

# رابطه آبِ خاک و گیاه

تألیف:

دکتر افشین سلطانی

با همکاری:

مهندس ابوالفضل فرجی

۱۳۹۳



انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد

مشهد، میدان آزادی، پردیس دانشگاه، سازمان مرکزی جهاد دانشگاهی

ص. پ. ۹۱۷۷۵-۱۳۷۶ / تلفن: ۸۳۲۳۶۷، ۲-۸۳۲۳۶۰

www.jdmppress.com / info@jdmppress.com

رابطه آب خاک و گیاه

تألیف: دکتر افشین سلطانی، مهندس ابوالفضل فرجی

طرح جلد از داوود مرگان

لیتوگرافی مشهد اسکندر / چاپ و صحافی چاپخانه سعید

چاپ سوم ۱۳۹۳ / ۱۱۰۰ نسخه / شماره نشر ۳۲۹

ISBN: 964-324-135-1

شابک ۹۶۴-۳۲۴-۱۳۵-۱

کلیه حقوق نشر برای ناشر محفوظ است.

قیمت: ۸۵.۰۰۰ ریال

## به نام خداوند جان و خرد

کتاب بزرگترین دستاورد فرهنگی بشر است. دانش بشری مدیون هزاران هزار کتابی است که در طول تاریخ با رنج و تلاش فراوان گرد آمده‌اند. کتاب تداوم معرفت علمی انسان است که سرانجام به تراکم دانش و بروز دگرگونی‌های تمدنی می‌انجامد.

جهاد دانشگاهی مشهد بر این باور است که نخستین گام در راه بهبود ساختارهای اقتصادی-اجتماعی و توسعه کشور، دستیابی به تازه‌های دانش و نشر یافته‌های پژوهشگران است. کتاب حاضر سیصد و بیست و نهمین اثری است که با همین رویکرد منتشر می‌شود. رهنمودهای خوانندگان فرهیخته می‌تواند ما را در ارتقای سطح کیفی و کمی این آثار یاری نماید.

**انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد**

# فهرست

۱۱

پیشگفتار

## ۱- رابطه آب خاک و گیاه، چرا؟

- ۱-۱ چگونگی اهمیت آب برای فرایند تولید توسط گیاه (دریافت و تبدیل تشعشع) ..... ۱۳
- ۱-۲ نقش آب در پراکندن انرژی و کمک به تداوم حیات گیاه از این طریق ..... ۱۴
- ۱-۳ سایر نقش‌های مهم آب در گیاهان ..... ۱۴

## ۲. ویژگی‌های آب و محلول‌های آبی

- مقدمه ..... ۱۷
- ۲-۱ ویژگی‌های فیزیکی آب ..... ۱۷
- ۲-۱-۱ پیوند هیدروژنی ..... ۱۷
- ۲-۱-۲ گرمای نهان ذوب آب ..... ۲۰
- ۲-۱-۳ ظرفیت گرمایی ویژه آب ..... ۲۱
- ۲-۱-۴ گرمای نهان تبخیر آب ..... ۲۱
- ۲-۱-۵ غیرقابل فشرده شدن آب ..... ۲۲
- ۲-۱-۶ گرانروی یا ویسکوزیته آب ..... ۲۲
- ۲-۱-۷ نیروهای چسبندگی و پیوستگی آب ..... ۲۳
- ۲-۱-۸ کشش سطحی ..... ۲۴
- ۲-۱-۹ صعود کاپیلاری آب ..... ۲۵
- ۲-۱-۱۰ استقامت کششی آب ..... ۲۶
- ۲-۱-۱۱ ثابت دی‌الکتریک ..... ۲۷
- ۲-۱-۱۲ چگالی و فشار بخار ..... ۲۸
- ۲-۲ ویژگی‌های شیمیایی آب ..... ۲۹
- ۲-۲-۱ تعریف و اهمیت ..... ۲۹
- ۲-۲-۲ پتانسیل آب و اجزای آن ..... ۳۲
- ۲-۳ ویژگی‌های محلول‌های آبی ..... ۴۰
- ۲-۳-۱ ویژگی‌های کولیگاتیو ..... ۴۰
- ۲-۳-۲ ارتباط پتانسیل اسمزی با کاهش نقطه انجماد ..... ۴۱
- ۲-۴ کیفیت آب برای آبیاری ..... ۴۱
- ۲-۴-۱ شفافیت ..... ۴۱
- ۲-۴-۲ دما ..... ۴۲
- ۲-۴-۳ BOD و COD ..... ۴۲
- ۲-۴-۴ عناصر غذایی و مواد آلی ..... ۴۲
- ۲-۴-۵ شوری ..... ۴۲
- ۲-۴-۶ سدیم ..... ۴۳

### ۳. روابط آب سلول

۴۵	مقدمه
۴۵	۳-۱ ساختمان سلول
۴۶	۳-۱-۱ غشای پلاسمایی
۴۸	۳-۱-۲ سیتوپلاسم
۴۸	۳-۱-۳ واکوئل
۴۹	۳-۲ توزیع آب در سلول‌ها
۴۹	۳-۲-۱ دیواره سلولی
۵۰	۳-۲-۲ سیتوپلاسم
۵۱	۳-۲-۳ واکوئل‌ها
۵۱	۳-۲-۴ تغییرات وضعیت آب سلول
۵۳	۳-۳ حرکت آب و مواد محلول از غشاها
۵۳	۳-۳-۱ انتقال فعال و غیرفعال
۵۴	۳-۳-۲ مکانیزم اسمز
۵۵	۳-۳-۳ حرکت آب از غشا
۵۶	۳-۴ تنظیم اسمزی
۵۷	۳-۵ نمودار هافلر

### ۴. پتانسیل آب و اجزای آن در خاک، گیاه و اتمسفر

۵۹	مقدمه
۵۹	۴-۱ پتانسیل آب و اجزای آن در خاک
۶۰	۴-۱-۱ پتانسیل ثقلی
۶۰	۴-۱-۲ پتانسیل اسمزی
۶۱	۴-۱-۳ پتانسیل ماتریک
۶۱	۴-۱-۴ پتانسیل فشاری
۶۲	۴-۲ پتانسیل آب و اجزای آن در گیاه
۶۳	۴-۲-۱ پتانسیل اسمزی
۶۳	۴-۲-۲ پتانسیل ماتریک
۶۴	۴-۲-۳ پتانسیل فشاری
۶۵	۴-۲-۴ پتانسیل ثقلی
۶۶	۴-۳ پتانسیل آب در اتمسفر
۶۷	۴-۴ روش‌های اندازه‌گیری مقدار آب و پتانسیل آن در خاک
۶۷	۴-۴-۱ اندازه‌گیری مستقیم آب خاک
۶۸	۴-۴-۲ استفاده از نوترون متر
۷۱	۴-۴-۳ استفاده از دستگاه تابش گاما
۷۲	۴-۴-۴ روش انعکاس سنجی زمانی
۷۳	۴-۴-۵ تانسومتر
۷۴	۴-۴-۶ بلوک‌های مقاومت الکتریکی
۷۶	۴-۴-۷ ترموکوپل سایکرومتر
۷۶	۴-۴-۸ اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک
۷۷	۴-۴-۹ اندازه‌گیری پتانسیل اسمزی

۷۸	اندازه‌گیری مقدار آب و پتانسیل آن در گیاه
۷۸	۴-۵-۱ روش تعادل مایع
۷۹	۴-۵-۲ روش تعادل بخار
۷۹	۴-۵-۳ استفاده از ترموکوپل سایکرومتر
۸۰	۴-۵-۴ استفاده از محفظه فشاری
۸۱	۴-۵-۵ روش پلاسمولیز
۸۲	۴-۵-۶ روش کریوسکوپ
۸۲	۴-۵-۷ پتانسیل فشاری در گیاه

## ۵. ریشه: نقش، رشد و اندازه‌گیری

۸۳	مقدمه
۸۳	۵-۱ ساختمان و رشد ریشه
۸۳	۵-۱-۱ ساختمان و رشد اولیه ریشه
۸۸	۵-۱-۲ ساختمان و رشد ثانویه ریشه
۹۰	۵-۱-۳ تشکیل ریشه‌های فرعی
۹۱	۵-۱-۴ انقباض ریشه
۹۲	۵-۲ ناحیه جذب ریشه‌ها
۹۲	۵-۲-۱ ریشه‌های جوان
۹۳	۵-۲-۲ ریشه‌های مسن‌تر
۹۴	۵-۲-۳ نقش مایکوریزا
۹۵	۵-۳ عوامل مؤثر بر رشد ریشه
۹۵	۵-۳-۱ عوامل درونی مؤثر بر رشد ریشه
۹۹	۵-۳-۲ عوامل بیرونی مؤثر بر رشد ریشه
۱۰۲	۵-۴ اندازه‌گیری مشخصات ریشه و سیستم ریشه‌ای
۱۰۲	۵-۴-۱ نمونه‌برداری
۱۰۲	۵-۴-۲ شستشوی ریشه از خاک
۱۰۳	۵-۴-۳ سنجش پارامترهای ریشه

## ۶. آب در خاک

۱۰۶	مقدمه
۱۰۶	۶-۱ ویژگی‌های مهم خاک در رابطه با آب
۱۰۶	۶-۱-۱ وزن مخصوص ظاهری خاک
۱۰۷	۶-۱-۲ وزن مخصوص حقیقی خاک
۱۰۷	۶-۱-۳ تخلخل خاک
۱۰۸	۶-۱-۴ درصد جرمی رطوبت خاک
۱۰۸	۶-۱-۵ درصد حجمی رطوبت خاک
۱۰۸	۶-۱-۶ ظرفیت زراعی
۱۰۹	۶-۱-۷ نقطه پژمردگی دائم
۱۱۰	۶-۱-۸ نقطه اشباع
۱۱۰	۶-۱-۹ آب موجود در خاک
۱۱۱	۶-۱-۱۰ کل آب قابل دسترس خاک
۱۱۲	۶-۱-۱۱ آب قابل دسترس حقیقی خاک

۱۱۲	۶-۱-۱۲ کسر آب قابل دسترس خاک
۱۱۲	۶-۱-۱۳ آب سهل الوصول
۱۱۵	۶-۱-۱۴ منحنی مشخصه آب خاک
۱۱۷	۶-۲ نگهداری آب در خاک
۱۱۷	۶-۳ حرکت آب در خاک
۱۱۹	۶-۳-۱ اختلاف بار (پتانسیل) هیدرولیکی ( $\Delta H$ )
۱۲۰	۶-۳-۲ هدایت هیدرولیکی اشباع (KS)
۱۲۰	۶-۳-۳ هدایت هیدرولیکی غیر اشباع $K(\theta)$

## ۷. جذب آب از خاک

۱۲۳	مقدمه
۱۲۳	۷-۱ آناتومی مسیر حرکت آب در ریشه
۱۲۵	۷-۲ نیروی محرک در جذب آب
۱۲۷	۷-۲-۱ جذب غیر فعال
۱۲۷	۷-۲-۲ جذب فعال و پدیده فشار ریشه
۱۲۸	۷-۲-۳ جمع بندی
۱۲۸	۷-۳ مقاومت در برابر جذب آب
۱۲۹	۷-۴ عوامل مؤثر بر جذب آب
۱۳۰	۷-۴-۱ عوامل درونی مؤثر بر جذب
۱۳۱	۷-۴-۲ عوامل بیرونی مؤثر بر جذب آب

## ۸. حرکت آب در گیاه

۱۳۳	مقدمه
۱۳۳	۸-۱ ساختار سیستم هادی
۱۳۶	۸-۲ نیروی محرکه در انتقال آب
۱۳۸	۸-۳ سرعت جریان
۱۴۰	۸-۴ مقاومت در برابر حرکت
۱۴۱	۸-۵ کارایی سیستم هادی
۱۴۲	۸-۵-۱ هدایت ویژه
۱۴۲	۸-۵-۲ سطح هادی نسبی
۱۴۳	۸-۵-۳ حفره سانی یا رگ بستگی
۱۴۴	۸-۶ حرکت آب در برگها
۱۴۵	۸-۷ مقایسه مقاومتها از خاک تا محل تبخیر
۱۴۷	۸-۸ کنترل جریان

## ۹. تعرق

۱۴۹	مقدمه
۱۵۰	۹-۱ سطوح تبخیرکننده در تعرق
۱۵۰	۹-۱-۱ آناتومی روزنهها
۱۵۱	۹-۱-۲ تعداد و اندازه روزنهها

۱۵۳	۹-۲	مسیر حرکت بخار آب در تعرق
۱۵۴	۹-۳	نیروی محرک در تعرق
۱۵۷	۹-۴	مقاومت‌ها در تعرق
۱۵۸	۹-۵	مکانیسم عمل روزنه‌ها
۱۶۱	۹-۶	واکنش بازوبسته شدن روزنه‌ها به عوامل محیطی
۱۶۱	۹-۶-۱	نور
۱۶۲	۹-۶-۲	رطوبت
۱۶۳	۹-۶-۳	دما
۱۶۳	۹-۶-۴	باد
۱۶۳	۹-۶-۵	دی‌اکسیدکربن
۱۶۳	۹-۷	عوامل مؤثر بر تعرق
۱۶۳	۹-۷-۱	عوامل گیاهی مؤثر بر تعرق
۱۶۵	۹-۷-۲	عوامل محیطی مؤثر بر تعرق
۱۶۵	۹-۸	روش‌های اندازه‌گیری تعرق
۱۶۵	۹-۸-۱	روش وزنی
۱۶۶	۹-۸-۲	روش لایسی‌متر
۱۶۶	۹-۸-۳	روش جریان در ساقه
۱۶۷	۹-۸-۴	روش تبادل گازی
۱۶۷	۹-۹	مواد ضد تعرق

#### ۱۰. موازنه آب خاک

۱۷۱	مقدمه
۱۷۱	۱۰-۱ موازنه آب خاک
۱۷۲	۱۰-۲ رواناب
۱۷۶	۱۰-۳ تبخیر از سطح خاک
۱۷۸	۱۰-۴ تعرق از گیاه
۱۷۹	۱۰-۵ زهکشی عمقی

#### ۱۱. کارایی مصرف آب

۱۸۱	مقدمه
۱۸۲	۱۱-۱ انواع کارایی مصرف آب
۱۸۲	۱۱-۱-۱ کارایی مصرف آب فیزیولوژیکی یا کارایی تعرق
۱۸۲	۱۱-۱-۲ کارایی مصرف آب پایه
۱۸۳	۱۱-۱-۳ کارایی مصرف آب اقتصادی
۱۸۴	۱۱-۲ عوامل مؤثر بر کارایی مصرف آب
۱۸۴	۱۱-۲-۱ خصوصیات گیاهی
۱۸۷	۱۱-۲-۲ شرایط اقلیمی
۱۸۸	۱۱-۲-۳ شرایط خاک
۱۸۹	۱۱-۲-۴ عملیات مدیریتی
۱۹۲	۱۱-۳ افزایش کارایی مصرف آب در شرایط دیم
۱۹۲	۱۱-۴ تبعیض علیه ایزوتوپ $^{13}C$
۱۹۳	۱۱-۴-۱ برآورد میزان تبعیض



- ۱۹۴..... ۱۱-۴-۲ میزان تبعیض در گونه‌های مختلف گیاهی
- ۱۹۵..... ۱۱-۴-۳ تبعیض ایزوتوپی کربن و کارایی مصرف آب
- ۱۲. نیاز آبی گیاه و بهینه‌سازی مصرف آب**

- ۱۹۷..... مقدمه
- ۱۹۷..... ۱۲-۱ تعیین تبخیر تعرق گیاه یا نیاز آبی
- ۱۹۸..... ۱۲-۲ تعیین تبخیر تعرق مرجع
- ۲۰۰..... ۱۲-۳ تعیین ضریب گیاهی
- ۲۰۶..... ۱۲-۴ مقدار و زمان آبیاری
- ۲۰۶..... ۱۲-۵ کم‌آبایی و بهینه‌سازی مصرف آب
- ۱۳. تنش کمبود آب: توسعه، اثرات، سازگاری**

- ۲۱۱..... مقدمه
- ۲۱۱..... ۱۳-۱ انواع خشکی و نحوه توسعه آن‌ها
- ۲۱۱..... ۱۳-۱-۱ تنش کمبود آب در گیاه
- ۲۱۲..... ۱۳-۱-۲ الگوهای وقوع خشکی
- ۲۱۴..... ۱۳-۲ اثرات تنش کمبود آب
- ۲۱۴..... ۱۳-۲-۱ اثرات آناتومیکی و فیزیولوژیکی
- ۲۱۴..... ۱۳-۲-۲ واکنش‌های متابولیکی و هورمونی
- ۲۱۵..... ۱۳-۲-۳ رشد و عملکرد
- ۲۱۶..... ۱۳-۳ اثرات تأمین مجدد آب بعد از یک دوره تنش
- ۲۱۷..... ۱۳-۴ سازگاری و تحمل خشکی
- ۲۱۹..... ۱۳-۴-۱ فرار از خشکی
- ۲۲۱..... ۱۳-۴-۲ اجتناب از تنش
- ۲۲۵..... ۱۳-۴-۳ تحمل نسبت به آب‌کشیدگی
- ۲۲۷..... ۱۳-۵ مسیرهای فتوسنتزی و تحمل به خشکی
- ۱۴. آزمایش‌هایی برای رابطه آب خاک و گیاه**

- ۲۲۹..... مقدمه
- ۲۲۹..... ۱۴-۱ تعیین مقدار آب نسبی، پتانسیل آب بافت گیاهی
- ۲۳۱..... ۱۴-۲ ایجاد محلول‌های اسمزی
- ۲۳۳..... ۱۴-۳ تأثیر پتانسیل آب بر جوانه‌زنی بذر
- ۲۳۴..... ۱۴-۴ تعیین پتانسیل آب بافت گیاهی
- ۲۳۵..... ۱۴-۵ کار با دستگاه‌های سنجش رطوبت خاک
- ۲۳۵..... ۱۴-۶ تعیین ظرفیت گلدانی و ظرفیت زراعی
- ۲۳۷..... ۱۴-۷ تعیین حد تحتانی رطوبت خاک
- ۲۳۸..... ۱۴-۸ مشاهده و اندازه‌گیری حرکت آب در گیاه
- ۲۳۸..... ۱۴-۹ مشاهده روزنه‌ها
- ۲۳۸..... ۱۴-۱۰ سنجش ویژگی‌های ریشه
- ۲۳۹..... ۱۴-۱۱ تعیین نیاز آبی

# پیشگفتار

کتاب *رابطه آب خاک و گیاه* که تقدیم علاقه‌مندان می‌شود، برای درسی به‌همین نام تهیه شده است که در مقطع کارشناسی در رشته‌های علوم گیاهی، کشاورزی و منابع طبیعی تدریس می‌شود. همچنین برای درس *رابطه آب خاک و گیاه تکمیلی* که در مقطع کارشناسی ارشد و دکترا تدریس می‌شود، قابل استفاده است. این کتاب حاصل هفت سال تدریس دروس ذکرشده توسط مؤلف می‌باشد که در ابتدا به صورت جزوه درسی در اختیار دانشجویان قرار گرفته است. ویرایش و تکمیل کتاب نیز با کمک آقای مهندس فرجی به‌تمام رسیده است. بخش عمده مطالب فصل ۳ نیز توسط ایشان تهیه شده است.

کتاب دارای ۱۴ فصل است که با توضیح اهمیت آب شروع می‌شود، با شرح سیستم ریشه گیاهان و جذب و انتقال آب در گیاه ادامه می‌یابد و با مطالبی درباره کارایی مصرف آب، نیاز آبی گیاهان و تنش کمبود آب پایان می‌گیرد. یک فصل نیز به آزمایش‌هایی برای درس *رابطه آب خاک و گیاه* اختصاص یافته است.

لازم می‌دانم از استادان ارجمندم آقایان دکتر مهدی کریمی (دانشگاه صنعتی اصفهان) و دکتر محمدرضا نیشابوری (دانشگاه تبریز) تشکر نمایم که مبنای درس *رابطه آب خاک و گیاه* را نزد آنها فرا گرفتم. امیداست این مجموعه مورد توجه اساتید، محققان و دانشجویان عزیز قرار گیرد و با انعکاس نقطه‌نظرات خود ما را در اصلاح کتاب در ویرایش‌های بعدی یاری نمایند.

افشین سلطانی

زمستان ۱۳۸۵

# رابطه آب خاک و گیاه، چرا؟

در این فصل می‌خوانیم:

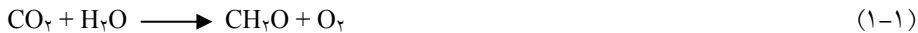
۱-۱ چگونگی اهمیت آب برای فرایند تولید توسط گیاه (دریافت و تبدیل تشعشع)

۱-۲ نقش آب در پراکندن انرژی و کمک به تداوم حیات گیاه از این طریق

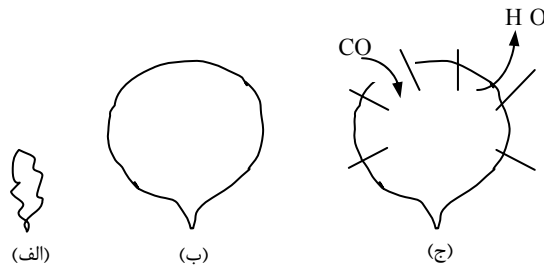
۱-۳ سایر نقش‌های مهم آب در گیاهان

## ۱-۱ چگونگی اهمیت آب برای فرایند تولید توسط گیاه (دریافت و تبدیل تشعشع)

فرایند اصلی تولید در اکوسیستم‌های گیاهی و کشاورزی شامل دریافت تشعشع خورشیدی و تبدیل آن به ماده خشک طی فرایند فتوسنتز (رابطه ۱-۱) می‌باشد (سینکلر و گاردنر، ۱۹۹۸):



بنابراین، برای آنکه تولیدی صورت گیرد حتماً باید تشعشع دریافت شود، یعنی گیاه خود را در معرض تشعشع خورشیدی قرار دهد تا تشعشع به گیاه برخورد کند<sup>۱</sup>. در این زمینه می‌توان گیاه را با یک بادکنک مقایسه کرد. برای آنکه گیاه یا بادکنک ما بتواند حداکثر دریافت تشعشع و تولید را داشته باشد، لازم است که نه به صورت چروکیده (شکل ۱-الف)، بلکه به صورت متورم و بادکرده باشد (شکل ۱-ب). در مورد گیاهان این تورم و در معرض نور قرار گرفتن به کمک آب انجام می‌شود، یعنی آب در گیاه مشابه هوا در بادکنک عمل می‌کند. از آنجایی که در گیاهان برخلاف بادکنک، لازم است که  $\text{CO}_2$  مطابق رابطه ۱-۱ از هوا وارد گیاه شود، بادکنک ما سوراخ‌دار (وجود روزنه‌های فراوان در گیاه) می‌باشد (شکل ۱-ج). یعنی همچنان‌که برای تورم بادکنک باید به‌طور مداوم به آن هوا دمیده شود، برای ادامه حیات گیاه نیز جذب مداوم آب از خاک ضروری است. به‌هرحال، ۵۰ تا ۹۰٪ حجم و وزن گیاهان از آب تشکیل شده و گیاهان تظاهر خود را مدیون آب هستند.



شکل ۱-۱ توضیح شماتیک نقش آب در کمک به خودنمایی و دریافت تشعشع در گیاهان. برای توضیح بیشتر به متن مراجعه شود (از مؤلف).

## ۲-۱ نقش آب در پراکندن انرژی و کمک به تداوم حیات گیاه از این طریق

زمانی که گیاه خود را در معرض تشعشع خورشید قرار می‌دهد، انرژی زیادی جذب گیاه می‌شود. برای مثال، در بسیاری از روزهای بهار و تابستان، اگر گیاه سطح خاک را به‌طور کامل پوشانده باشد، حدود ۲۰ تا ۳۰ مگاژول در مترمربع در روز ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ) تشعشع دریافت می‌کند که انرژی آن معادل ۲۰ تا ۳۰ تن دینامیت در هکتار است (لومیس و کانر، ۱۹۹۲). این میزان انرژی، فوق‌العاده زیاد بوده و بخش ناچیزی از آن (حداکثر ۵٪) در فتوسنتز تثبیت شده و مابقی آن باید به‌روش مناسبی از گیاه دفع (پراکنده) شود. یکی از مهم‌ترین راه‌های پراکنش این انرژی، تعرق از گیاه می‌باشد. در واقع، بخشی از تشعشع به‌جای افزایش دمای گیاه در تعرق صرف می‌شود. به‌عنوان مثال، ممکن است در اثر عدم وجود تعرق و خنک شدن گیاه به‌وسیله آن، دمای گیاه در طی تنها یک دقیقه به صدها درجه سانتی‌گراد برسد. البته تابش موج بلند و انتقال گرمای محسوس نیز دو روش مهم پراکنش انرژی هستند (کمبل و نورمن، ۱۹۹۸). بنابراین، آب به‌شکل‌گیری و تظاهر گیاه، مخصوصاً در گیاهان علفی، کمک کرده و علاوه بر آن، موجب پراکنش تشعشع جذب‌شده اضافی توسط گیاه می‌شود. به‌عبارت دیگر، لازم است که گیاه جهت تولید مواد فتوسنتزی و ماده خشک در معرض تشعشع قرار گرفته و در همان حال از انرژی زیاد دریافتی آسیب نبیند، که در هر دو مورد آب نقش اساسی دارد.

## ۳-۱ سایر نقش‌های مهم آب در گیاهان

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد آب، آن را برای نقش‌های مختلفی در گیاه مناسب ساخته است (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶): آب محیطی است که انتشار مواد حل‌شده در سلول‌های گیاهی در آن صورت می‌گیرد. آب یک حلال بوده و در اغلب واکنش‌های بیوشیمیایی شرکت دارد. چون قابل فشرده شدن نیست، می‌تواند باعث انبساط سلول‌ها و شکل‌گیری گیاه شود. از آنجایی که آب از گرمای تبخیر، گرمای ویژه و هدایت گرمایی بالایی برخوردار است، بنابراین، در تنظیم دمای گیاه نقش

اساسی دارد. به واسطه قطبی بودن، آب ماده مناسبی برای حل مواد قطبی می باشد. به علت داشتن ثابت دی الکتریک بالا، آب مخصوصاً حلال مناسبی برای یون ها می باشد. از آنجایی که اکثر مواد محلول که از نظر بیولوژیکی اهمیت دارند دارای بار الکتریکی می باشند، بنابراین، ثابت دی الکتریک بالای آب برای حیات بسیار مهم است.

مواد معدنی لازم برای رشد گیاه و ترکیبات آلی تولید شده توسط فتوسنتز در گیاه، توسط آب انتقال پیدا می کنند. در گیاهان آب به صورت پیوسته از خاک، گیاه تا هوا امتداد داشته و این تداوم آب برای بازبودن روزنه ها مهم است. آب نسبت به تشعشع، شفاف بوده و اجازه می دهد نور به کلروپلاست های داخل برگ و نیز به گیاهان زیر آب برسد. آب در متابولیسم گیاه نقش دارد. آب، منبع تولید اکسیژن فتوسنتز و منبع تولید هیدروژن مورد استفاده در احیای  $CO_2$  به  $CH_2O$  (کربوهیدرات) می باشد. از نقطه نظر اکولوژیکی سبک تر بودن یخ در مقایسه با آب اهمیت زیادی برای حیات آبریان دارد، زیرا یخ در سطح آب قرار گرفته و در بهار و تابستان به راحتی ذوب می گردد.

ملاحظه می شود که آب نقش های مهمی در حیات گیاهان و تولید اکوسیستم های گیاهی دارد. این نقش های مهم و متعدد به واسطه ویژگی های فیزیکی-شیمیایی آب امکان پذیر است. پس درک ویژگی های آب و فعل و انفعالات (نقل و انتقالات) آن در خاک و گیاه برای درک فیزیولوژی، اکولوژی و تولید گیاهان مهم است.

# ویژگی‌های آب و محلول‌های آبی

در این فصل می‌خوانیم:

۲-۱ ویژگی‌های فیزیکی آب

۲-۲ ویژگی‌های شیمیایی آب

۲-۳ ویژگی‌های محلول‌های آبی

۲-۴ کیفیت آب برای آبیاری

## مقدمه

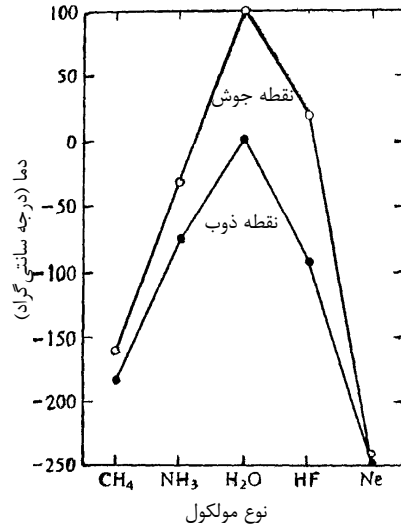
شکل منحصر به فرد مولکول آب و وجود پیوندهای هیدروژنی بین اتم‌های هیدروژن و اکسیژن مولکول‌های مجاور، سبب ایجاد خصوصیات ویژه‌ای در آب گردیده و این ماده را به‌عنوان مهم‌ترین ماده موجود در کره زمین معرفی نموده است. بیشتر فرایندهای انجام‌شده در سلول‌ها و اندام‌های گیاهی، به‌طور مستقیم و غیرمستقیم به آب وابسته بوده و این ماده به‌همراه درجه‌حرارت مهم‌ترین عوامل توزیع و پراکندگی گیاهان و جانوران در سطح کره زمین هستند. جهت درک بهتر نقش و نحوه دخالت آب در واکنش‌های حیاتی، شناخت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب و محلول‌های آبی ضروری بوده و در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۲-۱ ویژگی‌های فیزیکی آب

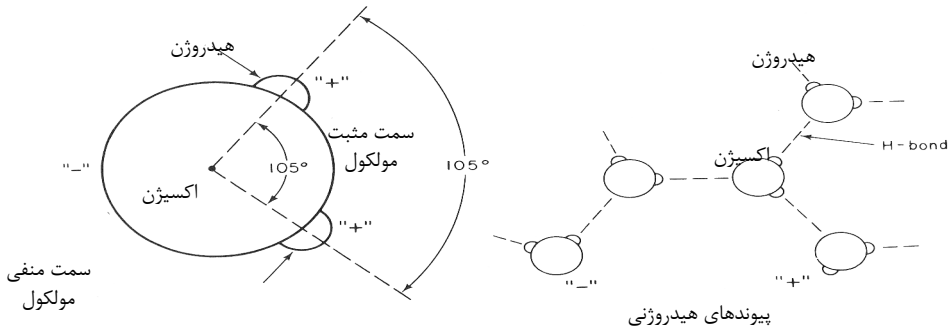
آب با مواد دیگری که از نظر ساختار الکترونیکی مشابه هم هستند، اختلافات بارزی دارد.  $\text{NH}_3$ ،  $\text{CH}_4$ ،  $\text{H}_2\text{O}$ ،  $\text{HF}$  و  $\text{Ne}$  هر کدام دارای ۱۰ پروتون و ۱۰ الکترون هستند، اما تعداد اتم‌های هیدروژن از  $\text{CH}_4$  به  $\text{Ne}$  کاهش می‌یابد. نقطه ذوب و جوش بالای آب در مقایسه با سایرین، نتیجه پیوندهای محکم بین مولکولی (پیوند هیدروژنی) در آب است (شکل ۲-۱).

### ۲-۱-۱ پیوند هیدروژنی

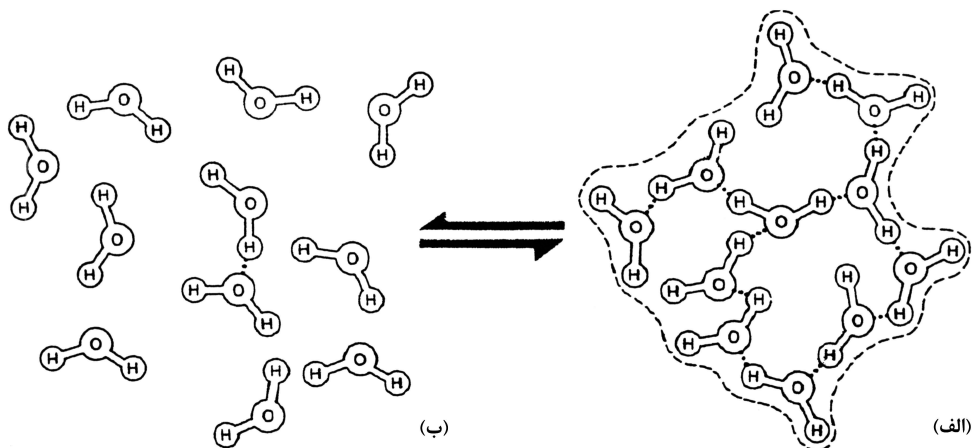
ساختار مولکول آب در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. اکسیژن دارای الکترونگاتیوی بالاتری نسبت به هیدروژن بوده و در نتیجه الکترون‌های اتم‌های هیدروژن را به سمت خود می‌کشد. بر اثر این عمل، اتم



شکل ۱-۲ نقطه ذوب و جوش موادی که هر یک دارای ۱۰ پروتون و ۱۰ الکترون هستند. مشاهده می‌شود که آب تفاوت زیادی با سایر مولکول‌ها دارد. اکثر فرایندهای بیولوژیکی در دمای بین صفر تا ۵۰°C یعنی در دماهایی که آب به صورت مایع است رخ می‌دهند (نوبل، ۱۹۹۴).



شکل ۲-۲ ساختار مولکول آب. (الف) هر مولکول آب از یک اتم اکسیژن و دو اتم هیدروژن تشکیل شده است. پیوندهای هیدروژنی بین اتم‌های هیدروژن و اکسیژن، مولکول‌های آب مجاور را به یکدیگر متصل کرده و باعث ایجاد بسیاری از خصوصیات ویژه آب می‌گردند؛ (ب) ساختمان مولکول آب و آرایش اتم‌ها نسبت به یکدیگر را نشان می‌دهد. اتم اکسیژن دارای بار الکتریکی قدری منفی ( $\delta^-$ ) و اتم‌های هیدروژن، دارای بار الکتریکی قدری مثبت ( $\delta^+$ ) هستند (کرامر، ۱۹۹۵).



شکل ۲-۳ (الف) پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های آب باعث استحکام بخشیدن به آب و تشکیل ساختمان نیمه‌بلوری (کلاستری) می‌شود؛ (ب) به دلیل آشفتگی‌های حرارتی دائمی، عمر ساختمان نیمه‌بلوری آب کم بوده و خیلی سریع و بسیار تصادفی شکسته می‌شود (کرامر، ۱۹۹۵).

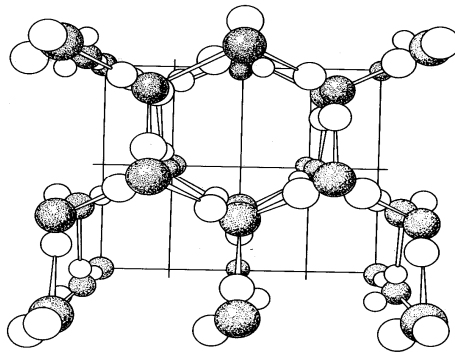
اکسیژن دارای بار الکتریکی قدری منفی ( $\delta^-$ ) و اتم‌های هیدروژن دارای بار الکتریکی قدری مثبت ( $\delta^+$ ) می‌شوند. اتم‌های هیدروژن دارای بار مثبت، به صورت الکترواستاتیکی جذب اتم‌های اکسیژن که دارای بار منفی هستند، می‌شوند. بنابراین، هر اتم هیدروژن، جذب یک اتم اکسیژن مولکول آب مجاور خود می‌شود (شکل ۲-۳). چون هر مولکول آب دارای دو اتم هیدروژن است، به‌ازای هر مولکول آب، دو پیوند هیدروژنی تشکیل می‌شود. برای شکستن یک مول پیوند هیدروژنی ( $10^{23} \times 6,023 \times 10^{23}$  عدد) به ۲۰ کیلوژول انرژی نیاز است (نوبل، ۱۹۹۴). البته پیوند هیدروژنی می‌تواند بین هیدروژن و بخش منفی سایر مولکول‌ها نیز ایجاد شود و بسته به مولکول، انرژی این پیوندهای هیدروژنی بین ۸ تا ۴۲ کیلوژول بر مول متغیر است. مقایسه میزان انرژی برخی از پیوندها در جدول ۱-۲ آورده شده است.

جدول ۱-۲ مقایسه میزان انرژی برخی از پیوندها (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

میزان انرژی پیوند (کیلوژول بر مول)	پیوند
۵۸۲-۱۰۰۴	پیوند یونی <sup>۱</sup>
	پیوند کووالانسی
۱۳۸	O-O
۲۹۳	C-N
۳۴۷	C-C
۴۶۰	O-H
۴,۲	پیوند واندروالسی

۱. میزان انرژی پیوند یونی در NaCl معادل ۷۶۶ کیلوژول بر مول است.





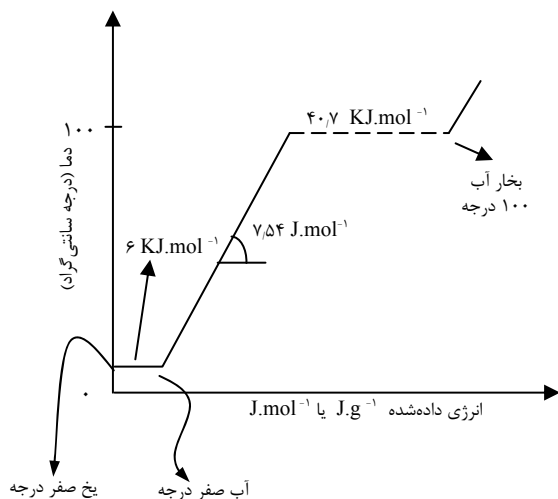
شکل ۴-۲ ساختار مشبک یخ. کره‌های تیره نشان‌دهنده اتم‌های اکسیژن و کره‌های روشن نشان‌دهنده اتم‌های هیدروژن هستند. از آنجایی‌که در یخ تمامی پیوندهای هیدروژنی تشکیل شده است، بنابراین، به آن ساختاری کریستالی می‌دهد. برقراری تمامی پیوندهای هیدروژنی در یخ سبب می‌شود تا جرم حجمی یخ کمتر از آب شده و این مسئله سبب می‌گردد تا یخ بر روی آب شناور گردد (کرامر، ۱۹۹۵).

در یخ، کلیه پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های  $H_2O$  برقرار بوده و این مسئله سبب می‌شود تا یخ ساختار مشبک پیدا کند (شکل ۴-۲). به دلیل ساختار مشبک و برقراری تمامی پیوندهای هیدروژنی، یخ از وزن حجمی کمتری نسبت به آب برخوردار است. سبک‌تر بودن یخ نسبت به آب و آمدن یخ به بالای سطح آب از نظر اکولوژیکی بسیار مهم می‌باشد. دریاچه‌ها و حوضچه‌های آبی در شرایط دمایی پایین از بالا به پایین شروع به یخ‌زدن می‌کنند. لایه یخ موجود در بالای حوضچه، آب زیر آن را درمقابل هوای سرد محافظت نموده و مانع از یخ‌زدن حوضچه و از بین رفتن موجودات درون آن می‌شود (کرامر، ۱۹۹۵). زمانی‌که یخ صفر درجه سانتی‌گراد به آب صفر درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شود حدود ۱۵٪ از پیوندهای هیدروژنی آن شکسته می‌شود. شکستن پیوندهای هیدروژنی سبب کاهش حجم و افزایش جرم حجمی آب صفر درجه نسبت به یخ می‌شود. میزان انرژی مورد نیاز برای تبدیل یخ صفر درجه به آب صفر درجه، ۶ کیلوژول بر مول یا ۳۳۵ ژول بر گرم است. از طرف دیگر، برای شکستن کلیه پیوندهای هیدروژنی آب به ۴۰ کیلوژول بر مول انرژی نیاز می‌باشد. بنابراین، می‌توان نشان داد که در آب صفر درجه، ۱۵٪ از پیوندهای هیدروژنی شکسته شده‌اند. البته از آنجایی‌که مقدار اندکی از انرژی صرف غلبه بر پیوندهای واندروالسی می‌شود، بنابراین، معمولاً درصد پیوندهای شکسته‌شده در آب صفر درجه از ۱۵٪ کمتر است.

