه پایین آب

بهترین خاک از نظر کشاورزی، خاکی است که ذرات آن به‌صورت خاکدانه باشند. فرآیندهایی که سبب تخریب خاکدانه‌ها می گردند عبارتند از:

- خشک و مرطوب شدن خاک
- از بین رفتن مواد آلی
- فعالیت ریشه‌ها و جانوران ریز
- جذب نیتروژن
- یخ زدن آب بین ذرات خاک و ذوب شدن یخ
- شخم خاک

گاهی اوقات ممکن است خاک فاقد ساختمان باشد در این حالت ذرات خاک به‌طور مستقل و بدون هر نوع اتصال و شکل ساختمانی کنار یکدیگر قرار گرفته و یا ممکن است همگی یکپارچه شده و تشکیل یک بلوک سیمانی را بدهند. مثلاً شن‌های روان در کویرها، نمونه‌ای از خاک‌های بدون ساختمان می‌باشد.

۳-۴ تخلخل خاک

حجم منافذ خالی به حجم کل خاک را تخلخل می‌نامند. میزان تخلخل خاک های معدنی عموماً بین ۳۰ تا ۶۰ درصد حجم کل خاک (به‌طور متوسط حدود ۵۰ درصد) می‌باشد. تخلخل خاک تحت تأثیر دانه‌بندی خاک، بافت، فعالیت ریشه، گازهای محبوس و حشرات، کرم‌ها و سایر حیوانات نقب‌زن می‌باشد. خاک‌های درشت بافت، تخلخل کمتری نسبت به خاک‌های ریزبافت دارند اما اندازهٔ متوسط منافذ در خاک‌های شنی معمولاً بزرگ‌تر است. تخلخل خاک‌های رسی به‌دلیل پتانسیل آماس و انقباض در طول دوره‌های خشک و مرطوب شدن و توانایی بیشتر در جهت تجمع یا پراکندگی دانه‌ها، تغییرپذیرتر است.

فضای خالی خاک‌ها را می‌توان به‌صورت شبکهٔ وسیع متصل به هم از خلل و فرج دانست که در جهات مختلف توسعه می‌یابند. این خلل و فرج علاوه‌بر اینکه محل نگهداری مایعات و گازها را بوده و جابه‌جایی آن‌ها را تنظیم می‌کنند، به‌عنوان زیستگاه موجودات زندهٔ ریز و نیز معابر ورود ریشه‌ها و رشد و توسعهٔ آن‌ها می‌باشند. کل تخلخل یک نمونه خاک را می‌توان با استفاده از معادلهٔ زیر به‌دست آورد:

$$\text{تخلخل کل} = 1 - \frac{\text{جرم مخصوص ظاهری}}{\text{جرم مخصوص حقیقی}} \qquad (۱-۳)$$

درصورتی‌که خاکدانه‌ها کاملاً مجزا باشند، می‌توان توزیع اندازهٔ منافذ را به خلل و فرج درشت یا ماکروپورها و خلل و فرج ریز یا میکروپورها تقسیم نمود. ماکروپورها، عمدتاً فضاهای خالی بین خاکدانه‌ها هستند که به‌عنوان مسیرهای اصلی نفوذ آب، زهکشی و تهویه می‌باشند. میکروپورها، منافذ کوچک‌تر داخل خاکدانه‌ها می‌باشند که غالباً به‌عنوان نگهدارندهٔ آب و املاح عمل می‌نمایند.

۳-۵ تراکم خاک

تراکم خاک‌های کشاورزی، عموماً بر کاهش تخلخل خاک از طریق فروپاشی جزئی منافذ و دفع هوای موجود دلالت دارد. از لحاظ کشاورزی، زمانی به خاک‌ها متراکم گفته می‌شود که تخلخل پر شده از هوا، به اندازه‌ای کاهش یابد که تهویه را محدود نماید و به‌واسطهٔ کم شدن تهویه، از نفوذ ریشه و زهکشی جلوگیری گردد.

به‌طور طبیعی، خاک‌ها می‌توانند در نتیجهٔ شکل‌گیری بافت شان، رژیم رطوبتی یا نحوهٔ قرار گرفتن ذرات در کنار یکدیگر، متراکم گردند. نیروهای مکانیکی وارد شده بر سطح خاک در طول مدت فعالیت‌های زراعی، غالباً منجر به تراکم خاک‌های کشاورزی می‌گردند. حرکت دام‌ها نیز می‌تواند منجر به تراکم خاک شود، با این وجود رایج‌ترین علت افزایش تراکم خاک (افزایش جرم مخصوص ظاهری) در کشاورزی امروزی، نیروی وارده بر سطح خاک به‌واسطهٔ چرخ‌های ماشین‌آلات کشاورزی می‌باشد.

۳-۶ شوری و سدیتهٔ خاک

خاک‌های شور و سدیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به وفور یافت می‌شوند زیرا مقدار بارندگی کمتر از حدی است که بتواند نیاز تبخیر و تعرق پتانسیل گیاهان را تأمین نماید. این خاک‌ها در شرایطی ایجاد می‌گردند که نمک‌ها شسته نشده و به حدی که برای رشد گیاه مضر است تجمع یابند. به‌علاوه، مشکلات شوری در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب، به‌ویژه در مجاورت مناطق ساحلی، می‌تواند به‌وجود آید. بیش از یک سوم اراضی فاریاب جهان دارای مشکلات شوری می‌باشند.

سه منبع طبیعی مهم شوری خاک عبارتند از: هوازدگی معدنی، نهشته‌های اتمسفری و نمک‌های فسیلی. به‌علاوه، آبیاری، کشاورزی و ضایعات صنعتی نیز موجب اضافه شدن نمک به خاک‌ها می‌گردند. نمک‌ها غالباً از مناطقی که بیش از حد مورد نیاز آبیاری می‌شوند به مناطق دارای زهکشی ضعیف منتقل شده و در آنجا تجمع می‌یابند. همچنین، به‌واسطهٔ تبخیر زه‌آب‌ها یا جریان‌های برگشتی آبیاری، غلظت‌های زیادی از نمک باقی می‌ماند.

آبیاری صحیح مستلزم پخش آب در سطح خاک و تخلیهٔ آب مازاد، در طول مدت بین دو آبیاری می‌باشد. همچنین ممکن است بخشی از آب مازاد، درنهایت وارد ناحیهٔ زیر ریشهٔ گیاه گردد. در سطح خاک بخشی از آب به‌واسطهٔ تبخیر تلف می‌شود. هم تبخیر و هم تعرق، غلظت باقیماندهٔ نمک‌های محلول را افزایش می‌دهند. در خاک‌های دارای زهکشی داخلی خوب، غلظت نمک به‌طور معمول با افزایش عمق خاک، افزایش می‌یابد. هرچه نسبت آب آبیاری عبوری از ناحیهٔ ریشه (جزء آبشویی) بیشتر شود، تجمع نمک در این ناحیه کاهش می‌یابد.

چنانچه خاک‌ها با آب آبیاری دارای مقادیر زیاد سدیم آبیاری شوند، مقدار سدیم قابل تبادل ممکن است بسیار زیاد گردد. در این خاک‌ها، ذرات خاک سطحی به‌شدت پراکنده می‌شود که در نتیجهٔ آن، نفوذپذیری خاک نسبت به آب کاهش می‌یابد.

۳-۷ انواع خاک‌های شور

طبقه‌بندی خاک‌های شور، براساس غلظت نمک محلول در عصارهٔ اشباع خاک صورت می‌گیرد. هدایت الکتریکی عصارهٔ اشباع (ECe)، یک معیار استاندارد برای شوری است. در جدول ۳-۱ طبقه بندی شوری خاک براساس هدایت الکتریکی عصارهٔ اشباع ارائه گردیده است.

نسبت جذبی سدیم (SAR) معیار استاندارد سدیمی بودن خاک است که با استفاده از غلظت یون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم (برحسب میلی‌اکی‌وانت بر لیتر) و از طریق رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد:

$$SAR = \frac{Na}{\left[\frac{(Ca + Mg)}{۲}\right]^{\frac{۱}{۲}}}$$

جدول ۳-۱. طبقه‌بندی خاک‌های شور

هدایت الکتریکی عصاره اشباع (دسی‌زیمنس بر متر یا میلی‌موس بر سانتی‌متر)	کلاس
۴-۰	شوری خیلی کم
۸-۴	شوری کم
۱۶-۸	شوری متوسط
بیشتر از ۱۶	شوری زیاد

مسائل فصل سوم

۱. در مقیاس طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا، به ذرات خاک کوچک‌تر از ۰٫۰۰۲ میلی‌متر، ..... اطلاق می‌گردد.

الف) رس ب) سیلت

ج) لای د) شن

۲. به نحوه قرار گرفتن ذرات خاک در واحدهای طبیعی توده خاک، ..... می‌گویند.

الف) بافت خاک ب) ساختمان خاک

ج) جرم مخصوص خاک د) خاکدانه

۳. کدام‌یک از عبارات زیر صحیح نمی‌باشد؟

الف) بافت خاک دائمی است و کشاورز نمی تواند آن را اصلاح یا تغییر دهد.

ب) نفوذ آب در خاک‌های دارای ساختمان ورقه‌ای بهتر از خاک‌های دارای ساختمان منشوری می‌باشد.

ج) ساختمان خاک در اثر عملیات زراعی تغییر می کند.

د) چرخه‌های خشک و مرطوب شدن یا یخ زدگی و ذوب یخ، ساختمان لایه شخم را بهبود می‌بخشد.

۴. تخلخل خاک‌های درشت بافت نسبت به خاک‌های ریزبافت ..... و اندازه متوسط منافذ در خاک‌های شنی معمولاً ..... است.

الف) کمتر، بزرگ‌تر ب) کمتر، کوچک‌تر

ج) بیشتر- کوچک‌تر د) بیشتر، بزرگ‌تر

۵. درصورتی‌که جرم مخصوص ظاهری و واقعی یک نمونه خاک به‌ترتیب ۱٫۳ و ۲٫۶ گرم بر سانتیمتر مکعب باشد، مقدار تخلخل آن چند درصد می‌باشد؟

الف) ۲۰ ب) ۳۰

ج) ۴۰ د) ۵۰

۶. افزایش تراکم خاک منجر به افزایش کدام‌یک از خصوصیات خاک می‌گردد.

الف) جرم مخصوص حقیقی ب) تخلخل

ج) جرم مخصوص ظاهری د) قابلیت زهکشی

۷. آبیاری با آب آبیاری دارای مقادیر زیاد سدیم سبب:

الف) پراکندگی ذرات خاک سطحی ب) کاهش نفوذپذیری خاک نسبت به آب

ج) شوری خاک د) همه موارد

۸. معیارهای استاندارد برای طبقه‌بندی خاک‌های شور و سدیمی کدامند؟

الف) EC، EC ب) EC ،SAR

ج) SAR ،SAR د) SAR ،EC

فصل چهارم

وضعیت آب در خاک

اهداف کلی

۱. پی بردن به رابطهٔ آب و خاک و چگونگی عملکرد آب در خاک
۲. تعیین زمان انجام آبیاری با استفاده از برآورد مقدار رطوبت خاک
۳. آشنایی با روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک
۴. تبیین مفهوم پتانسیل آبی خاک و دلیل اهمیت آن، همچنین پی بردن به مؤلفه‌های مختلف پتانسیل آب خاک و نحوهٔ تعیین هر یک از آن‌ها
۵. درک مفاهیم مربوط به ظرفیت مزرعه، نقطهٔ پژمردگی و عوامل مؤثر بر آن‌ها
۶. تعیین آب قابل دسترس گیاه به‌منظور طراحی سیستم آبیاری

۴-۱ مقدمه

گیاه، آب مورد نیاز خود را از طریق ریشه‌ها از خاک جذب می‌کند. بنابراین فراهم بودن آب در خاک، از عوامل اصلی رشد گیاه است. علاوه‌بر این، بسیاری از خصوصیات خاک مانند پایداری، خمیرایی، مقاومت، قابلیت فشرده شدن، نفوذپذیری و قابلیت تردد روی خاک، بستگی به مقدار آب آن دارد. همچنین، رطوبت خاک بر مقدار هوای موجود در خاک و تبادل گازها در آن مؤثر است. فعالیت موجودات ریز خاک و کنش‌های شیمیایی خاک نیز تابعی از مقدار رطوبت آن است. بنابراین، بررسی رطوبت و قوانین حاکم بر اینکه آب چگونه و به چه مقدار در خاک موجود بوده و قابل استفادهٔ

گیاه می‌باشد، از مهم‌ترین موضوعات در علم رابطهٔ آب و خاک و گیاه است.

۴-۲ اصطلاحات مربوط به آب خاک و کاربردهای آن

رطوبت خاک، مقدار آب موجود در خاک به‌صورت جرمی یا حجمی است و مقدار آبی می‌باشد که یک تودهٔ خاک در گرمخانه‌ای با دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد از دست می‌دهد. مقدار آن برحسب جرم آب به واحد جرم خاک خشک (کیلوگرم بر کیلوگرم)، یا حجم آب در واحد حجم تودهٔ خاک (مترمکعب بر متر مکعب) بیان می‌شود. این اصطلاحات برای کارهای آبیاری که هدف، تعیین مقدار آب مورد نیاز برای برگرداندن رطوبت خاک به مقدار معینی (حد ظرفیت مزرعه) است، کافی می‌باشد. با این وجود، برای پاسخ به سؤالاتی مانند اینکه چرا خاک‌های دارای رفتار یکسان، رطوبت‌های مختلفی دارند یا چرا واکنش گیاهان در خاک های مختلف با رطوبت یکسان، متفاوت است و اینکه چرا اگر دو خاک شنی و رسی دارای رطوبت یکسان در کنار هم قرار گیرند، آب از خاک شنی به سمت خاک دارای بافت ریزتر حرکت می‌کند؛ عامل دیگری غیر از رطوبت مورد نیاز می‌باشد. برای تشریح این پدیده ها می‌توان از واژهٔ پتانسیل آب خاک استفاده کرد که در ادامه بیان می‌گردد.

۴-۳ روش‌های توصیف رطوبت خاک

بهترین و مؤثرترین روش تعیین زمان آبیاری، اندازه گیری یا برآورد مقدار رطوبت خاک می‌باشد. با آگاهی از مقدار رطوبت موجود، یک آبیار که دانش و تجربهٔ مرتبط با یک گیاه در یک خاک خاص را دارد می‌تواند زمان آبیاری را به درستی تعیین کند. بیشتر روش‌های اندازه‌گیری و برآورد رطوبت خاک، برای کاربرد مزرعه‌ای مناسب نیستند. برخی از روش‌های قابل استفاده برای تعیین زمان آبیاری، در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

روش جرمی: یک روش استاندارد برای اندازه‌گیری رطوبت خاک می‌باشد. در یک مزرعه برای هر نوع خاک، از عمق مورد نظر در چندین محل، نمونه‌های خاک تهیه می‌شوند. نمونه‌ها وزن شده و به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه در دمای ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد خشک و مجدداً وزن می‌شوند. اختلاف دو وزن، مقدار آب موجود در

خاک براساس وزن خشک می‌باشد که می‌توان آن را بر حسب عمق آب موجود در خاک بیان کرد.

برحسب، تعریف مقدار جرمی رطوبت خاک (θ_m) عبارتست از نسبت جرم آب موجود در خاک (M_w) به جرم جزء جامد خاک (M_s):

$$\theta_m = \frac{M_w}{M_s} \qquad (۱-۴)$$

اگرچه این روش، نتایج خوبی ارائه می‌نماید ولی معمولاً توسط زارعین مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. دقت اندازه‌گیری در این روش، به تعداد نمونه‌های گرفته شده و مهارت در نمونه برداری بستگی دارد. در این روش نیاز به تجهیزاتی می‌باشد که معمولاً زارعین در اختیار ندارند و همچنین زمان و نیروی انسانی زیادی صرف می‌شود. از این روش اصولاً در کارهای آزمایشگاهی و به‌عنوان استانداردی برای مقایسهٔ نتایج روش‌های دیگر استفاده می‌شود.

رطوبت حجمی: رطوبت حجمی (θ_v) خاک عبارت است از نسبت حجم آب (V_w) به حجم کل خاک(V_t):

$$\theta_v = (\frac{V_w}{V_t}) \qquad (۲-۴)$$

بین رطوبت حجمی ورطوبت جرمی، رابطه‌ای وجود دارد و می‌توان با استفاده از رطوبت جرمی که آسان‌تر و در آزمایشگاه به‌دست می‌آید به رطوبت حجمی که در مسائل آبیاری کاربرد بیشتری دارد، دست یافت. این رابطه به‌صورت زیر است:

$$\theta_v = \theta_m \times \rho_b \qquad (۳-۴)$$

رطوبت خاک را می‌توان به‌صورت ضخامت لایه‌ای از آب نیز نشان داد:

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} = \frac{A \cdot d}{A \cdot D} = \frac{d}{D} \;\Rightarrow\; d = \theta_v \cdot D \qquad (۴-۴)$$

$$d = \theta_m \cdot P_b \cdot D \qquad (۵-۴)$$

در روابط فوق؛ θ_m رطوبت جرمی (یا وزنی) خاک (برحسب اعشار)، θ_v رطوبت حجمی خاک (برحسب اعشار)، d عمق آب داده شده به خاک (معمولاً برحسب میلی‌متر)، D عمق خاک زراعی یا عمق توسعهٔ ریشهٔ گیاه (معمولاً برحسب میلی‌متر) و A مساحت سطح خاک (یا مساحت مزرعه) می‌باشند.

۴-۴ اندازه‌گیری رطوبت خاک

اندازه‌گیری رطوبت خاک و ظرفیت خاک‌ها، برای نگهداشت آب اهمیت زیادی دارد. قابلیت تولید محصول در بعضی خاک ها در مناطق مرطوب با وجود سپری شدن روزها یا هفته‌های بدون بارندگی، گواهی بر ظرفیت ذخیرهٔ آب آن‌هاست زیرا کلیهٔ گیاهان در حال رشد، همه روزه به آب نیاز دارند. در مناطق فاریاب، عمق آب مصرفی در هر آبیاری و فاصلهٔ بین آبیاری‌ها متأثر از ظرفیت ذخیره خاک می‌باشند بنابراین ظرفیت خاک ها برای نگهداشت آب جهت مصرف گیاهان در حال رشد، از اهمیت و توجه ویژه‌ای برخوردار است. خاک های تحت آبیاری که دارای ظرفیت ذخیرهٔ زیادی هستند می‌توانند در مناطق کم آب، عملکرد سودبخشی داشته باشند.

آگاهی از ظرفیت خاک‌ها برای نگهداشت آب آبیاری موجود، برای آبیاری کارآمد ضروری است. اگر در یک آبیاری، بیشتر از ظرفیت ذخیرهٔ آب در ناحیهٔ ریشهٔ گیاه آب مصرف شود، آب مازاد هدر خواهد رفت. از طرف دیگر، چنانچه کمتر از توان ذخیره آب مصرف شود، قبل از آبیاری بعدی گیاه به‌واسطهٔ کمبود آب پژمرده خواهد شد مگر اینکه آبیاری بعدی زودتر انجام شود. در نواحی مرطوب، آبیاری‌ها برمبنای استفادهٔ مؤثر از بارندگی، برنامه‌ریزی می‌شود. تلفات آب به‌صورت نفوذ عمقی از ناحیهٔ ریشهٔ گیاه قابل مشاهده نمی‌باشد. با کسر ظرفیت ذخیرهٔ خاک‌های مختلف و مقدار رواناب از میزان آب مصرفی در یک آبیاری، می‌توان مقدار تلفات را به‌طور تقریبی تعیین کرد.

۴-۴-۱ روش لمس و ظاهر خاک

برای نمونه‌برداری می‌توان از بیل استفاده کرد ولی برای نمونه‌برداری از خاک زیرین، بهتر است از آگر استفاده گردد. واکنش خاک در سه آزمایش مزرعه‌ای، ثبت شده و با

مقدار رطوبت خاک مقایسه می‌گردد. این سه آزمایش به‌صورت زیر می‌باشند: آزمایش توپ خاک (ball test) که در آن، نمونهٔ خاک به‌صورت یک توپ سفت فشرده می‌شود و از ارتفاع‌های مختلف انداخته شده و اثرات ثبت می‌گردد؛ آزمایش میله (rod test) که در آن، نمونهٔ خاک به شکل میله‌ای با قطر ۳ میلی‌متر درمی‌آید و سپس به‌صورت عمودی نگهداشته می‌شود و تأثیر بر طول آن اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد؛ و آزمایش تسمه (ribbon test) که مواد خاک بین انگشت شصت و انگشت اول فشرده شده (smeared out) و طول تسمهٔ حاصله ثبت می‌شود. اگرچه تعیین رطوبت خاک با روش لمس و ظاهر دقیق ترین روش نیست، آبیار باید با تجربه قادر به برآورد رطوبت خاک با خطای ۱۰ تا ۱۵ درصد باشد. این روش ارزان است ولی جمع‌آوری نمونه‌های خاک نیاز به کار زیادی خواهد داشت.

۴-۴-۲ تانسیومتر[1]

تانسیومتر یا مکش‌سنج، وسیله‌ای برای اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک یا تنش رطوبتی خاک (در شرایطی که خاک خیلی خشک نیست) می‌باشد. به‌دلیل اینکه این وسیله، مکش را اندازه‌گیری می‌کند به آن مکش‌سنج می‌گویند. مکش رطوبتی خاک را می‌توان با عبارت‌هایی مانند بار مکش (برحسب واحد طول) یا انرژی پتانسیل در واحد جرم (ارگ برگرم) یا انرژی پتانسیل در واحد حجم (ژول بر متر مکعب یا دین بر سانتی‌متر مربع؛ یک بار برابر است با $۱۰^۶$ دین بر سانتی‌متر مربع) نیز بیان نمود.

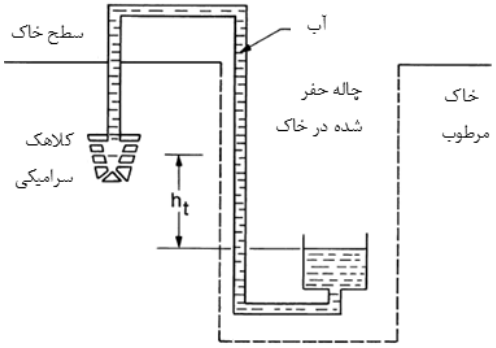
تانسیومتر از یک کلاهک متخلخل نفوذپذیر که به یک لولهٔ مانومتر پر از آب، خلاءسنج، مبدل فشار یا وسایل دیگر اندازه‌گیری فشار متصل است، تشکیل می‌گردد. همان‌گونه‌که ذکرشد از تانسیومتر برای اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک استفاده می‌شود. پتانسل ماتریک زمانی وجود دارد که خاک غیراشباع بوده و آب در داخل خاک تحت مکش باشد. برای اندازه‌گیری فشار آب در خاک اشباع، از پیزومتر استفاده می‌شود. تانسیومترها پتانسیل اسمزی را اندازه‌گیری نمی‌کنند زیرا نسبت به اثرات اسمزی نمک‌های محلول در حل‌شده خاک حساس نمی‌باشند. به‌دلیل اینکه بیشتر نظریه‌ها و کارهای مربوط به رطوبت خاک به نوعی با پتانسیل ماتریک مرتبطند، لازم است نحوهٔ کار تانسیومترها را بدانیم. دو رابطهٔ اساسی که باید قبل ار مدل‌سازی آب در محیط

1. tensiometer

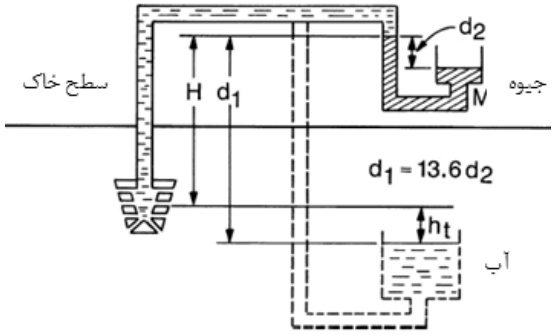
غیراشباع خاک، مورد توجه قرار گیرند عبارتند از: رابطهٔ بین پتانسیل ماتریک و مقدار رطوبت خاک و رابطهٔ بین هدایت هیدرولیکی و پتانسیل ماتریک خاک.

با درنظر گرفتن یک نوع غیر عملی ولی آموزشی تانسیومتر که در آن، بار مکش (ht) به‌وسیلهٔ کلاهک متخلخل در تماس با خاک مرطوب ایجاد می‌شود، نحوهٔ عمل تانسیومترها را تشریح می‌نماییم (شکل ۴-۱). منافذ کوچک کلاهک تانسیومتر، ارتباط بین آب نگهداشته شده در منافذ خاک با ستون مکش (tension column) را برقرار می‌کنند. منافذ کلاهک باید کوچک‌تر از منافذ خاکی باشند که تانسیومتر در آن نصب می‌شود؛ در غیر این‌صورت ممکن است هوا وارد کلاهک گردد. زمانی‌که هوا وارد کلاهک شود، نشان‌دهنده نقطهٔ ورود هوا برای آن کلاهک متخلخل است. هر کلاهک متخلخل، یک نقطهٔ ورود هوا دارد. درصورت ورود هوا، پدیدهٔ کاویتاسیون اتفاق خواهد افتاد که نشان‌دهندهٔ ایجاد خلاءهای جزئی در سیال جاری، در نتیجهٔ انفصال بخش‌های آن می‌باشد. در شکل ۴-۱، چاله‌ای در داخل خاک حفر گردید تا تانسیومتر در آن قرار داده شود ولی از آنجایی که حفر چاله معمولاً عملی نمی‌باشد، درشکل ۴-۲ ستونی از آب به ارتفاع d_1 که تا سطح زمین ادامه دارد با یک ستون معادل و کوتاه‌تر جیوه با ارتفاع d_2 در بالای زمین جایگزین شده است. با فواصل ht، H، d_1 و d_2 نشان داده در شکل، ارتفاع مکش برابر است با $h_t=d_1-H=۱۳/۶d_2-H$ که در آن $۱۳/۶d_2$ جایگزین d_1 شده است زیرا چگالی جیوه ۱۳٫۶ گرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد و این بدان معنی است که یک سانتی‌متر از ارتفاع ستون جیوه، فشاری معادل ۱۳٫۶ سانتی‌متر ارتفاع ستون آب تولید می‌نماید. در این معادله، وزن مخصوص جیوه ۱۳٫۶ فرض شده است که از نظر عددی با چگالی آن برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب برابر است. وزن مخصوص، نسبت وزن یا جرم یک ماده به وزن یا جرم همان حجم از یک مادهٔ دیگر (آب برای سیالات و جامدات؛ هوا یا هیدروژن برای گازها) می‌باشد و بدون واحد میباشد. منافذ کلاهک متخلخل و مخازن (در شکل‌های ۴-۱ و ۴-۲)، برای اهداف آموزشی رسم شده‌اند.

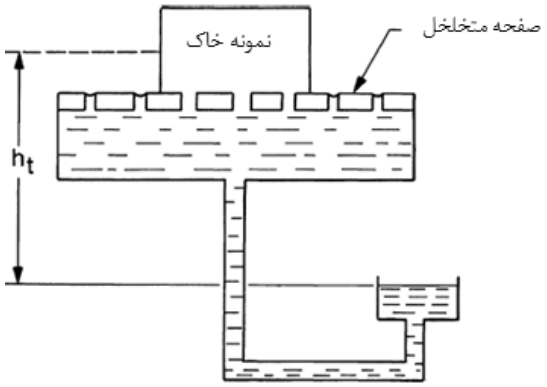
در آزمایشگاه، می‌توان از صفحات متخلخل برای اندازه‌گیری مکش رطوبتی در نمونه‌های خاک استفاده نمود (شکل ۴-۳). در شکل۴-۳، ارتفاع ht ارتفاع مکش می‌باشد.



شکل ۴-۱. نوعی از تانسیومتر

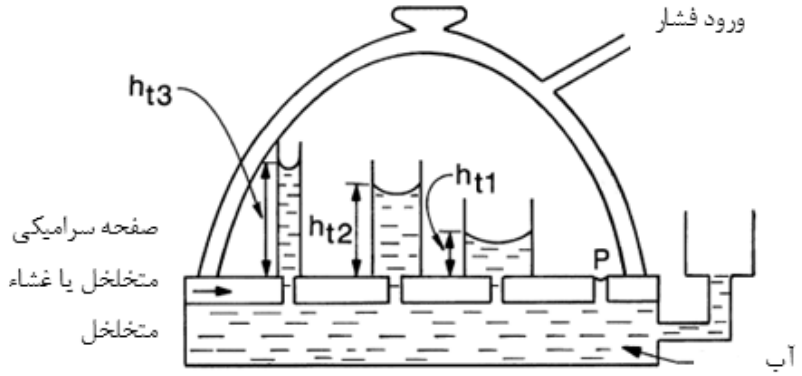


شکل ۴-۲. تانسیومترهای معادل آب و جیوه



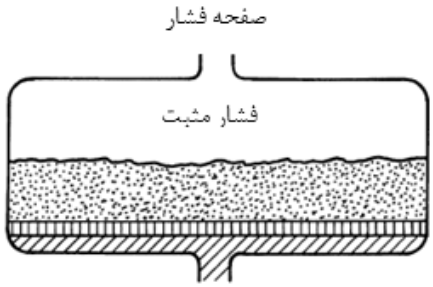
شکل ۴-۳. دستگاه صفحهٔ متخلخل فشار

در عمل، ارتفاع مکش یک تانسیومتر نمی‌تواند از سه چهارم بار یا ۷۵۰ سانتی‌متر ارتفاع ستون آب، تجاوز نماید که به‌دلیل ورود هوا از محلول خاک به داخل تانسیومتر است و سبب انفصال پیوستگی ستون آب می‌شود. مقدار ۷۵۰ سانتی‌متر به این معنی نیست که مکش رطوبتی بیشتر از آن، در داخل خاک اتفاق نمی‌افتد بلکه ۷۵۰ سانتی‌متر، کل تنشی است که تانسیومتر میتواند اندازه‌گیری نماید. برای مقادیر بزرگ‌تر، می‌توان از دستگاه فشار استفاده نمود. در شکل ۴-۴ سه لولهٔ کاپیلاری با ارتفاع صعود آب h_{t1}، h_{t2}، و h_{t3} نشان داده شده است. کف لوله‌های کاپیلاری می‌تواند روی صفحهٔ سرامیکی متخلخل، یا غشاء متخلخل قرار گیرد. یک صفحهٔ شیشه‌ای زنگوله‌ای شکل (bell jar)، روی لوله‌ها را می‌پوشاند و فشار، وارد صفحهٔ شیشه‌ای (jar) می‌گردد. اگر فشاری معادل h_{t1} سانتی‌متر از ستون آب وارد شود، ستون h_{t1} تا رویه بالایی غشاء زهکشی خواهد شد. اگر فشار h_{t2} سانتی‌متر وارد شود، ستون h_{t2} تا رویهٔ بالایی غشاء زهکشی خواهد شد و اگر h_{t3} سانتی‌متر فشار وارد گردد، هر سه زهکشی خواهند شد.



شکل ۴-۴. دستگاه فشار

اگر غشاء متخلخل (porous membrane) استفاده گردد، منافذ غشاء زهکشی نخواهد شد مگر اینکه فشارهای بیشتر از ۳۰ بار به‌کار رود. در فشارهای زیاد می‌توان از دستگاه‌های صفحات فشار استفاده نمود(شکل ۴-۵). این دستگاه‌ها، تا فشارهای بیش از ۳۰ بار و یا حتی ۱۰۰ بار، کار می‌کنند.



شکل ۴-۵. صفحهٔ فشار. در داخل دستگاه، خاک روی یک غشاء متخلخل قـرار دارد. جنس فولادی دستگاه، اعمال فشارهای زیاد را ممکن می‌سازد.

اثرات دما بر تانسیومترها

دما به دو طریق، بر قرائت‌های تانسیومتر تأثیر می‌گذارد:

۱. اثر دما بر آب در خاک

۲. اثر دما بر دستگاه

دما بر خواص فیزیکی آب شامل چگالی و کشش سطحی تأثیر می‌گذارد. بنابراین پتانسیل ماتریک (مکش) آب خاک، تحت تأثیر تغییرات دما قرار می‌گیرد. مهم‌ترین اثر دما، در سطح خاک (که حداکثر تغییرات رخ می‌دهد) اتفاق می‌افتد.

دما به‌طور مستقیم بر دستگاه اثر می‌گذارد زیرا بالا رفتن دما سبب انبساط جیوه می‌شود. فلز به‌کار رفته در تانسیومتر می‌تواند سبب هدایت گرما از هوا به داخل خاک گردد. استفاده از پلاستیک به‌جای فلز در ساخت تانسیومتر، می‌تواند سبب به حداقل رسیدن اثرات دما گردد. می‌توان با عایق کردن تانسیومتر یا قرائت در هنگام صبح که هنوز هوا به اندازهٔ کافی گرم نشده است، اثرات دما را حداقل نمود. از تانسیومتر نمی‌توان در هوای یخبندان استفاده کرد زیرا آب داخل تانسیومتر یخزده و آن را خواهد شکست. نصب تانسیومتر در عمق زیاد یا استفاده از محلول‌های متانول- آب، می‌تواند تانسیومتر را تا دمای ۱۸- درجه سانتیگراد حفظ نماید.

کاربرد تانسیومترها

۱. برای تعیین عمق ریشه دوانی. می‌توان در زمان‌های مختلف مقـدار مکـش را قرائـت نمود و نرخ افزایش مکش خاک در هر عمق را به تراکم ریشه‌های فعال ارتباط داد.

۲. برای تعیین زمان آبیاری. زمانی که قرائت تانسیومتر در عمقی از خاک که مقدار ریشه‌های تغذیه شونده بیشتر است، به مقدار از قبل تعیین شده برسد زمان آبیاری است. طول مدت یک آبیاری، با استفاده از تانسیومترهایی که در عمق ثانویه یا بزرگتر نصب شده‌اند، تعیین می‌گردد. اگر قرائت مکش در این عمق ثانویه کم باشد (پتانسیل ماتریک زیاد) نشان‌دهندهٔ این است که یک آبیاری کوتاه مدت لازم است. برعکس، اگر قرائت مکش زیاد باشد، آبیاری باید تا زمانی ادامه یابد که مقدار مکش کم شود.

۳. برای تعیین زمان آبیاری‌های گلخانه‌ای

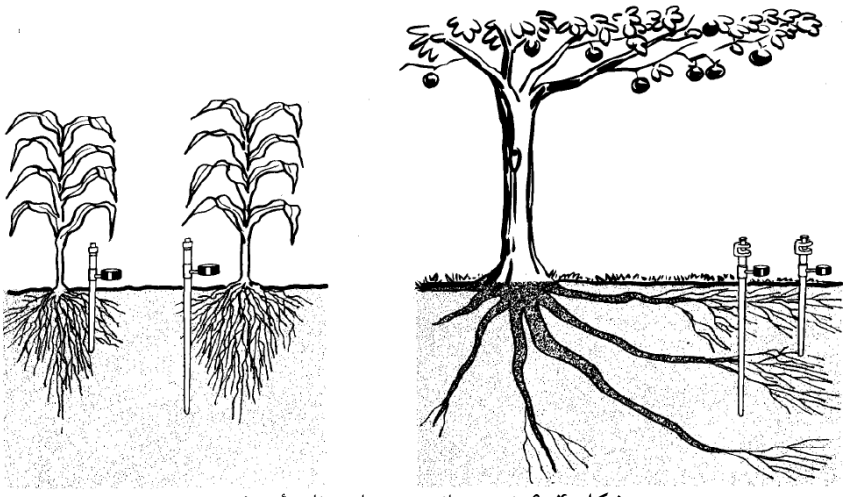
۴. برای تعیین عمق سطح ایستابی. زمانی که قرائت تانسیومتر در مزرعه زیر صفر باشد، نشان‌دهندهٔ این است که سطح ایستابی بالاتر از عمق نصب کلاهک قرار دارد. قرائت منفی برحسب میلی‌بار، معادل فاصله برحسب سانتی متر از سطح ایستابی تا عمق کلاهک می‌باشد.

۵. تعیین شیب هیدرولیکی با استفاده از اندازه‌گیری‌های دو تانسیومتر. استفاده از دو تانسیومتر در دو عمق مختلف تنها روش تعیین جهت جریان آب (بالا یا پایین) در داخل خاک است. این امر، در مطالعات بیلان آب برای تعیین مؤلفه زهکشی (آبشویی از ناحیهٔ ریشه) اهمیت زیادی دارد.

نحوهٔ استفاده از تانسیومترها

تانسیومترها براساس ایجاد خلاء جزئی در لولهٔ بسته، هنگامی که آب از کلاهک سرامیکی به خاک اطراف حرکت می‌کند، عمل می‌کنند. مکش ایجاد شده را می‌توان با استفاده از یک مانومتر آب، مانومتر جیوه یا یک خلاءسنج اندازه‌گیری کرد. مقیاس‌ها می‌تواند براساس صدم اتمسفر و یا سانتی متر آب، کالیبره گردد. تانسیومترهای جیوه‌ای به‌دلیل دقت زیادشان، معمولاً کاربرد تحقیقاتی دارند. تانسیومترهایی که دارای خلاء سنج بوردون[1] می‌باشند، به‌دلیل ساده بودن برای استفاده‌های عملی و کنترل آبیاری در خاک‌های خاص، مناسب‌ترند.

1. Bourdon vacuum gauges



شکل ۴-۶. نصب تانسیومترها در ناحیهٔ ریشه

کلاهک تانسیومتر در عمق مورد نظر خاک (شکل ۴-۶) قرار داده می‌شود و پس از آن، لوله باید پر آب گردد. آب از کلاهک به داخل خاک حرکت می‌کند تا زمانی‌که آب موجود در کلاهک و خاک به تعادل برسند. با افزایش مکش خاک (با کاهش رطوبت خاک)، عدد خلاءسنج زیاد می‌شود. برعکس، افزایش رطوبت خاک مکش را کاهش داده و در نتیجه عدد تانسیومتر کم می‌شود. تانسیومترها تا مکش کمتر از ۰٫۸۵ اتمسفر، نوسانات رطوبت خاک را نشان می‌دهند ولی در این نقطه هوا وارد سیستم شده و کارکرد آن متوقف می‌شود. در صورت وقوع این اتفاق، لولهٔ تانسیومتر باید قبل از استفادهٔ مجدد پر از آب شود.

استفاده از تانسیومتر به تجربهٔ مناسبی نیاز دارد. اگر هوا از محل اتصالات وارد سیستم شود، اندازه‌گیری‌ها قابل اعتماد نخواهد بود.

قرائت‌های تانسیومتر، تنها مکش خاک را نشان می‌دهند که بیانگر رطوبت نسبی خاک اطراف کلاهک تانسیومتر است. آن‌ها رطوبت خاک را به‌طور مستقیم نشان نمی‌دهند. اندازه‌گیری‌های مکش برای تعیین زمان آبیاری مفید می‌باشد ولی نشان نمی‌دهند که چه مقدار آب باید مصرف شود. برای تبدیل اندازه‌گیری‌های مکش رطوبتی به درصد آب قابل دسترس، منحنی مشخصهٔ رطوبتی مربوط به هر خاک مورد نیاز است.

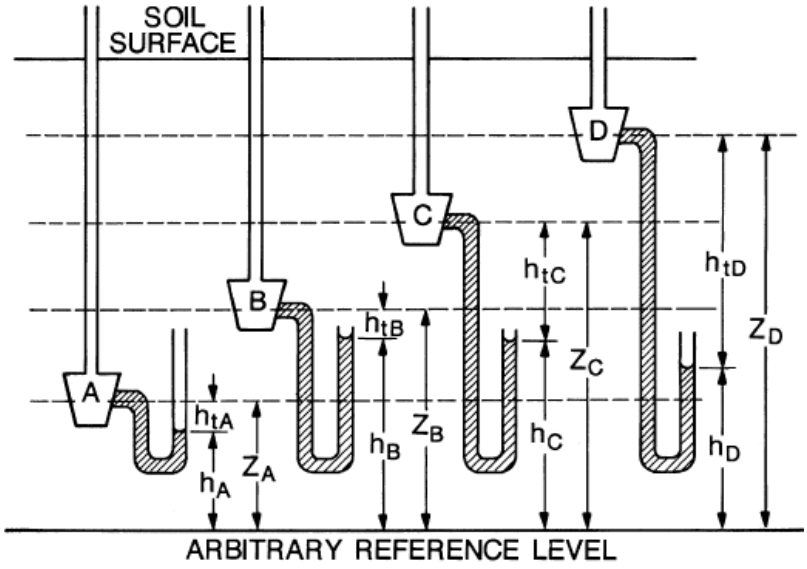
تانسیومترها به‌طور رضایت‌بخشی، کل محدودهٔ آب قابل دسترس را در انواع خاک‌ها اندازه‌گیری نمی‌کنند. ولی احتمالاً بهترین وسیلهٔ مزرعه‌ای قابل استفاده برای تعیین وضعیت رطوبتی برای در خاک‌های متوسط تا درشت بافت در محدودهٔ مرطوب آن‌ها می‌باشند. استفاده از تانسیومترها برای خاک‌های شنی مناسب‌تر است زیرا در این خاک‌ها، بخش اعظم آب قابل استفادهٔ گیاهان، در مکش کمتر از یک اتمسفر نگهداری می‌شود. کاربرد تانسیومترها برای خاک‌های ریزبافت که تنها بخش کوچکی از آب قابل استفاده در آن‌ها، در مکش کمتر از یک اتمسفر نگهداری می‌شود، کمترین مطلوبیت را دارد. تانسیومترها معمولاً در نیمهٔ پایینی ناحیهٔ ریشه گیاه، در خاک‌های با بافت ریزتر نصب می‌شوند، برای اینکه حتی پس از تخلیهٔ قابل توجه آب، قرائت‌ها در محدودهٔ کاری تانسیومتر باقی بمانند.

حرکت آب بین تانسیومترها

با توجه به اینکه بین فشار (فشار منفی یا مکش) و ارتفاع، رابطه وجود دارد پس می‌توان از ارتفاع برای تعیین جهت حرکت آب در خاک به وسیلهٔ دو تانسیومتر استفاده نمود. در شکل ۴-۷، تصویر فیزیکی از نحوهٔ جمع شدن بار مکش و بار ثقل z، و ایجاد بار کل ارائه شد. تانسیومترها به همراه مانومترهای آب در داخل خاک نشان داده شده اند. در حالت واقعی، به‌جای قرار دادن مانومترهای آب در داخل خاک، می‌توان از مانومترهای جیوه در سطح خاک استفاده نمود. سطح مقایسه در عمق z_D، زیر بالاترین کلاهک تانسیومتر در نظر گرفته شد.

در شکل۴-۷، برای هر یک از نقاط A، B، C و D، بار کل به‌صورت $h=h_t+z$ می‌باشد (که h_t منفی است). برای نقاط A و B، h_{tB} مساوی h_{tA} در نظر گرفته شد. بنابراین، در نقاط A و B وضعیت رطوبتی خاک یکسان است، اما این بدان معنا نیست که بین این دو نقطه، جابه‌جایی رطوبت وجود ندارد. برعکس، تا زمانی‌که بار کل در نقطهٔ B، بزرگ‌تر از مقدار متناظر در نقطهٔ A باشد، حرکت آب از نقطهٔ B به سمت نقطهٔ A خواهد بود. در نقاط C و B، مشاهده می‌شود که h_{tC} منفی‌تر از h_{tB} است. بنابراین در نقطهٔ C، خاک خشک‌تر از نقطهٔ B می‌باشد ولی آب از خاک مرطوب‌تر در نقطهٔ B به خاک خشک‌تر در نقطهٔ C حرکت نخواهد کرد زیرا در این شرایط بار کل در

نقطهٔ B (h_B) مساوی بار کل در نقطهٔ C (h_C) است. بنابراین آب از نقطهٔ B به نقطهٔ C و همچنین از نقطهٔ C به نقطهٔ B حرکت نخواهد کرد، به‌عبارت‌دیگر رطوبت در حالت تعادل است. درنهایت، آب از نقطهٔ C به سمت نقطه D انتقال نخواهد یافت زیرا شرایط رطوبتی در نقاط C و D، به‌گونه‌ای است که h_C بزرگتر از h_D است. با این وجود چون ht_D منفی تر از ht_C است (مکش در نقطه D بیشتر از نقطه C است)، خاک در نقطهٔ D باید به مقدار قابل توجهی خشک‌تر از نقطهٔ C باشد تا سبب جریان رو به بالا شود. در شکل ۴–۷، اگر تراز مقایسه در بالای شکل باشد، مقادیر h_A، h_B و غیره همیشه منفی خواهند بود و البته مقدار ht برای خاک غیر اشباع بدون توجه به سطح مقایسه، منفی می‌باشد.



شکل ۴–۷. توصیف حرکت آب بین تانسیومترها

۴–۴–۳ بلوک‌های مقاومت

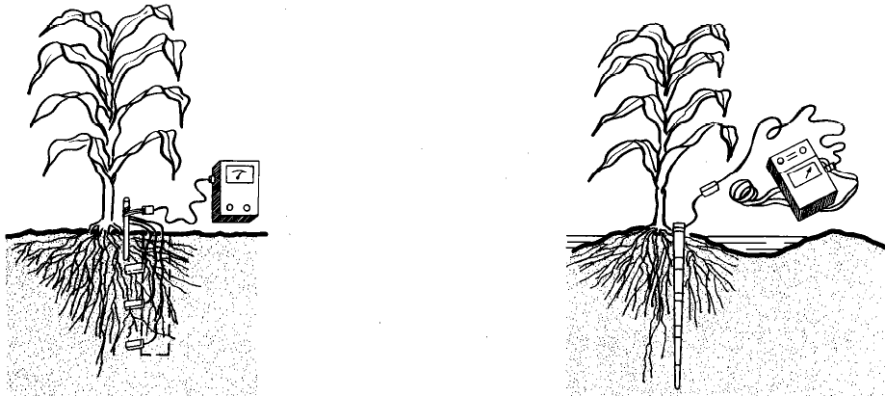
این بلوک ها (شکل ۴–۸) براساس این اصل که تغییر رطوبت خاک در خاصیت الکتریسیتهٔ خاک یا دستگاه موجود در خاک تغییر ایجاد می‌کند، کار می‌کنند. برای ساختن بلوک گچی، قالب مکعبی شکلی به ابعاد ۴ در ۳ در ۱٫۵ سانتی متر تهیه نموده،

سپس دو قطعه تور سیمی (با اندازهٔ ۲۰ مش) از فولاد ضد زنگ به ابعاد یک در دو سانتی‌متر انتخاب کرده و به هر کدام، یک سیم لحیم می‌نماییم. این صفحات که الکترود نامیده می‌شوند، به فاصلهٔ کمی از هم (حدود یک سانتی متر) به طور موازی در داخل قالب قرار داده شده و با قلاب یا بست پلاستیکی محکم بسته می‌شوند. پس از آماده شدن قالب و الکترودها، گچ دندانپزشکی را به نسبت ۱ به ۱ با آب مقطر مخلوط نموده و پس از آنکه به‌خوبی به‌هم زده شد آن را یکباره اما به‌آرامی، داخل قالب می‌ریزند. با ضربه زدن به قالب می‌توان هوای محبوس شده را خارج نمود. پس از نیم ساعت، گچ به اندازهٔ کافی سفت شده و می‌توان آن را از قالب خارج نمود. این بلوک‌ها را حداقل به مدت یک شبانه‌روز در سایه خشک کنید آنگاه آن‌ها را در داخل آب قرار دهید تا به مدت نیم ساعت اشباع شوند و در همین وضعیت، مقاومت دو سر الکترود را با دستگاه مقاومت‌سنج اندازه‌گیری کنید. اگر عدد قرائت شده در بعضی از بلوک‌ها از ۵ درصد متوسط قرائت‌ها تجاوز نمود از آن‌ها استفاده نکنید. بلوک‌های آماده شده را در داخل خاک گلدان قرار داده و پس از آبیاری، مقاومت را در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری کرده و همزمان با برداشت نمونه، رطوبت خاک را به دست آورید. با رسم منحنی تغییرات مقاومت بلوک و درصد رطوبت خاک، بلوک‌ها واسنجی می‌شوند. حال اگر این بلوک‌ها را در خاک نصب کنیم کافی است فقط مقاومت را اندازه‌گیری نمود تا از روی این منحنی‌ها، درصد رطوبت خاک به‌دست آید.

در هنگام آزمایش بلوک‌های گچی، پس از آنکه آن‌ها را در داخل آب قرار دادید تفاوت قرائت بلوک‌ها نباید از ۵۰ اهم بیشتر باشد. در این صورت بلوک‌ها یکنواخت نخواهند بود. اگر قرائت بلوک‌ها در داخل آب، همگی صفر باشند ایده‌آل است اما اگر قرائت‌ها اعدادی تا حدود ۴۰۰ اهم را نشان دهند، باز هم میتوان با اعمال ضریب اصلاحی از آن‌ها استفاده کرد ولی اگر قرائت بلوک در آب بسیار زیاد بود حتماً توصیه می‌شود که از آن استفاده نگردد. در حد ظرفیت زراعی باید قرائت بلوک حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ و در حد پژمردگی ۵۰۰۰۰ تا ۷۵۰۰۰ اهم باشد.

بزرگ‌ترین مشکل در استفاده از بلوک‌های گچی، حساسیت آن‌ها نسبت به شوری محلول خاک است. وجود نمک باعث افزایش هدایت الکتریکی بلوک و درنتیجه اشتباه در تخمین رطوبت می‌گردد. با توجه به نیاز تعادل پتانسیلی بین بلوک و

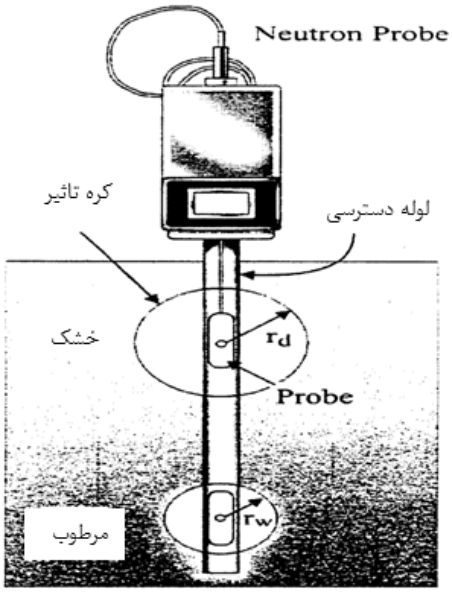
خاک، لازم است که پس از نصب بلوک به مدت چندین ساعت صبر کرد تا این تعادل برقرار شود. برای این منظور، بلوک‌ها قبل از آبیاری در خاک قرار داده می‌شوند و معمولاً در تمام طول فصل رشد، در خاک باقی می‌مانند و فقط سیم‌های متصل به الکترودها از خاک خارج می‌باشند تا در مواقع اندازه‌گیری، به دو سر مقاومت‌سنج وصل شوند. گرچه در خاک‌های معمولی، بلوک می‌تواند تا ۵ سال مورد استفاده قرار گیرد ولی در خاک‌های شور یا آلی و خاک‌های مرطوب، بیش از یک سال عمر نخواهند کرد. در استفاده از بلوک‌های گچی، توصیه می‌شود فاصلهٔ آن‌ها از یکدیگر درخاک کمتر از ۳۰ سانتی‌متر نباشد. بلوک‌ها نسبت به درجه حرارت حساس بوده و در هنگام واسنجی آن‌ها باید این مسأله در نظر گرفته شود.



شکل ۴-۸ . بلوک‌های اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی خاک

۴-۴-۴ روش نوترون متر Neutron meter

دستگاه نوترون متر شامل یک محفظهٔ انتشار نوترون های سریع و بخش گیرندهٔ نوترون های کند است. این مجموعه را میله یا پروب (Probe) گویند. وقتی نوترون های سریع به ذرات هم جرم خود برخورد می‌کنند، مقدار زیادی انرژی از دست داده و به نوترون کند تبدیل می‌شوند (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹. دستگاه نوترون متر جهت اندازه‌گیری رطوبت خاک

هستهٔ اتم هیدروژن، تقریباً هم جرم با ذرات نوترون است. در خاک نیز تقریباً تنها منبع هیدروژن، همان آب موجود درخاک است. بنابراین تعداد نوترون های کند شدهٔ برگشتی، متناسب با مقدار رطوبت خاک است. به کمک یک دستگاه شمارش‌گر، نوترون های کند شدهٔ برگشتی ثبت می‌شوند و سپس به کمک منحنی واسنجی (که در آن، رابطهٔ هیدروژن یا رطوبت خاک با تعداد نوترون های کند شده مشخص است) می‌توان به درصد رطوبت حجمی خاک پی برد.

هرچه رطوبت خاک بیشتر باشد، تعداد بیشتری نوترون کند شده به گیرنده می‌رسد. بنابراین یک رابطهٔ خطی بین رطوبت حجمی خاک و نوترون‌های کند شده وجود دارد.

$$N_w = m\theta_v + b \qquad (۶-۴)$$

$$\frac{N_w}{N_s} = y\theta_v \qquad (۷-۴)$$

N_w تعداد نوترون‌های کند شده در خاک مرطوب، N_s تعداد نوترون‌های کند شده در آب یا جذب‌کننده استاندارد، y عدد ثابت، θ_v رطوبت حجمی خاک، b و m عرض از مبدأ و شیب خط معادله بین N_w و θ_v می‌باشند.

مزایای روش نوترون‌متر

احتیاج به نمونه‌برداری از خاک ندارد و خاک، دست‌نخورده باقی می‌ماند. مقدار رطوبت در هر فازی تعیین می‌شود، سرعت اندازه‌گیری زیاد است، در حجم وسیع خاک و در شرایط واقعی مزرعه امکان کاربرد دارد و می‌توان اندازه‌گیری را با هر تعداد، تکرار نمود.

معایب

هزینهٔ زیاد دستگاه، نیاز به تهیهٔ منحنی واسنجی برای هر نوع خاک، عدم امکان اندازه‌گیری رطوبت در لایهٔ سطحی خاک، خطرات ناشی از تابش نوترون برای سلامت فرد، تأثیر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک (نظیر شوری و میزان مواد آلی) بر روی اندازه گیری‌ها.

۴-۴-۵ روش جذب اشعه گاما

به‌طورکلی، دستگاه جذب اشعهٔ گاما از دو قسمت مجزا تشکیل شده است:

منبع تولید اشعهٔ گاما (سزیم ۱۳۷ که اشعهٔ گاما را با انرژی ۰٫۶۶ میلی‌ولت ساطع می‌کند) و یک گیرندهٔ اشعهٔ گاما. بین این دو قسمت، فاصله‌ای وجود دارد که توسط خاک اشغال می‌شود. اگر خاک موجود بین دو قسمت دارای چگالی ثابت باشد، شدت اشعهٔ انتقالی فقط با تغییرات مقدار آب موجود در خاک تغییر می‌کند که به‌صورت یک تابع نمایی بیان می‌شود.

مزایا: توانایی اندازه‌گیری تغییرات زمانی رطوبت خاک، روش غیر تخریبی، تعیین رطوبت در اعماق مختلف حتی اعماق سطحی و قابلیت اتوماتیک کردن.

معایب: کاربرد این دستگاه در صحرا محدود است، خطرات ناشی از تابش اشعهٔ گاما، محدودیت ضخامت خاک (۲٫۵ سانتی‌متر یا کمتر)، تأثیر تغییر چگالی بر اندازه‌گیری رطوبت، هزینهٔ بالا و خطای زیاد در خاک‌های مطبق.

۴-۵ خطای نمونه‌برداری

خطای نمونه‌برداری، مشکلی است که غالباً در تعیین رطوبت خاک وجود دارد. به دست آوردن نمونه‌های معرف، مسأله‌ای مهم می‌باشد. رشد غیریکنواخت گیاهان و نفوذ غیریکنواخت ریشه باید در نظر گرفته شوند زیرا سبب تغییرات رطوبت خاک می‌شوند. تغییرات بافت و ساختمان خاک؛ نفوذ، انتقال و نگهداشت آب در خاک را تغییر می‌دهند. تغییرات شکل ظاهری سطح زمین، بر فرصت نفوذ آب باران و آبیاری تأثیر دارد و شکل و اندازهٔ فاروهای آبیاری، سرعت نفوذ آب آبیاری را تغییر می‌دهد. کلیهٔ این عوامل سبب می‌شوند که مقدار رطوبت خاک از یک نقطه به نقطهٔ دیگر در مزرعه تغییر کند. برای به‌دست آوردن نمونهٔ خاک معرف شرایط مزرعه، لازم است که چندین نمونه تهیه شود مگر اینکه روش مورد استفاده برای تعیین رطوبت خاک، به‌طور ذاتی حجم بزرگی از خاک را در برداشته باشد. تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای به‌دست آوردن نمونهٔ معرف، با افزایش تغییرات رطوبت خاک افزایش می‌یابد.