## ۲-۱-۲ گرمای نهان ذوب آب

گرمای نهان ذوب<sup>۱</sup> مقدار گرمایی است که باید به یک مول یا یک گرم یخ صفر درجه سانتی‌گراد داده شود تا به آب صفر درجه سانتی‌گراد تبدیل شود و مقدار آن ۶ کیلوژول بر مول یا ۳۳۵ ژول بر گرم

1. Latent heat of fusion



شکل ۲-۵ تغییرات دمای آب در مقابل مقدار انرژی داده‌شده به آن. مفاهیم و مقادیر گرمای نهان ذوب، گرمای ویژه آب و گرمای نهان تبخیر در شکل نشان داده شده‌اند (از مؤلف).

است. لفظ نهان از آن جهت به کار می‌رود که در مقابل انرژی داده‌شده به آب، افزایش دمایی که با دماسنج قابل حس<sup>۱</sup> کردن باشد، ملاحظه نمی‌شود (شکل ۲-۵).

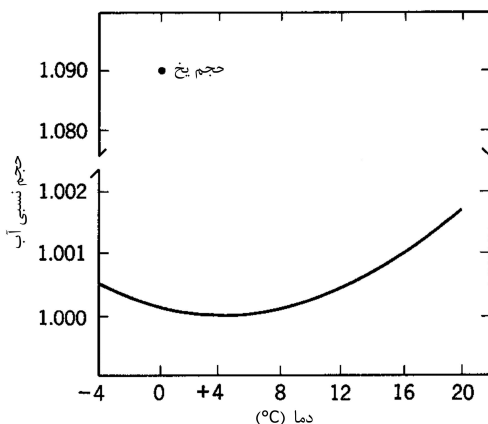
### ۲-۱-۳ ظرفیت گرمایی ویژه آب

گرمای ویژه<sup>۲</sup> یا ظرفیت گرمایی<sup>۳</sup> مقدار گرمایی است که باید به یک مول یا یک گرم آب داده شود تا دمای آن یک درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کند. ظرفیت گرمایی ویژه آب ۷۵٫۴ ژول بر مول یا ۴٫۱۸۴ ژول بر گرم است (شکل ۲-۵).

### ۲-۱-۴ گرمای نهان تبخیر آب

گرمای نهان تبخیر<sup>۴</sup> مقدار گرمایی است که باید به یک مول یا یک گرم آب  $100^{\circ}\text{C}$  داده شود تا به بخار آب  $100^{\circ}\text{C}$  تبدیل شود و مقدار آن ۴۰٫۷ کیلوژول بر مول یا ۲۴۵۲ ژول بر گرم است (شکل ۲-۵). ملاحظه می‌شود که هر سه خاصیت نامبرده آب، در مقایسه با بسیاری از مواد، بالا بوده و این مسئله بدین معنا است که آب مقدار زیادی انرژی جذب می‌کند بدون آنکه تغییر دمایی زیادی در آن صورت گیرد. از آنجایی که آب درصد بالایی از وزن گیاهان و جانوران را تشکیل می‌دهد، بنابراین، این سه خاصیت آب در ثبات گرمایی گیاهان و جانوران نقش مهمی ایفا می‌کنند (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

1. Sense  
2. Specific heat  
3. Thermal capacity  
4. Latent heat of vaporization



شکل ۲-۶ رابطه حجم آب با دما. با افزایش حرارت تا  $4^{\circ}\text{C}$  به دلیل شکستن پیوندهای هیدروژنی حجم آب کاهش می‌یابد، ولی با افزایش دما به بیش از  $4^{\circ}\text{C}$  به دلیل افزایش تحرک مولکولی و فاصله‌گرفتن مولکول‌های آب از یکدیگر، حجم آب افزایش می‌یابد. بنابراین، کمترین حجم و بیشترین چگالی آب در  $4^{\circ}\text{C}$  مشاهده می‌شود. حجم یخ نیز نشان داده شده است (کرامر، ۱۹۹۵).

### ۲-۱-۵ غیرقابل فشرده شدن آب

غیرقابل فشرده شدن<sup>۱</sup> سبب می‌شود تا آب در شکل‌گیری گیاه (به‌ویژه گیاهان علفی)، بازوبسته شدن روزنه‌ها و گسترش و رشد سلولی نقش مهمی داشته باشد. در صورت قابل فشرده بودن آب، نقش‌های ذکر شده غیرممکن بود. البته با تغییر دما، حجم نسبی آب اندکی تغییر می‌کند (شکل ۲-۶).

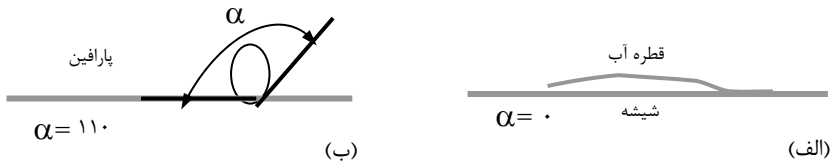
### ۲-۱-۶ گرانروی یا ویسکوزیته آب

گرانروی<sup>۲</sup> مقاومت مایع در برابر جاری شدن را نشان می‌دهد و به نیروی پیوستگی بین مولکول‌های مایع بستگی دارد. گرانروی آب، ناشی از پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های آب بوده و در مقایسه با حلال‌هایی که پیوند هیدروژنی ندارند و یا مقدار پیوند هیدروژنی در آن‌ها کم است نسبتاً بالا است. ویسکوزیته آب با افزایش دما به واسطه شکسته شدن پیوندهای هیدروژنی و سست شدن نیروهای جاذبه بین مولکولی و اندروالسی (ناشی از تحرکات بیشتر مولکول‌ها بر اثر افزایش دما)، کاهش می‌یابد (جدول ۲-۲) و سبب می‌شود تا با افزایش دما، آب با سهولت بیشتری جریان یابد.

جدول ۲-۲ تغییرات ویسکوزیته آب به صورت درصد نسبت به دمای  $20^{\circ}\text{C}$  (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

دمای ( $^{\circ}\text{C}$ )	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰
ویسکوزیته (درصد نسبت به $20^{\circ}\text{C}$ )	۱۷۷	۱۳۰	۱۰۰	۸۰	۶۵	۴۷	۳۵	۲۸

1. Incompressible  
2. Viscosity



شکل ۷-۲ (الف) زاویه تماس آب با شیشه؛ (ب) زاویه تماس آب و پارافین. در پارافین نیروی چسبندگی مایع-جامد در مقایسه با نیروی پیوستگی کم بوده و زاویه تماس به طرف  $180^\circ$  درجه میل می‌کند (از مؤلف).

### ۲-۱-۷ نیروهای چسبندگی و پیوستگی آب

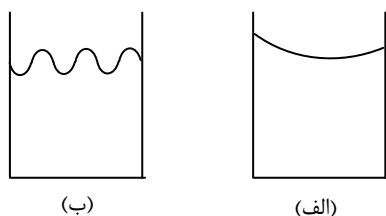
آب مولکولی قطبی<sup>۱</sup> است و بنابراین می‌تواند توسط بسیاری از مواد، که دارای محل‌های قطبی هستند، جذب شود. پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی از جمله مواد دارای محل‌های قطبی هستند که آب جذب آن‌ها می‌شود. جذب آب به آب (یعنی مولکول‌های هم‌نوع) پیوستگی<sup>۲</sup> و جذب آب به سایر مولکول‌ها (مولکول‌های غیرهم‌نوع) چسبندگی<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. بین چسبندگی و پیوستگی، رابطه ۱-۲ (معادله یانگ) برقرار است (نوبل، ۱۹۹۴):

$$\text{چسبندگی} = \frac{1 + \cos \alpha}{2} \text{ پیوستگی} \quad (2-1)$$

که در آن،  $\alpha$  زاویه تماس آب با جدار لوله یا آوند یا سطح موردنظر می‌باشد. وقتی نیروی چسبندگی مساوی یا بیشتر از نیروی پیوستگی باشد، زاویه تماس صفر درجه و کسینوس آن برابر یک می‌شود. این موضوع درباره آب در لوله‌های شیشه‌ای تمیز و صاف صادق است. وقتی نیروی چسبندگی نصف نیروی پیوستگی باشد، زاویه تماس،  $90^\circ$  و کسینوس آن برابر صفر می‌شود، در این حالت، سطح مایع در لوله، هم‌سطح آن در ظرف اصلی می‌باشد. این حالت برای آب در لوله پلی‌اتیلنی صادق است. سرانجام اگر نیروی چسبندگی مایع-جامد در مقایسه با نیروی پیوستگی کم باشد، زاویه تماس به طرف  $180^\circ$  میل می‌کند و سطح مایع در داخل لوله پایین می‌افتد. این حالت برای آب و پارافین یا جیوه و شیشه صادق است (شکل ۷-۲).

در مورد آبی که بر روی سطوح جامد قرار دارد، با کاهش زاویه تماس آب با سطح جسم جامد، تمایل جذب آب افزایش یافته و در حالت زاویه صفر درجه عمل خیس شدن جسم جامد یا خاک صورت می‌گیرد. در مقابل، با افزایش زاویه تماس بین آب و جسم جامد و افزایش  $\alpha$  به  $180^\circ$ ، تمایل به جذب آب و خیس شدن کاهش می‌یابد. این مسئله در مورد قطرات روغنی که بر روی یک جسم شیشه‌ای قرار گرفته صادق است.

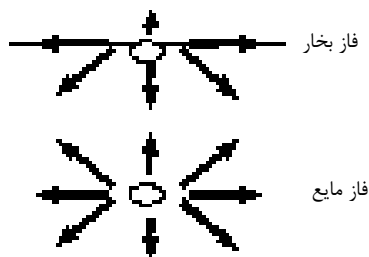
1. Polar  
2. Cohesion  
3. Adhesion



شکل ۸-۲ (الف) به دلیل وجود کشش سطحی، مولکول‌های آب مداوماً به دو طرف درحال کشیده شدن هستند؛ (ب) در صورت عدم وجود کشش سطحی (از مؤلف).

### ۸-۱-۲ کشش سطحی

آب دارای کشش سطحی<sup>۱</sup> بسیار بالایی است که در فصل مشترک بین آب و هوا مشهود می‌باشد. برای مثال، به دلیل کشیده شدن سطح آب، اگر آب را داخل یک ظرف بریزیم، حالت «الف» و نه حالت «ب» در شکل ۸-۲ را خواهیم دید. این خاصیت را می‌توان طور دیگری توضیح داد که اگر در سطح آب یک خط فرضی رسم شود، مولکول‌های آب واقع در این خط فرضی، مداوماً به دو طرف درحال کشیده شدن هستند. کشیده شدن به دو طرف مولکول‌های آب به دلیل بیشتر بودن نیروی جاذبه بین مولکول‌های آب در فاز مایع نسبت به نیروی جاذبه بین مولکول‌های آب در فاز بخار (هوا) می‌باشد (شکل ۹-۲).

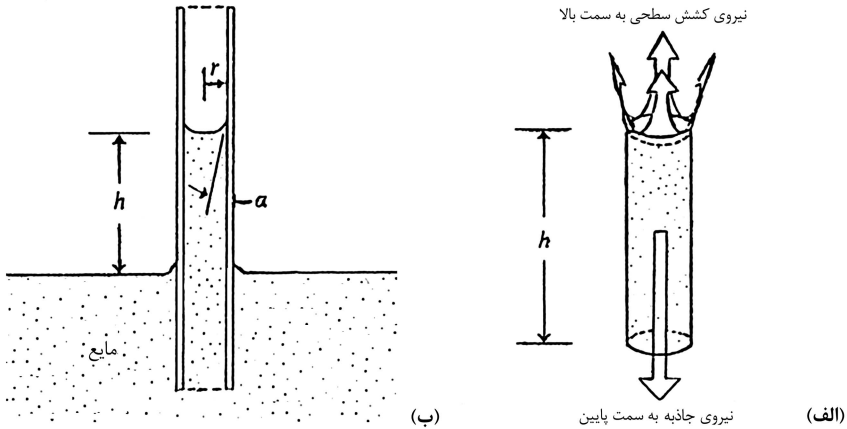


شکل ۹-۲ کشش سطحی آب در فصل مشترک آب و هوا. به دلیل بیشتر بودن نیروی جاذبه بین مولکول‌های آب در فاز مایع نسبت به نیروی جاذبه بین مولکول‌های آب در فاز مایع با فاز بخار (هوا)، مولکول‌های آب در فاز مایع به دو طرف کشیده می‌شوند (از مؤلف).

کشش سطحی در فصل مشترک هوا-آب در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  برابر  $0.0728$  نیوتون بر متر است. به عبارت دیگر، کشش سطحی عبارت از مقدار انرژی لازم برای گسترش سطح آب به اندازه یک مترمربع بوده و مقدار آن برابر  $0.0728$  ژول بر مترمربع است. علت بروز پدیده کشش سطحی، وجود پیوند هیدروژنی است که با قدرت بالایی سبب اتصال مولکول‌های آب به یکدیگر می‌شود. کشش سطحی به دمای آب نیز بستگی دارد و با افزایش دما مقدار آن کاهش می‌یابد (جدول ۳-۲). دلیل کاهش کشش سطحی با افزایش دما، شکستن پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های آب با افزایش دما می‌باشد.

جدول ۳-۲ کاهش کشش سطحی با افزایش دما (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰
کشش سطحی (ژول بر مترمربع)	۰.۰۷۵۶	۰.۰۷۴۲	۰.۰۷۲۸	۰.۰۷۱۲	۰.۰۶۹۶



شکل ۱۰-۲ صعود کاپیلاری یک مایع. (الف) نیروهای مؤثر در صعود آب. زمانی که نیروی بالا برنده با نیروی جاذبه برابر گردید، صعود آب در لوله متوقف می‌شود؛ (ب) متغیرهای درگیر در صعود آب. وقتی نیروی چسبندگی بین مولکول‌های آب و جسم جامد بیشتر از نیروی پیوستگی بین مولکول‌های آب باشد، آب در لوله بالا می‌رود. در شکل، شعاع لوله،  $\alpha$  زاویه تماس و  $h$  ارتفاع صعود در لوله است (نوبل، ۱۹۹۴).

### ۹-۱-۲ صعود کاپیلاری آب

وقتی نیروی چسبندگی بین مولکول‌های آب و جسم جامد، بیشتر از نیروی پیوستگی بین مولکول‌های آب باشد، گفته می‌شود که آن جسم جامد، قابل خیس شدن<sup>۱</sup> بوده و آب در لوله باریک از جنس آن جسم بالا می‌رود. برعکس، اگر نیروی پیوستگی بیشتر از چسبندگی باشد، سطح مایع در لوله پایین می‌افتد (شکل ۱۰-۲). در واقع، به دلیل چسبندگی بین مولکول‌های آب و دیواره لوله یا آوند، مولکول‌های آب به دیواره می‌چسبند. همچنین، به واسطه خاصیت کشش سطحی، آب قسمت وسط لوله (بخش‌هایی که به دیواره چسبیده نیستند) بالا آمده و در نتیجه، صعود یا خیز کاپیلاری<sup>۲</sup> مولکول‌های آب در لوله انجام می‌شود. پس نیروی اصلی بالا برنده همان کشش سطحی است که در محیط لوله عمل کرده و به کمک نیروی چسبندگی، سبب صعود آب می‌گردند. جهت اعمال این نیرو به زاویه تماس  $\alpha$  بستگی دارد. آب (یا هر مایع دیگر) آن قدر در لوله بالا می‌رود و یا بالعکس پایین می‌افتد که نیروی بالا برنده (رابطه ۲-۲) با نیروی ثقلی (رابطه ۲-۳) ناشی از وزن آب بالا رفته یا پایین افتاده، برابر شوند (نوبل، ۱۹۹۴):

$$2\pi r \sigma \cos \alpha = \pi r^2 h \rho g \quad (2-2)$$

$$\pi r^2 h \rho g = \text{نیروی ثقلی} \quad (2-3)$$

1. Wettable  
2. Capillary rise

که در آن‌ها،  $r$  شعاع لوله،  $h$  ارتفاع صعود،  $\rho$  وزن حجمی و  $g$  شتاب ثقل زمین هستند. در معادله دوم ( $\pi r^2 h$ ) حجم آب بالا رفته بوده و وقتی در  $\rho$  ضرب می‌شود جرم آب بالا رفته به دست می‌آید. با مساوی قرار دادن این دو نیرو و حل آن برای  $h$ ، خواهیم داشت:

$$2\pi r \sigma \cos \alpha = \pi r^2 h \rho g \quad (2-4)$$

$$h = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r \rho g} \quad (2-5)$$

معادله ۲-۵، ارتفاع صعود و عوامل مؤثر بر آنرا نشان می‌دهد. برای مثال، به سادگی می‌توان نشان داد که هرچه شعاع لوله بیشتر باشد، ارتفاع صعود آب کمتر خواهد شد و یا افزایش دما از طریق کاهش  $\sigma$  می‌تواند باعث کاهش  $h$  شود. حال اگر مایع صعودکننده را آب و لوله صعود را آوند چوبی یا منافذ دیواره‌های سلولی در نظر بگیریم، می‌توانیم به معادله دیگری دست پیدا کنیم. در مورد آوند چوبی و منافذ نامبرده، زاویه تماس  $\alpha$  صفر درجه و در نتیجه  $\cos \alpha$  برابر ۱ خواهد بود. با قرار دادن مقادیر عددی  $\sigma$  و  $\rho$  برای آب در شرایط  $20^\circ\text{C}$  و قرار دادن مقدار  $g$  و تبدیل شعاع ( $r$ ) به قطر ( $d$ )، معادله حاصله به صورت رابطه ۲-۶ خواهد بود:

$$h (m) = \frac{30}{d (\mu m)} \quad (2-6)$$

از آنجایی که قطر تیپیک سلول‌های آوند چوب ۴۰ میکرومتر می‌باشد، با قرار دادن آن در معادله بالا، می‌توان دید که صعود کاپیلاری در چنین لوله‌ای برابر ۰٫۷۵ متر یا ۷۵ سانتی‌متر خواهد بود. مشاهده می‌شود که صعود کاپیلاری نمی‌تواند توجیه‌کننده حرکت آب در درختان (مثلاً به ارتفاع ۳۰ متر) باشد. برای صعود آب به چنین ارتفاعی، قطر لوله کاپیلاری باید حدود ۱ میکرومتر باشد که خیلی کمتر از قطر مشاهده شده آوند چوب در آن‌ها است. از طرفی، گرچه در دیواره‌های سلولی آوندها منافذ متعددی وجود دارد که قطر آنها بسیار کم و حدود ۱۰ نانومتر است و بنابر معادله ۲-۶ ارتفاع آب در چنین لوله‌ای می‌تواند به ۳ کیلومتر نیز برسد، ولی از آنجایی که احتمالاً جریان آب در چنین لوله‌ای بسیار کند بوده و میزان آن برای تأمین آب ازدست‌رفته در تعرق بسیار اندک است، بنابراین، آب تأمین‌شده از طریق این منافذ قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. به هر حال، رابطه ۲-۶ یکی از مهم‌ترین معادلات در مبحث رابطه آب خاک و گیاه بوده و استفاده زیادی از آن می‌گردد.

**تمرین** میزان صعود آب را در لوله‌ای با قطر ۴۰ میکرومتر، برای سه حالت  $\alpha = 90^\circ$ ،  $\alpha = 30^\circ$  و  $\alpha = 150^\circ$  حساب کنید.

### ۱-۱-۲ استقامت کششی آب

وجود استقامت کششی<sup>۱</sup>، باعث می‌شود که مولکول‌های آب در طی بالا کشیده شدن از آوندهای چوبی در طی پدیده تعرق، دچار پارگی نشده و در نتیجه ستون آب، که به صورت جریانی پیوسته می‌باشد، قطع

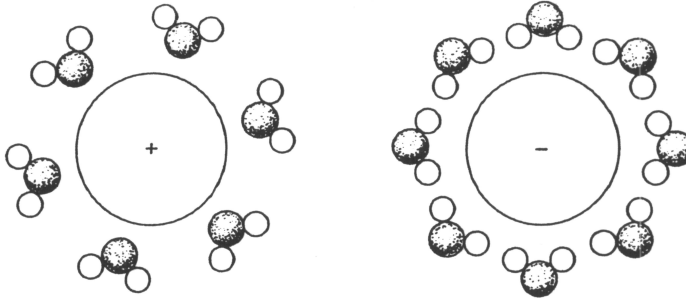
نگردد. برای درک بهتر مسئله وضعیت آب در داخل آوند چوب، حالتی در نظر بگیرید که به وسیله نی در حال مکیدن نوشابه از شیشه‌اش هستید. در این حالت، آب تحت کشش (یا فشار منفی) است و بدیهی است که اگر کشش زیاد باشد، ستون آب در داخل آوند چوب (یا نی) دچار پارگی می‌گردد. وجود پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های آب باعث می‌شود تا ستون آب داخل آوند حالت پیوسته خود را حفظ کرده و دچار پارگی نگردد. آزمایش‌ها نشان داده است که در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  ستون آب قادر است تا کشش  $30\text{ MPa}$  (حدود  $10\%$  مقاومت کششی آلومینیوم) را تحمل کرده و سپس دچار پارگی شود (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶). البته حد دقیق کشش مورد نیاز جهت پارگی ستون آب و ایجاد پدیده حفره‌سانی<sup>۱</sup> یا قطع ستون آب<sup>۲</sup> یا تشکیل حباب به مواد دیواره، شعاع آوند چوب، مواد حل شده در آب و وضعیت رطوبتی خاک بستگی دارد.

### ۱۱-۱-۲ ثابت دی‌الکتریک

یکی از خواص مهم فیزیکی آب، داشتن ثابت دی‌الکتریک<sup>۳</sup> (D) بالا بوده، که ناشی از ساختمان آب است. ثابت دی‌الکتریک نشانگر ظرفیت ماده در خنثی کردن جاذبه بین بارهای الکتریکی بوده و هرچه ثابت دی‌الکتریک یک حلال بالاتر باشد، آن حلال نیروهای الکتریکی بین مواد حل شده باردار را بهتر کاهش می‌دهد. در واقع، ثابت دی‌الکتریک بالا در آب سبب می‌گردد تا این ماده به عنوان مهم‌ترین حلال مواد و اجسام قطبی و یونی مورد توجه قرار گیرد. به همین علت، آب مخصوصاً برای الکترولیت‌ها و مولکول‌های قطبی مثل قندها حلال قدرتمندی می‌باشد. D برای آب در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  و به ترتیب  $80/2$  و  $78/4$  است، در حالی که مقدار D برای متانول، استون، بنزن و هگزان مایع در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  به ترتیب  $33$ ،  $21/4$ ،  $2/3$  و  $1/87$  می‌باشد (نوبل، ۱۹۹۴). علت کاهش D با افزایش دما در آب، افزایش تحرکات مولکولی، کاهش پیوندهای هیدروژنی و در نتیجه، کاهش قدرت مولکول‌های آب در جدا کردن یون‌ها است. اختلاف بین ثابت دی‌الکتریک آب و هگزان مایع نشان می‌دهد که به عنوان مثال نیروی جاذبه الکتریکی بین  $\text{Na}^+$  و  $\text{Cl}^-$  در هگزان  $42/9$  برابر بیشتر از آب است  $[(80/2)/(1/87)]$ . پس می‌توان انتظار داشت که مقدار حل شدن  $\text{NaCl}$  در هگزان مایع نسبت به آب بسیار کمتر باشد. به عبارت دیگر، از آنجایی که در آب، خنثی کردن جاذبه بین یون‌ها بهتر صورت می‌گیرد، میزان حل شدن مواد باردار یا قطبی بیشتر است. از طرفی، برعکس مواد قطبی، حلالیت مواد غیرقطبی در آب خیلی کم است، ولی از آنجایی که در بیولوژی اهمیت مواد قطبی بسیار بیشتر از مواد غیرقطبی است، کاهش حلالیت مواد غیرقطبی در آب اهمیت چندانی ندارد. نحوه احاطه یون‌های مثبت و منفی توسط مولکول‌های آب و خنثی کردن جاذبه بین آن‌ها در شکل ۱۱-۲ نشان داده شده است.

1. Cavitation  
2. Embolism  
3. Dielectric constant





شکل ۱۱-۲ آرایش تقریبی مولکول‌های آب در اطراف یون‌ها. آب به شکل پوششی در اطراف یون‌ها، آنها را از یکدیگر جدا کرده و باعث حلالیت یون‌ها در آب می‌شود. این پدیده همچنین ساختمان طبیعی آب را برهم زده و باعث می‌شود حجم آب قدری بیشتر شود (نوبل، ۱۹۹۴).

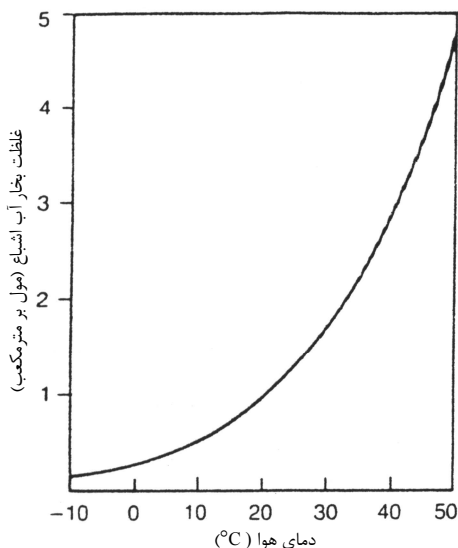
## ۱۲-۱-۲ چگالی و فشار بخار

اگر مقداری آب خالص داخل یک ظرف بسته (دارای گاز یا خلأ) ریخته شود، مولکول‌های آب، از مایع، تبخیر شده و وارد فضای بالای آب می‌شوند. این خروج مولکول‌ها از فاز مایع تا برقراری تعادل بین دو فاز مایع و گاز ادامه می‌یابد. درحالت تعادل، تعداد مولکول‌های آب که وارد فاز گازی می‌شوند برابر با تعداد مولکول‌های آب است که از فاز گازی وارد فاز مایع می‌شوند (ورود = خروج). دراین حالت، یک معیار متداول برای بیان غلظت مولکول‌های آب در فاز گازی، گرم مولکول آب در مترمکعب فضای موجود است که به آن چگالی بخار<sup>۱</sup> می‌گویند. همچنین، مولکول‌های فاز گازی که مداوماً در جهات مختلف حرکت می‌کنند، با سطح مایع و دیواره‌های ظرف برخورد داشته و فشاری را به دیواره ظرف وارد می‌کنند که این فشار وارده را فشار بخار<sup>۲</sup> می‌نامند. باید توجه داشت که چگالی بخار و فشار بخار دو راه مختلف برای نشان دادن مقدار بخار درحالت تعادل با مایع هستند. درحالتی که آب ظرف خالص باشد، تبخیر از فاز مایع تا اشباع شدن فازگازی با بخار آب ادامه داشته و درنتیجه در چنین حالتی چگالی بخار اشباع<sup>۳</sup> جایگزین چگالی بخار و فشار بخار اشباع<sup>۴</sup> جایگزین فشار بخار می‌گردند. مقادیر چگالی بخار اشباع و فشار بخار اشباع به دما بستگی داشته (شکل ۱۲-۲) و به وسیله روابط ۷-۲ و ۸-۲ تعریف می‌شوند (کمبل، ۱۹۹۲):

$$e_s = 610.7 \exp \left\{ \frac{(17.269 T)}{(237.3 + T)} \right\} \quad (2-7)$$

$$C_{sw} = \frac{e}{RT_k} M_w \quad (2-8)$$

1. Vapor density
2. Vapor pressure
3. Saturation vapor density
4. Saturation vapor pressure



شکل ۱۲-۲ وابستگی فشار بخار اشباع به دما. ملاحظه می‌شود که با افزایش دما، فشار بخار به شدت افزایش می‌یابد (کمبل و نورمن، ۱۹۹۸).

اثرات فشار بیرونی، دما و مواد حل شده بر چگالی و فشار بخار در شکل ۱۳-۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دما و فشار دو کمیت فشار بخار اشباع و چگالی بخار اشباع افزایش و با افزایش مواد محلول دو کمیت فوق کاهش می‌یابند.

که در این دو رابطه  $T$  دما برحسب درجه سانتی‌گراد،  $e_s$  فشار بخار اشباع برحسب پاسکال (Pa)،  $M_w$  جرم مولکولی آب (۱۸ گرم بر مول)،  $e$  فشار بخار برحسب پاسکال،  $R$  ثابت عمومی گازها و معادل  $۸,۳۱۴$  مترمکعب پاسکال بر مول درجه کلونین ( $m.Pa.mol^{-1}.k^{-1}$ )،  $T_K$  دما برحسب درجه کلونین و  $C_{sw}$  غلظت یا چگالی بخار اشباع برحسب گرم بر مترمکعب ( $g.m^{-3}$ ) هستند. مقادیر فشار بخار اشباع و چگالی بخار اشباع برای چهار دما در جدول ۴-۲ آورده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دما فشار و چگالی بخار اشباع افزایش می‌یابد. شکسته شدن پیوندهای هیدروژنی و همچنین افزایش تحرک مولکول‌های آب دلیل اصلی افزایش فشار بخار اشباع و چگالی بخار اشباع با افزایش دما است.

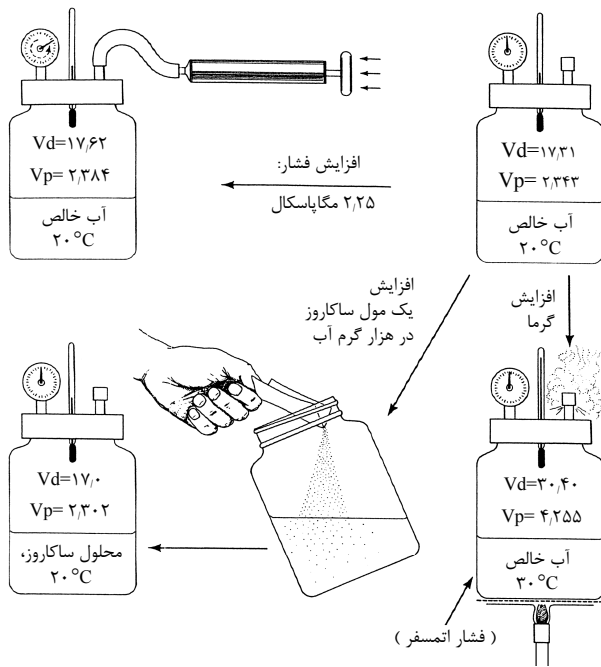
## ۲-۲ ویژگی‌های شیمیایی آب

### ۲-۲-۱ تعریف و اهمیت

پتانسیل شیمیایی آب مقدار انرژی مفید و مؤثر آب برای انجام کار در یک محیط معین را نشان داده و واحد آن ژول بر مول ( $J.mol^{-1}$ ) می‌باشد. در واقع، پتانسیل شیمیایی نشان می‌دهد که هر مولکول گرم آب

جدول ۴-۲ مقدار فشار بخار اشباع و چگالی بخار اشباع برای چهار دما.

چگالی بخار اشباع ( $g.m^{-3}$ )	فشار بخار اشباع (Pa)	دما ( $^{\circ}C$ )
۹,۷۴	۱۲۲۸	۱۰
۱۷,۲۸	۲۳۳۸	۲۰
۳۰,۶۱	۴۲۴۲	۳۰
۵۱,۰۰	۷۳۷۳	۴۰



شکل ۱۳-۲ تأثیر فشار، دما و مواد حل شده بر فشار بخار و چگالی بخار.  $V_d$  غلظت بخار برحسب گرم بر مترمکعب،  $V_p$  فشار بخار برحسب کیلوپاسکال و دما برحسب درجه سانتیگراد است. چنانکه ملاحظه می‌شود، افزودن فشار و دما سبب افزایش فشار و چگالی بخار می‌گردد، درحالی‌که افزودن مواد حل شده هر دو کمیت را کاهش می‌دهد (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

(یا هر ماده دیگر) دارای چه میزان انرژی برای انجام کار است. کار می‌تواند جابه‌جایی، انتقال آب، شرکت در واکنش‌ها و غیره باشد. اهمیت پتانسیل شیمیایی آب در موارد زیر است (نوبل، ۱۹۹۴):

(۱) اختلاف پتانسیل شیمیایی آب بین دو نقطه یا دو محیط، نیروی محرکه برای جابه‌جایی آب را فراهم کرده و جهت حرکت از پتانسیل شیمیایی بیشتر به پتانسیل شیمیایی کمتر است. حرکت آب از خاک به گیاه و در گیاه از ریشه تا برگ و از آنجا به اتمسفر (رابطه ۹-۲) ناشی از همین نیروی محرکه است. در این رابطه  $\mu_w$  نشان‌دهنده پتانسیل شیمیایی آب است.

$$\mu_w \text{ هوا} > \mu_w \text{ برگ} > \mu_w \text{ ریشه} > \mu_w \text{ خاک} \quad (2-9)$$

(۲) مقدار جریان آب در هر جایی (مثلاً در خاک یا گیاه) متناسب با اختلاف پتانسیل شیمیایی آب بین دو نقطه یا دو مکان می‌باشد. هرچه اختلاف پتانسیل بیشتر باشد، مقدار جریان نیز بیشتر خواهد بود.

(۳) شرط لازم و کافی برای تعادل بین دو نقطه آن است که پتانسیل شیمیایی آن دو نقطه برابر بوده و یا اینکه اختلاف پتانسیل شیمیایی بین دو نقطه برابر صفر باشد.

(۴) شرط لازم و کافی برای حصول تعادل بین دو فاز مختلف آن است که پتانسیل شیمیایی آب در دو فاز برابر باشد. در این شرایط تبخیر از مایع به گاز و برعکس آن صفر می‌باشد.

پتانسیل شیمیایی آب دارای مقدار مطلق نبوده و مقدار آن به صورت نسبی بیان می‌شود. مانند ارتفاع که میزان آن را نسبت به سطح دریا یا سطح زمین می‌سنجیم، در مورد پتانسیل شیمیایی آب نیز یک مقدار

پتانسیل در شرایط مرجع یا استاندارد در نظر گرفته شده و پتانسیل شیمیایی آب در مقایسه با آن عنوان می‌گردد. برای آب موجود در سیستمی مانند گیاه یا خاک، پتانسیل شیمیایی استاندارد یا مرجع دارای شرایط زیر بوده و مقدار آن به‌طور قراردادی صفر و با  $\mu_w = 0$  نشان داده می‌شود.

شرایط استاندارد (مرجع) برای آب عبارت‌اند از:

۱. آب به‌صورت خالص یا فاقد مواد حل‌شده باشد.
۲. آب تحت تأثیر نیروهای ماتریک مثل نیروی کاپیلاری نباشد.
۳. آب تحت فشار اتمسفر (نه بیشتر و نه کمتر) باشد.
۴. آب در ارتفاع و دمای معین و برابر با دمای سیستم موردنظر باشد.

پتانسیل شیمیایی آب در هر سیستمی را می‌توان به فشار بخار نسبی در آن سیستم ارتباط داد (روابط ۲-۱۰ و ۲-۱۱) (کرامر، ۱۹۹۵):

$$\mu_w = \mu_w^\circ + RT \ln \frac{e}{e_s} \quad (2-10)$$

چون  $\mu_w = 0$  بنابراین:

$$\mu_w = RT \ln \frac{e}{e_s} \quad (2-11)$$

که در آن،  $\mu_w$  پتانسیل شیمیایی آب برحسب ژول بر مول،  $\mu_w^\circ$  پتانسیل شیمیایی آب در شرایط استاندارد،  $R$  ثابت عمومی گازها و معادل  $8.314$  ژول بر مول در درجه کلوین،  $T$  دمای سیستم برحسب درجه کلوین،  $e$  و  $e_s$  به‌ترتیب فشار بخار و فشار بخار اشباع در دمای سیستم برحسب پاسکال و نسبت  $\frac{e}{e_s}$  فشار بخار نسبی<sup>۱</sup> یا همان رطوبت نسبی<sup>۲</sup> به صورت  $\frac{RH}{100}$  می‌باشند.

به‌عبارت بهتر و ساده‌تر، برای دانستن پتانسیل شیمیایی آب یک سیستم مثل یک برگ یا یک نمونه خاک، کافی‌است نمونه موردنظر را در محفظه بسته‌ای قرار داد تا بین نمونه و فاز گازی بالای آن تعادل برقرار شده و سپس رطوبت نسبی فاز گازی در تعادل با نمونه، اندازه‌گیری شود. اگر این رطوبت نسبی را به صورت  $\frac{RH}{100}$  در معادله بالا قرار دهیم،  $\mu_w$  آن سیستم به‌دست می‌آید. با دقت در شکل ۲-۱۳ و معادله ۲-۱۱ می‌توان دید که هر عاملی که سبب کاهش فشار بخار نسبی گردد،  $\mu_w$  را نیز کم می‌کند و بالعکس هر عاملی که فشار بخار نسبی را افزایش دهد (مثل فشار بیرونی) باعث افزایش  $\mu_w$  نیز خواهد شد.

**تمرین** مقدار  $\mu_w$  یک نمونه خاک با دمای  $20^\circ\text{C}$ ، وقتی که رطوبت نسبی (RH) فاز گازی در تعادل با آن به‌ترتیب برابر ۹۰، ۹۵ و ۹۸ درصد باشد را محاسبه کنید.

## ۲-۲-۲ پتانسیل آب و اجزای آن

از آنجایی که در مبحث روابط آب، کارکردن با واحد پتانسیل شیمیایی آب یعنی ژول بر مول راحت نبوده و در عمل نیز اندازه‌گیری پتانسیل آب با دستگاه‌های موجود به صورت فشار راحت‌تر است، بنابراین، به جای پتانسیل شیمیایی آب، از پتانسیل آب استفاده می‌شود. پتانسیل آب از تقسیم طرفین معادله پتانسیل شیمیایی آب بر حجم مولی آب به دست آمده و واحد آن مشابه واحد فشار (ژول بر مترمکعب) می‌باشد (رابطه ۲-۱۲) (کمبل و نورمن، ۱۹۹۸):

$$1 \text{ J.m}^{-3} = 1 \text{ N.m}^{-2} = 1 \text{ Pa} \quad (2-12)$$

در عمل چون پاسکال (Pa) واحد کوچکی است، بنابراین، در محاسبات از مگاپاسکال (MPa) یا کیلوپاسکال (kPa) استفاده می‌شود. در منابع قدیمی واحد بار (bar) رایج است (روابط ۲-۱۳ و ۲-۱۴).

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 1000 \text{ kPa} = 10 \text{ bar} \quad (2-13)$$

$$0.1 \text{ MPa} = 1 \text{ bar} = 76 \text{ cmHg} = 10 \text{ mH}_2\text{O} \quad (2-14)$$

لازم به ذکر است که حجم مولی آب ( $\bar{V}_m$ )، حجم یک مولکول گرم یا ۱۸ گرم آب بوده و عبارت از  $18 \times 10^{-6}$  مترمکعب بر مول ( $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ) یا ۱۸ سانتی مترمکعب بر مول ( $\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ) است. بدین ترتیب، پتانسیل آب ( $\Psi_w$ ) از طریق رابطه ۲-۱۵ به دست می‌آید.

$$\Psi_w = \frac{\mu_w - \mu_w^\circ}{\bar{V}_w} = \frac{RT}{\bar{V}_w} \ln \frac{e}{e_s} = \frac{RT}{\bar{V}_w} \ln \frac{RH}{100} \quad (2-15)$$

بنابر معادله بالا، که معادله‌ای بسیار مهم در بیولوژی است، پتانسیل آب در هر سیستمی بر اثر عواملی که باعث کاهش فشار بخار یا رطوبت نسبی (RH) می‌شوند، کاهش می‌یابد. این عوامل عبارت‌اند از (کرامر، ۱۹۹۵):

(۱) اضافه شدن مواد حل شده؛ که باعث رقیق شدن آب (کاهش نسبت آب به نسبت کل ماده محلول) و

کاهش فعالیت و انرژی آزاد آب از طریق هیدراسیون<sup>۱</sup> مولکول‌های مواد حل شده یا یون‌ها می‌شوند.

(۲) وجود نیروهای ماتریک شامل نیروهای کاپیلاری؛ که در خاک، دیواره‌های سلولی، پروتوپلاسم و غیره، آب را به خود جذب می‌کنند، مکش ایجاد می‌کنند و انرژی آزاد آب برای انجام کار را کاهش می‌دهند.

(۳) فشار منفی یا مکش<sup>۲</sup>؛ مثل آنچه در آوند چوب گیاهان در حال تعرق رخ می‌دهد (بعدها توضیح داده خواهد شد).

(۴) کاهش دما؛ از طریق افزایش تشکیل پیوندهای هیدروژنی و کاهش تحرک مولکول‌های آب.

(۵) کاهش ارتفاع سیستم در مقایسه با ارتفاع مرجع؛ که برای رساندن آب به سطح مرجع باید انرژی صرف شود.

در مقابل، پتانسیل آب در هر سیستمی بر اثر عواملی که فشار بخار نسبی را افزایش می‌دهند، افزایش پیدا می‌کند. این عوامل عبارت‌اند از:

(۱) اعمال فشار؛ مثل فشاری که دیواره‌های سلولی بر محتویات سلول وارد می‌کنند (بعداً گفته می‌شود).

(۲) افزایش دما؛ از طریق کاهش پیوندهای هیدروژنی و افزایش تحرک مولکول‌های آب.

(۳) افزایش ارتفاع سیستم در مقایسه با ارتفاع مرجع.

بنابراین، می‌توان اظهار داشت که پتانسیل آب ( $\Psi_w$ ) از اجزایی تشکیل شده است که در رابطه ۱۶-۲ آورده شده است:

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_m + \Psi_p + \Psi_z \quad (2-16)$$

که در آن،  $\Psi_s$  پتانسیل اسمزی<sup>۱</sup> است، که در شرایط وجود مواد محلول کمتر از صفر و در شرایط عدم وجود این مواد مساوی صفر می‌باشد.  $\Psi_m$  پتانسیل ماتریک<sup>۲</sup> بوده و در شرایط وجود منافذ ماتریکس، مشروط به آنکه اشباع نشده باشند، کمتر از صفر و در شرایط عدم وجود این منافذ یا در شرایطی که این منافذ وجود داشته باشند ولی اشباع از آب باشند، برابر صفر است.  $\Psi_p$  پتانسیل فشاری<sup>۳</sup> یا آماس بوده و اگر سیستم تحت فشار اتمسفر باشد برابر صفر است. در صورتی که فشار بیشتر از فشار اتمسفر باشد پتانسیل فشاری بزرگ‌تر از صفر و اگر فشار کمتر از فشار اتمسفر باشد، کوچکتر از صفر است.  $\Psi_z$  پتانسیل ثقلی<sup>۴</sup> بوده و در صورتی که سیستم در همان ارتفاع مرجع باشد برابر صفر، اگر بالاتر از ارتفاع مرجع باشد، بزرگ‌تر از صفر و در صورتی که پایین‌تر از ارتفاع مرجع باشد کمتر از صفر است. لازم به ذکر است که  $\Psi_{th}$  پتانسیل دمایی<sup>۵</sup> بوده و از آن‌جایی که در نظر گرفتن و محاسبه آن در تعیین پتانسیل آب بسیار مشکل است، بنابراین، در محاسبه پتانسیل آب معمولاً حذف می‌شود. بنابراین،  $\Psi_w$  فقط برای حالت ایزوترمال، یعنی حالتی که دمای سیستم برابر دمای حالت مرجع است، در نظر گرفته می‌شود. در این قسمت، به اجزای پتانسیل آب و عوامل مؤثر بر آنها پرداخته می‌شود.

### پتانسیل اسمزی

وجود مواد حل شده در آب، باعث کاهش انرژی آزاد آب شده و پتانسیل آب را کاهش می‌دهد. این

کاهش پتانسیل آب ناشی از مواد حل شده را پتانسیل اسمزی می‌نامند و با  $\Psi_s$  یا  $-\pi$  نشان داده می‌شود.

در محلول‌های رقیق، یعنی محلول‌هایی که غلظت آن‌ها کمتر از یک مولال (یعنی وجود یک مولکول

گرم ماده حل شده در ۱ کیلوگرم آب) است، فشار بخار محلول (e) از قانون راول<sup>۶</sup> پیروی می‌کند

---

1. Osmotic potential  
2. Matric potential  
3. Pressure potential  
4. Gravity potential  
5. Thermal potential  
6. Raoult's law

(رابطه ۱۷-۲). قابل ذکر است که غلظت شیره سلولی، شیره خام و محلول خاک اغلب کمتر از یک مولال بوده و بنابراین می توان گفت که احتمالاً قانون راتول برای آنها نیز صادق است (اسلاچر، ۱۹۷۷):

$$e = e_s \frac{n_w}{n_w + n_s} \quad (2-17)$$

که در آن،  $n_w$  تعداد مولکول گرم آب در محلول،  $n_s$  تعداد مولکول گرم مواد حل شده در محلول و  $e_s$  فشار بخار اشباع برای دمای سیستم می باشند. به  $N_w = \frac{n_w}{n_w + n_s}$  کسر مولی آب گفته می شود که عبارت است از نسبت تعداد مولکول گرم آب به کل تعداد مولکول گرم محلول (آب + مواد حل شده). با قدری جابه جایی رابطه ۱۸-۲ به دست می آید:

$$N_w = \frac{e}{e_s} = \frac{n_w}{n_w + n_s} \quad (2-18)$$

در شرایطی که مواد ماتریکی وجود نداشته باشد، فشار وارده بر سیستم مساوی فشار هوا بوده و ارتفاع سیستم نیز معادل ارتفاع مرجع باشد، پتانسیل ماتریک، فشاری و ثقلی سیستم برابر صفر بوده و در نتیجه پتانسیل آب برابر پتانسیل اسمزی خواهد بود و از طریق رابطه ۱۹-۲ قابل محاسبه است.

$$\Psi_s = \Psi_w = \frac{RT}{V_w} \ln N_w \quad (2-19)$$

باتوجه به معادله ۱۹-۲ می توان دید در صورتی که هیچ ماده حل شده ای در آب نباشد (آب خالص)، کسر مولی آب ( $N_w$ ) برابر یک و پتانسیل اسمزی ( $\Psi_s$ ) برابر صفر می شود. در شرایط وجود مواد حل شده، کسر مولی آب کمتر از یک شده و در نتیجه پتانسیل اسمزی منفی می گردد. بنابراین، مشاهده می شود که تغییرات پتانسیل اسمزی وابسته به وجود مواد حل شده بوده و مقادیر آن صفر یا کمتر از صفر است. هرچه مقدار مواد حل شده بیشتر باشد، کسر مولی آب کوچکتر شده و انرژی آزاد آب بیشتر کاهش می یابد و در نتیجه پتانسیل اسمزی منفی تر می شود.

**مثال** در یک محلول یک مولال ساکارز، مقادیر کسر مولی آب ( $N_w$ ) و پتانسیل اسمزی ( $\Psi_s$ ) را در دمای  $20^\circ\text{C}$  به دست آورید.

از آن جایی که یک مول آب ۱۸ گرم وزن دارد (یک مول اتم اکسیژن ۱۶ گرم و هر مول اتم هیدروژن ۱ گرم وزن داشته و بنابراین وزن هر مول آب معادل ۱۸ گرم است)، پس ۱۰۰۰ گرم آب از ۵۵٫۶ مول آب تشکیل شده است. بنابراین:

$$n_w = 1000 / 18 = 55,6$$

در چنین شرایطی کسر مولی آب برابر است:

$$N_w = 55,6 / (55,6 + 1) = 55,6 / 56,6 = 0,9823$$

$$R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}, T = 293^\circ\text{k}, \bar{V}_m = 18 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

بنابراین، پتانسیل اسمزی برابر است با:

$$\Psi_s = \frac{RT}{V_w} \ln N_w = -2,42 \text{ MPa}$$

در رابطه با پتانسیل اسمزی یک قانون تجربی به نام قانون وانت هوف (Van't Hoff) وجود دارد (رابطه ۲۰-۲) که توسط نامبرده در سال ۱۸۸۷ ارائه شده و رابطه‌ای تجربی بین پتانسیل اسمزی و غلظت مولال است (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶):

$$\Psi_s = -CiRT \quad (2-20)$$

که در آن،  $\Psi_s$  پتانسیل اسمزی برحسب مگاپاسکال،  $C$  غلظت محلول به صورت مولالیتیه (مول ماده حل شده در هر کیلوگرم آب،  $\text{mol.kg}^{-1}$ )،  $i$  یک ضریب ثابت برای لحاظ کردن یونیزاسیون ماده حل شده و یا تصحیح سایر انحرافات،  $R$  ثابت گازها (برای معادله بالا  $8,314 \text{ KJ.MPa.mol}^{-1}.K^{-1}$ ) و  $T$  دمای محلول برحسب کلوین است.

حال اگر مقادیر  $i$ ،  $C$  و  $T$  برای یک محلول معلوم باشند، می‌توانیم  $\Psi_s$  را برای آن محلول حساب کنیم. در مورد محلول‌های غیر یونیزه‌شونده مثل ساکارز یا مانتول  $i = 1$  است.  $\Psi_s$  کل در یک محلول پیچیده شامل چندین ماده حل شده (مثل وضعیت موجود در شیره سلولی) عبارت از مجموع کلیه پتانسیل‌های اسمزی برای کلیه مواد حل شده بوده و اُسمولالیتیه (osmolality) نامیده می‌شود.

**مثال** پتانسیل اسمزی یک محلول یک ساکارز در دمای صفر و  $30^\circ\text{C}$  را حساب کنید.

$$\Psi_s = -CiRT$$

پتانسیل اسمزی در دمای صفر درجه سانتی‌گراد:

$$\Psi_s = -(1)(1)(0,008314)(273) = -2,27 \text{ MPa}$$

پتانسیل اسمزی در دمای  $30^\circ\text{C}$ :

$$\Psi_s = -(1)(1)(0,008314)(303) = -2,52 \text{ MPa}$$

مشاهده می‌شود که با افزایش دما پتانسیل اسمزی محلول کاهش (عدد منفی بزرگ‌تر) می‌یابد.

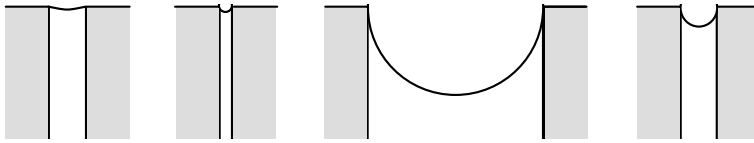
لازم به ذکر است که مقدار  $i$  در محلول‌های یونیزه‌شونده برابر ۱ نیست ( $i \neq 1$ ). به عنوان مثال، محلول ۱ مولال کلرید سدیم (NaCl) را در دمای  $20^\circ\text{C}$  در نظر بگیرید. تصور می‌شود که کلرید سدیم در محلول‌های رقیق ۱۰٪ یونیزه شده و مقدار  $i = 2$  باشد، در صورتی که اندازه‌گیری‌های تجربی نشان داد که مقدار  $i$  واقعی آن برابر ۱٫۸ است، پس برای محاسبه  $\Psi_s$  محلول ۱ مولال کلرید سدیم خواهیم داشت:

$$\Psi_s = -(1)(1,8)(0,008314)(293) = -4,38 \text{ MPa}$$

### پتانسیل ماتریک

بسیاری از مواد دارای منافذ مثل ذرات رس در خاک، پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی تمایل زیادی برای جذب آب دارند. ماده‌ای که دارای منافذ جاذب آب باشد ماتریکس و مقدار انرژی لازم برای





الف	ب	ج	د
۵	۲۶	۱٫۵	۵
۰	۰	۰	۸۷
-۲۹	-۵٫۵	-۹۴	-۱٫۳۶

شعاع منفذ (نانومتر)  
زاویه تماس (°C)  
پتانسیل ماتریک (مگاپاسکال)

شکل ۱۴-۲ ایجاد پتانسیل ماتریک (پتانسیل فشاری منفی) در منافذ نیمه پر بین سلول‌ها و دیواره‌های سلولی و همچنین منافذ موجود در مجاورت ذرات خاک (نوبل، ۱۹۹۴).

جدا کردن مولکول‌های آب از این منافذ، پتانسیل ماتریک ( $\Psi_m$  یا  $-\tau$ ) نامیده می‌شود. جذب آب توسط این منافذ باعث کاهش انرژی آزاد آب و کاهش قابلیت آن برای انجام کار شده و هیدراسیون یا آب‌نوشی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. نکته بسیار مهم این است که وقتی آب کافی جذب این منافذ شود، دیگر قادر به جذب آب بیشتر نخواهند بود. پتانسیل ماتریک تمایل منافذ ذکر شده برای جذب آب اضافی را نشان می‌دهد. یعنی در یک سیستم مثل خاک،  $\Psi_m$  نشان‌دهنده تمایل ماتریکس به جذب آب بیشتر است. پس وقتی ماتریکس اشباع از آب باشد، تمایل به جذب آب اضافی صفر و  $\Psi_m = 0$  است. اما اگر خاک اشباع از آب نباشد، تمایل وجود خواهد داشت و چون باعث کاهش پتانسیل آب می‌شود کوچکتر از صفر خواهد بود.

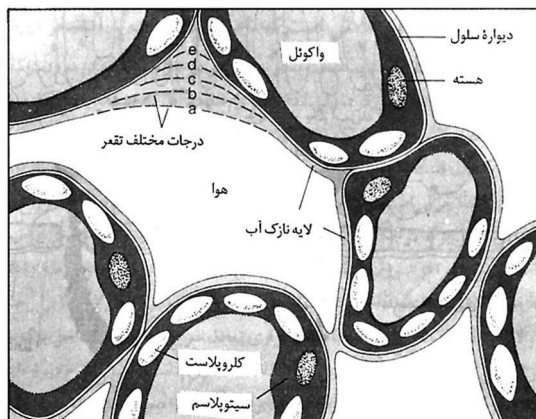
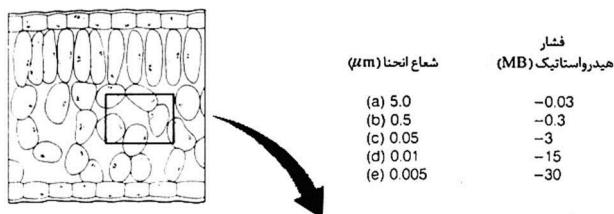
از آنجایی که جذب آب توسط لوله‌های موئین، منافذ خاک و دیواره‌های سلولی (میکروکاپیلاری‌ها) به دلیل وجود پتانسیل ماتریک است، با داشتن قطر لوله یا منفذ در خاک یا گیاه می‌توان  $\Psi_m$  بالقوه موجود در آن را محاسبه کرد. در قسمت کشش سطحی گفته شد که نیروی بالابرنده (یا بالاکشنده) آب برابر  $2\pi r \sigma \cos \alpha$  می‌باشد (رابطه ۲-۲)، که بر روی سطح  $\pi r^2$  اعمال می‌گردد. بنابراین،  $\Psi_m$  (یا شکل مثبت آن مکش ماتریک) برای یک منفذ با شعاع  $r$  از طریق رابطه ۲۱-۲ قابل محاسبه خواهد بود (نوبل، ۱۹۹۴):

$$\Psi_m = -\tau = \frac{-2\pi r \sigma \cos \alpha}{\pi r^2} = -\frac{2\sigma \cos \alpha}{r} \quad (2-21)$$

که در آن،  $r$  شعاع منفذ برحسب متر و  $\sigma$  کشش سطحی هستند. برای منافذ خاک و گیاه،  $\alpha$  را می‌توان صفر در نظر گرفت، که در نتیجه  $\cos \alpha = 1$  می‌گردد. با جایگذاری  $\sigma$  برای دمای  $20^\circ\text{C}$  و تبدیل شعاع به قطر منفذ، به رابطه ساده و بسیار مهم ۲۲-۲ دست خواهیم یافت:

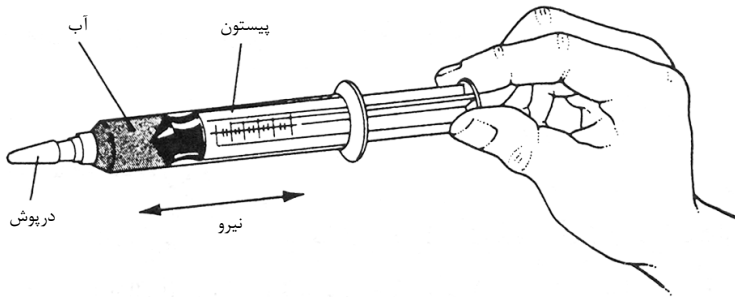
$$\Psi_m = -\frac{0.3}{d} \quad (2-22)$$

که در آن،  $d$  قطر منفذ برحسب میکرومتر و  $\Psi_m$  پتانسیل ماتریک برحسب مگاپاسکال (MPa) است. از آنجایی که منافذ بین دیواره سلول‌ها دارای قطر تپییک ۱۰ نانومتر (۰٫۰۱ میکرومتر) هستند، براساس رابطه ۲۲-۲ پتانسیل ماتریک بالقوه آن‌ها (اگر فاقد آب باشند) حدود  $30 \text{ MPa}$  می‌باشد. وجود پتانسیل



شکل ۱۵-۲ منافذ دیواره سلول‌های برگ. با کاهش پتانسیل آب شعاع انحنا تقعر و پتانسیل فشاری (فشار هیدرواستاتیک) کاهش یافته و تنها در منافذ کوچک و دیواره‌های سلولی آب به صورت مایع باقی می‌ماند (کافی و همکاران، ۱۳۷۸).

ماتریک بالقوه حدود  $30 \text{ MPa}$  - بین منافذ سلولی نشان می‌دهد که اگر این منافذ دارای مقداری آب باشند، برای خالی شدن آن‌ها از آب باید فشار یا مکشی معادل  $30 \text{ MPa}$  اعمال گردد. لازم به ذکر است که در منافذ پُراز آب، تمایل به جذب آب بیشتر وجود نداشته و بنابراین پتانسیل ماتریک این منافذ برابر صفر خواهد بود. به طریق مشابهی در منافذ نیمه پر بین سلول‌ها و دیواره‌های سلولی که در زیر حفره روزنه قرار گرفته‌اند و همچنین منافذ موجود در مجاورت ذرات خاک پتانسیل ماتریک ایجاد می‌گردد. مبنای ایجاد این پتانسیل ماتریک معادله ۲۱-۲ می‌باشد. در چنین منافذی میزان پتانسیل ماتریک به قطر (شعاع) منفذ و زاویه تماس یا شعاع انحنا بستگی دارد (شکل‌های ۱۴-۲ و ۱۵-۲). تبخیر آب از منافذ بین سلول‌ها یا منافذ دیواره‌های سلولی باعث می‌شود سطح آب در آن‌ها پایین رفته و زاویه تماس روبه کاهش بگذارد یا به صفر برسد (شکل ۱۴-۲ الف، ب، ج). حتی کاهش جزئی آب در این منافذ باعث ایجاد پتانسیل ماتریک قابل توجهی می‌شود که نمونه‌ای از آن در شکل ۱۴-۲ د نشان داده شده است. در این شکل، کاهش جزئی آب باعث شده است تا زاویه تماس از  $90^\circ$  درجه به  $87^\circ$  درجه کاهش یابد، که این امر ایجاد پتانسیل ماتریک معادل با  $1.36 \text{ MPa}$  - را در پی داشته است.



شکل ۱۶-۲ از یک سرنگ می‌توان برای تولید فشار مثبت یا منفی در مایعی مانند آب استفاده کرد. وارد آوردن فشار بر روی پیستون باعث فشرده شدن مایع و تولید فشار مثبت می‌شود. اگر یک حباب کوچک هوا در سرنگ حبس شود، می‌توان افزایش فشار را در آن دید. وقتی پیستون به طرف عقب کشیده می‌شود، در مایع کشش ایجاد شده و تولید فشار منفی می‌کند. اگر در سرنگ حبابی وجود داشته باشد، هرچه قدر فشار نسبت به فشار اتمسفر کمتر شود، حباب بزرگتر می‌شود. اگر سرنگ با محلول بدون گاز و فاقد حباب پر شود، فشار مادون‌خلاء (فشار منفی) به وجود می‌آید، زیرا در این صورت، پیوندهای بین مولکولی می‌توانند قبل از شکسته شدن، کشش سطحی قابل توجهی را تحمل کنند (کافی و همکاران، ۱۳۷۸).

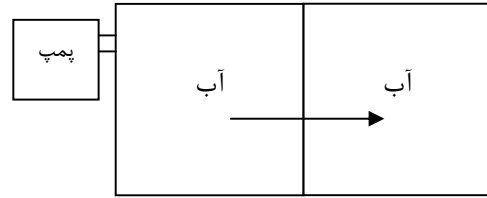
در فضاهای نیمه پر بین سلول‌ها نیز به طریق مشابهی پتانسیل ماتریک ایجاد می‌گردد که در شکل ۱۵-۲ به تصویر کشیده شده است. تبخیر آب باعث کاهش میزان و شعاع انحناى آب این منافذ شده و در نتیجه پتانسیل ماتریک منفی تری ایجاد می‌گردد. شعاع انحنا در شکل ۱۵-۲ را می‌توانید به عنوان شعاع منفذ تجسم کنید. با کاهش شعاع انحنا در حقیقت با منفذ کوچکتری روبرو هستیم که در آن، پتانسیل ماتریک منفی تری قابل توسعه است. ایجاد پتانسیل ماتریک در خاک نیز با مکانیسم مشابهی صورت می‌گیرد. بدین منظور، در شکل ۱۵-۲ تصور کنید که سلول‌های گیاهی ذرات خاک باشند. لازم به ذکر است که در حالات ذکر شده، پتانسیل ماتریک از جنس مکش یا فشار منفی بوده و به همین دلیل در منافذ پر، مکش وجود ندارد.

### پتانسیل فشاری

افزایش فشار از طریق افزایش انرژی آزاد یک سیستم سبب افزایش پتانسیل فشاری و در نتیجه پتانسیل شیمیایی یک سیستم می‌گردد (شکل ۱۶-۲). پتانسیل فشاری یک سیستم با  $\Psi_p$  یا  $P$  نشان داده می‌شود. برای درک بهتر پتانسیل فشاری ظرفی را در نظر بگیرید که توسط یک غشای نفوذپذیر به آب و غیرقابل خم شدن به دو بخش تقسیم شده است (شکل ۱۷-۲). اگر به طرف چپ فشار وارد شود، پتانسیل آب در آن طرف افزایش یافته و مولکول‌های آب بر اثر انتشار و در جهت شیب پتانسیل به سمت دیگر ظرف خواهند رفت. در این حالت، در سمت چپ ظرف پتانسیل فشاری مثبت ایجاد شده است.

در سلول‌های گیاهی به واسطه وجود مواد حل شده، پتانسیل اسمزی شیره سلولی منفی بوده و به همین دلیل آب وارد سلول (واکول) می‌شود و باعث ایجاد فشار می‌گردد. از طرفی، دیواره‌های سلولی

شکل ۱۷-۲ افزایش فشار به سمت چپ ظرف، پتانسیل آب در آن طرف را افزایش داده و مولکول‌های آب بر اثر انتشار به سمت دیگر ظرف خواهند رفت. در این حالت، در سمت چپ ظرف پتانسیل فشاری مثبت ایجاد می‌شود (از مؤلف).

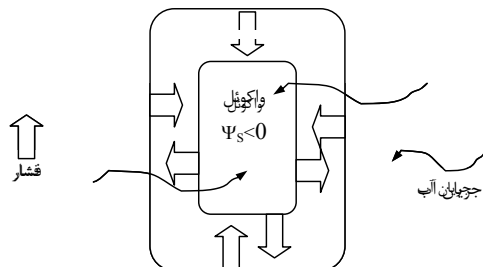


نمی‌توانند خیلی اتساع پیدا کنند، بنابراین، محتویات سلول از دو طرف تحت فشار قرار می‌گیرند (شکل ۱۸-۲). در این مورد پتانسیل فشاری مثبت و بزرگ‌تر از صفر است. این پتانسیل فشاری مثبت فشار آماس (Tugen pressure) نیز نامیده می‌شود و نقش مهمی در بزرگ‌شدن سلولی، بازوبسته‌شدن روزنه‌ها و شکل‌دهی گیاه دارد. معمولاً محتویات سلول‌های گیاهی تحت فشاری بیش از فشار اتمسفر هستند. اظهار شده است که احتمالاً مهم‌ترین مکانیسم تأثیر کمبود آب بر فرایندهای متابولیک گیاه از طریق تأثیر آن بر فشار آماس می‌باشد. احتمالاً در نتیجه تغییر فشار آماس، آرایش یا روابط فضایی آنزیم‌های سیتوپلاسم و آنزیم‌های واقع بر روی غشاهای سلولی تغییر کرده و فعالیت آن‌ها دستخوش تغییر می‌شود (کرامر، ۱۹۹۵).

تحت بعضی از شرایط پتانسیل فشاری می‌تواند منفی باشد. این وضعیت در گیاهان در حال تعرق رخ می‌دهد. در این حالت، آب از سطوح دیواره‌های سلولی واقع در معرض فضاهای زیر روزنه تبخیر می‌شود. یعنی منافذ دیواره‌های سلولی آب خود را ازدست داده و در نتیجه مطابق رابطه ۲۱-۲ یک مکش یا فشار منفی ایجاد می‌شود (شکل ۱۴-۲). این مکش بر آب سلول‌ها وارد می‌شود و چون آب سلول با آب آوند چوب ارتباط دارد، بنابراین، آب آوند چوب نیز تحت مکش قرار می‌گیرد. در این شرایط  $\Psi_p = \Psi_m$  است. در سال‌های اخیر، برخی دانشمندان  $\Psi_m$  را از معادله  $\Psi_w$  حذف کرده و آن را با  $\Psi_p$  جایگزین نموده‌اند.

### پتانسیل ثقلی

پتانسیل ثقلی به محل آب در مقایسه با سطح مرجع بستگی داشته و با  $\Psi_z$  یا  $\Psi_g$  یا  $G$  نشان داده می‌شود. از آنجایی که برای انتقال آب به بالاتر از ارتفاع مرجع (مبنا) باید انرژی مصرف شود، بنابراین، آبی که در ارتفاع بالاتر است، دارای انرژی بیشتری برای انجام کار خواهد بود. اگر آب در سطح مرجع باشد،  $\Psi_z = 0$  است، اگر زیر سطح مرجع باشد،  $\Psi_z < 0$  است و اگر بالاتر از سطح مرجع باشد  $\Psi_z > 0$  است.



شکل ۱۸-۲ ایجاد پتانسیل فشاری در سلول گیاهی از طریق فشار آمدن به محتویات درون سلولی از اطراف سلول (از مؤلف).

جدول ۲-۵ مقادیر وزن حجمی آب ( $\rho_w$ ) برای چند دما.

۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۴	۰	دما (درجه سانتی‌گراد)
۹۹۲٫۲	۹۹۵٫۶	۹۹۸٫۲	۹۹۹٫۷	۱۰۰۰	۹۹۹٫۸	$\rho_w$ (کیلوگرم بر مترمکعب)

پتانسیل ثقلی با معادله ۲-۲۳ قابل بررسی است (نوبل، ۱۹۹۴):

$$\Psi_Z = \rho_w g h \quad (2-23)$$

که در آن،  $\rho_w$  وزن حجمی آب برحسب کیلوگرم بر مترمکعب ( $\text{kg.m}^{-3}$ )،  $g$  شتاب ثقل زمین که معادل ۹٫۸ متر بر ریشه دوم ثانیه بوده ( $\text{m.s}^{-2}$ ) و  $h$  ارتفاع درمقایسه با سطح مرجع و برحسب متر (m) است. وزن حجمی آب ( $\rho_w$ ) با دما رابطه داشته و با افزایش دما تا  $4^\circ\text{C}$  افزایش و سپس به دلیل شکستن پیوندهای هیدروژنی و تحرک بیشتر مولکول‌های آب کاهش می‌یابد (جدول ۲-۵).

**مثال** مطلوب است محاسبه  $\Psi_Z$  در سطح مرجع و در ارتفاع ۳ متر بالاتر از آن در دمای  $20^\circ\text{C}$ .

$$h=0 \Rightarrow \Psi_Z=0$$

$$h=3 \text{ m} \Rightarrow \Psi_Z = (998.2) (9.8) (3) = 29347.08 \frac{\text{kg.m}}{\text{m}^2.\text{s}^2} = \text{J.m}^{-3} = 0.03 \text{ MPa}$$

مشاهده می‌شود که به ازای هر متر افزایش ارتفاع، پتانسیل ثقلی معادل  $0.03 \text{ MPa}$  افزایش می‌یابد. در واقع، مقدار انرژی لازم برای غلبه بر نیروی جاذبه و صعود آب حدود  $0.03 \text{ MPa}$  بر متر است. از آنجایی که معمولاً مقدار پتانسیل ثقلی درمقایسه با مقادیر پتانسیل ماتریک، اسمزی و فشاری اندک است، در بسیاری مواقع، به‌ویژه در فواصل انتقال کوتاه (مثلاً در گیاهان علفی)، قابل صرف‌نظر می‌باشد. البته در انتقال آب در درختان بلند قامت و به دلیل مسافت زیاد انتقال آب مقدار پتانسیل ثقلی قابل صرف‌نظر کردن نبوده و باید محاسبه شود.

## ۲-۳ ویژگی‌های محلول‌های آبی

### ۲-۳-۱ ویژگی‌های کولیگاتیو

به دلیل اینکه آب موجود در گیاه و در محیط ریشه و خاک حاوی طیف وسیعی از مواد حل شده است، در خاک و گیاه به ندرت آب خالص وجود دارد. از این رو، درک تفاوت‌های بین آب خالص و محلول‌های آبی<sup>۱</sup> از نظر ویژگی‌ها ضروری است. ویژگی‌هایی که در محلول‌های آبی تغییر پیدا می‌کنند، به ویژگی‌های کولیگاتیو (colligative) معروف‌اند (کرامر، ۱۹۹۵). از آنجایی که اثر ماده حل شده بر روی این ویژگی‌ها یکسان است، بنابراین، کولیگاتیو یا خواص به هم‌گره خورده نامیده می‌شوند. به عبارت دیگر، ویژگی‌های کولیگاتیو با غلظت مواد حل شده در آب ارتباط دارند. فشار بخار، نقطه انجماد، نقطه جوش، پتانسیل اسمزی و پتانسیل آب با میزان غلظت مواد حل شده در آب تغییر کرده و بنابراین جزو ویژگی‌های کولیگاتیو آب هستند (جدول ۲-۶).

1. Aqueous solution

**جدول ۶-۲** ویژگی‌های کولیگاتیو یک محلول مولال غیرالکترولیت (مثل ساکاروز) در مقایسه با آب خالص (کرامر، ۱۹۹۵).

ویژگی	آب خالص	محلول مولال
فشار بخار (در صفر درجه سانتی‌گراد)	۰٫۹۱ کیلوپاسکال	بنابر قانون راولن کاهش می‌یابد
فشار بخار (در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)	۱۰۱٫۳ کیلوپاسکال	بنابر قانون راولن کاهش می‌یابد
نقطه جوش	۱۰۰ درجه سانتی‌گراد	۱۰۰٫۵۱۸ درجه سانتی‌گراد <sup>۱</sup>
نقطه انجماد	صفر درجه سانتی‌گراد	۱٫۸۶- درجه سانتی‌گراد
پتانسیل اسمزی	۰	۲٫۲۷- مگاپاسکال
پتانسیل آب	۰	کاهش می‌یابد

۱. وجود مواد محلول، سبب کاهش فشار بخار نسبت به آب خالص شده و در نتیجه میزان انرژی لازم برای رسیدن به نقطه جوش با افزایش مواد محلول افزایش می‌یابد.

### ۲-۳-۲ ارتباط پتانسیل اسمزی با کاهش نقطه انجماد

به لحاظ تئوریک ملاحظه شد که نقطه انجماد یک محلول مولال  $1.86^\circ\text{C}$  کاهش می‌یابد (جدول ۶-۲) و پتانسیل اسمزی آن در صفر درجه سانتی‌گراد  $2.27\text{ MPa}$  است. بنابراین، پتانسیل اسمزی ( $\Psi_s$ ) یک محلول را می‌توانیم با استفاده از میزان کاهش نقطه انجماد آن محلول ( $\Delta T$ ) محاسبه کنیم (رابطه ۲-۲۴) (کرامر، ۱۹۹۵):

$$\Psi_s = -[\Delta T / (1.86)] \times 2.27 \text{ MPa} \quad (2-24)$$

مثلاً اگر نقطه انجماد یک محلول مثل شیر سلولی  $1^\circ\text{C}$  باشد، مقدار  $\Delta T$  آن برابر ۱ و بنابراین پتانسیل اسمزی آن بر اساس رابطه ۲-۲۴ خواهد بود با:

$$\Psi_s = -(1 / 1.86) \times 2.27 = -1.22 \text{ MPa}$$

به روش‌هایی که پتانسیل اسمزی ( $\Psi_s$ ) را از طریق کاهش نقطه انجماد برآورد می‌کنند، روش‌های کریوسکوپی (cryoscopic) یا کاهش نقطه انجماد<sup>۱</sup> می‌گویند.

### ۲-۴ کیفیت آب برای آبیاری

کیفیت آب آبیاری با توجه به هدف مورد استفاده تعیین می‌شود. برای آب مورد استفاده در آبیاری معیارهای مرسوم شامل شوری، میزان سدیم و سمیت عناصر است. تعدادی از معیارهای مهم دیگر کیفیت آب شامل مزه، رنگ، بو، شفافیت، دما، سختی، pH، COD، BOD، میزان عناصر غذایی نیتروژن و فسفر و عوامل بیماری‌زا هستند، که در بعضی اوقات و نه همیشه، برای تعیین کیفیت آب آبیاری مورد توجه قرار می‌گیرند (میلر و داناو، ۱۹۹۰).

#### ۲-۴-۱ شفافیت

شفافیت<sup>۲</sup>، عدم تیرگی و مات بودن آب است که به وسیله اجسام معلق مانند رس، سیلت، شن و مواد آلی به وجود می‌آید. این مواد ممکن است کانال‌های آبیاری، منابع آب و منافذ سطح خاک را پر کرده و سبب

1. Freezing point depression

2. Turbidity

مسدود شدن لوله‌های سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی شوند. مشکلات این مواد و رسوب آن‌ها را می‌توان به‌وسیله استفاده از فیلترها و حوضچه‌های آرام و ساکن‌کننده آب کاهش داد.

### ۲-۴-۲ دما

از آنجایی که دمای خاک و تشعشع خورشیدی سبب متعادل شدن دمای آب آبیاری می‌شوند، بنابراین، در این خصوص، معمولاً دما نگران‌کننده رشد گیاه نیست. البته در تعدادی از شرایط، آب‌های بسیار سرد می‌توانند محدودکننده رشد گیاهان زراعی مثل برنج شوند که آب در پای بوته به‌صورت غرقاب وجود دارد.

### ۲-۴-۳ COD و BOD

نیاز اکسیژن بیولوژیکی<sup>۱</sup> (BOD) یا نیاز اکسیژن شیمیایی<sup>۲</sup> (COD) نشان می‌دهند که چه مقدار از اکسیژن حل شده در آب توسط تجزیه شدن مواد آلی یا اکسید شدن مواد شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آب با مقادیر BOD و COD بالا حاوی مواد آلی مثل جلبک‌ها، باقی‌مانده‌های گیاهی و کودهای آلی است. لجن، خزه و گنداب دارای BOD و COD بالایی بوده و برای موجودات زنده در آب مضر هستند. این آب‌ها وقتی در خاک‌های دارای زهکشی پایین استفاده می‌شوند موجب تخلیه سریع اکسیژن خاک می‌گردند. آب‌های آبیاری با BOD بالا وقتی در خاک استفاده می‌شوند، می‌توانند موجب تهویه ضعیف خاک (کمبود اکسیژن) گردند.

### ۲-۴-۴ عناصر غذایی و مواد آلی

اگر عناصر معدنی و مواد آلی در غلظت‌های بالا وجود داشته باشند، آب آلوده شده و به‌وسیله جلبک‌ها پوشیده می‌شود. مواد غذایی و آلی که دارای مقادیر نیتروژن و فسفر بالایی هستند، می‌توانند برای رشد جلبک‌ها مورد استفاده واقع شوند. آلودگی آب در چنین شرایطی به‌خصوص در سرعت‌های کم جریان آب و آب‌های ساکن شدت بیشتری می‌یابد. از بین عناصر غذایی سمیت بور در آب آبیاری متداول است. از آنجایی که حلالیت بور در آب بسیار بالا است، بنابراین، نمی‌توان با ساکن و آرام کردن آب، بور را به‌صورت ته‌نشست و رسوب از آب خارج کرد. اضافه کردن مقادیر زیادی از آب با میزان بور کم به آب آبیاری با بور زیاد، می‌تواند سبب کاهش میزان بور آب و رفع سمیت آن شود.

### ۲-۴-۵ شوری

شوری یا کل نمک‌های قابل حل<sup>۳</sup> (TSS) یکی از مهم‌ترین معیارهای کیفیت آب آبیاری است. مقادیر نمک آب به‌وسیله هدایت الکتریکی<sup>۴</sup> (EC) و برحسب دسی‌زیمنس بر متر یا زیمنس بر متر برای محلول خاک

---

1. Biological oxygen demand  
2. Chemical oxygen demand  
3. Total soluble salts  
4. Electrical conductivity

## جدول ۷-۲ یک نمونه تیپیک طبقه‌بندی تأثیر عوامل مخرب بر کیفیت آب آبیاری مزارع کشاورزی\*.

شدت مشکل			اجزای مخرب آب
مشکل زیاد	مشکل متوسط	بدون مشکل	
>۳	۰٫۷۵-۳	<۰٫۷۵	شوری (دسی‌زیمنس بر متر)
>۹	۶-۹	<۶	SAR در خاک با رس غالب مونت موریلونیت
>۱۶	۸-۱۶	<۸	SAR در خاک با رس غالب ایلیت-ورمیکولیت
>۲۴	۱۶-۲۴	<۱۶	SAR در خاک با رس غالب کائولینیت
>۱۰	۴-۱۰	<۴	کلرید (میلی‌مول بر لیتر)
>۲	۰٫۷۵-۲	<۰٫۷۵	بور (میلی‌مول بر لیتر)
>۳۰	۵-۳۰	<۵	نیتروژن نیتراتی یا آمونیاکی (میلی‌مول بر لیتر)
>۸٫۵	۱٫۵-۸٫۵	<۱٫۵	بی‌کربنات (میلی‌مول بر لیتر)
>۹٫۵ و ۰-۵		۶٫۵-۸٫۴	pH

\*. اعداد تقریبی بوده و فرض شده است که خاک لوم شنی تا لوم رسی، دارای زهکشی خوب و اقلیم خشک تا نیمه‌خشک می‌باشد.

و یا میلی‌زیمنس بر متر برای آب آبیاری محاسبه می‌شود. یک طبقه‌بندی تیپیک کیفیت آب آبیاری در شکل ۱۹-۲ آورده شده است.

قابل‌استفاده‌بودن یا نبودن آب برای آبیاری به مرحله و میزان رشد گیاه، گونه گیاهی، میزان آبشویی در هر آبیاری و زمان خشک‌بودن خاک تا آبیاری بعدی بستگی دارد. اگر خاک تا آبیاری بعدی زمان برای خشک‌شدن داشته باشد، نمک‌ها به‌جای آنکه به‌وسیله آبشویی به‌عمق خاک نفوذ کنند، به‌وسیله تبخیر آب به‌سطح خاک می‌آیند. با افزایش رطوبت خاک و آبشویی، میزان نمک خاکی که گیاه می‌تواند تحمل کند بیشتر شده و در نتیجه گیاه می‌تواند با آب آبیاری دارای شوری بالاتر، به رشد خود ادامه دهد.