عامل دیگری که بر پیچیدگی اندازه‌گیری رطوبت خاک می‌افزاید این است که همهٔ روش‌های مورد استفاده برای تعیین رطوبت خاک، براساس نمونه‌های کوچک می‌باشند. انتظار می‌رود که مقدار رطوبت هر نمونه با مقدار متوسط مربوط به کل نمونه‌ها، حداقل ۲۰ درصد (بیشتر یا کمتر) اختلاف داشته باشد.

۴-۶ محل اندازه‌گیری رطوبت خاک

محل اندازه گیری رطوبت خاک اهمیت زیادی دارد. انتخاب محلی که برآورد خوبی از میزان رطوبت خاک در کل مزرعه باشد موضوعی است که به شناخت خاک، تجارب قبلی و قضاوت صحیح مربوط می‌شود. موقعیت این محل‌ها در خاک های یکنواخت، به‌اندازهٔ مزارع دارای خاک‌های غیریکنواخت، مشکل نمی‌باشد. معمولاً توصیه می‌شود که نقطه‌ای در یک سمت مزرعه که آبیاری از آنجا آغاز می‌شود به‌عنوان نقطهٔ مرجع برای شروع دور آبیاری، انتخاب گردد. حداقل یک محل در طرف مقابل این نقطه در انتهای مزرعه، برای تعیین اینکه آیا رطوبت کافی در آنجا تأمین شده است یا خیر، باید انتخاب شود. در سایر نقاط بحرانی مزرعه نیز (مانند محل‌هایی که خیلی زود خشک می‌شوند یا مدت زمان طولانی مرطوب می‌مانند) باید رطوبت خاک اندازه گیری شود.

بهتر است که در مناطق بحرانی، حداقل دو ایستگاه اندازه‌گیری وجود داشته باشد و در صورت امکان، ۲ تا ۳ ایستگاه در مناطقی که معرف بخش وسیعی از مزرعه هستند قرار داشته باشد. کافی بودن نقاط اندازه‌گیری، داده های کافی برای آبیار جهت مدیریت سیستم را فراهم خواهد کرد به‌طوری‌که میزان رطوبت خاک در کل مزرعه کنترل می‌شود. این نوع اطلاعات، نقش محوری در تعیین میزان و دور آبیاری در محل‌های مختلف مزرعه و در دوره‌های مختلف فصل رشد، ایفا می‌نماید. در آبیاری بارانی، ایستگاه‌های اندازه‌گیری باید بین آبپاش‌ها و به فاصلهٔ ۱۰ تا ۱۵ فوت از خط لاترال باشد. برای گیاهان ردیفی، اندازه‌گیری‌ها باید در ردیف یا نزدیک گیاه ولی نه زیر شیار یا فارو انجام شود. برای درختان، معمولاً اندازه‌گیری‌ها باید به فاصلهٔ ۴ تا ۶ فوت از تنهٔ درخت و داخل خط قطره چکان باشد.

اندازه‌گیری‌ها باید از بخشی از خاک که ریشه‌های گیاه آب را از آنجا جذب می‌کنند و مطابق با الگوی جذب آب یک گیاه خاص انجام شود. در خاک‌های دارای بافت یکنواخت، بایستی یک اندازه‌گیری در ناحیهٔ یک‌چهارم بالایی ریشه و یک تا سه اندازه‌گیری در ترازهای پایین‌تر صورت گیرد. به‌عنوان نمونه اگر حداکثر عمق جذب آب برای یک گیاه ۲۴ اینچ باشد، اندازه‌گیری‌ها احتمالاً باید در اعماق حدود ۶، ۱۲ و ۱۸ اینچ انجام شود. در خاک‌های لایه لایه، باید لایه‌های مختلف بافت خاک مورد اندازه‌گیری قرار گیرند. برای پیش‌بینی زمان آبیاری در مراحل اولیهٔ توسعهٔ ریشه، اندازه‌گیری لازم برای اغلب گیاهان در عمق ۶ اینچی انجام می‌گیرد. با تکمیل سیستم ریشه‌ای، باید رطوبت خاک در هر سه عمق اندازه‌گیری شود تا تصویر روشنی از وضعیت رطوبتی خاک در سراسر ناحیهٔ جذب آب به‌دست آید.

۴-۷ پتانسیل آب خاک

این اصطلاح، بیان کنندهٔ انرژی پتانسیل یک جزء کوچک آب در داخل خاک و گیاه (مثلا یک میلی‌گرم) می‌باشد. مفهوم پتانسیل آب خاک، دارای اهمیت بسیار زیادی است. این مفهوم، جایگزین طبقه‌بندی‌های قرارداری (آب ثقلی، آب کاپیلاری، آب‌هایگروسکوپیک) مورد استفاده در مراحل ابتدایی توسعهٔ علم فیزیک خاک، گردیده است. کلیهٔ آب موجود در خاک (گیاه)، در معرض نیروهایی هستند که از ۴ عامل ناشی

می‌شوند: وجود فاز جامد (بافت)، ثقل، نمک‌های محلول و عمل فشار گاز یا آب خارجی. اگر این نیروها در خاک با نقطهٔ مرجع مقایسه شوند، آن ها را می‌توان برمبنای انرژی پتانسیل بیان نمود و هر یک از عوامل ۴ گانه را به‌صورت یک مقدار انرژی پتانسیل مجزا در نظر گرفت. مجموع این ۴ مقدار انرژی پتانسیل را پتانسیل آب خاک یا کل انرژی پتانسیل (برای تأکید بر اینکه این انرژی از عوامل مختلفی تشکیل شده است)، می‌نامند. انرژی پتانسیل آب در داخل خاک از یک نقطه به نقطهٔ دیگر و از زمانی به زمان دیگر تفاوت دارد. اختلاف انرژی پتانسیل آب از یک نقطه در سیستم خاک تا نقطهٔ دیگر، سبب حرکت آب در داخل خاک می‌گردد. در داخل خاک، آب همواره در جهت کاهش انرژی پتانسیل حرکت می‌نماید.

انرژی پتانسیل را معمولاً با حرف یونانی سای (Ψ) نشان می‌دهند Ψ_w و Ψ_T به‌ترتیب، نشان‌دهندهٔ پتانسیل آبی و کل پتانسیل آب می‌باشند. واحدهای مختلفی برای بیان پتانسیل استفاده می‌شوند که برخی از آن‌ها عبارتند از: بار، سانتی‌متر آب، سانتی‌متر جیوه، اینچ آب، اتمسفر، سانتی‌بار، میلی‌بار، ژول بر کیلوگرم، پوند بر اینچ مربع، ارگ بر گرم و دین بر سانتی‌متر مربع. از بین این واحدها، واحد بار کاربرد زیادی دارد. یک بار معادل ۱۰۲۰ سانتی‌متر آب، ۷۵٫۰۱ سانتی‌متر جیوه، ۴۰۵٫۱ اینچ آب، ۰٫۹۸۷ اتمسفر، ۱۰۰ سانتی‌بار، ۱۰۰۰ میلی‌بار، ۱۰۰ ژول بر کیلوگرم، 10^6 ارگ بر گرم و 10^6 دین بر سانتی‌متر مربع می‌باشد.

نقطهٔ مرجع برای انرژی پتانسیل، انرژی آب آزاد خالص در ارتفاع یا تراز خاص در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که آب موجود در خاک، تحت تأثیر نیروهایی نظیر جذب سطحی (adsorption)، جذب داخلی (absorption)، همدوستی (cohesion) و وجود املاح محلول قرار دارد؛ لذا به اندازهٔ آب خالص، انرژی برای انجام کار ندارد. بنابراین، پتانسیل آب خاک به‌طور معمول منفی است. مؤلفه‌های مختلف پتانسیل آب خاک در ادامه تشریح می‌شوند.

۴-۷-۱ پتانسیل ماتریک (Ψ_m)

انرژی پتانسیل ماتریک یا پتانسیل ماتریک، یک خصوصیت دینامیک خاک بوده و بخشی از پتانسیل آب است که از نیروهای موئینگی و جذب سطحی بافت خاک ناشی

می‌شود و برای یک خاک اشباع، مقدار آن از لحاظ تئوری صفر است. برحسب عادت، این پتانسیل را پتانسیل موئینگی نیز می‌نامند زیرا بخش وسیعی از آن، ناشی از عمل موئینگی می‌باشد که به‌منظور صعود آب در لوله‌های موئین کوچک استوانه‌ای، انجام می گیرد. نیروهای موئینگی و جذب سطحی، آب را جذب و به خاک پیوند داده و انرژی پتانسیل آن را، به کمتر از مقدار مربوط به تودهٔ آب می‌رسانند. با کاهش مقدار آب در مواد متخلخل، آبی که از طریق نیروی موئینگی در فضاهای خالی نگهداری می‌شود، در مقایسه با آبی که به طور مستقیم روی سطح ذرات حفظ می‌شود، تقریباً ناچیز می‌گردد. بنابراین اصطلاح پتانسیل ماتریک، پدیده‌هایی را تحت پوشش قرار می‌دهد که آنالوژی موئینگی برای آن‌ها مناسب است.

پتانسیل ماتریک آب خاک در هر نقطه را، می‌توان با استفاده از تانسیومتر تعیین کرد. در واقع تانسیومتر مکش رطوبتی خاک را اندازه‌گیری می‌نماید. واحدهای مورد استفاده برای پتانسیل ماتریک و سایر پتانسیل‌ها زمانی آشکار می‌شود که ما اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک را با یک تانسیومتر مد نظر قرار دهیم. نیرو در واحد سطح یا فشار منفی آب در کلاهک سرامیکی، وزن در واحد سطح ستون آب معلق (hanginf water) می‌باشد که در واقع حجم ستون آب تقسیم بر مساحت ضرب در چگالی آب و شتاب ثقل می‌باشد:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = (V)(\rho_w)(\frac{g}{A}) = \frac{(hA\rho_w g)}{A} = h\rho_w g \qquad (۸-۴)$$

در این رابطه؛ P فشار، F نیرو، m جرم، g شتاب ثقل، A مساحت، V حجم، ρ_w چگالی آب، h ارتفاع و پتانسیل (فشار منفی) در واحدهای انرژی پتانسیل یا کار در واحد حجم می‌باشد. در سیستم واحد cgs، ۱۰۲۰ سانتی‌متر آب، فشار منفی معادل ۹۹۹۶۰۰ دین بر سانتی‌متر مربع تولید خواهد کرد:

$$(۱۰۲۰cm)(۱\frac{gr}{cm^۳})(۹۸۰\frac{cm}{s^۲}) = ۹۹۹۶۰۰\frac{dyne}{cm^۲} \qquad (۹-۴)$$

در سیستم cgs، ۱×۱۰^۶ دین بر سانتی‌متر مربع، معادل یک بار است. در سیستم SI (سیستم بین‌المللی واحدها) واحد فشار پاسکال (نیوتن بر مترمربع) است و ۱۰ بار

معادل یک مگاپاسکال (MPa) می‌باشد. واحد دین بر سانتی‌متر مربع همان انرژی پتانسیل در واحد حجم می‌باشد زیرا اگر صورت و مخرج کسر $\frac{F}{A}$ در معادلهٔ (۴-۸)، در یک سانتی‌متر ضرب شود، به‌کار در واحد حجم یا انرژی پتانسیل در واحد حجم تبدیل می‌شود:

$$\frac{[(\text{dyne})(\text{cm})]}{[(\text{cm}^{۲})(\text{cm})]} = \frac{\text{انرژی پتانسیل}}{\text{حجم}} = \frac{\text{erg}}{\text{cm}^{۳}} \qquad (۴-۱۰)$$

یک دین در سانتی‌متر، معادل یک ارگ (erg) می‌باشد.

واحدهای انرژی پتانسیل در واحد حجم را می‌توان با تقسیم بر چگالی آب برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، به واحدهای انرژی پتانسیل در واحد جرم تبدیل نمود:

$$\frac{(۱\times۱۰^{۶}\ \text{dyne}/\text{cm}^{۲})}{(۱\frac{\text{gram}}{\text{cm}^{۳}})} = ۱\times۱۰^{۶}\ \frac{\text{dyne}-\text{cm}}{\text{gram}} = ۱\times۱۰^{۶}\ \frac{\text{erg}}{\text{gram}} = ۱۰۰\frac{\text{joule}}{\text{Kg}} \qquad (۴-۱۱)$$

یک ژول معادل ۱×۱۰^{۷} ارگ می‌باشد. یا یک بار را می‌توان معادل ۱۰۰ ژول بر کیلوگرم در نظر گرفت. باید توجه شود که واحدهای پتانسیل ماتریک، مساوی واحدهای انرژی پتانسیل (ژول؛ ارگ) نمی‌باشند بلکه به‌صورت انرژی پتانسیل در واحد حجم یا واحد جرم بیان می‌شوند.

درصورتی‌که واحد کمّی آب برحسب وزن بیان شود، پتانسیل ماتریک فاصلهٔ عمودی بین نقطهٔ اندازه‌گیری در خاک (کلاهک سرامیکی در شکل ۴-۱۰) و سطح آب موجود در مانومتر است. در شکل ۴-۱۰، یک کلاهک سرامیکی موجود در خاک، به یک مانومتر آب متصل گردید تا تشکیل یک تانسیومتر را دهد. درصورتی‌که پتانسیل در واحد وزن بیان شود، پتانسیل ماتریک خاک در محل کلاهک سرامیکی برابر فاصلهٔ عمودی مرکز کلاهک تا سطح آب داخل مانومتر می‌باشد که در این شکل (۶ اینچ) ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد.

۴-۷-۲ پتانسیل ثقلی (Ψ_g یا Ψ_m)

انرژی پتانسیل ثقلی یا پتانسیل ثقلی، انرژی پتانسیل در ارتباط با موقعیت عمودی

می‌باشد. ارتفاع مبنا یا سطح مقایسه، می‌تواند برحسب نیاز انتخاب گـردد. خاکشناسـان معمولاً سطح خاک یا سطح آب زیرزمینی را، به عنوان سطح مبنا در نظر می‌گیرند. سطح مبنا عموماً به جهت حرکت آب (صعود یـا نفـوذ) بسـتگی دارد. درصـورتی‌کـه سـطح مقایسه، زیر نقطهٔ مورد نظر باشد باید کاری روی آب انجام شـود و در نتیجـه پتانسـیل ثقلی مثبت است. اگر سطح مقایسه بالاتر از نقطهٔ مورد نظر باشد، آب بایـد کـار انجـام دهد و در نتیجه پتانسیل ثقلی منفی است.

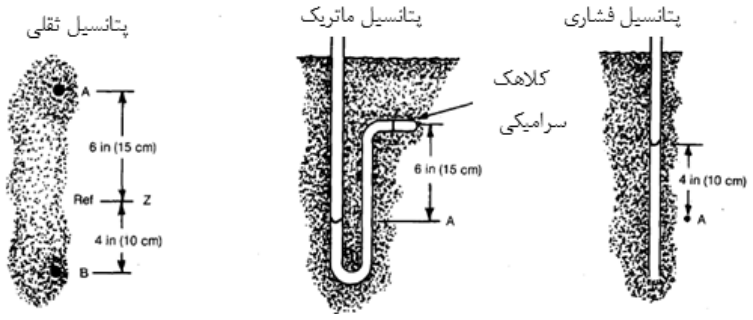
تعیین پتانسیل ثقلی، در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. این جزء از پتانسیل کل، مستقل از خواص خاک بوده و تنها به فاصلهٔ عمودی بین نقطهٔ مرجع و نقطهٔ مورد نظر بستگی دارد. در شکل ۴-۱۰ دو نقطه در یک خاک به فاصلهٔ مشخصی از نقطهٔ مرجع Z قرار دارند. پتانسیل ثقلی نقطهٔ A، ۱۵ سانتی‌متر و برای نقطهٔ B منفی ۱۰- سانتی‌متر می‌باشد، بنابراین اختلاف بین پتانسیل ثقلی دو نقطه ۲۵ سانتی‌متر است.

۴-۷-۳ پتانسیل فشاری (Ψ_p)

انرژی پتانسیل فشاری یا پتانسیل فشاری، انرژی پتانسیل حاصله در اثر وزن آب درنقطهٔ مورد نظر یا اختلاف فشار گاز در نقطهٔ مورد نظر نسبت به نقطهٔ مرجـع اسـت. گـاهی، انرژی پتانسیل فشاری به دو مؤلفهٔ مجزا تقسیم می‌شود: پتانسیل فشار هوا که در شرایط غیراشباع خاک اتفاق می‌افتد و پتانسیل فشار هیدرواستاتیک که در شرایطی رخ می‌دهـد که خاک اشباع باشد و یک فشار هیدرواستاتیک از فاز آب، روی نقطهٔ مورد نظر وجـود داشته باشد. در خاک های اشباع، گاهی به پتانسیل فشاری پتانسیل پیزومتریک نیز گفتـه می‌شود زیرا مقدار آن را می‌توان با استفاده از پیزومتر اندازه گیری کرد. پیزومتر، لولـه‌ای است که در نقطهٔ مورد نظر در داخل خاک قرار داده می‌شود و دو طرف آن باز بـوده و قسمت بـالایی آن در هـوای آزاد و تحـت فشـار اتمسـفر قـرار دارد. پیزومترهـا بـرای اندازه‌گیری عمق آب زیرزمینی استفاده می‌شوند. پتانسیل فشار گـاز در داخـل خـاک را می‌توان با استفاده از مانومتر اندازه‌گیری کرد.

اگر کمیت آب در واحد وزن بیان شود، پتانسیل فشاری فاصلهٔ عمودی بین سطح آب و نقطهٔ مورد نظر می‌باشد. مقدار آن برای نقاط بالای سطح ایستابی و در محل سطح ایستابی، صفر است و برای نقاط زیر سطح ایستابی همواره مثبت می‌باشد. در

شکل ۴-۱۰، یک لولهٔ پیزومتر (لوله‌ای که هر دو انتهای آن باز است) در داخل خاک تا عمق زیر سطح ایستابی نصب گردید. پتانسیل فشاری در نقطهٔ A، فاصلهٔ این نقطه تا سطح ایستابی (۴ اینچ) می‌باشد.



شکل ۴-۱۰. توصیف و نحوهٔ محاسبات پتانسیل‌های ثقلی، ماتریک و فشاری برمبنای انرژی در واحد وزن آب

۴-۷-۴ پتانسیل اسمزی (Ψ_s)

انرژی پتانسیل اسمزی یا پتانسیل اسمزی، بخشی از پتانسیل آب است که به جذب املاح به آب نسبت داده می‌شود. درصورتی‌که آب خالص و محلول، به‌وسیلهٔ یک غشاء نیمه‌تراوا که نسبت به آب نفوذپذیر و نسبت به جسم حل شدنی غیرقابل نفوذ باشد از هم جدا شوند، آب خالص وارد محلول می‌شود تا آن را از نظر غلظت شبیه خود سازد. برای جلوگیری از ورود آب به داخل محلول، باید فشاری روی سطح محلول اعمال گردد. این فشار عموماً فشار اسمزی نامیده می‌شود که از نظر مقدار، مساوی پتانسیل اسمزی ولی از نظر علامت، عکس آن می‌باشد. معمولاً در مطالعهٔ حرکت آب در خاک، از پتانسیل اسمزی صرف‌نظر می‌شود مگر اینکه خاک شور باشد. پتانسیل اسمزی در گیاهان اهمیت زیادی دارد.

همان‌گونه‌که ذکر گردید پتانسیل اسمزی در نتیجهٔ وجود املاح محلول (عموماً نمک) در محلول خاک و یک غشاء نیمه‌تراوا می‌باشد. دو غشاء شناخته شده در سیستم‌های آب و خاک، دیوارهٔ سلولی ریشه‌های گیاه و حدفاصل هوا- آب می‌باشند. پتانسیل اسمزی را می‌توان با استفاده از رابطهٔ زیر برآورد نمود:

$$\Psi_s = RTC \qquad (۱۲-۴)$$

که در این رابطه: R ثابت جهانی گازها (۸۲ بار سانتی‌مترمکعب بر مول درجه کلوین($۸۲\ bars\ cm^3 / mol\ ^\circ K$)، T دمای مطلق (درجه کلوین) و C غلظت نمک (مول بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد.

در هر دو سیستم خاک و گیاه، پتانسیل آبی عبارت است از مجموع چهار پتانسیل ماتریک، ثقلی، اسمزی و فشاری:

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_g + \Psi_s + \Psi_p \qquad (۱۳-۴)$$

حرکت آب، در جهت شیب نزولی پتانسیل می‌باشد به‌عبارت دیگر آب از نقطهٔ دارای انرژی پتانسیل بیشتر به نقطهٔ دارای انرژی پتانسیل کمتر حرکت می‌کند. گرادیان پتانسیل آب، اختلاف پتانسیل در واحد فاصلهٔ جریان می‌باشد. در خاک‌های غیرشور و غیراشباع، پتانسیل ماتریک و پتانسیل ثقلی مهم‌ترین پتانسیل‌های خاک به‌حساب می‌آیند که در تعیین جهت جریان آب، هر دو مورد باید مورد توجه قرار گیرند. در خاک‌های غیر شور و اشباع، پتانسیل‌های فشاری و از اهمیت بیشتری برخوردارند و تفاوت بین مجموع این دو پتانسیل در نقاط مختلف (که اختلاف بار آبی یا هیدرولیکی نامیده می‌شود)، جریان آب در خاک را کنترل می‌کند. از مهم‌ترین مؤلفه‌های پتانسیل آبی در گیاهان، پتانسیل اسمزی و پتانسیل فشاری که پتانسیل تورگر نیز نامیده می‌شود، می‌باشند.

به‌جای کاربرد از اصطلاح پتانسیل، می‌توان از اصطلاح بار (head) که بیانگر فاصله است، استفاده کرد. همان‌گونه که قبلاً مشاهده شد، مکش یا فشار منفی را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

$$\frac{F}{A} = h\rho_w g \qquad (۱۴-۴)$$

که در آن؛ F نیرو، A مساحت، h ارتفاع، ρ_w چگالی آب و g شتاب ثقل می‌باشد. به‌دلیل اینکه چگالی آب و شتاب ثقل ثابت هستند، می‌توان فشار یا فشار منفی را (برحسب انرژی پتانسیل در واحد حجم) به طول ارتباط داد. در مقایسه با واحد

پتانسیل، کار کردن با واحد طول (بار) آسان‌تر می‌باشد زیرا اندازه‌گیری و تعقیب مسیر آن آسان‌تر است.

بنابراین معادلهٔ پتانسیل آب برحسب بار برای خاک غیر شور (با صرف‌نظر از پتانسیل اسمزی) به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$h = h_t + h_g + h_p \qquad (۱۵-۴)$$

در این رابطه؛ h بار کل، h_t بار مکش (به‌جای بار ماتریک)، h_g بار ثقلی و h_p بار فشار می‌باشند. تحت شرایط اشباع، بار مکش وجود ندارد و بار کل به‌صورت است:

$$h = h_p + h_g \qquad (۱۶-۴)$$

در شرایطی که خاک تحت مکش باشد:

$$h = h_t + h_g \qquad (۱۷-۴)$$

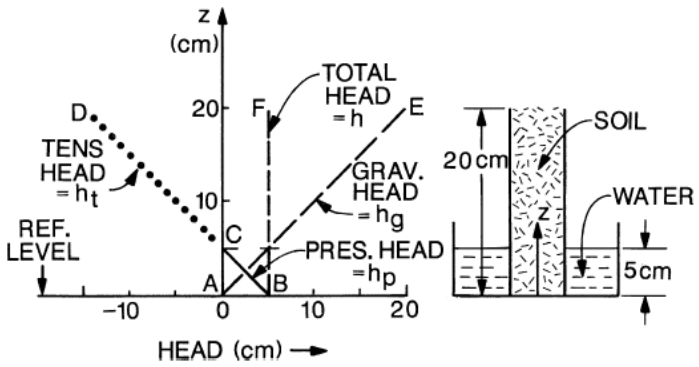
مثال زیر، نحوهٔ استفاده از بار (head) برای تعیین بار آبی در یک ستون خاک را نشان می‌دهد. برای این کار، مقادیر بار کل، بار ثقل، بار فشار و بار مکش در یک ستون خاک مرطوب رسم می‌شوند. در شکل ۴-۱۱، بارهای مختلف نسبت به فاصلهٔ z از کف ستون خاک واقع بر ۵ سانتی‌متر آب رسم شده است. فرض گردید که ستون خاک از کف آن تا ارتفاع ۵ سانتی‌متری از آب اشباع بوده و در حالت تعادل باشد. از تبخیر آب از رویه بالایی ستون خاک جلوگیری شده است. کف ستون خاک، به‌عنوان سطح مقایسه در نظر گرفته شده است. خط AE نمودار ارتفاع z در مقابل بار ثقلی h_g است؛ خط BC نمودار z نسبت به بار فشار h_p؛ خط CD نمودار z نسبت به بار مکش h_t و خط BF نمودار z نسبت به بار کل می‌باشند. خط BF عمودی است زیرا در ارتفاع‌های مختلف ستون خاک (درzهای مختلف)، مجموع جبری h_g و(h_t یا h_p) باید به مقدار مساوی(h بار کل= ۵ سانتی‌متر) اضافه شود. در غیراین‌صورت، آب نمی‌تواند در ستون خاک در حالت تعادل باشد و حرکت خواهد نمود. حالت تعادل برای این ستون خاک به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$h_g + h_p = h = ۵cm \quad \text{(برای ارتفاع ستون خاک بین صفر و ۵ سانتی‌متر)}$$

و برای ارتفاع ستون خاک (z) بین ۵ و ۲۰ سانتی‌متر:

$$h_g + h_t = h = ۵cm$$

خط BC در شکل ۴-۱۱، نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع از صفر تا ۵ سانتی‌متر، بار فشار به‌صورت خطی از ۵ سانتی‌متر تا صفر کاهش می‌یابد. از $z = ۵$ تا $z = ۲۰$ سانتی‌متر، فشار منفی خواهد گردید. مقدار مکش (فشار منفی) در ترازE، برابر 15 سانتی‌متر آب خواهد شد. درصورتی‌که تبخیر از سطح خاک مجاز باشد، مقدار بار مکش به بیشتر از ۱۵ سانتی‌متر می‌رسد (از نظر عددی) و منحنی‌های CD و BF نسبت به موقعیت نشان داده شده در شکل، تغییر خواهند کرد. در شکل۴-۱۱ بار مکش(h_t)، از پیچیدگی آب در داخل منافذ حاصل می‌شود. در این شکل، مقدار مکش در فاصلهٔ ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر را می‌توان با استفاده از تانسیومتر و مقدار فشار در فاصلهٔ بین صفر تا ۵ سانتی‌متر را با استفاده از پیزومتر تعیین نمود.



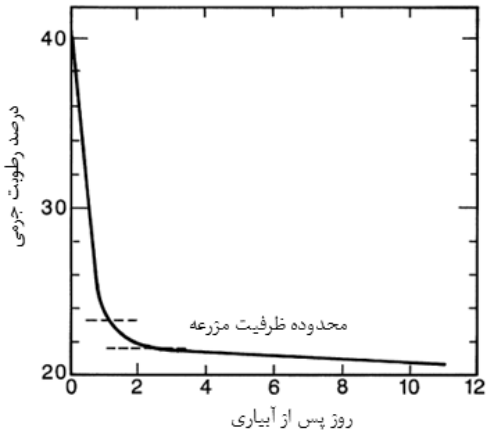
شکل ۴-۱۱. بارها در یک ستون خاک مرطوب

۴-۸ نقاط پتانسیلی مهم

میزان آب قابل دسترس برای جذب گیاه، به بیلان آب خاک ارتباط دارد. سه اصطلاح مرتبط با بیلان آب عبارتند از ظرفیت مزرعه (field capacity, FC)، نقطهٔ پژمردگی (wilting point, WP) و آب قابل دسترس (available water, AW)

۴-۸-۱ ظرفیت مزرعه

در بیشتر خاک‌ها بعد از آبیاری یا بارندگی، مقداری آب از پروفیل خاک به سمت اعماق بیشتر زهکشی می‌شود و پس از یک یا دو روز (بسته به نوع خاک)، رطوبت خاک در عمق مورد نظر به مقدار نسبتاً ثابتی می‌رسد. این مقدار رطوبت خاک که تا حدودی اختیاری است و به صورت درصد بیان می‌گردد ظرفیت مزرعه نامیده می‌شود. با گذشت زمان، خاکشناسان دریافته‌اند که ظرفیت مزرعه اصطلاح دقیقی نیست. زیرا حالت تعادل هرگز اتفاق نمی‌افتد و در نتیجه مقدار آن یک عدد ثابت نخواهد بود. همچنین رطوبت خاک دینامیک می‌باشد، زهکشی، تبخیر و تعرق آب را از پروفیل خاک خارج می‌نمایند و ورود آب به خاک در اثر بارندگی و آبیاری رخ خواهد داد. نفوذ عمقی آب متوقف نخواهد شد بلکه در زمان‌های طولانی با سرعت کاهشی ادامه خواهد داشت. یک مقدار واقعی، برای ظرفیت مزرعه وجود ندارد بنابراین محدوده‌ای از مقادیر رطوبت خاک را در بر می‌گیرد (شکل ۴-۱۲).



شکل ۴-۱۲. توصیف ظرفیت زراعی به‌صورت محدوده‌ای از مقادیر رطوبت خاک

عوامل مختلفی بر ظرفیت مزرعه تأثیر می‌گذارند که عبارتند از:

۱. **رطوبت اولیهٔ خاک:** خاک مرطوب و خشک، مقادیر مختلف رطوبت را در خود نگه می‌دارند. خاکی که اشباع و سپس خشک شود، نسبت به خاکی که در حال مرطوب شدن است ظرفیت مزرعهٔ بزرگ‌تری دارد. این امر به‌دلیل پدیدهٔ پسماند است.

۲. **بافت و ساختمان خاک:** بافت و ساختمان خاک در لایه های مختلف، تغییر نموده و بر نگهداشت آب تأثیر می‌گذارند. خاک‌های رسی در مقایسه با خاک‌های شنی، رطوبت بیشتری را در زمان طولانی‌تری نگهداری می‌کنند. هرچه بافت خاک ریزتر باشد ظرفیت مزرعهٔ ظاهری آن بزرگ‌تر و زمان رسیدن به آن، طولانی‌تر می‌شود.
۳. **نوع رس:** هر چه مقدار مونت‌موریلونیت بیشتر باشد، ظرفیت نگهداشت آب بیشتر خواهد بود.
۴. **مواد آلی:** مواد آلی خاک به نگهداشت آب کمک می‌نمایند.
۵. **دما:** دما بر میزان نگهداشت آب تأثیر دارد به ویژه اگر خاک قبلاً مرطوب شده باشد. میزان آب قابل نگهداری در ظرفیت مزرعه با افزایش دمای خاک کاهش می‌یابد. این امر سبب می‌شود که با گرم شدن خاک، میزان رواناب از حوضهٔ آبخیز افزایش یابد.
۶. **سطح ایستابی:** اصطلاح ظرفیت مزرعه، در خاک هایی که سطح ایستابی در نزدیکی سطح زمین قرار دارد، شک برانگیز است. این اصطلاح برای خاک‌های با زهکشی آزاد به‌کار می‌رود.
۷. **عمق مرطوب شدگی:** معمولاً هر چه پروفیل خاک مرطوب‌تر باشد، عمق خیس شدگی در طول فرایند نفوذ بیشتر، سرعت توزیع مجدد کمتر و ظرفیت مزرعهٔ ظاهری بزرگتر است.
۸. **وجود لایه‌های بازدارنده:** (impeding layers) این لایه‌ها از توزیع مجدد جلوگیری نموده و ظرفیت مزرعهٔ ظاهری را افزایش می‌دهند. اصطلاح ظرفیت مزرعه برای خاک‌هایی که دارای لایه‌های با تغییرات زیاد هدایت هیدرولیکی می‌باشند (هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف تفاوت زیادی دارند)، مقداری بحث‌برانگیز است.
۹. **تبخیر و تعرق:** سرعت و الگوی جذب آب از خاک توسط ریشه های گیاه، می‌تواند بر گرادیان و جهت جریان آب در خاک تأثیر گذاشته و توزیع مجدد آب را نیز تغییر دهد.

پیشنهاد شده است که چون ظرفیت مزرعه نتایج گمراه‌کننده‌ای را به‌دنبال دارد، از آن استفاده نشود. به‌عنوان نمونه، اگر فرض شود که زهکشی رخ ندهد که واقعیت دارد، مقدار زهکشی در آب مصرفی گیاهان لحاظ می‌شود که این منجر به مقادیر آب مصرفی بسیار بزرگ‌تر خواهد شد. این اصطلاح برای فهم کیفی، نه کمی، آب درخاک مفید می‌باشد.

ظرفیت مزرعه، حد بالای آب قابل استفاده برای گیاهان را در برنمی‌گیرد زیرا کل آبی که محکم توسط خاک نگهداشته نشده است تا زمانی‌که در تماس با ریشه‌ها باشد می‌تواند به‌وسیلهٔ گیاهان استفاده شود، حتی اگر آب در طول زهکشی، باسرعت در حال خارج شدن باشد. عامل محدود کنندهٔ جذب آب توسط گیاهان، تهویهٔ خاک می‌باشد و برای اینکه اغلب ریشه‌ها بتوانند زنده بمانند، حداقل ۱۰ درصد منافذ خاک باید پر از هوا باشد.

ظرفیت مزرعه همواره باید در شرایط مزرعه برای هر خاک اندازه‌گیری شود. مقدار پتانسیل ماتریک متناظر با رطوبت ظرفیت مزرعه در خاک‌های لایه‌ای می‌تواند به بزرگی منفی ۰٫۰۰۰۵ مگاپاسکال یا به مقدار کم (منفی ۰٫۰۶ مگاپاسکال در خاک خشک عمیق) باشد. درصورتی‌که اندازه‌گیری مزرعه‌ای ظرفیت مزرعه امکان‌پذیر نباشد، می‌توان مقدار رطوبت نگهداشته شده در خاک با مکش منفی ۰٫۰۳ مگاپاسکال (یک سوم بار) را به‌عنوان ظرفیت مزرعه در نظر گرفت.

۴-۸-۲ نقطه پژمردگی

نقطهٔ پژمردگی که نقطهٔ پژمردگی دائم نیز نامیده می‌شود، به‌عنوان مقدار آب (برحسب درصد) در واحد وزن یا حجم خاک تعریف می‌شود و توسط بافت خاک به اندازه ای محکم نگهداشته می‌شود که ریشه ها قادر به جذب آن نیستند و گیاه پژمرده می‌شود. در این نقطهٔ پتانسیلی که مقدار آن حدود ۱۰ تا ۲۰ اتمسفر (به‌طور متوسط ۱۵ اتمسفر) است، گیاه در طول شب قادر نیست رطوبتی را که در طول روز از دست داده است جبران بنماید لذا به به طور کامل از بین می‌رود. به‌عبارت دیگر در حالت پژمردگی دائم، تمام آب موجود در خاک به‌جز آبی که با نیروی بیش از ۱۵ اتمسفر به ذرات خاک چسبیده است، از آن خارج می‌شود.

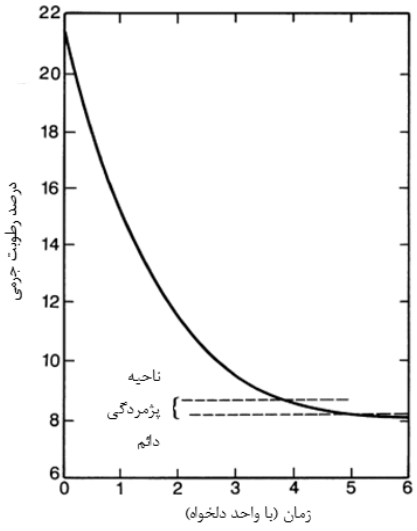
همانند ظرفیت زراعی، محققان دریافتند که نقطهٔ پژمردگی یک مقدار مشخصی نبوده و دینامیک است. بسته به پروفیل خاک(بافت، تراکم، لایه‌بندی خاک)، مقدار رطوبت خاک در اعماق مختلف که بر توزیع ریشه تأثیر دارد، سرعت تعرق گیاه و دما (جدول ۴-۱)؛ محدوده‌ای از مقادیر مختلف وجود دارد که در آن‌ها سرعت تأمین آب برای گیاهان به اندازهای نیست که از پژمرده شدن گیاه جلوگیری کند. باید از حمام آب برای تعیین نقطهٔ پژمردگی استفاده شود تا دما کنترل گردد. همچنین برگ‌ها به‌طور

انجمن علمی مهندسی کشاورزی کویر سبز
دانشگاه پیام نور رضوانشهر صدوق
www.pnu.gigfa.com
agripnu@gmail.com

مشابه پژمرده نمی‌شوند. برگ‌های پایینی زودتر پژمرده می‌شوند و نشان‌دهندهٔ اولین نقطهٔ پژمردگی دائم می‌باشند که در آن، برگ‌های پایینی نمی‌توانند شادابی خود را بازیابند. درنهایت، آخرین نقطهٔ پژمردگی دائم که در آن برگ‌های رأس گیاه نمی‌توانند شادابی خود را بازیابند، اتفاق می‌افتد. نقطهٔ پژمردگی دائم، به تنظیمات اسمزی گیاه بستگی دارد. بنابراین مشاهده می‌شود که محدوده‌ای از مقادیر برای نقطهٔ پژمردگی دائم وجود دارد و مقدار آن، منحصر به فرد نیست (شکل ۴-۱۳).

جدول ۴-۱. تأثیر دما بر درصد رطوبت خاک که در آن، گیاه آفتابگردان به طور دائمی پژمرده خواهد شد

درصد پژمردگی دائم برای سه نوع خاک			
دما (درجه سانتی‌گراد)	سیلت لوم لوم	رسی سیلتی	لوم شنی ریز
۵	–	–	۸/۸۹–۹/۱۱
۱۲/۸	–	–	۸/۴۷–۸/۵۳
۱۵	۸/۲۵–۸/۵۱	۱۱/۴–۱۱/۸۶	–
۲۵	۷/۱۷–۷/۵۱	۱۰/۲–۱۰/۷۲	–
۳۵	۶/۵–۶/۸۲	–	–



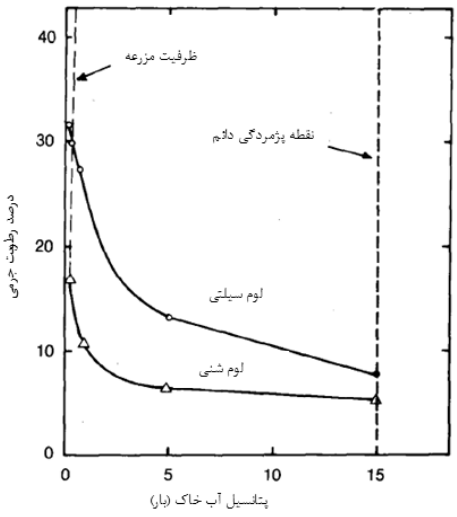
شکل ۴-۱۳. متوسط درصد رطوبت در یک فوت بالایی خاکی که در آن، یونجه تا عمق ۳ متر ریشه دوانی کرده است. درصد پژمردگی دائم، به‌صورت محدوده‌ای از مقادیر رطوبت خاک نشان داده شد.

درصورتی‌که نتوان نقطهٔ پژمردگی دائم را اندازه‌گیری نمود، معمولاً مقدار رطوبت باقیمانده در خاک با پتانسیل ماتریک منفی یک و نیم مگاپاسکال یا منفی ۱۵ بار را به‌عنوان رطوبت نقطهٔ پژمردگی در نظر می‌گیرند. اگرچه برخی گیاهان قادرند رطوبت خاک را در پتانسیل ماتریک تا منفی ۶ مگاپاسکال جذب کنند، ولی رطوبت قابل نگهداری در محدوده بین منفی یک و نیم تا منفی شش مگاپاسکال، کم است.

۴-۹ آب قابل دسترس گیاه

برای طراحی یک سیستم آبیاری، باید بدانیم که چقدر از آب موجود در خاک برای گیاه قابل دسترس یا قابل استفاده است چرا که خاک نقش مخزنی را دارد که ظرفیت آن محدود است. به طور معمول، آب قابل دسترس گیاه (AW)، مقدار آبی در نظر گرفته می‌شود که بین دو حد ظرفیت زراعی و نقطهٔ پژمردگی دائم در خاک نگهداری می‌شود (شکل ۴-۱۴) اگر چه این دو نقطه، فقط ارائه کنندهٔ اطلاعات کیفی دربارهٔ خصوصیات نگهداشت آب خاک هستند، اما برای برنامه‌ریزی آبیاری می‌توانند فواید زیادی در برداشته باشند. با این وجود آگاهی از محدودیت‌های مرتبط با آن‌ها مهم است.

$$AW=FC-WP \qquad (۱۸-۴)$$

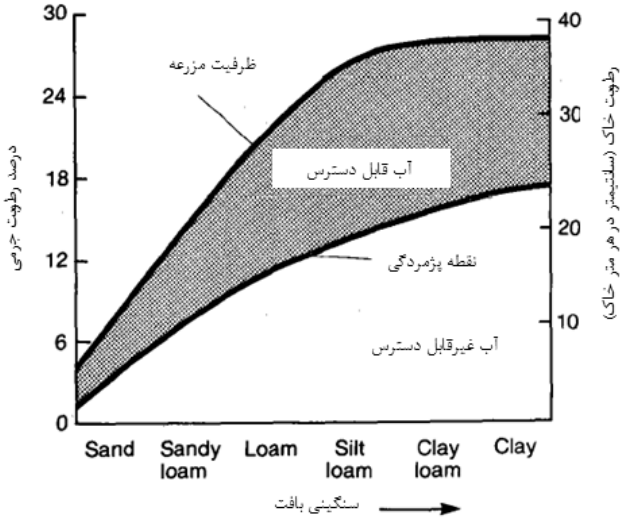


شکل ۴-۱۴. رابطهٔ بین نگهداشت رطوبت و مکش رطوبت خاک

درصورتی‌که مقدار آب قابل دسترس در یک نوع خاک رس سنگین، ۳۰ درصد حجمی باشد این بدان مفهوم است که در عمق یک متر یا ۱۰۰ سانتی‌متر از این خاک، معادل ۳۰ سانتی‌متر آب قابل استفاده برای گیاه وجود دارد.

همان‌گونه که ذکر شد، آبی به‌عنوان آب قابل استفاده گیاه در نظر گرفته می‌شود که بین دو محدودهٔ انرژی پتانسیل ظرفیت مزرعه و نقطهٔ پژمردگی دائم قرار دارد. لازم به ذکر است که این مقادیر تعیین شده، تنها معرف پتانسیل ماتریک سیستم آب خاک می‌باشند. وجود نمک در خاک می‌تواند به‌صورت پتانسیل اسمزی در کل پتانسیل آب خاک نقش داشته باشد. در واقع پتانسیل کل است که تعیین کنندهٔ موجودیت آب خاک برای گیاهان است. در خاک‌های دارای املاح محلول کم، هرچه بافت خاک ریزتر باشد، مقدار آب قابل دسترس (AWC) بیشتر است.

در شکل ۴-۱۵، رابطهٔ میزان رطوبت ظرفیت مزرعه و نقطهٔ پژمردگی دائم با بافت خاک نشان داده شده است. درصد رطوبت جرمی خاک در حاشیهٔ سمت چپ و مقدار آب خاک برحسب سانتی‌متر آب در هر متر خاک در حاشیهٔ سمت راست، برای مقادیر مختلف جرم مخصوص ظاهری خاک ارائه شد. از این شکل می‌توان به‌عنوان یک راهنمای کلی برای برآورد آب قابل دسترس خاک‌های دارای بافت‌های مختلف و با پروفیل یکنواخت و نمک کم استفاده کرد.



شکل ۴-۱۵. رابطهٔ کلی بین مشخصهٔ رطوبتی و بافت خاک

معمولاً خاک‌های شنی دارای قابلیت زهکشی خوب، آب قابل دسترس کمی دارند. خاک‌های لومی همانند خاک‌های لوم رسی و رسی، ظرفیت نگهداشت آب خوبی دارند. در جدول ۴-۲، مقادیر نگهداشت آب بافت‌های مختلف خاک به‌عنوان راهنما ارائه گردید.

با وجود اینکه ظرفیت مزرعه را به‌عنوان حد بالای آب قابل استفاده گیاه درنظر می‌گیرند، ولی این دقیقاً درست نمی‌باشد. آبی که پس از آبیاری یا بارندگی در خاک به سمت پایین حرکت می‌کند می‌تواند توسط گیاهان در حال رشد به نحو مؤثری استفاده شود. به‌دلیل اینکه این مرحله یک مرحله انتقالی است، این آب معمولاً در محاسبات تعیین آب قابل دسترس مورد توجه قرار نمی‌گیرد ولی می‌تواند در برنامه‌ریزی آبیاری تأثیرگذار باشد.

جدول ۴-۲ محدوده آب قابل دسترس برای بافت‌های مختلف خاک

بافت خاک	سانتی‌متر آب در هر سانتی‌متر عمق خاک
شن خیلی درشت	۰/۰۳ -۰/۰۶
شن درشت- شن لومی	۰/۰۶-۰/۱
لوم شنی- لوم شنی ریز	۰/۱-۰/۱۴
لوم شنی خیلی ریز- لوم سیلتی	۰/۱۲-۰/۱۹
لوم رسی شنی - لوم رسی	۰/۱۴-۰/۲۱
رس شنی- رسی	۰/۱۳-۰/۲۱
تورب و لجن	۰/۱۷-۰/۲۵

مسائل فصل چهارم

۱. معیار مربوط به مقدار آب موجود در خاک چیست؟

الف) پتانسیل خاک ب) رطوبت خاک

ج) چگالی خاک د) تخلخل خاک

۲. کدام‌یک از گزینه‌های زیر صحیح نیست؟

الف) رطوبت حجمی خاک عبارتست از نسبت حجم آب به حجم کل خاک

ب) رطوبت جرمی خاک عبارتست از نسبت جرم آب موجود در خاک به جرم جزء جامد خاک

ج) رطوبت حجمی خاک برابر است با حاصلضرب رطوبت جرمی در جرم مخصوص ظاهری خاک

د) رطوبت جرمی خاک برابر است با حاصلضرب رطوبت حجمی در جرم مخصوص ظاهری خاک

۳. جرم یک نمونه خاک مرطوب ۳۸۵ گرم بود که پس از خشک شدن در گرمخانه به ۳۱۵ گرم کاهش یافت. چنانچه جرم مخصوص ظاهری این نمونه خاک ۱/۳۵ گرم بر سانتیمتر مکعب باشد، درصد رطوبت حجمی آن چقدر است؟

الف) ۲۹٫۷ ب) ۲۲

ج) ۷۰ د) ۰٫۲۹۷

۴. نسبت جرمی رطوبت در یک خاک ۰/۲۵ و جرم مخصوص ظاهری آن ۱/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب است. ارتفاع رطوبت در هر متر خاک چند میلیمتر است؟

الف) ۰٫۳۵ ب) ۳٫۵

ج) ۳۵ د) ۳۵۰

۵. خاکی که جرم مخصوص ظاهری آن ۱/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد، اشباع گردید. درصورتی‌که در این حالت، نسبت جرمی رطوبت ۰/۳۵ باشد، در لایه‌ای به ضخامت ۷۵ سانتیمتر چند سانتیمتر آب وجود دارد؟

الف) ۳۶۷٫۵ ب) ۳۶٫۷۵

ج) ۳٫۶۷۵ د) ۰٫۳۶۷۵

۶. تانسیومتر کدام یک از اجزای پتانسیلی خاک را اندازه می‌گیرد؟

الف) پتانسیل اسمزی ب) پتانسیل اسمزی و ماتریک

ج) پتانسیل ماتریک د) پتانسیل ثقلی

۷. کدام‌یک از گزینه‌های زیر جزء کاربرد تانسیومترها نمی‌باشد؟

الف) تعیین عمق ریشه دوانی ب) تعیین زمان آبیاری

ج) تعیین عمق سطح ایستابی د) تعیین هدایت هیدرولیکی

۸. با افزایش مکش خاک، رطوبت خاک ..... و عدد خلاسنج تانسیومتر ..... می‌یابد.

الف) کاهش- افزایش ب) افزایش-کاهش

ج) افزایش-افزایش ج) کاهش-کاهش

۹. بزرگ‌ترین مشکل در استفاده از بلوک‌های گچی برای تعیین رطوبت خاک، حساسیت آن‌ها به ..... است.

الف) مکش خاک ب) رطوبت خاک

ج) شوری محلول خاک د) ریشه‌های گیاه

۱۰. در روش نوترون متری .....

الف) نیاز به خاک دست خورده می‌باشد

ب) سرعت عمل پایین است

ج) احتیاج به نمونه برداری از خاک دارد

د) اندازه گیری رطوبت در لایه سطحی خاک ممکن نیست

۱۱. عاملی که سبب حرکت آب از یک نقطه به نقطه دیگر در داخل خاک می‌گردد، چه نام دارد؟

الف) اختلاف پتانسیل آب دو نقطه ب) اختلاف رطوبت دو نقطه

ج) اختلاف ارتفاع دو نقطه د) اختلاف انرژی جنبشی دو نقطه

۱۲. درصورتی‌که نقطه A به فاصله ۱۵ سانتیمتر بالاتر از سطح مقایسه و نقطه B، ۱۰ سانتیمتر زیر سطح مقایسه باشد، اختلاف پتانسیل ثقلی بین دو نقطه چند سانتیمتر می‌باشد؟

الف) ۵ ب) ۱۰

ج) ۱۵ د) ۲۵

۱۳. کدام‌یک از موارد زیر بر ظرفیت مزرعه تأثیر می‌گذارد؟

الف) رطوبت اولیه خاک ب) دمای خاک

ج) تبخیر و تعرق د) همه موارد

۱۴. منظور از آب قابل دسترس خاک چیست؟

الف) رطوبت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه

ب) رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم

ج) مقدار آب خاک بین دو حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم

د) مقدار آب خاک بین دو حد ظرفیت زراعی و نقطه اشباع

فصل پنجم

حرکت آب در خاک

اهداف کلی

۱. شناخت قانون حاکم بر حرکت آب در خاک‌های اشباع
۲. درک مفهوم هدایت الکتریکی، نفوذپذیری ذاتی و تفاوت این دو با یکدیگر
۳. تبیین مفهوم نفوذپذیری، عوامل مؤثر بر آن، معادلات مربوطه و چگونگی اندازه‌گیری نفوذپذیری

۵-۱حرکت آب در خاک‌های اشباع

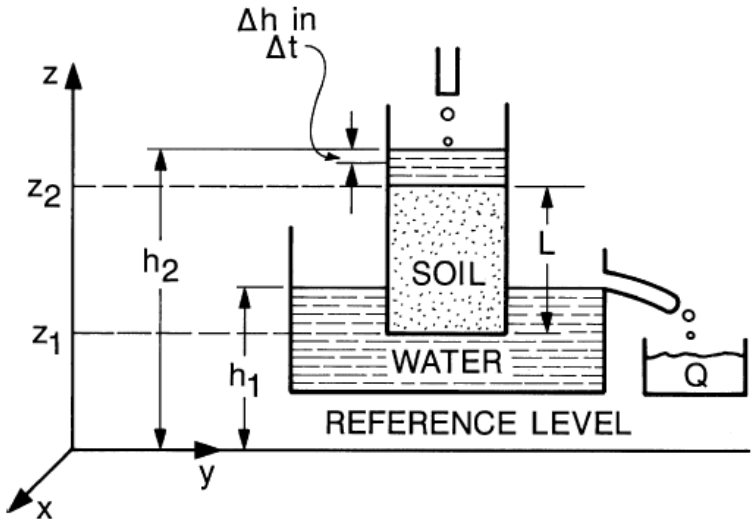
فهم حرکت آب در خاک اشباع در مطالعات روابط آب و خاک و گیاه، زهکشی و آب زیرزمینی اهمیت زیادی دارد. دارسی، مهندس هیدرولیک فرانسوی، معادلهٔ حاکم بر جریان آب در خاک اشباع را ارائه نمود که به نام قانون دارسی معروف است.

۵-۱-۱ قانون دارسی

برای فهم قانون دارسی، شکل ۵-۱ را در نظر بگیرید که جریان آب از داخل ستون خاک به طول L و سطح مقطع A را نشان می‌دهد. این قانون را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$Q = -KA\frac{(h_2 - h_1)}{(z_2 - z_1)} \qquad (۵-۱)$$

در این رابطه؛ Q مقدار جریان در واحد زمان برحسب سانتی‌متر مکعب در ثانیه، K هدایت هیدرولیکی برحسب سانتی‌متر بر ثانیه، h_1 و h_2 بار آبی در نقاط یک و دو، z_1 و z_2 بیانگر فاصله می‌باشند. سطح مقایسه در اینجا، صفحهٔ x و y است. h_1 بار آبی کلیهٔ نقاط زیر ستون خاک در $z = z_1$ بوده و به‌طور مشابه h_2 بار آبی کلیهٔ نقاط بالای ستون خاک در $z = z_2$ می‌باشد. طول ستون برابر است با: $z_2 - z_1 = L$ علامت منفی در رابطهٔ دارسی به این دلیل استفاده شد که مقدار مثبت شدت جریان(Q)، معرف جریان در جهت مثبت z می‌باشد. جهت مثبت z از z_1 تا z_2 اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۵-۱. تشریح قانون دارسی

در معادلهٔ دارسی مقدار $\frac{(h_2 - h_1)}{(z_2 - z_1)}$، گرادیان هیدرولیکی (i) نامیده می‌شود. همچنین نسبت Q/A، شدت جریان در واحد سطح مقطع یا شار جریان با واحد سانتی‌متر مکعب بر ثانیه بر سانتی‌متر مربع $(cm^3 / sec) / cm^2$ نامیده می‌شود. به نسبت Q/A، سرعت دارسی یا به‌صورت ساده‌تر، سرعت (v) اطلاق می‌گردد بنابراین قانون دارسی را می‌توان به‌صورت v=-Ki نوشت. سرعت واقعی جریان در داخل خاک بسیار بیشتر از سرعت دارسی می‌باشد. سرعت واقعی به‌طور متوسط برابر v/f می‌باشد که f

تخلخل خاک است. تخلخل عبارت است: از حجم منافذ نمونهٔ خاک تقسیم بر کل حجم نمونه. منافذ می‌توانند توسط آب و هوا پر شوند (به‌دلیل اینکه قانون دارسی مربوط به خاک‌های اشباع است، در شرایط کاربرد قانون دارسی، منافذ تنها به‌وسیلهٔ آب پر شده‌اند). همان‌گونه که قبلاً ذکر گردید درصد تخلخل خاک را می‌توان با استفاده از رابطهٔ زیر تعیین نمود:

$$\text{درصد تخلخل} = \left[1 - \left(\frac{\text{چگالی ظاهری}}{\text{چگالی حقیقی}}\right)\right] \times 100$$

همان‌گونه‌که مشاهده گردید، از ستون عمودی خاک برای اثبات قانون دارسی استفاده شد. با این وجود، قوانین و مفاهیمی که در ادامه بیان می‌شوند، برای جریان آب در جهات مختلف در داخل خاک به‌کار می‌روند.

۵-۲ هدایت هیدرولیکی

هدایت هیدرولیکی، با نفوذپذیری ذاتی (intrinsic permeability, κ) محیط متخلخل که گاهی نفوذپذیری نامیده می‌شود، تفاوت دارد. نفوذپذیری ذاتی برابر $\frac{K\mu}{\rho g}$ است که در آن: K هدایت هیدرولیکی، η گرانروی سیال، ρ چگالی سیال و g شتاب ثقل می‌باشند. از لحاظ ابعادی، دیمانسیون κ مساحت (L^2) و واحد K یا هدایت هیدرولیکی متر بر روز (که مشابه مترمکعب بر مترمربع بر روز است) می‌باشد. هدایت هیدرولیکی را می‌توان به صورت حجم آب (برحسب متر مکعب) نفوذ کرده در واحد سطح خاک (برحسب متر مربع) در روز تحت گرادیان هیدرولیکی واحد، تفسیر نمود.

در خاک طبیعی مزرعه عوامل مختلفی مانند ترک‌ها، حفره‌های ریشه، کرم راهه‌ها و پایداری خاکدانه‌ها بر هدایت هیدرولیکی تأثیر می‌گذارند. بافت خاک به‌جز در خاک‌های دست خورده، اثر کمی بر هدایت هیدرولیکی دارد.

با مدیریت خاک می‌توان هدایت هیدرولیکی را افزایش یا کاهش داد. تجزیهٔ ریشه‌های گیاه، هدایت هیدرولیکی را افزایش می‌دهد. تراکم خاک در اثر عبور حیوانات یا ماشین‌ها، هدایت هیدرولیکی را حداقل در خاک سطحی کاهش می‌دهد.