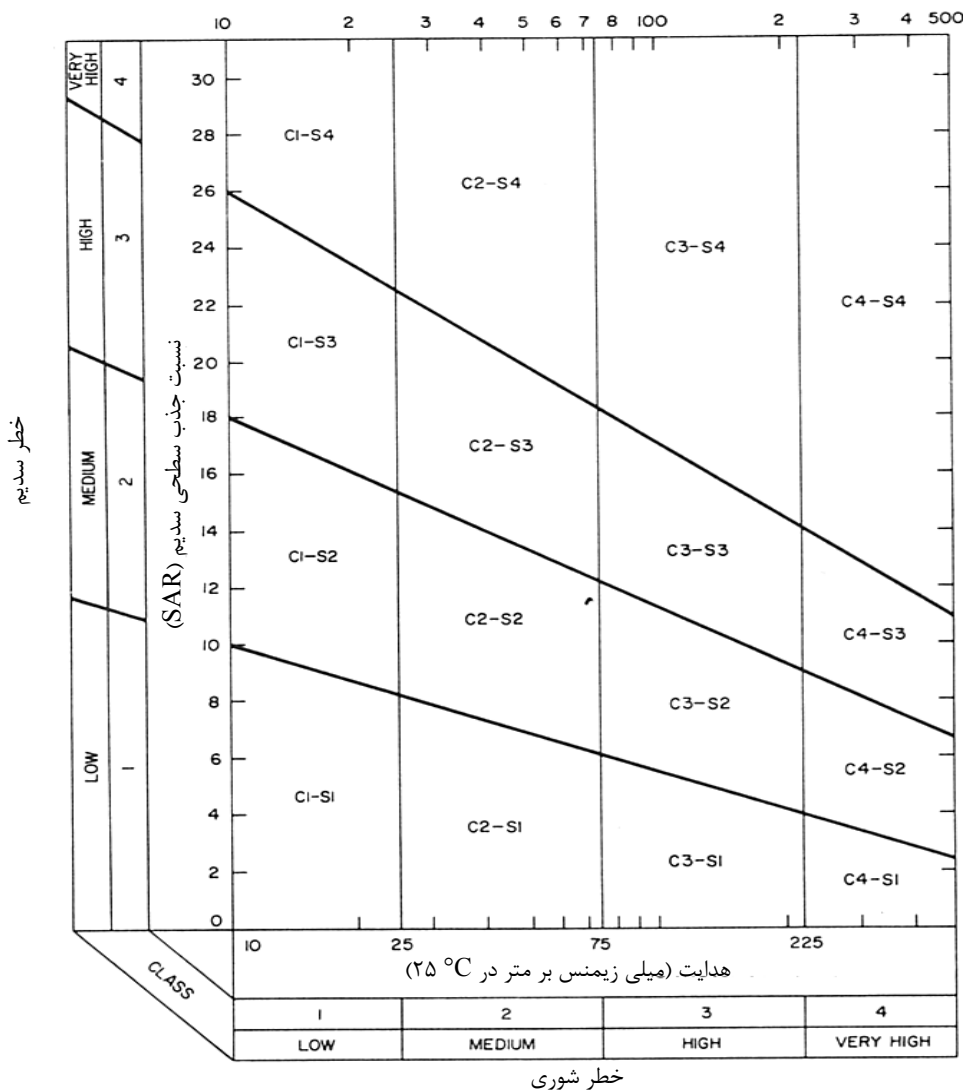
## ۶-۴-۲ سدیم

غلظت بالای سدیم (Sodicity)، برای آب آبیاری نامطلوب است. سدیم مکان‌های تبادل کاتیونی خاک را اشغال کرده، سبب شکستن و تجزیه خاک‌دانه‌های خاک می‌شود. همچنین، سدیم منافذ خاک را پر کرده و سبب می‌شود تا این منافذ قابلیت نفوذ آب خود را از دست بدهند. میزان اشغال مکان‌های تبدالی خاک به‌وسیله سدیم به حضور کاتیون‌های دیگر بستگی داشته و به نسبت میزان کلسیم و منیزیم آب وابسته است. نسبت سدیم به مجموع کلسیم + منیزیم نسبت جذب سطحی سدیم<sup>۱</sup> (SAR) نامیده می‌شود. یک SAR کوچک نشان‌دهنده میزان سدیم پایین آب بوده و این آب از این نظر برای آبیاری دارای کیفیت مطلوبی است. جهت درک بهتر تأثیر عوامل ذکر شده فوق بر کیفیت آب آبیاری مزارع کشاورزی یک نمونه تیپیک طبقه‌بندی کیفیت آب آبیاری که توسط سازمان خواروبار جهانی<sup>۲</sup> (FAO) ارائه شده، در جدول ۷-۲ آورده شده است.

1. Sodium adsorption ratio

2. Food and Agriculture Organization





شکل ۱۹-۲ یکی از روش‌های طبقه‌بندی آب جهت تعیین کیفیت آب آبیاری. بهترین آب برای آبیاری در گوشه پایین و چپ شکل و بدترین آب برای آبیاری در گوشه بالای راست شکل قرار دارد. C نشان‌دهنده شوری و S نشان‌دهنده سدیم است (میلر و داناو، ۱۹۹۰).

# روابط آب سلول

در این فصل می‌خوانیم:

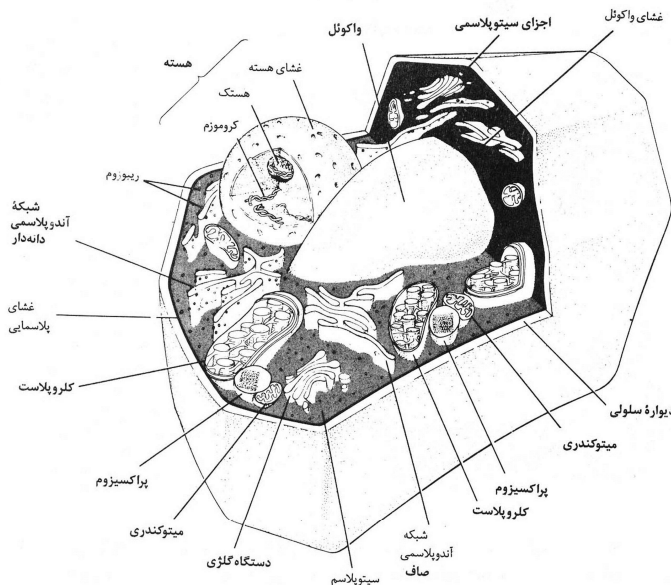
- ۳-۱ ساختمان سلول
- ۳-۲ توزیع آب در سلول‌ها
- ۳-۳ حرکت آب و مواد محلول از غشاها
- ۳-۴ تنظیم اسمزی
- ۳-۵ نمودار هافلر

## مقدمه

سلول واحد ساختمانی تمامی موجودات، شامل تک‌سلولی‌ها تا درختان و جانوران بزرگ جثه است. اندازه اکثر سلول‌ها میکروسکوپی بوده و با چشم غیر مسلح دیده نمی‌شوند. قطر معمول سلول‌های گیاهی حدود ۵ تا ۱۰۰ میکرومتر است (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶). اندازه کوچک سلول‌ها و پیچیدگی‌های موجود در سطح آن‌ها سبب گردیده تا نسبت سطح به حجم سلول‌ها زیاد شده و این مسئله سبب سهولت انتشار مواد غذایی، املاح و مواد زائد بین سلول و محیط اطراف آن می‌شود. جذب آب توسط سلول که در اثر ورود انتخابی املاح از غشای پلاسمایی و در نتیجه ایجاد فشار اسمزی صورت می‌گیرد، سبب بزرگ‌شدن، تورم، استحکام و سفتی سلول می‌شود. از طرفی، ازدست‌رفتن آب سلول می‌تواند سبب کاهش حجم، چروکیدگی و حتی مرگ سلول شود. نکته جالب توجه این است که بسیاری از خصوصیات فیزیکی و بیولوژیکی مولکول‌های درون‌سلولی به‌خصوص پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک، ناشی از واکنش متقابل بین مولکول‌های آب و این مولکول‌ها است.

## ۳-۱ ساختمان سلول

گرچه گیاهان دارای انواع مختلفی از سلول‌ها با شکل و عملی متمایز هستند، ولی تقریباً تمامی سلول‌های گیاهی دارای اجزای ساختمانی مشترکی هستند. دیواره سلولی، که مختص سلول‌های گیاهی است، تعیین‌کننده محیط و اندازه سلول بوده و به‌همراه غشای پلاسمایی، که در قسمت داخلی آن واقع

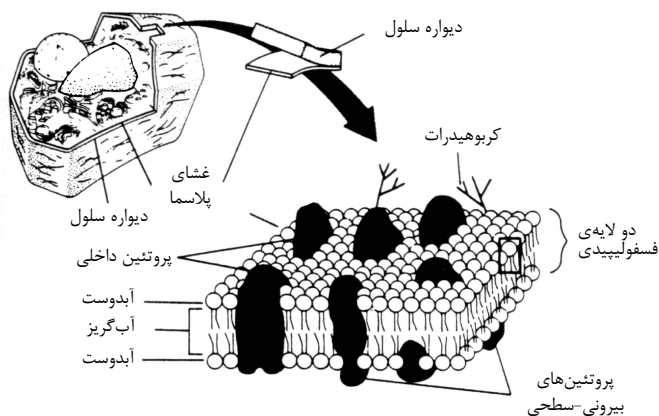


شکل ۱-۳ ساختمان سلول‌های گیاهی و اجزای تشکیل‌دهنده آن. در سلول‌های بالغ واکوئل بالغ بر ۹۰٪ حجم سلول را تشکیل می‌دهد. توجه شود که علاوه بر غشای پلاسمایی بخش‌های داخلی سلول نیز دارای غشای اختصاصی هستند (کافی و همکاران، ۱۳۷۸).

شده است، محتویات سلول را از بقیه سلول‌ها و محیط اطراف جدا می‌کنند. اجزای مهم تشکیل‌دهنده سلول‌های گیاهی شامل غشای پلاسمایی (plasmalema)، سیتوپلاسم (cytoplasm)، واکوئل (vacuole)، کلروپلاست (chloroplast)، میتوکندری (mitochondria) و هسته (nucleus) است (شکل ۱-۳)، که در مبحث رابطه آب خاک و گیاه توضیح مختصری در مورد وظایف و اهمیت سه جزء اول داده می‌شود. لازم به ذکر است که هرکدام از اندامک‌های درون سلول ترکیب خاص خود را داشته و غلظت معینی از مواد محلول را دارا هستند. بنابراین، غلظت مواد محلول و فشار اسمزی در اندامک‌های درون سلول یکسان نیست.

### ۱-۱-۳ غشای پلاسمایی

غشای پلاسمایی از مولکول‌های متعدد چربی و پروتئین تشکیل شده، که در کنار یکدیگر یک لایه آب‌گریز در اطراف سلول تولید می‌کنند و سبب جدا شدن محتویات سلول از محیط اطراف می‌شوند (شکل ۲-۳). از طرفی، غشای پلاسمایی نسبت به آب نفوذپذیر بوده و میزان بزرگ شدن حجم سلول در هنگام جذب آب و آماس و همچنین کاهش حجم سلول در هنگام از دست رفتن آب، به میزان ارتجاع‌پذیری غشای پلاسمایی بستگی دارد. غشای پلاسمایی در برابر عبور یون‌ها، مواد معدنی و عناصر غذایی به شدت



شکل ۲-۳ ساختمان غشای پلاسمایی که از دو لایه فسفولیپیدی که مولکول‌های پروتئین در بین آن‌ها قرار گرفته اند، تشکیل شده است. قسمت میانی دو لایه غشا آب‌گریز و دو سمت بیرونی آن آب‌دوست است. مولکول‌های پروتئین مانند کانال عمل کرده و اجازه عبور انتخابی بعضی از مواد را می‌دهند (کافی و همکاران، ۱۳۷۸).

انتخابی عمل می‌کند و تنها اجازه عبور یون‌ها و عناصر خاصی را می‌دهد. پروتئین‌ها، مولکول‌های ناقل عمده بر روی غشا هستند که اجازه عبور برخی از یون‌ها و مولکول‌ها از عرض غشا را به صورت فعال یا غیرفعال می‌دهند. صدمه دیدن غشا خاصیت انتخابی انتقالی آنرا از بین برده و از طریق نشت مواد به بیرون سلول و یا ورود غیرانتخابی مواد از بیرون به داخل سلول سبب مرگ سلول می‌شود.

به عنوان مثال، در روی غشای سلول‌های بعضی از گیاهان که در مناطق شور زندگی می‌کنند، مولکول‌های ناقلی وجود دارند که در شرایطی که غلظت سدیم محیط بسیار بیشتر از پتاسیم است، به نفع پتاسیم به صورت انتخابی عمل کرده و سبب حفظ نسبت‌های بالای پتاسیم به سدیم در سلول می‌شوند. صدمه دیدن غشا باعث می‌شود که این خصوصیت جذب انتخابی غشای پلاسمایی از بین رفته و به علت غلظت بالای سدیم در چنین محیط‌های شوری، غلظت سدیم و همچنین نسبت سدیم به پتاسیم در سلول افزایش یابد. افزایش غلظت سدیم و به عبارتی افزایش نسبت سدیم به پتاسیم در سلول سبب مختل شدن فعالیت آنزیم‌ها و بسیاری از اعمال متابولیکی سلول می‌گردد. این مسئله می‌تواند در نهایت سبب مرگ سلول، بافت و حتی گیاه شود. به هر حال، حفظ نسبت‌های بالای پتاسیم به سدیم سلول یکی از اعمال ویژه غشا بوده و می‌تواند به عنوان یک عامل مهم در افزایش تحمل به شوری گیاهان مدنظر قرار گیرد.

خاصیت انتخابی غشای پلاسمایی در انتقال املاح سبب می‌شود تا غلظت املاح در داخل و بیرون سلول متفاوت باشد. غلظت محلول اطراف سلول حدود آب دریا و غلظت داخل سلول بسیار بیشتر از آن است. لازم به ذکر است از آنجایی که اندامک‌های درون‌سلولی مانند کلروپلاست و واکوئل نیز دارای

غشاهای اختصاصی هستند، خصوصیت جذب انتخابی یون‌ها در مورد غشاهای اندامک‌های درون سلولی نیز صادق است و بنابراین ورود و خروج املاح با کنترل بیشتری در این اندامک‌ها صورت می‌گیرد. در مورد آب، نفوذپذیری غشا تا حدود زیادی به خاطر انتشار ساده آب از لابه‌لای دو لایه لیپیدی غشا و همچنین به واسطه کانال‌های پروتئینی، که به اکواپورین‌ها (Aquaporines) معروف هستند، بوده که اجازه عبور آب به صورت انتخابی را می‌دهند (استیودل و پیترسون، ۱۹۹۸).

در ساختمان غشای پلاسمایی منافذی به نام پلاسمودسماتا (Plasmodesmata) وجود دارند که از طریق این منافذ غشاهای پلاسمایی و در نتیجه سیتوپلاسم سلول‌های مجاور بایکدیگر ارتباط دارند. هرکدام از این منافذ یک پلاسمودسما نامیده می‌شود. قطر این منافذ کوچک است (حدود ۶۰ نانومتر) و اجازه عبور اندامک‌های سلولی درون سیتوپلاسم را نمی‌دهند، ولی مولکول‌های کوچک محلول در سیتوپلاسم می‌توانند از آن عبور کنند (کافی و همکاران، ۱۳۷۸).

### ۳-۱-۲ سیتوپلاسم

سیتوپلاسم ماده داخل سلولی است که به وسیله غشای پلاسمایی احاطه شده است. سیتوپلاسم شامل محلول آبی به نام سیتوزول است که انواع مختلفی از ذرات نامحلول به شکل معلق در آن وجود دارند. در واقع، سیتوزول محلول آبی غلیظی است که دارای ترکیبات پیچیده و ژل مانند می‌باشد. بسیاری از اسیدهای آمینه، اسیدهای نوکلئیک، پروتئین‌ها و یون‌های معدنی در درون سیتوپلاسم قرار گرفته‌اند. ریوزوم‌ها که ذرات کوچک و با قطر ۱۸ تا ۲۲ نانومتر هستند و عمل سنتز پروتئین‌ها را انجام می‌دهند در سیتوپلاسم قرار گرفته‌اند. سیتوپلاسم بسیاری از سلول‌ها حاوی مواد غذایی ذخیره شده‌ای مانند چربی و نشاسته است. در سلول‌های بالغ، از آنجایی که ممکن است واکوئل تا ۹۰٪ حجم سلول را اشغال کند، بنابراین، سیتوپلاسم تنها به صورت یک لایه نازک بین غشای پلاسمایی و اطراف واکوئل قرار می‌گیرد.

### ۳-۱-۳ واکوئل

واکوئل‌ها اندامک‌های سلولی هستند که به عنوان محل نگهداری و ذخیره آب و مواد غذایی، یون‌ها و املاح، عناصر سمی و زائد و انجام بسیاری از واکنش‌های شیمیایی ایفای نقش می‌کنند. سلول‌های گیاهی در حال رشد واکوئل‌های متعدد کوچکی دارند که به صورت حبابچه‌هایی (وزیکول‌ها) که هر کدام دارای یک غشای دولایه به نام تونوپلاست هستند، در سیتوپلاسم قرار گرفته‌اند. با بلوغ سلول این حبابچه‌های کوچک بایکدیگر ترکیب شده و تولید یک واکوئل بزرگ می‌کنند، که قسمت اعظم فضای سلول را در برمی‌گیرد. غشای تونوپلاست ورود و خروج یون‌ها، عناصر معدنی و مولکول‌های دیگر به داخل واکوئل را کنترل می‌کند.

با افزایش غلظت مواد محلول (مانند یون‌ها، املاح و محصولات تخریبی که به وسیله ناقل‌های مخصوص به داخل واکوئل منتقل می‌شوند) در واکوئل نسبت به سیتوپلاسم، فشار اسمزی درون واکوئل

افزایش یافته (پتانسیل اسمزی منفی تر شده) و در نتیجه، آب از محیط اطراف سلول به سیتوپلاسم و از سیتوپلاسم وارد واکوئل می‌شود. افزایش ورود آب به درون واکوئل سبب تورم و بزرگی آن و ایجاد فشار به سمت غشای پلاسمایی می‌شود. به‌طور کلی، غلظت مواد محلول درون سلول‌های گیاهی ۰٫۵ تا ۱ مولال بیشتر از بیرون سلول است. بنابراین، برای غلظت ۱ مولال درون و صفر مولال بیرون سلول، میزان فشار تولیدشده توسط رابطه وانت‌هوف (فصل ۲) در دمای صفر درجه سانتی‌گراد  $2,27 \text{ MPa}$  و در دمای  $25^\circ\text{C}$ ،  $2,47 \text{ MPa}$  است.

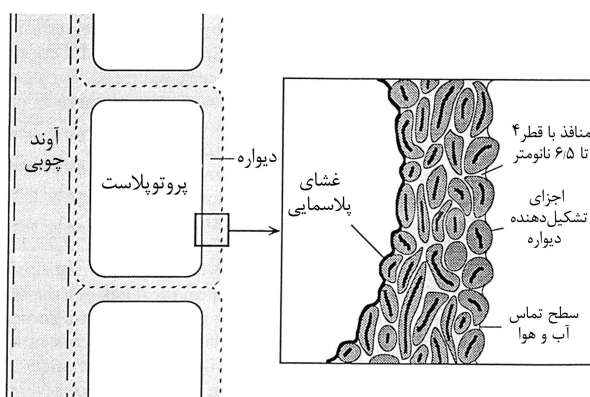
از طرفی، خاصیت ارتجاع‌پذیری غشای پلاسمایی و دیواره سلولی محدود است و این دو اندام نیز این فشار را متقابلاً به سمت داخل سلول اعمال می‌کنند. بنابراین، محتویات سلول و سیتوپلاسم از دو سمت تحت تأثیر یک فشار مثبت قرار می‌گیرند که به آن پتانسیل فشاری یا فشار آماس می‌گویند. لازم‌به‌ذکر است که از آنجایی که عموماً سلول‌ها نسبت به محیط اطراف خود دارای غلظت بیشتری از املاح هستند (به عبارت دیگر، در یک محیط هیپوتونیک، که غلظت املاح در خارج کمتر از داخل است، قرار گرفته‌اند)، فشار اسمزی ایجادشده در درون سلول سبب می‌گردد تا آب به داخل سلول کشیده شود. عدم وجود دیواره سلولی سبب می‌شود تا غشای پلاسمایی تا حد انفجار بزرگ شده و سبب مرگ سلول شود. در واقع، وجود دیواره سلولی کنترل‌کننده این فشار آماس ایجادشده ناشی از فشار اسمزی درون سلول نسبت به بیرون سلول است.

## ۳-۲ توزیع آب در سلول‌ها

### ۳-۲-۱ دیواره سلولی

باتوجه به سن، ضخامت و ترکیب دیواره‌های سلولی، حدود ۵ تا ۴۰٪ آب سلول‌ها در دیواره‌های سلولی یافت می‌شود. در سلول‌های جوان و در برخی بافت‌های پارانشیمی بالغ، دیواره‌ها نازک بوده و درصد کمی از آب سلول را در خود دارند. در برگ‌های ضخیم و چرمی، مانند برگ اکالیپتوس، دیواره‌ها ضخیم‌تر بوده و درصد بیشتری از آب سلول در آن‌ها یافت می‌شود. در گیاهان حدود ۹۰٪ از حجم بافت در حال رشد را آب تشکیل می‌دهد. بیش از نیمی از حجم برخی دیواره‌ها از آب تشکیل شده است و برخی از دیواره‌ها در زمان پسابیدگی تا ۵۰٪ چروکیده می‌شوند (کرامر، ۱۹۹۵). در طی بلوغ دیواره سلولی و رشد ثانویه آن، رسوب لیگنین، سوبرین و مواد دیگر باعث می‌شود حجم قابل دسترس برای ذخیره و حرکت آب در دیواره کاهش یافته و نفوذپذیری دیواره به آب کاهش یابد.

دیواره سلولی دارای دو نوع منفذ کوچک و بزرگ است. منافذ کوچک به تعداد زیاد وجود داشته و با محلولی که در تماس با خارج سلول است پر شده‌اند. قطر این منافذ دیواره سلولی حدود ۴ تا ۶٫۵ نانومتر است (شکل ۳-۳) و به راحتی اجازه عبور آب (با قطر معمول ۰٫۴ نانومتر برای مولکول‌های آب) و مولکول‌های کوچک (مانند قندها و اسیدهای آمینه با قطر حدود ۱ تا ۱٫۵ نانومتر و پروتئین‌های



شکل ۳-۳ نمای بزرگ شده دیواره سلول. قطر منافذ دیواره سلولی حدود ۴ تا ۶٫۵ نانومتر بوده و به راحتی اجازه عبور آب و مولکول‌های کوچک مانند قندها و اسیدهای آمینه را می‌دهند، ولی مولکول‌های بزرگ مانند برخی پروتئین‌ها نمی‌توانند از این منافذ عبور کنند (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۴).

کوچکتر) را می‌دهند، ولی مولکول‌های بزرگ مانند برخی پروتئین‌ها (با قطر بیشتر از ۸٫۵ نانومتر) نمی‌توانند از این منافذ عبور کنند. تعداد منافذ بزرگ اندک بوده و پروتوپلاسم سلول‌های مجاور را به هم مرتبط می‌سازند. این منافذ بزرگ همان پلاسمودسماتا هستند و احتمالاً آب و مواد محلول را به‌طور مستقیم بین پروتوپلاست‌ها منتقل می‌کنند. به‌نظر می‌رسد که وجود منافذ پلاسمودسماتا در حفظ توازن اسمزی بین سلول‌ها نیز مؤثر است.

میزان افزایش و یا کاهش حجم سلول‌ها و در نتیجه میزان کاهش پتانسیل آب آن‌ها تا نقطه خسارت کاهش تورم به‌میزان ارتجاع‌پذیری دیواره‌های سلولی بستگی دارد. ثابت شده است که سلول‌های با خصوصیت ارتجاع‌پذیری دیواره سلولی بالا قادرند آب زیادتری را در خود جای دهند. میزان ارتجاع‌پذیری دیواره سلولی به‌خصوصیات شیمیایی اجزای مختلف تشکیل‌دهنده آن و اثرات متقابل بین آن‌ها بستگی دارد.

مشاهده شده است که سلول‌های گیاهان نواحی خشک دارای خاصیت ارتجاع‌پذیری دیواره سلولی بیشتری نسبت به سلول‌های گیاهان نواحی مرطوب هستند. این مسئله سبب می‌شود تا آن‌ها پتانسیل اسمزی منفی‌تر و در نتیجه فشار آماس و تورم بیشتری داشته باشند. از طرفی، پروتوپلاسم سلول‌های برگ گیاهان سازگار به تنش خشکی باید ظرفیت تحمل پتانسیل‌های منفی‌تر آب را داشته باشند تا بتوانند در برابر تلفات زیاد آب، به‌دلیل دیواره سلولی انعطاف‌پذیر خود، زنده باقی بمانند.

## ۲-۲-۳ سیتوپلاسم

در بافت‌های مریستمی و سلول‌های جوان، که حجم واکوئل سلول‌ها اندک بوده و دیواره‌ها نازک هستند، بخش اعظم آب سلول در سیتوپلاسم یافت می‌شود، در حالی که در سلول‌های بالغ به‌دلیل بزرگ شدن حجم

واکوئل، سیتوپلاسم معمولاً فقط یک لایه نازک بوده و ممکن است تنها ۵ تا ۱۰٪ آب سلول را تشکیل دهد. معمولاً بخشی از آب سیتوپلاسم با پیوند هیدروژنی جذب پروتئین‌هایی می‌شود که چارچوب پروتوپلاسم را تشکیل می‌دهند. از آنجایی که تغییرات مقدار آب سیتوپلاسم بر ساختار پروتئین‌ها اثر می‌گذارد، میزان آب سیتوپلاسم بسیار مهم است. هنگامی که تبخیر آب زیاد بوده و یا هنگامی که غلظت محلول خارج سلول بیشتر از داخل سلول باشد، آب از سلول خارج شده و سلول چروکیده می‌شود.

### ۳-۲-۳ واکوئل‌ها

در بافت‌های گیاهی مثل سلول‌های پاراننشیمی بالغ، برگ‌ها، ساقه‌ها و ریشه‌ها حدود ۵۰ تا ۸۰٪ آب سلول در واکوئل‌ها قرار دارد. این آب معمولاً حاوی مقادیر قابل ملاحظه‌ای از مواد حل شده، به خصوص قندها، نمک‌ها و گاهی اسیدهای آلی و رنگدانه‌هایی مثل آنتوسیانین می‌باشد. ممکن است شیره واکوئلی دارای پتانسیل اسمزی برابر با ۱- تا ۳- مگاپاسکال باشد. واکوئل‌ها سیستم اسمزی ایجاد می‌کنند که خود باعث ایجاد فشار آماس (پتانسیل فشاری مثبت) است.

نکته جالب توجه این است که چون اثر مواد حل شده بر روی کاهش پتانسیل اسمزی درون سلول و به خصوص واکوئل به تعداد ذرات حل شده (i) و نه جرم و خصوصیات شیمیایی آن‌ها بستگی دارد (رجوع شود به فصل ۲، رابطه وانت هوف  $\Psi_s = -CiRT$ )، بنابراین، مولکول‌های بزرگی مانند پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و پلی‌ساکاریدها در مقایسه با جرم برابری از اجزای مونومری خود (اجزای تشکیل دهنده آن‌ها) دارای اثر بسیار کمتری بر روی پتانسیل اسمزی یک محلول می‌باشند. به عنوان مثال، یک گرم پلی‌ساکارید متشکل از ۱۰۰۰ واحد گلوکوز، بر روی پتانسیل اسمزی دارای اثر مشابه یک میلی‌گرم گلوکوز است. یا تأثیر یک پروتئین متشکل از ۵۰ عدد اسید آمینه در کاهش پتانسیل اسمزی سلول بسیار کمتر از مجموع تک تک اسیدهای آمینه تشکیل دهنده آن پروتئین است. به نظر می‌رسد که یکی از دلایل ذخیره مواد سوختی به شکل پلی‌ساکاریدهای نشاسته و گلیکوژن (و نه به شکل اجزای تشکیل دهنده آن‌ها، مانند گلوکوز و یا سایر قندهای ساده)، جلوگیری از کاهش زیاد پتانسیل اسمزی داخل سلول ذخیره‌ای باشد.

### ۳-۲-۴ تغییرات وضعیت آب سلول

زمانی که یک سلول آب خود را از دست می‌دهد، پتانسیل آب آن کاهش یافته و محتویات سلول غلیظ‌تر می‌شود. در سلول‌های گیاهی، از آنجایی که معمولاً میزان آب سلول زیاد است و فضاهای خالی که به وسیله هوا پر شده باشند وجود ندارد، پتانسیل ماتریک ناچیز و در حد صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین، بجز در درختان بلند قامت، پتانسیل ثقلی سلول‌های گیاهی ناچیز بوده و در محاسبه پتانسیل آب سلول از آن صرف نظر می‌شود. بنابراین، از آنجایی که پتانسیل آب سلول با توجه به رابطه ۱-۳ به دست می‌آید، تغییرات روابط آب سلول را می‌توان به صورت رابطه ۲-۳ بیان کرد:  $p$  نشان دهنده فضای درون سلول یا پروتوپلاست است.



$$\Psi_{W(p)} = \Psi_{s(p)} + \Psi_{p(p)} \quad (3-1)$$

$$d\Psi_{W(p)} = d\Psi_{s(p)} + d\Psi_{p(p)} \quad (3-2)$$

که در این روابط  $d\Psi_{W(p)}$  تغییرات پتانسیل آب پروتوپلاست  $(p)$ ،  $d\Psi_{s(p)}$  تغییرات پتانسیل اسمزی پروتوپلاست و  $d\Psi_{p(p)}$  تغییرات پتانسیل فشاری پروتوپلاست است. رابطه ۲-۳ نشان می‌دهد که تغییرات پتانسیل آب شامل مجموع تغییرات پتانسیل اسمزی و فشار آماس است. این رابطه سرعت تغییرات را نشان نداده، اما اندازه تغییرات بین دو وضعیت تعادل را نشان می‌دهد.

دانستن اینکه کدام جزء از رابطه ۲-۳ تغییر بیشتری در پتانسیل آب ایجاد می‌کند، مفید است. اگر میزان مواد محلول سلول ثابت باقی بماند و تغییرات پتانسیل آب پروتوپلاست تنها به وسیله تغییر آب خالص ایجاد شود، پیدا کردن جزء مورد نظر ساده است. در این مورد تغییرات پتانسیل اسمزی پروتوپلاست از رابطه ۳-۳ به دست می‌آید که در آن،  $v$  حجم سلول و  $dv$  تغییرات حجم سلول است.

$$d\Psi_{s(p)} = -\Psi_{s(p)} (dv/v) \quad (3-3)$$

به طور مشابهی، تغییرات پتانسیل فشاری پروتوپلاست می‌تواند از خصوصیات ارتجاعی دیواره سلول به دست آید. این خصوصیات از طریق رابطه ۴-۳ تعریف می‌شود:

$$d\Psi_{p(p)} = \varepsilon (dv/v) \quad (3-4)$$

که در آن،  $\varepsilon$  میزان سختی دیواره سلول و نشان‌دهنده ارتجاع‌پذیری یا الاستیسیته آن است که به آن ضریب قابلیت ارتجاع حجمی دیواره نیز می‌گویند و میزان آن به وسیله رابطه ۵-۳ بیان می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{d\Psi_{p(p)}}{dv/v} \quad (3-5)$$

با افزایش  $\varepsilon$  دیواره سلول سخت‌تر و میزان ارتجاع‌پذیری آن کاهش می‌یابد. روابط ۳-۳ و ۳-۴ شکل مشابهی داشته و نشان می‌دهند که تأثیر تغییر میزان آب به این مسئله که از بین  $\Psi_{s(p)}$  یا  $\varepsilon$  کدام یک از نظر عددی بزرگتر هستند، بستگی دارد. هرچه  $\Psi_{s(p)}$  بزرگتر باشد تأثیر تغییرات واحد حجم سلول  $(dv/v)$  روی پتانسیل اسمزی بیشتر است و در مقابل هرچه  $\varepsilon$  بزرگتر باشد تأثیر تغییرات واحد حجم سلول  $(dv/v)$  روی پتانسیل فشاری بیشتر است. به عبارت دیگر، اگر حجم سلول به اندازه ۱٪ افزایش یابد، فشار آماس به اندازه ۰٫۱ MPa افزایش می‌یابد که معادل ۲۰٪ افزایش فشار آماس سلول است، در حالی که ۱٪ افزایش حجم سلول تنها سبب کاهش ۱ درصدی فشار اسمزی سلول می‌شود. به طور کلی، روابط تغییرات آب سلول را می‌توان به صورت رابطه مهم ۶-۳ بیان کرد:

$$dv/d\Psi_{W(p)} = v/(\varepsilon - \Psi_{s(p)}) \quad (3-6)$$

که در آن،  $dv/d\Psi_{W(p)}$  گنجایش‌پذیری سلول<sup>۱</sup>  $(c)$  بوده و نشان می‌دهد که چقدر سلول باید آب کشیده شود تا سبب تغییر در پتانسیل آب سلول شود و همچنین چقدر از تغییرات آب سلول به وسیله  $\Psi_{s(p)}$  یا  $\varepsilon$

1. Capacitance C of the cell

ایجاد شده است. بنابراین، برای سلولی با  $\Psi_{s(p)} = -1$  مگاپاسکال و با یک دیواره سلولی سخت با  $\varepsilon = 49$  مگاپاسکال، میزان  $\varepsilon$  از نظر عددی از  $\Psi_{s(p)}$  بزرگتر بوده و در نتیجه آب کشیدگی سبب تغییر بیشتری در فشار آماس نسبت به پتانسیل اسمزی سلول می‌شود.

معادله ۳-۶ نشان می‌دهد که یک کاهش ۲ درصدی میزان آب ( $dv/v = 0.02$ ) سبب می‌شود که فشار آماس به اندازه کافی کاهش یابد تا سبب کاهش ۱ مگاپاسکالی پتانسیل آب چنین سلولی شود. از طرف دیگر، در یک سلول مشابه با یک دیواره سلولی ارتجاع‌پذیر که دارای  $\varepsilon = 49$  مگاپاسکال است، گرچه همچنان تحت تأثیر تغییرات فشار آماس بوده، اما به‌ازای همان میزان آب کشیدگی پتانسیل فشاری تنها  $0.12 \text{ MPa}$  کاهش می‌یابد.

به‌طور واضحی مشخص است که تغییرات پتانسیل آب بیشتر به‌وسیله تغییرات پتانسیل فشاری به‌وجود می‌آید، تا اینکه به‌وسیله تغییرات پتانسیل اسمزی. همچنین، در دیواره‌های سلولی سخت، میزان ارتجاع‌پذیری کمتر بوده و در نتیجه تغییرات پتانسیل آب بیشتر است. به‌عبارت دیگر، تغییرات پتانسیل آب سلول زمانی که دیواره سلولی سخت‌تر است، نسبت به دیواره‌های سلولی نرم‌تر و با خاصیت ارتجاع‌پذیری بیشتر، شدیدتر است.

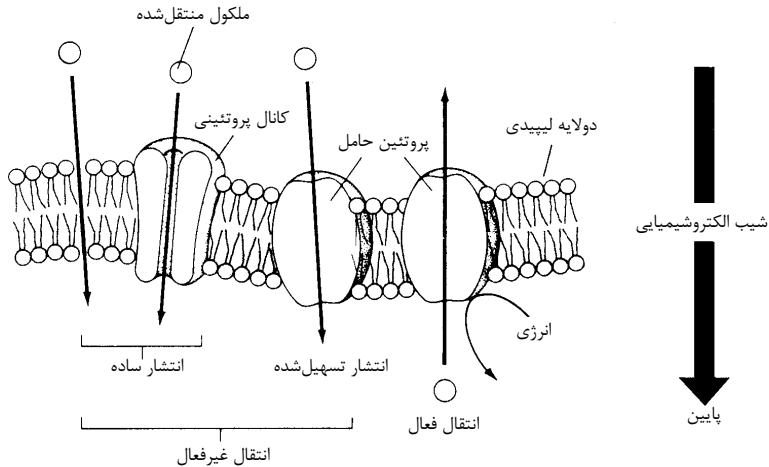
### ۳-۳ حرکت آب و مواد محلول از غشاها

#### ۳-۳-۱ انتقال فعال و غیرفعال

مواد محلول می‌توانند به دو طریق فعال و غیرفعال از غشای سلولی عبور کنند. انتقال فعال مواد نیاز به انرژی متابولیکی دارد و معمولاً در خلاف جهت شیب الکتروشیمیایی ماده مورد نظر صورت می‌گیرد، در حالی که در انتقال غیرفعال مواد محلول بدون صرف هیچ‌گونه انرژی و در جهت شیب الکتروشیمیایی منتقل می‌شوند. لازم به‌ذکر است که دو عامل اختلاف غلظت و اختلاف ولتاژ الکتریکی در دو سمت غشا سبب ایجاد اختلاف الکتروشیمیایی در دو طرف غشا شده و سبب انتقال املاح در عرض غشا می‌شوند. برای انتقال یون‌ها و مولکول‌های دیگر در عرض غشای سلولی پروتئین‌های ناقلی<sup>۱</sup> وجود دارند که شامل کانال‌ها<sup>۲</sup> و حامل‌ها<sup>۳</sup> می‌باشند (شکل ۳-۴).

به‌طور کلی، کانال‌ها پروتئین‌هایی هستند که در سرتاسر عرض غشا امتداد یافته و به مولکول‌ها و یون‌هایی که اندازه آن‌ها کمتر از قطر منفذ کانال است اجازه عبور می‌دهند (کافی و همکاران، ۱۳۷۸). در انتقال از طریق پروتئین‌های حامل، ماده منتقل‌شونده باید به‌محل فعال بروی پروتئین متصل شود و سپس به‌وسیله پروتئین حامل به‌سمت دیگر غشا منتقل گردد. معمولاً ماده منتقل‌شونده قبل از عبور از عرض غشا و پس از اتصال به پروتئین حامل، به‌شکلی که سبب سهولت انتقال آن می‌شود تغییر شکل یافته و

1. Transport proteins  
2. Channels  
3. Carriers



شکل ۳-۴ برای انتقال یون‌ها و مولکول‌های دیگر در عرض غشای سلولی پروتئین‌های ناقلی وجود دارند که شامل کانال‌ها و حامل‌ها می‌باشند. کانال‌ها پروتئین‌هایی هستند که در سرتاسر عرض غشا امتداد یافته و به مولکول‌ها و یون‌هایی که اندازه آن‌ها کمتر از قطر منفذ کانال است اجازه عبور می‌دهند. در انتقال از طریق پروتئین‌های حامل، ماده منتقل‌شونده باید به محل فعال بر روی پروتئین متصل‌شده و سپس به وسیله پروتئین حامل به سمت دیگر غشا منتقل شود. شکل سمت راست جهت شیب الکتروشیمیایی و حرکت مواد را نشان می‌دهد (کافی و همکاران، ۱۳۷۸).

پس از عبور از عرض غشا مجدداً به شکل قبلی خود برمی‌گردد. انتقال مواد به وسیله پروتئین‌های حامل می‌تواند به صورت فعال و غیرفعال انجام گیرد. انتقال فعال از طریق مولکول‌های حامل، پمپ مواد و انتقال غیرفعال به وسیله مولکول‌های حامل، انتشار تسهیل‌شده<sup>۱</sup> نامیده می‌شود (شکل ۳-۴).

### ۲-۳-۳ مکانیزم اسمز

در غشاهای سلولی اسمز (osmosis) باعث حرکت آب در عرض غشاها می‌شود و برخلاف جریان توده‌ای و انتشار، هم اختلاف غلظت املاح که نشان‌دهنده میزان فشار اسمزی است و هم اختلاف فشار در انتقال آب از طریق غشاهای سلولی نقش دارند. لازم‌به‌ذکر است که در انتقال آب به وسیله جریان توده‌ای تنها اختلاف فشار سبب انتقال آب شده و در انتقال آب به وسیله انتشار تنها اختلاف غلظت املاح سبب انتقال آب می‌شود. اختلاف غلظت و فشار در دو سمت غشا جهت و میزان جریان آب از عرض غشای سلولی را تعیین می‌کند که به مجموع این دو عامل اختلاف پتانسیل شیمیایی آب یا اختلاف پتانسیل آب می‌گویند.

از آنجایی که منافذ غشای پلاسمایی دارای قطر کمی هستند، آب با مکش بالایی در آن‌ها نگه داشته می‌شود. نیروی اسمزی که به وسیله مواد محلول در درون سلول ایجاد می‌شود از طریق منافذ غشای

پلاسمایی و تقریباً به‌طور همزمان به دیواره سلولی و فضای اپوپلاست و در نتیجه به سرتاسر گیاه منتقل می‌شود. در نهایت این مکش ایجادشده برای جذب آب به ریشه‌ها و خاک نیز رسیده و سبب جذب آب از خاک می‌شود. وجود فشار منفی در منافذ غشای پلاسمایی نشان می‌دهد که مکش در غشای پلاسمایی وجود داشته و این مکش می‌تواند به نقاط مختلف گیاه مانند آوندهای چوبی و اپوپلاست نیز منتقل شود. به‌هرحال، وجود منافذ منتقل‌کننده آب در غشا بر این نکته دلالت دارد که میزان و سرعت انتقال آب به درون سلول باید باتوجه به منافذ موجود در غشا متغیر باشد. نوع و خصوصیات تنظیمی منافذ نیز بر میزان و سرعت انتقال آب مؤثر است. با این وجود، در شرایط تعادل پتانسیل، زمانی که جریان آب خالص وجود ندارد، وضعیت آب به‌وسیله تعداد یا خصوصیات این منافذ غشایی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد.

### ۳-۳-۳ حرکت آب از غشا

میزان سهولت حرکت آب از عرض غشای سلول نشان‌دهنده میزان سهولت آب‌کشیدگی و یا آب‌دارشدن سلول است. میزان آب‌کشیدگی به فراهمی آب و همچنین وجود موانع محافظ جهت جلوگیری از ازدست‌رفتن آب و همچنین سرعت ازدست‌رفتن آب بستگی دارد و به‌وسیله رابطه ۷-۳ بیان می‌شود (نوبل، ۱۹۹۴):

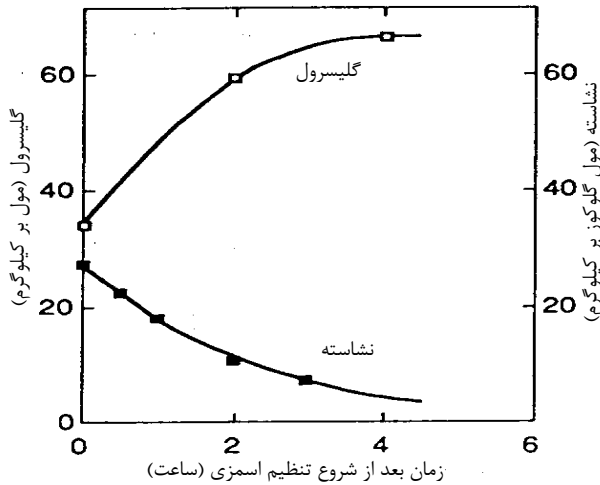
$$t\left(\frac{1}{p}\right) = 0,693 rc \quad (3-7)$$

که در آن،  $c$  گنجایش‌پذیری سلول است و به‌وسیله اندازه سلول، میزان ارتجاع‌پذیری دیواره سلولی و پتانسیل اسمزی داخلی تعیین می‌شود،  $r$  مقاومت نسبت به حرکت آب از طریق غشای پلاسمایی و  $t\left(\frac{1}{p}\right)$  زمان برای نصف تغییرات در پتانسیل آب است. مقدار مقاومت نسبت به حرکت آب عمدتاً به‌وسیله غشای پلاسمایی تعیین شده و سرعت ورود آب به سلول را کنترل می‌کند و اندازه آن را می‌توان از طریق رابطه ۸-۳ محاسبه کرد:

$$r = 1 / (I_p \cdot A) \quad (3-8)$$

که در آن  $A$  مساحت سلول برحسب مترمربع و  $I_p$  هدایت هیدرولیکی غشای پلاسمایی برحسب متربرثانیه بر مگاپاسکال است. میزان آب‌کشیدگی برآیندی از میزان مقاومت غشا و گنجایش سلول است و افزایش مقاومت و یا گنجایش‌پذیری سلول سبب کندترشدن زمان آب‌کشیدگی می‌شود.

به‌طورکلی، هدایت هیدرولیکی غشای پلاسمایی اندازه‌گیری‌شده در مورد سلول‌های گیاهی نشان می‌دهد که انتقال آب در عرض غشای پلاسمایی به‌ازای اختلاف پتانسیل کمی، به‌سرعت اتفاق می‌افتد. از آنجایی که میزان هدایت هیدرولیکی غشای پلاسمایی می‌تواند تا ۱۰۰ برابر متغیر باشد، بنابراین، غشای پلاسمایی می‌تواند بسته به نوع سلول، به‌طور وسیعی از نظر خصوصیات و کارایی متفاوت باشد. لازم‌به‌ذکر است که در سلول‌های گیاهی به‌دلیل اینکه سرعت انتقال آب زیاد است، سرعت آب‌کشیدگی و آب‌دارشدن سلول‌ها زیاد بوده و  $t(1/2)$  به‌ندرت بیشتر از ۵ دقیقه می‌باشد. فعالیت‌های متابولیکی



شکل ۳-۵ تنظیم اسمزی در جلبک دریایی *Dunaliella*. در نقطه زمانی صفر، سلول از محلول ۱/۵ مولال NaCl به محلول ۳ مولال NaCl انتقال یافته است. مشاهده می‌شود که جهت تنظیم اسمزی میزان نشاسته سلول کاهش و میزان گلیسرول افزایش یافته است. توجه شود که هر مولکول گلوکوز آزاد شده از نشاسته، تولید دو مولکول گلیسرول می‌کند (کرامر، ۱۹۹۵).

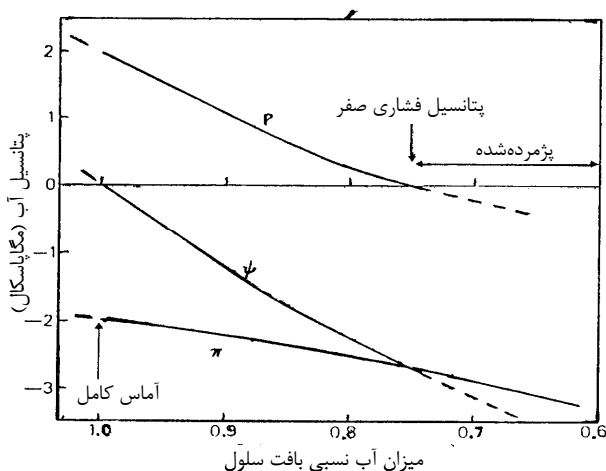
داخل سلول که سبب تغییر غلظت املاح درون سلول می‌شوند، می‌توانند سبب تأخیر یا جلوگیری از آب‌کشیدگی سلول‌ها شوند.

### ۳-۴ تنظیم اسمزی<sup>۱</sup>

با افزایش خشکی خاک، پتانسیل آب خاک کاهش یافته و در نتیجه سلول‌های گیاهی برای تنظیم وضعیت آب خود و حفظ پتانسیل فشاری مناسب برای ادامه رشد سلول و انجام فعالیت‌های حیاتی آن، میزان مواد محلول را که سبب کاهش پتانسیل اسمزی سلول می‌شوند، افزایش می‌دهند. بنابراین، این سلول‌ها از طریق افزایش قدرت جذب آب، جذب آب را افزایش می‌دهند. این مسئله سبب افزایش پتانسیل فشاری، متورم ماندن سلول و حفظ اعمال متابولیک آن می‌گردد. این پدیده تنظیم اسمزی نامیده می‌شود.

اکثر گیاهان این قابلیت را دارند تا از طریق تجمع مواد اسمزی سازگار با سیتوپلاسم و غیرخسارت‌زا برای سلول (مواد اسمزی که تأثیر منفی بر متابولیسم سلول ندارند) پتانسیل اسمزی درون سلول را کاهش دهند. آنزیم‌ها جمع این مواد، که عمدتاً در واکنش‌های سنتز صورت می‌گیرند، عمدتاً از طریق افزایش سنتز آن‌ها در سلول صورت گیرد. در این ارتباط، تبدیل مواد و مولکول‌های بزرگی که نقش زیادی در کاهش پتانسیل اسمزی سلول ندارند به موادی که دارای اثر اسمزی بیشتری هستند، بسیار مهم است

1. Osmotic adjustment



شکل ۳-۶ نمودار هافلر: رابطه بین پتانسیل آب ( $\psi$ )، پتانسیل فشاری ( $p$ )، پتانسیل اسمزی ( $\pi$ ) و میزان آب نسبی ( $RWC$ ) یک سلول یا بافت در حال ازدست‌دادن آب از حالت کاملاً آماس‌کرده. خطوط نقطه‌چین نشان‌دهنده پتانسیل فشاری منفی در تعدادی از سلول‌های سخت است. توجه شود که نقطه پژمردگی زمانی است که پتانسیل فشاری برابر صفر شده و از آن زمان به بعد پتانسیل آب برابر پتانسیل اسمزی است (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

(شکل ۳-۵). سوربیتول، گلیسین، بتائین و پرولین نمونه‌هایی از این مواد هستند. این ترکیبات قطبی و بسیار محلول بوده و تأثیر منفی بر فعالیت آنزیم‌ها و متابولیسم سلول ندارند.

به نظر می‌رسد که اکثر گیاهانی که توانایی تحمل تنش خشکی بیشتری دارند، قادرند تا در شدت‌های تنش بالاتر تنظیم اسمزی را ادامه داده و فشار آماس خود را حفظ کنند. تنظیم اسمزی سبب می‌شود تا این گیاهان جذب آب از خاک را حتی در پتانسیل‌های پایین آب خاک ادامه دهند. به هر حال، زمانی که سلول‌های گیاه تحت تأثیر آب‌کشیدگی یا شوری بالا قرار می‌گیرند، انجام توازن اسمزی مشکل می‌شود. ازدست‌رفتن آب و عدم خروج مواد محلول سبب تجمع غلظت‌های بالای املاح در تعدادی از اجزای سلولی می‌گردد. این مسئله می‌تواند سبب تخریب ساختمان سلول، شکستن غشای واکوئل و غشای پلاسمایی شود. بنابراین، تحمل به آب‌کشیدگی سلول‌ها تا حدود زیادی به خصوصیات غشاهای درمقابل پارگی و نشت بستگی دارد.

### ۳-۵ نمودار هافلر<sup>۱</sup>

روابط آب در سلول‌ها، نافت‌ها، گناه. رامی توان به راحتی با استفاده از نمه‌ها، هافلر. سان کرد (شکل ۳-۶). این نمودار وابستگی‌ها و روابط بین حجم سلول با پتانسیل آب، پتانسیل اسمزی و پتانسیل فشاری در طی ازدست‌رفتن آب از سلول را توضیح می‌دهد. در یک سلول کاملاً آماس‌کرده پتانسیل آب و پتانسیل ماتریک برابر صفر است و با توجه به اینکه سلول در سطح مینا قرار گرفته باشد (پتانسیل ثقلی برابر صفر

1. Höfler diagram

باشد)، بنابراین، رابطه ۳-۹ در این حالت صادق بوده و پتانسیل آب از دو جزء برابر (ولی مخالف از نظر علامت) پتانسیل فشاری و اسمزی تشکیل شده است.

$$\Psi_w = 0, \Psi_m = 0, \Psi_g = 0$$

$$\Psi_w = \Psi_p + \Psi_s, \quad \Psi_s = -\Psi_p \quad (3-9)$$

در چنین شرایط، مقدار آب نسبی<sup>۱</sup> سلول که به صورت کسری از مقدار آب سلول در یک شرایط خاص به مقدار آب سلول در آماس کامل بیان می‌شود، برابر ۱ یا ۱۰۰٪ است. همچنانکه آب از سلول تلف می‌شود، حجم سلول کاهش می‌یابد و در نتیجه آن، پتانسیل فشاری ( $\Psi_p$ ) به طور تقریباً خطی کاهش یافته و در نقطه‌ای به صفر می‌رسد ( $\Psi_p = 0$ ). معمولاً در چنین شرایطی ( $\Psi_p = 0$ ) مقدار آب نسبی سلول بین ۰٫۷ تا ۰٫۸ یا ۷۰ تا ۸۰٪ است. به عبارت دیگر، وقتی مقدار آب نسبی سلول به ۰٫۷ تا ۰٫۸ می‌رسد، پتانسیل فشاری مساوی صفر خواهد شد.

در بسیاری از سلول‌های گیاهی با کاهش بیشتر در مقدار آب، فشار آماس همچنان در حد صفر ثابت مانده و منفی نمی‌شود (درواقع در بخش‌های زنده سلولی گیاه پتانسیل فشاری منفی نداریم)، ولی در برخی از سلول‌های سخت مثل آسکوسپوره‌های سورداریا (*Sordaria Ascospores*) ممکن است پتانسیل فشاری منفی نیز ایجاد شود (خطوط بریده در شکل ۶-۳). همچنانکه مقدار آب نسبی سلول کاهش یافته و حجم سلول کم می‌شود، پتانسیل اسمزی روبه‌کاهش می‌گذارد. همچنین، بعد از نقطه‌ای که پتانسیل فشاری به صفر می‌رسد (نقطه پژمردگی سلول)، پتانسیل آب تنها از جزء پتانسیل اسمزی تشکیل شده و در نتیجه پتانسیل آب برابر پتانسیل اسمزی می‌شود.

تمرین: نکات مهم نمودار هافلر را ذکر کنید.

# پتانسیل آب و اجزای آن در خاک، گیاه و اتمسفر

در این فصل می خوانیم:

- ۴-۱ پتانسیل آب و اجزای آن در خاک
- ۴-۲ پتانسیل آب و اجزای آن در گیاه
- ۴-۳ پتانسیل آب در اتمسفر
- ۴-۴ روش‌های اندازه‌گیری مقدار آب و پتانسیل آن در خاک
- ۴-۵ اندازه‌گیری مقدار آب و پتانسیل آن در گیاه

## مقدمه

شناخت پتانسیل آب و اجزای آن در خاک و گیاه و نحوه تغییرات آن‌ها در شرایط مختلف در درک رابطه آب خاک و گیاه اهمیت کلیدی دارد. در این فصل توضیحاتی پیرامون مقادیر و تغییرات پتانسیل آب و اجزای آن در خاک و گیاه و پتانسیل آب در اتمسفر ارائه می‌شود. همچنین، روش‌های اندازه‌گیری مقدار آب و پتانسیل آب و اجزای آن در خاک و گیاه توضیح داده می‌شوند.

## ۴-۱ پتانسیل آب و اجزای آن در خاک

اگر پتانسیل دمایی را، که محاسبه آن بسیار پیچیده است و معمولاً در اندازه‌گیری پتانسیل آب در نظر گرفته نمی‌شود و فرض می‌گردد که دو نقطه مورد مقایسه از نظر دمایی مشابه هستند، به حساب نیاوریم، اجزای پتانسیل آب خاک به صورت رابطه ۴-۱ نشان داده می‌شود.

$$(۴-۱) \quad \text{پتانسیل فشاری} + \text{پتانسیل ماتریک} + \text{پتانسیل اسمزی} + \text{پتانسیل ثقلی} = \text{پتانسیل آب}$$

اجزای پتانسیل آب در خاک‌های اشباع و غیر اشباع تا حدودی متفاوت بوده و به صورت زیر نشان داده می‌شود.



## سطح خاک

$$\Psi_s < 0$$

$$\Psi_m < 0$$

$$\Psi_p = 0$$

$$\Psi_g > 0$$

$$\Psi_p = 0, \Psi_g = 0$$

منطقه غیراشباع

----- خط ایستابی (مینا) -----

$$\Psi_s < 0$$

$$\Psi_m = 0$$

$$\Psi_p > 0$$

$$\Psi_g < 0$$

منطقه اشباع

## ۴-۱-۱ پتانسیل ثقلی

پتانسیل ثقلی ( $\Psi_g$ ) به اختلاف ارتفاع نقطه مورد نظر تا سطح مقایسه بستگی دارد. اگر نقطه مورد نظر بالاتر از سطح مقایسه باشد، پتانسیل ثقلی مثبت و اگر پایین تر از آن باشد پتانسیل ثقلی منفی است. بنابراین، پتانسیل ثقلی مستقل از ویژگی‌های خاک است. معمولاً در خاک، سطح ایستابی<sup>۱</sup> را به طور قراردادی سطح مینا در نظر می‌گیرند. سطح مقایسه معمولاً می‌تواند به دلخواه انتخاب شود. این امر اغلب موجب بی‌معنی شدن مقادیر مطلق پتانسیل ثقلی می‌گردد. بنابراین، در سطح ایستابی  $\Psi_g = 0$ ، در زیر آن  $\Psi_g < 0$  و در بالاتر از آن  $\Psi_g > 0$  می‌باشد.

## ۴-۱-۲ پتانسیل اسمزی

از آنجایی که در محلول خاک مواد حل شده و عمدتاً املاح حضور دارند، بنابراین، همیشه پتانسیل اسمزی کمتر از صفر می‌باشد.  $\Psi_s$  محلول یا عصاره خاک با هدایت الکتریکی<sup>۲</sup> (EC) و مقدار مواد حل شده در محلول خاک<sup>۳</sup> (TDS) ارتباط دارد و به وسیله رابطه ۲-۴ بیان می‌شود (میلر و داناهاو، ۱۹۹۰):

$$\Psi_s \text{ (MPa)} = \text{EC (dS.m}^{-1}\text{)} (0.36) \quad (4-2)$$

$$\Psi_s \text{ (bar)} = \text{EC (dS.m}^{-1}\text{)} (0.36)$$

$$\text{EC (dS.m}^{-1}\text{)} = \text{TDS (mg.l}^{-1}\text{)} \div 690$$

در خاک‌هایی که مشکل شوری ندارند، معمولاً پتانسیل اسمزی کمتر از  $-0.07$  تا  $-0.14$  مگاپاسکال (EC کمتر از ۲ تا ۴ دسی‌زیمنس بر متر) می‌باشد. در خاک‌های شور بسته به مقدار EC، مقدار  $\Psi_s$  متفاوت بوده و معمولاً بالغ بر  $-0.14$  MPa است. در شرایط ثابت بودن املاح خاک، مقادیر EC و  $\Psi_s$  محلول خاک با نوسان مقدار آب خاک تغییر پیدا کرده و با افزایش مقدار آب خاک، کاهش پیدا می‌کنند (رابطه ۳-۴) (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶):

1. Water table  
2. Electrical conductivity  
3. Total dissolved solids

#### جدول ۱-۴ پتانسیل ماتریک در چهار وضعیت رطوبتی خاک با واحدهای مختلف اندازه‌گیری.

پتانسیل ماتریک با واحدهای مختلف اندازه‌گیری				وضعیت رطوبتی خاک
سانتی‌متر	ژول بر کیلوگرم	دین بر سانتی‌متر مربع	بار	
-۱	-۰٫۰۹۸	-۹۸۰	$-۹٫۸ \times ۱۰^{-۴}$	اشباع
-۱۰۰	-۹٫۸	$-۹٫۸ \times ۱۰^{-۴}$	-۰٫۰۹۸	ظرفیت زراعی
$-۱٫۵ \times ۱۰^۴$	-۱۴۷۰	$-۱٫۴۷ \times ۱۰^۷$	-۱۴٫۷	نقطه پژمردگی دائم
$-۲٫۲ \times ۱۰^۵$	$-۲٫۱۶ \times ۱۰^۴$	$-۲٫۱۶ \times ۱۰^۸$	-۲۱۶	خاک خشک‌شده در هوا (۰٫۸۵ رطوبت نسبی)

$$\Psi_{S1} \cdot V_1 = \Psi_{S2} \cdot V_2 \quad (۴-۳)$$

که در آن،  $V$  حجم محلول و شماره‌های ۱ و ۲، حالت‌های دو محلول هستند. برای مثال، اگر پتانسیل اسمزی و حجم یک محلول به ترتیب  $1 \text{ MPa}$  و  $200$  میلی‌لیتر باشد ( $V_1$ ) و با افزایش میزان آب مقطر حجم محلول به  $400$  میلی‌لیتر افزایش یابد ( $V_2$ )، پتانسیل اسمزی محلول جدید براساس رابطه ۳-۴ به  $0.5 \text{ MPa}$  افزایش می‌یابد. بنابراین مشاهده می‌شود که با افزایش حجم به دو برابر (بدون تغییر نمک)،  $\Psi_S$  به نصف کاهش یافته است (از نظر عددی بدون علامت). از رابطه ۳-۴ برای ساختن محلول‌هایی با پتانسیل‌های اسمزی متفاوت در آزمایشگاه استفاده می‌گردد (رجوع شود به فصل ۱۴).

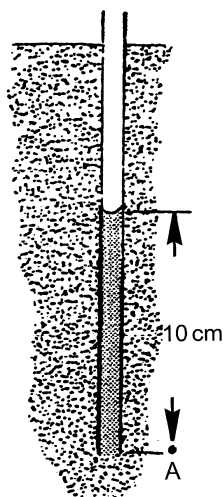
#### ۳-۱-۴ پتانسیل ماتریک

در خاک‌های اشباع پتانسیل ماتریک خاک برابر صفر است (البته از آنجایی که خاک‌های اشباع به ندرت اشباع کامل بوده، پتانسیل ماتریک ممکن است در عمل اندکی منفی باشد). برای درک بهتر مسئله پتانسیل ماتریک در چهار وضعیت رطوبتی خاک در جدول ۱-۴ آورده شده است. اگر کلیه منافذ خاک اشباع از آب باشند،  $\Psi_m = 0$  است. در ظرفیت زراعی،  $\Psi_m$  بین  $-0.03$  تا  $-0.01$  مگاپاسکال می‌باشد. عدد  $-0.01$  مربوط به خاک‌های سبک (خاک شنی) است. در نقطه پژمردگی دائم،  $\Psi_m = -1.5$  مگاپاسکال می‌باشد.

#### ۴-۱-۴ پتانسیل فشاری

در خاک‌های غیراشباع منافذ خاک با هوا در ارتباط بوده و فشار موجود در منافذ برابر فشار هوا است، پس پتانسیل فشاری ( $\Psi_p$ ) برابر صفر می‌باشد. ولی در خاک اشباع چنین نیست. با افزایش عمق زیر سطح ایستابی، بر میزان فشار افزوده می‌شود. این مؤلفه از پتانسیل فشاری، پتانسیل استغراقی،  $\Psi_u$  نیز نامیده می‌شود. به‌طورکلی، هر  $10$  متر ستون آب معادل  $0.1 \text{ MPa}$  یا یک بار فشار دارد. بنابراین، اگر نقطه‌ای  $5$  متر زیر سطح ایستابی باشد، پتانسیل فشاری آن برابر با  $0.05 \text{ MPa}$  خواهد بود.

برای اندازه‌گیری پتانسیل فشاری در مزرعه از پیزومتر (piezometer) استفاده می‌شود. یک پیزومتر لوله‌ای ساده است که دو طرف آن باز بوده و در خاک تعبیه می‌شود. آب از انتهای لوله



شکل ۱-۴ پیزومتری که برای تعیین پتانسیل فشاری مورد استفاده قرار گیرد. پتانسیل فشاری در هر نقطه از خاک برابر با فاصله بین آن نقطه و سطح آب در لوله پیزومتر است. پتانسیل فشاری نقطه A برابر ۱۰ سانتی‌متر یا ۱۰۰۰ پاسکال می‌باشد (علیزاده، ۱۳۸۳).

به داخل آن جریان یافته و تا سطح ایستابی بالا می‌آید. پتانسیل فشاری یک نقطه از خاک برابر با فاصله عمودی آن نقطه از سطح آب در پیزومتری است که در آن نقطه کار گذاشته می‌شود (شکل ۱-۴). در شرایط مزرعه در بالا و در سطح آب پیزومتر، پتانسیل فشاری برابر صفر است و در زیر این سطح پتانسیل فشاری همیشه مثبت است.

## ۲-۴ پتانسیل آب و اجزای آن در گیاه

جریان آب در تمام گیاه شامل ریشه، آوندها، دیواره‌های سلولی، پروتوپلاسم و اندامک‌های گوناگون پیوسته می‌باشد، در حالی که مواد حل شده در آب توسط غشاهایی با نفوذپذیری متفاوت تفکیک می‌شوند. گرچه مقداری از آب توسط سطوح مختلف جاذب آن جذب شده و مقداری نیز در میکروکاپیلاری‌های دیواره‌های سلولی نگهداری می‌شود، ولی بخش اعظم آب گیاه می‌تواند آزادانه در امتداد شیب‌های پتانسیل آب در گیاه، حرکت کند.

به‌طور کلی، آب گیاه را می‌توان به دو بخش آب موجود در دیواره‌های سلولی و عناصر آوند چوب که به آب آپوپلاستی (apoplastic) معروف است (آب موجود در بخش‌های غیرزنده گیاه) و آب موجود در پروتوپلاسم‌ها که به آب سیمپلاستی (symplastic) معروف می‌باشد (آب موجود در بخش‌های زنده گیاه)، تقسیم کرد. از آنجایی که آب موجود در این دو بخش به‌طور کامل قابل تفکیک نیستند، بنابراین، در واقع این تقسیم‌بندی به توزیع مواد حل شده مربوط بوده و خود آب در گیاه یک سیستم پیوسته را تشکیل می‌دهد. برای درک بهتر میزان آب آپوپلاستی و سیمپلاستی در اندام‌های مختلف گیاهان نمونه‌هایی در جدول ۲-۴ آورده شده است.

جدول ۲-۴ میزان آب آپوپلاستی و سیمپلاستی در اندام‌های مختلف چند گیاه (کرامر، ۱۹۹۵).

گیاه	آب آپوپلاستی (%)	آب سیمپلاستی (%)
ریشه گندم	۲۵-۲۰	۸۰-۷۵
برگ اکالیپتوس	۴۰	(۶۰)
برگ آفتابگردان	۱۴-۵	(۹۵-۸۶)
برگ گندم	۳۰	(۷۰)
برگ سیب‌زمینی	۵	(۹۵)
برگ نابالغ سویا	(۱۶)	۸۴
برگ بالغ سویا	(۳۰)	۷۰

مقادیر داخل پرانتز حاصل اندازه‌گیری نبوده و تخمین زده شده‌اند.

اجزای پتانسیل آب در گیاه تا حدودی با اجزای آن در خاک متفاوت بوده که در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### ۴-۲-۱ پتانسیل اسمزی

باتوجه به اینکه همواره آب موجود در اندام‌ها و سلول‌های متفاوت گیاه دارای عناصر محلول و مواد حل شده است، بنابراین، پتانسیل اسمزی ( $\Psi_s$ ) آب در گیاه همیشه کمتر از صفر است. معمولاً در شیره (آب + مواد محلول) واکوئل سلول‌ها غلظت مواد حل شده بیشتر از قسمت‌های دیگر سلول است (حدود ۳۰۰ مول بر مترمکعب یا ۰٫۳ اُسمولال) و پتانسیل اسمزی می‌تواند بین ۰٫۶- تا ۳- مگاپاسکال باشد که آن‌را می‌توان با پتانسیل اسمزی آب دریا که حدود ۲٫۵ MPa- است مقایسه کرد. در آوندهای چوبی غلظت مواد حل شده کمتر بوده (حدود ۱۰ مول بر مترمکعب) و پتانسیل اسمزی حدود ۰٫۲۴ MPa- است. به‌طورکلی، مقادیر تپیک پتانسیل اسمزی در گیاهان از ۰٫۷۵- تا ۱٫۵- مگاپاسکال متغیر است (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

### ۴-۲-۲ پتانسیل ماتریک

از آنجایی که معمولاً تمام محتویات سلول مانند خاک‌های اشباع از آب، در محیط اشباع آبی هستند، در سلول‌های گیاهی پتانسیل ماتریک را می‌توان صفر در نظر گرفت. از طرفی، در دیواره‌های سلولی و سلول‌های مجاور فضاهای زیر روزنه که آب از آن‌ها تخییر می‌شود، پتانسیل ماتریک کمتر از صفر است که در این مورد پتانسیل منفی ایجاد شده را به حساب پتانسیل فشاری منفی گذاشته و پتانسیل ماتریک را معادل صفر در نظر می‌گیرند. به‌هرحال، در این رابطه که آیا این پتانسیل منفی ایجاد شده در فضاهای اپوپلاستی دیواره‌های سلولی مربوط به پتانسیل ماتریک یا پتانسیل فشاری منفی است، اختلاف نظر وجود دارد (شکل ۱۴-۲). برخی از دانشمندان این ازدست‌دادن آب از منافذ بین‌سلولی را با پتانسیل ماتریک کمتر از صفر و برخی دیگر با پتانسیل فشاری کمتر از صفر بیان می‌کنند، ولی در هر صورت مکانیزم ایجاد یکی بوده و مطابق رابطه ۲۱-۲ (به فصل ۲ رجوع شود) بیان می‌شود.

تمرین پتانسیل فشاری منافذی با قطر ۳ و ۵۲ نانومتر در حالت  $\alpha=0^\circ$  و منفذی با قطر ۱۰ نانومتر در حالت  $\alpha=87^\circ$  را حساب کنید.

$$d=52 \text{ nm}$$

$$d=3 \text{ nm}$$

$$d=10 \text{ nm}$$

$$\alpha=0^\circ$$

$$\alpha=0^\circ$$

$$\alpha=87^\circ$$

$$\Psi_p = -5,5 \text{ MPa}$$

$$\Psi_p = -64 \text{ MPa}$$

$$\Psi_p = -1,36 \text{ MPa}$$

### ۴-۲-۳ پتانسیل فشاری

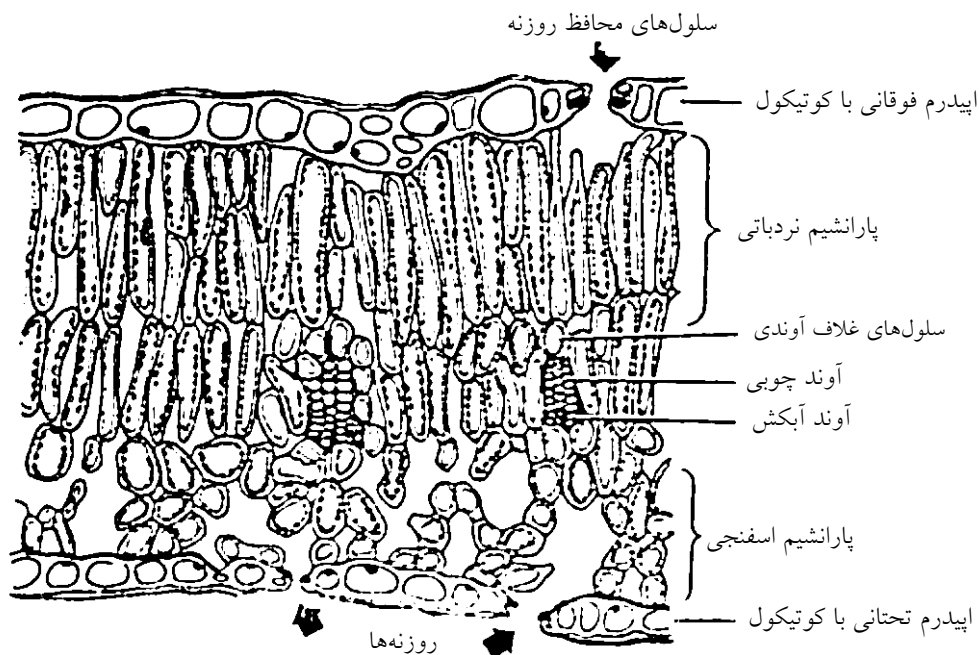
سلول‌های گیاهی به واسطه عمل شیره واکوئلی که پتانسیل اسمزی آن پایین‌تر از بقیه اجزای سلول است، مانند اسمومتر عمل کرده و در نتیجه محتویات سلولی تحت فشار قرار می‌گیرند (قسمت ۲-۲-۲). در واقع وجود پتانسیل اسمزی پایین‌تر در واکوئل به دلیل وجود قندها، پروتئین‌ها و مواد حل شده بیشتر، سبب می‌شود تا آب از بقیه نقاط سلول مانند سیتوپلاسم و همچنین فضاهای بیرون سلولی به داخل واکوئل رفته و این مسئله سبب انبساط واکوئل، بزرگ شدن آن و ایجاد فشار به سیتوپلاسم و دیواره سلولی گردد. از آنجایی که دیواره سلول‌ها تا اندازه‌ای معین می‌توانند این فشار را تحمل کنند، آن‌ها نیز متقابلاً به واکوئل و سایر اجزای درون سلول فشار وارد می‌کنند. این مسئله سبب ایجاد پتانسیل فشاری ( $\Psi_p$ ) یا فشار آماس در سلول (سیتوپلاسم) می‌گردد. مقادیر پتانسیل فشاری در حالت‌های مختلف سلولی و وضعیت‌های مختلف رطوبت متفاوت است و برای درک بهتر موضوع نمونه‌ای از مقادیر پتانسیل فشاری، اسمزی و آب سلول در جدول ۳-۴ آورده شده است.

وجود یک پتانسیل فشاری حداقل یا یک فشار آماس آستانه برای انجام بسیاری از فعالیت‌های گیاه ضروری است. روابط بین پتانسیل اسمزی و فشاری عمدتاً تعیین‌کننده و یا تنظیم‌کننده پتانسیل آب سلول است و در بسیاری از موارد گیاهان از طریق تنظیم پتانسیل اسمزی و کاهش بیشتر آن، جذب آب و پتانسیل فشاری را افزایش داده و در نتیجه روابط آبی خود را بهبود می‌بخشند.

اگر مطابق نظر برخی دانشمندان پتانسیل منفی ایجاد شده در منافذ دیواره‌های سلولی در حفره زیر روزنه را به حساب پتانسیل فشاری بگذاریم، باید بگوییم که پتانسیل فشاری در منافذ دیواره‌های سلولی مربوط به

**جدول ۳-۴** مقادیر تیپیک پتانسیل فشاری، اسمزی و آب سلول (همگی برحسب مگاپاسکال) در سه حالت مختلف.

حالت سلول	پتانسیل اسمزی	پتانسیل فشاری	پتانسیل آب
کاملاً آماس کرده	-۲	+۲	۰
تا حدودی آماس کرده	-۲	+۱	-۱
پژمرده	-۲	۰	-۲



شکل ۲-۴ برش عرضی یک برگ که در آن، آرایش سلول‌های مختلف و فضای زیر روزنه نشان داده شده است. پتانسیل فشاری در منافذ دیواره‌های سلولی و آوندهای چوبی منفی است (نوبل، ۱۹۹۴).

سلول‌های مجاور فضاهای زیر روزنه‌ها و در آوندهای چوبی منفی است (شکل ۲-۴). با افزایش تعرق، آب بیشتری از منافذ تبخیر شده و در نتیجه فشار منفی (مکش) آن‌ها افزایش می‌یابد. معمولاً در آوندهای چوبی و بسته به شدت تعرق و رطوبت خاک، پتانسیل فشاری بین  $-0.1$  تا  $-3$  مگاپاسکال متغیر بوده و مقدار تپیک آن  $0.5 \text{ MPa}$  - است. در بعضی شرایط که تعرق اندک بوده و نیز رطوبت هوا و خاک بالا می‌باشد، در اثر فشار ریشه‌ای (که در بخش‌های بعدی به آن می‌پردازیم) پتانسیل فشاری در آوندهای چوبی مثبت است و در نتیجه عمل تعریق<sup>۱</sup> یا خروج آب از منافذ کناری برگ‌ها (هیداتودها) انجام می‌گیرد.

#### ۴-۲-۴ پتانسیل ثقلی

پتانسیل ثقلی ( $\Psi_g$ ) آب به ارتفاع بستگی داشته و مقدار آن باتوجه به یک سطح مبنای قراردادی تعیین می‌گردد. در مورد گیاه اگر ارتفاع مبنا را سطح خاک در نظر بگیریم، به ازای هر متر افزایش پتانسیل ثقلی به اندازه  $0.01 \text{ MPa}$  افزایش می‌یابد. همچنین، در خصوص ریشه‌ها و در زیر خاک با افزایش هر متر عمق، پتانسیل ثقلی به اندازه  $0.01 \text{ MPa}$  - کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، اگر ارتفاع یک درخت را  $30$  متر در نظر بگیریم، در بالاترین نقطه پتانسیل ثقلی برابر  $0.3 = 30 \times 0.01$  مگاپاسکال است و برای صعود آب به

جدول ۴-۴ میزان پتانسیل آب اتمسفر برای مقادیر مختلف رطوبت نسبی در دمای  $20^{\circ}\text{C}$ .

رطوبت نسبی (%)	پتانسیل آب (MPa)	رطوبت نسبی (%)	پتانسیل آب (MPa)
۱۰۰	۰٫۰	۹۰	-۳۲٫۸
۹۹٫۹	-۰٫۳۱	۷۵	-۸۹٫۴
۹۹٫۵	-۱٫۵۶	۵۰	-۲۱۵٫۵
۹۹	-۳٫۵۲	۲۰	-۵۰۰
۹۸	-۶٫۲۸	۱۰	-۷۱۸
۹۵	-۱۵٫۹۵		

نقطه مذکور حداقل اختلاف پتانسیل باید بیشتر از  $0.3 \text{ MPa}$  باشد. لازم به ذکر است که پتانسیل ثقلی تنها در مورد درختان و بوته‌های پابلند مهم بوده و در مورد گیاهان پاکوتاه از اهمیت ناچیزی برخوردار است.

### ۴-۳ پتانسیل آب در اتمسفر

در اتمسفر پتانسیل آب را می‌توان به رطوبت نسبی<sup>۱</sup> (RH) آن نسبت داد. در اتمسفر رطوبت نسبی را می‌توان به صورت رابطه ۴-۴ و پتانسیل آب ( $\Psi_w$ ) هوا را از طریق رابطه ۴-۵ بیان کرد (نوبل، ۱۹۹۴):

$$RH = \frac{\text{فشار بخار آب موجود در اتمسفر}}{\text{فشار بخار آب اشباع در همان دما}} \times 100 = \frac{e_a}{e_s} \times \quad (4-4)$$

$$\Psi_w = \frac{RT}{V_w} \ln \frac{RH}{100} \quad (4-5)$$

که در آن، RH رطوبت نسبی،  $\bar{V}_m$  حجم مولی آب، R ثابت عمومی گازها، T دمای سیستم،  $e_s$  و  $e$  به ترتیب فشار بخار و فشار بخار اشباع در دمای سیستم برحسب پاسکال و نسبت  $\frac{e}{e_s}$  فشار بخار نسبی یا همان رطوبت نسبی به صورت  $\frac{RH}{100}$  می‌باشند.

میزان پتانسیل آب اتمسفر برای مقادیر مختلف رطوبت نسبی در جدول ۴-۴ آورده شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود، با کاهش رطوبت نسبی میزان پتانسیل آب اتمسفر به شدت کاهش می‌یابد. نکته جالب این مسئله است که پتانسیل آب اتمسفر نسبت به پتانسیل آب خاک و گیاه بسیار منفی‌تر است. به عنوان مثال، در نقطه پژمردگی دائم اکثر گیاهان که پتانسیل آب خاک و گیاه حدود  $1.5 \text{ MPa}$ - است، رطوبت نسبی هوا حدود ۹۹٪ است. به عبارت دیگر، در زمان پژمردگی دائم، فضاهای بین سلولی گیاه و اتمسفر می‌توانند تا حدود ۹۹٪ رطوبت نسبی داشته باشند. این مسئله نشان می‌دهد که هوا نسبت به خاک و گیاه بسیار خشک بوده و همواره شیب بالایی از پتانسیل آب بین خاک و گیاه با اتمسفر برقرار است. در واقع، در صورت عدم وجود مکانیسم‌های لازم در جلوگیری از خروج رطوبت از گیاه مانند بسته شدن

**جدول ۴-۵** نمونه‌ای از تغییرات اجزای پتانسیل آب در سیستم خاک- گیاه- اتمسفر و ارتباط آن‌ها با رطوبت نسبی.

محیط	پتانسیل (مگا پاسکال)			
	اسمزی	ماتریک	فشاری	ثقلی
اتمسفر (رطوبت نسبی ۰/۶۵)	-	-	-	-
برگ	-۱,۵	۰	+۰,۵	+۰,۱۵
آوند چوب	-۰,۲۴	۰	-۰,۴	+۰,۱۵۰
ریشه گیاه	-۰,۹	۰	+۰,۵	-۰,۰۰۵
خاک (ظرفیت زراعی)	-۰,۰۴	-۰,۰۳	۰	-۰,۰۰۵
خاک (پژمردگی دائم)	-۰,۰۷	-۱,۵	۰	-۰,۰۰۵
				-۱,۶

روزنه‌ها در شرایط گرمای زیاد یا تنش خشکی جهت جلوگیری از خروج رطوبت به صورت تعرق، گیاه به سرعت تمامی آب خود را ازدست داده و پژمرده می‌شود.

**تمرین** میزان رطوبت نسبی فضاهای بین سلولی در یک بافت گیاهی درموقع پژمردگی دائم را محاسبه کنید. پتانسیل آب گیاه در نقطه پژمردگی دائم را ۱,۵ MPa- در نظر بگیرید.

برای درک بهتر وضعیت اجزای پتانسیل آب و رابطه آن‌ها با رطوبت نسبی، نمونه‌ای از تغییرات اجزای پتانسیل آب در سیستم خاک- گیاه- اتمسفر در جدول ۴-۵ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که همواره یک شیب پتانسیل آب از خاک تا اتمسفر برقرار بوده و حرکت آب نیز در جهت همین شیب پتانسیل صورت می‌گیرد.