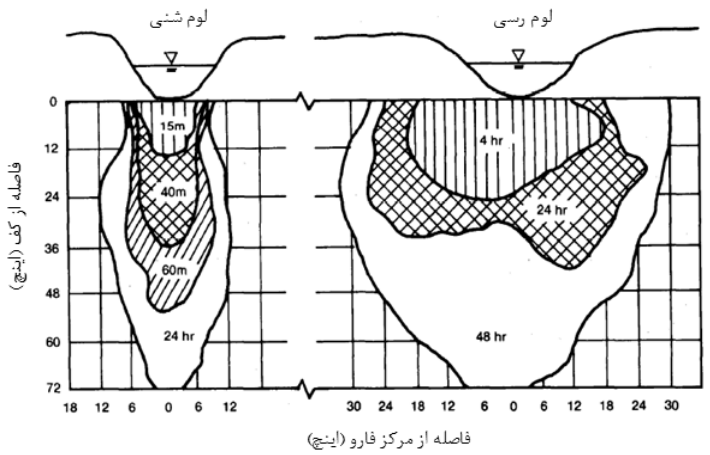
به‌طور معمول، فرض می‌شود که مقدار هدایت هیدرولیکی در رابطهٔ v=-Ki در شرایط جریان اشباع ثابت باشد. مقدار هدایت هیدرولیکی در شرایطی ثابت است که: ۱. خواص فیزیکی آب و خاک در مکان‌های مختلف مسیر جریان آب در خاک و در زمان‌های متفاوت تغییر نکند (اگر خاک یکنواخت یا ایزوتروپیک باشد، هدایت هیدرولیکی درجهات مختلف یکسان خواهد بود) و ۲. شکل جریان آرام باشد یعنی آشفته نباشد. در جریان آرام، دو ذرهٔ آب عبوری از خاک مسیرهایی (خطوط جریانی) را تشکیل می‌دهند که هرگز همدیگر را قطع نمی‌کنند. در جریان آشفته، گردابه‌ها یا آشفتگی‌هایی در داخل خاک به‌وجود می‌آید. امکان ایجاد جریان آشفته در خاک، تنها درصورتی وجود دارد که خاک از شن درشت یا گراول تشکیل شده و گرادیان هیدرولیکی بسیار بزرگ باشد.

در شرایط غیراشباع، فرایندهای زیادی بر حرکت یا جریان آب در ناحیهٔ ریشهٔ گیاه تأثیر می‌گذارند. در مقایسه با جریان اشباع، حرکت آب تحت شرایط غیر اشباع پیچیده‌تر بوده و تشریح کمّی آن مشکل‌تر است.

در شرایط غیراشباع، آب موجود در خاک تحت پتانسیل فشاری منفی قرار دارد. گرادیان این پتانسیل، نیروی محرکه را تشکیل می‌دهد. علت ایجاد پتانسیل ماتریک چسبندگی آب سطح ذرات خاک و فضاهای موئینگی می‌باشد. آب از جایی که در آن، غشاء هیدراته (hydration film) ضخیم‌تر است به منطقهٔ دارای غشاء نازک‌تر و از منطقهٔ دارای هلال موئینگی (capillary menisci) با انحنای کمتر به جایی که این هلال‌ها انحنای بیشتری دارند، کشیده می‌شود. به‌عبارت دیگر، آب از منطقهٔ دارای پتانسیل ماتریک بیشتر به منطقه دارای پتانسیل ماتریک کمتر حرکت می‌کند (از مکش کم به زیاد).

در شرایط غیراشباع، هدایت هیدرولیکی به شدت با تغییرات رطوبت خاک تغییر می‌کند. ابتدا، منافذ درشتی که دارای هدایت هیدرولیکی زیادی هستند زهکشی می‌شوند و در نتیجه با خشک شدن خاک، K کاهش می‌یابد. به‌دلیل اینکه خاک‌های دارای بافت‌های مختلف خصوصیات منفذی مختلفی دارند، مقادیر هدایت هیدرولیکی آن‌ها نیز تفاوت‌های زیادی دارند. معمولاً یک خاک شنی اشباع، سریع‌تر از یک خاک

رسی اشباع آب را منتقل می‌نماید. با شروع زهکشی خاک شرایط متفاوتی اتفاق خواهد افتاد، منافذ ریز یک خاک رسی حتی در پتانسیل‌های خیلی کم مقداری آب را نگهداشته و آن را هدایت می‌نمایند. در شکل ۵-۲، یک نمونه از تأثیر بافت خاک بر حرکت آب در خاک ارائه گردید.



شکل ۵-۲. حرکت آب در خاک های لوم شنی و لوم رسی. برای مرطوب شدن کامل خاک لازم است که در خاک‌های شنی، فاصلهٔ فاروها کمتر باشد.

۵-۳ نفوذ

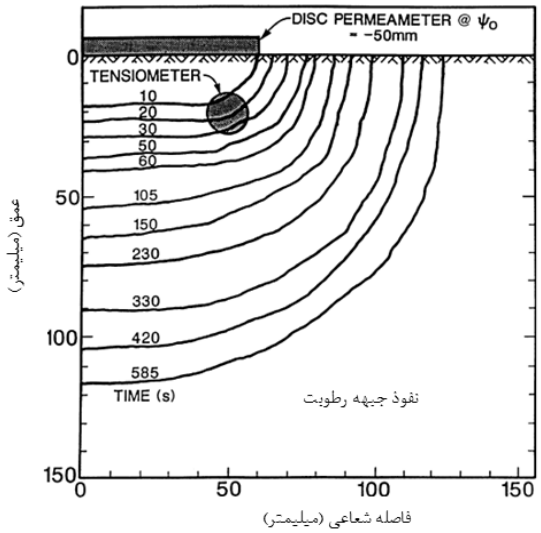
۵-۳-۱ تعریف نفوذ

به واحد طول آب وارد شده به خاک در واحد زمان بدون توجه به انواع یا مقادیر نیروها یا گرادیان‌ها، سرعت نفوذ گفته می‌شود. باید توجه شود که اصطلاح هدایت هیدرولیکی، مربوط به سرعت حرکت آب در داخل خاک تحت نیروی ثقل یا گرادیان هیدرولیکی واحد است و با سرعت نفوذ تفاوت دارد. سرعت نفوذ لزوماً نباید معرف شرایط اشباع باشد. درصورتی که دو قطره باران با حجم کل ۲ میلی متر مکعب یا ۰٫۰۰۰۰۰۲ مترمکعب در یک روز، بر سطحی از خاک به مساحت یک متر مربع نازل شده و وارد خاک شوند، سرعت نفوذ معادل ۰٫۰۰۰۰۰۲ متر بر روز خواهد بود.

ورود آب به داخل خاک، به‌علت وجود نیروهای ماتریک و ثقل می‌باشد. بنابراین، ورود آب به خاک می‌تواند علاوه‌بر جهت ثقل (رو به پایین)، در جهت‌های

افقی و روبه بالا نیز صورت گیرد. به‌طور معمول، نفوذ به حرکت روبه پایین آب اطلاق می‌گردد. در مراحل اولیهٔ ورود آب به خاک، نیروی ماتریک بر نیروی ثقل غالب است. به‌همین دلیل، مشاهدات مربوط به مراحل اولیهٔ نفوذ، برای زمانی که نخواهند اثر ثقل را درنظر بگیرند معتبر است.

اگر آب به داخل خاک خشک نفوذ کند، جبههٔ مرطوب شدگی مشخص که جبههٔ رطوبتی نیز نامیده می‌شود قابل مشاهده است. این جبهه، مرز بین بخش بالایی خیس‌شدهٔ خاک و بخش زیرین خشک خاک می‌باشد. اگر آب به داخل ستون خاکی که در یک ظرف پلاستیکی شفاف قرار دارد نفوذ نماید، می‌توان پیشروی جبههٔ رطوبتی را مشاهده و تغییرات زمانی آن را ثبت نمود (شکل ۵-۳). در حال حاضر، اندازه‌گیری دقیق پتانسیل ماتریک در جبههٔ پیشروی ممکن نیست زیرا پیشروی آن به داخل خاک خیلی سریع اتفاق می‌افتد. با این وجود، می‌توان مقدار آب نفوذ یافته و عمق و شکل جبههٔ پیشروی را اندازه‌گیری و از طریق آن، به نتایج مهمی دربارهٔ ورود آب به داخل خاک دست یافت.

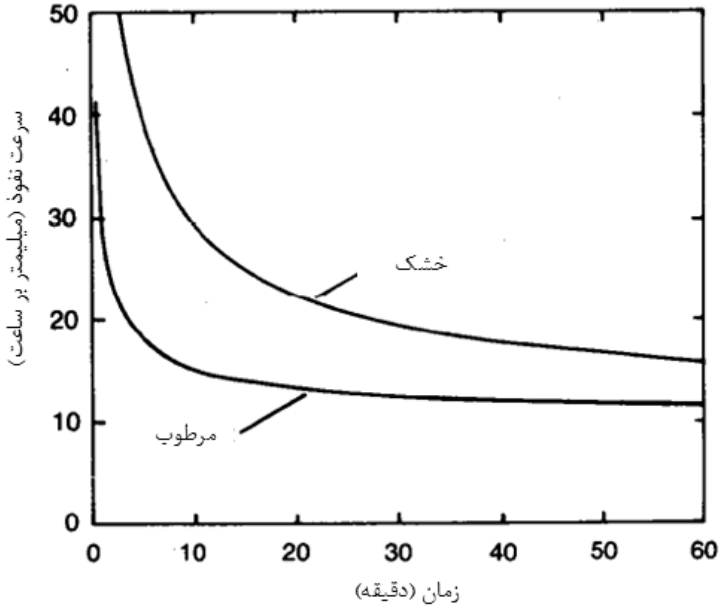


شکل ۵-۳. موقعیت جبههٔ رطوبتی در زمان های مختلف پس از نفوذ برای یک خـاک لوم شنی

۵-۳-۲ عوامل مؤثر بر نفوذ

رطوبت خاک

مقدار رطوبت باقیمانده در خاک، بر سرعت ورود آب به داخل خاک تأثیر می‌گذارد (شکل ۵-۴). در خاک های خشک، تفاوت زیاد پتانسیل ماتریک منجر به ورود آب به خاک می‌شود و خاک قادر است آب بیشتری را نسبت به شرایطی که خاک در ابتدا مرطوب بوده حفظ کند. با این وجود هم در خاک اشباع و هم در خاک غیراشباع، خاک سطحی به‌تدریج با ادامهٔ آبیاری اشباع می‌شود و سرعت نفوذ، تا مقدار سرعت نفوذ دائمی یا پایه کاهش می‌یابد.



شکل ۵-۴. سرعت نفوذ پیش‌بینی شده برای خاک سیلتی لوم عمیق با مقادیر رطوبت اولیهٔ متفاوت

سله بستن خاک

هر عامل محدودکننده در برابر جریان که به واسطهٔ تغییری در هدایت هیدرولیکی یا محدودیتی در حد فاصل آب و خاک ایجاد می‌شود، نفوذ را محدود می‌نماید.

شکل‌گیری لایهٔ نازک متراکم در سطح خاک، سرعت ورود آب از سطح خاک را کاهش می‌دهد. این لایه، در نتیجهٔ شکستگی ساختمان خاک به واسطهٔ ضربات حاصله از قطرات آب یا به‌وسیلهٔ جریان آب روی سطح زمین ایجاد می‌شود. ذرات ریز در کنار ذرات درشت‌تر قرار گرفته و سلهٔ نسبتاً نفوذناپذیری را تشکیل می‌دهند. با پوشش سطح خاک توسط مالچ یا مواد نفوذپذیر دیگر، می‌توان تا حدودی از سله بستن خاک سطحی جلوگیری نمود. گراس‌ها یا سایر گیاهانی که به صورت نزدیک کشت می‌شوند، قطرات بارش را جذب و انرژی آن ها را مستهلک و در نتیجه، سله بستن خاک را کاهش می‌دهند.

ایجاد موج

در طول مدت آبیاری موجی، مرطوب شدن دوره‌ای سطح خاک در نتیجهٔ جریان متناوب، نفوذ را کاهش می‌دهد. این کاهش نفوذ را می‌توان با مکانیزم‌های متعددی مرتبط دانست. مرطوب و خشک شدن، به آب اجازه می‌دهد تا در کلوخه ها نفوذ و آن ها را حل نماید و بدین‌وسیله، خاک در فرایند خشک شدن (dewatering) ته‌نشین شده و متراکم می‌گردد. به همراه انحلال، ممکن است سله ای نیز در سطح خاک تشکیل شود. بنابراین هم تراکم و هم سله بستن، نفوذ را کاهش می‌دهند. هوای فشرده در فرایند خشک شدن یا آب‌زدائی نیز می‌تواند دلیلی بر کاهش نفوذ باشد. حباب‌های هوا، منافذ ریز سطح خاک را مسدود نموده و نفوذ را کاهش می‌دهد. آماس خاک در نتیجهٔ هیدراته شدن ذرات رس و کاهش گرادیان هیدرولیکی با پیشرفت خیس شدن خاک، نیز می‌توانند از مکانیسم‌های مؤثر بر کاهش نفوذ باشند.

تراکم

اگر خاک ها در شرایط رطوبت زیاد شخم‌زده شوند، فعالیت‌های خاک‌ورزی می‌توانند سبب تراکم و تشکیل کفه های شخم در زیر عمق کشت خاک شوند. کفهٔ شخم، از حرکت آب جلوگیری نموده و سرعت نفوذ را کم می‌کند. برای برخی خاک ها، به واسطهٔ حرکت چرخ های تراکتور در شیارها، سرعت نفوذ کاهش می‌یابد. شخم عمیق یا شخم زیرشکن، با شکستن لایهٔ زیرین نفوذناپذیر حرکت آب را بهبود می‌بخشد. درصورتی که تغییری در عملیات زراعی ایجاد نشود مانند خاک‌ورزی کاهشی، افزودن

بقایای گیاهی یا زمان‌بندی مناسب عملیات‌های خاک‌ورزی، تراکم تجدید خواهد شد.

خاک‌ورزی

شخم زدن، کشت یا هر نوع به‌هم زدگی دیگر که اندازهٔ منافذ را افزایش دهد، به‌طور موقتی سرعت نفوذ را زیاد می‌کند. اثر مفید کشت بر تخلخل خاک و سرعت نفوذ تنها تا زمانی‌که بارش یا غرقابی یا تراکم بعدی سبب ته‌نشینی ذرات خاک در موقعیت قبلی آن‌ها می‌شود، باقی می‌ماند. سرعت نفوذپذیری شن نرم متخلخل، احتمالاً در نتیجهٔ عملیات خاک‌ورزی افزایش نمی‌یابد. عملیات کشت ممکن است از طریق متراکم کردن و تخریب منافذ خاک، سرعت نفوذ را کاهش دهد.

ترک‌خوردگی خاک

در نتیجهٔ زهکشی برخی خاک‌های رسی، ترک‌هایی در این خاک‌ها ایجاد می‌گردد. در طول مدت آبیاری غرقابی، ترک‌ها به سرعت قبل از تورم ذرات خاک پر می‌شوند که در نتیجهٔ آن سرعت اولیهٔ نفوذ زیاد می‌شود. با مرطوب شدن خاک، ذرات خاک متورم و در نهایت ترک‌ها بسته می‌شوند. سرعت نفوذ در این خاک های ریزبافت، غالباً ناچیز یا خیلی کم است. بنابراین مقدار آب مصرفی باید بر اساس اندازه و تعداد ترک‌ها باشد. تحت آبیاری بارانی، اگر شدت پخش آب کمتر از سرعت نفوذ باشد، مقدار پخش در ارتباط با مدت آبیاری است نه در ارتباط با اندازه و تعداد ترک.

مواد آلی

درصورتی که در نتیجهٔ تولید بقایای گیاهی زیاد، مواد آلی در خاک موجود باشد میزان تخلخل به‌مدت نسبتاً طولانی، زیاد باقی خواهد ماند. با استفاده از سیستم کشت تولیدکنندهٔ بقایای زیاد گیاهی در عمق سطحی خاک، می‌توان سرعت نفوذ را حفظ و حتی افزایش داد. گراس‌ها و لگوم‌ها، نمونه هایی از گیاهان افزایش‌دهندهٔ محتوی مواد آلی در خاک می‌باشند. نسبت خاکدانه های پایدار خاک، منافذ بزرگ‌تری تولید و در نتیجه منجر به سرعت نفوذ بیشتر می‌گردد. گیاهان دائمی مانند یونجه، با محافظت سطح خاک دربرابر سله بستن، حفظ مواد آلی در خاک و افزایش منافذ مؤثر در انتقال آب در نتیجهٔ پوسیدگی ریشه‌ها، نفوذپذیری را بهبود می‌بخشند.

نمک‌های خاک

نمک‌های موجود در آب آبیاری، در خاک‌های آبیاری شده جمع می‌شوند و خصوصیات خاک را تغییر می‌دهند. این تجمع در مناطق گرم و خشک که آبیاری نقش اساسی در تأمین نیاز آبی گیاهان دارد، خطرناک می‌باشد. لازم است که به صورت دوره‌ای با انجام پرآبیاری یا آبیاری بیش از حد، نمک‌های محلول جمع شده در خاک از ناحیهٔ ریشهٔ گیاه دفع شده یا کاهش یابند. نفوذ آب باران به خاک در مناطق مرطوب، بیشتر نمک‌های محلول را خواهد شست.

بعضی از املاح محلول آب آبیاری مانند نیترات پتاسیم، ممکن است مستقیماً برای گیاه مفید باشند. در برخی شرایط، کلسیم و منیزیم اثر مثبتی بر خواص فیزیکی خاک دارند. با این وجود، مقادیر زیاد کلرید سدیم یا سولفات سدیم اثر منفی دارد. ساختمان خاک می‌شکند و در نهایت کلوئیدهای خاک پراکنده می‌شوند که این امر، سرعت نفوذ را کاهش می‌دهد. این نوع سله بستن حتی ممکن است در برخی خاک‌های شنی قابل توجه باشد.

می‌توان خواص فیزیکی همچون نفوذپذیری برخی خاک‌های سدیمی را، با افزودن مواد شیمیایی یا اصلاح‌کننده‌های خاک که از طریق آن‌ها، کلسیم جایگزین سدیم قابل تبادل می‌شود بهبود بخشید. سولفات کلسیم (سنگ گچ)، یک مادهٔ اصلاحی نسبتاً اقتصادی برای بهبود نفوذپذیری و تهویه، جهت افزایش توسعهٔ ریشه و رشد گیاه می‌باشد. اگر کلسیم کافی در خاک قابل دسترس باشد، مواد شیمیایی دیگر مانند گوگرد و سولفات آلومینیوم نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

رسوبات موجود در آب آبیاری

ذرات رس و سیلت ریز معلق، بر کیفیت آب آبیاری تأثیر دارند. مفید یا مضر بودن این ذرات به میزان سیلت انتقال داده شده، مدت زمان برقراری جریان سیلتی و بافت خاک تحت آبیاری بستگی دارد. گاه ممکن است آبیاری با آب سیلتی در خاک‌های درشت بافت مفید باشد زیرا رسوبات، شرایط فیزیکی ناحیهٔ ریشه را بهبود بخشیده و سرعت حرکت آب را کاهش می‌دهند. کاربرد آب سیلتی در خاک‌های ریزبافت، عموماً مشکلات سله‌بندی خاک سطحی را افزایش می‌دهد زیرا نفوذ را کند نموده و زراعت را مشکل می‌سازد. رسوبات، برخی مواد غذایی مورد نیاز گیاه مانند پتاسیم، کلسیم و

فسفات را به خاک اضافه می‌نمایند.

فرسایش خاک

پیشروی فرسایش، با افزایش تلفات خاک سطحی و مواد آلی، منجر به کاهش سرعت نفوذ در بسیاری از خاک ها می گردد. این به دلیل آن است که مواد با تراوائی کم (مانند خاک رس متراکم زیرین) نمایان می‌شود یا خاک با بافت ریزتر زیرین با لایهٔ شخم مخلوط می‌گردد. در برخی خاک ها فرسایش ممکن است خاک درشت بافت زیرین مانند شن یا گراول را نمایان سازد که به معنی افزایش نفوذپذیری می‌باشد.

تسطیح زمین

جابه‌جایی و ترکیب خاک در فرایند تسطیح زمین، ممکن است خصوصیات نفوذ را تغییر دهد. درصورتی که خاک کم و بیش نفوذپذیر زیرین نمایان شود، اثر تسطیح مشابه اثر فرسایش می‌باشد. ماشین‌آلات مورد استفاده برای تسطیح، سبب تراکم خاک و در نتیجه کاهش نفوذپذیری می‌شوند. شخم زیرشکن و افزودن مواد آلی، غالباً برای حل این مشکل ضروری می‌باشند. در مواردی که یک لایهٔ خاک با نفوذپذیری کم روی یک لایهٔ نفوذپذیر قرار گیرد، می‌توان با برداشتن لایهٔ سطحی و نمایان ساختن لایهٔ زیرین، نفوذپذیری را بهبود بخشید.

دما

نفوذ آب باران در تابستان، بیشتر از نفوذ آن در زمستان است. کاملاً واضح است که با افزایش دما گرانروی آب سریعاً کاهش می‌یابد که این امر سبب تسریع نفوذ می‌شود.

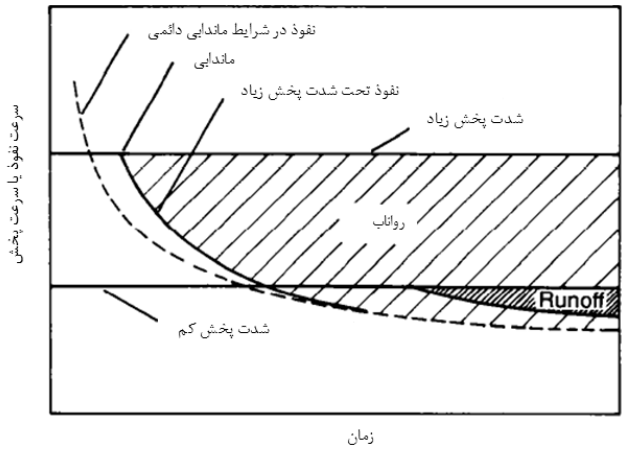
ذخیرهٔ سطحی

زبری و شیب سطح خاک، بر میزان آبی که می‌تواند در سطح زمین جمع شده و برای نفوذ ذخیره شود، مؤثر است. رواناب زمانی آغاز می گردد که شدت بارش بیشتر از سرعت نفوذ بوده و ذخیرهٔ سطحی پر شده باشد. معمولاً میزان ذخیره در شیب‌های یکنواخت و ناهموار دارای پوشش گیاهی، بیشتر از اراضی مسطح و شیبدار لخت است. بنابراین ذخیرهٔ سطحی بر میزان آبی که نفوذ می‌نماید مؤثر است.

۵-۳-۳ مراحل نفوذ

اگر شدت بارندگی یا پخش آب از یک آبپاش کمتر از توانایی جذب آب توسط خاک باشد، آب در سطح خاک جمع نخواهد شد. شکل ۵-۶، رابطهٔ سرعت ورود آب به خاک با زمان را برای شدت پخش یکنواخت کم و زیاد نشان می‌دهد. در ابتدای این فرایند که شدت پخش، سرعت نفوذ را کنترل می‌کند و مساوی آن است؛ هر دو منحنی در یک خط افقی قرار می‌گیرند. با گذشت زمان، توانایی خاک برای جذب آب کاهش می‌یابد و کمتر از سرعت پخش آب می‌گردد درنتیجه، شرایط ماندابی شروع شده و آب در سطح خاک جمع می‌شود. منطقهٔ هاشورزدهٔ بین دو خط افقی، مربوط به شدت پخش یکنواخت آب و منحنی نزولی شدت نفوذ، معرف ذخیرهٔ سطحی است که امکان دارد به صورت رواناب تلف گردد. برای شدت پخش زیاد، ماندابی زودتر شروع می‌شود و پتانسیل وقوع رواناب بیشتر است.

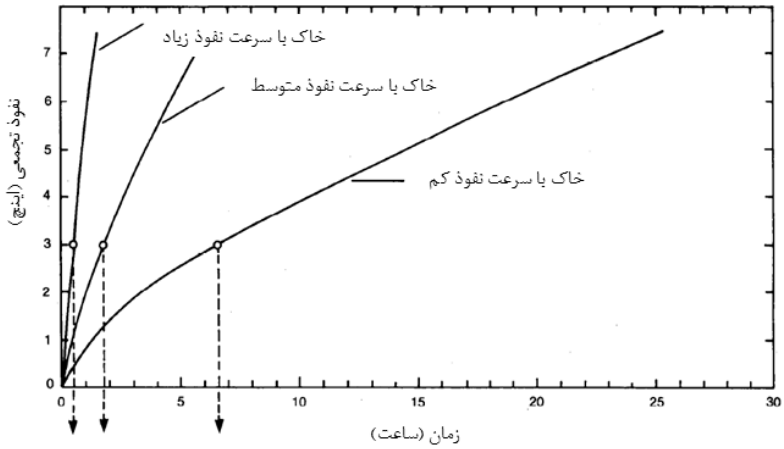
خط شکسته در شکل ۵-۶، کاهش سرعت نفوذ با گذشت زمان تحت شرایط ماندابی یا سیلابی دائمی را نشان می‌دهد. در شروع آبیاری، سرعت نفوذ زیاد است اما به سرعت کاهش می‌یابد. سرعت نفوذ، حالت غیردائمی دارد زیرا با گذشت زمان تغییر می‌نماید. در نقطه‌ای که تغییرات سرعت خیلی کم است، سرعت نفوذ دائمی شروع می‌شود. درصورتی‌که شدت بارش کمتر از سرعت نفوذ دائمی باشد، ماندابی در سطح خاک رخ نمی‌دهد.



شکل ۵-۶. رواناب بالقوه برای شدت پخش زیاد و کم مشابه آبپاش‌های ثابت

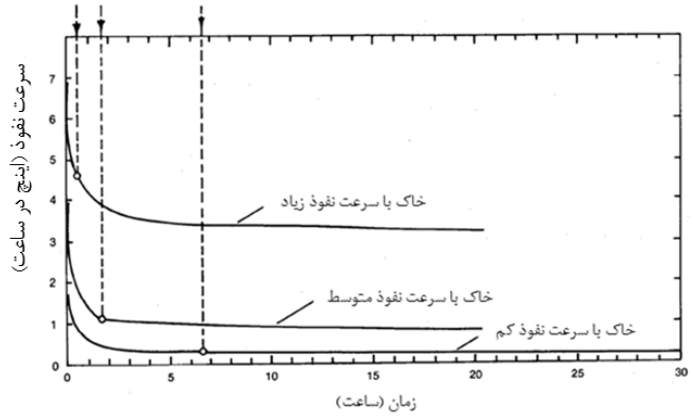
۵-۳-۴ روابط نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ

زمان مورد نیاز برای جذب مقدار معینی آب توسط خاک تحت شرایط ماندابی را می‌توان با رسم نفوذ تجمعی نسبت به زمان تعیین کرد. این رابطه برای خاک های دارای سرعت نفوذ زیاد، متوسط و کم در شکل ۵-۷ ارائه گردید. خاک دارای سرعت نفوذ متوسط، ۳ اینچ (۷٫۶ سانتی متر) آب را در حدود ۱٫۷۵ ساعت جذب نمود. تنها حدود ۲۰ دقیقه برای نفوذ هر اینچ آب (۲٫۵ سانتی‌متر) مورد نیاز است، درحالی‌که حدود ۴٫۵ ساعت برای جذب ۶ اینچ (۷٫۱سانتی‌متر) آب لازم است. بنابراین میزان نفوذ به‌واسطهٔ زمان‌های پخش مختلف، قابل کنترل است.



شکل ۵-۷. رابطهٔ نفوذ تجمعی با زمان برای سه نوع خاک

نمودارهای مشابهی را می‌توان برای نشان دادن رابطهٔ سرعت نفوذ لحظه‌ای با زمان برای خاک‌های دارای سرعت نفوذ زیاد، متوسط و کم رسم نمود (شکل ۵-۸). سرعت نفوذ در ابتدای آبیاری زیاد است اما مقدار آن به سرعت کاهش می‌یابد تا به مقدار یکنواختی برسد.



شکل ۵-۸ . رابطهٔ سرعت نفوذ با زمان برای سه نوع خاک

مقایسهٔ بین شکل‌های ۵-۷ و ۵-۸ نشان می‌دهد که خاک دارای سرعت نفوذ زیاد، سه اینچ (۷٫۶ سانتی‌متر) آب را در حدود ۲۰ دقیقه جذب می‌کند که در این زمان سرعت نفوذ به حدود ۴٫۶ اینچ (۱۱٫۷ سانتی‌متر) در ساعت کاهش می‌یابد. در مقابل، برای خاک با نفوذپذیری کم سرعت نفوذ برابر۰٫۳ اینچ (۰٫۸ سانتی‌متر) در ساعت در طول کل دوره زمانی ۶٫۵ ساعت است. موقعیت نسبی روی منحنی سرعت در زمانی که ۳ اینچ آب نفوذ کرده است، به‌طور قابل توجهی در سه نوع خاک فرق می‌کند. در این زمان، سرعت نفوذ به سرعت برای خاک با سرعت نفوذ زیاد کم می‌شود اما برای خاک با سرعت نفوذ کم به مقدار تقریباً ثابتی رسیده است.

۵-۳-۵ سرعت نفوذ پایه یا دائمی

معمولاً سرعت نفوذ پایه یا دائمی، به‌عنوان سرعت تقریباً ثابتی تعریف می‌شود که زمانی پس از شروع آبیاری رخ می‌دهد. خاک با سرعت نفوذ کم که در شکل ۵-۸ نشان داده شده است، احتمالاً دارای سرعت نفوذ پایه معادل ۰٫۳ اینچ (۰٫۸ سانتی متر) در ساعت می‌باشد. تعیین سرعت نفوذ پایه برای خاک دارای سرعت نفوذ زیاد مشکل تر است زیرا معمولاً قبل از وقوع این سرعت، آبیاری متوقف می‌شود. بر اساس دستورالعمل سازمان حفاظت خاک آمریکا سرعت نفوذ پایه، نقطه ای روی منحنی سرعت نفوذ است که در آن تغییر سرعت کمتر از ۱۰ درصد باشد. تغییرات سرعت

نفوذ پس از آن، مهم در نظر گرفته نمی‌شود.

۵-۳-۶ تغییر زمانی و مکانی نفوذ

تغییر عوامل مؤثر بر نفوذ، سبب تغییر نفوذ در طول فصل یا از فصلی به فصل دیگر می‌شوند. معمولاً در طول یک فصل از یک آبیاری تا آبیاری بعدی، نفوذ کاهش می‌یابد. کاهش نفوذ در طول یک فصل، معمولاً برای یک گیاه یک‌ساله قابل توجه‌تر از یک گیاه دائمی است. تغییرات فصل به فصل، معمولاً در ارتباط با گیاهان دائمی است زیرا خاک اغلب کمتر از گیاهان یک‌ساله تحت عملیات‌های زراعی قرار می‌گیرد. برای تطبیق کردن با این شرایط متغیر، مدیریت آبیاری باید انعطاف‌پذیر باشد طوری‌که آبیار بتواند آب را به‌صورت کارآمد مصرف کند. در هر حالت، اگر خاک با استفاده از عملیات خاک‌ورزی یا عملیات دیگر به‌گونه ای دستکاری شود که تولید خلل و فرج درشت‌تر نماید، روند کاهش نفوذ را می‌توان کم نمود یا برعکس کرد.

به‌ندرت، کلیهٔ بخش‌های یک مزرعه یا یک نوع خاک سرعت نفوذ مشابهی دارند زیرا تغییرات کوچک در خصوصیات خاک و گیاه بر نفوذ تأثیر می‌گذارد. این تغییرات ممکن است ناشی از تراکم حاصله از چرخ ماشین‌های کشاورزی یا تغییرات طبیعی در بافت و ساختمان خاک باشد.

تغییرات مکانی خصوصیات نفوذ برای سیستم‌هایی که در آن‌ها سطح خاک ماندابی می‌شود نسبت به سیستم‌هایی که شدت پخش کنترل‌کننده سرعت نفوذ است، حیاتی‌تر است. به‌دلیل اینکه سرعت نفوذ از یک مکان به مکان دیگر تغییر می‌کند، در آبیاری سطحی حتی اگر زمان باقی ماندن آب در کلیهٔ نقاط مزرعه یکسان باشد، کل نفوذ در نقاط مختلف متفاوت است. مدیریت تغییرات بین مزرعه‌ای، نسبت به مدیریت تغییرات درون یک مزرعه آسان‌تر است زیرا برای هر مزرعه می‌توان یک سیستم آبیاری طراحی نمود.

۵-۳-۷ معادلات نفوذ

هنگامی‌که آب روی خاک قرار می‌گیرد، ابتدا لایهٔ سطحی آن اشباع شده و سپس جریانی پیستونی شکل از آب در خاک برقرار می‌گردد. یعنی پس از اشباع شدن سطح

خاک، رطوبت به‌صورت پیستونی به سمت اعماق خاک حرکت می‌کند و مرز بین قسمت خیس شده و خشک کاملاً متمایز می‌باشد. منطقهٔ پیشروی رطوبت را، جبههٔ رطوبتی گویند. حرکت آب در این جبهه، از داخل منافذ خاک و براساس قانون دارسی صورت می‌گیرد. اما معادلهٔ دارسی نمی‌تواند پاسخ‌گوی مقدار نفوذ و سرعت نفوذ در هر لحظه باشد درصورتی که آنچه در زراعت و آبیاری اهمیت دارد این است که بدانیم در یک مدت مشخص چقدر آب در خاک نفوذ کرده و یا سرعت نفوذ در هر لحظه چقدر بوده است. برای این منظور، معادلات متعددی که توصیف‌کنندهٔ وضعیت‌های فوق باشد، ارائه گردید. برخی از این معادلات که کاربردهای بیشتری دارند در اینجا تشریح می‌شوند.

در سال ۱۹۱۱، گرین و آمپت[1] معادله‌ای را برای نفوذ آب در شرایط یکنواخت به داخل زمین ارائه دادند که به‌صورت زیر می‌باشد.

$$f = k\frac{(H_{\circ} + S_w + L)}{L} \qquad (۳-۵)$$

در این معادله: K ضریب هدایت هیدرولیکی خاک، $H_{\circ}$ ارتفاع آب انباشته شده در سطح خاک، S_w پتانسیل مکش خاک در جبههٔ رطوبت، L فاصلهٔ سطح خاک تا جبههٔ رطوبت و f شدت نفوذ می‌باشد. برای استفاده‌های کاربردی، حل معادلهٔ فوق مشکل است لذا در عمل، معادلهٔ گرین- آمپت به‌صورت ساده زیر ارائه و اجزای آن تخمین زده می‌شود:

$$f = \frac{A}{F} + B \qquad (۴-۵)$$

در این رابطه: f سرعت نفوذ، F مقدار نفوذ تجمعی و A و B ضرائبی هستند که از روی آزمایش نفوذ به‌دست می‌آیند.

یکی از رایج‌ترین و ساده‌ترین روابط ریاضی برای توصیف فرایند نفوذ، معادلهٔ کوستیاکوف[2] می‌باشد:

$$f = kt^{-a} \qquad (۵-۵)$$

---

1. Green and Ampt
2. Kostiakov

در این رابطه: f سرعت نفوذ، t زمان پس از شروع نفوذ و k و a ضرایب ثابتی می‌باشند که به نوع خاک و شرایط اولیه بستگی دارند. اگرچه این معادله ساده است ولی نمی‌توان شرایط مزرعه‌ای مختلف مانند میزان رطوبت اولیه، را در آن لحاظ کرد بدین‌معنی که ضرایب ثابت این معادله فقط در وضعیت مشابه رطوبت اولیهٔ خاک که به‌ازای آن، معادله استخراج شده است صادق بوده و لذا نمی‌توان از آن برای تمام وضعیت‌های رطوبت اولیهٔ خاک استفاده کرد. سادگی، آسان بودن واسنجی با داده‌های صحرایی و آسان بودن مشتق‌گیری از آن، از مزایای معادلهٔ کوستیاکوف محسوب می‌گردد. معادلهٔ کوستیاکوف، برای دوره‌های زمانی کوتاه مدت نتایج رضایت بخشی به‌دست می‌دهد. منظور از زمان کوتاه یعنی حدود ۲ تا ۶ ساعت که چون در سیستم‌های آبیاری سروکار با حدود همین چند ساعت است، لذا این معادله در برنامه‌ریزی آب و خاک کاربرد زیادی دارد. ایرادی که بر این معادله گرفته می‌شود آن است که در زمان‌های طولانی، سرعت نفوذ را نزدیک به صفر پیش‌بینی می‌کند. حال آنکه در عمل چنین نبوده و سرعت نفوذ نهایی که همان ضریب آبگذری اشباع خاک است، صفر نمی‌باشد. برای برطرف کردن مشکل اخیر، می‌توان یک ترم ثابت را به سمت راست معادلهٔ کوستیاکوف اضافه نمود. معادلهٔ حاصله که به نام معادلهٔ کوستیاکوف لوئیز[1] معروف است، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$f = kt^{-a} + f_c \qquad (۶-۵)$$

در این رابطه، f_c سرعت نفوذ نهایی و ثابت می‌باشد. هورتن[2] با توجه به تیپ کلی منحنی تغییرات سرعت نفوذ، معادلهٔ نفوذ دیگری را با سه ضریب ثابت ارائه کرد که به‌صورت زیر می‌باشد:

$$f = f_c + (f_\circ - f_c)e^{-kt} \qquad (۷-۵)$$

که در آن: f سرعت نفوذ در هر لحظه، $f_\circ$ سرعت نفوذ در ابتدای فرایند نفوذ، f_c سرعت نهایی نفوذ وقتی نسبتاً ثابت شده باشد، k عدد ثابتی که بسته به نوع خاک

1. Kostiakov-Lewis
2. Horton

متغیر است و t زمان از شروع نفوذ می‌باشد. با کمی تغییر در معادلهٔ فوق خواهیم داشت:

$$\log(f - f_c) - \log(f_\circ - f_c) = -kt \log e$$

$$t = \frac{-۱}{k \log e} \log(f - f_c) + \frac{۱}{k \log e} \log(f_\circ - f_c)$$

اگر این معادله را با معادلهٔ کلی خط مستقیم $y = mx + c$ مقایسه کنیم خواهیم داشت:

$$Y = t$$

$$m = \frac{-۱}{(k \log e)}$$

$$x = \log(f - f_c)$$

$$c = \log \frac{(f_\circ - f_c)}{(k \log e)}$$

حال چنانچه t را نسبت به $\log(f - f_c)$ در یک دستگاه محور مختصات قائم رسم کنیم، خط مستقیمی با شیب $\frac{-۱}{(k \log e)}$ حاصل می‌شود. اگر در دو زمان مختلف، دو مقدار از f را بدانیم و f_c نیز معلوم باشد، خواهیم توانست خط فوق را رسم و شیب آن را به‌دست آوریم تا معادلهٔ سرعت نفوذ مشخص شود.

معادلهٔ دیگری که تا اندازه‌ای پیچیده‌تر است معادلهٔ فیلیپ[1] نام دارد که به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$I = S \cdot t^{۰/۵} + K \cdot t \qquad (۸-۵)$$

در این رابطه؛ I عمق آب نفوذ یافته (cm) از شروع نفوذ، t زمان از شروع نفوذ (min)، S ضریب ثابت مربوط به قابلیت جذب آب برحسب $cm/(min)^{۰/۵}$ که تابع

1. Philip

انجمن علمی مهندسی کشاورزی کویر سبز
دانشگاه پیام نور رضوانشهر صدوق
www.pnu.gigfa.com
agripnu@gmail.com

مکش خاک است و K ضریب ثابت مربوط به هدایت هیدرولیکی خاک برحسب cm/min می‌باشد. در اوایل نفوذ، ضریب ثابت جذب آب و در اواخر نفوذ، ضریب ثابت هدایت هیدرولیکیپ، غالب است. زیرا اگر از معادلهٔ بالا مشتق گرفته شود، سرعت نفوذ برابر خواهد بود با $i = ۰/۵ S \cdot t^{-۰/۵} + K$ که وقتی زمان به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، سرعت نفوذ به سمت K میل خواهد نمود. دو عبارت سمت راست معادلهٔ فیلیپ، به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ بار مکش و بار ثقلی می‌باشند که برای یک ستون افقی خاک، مکش تنها نیرویی است که آب را به داخل می‌کشاند لذا در وضعیت افقی $I = S \cdot t^{۰/۵}$ می‌باشد.

۵-۳-۸ اندازه‌گیری نفوذ

نفوذسنج‌ها را می‌توان به انواع غرقابی و بارانی (flooding and sprinkling)، تقسیم بندی نمود. نفوذسنج های غرقابی برای آبیاری سطحی مناسبند و نفوذسنج های بارانی، نفوذ را برای سیستم های بارانی اندازه گیری می‌کنند. انواع غرقابی معمولاً بیشتر استفاده می‌شوند زیرا به تجهیزات کمتری نیاز دارند و نصب و راه اندازی آن ها نسبت به نوع بارانی راحت‌تر است.

متداول‌ترین نوع نفوذسنج غرقابی، از یک استوانهٔ فلزی به قطر ۲۰ تا ۴۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ تا ۳۶ سانتی‌متر که در داخل خاک کار گذاشته می‌شود، تشکیل می‌گردد. با ریختن آب در داخل استوانه و اندازه‌گیری سرعت افت سطح آزاد آب یا سرعت افزودن آب به استوانه جهت ثابت نگهداشتن تراز آب در داخل استوانه، سرعت نفوذ اندازه‌گیری می‌شود. به محض اینکه جبههٔ رطوبتی از عمق بخش فرورفتهٔ استوانه بیشتر شود، جریان افقی می‌تواند سبب شود که سرعت نفوذ اندازه‌گیری شده بیشتر از سرعت نفوذ واقعی که در زمان آبیاری رخ خواهد داد، گردد. جریان افقی به‌ویژه زمانی مسأله ساز می‌شود که لایه‌های محدودکننده مانند کفه‌های شخم (plow pans)، وجود داشته باشد یا هدایت هیدرولیکی با افزایش عمق کاهش یابد. درصورتی‌که لایه‌های محدود کننده در عمق کم باشند، استوانهٔ نفوذ باید وارد این لایه شده یا در صورت امکان از آن عبور نماید. روش دیگر برای جلوگیری از خطای اندازه‌گیری به‌واسطهٔ جریان افقی، برمبنای استفاده از یک استوانهٔ محافظتی یا منطقهٔ بافر (buffer area)، در

اطراف بیرون استوانهٔ نفوذ است. در بین دو استوانه، همواره آب ریخته می‌شود تا از اثرات حاشیه‌ای جلوگیری شده و جریان عمودی در زیر استوانهٔ نفوذ داخلی حفظ شود.

نفوذ تحت آبیاری فارو، مستلزم حرکت آب خاک در هر دو جهت عمودی و افقی است. به‌دلیل اینکه سرعت نفوذ به اندازه و شکل فارو بستگی دارد، سرعت حرکت آب به داخل خاک، بیشتر intake rate نامیده می‌شود تا infiltration rate. بدون توجه به اصطلاح مورد استفاده، اندازه‌گیری سرعت نفوذ برای طراحی یک سیستم آبیاری فارو مهم می‌باشد. سرعت نفوذ تعیین شده به‌وسیلهٔ آبپاش یا استوانهٔ نفوذ عمدتاً نشان‌دهندهٔ جریان عمودی می‌باشد، بنابراین استفادهٔ مستقیم از این نتایج مشکل است. روشی که غالباً برای تعیین سرعت نفوذ در آبیار فارو استفاده می‌شود، اندازه‌گیری جریان ورودی و خروجی در یک فارو است. برای این کار قطعه‌ای از فارو به طول ۳۰ تا ۹۰ فوت را مشخص نموده و جریان ورودی به این قطعه و خروجی از آن را توسط فلوم یا دریچه اندازه‌گیری می‌کنند. سرعت نفوذ، براساس اختلاف جریان ورودی و خروجی برای زمان‌های مختلف پس از شروع آبیاری محاسبه می‌شود. اگر چه این روش، معیارهای خوبی را برای ارزیابی سیستم‌های موجود آبیاری فارو فراهم می‌کند، ولی استفاده از آن، برای تعیین سرعت نفوذ در طراحی سیستم‌های جدید آبیاری فارو مناسب و راحت نیست. برای رفع این مشکل، یک نفوذسنج فارو (furrow infiltrometer) برای اندازه‌گیری سرعت نفوذ در مقطع کوتاهی از یک فاروی آبیاری، درست شده است. فارو با استفاده از صفحه‌های فلزی مسدود می‌شود و آب با سرعتی که برای ثابت نگهداشتن عمق آب کافی باشد مصرف می‌شود. سپس سرعت نفوذ مشابه با روش استوانهٔ نفوذ تعیین می‌گردد.

نفوذسنج‌های فارو یا استوانه‌ای ممکن است شرایط واقعی را به‌درستی شبیه سازی نکنند زیرا آب ساکن است نه در جریان. برای حل این مشکل، استفاده از یک نفوذسنج فاروی گردشی یا در جریان ممکن است مناسب‌تر باشد. آب از یک طرف وارد مقطع مورد آزمایش فارو شده و در طرف، دیگر در یک حوضچه جمع‌آوری شده و به گردش در می‌آید. برای جایگزینی آب نفوذ یافته، آب مازاد از منبعی تأمین

می‌گردد. با اندازه‌گیری حجم آب موجود در مخزن نسبت به زمان، می‌توان نفوذ را تعیین کرد.

نفوذسنج‌های بارانی یا پاششی (sprinkling or spray infiltrometers)، از یک کرت که اطراف آن با استفاده از ورقه‌های فلزی محصور شده، همراه با وسایلی برای اندازه‌گیری سرعت رواناب سطحی تشکیل می‌شوند. آب با استفاده از یک آبپاش چرخان، با سرعت ثابت یا به‌طور متناوب در سطح کرت پاشیده می‌شود. اگر سرعت پخش ثابت باشد، سرعت نفوذ نسبت به زمان از مقادیر رواناب اندازه‌گیری شده با کسر سرعت رواناب از شدت پخش تعیین می‌شود. برای اجتناب از خطای قابل توجه، میزان ذخیره باید مدنظر قرار گیرد. در مورد آبپاش چرخان، سرعت نفوذ طراحی‌شده در حدی است که به هنگام رسیدن دوبارهٔ آبپاش به یک محل، آب مصرفی از سطح خاک در آن محل، محو می‌شود. فایدهٔ روش آخر این است که اندازه‌گیری‌های نفوذ برای شرایطی انجام می‌شود که شباهت زیادی با شرایط موجود در یک آبیاری واقعی دارد.

مسائل فصل پنجم

۱. کدام‌یک از گزینه‌های زیر صحیح نمی‌باشد.

الف) سرعت واقعی جریان در داخل خاک بسیار بیشتر از سرعت دارسی می‌باشد.

ب) هدایت هیدرولیکی با نفوذپذیری ذاتی محیط متخلخل تفاوت دارد.

ج) با مدیریت خاک می‌توان هدایت هیدرولیکی را افزایش یا کاهش داد.

د) هدایت هیدرولیکی همان نفوذپذیری ذاتی محیط متخلخل است.

۲. مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع در صورتی ثابت است که:

الف) جریان آرام باشد

ب) خواص فیزیکی آب و خاک در مکانهای مختلف مسیر جریان آب در خاک و در زمان‌های متفاوت تغییر نکند

ج) جریان آشفته باشد

د) الف و ب

۳. ورود آب به داخل خاک به‌علت نیروهای ..... می‌باشد.

الف) ثقل و اسمزی ب) ماتریک و ثقل

ج) ماتریک و اسمزی د) فشاری و اسمزی

۴. کدام‌یک از گزینه‌های زیر درباره نفوذ آب به خاک صحیح است؟

الف) مقدار رطوبت باقیمانده در خاک تأثیری بر سرعت ورود آب به داخل خاک ندارد.

ب) شکل گیری لایه نازک متراکم در سطح خاک به سرعت ورود آب از سطح خاک را کاهش می‌دهد.

ج) مرطوب شدن دوره‌ای سطح خاک در نتیجه جریان متناوب، نفوذ را افزایش می‌دهد.

د) کاربرد آب سیلتی در خاک‌های ریزبافت عموماً مشکلات سله‌بندی خاک سطحی را برطرف می‌کند.

۵. سرعت نفوذ پایه یا دائمی .....

الف) به سرعت نفوذ در ابتدای آبیاری گفته می‌شود.

ب) به مقدار نفوذ تجمعی در انتهای آبیاری گفته می‌شود.

ج) کمتر از سرعت نفوذ نهایی است

د) نقطه‌ای روی منحنی سرعت نفوذ است که در آن تغییر سرعت کمتر از ۱۰ درصد باشد

۶. کدام‌یک از مزایای معادله کوستیاکوف نیست؟

الف) در زمان‌های طولانی سرعت نفوذ را نزدیک به صفر پیش‌بینی می‌کند.

ب) سادگی

ج) سهولت واسنجی با داده‌های صحرایی

د) آسان بودن مشتق‌گیری از آن

۷. در یک آزمایش نفوذ با حلقه‌های مضاعف نتایج زیر حاصل شده است:

عمق نفوذ پس از ۶۰ دقیقه ۳٫۵ سانتیمتر

عمق نفوذ پس از ۱۸۰ دقیقه ۷٫۶ سانتیمتر

مطلوبست مقدار نفوذ برحسب سانتیمتر و سرعت نفوذ برحسب سانتیمتر بر ساعت ۵ ساعت پس از شروع نفوذ با استفاده از معادله کوستیاکوف.

۸. مقادیر سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی بدست آمده در یک آزمایش به شرح جدول زیر می‌باشند. مطلوبست مقدار نفوذ تجمعی برحسب سانتیمتر و سرعت نفوذ بر حسب سانتیمتر بر ساعت پس از ۶ ساعت با استفاده از معادله گرین امپت.

زمان (ساعت)	سرعت نفوذ (سانتیمتر بر ساعت)	نفوذ تجمعی (سانتیمتر)
۰	۲	۰
۰/۵	۱/۴۱	۰/۸۵
۱	۱/۰۹	۱/۴۷
۲	۰/۶۹	۲/۳۶
۴	۰/۵۳	۳/۵۸

۹. مطلوبست معادله سرعت نفوذ هورتن با استفاده از اعداد جدول زیر:

زمان (دقیقه)	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰	۱۰۵	۱۲۰
سرعت نفوذ (میلیمتر بر ساعت)	۱۰۴	۵۶	۳۲	۲۱	۱۵	۱۲	۱۱	۱۰	۱۰

۱۰. اگر یک لوله افقی با سطح مقطع ۴۰ سانتیمتر مربع از خاک پر شده باشد و چنانچه انتهای باز لوله اشباع بوده و پس از ۱۵ دقیقه ۱۰۰ سانتیمتر مکعب آب در آن نفوذ نماید، محاسبه کنید در این لوله در حالت عمودی چند سانتیمتر آب نفوذ می‌نماید؟ هدایت هیدرولیکی خاک ۰٫۴ سانتیمتر در ساعت فرض گردد.

فصل ششم

ریشه‌های گیاهان

اهداف کلی

۱. تبیین نقش ریشه در گیاه همراه با توضیح ساختمان ریشه و چگونگی قرارگیری بافت‌های اصلی آن در تک لپه‌ای‌ها و دولپه‌ای‌ها
۲. آشنایی با قانون پوازیه، قانون گاردنر و کاربردهای آن‌ها
۳. درک مفهوم عمق طراحی جذب آب و اهمیت آن برای تعیین نیازهای آب آبیاری

۶-۱ وظایف ریشه‌ها

سیستم‌های ریشه‌ای در گیاهان ۴ وظیفهٔ مهم را بر عهده دارند که عبارتند از: جذب آب و مواد غذایی، ثابت نگهداشتن گیاه و ایجاد لنگر برای آن، ذخیرهٔ مواد غذایی و ساختن ترکیبات آلی گوناگون. در گیاهان خاکزی، جذب آب و کلیهٔ مواد غذایی عملاً از طریق ریشه صورت می‌گیرد. البته آب و برخی املاح از طریق برگ ها جذب می‌شوند ولی جذب از طریق شاخه و برگ، در مقایسه با مقدار جذب از راه ریشه بسیار ناچیز است.

نقش ریشه به‌عنوان لنگرگاه نیز از بسیاری جهات حائز اهمیت است. غالباً موفقیت انواع گیاهان بسته به عمود قرار گرفتن آن‌هاست و اگر نتوانند به‌صورت قائم قرار گیرند، دسترسی آن‌ها به نور خورشید کاهش پیدا کرده و در زیر پوشش سایر گیاهان از بین خواهند رفت. بین گیاهان مختلف از نظر مقاومت در برابر سقوط به‌وسیلهٔ باد، اختلافات زیادی وجود دارد. این مقاومت به مقدار، عمق و مقاومت

مکانیکی و در واقع نقش لنگر بودن ریشه‌ها بستگی دارد. ظاهراً ریشه‌ها به دو صورت گیاه را درخاک تثبیت می‌کنند: یکی توسعهٔ شبکهٔ ریشه‌ها در خاک و مسلح کردن آن و دیگری جذب آب و خشک کردن آن که هر دو عامل، مقاومت برشی خاک را افزایش داده و از لغزش خاک و در نتیجه سقوط درخت در شیب تپه‌ها و یا افتادن آن توسط باد جلوگیری می‌کنند. مقاومت مکانیکی ریشه‌ها، یکی از عوامل مؤثر بر طاقت برخی گیاهان مانند گندم در برابر سرمای زمستانه است. زیرا وجود ریشه‌های خشبی و زبر، موجب می‌گردد تا گیاه با حداقل صدمه در مقابل یخبندان‌ها ایستادگی نماید.

مقدار مواد غذایی ذخیره شده در ریشه‌ها به‌خصوص در گیاهان دو ساله و یا دائمی قابل توجه است. این مواد نه تنها در بهار به هنگام شروع رشد مجدد گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرند، بلکه غالباً از نظر اقتصادی برای انسان مفید می‌باشد، مانند چغندرقند، سیب زمینی و هویج.

هرچند نقش سازندگی ریشه‌ها در مقایسه با برگ‌ها ناچیز شمرده می‌شود، ولی این موضوع در جای خود بسیار با اهمیت است. در بسیاری از گیاهان، ازت معدنی قبل از آنکه به شاخ و برگ منتقل شود ابتدا در ریشه به ترکیبات آلی تبدیل و سپس به سایر نقاط گیاه منتقل می‌گردد. از جمله این مواد نیکوتین است که ابتدا در ریشه‌ها ساخته شده و سپس به شاخه و برگ منتقل می‌شود. همچنین، بسیاری از ترکیبات آلی سولفوره و فسفره و هورمون‌های تنظیم‌کنندهٔ رشد، در ریشه ساخته می‌شوند.

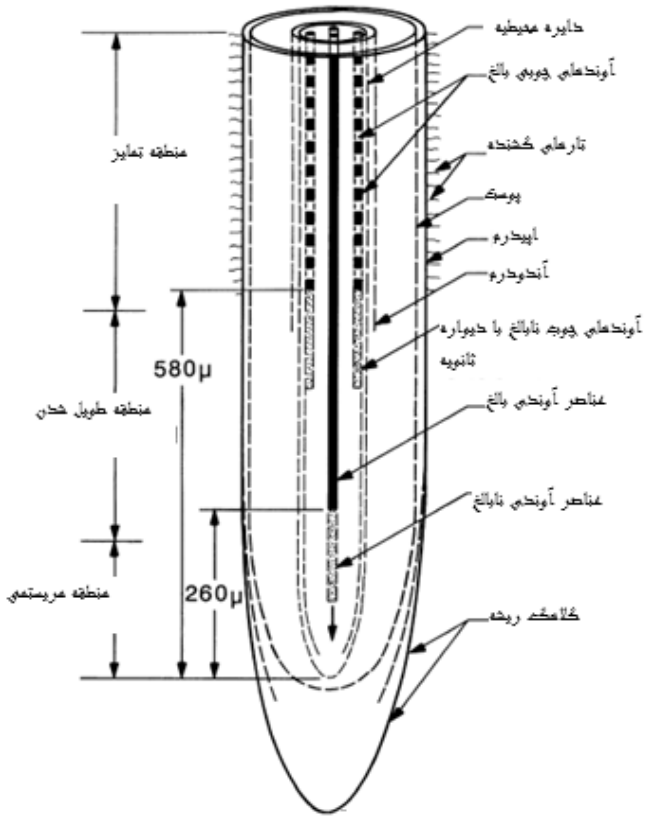
۶-۲ آناتومی ریشه

۶-۲-۱ چهار ناحیهٔ یک ریشهٔ در حال رشد

ریشه‌های در حال رشد معمولاً دارای ۴ ناحیه می‌باشند: کلاهک ریشه، منطقهٔ مریستمی، منطقهٔ تقسیم سلولی و منطقهٔ تمایز و اشتقاق سلولی(شکل ۶-۱). ولی این مناطق ممکن است همیشه به وضوح قابل تشخیص نباشند. کلاهک ریشه، از تعدادی سلول نامنظم و غیرمتراکم تشکیل شده که معمولاً به‌خوبی مشخص است. به‌دلیل اینکه کلاهک مستقیماً به سیستم آوندی متصل نمی‌باشد، احتمالاً نقشی در جذب آب و مواد غذایی ندارد و گفته می‌شود محتوی موادی است که خاصیت ژئوتروپیسم مثبت را در گیاه ایجاد

می‌کند یعنی موادی که رشد ریشه را به سمت اعماق خاک تقویت می‌کنند.

منطقهٔ مریستمی که در بالای کلاهک واقع گردیده، از تعداد بیشماری سلول‌های کوچک و متراکم با دیوارهٔ نازک که محتوی مواد سیتوپلاسمی می‌باشند تشکیل شده است. به‌دلیل مقاومت زیاد سیتوپلاسم در برابر ورود آب و املاح و عدم وجود یک سیستم هدایت‌کننده، مقدار نسبتاً کمی آب یا املاح از طریق این منطقه جذب می‌شوند.



شکل ۶-۱. ساختمان اولیهٔ ریشهٔ تنباکو در یک برش عرضی

معمولاً منطقهٔ تقسیم سلولی و طویل شدن سلول‌ها، بالاتر از منطقهٔ مریستمی و حدود چند دهم میلی‌متر بالاتر از کلاهک ریشه قرار دارد. در این منطقه، سلول‌ها به سرعت طویل می‌شوند و اندازهٔ واکوئول‌ها در آن گاهی به چند دهم میلی‌متر می‌رسد.

منطقهٔ تمایز، از بالای منطقهٔ تقسیم سلولی آغاز می‌گردد. مشخص کردن دقیق منطقهٔ تمایز سلولی مشکل است زیرا انواع مختلفی از سلول‌ها و بافت‌ها در فواصل مختلفی از رأس ریشه، تمایز می‌یابند.

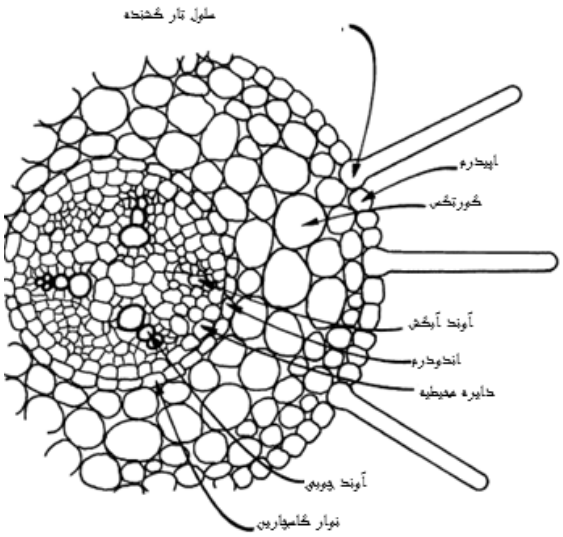
۶-۲-۲ ریشه‌های موئی root hairs

ریشه های موئی زمانی ظاهر می‌شوند که اپیدرم (epidermis) تمایز می‌یابد. اپیدرم، سلول‌های خاصی دارد که سلول‌های ریشه‌های موئی می‌باشند. توجه زیادی به ریشه های موئی می‌شود زیرا به عنوان سطوح جذب آب و املاح، اهمیت زیادی دارند. اپیدرم معمولاً از سلول‌های با دیوارهٔ نسبتاً نازک طویل (thin-walled elongated cells) تشکیل می‌شود که با ایجاد لایهٔ متراکمی، قسمت بیرونی ریشه‌های جوان را می‌پوشاند. گاه لایهٔ متراکم ثانویه یا هیپودرم (hypodermis)، در زیر اپیدرم قرار می‌گیرد. در بعضی گیاهان، شامل مرکبات و مخروطیان، ریشه های موئی نه تنها از اپیدرم خارج می‌شوند بلکه از لایهٔ سلول های زیر اپیدرم یا حتی از ناحیهٔ عمیق‌تر در کورتکس (cortex) ظاهر می‌گردند.

۶-۲-۳ ریشهٔ دولپه‌ای‌ها (Dicotyledonous Roots)

نحوهٔ قرار گیری بافت‌های اصلی در ریشهٔ دو لپه‌ای‌ها، در شکل ۶-۲ ارائه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که بافت‌های هدایت‌کنندهٔ ریشه، به‌جای اینکه مثل ساقه در اکثر گیاهان علوفه‌ای به‌صورت دستجاتی در اطراف مغز باشند، تودهٔ جامدی را در مرکز ریشه تولید می‌کنند. آوندهای چوبی اولیهٔ ریشهٔ گیاهان دولپه ای، از دو تا چندین رشته تشکیل گردیده که به‌صورت شعاعی از مرکز ریشه خارج شده‌اند و آوندهای آبکش اولیه در بین آن‌ها قرار می‌گیرند. آخرین لایهٔ استوانهٔ آوندی (stele) را دایرهٔ محیطیه می‌نامند که سلول های آن، قدرت تقسیم خود را حفظ کرده و نه تنها انشعابات ریشه بلکه درصورتی‌که رشد ثانویه رخ دهد، بافت‌های چوب‌پنبه‌ای کامبیوم را تولید می‌کنند. اندودرم(endodermis)، معمولاً از سلول‌های تک‌لایه‌ای درست می‌شود و لایهٔ داخلی کورتکس را ایجاد می‌کند. اندودرم دارای نوار کاسپارین است که به‌صورت

دیوارهٔ حلقوی در داخل دیواره‌های اولیه قرار دارد و محتوی مادهٔ مومی یا چرب چوب‌پنبه (suberin) و لیگنین (lignin) می‌باشد.

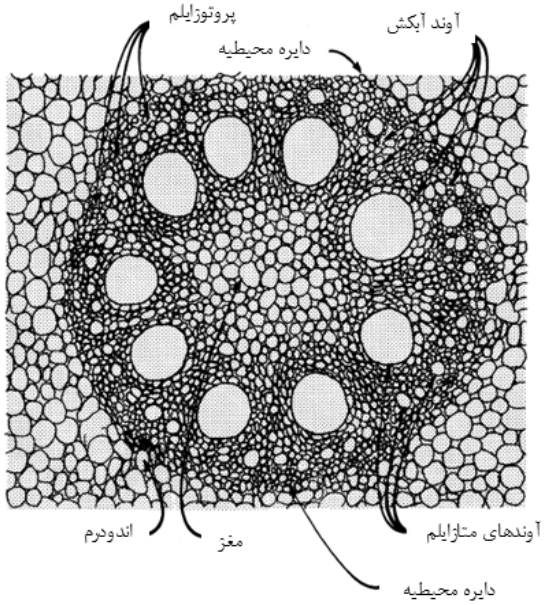


شکل ۶-۲. یک ریشهٔ دو لپه

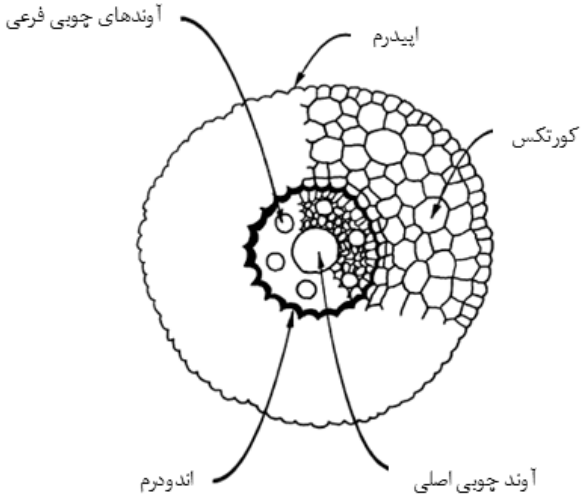
۴-۲-۴ ریشهٔ تک‌لپه‌ای‌ها (Monocotyledonous Root)

در گیاهان تک‌لپه‌ای، تعداد متفاوتی از آوندهای چوبی به‌صورت دایره‌ای در اطراف مغز (pith) قرار می‌گیرند (شکل ۶-۳) با این وجود در بعضی از تک‌لپه‌ای ها مانند گندم (شکل ۶-۴)، یک آوند در مرکز قرار می‌گیرد و به‌وسیلهٔ اجزای (nontracheary elements) آوندهای دیگر مجزا می‌شود. آوند چوبی مرکزی بزرگ، بخشی از متازایلم (metaxylem) است. متازایلم بخشی از آوند چوبی اولیه است که بعد از پروتوزایلم (protoxylem) و قبل از آوند ثانویه تمایز می‌یابد (البته درصورتی‌که آوند ثانویه‌ای در یک گونهٔ خاص تشکیل شود). پروتوزایلم، اولین جزء تشکیل‌شدهٔ آوند در اندام گیاهی و اولین بخش آوند اولیه می‌باشد. با تشکیل متازایلم، پروتوزایلم از بین می‌رود. اگرچه اکثر تک‌لپه‌ای‌ها فاقد رشد ثانویه از کامبیوم آوندی می‌باشند، اما برخی از آن‌ها می‌توانند نوعی رشد ثانویه را با رشد تراکمی طولانی

تجربه نمایند (درختان بزرگی مانند خرما جزو این دسته از تک‌لپه‌ای‌ها به‌شمار می‌آیند).



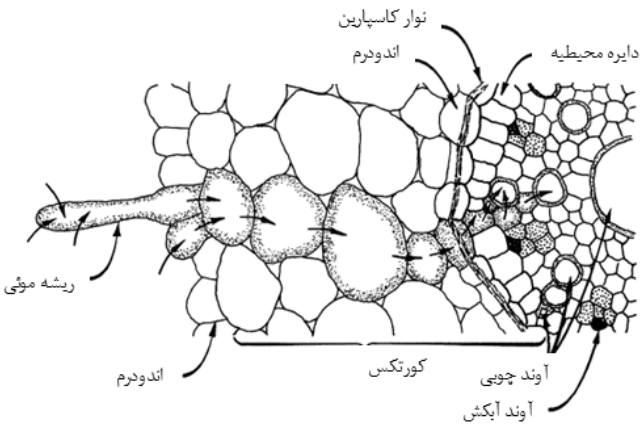
شکل ۶-۳. یک ریشهٔ تک‌لپه‌ای (ریشهٔ ذرت)



شکل ۶-۴. یک ریشهٔ تک‌لپه‌ای (ریشهٔ گندم)

۶-۲-۵ جابجایی آب و املاح از طریق ریشه

ساختمان ریشه از نظر جابه‌جایی آب و نمک‌های محلول در آن، از سلول‌های جذب‌کننده گرفته تا بافت‌های هدایت‌کننده و آزادسازی آن‌ها از سلول‌های زندهٔ لوله های آوندی به داخل عناصر غیرزندهٔ آوندی، دارای اهمیت خاصی است. شکل ۶-۵، مسیر محلول خاک در ریشهٔ گندم را نشان می‌دهد. فلش‌ها بیانگر جهت حرکت در سلول‌های انتخابی معین، می‌باشند. سلول‌های زنده در شکل با نقطه چین مشخص شدند. مهم ترین ویژگی‌های این مسیر عبارتند از: ۱. وجود فضاهای زیاد بین سلولی در کورتکس، ۲. وجود نداشتن چنین فضاهایی در لولهٔ آوندی و ۳. وجود اندودرم ویژه بین دو سیستم. اندودرم بین این دو سیستم مجزا (کورتکس و لوله آوندی) به عنوان مانعی عمل می‌کند که با جلوگیری از نشت محلول (solutes) از لولهٔ آوندی به داخل کورتکس، ایجاد فشار هیدرواستاتیک در لولهٔ آوندی را تسهیل می‌کند.

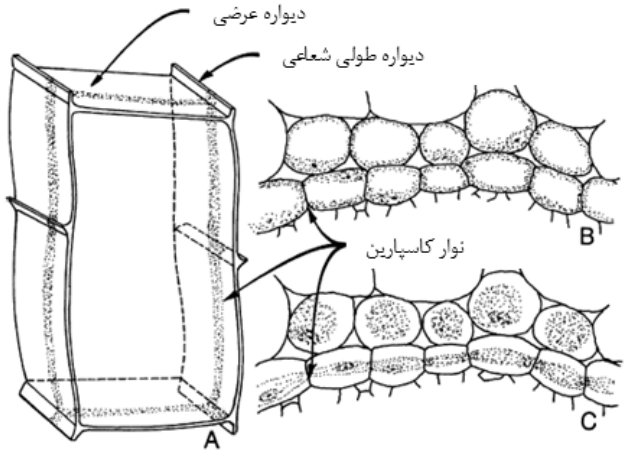


شکل ۶-۵. یک برش عرضی از بخشی از ریشهٔ گندم؛ فلش ها نشان‌دهندهٔ جهت حرکت آب و املاح از درون سری‌های انتخابی سلول‌ها می‌باشند. سلول‌های زنده به‌صورت‌هاشورزده نشان داده شدند.

۶-۲-۶ اندودرم Endodermis

در این قسمت، اندودرم و نوار کاسپارین آن را به طور مفصل‌تر مورد بررسی قرار می‌دهیم. مشخصهٔ اصلی ساختمان اولیهٔ اغلب ریشه‌ها، اندودرم (لایهٔ درونی سلول‌های کورتکس که آن را از آوند (stele) جدا می‌کند) می‌باشد. اندودرم، بخشی از آوند

محسوب نمی‌شود. آوند متشکل از سیستم آوندی (چوبی و آبکش) و بافت اصلی مرتبط (associated ground tissue) (دایرهٔ محیطیه، مناطق بین آوندی (interfascicular regions) و مغز (اگر به‌وجود آید)) می‌باشد. در مراحل ابتدایی تشکیل اندودرم، مادهٔ مومی یا چرب چوب‌پنبه (suberin) (یک مادهٔ چرب) به‌صورت نوارهایی روی دیواره‌های عرضی و شعاعی در جهت افقی ته‌نشین می‌شود که نوار کاسپارین را تشکیل می‌دهد (شکل ۶-۶) و این دیواره‌ها را نسبت به آب، نسبتاً نفوذناپذیر می‌سازد و مانعی در برابر حرکت آب و املاح محلول به داخل آپوپلاست ایجاد می‌کند. آپوپلاست، به‌طور فرضی بخش مردهٔ بافت گیاهی است که شامل دیواره‌های سلولی می‌باشد. سیمپلاست یا سیمپلاسم، زنجیرهٔ ارتباط سیتوپلاسمی است که به‌وسیلهٔ ارتباطات بین سلولی ایجاد می‌شود. پلاسمادزماتا، مارپیچ‌های نازک سیستوپلاسمی هستند که از طریق پروتوپلاست از طریق یک دیوارهٔ سلولی، مستقیماً به داخل پروتوپلاست سلول دوم عبور می‌کنند.



شکل ۶-۶. سلول های اندودرمی، A: کل سلول که موقعیت نوار کاسپارین را نشان می‌دهد، B و C: اثر تیمار با الکل بر سلول های اندودرم و پارانشیم، B قبل از تیمار و C پس از آن. تنها مقطع عرضی از نوار کاسپارین در B و C نشان داده شد.

اندودرم که به‌وسیلهٔ نوارهای کاسپارین شناخته می‌شود، غالباً در ریشه‌ها وجود دارد. این نوار در هنگام پیدایش اولیهٔ سلول تشکیل می‌شود و به‌عنوان بخشی از دیوارهٔ

اولیه است. عرض آن متفاوت و اغلب خیلی باریک‌تر از دیواری است که در آن به‌وجود می‌آید. تشکیل دیوارهٔ سلولی با استفاده از مواد تشکیل‌دهندهٔ نوار کاسپارین، احتمالاً منافذ خیلی ریز (نامرئی با میکروسکوپ) روی دیواره را مسدود نموده و از عبور مواد از دیواره‌ها ممانعت می‌نماید. به‌علاوه، سیتوپلاسم سلول‌های اندودرمی به‌صورت نسبتاً محکمی به نوار کاسپارین متصل است، به‌طوری‌که اگر بافت در معرض اثرات پلاسمولیز (plasmolytic) یا عوامل دیگری که به‌طور معمول سبب جمع شدگی پروتوپلاست‌ها می‌شوند قرار گیرد، به‌آسانی جدا نمی‌شود (شکل ۶-۶). بنابراین به نظر می‌رسد که نوار کاسپارین مانعی را تشکیل می‌دهد که در آن محلول خاک مجبور است که بیشتر از سیتوپلاسم نفوذپذیر انتخابی (سیمپلاسم) عبور کند تا از طریق دیوارهٔ سلولی (آپوپلاست).

۶-۲-۷ انواع سلول در بافت چوبی (Cell Types in Xylem Tissue)

بافت چوبی بافتی است که از چهار نوع سلول تشکیل می‌شود: تراکئیدها (tracheids) و اجزای آوندی (vessel members) که عناصر آوندی (tracheary elements) را می‌سازند، الیاف (fibers)، سلول‌های پارانشیمی. عناصر آوندی، سلول‌های خاصی از آوند می‌باشند که در ارتباط با هدایت آب و مواد موجود در آب فعالیت می‌نمایند.

دو نوع سلول‌های آوندی، تراکئیدها و اجزای آوندی هستند با این تفاوت که تراکئید، سلولی بدون روزنه است درحالی‌که اجزای آوندی دارای یک یا تعداد بیشتری روزنه در هر انتها و گاه نیز در یک طرف دیوار می‌باشند. سری‌های طولی اجزای آوندی که از طریق منافذشان به یکدیگر متصلند، آوندهای چوبی یا به‌طور ساده‌تر آوند نامیده می‌شوند. بخش روزنه‌دار دیوارهٔ یک جزء آوندی، صفحهٔ منفذی (perforation plate) نامیده می‌شود. یک صفحه ممکن است ساده (تنها با یک سوراخ) یا چند روزنه‌ای (با بیش از یک روزنه) باشد.

الیاف‌ها یا فیبرها، سلول‌های طویل با دیوارهٔ ثانویه یا چوبی هستند. ضخامت دیواره‌ها متفاوت است ولی معمولاً ضخامت آن‌ها از ضخامت دیواره‌های تراکئیدها در یک چوب (که بافت ثانویه محسوب می‌شود) بیشتر می‌باشد. دو نوع اصلی الیاف چوبی (xylem fibers) شناسایی گردیده‌اند: فیبر- تراکئیدها و الیاف لیفی (libriform fibers). اگر هر دو در یک چوب ایجاد شوند، فیبر لیفی طولانی‌تر بوده و

انجمن علمی مهندسی کشاورزی کویر سبز
دانشگاه پیام نور رفسنجان صدوق
www.pnu.gigfa.com
agripnu@gmail.com

دیواره‌های ضخیم‌تری نسبت به فیبر- تراکئید دارد. فیبرها پشتیبان بافت چوبی می‌باشند.

سلول‌های پارانشیمی بافت چوبی اولیه، در مناطق بین آوندی (interfascicular regions) به‌وجود می‌آیند و به‌عنوان بخشی از بافت (ground tissue) درنظر گرفته می‌شوند. در ریشه، بافت چوبی اولیه، هسته‌ای با پارانشیم (همانند برخی از ریشه‌های تک‌لپه‌ای‌ها) یا یک هستهٔ بدون پارانشیم (همانند ریشه‌های دولپه‌ای‌ها) را تشکیل می‌دهد. در بافت چوبی ثانویه (secondary xylem)، سلول‌های پارانشیمی، پارانشیم محوری و شعاعی را می‌سازند. این سلول‌های پارانشیمی نشاسته، چربی‌ها و خیلی از مواد (ergastic substances) دیگر را ذخیره می‌کنند. این مواد، محصولات پروتوپلاست‌ها (مانند دانه‌های نشاسته، گلبول‌های چربی، کریستال‌ها و سیالات) به‌حساب می‌آیند.

خصوصیات تراکئیدها، اجزای آوندی، فیبرها و سلول‌های پارانشیمی به شرح زیر است:

الف) تراکئیدها:

- خیلی ابتدایی (in Angiosperms, Gymnosperms, and lower vascular plants)
- انتهای مخروطی (بسته)
- سلول‌های طویل
- سلول‌های نازک
- دیواره‌های سلولی ثانویهٔ چوبی
- فاقد پروتوپلاست (مرده) در زمان بلوغ

ب) اجزای آوندی:

- تنها در اندوسپرم وجود دارند
- سلول‌های کوتاه
- سلول‌های پهن
- انتهای مسطح
- دیواره‌های انتهایی منفذدار با صفحات منفذی
- دیواره‌های سلولی ثانویهٔ چوبی شده

- فاقد پروتوپلاست در هنگام بلوغ (مرده)
- چند عدد از آن ها با همدیگر، یک لولهٔ پیوسته تشکیل می‌دهند که آوند چوبی نامیده می‌شود
- یک آوند چوبی مسیری با مقاومت کم است
- عرض آن از ۱۰ تا ۸۰۰ میکرومتر متغیر است (با قطر متوسط حدود ۴۰ میکرومتر)
- طول یک آوند چوبی از چند صد میکرون (میکرومتر) تا چند میلی‌متر تغییر می‌کند. آوندهای چوبی طویل و عریض در گیاهان گرمسیری مانند درختان مو به وجود می‌آیند.

ج) فیبرها:

- برای حمایت ساختاری
- سلول‌های طویل
- سلول‌های نازک
- دیواره‌های سلولی خیلی چوبی
- فاقد پروتوپلاست (مرده) در زمان بلوغ

د) سلول‌های پارانشیمی:

- برای ذخیره
- برای جابه جایی افقی آب و املاح محلول به درون و خارج سلول‌های هدایت کننده (سیستم شعاعی در بافت چوبی ثانویه)

۳-۶ قانون پوازیه (POISEUILLE'S LAW)

پوازیه، فیزیولوژیست فرانسوی قانون مربوط به سرعت جریان یک مایع در لولهٔ موئین را کشف کرد. وی دریافت که حجم جریانی که در واحد زمان از یک لولهٔ موئین عبور می‌کند، متناسب با توان چهارم شعاع لوله است و به افت فشار بستگی دارد. قانون پوازیه، برای لوله‌های موئین استوانه‌ای کاربرد دارد. اگرچه خاک را می‌توان مجموعه‌ای از لوله‌های موئین درنظر گرفت، معمولاً از قانون پوازیه برای مطالعهٔ حرکت آب در خاک استفاده نمی‌شود و در این مورد، قانون دارسی کاربرد دارد. قانون دارسی، قانون جریان خطی است (برخلاف قانون پوازیه) و همچنین برای متوسط سطح مقطع خاک

به‌کار می‌رود. قانون دارسی برای حرکت آب در مقیاس کوچکی مانند یک لولهٔ کاپیلاری مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. قانون پوازیه به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$v = \frac{(\pi Pr^{۴})}{(۸ \times \eta)} \qquad (۶-۱)$$

که در آن؛ v حجم (سانتی‌مترمکعب) سیال عبوری در واحد زمان، P اختلاف فشار (دین بر سانتی‌مترمربع) در دو انتهای لوله، r شعاع لوله (سانتی‌متر، X طول لوله (سانتی‌متر) و η گرانروی یا ویسکوزیته سیال (پواز یا دین-ثانیه بر سانتی‌متر مربع).

درصورتی‌که در رابطهٔ بالا به‌جای واحد دین، گرم-سانتی‌متر بر مجذور ثانیه استفاده شود، گرانروی نیز به‌جای پواز برحسب گرم- سانتی‌متر بر ثانیه بیان می‌شود (براساس قانون دوم نیوتن؛ F=ma).

نوبل[1] معادلهٔ پوازیه را به شکل زیر مورد استفاده قرار داد:

$$v = -\left(\frac{\pi r^{۴}}{۸\eta}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right) \qquad (۶-۲)$$

در این رابطه؛ v نرخ جابه‌جایی حجم (سانتی‌مترمکعب در ثانیه)، r شعاع لولهٔ موئین (سانتی‌متر)، η گرانروی محلول (پواز)، و $-\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)$ گرادیان منفی فشار هیدرواستاتیک.

به‌جای فشار هیدرواستاتیک، از این به بعد کلمهٔ ساده‌تر فشار استفاده خواهد شد. به‌دلیل اینکه جریان مثبت در جهت کاهش فشار $\left[\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right) < ۰\right]$ رخ می‌دهد (یعنی جریان از نقاط با فشار بیشتر به نقاط دارای فشار کمتر است)، لحاظ نمودن علامت منفی در معادلهٔ فوق لازم است.

در معادلهٔ فوق از مشتق‌های جزئی استفاده گردید. زمانی که یک کمیت، تابعی از بیش از یک متغیر مستقل باشد، لازم است که از مشتق‌های جزئی در بحث دیفرانسیل‌ها استفاده گردد. به‌عنوان مثال، اگر $u = f(x,y)$ یعنی u تابعی از x و y باشد، مشتق

1. Nobel

جزئی u نسبت به x، عبارت است از $(\frac{\partial u}{\partial x})_y$ که در واقع سرعت تغییرات u نسبت به تغییر x در یک مقدار ثابت y خواهد بود. اندیس در مشتق جزئی، برای تأکید بر ثابت بودن یک متغیر استفاده می‌گردد. درمعادلهٔ فوق، v هم به p و هم به X بستگی دارد.

قانون پوازیه، بیانگر حجم جریان عبوری در واحد سطح و زمان می‌باشد که اغلب با J_v نشان داده شده و شار (flux) نامیده می‌شود. برای جریانی از یک لولهٔ استوانه‌ای با شعاع r و سطح مقطع πr^2، J_v برابر است با:

$$\frac{v}{\pi r^2} = J_v = -(\frac{r^2}{8\eta})(\frac{\partial P}{\partial X}) \qquad (۳-۶)$$

در این رابطه، واحد J_v طول بر زمان می‌باشد. این شکل از قانون پوازیه، در ادامه برای محاسبات میزان جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۶-۳-۱ فرضیات قانون پوازیه

قبل از استفاده از قانون پوازیه، لازم است که فرضیات استفاده شده برای به دست آوردن این قانون ذکر گردد. دانستن این فرضیات برای استفادهٔ صحیح از این قانون مهم است. قانون پوازیه دو فرض دارد: فرض اول این است که جریان در داخل لوله آرام یا ورقه ای است. در جریان آرام، دو ذره آب عبوری مسیرهایی (خطوط جریان) را تشکیل می‌دهند که هرگز همدیگر را قطع نمی‌کنند. این نوع جریان تنها زمانی رخ می‌دهد که جریان به اندازه‌ای کند باشد که معیار عدد رینولدز تأمین شود. عدد رینولدز (Re) (Reynolds number)، یک کمیت بدون بعد است که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

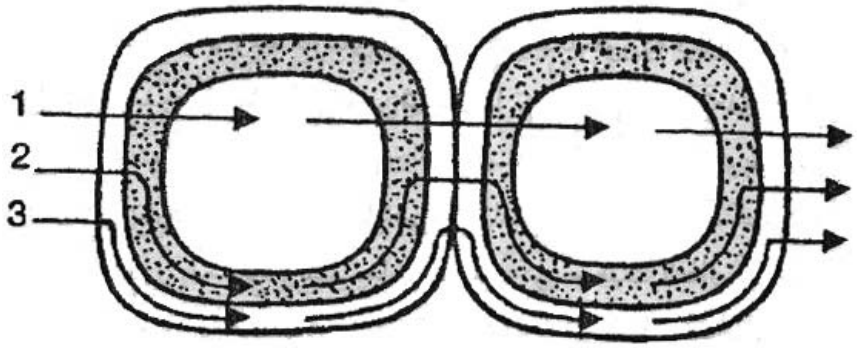
$$R_e = \frac{(\rho J_v r)}{\eta} \qquad (۴-۶)$$

علائم استفاده شده در این معادله، همانند معادلات فوق است و ρ چگالی محلول می‌باشد. اگر عدد رینولدز کمتر از ۲۰۰۰ باشد، جریان را ورقه‌ای یا آرام می‌گویند. در غیراین‌صورت، جریان انتقالی تا آشفته ایجاد خواهد شد و معادلهٔ پوازیه حاکم نخواهد بود.

فرض دوم قانون پوازیه این است که سیال در جریان پوازیه (آرام) در دیوارهٔ لوله ساکن است (سرعت در جداره‌های لوله صفر است). سرعت جریان محلول به شکل سهمی (parabolic fashion) افزایش می‌یابد تا به بیشترین مقدار خود در مرکز لوله می‌رسد. بنابراین سرعت جریان حاصله از معادله (۶-۳)، در واقع متوسط جریان در کل سطح مقطع لوله به شعاع r می‌باشد.

۶-۴ جذب آب توسط ریشه‌ها

برای آنکه آب بتواند به‌طور مؤثر جذب ریشه‌ها شود لازم است، ریشه با خاک تماس نزدیک داشته باشد. این تماس دراثر رشد تارهای کشنده است. آب در ابتدا در خاک حرکت کرده و به سطح ریشه می‌رسد، اما وقتی با سطح ریشه تماس حاصل کرد ماهیت انتقال آب تغییر می‌کند. در داخل خاک، حرکت آب به‌صورت توده‌ای (mass flow) می‌باشد. ولی آب برای اینکه از سطح ریشه به اندودرم (لایه دور استوانه مرکزی) و سپس آوندهای چوبی برسد مسیرهای مختلفی را طی می‌کند (شکل ۶-۷). یکی از این مسیرهای طی شده، مسیر آپوپلاسمی است. در مسیر آپوپلاسمی، آب منحصراً از لابلای دیوارهٔ سلولی و بدون عبور از هر غشاء سلولی حرکت می‌کند. آپوپلاست، به سیستم به‌هم پیوستهٔ دیواره‌های سلولی و فضاهای خالی بین سلول‌های بافت گیاه اشاره دارد.



شکل ۶-۷ مسیرهای مختلف حرکت آب در سلولهای ریشه. ۱- مسیر درون غشایی که آب از داخل سلول‌ها و با عبور از غشاهای پلاسمایی و غشاهای اندامک‌های درون سلولی عبور می‌کند، ۲- مسیر سیمپلاستی که آب از منافذ موجود در دیواره سلول‌ها عبور می‌کند و ۳- مسیر آپوپلاستی بدون عبور از داخل سلول‌ها

آب ممکن است از مسیر سلولی هم حرکت کند. مسیر سلولی شامل دو جزء است: قسمت اول، مسیر درون سلولی است. بدین‌ترتیب که آب به‌طور مداوم از یک طرف سلول وارد و از طرف دیگر آن خارج و سپس وارد سلول بعدی می‌شود. در این مسیر آب باید در هر سلول، حداقل از دو غشاء عبور کند. زیرا ممکن است لازم باشد از اندامک‌های داخل سلول نیز بگذرد که آن‌ها نیز دارای غشاء نازک می‌باشند. در جزء دوم مسیر سلولی یا سیمپلاستی، آب از داخل سلول عبور نمی‌کند بلکه از منافذ بین سلولی که پلاسمادزماتا می‌باشند، عبور می‌کند.

به‌طور خلاصه، در ریشه آب از طریق مسیرهای آپوپلاستی و سیمپلاستی حرکت کرده و وارد آوندهای چوبی و از آنجا به سایر اندام‌های هوایی گیاه می‌رسد. آپوپلاست بخش غیرزندهٔ گیاه بوده و دیواره‌های سلولی، آوندهای چوبی و فضاهای بین سلولی را شامل شده و در آن، جریان آب به‌طور پیوسته وجود دارد. در مسیر آپوپلاستی هیچ‌گونه غشائی وجود نداشته و آب از طریق فضاهای بین سلولی و دیواره‌ها از اپیدرم تا آندودرم به‌راحتی در جریان است. اما به محض آنکه به نوار کاسپارین رسید متوقف شده و از آنجا به بعد باید از مسیر سیمپلاستی عبور کند. در مسیر سیمپلاستی، آب با مکانیسم خاصی پس از گذشتن از غشاها از داخل سلول عبور می‌کند. بدین ترتیب آب وارد آوند چوبی شده از آنجا وارد ساقه و سپس برگ می‌گردد و در نهایت از روزنه‌های برگ‌ها خارج می‌شود.

۶-۵ محاسبات جریان براساس قانون پوازیه

در این قسمت، از شکل نوبل قانون پوازیه، برای برآورد گرادیان‌های فشار در مسیرهای مختلف حرکت آب از خارج ریشه و از طریق آپوپلاست به اندودرم، جایی که آب بالاجبار به دلیل وجود نوار کاسپارین وارد بخش زندهٔ گیاه (سیتوپلاسم) می‌شود، استفاده می‌گردد. این ناحیه از گیاه که از دیواره‌های سلولی و لوله‌های آوندی توخالی تشکیل شده است، بخشی از آپوپلاست می‌باشد. آب و املاح محلول موجود در آن می‌توانند به طور نسبتاً آسان در آپوپلاست حرکت نمایند. ولی برای ورود به سیمپلاست (بخش زندهٔ سلول‌ها) باید از یک غشاء عبور کنند.

در ابتدا گرادیان فشار در آوندهای چوبی چوب پخشندهٔ متخلخل

(diffuse-porous wood) براساس آنالیز نوبل محاسبه می‌شود. قبل از محاسبات، لازم است که، آناتومی چوب بررسی شود. دو نوع چوب (بافت چوبی ثانویه) وجود دارد: چوب پخشندهٔ متخلخل و چوب حلقوی متخلخل (ring-porous wood). در چوب نوع اول، عناصر آوندی دارای قطرهای کم و بیش یکسانی در چوب بهاره و تابستانه می‌باشند. این نوع چوب، بافت چوبی ثانویه‌ای است که در آن منافذ (آوندها) به‌طور نسبتاً یکنواختی در سراسر لایهٔ رشد توزیع می‌شوند یا اندازهٔ آن ها به‌تدریج از چوب ابتدایی تا انتهایی تغییر می‌کند. نمونه هایی از گیاهان دارای چوب پخشندهٔ متخلخل عبارتند از: Acer (افرا)، Betula (غان) و Liriodendron (گل لاله tulip tree). در چوب نوع دوم، قطر عناصر آوندی در چوب بهار بزرگ و در چوب تابستان کوچک است. این نوع چوب متشکل از بافت چوبی ثانویه‌ای است که در آن‌ها، منافذ (آوندها) چوب ابتدایی به طور قابل ملاحظه ای بزرگ‌تر از منافذ چوب بعدی می‌باشند و ناحیه یا حلقهٔ مشخصی را در سطح مقطع چوب تشکیل می‌دهند. نمونه هایی از این نوع چوب عبارتند: Castanea (شاه بلوط)، Fraxinus (زبان گنجشگ)، Robinia (اقاقیا) و برخی Quercus (بلوط).

باید توجه شود که آنالیز نوبل، در ارتباط با چوب (شامل ساقه‌ها یا ریشه‌های چوبی) می‌باشد. بنابراین، محاسبات وی تنها محدود به ریشه‌ها نمی‌شود.

براساس داده‌های آزمایشی، نوبل فرض کرد که سرعت صعود شیره در آوند یک درخت در حال تعرق با چوب پخشندهٔ متخلخل، ۰٫۱ سانتی‌متر در ثانیه است که این مقدار J_v می‌باشد. برای یک درخت با چوب حلقه‌ای متخلخل، وی مقدار J_V را ۱۰ برابر سریع‌تر (یک متر بر ثانیه) درنظر گرفت. همچنین فرض شد که شعاع عناصر آوندی برای چوب نوع اول و نوع دوم به ترتیب ۲۰ و ۱۰۰ میکرون باشد. نوبل همچنین فرض کرد که شیرهٔ آوندی، یک محلول آبی رقیق است به‌طوری‌که شار جریان ضرورتاً مشابه جریان آب، و گرانروی محلول مشابه گرانروی آب باشد. با قراردادن مقادیر مذکور برای چوب نوع اول در معادلهٔ (۶-۳) داریم:

$$۰٫۱ \,\mathrm{cm/s} = \frac{-(۲۰\times۱۰^{-۴})}{(۸\times۰٫۰۱\ \mathrm{dyne-s/cm^{۲}})(\partial P/\partial X)}$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right) = -۲\times۱۰^{۳}\ \mathrm{dynes/cm^{۳}}$$

با توجه به اینکه یک بار معادل ۱×۱۰^{۶} دین بر سانتی‌متر مربع است، ۲×۱۰^{۳}- دین بر سانتی‌مترمکعب معادل ۲×۱۰^{-۳}- بار بر سانتی‌متر یا ۰٫۲- بار بر متر می‌باشد.

حال با فرض اینکه چگالی شیرهٔ آوندی، یک گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد (مشابه چگالی آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) برای تعیین وضعیت جریان، عدد رینولدز را محاسبه می‌کنیم. با استفاده از قانون دوم نیوتن ($F=ma$) و رابطه ($\rho=\frac{m}{v}$) و با جایگذاری واحد عوامل مختلف در این روابط، واحد چگالی را به $dyne-s^{۲}/cm^{۴}$ تبدیل می‌نماییم:

$$F=ma;۱dyne=۱gram\times۱\frac{cm}{s^{۲}} \quad \text{در نتیجه} \quad ۱gram=\frac{dyne-s^{۲}}{cm}$$

$$\rho=\frac{m}{v}=۱\frac{gram}{cm^{۳}}=\frac{(\frac{dyne-s^{۲}}{cm})}{cm^{۳}}=\frac{dyne-s^{۲}}{cm^{۴}}$$

حال مقدار عدد رینولدز را برای چوب پخشندهٔ متخلخل با شعاع عناصر آوندی ۲۰ میکرومتر و سرعت جریان شیرهٔ آوندی ۰٫۱ سانتی‌متر در ثانیه، به‌دست می‌آوریم:

$$R_e=\frac{\left[(\frac{۱dynes^{۲}}{cm^{۴}})(۰٫۱\frac{cm}{s})(۲\times۱۰^{-۳}cm)\right]}{(۰٫۰۱\frac{dyne-s}{cm^{۲}})}=۰٫۰۲$$

برای چوب حلقه‌ای متخلخل با شعاع عناصر آوندی ۱۰۰ میکرومتر و سرعت جریان شیرهٔ آوندی ۱ سانتی‌متر در ثانیه، عدد رینولدز برابر یک به‌دست می‌آید.

این اعداد رینولدز، خیلی کمتر از عدد ۲۰۰۰ می‌باشند که شروع جریان آشفته است. بنابراین می‌توان مطمئن بود که قانون پوازیه حتی برای گیاهانی که قطر عناصر آوندی آن‌ها بزرگ باشد، قابل استفاده است.

بعد از محاسبهٔ گرادیان فشار در آوندهای چوبی، اکنون افت فشار در دیواره‌های سلولی (مسیر آپوپلاستی) نیز با استفاده از آنالیز نوبل محاسبه می‌شود.

فضاهای بین رشته‌ای (interfibrillar spaces) در دیوارهٔ سلولی، قطری حدود ۱۰ نانومتر دارند. فرض می‌کنیم که متوسط شعاع این حفره‌ها ۵ نانومتر است. همچنین

از پیچ و خم (tortuosity) یا انحنای مسیر صرف‌نظر شده و فرض می‌گردد که دیواره‌های سلولی، لوله‌هایی می‌باشند که قانون پوازیه برای آن‌ها قابل کاربرد است. در این حالت نیز، از شار جریان مساوی با حالت لوله‌های آوندی استفاده می‌نماییم (J_v=0.1 cm/s) در نتیجه با استفاده از رابطهٔ (۶-۳)، گرادیان فشار در دیوارهٔ سلولی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$۰/۱\frac{\text{cm}}{\text{s}} = \frac{-(۵\times۱۰^{-۷})^{۲}}{\left[۸(۰/۰۱\ \frac{\text{dyne}-\text{s}}{\text{cm}^{۲}})\ (\frac{\partial \text{P}}{\partial \text{X}})\right]}$$

$$(\frac{\partial \text{P}}{\partial \text{X}}) = -۳/۲\times۱۰^{۱۰}\ \frac{\text{dyne}}{\text{cm}^{۳}} = -۳/۲\times۱۰^{۶}\ \frac{\text{bars}}{\text{m}}$$

برای انتقال شار جریان مشابه در عناصر آوندی به شعاع ۲۰ میکرومتر، تنها به گرادیان فشار معادل منفی ۰.۲ بار بر متر نیاز می‌باشد. بنابراین گرادیان فشار حفره‌های کوچک دیوارهٔ سلولی، $۱۰^{۷}$ برابر گرادیان مورد نیاز برای حرکت آب در آوندها است. به‌دلیل اینکه گرادیان فشار خیلی زیادی برای گذراندن آب از حفره‌های کوچک موجود برای هدایت محلول در دیوارهٔ سلولی لازم است، محلول نمی‌تواند از طریق دیوارهٔ سلولی از گیاه بالا رود.

چنانچه بخواهیم گرادیان فشار را برای غشاء سلولی (مسیر سیمپلاستی) محاسبه کنیم، به‌دلیل وجود نداشتن لوله‌های کاپیلاری در این مسیر، قانون پوازیه کاربرد نداشته و از معادلهٔ زیر برای محاسبهٔ شار جریان (J_v) از طریق پلاسمالما استفاده می‌شود:

$$J_v = -L_p(\Delta P - \sigma\Delta\pi) \qquad (۵-۶)$$

در این رابطه؛

Lp: ضریب هدایت هیدرولیکی غشاء سلولی

ΔP: اختلاف فشار در دو طرف غشاء،

σ: ضریب انعکاس که یک عدد بدون بعد بوده و بین صفر و یک متغیر است. اگر یک باشد، کلیهٔ محلول‌ها از غشاء برگشت داده شده و هیچ محلولی از آن عبور نمی‌کند. اگر این ضریب برابر صفر باشد، کلیهٔ محلول‌ها می‌توانند از غشاء عبور کنند.

$\Delta\pi$: اختلاف فشار اسمزی در دو طرف غشاء

شیرهٔ آوندی، محلول خیلی رقیقی بوده و می‌توان آن را مشابه آب فرض کرد. بنابراین مقدار $\Delta\pi$ در معادلهٔ فوق را می‌توان صفر در نظر گرفت. در نتیجه این معادله به $J_v = -L_p(\Delta P)$ ساده می‌شود.

با فرض اینکه همان مقدار جریان ۰٫۱ cm/s را داشته باشیم و هدایت هیدرولیکی غشاء سلولی (cm/s-bar) ۱×۱۰^{-۵} باشد، داریم:

$$\Delta P = \frac{(۰٫۱\frac{cm}{s})}{(۱\times۱۰^{-۵}\frac{cm}{s-bar})} = -۱۰۰۰۰bar = -۱\times۱۰^{۴}\ bar$$

حال فرض کنیم که طول یک مسیر آوندی ۱۰۰۰ میکرومتر و قطر آن ۲۰ میکرومتر و ضخامت دیوارهٔ سلول ۵ میکرومتر باشد. در این صورت، آب از پایین وارد یک واحد آوندی می‌شود که در آن از یک دیوارهٔ سلولی (به ضخامت ۵ میکرومتر) گذشته و سپس وارد یک لوله (lumen) به‌طول ۱۰۰۰ میکرومتر شده و سپس از یک غشاء دیگر و در نهایت دیوارهٔ سلولی دیگر (۵ میکرومتر) عبور می‌کند. با این فواصل، اکنون می‌توانیم افت فشار یا مقاومت را در مسیر غشاء، دیوارهٔ سلولی و لوله مقایسه کنیم. برای غشاء (همان مسیر سیمپلاست) مقدار آن -۲×۱۰^{۴} بار می‌باشد. این مقدار شامل هر دو انتهای سلول می‌شود (آب دو بار از غشاء سلول عبور می‌کند، در ورود به سلول و خارج شدن از آن).

در مسیر دیوارهٔ سلولی، آب از یک دیوارهٔ سلولی در ابتدا و از دیوارهٔ سلولی دیگر در انتها، عبور می‌کند. با در نظر گرفتن مقدار $(\frac{\partial P}{\partial X}) = -۳٫۲\times۱۰^{۶}$ بار بر متر و ضرب آن در ۱۰×۱۰^{-۶} متر (هر دیوارهٔ سلول ۵ میکرومتر ضخامت دارد که مجموع ضخامت دو دیواره ۱۰ میکرومتر می‌شود) داریم:

$$-۳٫۲\times۱۰^{۶}\frac{bar}{m}\times۱۰\times۱۰^{-۶}\ m = -۳۲\,bar$$

در مسیر آوندی داریم:

$$(\frac{\partial P}{\partial X}) = (\frac{\Delta P}{\Delta X}) = -۰٫۲\ \frac{bar}{m}$$

$$\Delta X = ۱۰۰۰\mu m = ۱۰۰۰\times ۱۰^{-۶}\ m = ۱۰^{-۳}\ m$$

$$\Delta P = ۰/۲\times(۱\times ۱۰^{-۳}) = -۲\times ۱۰^{-۴}\ bar$$

با مقایسهٔ اعداد فوق، مشاهده می‌شود که مقاومت اصلی در برابر انتقال آب، در غشاهای سلولی می‌باشد. حفره‌های دیواره‌های سلولی، مسیر راحت‌تری را برای جریان محلول فراهم می‌کنند درحالی‌که آوند چوبی توخالی مسیری است که دارای کمترین مانع می‌باشد. تکامل آوند چوبی به‌ویژه عناصر آوندی در آندوسپرم، لوله‌هایی را در داخل گیاه ایجاد می‌کند که برای انتقال آب در مسیرهای طولانی مناسب است.

مهم‌ترین محدودیت‌های استفاده از معادلهٔ پوازیه برای محاسبهٔ افت فشار در آوند (و به‌طور غیرمستقیم مقاومت در برابر حرکت آب): ناتوانی در اندازه‌گیری دقیق شعاع آوند، نبود آگاهی دربارهٔ اثرات شرایط رشد بر تغییرات طولی شعاع آوند، نبود آگاهی درباره تعداد آوندهایی که آب را از یک لایه به لایهٔ دیگر در گیاهان زراعی انتقال می‌دهند و ناتوانی در به‌حساب آوردن تبادل آب (water exchange) در طول آوند می‌باشند. مهم‌ترین محدودیت، همان شعاع آوند است به‌ویژه با توجه به این واقعیت که شعاع در معادلهٔ پوازیه با توان چهارم ظاهر می‌شود. با این وجود، استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی پیشرفته، دقت اندازه‌گیری شعاع آوند را بهبود می‌بخشد.

۶-۶ معادلهٔ گاردنر برای حرکت آب به سمت ریشه‌های گیاه

اولین کسی که توانست مدل تحلیلی حرکت آب به سمت ریشه‌ها را ارائه نماید، گاردنر[1] بود. وی جذب آب توسط ریشه‌ها را در یک محیط دوبعدی به‌صورت زیر بیان نمود:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right) = \left(\frac{۱}{r}\right)\left(\frac{\partial}{\partial r}\right)\left[r\, D\left(\frac{\partial \theta}{\partial r}\right)\right] \qquad (۶-۶)$$

در این رابطه؛ θ رطوبت حجمی خاک، D ضریب پخشیدگی خاک، t زمان و r فاصلهٔ شعاعی از محور ریشه می‌باشد. با حل معادلهٔ فوق براساس شرایط مرزی مربوطه، معادلهٔ زیر به‌دست می‌آید:

1. Gardner

$$\tau - \tau_{\circ} = (\frac{q}{۴\pi k})[In(\frac{۴Dt}{a^{۲}}) - \gamma] \qquad (۶-۷)$$

در این معادله؛ γ عدد اولر ($\gamma = ۰/۵۷۷۲۲$)، a شعاع ریشه، k هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک، q میزان جذب آب توسط ریشه، D ضریب پخشیدگی خاک، τ مکش خاک و $\tau_{\circ}$ مکش خاک در شرایط اولیه می‌باشند. برای حل این معادله، فرض می‌شود که مقادیر k و D اعداد ثابتی هستند. به‌دلیل اینکه قطر ریشه‌ها کوچک است می‌توان ریشه را به‌عنوان یک مخزن خطی (line sink) با ظرفیت q در واحد طول درنظر گرفت. با این فرضیات، شکل دیگری از حل معادلهٔ گاردنر منجر به معادلهٔ زیر گردید:

$$\tau - \tau_{\circ} = (\frac{q}{۴\pi k})[In(\frac{۴Dt}{r^{۲}}) - \gamma] \qquad (۶-۸)$$

زمانی‌که r برابر a باشد، این معادله مشابه معادلهٔ قبلی است. گاردنر با مطالعهٔ معادلهٔ فوق، متوجه شد که بخش زیادی از آبی که توسط ریشه جذب می‌شود در فاصلهٔ کمی از ریشه‌ها قرار دارد. مقایسهٔ معادلهٔ (۶-۷) با حل ماندگار جریان در لولهٔ استوانه‌ای توخالی می‌تواند آموزنده باشد:

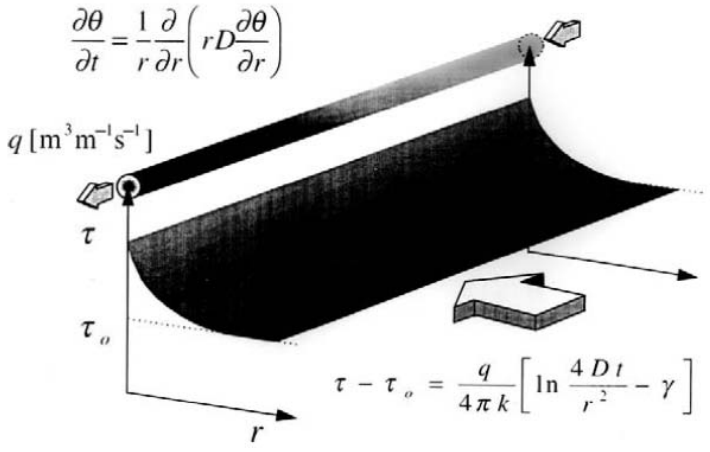
$$\tau - \tau_{\circ} = (\frac{q}{۴\pi k})[In(\frac{b^{۲}}{a^{۲}})] \qquad (۶-۹)$$

که در این معادله، $\tau_{\circ}$ مکش در شعاع بیرونی استوانه $r = b$ و τ مکش در شعاع درونی $r = a$ می‌باشد. اگر $۲(Dt)^{۰/۵}$ را برابر b فرض کنیم، معادله فوق مشابه معادلهٔ (۶-۷) می‌شود به استثنای عامل ثابت $۰/۷$ که در مقایسه با ترم لگاریتمی نسبتاً کوچک است به‌طوری‌که توزیع مکش در حالت انتقالی، تفاوت زیادی با وضعیت آن در حالت ماندگار که کل آب از فاصلهٔ b به سمت ریشه می‌آید، ندارد. حداکثر مقدار شعاع b به‌وسیلهٔ تراکم ریشه‌ها محدود می‌شود و می‌توان آن را، مساوی نصف فاصلهٔ متوسط بین ریشه‌های مجاور درنظر گرفت.

درصورتی‌که از واژه‌های جدید پتانسیل ماتریک به‌جای مکش خاک در معادلهٔ فوق استفاده شود:

$$\Psi_b - \Psi_a = (\frac{q}{۴\pi k})[\text{In } (\frac{b^۲}{a^۲})] \qquad (۱۰-۶)$$

در این رابطه؛ Ψ_b (برحسب بار یا مگاپاسکال) پتانسیل ماتریک در حد فاصل بین ریشه‌ها و نقطه‌ای که در خاک اندازه‌گیری می‌شود، Ψ_a (برحسب بار یا مگاپاسکال) پتانسیل ماتریک در مرز خاک- ریشهٔ گیاه، q حجم آب دریافت شده توسط ریشه در واحد زمان در هر واحد طول ریشه (برحسب سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر بر ثانیه یا میلی لیتر بر سانتی‌متر بر روز) و k هدایت هیدرولیکی غیراشباع یا هدایت موئینگی خاک (سانتی‌متر مربع بر ثانیه بر بار) می‌باشد. در معادلهٔ گاردنر، از هر نوع مقاومت تماسی در حد فاصل خاک- ریشه صرف‌نظر گردید. شکل ۶-۸، توصیف ریاضی مدل گاردنر را در مورد جذب توسط ریشه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۶-۸ . مدل گاردنر برای جذب آب توسط ریشه ها که بر اساس معادلهٔ ریچاردز تهیه شده است. در این شکل؛ q میزان جذب آب، τ مکش آب در خاک،r فاصله از ریشه، t زمان، k هدایت موئینگی خاک، D ضریب پخشیدگی خاک و γ عدد اولر می‌باشد.

۶-۶-۱ فرضیات معادلهٔ گاردنر

در اشتقاق معادلهٔ (۶-۹)، فرضیات مختلفی ارائه شده‌اند که عبارتند از:

۱. ریشه‌ها لوله‌های استوانه‌ای بی‌نهایت طولانی هستند و به فاصلهٔ 2b از هم قرار دارند.

۲. شعاع ریشه‌ها یکنواخت و برابر a است.

۳. جذب آب در طول ریشه یکنواخت است.
۴. آب تنها به‌صورت شعاعی حرکت می‌کند (حرکت بدون تأثیر ثقل)
۵. رطوبت اولیهٔ خاک، مقدار ثابت $\theta_{\circ}$ (در نقاط مختلف یکنواخت است) و متناظر با پتانسیل ماتریک اولیه در تودهٔ خاک Ψ_b می‌باشد.

۶-۶-۲ مقادیر سرعت جذب آب توسط ریشه

مقدار q چقدر می‌تواند باشد؟ جذب آب به‌وسیلهٔ یک ریشهٔ جوان به قطر یک میلی‌متر، معمولاً ۰٫۱ تا ۰٫۵ میلی لیتر در روز در هر سانتی متر طول ریشه است.که اگر به‌طور متوسط، ۰٫۳ میلی لیتر در روز در هر سانتی‌متر طول ریشه در نظر گرفته شود:

$$q = (۰٫۳\frac{cm^۳}{day})(۱\frac{day}{۸۶۴۰۰\,s}) = ۳٫۵\times۱۰^{-۶}\,\frac{cm^۳}{s/cm}$$

می‌توانیم مقدار q را با مقادیر شار جریان (J_v) مدل نوبل برای میزان تعرق چوب‌های مختلف، مقایسه نماییم. مقدار $q = ۳٫۵\times۱۰^{-۶}\,cm^۳/s$ در مساحت سطح ریشه معادل $۲\pi rl$ جذب می‌شود که مساحت یک لولهٔ استوانه‌ای به شعاع r و طول l می‌باشد. بنابراین اگر شعاع ریشه ۰٫۰۵ سانتی‌متر باشد، سطح جذب در هر سانتی‌متر طول ریشه برابر است با:

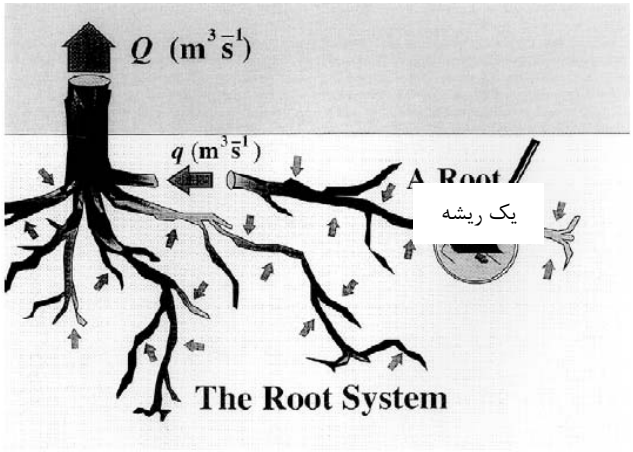
$$(۲\pi)(۰٫۰۵\,cm)(۱cm) = ۰٫۳۱cm^۲$$

و مقدار J_v در سطح ریشه برابر است با:

$$J_v = \frac{(۳٫۵\times۱۰^{-۶}cm^۳/s)}{(۰٫۳۱cm^۲)} = ۱٫۱\times۱۰^{-۵}\,cm/s$$

در مدل نوبل، سرعت جریان در چوب پخشندهٔ متخلخل ۰٫۱ سانتی‌متر بر ثانیه و برای چوب حلقوی متخلخل ۱ سانتی‌متر بر ثانیه فرض شد. بنابراین مقدار شار جریان برای ریشه، به‌ترتیب $۱۰^۴$ و $۱۰^۵$ مرتبه کمتر از سرعت جریان آوندی در دو نوع چوب پخشندهٔ متخلخل و چوب حلقوی متخلخل می‌باشد. باید توجه داشت که مقدار q

موردنظر گاردنر، مربوط به ریشه است که خیلی کمتر از کل جریانی است که از تعداد بی‌شماری ریشه وارد ساقه می‌شود و در آنجا جمع می‌گردد (شکل ۶-۹). جذب آب توسط ریشه‌های گیاه، با سرعت کمتری نسبت به حرکت آب از داخل لوله‌های عمودی باز آوندهای چوبی موجود در ساقهٔ گیاهان صورت می‌گیرد.



شکل ۶-۹. ما سیستم ریشه ال آن به ساقه. مقـدار Q در این مدل برابر میزان تعرقی است که در گیاه صورت می‌گیرد.