## ۴-۴ روش‌های اندازه‌گیری مقدار آب و پتانسیل آن در خاک

### ۴-۴-۱ اندازه‌گیری مستقیم آب خاک

این روش که اصلی‌ترین روش اندازه‌گیری رطوبت خاک است، بسیار ساده بوده و نیاز به امکانات کمی دارد. اندازه‌گیری آب خاک بر روی نمونه‌هایی انجام می‌شود که وزن یا حجم آن‌ها معلوم می‌باشد. مقدار آب به صورت گرم آب بر گرم خاک خشک‌شده در آون یا به صورت گرم آب بر سانتی‌متر مکعب خاک بیان می‌شود (روابط ۴-۶ و ۴-۷). نمونه‌ها را باکمک وسایل مخصوص (مانند آگر) از خاک برمی‌دارند. برای تعیین حجم خاک معمولاً نمونه‌ها را با استفاده از ظرفی با حجم معین برمی‌دارند. وزن مخصوص ظاهری (رابطه ۴-۸) و حقیقی خاک (رابطه ۴-۹) را می‌توان جداگانه نیز تعیین کرد. رطوبت خاک نمونه با قراردادن خاک در آون با دمای ۱۰۵°C به مدتی که وزن آن ثابت شود (حدود ۲۴ ساعت)، محاسبه می‌شود. زمان لازم برای خشک کردن را می‌توان با مجهز کردن آون به دستگاه تهویه کوتاه ساخت.

$$100 \times (\text{وزن خاک خشک} / \text{وزن آب}) = \text{درصد رطوبت وزنی خاک} \quad (4-6)$$

$$100 \times (\text{حجم خاک دست‌نخورده} / \text{حجم آب}) = \text{درصد رطوبت حجمی خاک} \quad (4-7)$$



(۴-۸) (حجم خاک دست نخورده / وزن خاک خشک) = وزن مخصوص ظاهری خاک

(۴-۹) (حجم ذرات جامد خاک / وزن خاک خشک) = وزن مخصوص حقیقی خاک

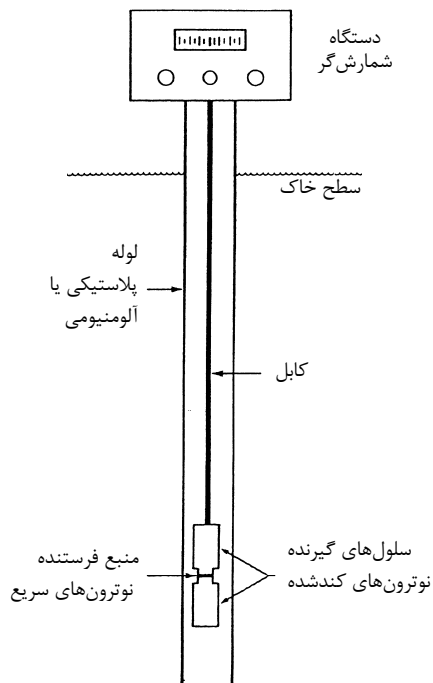
در برخی موارد لازم است مقدار آب در واحد وزن را به مقدار آب در واحد حجم تبدیل کرد، چون مقدار خاکی را که توسط سیستم ریشه‌های گیاه اشغال می‌شود به صورت حجم نه وزن بیان می‌کنند. معیار مهم در این رابطه تراکم طول ریشه است که واحد آن سانتی‌متر طول ریشه بر سانتی‌متر مکعب حجم خاک است. با ضرب کردن مقدار حجمی آب خاک در عمق خاک می‌توان عمق آب را در هر واحد سطح زمین به دست آورد. همچنین، با ضرب کردن رطوبت وزنی در وزن مخصوص ظاهری خاک، رطوبت حجمی به دست می‌آید. به هر حال، بیان مقدار آب خاک به صورت درصد از وزن خاک خشک یا حجم خاک دست نخورده برای توصیف میزان آب قابل دسترس گیاه و همچنین آب مورد نیاز گیاه کافی نیست، مگر در مواقعی که منحنی پتانسیل آب خاک در برابر مقدار رطوبت آن یا ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی داریم خاک معلوم باشد. درصد معینی از آب خاک که ممکن است برای یک خاک شنی در حد اشباع باشد، ممکن است در یک خاک رسی زیر نقطه پژمردگی دائم باشد.

از معایب این روش می‌توان به تعداد زیاد نمونه برداری‌ها که اغلب موجب از بین رفتن گیاهان می‌شود، به هم خوردن خاک و نیاز به پرکردن سوراخ‌های متعدد، دشواری نمونه برداری در خاک‌های دارای سنگریزه و خاک‌های سنگین و غیریکنواخت اشاره کرد. به هر حال، این روش پرزحمت بوده و به همین دلیل بسیاری از محققین روش‌های غیرمستقیم را ترجیح می‌دهند، ولی اگر به درستی انجام شود دقیق‌ترین برآورد از آب خاک را به دست می‌دهد (کرامر، ۱۹۹۵).

## ۲-۴-۴ استفاده از نوترون متر

استفاده از نوترون متر متداول‌ترین روش غیرمستقیم اندازه‌گیری آب خاک است. این روش بر این حقیقت استوار است که اگر از یک منبع رادیواکتیو که معمولاً رادیوم و بریلیوم است، نوترون‌هایی با انرژی زیاد خارج شود، این نوترون‌ها با هسته اتم‌های مجاور برخورد می‌کنند. حال اگر هسته این اتم‌ها سخت و سنگین باشد، نوترون‌ها پس از برخورد، مانند برخورد تویی به دیوار، برمی‌گردند و در ضمن سرعت اولیه خود را نیز حفظ می‌کنند. برعکس، اگر ذراتی که نوترون به آن‌ها برخورد می‌کند، از اندازه و جرم مشابه نوترون برخوردار باشند، در این صورت تقریباً نیمی از انرژی اولیه نوترون به ذره جدید منتقل گردیده و هر دو با سرعتی برابر که معادل نصف سرعت اولیه نوترون است، دور می‌شوند. در این حالت، به این نوترون‌ها که سرعت آن‌ها کم شده است نوترون‌های کند شده می‌گویند. سرعت نوترون‌های سریع حدود ۱۶۰۰ کیلومتر در ثانیه است، در حالی که برای نوترون‌های کند شده سرعت در حدود ۲٫۷ کیلومتر در ثانیه می‌باشد (کرامر، ۱۹۹۵).

در خاک عناصر فراوانی برای کند کردن سرعت نوترون‌ها نیست. از آنجایی که جرم هسته اتم هیدروژن مساوی جرم نوترون است، بنابراین، هیدروژن مؤثرترین عامل در ایجاد نوترون‌های کند شده است. در واقع،

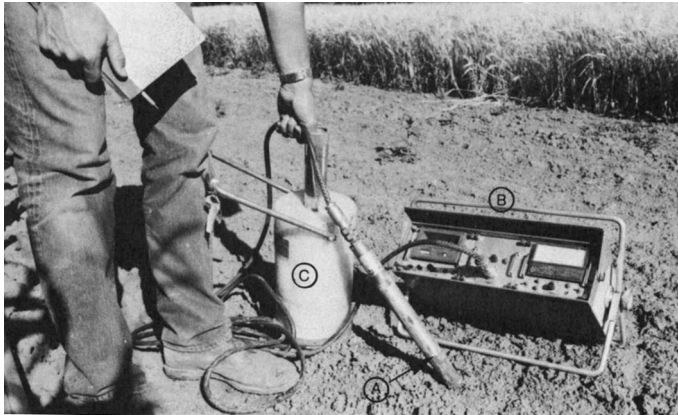


شکل ۳-۴ نوترون‌متر از یک لوله متشکل از یک منبع نوترون‌های سریع و یک شمارش‌گر برای شمارش تعداد نوترون‌های کندشده تشکیل شده است که این شمارش‌گر از طریق یک آمپلی‌فایر به صفحه سنجش متصل می‌شود. تراکم نوترون‌های کندشده در اطراف میله به غلظت هیدروژن موجود در خاک و در نتیجه به حجم آب موجود در خاک بستگی دارد (کرامر، ۱۹۹۵).

نوترون‌های کندشده با اجزای مختلف خاک برخورد کرده و به تدریج جذب هسته‌های موجود در آن‌ها می‌شوند. درجه مؤثر بودن هسته‌های مختلف موجود در خاک و نقش آن‌ها در کندکردن نوترون‌های سریع بسیار متفاوت است. هسته‌های هیدروژن موجود در خاک بیشترین تأثیر را در کندکردن سرعت نوترون‌ها دارند. مثلاً برای آنکه یک نوترون سریع با انرژی حدود ۲ میلیون الکترون ولت کند شود کافی است فقط ۱۸ مرتبه با هسته هیدروژن برخورد کند، درحالی‌که برای رسیدن به همین سرعت لازم خواهد بود ۱۱۴ مرتبه با هسته کربن و یا ۱۵۰ مرتبه با هسته اکسیژن برخورد داشته باشد. هرچه عدد جرمی یک عنصر بیشتر باشد تعداد دفعات برخورد بیشتری برای کندشدن نوترون لازم خواهد بود.

به هر حال، تراکم نوترون‌های کندشده در اطراف میله تا اندازه زیادی به غلظت هیدروژن موجود در خاک و در نتیجه به حجم آب موجود در خاک بستگی دارد. نوترون‌های کندشده چون به صورت یکنواخت در اطراف میله پراکنده‌اند بخشی از آن‌ها وارد میله شده و در آنجا توسط یک سلول<sup>۱</sup> ثبت می‌شوند. سلول گیرنده محفظه‌ای است که از گاز تری‌فلورید بور پر شده است. هنگامی که نوترون کندشده به هسته بور برخورد می‌کند جذب آن شده و ذره آلفا گسیل می‌شود. ذرات آلفا به نوبه خود پالس‌های الکتریکی ایجاد می‌نمایند که می‌توان تعداد این پالس‌ها را توسط گیرنده‌های مخصوص ثبت نمود. تعداد پالس‌های ثبت‌شده در یک دوره زمانی با درصد حجمی رطوبت خاک رابطه مستقیم و خطی دارد.

1. Detector cell

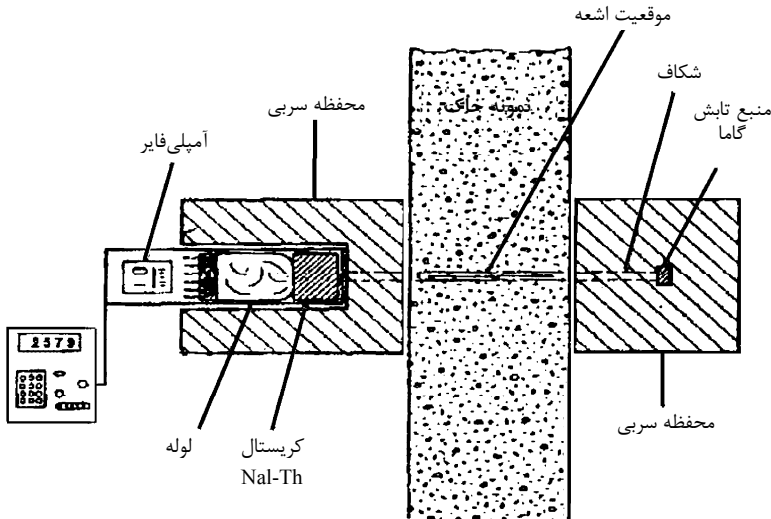


**شکل ۴-۴** نحوه استفاده از نوترون متر در مزرعه. با کالیبراسیون میزان شمارش نوترون‌های کندشده با مقدار آب خاک می‌توان در دفعات بعد در همان محل از روی میزان شمارش به مقدار آب خاک پی برد (میلر و داناهاو، ۱۹۹۰).

نوترون متر (شکل ۴-۳) از یک لوله متشکل از یک منبع نوترون‌های سریع و یک شمارش‌گر برای شمارش تعداد نوترون‌های کندشده تشکیل شده است که این شمارش‌گر از طریق یک آمپلی‌فایر به صفحه سنجش دستگاه متصل می‌شود. به هنگام استفاده منبع و شمارش‌گر در داخل یک لوله پلاستیکی یا آلومینیومی به پایین فرستاده می‌شود و عمل قرائت دستگاه در عمق‌های مورد نظر انجام می‌گیرد. با کالیبراسیون میزان شمارش با مقدار آب خاک، می‌توان در دفعات بعد در همان محل از روی میزان شمارش به مقدار آب خاک پی برد (شکل ۴-۴).

بنابراین، از روی شمارش نوترون‌های کندشده در مجاورت منبع تولید نوترون‌های سریع می‌توان مقدار اتم‌های هیدروژن را تخمین زد. چون مهم‌ترین منبع هیدروژن در اکثر خاک‌ها آب است، از این اصل می‌توان برای اندازه‌گیری آب خاک سود برد. البته در خاک‌هایی که تراکم ریشه زیاد است و یا در خاک‌هایی که دارای مقدار زیادی بقایای آلی می‌باشند، ممکن است مقدار هیدروژن آلی بر تخمین مقدار آب مؤثر باشد. اما این مقدار هیدروژن در مقایسه با هیدروژن موجود در آب خاک کم است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. نوترون متر متوسط رطوبت خاک را در حجم کره‌ای به شعاع ۲۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌کند.

مزیت این روش نسبت به روش جرمی این است که اولاً اندازه‌گیری به سرعت انجام شده و نیازی به صرف وقت ۲۴ ساعت برای خشک کردن نمونه‌ها نیست. ثانیاً اندازه‌گیری مستقیماً در صحرا و در شرایط طبیعی صورت می‌گیرد. از عیوب این دستگاه گرانی بسیار زیاد آن، خطرات ناشی از تابش نوترون، داشتن اجزای الکتریکی ظریف، به هم خوردگی خاک برای جایگذاری لوله ارزیابی، تحت تأثیر قرارگرفتن نتایج در اثر وجود سایر منابع هیدروژن مثل مواد آلی و عناصری



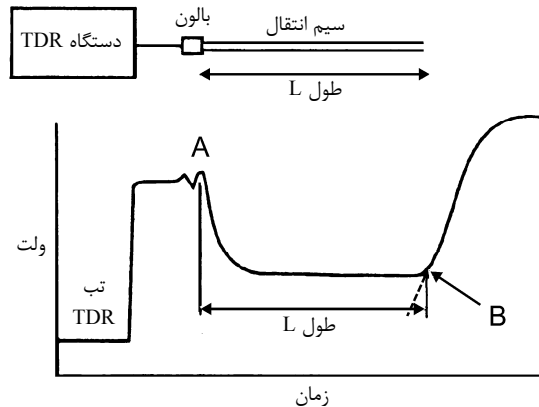
شکل ۴-۵ اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش تابش گاما. کاهش شدت تابش به چگالی، رطوبت و ضخامت نمونه خاکی که تابش از آن عبور می‌کند، بستگی دارد. اگر چگالی خاک ثابت باشد، تغییرات شدت تابش به رطوبت خاک ارتباط دارد (علیزاده، ۱۳۸۳).

مثل کالر، آهن و بور و غیرقابل استفاده بودن دستگاه برای اندازه‌گیری رطوبت در نزدیکی سطح خاک است. انواع جدید نوترون‌متر نیاز به کالیبراسیون نداشته و سنجش آن‌ها برای مواد تأثیرگذار قابل تصحیح است. همچنین، این انواع جدید قادرند رطوبت خاک در نزدیک سطح زمین را نیز اندازه‌گیری کنند (میلر و داناوو، ۱۹۹۰).

### ۳-۴-۴ استفاده از دستگاه تابش گاما

یکی از روش‌های تابشی برای تعیین رطوبت خاک استفاده از دستگاههایی است که تابش گاما را به داخل خاک گسیل می‌دارند. اگر نمونه‌ای از خاک را انتخاب و از یک طرف تابش گاما را وارد آن کنیم و در طرف دیگر نمونه شدت تابش را اندازه‌گیری کنیم ملاحظه خواهد شد که از مقدار تابش کاسته شده است. کاهش شدت تابش به چگالی خاک و میزان رطوبت خاک و فاصله‌ای که تابش در خاک طی می‌کند (ضخامت نمونه خاک که تابش از آن عبور می‌کند) بستگی دارد و اگر چگالی خاک ثابت باقی بماند می‌توان گفت که تغییرات شدت تابش به رطوبت خاک بستگی دارد.

در دستگاه تابش گاما منبع رادیواکتیو در داخل محفظه سربی قرار گرفته است تا درحالت عادی خطرات ناشی از آن به حداقل برسد (شکل ۴-۵). پس از آنکه تابش‌های تولیدشده به وسیله منبع رادیواکتیو از داخل خاک عبور کرد در طرف دیگر یک وسیله حساس تابش‌های مستهلک‌شده را دریافت و ثبت می‌نماید. با این روش می‌توان رطوبت را در هر مقطعی از خاک تعیین کرد.

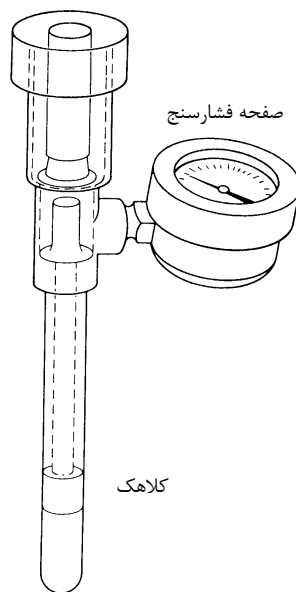


شکل ۴-۶ اجزای تشکیل دهنده دستگاه TDR و تیپ منحنی‌های حاصل از آن. نقطه A زمانی است که سیگنال وارد خاک شده و نقطه B نشان‌دهنده زمان برگشت آن است. سرعت انتشار علائم با مقدار ثابت دی‌الکتریک خاک که تابعی از رطوبت آن می‌باشد نسبت معکوس دارد (علیزاده، ۱۳۸۳).

#### ۴-۴-۴ روش انعکاس‌سنجی زمانی

یکی از روش‌های نسبتاً جدید در اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک روش انعکاس‌سنجی زمانی<sup>۱</sup> است که اصطلاحاً روش TDR نام گرفته است (علیزاده، ۱۳۸۳). در این روش دو میله فلزی موازی، که معمولاً از جنس مس یا فولاد انتخاب می‌شوند، به یک دستگاه گیرنده متصل می‌باشند (شکل ۴-۶). این دو میله سپس به‌داخل خاک فرو برده می‌شوند. میله‌ها که قطرشان حدود ۵ میلی‌متر است به‌عنوان هادی عمل کرده و خاکی که بین میله و اطراف آن‌ها واقع شده نقش محیط دی‌الکتریک را ایفا می‌کند. حال اگر دستگاه TDR علائمی را ایجاد کرده و آن‌را در طول میله‌های موازی منتشر نماید، سرعت این علائم که با فرکانس زیاد خارج شده‌اند توسط موادی مانند خاک مرطوب که ثابت دی‌الکتریک آن‌ها زیاد است کاهش پیدا می‌کند (به‌طورکلی، دی‌الکتریک به معنی نارسا بودن الکتروسیسته است و جسمی که بین دو سطح باردار قرار می‌گیرد مانع از تشکیل شبکه جریان بار الکترونیکی می‌گردد).

سیگنال‌هایی که سرعت آن‌ها کم شده است از انتهای میله منعکس شده و پس از برگشت وارد دستگاه می‌شوند. این دستگاه زمان بین فرستادن و دریافت علائم منعکس‌شده را اندازه‌گیری می‌کند. سرعت انتشار علائم با مقدار ثابت دی‌الکتریک خاک که تابعی از رطوبت آن می‌باشد نسبت معکوس دارد. به‌این ترتیب که هرچه رطوبت خاک افزایش یابد، ثابت دی‌الکتریک افزایش یافته و بنابراین سرعت انتشار علائم کاهش و فاصله زمانی بین رفت و برگشت علائم افزایش پیدا می‌کند.



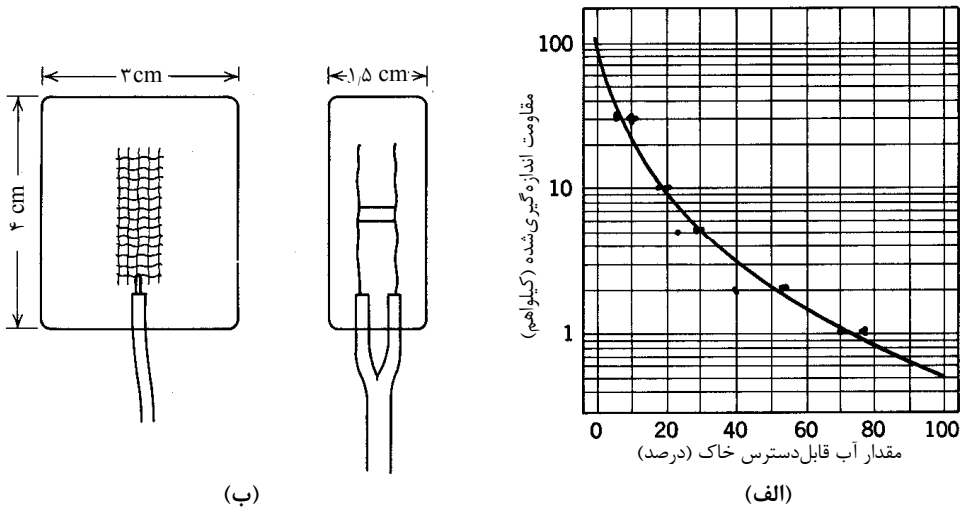
شکل ۴-۷ تانسئومتر از یک لوله پُرازآب که در انتهای آن یک کلاهک متخلخل قرار دارد، تشکیل شده است. لوله پُرازآب به یک فشارسنج متصل است و مقدار فشار منفی آب داخل لوله را اندازه‌گیری می‌کند (کرامر، ۱۹۹۵).

از دستگاه TDR به خوبی می‌توان در اندازه‌گیری رطوبت خاک برای اهداف آبیاری و مطالعات آب و خاک استفاده کرد. در این دستگاه فاصله میله‌هایی که در خاک فروبرده می‌شوند حدود ۵ سانتی‌متر است. به این ترتیب، در دستگاه TDR رطوبت استوانه‌ای از خاک اندازه‌گیری می‌شود که محور آن منطبق بر خط وسط میله‌ها و ارتفاع آن معادل طول میله‌ها است. نکته قابل توجه در مورد این دستگاه، که غالباً باعث ایجاد اشتباه در اندازه‌گیری‌ها می‌گردد، عدم تماس کامل میله‌ها با خاک است. این حالت به خصوص در خاک‌های خشک و منقبض شده صورت می‌گیرد. برای رفع این مشکل توصیه می‌شود که میله‌ها به صورت مایل در خاک فرو برده شوند.

هرچند سرعت سیگنال‌های TDR تحت تأثیر هدایت الکتریکی محلول خاک قرار نمی‌گیرد، ولی شدت سیگنال‌ها (کاهش ولتاژ) می‌تواند به عنوان شاخصی از مقدار شوری محلول خاک مورد استفاده قرار گیرد. از این نظر، دستگاه TDR برای اندازه‌گیری شوری خاک (ولی با دقت کمتر) نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۴-۴-۵ تانسئومتر

در صورتی که کالیبراسیون انجام شده باشد می‌توان برای تعیین مقدار رطوبت خاک نیز استفاده کرد. تانسئومتر از یک لوله پُرازآب، که در انتهای آن یک کلاهک متخلخل قرار دارد، تشکیل شده است. لوله پُرازآب به یک فشارسنج (سنجنده خلأ) متصل است و کلاهک را می‌توان در هر عمقی قرار داد (شکل ۴-۷).



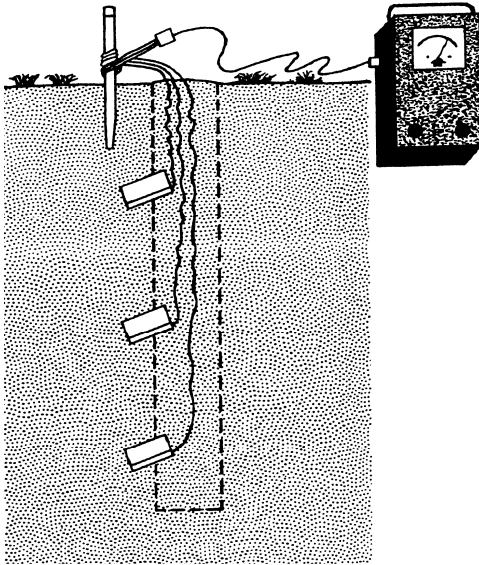
شکل ۸-۴ الف) رابطه مقاومت الکتریکی با مقدار آب در خاک؛ ب) ساختمان بلوک گچی از مقابل و کنار. هدایت الکتریکی قالب متخلخل به عنوان تابعی از رطوبت جذب شده از خاک به شمار می رود (کرامر، ۱۹۹۵).

فشارسنج، مقدار فشار منفی (مکش) آب داخل لوله را که از طریق کلاهک با پتانسیل ماتریک آب خاک در حال تعادل است، اندازه گیری می کند. دقت تانسیومتر در خاک های مرطوب بسیار خوب است، ولی اگر پتانسیل ماتریک کمتر از  $0.08 \text{ MPa}$  شود، در اثر مکش ایجاد شده، هوا به داخل آن نفوذ کرده و استفاده از این وسیله غیر عملی می شود.

از معایب این روش می توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) گرچه رشد سریع گیاه معمولاً در محدوده رطوبتی انجام می شود که این وسیله به آن حساس است (پتانسیل آب حدود  $0.03$  تا  $0.08$  - مگاپاسکال)، ولی محاسبه پتانسیل های آب پایین تر نیز برای ما اهمیت دارند که با این دستگاه قابل سنجش نیستند، (۲) هربار پس از ورود هوا به لوله باید مجدداً لوله از آب پر شود، و (۳) رشد زیاد ریشه در اطراف کلاهک می تواند در سنجش میزان پتانسیل ماتریک ایجاد خطا کند.

#### ۴-۴-۶ بلوک های مقاومت الکتریکی

بلوک های مقاومت الکتریکی از یک بلوک گچی که در داخل آن الکترودهایی قرار دارند، تشکیل شده است (شکل ۸-۴). بلوک های گچی در داخل خاک و در عمق مورد نظر قرار داده می شوند و با سیم هایی کاملاً عایق کاری شده به دستگاه اندازه گیری مقاومت متصل می شوند (شکل ۹-۴). چون مقدار آب قطعات گچی تابعی از تغییرات رطوبت خاک است، محلولی که بین الکترودها قرار می گیرد بستگی به مقدار آب خاک دارد و در نتیجه تغییرات مقاومت الکتریکی آن به مقدار آب خاک مرتبط است. در شرایط معمول بلوک های گچی می توانند ماهها و حتی سالها در خاک باقی بمانند،



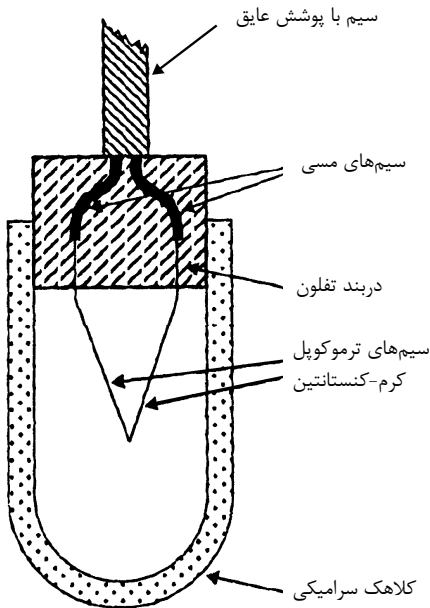
شکل ۹-۴ نحوه قرارگیری بلوک‌های گچی در خاک مزرعه. بلوک‌های گچی در داخل خاک و در عمق موردنظر قرار داده می‌شوند و با سیم‌هایی کاملاً عایق‌کاری شده به دستگاه اندازه‌گیری مقاومت متصل می‌شوند (میلر و

ولی اگر از گچ معمولی یا گچ پاریس (شکسته‌بندی) ساخته شده باشند در محیط‌های اسیدی و مرطوب تجزیه شده و اغلب بیش از یک فصل دوام نمی‌آورند. عمر بلوک‌های گچی را می‌توان با فرو بردن آن‌ها در صمغ افزایش داد. حساسیت بلوک‌های گچی معمولی در خاک‌های خشک بیشتر از خاک‌های مرطوب است.

انواعی از بلوک‌های گچی که در آن‌ها الکترودها داخل نایلون یا فایبرگلاس قرار داده می‌شوند، دارای عمر طولانی بوده و علاوه بر سرعت عمل در پتانسیل‌های بالاتر از  $0.1 \text{ MPa}$ ، در مقایسه با انواع گچی حساس‌تر هستند. ولی حساسیت آن‌ها نسبت به مقدار نمک خاک بیشتر از نوع گچی است و در خاک‌های خشک حساسیت کمتری دارند. بلوک‌های گچی در برابر نمک‌ها حساسیت کمتری نشان می‌دهند.

واسنجی بلوک‌ها به دو صورت انجام می‌شود: (۱) کالیبراسیون مقاومت الکتریکی قرائت‌شده در برابر مقدار آب موجود در خاک، و (۲) کالیبراسیون در برابر پتانسیل ماتریک بلوک. در حالت اخیر، برای انجام کالیبراسیون، بلوک‌ها را در داخل دستگاه صفحه فشاری قرار داده و مقدار مقاومت آن‌ها تحت فشارهای مختلف (پتانسیل‌های مختلف) اندازه‌گیری می‌شود. در این صورت، می‌توان از روی قرائت میزان مقاومت به پتانسیل ماتریک خاک پی برد. برای کالیبراسیون حالت اول، می‌توان قرائت مقاومت‌ها را با مقدار رطوبت خاک نزدیک بلوک‌ها (وزنی یا حجمی) واسنجی کرد. حالت دوم خاص بلوک بوده و در کلیه خاک‌ها همان خواهد بود، ولی کالیبراسیون حالت اول از خاکی به خاک دیگر تغییر می‌یابد و لازم است برای هر خاک جداگانه انجام شود. عیب این روش آن است که دستگاه باید برای هر خاکی واسنجی شود.





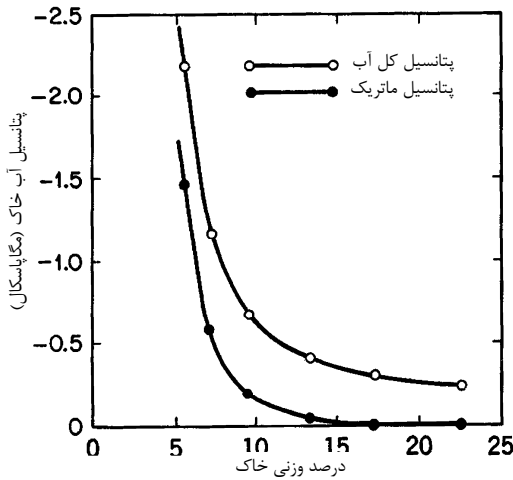
شکل ۱۰-۴ نمونه‌ای از یک ترموکوپل سایکرومتر برای اندازه‌گیری پتانسیل آب خاک. این دستگاه از محفظه‌ای کوچک از سرامیک متخلخل درست شده است و درون خاک قرار داده می‌شود. از آنجاکه بخار آب به‌سادگی از سرامیک عبور می‌کند، فشار بخار هوای درون محفظه سرامیکی با فشار بخار هوای خاک در تعادل باقی می‌ماند (علیزاده، ۱۳۸۳).

#### ۷-۴-۴ ترموکوپل سایکرومتر

به نظر می‌رسد بهترین روش اندازه‌گیری پتانسیل آب خاک، استفاده از ترموکوپل سایکرومتر باشد (thermocouple psychrometry) (شکل ۱۰-۴). چنان‌که در فصل ۲ توضیح داده شد (رابطه ۱۵-۲) پتانسیل آب در هر سیستمی، از جمله خاک، از روی رطوبت نسبی فاز گازی در تعادل با آن قابل تعیین می‌باشد. در این روش رطوبت نسبی در داخل یک محفظه چینی یا سرامیکی کوچک و دارای منافذ، که با فاز گازی خاک ارتباط دارد، اندازه‌گیری می‌شود و سپس رطوبت نسبی به پتانسیل آب برگردانده می‌شود (براساس رابطه ۱۵-۲). همان‌طور که از نام دستگاه پیداست (نم‌سنج دما جفت)، رطوبت نسبی بر مبنای تغییر دما در محل اتصال دو سیم فلزی از جنس مختلف و ایجاد جریان الکتریکی، اندازه‌گیری می‌شود.

#### ۸-۴-۴ اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک

در خاک‌هایی با میزان املاح کم، پتانسیل آب عموماً از پتانسیل ماتریک تشکیل شده است. برای تعیین پتانسیل آب در چنین حالتی اگر منحنی مشخصه رطوبتی خاک در دست باشد، با تعیین مقدار آب نمونه در آزمایشگاه و استفاده از منحنی مشخصه رطوبتی خاک می‌توان به پتانسیل ماتریک و در نتیجه پتانسیل آب پی برد (شکل ۱۱-۴). اگر مقدار املاح خاک مانند خاک‌های شور و خاک‌هایی که کود زیادی به آن‌ها داده شده است زیاد باشد، در آن صورت پتانسیل آب با پتانسیل ماتریک برابر نبوده ( $\Psi_w \neq \Psi_m$ ) و پتانسیل اسمزی در محاسبه پتانسیل آب قابل صرف نظر کردن نیست.



شکل ۱۱-۴ رابطه پتانسیل ماتریک و پتانسیل آب با مقدار رطوبت خاک. با تعیین مقدار آب نمونه در آزمایشگاه و استفاده از منحنی مشخصه رطوبتی خاک می‌توان به پتانسیل ماتریک و در نتیجه پتانسیل آب پی برد (کرامر، ۱۹۹۵).

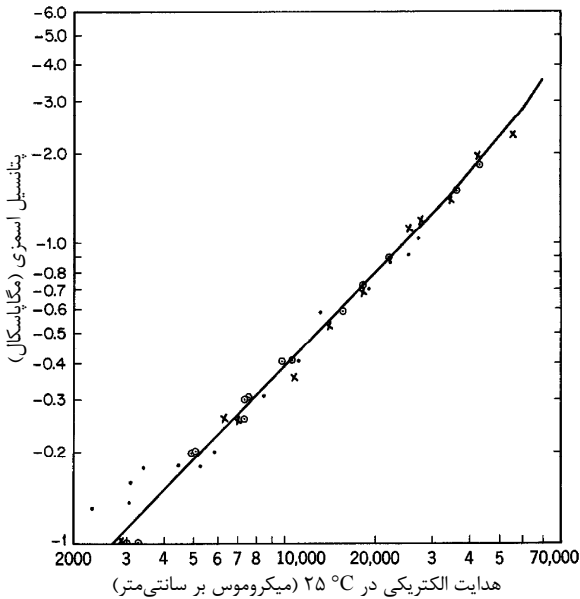
برای تعیین منحنی مشخصه آب خاک در آزمایشگاه اغلب از دستگاه صفحه فشاری<sup>۱</sup> یا غشای فشاری<sup>۲</sup> استفاده می‌شود (مراجعه شود به فصل ۶، شکل ۵-۶ و ۶-۶). در این روش نمونه خاک که قبلاً مرطوب شده است روی غشایی که نسبت به آب و اجسام حل‌شدنی نفوذپذیر است، قرار می‌گیرد. سپس به این نمونه خاک از بالا فشار و یا از پایین مکش اعمال شده که در نتیجه آب از نمونه خارج می‌شود. وقتی جریان آب خروجی متوقف شد، بدین معنا است که بین پتانسیل ماتریک نمونه و فشار یا مکش وارده تعادل برقرار شده ( $P = -\Psi_m$ ) و بنابراین پتانسیل ماتریک برابر فشار وارده است. در این هنگام نمونه را بیرون می‌آورند و مقدار رطوبت آن را اندازه می‌گیرند.

غشای به‌کاررفته از جنس استات سلولز یا سرامیک متخلخل است و بر روی صفحه فلزی مشبک قرار داده می‌شود. در خاک‌هایی که بر اثر خشک‌شدن چروکیده می‌شوند، اشکالاتی در تماس بین نمونه خاک و غشا به‌وجود می‌آید. مقدار آب خاک در فشار ۱/۵ MPa که با این روش به‌دست می‌آید، تقریب خوبی از نقطه پژمردگی دائم می‌باشد.

#### ۹-۴-۴ اندازه‌گیری پتانسیل اسمزی

پتانسیل اسمزی نمونه را فقط بعد از استخراج محلول خاک می‌توان اندازه گرفت. بدین منظور ابتدا نمونه گل اشباع تولید شده، سپس از آن عصاره گرفته می‌شود و سرانجام پتانسیل اسمزی عصاره اشباع اندازه‌گیری می‌شود. پتانسیل اسمزی عصاره را می‌توان با روش کریوسکوپ، یا روش استفاده از ترموکوپل سایکرومتر، یا اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آن به‌دست آورد. پتانسیل اسمزی که از عصاره اشباع خاک به‌دست می‌آید را می‌توان برای رطوبت حقیقی خاک اصلاح کرد. شکل ۱۲-۴ رابطه هدایت الکتریکی عصاره با پتانسیل اسمزی را نشان می‌دهد.

1. Pressure plate  
2. Pressure membrane



شکل ۱۲-۴ رابطه پتانسیل اسمزی محلول با هدایت الکتریکی آن. مشاهده می شود که با افزایش هدایت الکتریکی پتانسیل اسمزی کاهش می یابد (کرامر، ۱۹۹۵).

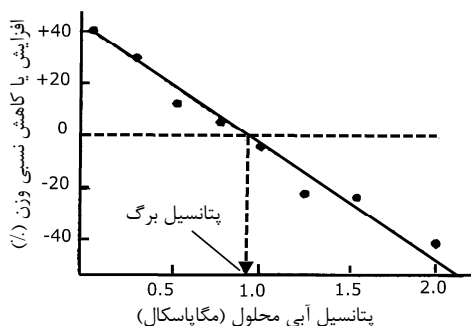
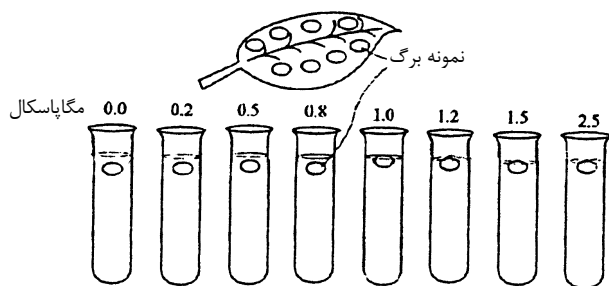
## ۴-۵ اندازه گیری مقدار آب و پتانسیل آن در گیاه

باتوجه به اینکه پتانسیل آب گیاه از دو جزء پتانسیل فشاری و پتانسیل اسمزی تشکیل شده است، در اینجا به ذکر روش های اندازه گیری و محاسبه این دو جزء پرداخته می شود.

### ۴-۵-۱ روش تعادل مایع

در روش تعادل مایع<sup>۱</sup> ابتدا محلول هایی با پتانسیل های اسمزی متفاوت تهیه می شود. دامنه این پتانسیل های اسمزی ایجاد شده باید طوری باشد که شامل پتانسیل آب بافت که معمولاً محدوده آن بین پتانسیل ۰ تا -۲ مگاپاسکال است، باشد. قطعه ای از بافت مورد نظر در هر یک از این محلول ها قرار داده می شود. وزن این قطعات قبل و بعد از قرارگیری در محلول اندازه گیری می شود. محلول های حاوی قطعه بافت را با کاغذ آلومینیوم یا پلاستیک پوشانده و سپس به مدت ۸ الی ۲۴ ساعت در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  و در تاریکی گذاشته می شود. تاریکی از فتوسنتز و افزایش وزن نمونه جلوگیری می کند و دمای پایین موجب توقف تنفس و کاهش وزن نمونه می گردد. پتانسیل آب بافت عبارت از پتانسیلی است که در آن، بافت نه آب جذب کند و نه آب از دست بدهد. این پتانسیل را با رسم نموداری که محور  $y$  آن اختلاف وزن نمونه در قبل و بعد از قرارگیری در محلول و محور  $x$  آن پتانسیل اسمزی محلول است به دست می آورند. نقطه ای که نمودار محور  $x$  ها را قطع می کند برابر پتانسیل اسمزی بافت است (شکل ۱۳-۴).

1. Liquid equilibration method



شکل ۱۳-۴ تعیین پتانسیل اسمزی به روش تعادل مایع. نقطه‌ای که نمودار محور Xها را قطع می‌کند برابر پتانسیل اسمزی برگ است.

برای ایجاد پتانسیل‌های اسمزی باید ترجیحاً از موادی مانند ساکاروز، مانیتول یا پلی اتیلن گلیکول، که جذب بافت گیاهی نمی‌شوند، استفاده شود. در صورت استفاده از کلرید سدیم ممکن است مقداری از آن جذب بافت شده و در نتیجه به خاطر تنظیم اسمزی، مقداری آب (بیشتر از حد طبیعی آن) توسط بافت جذب شده و سبب اشکال در اندازه‌گیری شود.