مثال: فرض کنید $b = ۱٫۰۵cm$ ، $\Psi_b = -۲$ بار (این مکش را نمی‌توان با استفاده از تانسیومتر اندازه‌گیری نمود بلکه باید از وسایل دیگری مانند سایکرومتر دماجفت thermocouple psychrometer استفاده نمود)، $k = ۱\times۱۰^{-۶}\ cm^۲ / s.bar$ و $q = ۳٫۵\times۱۰^{-۶}\ cm^۳ / s - cm$ باشد، در این صورت:

$$-۲ - \Psi_a = \{\frac{(۳٫۵\times۱۰^{-۶})}{(۴\pi)(۱\times۱۰^{-۶})}\}\times\{\text{In}\ [\frac{(۱٫۰۵)^۲}{(۰٫۰۵)^۲}]\}$$

با حل این معادله، مقدار $\Psi_a = -۳٫۷$ بار، در حدود منفی چهار بار به‌دست می‌آید. بنابراین مقدار پتانسیل ماتریک داخل در فاصلهٔ ۱٫۰۵ سانتی‌متری تا ریشه، ۲ بار افت می‌کند. می‌توانیم مؤلفهٔ پتانسیل اسمزی خاک را لحاظ نماییم که در سراسر خاک ثابت در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، پتانسیل آبی کل برابر است

با:

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_s + \Psi_g + \Psi_p$$

به‌دلیل اینکه حرکت آب به‌صورت افقی فرض شده است، مقدار پتانسیل ثقلی در این رابطه برابر صفر است. همچنین با توجه به شرایط غیراشباع خاک، مقدار پتانسیل فشاری نیز برابر صفر می‌باشد. با فرض اینکه پتانسیل اسمزی محلول خاک برابر منفی یک بار باشد برای Ψ_a داریم:

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_s = -۴ + (-۱) = -۵ \text{bars}$$

همچنین برای Ψ_b داریم:

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_s = -۲ + (-۱) = -۳ \text{bars}$$

این محاسبات، نشان می‌دهد که اختلاف پتانسیل ماتریک بین مرز خاک- ریشه و تودهٔ خاک به فاصلهٔ ۱٫۰۵ سانتی‌متری از ریشه، در زمانی‌که محلول خاک شور باشد نیز به همان مقدار مشابه با حالت غیرشور (۲ بار) باقی می‌ماند

۶-۷ سیستم‌های ریشهٔ گیاهان

سیستم‌های ریشهٔ گیاهان بین آب و مواد غذایی خاک و اندام‌هایی از گیاه که روی زمین قرار دارند ارتباط برقرار می‌نمایند. دو نوع کلی سیستم‌های ریشه‌ای شناخته شده عبارتند از: سیستم‌های ریشهٔ افشان مانند ریشه‌های غلات و سایر گراس‌ها (تک‌لپه‌ای‌ها) و سیستم‌های ریشهٔ راست (taproot) مانند ریشه‌های چغندرقند و یونجه (دولپه‌ای‌ها). این دو نوع ریشه، در شکل ۶-۱۰ نشان داده شدند.

ریشه‌های فیبری، از تعداد زیادی ریشه‌های بلند و باریک تشکیل می‌شوند که از لحاظ طول و اندازه مشابه‌اند. اولین ریشه‌ای که از بذر در حال جوانه زدن خارج می‌شود، ریشهٔ اصلی یا اولیه (seminal or primary) است. این ریشه بتدریج دراز شده و قطر آن افزایش می‌یابد. ریشه‌های ثانویه به‌صورت انشعابات جانبی و subbranches از ریشهٔ اولیه منشعب می‌شوند. با رشد پیوسته، ریشه‌های گرهی (nodal roots) از گره‌های ساقهٔ موجود در زیر زمین ناشی می‌شوند. همچنین از گره‌های روی زمین نیز

ریشه‌ها ایجاد می‌شوند، مانند ریشه‌های ذرت.

برعکس سیستم ریشه‌ای افشان، سایر گیاهان زراعی یک سیستم ریشه‌ای کلی دارند که شامل یک ریشهٔ عمودی می‌باشد. گیاهانی مانند یونجه و چعندرقند، دارای این نوع سیستم ریشه‌ای هستند. اگرچه ریشهٔ عمودی ممکن است تا عمق قابل توجهی در خاک نفوذ کند، بخش اعظم کل سیستم ریشه از لاترال‌های درجه یک تشکیل می‌شود.

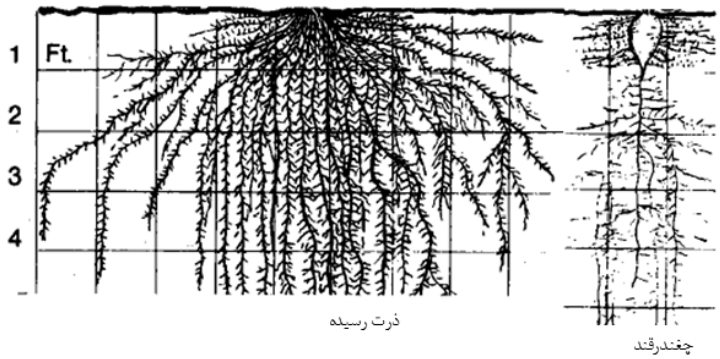
بدون توجه به مشخصات اساسی سیستم ریشه‌ای تک‌لپه‌ای‌ها و دولپه‌ای‌ها، طول و انشعاب‌بندی پیچیده (complex branching) یک سیستم‌ریشه‌ای سالم با گذشت فقط چند هفته پس از شروع رشد، قابل توجه می‌باشد. ریشه‌های جانبی در اعضای اصلی ریشه شروع می‌شوند، از ریشه‌های جانبی اولیه ریشه‌های جانبی ثانویه خارج می‌شوند و این روند ادامه می‌یابد تا زمانی‌که شبکهٔ وسیعی تحت شرایط مطلوب شکل گیرد. سرعت رشد معمول برای بخش‌های مختلف ریشه عبارتند از:

محورهای ریشه، ۰٫۸ اینچ در روز

ریشه‌های جانبی اولیه، ۰٫۲ اینچ در روز

ریشه‌های جانبی ثانویه، ۰٫۰۴ اینچ در روز

رشد ریشه به طول ۲٫۴ اینچ در روز برای ذرت گزارش شده است. در مقابل، شرایط نامطلوب به‌واسطهٔ اقلیم، ترکیب خاک، تهویهٔ خاک یا شیمی خاک، به‌شدت رشد و ازدیاد ریشه را محدود می‌کنند.



شکل ۶-۱۰. سیستم ریشه‌ای فیبری ذرت (سمت چپ) و سیستم ریشه‌ای عمقی (چغندرقند)، هر دو تقریباً دو ماهه‌اند.

۶-۸ مشخصات ریشه‌ای گونه‌های گیاهی

مدیریت مناسب آبیاری، مستلزم داشتن اطلاعات خوب از خصوصیات ریشه دوانی گیاه، توسعهٔ عمقی و تراکم ریشه دوانی می‌باشد. حداکثر عمق ریشه دوانی برخی گیاهان، در جدول ۶-۱ ارائه شد. محدودهٔ معین شده برای گیاهان مختلف، بیشتر مربوط به تفاوت در خصوصیات ژنتیکی می‌باشد.

جدول ۶-۱. حداکثر عمق ریشه دوانی گیاهان مختلف

گیاه	حداکثر عمق ریشه‌دوانی (سانتی‌متر)	گیاه	حداکثر عمق ریشه‌دوانی (سانتی‌متر)
ذرت	۱۸۰-۲۴۰	هویج	۱۵۰-۳۰۰
مارچوبه	۱۰۰-۲۰۰	گل کلم	۹۰-۱۵۰
جو	۱۵۰-۲۹۰	پنبه	۱۵۰-۳۰۰
چغندرقند	۱۸۰-۳۳۰	لوبیای چشم بلبلی	۱۰۰-۱۵۰
باقلا	۱۵۰-۱۹۰	فلفل	۹۰-۱۵۰
سرکلم (cabbage)	۱۵۰-۲۴۰	سیب زمینی	۵۰-۲۴۰
کدوتنبل	۱۵۰-۲۱۰	سیر	۶۰-۱۰۰
بادنجان	۱۵۰-۲۴۰	شبدر چمنی	۱۴۰-۱۸۰
بذرک (flax)	۱۰۰-۱۵۰	لوبیا قرمز	۱۰۰-۳۰۰
کلم قمری	۱۵۰-۲۷۰	سورگوم	۱۵۰-۳۰۰
چاودار	۱۵۰-۲۴۰	سویا	۱۵۰-۲۵۰
اسفناج	۱۵۰-۲۰۰	تره فرنگی	۴۰-۸۰
کدو رشت (squash)	۱۵۰-۲۴۰	کاهو	۱۵۰-۲۵۰
خربزه	۱۰۰-۱۵۰	نیشکر	۲۰۰-۶۰۰
جو دو سر	۱۶۰-۲۶۰	بامیا	۱۲۰-۱۶۰
توت فرنگی	۶۰-۱۲۰	پیاز	۴۰-۱۰۰
جعفری	۹۰-۱۵۰	نخود فرنگی	۱۰۰-۲۴۰
هویج وحشی	۲۰۰-۳۰۰	گوجه فرنگی	۱۴۰-۲۶۰
گل آفتابگردان	۱۵۰-۳۰۰	گندم	۱۵۰-۳۰۰
شلغم	۱۵۰-۲۰۰	هندوانه	۱۵۰-۲۰۰

۶-۹ عوامل مؤثر بر رشد ریشه

اگرچه رشد ریشه تحت شرایط ایده‌آل عموماً سریع است، ولی عوامل مختلفی می‌توانند سرعت رشد و حداکثر عمق ریشه دوانی را بـه شـدت محـدود نماینـد. درصـورتی‌کـه سیستم مؤثر ریشه، از شرایط تهویهٔ خوبی برخوردار بوده و آب و مواد غذایی کـافی در اختیار داشته باشد، قادر خواهد بود که ساقه را به میزان قابل ملاحظه‌ای مـورد حمایـت قرار دهد. تنش‌های وارد بر ریشه ها شامل: تنش شیمیایی ایجاد شده بـه واسـطهٔ کمبـود مواد غذایی، منبع غـذایی نامتعـادل یـا مـواد سـمی؛ تـنش فیزیکـی ناشـی از مقاومـت مکانیکی، شرایط غیرهوازی، نبود آب و دمای نـامطلوب؛ و تـنش بیولـوژیکی ناشـی از آفات و بیماری‌های گیاهی می‌باشند.

بخش عمدهٔ محدودیت‌های رشد ریشه، به‌علت مقاومت‌های مکانیکی می‌باشد. این مقاومت‌ها از دو عامل ناشی می‌شوند: عوامل طبیعی، مانند قرار گرفتن خاک زراعی کم عمق روی مواد مادری تحکیم شده (consolidated) و عوامل غیرطبیعی، مانند کفه‌های شخم حاصل از فشرده شدن (compaction) خاک که به سیستم‌های مدیریت مزرعه بر می‌گردد. محدودیت‌های ریشه ممکن است خیلی ناگهانی (در خاک تحکیم شده یا کفه‌های سخت) یا تدریجی باشد، مانند مورد فشرده شدن خاک. فشرده شدن خاک، معمولاً منجر به کاهش سرعت رشد ریشه یا در وضعیت‌های خیلی حاد جلوگیری از رشد ریشه می‌شود. فشرده شدن خاک، حجم منافذ یا تخلخل خاک (به‌ویژه تخلخل درشت خاک) را کاهش می‌دهد. این امر سبب مقاومت در برابر توسعهٔ ریشه شده، سرعت تبادل گاز بین خاک و اتمسفر را پایین می‌آورد و خواص مربوط به نگهداشت و انتقال آب در خاک را تغییر می‌دهد. کلیهٔ این عوامل، رشد ریشه را تغییر می‌دهند و به‌طور همزمان تحت تأثیر فشردگی خاک قرار می‌گیرند.

خاک‌های لایه‌ای ممکن است مقاومت شدیدتری در برابر توسعهٔ سیستم ریشه، ایجاد نمایند. رشد کمتر ریشه در یک لایهٔ شن یا گراول، می‌تواند به‌علت دانسیتهٔ ظاهری زیاد و مقاومت این لایه‌ها باشد. این لایه‌ها به‌طور معمول از زهکشی خوبی برخوردارند ولی در برابر ورود ریشهٔ در حال رشد، بسیار سفت و مقاوم می‌باشند. یک لایهٔ رسی واقع در زیر خاک دارای بافت متوسط یا شنی، ممکن است سبب ایجاد سطح

ایستابی معلق و تهویهٔ ضعیف در ناحیهٔ انتقالی شود که به‌عنوان مانعی در برابر توسعهٔ ریشه و عبور آن از این لایه عمل می‌کند.

۶-۱۰ جریان آب به داخل ریشه‌ها

در زنجیرهٔ خاک- گیاه- اتمسفر، آب در جهت شیب نزولی انرژی پتانسیل خود حرکت می‌کند. تعرق سبب می‌شود که پتانسیل آب سیستم ساقه و ریشه، کمتر از پتانسیل آب خاک گردد و درنتیجه رطوبت خاک در جهت این گرادیان پتانسیل، وارد سیستم ریشه می‌شود. آب ابتدا از سلول‌های اپیدرمی در تماس با خاک مرطوب، وارد سیستم ریشه شده و سپس با عبور از سلول‌های کورتکس، اندرودرم و سلول‌های دایرهٔ محیطیه، درنهایت به آوند چوبی وارد می‌گردد که این آوندها آب را به اندام‌های مختلف گیاه منتقل می‌کنند. شدت توسعهٔ ریشه و تماس فیزیکی بین ریشه و خاک، ملاحظات فیزیکی بسیار مهمی می‌باشند. زمانی‌که بخش بالایی ریشه نسبتاً خشک می‌شود و آب در ناحیهٔ زیرین آن وجود دارد، مشاهده شده است که جذب آب در واحد حجم خاک، متناسب با تراکم ریشه می‌باشد. بنابراین، نحوهٔ توزیع ریشه ها که برحسب گونهٔ گیاهی و خواص فیزیکی خاک متفاوت است، می‌تواند عامل مدیریتی مهمی باشد.

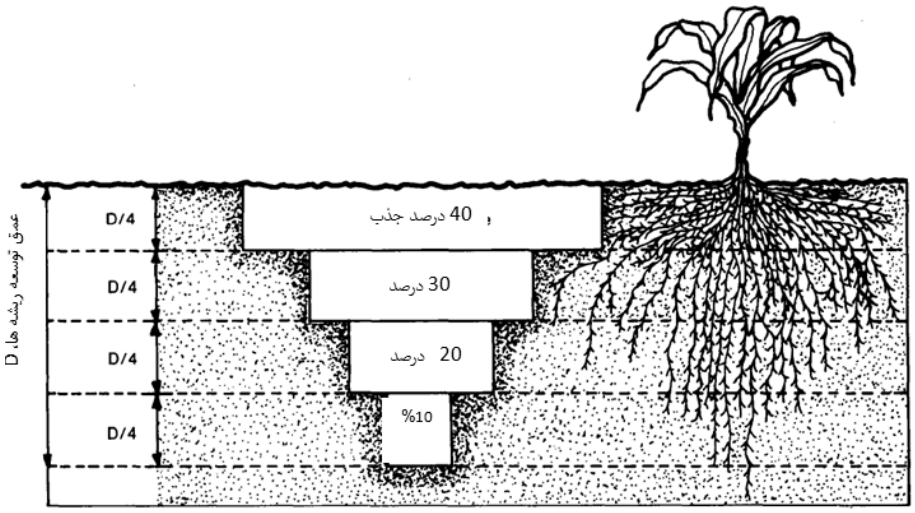
در زمان ارزیابی رطوبت موجود در خاک، وجود نمک در محلول آب خاک باید مدنظر قرار گیرد. ریشهٔ گیاه دارای غشاء نیمه‌تراوایی است که اجازهٔ عبور آب را می‌دهد، ولی از ورود املاح جلوگیری می‌کند. بنابراین اثر مهم نمک‌های محلول بر گیاهان، اثر اسمزی است که بالا بودن میزان نمک، جذب آب از محلول خاک توسط گیاه را دچار مشکل می‌کند. در این حالت، ابتدا رشد سلول تحت تأثیر قرار می‌گیرد و به‌واسطهٔ تنش آبی، رنگ گیاهان تغییر می‌کند.

۶-۱۱ روابط جذب آب- پروفیل ریشه

تراکم طول ریشه (root length density) (طول ریشه‌ها در واحد حجم خاک) معمولاً در اطراف سطح خاک بیشترین مقدار را دارد و با افزایش عمق تا حداکثر عمق نفوذ ریشهٔ یک گیاه، کاهش می‌یابد. این روند در شکل ۶-۱۱ نشان داده شده است.

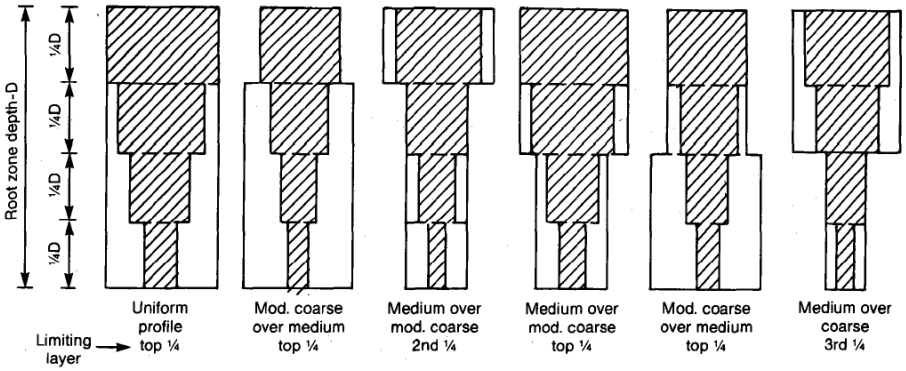
انجمن علمی مهندسی کشاورزی کویر سبز
دانشگاه پیام نور رفسنجان صدوق
www.pnu.gigfa.com
agripnu@gmail.com

بیشترین سرعت جذب آب، در ناحیهٔ دارای حداکثر تراکم ریشه و تحت مناسب‌ترین شرایط دما و تهویه است. به‌دلیل اینکه آب از چند اینچ بالایی خاک به‌صورت تبخیر نیز خارج می‌شود، لذا خیلی سریع از بخش بالایی پروفیل خاک تخلیه می‌گردد. منحنی‌های جذب آب، براساس چارک‌های ناحیهٔ عمقی ریشه، نشان می‌دهند که تقریباً کلیهٔ گیاهانی که در خاک یکنواخت و دارای رطوبت کافی رشد می‌کنند دارای الگوهای جذب مشابهی می‌باشند. شکل ۶-۱۱ نشان می‌دهد که حدود ۴۰ درصد از آب جذب شده توسط گیاه از یک چهارم ابتدایی، ۳۰ درصد از یک چهارم دوم، ۲۰ درصد از یک چهارم سوم و ۱۰ درصد از یک چهارم پایینی ناحیهٔ عمقی ریشه می‌باشد. در خاک‌های غیریکنواخت، مقدار رطوبت خاک برای رشد گیاه ممکن است به‌وسیلهٔ لایه‌ای از خاک که دارای حداقل قابلیت نگهداشت آب می‌باشد، تعیین شود. به‌عنوان نمونه، لایهٔ خاک بالایی با ظرفیت نگهداشت کم، امکان دارد خیلی سریع پس از آبیاری یا بارندگی تخلیه گردد. با وجود آنکه ممکن است رطوبت در لایه‌های زیرین کافی باشد، در مراحل ابتدایی رشد گیاه اگر ریشه هنوز به خوبی استقرار نیافته باشد، گیاه تنش آبی را تجربه خواهد کرد.



شکل ۶-۱۱. الگوی جذب آب توسط گیاهان درحال رشد در خاک فاقد لایه های محدودکننده و با مقدار کافی آب قابل دسترس در کل ناحیهٔ ریشه

نمونه‌هایی از لایه‌های محدودکنندهٔ خاک، در شکل۶-۱۲ نشان داده شده‌اند. الگوی جذب نرمال برای یک گیاه خاص، در صورت وجود لایه‌های محدودکننده تغییر خواهد کرد. همچنین اگر لایه‌های بالایی بسیار خشک باشند، آب بیشتر از حد نرمال از لایه‌های پایینی خاک تأمین خواهد شد.

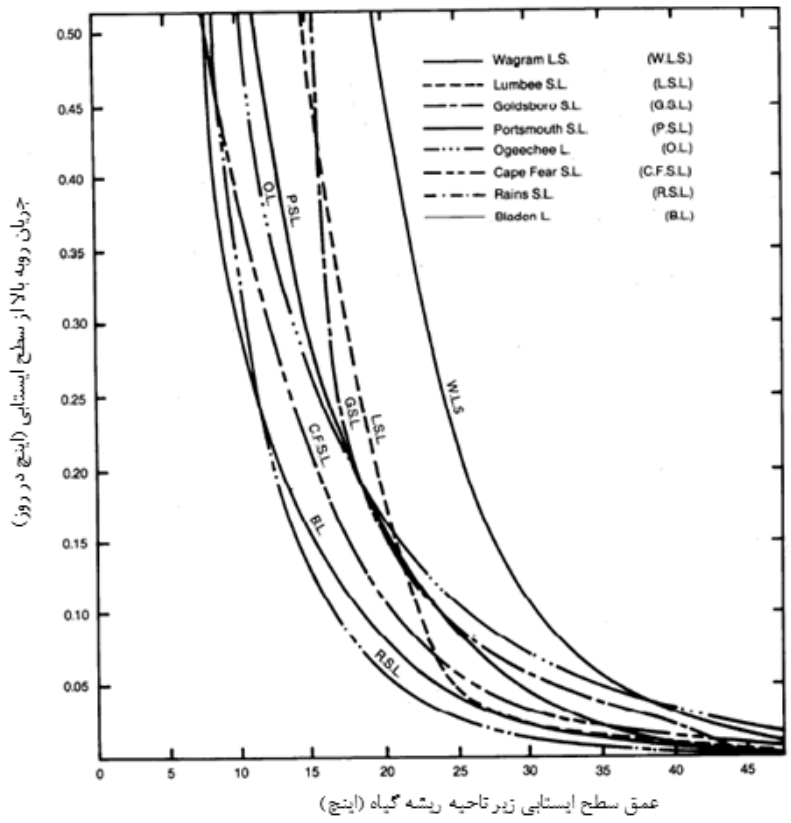


شکل ۶-۱۲. الگوهای جذب آب که به‌وسیلهٔ مقدار آب قابل دسترس در بخش‌های مختلف پروفیل ریشه تعیین می‌شود. عرض هر پروفیل نشان‌دهندهٔ کل آب قابل دسترس است. سطح ناخالص (ارتفاع و عرض) هر پروفیل بیانگر کل آب قابل دسترس در پروفیل می‌باشد؛ منطقهٔ هاشورزده نشان‌دهندهٔ الگوی جذب آب برای هر پروفیل است.

۶-۱۲ مصرف آب گیاه از سطح ایستابی کم عمق

مناطق زیادی از اراضی کشاورزی، دارای سطح ایستابی نزدیک به سطح زمین می‌باشند. با خشک شدن پروفیل خاک به واسطهٔ تبخیر از سطح خاک یا تعرق از گیاهان، گرادیان پتانسیل آب ایجاد شده سبب حرکت روبه بالای آب در پروفیل خاک و جذب آن توسط ریشه‌های گیاهان می‌شود. مقدار جریان رو به بالا، به بزرگی گرادیان پتانسیل آب، خواص جریان غیراشباع خاک و عمق سطح ایستابی بستگی دارد. مقدار جریان رو به بالا برای برخی از خاک‌ها در شکل ۶-۱۳ نشان داده شده است.

در عملیات آبیاری زیرزمینی، از این مفهوم استفاده می‌شود. در این نوع آبیاری، آب وارد منطقهٔ زیرین پروفیل خاک شده و به‌واسطهٔ فرایند موئینگی به طرف بالا حرکت نموده و وارد بخش فعال ناحیهٔ ریشهٔ گیاه می‌گردد.



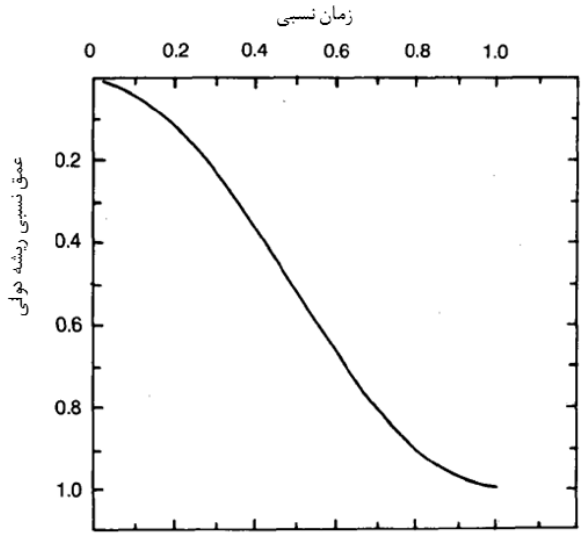
شکل ۶-۱۳. رابطهٔ جریان روبه بالا و عمق سطح ایستابی برای برخی خاک‌ها

۶-۱۳ عمق طراحی جذب آب

برحسب تعریف عمق طراحی جذب آب، عمقی از خاک است که برای تعیین نیازهای آب آبیاری برای اهداف طراحی سیستم آبیاری استفاده می‌شود و برابر عمقی است که تا آن، رطوبت قابل توجهی برای تولید بهینهٔ گیاهان زراعی قابل نگهداری است. عمق طراحی نباید حداکثر عمق ریشه دوانی باشد، بالاخص برای سیستم ریشه های عمودی طولانی، ولی مهم است که این عمق منطبق با عمقی باشد که غالب ریشه های فعال گیاه بتوانند نیازهای تعرق خود را از آن تأمین کنند. این عمق باید براساس داده‌های جذب آب محلی برای گیاهان، تطابق یافته باشد. درصورتی‌که دو یا تعداد بیشتری گونهٔ گیاهی با خصوصیات ریشه دوانی متفاوت با همدیگر کشت شوند، عمق طراحی باید عمق

مربوط به گیاه دارای سیستم ریشه‌ای کم‌عمق‌تر درنظر گرفته شود.

عمق ریشه‌دوانی گیاهان دائمی با وضعیت استقرار خوب، از یک فصل رشد به فصلی دیگر به طور قابل توجهی پایدار است و معمولاً می‌توان آن را ثابت درنظر گرفت؛ با این وجود برای گیاهان یکساله توسعهٔ ریشه به زمان بستگی دارد. یک نمونه از رابطهٔ بین زمان نسبی و عمق ریشه دوانی نسبی برای گیاهان یکساله، در شکل ۶-۱۴ نشان داده شد. زمان نسبی، گذشت جزئی زمان را نسبت به تاریخ کاشت، تا هنگام رسیدن گیاه نشان می‌دهد. عمق دقیق ریشه دوانی در یک مکان و زمان مشخص را می‌توان با ضرب حداکثر عمق ریشه دوانی در زمان رسیدگی (که برای یک مکان خاص مشخص است یا برآورد می‌گردد)، در عمق نسبی ریشه دوانی که از شکل ۶-۱۴ تعیین می‌شود، به‌دست آورد.



شکل ۶-۱۴. تغییر در عمق نسبی ریشه دوانی نسبت به زمان برای گیاهان یک‌ساله

مسائل فصل ششم

۱. کدام‌یک از موارد زیر، جزء وظایف ریشه نیست؟

الف) جذب آب و مواد غذایی　　ب) ذخیره مواد غذایی

ج) کاهش تنش برشی خاک　　د) ساختن ترکیبات آلی گوناگون

۲. کدام‌یک از عبارات زیر صحیح نمی‌باشد:
الف) معمولاً منطقه تقسیم سلولی بالاتر از منطقه مریستمی ریشه قرار دارد.
ب) در ریشه دولپه‌ای‌ها، آخرین لایه استوانه آوندی را دایره محیطیه می‌نامند.
ج) پروتوزایلم اولین جزء تشکیل شده آوند در اندام گیاهی است.
د) با تشکیل متازایلم، پروتوزایلم از بین نمی‌رود.

۳. اجزای آوندی .....
الف) دارای سلول‌های طویل می‌باشند
ب) دارای سلول‌های پهن می‌باشند
ج) دارای انتهای مخروطی می‌باشند
د) دارای سلول‌های نازک می‌باشند

۴. براساس قانون پوازیه حجم جریانی که در واحد زمان از یک لوله موئین عبور می‌کند، متناسب با توان ..... شعاع لوله است.
الف) چهارم ب) سوم
ج) دوم د) یکم

۵. کدام‌یک از گزینه‌های زیر جزء فرضیات قانون پوازیه برای جریان آب در لوله موئین نمی‌باشد؟
الف) جریان آرام است
ب) سرعت در جداره‌های لوله صفر است
ج) جریان آشفته است
د) عدد رینولدز کمتر از ۲۰۰۰ است

۶. از میان مسیرهای مختلف انتقال آب در اندام گیاه، مقاومت اصلی در برابر انتقال آب در ..... می‌باشد.
الف) حفره‌های دیواره سلولی ب) غشاهای سلولی
ج) آوند چوبی د) مسیر آپوپلاستی

۷. مهم‌ترین محدودیت استفاده از معادله پوازیه برای محاسبه افت فشار در آوند کدام است؟
الف) ناتوانی در اندازه‌گیری دقیق شعاع آوند

ب) نبود آگاهی درباره اثرات شرایط رشد بر تغییرات طولی شعاع آوند
ج) نبود آگاهی درباره تعداد آوندهایی که آب را از یک لایه به لایه دیگر در گیاهان زراعی انتقال می‌دهند
د) ناتوانی در به حساب آوردن تبادل آب در طول آوند

۸. مدل تحلیلی حرکت آب به سمت ریشه‌ها، اولین بار توسط چه کسی ارائه شد؟
الف) گاردنر ب) نوبل
ج) دارسی د) پوازیه

۹. کدام‌یک از فرضیات معادله گاردنر نیست:
الف) ریشه‌ها لوله‌های استوانه‌ای بی‌نهایت طولانی هستند
ب) شعاع ریشه‌ها یکنواخت و برابر a است
ج) جذب آب در طول ریشه یکنواخت است
د) شعاع ریشه‌ها متغیر است

۱۰. کدام گزینه صحیح نیست:
الف) تراکم طول ریشه (طول ریشه‌ها در واحد حجم خاک) معمولاً در اطراف سطح خاک بیشترین مقدار را دارد
ب) بیشترین سرعت جذب آب در ناحیه دارای حداکثر تراکم ریشه و تحت مناسب‌ترین شرایط دما و تهویه است.
ج) در زنجیره خاک- گیاه- اتمسفر، آب در جهت شیب نزولی انرژی پتانسیل آب حرکت می‌کند.
د) جذب آب در واحد حجم خاک ارتباطی با تراکم ریشه ندارد.

فصل هفتم

تبخیر و تعرق

اهداف کلی

۱. آشنایی با مفاهیم تبخیر و تعرق، اهمیتشان در گیاه و عوامل مؤثر بر آن‌ها و روش‌های اندازه‌گیری این دو فرایند
۲. تبیین ضریب گیاهی، عوامل مؤثر بر آن و کاربرد این ضریب
۳. مفهوم برنامه‌ریزی آبیاری و روش‌های انجام آن

۷-۱ تبخیر

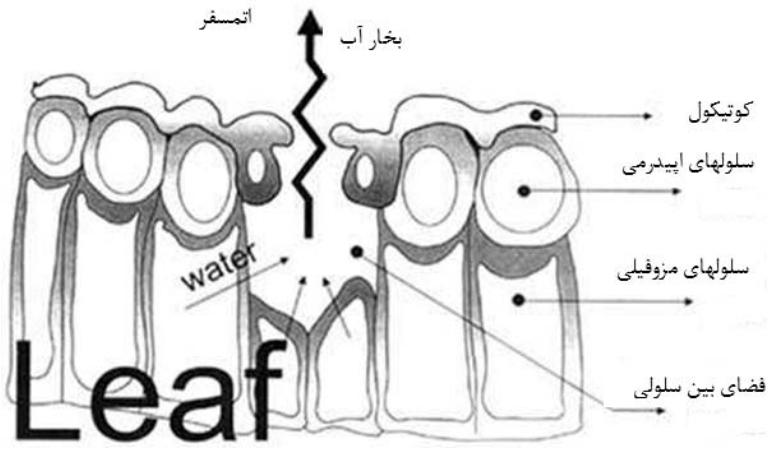
تبخیر فرایندی است که در آن، آب مایع تبدیل به بخار تبدیل شده و از سطح تبخیر کننده خارج می‌گردد. آب از سطوح مختلفی تبخیر می‌شود مانند: دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، خاک‌ها و فضای سبز.

برای تغییر حالت مولکول‌های آب از مایع به بخار، انرژی لازم است. اول تابش مستقیم خورشید و پس از آن درجه حرارت هوای اطراف، به‌عنوان منبع انرژی می‌باشند. عامل حذف کننده‌ی بخار آب از سطح تبخیر کننده، اختلاف فشار بخار بین سطح تبخیر و جو اطراف می‌باشد. با ادامهٔ تبخیر، هوای اطراف به‌تدریج اشباع شده و فرایند تبخیر کند می‌شود و در صورت عدم جابه‌جایی هوای مرطوب، ممکن است متوقف شود. جایگزینی هوای اشباع با هوای خشک‌تر، تا حد زیادی به سرعت باد بستگی دارد. بنابراین، تابش خورشیدی، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد عوامل اقلیمی می‌باشند که باید در زمان ارزیابی فرایند تبخیر مورد توجه قرار گیرند.

درصورتی‌که تبخیر از سطح خاک صورت گیرد، میزان سایه‌اندازی تاج پوشش گیاه و مقدار آب قابل دسترس در سطح تبخیر، عوامل دیگری هستند که بر فرایند تبخیر تأثیر می‌گذارند.

۲-۷ تعرق

تبخیر آب مایع از بافت‌های گیاه را، تعرق می‌گویند. آب موجود در اندام‌های گیاهان، غالباً از طریق روزنه خارج می‌شود. روزنه‌ها، منافذ کوچک موجود در سطح برگ‌ها می‌باشند که گازها و بخار آب از طریق آن‌ها عبور می‌کنند (شکل ۷-۱).



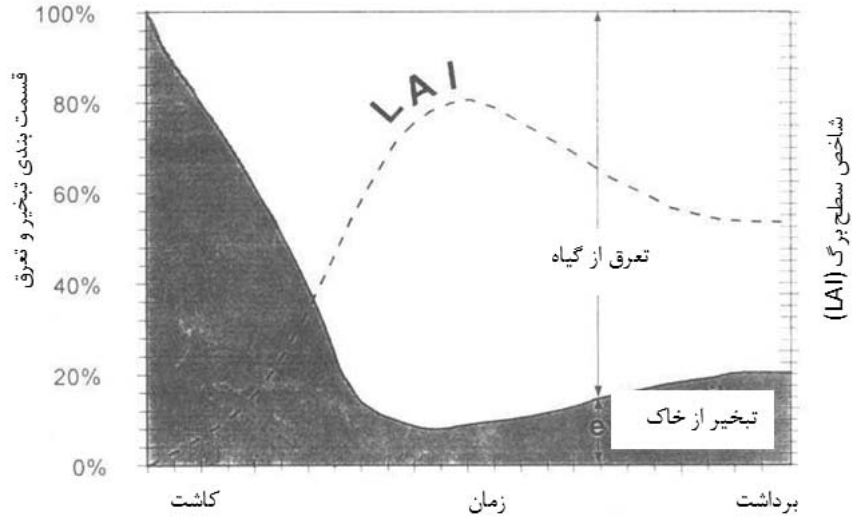
شکل ۷-۱.خروج بخار آب از روزنه‌های برگ

آب همراه با برخی مواد غذایی، توسط ریشه‌ها جذب شده و از طریق گیاه منتقل می‌شود. تقریباً کل آب جذب شده، به‌واسطهٔ تعرق تلف می‌شود و تنها مقدار کمی از آن در داخل گیاه استفاده می‌گردد. تعرق همانند تبخیر به منبع انرژی، گرادیان فشار بخار و باد بستگی دارد. بنابراین؛ تشعشع، دمای هوا، رطوبت هوا و باد باید در زمان ارزیابی تعرق مورد توجه قرار گیرند. همچنین مقدار رطوبت خاک و توانایی خاک در انتقال آب به ریشه‌ها، همانند غرقابی و شوری آب خاک، تعیین کنندهٔ سرعت تعرق می‌باشند. سرعت تعرق تحت‌تأثیر خصوصیات گیاه، عوامل محیط زیستی و عملیات‌های زراعی نیز می‌باشد. گیاهان مختلف ممکن است دارای سرعت تعرق

متفاوتی باشند. نه تنها نوع گیاه بلکه مقدار رشد گیاه، محیط زیست و عوامل مدیریتی نیز باید در زمان ارزیابی تعرق مورد توجه قرار گیرند.

۳-۷ تبخیر و تعرق (ET)

تبخیر و تعرق، به‌صورت همزمان رخ می‌دهند و هر دو ماهیت تبخیری داشته و تفکیک آن‌ها از یکدیگر به‌سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد. به غیر از وجود آب در خاک سطحی، تبخیر از یک خاک تحت کشت عمدتاً تحت تأثیر بخشی از تابش خورشیدی است که به سطح خاک می‌رسد. با رشد بیشتر گیاه و توسعه سطح سایه‌انداز آن، درصد تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین کاهش می‌یابد. زمانی که گیاه کوچک است، آب عمدتاً به‌واسطهٔ تبخیر از سطح خاک تلف می‌شود اما بعد از رشد کامل گیاه، تعرق فرایند غالب خواهد بود. در شکل ۷-۲ سهم تبخیر و تعرق متناظر با سطح برگ، در واحد سطح خاک زیر آن رسم شده است. در زمان کاشت، تقریباً ۱۰۰ درصد تبخیر و تعرق در نتیجهٔ تبخیر می‌باشد درحالی‌که بعد از رشد کامل گیاه، بیش از ۹۰ درصد تبخیر و تعرق در نتیجهٔ تعرق از سطح گیاه می‌باشد.



شکل ۷-۲. سهم تبخیر و تعرق در فرایند تبخیر - تعرق

میزان تبخیر و تعرق، به‌طور معمول به‌صورت عمق آب از دست رفته از سطح تحت کشت بر حسب میلی‌متر در واحد زمان بیان می‌شود. واحد زمان می‌تواند ساعت، روز، دهه، ماه یا حتی کل دورهٔ رشد یا سال باشد. یک هکتار، سطحی معادل ۱۰۰۰۰ متر مربع و یک میلی‌متر، مساوی ۰/۰۰۱ متر می‌باشد. تلفات آب برابر با یک میلی‌متر، معادل اتلاف ۱۰ مترمکعب در هر هکتار است. به عبارت دیگر یک میلی‌متر در روز، معادل ۱۰ متر مکعب بر هکتار در روز است.

عمق آب را می‌توان بر حسب انرژی دریافت شده در واحد سطح نیز بیان کرد. منظور از انرژی، همان گرمای لازم برای تبخیر آب آزاد است. این انرژی که به‌عنوان گرمای نهان بخار (λ) شناخته می‌شود، تابعی از درجه حرارت است. به‌عنوان مثال در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار آن حدود ۲/۴۵ مگاژول بر کیلوگرم است. به عبارت دیگر، ۲/۴۵ مگاژول گرما برای تبخیر یک کیلوگرم یا ۰/۰۰۱ مترمکعب آب مورد نیاز است. بنابراین انرژی ورودی معادل ۲/۴۵ مگاژول بر مترمکعب قادر است ۰/۰۰۱ متر یا یک میلی‌متر آب را بخار نماید، در نتیجه یک میلی‌متر آب معادل ۲/۴۵ مگاژول بر مترمربع است. در جدول ۷-۱، واحدهای مورد استفاده برای بیان سرعت تبخیر و تعرق و ضرایب تبدیل ذکر شدند.

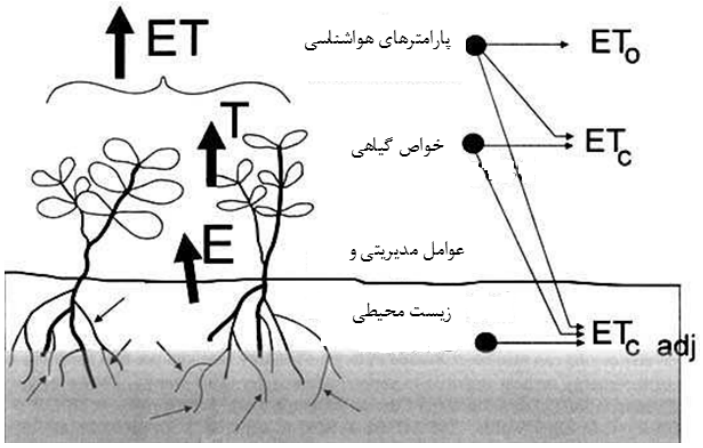
جدول ۷-۱. ضرایب تبدیل برای تبخیر و تعرق (برای آب با دانسیتهٔ ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

	عمق (میلی‌متر بر روز)	حجم در واحد سطح		انرژی در واحد سطح (مگاژول بر متر مربع بر روز)
		لیتر بر ثانیه بر هکتار	مترمکعب بر هکتار بر روز	
۱ میلی‌متر بر روز	۱	۱۰	۰/۱۱۶	۲/۴۵
۱ مترمکعب بر هکتار بر روز	۰/۱	۱	۰/۰۱۲	۰/۲۴۵
۱ لیتر بر ثانیه بر هکتار	۸/۶۴	۸۶/۴	۱۱	۲۱/۱۷
۱ مگاژول بر مترمربع بر روز	۰/۴۰۸	۴/۰۸۲	۰/۰۴۷	۱

۷-۳-۱ عوامل مؤثر بر تبخیر و تعرق

پارامترهای هواشناسی، خصوصیات گیاه، عوامل مدیریتی و عوامل زیست محیطی فاکتورهایی هستند که بر تبخیر و تعرق تأثیر می‌گذارند. این عوامل، به‌طور شماتیک در

شکل ۷-۳ نشان داده شدند.



شکل ۷-۳. عوامل مؤثر بر تبخیر و تعرق

مهم‌ترین پارامترهای هواشناسی مؤثر بر تبخیر و تعرق شامل تشعشع، دمای هوا، رطوبت و سرعت باد می‌باشند. تاکنون روش‌های متعددی برای ارزیابی سرعت تبخیر از این پارامترها توسعه یافته‌اند.

نوع گیاه، واریته و مرحلهٔ رشد، خصوصیاتی هستند که باید در زمان ارزیابی تبخیر و تعرق گیاهان تحت کشت در مزارع وسیع با مدیریت خوب، مورد توجه قرار گیرند. تفاوت در مقاومت گیاهان در برابر تعرق، ارتفاع گیاه، زبری سطح گیاه، انعکاس، پوشش سطح زمین و وضعیت ریشه دوانی گیاه منجر به اختلاف میزان تبخیر و تعرق گونه‌های مختلف گیاهان تحت شرایط محیط زیستی مشابه می‌شوند. تبخیر و تعرق استاندارد (ET_c)، به تقاضای تبخیری از گیاهانی گفته می‌شود که در مزارع وسیع و تحت شرایط بهینهٔ رطوبت خاک، شرایط مدیریتی و محیط زیستی عالی و تولید کامل تحت شرایط اقلیمی یکسان می‌رویند.

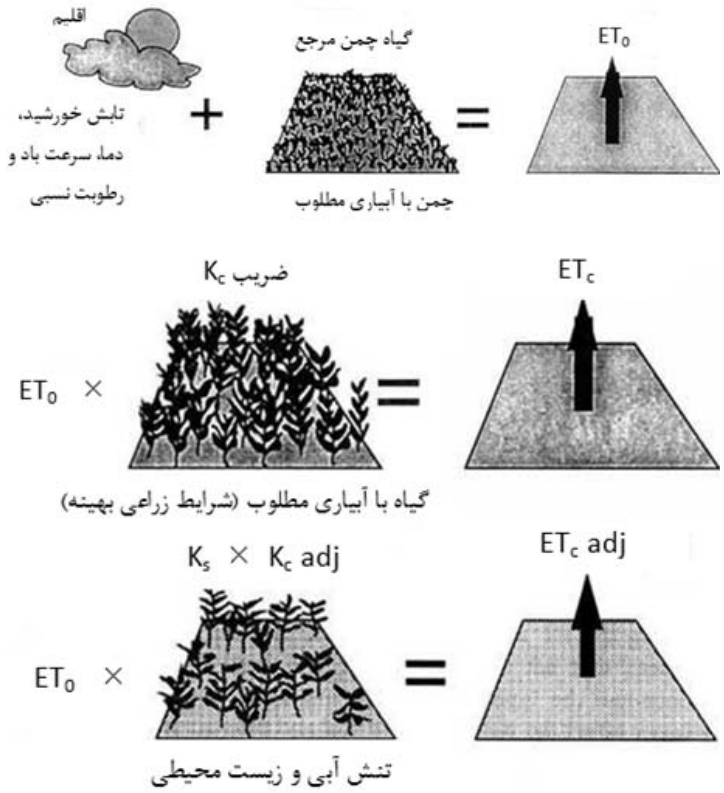
عواملی مانند شوری خاک، حاصلخیزی کم زمین، مصرف محدود کودها، وجود لایه‌های خاک سخت یا نفوذناپذیر، عدم کنترل بیماری‌ها و آفات و مدیریت ضعیف خاک ممکن است رشد گیاه را محدود نموده و تبخیر و تعرق را کاهش دهد. عوامل

دیگری که باید در زمان ارزیابی تبخیر و تعرق مورد بررسی قرار گیرند، شامل پوشش سطح زمین، تراکم گیاه و رطوبت خاک است. اثر رطوبت خاک بر تبخیر و تعرق، عمدتاً مشروط به میزان کمبود آب و نوع خاک است. به عبارت دیگر، آب خیلی زیاد منجر به غرقابی می‌شود که سبب صدمه دیدن ریشه و محدود شدن جذب آب توسط ریشه از طریق ممانعت از تنفس می‌شود. عوامل مدیریتی دیگری که باید مورد توجه قرار گیرند، شامل عملیات‌های کشت و روش آبیاری می‌باشند که می‌توانند میکرواقلیم را تغییر داده و خصوصیات گیاه و خیس شدگی سطح خاک و گیاه را تحت تأثیر قرار دهند. یک بادشکن، سرعت باد را کاهش داده و میزان تبخیر و تعرق آن سمت مانع را کم می‌کند. این اثر به‌ویژه در روزهای بادی، گرم و خشک می‌تواند قابل توجه باشد. به‌منظور کاهش تبخیر از سطح خاک در باغ‌های جوان که فاصلهٔ درختان از یکدیگر زیاد است، می‌توان از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای مناسب بهره گرفت. استفاده از مالچ‌ها، به‌ویژه زمانی که گیاه کوچک است، روشی دیگر برای کاهش تبخیر از سطح خاک است. استفاده از ضد تعرق‌ها، تلفات آب از گیاه و در نتیجه سرعت تعرق را کم می‌کنند.

درصورتی‌که شرایط مزرعه‌ای با شرایط استاندارد تفاوت داشته باشد، اصلاح ET_c نیازمند لحاظ نمودن ضرایب اصلاحی است. این ضرایب، اثر شرایط مدیریتی و محیط زیستی مزرعه بر تبخیر و تعرق گیاه را منعکس می‌کنند.

۷-۳-۲ مفاهیم تبخیر و تعرق

تفاوت‌هایی بین تبخیر و تعرق مرجع (ET_0)، تبخیر و تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد (ET_c) و تبخیر و تعرق گیاه تحت شرایط غیر استاندارد (ET_c adj) (شکل ۷-۴) وجود دارد. ET_0 یک پارامتر اقلیمی است که بیان کنندهٔ قدرت تبخیری اتمسفر است. ET_c دلالت بر تبخیر و تعرق از یک مزرعه تحت مدیریت خوب و آبیاری کامل که منجر به بیشترین عملکرد در شرایط اقلیمی مشخص می‌شود، دارد. به‌دلیل محدودیت‌های مدیریتی و محیط زیستی که بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارند و تبخیر و تعرق را محدود می‌کنند، ET_c تحت شرایط غیراستاندارد عموماً نیاز به اصلاح دارد.



شکل ۷-۴. تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0)، تبخیر و تعرق گیاه تحت شرایط غیراستاندارد (ET_c) و تبخیر و تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد (ET_c adj)

میزان تبخیر و تعرق از یک سطح مرجع، بدون کمبود آب، تبخیر و تعرق گیاه مرجع یا تبخیر و تعرق مرجع نام دارد که با ET_0 نشان داده می‌شود. سطح مرجع یک گیاه مرجع، چمن فرضی با خصوصیات خاص می‌باشد.

مفهوم تبخیر و تعرق مرجع، برای مطالعهٔ تقاضای تبخیری اتمسفر بدون توجه به نوع گیاه، میزان توسعهٔ گیاه و عملیات‌های مدیریتی معرفی گردید. درصورتی‌که آب در سطح تبخیر و تعرق کنندهٔ مرجع به وفور موجود باشد، عوامل خاک بر تبخیر و تعرق تأثیری ندارند. تبخیر و تعرق مربوط به یک سطح مشخص، مرجعی را تعیین می‌کند که تبخیر و تعرق از سطوح دیگر را می‌توان با آن مرتبط نمود.

تنها عوامل مؤثر بر تبخیر و تعرق مرجع، پارامترهای اقلیمی هستند. در نتیجه، ET_0 یک پارامتر اقلیمی است و می‌تواند با استفاده از داده‌های هواشناسی محاسبه گردد . ET_0 بیان کنندهٔ توان تبخیری اتمسفر در یک مکان خاص و در زمان مشخصی از سال است و عوامل گیاه و خاک در آن لحاظ نمی‌شود.

تبخیر و تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد که با ET_c نشان داده می‌شود، بیانگر تبخیر و تعرق از پوشش گیاهی سالم و خوب کوددهی شده‌ای است که در مزارع وسیع و تحت شرایط بهینهٔ رطوبت خاک رشد می‌کنند و تحت شرایط اقلیمی مشخص حداکثر عملکرد را دارند.

مقدار آب مورد نیاز برای جبران تلفات تبخیر و تعرق از مزرعهٔ تحت کشت را، نیاز آبی گیاه می‌گویند. اگرچه تبخیر و تعرق گیاه و نیاز آبی گیاه یکسانند، نیاز آبی گیاه دلالت بر مقدار آبی دارد که باید تأمین گردد درحالی‌که تبخیر و تعرق گیاه، نشان دهندهٔ مقدار آبی است که به‌واسطه تبخیر و تعرق تلف می‌شود. نیاز آب آبیاری، اساساً نشان دهندهٔ تفاوت بین نیاز آبی گیاه و بارش مؤثر است. همچنین نیاز آب آبیاری شامل آب اضافی برای شستشوی نمک‌ها و جبران غیریکنواختی پخش آب است. تبخیر و تعرق گیاه در شرایط استاندارد (ET_c) برابر حاصلضرب ضریب گیاهی در تبخیر و تعرق گیاه مرجع می‌باشد .($ET_c=K_c.ET_0$)

وجود تفاوت‌هایی در آناتومی برگ، خصوصیات روزنه‌ای، ویژگی‌های آئرودینامیک و حتی آلبیدو سبب می‌شود که تحت شرایط اقلیمی مشابه، تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) با تبخیر و تعرق گیاه (ET_c) فرق داشته باشد. به‌دلیل تغییر ویژگی‌های گیاه در طول فصل رشد، ضریب گیاهی یک گیاه از زمان کاشت تا هنگام برداشت تغییر خواهد کرد.

تبخیر و تعرق گیاه تحت شرایط غیراستاندارد (ET_c adj)، تبخیر و تعرق گیاهان کشت شده تحت شرایط محیطی و مدیریتی است که با شرایط استاندارد متفاوت است. در زمان کشت گیاهان در مزرعه، تبخیر و تعرق واقعی گیاه در مزرعه ممکن است به‌دلیل شرایط غیر بهینه مانند وجود آفات و بیماری‌ها، شوری خاک، حاصلخیزی کم خاک، کمبود آب یا غرقابی، با ET_c فرق داشته باشد. این امر ممکن است منجر به رشد کم گیاه، تراکم کم گیاه و کاهش تبخیر و تعرق نسبت به ET_c شود.

تبخیر و تعرق گیاه تحت شرایط غیراستاندارد، با استفاده از ضریب تنش آبی (K_s) و یا به‌وسیله تصحیح K_c، برای کلیهٔ تنش‌ها و محدودیت‌های محیطی مؤثر بر تبخیر و تعرق گیاه محاسبه می‌شود.

۷-۳-۳ تعیین تبخیر و تعرق

منظور از تعیین تبخیر و تعرق، برآورد مقدار آبی است که باید به یک پوشش زراعی داده شود تا در طول دورهٔ رویش، صرف تبخیر و تعرق نموده و بدون آنکه با تنش آبی مواجه شود رشد خود را تکمیل و حداکثر مقدار محصول را تولید نماید. روش‌های مورد استفاده برای تخمین تبخیر و تعرق، در دو گروه کلی روش‌های مستقیم و روش‌های غیر مستقیم یا محاسبه‌ای قرار می‌گیرند. در روش‌های مستقیم، بخش کوچک و کنترل شده‌ای از مزرعه را مجزا نموده و مقدار تبخیر و تعرق در یک دوره زمانی به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. در روش‌های محاسبه‌ای، از عوامل مختلف اقلیمی و گیاهی استفاده شده و از روی ارتباط آن‌ها با تبخیر و تعرق و معادله‌هایی که قبلاً با روش‌های مستقیم واسنجی شده اند، تبخیر و تعرق پوشش گیاهی مورد نظر تخمین زده می‌شود.

اندازه‌گیری مستقیم ET دشوار، وقت‌گیر و نیازمند تجهیزات قابل‌توجهی است. بنابراین غالباً از اندازه‌گیری عوامل اقلیمی برای برآورد ET بر اساس معادله یا مدلی که عوامل اقلیمی و میزان تبخیر و تعرق را مرتبط می‌کند، بهره گرفته می‌شود. مدل‌های ET معمولاً تبخیر و تعرق پتانسیل یک گیاه مرجع مانند چمن یا یونجه را برآورد می‌کنند. ضرایب تبدیل موسوم به ضرایب گیاهی، برای مرتبط کردن تبخیر و تعرق گیاه مرجع با تبخیر و تعرق گیاه واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برخی مدل‌های تبخیر و تعرق مانند طشتک تبخیر و روش بلانی کریدل اصلاح شده، عوامل اقلیمی را مستقیماً به تبخیر و تعرق گیاه واقعی ربط می‌دهند. در این موارد نیز، ضرایب گیاهی برای تعدیل مراحل توسعهٔ گیاه مورد نیاز می‌باشند زیرا میزان تعرق گیاه ارتباط مستقیمی با سطح سایه‌انداز آن دارد. با افزایش سطح سایه انداز، ضرایب گیاهی باید افزایش یابند.

در شرایط کمبود رطوبت خاک، گیاه قادر به جذب آب کافی برای تأمین نیاز تبخیر و تعرق خود نمی‌باشد و در اصطلاح تحت تنش قرار می‌گیرد. زمانی‌که گیاهان تحت تنش کمبود رطوبت خاک قرار می‌گیرند، میزان تبخیر و تعرق واقعی گیاه (ET_a) کمتر از میزان تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_m) آن و عملکرد واقعی گیاه (Y_a) کمتر از حداکثر عملکرد (Y_m) خواهد بود. رابطهٔ تبخیر و تعرق–عملکرد، در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

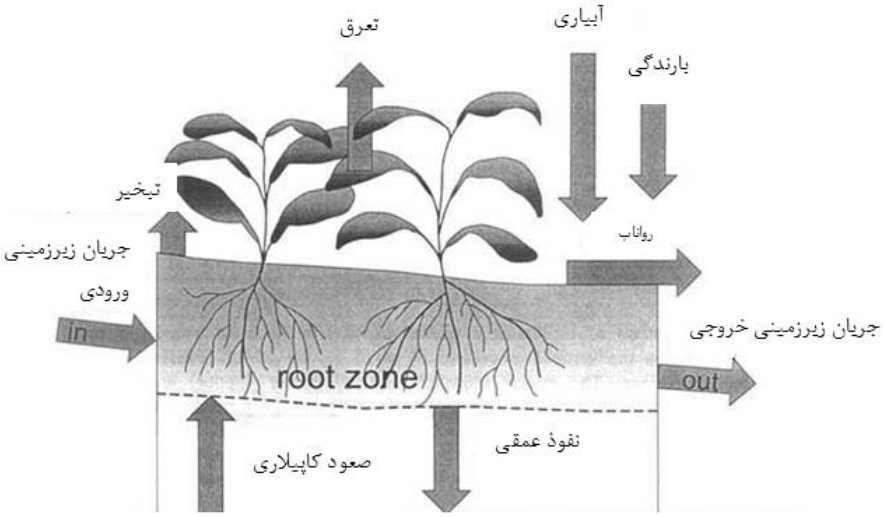
۷-۳-۴ روش‌های مستقیم تعیین تبخیر و تعرق

متداول‌ترین روش مستقیم تعیین تبخیر و تعرق، استفاده از اصل بیلان جرمی در یک حجم کنترل شده از خاک است. در این روش، مقدار آب ورودی و خروجی به ناحیهٔ ریشهٔ گیاه در یک دوره زمانی خاص اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۷-۵). آبیاری (I) و بارندگی (P)، سبب اضافه شدن آب به ناحیهٔ ریشه می‌گردند. بخشی از آب آبیاری یا بارندگی ممکن است از طریق رواناب (RO) و نفوذ عمقی (DP) تلف شود. همچنین ممکن است به‌واسطه صعود موئینگی (CR)، مقداری آب از سطح ایستابی کم عمق به طرف ناحیهٔ ریشه حرکت نماید یا از طریق جریان زیرسطحی به‌طور افقی وارد ناحیهٔ ریشه شود (SF_{in}) یا خارج گردد (SF_{out}). در بیشتر مواقع، به استثنای برخی موارد خاص، SF_{in} و SF_{out} بسیار کم و قابل چشم‌پوشی می‌باشند. تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه، سبب تخلیهٔ آب از ناحیهٔ ریشه می‌شوند. درصورتی‌که کلیهٔ جریان‌ها به غیر از تبخیر و تعرق (ET) قابل اندازه‌گیری باشند، مقدار تبخیر و تعرق در بازه زمانی مورد نظر را می‌توان با استفاده از رابطهٔ زیر تعیین نمود:

$$ET=I+P-RO-DP+CR\pm\Delta SF\pm\Delta SW \qquad (۱-۷)$$

که ΔSW؛ تغییرات رطوبت خاک ناحیهٔ ریشه در بازهٔ مورد نظر می‌باشد.