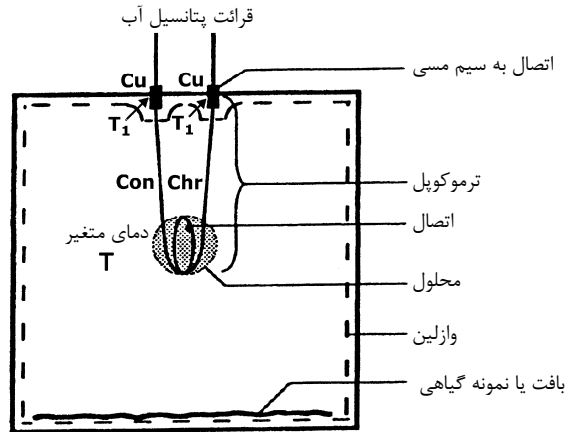
## ۲-۵-۴ روش تعادل بخار

محاسبه پتانسیل آب گیاه در روش تعادل بخار<sup>۱</sup> مشابه روش تعادل مایع است، با این تفاوت که بافت گیاه به جای اینکه مستقیماً در داخل محلول قرار گیرد، با استفاده از توری‌های ویژه‌ای بر روی محلول قرار می‌گیرد. از آنجایی که در این روش بافت گیاه مستقیماً در تماس با محلول قرار نمی‌گیرد، بنابراین، نسبت به روش تعادل مایع دقیق‌تر است.

## ۳-۵-۴ استفاده از ترموکوپل سایکرومتر

در این مورد ترموکوپل سایکرومتر دستگاهی است که یک محفظه کوچک دارد و بافت گیاهی در داخل این محفظه قرار می‌گیرد. پس از چند دقیقه و برقراری تعادل بین بافت و فاز گازی (هوای اتاقک)، رطوبت نسبی فاز گازی اندازه‌گیری شده و سپس از روی این رطوبت نسبی پتانسیل آب، از طریق رابطه ۱۵-۲ (به فصل ۲ رجوع شود)، محاسبه می‌شود (شکل ۱۴-۴). از آنجایی که پتانسیل آب بافت با توجه به رطوبت نسبی فاز

1. Vapor pressure method



شکل ۴-۱۴ استفاده از ترموکوپل سایکرومتر برای اندازه‌گیری پتانسیل آب نمونه گیاهی. پس از برقراری تعادل بین بافت و فاز گازی (هوای اتاقک)، رطوبت نسبی فاز گازی اندازه‌گیری شده و سپس از روی این رطوبت نسبی، پتانسیل آب محاسبه می‌شود (کافی و همکاران، ۱۳۷۸).

گازی محاسبه می‌شود، برقراری کامل تعادل بین بافت و فاز گازی جهت تعیین صحیح پتانسیل آب بافت لازم است. ذکر این نکته ضروری است که ترموکوپل سایکرومتر پتانسیل آب دیواره‌های سلولی (فضای اپوپلاست) را اندازه‌گیری می‌کند، بنابراین، باید پتانسیل آب دیواره‌های سلول مشابه درون سلول (پروتوپلاست) بوده و پتانسیل اندازه‌گیری شده مشابه پتانسیل درون سلول در نظر گرفته شود.

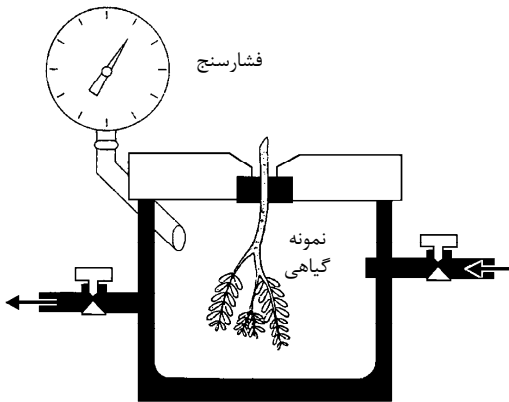
از ترموکوپل سایکرومتر برای اندازه‌گیری پتانسیل اسمزی بافت نیز استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا بافت گیاهی در دمای بسیار کم قرار می‌گیرد تا یخ بزند. سپس برای رسیدن به دمای معمول بافت گرم می‌شود. با یخ‌زدن بافت گیاه ساختار غشای تونوپلاست (غشای واکوئل) و سلول از بین رفته و بافت گیاه تبدیل به یک بخش غیرزنده می‌شود. در چنین حالتی، پتانسیل فشاری بافت مرده برابر صفر شده و پتانسیل آب قرائت شده پس از آب‌شدن و خروج از حالت یخ‌زدگی بافت و اندازه‌گیری آن با استفاده از دستگاه ترموکوپل سایکرومتر معادل پتانسیل اسمزی بافت است. در گیاه، تعیین پتانسیل اسمزی و سایر سنجش‌های مشابه، معمولاً روی آخرین برگ کاملاً توسعه‌یافته انجام می‌گیرد.

لازم به ذکر است که ترموکوپل سایکرومتر دارای انواع مختلفی بوده که در آن‌ها اندازه‌گیری رطوبت نسبی با روش‌های متفاوتی صورت می‌گیرد.

#### ۴-۵-۴ استفاده از محفظه فشاری

دستگاه محفظه فشاری<sup>۱</sup> از یک محفظه توخالی جهت قرارگرفتن نمونه (برگ)، یک واشر جهت نگه‌داشتن دم‌برگ، یک فشارسنج و یک کپسول هوای فشرده تشکیل شده است. برگ در داخل محفظه

1. Pressure chamber



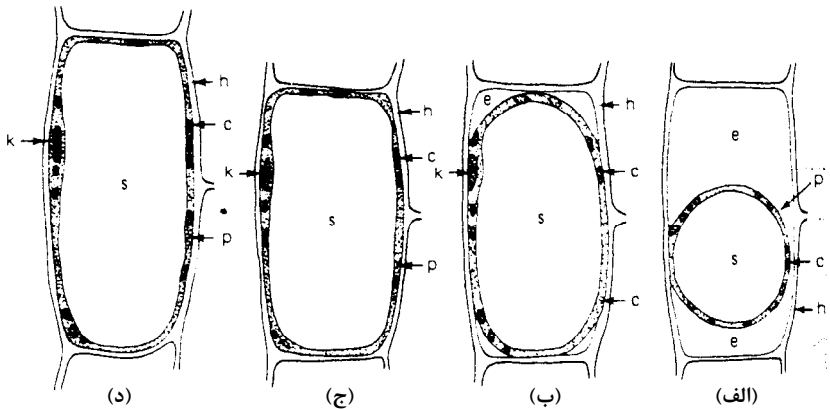
شکل ۴-۱۵ اندازه‌گیری پتانسیل آب نمونه گیاهی با استفاده از دستگاه محفظه فشاری. اگر پتانسیل آب برگ در ناحیه سیم‌پلاستی برابر پتانسیل آب برگ ناحیه اپوپلاستی باشد، مقدار فشار قرائت‌شده برابر پتانسیل آب برگ است (علیزاده، ۱۳۸۳).

و به‌طریقی که دم‌برگ در بیرون محفظه واقع شود، قرار داده می‌شود (شکل ۴-۱۵). با توجه به نوع برگ‌ها و اینکه دارای دم‌برگ و یا بدون دم‌برگ هستند، نوع واشر به‌کارگرفته‌شده در دستگاه متفاوت است. با بازکردن شیر کپسول هوای فشرده، فشار داخل محفظه به‌تدریج افزایش یافته و درست در لحظه‌ای که اولین قطره آب از برگ در حال خارج شدن است، فشار دستگاه قرائت می‌گردد. در صورتی که پتانسیل آب برگ در ناحیه سیم‌پلاستی برابر پتانسیل آب برگ در ناحیه اپوپلاستی باشد، مقدار فشار قرائت‌شده در این لحظه برابر پتانسیل آب برگ است. از آنجایی که در این دستگاه پتانسیل آب سیم‌پلاست از روی پتانسیل آب اپوپلاست تعیین می‌شود، برابر بودن پتانسیل آب سیم‌پلاستی و اپوپلاستی ضروری می‌باشد. لازم به‌ذکر است در صورتی که پتانسیل اسمزی شیره خام آوند چوبی برابر صفر باشد (حدود صفر)، پتانسیل آب به‌دست‌آمده از طریق دستگاه محفظه فشاری برابر پتانسیل فشاری آوند چوبی خواهد بود.

از آنجایی که در طول شب روزنه‌ها بسته بوده و بین پتانسیل آب گیاه و خاک یک تعادل نسبی برقرار می‌شود، با قرائت پتانسیل آب گیاه در صبح و درست قبل از طلوع آفتاب و باز شدن روزنه‌ها (موقع تعادل پتانسیل آب گیاه و خاک) می‌توان پتانسیل آب خاک را از طریق دستگاه محفظه فشاری به‌طور غیرمستقیم محاسبه کرد.

#### ۵-۴-۵ روش پلاسمولیز

در روش پلاسمولیز ابتدا محلول‌های مختلف با پتانسیل‌های اسمزی متفاوت تهیه شده و سپس نمونه‌های بافت گیاهی در داخل این محلول‌ها قرار داده می‌شوند. پس از برقراری تعادل از نظر پتانسیل آب بین نمونه‌های بافت و محلول‌ها، نمونه‌های میکروسکوپی از بافت تهیه شده و در زیر میکروسکوپ مورد بررسی قرار می‌گیرند. پتانسیل آب بافت برابر پتانسیلی از محلول است که در آن، پتانسیل پلاسمولیز شروع شده باشد (شکل ۴-۱۶). در واقع غلظت معینی از محلول سبب شروع



شکل ۱۶-۴ تعیین پتانسیل آب بافت به وسیله روش پلاسمولیز. (الف) سلول گیاهی در محلول ۱۵٪ نیترات پتاسیم با پتانسیل اسمزی ۵- مگاپاسکال؛ (ب) همان سلول در محلول ۶٪ نیترات پتاسیم با پتانسیل اسمزی ۲٫۷- مگاپاسکال؛ (ج) همان سلول در محلول ۴٪ نیترات پتاسیم با پتانسیل اسمزی ۱٫۸- مگاپاسکال؛ و (د) همان سلول بدون قراردادن در نیترات پتاسیم. توجه شود که پتانسیل آب بافت برابر پتانسیلی از محلول است که در آن پتانسیل، پلاسمولیز شروع شده باشد.

پلاسمولیز سلول و جدا شدن پروتوپلاست از دیواره سلولی می‌شود. لازم به ذکر است از آنجایی که در حالت پلاسمولیز، پتانسیل فشاری برابر صفر و یا تقریباً معادل صفر در نظر گرفته می‌شود، بنابراین، پتانسیل آب درون سلول برابر پتانسیل اسمزی است.

#### ۴-۵-۶ روش کریوسکوپی

روش کریوسکوپی (Cryoscopic) یا روش کاهش نقطه انجماد برای تعیین پتانسیل اسمزی بافت گیاه در آزمایشگاه مورد استفاده واقع می‌شود. در این روش ابتدا بافت گیاهی را به یک بافت مرده تبدیل می‌کنند و سپس بافت مرده را در حالی که دما در حال کم شدن است (در بافت مرده گیاهی پتانسیل فشاری مساوی صفر و پتانسیل آب بافت برابر پتانسیل اسمزی است)، در زیر میکروسکوپ مورد بررسی قرار می‌دهند. درست لحظه‌ای که انجماد صورت گرفته و بلورهای یخی در حال تشکیل شدن است، دما یادداشت می‌شود. سپس با استفاده از رابطه ۲۴-۲ (به فصل ۲ رجوع شود) پتانسیل اسمزی بافت تعیین می‌شود.

#### ۴-۵-۷ پتانسیل فشاری در گیاه

به طور معمول در گیاه پتانسیل فشاری اندازه‌گیری نمی‌شود، بلکه پتانسیل آب و پتانسیل اسمزی اندازه‌گیری می‌شوند و پس از محاسبه تفاضل آنها، پتانسیل فشاری به دست می‌آید ( $\psi_w = \psi_s + \psi_p$ ).

## ریشه: نقش، رشد و اندازه گیری

در این فصل می خوانیم:

- ۵-۱ ساختمان و رشد ریشه
- ۵-۲ ناحیه جذب ریشه ها
- ۵-۳ عوامل درونی و بیرونی مؤثر بر رشد ریشه
- ۵-۴ اندازه گیری مشخصات ریشه و سیستم ریشه ای

### مقدمه

رشد مناسب اندام های هوایی گیاه مستلزم داشتن سیستم ریشه ای مناسب و گسترده است. در واقع، رشد ریشه و اندام های هوایی کاملاً به یکدیگر وابسته بوده و در شرایطی که یکی از آنها معیوب باشد، در وظیفه و رشد اندام دیگر نیز مشکل ایجاد خواهد شد. جذب آب و مواد غذایی، استقرار و نگهداری گیاه در خاک، سنتز تعدادی از هورمون های گیاهی مانند جیبرلین و سیتوکنین، انتقال آب و مواد غذایی به اندام های هوایی، ذخیره مواد به خصوص در ریشه های مسن تر و همچنین ریشه های ضخیم دولپه ای ها، احیای عناصر معدنی مانند نیتروژن، فسفر و گوگرد و تکثیر رویشی که ناشی از قابلیت رشد جوانه های نابجای روی آنها می باشد، از مهم ترین وظایف ریشه است (کرامر، ۱۹۹۵). به هر حال، گرچه ریشه دارای نقش های فراوان و مهمی می باشد، ولی در مقایسه با اندام های هوایی، به دلیل در معرض دید نبودن و دشوار تر بودن بررسی آن، مطالعات کمتری روی آن انجام شده است (بوهم، ۱۹۷۹).

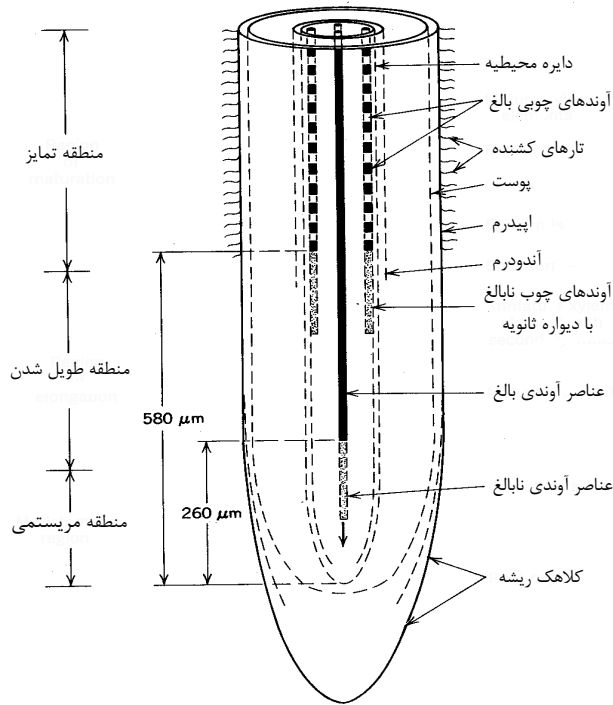
### ۵-۱ ساختمان و رشد ریشه

#### ۵-۱-۱ ساختمان و رشد اولیه ریشه<sup>۱</sup>

در یک ریشه جوان (یا نوک ریشه) که در حال طولیل شدن می باشد، می توان چهار منطقه کلاهیک ریشه<sup>۲</sup>، منطقه مریستمی<sup>۳</sup>، منطقه طولیل شدن سلول ها<sup>۴</sup> و منطقه تمایز سلولی<sup>۵</sup> را مشخص ساخت (شکل ۱-۵)،

1. Primary growth and structure
2. Root cap
3. Meristematic region
4. Region of cell elongation
5. Region of cell differentiating

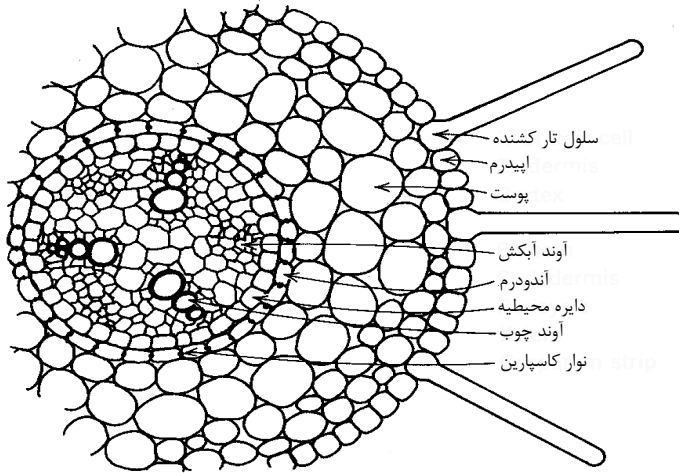




شکل ۱-۵ ساختمان اولیه ریشه در برش طولی. فاصله بین نوک ریشه تا منطقه مریستمی، طول شدن و بلوغ باتوجه به نوع و سرعت رشد ریشه متغیر است. از آنجایی که انواع مختلف سلولها و بافتها در فواصل متفاوتی از نوک ریشه تمایز حاصل می کنند، بنابراین، تعیین مرز دقیق منطقه تمایز سلولها دشوار می باشد (کرامر، ۱۹۹۵).

گرچه مرز دقیق و کاملاً مشخصی بین مناطق مذکور وجود ندارد (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶). کلاهک ریشه از مجموعه ای از سلولها که آزادانه در کنار یکدیگر قرار گرفته اند تشکیل شده و معمولاً از مناطق دیگر کاملاً متمایز است. از آنجایی که ارتباط مستقیمی بین کلاهک ریشه و سیستم آوندی آن وجود ندارند، به نظر می رسد که کلاهک در جذب آب و مواد غذایی نقشی ندارد. به هر حال، در برخی ریشهها مانند ریشه های کوتاه کاج، کلاهک دیده نمی شود (کرامر، ۱۹۹۵).

منطقه مریستمی از تعداد زیادی سلولهای کوچک و کاملاً چسبیده به هم و دارای دیواره نازک تشکیل شده است که بخش عمده این سلولها را سیتوپلاسم تشکیل می دهد. به دلیل وجود مقاومت زیاد در مسیر حرکت آب و املاح از سیتوپلاسم و نداشتن سیستم هادی در منطقه مریستمی، آب و املاح نسبتاً کمی از این منطقه جذب می شود. از آنجایی که آوند آبکش تا منطقه مریستمی تمایز پیدا نکرده و مواد غذایی برای رسیدن به این بخش باید از طریق انتشار از یک لایه ضخیم از سلولها عبور کنند، احتمالاً بر اثر محدودیت تأمین مواد غذایی، رشد در بخش انتهایی این منطقه دچار محدودیت می باشد.



شکل ۲-۵ ساختمان اولیه ریشه دربرش عرضی. تارهای کشنده تعدادی از سلول‌های برآمده لایه اپیدرم یا در بعضی مواقع لایه هیپودرم زیر آن بوده و سبب افزایش قابل توجه سطح تماس ریشه با خاک و کاهش مسافت طی شده یون‌ها و آب برای رسیدن به سطح ریشه می‌شوند (نوبل، ۱۹۹۴).

به‌طور کلی، رشد ریشه ناشی از تقسیم سلولی و افزایش فشار به‌وسیله سلول‌های تازه تشکیل شده است. در نزدیکی نوک ریشه، رشد از طریق تقسیم سلولی انجام می‌شود، ولی در فاصله‌ای کمتر از یک میلی‌متر آن طرف‌تر از نوک ریشه، معمولاً یک منطقه طویل شدن سریع سلول‌ها وجود دارد. پس از این منطقه، منطقه تمایز سلول‌ها واقع شده است. چون انواع مختلف سلول‌ها و بافت‌ها در فواصل متفاوتی از نوک ریشه تمایز حاصل می‌کنند، بنابراین، تعیین مرز دقیق منطقه تمایز سلول‌ها دشوار می‌باشد.

همچنان‌که در قاعده منطقه طویل شدن، طویل شدن سلول‌های تازه طویل شده با دیواره‌های نازک سلولی متوقف می‌شود، تمایز آن‌ها به اپیدرم<sup>۱</sup>، پوست<sup>۲</sup> و استوانه مرکزی<sup>۳</sup> آغاز می‌شود که ساختمان اولیه یک ریشه را تشکیل می‌دهند. ساختمان اولیه یک ریشه دولپه‌ای در شکل‌های ۱-۵ و ۲-۵ نشان داده شده است.

### اپیدرم و تارهای کشنده

لایه ریشه‌های مویی یا تارهای کشنده<sup>۴</sup>، لایه چوب‌پنبه و پارانشیم پوستی در پوست ریشه و به‌ترتیب از خارج به‌داخل قرار گرفته‌اند. از آنجایی که اپیدرم و تارهای کشنده در تماس مستقیم با خاک هستند، بنابراین، به‌عنوان سطوحی که آب و مواد غذایی از طریق آن‌ها وارد ریشه می‌شوند، حائز اهمیت هستند.

1. Epidermis
2. Cortex
3. Stele
4. Root hairs

اپیدرم از یک ردیف سلول‌ها با دیواره نسبتاً نازک تشکیل شده است. تارهای کشنده تعدادی از سلول‌های برآمده لایه اپیدرم یا در بعضی مواقع لایه هیپودرم (hypodermis) زیر آن بوده و سبب افزایش قابل توجه سطح تماس ریشه با خاک و کاهش مسافت طی شده یون‌ها و آب برای رسیدن به سطح ریشه می‌شوند. لازم به ذکر است هیپودرم یک لایه سلولی فشرده بوده که بلافاصله در زیر لایه سلولی فشرده اپیدرم قرار گرفته است (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

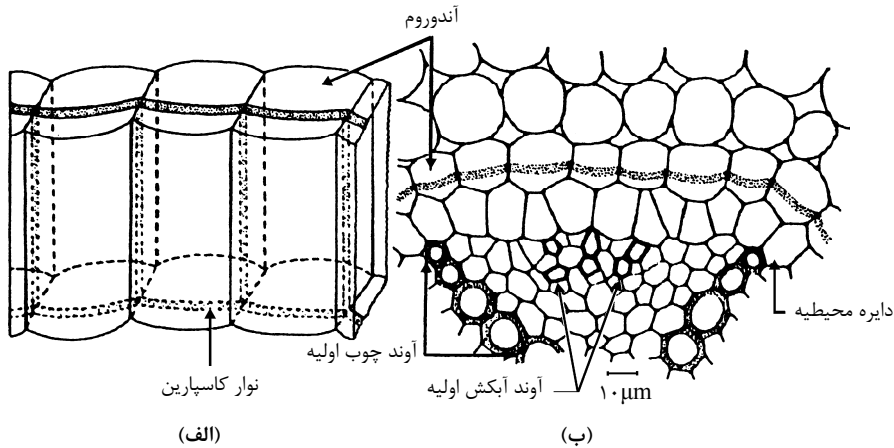
تعداد تارهای کشنده باتوجه به گونه گیاهی و شرایط خاک متغیر است، ولی به‌طور کلی بیشترین فراوانی آن‌ها در خاک‌های لومی مرطوب، خوب زهکشی شده و دارای تهویه مناسب مشاهده می‌شود. تعداد تارهای کشنده گزارش شده از ۲۰ تا ۵۰۰ عدد در سانتی‌متر مربع سطح ریشه در ریشه‌های بعضی از درختان و تا ۲۵۰۰ عدد در سانتی‌متر مربع سطح ریشه در ریشه‌های چاودار زمستانه متغیر است. میزان اهمیت و نقش نسبی تارهای کشنده در جذب آب و مواد غذایی باتوجه به شرایط خاک و گونه گیاهی متفاوت است. سلول‌های اپیدرمی و تارهای کشنده در محل تماس خود با هوا به‌وسیله یک لایه نازک کوتینی (cutin) پوشیده شده‌اند. تشکیل تارهای کشنده در شرایط خاک‌های سنگین و نفوذناپذیر، کمبود شدید رطوبت، تهویه نامناسب و کمبود اکسیژن و وجود مایکوریزای اکتوتروفیک (که سبب افزایش جذب آب و مواد غذایی به‌وسیله ریشه‌ها می‌شود) محدود می‌شود. پس از افتادن ریشه‌های مویی، لایه سلول‌هایی که در زیر آن قرار گرفته است چوب‌پنبه‌ای شده و لایه چوب‌پنبه نامیده می‌شود. البته تا زمانی که تارهای کشنده وجود دارند، این لایه چوب‌پنبه‌ای تشکیل نمی‌شود.

### پارانشیم پوستی

پارانشیم پوستی شامل چند لایه نامنظم سلول است که دیواره نازک دارد و ذخیره مواد (برای ریشه‌هایی که عمل ذخیره مواد را انجام می‌دهند) در آن‌ها انجام می‌شود. سلول‌های بخش داخلی‌تر پارانشیم پوستی منظم‌تر هستند. آخرین لایه سلول‌های پارانشیم پوستی، از سلول‌هایی مکعبی شکل تشکیل شده و آندودرم (endodermis) نامیده می‌شوند. این سلول‌ها از چهار سمت چوب‌پنبه‌ای شده و تنها دو سمتی که هر سلول را با سلول‌های خارج و داخل مرتبط می‌سازد، چوب‌پنبه‌ای نمی‌شود. در همین دو سمت منافذ<sup>۱</sup> زیادی وجود دارد که پروتوپلاسم سلول‌های آندودرم را به سلول‌های مجاور متصل می‌کنند و باعث تسهیل انتقال آب و مواد غذایی می‌شوند. نوار چوب‌پنبه‌ای شده سلول‌های آندودرم، نوار کاسپارین<sup>۲</sup> نام دارد و در برابر حرکت آب و مواد غذایی نفوذناپذیر است (شکل ۳-۵). در بسیاری از انواع ریشه‌ها، به‌ویژه ریشه‌های گیاهان خانواده گندمیان، لایه آندودرم توسط تعداد زیادی از شاخه‌های فرعی ریشه سوراخ شده و مسیرهایی برای نفوذ آب تشکیل می‌شود (کرامر، ۱۹۹۵).

1. Pits

2. Casparian strip



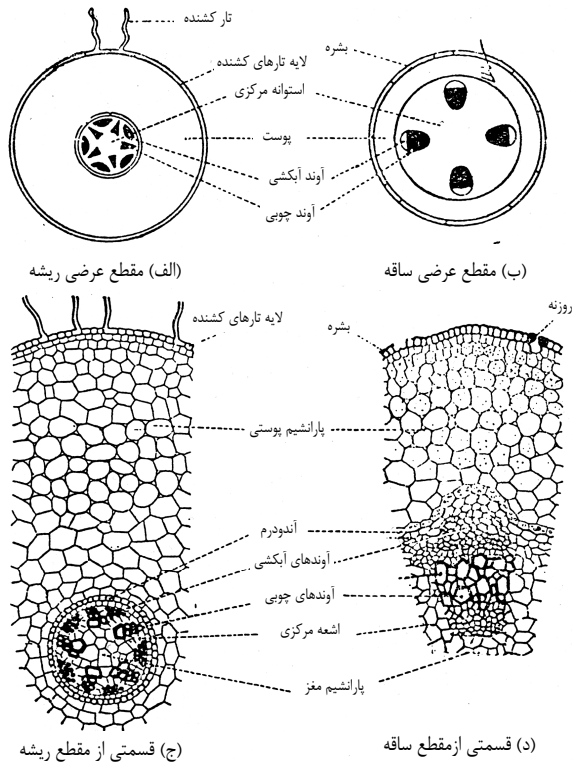
شکل ۳-۵ برش عرضی ریشه که در آن، لایه آندودرم و نوار کاسپارین به وضوح نشان داده شده‌اند. (الف) موقعیت آندودرم در دیواره‌های سلولی؛ (ب) برش عرضی ریشه و موقعیت آندودرم، دایره محیطیه و عناصر آوندی چوب و آبکش (کرامر، ۱۹۹۵).

### استوانه مرکزی

استوانه مرکزی از دایره محیطیه<sup>۱</sup>، دسته‌های آوندی چوب<sup>۲</sup> و آبکش<sup>۳</sup> و پارانشیم داخلی تشکیل شده است. دایره محیطیه یا لایه ریشه‌زا از یک ردیف سلول ساخته شده، که به‌طور منظم پهلوی هم قرار داشته و هر سلول آن در مقابل دو سلول آندودرم قرار گرفته است. از آنجایی که ریشه‌های فرعی به‌وسیله دایره محیطیه به‌وجود می‌آیند، به دایره محیطیه، لایه ریشه‌زا نیز می‌گویند. دسته‌های آوند چوب و آبکش ریشه جدا از هم بوده و به‌طور متناوب قرار گرفته‌اند. هر دسته آوند چوبی در مقطع عرضی به مثالی شبیه است، که قاعده آن متوجه مرکز و رأس آن به‌طرف آندودرم می‌باشد. در این دسته‌های آوندی، آوندهای بزرگتر در داخل و آوندهای کوچکتر در خارج قرار گرفته‌اند.

تعداد دسته‌های آوند چوب در هر گیاهی ثابت است و به‌عنوان مثال در سیر دو، در نخود فرنگی سه و در لوبیا چهار دسته می‌باشد. شکل مقطع هر دسته آوند آبکش شبیه یک بیضی بوده و تعداد دسته‌های آن مساوی تعداد دسته‌های آوند چوب است. همچنین، قسمت مرکزی استوانه مرکزی را پارانشیم داخلی پرکرده است که بخشی از آن به‌نام مغز ریشه در وسط و بخش‌هایی به‌نام اشعه مغزی در میان دسته‌های آوند چوب و آبکش قرار گرفته‌اند (شکل ۴-۵).

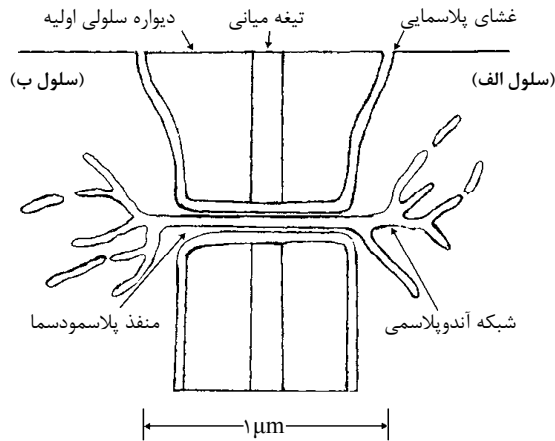
1. Pericycle
2. Xylem
3. Phloem



شکل ۴-۵ ساختمان نخستین ریشه و ساقه. قسمت مرکزی استوانه مرکزی را پارانشیم داخلی پرکرده است که بخشی از آن به نام مغز ریشه در وسط و بخش‌هایی به نام اشعه مغزی در میان دسته‌های آوند چوب و آبکش قرار گرفته‌اند.

## ۲-۱-۵ ساختمان و رشد ثانویه ریشه<sup>۱</sup>

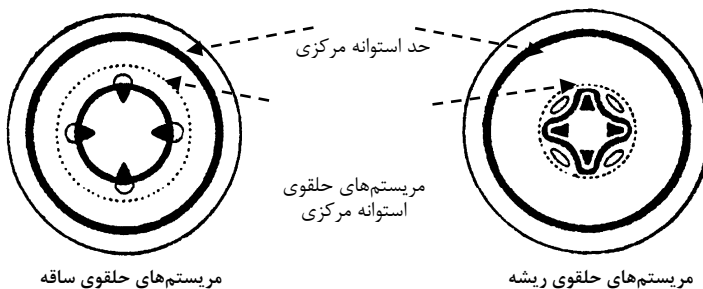
در تعدادی از گیاهان مثل تک‌لپه‌ای‌ها، نهان‌زادان آوندی و معدودی از دولپه‌ای‌ها ساختمان اولیه ریشه و ساقه به همان شکل اولیه و بدون تغییر باقی می‌ماند. در این گیاهان فقط دیواره سلول‌های پارانشیمی ریشه و ساقه چوب‌پنبه‌ای شده و به آن‌ها مقاومت بیشتری می‌دهد. در سایر گیاهان دولپه و بازدانگان، به‌علت پیدایش مریستم‌های حلقوی در دو بخش پوست و استوانه مرکزی و فعالیت این مریستم‌ها، بافت‌های جدید به وجود آمده و سبب ایجاد نمو قطری ریشه می‌شود. با ایجاد بافت‌های جدید ساختمان نخستین ریشه به‌طور کامل تغییر کرده (شکل‌های ۴-۵ و ۶-۵) و ساختمان ثانویه یا پسین ریشه و ساقه به وجود می‌آید (کرامر، ۱۹۹۵). نمو قطری ریشه که در اثر رشد ثانویه آن ایجاد می‌شود نتیجه فعالیت دو مریستم حلقوی است. مریستم چوب آبکش که در استوانه مرکزی بین آوندهای چوب و آبکش ظاهر می‌شود و مریستم پوست که در پوست ریشه به وجود می‌آید، با همدیگر سبب رشد ثانویه و ایجاد نمو قطری ریشه می‌شوند (شکل ۷-۵).



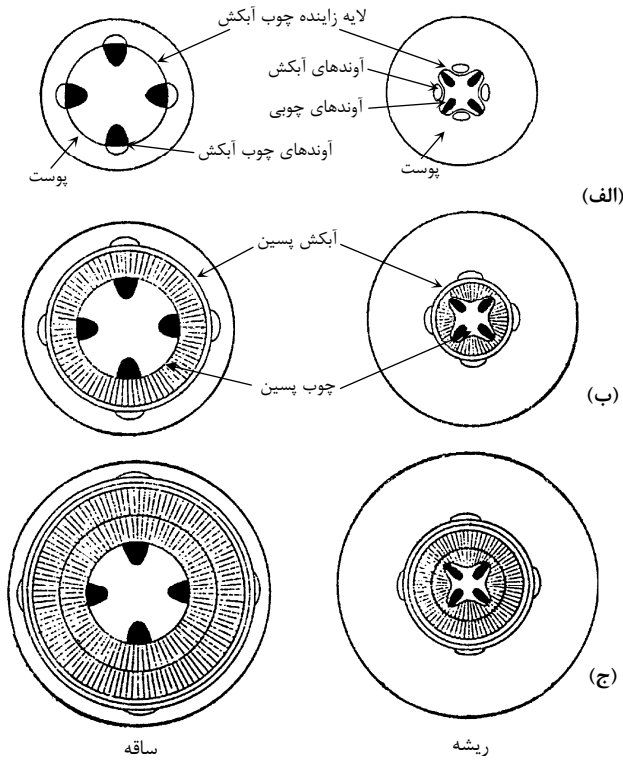
شکل ۵-۵ برش طولی دو سلول ریشه که نشان‌دهنده یک منفذ پلاسمودسما است، که پروتوپلاسم دو سلول مجاور را به هم وصل می‌کند. مشاهده می‌شود که دیواره‌های سلولی اولیه در محل این منفذ نازکتر هستند (نوبل، ۱۹۹۴).

### مریستم چوب آبکش

سلول‌های مریستمی در آغاز کوچک و جدا از هم هستند و سپس به تدریج به هم پیوسته شده و به صورت لایه‌ای پیچ‌وخم‌دار بین دسته‌های چوب و آبکش قرار می‌گیرند. قرارگرفتن سلول‌های مریستمی بین دسته‌های چوب و آبکش طوری است که آوندهای آبکش درخارج و آوندهای چوب در داخل آن‌ها دیده می‌شوند. سلول‌هایی که توسط این مریستم تولید و به‌خارج حلقه مریستمی رانده می‌شوند به تدریج به بافت آبکش ثانویه و سلول‌هایی که به‌داخل رانده می‌شوند به تدریج به بافت چوبی ثانویه تبدیل می‌شوند. گرچه حلقه مریستمی استوانه مرکزی در آغاز به‌شکل دایره کامل نیست، ولی رفته‌رفته به صورت دایره کامل درمی‌آید.



شکل ۵-۶ مریستم‌های حلقوی ریشه و ساقه. نمو قطری ریشه و ساقه که در اثر رشد ثانویه آن ایجاد می‌شود نتیجه فعالیت دو مریستم حلقوی است.



شکل ۷-۵ رشد اولیه و ثانویه ریشه و ساقه. مریستم چوب آبکش که در استوانه مرکزی بین آوندهای چوب و آبکش ظاهر می‌شود و مریستم پوست که در پوست ریشه به وجود می‌آید، با همدیگر سبب رشد ثانویه و نمو قطری ریشه می‌شوند.

در کنار آوندهای چوبی، بیشتر سلول‌هایی که از تقسیم سلول‌های زاینده به وجود آمده و به داخل مریستم حلقوی رانده می‌شوند، به سلول‌های اسکلرانشیمی و فیبرهای چوبی تبدیل شده و سبب استحکام آوندها می‌شوند.

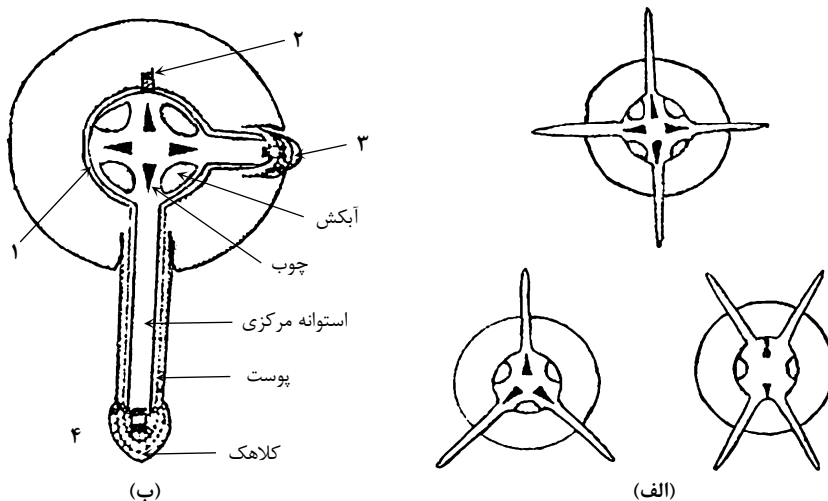
### مریستم پوست

مریستم پوست یا مریستم چوب پنبه فلودرم به صورت حلقه‌ای در پارانشیم پوست ظاهر می‌شود. این لایه از خارج چوب پنبه و از داخل پارانشیم پوستی یا فلودرم را می‌سازد. طبقه چوب پنبه‌ای، که بر اثر فعالیت این لایه در ریشه ایجاد می‌شود، بافت محافظ ریشه را تشکیل می‌دهد. هر لایه از مریستم پوست پس از مدتی فعالیت کردن از کار افتاده و لایه دیگری از این مریستم به جای آن، در قسمت عمیق‌تر به وجود می‌آید.

### ۳-۱-۵ تشکیل ریشه‌های فرعی<sup>۱</sup>

ریشه‌های فرعی از ناحیه بالای تارهای کشنده یا ریشه‌های مویی تولید می‌شوند. تولید ریشه‌های فرعی به این شکل است که در سلول‌های دایره محیطیه مقابل آوندهای چوب، سه سلول به وجود می‌آید. این سلول‌ها که دارای سیتوپلاسم متراکم‌تری نسبت به سلول‌های دیگر هستند، سلول‌های اصلی مولد ریشه

1. Lateral root formation



شکل ۸-۵ الف) سه نوع رویش ریشه‌های فرعی؛ ب) چهار مرحله از رویش ریشه‌های فرعی.

فرعی هستند. از این سه سلول، سلول داخلی‌تر استوانه مرکزی ریشه فرعی، سلول وسطی پوست ریشه فرعی و سلول خارجی کلاهک ریشه فرعی را می‌سازد (شکل ۸-۵). مریستمی که از تقسیمات مکرر سلول‌های اصلی نتیجه می‌شود، توده‌ای سلولی را به وجود می‌آورد که آندودرم را پاره کرده و از آن عبور می‌کند. در واقع، این توده سلولی ضمن ترشح آنزیم، همه بافت‌های پوست را تجزیه کرده و از آن خارج می‌شود. در نهایت، ضمن به وجود آمدن بافت‌های جدید در ریشه‌های فرعی، آوندهای آن‌ها با آوندهای ریشه اصلی ارتباط حاصل می‌کنند.

تعداد ریشه‌های فرعی عموماً متناسب با تعداد دسته‌های چوب آبکش ریشه اصلی است. به عنوان مثال، در لوبیا، که دارای چهار دسته چوب آبکش می‌باشد، چهار ردیف ریشه فرعی نیز به وجود می‌آید. البته اگر گیاهی تنها دارای دو دسته آوند چوب آبکش باشد، تعداد ردیف‌های ریشه‌های فرعی آن مضاعف می‌گردد. این مسئله در مورد ریشه‌های فرعی چغندر قند صادق بوده و دارای چهار ردیف ریشه فرعی است. لازم به ذکر است که در نهان‌زادان آوندی ریشه‌های فرعی همیشه از آندودرم به وجود می‌آیند.