اندازه‌گیری پارامترهایی مانند جریان زیرزمینی، نفوذ عمقی و صعود موئینگی مشکل بوده و برای فواصل زمانی کوتاه‌مدت، قابل چشم‌پوشی کردن است. روش بیلان آب خاک، معمولاً برای برآورد تبخیر و تعرق مربوط به دوره‌های یک هفته‌ای یا ده روزه قابل استفاده است.



شکل ۷-۵. بیلان آب خاک ناحیه ریشه

در معادلهٔ فوق، الزاماً نباید برای هر کدام از عناصر، عدد مشخصی وجود داشته باشد و در صورت عدم وجود برخی از پارامترها، به‌جای آن‌ها صفر منظور می‌گردد. معادلهٔ فوق را می‌توان در مقیاس بزرگ و در سطح مزرعه نیز به‌کار برد. برای این منظور، رطوبت خاک در ابتدا و انتهای دوره زمانی معینی اندازه‌گیری و مقادیر آب ورودی و خروجی از زمین نیز اندازه‌گیری و از روی آن‌ها و با استفاده از معادلهٔ فوق، تبخیر و تعرق تخمین زده می‌شود.

در مقیاس کوچک، ساده‌ترین وسیله لایسیمتر است. با ایزوله کردن محیط ریشه از محیط اطراف و کنترل فرایندهایی که اندازه‌گیری آن‌ها مشکل است، اجزاء مختلف معادلهٔ بیلان آب خاک را می‌توان با دقت بیشتری برآورد نمود. در لایسیمترهای دقیق وزنی که تغییرات رطوبت به‌طور مستقیم از روی تغییرات جرم اندازه‌گیری می‌شود، می‌توان تبخیر و تعرق را حتی برای دوره‌های زمانی کوچک مانند ساعت، با دقت قابل توجهی اندازه‌گیری کرد. در لایسیمترهای حجمی، تبخیر و تعرق دورهٔ مورد نظر را می‌توان با کسر زه آب جمع شده در ته لایسیمتر از کل آب ورودی تعیین نمود.

برای اینکه نتایج لایسیمترها قابل اعتماد باشند، لازم است که پوشش گیاهی درون لایسیمتر و فضای اطراف چسبیده به آن کاملاً مشابه درنظر گرفته شوند (ارتفاع و شاخص سطح برگ مشابه). در غیراین‌صورت نتایج حاصله با خطا همراه خواهد بود. با توجه به اینکه اجرای لایسیمترها گران و مشکل است و بهره برداری و نگهداری از آن‌ها نیز نیاز به مراقبت ویژه‌ای دارد، استفاده از آن‌ها محدود به اهداف تحقیقاتی خاص می‌باشد.

۷-۳-۵ روش‌های محاسباتی تعیین تبخیر و تعرق گیاه

تبخیر و تعرق واقعی گیاه، علاوه بر عوامل اقلیمی به عوامل خاک و گیاه مانند میزان پوشش سطح زمین، خصوصیات برگ و زبری سطح سایه انداز گیاه بستگی دارد. عوامل گیاهی، به‌وسیله ضرایب گیاهی توصیف می‌شوند که در طول فصل رشد و مطابق با مدل مورد استفاده برای برآورد ET تغییر می‌کنند.

در مشاهدات اقلیمی، برآورد تبخیر و تعرق واقعی یک گیاه در حال رشد نیازمند تبخیر و تعرق گیاه مرجع و ضرایب خاص گیاهی می‌باشد. تبخیر و تعرق یک گیاه خاص با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$ET_c=(\text{تبخیر و تعرق گیاه مرجع})(\text{ضریب گیاهی خاص}) \qquad (۲-۷)$$

$$ET_c=(ET_0)(K_c) \qquad (۳-۷)$$

$$ET_c=(E_{pan})(K_p) \qquad (۴-۷)$$

$$ET_c=(ET_p)(C_{et}) \qquad (۵-۷)$$

در این روابط؛ ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع (چمن با ارتفاع ۴ تا ۷ اینچ)، ET_p تبخیر و تعرق پتانسیل، E_{pan} تبخیر از طشتک تبخیر کلاس A، ET_c تبخیر و تعرق یک گیاه خاص، K_{pan} ضریب تبدیل E_{pan} به ET_0، K_p ضریب تبدیل E_{pan} به ET_c، K_c ضریب تبدیل ET_0 به ET_c و C_{et} ضریب تبدیل ET_p به ET_c می‌باشند.

معادلات متعددی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع وجود دارد. دو گیاه مرجع مورد استفاده برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه، چمن و یونجه می‌باشند. چمن،

گیاه مرجعی است که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در استفاده از روش‌ها و ضرایب باید دقت شود تا اشتباهی صورت نگیرد. انتخاب روش مورد استفاده، به اطلاعات موجود بستگی دارد. با این وجود، تبدیل از یک مبنای مرجع به دیگری با استفاده از فاکتور عمومی (general factor) انجام می‌شود. درصورتی‌که فاکتورهای تبدیل محلی موجود باشند، باید از آن‌ها بهره گرفت. درصورت عدم وجود این فاکتورها، می‌توان از مقادیر ارائه شده در جدول ۷-۱ استفاده کرد.

جدول ۷-۱. ضرایب کلی برای تبدیل از یک روش برآورد تبخیر و تعرق گیاه به روشی دیگر

Evapotranspiration			Coefficients		
To ET_o			*To K_c*		
ET_o	=	$(E_{pan})(K_{pan})$	K_c	=	K_p/K_{pan}
	=	$(E_{pan})(0.75)$		=	$(K_p)(1.33)$
	=	$(ET_p)(0.87)$		=	$(C_{et})(1.15)$
To Et_p			*To C_{et}*		
ET_p	=	$(ET_o)(1.15)$	C_{et}	=	$(ET_o)(0.87)$
	=	$(E_{pan})(1.08)$		=	$(K_p)(0.93)$
To E_{pan}			*To K_p*		
E_{pan}	=	ET_o/K_{pan}	K_p	=	$(K_c)(K_{pan})$
	=	$(ET_o)(1.33)$		=	$(K_c)(0.75)$
	=	$(ET_p)(0.93)$		=	$(C_{et})(1.08)$

معمولاً انتخاب یک روش برای برآورد تبخیر و تعرق، برمبنای نوع داده‌های اقلیمی موجود و میزان دقت مورد نیاز برای تعیین آب مصرفی گیاه صورت می‌گیرد. معمولاً فرایندهایی که در آن‌ها پارامترهای اقلیمی زیاد استفاده می‌شود، پیش بینی‌های دقیق تری ارائه می‌دهند.

هر کدام از روش‌هایی که برای محاسبهٔ ET_0 پیشنهاد شده‌اند، از نظر داده‌های مورد لزوم نیازهای متفاوتی دارند. در برخی از آن‌ها لازم است آمار درجه حرارت روزانه وجود داشته باشد، حال آنکه برای تعدادی از روش‌ها داشتن آمار ماهانهٔ هواشناسی کفایت می‌کند. برخی از روش‌ها، علاوه بر دما به آمار رطوبت نسبی و

سرعت باد نیز نیاز دارند و برای برخی دیگر از روش‌ها، باید آمار تابش خورشید یا ساعات آفتابی روز هم وجود داشته باشد. به‌طور خلاصه تعدادی از روش‌ها اساس فیزیکی دارند و تعدادی فقط از روی تجربه به‌دست آمده‌اند. این روش‌ها را کلاً می‌توان در ۴ گروه تقسیم‌بندی نمود که عبارتند از:

۱. روش‌های موسوم به آئرودینامیک
۲. روش‌های موسوم به توازن انرژی
۳. روش‌هایی که از ترکیب دو روش فوق حاصل شده و به نام روش‌های ترکیبی معروفند.
۴. روش‌های تجربی

پس از آنکه ET_0 با یکی از روش‌های فوق محاسبه گردید، لازم است برای هر دوره‌ای که ET_0 محاسبه شده است ضریب گیاهی K_c نیز برآورد شده و با ضرب کردن آن‌ها در یکدیگر، تبخیر و تعرق گیاه مورد نظر به‌دست آید.

۱. روش‌های آئرودینامیک

می‌دانیم که آب از سطح مرطوب خاک و گیاه، با عمل پخشیدگی مولکولی وارد لایهٔ بسیار نازک هوایی می‌شود که چسبیده به این سطوح است. در خارج از این لایه، عدم یکنواختی در آئرودینامیک سطوح و اختلاف گرما در نقاط مختلف باعث می‌شود که مولکول‌های آب به‌جای پخشیدگی مولکولی، به‌صورت پخشیدگی متلاطم جابه‌جا شوند. به‌عبارت دیگر، مولکول‌های آب ابتدا از روزنه‌ها با عمل پخشیدگی مولکولی وارد لایهٔ نازک هوای مجاور سطح برگ شده و سپس با عمل پخشیدگی متلاطم وارد هوای بالاتر می‌گردد. در این صورت جریان بخار آب از برگ به هوا، بستگی به سرعت باد و اختلاف فشار بخار لایهٔ هوای چسبیده به برگ و هوای اطراف دارد.

ساده‌ترین فرمول برای محاسبهٔ ET_0، با روش آئرودینامیک به‌صورت زیر می‌باشد که در آن سرعت باد و دانسیتهٔ بخار آب در دو ارتفاع مختلف در بالای سطح گیاه اندازه‌گیری می‌شود.

$$ET_0 = c\frac{K^2(U_2 - U_1)(\rho V_1 - \rho V_2)}{\ln(\frac{Z_1}{Z_2})} \qquad (۶-۷)$$

در رابطهٔ فوق؛ K ضریب فون کارمن[1]، U_1 و U_2 سرعت متوسط باد در ارتفاع‌های Z_1 و Z_2، ρV_1 و ρV_2 چگالی بخار آب در ارتفاع‌های Z_1 و Z_2، و c ضریب اصلاحی می‌باشد. معادلهٔ فوق همانند سایر معادله‌های آئرودینامیک، فقط در شرایط تحقیقاتی قابل استفاده می‌باشد زیرا اولاً اندازه‌گیری سرعت باد و دانسیتهٔ بخار آب باید با دقت صورت گیرد که کاری بسیار مشکل است، ثانیاً نیاز به دستگاه‌هایی دارد که هزینهٔ آن‌ها زیاد است و ثالثاً برای کاربرد این دستگاه‌ها نیاز به افراد ماهر و کارآزموده است.

۲. روش‌های توازن انرژی

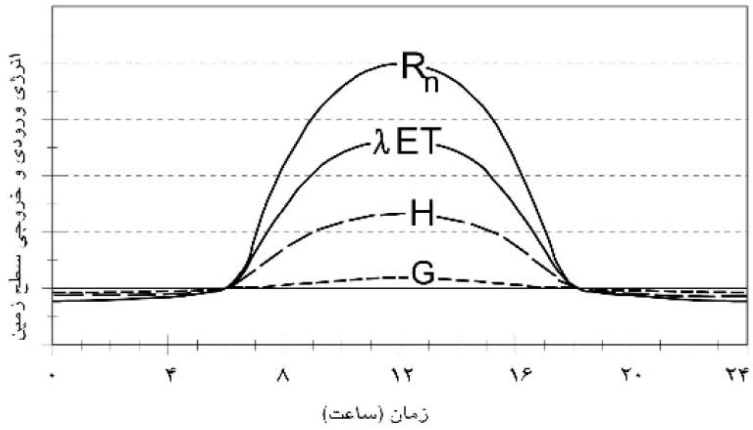
تبخیر آب، مستلزم صرف انرژی نسبتاً زیادی به‌صورت گرمای محسوس یا انرژی تابشی است. بنابراین فرایند تبخیر و تعرق، به‌واسطه تبادل انرژی در سطح پوشش گیاهی کنترل می‌شود و عامل محدود کنندهٔ آن، مقدار انرژی موجود می‌باشد. به‌دلیل این محدودیت، پیش‌بینی میزان تبخیر و تعرق با استفاده از اصل بقاء انرژی امکان‌پذیر می‌باشد. برای یک دوره زمانی خاص، مقدار انرژی ورودی در یک سطح باید برابر مقدار انرژی خروجی از آن سطح باشد.

برای اشتقاق معادلهٔ بیلان انرژی، کلیهٔ جریان‌های انرژی باید مورد توجه قرار گیرند. برای یک سطح تبخیر کننده، این معادله به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$Rn-G-\lambda ET-H=۰ \qquad (۷-۷)$$

در این رابطه؛ R_n تابش خالص، H گرمای محسوس، G شار گرمای خاک و λET گرمای نهان بخار می‌باشد. اجزاء مختلف این معادله، می‌توانند مثبت یا منفی باشندRn . مثبت نشان‌دهندهٔ ورود انرژی به سطح مورد نظر و مثبت بودن G، λET و H نشان‌دهندهٔ خروج انرژی از سطح مورد نظر می‌باشند (شکل ۷-۶).

1. Von Karman



شکل ۷-۶. تغییر اجزای موازنهٔ انرژی در بالای یک سطح در حال تعرق دارای آب کافی در یک روز صاف

در معادلهٔ فوق، تنها جریان‌های عمودی در نظر گرفته شدند و از جابه‌جایی افقی انرژی گرمایی یا پدیدهٔ همرفت (advection) صرفنظر شده است. بنابراین این معادله باید تنها برای سطوح بزرگ و وسیع دارای پوشش گیاهی یکنواخت به‌کار برده شود. این معادله به ۴ مؤلفه محدود شده است: R_n، λET، H و G. سایر اجزاء انرژی مانند گرمای ذخیره یا آزاد شده در گیاه یا انرژی مورد استفاده در فعالیت‌های متابولیکی، در نظر گرفته نشدند. این انرژی‌ها، تنها بخش کوچکی از تابش خالص روزانه می‌باشند و در مقایسه با ۴ مؤلفهٔ دیگر، قابل صرفنظر می‌باشند.

شار گرمای نهان (λET) که نشان‌دهندهٔ جزء تبخیر و تعرق است می‌تواند در صورت معلوم بودن سایر اجزاء، از طریق رابطهٔ بیلان انرژی تعیین شود. تابش خالص و شار گرمای خاک را می‌توان با استفاده از پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری یا برآورد کرد. با این حال، اندازه‌گیری گرمای محسوس، اغلب پیچیده می‌باشد. برای تعیین گرمای محسوس، اندازه‌گیری دقیق شیب دمای هوای بالای سطح مورد نیاز است.

۳. روش‌های ترکیبی

پنمن[1] دانشمند انگلیسی (۱۹۴۸) از ترکیب روش‌های آئرودینامیک و توازن انرژی،

1. Penman

روشی را برای محاسبهٔ تبخیر و تعرق ارائه نمود که به روش ترکیبی یا معادلهٔ پنمن معروف شد. معادله پنمن در ابتدا برای محاسبهٔ تبخیر از سطح آزاد آب ارائه گردید و سپس برای محاسبهٔ شدت تبخیر و تعرق از یک سطح کامل پوشیده از چمن، مورد استفاده قرار گرفت.

مزیت روش پنمن در این است که معادلهٔ ارائه شده، مبنای فیزیکی داشته و در آن اندازه‌گیری دما و فشار بخار آب در لایهٔ هوای چسبیده به برگ حذف شده است. در معادلهٔ پنمن نیز نیاز است که تابش خالص محاسبه گردد. برای محاسبهٔ تابش خالص نیز، معادله‌هایی توسط افراد مختلف ارائه شده است. این معادله‌ها چون همگی از فرمول پنمن مشتق گردیده‌اند، همراه با نام پنمن نام این افراد نیز ذکر می‌شود، مانند معادلات پنمن فائو[1]، پنمن رایت[2] و غیره.

معادلهٔ پنمن فائو که توسط متخصصان سازمان فائو ارائه گردید، هنوز هم به‌عنوان یکی از معادلات کاربردی در محاسبات تبخیر و تعرق مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی از آنجا که در این معادله فرض بر آن است که تبخیر و تعرق فقط تحت کنترل عوامل آب و هوایی قرار دارد و نقش خود گیاه در آن در نظر گرفته نشده است، لذا به‌تدریج اهمیت خود را از دست داد و معادلات دیگری جای آن را گرفتند. از جملهٔ این معادله‌ها، می‌توان معادلهٔ فائو- پنمن- مونتیت[3] را که در حال حاضر کاربرد بیشتری دارد ذکر نمود و که ما نیز در اینجا نظر به اهمیتی که دارد به شرح آن می‌پردازیم.

این روش، تقریباً معتبرترین و دقیق‌ترین فرمولی است که تاکنون برای تخمین ET_0 ارائه شده است. در این روش، گیاه مرجع یک پوشش چمن فرضی است که ارتفاع آن ۱۲ سانتی‌متر و ضریب بازتاب تابش در آن ۲۳ درصد است (در گیاه چمن واقعی این مقدار ۲۵ درصد می‌باشد) مقاومت آئرودینامیکی که در این روش لحاظ گردیده است، از دو مؤلفهٔ زبری سطح گیاه و مقاومت مربوط به خروج بخار آب از روزنه‌های برگ به هوای خارج تشکیل می‌شود. در واقع در معادلهٔ فائو پنمن مونتیت سطح پوشش گیاهی برخلاف روش پنمن که سطح آب در نظر گرفته می‌شد، یک سطح مرطوب است. به عبارت دیگر در این روش فرض می‌شود که کل سطح پوشش

1. Penman-FAO
2. Penman-Wright
3. FAO-Penman-Monteith

گیاهی، یک برگ بزرگ با روزنه‌های موجود در آن است. به‌همین دلیل روش فائو پنمن مونتیت را روش برگ بزرگ (big leaf) هم می‌گویند. مقاومت روزنه‌ها در برابر خروج آب در روش فائو پنمن مونتیت از ۳۰ s/m برای گیاهان مناطق خشک تا ۱۵۰ s/m متغیر است که در مورد گیاه مورد مطالعه، این عدد ۷۰ s/m فرض می‌گردد. شکل اصلی معادله به‌صورت زیر است:

$$ET_0 = \frac{۰٫۴۰۸\Delta(R_n - G) + \gamma[۸۹۰/(T + ۲۷۳)]u_۲(e_u - e_d)}{\Delta + \gamma(۱ + ۰٫۳۴u_۲)} \qquad (۸-۷)$$

که در آن:

ET_0 = تبخیر ـ تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز)

R_n = تابش خالص در سطح پوشش گیاهی $(MJm^{-۲}d^{-۱})$

T = دمای متوسط هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین (درجه سانتی‌گراد)

$u_۲$ = سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)

ea-ed = کمبود فشار بخار هوا در ارتفاع ۲ متری (کیلوپاسکال)

Δ = شیب منحنی فشار بخار $(KPa^{\cdot}C^{-۱})$

γ = ضریب رطوبتی $(KPa^{\cdot}C^{-۱})$

G = شار گرما به داخل خاک $(MJm^{-۲}d^{-۱})$

هر یک از اجزاء فرمول فائو پنمن ـ مونتیت به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta = \frac{۲۵۰۴.\exp[^{۱۷٫۲۷}/_{(T + ۲۳۷٫۳)}]}{(T + ۲۳۷٫۳)^۲} \qquad (۹-۷)$$

$$\gamma = ۲٫۵۰۱ - (۲٫۳۶۱ \times ۱۰^{-۳})T \qquad (۱۰-۷)$$

$$\gamma = ۰٫۰۰۱۶۳ \frac{P}{\lambda} \qquad (۱۱-۷)$$

که در آن: P فشار هوا (بر حسب کیلوپاسکال) و λ گرمای نهان تبخیر (بر حسب مگاژول بر کیلوگرم) است. اگر ارتفاع محل از سطح دریا مشخص باشد، P به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$P = ۱۰۱٫۳(\frac{۲۹۳ - ۰٫۰۰۶۵Z}{۲۹۳})^{۵٫۲۶} \quad (۱۲-۷)$$

که در آن؛ Z ارتفاع نقطه از سطح دریا (m) است. به‌عنوان مثال برای هوای با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد در محلی که ارتفاع آن از سطح دریا ۹۸۰ متر می‌باشد، مقدار γ برابر ۰٫۰۶ به‌دست می‌آید. مقدار فشار بخار اشباع با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد:

$$e_a = e(T) = ۰٫۶۱۱\exp(\frac{۱۷٫۲۷T}{T + ۲۳۷٫۳}) \quad (۱۳-۷)$$

که e(a) فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال) در هر دما می‌باشد. در یک دورهٔ ۲۴ ساعتهٔ شبانه‌روز مقدار e_a به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$e_a = [e(T_{max}) + e(T_{min})]/۲ \quad (۱۴-۷)$$

که $e(T_{max})$ و $e(T_{min})$ به ترتیب فشار بخار اشباع به ازای دماهای حداکثر و حداقل می‌باشد.

فشار بخار اشباع در نقطهٔ شبنم، به‌عنوان فشار بخار واقعی (e_d) یا فشار بخار روزانه تعریف می‌شود و چنانچه دمای نقطهٔ شبنم در اختیار باشد رابطه زیر بهترین برآورد را خواهد داشت:

$$e_a = e(T_d) = ۰٫۶۱۱\exp(\frac{۱۷٫۲۷T_d}{T_d + ۲۳۷٫۳}) \quad (۱۵-۷)$$

اما اگر تنها متوسط رطوبت نسبی (RH) در اختیار باشد، می‌توان فشار بخار واقعی را از رابطهٔ زیر محاسبه نمود:

$$e_d = (RH/۱۰۰)e_a \quad (۱۶-۷)$$

مثلاً چنانچه متوسط دمای هوا ۲۰ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد باشد، e_d برابر ۱٫۱۷ به‌دست می‌آید. در اینجا نیز برای انجام محاسبات در طول یک دورهٔ ۲۴ ساعتهٔ شبانه‌روز، چنانچه داده‌های رطوبت نسبی ماکزیمم (RH_{max}) و مینیمم

(RH_{min}) در اختیار باشد، باید میانگین فشار بخار واقعی در دماهای T_{max} و T_{min} به‌عنوان مبنای محاسبهٔ e_d درنظر گرفته شود:

$$e_d = ۰٫۵\{[\frac{e(T\min)RH\max}{۱۰۰}] + [\frac{e(T\max)RH\min}{۱۰۰}]\} \qquad (۱۷-۷)$$

که $e(T_{max})$ و $e(T_{min})$ به ترتیب فشار بخار اشباع محاسبه شده به ازای دماهای حداکثر و حداقل می‌باشد. اما اگر فقط متوسط رطوبت نسبی (RH) در اختیار باشد، با فرض اینکه $RH=\frac{(RH_{max}+RH_{min})}{۲}$ است، e_d از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$e_d = \frac{RH}{\frac{۵۰}{e_{(T\max)}} + \frac{۵۰}{e_{(T\min)}}} \qquad (۱۸-۷)$$

که در آن eT_{min} و eT_{max} به ترتیب فشار بخار اشباع محاسبه شده در دمای حداقل و حداکثر می‌باشد. چنانچه داده‌های رطوبت موجود نبوده و یا از دقت کافی برخوردار نباشند، می‌توان در مناطق مرطوب با فرض اینکه $T_d=T_{min}$ می‌باشد، فشار بخار واقعی را از رابطهٔ زیر به‌دست آورد:

$$e_a = ۰٫۶۱۱\exp(\frac{۱۷٫۲۷T_{min}}{T_{min}+۲۳۷٫۳}) \qquad (۱۹-۷)$$

این فرمول برای مناطق خشک دقت زیادی ندارد و لازم است در این نقاط رابطهٔ دمای حداقل و دمای نقطهٔ شبنم، واسنجی و سپس مورد استفاده قرار گیرد.

برای محاسبهٔ تابش خالص، می‌توان از رابطهٔ زیر بهره گرفت:

$$R_n = ۰٫۷۷(۰٫۲۵+۰٫۵\frac{n}{N})R_a - ۲٫۴۵\times۱۰^{-۹}(۰٫۹\frac{n}{N}+۰٫۱)\times(۰٫۳۴-۰٫۱۴\sqrt{e_d})\times(Tk_x^۴+Tk_n^۴) \qquad (۲۰-۷)$$

در این معادله:

R_a: تابش برون‌زمینی $(MJ.M^{-۲}.d^{-۱})$

TK_x: حداکثر دمای روزانه برحسب درجه کلوین

TK_n: حداقل دمای روزانه برحسب درجه کلوین

n: تعداد ساعات آفتابی که از داده‌های هواشناسی منطقه استخراج می‌شود و N حداکثر

تعداد ساعات آفتابی که در جدول ۷-۲ ذکر شده است.

$$R_a = ۳۷/۶ dr(W_s \sin\phi\sin\gamma\cos\phi\cos\gamma\sin(ws)) \qquad (۲۱-۷)$$

که در این معادله

$$W_s = \arccos(-\tan\phi\tan\gamma) \qquad (۲۲-۷)$$

$$dr = ۱+۰/۰۳۳\cos(۰/۰۱۷۲J) \qquad (۲۳-۷)$$

$$\gamma = ۰/۴۰۹\sin(۰/۰۱۷۲J - ۱/۳۹) \qquad (۲۴-۷)$$

$$J = \text{interyer}(۳۰/۵M - ۱۴/۶) \qquad (۲۵-۷)$$

dr: فاصلهٔ نسبی زمین تا خورشید

γ: زاویهٔ میل خورشیدی (R_a)

ϕ: عرض جغرافیایی (R_a)

W_s: زاویهٔ ساعتی غروب خورشید (R_a)

M: شمارهٔ ماه میلادی سالی که تبخیر و تعرق برای آن محاسبه می‌گردد.

J: شمارهٔ روز ژولیوسی[۱]. برای محاسبات ماهانه از معادلهٔ فوق استفاده می‌شود و چنانچه بخواهیم تبخیر و تعرق روزانه را حساب کنیم، با داشتن شماره روز از ماه (D) از معادلهٔ زیر را استفاده می‌کنیم:

$$J = \text{integer}(۲۷۵\frac{M}{۹} - ۳۰ + D) \qquad (۲۶-۷)$$

$U_۲$ سرعت باد در ارتفاع دو متری است و چنانچه سرعت باد در ارتفاع دیگری (Z) وجود داشته باشد می‌توان آن را با استفاده از رابطهٔ تجربی زیر، به سرعت باد در ارتفاع دو متری تبدیل نمود:

$$U_۲ = U_Z[\frac{۲/۰}{Z}]^{۰/۱۵} \qquad (۲۷-۷)$$

---

۱. روز ژولیوسی: شماره روز از ابتدای سال میلادی

انجمن علمی مهندسی کشاورزی کویر سبز
دانشگاه پیام نور رضوانشهر صدوق
www.pnu.gigfa.com
agripnu@gmail.com

جدول ۷ـ۲. حداکثر ممکن ساعات روزانهٔ تابش آفتاب N برای ماه‌ها و عرض‌های جغرافیایی مختلف

عرض جغرافیائی	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
50	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.6	11.1	9.8	9.1
40	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3
35	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

مثال: مطلوب است محاسبهٔ میزان تبخیر و تعرق به روش پنمن مانتیت برای ایستگاهی در تهران. مشخصات و اطلاعات هواشناسی لازم در زیر ارائه گردیده است:

ـ عرض جغرافیایی ۴۰ درجه شمالی

ـ ارتفاع از سطح دریا ۱۷۵۰ متر

ـ تاریخ ابتدای آگوست (۱۰ مرداد)

ـ دمای حداقل و حداکثر به‌ترتیب ۸ و ۳۷ درجه سانتیگراد

ـ رطوبت نسبی متوسط ۷۵٪

ـ سرعت باد ۵ متر بر ثانیه و در ارتفاع ۱۰ متری

ـ تعداد ساعات آفتابی واقعی ۱۰/۵ ساعت

حل:

$$T = \frac{۳۷ + ۸}{۲} = ۲۲٫۵^{\circ}C$$

$$\lambda = ۲٫۵۰۱ - (۲٫۳۶۱ \times ۱۰^{-۳}) \times ۲۲٫۵ = ۲٫۴۴ \, MJ/Kg$$

$$\Delta = \frac{۲۵۰۴\exp[۱۷٫۲۷\times ۲۲٫۵(۲۲٫۵+۲۳۷٫۳)]}{(۲۳۷٫۳+۲۲٫۵)^{۲}} = ۰٫۱۶۵$$

$$P = ۱۰۱٫۳(\frac{۲۹۳-۰٫۰۰۶۵\times ۱۷۵۰}{۲۹۳}) = ۹۷٫۳۶$$

$$\gamma = ۰٫۰۰۱۶۳\frac{۹۷٫۳۶}{۲٫۴۴} = ۰٫۰۰۵$$

$$e_a = ۰٫۶۱۱\exp(\frac{۱۷٫۲۷\times ۲۲٫۵}{۲۲٫۵+۲۳۷٫۳}) = ۲٫۷۲$$

$$e_d = \frac{۷۵}{\frac{۵۰}{۶٫۲۷}+\frac{۵۰}{۱٫۰۷}} = ۱٫۳۷$$

$$J = \text{integer}(۲۷۵\frac{۸}{۹}-۳۰+۱)-۲ = ۲۱۳$$

$$\gamma = ۰٫۴۰۹\sin(۰٫۰۱۷۲\times ۲۱۳-۱٫۳۹) = ۰٫۰۱۶$$

$$dr = ۱+۰٫۰۳۳\cos(۰٫۰۱۷۲\times ۲۱۳) = ۱٫۰۳$$

$$W_s \arccos(-\tan ۰٫۶۹\tan ۰٫۰۱۶) = ۱٫۵۷$$

$$R_a = ۳۷٫۶\times ۱٫۰۳\times(۱٫۵۷\sin ۰٫۶۹\sin ۰٫۰۱۶ + \cos ۰٫۶۹\times\cos ۰٫۰۱۶\times\sin ۱٫۵۷) = ۳۰٫۴۸(MJ.m^{-۲}.d^{-۱})$$

از جدول (۷-۲) $\frac{n}{N} = \frac{۱۰٫۵}{۱۳٫۷} = ۰٫۷۶۶$

$$Tk_a = ۲۷۳+۸ = ۲۸۱^{\circ}K \qquad Tk_s = ۲۷۳+۳۷ = ۳۱۰^{\circ}K$$

$$U_۲ = ۵[\frac{۲}{۱۰}]^{۰٫۱۵} = ۳٫۹۲$$

$$R_n = ۰٫۷۷(۰٫۲۵+۰٫۵\times ۰٫۷۶۶)۳۰٫۴۸ - ۴۵\times ۱۰^{-۹}(۰٫۹\times ۰٫۷۶۶+۰٫۱)$$
$$۲\times(۰٫۳۴-۰٫۱۴\sqrt{۱٫۳۷})\times(۳۱۰^{۴}+۲۸۱^{۴}) = ۹٫۵۸$$

اکنون با توجه به آنکه به دلیل پوشش کامل گیاه مرجع، شار گرما به داخل خاک صفر فرض می‌شود (G=۰) داریم:

$$ET_{\circ} = \frac{۰٫۴۰۸\times ۰٫۱۶۵\times(۹٫۵۸-۰)+۰٫۰۶۵[\frac{۸۹۰}{(۲۲۵+۲۷۳)}]\times ۳٫۹۲(۲٫۷۲-۱٫۳۷)}{۰٫۱۶۵+۰٫۰۶۵(۱+۰٫۳۴\times ۳٫۹۲)} = ۵٫۳\,mm/day$$

۴. معادله‌های تجربی

معادله‌های تجربی مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع ارائه شده است. در این معادله‌ها، رابطهٔ بین تبخیر و تعرق مرجع با یک یا چند پارامتر اساسی مؤثر بر تبخیر و تعرق، در نظر گرفته شده است. دمای هوا، تابش خورشید، تبخیر از تشت، رطوبت هوا و سرعت باد جزء این پارامترها به شمار می‌آیند. معادله‌های تجربی بسیار زیادی ارائه شده‌اند که در اینجا فقط به ذکر تعدادی از آن‌ها که کاربرد بیشتری دارند، بسنده می‌گردد.

روش تورنت وایت[1]

در روش تورنت وایت، تبخیر و تعرق پتانسیل برای هر یک از ماه‌های سال محاسبه می‌گردد. پارامترهای مورد نیاز آن، دمای متوسط ماهانه، عرض جغرافیایی برای محاسبهٔ ضرایب اصلاحی معادلهٔ تورنت وایت و نمایهٔ حرارتی می‌باشند. برای محاسبهٔ نمایهٔ حرارتی سالانه، مقدار نمایهٔ حرارتی ماهانه محاسبه و سپس مجموع آن‌ها تعیین می‌شود. اساس این روش، داشتن دمای متوسط ماهانه (T_m) است. نمایهٔ حرارتی سالانهٔ مورد استفاده در روش تورنت وایت (I)، از جمع نمایه‌های حرارتی ماهانه(i_m) در طول سال به‌دست می‌آید. درصورتی‌که متوسط دما در یک ماه صفر یا منفی باشد، نمایهٔ حرارتی آن ماه صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$I = \sum i_m \qquad (۲۸-۷)$$

$$i_m = (\frac{T_m}{۵})^{۱٫۵۱} \qquad (۲۹-۷)$$

در روابط فوق، مقدار T_m متوسط دمای هوا برحسب درجه سانتیگراد در ماه مورد نظر است.

با داشتن نمایهٔ حرارتی سالانه، ضریب a از معادلهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$a = (۶٫۷۵\times۱۰^{-۷})I^۳ - (۷٫۷۱\times۱۰^{-۵})I^۲ + (۱٫۷۹۲\times۱۰^{-۲})I + ۰٫۴۹۲ \qquad (۳۰-۷)$$

1. Thornthwait

برای هر یک از ماه‌های سال، تبخیر و تعرق پتانسیل برحسب میلی‌متر از فرمول زیر به‌دست می‌آید:

$$ET_p = ۱۶\left(۱۰\ {T_m}/{I}\right)^a \qquad (۳۱-۷)$$

محاسبهٔ تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از رابطهٔ فوق برای هر یک از ماه‌های سال با این فرض است که هر ماه ۳۰ روز و هر روز ۱۲ ساعت روشنایی داشته باشد، حال آنکه تعداد روزهای هر ماه و تعداد ساعات روشنایی در ماه‌های مختلف سال متفاوت است. بنابراین لازم است ET_p با اعمال ضریب N_m که مقادیر آن برای ماه‌های مختلف مطابق جدول ۷-۳ می‌باشد، اصلاح گردد. لذا:

$$ET_p = ۱۶\ N_m\left(۱۰\ {T_m}/{I}\right)^a$$

جدول ۷-۳. مقادیر ضریب اصلاحی N_m در معادلهٔ تورنت وایت برای عرض‌های (شمالی) مختلف جغرافیایی در ماه‌های سال

عرض شمالی	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
۰	۱/۰۴	۰/۹۴	۱/۰۴	۱/۰۱	۱/۰۴	۱/۰۱	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۱	۱/۰۴	۱/۰۱	۱/۰۴
۱۰	۱	۰/۹۱	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۸	۱/۰۶	۱/۰۸	۱/۰۷	۱/۰۲	۱/۰۲	۰/۹۸	۰/۹۹
۲۰	۰/۹۵	۰/۹	۱/۰۳	۱/۰۵	۱/۱۳	۱/۱۱	۱/۱۴	۱/۱۱	۱/۰۲	۱	۰/۹۳	۰/۹۴
۳۰	۰/۹	۰/۸۷	۱/۰۳	۱/۰۸	۱/۱۸	۱/۱۷	۱/۲۰	۱/۱۴	۱/۰۳	۰/۹۸	۰/۸۹	۰/۸۸
۳۵	۰/۸۷	۰/۸۵	۱/۰۳	۱/۰۹	۱/۲۱	۱/۲۱	۱/۲۳	۱/۱۶	۱/۰۳	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۸۵
۴۰	۰/۸۴	۰/۸۳	۱/۰۳	۱/۱۱	۱/۲۴	۱/۲۵	۱/۲۷	۱/۱۸	۱/۰۴	۰/۹۶	۰/۸۳	۰/۸۱
۴۵	۰/۸	۰/۸۱	۱/۰۲	۱/۱۳	۱/۲۸	۱/۲۹	۱/۳۱	۱/۲۱	۱/۰۴	۰/۹۴	۰/۷۹	۰/۷۵
۵۰	۰/۷۴	۰/۷۸	۱/۰۲	۱/۱۵	۱/۳۳	۱/۳۶	۱/۳۷	۱/۲۵	۱/۰۶	۰/۹۲	۰/۷۶	۰/۷

روش بلانی کریدل[1]

بلانی و کریدل دو تن از دانشمندان آمریکایی، در سال ۱۹۵۰ رابطه‌ای را جهت محاسبهٔ تبخیر و تعرق پتانسیل محصولات در مناطق خشک غرب آمریکا ارائه نمودند. این فرمول بعداً به‌وسیلهٔ FAO برای ۱۳ نقطه در آمریکا مورد ارزیابی و واسنجی قرار

1. Belany-Criddle

گرفت و نسبت به بعضی از پارامترهای هواشناسی مانند رطوبت نسبی هوا، ساعات آفتابی و سرعت باد اصلاح گردید. به‌طورکلی، فرمول بلانی کریدل بر اساس بیلان حرارتی می‌باشد لذا ET_0 به حرارت و زمان تشعشع ربط یافته است. فرمولی که نهایتاً برای این روش ارائه گردید به‌صورت زیر است:

$$ET_{\circ} = a + b[P(0{,}46T + 8{,}13)] \qquad (۳۳-۷)$$

که در آن:

ET_0: تبخیر و تعرق گیاه مرجع برحسب میلی‌متر در روز

P: ضریب مربوط به تعداد ساعات آفتابی که عبارتست از متوسط ساعات روشنایی هر روز در ماه مورد نظر تقسیم بر کل ساعات روشنایی سالانه ضربدر ۱۰۰، جدول(۷ـ۴)

T: متوسط دما در ماه مورد نظر $^{\circ}C$

a,b: ضرایب اقلیمی

برای محاسبهٔ a و b در هر منطقه، از اطلاعات حداقل رطوبت نسبی هوا (RH_{min})، سرعت باد در روز (U_{day}) و n/N استفاده می‌گردد. منظور از n/N، نسبت تعداد آفتابی واقعی به تعداد ساعات آفتابی پتانسیل در هر منطقه است. مقدار n را از داده‌های آفتاب‌نگار و N را از جداولی که برای عرض‌های جغرافیایی و ماه‌های مختلف تهیه شده است (جدول ۷-۲) محاسبه می‌نمایند. سرعت باد نیز در ارتفاع دو متری از سطح زمین برحسب (m/s) به‌دست می‌آید.

مقادیر a,b را می‌توان از معادله‌های زیر برآورد نمود:

$$a = 0{,}0043(RH_{min}) - \frac{n}{N} - 1{,}41 \qquad (۳۴-۷)$$

$$b = 0{,}819 - 0{,}0041(RH_{min}) + 1{,}07(\frac{n}{N}) + 0{,}066(U_{day}) - 0{,}006(RH_{min})\frac{n}{N} - 0{,}006(RH_{min})(U_{day}) \qquad (۳۵-۷)$$

جدول ۷ـ۴. متوسط روزانهٔ درصد ساعات روشنایی نسبت به کـل سـاعات روشـنایی سال در ماه‌های مختلف (ضریب P برای استفاده در فرمول بلانی-کریدل - FAO)

عرض جغرافیائی شمالی (درجه)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
60°	.15	.20	.26	.32	.38	.41	.40	.34	.28	.22	.17	.13
58	.16	.21	.26	.32	.37	.40	.39	.34	.28	.23	.18	.15
56	.17	.21	.26	.32	.36	.39	.38	.33	.28	.23	.18	.16
54	.18	.22	.26	.31	.36	.38	.37	.33	.28	.23	.19	.17
52	.19	.22	.27	.31	.35	.37	.36	.33	.28	.24	.20	.17
50	.19	.23	.27	.31	.34	.36	.35	.32	.28	.24	.20	.18
48	.20	.23	.27	.31	.34	.36	.35	.32	.28	.24	.21	.19
46	.20	.23	.27	.30	.34	.35	.34	.32	.28	.24	.21	.20
44	.21	.24	.27	.30	.33	.35	.34	.31	.28	.25	.22	.20
42	.21	.24	.27	.30	.33	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.21
40	.22	.24	.27	.30	.32	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.21
35	.23	.25	.27	.29	.31	.32	.32	.30	.28	.25	.23	.22
30	.24	.25	.27	.29	.31	.32	.31	.30	.28	.26	.24	.23
25	.24	.26	.27	.29	.30	.31	.31	.29	.28	.26	.25	.24
20	.25	.26	.27	.28	.29	.30	.30	.29	.28	.26	.25	.25
15	.26	.26	.27	.28	.29	.29	.29	.28	.28	.27	.26	.25
10	.26	.27	.27	.28	.28	.29	.29	.28	.28	.27	.26	.26
5	.27	.27	.27	.28	.28	.28	.28	.28	.28	.27	.27	.27
0	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27

مثال: مطلوب است میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع بـرای اول مـاه جـولای (۱۰ تیر) در منطقهٔ کرج با عرض جغرافیایی ۳۵/۵ درجه شمالی و دمای حـداکثر ۳۷ درجـه سانتی گراد، تعداد ساعات آفتابی n=۱۱، سرعت متوسط باد در ارتفاع دو متری ۷ متر در ثانیه و حداقل رطوبت نسبی برابر ۳۲ درصد.

حل:

با استفاده از جدول ۷-۲ و برای عرض جغرافیایی و تاریخ مذکور داریم: $N = ۱۴٫۳$

لذا:

$$\frac{n}{N} = \frac{۱۱}{۱۴٫۳} = ۰٫۷۷$$

با فرض رطوبت نسبی حداقل ۳۲٪ داریم:

$$a = -۲٫۱۷۸ \qquad b = ۲٫۰۸۸$$

از جدول ۷-۴ هم برای عرض جغرافیایی و ماه مذکور مقدار $P = ۰٫۳۲$ استخراج

می‌شود. دما نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{۲} = \frac{۳۷ + ۱۰٫۵}{۲} = ۲۳٫۷۵^{\circ}C$$

لذا:

$$ET_{\circ} = -۲٫۱۷۸ + ۲٫۰۸۸[۰٫۳۲(۰٫۴۶ \times ۲۳٫۷۵ + ۸٫۱۳)] = ۱۰٫۵۵ \, mm/day$$

به دلیل عمومیت فراوان استفاده از فرمول بلانی کریدل و همچنین تسهیل و تسریع در کاربرد این روش، نمودارهایی تهیه شده است که در موارد خاص از آن‌ها نیز می‌توان بهره برد.

روش جنسن ـ هیز[1]

یکی از روش‌های تجربی است که به‌طور متداول در ایالات غربی آمریکا به‌کار می‌رفت و در سال ۱۹۶۳ منتشر گردید. در ابتدای ابداع این روش، ضرایب واقعی گیاهی به‌طور گسترده‌ای کاربرد داشت ولی به سرعت مورد تجدید نظر قرار گرفت و اصلاح شد. معادلهٔ جنسن–هیز به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$ET_0 = C_T(T - T_x)R_s \qquad (۳۶–۷)$$

$$C_T = \frac{۱}{(C_۱ + ۷٫۳CH)} \qquad (۳۷–۷)$$

$$CH = \frac{۵}{(e_۲ - e_۱)} \qquad (۳۸–۷)$$

$$C_۱ = ۳۸ - \frac{Z}{۱۵۲٫۵} \qquad (۳۹–۷)$$

$$T_x = -۲٫۵ - ۱٫۴(e_۲ - e_۱) - \frac{Z}{۵۵۰} \qquad (۴۰–۷)$$

1. Jensen-Haise

در روابط فوق؛ T میانگین دمای هوا برای دوره زمانی مورد نظر برحسب درجه سانتیگراد، e_1، e_2 فشار بخار اشباع در متوسط حداکثر و حداقل دمای ماهانهٔ هوا برای گرم‌ترین ماه سال بر حسب KPa، Z ارتفاع از سطح دریا برحسب متر و R_S تابش خورشیدی در دورهٔ مورد نظر است که اگر برحسب کالری بر سانتی‌مترمربع باشد با تقسیم آن بر ۵۸٫۴۸ به میلی‌متر تبدیل می‌شود. بر اساس توصیهٔ ASCE، روش جنسن ـ هیز برای دوره‌های زمانی حداقل ۵ روز قابل استفاده است.

مثال: حداکثر و حداقل دمای هوا در شهر همدان و برای خرداد ماه به ترتیب ۳۵ و ۱۱ درجه سانتی گراد ثبت گردید. فشار بخار اشباع ماکزیمم و مینیمم هم در این دوره به ترتیب۴۳/۲، ۱۳/۵ میلی‌بار بوده است. با توجه به آنکه ارتفاع شهر همدان ۱۷۸۰ متر از سطح دریاست مطلوب است محاسبهٔ تبخیر و تعرق پتانسیل برای گیاه مرجع در این‌منطقه با فرض آنکه:

$$R_s = ۶۳۰ \, cal/cm^2$$

$$C_1 = ۳۸ - \frac{۱۷۸۰}{۱۵۲٫۲} = ۲۷٫۴۴$$

$$e_2 = ۰٫۶۱۰۸ \exp[\frac{۱۷٫۲۷ \times ۴۳٫۲}{۴۳٫۲ \times ۲۳۷٫۳}] = ۸٫۷۳ KPa$$

تبدیل فشار بخار:

$$e_1 = ۰٫۶۱۰۸ \exp[\frac{۱۷٫۲۷ \times ۱۳٫۵}{۱۳٫۵ + ۲۳۷٫۳}] = ۱٫۵۴ Kpa$$

$$CH = \frac{۵}{۸٫۷۳ - ۱٫۵۴} = ۰٫۰۹۵$$

$$C_T = \frac{۱}{(۲۷٫۴۴ + ۷٫۳ \times ۰٫۶۹۵)} = ۰٫۰۳$$

$$T_x = -۲٫۵ - ۱٫۴(۸٫۷۳ - ۱٫۵۴) - \frac{۱۷٫۸۰}{۵۵۰} = -۱۵٫۸$$

$$T = \frac{۳۵ + ۱۱}{۲} = ۲۳^{\circ}C$$

$$R_s = \frac{۶۳۰}{۵۸٫۴۸} = ۱۰٫۷۷$$

تابش خورشیدی برحسب میلی‌متر آب mmH_2O

$$ET_0 = ۰٫۰۳(۲۳ - (-۱۵٫۸)) \times ۱۰٫۷۷ = ۱۲٫۵ \, mm/day$$

روش هارگریوز - سامانی[1]

معادلهٔ ارائه شده توسط‌هارگریوز-سامانی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$ET_0 = ۰٫۰۱۳۵(K_T).R_a.TD^{۰٫۵}(T + ۱۷٫۸) \qquad (۴۱-۷)$$

مقدار KT از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$KT = ۰٫۰۰۱۸۵(TD)^2 - ۰٫۰۴۳TD + ۰٫۴۰۲۳ \qquad (۴۲-۷)$$

در روابط فوق؛ ET_0 تبخیر و تعرق مرجع برحسب میلی‌متر در روز، TD اختلاف دمای ماکزیمم و مینیمم برحسب سانتیگراد و T متوسط درجه حرارت بر حسب سانتیگراد می‌باشد.

روش تشت تبخیر

تشت تبخیر ساده‌ترین وسیله‌ای است که با آن می‌توان مقدار تبخیر را از یک سطح نسبتاً آزاد به‌دست آورد. در ایستگاه‌های هواشناسی، معمولاً از تشت استاندارد کلاس A که ظرفی استوانه‌ای از جنس آهن گالوانیزه با قطر ۱۲۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵٫۴ سانتی‌متر می‌باشد، استفاده می‌شود. درصورتی‌که مقدار تبخیر از تشت در یک دوره زمانی مشخص (روز یا ماه) برابر E_p باشد، تبخیر و تعرق گیاه مرجع در همان دوره برابر خواهد بود با:

$$ET_o = K_{pan}\left(E_p\right) \qquad (۴۳-۷)$$

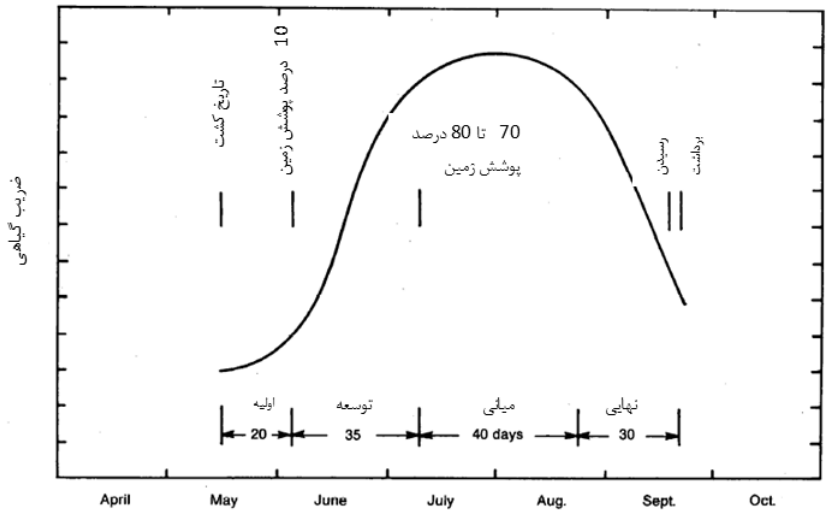
---

1. Hargreaves-Samani

ضریب K_{pan} به نام ضریب تشت معروف بوده و بستگی به وضعیت استقرار تشت و محیط اطراف آن دارد و مقدار آن بین ۰٫۵ تا ۰٫۸۵ متغیر است. سرعت باد، رطوبت هوا و ارتفاع محل از سطح دریا نیز بر ضریب تشت مؤثرند. ضریب تشت برای کارهای عملی معمولاً ۰٫۶۶ در نظر گرفته می‌شود. باید توجه داشت که بر اساس مطالعات سازمان فائو و پیشنهاد آن استفاده از تشت تبخیر در محاسبات نیاز آبی بسیار اشتباه برانگیز بوده و لذا کاربرد آن توصیه نشده است.

۷-۴ ضریب گیاهی

ضریب گیاهی، نسبت تبخیر و تعرق گیاه واقعی به تبخیر و تعرق گیاه مرجع در یک زمان مشخص می‌باشد. منحنی ضریب گیاهی به‌عنوان تابعی از زمان به‌عنوان منحنی گیاهی شناخته می‌شود. توصیفی از یک منحنی گیاهی در شکل ۷-۷ داده شده است.



شکل ۷-۷. تشریح یک منحنی ضریب گیاهی. در این شکل طول فصل رشد به‌صورت مرحلهٔ ابتدایی، مرحلهٔ توسعهٔ گیاه، مرحلهٔ میانی و مرحلهٔ نهایی مشخص شده است. انتخاب این طبقه‌بندی‌ها اختیاری است.

ضریب گیاهی، یک مقدار ثابت نبوده و مقدار آن در طول دورهٔ رویش گیاه تغییر می‌کند. در تمام روش‌هایی که توسط آن‌ها تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) یا تبخیر و

تعرق پتانسیل (ET_p) محاسبه می‌شود برای آنکه بتوان نتایج حاصله را به سطوح پوشش گیاهی مورد نظر تعمیم داد، لازم است مقادیر به‌دست آمده را در ضریب گیاهی K_c ضرب نمود ($ET_c=K_c\ ET_0$). این ضریب به عواملی مانند نوع گیاه، مرحلهٔ رشد و شرایط آب و هوایی محل بستگی دارد.

۷-۵ برنامه‌ریزی آبیاری

برنامه‌ریزی آبیاری، یک عملیات مدیریتی است که برای تعیین زمان آبیاری و مقدار آبی که باید در هر بار آبیاری به‌کار برده شود، استفاده می‌گردد. به عبارت دیگر هدف برنامه‌ریزی آبیاری، مشخص کردن مقدار دقیق آب مورد استفاده در مزرعه و زمان‌بندی دقیق کاربرد آن می‌باشد. زمان‌بندی دقیق آبیاری را می‌توان با اندازه‌گیری نگهداشت رطوبت خاک انجام داد. در اکثر روش‌های برنامه‌ریزی آبیاری، پایش رطوبت خاک اساسی‌ترین عملی است که انجام می‌شود. برنامه‌ریزی مؤثر آبیاری، نیاز به آگاهی از پارامترهای زیر دارد:

ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک، رطوبت قابل دسترس در هر زمان، آب مصرفی گیاه یا تبخیر و تعرق، حساسیت گیاه به تنش‌های رطوبتی در هر مرحله از رشد، آبیاری یا باران مؤثر دریافت شده، قابلیت دسترسی به منابع آب و زمان لازم برای آبیاری هر مزرعه.

تصمیم برای انجام آبیاری، به برآورد وضعیت رطوبتی خاک و گیاه و شاخص‌ها و راهکارهای مورد نظر بستگی دارد. برنامه‌ریزی آبیاری بهینه براساس اندازه‌گیری یا تخمین نگهداشت رطوبت خاک و نیاز آبی گیاه، یکی از بهترین عملیات‌های مدیریتی آبیاری است.

۷-۵-۱ مزایای برنامه‌ریزی آبیاری

۱. کشاورز را قادر می‌سازد تا ضمن برنامه‌ریزی تناوب آبیاری در میان مزارع مختلف، تنش آبی گیاه را حداقل و عملکرد را حداکثر نماید.
۲. با کاهش آبیاری بی‌رویه، از هزینه‌های آب و نیروی انسانی کاسته شده و در نتیجه، حداکثر استفاده از ذخیرهٔ رطوبت خاک به عمل می‌آید.

۳. با کاستن از رواناب سطحی و نشت عمقی، موجب کاهش هزینهٔ کود می‌گردد.
۴. عملکرد محصول و کیفیت آن و در نتیجه درآمد خالص افزایش می‌یابد.
۵. مشکلات غرقابی کم شده و به‌واسطه آن نیاز زهکشی کاهش می‌یابد.
۶. برنامه‌ریزی آبیاری با تنظیم آبشویی، در کنترل مشکلات ناحیهٔ ریشهٔ گیاه کمک می‌کند.
۷. از آب ذخیره شده در نتیجهٔ برنامه‌ریزی آبیاری، می‌توان برای آبیاری گیاهان کم‌ارزش (که در طول مدت کم‌آبی قادر به آبیاری آن‌ها نیستیم) استفاده نمود که سبب افزایش درآمدهای جانبی می‌شود.
۸. کاهش اثرات سوء زیست محیطی در نتیجهٔ کنترل آبشویی و رواناب سطحی

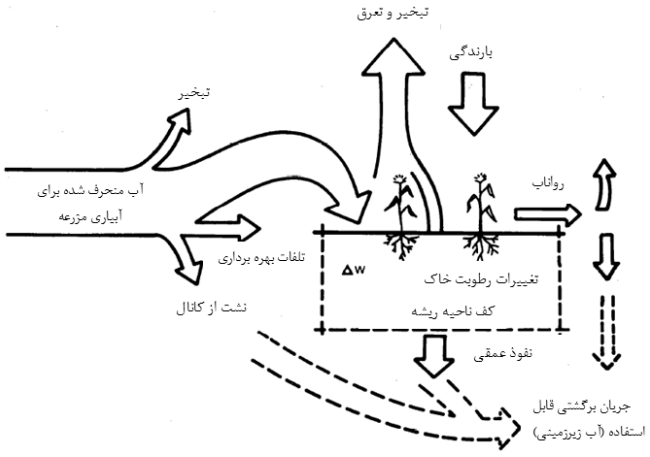
مقدار آب مورد استفاده در هر آبیاری، به استراتژی‌های زارع بستگی دارد. به‌عنوان مثال، زارع می‌تواند رطوبت خاک را تا حد ظرفیت زراعی یا کمتر از آن پر نماید. اگر امکان وقوع بارندگی نباشد و آبیار بخواهد دور آبیاری را بیشتر کند، بهتر است خاک را تا حد ظرفیت زراعی آبیاری نماید. در صورت امکان وقوع بارندگی، منطقی است که مقداری از فضای خاک برای نگهداشت باران حفظ شود. اگر هدف زارع به حداکثر رساندن عملکرد باشد، آبیاری باید به‌گونه‌ای انجام شود که رطوبت خاک همواره بالاتر از حد بحرانی باشد. حد بحرانی، معرف مقدار رطوبتی از خاک است که شرایط خشک‌تر از آن، ممکن است سبب کاهش عملکرد نسبت به حداکثر توان تولید گردد.

اهمیت برنامه‌ریزی در این است که آبیار را قادر می‌سازد تا مقدار دقیق آب را برای تأمین هدف خویش به‌کار گیرد که این امر سبب افزایش راندمان آبیاری می‌شود. فاکتور اساسی برای رسیدن به این مهم، اندازه‌گیری دقیق حجم آب استفاده شده یا عمق آب مصرفی می‌باشد. کاربرد صحیح آب، از پر آبیاری (آبیاری بیشتر از حد مورد نیاز) و کم آبیاری (آبیاری کمتر از حد مورد نیاز) جلوگیری می‌کند. پرآبیاری سبب اتلاف آب، انرژی و نیروی انسانی، شستشوی مواد غذایی از ناحیهٔ ریشه و دور شدن آن از دسترس گیاه، کاهش تهویهٔ خاک و در نتیجه کاهش عملکرد گیاه می‌شود. کم آبیاری نیز با وارد نمودن تنش به گیاه، سبب کاهش عملکرد می‌شود. برخی از روش‌های برنامه‌ریزی آبیاری در ادامه ذکر می‌گردد.

۷-۵-۲ بیلان آب

روش بیلان آب، یکی از بهترین روش‌ها جهت تعیین زمان مناسب آبیاری و مقدار آب مصرفی می‌باشد. در این روش، اطلاعات خاصی برای انجام محاسبات صحیح مورد نیاز است.

در شکل ۷-۸، مؤلفه‌های بیلان آب مزرعه‌ای نشان داده شده‌اند. هم آب باران و هم آب آبیاری، در خاک ذخیره می‌شوند بنابراین ناحیهٔ مؤثر ریشهٔ گیاه، مخزنی برای ذخیرهٔ آب می‌باشد. برای تعیین ظرفیت این مخزن، اطلاعاتی از خصوصیات نگهداشت آب خاک‌ها و ویژگی‌های توسعهٔ ریشهٔ گیاهان مورد نیاز است. باید برآوردی قابل اعتماد از تبخیر و تعرق پتانسیل یا تبخیر و تعرق گیاه مرجع، همراه با منحنی ضریب گیاهی مناسب صورت گیرد. با استفاده از مقادیر تبخیر و تعرق مرجع و ضرایب گیاهی و رابطهٔ $ET_c=(K_c)(ET_0)$، مقدار تبخیر و تعرق گیاه مورد نظر برآورد می‌گردد.



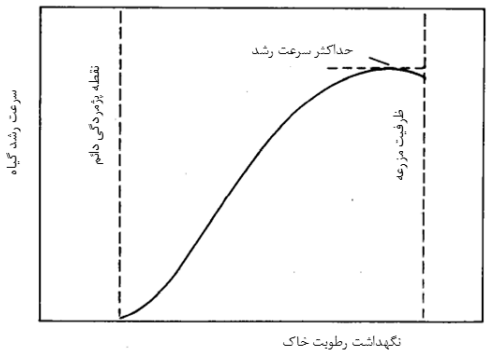
شکل ۷-۸ مؤلفه‌های بیلان آب مزرعه

۷-۵-۳ تخلیهٔ مجاز آب

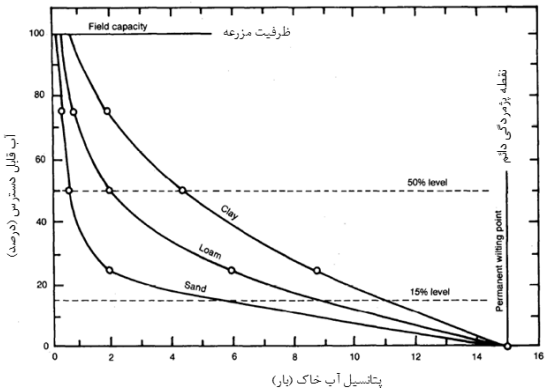
رشد مطلوب اغلب گیاهان زراعی تحت شرایط رطوبت کافی خاک صورت می‌گیرد، اما نباید رطوبت به قدری زیاد باشد که عامل محدود کنندهٔ تهویه خاک به حساب آید. این مفاهیم، در شکل ۷-۹ تشریح شدند. اگر رطوبت خاک تا حد نقطهٔ پژمردگی دائم از طریق گیاه خارج گردد، رطوبت باقیمانده در خاک به‌قدری محکم توسط خاک

نگهداری می‌شود که سایر گیاهان قادر به جذب آب کافی برای تأمین نیاز تبخیر و تعرقشان نمی‌باشند، در نتیجه تعرق کاهش یافته و عملکرد کم می‌شود. پر کردن بیش از حد منافذ خاک سبب می‌گردد که گیاه نتواند اکسیژن کافی مورد نیاز خود را تأمین نماید و مجدداً عملکرد کاهش خواهد یافت. گونه‌های گیاهی از لحاظ مقاومت در برابر کمبود و زیادی آب، رفتار متفاوتی دارند. برنامه‌های مدیریت آب باید خصوصیات مربوط به هر گیاه را دربر گیرند.

میزان آب بحرانی (critical water level)، بسته به نوع خاک و گیاه متفاوت است. شکل ۷-۱۰ نشان می‌دهد که در میزان آب قابل دسترس معادل ۱۵ درصد، مقدار مکش خاک برای خاک‌های شنی، لومی و رسی به ترتیب برابر ۵/۸، ۸/۷ و ۱۰/۷ بار است. با این وجود مقدار نگهداشت آب شن، اغلب زیر نقطهٔ پژمردگی است. یک گیاه برای جذب آب از خاک رسی در رطوبت ۱۵ درصد باید انرژی بیشتری نسبت به جذب همان رطوبت از خاک شنی صرف کند، اما آب بیشتری در خاک رسی قابل دسترس است که ضریب اطمینان بیشتری را حاصل می‌کند. برای فراهم کردن ضریب اطمینان منطقی، باید حد پایین تخلیهٔ آب در خاک شنی برای اکثر گیاهان بیشتر از ۱۵ درصد باشد. برای تشریح این نقطه، فرض کنید سه نوع خاک شنی، لومی و رسی به ترتیب ۰/۷، ۴/۱ و ۴/۲ اینچ آب قابل دسترس گیاه را در هر فوت خاک در ظرفیت مزرعه یا ۱۰۰ درصد آب قابل دسترس نگه می‌دارند. در ۱۵ درصد آب قابل دسترس باقیمانده، ۰/۱، ۰/۲۱ و ۰/۳۶ اینچ آب در هر فوت عمق خاک شنی، لومی و رسی وجود دارد.



شکل ۷-۹. رابطهٔ کلی بین نگهداشت رطوبت خاک و رشد گیاه



شکل ۷–۱۰. منحنی رهاسازی آب برای سه نوع خاک

در جدول ۷–۵، برخی از گیاهان زراعی رایج و مقدار نگهداشت آب پیشنهادی که در زمان آبیاری باید در خاک باقی بماند آورده شده‌اند.

جدول ۷–۵. درصد رطوبت قابل دسترس در ناحیهٔ ریشهٔ گیاه در زمان آبیاری برای برخی گیاهان زراعی

گیاه	فصل	آبیاری اول	آبیاری بعدی
		درصد آب قابل دسترس باقیمانده	
سیب‌زمینی	۶۵	۶۵	۵۰
چغندرقند	۵۰	۵۰	۵۰
ذرت شیرین	۶۰	۴۰	۶۰
ذرت مزرعه ای	۵۰	۴۰	۵۰
نعناع mint	۶۰	۶۰	۶۰
لوبیا	۶۰	۶۰	۶۰
ریزدانه	۴۰	۴۰	۶۰
پیاز	۷۰	۶۰	۷۰
یونجه	۵۰	۵۰	۵۰
مرتع	۵۰	۵۰	۵۰

۷–۵–۳ عمق جذب آب خاک (soil water extraction depth)

عمقی از خاک است که برای تعیین منطقهٔ مؤثر جذب آب توسط گیاهان، استفاده

می‌شود. این عمق ضرورتاً حداکثر عمق ریشه‌دوانی نمی‌باشد (به‌ویژه در گیاهانی که دارای ریشهٔ عمودی طولانی هستند) بلکه عمقی از خاک است که در آن، یک گیاه با بلوغ متوسط (average mature plant) می‌تواند فعالانه مقدار آب قابل‌توجهی از خاک جذب کند. به‌دلیل اینکه عوامل زیادی بر توسعه و تکثیر ریشه تأثیر دارند، عمق مؤثر باید برای هر منطقه تعیین شود.

۷-۵-۴ محاسبات آب خالص (net water calculations)

درصورتی‌که مقدار رطوبت در دو حد ظرفیت مزرعه و نقطهٔ پژمردگی دائم برای عمق مناسب خاک مشخص باشد، می‌توان مقدار آب قابل دسترس خاک را محاسبه کرد. برای تشریح این فرایند، برخی از خصوصیات شن لومی در جدول ۷-۶ ارائه شده است. نقطهٔ پژمردگی دائم معمولاً رطوبت موجود در مکش ۱۵ بار در نظر گرفته می‌شود، ظرفیت مزرعه برای خاک شنی معرف مکش یک دهم بار و برای خاک متوسط تا ریزبافت معرف مکش یک سوم بار می‌باشد. برای اهداف آبیاری، رطوبت خاک برحسب عمق آب (اینچ، سانتی‌متر و غیره) در واحد عمق خاک بیان می‌شود (واحدهای مربوط به عمق آب و عمق خاک باید یکی باشند). رطوبت بیان شده در این روش، بر مبنای حجمی است و برای محاسبات عمق آب مناسب‌تر است. رطوبت وزنی خاک را می‌توان با ضرب در جرم مخصوص ظاهری خاک، به رطوبت حجمی تبدیل کرد. برای محاسبهٔ میزان آب قابل دسترس بین ظرفیت مزرعه و نقطهٔ پژمردگی دائم، از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$D = \frac{(\rho b)(d)(AWC)}{(\rho w)(۱۰۰)} \qquad (۴۴-۷)$$

در این رابطه؛ عمق آب (سانتی‌متر یا اینچ) در عمق خاک (d)، ρ_b دانسیتهٔ ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، d عمق خاک برحسب اینچ یا سانتی‌متر، AWC مقدار رطوبت وزنی بین دو حد ظرفیت مزرعه و نقطهٔ پژمردگی دائم و ρ_w چگالی آب که برابر یک گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.

جدول ۷-۶. خواص نگهداشت رطوبتی خاک شن لومی

افق خاک	بافت	عمق (اینچ)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	درصد رطوبت وزنی		در خاک (اینچ بر اینچ)	در افق (اینچ)
				FC	PWP		
A_p	شن لومی	۰-۸	۱/۱۵	۲۱/۱	۸/۳	۰/۱۴۷	۱/۱۸
B_{21}	شن لومی	۸-۱۴	۱/۲۵	۲۲/۵	۸/۷	۰/۱۷۲	۱/۰۳
B_{22}	شن لومی	۲۰-۱۴	۱/۲۳	۱۷	۵/۱	۰/۱۴۶	۰/۸۸
C	شنی	۲۶-۲۰	۱/۳۹	۹/۸	۳	۰/۰۹۵	۰/۵۷
D	شنی	۳۲-۲۶	۱/۴۷	۶	۱/۴	۰/۰۶۸	۰/۴۱

دو ستون آخر جدول ۷-۶، با استفاده از رابطهٔ فوق محاسبه شدند. به‌عنوان نمونه، میزان رطوبت قابل دسترس در یک اینچ خاک افق A_p برابر است با:

$$D = \frac{(۱/۱۵)(۱)(۱۲/۸)}{(۱)(۱۰۰)} = ۰/۱۴۷ \text{ اینچ}$$

یا A_p اینچ آب در افق $(۰/۱۴۷ \text{ inch/inch})\ (۸ \text{ inch}) = ۱/۱۸$

برای طراحی یک سیستم آبیاری، کل آب قابل دسترس عمقی از خاک براساس سیستم ریشه و گیاه بالغ تحت کشت محاسبه می‌شود. کل رطوبت قابل نگهداشت خاک جدول ۷-۶، برای کلیهٔ افق‌ها برابر ۴/۰۷ اینچ می‌باشد. فرض کنید که سیستم ریشهٔ یک گیاه بالغ تا عمق ۲۶ اینچ در خاک نفوذ کند، پس کل آب قابل دسترس در ظرفیت مزرعه در ناحیهٔ ریشه برابر ۳/۶۶=۰/۵۷+۰/۸۸+۱/۰۳+۱/۱۸ اینچ است. اگر تحقیق یا تجربه نشان دهد که با تخلیهٔ بیش از ۵۰ درصد آب قابل دسترس از ناحیهٔ طراحی یا مؤثر ریشهٔ عملکرد محصول کاهش یابد گیاه باید پس از تخلیهٔ ۱/۸۳ اینچ (۵۰ درصد ۳/۶۶ اینچ) آب از پروفیل خاک، آبیاری شود.

۷-۵-۵ فرایند محاسبهٔ بیلان آب (water balance accounting procedure)

فرایند محاسبهٔ آب بر مبنای دو اصل اساسی زیر است:

۱. درصورتی‌که منبع آب کافی باشد، شدت تبخیر و تعرق یک گیاه به نیاز تبخیری اقلیمی (climatological evaporative demand) بستگی دارد.

۲. درصورتی‌که رطوبت خاک در یک زمان خاص مشخص باشد، مقدار آن در زمان‌های بعدی را می‌توان با افزودن آب آبیاری یا بارندگی و کسر کردن تبخیر و تعرق در زمان سپری شده محاسبه کرد.

با مشخص بودن مقادیر روزانهٔ بارندگی، تبخیر و تعرق و میزان آبیاری خالص برای یک محل، می‌توان بیلان روزانه را محاسبه و با مقدار رطوبت خاک قابل تخلیه قبل از نیاز به آبیاری مقایسه کرد.

محاسبات از زمانی آغاز می‌شود که خاک در شرایط ظرفیت مزرعه یا یک رطوبت مشخص قرار دارد. پس از یک بارندگی سنگین یا آبیاری، خاک ممکن است در شرایط ظرفیت مزرعه باشد اما این باید در مزرعه بررسی گردد. رطوبت خاک باید همواره در زمان شروع بررسی شود. در زمان مشخصی از روز، در صورت امکان هر صبح، مقدار رطوبت خاک از طریق کسر مقدار تبخیر و تعرق روز قبل از بیلان صبح قبلی محاسبه می‌شود. آبیاری یا بارندگی مربوط به روز قبل باید به بیلان صبح قبلی اضافه شود. زمانی‌که بیلان روزانه به نقطه‌ای می‌رسد که در آن رطوبت خاک، تا حد مجاز از پیش تعیین شده تخلیه شده است آن نقطه، زمان آبیاری است. با صرفنظر از راندمان کاربرد، مقدار خالص آبی که باید به‌وسیله آبیاری به خاک اضافه شود، مقداری است که رطوبت خاک را تا حد ظرفیت مزرعه برساند. برای تعیین بیلان صبح پس از آبیاری، مقدار آب آبیاری باید اضافه شود. سپس بیلان به‌صورت روزانه محاسبه می‌شود تا زمان آبیاری بعدی مشخص گردد. درصورتی‌که مقدار آبیاری نتواند رطوبت خاک را به حد ظرفیت مزرعه برساند، مقدار رطوبت قابل دسترس خاک برابر مقدار واقعی موجود تنظیم می‌گردد. این رویه در مناطق مرطوب، برای استفادهٔ مؤثرتر از بارندگی‌های احتمالی که ممکن است پس از آبیاری رخ دهند و برای کاهش آبشویی مواد غذایی موجود در خاک به آب زیرزمینی به‌کار می‌رود.

خواص نگهداشت آب جدول ۷-۶ را می‌توان برای تشریح این فرایند استفاده کرد. فرض کنید که عمق ریشه دوانی گیاه ۲۶ اینچ و کل آب قابل دسترس گیاه برای

عمق مذکور و خاک شن لومی برابر ۳/۶۶ اینچ باشد. درصورتی‌که گیاه مجاز به تخلیهٔ ۶۰ درصد این مقدار را باشد، ۲/۲ اینچ از تخلیهٔ مجاز می‌تواند قبل از آبیاری مجدد تخلیه شود. فرایند محاسبهٔ بیلان آب برای این شرایط، در جدول ۷–۷ نشان داده شد.

جدول ۷–۷. نمونه‌ای از فرایند محاسبهٔ بیلان آب

روز پس از آبیاری	آب باقیمانده در پروفیل خاک (اینچ)	تبخیر و تعرق گیاه (اینچ)	تبخیر و تعرق تجمعی (اینچ)
۰	۳/۶۶		
۱	۳/۵۱	۰/۱۵	۰/۱۴
۲	۳/۳۳	۰/۱۸	۰/۳۳
۳	۳/۱۹	۰/۱۴	۰/۴۷
۴	۳/۰۲	۰/۱۷	۰/۶۴
۵	۲/۸۳	۰/۱۹	۰/۸۳
۶	۲/۶۳	۰/۲۰	۱/۰۳
۷	۲/۴۲	۰/۲۱	۱/۲۴
۸	۲/۲۰	۰/۲۲	۱/۴۶
۹	۲	۰/۲	۱/۶۶
۱۰	۱/۸۲	۰/۱۸	۱/۸۴
۱۱	۱/۶۳	۰/۱۹	۲/۰۳
۱۲	۱/۴۶	۰/۱۷	۲/۲

در انتهای روز دوازدهم، ۲/۲ اینچ آب لازم است تا رطوبت پروفیل خاک را به ظرفیت زراعی بازگرداند.

اگر مقدار آبیاری یا بارندگی لازم برای بازگرداندن رطوبت خاک به حد ظرفیت مزرعه، بیش از حد مورد نیاز باشد، فرض می‌شود که مقدار مازاد به زیر ناحیهٔ ریشه نفوذ می‌نماید و بیلان روزانه، از حد ظرفیت مزرعه ثبت می‌گردد. درصورتی‌که بارندگی شدید سبب شود که قبل از رسیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت مزرعه رواناب رخ دهد، ضروری است مقدار بارش مؤثر نفوذیافته به خاک که برای استفادهٔ گیاه قابل دسترس است اندازه‌گیری یا برآورد شود. این مقدار به‌عنوان ورودی، به معادلهٔ بیلان اضافه می‌شود.

۷-۵-۶ مفاهیم مبتنی بر گیاه (plant-based concepts)

اصلی‌ترین مزیت اندازه‌گیری‌های مبتنی بر گیاه برای برنامه‌ریزی آبیاری، به‌واسطه این واقعیت است که رشد گیاه ارتباط مستقیمی با وضعیت آب گیاه دارد و تنها به طور غیر مستقیم، به رطوبت خاک و شرایط جوی وابسته است. گیاه ضرورتاً شرایط رطوبت خاک و محیط جوی را تلفیق می‌کند و شرایط غالب را در فرایندهای رشد منعکس می‌نماید. به‌دلیل اینکه سرعت تعداد زیادی از این فرایندهای رشد با وضعیت آب گیاه مرتبطند، اندازه‌گیری وضعیت آب گیاه می‌تواند داده‌های ارزشمندی را مبنی بر رشد و توسعهٔ گیاه حاصل نماید.

ساده‌ترین روش برای تعیین زمان آبیاری این است که برخی از خصوصیات بارز گیاه را در نظر گرفته و تغییرات آن را در روزهای بعد از آبیاری تعقیب کنیم. نمایه‌های ظاهری مانند شادابی برگ‌ها و شاخه‌ها و رنگ برگ‌ها از جمله پارامترهایی می‌باشند که با توجه به تغییر شدید آن‌ها در هنگام تشنگی گیاه، می‌توان زمان آبیاری را تعیین نمود. با اندازه‌گیری روزانهٔ قطر ساقه و ارتفاع گیاه، می‌توان به سرعت رشد پی برد و هر زمان که این سرعت متوقف گردید نشانهٔ آن است که باید آبیاری صورت گیرد. در استفاده از نمایه‌های ظاهری گیاه باید دقت کافی صورت گیرد تا عوامل دیگری که ممکن است در گیاه تغییرات ظاهری ایجاد نمایند، با تشنگی گیاه اشتباه گرفته نشوند. از جملهٔ این عوامل، می‌توان آفات و بیماری‌ها و برخی عوامل محیطی را نام برد.

یکی دیگر از نمایه‌های تشنگی گیاه، بالارفتن دمای برگ‌هاست. افزایش دمای برگ، نشانهٔ کاهش تعرق و بسته شدن نسبی یا کامل روزنه‌هاست. امروزه از دماسنج مادون قرمز، برای اندازه‌گیری دمای برگ یا تاج پوشش گیاهی استفاده می‌شود. با اندازه‌گیری دمای هوای اطراف و سطح برگ‌ها و از روی اختلاف آن‌ها، می‌توان به وضعیت آبی گیاه و نیاز آن به آبیاری پی برد. مناسب‌ترین زمان برای اندازه‌گیری دمای برگ، هنگامی است که ۱ تا ۱/۵ ساعت از ظهر خورشیدی گذشته باشد. از روزی که آبیاری صورت می‌گیرد، اختلاف دمای برگ و هوا هر روز اندازه‌گیری شده و مقادیر تجمعی آن‌ها در روزهای متوالی محاسبه می‌گردد. هنگامی‌که این مقدار به حد بحرانی رسید باید آبیاری انجام شود. حد بحرانی در مورد هر گیاه و هر نوع خاک متفاوت بوده

و باید از روی تجربه به‌دست آید. در طی روزهای اندازه‌گیری دما، ممکن است در برخی از روزها به‌دلایلی دمای هوا بیشتر از دمای برگ باشد که در محاسبهٔ اختلاف دمای تجمعی، این روزها منظور نمی‌شوند.

یکی دیگر از نمایه‌های گیاهی برای تعیین زمان آبیاری، پتانسیل آب برگ است. هر چه این پتانسیل کمتر باشد نشانهٔ این است که نیاز بیشتری به آب وجود دارد. مقاومت روزنه‌ها در برابر خروج آب، از جمله نمایه‌های دیگر برای تعیین زمان آبیاری است. زیرا مقاومت روزنه‌ها، در ارتباط با درجهٔ باز بودن روزنه است که خود تابعی از وضعیت آبی گیاه می‌باشد. هر چه مقاومت روزنه زیادتر باشد، نشانهٔ این است که نیاز به آب در گیاه بیشتر است. برای اندازه‌گیری مقاومت روزنه‌ها، از وسایلی به نام پرومتر (porometer) استفاده می‌شود.

کلیهٔ روش‌های مبتنی بر گیاه، زمان آبیاری را نشان می‌دهند اما اطلاعاتی دربارهٔ میزان آب آبیاری نمی‌دهند. اندازه‌گیری‌های پتانسیل آب برگ و اندازه‌گیری‌های دمای برگ یا تاج پوشش گیاهی تکنیک‌های برنامه‌ریزی بسیار خوبی فراهم می‌کنند، با تلفیق این تکنیک‌ها با اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک برای تعیین مقدار آب آبیاری مورد نیاز، می‌توان به یک برنامهٔ مدیریت آب خوب نائل شد.

۷-۵-۷ اتوماسیون در برنامه‌ریزی آبیاری

جذب آب گیاه، برای تأمین فرایندهای رشد و تبخیر و تعرق یک سیکل روزانه است. آب از ناحیهٔ ریشهٔ پرشوندهٔ دوره‌ای (منبع) (periodically replenished root zone) وارد گیاه و سپس وارد اتمسفر (مخزن) می‌شود. در انتهای یک سیکل آبیاری معمول (ذخیرهٔ رطوبتی خاک تخلیه شده) هدایت هیدرولیکی به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد و سیستم ریشه‌ای قادر نخواهد بود تا با سرعت کافی نیاز تبخیر و تعرق گیاه را تأمین کند و در نتیجه گیاه دچار تنش آبی یا کمبود آب خواهد شد.

با استفاده از روش‌های آبیاری دارای قابلیت بهره‌برداری متناوب (capable of operating frequently) مانند آبیاری بارانی، قطره‌ای و زیرزمینی، می‌توان رطوبت خاک را در حد نسبتاً ثابتی حفظ کرد. آن‌ها محیط خاک-آب-ریشه را تحت

کنترل آبیار قرار می‌دهند، خواه آبیار انسان یا کامپیوتر باشد. به‌دلیل اینکه هر گونه نقص در برنامهٔ آبیاری به‌طور خودکار تنش آبی یا هوایی خطرناکی را برای گیاه در پی خواهد داشت، کنترل آبیاری با تناوب زیاد باید خودکار و قادر به عکس‌العمل در برابر تغییرات کوچک و سریع در رطوبت خاک، آب گیاه یا تبخیر و تعرق باشد.

برنامه‌ریزی آبیاری‌های مکرر را می‌توان با کنترل پس خورد خودکار (automatic feedback control) که بر اساس پتانسیل آب خاک است تکمیل نمود. به‌دلیل اینکه ظرفیت ذخیرهٔ خاک مشخص است و آب به‌طور پیوسته مصرف می‌شود تا چرخهٔ پتانسیل آب را تأمین کند و این عمل متناسب با نرخ تبخیر و تعرق است، حاشیهٔ اطمینان کمتری برای خطا وجود دارد.

برای پایش رطوبت خاک و کنترل خودکار یک سیستم آبیاری، می‌توان از حسگرهای متعدد و کامپیوتر و ریزپردازنده‌ها استفاد کرد.

سؤالات فصل ۷

۱. تبخیر آب مایع از بافتهای گیاه ..... نام دارد.

الف) تبخیر　　ب) تعرق

ج) تبخیر و تعرق　　د) شبنم

۲. تبخیر و تعرق مرجع عبارتست از:

الف) تبخیر از سطح خاک و تعرق از سطح گیاه در شرایط طبیعی

ب) تبخیر از سطح خاک و تعرق از سطح گیاه در شرایط بدون تنش

ج) میزان تبخیر و تعرق از یک سطح مرجع بدون کمبود آب

د) کسر تبخیر و تعرق از کل آب ورودی به زمین

۳. کدام‌یک از عوامل زیر جزء عوامل مؤثر بر تبخیر و تعرق مرجع می‌باشد؟

الف) پارامترهای اقلیمی　　ب) پارامترهای مدیریتی

ج) پارامترهای زیست محیطی　　د) ضرائب گیاهی

۴. مقدار آب مورد نیاز برای جبران تلفات تبخیر و تعرق از مزرعه تحت کشت را ..... می‌گویند.

الف) تبخیر و تعرق مرجع ب) تبخیر و تعرق استاندارد
ج) نیاز آب آبیاری د) نیاز آبی گیاه

۵. معمولترین روش مستقیم تعیین تبخیر و تعرق، ..... است.
الف) معادلات تجربی ب) تشتک تبخیر
ج) روش‌های محاسبه‌ای د) استفاده از اصل بیلان جرمی

۶. روش ترکیبی برای برآورد تبخیر و تعرق، اولین بار توسط چه کسی ارائه شد؟
الف) بلانی کریدل ب) پنمن
ج) هارگریوز د) پنمن رایت

۷. کدام‌یک از گزینه‌های زیر درباره معادله فائو–پنمن–مونتیت صحیح نمی‌باشد.
الف) این روش تقریبا معتبرترین و دقیق‌ترین فرمولی است که تا کنون برای تخمین ET_0 ارائه شده است.
ب) در این روش گیاه مرجع یک پوشش چمن فرضی است که ارتفاع آن ۱۲ سانتی متر است.
ج) در این معادله سطح پوشش گیاهی یک سطح مرطوب است.
د) در این معادله سطح پوشش گیاهی، سطح آب در نظر گرفته شد.

۸. نسبت تبخیر و تعرق گیاه واقعی به تبخیر و تعرق گیاه مرجع ..... نام دارد.
الف) ضریب حساسیت ب) کمبود آب آبیاری
ج) ضریب گیاهی د) تبخیر و تعرق پتانسیل

۹. در معادله بلانی کریدل ضریب a به چه پارامترهایی بستگی دارد؟
الف) حداقل رطوبت نسبی هوا، سرعت باد، تعداد ساعات آفتابی واقعی و تعداد ساعات آفتابی پتانسیل
ب) حداقل رطوبت نسبی هوا، سرعت باد و تعداد ساعات آفتابی واقعی
ج) حداقل رطوبت نسبی هوا و سرعت باد
د) حداقل رطوبت نسبی هوا، سرعت باد، تعداد ساعات آفتابی واقعی، تعداد ساعات آفتابی پتانسیل و فشار هوا

۱۰. کدام روش مقدار تبخیر و تعرق را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌کند؟
الف) بلانی کریدل ب) پنمن فائو

ج) لایسیمتر د) تشتک تبخیر

۱۱. هدف برنامه ریزی آبیاری، ..... می‌باشد.

الف) مشخص کردن مقدار دقیق آب مورد استفاده در مزرعه و زمانبندی دقیق کاربرد آن

ب) پایش رطوبت خاک

ج) تعیین زمان آبیاری

د) تعیین مقدار آب مصرفی

۱۲. منظور از عمق جذب آب خاک چیست؟

الف) حداکثر عمق ریشه دوانی

ب) عمقی از خاک که گیاه بتواند مقدار آب قابل‌توجهی از آن جذب کند.

ج) یک چهارم بالایی ناحیه ریشه

د) یک چهارم پایینی ناحیه ریشه

۱۳. کدام‌یک از گزینه‌های زیر از نمایه‌های تشنگی گیاه است؟

الف) بالارفتن دمای برگ و افزایش تعرق

ب) پایین آمدن دمای برگ و افزایش تعرق

ج) بالارفتن دمای برگ و کاهش تعرق

د) پایین آمدن دمای برگ و کاهش تعرق

فصل هشتم

تنش‌های گیاهی

اهداف کلی

۱. آشنایی با مفهوم تنش آبی، دلیل بروز آن در گیاه و اثرات آن بر جنبه‌های مختلف گیاه
۲. تبیین روش‌های اندازه‌گیری تنش آبی در گیاهان
۳. درک رابطهٔ بین عملکرد گیاه با تبخیر و تعرق و آب مصرفی
۴. پی بردن به رابطهٔ بین شوری خاک و عملکرد گیاه، همچنین بررسی عوامل مؤثر بر شوری خاک

۸-۱ تنش آبی و رشد گیاه

تنش یا کمبود آب به شرایطی اطلاق می‌گردد که در آن سلول‌ها و بافت‌ها در وضعیتی قرار گرفتند که آماس آن‌ها کامل نیست. تنش آبی زمانی اتفاق می‌افتد که میزان تعرق بیش از مقدار جذب آب باشد. کاهش مقدار آب همراه با از بین رفتن آماس، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش رشد از علائم مخصوص تنش آبی می‌باشند. چنانچه شدت تنش آبی زیاد باشد، کاهش شدید فتوسنتز و مختل شدن فرایندهای فیزیولوژیکی، توقف رشد و سرانجام خشک شدن و مرگ گیاه را درپی خواهد داشت.

تعرق مهم‌ترین عامل کمبود آب در گیاه است. این نظریه، به‌ویژه در مورد کمبودهای موقتی اواسط روز صادق است. زیرا در روزهای آفتابی حتی در شرایطی که

خاک مرطوب باشد نیز علائم کمبود آب و پژمردگی دیده می‌گردد. گرچه تعرق زیاد باعث کمبود روزانهٔ آب در اواسط روز می‌شود ولی کاهش جذب که در اثر تقلیل قابلیت دسترسی به آب خاک به‌وجود می‌آید نیز مسئول دوره‌های طویل‌المدت تنش آبی بوده و منجر به کاهش شدید رشد گیاه می‌شود.

۸-۲ رطوبت خاک و رشد گیاه

به‌طورکلی با کاهش رطوبت خاک، رشد گیاه نیز کاهش می‌یابد. به علت تأثیر درجه حرارت بر تعرق، رشد گیاه در تابستان‌هایی که میزان بارندگی و درجه حرارت کمتر از متوسط می‌باشد بیش از تابستان‌هایی است که بارندگی و درجه حرارت است زیرا در این حالت تلفات آب زیاد می شود. همچنین رشد درختانی که در مناطق مرطوب می‌رویند در سال‌های خشک بیشتر از سال‌های مرطوب است زیرا اشباع بودن خاک و تهویهٔ ناکافی، باعث کاهش جذب آب می‌گردد.

۸-۳ قابلیت دسترسی نسبی رطوبت خاک

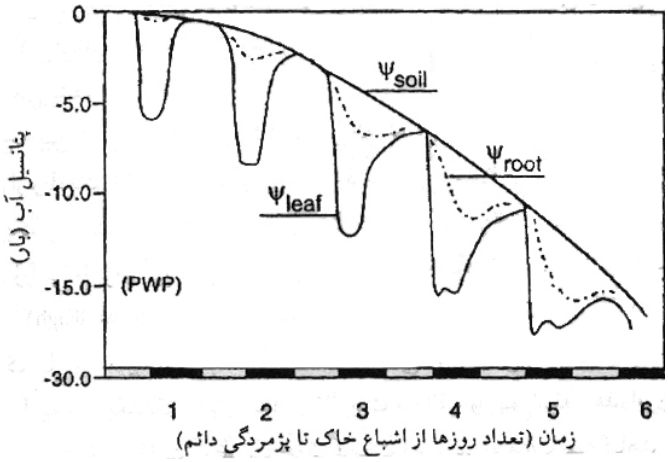
اختلاف نظرهایی دربارهٔ تعیین نقطه‌ای از رطوبت خاک که رشد گیاه را محدود می‌سازد وجود دارد. بر اساس یک نظریه، قابلیت دسترسی گیاه به آب از ظرفیت زراعی تا پژمردگی دائم یکسان است. برخی دیگر عقیده دارند که کاهش قابلیت دسترسی به رطوبت خاک قبل از پژمردگی دائم، باعث کم شدن رشد می‌شود. امروزه مورد قبول واقع شده است که با کاهش محتوای رطوبت خاک، قابلیت دسترسی به آن نیز کاهش می‌یابد ولی نمی‌توان نقطهٔ مشخصی را تعیین نمود که در آن نقطه، آب برای گیاه غیرقابل استفاده باشد. در صورت بالا رفتن تعرق، کمبودهای شدید آب و کاهش پتانسیل آب برگ در مدت کمتر از یک ساعت ظاهر می‌شود، ولی اکثر صدماتی که به گیاه وارد می‌آید در اثر تنش‌هایی است که در طی چندین روز کاهش ذخیرهٔ آب خاک ایجاد می‌گردد.

۸-۴ پیشرفت تدریجی تنش‌های آبی

شکل ۸-۱، تغییراتی را که در اثر کاهش تدریجی پتانسیل آب خاک در طی چندین روز

در گیاهان معرق به‌وجود می‌آید نشان می‌دهد. در این شکل، نوسانات روزانهٔ پتانسیل آب گیاه که در اثر تأخیر بین جذب و تعرق به‌وجود می‌آید مشاهده می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که در اثر عدم افزایش آب به خاک، پتانسیل‌های آب در خاک و گیاه برای چندین روز کاهش می‌یابد تا اینکه پتانسیل خاک و گیاه برابر شده و جذب آب توسط گیاه متوقف می‌گردد زیرا در این‌صورت، بین خاک و گیاه شیب پتانسیل آب وجود نخواهد داشت. در ابتدا وقتی پتانسیل آب خاک نسبتاً بالا است، پتانسیل گیاه در شب هم ارز پتانسیل خاک می‌شود ولی با کاهش پتانسیل خاک و هدایت آب خاک این وضعیت اتفاق نمی‌افتد زیرا سرعت حرکت آب به طرف ریشه به قدری کم است که نمی‌تواند جبران تلفات روزانه را بنماید. در این نقطه است که مطابق شکل ۸-۱، در روز چهارم و پنجم، پژمردگی دائم به‌وجود می‌آید.

در حالت دیگر زمانی‌که گیاه با از دست دادن آماس به پژمردگی می‌رسد، روزنه‌ها بسته می‌شوند. بسته شدن روزنه‌ها به نوبهٔ خود، موجب کاهش تعرق می‌گردد. در چنین شرایطی حرکت آب به طرف ریشه‌ها به قدری کند می‌شود که برگشت به حالت عادی در شب امکان‌پذیر نبوده و گیاه به‌طور دائم پژمرده می‌گردد. از این تجزیه و تحلیل چنین بر می‌آید که درصد پژمردگی دائم، بیشتر به‌وسیله پتانسیل اسموتیک برگ‌ها کنترل می‌شود تا به‌وسیله خصوصیات خاک. حال آنکه در عمل، نقطه پتانسیلی خاک را به‌عنوان نمایهٔ پژمردگی دائم (۱۵- اتمسفر) در نظر می‌گیرند.



شکل ۸-۱. تغییرات پتانسیل خاک و گیاه پس از آبیاری

۸-۵ تغییرات محتوای آب اندام‌های مختلف گیاه در زمان‌های مختلف

مقدار آب موجود در قسمت‌های مختلف گیاه، بسیارمتفاوت است. مقدار آب پوست درخت در بیشتر گونه‌ها بیش از مغز تنهٔ درخت می‌باشد. مقدار آب پوست درخت در گیاهانی که مقطع تنهٔ آن‌ها حلقوی است ۷۵ درصد، در گیاهانی با مقطع تنهٔ غیرحلقوی ۱۰۰ درصد و در گیاهانی که چوب ثانویه فاقد آوند است ۱۳۰ درصد می‌باشد. به‌طور کلی مقدار آب پوست درخت در گیاهان خزان شونده، در اوایل تابستان به حداکثر و در اواخر تابستان به حداقل می‌رسد و دوباره در اواخر پاییز و اوایل زمستان افزایش می‌یابد. مشخص شده است که به علت حجم نسبتاً زیادی که ساقهٔ گیاهان دارا می‌باشند این اندام‌ها نقش مخزنی را ایفا می‌کنند که گیاه به هنگام تعرق سریع، آب مورد نیاز خود را از آن دریافت می‌کند. بنابراین با توجه به اینکه تغییرات روزانه و فصلی محتوای آبی تنهٔ درختان زیاد است می‌توان بیان کرد که تنهٔ درخت در ذخیرهٔ آب نقش مؤثری به عهده دارد.

۸-۶ رقابت برای آب در داخل گیاه

چون قسمت‌های مختلف گیاه به طور متفاوت در معرض عوامل محیطی قرار دارند لذا تلفات آب از بخش‌های گوناگون شاخه یکنواخت نبوده و کمبود آب و نیز پتانسیل آن متفاوت می‌باشد. همچنین توانایی برای جذب آب در مراحل مختلف رشد، متفاوت است. آب مورد نیاز برگ‌های جوان و میوه‌ها از برگ‌های مسن تأمین می‌شود و اگر گیاه با تنش شدید آب مواجه گردد، ابتدا برگ‌های مسن از بین می‌روند. بین برگ‌ها و میوه‌ها برای جذب آب رقابت وجود دارد. بزرگ شدن انواع میوه‌ها در ساعاتی که تعرق سریع است کاهش می‌یابد. همچنین نمو میوه‌ها در شب سریع‌تر از روز است.

تغییرات مقدار آب و پتانسیل آن در قسمت‌های مختلف گیاه و رقابت اعضاء مختلف برای جذب آب، اشکالات فراوانی را در نمونه گیری و تعیین مقدار تنش آبی گیاهان ایجاد می‌کند.

۸-۷ دوره‌های تنش بحرانی گیاه (crop critical stress periods)

به‌طورکلی صدمات وارده در اثر تنش آبی، در برخی از مراحل بحرانی بیش از مراحل دیگر است. دورهٔ بحرانی هنگامی است که اندام‌های تناسلی گیاه تشکیل یافته و زمان

گرده افشانی و تلقیح فرا می‌رسد. تنش شدید آب در مرحلهٔ تولید ابریشم‌ها و کاکل ذرت، میزان محصول را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد. تنش آبی درخت زردآلو در اواخر تابستان موجب کاهش تعداد جوانه‌های گل می‌گردد. از طرف دیگر، بوته‌های قهوه قبل از آنکه آبیاری یا بارندگی موجب به گل نشستن آن‌ها شود، باید تحت تنش آبی قرار گیرند.

با در نظر گرفتن این موارد، مسلم است که اثر تنش آبی در مراحل مختلف رشد کاملاً متفاوت است. مثلاً آبیاری چغندرقند در دیویس کالیفرنیا نه تنها محصول را افزایش نداده است بلکه میزان قند آن را نیز کم کرده است، ولی آبیاری چغندرقند در لوگان یوتا باعث افزایش محصول و مقدار قند آن شده است. این اختلاف احتمالاً از اینجا ناشی می‌شود که کشت چغندر در دیویس زودتر از لوگان بوده است و در نتیجه برای انتشار سیستم ریشه‌ای و رشد گیاه قبل از فرا رسیدن گرما و خشکی، وقت زیادی وجود داشته است. بنابراین، ارزیابی اثرات آبیاری و خشکی در صورتی امکان‌پذیر است که بتوان تنش آبی را در فصل رویش اندازه‌گیری و سپس مشخص نمود که تنش آبی در چه زمانی اتفاق می‌افتد. دورهٔ بحرانی تنش آبی برای تعدادی از گیاهان در جدول ۸-۱ ارائه گردیده است.

جدول ۸-۱. دوره‌های بحرانی برای تنش آبی، علائم و برخی ملاحظات دیگر در ارتباط با برخی گیاهان مهم

گیاه	تنش آبی	دورهٔ بحرانی	سایر ملاحظات
یونجه	تیرگی رنگ و پژمردگی	اوایل بهار و بلافاصله پس از چیدن	به‌طور معمول ۳ تا ۴ اینچ آب بین دو چیدن متوالی لازم است. آبیاری پاییزه مطلوب است.
ذرت	تاخوردگی برگ‌ها در اواسط صبح	شروع کاکل دهی تا شکل گیری کامل دانه‌ها	برای تولید حداکثر از زمان سبز شدن تا مرحلهٔ dent نیاز به آب کافی دارد.
سورگوم	تا خوردگی برگ‌ها در اواسط صبح	مراحل ساقه دهی، گلدهی و خمیری	کمبود آب در مرحله توسعه دانه، عملکرد را کاهش می‌دهد
چغندر قند	گرمای روزانه سبب پژمردگی برگ‌ها می‌شود	Post thinning	آبیاری زیاد پاییزه مقدار شکر را کم می‌کند.
لوبیا	پژمردگی	گلدهی و تشکیل میوه	کمبود آب در مراحل گلدهی و شکل‌گیری میوه، سبب کاهش عملکرد می‌شود.

ادامهٔ جدول ۸-۱. دوره‌های بحرانی برای تنش آبی، علائم و برخی ملاحظات دیگر در ارتباط با برخی گیاهان مهم

گیاه	تنش آبی	دورهٔ بحرانی	سایر ملاحظات
ریزدانه	رنگ سبز دوگانه، سپس سوختگی برگ‌های پایینی	ساقه‌دهی و گلدهی	آخرین آبیاری در مرحله شیردهی است.
سیب‌زمینی	پژمردگی در طول گرمای روز	تشکیل غده تا برداشت	تنش آبی در طول دورهٔ بحرانی ممکن است سبب تغییر شکل غده شود.
پیاز	پژمردگی	شکل‌گیری پیاز	در زمان شکل‌گیری پیاز، خاک باید مرطوب باشد و با نزدیک شدن زمان برداشت خاک باید خشک شود.
گوجه فرنگی	پژمردگی	بعد از شکل‌گیری میوه	بیماری می‌تواند سبب پژمردگی و تاخوردن برگ شود.
چمن فصل خنک	رنگ سبز دوگانه و سپس پژمردگی	اوایل بهار، اوایل پاییز	برای تولید دانه، دورهٔ بحرانی از زمان شکل‌گیری ساقه تا تشکیل رأس است.
درختان میوه	تیرگی رنگ برگ‌ها و پژمرده شدن	هر نقطه در طول فصل رشد	میوه‌های هسته‌دار در طول آبیاری نهایی به تنش آبی حساسند.

۸-۸ اثرات عمومی تنش آبی بر رشد گیاه

تنش آب بر هر یک از جنبه‌های رشد مؤثر بوده و موجب تغییراتی از نظر آناتومی، مرفولوژی، فیزیولوژی و بیوشیمیایی میگردد. برخی از این اثرات مربوط به کاهش آماس، بعضی مربوط به کاهش پتانسیل آب و شاید برخی از آن‌ها مربوط به کاهش پتانسیل اسموتیک در گیاه باشد. واضح است که تنش طولانی آب موجب کاهش اندازهٔ گیاه می‌گردد. گرچه کاهش اندازهٔ سلول مهم‌ترین عامل کوچک ماندن اندازهٔ گیاه است، ولی تنش آبی تقریباً بر هر فرایندی از گیاه مؤثر بوده و علاوه بر آماس، در عوامل دیگری نیز دخالت دارند. آماس از لحاظ باز و بسته شدن روزنه ها، رشد برگ‌ها، گل‌ها و حرکات مختلف اعضاء گیاه نیز حائز اهمیت است. از طرف دیگر، فرایندهای آنزیمی نیز احتمالاً با پتانسیل آب کنترل می‌شوند.

پروتوپلاسم سلول و اجسام حل‌شدنی باید از نظر اسمزی در حالت تعادل قرار داشته باشند، بنابراین در سلول‌هایی که پتانسیل اسموتیک آن‌ها ۲۰- بار است مقدار آب پروتوپلاسم کمتر از سلول‌هایی است که پتانسیل اسموتیک آن‌ها ۱۰- بار است. درحالی‌که اگر در حالت آماس کامل قرار داشته باشند، پتانسیل آب هر دوی آن‌ها صفر است. گزارش شده است که کاهش محصول گیاهان زراعی، با کاهش پتانسیل اسموتیک شیرهٔ گیاه مرتبط است. مثلاً به ازای هر یک بار کاهش متوسط پتانسیل اسمتیک، میزان محصول دانه‌های جو ۶۰ کیلوگرم در هکتار و میزان کاه آن ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار تقلیل می‌یابد. حتی در سبزیجات، میزان تقلیل محصول به ازای کاهش هر واحد پتانسیل اسمتیک، از این نیز بیشتر می‌باشد.

معمولاً اثر تنش آبی بر رشد گیاه، تصاعدی است. مثلاً با بسته شدن روزنه‌ها میزان فتوسنتز تقلیل پیدا کرده و تأمین دی‌اکسیدکربن نیز کم می‌شود. تنش آبی، توانایی پروتوپلاسم برای عمل فتوسنتز را نیز کاهش می‌دهد که در نتیجهٔ آن، جابه‌جایی کربوهیدرات‌ها و مواد تنظیم کنندهٔ رشد تقلیل یافته و اختلال در متابولیسم ازت نیز به کاهش آماس و رشد می‌افزاید. کاهش رشد، باعث کاهش سطوح سنتز کنندهٔ نور شده و مقدار نسبی کربوهیدرات‌های موجود برای رشد در مقایسه با گیاهانی که تحت تنش قرار نگرفته‌اند کم می‌شود.

۸-۸-۱ ساختمان گیاه و تنش آبی

تغییر اندازهٔ ساختمانی گیاهان، تنها تأثیر تنش آبی بر گیاهان محسوب نمی‌گردد بلکه خصوصیات ساختمانی و به‌خصوص برگ‌های آن‌ها نیز تغییر می‌یابد. سطح برگ، اندازهٔ سلول‌ها و حجم منافذ بین سلولی معمولاً کاهش می‌یابد ولی مقدار کوتین، تعداد رگبرگ‌ها، روزنه‌ها و ضخامت لایه‌های پارانشیمی برگ‌ها افزایش می‌یابد. نتیجهٔ این وضعیت ضخامت نسبتاً زیاد، چرمی شدن و کوتینی شدن شاخ و برگ است که از خصایص گیاهان مقاوم به خشکی به حساب می‌آیند. تقریباً هر گیاهی که با تنش آبی مواجه گردد یکی از علائم فوق در آن مشاهده خواهد شد. یکی از مثال‌های مربوط به کاستن تنش آبی برای کسب ساختمان مورد نظر، سایه دادن برگ‌های توتون است تا بتوان برگ‌های نازک و بزرگی برای ساختن سیگار برگ تولید نمود.

تفاوت بین ساختمان برگ‌های قسمت‌های بالا و پایین درخت و نیز برگ‌هایی که در ساقه قرار دارند با برگ‌هایی که در معرض آفتاب می‌باشند، ناشی از اختلاف تنش آبی در آن‌هاست.

۸-۸-۲ سلول و تنش آبی

الف) تنش آبی و تقسیم سلولی. کمبود آب در بافت مریستمی، بیشترین تأثیر را بر فعالیت‌های سازندگی از قبیل ساختن DNA و RNA و مواد جدار سلول بجا می‌گذارد. البته برای بزرگ شدن سلول، وجود حداقل آماس مورد نیاز است. حساسیت منطقهٔ مریستمی نسبت به تنش آبی در گونه‌های مختلف متفاوت است. به نظر می‌رسد که اثر تنش آبی بر تقسیم سلولی، کمتر از اثر آن بر نمو سلول باشد.

مشاهدات نشان می‌دهد که حتی در مواقعی که آماس سلول کمتر از صفر می‌باشد، تقسیم سلولی متوقف نشده است. برخی محققین دریافتند که تولید DNA در بوته‌های گوجه فرنگی که در معرض تنش آبی قرار داشتند ادامه پیدا کرد که خود، مؤید این است که تقسیم سلولی نیز ادامه خواهد داشت.

ب) تنش آبی و اتساع سلول. کاهش آماس سلول باعث کاهش نمو سلول می‌شود که به نوبهٔ خود باعث کاهش نمو برگ، شاخه و ریشه‌ها می‌گردد. کاهش آماس همچنین بر دیگر فرایندهای وابسته به آماس سلول از قبیل باز شدن روزنه‌ها مؤثر است.

ج) اثرات پروتوپلاسمی تنش آبی. احتمالاً می‌توان گفت که اغلب اثرات تنش آبی، بستگی به از دست دادن آب پروتوپلاسم دارد. خارج ساختن قسمتی از آب اطراف مولکول‌های پروتئینی باعث تغییر ترکیب آن می‌شود که بر نفوذپذیری، درجهٔ آبکی بودن، گرانروی و فعالیت‌های آنزیمی آن مؤثر است. گزارش شده است که از دست دادن آب در مولکول‌های پروتئین برگ‌های کلم، باعث تغییر ترکیب آن و در نتیجه تغییر مقدار سولفیدریل می‌شود. همچنین تغییرات ناچیز پتانسیل اسموتیک باعث تغییرات زیاد ساختمان پروتئین و فعالیت‌های آنزیمی می‌گردد.

استوکر[1] دو مرحله را در ارتباط با از دست دادن آب مشخص کرده است: مرحلهٔ واکنش که مرحله اولیهٔ برخورد گیاه با تنش آبی است و مرحلهٔ جبران یا سخت شدن که در صورتی اتفاق می‌افتد که طول مدت تنش از چندین روز تجاوز نماید. گفته می‌شود که این دو مرحله، از طریق ساختمان پروتوپلاسم و فرایندهای فیزیولوژیکی مثل تنفس قابل تشخیص می‌باشند. از خصوصیات مرحلهٔ واکنش می‌توان کاهش لزجت پروتوپلاسم، افزایش نفوذپذیری نسبت به آب، اوره و گلیسیرین، تجزیهٔ پروتئین‌ها و افزایش تنفس را نام برد.

اگر تنش آبی ادامه یابد، مرحلهٔ جبران بروز می‌نماید که از خصوصیات آن افزایش گرانروی به مقدار بیش از حد اولیهٔ خود، کاهش نفوذپذیری نسبت به آب و اوره و کاهش فرایندهای فیزیولوژیکی از قبیل تنفس می‌باشد. اگر گیاه قبل از صدمات ناشی از پژمردگی دائم آبیاری شود، این فرایندها برگشت‌پذیر بوده و گیاه به حالت طبیعی خود باز می‌گردد.

۸-۸-۳ اثرات تنش آبی بر تنفس و فتوسنتز

تنش آبی از طریق بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فعالیت‌های سیستم پروتوپلاسمی و کاهش سطح برگ باعث کاهش فتوسنتز می‌گردد. برخی از پژوهشگران اظهار داشته‌اند که اغلب اثرات شدید خشکی عبارت از کاهش سطوح سنتز کنندهٔ نور و تولید مواد خشک است. علاوه بر این، کاهش مقدار فتوسنتز در هر واحد سطح برگ نیز مهم است. کاهش زیاد فتوسنتز در واحد سطح برگ‌های گیاهانی که با تنش آبی مواجه‌اند، مربوط به بسته شدن روزنه‌ها می‌باشد. این نظریه که کاهش تعرق و فتوسنتز به یک میزان صورت می‌گیرد، مؤید مطلب فوق است. آزمایشاتی روی گونه‌های آبزی و گیاهانی مثل گلسنگ و خزه که فاقد روزنه می‌باشند انجام شده است که نشان می‌دهد افزایش تنش آبی موجب تقلیل فتوسنتز می‌گردد.

به‌طورکلی، کاهش سرعت فتوسنتز از چند بار کمبود آب شروع شده و تقریباً در آماس صفر متوقف می‌گردد. هنگامی‌که که گیاهان تحت تنش، آبیاری می‌شوند برگشت فتوسنتز به حالت اولیه کندتر از برگشت تعرق است به‌عبارت دیگر، بازگشت مجدد به

1. Stocker, 1960

ظرفیت سنتزکنندگی پروتوپلاسم پس از خشک شدن، به زمان زیادی نیاز دارد.

۸-۸-۴ تنش آبی و متابولیسم کربوهیدرات‌ها

آزمایشات نشان داده‌اند که با افزایش آب در برگ‌ها میزان نشاستهٔ آن‌ها کاهش یافته و مقدار قند افزایش می‌یابد. البته افزایش مقدار قند در تمام گونه‌ها صادق نیست. احتمالاً تغییرات نسبت قندها و پلی‌ساکاریدها، مربوط به فعالیت‌های آنزیمی است.

بین گونه‌های مختلف گیاهان از نظر اثرات تنش آبی بر متابولیسم کربوهیدرات‌ها اختلافات زیادی وجود دارد. این واکنش از این لحاظ پیچیده است که غالباً کاهش تنفس کندتر از فتوسنتز بوده و باعث تخلیهٔ ذخیرهٔ مواد غذایی و تغییر خواص کربوهیدرات‌های مختلف می‌گردد.

۸-۸-۵ متابولیسم ازت و تنش آبی

برخی محققین گزارش کرده‌اند که پژمردگی گیاهان باعث افزایش اسیدهای آمینه شده و هیدرولیز پروتئین‌ها به حد قابل‌ملاحظه‌ای بالا می‌رود. مشاهده شده است که با افزایش تنش آبی در یک دورهٔ ده روزه در مرکبات، سه مرحله متمایز می‌گردد. در ابتدا قبل از پژمردگی مقدار آب شدیداً کاهش یافته و به مقدار بسیار کمی بر میزان پروتئین‌ها افزوده می‌گردد. علت این امر احتمالاً ادامهٔ تولید RNA است. سپس هیدرولیز پروتئین‌ها افزایش یافته و در انتها بر مقدار پروتئین‌ها اضافه می‌شود.

۸-۸-۶ اثر تنش آبی بر مواد تنظیم کنندهٔ رشد

لارسن[1] دریافت که تنش آبی، تولید اکسین را در نوک درختان متوقف می‌سازد. گزارش شده است که فعالیت‌های سیتوکنین در ترشحات آوندهای چوبی ریشهٔ بوته‌های آفتابگردانی که در معرض تنش قرار گرفته‌اند در مقایسه با گیاهان شاهد، به مقدار زیادی کاهش یافته است. از این نتایج بر می‌آید که سیتوکنین ریشه‌ها در متابولیسم برگ مهم بوده و تنش آبی موجب کاهش آن می‌گردد. همچنین احتمال می‌رود که جیبرلین‌های مورد نیاز شاخه، در ریشه‌ها ساخته شود.

---

1. Larson

از احتمال کاهش مواد تنظیم کنندهٔ رشد که در سطح ریشه‌ها ساخته شده و در اختیار شاخ و برگ قرار می‌گیرد، می‌توان به برخی اثرات تنش آبی پی برد. مثلاً اگر قسمتی از سیستم ریشهٔ گندم با کمبود جزئی آب به مقدار یک بار مواجه شود، بر متابولیسم آن مؤثر واقع خواهد شد. کاهش رشدی را که در اثر افزایش نمک و تقلیل پتانسیل آب محیط ریشه حاصل می‌شود، نمی‌توان صرفاً بر مبنای کم شدن میزان جذب توصیف نمود. شاید کاهش مقدار مواد تنظیم کنندهٔ رشد مثل سیتوکنین‌ها یا جیبرلین‌ها در ریشه، یکی از عواملی باشد که در کاهش رشد گیاهان تحت تنش مشاهده می‌گردد. همچنین ممکن است عامل پیری زودرس برگ‌های تحت تنش نیز کمبود همین مواد باشد.

۸-۸-۷ جابه‌جایی مواد تحت تأثیر تنش آبی

تنش‌های آبی در گیاهان باعث کاهش جابه‌جایی ترکیبات آلی به مقدار زیاد می‌گردد. گزارش شده است که اگر پتانسیل آب برگ‌های آفتابگردان به ۱۰- تا ۲۱- بار کاهش یابد، انتقال موادی که به‌وسیله فتوسنتز ساخته می‌شوند و با کربن ۱۴ نشان دار شده اند به یک سوم کاهش پیدا می‌کند. با کاهش نسبی مقدار آب برگ‌های لوبیا به میزان ۸۰ درصد نیز این پدیده مشاهده می‌گردد. احتمالاً کاهش انتقال مواد تولیدی در برگ‌ها، یکی از عوامل تقلیل فتوسنتز در گیاهانی باشد که تحت تنش آبی قرار گرفته‌اند. کاهش انتقال اکسید و دیگر مواد تنظیم کنندهٔ رشد ممکن است به همان اندازهٔ کاهش انتقال کربوهیدرات‌ها مهم باشد.

۸-۸-۹ آفات و بیماری‌ها و تنش آبی

بییر (۱۹۵۹)[1] گزارش نموده که حملهٔ قارچ‌های از بین برندهٔ پوست درخت بید، در صورتی مؤثر است که مقدار نسبی آب یعنی آماس نسبی به کمتر از ۸۰ درصد برسد. ایشان در مورد از بین رفتن پوست درخت تبریزی نیز به نتایج مشابه دست یافت.

شواهدی نیز وجود دارد که نشان می‌دهند حملهٔ حشرات خورنده‌ای که در قسمت داخلی پوست (خارج از چوب) زندگی می‌کنند، در فصل خشک بیشتر از فصل‌هایی است که تنش آبی کمتر اتفاق می‌افتد. همچنین گزارش شده است که

1. Bier

درختان کاج در مناطق خشک نسبت به حملهٔ سوسک‌ها، حساس‌تر از مناطق مرطوب می‌باشند.

۸-۹ اثرات مفید تنش آبی

تنش آبی همواره مضر نیست و در بعضی مواقع، علیرغم اینکه رشد گیاه را تقلیل می‌دهد می‌تواند در بهبود کیفیت محصولات گیاهی مؤثر واقع شود. مطالعات نشان می‌دهد که تنش جزئی آب، کیفیت میوه‌های سیب، گلابی، هلو و آلو را افزایش داده است. همچنین با افزایش تنش آبی در طی رسیدن دانه‌های گندم، میزان پروتئین آن‌ها بالا می‌رود. تنش آبی بر خاصیت معطر بودن توتون ترکی می‌افزاید و ازت و نیکوتین توتون سیگار را افزایش می‌دهد که خاصیت خوبی به‌شمار نمی‌رود. تنش آبی موجب افزایش روغن نعناع، افزایش درصد چربی زیتون و افزایش درصد روغن سویا می‌شود.

۸-۱۰ مقاومت گیاهان در مقابل تنش آبی

مقاومت در مقابل تنش آبی عبارت است از هر نوع روشی که گیاه به‌وسیله آن بتواند دوره‌های تنش آبی محیط را تحمل نماید. به‌طورکلی، مقاومت گیاهان در برابر بی آبی به دو روش عملی می‌شود: یکی اینکه پروتوپلاسم قادر است بدون وارد آمدن خسارتی کمبود آب را تحمل نماید و دیگر اینکه خصوصیات ساختمانی و فیزیولوژیکی به نحوی است که اثرات تنش آبی را به تعویق انداخته یا خنثی می‌کند.

۸-۱۰-۱ مقاومت در مقابل خشکی

ساختمان پروتوپلاسم تعداد زیادی از گلسنگ‌ها، خزه‌ها، برخی از سرخس‌ها و بذر گیاهان به گونه‌ای است که می‌توانند شرایط خشکی هوای آزاد را بدون آنکه از بین بروند تحمل نمایند. از گیاهان بذری می‌توان علف‌ها و بوته‌های مختلف کویری مثل درمنه را نام برد. بین گونه‌های مختلف علف‌ها، بوته‌ها و درختان مناطق نیمه‌کویری نیز از نظر مقاومت در برابر خشکی، تفاوت‌هایی موجود است. این تفاوت‌ها در مواردی که زنده ماندن گیاه بیش از محصول ارزش داشته باشد حائز اهمیت است. زیتون مثال بارزی از این موارد است زیرا می‌تواند به علت مقاومت زیاد برگ‌ها در مقابل خشکی،

در شرایطی که برای اغلب گیاهان بیش از حد خشک است رشد نماید.

در گیاهان زراعی، اختلاف مقاومت در برابر خشکی بی‌اهمیت است زیرا اگر خشکی زیاد ادامه پیدا کند این گیاهان از بین می‌روند. در این گیاهان، به مقدار محصول بیش از زنده ماندن گیاه توجه می‌شود و میزان محصول هم از زمانی که پتانسیل آب خاک به ۱- یا ۲- بار یعنی به مراتب قبل از مواجه شدن با خطر خشکی می‌رسد، شروع به کاهش می‌کند.

۸-۱۰-۲ اجتناب از خشکی

بیشتر مقاومت گیاهان مزوفیت در برابر خشکی، احتمالاً ناشی از خصوصیات فیزیولوژیکی و مرفولوژیکی آن‌ها است که موجب اجتناب یا تعویق انداختن تنش آبی در گیاه می‌گردد. سه نوع از این مقاومت‌ها وجود دارد که عبارتند از:

الف) تطبیق فصل رویش. در بسیاری از گیاهان یکسالهٔ کویری جوانه زدن، رشد و گل دادن طی چند هفته پس از بارندگی و خیس شدن سطح خاک صورت می‌گیرد. در طی چند هفته پس از بارندگی، این گیاهان قبل از ایجاد تنش شدید آبی، دورهٔ زندگی خود را به اتمام می‌رسانند.

گیاهان یکسالهٔ زمستانی نیز از خشکی تابستان دوری جسته و برخی از گونه‌ها مثل چمن‌های نوع مدیترانه‌ای، در طی فصل گرم و خشک به خواب می‌روند. مقدار محصول در انواع گیاهان زراعی که بتوان آن‌ها را زود کشت نمود تا قبل از رسیدن خشکی تابستان رشد خود را تکمیل نمایند، بیش از انواع دیررس است.

ب) پراکندگی زیاد سیستم‌های ریشه. یکی از راه‌های مطمئن مقابله در برابر صدمات ناشی از خشکی وجود ریشه‌های عمیق، پراکنده و پرانشعاب شبیه ریشه‌های ذرت خوشه‌ای است. گیاهانی مثل سیب‌زمینی، پیاز و کاهو که دارای ریشه‌های سطحی و کم انشعاب می‌باشند سریع‌تر از گیاهانی مثل یونجه، ذرت و گوجه‌فرنگی که ریشه عمیق دارند آسیب می‌بینند. ترکیبی از توانایی گیاه در ساختن ریشه‌های عمیق و شرایطی از خاک که مناسب ریشه‌های عمیق باشد، وضعیتی را به‌وجود می‌آورد که از نظر مقاومت در برابر بی آبی مفید است.

ج) کنترل تعرق. برخی از گیاهان با ریزش برگ‌های خود، در مقابل تنش آبی واکنش نشان می‌دهند. بسیاری از گیاهان با بستن روزنه‌ها از خود واکنش نشان می‌دهند. در هر دو روش، تلفات آب کاهش می‌یابد و طول عمر گیاهانی که با این روش‌ها عمل می‌کنند بیشتر از سایر گیاهان است. عکس‌العمل روزنه‌ها که با تنش آبی بسته می‌شوند همراه با لایهٔ کوتینی روی برگ‌ها، از عوامل مؤثر در کنترل تعرق است.

۸-۱۱ راندمان استفاده از آب

راندمان استفاده از آب، برحسب مقدار آبی که در ساختن هر واحد وزن خشک گیاه مصرف می‌گردد تعریف می‌شود و در مناطقی همچون ایران که منابع آب محدود است، حائز اهمیت می‌باشد. به‌طورکلی با افزایش محصول مادهٔ خشک، راندمان آب نیز بالا می‌رود زیرا تولید مواد خشک سریع‌تر از تلفات آب است. بنابراین اگر تراکم گیاهان پرمحصول که دارای ریشه‌های عمیق می‌باشند در حد مطلوب بوده و به مقدار کافی کودپاشی شوند، مقدار راندمان آبیاری آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. ولی حتی درشرایط مطلوب نیز برای تولید هر واحد وزن خشک، بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ واحد آب مصرف می‌گردد. دلیل این وضعیت این است که ساختمان فعال سنتزکنندهٔ نور موجب می‌شود مقدار زیادی بخار آب خارج گردد. تنها استثنا در بین گیاهان زراعی آناناس است که میزان تولید سالانه مواد خشک آن معادل نیشکر است، درصورتی‌که فقط ۱۰ الی ۲۱ درصد آن آب مصرف می‌کند. کم بودن تلفات آب به این دلیل است که روزنه‌های آناناس، تمام مدت روز بسته باشند.

رسیدن به حداکثر راندمان استفاده از آب عملی نیست زیرا برای کسب آن، لازم است که احیاناً حداکثر محصول تقلیل پیدا کند و این در اغلب مواقع به صرفه نمی‌باشد. مثلاً ممکن است با افزایش دفعات آبیاری، مقدار محصول افزایش پیدا کند ولی اگر میزان آبیاری زیاد شود مقدار محصول به ازای هر واحد آب مصرفی تقلیل می‌یابد. در بعضی موارد، کودپاشی باعث افزایش راندمان آب می‌شود.

۸-۱۲ سخت شدن

باید توجه داشت که صدمات وارد شده در اثر یک تنش ناگهانی آب، بسیار بیشتر از

یک تنش تدریجی در طی یک دورهٔ طولانی است. گیاهانی که یک یا چند دوره با تنش آبی مواجه‌اند به اصطلاح سخت شده و صدمات وارده بر آن‌ها در اثر خشکی، کمتر از گیاهانی است که قبلاً با تنشی مواجه نبوده‌اند. برخی محققین، سخت شدن را مربوط به تغییرات پروتوپلاسم در جهت افزایش گرانروی و ظرفیت آب پیوندی و نیز کاهش نفوذپذیری آن می‌دانند. این نظریه، دانشمندان را وادار نموده است که با اجرای برخی عملیات‌ها قبل از بذرافشانی، مقاومت گیاه را در مقابل خشکی افزایش دهند. مثلاً قبل از کشت، بذرها را در آب خیسانده و سپس در هوا خشک می‌کنند و یا اینکه دوباره در محلول آب نمک قرار می‌دهند. هنکل اظهار داشته است که نتایج خوبی از این عمل گرفته است.

افزایشی که در نسبت ریشه به شاخه، کوچکی برگ‌ها، ضخامت لایهٔ کوتینی و رگبرگ‌های متراکم گیاهان تحت تنش مشاهده می‌شود، احتمالاً در مواردی که گیاه مجدداً مواجه با تنش آبی می‌گردد مفید است. این خصوصیات باعث می‌شود هنگامی‌که روزنه‌ها بر اثر تنش آبی بسته می‌شوند، آب کافی در اختیار بافت‌ها قرار گرفته و میزان تعرق پایین نگهداشته شود. بنابراین گیاهانی که قبلاً با تنش آبی مواجه شده‌اند، ممکن است بر تلفات آب کنترل بهتری داشته باشند تا گیاهانی که قبلاً تحت تنش نبوده‌اند. از سویا می‌توان به‌عنوان یک مثال نام برد که پس از مواجه شدن با تنش آبی میزان تعرق آن پایین می‌آید، زیرا مقدار چربی در سطح برگ گیاهان تحت تنش زیادتر از سایر گیاهان است.

برخی گیاهان اگر تحت تنش قرار گیرند رشد سریع پیدا می‌کنند و بهتر از زمانی که مقدار زیادی آب در اختیار دارند به حیات خود ادامه می‌دهند. بوته‌های جوان گیاهان علفی غالباً قبل از نشاء با کاهش مقدار آب سخت می‌شوند.

گرچه عموماً تنش آبی باعث کاهش رشد گیاه می‌شود ولی مشاهده شده است که رشد گیاهان تحت تنش پس از آبیاری مجدد، سریع‌تر از گیاهان مشابهی بوده است که مواجه با تنش آبی نبوده‌اند. میلر[1] مشاهده کرده است که اگر با آبیاری مجدد تنش آبی نهال‌های کاج برطرف گردد نمو ساقه برای مدت زیادی افزایش می‌یابد. شاید در گیاهان تحت تنش، کربوهیدرات‌ها و ترکیبات ازته تجمع حاصل نموده و با تأمین مجدد آب، مورد استفاده قرار گرفته و انگیزهٔ رشد سریع را فراهم می‌آورند.

1. Miller, 1965

۸-۱۳ اندازه‌گیری تنش آبی در گیاهان

مهم‌ترین قسمت روابط آب و گیاه، عبارت است از توازن داخلی آب یا میزان تنش آبی در گیاه. زیرا این توازن موجب کنترل فرایندهای فیزیولوژیکی و شرایطی می‌شود که کیفیت و کمیت رشد گیاه به آن‌ها بستگی دارد. تخمین تنش آبی از روی اندازه‌گیری مقدار آب خاک یا سرعت تبخیر و تعرق، در بعضی از موارد مفید می‌باشد. ولی با این روش نمی‌توان اطلاعات قابل اطمینانی را در مورد ارزیابی اثرات مقدار آب بر فرایندها و رشد گیاهان کسب نمود. تنها شاخص قابل اطمینان برای تنش آبی اندازه‌گیری مستقیم آن در گیاه است.

۸-۱۳-۱ چه چیزی باید اندازه‌گیری شود؟

سعی شده است که تنش آبی برحسب مقدار آب، آماس نسبی یا مقدار نسبی آب، کمبود اشباع و حتی اندازهٔ سوراخ‌های روزنه ارزیابی گردد. شاید یکی از دلایل عدم وجود یک روش مشخص در اندازه‌گیری تنش آبی گیاه این است که معلوم نیست چه چیزی باید اندازه‌گیری شود. مسلما باید خاصیتی اندازه‌گیری شود که رابطهٔ آن با فرایندهای فیزیولوژیکی اساسی گیاه بسیار نزدیک باشد. علاوه بر مقدار آب، سه خاصیت دیگر سلول مهم می‌باشند: پتانسیل اسمتیک، فشار یا پتانسیل آماس و پتانسیل آب. بر اندازه‌گیری پتانسیل اسمتیک، به‌عنوان شاخص وضعیت آب سلول تأکید شده است زیرا پتانسیل اسموتیک سلول‌ها بر مقدار آب آن‌ها مؤثر است. در هر صورت پتانسیل اسموتیک در بین گونه‌های مختلف گیاهان متفاوت بوده و مقدار طبیعی آن در هالوفیت‌ها (گیاهان مناطق شور) به مراتب کمتر از مزوفیت‌ها (گیاهان مناطق شیرین) می‌باشد.

روشن است که پتانسیل آماس در نمو سلول و اندازهٔ سوراخ روزنه‌ها مهم است ولی اندازه‌گیری مستقیم فشار آماس مشکل می‌باشد. معمولاً اندازهٔ آن از اختلاف پتانسیل آب سلول و پتانسیل اسموتیک با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\Psi w=\Psi_s+\Psi_p+\Psi_m \qquad (۱-۸)$$

در این رابطه؛ Ψ_w پتانسیل آب، Ψ_s پتانسیل اجسام حل شدنی (اسمزی)، Ψ_p پتانسیل فشاری و Ψ_m پتانسیل ماتریک می‌باشند.

۸-۱۳-۲ مشکلات نمونه‌برداری

صرفنظر از روشی که به‌کار گرفته می‌شود، استفاده از نمونه‌های قابل مقایسه حائز اهمیت فراوان است. بسیاری از اندازه‌گیری‌ها روی برگ انجام می‌شود زیرا دسترسی و امکان نمونه‌گیری آسان بوده و برگ‌ها از نظر فیزیولوژی نیز مهم می‌باشند. برگ‌ها در برابر تنش آب، شاخص حساسی به‌شمار می‌روند ولی وضعیت آب آن‌ها بسیار متفاوت است. مثلاً برگ‌های جوان و مسن از نظر مقدار آب و پتانسیل اسموتیک با یکدیگر تفاوت دارند. این تفاوت‌ها در برگ‌هایی که در سایه یا آفتاب قرار گرفته و یا در پایین و یا بالای گیاه قرار می‌گیرند نیز محسوس است. چنانچه برگ‌هایی که از نظر سن یا نحوهٔ قرارگیری متفاوت هستند و یا در زمان‌های مختلف روز نمونه‌برداری شده‌اند با هم مقایسه شوند، اشتباهات زیادی حاصل می‌گردد. باید دقت شود که در مقدار آب نمونه‌ها در طی زمان جمع‌آوری و نیز بعد از آن، تغییری حاصل نشود. نمونه‌ها را باید در ظرف سربسته‌ای در سایه قرار داده و هر چه زودتر اندازه‌گیری انجام گیرد. عملیات آماده نمودن نمونه از قبیل بریدن برگ‌ها و قرار دادن در داخل محفظهٔ سایکرومتر، باید در داخل اتاق مرطوبی انجام گیرد.

۸-۱۳-۳ اندازه‌گیری مستقیم آب

قدیمی‌ترین روش تعیین وضعیت آب گیاه، محاسبهٔ آن برحسب درصد وزن تازه یا خشک گیاه است.

الف) مقدار آب براساس وزن خشک. برای محاسبهٔ مقدار آب بر حسب وزن خشک، معمولاً مواد مورد استفاده را در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد خشک می‌کنند زیرا درجه حرارت‌های بالا گاهی اوقات باعث از بین رفتن مواد خشک می‌شوند. این روش به‌خصوص در مورد برگ‌هایی که وزن خشک آن‌ها در طی دورهٔ حیات زیاد افزایش می‌یابد، رضایت‌بخش نیست. مثلاً وزن خشک برگ‌های گلابی از اردیبهشت تا مرداد، حدود ۲۵۰ درصد افزایش می‌یابد و موجب می‌شود که درصد آب آن نیز به همین نسبت تغییر کند. درحالی‌که مقدار مطلق آب هر برگ، در اکثر دوره‌ها ثابت باقی می‌ماند. فتوسنتز، تنفس و جابجا شدن مواد باعث تغییرات قابل‌توجهی در مقدار اجسام حل شدنی برگ شده و سبب تغییرات روزانهٔ وزن خشک برگ می‌گردند.

ب) مقدار آب براساس وزن تازه. غالباً مقدار آب براساس وزن تازه بیان می‌شود ولی به علت نوسانات زیاد مقدار آب، این روش رضایت‌بخش نیست. از طرف دیگر وزن تازه، نسبت به تغییرات کوچک مقدار آب حساس نیست. برخی محققین اظهار کردند که کاهش مقدار آب از ۸۵ به ۸۰ درصد وزن تازه، نمایانگر تلفات ۲۵ گرم آب در هر ۱۰۰ گرم بافت برگ یعنی ۳۰ درصد مقدار آب اولیه است.

ج) مقدار نسبی آب. به علت اشکالاتی که در به‌کار گرفتن وزن خشک یا تازه دیده می‌شود، برخی محققین مقدار آب برگ را برحسب درصد مقدار آب آماس ذکر کرده اند. استوکر[1] برگ‌های جدا نشدهٔ گیاه را در داخل محفظهٔ مرطوبی قرار داد تا وزن آن تثبیت گردد و سپس مقدار کمبود آب را به شرح زیر محاسبه نمود:

$$\text{کمبود آب} = \frac{(\text{وزن تازه} - \text{وزن آماس})}{(\text{وزن خشک} - \text{وزن آماس})} \times ۱۰۰ \qquad (۸-۲)$$

مقدار نسبی آب نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{مقدار نسبی آب} = \frac{(\text{وزن خشک} - \text{وزن تازه})}{(\text{وزن خشک} - \text{وزن آماس})} \times ۱۰۰ \qquad (۸-۳)$$

$$\text{مقدار نسبی آب} = ۱۰۰ - \text{کمبود آب} \qquad (۸-۴)$$

اندازه‌گیری مقدار نسبی آب یا کمبود آب، می‌تواند روش مناسبی در تعیین مقدار آب به‌شمار آید. زیرا تغییرات وزن خشک، موجب بروز اشتباهات در اندازه‌گیری نمی‌گردد. متأسفانه یک مقدار معین کمبود آب یا مقدار نسبی آب در برگ‌هایی که از نظر سن، گونه و شرایط محیطی متفاوت می‌باشند تولید یک مقدار ثابت پتانسیل آب را نمی‌نماید، بنابراین مقایسهٔ آن در بافت‌های مختلف صحیح نیست.

۸-۱۳-۴ اندازه‌گیری غیرمستقیم مقدار آب

توسعهٔ دستگاه اندازه‌گیری بتا توانسته است روش مناسبی را در اندازه‌گیری غیر مستقیم تغییرات مقدار آب برگ فراهم سازد. منبعی از اشعهٔ بتا در یک طرف برگ و گیرندهٔ اشعه در طرف دیگر برگ قرار می‌گیرد. مقدار اشعهٔ جذب شده توسط بافت برگ با

1. Stocker, 1929

تغییرات مقدار ماده در هر واحد سطح متغیر است. در یک زمان کوتاه، تغییرات ماده یعنی ضخامت برگ به میزان زیادی متناسب با تغییرات مقدار آب است. متأسفانه ضخامت برگ‌های مختلف متفاوت بوده و حتی در یک برگ نیز ضخامت از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر تفاوت دارد.

۸-۱۳-۵ تخمین‌های کمّی تنش آبی

می‌توان از حالت ظاهری برگ‌هایی که با کاهش جزئی مقدار آب پژمرده می‌شوند، پیدایش تنش آبی را به‌طور کمّی تخمین زد. یک شاخص حساس، بسته شدن بی موقع روزنه‌هاست زیرا حساسیت سلول‌های محافظ نسبت به تنش آبی زیاد است. علاوه بر این، بسته شدن روزنه‌ها فتوسنتز را نیز کاهش می‌دهد. همچنین می‌توان وضعیت آب را در گیاهانی که سیستم مجاری شیرابه‌ای آن‌ها توسعه یافته است، از روی فشار شیره تخمین زد. ولی این روش‌ها فقط شاخص پیدایش تنش آبی هستند و هیچ اطلاعاتی راجع به اندازهٔ کمّی یا شدت آن به‌دست نمی‌دهند.

۸-۱۳-۶ اندازه‌گیری پتانسیل آب

مفیدترین خاصیت واحدی که بتوان از روی آن تنش آبی را مشخص کرد، پتانسیل آب است. برخی از روش‌های اندازه‌گیری پتانسیل آب تشریح می‌گردد.

الف) تعادل مایع. قدیمی‌ترین روش اندازه‌گیری تنش آبی این است که بافت‌ها را در محلول‌هایی که پتانسیل اسموتیک متفاوتی دارند فرو برده و پتانسیل اسموتیک محلولی که بافت گیاه در آن نه اضافه وزن و نه کاهش وزن پیدا نموده است تعیین می‌گردد. گاهی اوقات این کار با اندازه‌گیری تغییرات اندازهٔ سلول‌ها صورت می‌گیرد ولی غالباً تغییرات طول قطعات بافت تعیین می‌شود.

این روش در مورد بافت‌هایی که جدار سلول‌های آن‌ها نازک بوده و فاقد آوندهای بزرگ باشند به‌خوبی عمل می‌نماید. در روش وزنی، قطعاتی از بافت را وزن نموده و آن‌ها را برای مدتی در محلول‌های مختلف فرو می‌بریم. سپس قطعات بافت را خارج ساخته و پس از خشک شدن، مجدداً توزین می‌کنیم. اشتباهاتی که ممکن است

به‌وقوع بپیوندد از: نفوذ محلولی که بافت در آن فرو برده شده است، عدم خشک شدن یکنواخت سطح و کاهش وزن در حین جابه‌جایی و توزین، سرچشمه می‌گیرند. اندازه‌گیری در بافت‌هایی که تا حد پلاسمولیز آب خود را از دست داده‌اند غیر ممکن است. روش وزنی فقط در مورد بافت‌های گوشتی مناسب است، زیرا تهیهٔ تعداد زیادی نمونهٔ قابل مقایسه از برگ‌های نازک یا دیگر قسمت‌های گیاه عملی نیست.

روش مفید دیگر در طریقهٔ تعادل مایع که در آن می‌توان برخی از اشکالات ذاتی روش توزین را برطرف نمود، اندازه‌گیری تغییرات غلظت محلولی است که بافت در آن فرو برده شده است. در این روش، نمونه‌هایی از بافت متشابه را در داخل محلول‌های ساکاروز که دامنهٔ تغییرات پتانسیل اسموتیک آن‌ها در حد تغییرات پتانسیل بافت تحت آزمایش می‌باشد قرار می‌دهند. اندازه‌گیری‌های انکسارسنجی هر کدام از این محلول‌ها، قبل و پس از قرار گرفتن نمونه به مدت چند ساعت اندازه‌گیری می‌شود. بافت‌ها در محلول‌هایی که پتانسیل آن‌ها زیادتر است آب دریافت می‌کنند و ازاین‌رو تخمین پتانسیل آب ساده می‌شود.

حالت دیگری از این روش که غالباً به‌کار گرفته می‌شود استفاده از مواد رنگی است. در این روش، لوله‌های آزمایش را در سری‌های دوگانه از محلول‌های ساکاروز که دامنه تغییرات پتانسیل اسموتیک آن‌ها در حد تغییرات پتانسیل بافت می‌باشد پر می‌نمایند. نمونه‌هایی از بافت برگ را در هر محلول قرار داده و یک سری از لوله‌ها به‌عنوان شاهد باقی می‌مانند. پس از مدتی (معمولاً ۲ تا ۸ ساعت) نمونه‌ها را خارج می‌نمایند و به هر کدام از لوله‌ها مقداری مادهٔ رنگی از قبیل متیلن آبی یا متیلن نارنجی اضافه می‌کنند تا اندکی رنگین شوند. قطره‌ای از محلول رنگین را با قطره چکان برداشته و به لولهٔ شاهد منتقل می‌سازند. اگر محلول رنگین با آزمایش به‌وسیله بافت گیاهی رقیق شده باشد، قطرهٔ رنگی صعود می‌کند. اگر محلول با بافت گیاه غلیظ شده باشد، قطره به پایین سقوط می‌نماید. پتانسیل محلولی که در آن قطرهٔ تحت آزمایش نه صعود کند و نه سقوط، برابر پتانسیل آب برگ است.

ب) تعادل بخار. با اندازه‌گیری تنش آبی به روش تعادل بخار می‌توان از اشتباهات روش‌های تعادل مایع اجتناب نمود. قدیمی‌ترین روش این است که

نمونه‌هایی از بافت را توزین نموده و داخل ظروف سربسته که محتوی محلول‌های با پتانسیل اسموتیک مختلف است قرار می‌دهند. این ظروف به مدت چند ساعت داخل حمام آب گذاشته شده و سپس دوباره توزین می‌گردند. محلولی که وزن آن تغییر نکرده است دارای پتانسیل معادل پتانسیل بافت است.

ج) تعادل فشار. در این روش یک شاخهٔ برگ‌دار به‌نحوی داخل محفظهٔ فشار گذاشته می‌شود که قسمت بریدهٔ آن بیرون قرار گیرد. سپس به شاخه فشار وارد می‌شود تا آن که شیرهٔ آوندی در سطح بریدگی ظاهر شود. مقدار فشاری که لازم است از سطح برگ به سلول‌ها وارد آید تا آب را به آوندها برگرداند، معادل پتانسیل آب سلول‌های برگ است.

۸-۱۴ روابط عملکرد - تبخیر و تعرق

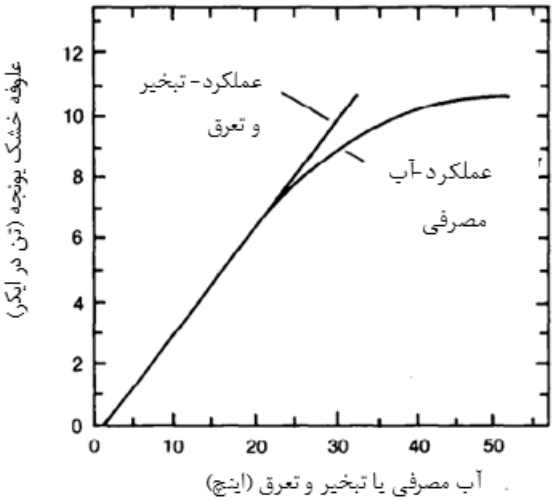
میزان آبی که صرف تبخیر و تعرق می‌شود تا بیشترین عملکرد محصول در یک منطقه حاصل شود به اقلیم، خاک و خصوصیات گیاه بستگی دارد. وجود یک منبع آب آبیاری برای دستیابی به عملکرد بالای محصول ضروری است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شوری یک مسألهٔ بالقوه است که باید در زمان آبیاری مورد توجه قرار گیرد. درصورتی‌که کمبود آب خاک بیشتر از حد آستانهٔ قابل تحمل گیاه در یک مرحلهٔ خاص از رشد گیاه گردد، تنش آبی حاصله منجر به کاهش تبخیر و تعرق شده و در نتیجه عملکرد نیز متناسب با آن کاهش می‌یابد. در سال‌های اخیر، شناخت این خصوصیت منجر به تدوین توابع ریاضی گردید که این رابطهٔ مستقیم را توصیف می‌کنند. معمولاً مطالعات مربوط به توسعهٔ توابع عملکرد -تبخیر و تعرق تحت شرایط عدم محدودیت شوری انجام گرفته است که البته تا حدودی ناخوشایند است زیرا در حال حاضر عموم عقیده دارند که اثرات مضر شوری زیاد، از کاهش تبخیر و تعرق حاصل می‌شود که این عامل ارتباط مستقیمی با کاهش عملکرد محصول دارد. در صورت عدم اثر یون‌های سمی خاص که می‌توانند بر عملکرد تأثیر داشته باشند، می‌توان اثرات عملکرد- تبخیر و تعرق و عملکرد- شوری را در قالب یک تابع عملکرد - تبخیر و تعرق نشان داد.

۸-۱۴-۱ مفاهیم توابع تولید

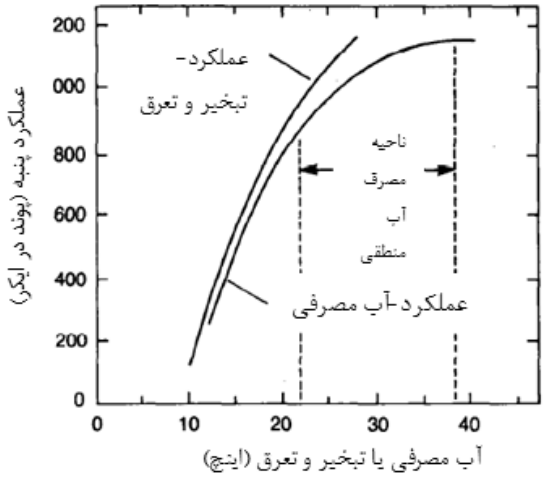
درصورتی‌که توابع تولید براساس داده‌هایی باشد که از برنامه‌ریزی مناسب آبیاری برای دستیابی به حداقل کاهش عملکرد در نتیجهٔ کمبود مشخص آب استفاده کنند، می‌توانند وسیلهٔ مفیدی برای تجزیه و تحلیل روابط عملکرد- آب باشند. توابع پاسخ آب (water response functions) برای گیاهان مختلفی تهیه شده است. اگرچه متغیرهای زیادی برای کمّی کردن مقدار آب مورد استفاده در فرایند تولید استفاده می‌شوند، سه مورد از مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: تبخیر و تعرق، آب مصرفی و رطوبت خاک. تبخیر و تعرق بیشترین اثر و پتانسیل را برای انتقال‌پذیری بین خاک‌ها و مناطق جغرافیایی دارد. میزان آب مصرفی یک متغیر قابل کنترل بوده و از لحاظ اقتصادی، نشان دهندهٔ ملاحظات مربوط به هزینه است. وضعیت رطوبت خاک رابطه‌ای را بین تبخیر و تعرق و آب مصرفی ایجاد می‌کند و به‌عنوان یک شاخص برای مدیریت و یکنواختی پخش سیستم آبیاری است.

۸-۱۴-۲ توابع تولید عملکرد-تبخیر و تعرق

برای تعداد زیادی از گیاهان و در شرایط رشد مختلف، رابطهٔ بین تبخیر و تعرق (ET) و عملکرد تا مقادیر تبخیر و تعرقی که متناسب با حداکثر عملکرد باشد، خطی است؛ این رابطه به‌ویژه برای گیاهانی که جرم تودهٔ خشک روی زمین آن‌ها معرف عملکرد باشد، صحیح است. این نوع واکنش برای عملکرد یونجهٔ خشک در کل فصل رشد و تبخیر و تعرق، در شکل ۸-۲ نشان داده شده است. تقریباً ۳۳/۵ اینچ (۸۵ سانتی‌متر) برای دستیابی به حداکثر عملکرد ۱۰/۷ تن در ایکر (۲۴ تن در هکتار)، برای منطقهٔ مورد مطالعه (درهٔ سن خواکین) مورد نیاز بود. شکل ۸-۳، رابطهٔ بین عملکرد پنبه (cotton yield) و تبخیر و تعرق را که غیرخطی است، نشان می‌دهد. انحنای کم این تابع، به ماهیت نسبتاً پیچیدهٔ جزءبندی رشد رویشی- زایشی نسبت داده می‌شود با این وجود، برای گیاهان دیگر مانند ذرت و سورگوم مشاهده شده است که توابع خطی بین نمو دانه یا رشد رویشی و تبخیر و تعرق وجود دارد.



شکل ۸-۲. نمونه‌ای از توابع تولید برای یونجه



شکل ۸-۳. یک نمونه تابع تولید پنبه

۸-۱۴-۳ روابط عملکرد-آب مصرفی

شکل‌های ۸-۲ و ۸-۳ نشان می‌دهند که یک تابع آب مصرفی (AW) با افزایش ET و آب مصرفی، به‌طور پیشرونده از تابع ET جدا می‌شود. این امر، عمدتاً به علت افزایش

زهکشی در زیر ناحیهٔ ریشه و مقادیر بیشتر AW باقیمانده در پروفیل خاک در انتهای فصل رشد می‌باشد که به‌طور مستقیم با سطح مدیریت مزرعه مرتبط است.

محدودهٔ مصرف آب منطقی (rational water use zone) در شکل ۸-۳ رسم شده است. آب مصرفی برای دستیابی به حداکثر عملکرد، حد بالایی است و AW مورد نیاز برای دستیابی به متوسط حداکثر محصول (maximum average product) (نسبت عملکرد به آب مصرفی)، حد پایینی است. مقدار آب مصرفی برای دستیابی به حداکثر سود، همواره در محدودهٔ منطقهٔ ورودی منطقی (rational input zone) قرار می‌گیرد. افزودن آب اضافی مازاد بر مقدار متناظر با حداکثر عملکرد، می‌تواند منجر به کاهش عملکرد گردد که دلایل آن عبارت است از: آبشویی مواد غذایی، تهویهٔ کم و رشد زیاد رویشی.

۸-۱۴-۴ توابع تولید محصول نسبت به آب

اگر فرض شود که مقدار محصول در شرایطی که گیاه بدون تنش آبی است Y_m بوده و در چنین شرایطی مجموع تبخیر و تعرق در طی رشد ET_m باشد، مسلما با کاهش تبخیر و تعرق و قرار گرفتن گیاه تحت تنش آبی مقدار محصول کاهش پیدا کرده و به y می‌رسد که کمتر از Y_m است. نسبت y به Y_m که مقدار نسبی محصول تولیدی است، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{Y}{Y_m}=[1-\beta(1-\frac{ET}{ET_m})] \qquad (۸-۵)$$

در این رابطه؛ ET_m تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مورد نظر و Y_m مقدار محصول (ماده خشک) تولیدی به ازای ET_m است. ET مقدار واقعی تبخیر و تعرق و Y مقدار واقعی محصول است. β شیب منحنی تغییرات $\frac{ET}{ET_m}$ نسبت به $\frac{Y}{Y_m}$ است که باید برای هر گیاه به‌صورت تجربی به‌دست آید.

با توجه به اینکه صدمات وارده در اثر تنش آبی در برخی مراحل رشد بیش از مراحل دیگر است در برخی از معادله‌های توابع، تولید محصول نسبت به آب مراحل

مختلف رشد نیز در نظر گرفته شده است. مثلاً معادله‌ای که جنسن برای پیش‌بینی مقدار محصول نسبت به آب پیشنهاد نموده است به‌صورت زیر است:

$$\frac{Y}{Y_m} = (\frac{ET_1}{ET_{m1}})^{\lambda 1}.(\frac{ET_2}{ET_{m2}})^{\lambda 2}...(\frac{ET_i}{ET_{mi}})^{\lambda i} \qquad (۶-۸)$$

در این رابطه؛ Y_m حداکثر محصول تولیدی در شرایط بدون تنش آبی، Y مقدار محصول در شرایط تنش آبی، ET_1، ET_2، ...، ET_i تبخیر و تعرق واقعی در مراحل مختلف رشد که با علائم ۱، ۲ ...و i مشخص شده‌اند، ET_{m1}، ET_{m2}، ...، ET_{mi} تبخیر و تعرق پتانسیل (ماکزیمم) در مراحل مختلف رشد که با علائم ۱، ۲ ...و i مشخص شده اند، λ_1، λ_2، ... و λ_i ضریب حساسیت گیاه به کم آبی در مراحل ۱ و ۲ و ... و i.

۸-۱۴-۵ اثرات شوری

نمک‌های محلول در آب آبیاری که در شوری خاک نقش دارند، سبب افت عملکرد محصول برای مقادیر شوری بیشتر از حد آستانه می‌شوند. افت عملکرد، عموماً در ارتباط با کاهش اندازهٔ گیاه و تبخیر و تعرق کمتر می‌باشد. برای مقدار مشخص آب آبیاری و بار نمک آن، در طول یک دورهٔ طولانی، تعادلی بین تبخیر و تعرق، آبشویی، شوری خاک و عملکرد محصول برقرار خواهد شد. تحت این شرایط، اثرات مضر شوری منجر به کاهش عملکرد محصول می‌گردد که این مهم با کاهش تبخیر و تعرق مرتبط است.

معمولاً گیاهان، شوری را بدون کاهش عملکرد تا سطح آستانهٔ معین تحمل می‌کنند. با افزایش شوری در خارج از این حد، عملکرد به‌طور خطی کاهش می‌یابد تا جایی که دیگر تولید محصول ممکن نباشد. جدول ۸-۲، از این مفهوم برای طبقه‌بندی گیاهان از نظر حساسیت به شوری در ۴ گروه تحت عنوان: حساس (S)، نسبتاً حساس (MS)، نسبتاً مقاوم (MT) و مقاوم (T) استفاده می‌کند. در این جدول، مقادیر آستانه (a) و شیب (b) تابع خطی کاهش عملکرد، با افزایش شوری بیان شدند. طبقه‌بندی‌های مذکور مطلق نبوده و هر کدام دامنه یا طیف نسبتاً وسیعی را دربرمی‌گیرند.

جدول ۸-۲. مقاومت برخی گیاهان نسبت به شوری

گیاه	a	b	طبقه	گیاه	a	b	طبقه
جو	۸	۵	T	برنج	۳/۶	۱۲	S
لوبیا	۱	۱۹	S	بادام‌زمینی	۳/۲	۲۹	MS
باقلا	۱/۶	۹/۶	MS	چغندرقند	۷	۵/۹	T
ذرت	۱/۷	۱۲	MS	نیشکر	۱/۷	۷/۱	MS
پنبه	۷/۷	۵/۲	T	گندم	۶	۷/۳	MT
نخود	۴/۹	۱۲	MT	یونجه	۲	۱۲	MS
کتان	۱/۷	۱۲	S	شبدر برسیم	۱/۵	۶/۲	MS
کلم	۱/۸	۹/۷	SMS	کرفس	۱/۸	۱۳	MS
هویج	۱	۱۴	S	خیار	۲/۵	۱۲	MS
کاهو	۱/۳	۱۳	MS	سیب زمینی	۱/۷	۱۳	MS
پیاز	۱/۲	۱۶	S	تربچه	۱/۲	۷/۶	MS
فلفل	۱/۵	۱۴	MS	اسفناج	۲	۹	MS
کدو	۳/۲	۱۶	MS	شلغم	۰/۹	۹/۹	MS
توت فرنگی	۱	۳۳	S	گوجه‌فرنگی	۲/۵	۲۴	MS
بادام	۱/۵	۱۹	S	زردآلو	۱/۶	۹/۶	S
خرما	۴/۶	۳/۶	T	انگور	۱/۵	۱۹	MS
گریپ‌فروت	۱/۸	۱۶	S	پرتقال	۱/۷	۱۸	S
هلو	۱/۷	۲۱	S	آلو	۱/۵		S

از نظر علمی معیاری که شوری با آن سنجیده می‌شود، هدایت الکتریکی عصارهٔ اشباع (ECe) خاک مربوط به منطقهٔ توسعهٔ ریشه‌هاست. چون غالباً نمونه گیری از خاک و تهیهٔ عصارهٔ اشباع از آن وقت گیر است، هدایت الکتریکی آب آبیاری (ECw) تعیین شده و از روی رابطه تجربی زیر، هدایت الکتریکی عصارهٔ اشباع خاک تخمین زده می‌شود. چون ECe مربوط به هدایت الکتریکی عصارهٔ اشباع خاک منطقهٔ توسعهٔ ریشه‌هاست، معمولاً ECe را حدود ۱/۵ برابر ECw در نظر می‌گیرند:

$$EC_e = ۱/۵\ EC_w \qquad (۷-۸)$$

غالباً تمام گیاهان تا حدی از شوری عصارهٔ اشباع را بدون اینکه عملکردشان کاهش یابد تحمل می‌کنند. این حد را آستانهٔ شوری گویند که با علامت a نشان داده می‌شود. مثلاً آستانهٔ شوری در مورد گیاهان علفی حساس ۱/۲۵، در مورد گیاهان نسبتاً حساس ۳، در گیاهان نسبتاً مقاوم ۶ و در گیاهان مقاوم ۱۰ دسی زیمنس بر متر[1] می‌باشد. به عبارت دیگر، گیاهی مقاوم به شوری است که اگر هدایت الکتریکی عصارهٔ اشباع خاک تا ۱۰ میلی موس بر سانتی‌متر برسد، هیچ‌گونه کاهش عملکردی در آن مشاهده نگردد. چنانچه شوری عصارهٔ اشباع از این حد فراتر رود با افزایش شوری، عملکرد نسبی محصول نیز به‌صورت خطی کاهش پیدا می‌کند ولی شیب این خط در گیاهان مختلف متفاوت است. مثلاً در گیاهان حساس شیب این خط زیاد و در گیاهان مقاوم کمتر است.

شیب خط که آن را با علامت b نشان می‌دهیم، در واقع مقدار کاهش نسبی محصول به‌ازای افزایش هر واحد شوری بعد از حد آستانه است. با این توصیف، می‌توان مقدار نسبی محصول را از معادلهٔ خطی زیر برای هر گیاه به‌دست آورد:

$$Y_r = ۱۰۰ - b\ (EC_e - a) \qquad (۸-۸)$$

در این رابطه؛ Y_r مقدار نسبی محصول در مقایسه با خاک غیر شور و EC_e شوری عصارهٔ اشباع خاک است. مثلاً اگر جو را که مقادیر a و b آن به ترتیب ۸ و ۵ دسی زیمنس بر متر است، با آبی که شوری آن ۹ میلی موس بر سانتی‌متر است، آبیاری کنیم:

$$EC_e = ۱٫۵ \times ۹ = ۱۳٫۵\ ds/m$$
$$Y_r = ۱۰۰ - ۵(۱۳٫۵ - ۸) = ۷۲٫۵$$

که مشخص می‌شود مقدار محصول نسبی۷۲/۵ درصد است یعنی با آبیاری زراعت جو با چنین آبی، مقدار محصول نسبت به آب یا خاک غیر شور ۲۷/۵ درصد کاهش خواهد داشت و اگر در شرایط غیر شور به فرض ۷ تن محصول در هکتار به‌دست آید، در این وضعیت نباید بیش از ۵ تن در هکتار انتظار محصول داشت.

---

۱. یک دسی زیمنس بر متر معادل یک میلی موس بر سانتی‌متر است.

باید توجه شود که مقاومت به شوری، به تعداد زیادی از متغیرهای گیاهی، خاک و اقلیمی بستگی دارد. متوسط زمانی شوری (time averaged salinity) مربوط به ناحیهٔ ریشه، به‌وسیلهٔ تعدادی فرایند خشک شدن خاک که بین آبیاری‌ها یا بارندگی‌ها رخ می‌دهد، تعیین می‌شود. پتانسیل‌های اسمزی و ماتریک در طی خشک شدن کاهش می‌یابند و طبق عقیدهٔ کلی، مجموع این دو پتانسیل، کل پتانسیل آب خاک است که گیاه به آن پاسخ می‌دهد. با تخلیهٔ آب از پروفیل خاک دارای توزیع غیریکنواخت املاح، پتانسیل کل آب قابل جذب در کلیهٔ عمق‌ها تمایل می‌یابد که به سمت پتانسیل یکنواخت نزدیک شود. به‌دنبال آبیاری یا بارندگی، گیاهان ابتدا آب را از مناطقی از ناحیهٔ ریشه که تنش اسمزی کمی دارد یا منطقهٔ دارای شوری کمتر پروفیل خاک، جذب می‌کنند (معمولاً عمق کمتر ناحیهٔ ریشه). با افزایش پتانسیل ماتریک در پروفیل بالاتر خاک، کل تنش آبی در کل پروفیل خاک یکسان خواهد شد تا زمانی‌که نمک بیشتری در قسمت پایین‌تر ناحیهٔ ریشه جمع شود. آبیاری با تناوب بیشتر برای حفظ رطوبت زیاد در پروفیل بالایی خاک، حتی با وجود شوری قابل توجه در ناحیهٔ پایینی ریشه، باعث کاهش تنش آبی می‌گردد.

عوامل گیاهی (plant factors)

درصورتی‌که گونه‌های گیاهی بر اساس حساسیت کلی‌شان به شوری طبقه‌بندی شوند، ممکن است انعطاف‌پذیری قابل‌توجهی به‌واسطهٔ انتخاب متنوع به‌دست آید، به‌ویژه در خانوادهٔ گراس (گرامینه Gramineae). توجه به تفاوت‌های ریشه‌ای (rootstock differences) در امر مقاومت نسبت به شوری و یون‌های سمی، برای انگور و درختان میوه حائز اهمیت است. گونه‌های چوبی متعدد، سطوح مقاومتی را نشان می‌دهند که مرتبط با خصوصیات تجمعی ریشه‌ها است.

برای برخی گیاهان، حساسیت به شوری، با مرحلهٔ رشد تغییر می‌کند که به‌ویژه در رابطه با غلات صادق است. برنج، جو، گندم، و ذرت در مرحلهٔ ظهور (emergence) و رشد جوانهٔ اولیه (early seedling growth)، در مقایسه با مرحلهٔ جوانه‌زنی (germination) و مراحل رشد نهایی و توسعهٔ دانه (grain development) نسبت به شوری، حساسیت بیشتری نشان می‌دهند.

عوامل خاک

بلافاصله پس از آبیاری، غلظت نمک در محلول خاک در کمترین مقدار ممکن قرار می‌گیرد. به‌واسطهٔ تبخیر و تعرق، با نزدیک شدن به زمان آبیاری بعدی این محلول غلیظ‌تر می‌شود. همان‌گونه‌که قبلاً ذکر شد، با آب و خاک خیلی شور، تناوب‌های بیشتری در آبیاری برای به حداقل رساندن تنش‌های شوری مورد نیاز است با این وجود، آبیاری متناوب‌تر ممکن است به‌ویژه در خاک‌های ریزبافت منجر به مشکلات تهویه‌ای شود.

گیاهانی که در خاک‌های غیرحاصلخیز رشد می‌کنند ممکن است مقاومت به شوری ظاهری زیادی از خود نشان دهند زیرا شوری عامل محدود کنندهٔ رشد نمی‌باشد. کوددهی صحیح، عملکرد بیشتری را حاصل می‌کند اما به نظر می‌رسد حساسیت به نمک را افزایش دهد.

عوامل اقلیمی

مشاهده شده است که دما، رطوبت و آلودگی هوا به‌طور قابل‌توجهی بر تحمل شوری تأثیر دارند. با افزایش نیاز تبخیری (دمای زیاد و رطوبت نسبی کم)، گیاهان زیادی مقاومت به شوری کمتری نشان می‌دهند. مشاهده شده است که اثرات مضر اوزون با حفظ سطوح متوسط شوری تعدیل می‌شود. این واکنش ممکن است برای برخی گیاهان برگدار (leafy vegetables) و گیاهان علوفه‌ای (forage crops) از اهمیت زیادی برخوردار باشد.

۸-۱۴-۶ اثرات یون‌های خاص

تعداد اندکی از یون‌های خاص در غلظت‌های نسبتاً کم، به‌طور مستقیم اثر سمی بر گیاهان حساس بجا می‌گذارند. درختان و گیاهان زینتی چوبی نسبت به غلظت‌های کم سدیم و کلر حساسند؛ گیاهان یک‌ساله این درجه از حساسیت را نشان نمی‌دهند. بور بر تعداد زیادی از گونه‌های گیاهی اثر منفی می‌گذارد. مطالعات در ارتباط با حساسیت گیاه نسبت به یون‌های خاص معمولاً حاکی از آن است که در مورد یون‌های سدیم و کلر، جذب به داخل سیستم ریشهٔ گیاه، دارای اهمیت مساوی؛ با جذب از طریق برگ‌های خیس شده با آبپاش می‌باشد.

بور ممکن است هم در خاک و هم در آب آبیاری وجود داشته باشد. بور می‌تواند در خاک آبشویی شود ولی انجام آن مشکل است. به‌منظور جلوگیری از اثر سمی بور موجود در آب آبیاری، بایستی مبادرت به سویچینگ (switching) منابع آب، در صورت امکان، یا انتخاب گیاه با حساسیت کمتر نمود. در جدول ۸-۳ گیاهان با درجات حساسیت مختلف نسبت به بور ارائه گردیده‌اند.

جدول ۸-۳. طبقه‌بندی تحمل گیاهان نسبت به بور

حساس	نیمه مقاوم	مقاوم	حساس	نیمه مقاوم	مقاوم
لیمو	لوبیا	هویج	پرتقال	گوجه‌فرنگی	کلم
گریپ فروت	سیب‌زمینی	کاهو	انگور	کدو تنبل	پیاز
آووکادو	فلفل	شلغم	زردآلو	جو	باقلا
هلو	یولاف	زنبق	گیلاس	ذرت‌خوشه‌ای	یونجه
خرمالو	ذرت	خرما	انجیر	گندم	چغندرقند

۸-۱۴-۷ اثرات اسیدیتهٔ خاک بر رشد گیاه

خیلی از پارامترهای خاک با تغییر اسیدیتهٔ خاک، تغییر می‌کنند بنابراین تعیین دلیل دقیق رشد ضعیف گیاه در خاک‌های اسیدی مشکل است. با این وجود، آزمایش‌های زیادی بر تفاوت ناهنجاری‌های تغذیه‌ای که در شرایط مزرعه‌ای رخ می‌دهند تأکید می‌نمایند.

کمبود کلسیم در خاک‌های اسیدی، مانعی برای رشد گیاه است همانند کمبودهای منیزیم و مولیبدن. معمولاً وجود فسفر، به خاک‌های اسیدی محدود می‌شود. علاوه بر اثرات مستقیم اسیدیته بر وضعیت شیمیایی عناصر غیرآلی، مقاومت جمعیت‌ها و فعالیت‌های میکروارگانیسم‌ها که مسئول تبدیلات نیتروژن، فسفر و گوگرد هستند، مقدار این عناصر را برای گیاهان کاهش می‌دهند.

سؤالات فصل ۸

۱. مهم‌ترین عامل کمبود آب در گیاه، در مورد کمبودهای موقتی اواسط روز، چیست؟

الف) تعرق ب) تنش آب

ج) تبخیر د) بسته شدن روزنه‌ها

۲. کدام گزینه صحیح نیست؟
الف) به‌طورکلی با کاهش رطوبت خاک، رشد گیاه نیز کاهش می‌یابد.
ب) تنش آب زمانی اتفاق می‌افتد که میزان تبخیر بیش از مقدار جذب آب باشد.
ج) تنش آب به شرایطی اطلاق می‌گردد که در آن سلول‌ها و بافت‌ها در وضعیتی قرار گرفتند که آماس آن‌ها کامل نیست.
د) تنش آب زمانی اتفاق می‌افتد که میزان تعرق بیش از مقدار جذب آب باشد.
۳. دوره بحرانی رشد گیاه ذرت از لحاظ تنش آبی چه مرحله‌ای است؟
الف) گل‌دهی
ب) ساقه‌دهی
ج) طول فصل
د) شروع کاکل دهی تا شکل‌گیری کامل دانه‌ها
۴. کدام‌یک از خصوصیات مرحله واکنش یا مرحله اولیه برخورد گیاه با تنش آب نیست؟
الف) کاهش لزجت پروتوپلاسم
ب) افزایش نفوذپذیری نسبت به آب
ج) کاهش تنفس
د) افزایش تنفس
۵. با افزایش آب در برگ‌ها میزان نشاسته آن‌ها ..... یافته و مقدار قند ..... می‌یابد.
الف) کاهش- افزایش
ب) کاهش-کاهش
ج) افزایش- افزایش
د) افزایش- کاهش
۶. کدام گزینه صحیح نیست؟
الف) با افزایش تنش آبی در طی رسیدن دانه‌های گندم میزان پروتئین آن بالا می‌رود.
ب) تنش آبی بر خاصیت معطر بودن توتون ترکی می‌افزاید.
ج) تنش آبی ازت و نیکوتین توتون سیگار را افزایش می‌دهد.
د) تنش آبی موجب کاهش روغن نعناع می‌شود.
۷. تنها شاخص قابل اطمینان برای مشخص کردن تنش آب در گیاه، ..... است.
الف) اندازه‌گیری رطوبت خاک
ب) اندازه‌گیری مستقیم تنش در گیاه
ج) اندازه‌گیری عملکرد محصول
د) اندازه‌گیری ارتفاع گیاه

۸. قدیمی‌ترین روش تعیین وضعیت آب گیاه، ..... است.
الف) محاسبه آن بر حسب درصد وزن تازه یا خشک گیاه
ب) محاسبه مقدار نسبی آب
ج) محاسبه کمبود آب
د) اندازه‌گیری غیرمستقیم مقدار آب

۹. درصورتی‌که در یک منطقه تبخیر و تعرق ذرت در طی دوره رشد ۶۰ سانتیمتر و مقدار محصول به ازای این مقدار آب ۱۸ تن در هکتار باشد، اگر زراعت تحت تنش قرار گرفته و تبخیر و تعرق آن در دوره رشد به ۳۷ سانتیمتر برسد، عملکرد محصول چند تن در هکتار می‌گردد؟
الف) ۰٫۵۲ ب) ۹٫۳۶
ج) ۵۲ د) ۹۳٫۶

۱۰. پتانسیل نیاز آبی سورگوم در مراحل سه‌گانه رشد به ترتیب ۲۲، ۲۶ و ۲۰ سانتیمتر و به ازای این مقدار آب ۱۸ تن در هکتار محصول تولید می‌شود. اگر در این مراحل تنها ۱۵، ۲۰ و ۱۸ سانتیمتر آب به مزرعه داده شود مقدار محصول چقدر خواهد شد؟
الف) الف) ۰٫۵۲ ب) ۹٫۳۶
ج) ۵۲ د) ۹۳٫۶

۱۱. حداکثر محصول گوجه‌فرنگی در یک مکان خاص ۱۹٫۱ تن در هکتار بوده است. این مقدار محصول برای شرایطی است که گیاه در طول فصل به اندازه ۷۷٫۵ سانتیمتر تبخیر و تعرق داشته باشد. نسبت کاهش محصول برای این رقم از گوجه‌فرنگی ۱٫۲۷ می‌باشد. آزمایشات زراعی در منطقه‌ای که این رقم را وارد کردیم نشان داد که توان تولید این گوجه‌فرنگی ۱۳٫۸ تن در هکتار است. در منطقه جدید اگر ۱۵ درصد کمبود تبخیر و تعرق نسبت به حداکثر تبخیر و تعرق محلی اعمال کنیم، مقدار محصول چقدر خواهد بود؟ با اعمال این کمبود، مقدار تبخیر و تعرق فصلی گیاه چقدر می‌شود؟
الف) ۲٫۱۱، ۵۲٫۳ ب) ۲٫۱۱، ۳٫۵۲
ج) ۱۱٫۲، ۵۲٫۳ د) ۱۱٫۲، ۳٫۵۲

انجمن علمی مهندسی کشاورزی کویر سبز
دانشگاه پیام نور رضوانشهر صدوق
www.pnu.gigfa.com
agripnu@gmail.com