#### ۴-۱-۵ انقباض ریشه<sup>۱</sup>

یکی از جنبه‌های رشد ریشه که به ندرت از آن یاد می‌شود، انقباض ریشه است که در برخی از گونه‌های گیاهی مشاهده می‌شود. در این پدیده، شکل سلول‌های پوست ریشه تغییر می‌کند. این سلول‌ها از طول منقبض شده و در عرض اتساع می‌یابند که در نتیجه ریشه کوتاه‌تر و کلفت‌تر می‌شود. در طی انقباض ریشه معمولاً بافت‌های آوندی به مقدار قابل ملاحظه‌ای تخریب می‌شوند. همچنین، اندام‌های هوایی گیاه

1. Root Contraction



به سطح زمین نزدیکتر شده و در گیاهان پیازدار<sup>۱</sup>، پیازها در عمق بیشتری از خاک قرار می‌گیرند. پدیده انقباض ریشه در تعدادی از گیاهان پیازدار و در گیاهانی که تشکیل روزت (rosette) می‌دهند، وجود دارد (کرامر، ۱۹۹۵).

## ۲-۵ ناحیه جذب ریشه‌ها<sup>۲</sup>

باتوجه به اینکه ریشه عمدتاً به‌عنوان اندام جذب‌کننده آب و موادمعدنی موردتوجه است، بنابراین، تعیین مساحت فعال ریشه جهت جذب یا ورود آب و موادمعدنی مهم می‌باشد. آشکاراست که آب از مناطقی که مقاومت کمتری را دربرابر حرکت آن ایجاد می‌کنند، با سرعت بیشتری وارد ریشه می‌شود. مکان قرارگرفتن این مناطق با مقاومت کمتر، بسته به گونه، سن و سرعت رشد و در برخی موارد مقدار کششی که در داخل سیستم هادی توسعه می‌یابد، متغیر است (کرامر، ۱۹۹۵).

### ۱-۲-۵ ریشه‌های جوان

به‌طورکلی، گرچه بخش‌های مسن‌تر ریشه نیز در جذب آب و موادمعدنی نقش دارند، ولی جذب آب و موادمعدنی عمدتاً توسط نوک ریشه‌ها و تارهای کشنده انجام می‌شود. به‌عبارت دیگر، با درنظرگرفتن ساختمان و آناتومی ریشه‌های اولیه می‌توان اظهار داشت که جذب آب و موادمعدنی عمدتاً در چند سانتی‌متر بعد از نوک ریشه، یعنی تقریباً معادل با منطقه وجود ریشه‌های مویی، انجام می‌گیرد. از آنجایی که در منطقه مریستمی، به‌واسطه وجود پروتوپلاسم متراکم، مقاومت دربرابر حرکت آب بالا بوده و همچنین آوندهای چوبی برای انتقال آب وجود ندارد، آب کمی از طریق منطقه مریستمی وارد ریشه می‌شود. از طرفی، گرچه در فواصل خیلی دورتر از نوک ریشه، آوندهای چوب فعال وجود دارد، ولی چوب‌پنبه‌ای<sup>۳</sup> و لیگنینه‌شدن<sup>۴</sup> هیپودرم و به‌ویژه اپیدرم، به‌مقدار زیادی ورود آب و موادمعدنی از این منطقه را کاهش می‌دهد. نفوذپذیری دیواره‌های سلولی این دو لایه به‌مقدار قابل‌توجهی متغیر است و به‌میزان چوب‌پنبه‌ای‌شدن آن‌ها بستگی دارد.

به‌هرحال، درمورد این مسئله که قسمت عمده جذب آب در چند سانتی‌متری نوک ریشه‌ها انجام می‌شود، مطالعاتی با استفاده از پتومتر (potometer) صورت گرفته است. در ریشه‌های ذرت با طول بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر، جذب آب در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از رأس ریشه حداکثر بوده و با حرکت به‌طرف قاعده از مقدار جذب کاسته شده است. در ریشه‌های ۷ سانتی‌متری پیاز حداکثر جذب به‌فاصله ۶-۴ سانتی‌متر از رأس ریشه‌ها بوده و با حرکت به‌طرف رأس یا قاعده از مقدار جذب کاسته شده است. در باقلا حداکثر جذب در ریشه‌های ۱۰ سانتی‌متری آن از منطقه‌ای انجام شده است که بین ۱/۵ تا ۸

1. Bulbous
2. The absorbing zone of roots
3. Suberization
4. Lignification

جدول ۱-۵ اثر حذف ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌نشده بر جذب آب و فسفر<sup>۳۲</sup> (P) توسط گیاهچه‌های کاج<sup>۱</sup> (کرامر، ۱۹۹۵).

سیستم هرس	کل سطح ریشه (سانتی‌مترمربع)	سرعت جذب آب (سانتی‌متربرثانیه)	سرعت جذب فسفر <sup>۳۲</sup> cpm بر سانتی‌مترمربع در ثانیه
سیستم ریشه هرس نشده (کامل)	۱۴۷٫۳	۴۶۹	۳۳۳
هرس بخشی از ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌نشده	۱۱۲ (٪۲۴)	۴۲۸ (٪۹)	۲۳۹ (٪۲۸)
هرس کلیه ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌نشده	۸۶ (٪۴۲)	۳۶۱ (٪۲۳)	۱۷۸ (٪۴۷)

۱. اعداد داخل پرانتز درصد کاهش نسبت به حالت عدم‌هرس ریشه را نشان می‌دهند.

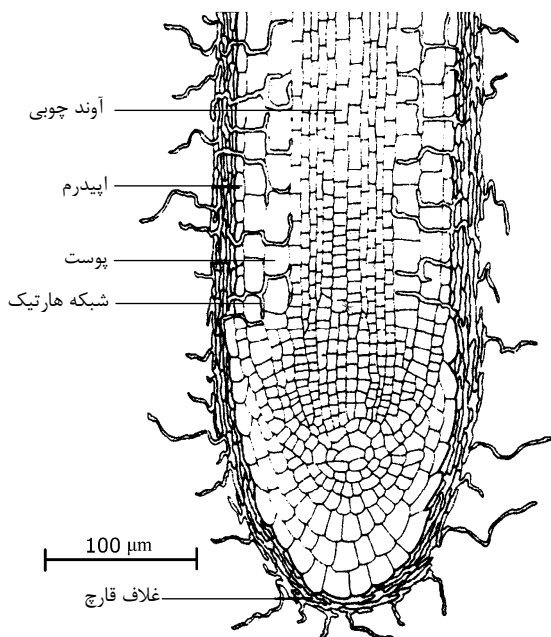
سانتی‌متر از رأس ریشه قرار داشته است. همچنین، مشخص شده است که با افزایش تعرق یعنی افزایش نیاز به جذب آب، نه‌تنها بر وسعت منطقه جذب افزوده شده است، بلکه منطقه حداکثر جذب به طرف قاعده ریشه حرکت می‌کند. احتمالاً وجود عناصر آوندی کاملاً توسعه‌یافته در این منطقه، که توانایی جذب آب و موادغذایی بالایی را دارند، در این مسئله نقش دارد.

## ۲-۲-۵ ریشه‌های مسن‌تر

باتوجه به اینکه اکثر مباحث مربوط به جذب آب و عناصرغذایی درباره ریشه‌های جوان بوده است، این تصور را ایجاد کرده که ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌شده مسن‌تر به‌عنوان سطوح جذب‌کننده آب و موادغذایی عمل نمی‌کنند. به‌نظر می‌رسد که این تصور در بسیاری از موارد اشتباه است. در بسیاری از گیاهان چندساله که ریشه‌های آن‌ها رشد ثانویه را طی کرده و با لایه‌هایی از بافت چوب‌پنبه‌ای پوشیده شده‌اند، احتمالاً بخش بزرگی از جذب آب و مواد محلول از طریق همین ریشه‌ها انجام می‌شود. همچنین، در شرایطی که خاک سرد یا خشک بوده و یا محلول خاک خیلی غلیظ یا شور می‌باشد، تعداد ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌نشده اندک یا هیچ است. در انواع گونه‌های کاج که در هوای خشک یا سرد رشد می‌کنند، در مرکبات در طی زمستان و همچنین در سبب در اواسط تابستان تعداد ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌نشده کم می‌باشد، درحالی‌که جذب املاح و آب ادامه دارد. بنابراین، در این شرایط نیز ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌شده و مسن‌تر نقش مهمی در جذب آب و عناصرغذایی دارند.

در درختان با وجود اینکه ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌نشده در مقایسه با ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌شده، نفوذپذیری بیشتری نسبت به آب و املاح دارند، ولی از آنجایی‌که این ریشه‌ها درصد بسیار کوچکی از سطح ریشه را تشکیل می‌دهند، نمی‌توان جذب تمام آب و املاح در درختان را به‌حساب ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌نشده گذاشت. در جدول ۱-۵ اثر حذف ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌نشده بر جذب آب و فسفر<sup>۳۲</sup> (P) توسط گیاهچه‌های کاج نشان داده شده است.

ملاحظه می‌شود که حذف ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌نشده از جذب آب و مواد معدنی جلوگیری نمی‌کند. به‌نظر می‌رسد در بسیاری از گیاهان چندساله سطح ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای‌نشده بسیار محدود



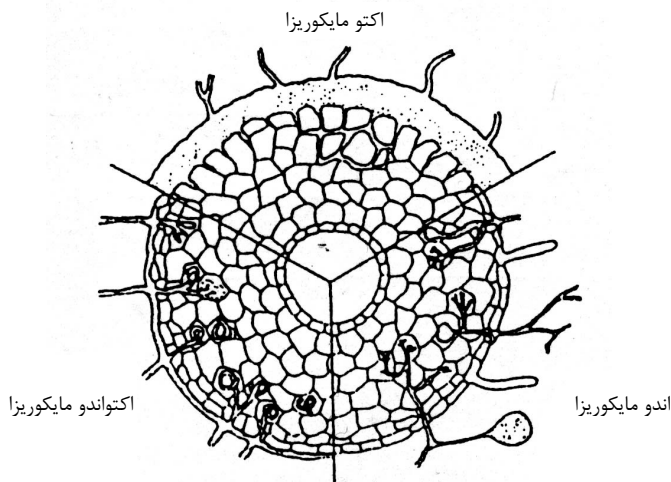
شکل ۹-۵ ریشه‌ای که به قارچ میکوریزای اکتوتروف آلوده شده است. در ریشه‌های آلوده، هیف‌های قارچ، ریشه را احاطه کرده و غلاف فشرده‌ای از هیف تولید می‌کنند. برخی از هیف‌ها نیز به داخل فضای بین سلول‌های پوست نفوذ کرده و شبکه هارتيک را ایجاد می‌کنند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

است و فقط حجم بسیار کوچکی از خاک را اشغال می‌کنند. بنابراین، در این گیاهان، ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای نشده نمی‌توانند کل آب و عناصر معدنی مورد نیاز گیاه را جذب کنند.

### ۳-۲-۵ نقش میکوریزا

تحت بعضی از شرایط، سیستم‌های ریشه‌ای و سطوح جذب‌کننده اکثر درختان و گیاهان علفی توسط قارچ‌ها مورد هجوم قرار گرفته و یک رابطه همزیستی بین گیاه و قارچ ایجاد می‌کند که به میکوریزا (Mycorrhizae) معروف است. این نوع همزیستی یکی از شناخته‌شده‌ترین و درعین حال گسترده‌ترین و مهم‌ترین رابطه همزیستی موجود در کره زمین است. قارچ‌های میکوریزا ترکیبات کربنی مورد نیاز خود را از گیاه میزبان دریافت کرده و در مقابل به جذب مواد غذایی توسط گیاه کمک می‌کنند (شکل ۹-۵). به‌طور کلی، دو نوع اصلی قارچ میکوریزا وجود دارد که شامل اکتومایکوریزا (Ectomycorrhizae) و اندومایکوریزا (Endomycorrhizae) هستند. همچنین، حالت مرکب این دو نیز دیده می‌شود، که اکتواندومایکوریزا (Ectoendomycorrhizae) نامیده می‌شود (شکل ۱۰-۵) (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

اکتومایکوریزا شامل یک شبکه قارچی بوده، که ریشه‌ها و فضای بین سلولی چند لایه اول پوست ریشه را دربرمی‌گیرند. در واقع، هیف‌های قارچ اکتومایکوریزا درون پوست ریشه و در فضای بین سلولی

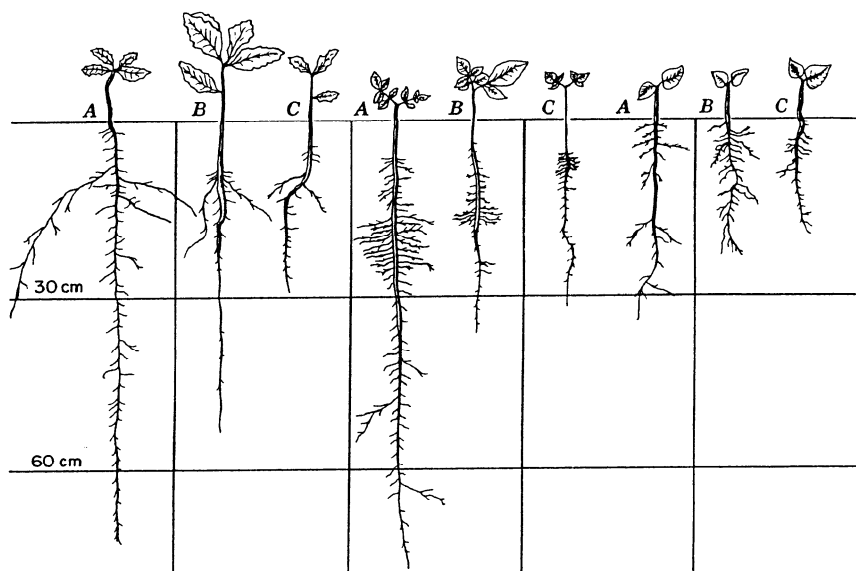


شکل ۱۰-۵ انواع مایکوریزا. اکتومایکوریزا شامل یک شبکه قارچی در سطح ریشه بوده و به مقدار محدودی به فضاهای بین سلولی نفوذ می‌کند. اندومایکوریزا رشته‌های قارچی در خاک اطراف پراکنده کرده و تولید اسپورهای بزرگ می‌کند. اکتواندومایکوریزا به فضاهای درون سلول‌های ریشه نفوذ می‌کند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

گسترده شده و بخش عمده‌ای از ریشه‌های مویین گیاه توسط غلاف قارچ پوشیده می‌شود. از غلاف قارچ موجود در سطح ریشه هیف‌های قارچ در خاک اطراف پراکنده می‌شوند و مساحت ناحیه جذب ریشه را افزایش می‌دهند. گیاهان میزبان در این نوع همزیستی انواع گونه‌های درختی، درختچه‌ای و گاهی گیاهان علفی هستند.

اندومایکوریزا عبارت از یک شبکه قارچی در خاک و داخل پوست ریشه است. برخلاف اکتومایکوریزا که هیف‌های آن در فضای بین سلول‌های ریشه فعالیت می‌کنند، در اندومایکوریزا هیف‌ها وارد فضای داخلی سلول‌های ریشه می‌شوند. اندومایکوریزا در بسیاری از گیاهان زراعی مانند گندم، ذرت، پنبه، بقولات و علف‌های چمنی مشاهده می‌شود. سرعت و میزان آلودگی این گیاهان به مایکوریزا تحت تأثیر عوامل مختلف خاک قرار دارد. pH نسبتاً اسیدی و دمای ۲۰ تا ۲۵ °C شرایط مطلوب برای آلودگی به این قارچ هستند. در گیاهانی که دچار کمبود نیتروژن هستند، میزان آلودگی کاهش می‌یابد.

مایکوریزا به‌ویژه نوع اندومایکوریزا در بهبود جذب عناصر غذایی کم‌تحرک توسط ریشه اکثر گیاهان زراعی بسیار مؤثر بوده و در واقع عمده‌ترین نقش آن‌ها بهبود جذب فسفر در خاک‌های دارای فسفر کم می‌باشد. ارتباط مایکوریزا - گیاه بر اثر حاصلخیزی کم یا متوسط خاک تشدید می‌شود که احتمالاً به دلیل نقش بیشتر مایکوریزا در بهبود روابط آب و جذب آب و مواد غذایی تحت این شرایط است. از طرفی، معمولاً در خاک‌های بسیار حاصلخیز و به‌خصوص در خاک‌هایی که مقدار نیتروژن و فسفر آن‌ها زیاد



شکل ۱۱-۵ اثر متقابل وراثت و محیط بر مقدار رشد ریشه سه گونه درختی در سه محیط متفاوت. (چپ) *Quercus rubra*، (وسط) *Hicoria ovata* و (راست) *Tilia Americana*. کشت در مرتع (A)، کشت در جنگل (B) و کشت در شرایط سایه کامل یک جنگل مرطوب (C) (کرامر، ۱۹۹۵).

است، استقرار مایکوریزا کاهش می‌یابد. ملاحظه شده است که گیاهان آلوده به مایکوریزا بعد از تنش کمبود آب سریع‌تر بهبود می‌یابند، که احتمالاً به علت مقاومت کمتر ریشه‌های آلوده در انتقال آب می‌باشد. در مقایسه با جذب فسفر، نقش مایکوریزا در جذب آب و نیتروژن دارای اهمیت کمتری است. لازم به ذکر است که با افزایش زیاد تراکم ریشه‌ها در خاک نقش مایکوریزا در کمک به جذب آب و مواد غذایی کاهش می‌یابد. این مسئله به علت رقابت ایجاد شده بین تارهای کشنده ریشه و هیف‌های قارچ در جذب مواد غذایی از ناحیه مشخصی از خاک است.

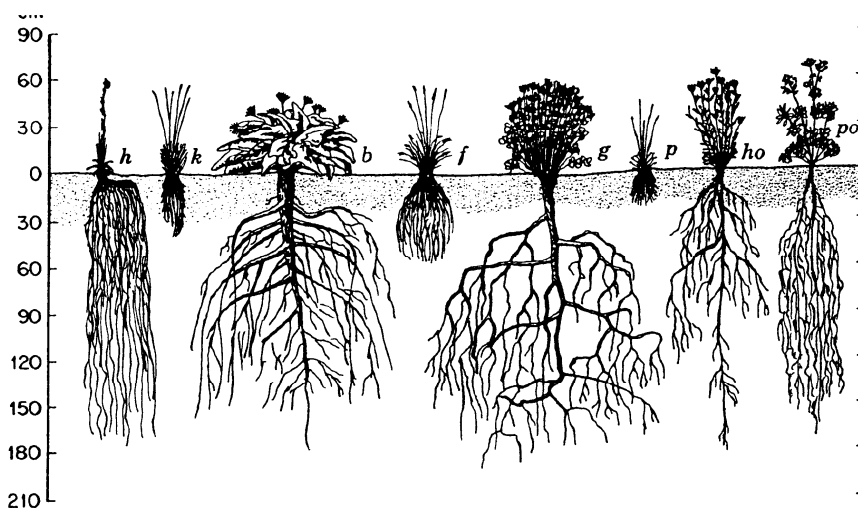
### ۳-۵ عوامل مؤثر بر رشد ریشه

#### ۱-۳-۵ عوامل درونی مؤثر بر رشد ریشه

##### خصوصیات ارثی<sup>۱</sup>

به‌طور کلی، نوع و نحوه رشد سیستم ریشه‌ای گیاه توسط خصوصیات ارثی و در واقع ژنوتیپ تعیین می‌شود، ولی می‌تواند توسط عوامل محیطی تغییر پیدا کند (کرامر، ۱۹۹۵). نمونه‌ای از اثر متقابل وراثت و عوامل محیطی بر نمو ریشه در شکل ۱۱-۵ نشان داده شده است. اهمیت عوامل ارثی در کنترل نمو

1. Hereditary characteristics



شکل ۱۲-۵ اختلافات در پراکنش و عمق سیستم ریشه گونه‌های مختلف گیاهی در یک خاک عمیق با تهویه مناسب (کرامر، ۱۹۹۵).

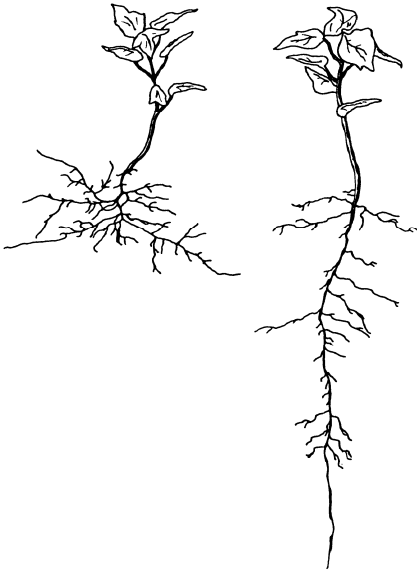
h: *Hieracium scouleri*    k: *Koeleria eristata*    b: *Balsamina sagittata*  
 f: *Festuca ovina ingrata*    g: *Geranium viscosissimum*    p: *Poa sandbergii*  
 ho: *Hoorebekia racemosa*    po: *Potentilla blaschkeana*

ریشه وقتی مشخص می‌شود که تعدادی از گونه‌های مختلف، در یک خاک معین، با هم کشت می‌شوند (شکل ۱۲-۵). بعضی از گونه‌ها دارای سیستم ریشه‌راست<sup>۱</sup> و برخی دیگر دارای سیستم ریشه‌افشان<sup>۲</sup> هستند. همچنین، برخی از گونه‌ها دارای ریشه عمیق و برخی دیگر دارای ریشه کم‌عمق هستند. از طرفی، گونه‌هایی وجود دارند که در خاک‌هایی با شرایط مختلف دارای سیستم ریشه متفاوتی هستند (شکل ۱۳-۵). نکته قابل توجه این است که اختلافات ارثی رشد ریشه می‌تواند بر اختلافات مقاومت به خشکی گیاهان مؤثر باشد. به‌عنوان مثال، دلیل اصلی مقاومت زیاد سورگوم به خشکی، ناشی از سیستم ریشه گسترده و پرانشعاب آن می‌باشد (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

### رابطه ریشه با اندام‌های هوایی

ریشه‌ها برای تأمین کربوهیدرات، تعدادی از مواد تنظیم‌کننده رشد و ترکیبات آلی مثل تیامین (Thiamin) و نیاسین (Niacin) به اندام‌های هوایی یا اندام‌های هوایی گیاه وابسته هستند. از طرفی، اندام‌های هوایی نیز برای تأمین آب، مواد معدنی و تعدادی از مواد تنظیم‌کننده رشد مورد نیاز خود به ریشه‌ها وابسته است. بنابراین، رشد موفقیت‌آمیز گیاه به حفظ یک موازنه متعادل در رشد و کارکرد بین اندام‌های هوایی و ریشه بستگی دارد. به‌عنوان مثال، هیچ‌کدام از این دو اندام، نباید از نظر تأمین مواد ضروری برای اندام

1. Tap root system  
 2. Fibrous root system



شکل ۱۳-۵ تأثیر شرایط خاک بر رشد ریشه گیاه *Acer rubrum*. (سمت راست) گیاهچه در خاکی با زهکشی مناسب. (سمت چپ) گیاهچه در شرایط خاک مرداب (کرامر، ۱۹۹۵).

دیگر دچار مشکل و کمبود جدی شوند. نسبت ریشه به اندام‌های هوایی به‌طور وسیعی بین گونه‌ها و باتوجه به سن و شرایط محیطی متغیر است (کرامر، ۱۹۹۵).

### اثر اندام‌های هوایی بر ریشه

چون رشد ریشه به عرضه کربوهیدرات از اندام‌های هوایی وابسته است، سایه‌اندازی و کاهش سطح برگ معمولاً باعث کاهش رشد ریشه می‌شود. چرای بیش‌ازحد مراتع و قطع مکرر مزارع علوفه‌ای می‌تواند باعث کاهش شدید وزن خشک ریشه شود. سایه‌اندازی معمولاً هم اندازه مطلق ریشه و هم نسبت ریشه به اندام‌های هوایی را کاهش می‌دهد، ولی استثناهایی هم در این ارتباط وجود دارد. رشد و توسعه میوه و دانه به‌دلیل مصرف زیاد کربوهیدرات‌ها، اغلب می‌تواند سبب کاهش قابلیت دسترسی این مواد برای ریشه شده و در نتیجه سبب کاهش رشد ریشه شود.

گزارش شده است در صورتی‌که در پنبه از تشکیل غوزه و شاخه‌زنی جلوگیری شود، وزن خشک ریشه و نسبت ریشه به اندام‌های هوایی می‌تواند تا چندبرابر افزایش یابد. مشاهده شده است که تشکیل خوشه سبب کاهش رشد ریشه ذرت می‌گردد و با حذف خوشه‌ها رشد ریشه تا زمانی‌که سرمای آخر فصل رشد را کاملاً متوقف کند، ادامه می‌یابد. در درخت کیوی، قسمت اعظم رشد ریشه زمانی صورت می‌گیرد که رشد میوه و اندام‌های هوایی تقریباً کامل شده است. این مسئله نشان می‌دهد که میوه‌های کیوی نسبت به ریشه‌های آن مقاصد فتوسنتزی<sup>۱</sup> قوی‌تری برای مواد فتوسنتزی تولیدشده توسط گیاه

1.Sink

هستند. همچنین، در این گیاه، کاهش اندک برگ‌ها سبب گردید تا رشد ریشه بیشتر از میوه کاهش یابد. در یک مطالعه دیگر، ظهور گل‌ها در خیار باعث توقف رشد ریشه شد. در این آزمایش، رشد ریشه قبل از آنکه میوه‌ها به‌قدر کافی بزرگ شده و بتوانند برای دریافت مواد پرورده با ریشه رقابت کنند، متوقف گردید. این مسئله نشان می‌دهد که توقف رشد ریشه صرفاً بر اثر رقابت برای دریافت مواد فتوسنتزی نیست و عوامل دیگری مانند کنترل هورمونی نیز می‌توانند در این مسئله مؤثر باشند (کرامر، ۱۹۹۵).

### اثر ریشه بر اندام‌های هوایی

با وجود اینکه برخی از اثرات ریشه بر اندام‌های هوایی، مثل نقش ریشه در جذب و نگهداری گیاه کاملاً روشن است، ولی برخی از اثرات دیگر آن کمتر مشهود هستند. تعجب‌آور نیست که آسیب به سیستم ریشه، به‌طوری‌که سبب کاهش جذب آب و مواد معدنی شود، می‌تواند باعث کاهش یا توقف رشد اندام‌های هوایی گردد. اما، نکته جالب توجه این است که مقدار عناصر معدنی در برگ‌های پرتقال و همچنین کیفیت میوه آن تحت تأثیر پایه می‌باشد که اندام‌های هوایی روی آن پیوند شده است (کرامر، ۱۹۹۵). در این ارتباط موارد مشابه دیگری نیز ملاحظه شده است، که دلایل آن دست‌کم در برخی موارد کاملاً روشن نیست (پاسیورا، ۲۰۰۲).

## ۲-۳-۵ عوامل بیرونی مؤثر بر رشد ریشه

### خصوصیات فیزیکی خاک

بافت خاک بر رشد ریشه مؤثر است. به‌عنوان مثال، خاک‌های شنی از ظرفیت ذخیره آب محدودی برخوردارند، در صورتی‌که خاک‌های رسی دارای مقادیر بیشتری آب قابل دسترس هستند، گرچه اغلب رشد ریشه در خاک‌های رسی بر اثر کمبود تهویه و مقاومت فیزیکی زیاد در برابر نفوذ ریشه، محدود می‌شود. از آنجایی‌که ذرات رس بسیار ریز هستند، با افزایش مقدار رس خاک میانگین اندازه منافذ خاک کاهش می‌یابد. این مسئله سبب می‌شود تا منافذ بیشتری از آب پر شده و تهویه خاک دچار اشکال شود.

در خاک‌های رسی و با بافت سنگین، ریشه‌ها معمولاً قادر نیستند به‌داخل منافذی که قطر آن‌ها کمتر از قطر خود ریشه است نفوذ کنند. حداقل قطر لازم منافذ خاک برای رشد ریشه‌ها حدود ۶۰ میکرومتر بوده، که معادل قطر ظریف‌ترین ریشه‌ها است. به‌هرحال، برای رشد مناسب ریشه، وجود درصد کوچکی از منافذ بزرگ کافی بوده و ریشه‌های مویی و میسلیم قارچ‌های مایکوریزا می‌توانند منافذ ریزتر را اشغال کنند.

ساختمان خاک نیز بر رشد ریشه اثر دارد. فشردگی خاک از مواردی است که در نتیجه آن ساختمان خاک دچار مشکل شده و رشد ریشه محدود می‌گردد. بالا بودن وزن مخصوص ظاهری خاک نشان‌دهنده فشردگی خاک است. حرکت ماشین‌آلات کشاورزی باعث افزایش فشردگی در مزرعه می‌شود. بر اثر فشردگی خاک، ظرفیت ذخیره‌سازی آب قابل دسترس و تهویه خاک کاهش یافته و در نتیجه رشد ریشه دچار مشکل می‌شود (کرامر، ۱۹۹۵).



## کمبود آب خاک

با وجود اینکه با افزایش تنش خشکی رشد ریشه کاهش می‌یابد، ولی به دلیل اینکه رشد ریشه کمتر از رشد اندام‌های هوایی تحت تأثیر کمبود آب واقع می‌شود، تنش خشکی سبب می‌شود تا نسبت اندام‌های هوایی به ریشه کاهش یابد. در شرایطی که آبیاری به‌طور مکرر و به مقدار کم انجام می‌شود، فقط بخش کوچکی از منطقه بالقوه ریشه‌دهی مرطوب شده و در نتیجه نفوذ ریشه محدود می‌گردد. این مسئله سبب می‌شود که گیاه به دوره‌های خشکی در مراحل بعدی رشد، بسیار حساس شود (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

## تهویه خاک

معمولاً به لحاظ ترکیب، اتمسفر ریشه‌ها با هوا کاملاً متفاوت است. غلظت اکسیژن در خاک بسیار کمتر از هوا و غلظت دی‌اکسیدکربن بسیار بیشتر است. نیتروژن گازی خنثی بوده و غلظت آن بر رشد ریشه‌ها تأثیر چندانی ندارد، در حالی که غلظت اکسیژن و دی‌اکسیدکربن بر رشد ریشه‌ها مؤثر می‌باشد. اکسیژن برای فرایندهای متابولیکی ریشه لازم است و کمبود آن باعث اختلالات متابولیکی مثل اختلال در تنفس و کاهش رشد ریشه می‌شود. کمبود اکسیژن در شرایط غرقابی و یا سنگین بودن خاک حادث می‌شود و می‌تواند سبب پژمردگی، اپی‌ناستی (تشکیل ناقص برگ و یا تشکیل برگ به شکل غیرطبیعی) و زردشدن برگ‌ها شود.

بعضی گونه‌ها مثل برنج، اکسیژن را از طریق اندام‌های هوایی به ریشه منتقل کرده و به همین علت نسبت به شرایط غرقابی مقاوم هستند. در این گیاه، انتقال اکسیژن از طریق مجاری مخصوصی، که از ساقه به ریشه امتداد داشته و آئرنشیم (Aerenchyma) نامیده می‌شود، صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که برخی از گونه‌های بیماری‌زا در خاک‌های دارای تهویه ضعیف، به خوبی گسترش یافته و خسارت زیادی به گیاه وارد می‌سازند.

## دمای خاک

دمای مطلوب برای رشد طبیعی ریشه‌ها بسته به گونه گیاهی متفاوت بوده و میزان آن معمولاً کمتر از اندام‌های هوایی است. تأثیر دما بر رشد ریشه بیشتر از اثر دما بر رشد اندام‌های هوایی است. به‌طور کلی، دماهای بالا و پایین که در شرایط طبیعی رخ می‌دهند، می‌توانند سبب محدودیت رشد ریشه شوند. انجماد و ذوب شدن خاک سطحی و آب موجود در آن، یکی از عوامل صدمه به ریشه‌ها بوده و می‌تواند در گیاهانی مثل یونجه و غلات زمستانی باعث قطع ارتباط اندام‌های هوایی با ریشه‌ها شود.

## حاصلخیزی، شوری و pH خاک

ریشه مثل اندام‌های هوایی، به املاح معدنی برای رشد مطلوب نیاز دارد. به علت نزدیکی ریشه‌ها به منبع آب و مواد غذایی، ریشه‌ها اولین فرصت را برای استفاده از آب و عناصر غذایی دارند، در حالی که در مورد استفاده از مواد فتوسنتزی تشکیل شده در اندام‌های هوایی، آخرین شانس را دارند. به همین دلیل

تأثیر کمبود آب و مواد معدنی روی رشد ریشه کمتر از اندام‌های هوایی است، مگر اینکه این کاهش مستقیماً روی فتوسنتز اثر بگذارد (مثل کمبود آهن که سبب کاهش کلروفیل می‌شود). کوددهی برای بروز خصوصیات ذاتی ریشه مناسب و گاهی لازم است. کلسیم و بُر اثرات مستقیمی بر رشد ریشه داشته و برای رشد ریشه ضروری هستند.

گرچه وفور برخی از عناصر غذایی به‌ویژه فسفر و نیتروژن می‌تواند باعث تحریک رشد ریشه شود، ولی به‌دلیل اینکه رشد اندام‌های هوایی بیشتر از رشد ریشه تحریک می‌شود، بنابراین، در خاک‌های حاصلخیز معمولاً نسبت ریشه به اندام‌های هوایی کمتر از خاک‌های ضعیف‌تر می‌باشد. به‌هرحال، اطلاعات کافی از اثرات تک‌تک عناصر بر رشد ریشه در دست نیست، ولی مشخص شده است که کمبود بُر و کلسیم باعث کوتاه‌شدن انشعابات ریشه و مرگ نوک ریشه‌ها می‌شود. احتمالاً عدم توانایی نفوذ ریشه در بعضی از خاک‌ها، بیشتر مربوط به کمبود عناصر غذایی است، تا اینکه به‌دلیل مقاومت مکانیکی یا کمبود تهویه خاک باشد. به‌نظر می‌رسد پتاسیم در طول‌شدن و منشعب‌شدن ریشه اثر مستقیمی نداشته باشد، ولی وجود آن برای برخی اعمال فیزیولوژیکی ریشه لازم است. نقصان پتاسیم ممکن است باعث تضعیف سیستم انتقال مواد و کاهش نفوذپذیری سلول‌ها شود.

از طرفی غلظت زیاد املاح خاک رشد ریشه را کند یا متوقف ساخته و بلوغ آنرا تسریع می‌کند، که در نتیجه ریشه‌ها چوب‌پنبه‌ای می‌شوند. به‌هرحال، از نظر میزان تحمل ریشه‌ها نسبت به شوری خاک و آب آبیاری، اختلافات بین‌گونه‌ای و درون‌گونه‌ای زیادی وجود دارد، که می‌توان از این اختلافات در برنامه‌های به‌نژادی استفاده کرد و ژن‌های مقاومت را به گیاهان موردنظر منتقل نمود.

pH خاک در دامنه وسیعی، اثر مستقیم اندکی بر رشد ریشه دارد و فقط وقتی اهمیت می‌یابد که باعث غیرقابل دسترس شدن تعدادی از عناصر غذایی می‌شود. pH‌های بالا و پایین از طریق کاهش حلالیت تعدادی از عناصر و یا افزایش حلالیت برخی از عناصر تاحد مقادیر سمی می‌توانند برای گیاه مشکل‌ساز شوند. به‌عنوان مثال، pH بالا می‌تواند سبب کمبود آهن و منگنز قابل دسترس برای ریشه‌ها شود. همچنین، pH پایین می‌تواند از طریق افزایش حلالیت آلومینیوم این عنصر را تاحد مقادیر سمی در دسترس ریشه‌ها قرار دهد. به‌طور کلی، در صورت مهیا بودن عناصر غذایی، گیاهان قادرند تا در pH بین ۴ تا ۹ به‌خوبی رشد کنند.

## رقابت

افزایش تراکم بوته، باعث تشدید رقابت و کاهش رشد ریشه تک‌بوته می‌شود. برای مثال، ملاحظه شده است که سیستم ریشه جو و گندم در شرایط عدم رقابت می‌تواند تا ۱۰۰ برابر بزرگتر از حالتی باشد که این گیاهان در ردیف‌های ۱۵ سانتی‌متری کشت می‌شوند. ثابت شده است که ریشه علف‌های هرز از طریق مصرف و در نتیجه کاهش اکسیژن خاک و افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، رشد ریشه درختان را کاهش می‌دهند. اثرات منفی یک گیاه بر گیاه دیگر می‌تواند ناشی از تخلیه آب یا عناصر غذایی مخصوصاً

نیترژن توسط گیاه اول، آزاد کردن ترکیبات سمی از ریشه یا برگ‌ها و تولید ترکیبات سمی از تجزیه بقایای گیاه اول و اثر آن بر گیاه دوم باشد. در مواردی که کاهش رشد ناشی از ترکیبات سمی یک گیاه بر گیاه دیگر باشد، به آن آللوپاتی (allelopathy) می‌گویند (کرامر، ۱۹۹۵).

#### ۴-۵ اندازه‌گیری مشخصات ریشه و سیستم ریشه‌ای

در این قسمت به بررسی روش‌های متداول نمونه‌برداری ریشه، شستشوی ریشه‌ها از خاک و سنجش پارامترهای رشد ریشه پرداخته می‌شود (بوهم، ۱۹۷۹).

##### ۱-۴-۵ نمونه‌برداری

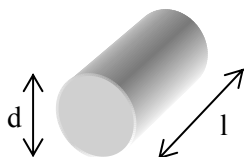
متداول‌ترین روش‌های تهیه نمونه ریشه برای مطالعه در کشاورزی، تهیه نمونه از مزرعه یا باغ با استفاده از آگر (Auger) و یا تهیه نمونه از گیاهانی که تحت تیمارهای مختلف و در شرایط گلدان پرورش یافته‌اند، می‌باشد. استفاده از آگر یکی از بهترین روش‌ها است که در آن، برداشت کل سیستم ریشه و تهیه نمونه کامل ریشه در فرم طبیعی و دست‌نخورده منظور نمی‌باشد (تننت، ۱۹۷۵). متداول‌ترین نوع آگر مورد استفاده دارای لوله سیلندری به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر و با قطر داخلی ۷ سانتی‌متر است. دسته این آگر حدود ۱۰۰ سانتی‌متر طول دارد و به فواصل ۱۰ سانتی‌متری علامت خورده است.

برای تهیه نمونه، آگر به داخل خاک فشار داده شده تا به عمق مورد نظر برسد. برای مطالعه پارامترهای مورد نظر در عمق‌های مختلف خاک، نمونه‌های آگر برای عمق‌های مختلف و با فواصل ۱۰ سانتی‌متری برداشته می‌شوند. تعداد نمونه‌های مورد نیاز از محیط طبیعی یا کرت‌های مزرعه به هدف مطالعه، نوع مطالعه و حجم کار بستگی دارد. حداقل تعداد نمونه در مورد گیاهان ردیفی دو نمونه است، که یک نمونه از روی ردیف و دیگری از بین یا وسط ردیف‌ها برداشته می‌شود. در مواردی که گیاه در داخل گلدان رشد داده می‌شود، هر گلدان خود می‌تواند یک نمونه باشد.

##### ۲-۴-۵ شستشوی ریشه از خاک

به‌طور کلی، مطالعه ریشه‌ها کار وقت‌گیر و پرهزینه بوده و این امکان وجود دارد که در بعضی مواقع مدتی طول بکشد تا نمونه‌ها به مرحله شستشو برسند. در مواقعی که امکان شستشوی فوری همه نمونه‌ها نیست، باید این نمونه‌ها به‌گونه‌ای نگهداری شوند. در صورتی که نمونه‌ها در آب به‌صورت غرق‌شده باشند، می‌توان آن‌ها را به‌همان صورت به مدت ۲ تا ۵ روز در دمای ۱۵ تا ۲۵ °C نگهداری کرد. در چنین شرایطی در رابطه با گیاهان گلدانی، باید بخش هوایی گیاه از بین برده شود (بوهم، ۱۹۷۹).

در صورتی که هدف نگهداری نمونه‌ها به مدت چند هفته باشد، باید به‌شکلی که غلظت الکل کمتر از ۱۰٪ نباشد، اتانول یا الکل دیگری به سوسپانسیون خاک-ریشه- آب اضافه شود. هرچه دمای محیط



شکل ۱۴-۵ ریشه را می‌توان به صورت یک استوانه در نظر گرفت که دارای طول  $l$  و قطر  $d$  می‌باشد (از مؤلف).

نگهداری بیشتر باشد، باید از غلظت الکل بالاتری استفاده شود. البته برای این منظور از مواد دیگری نیز استفاده می‌شود. قبل از شستشوی نمونه‌ها و جهت جدا شدن بهتر خاک از ریشه‌ها، معمولاً نمونه‌ها را یک شب در آب می‌خوابانند. معمولاً برای تسهیل جداسازی ریشه‌ها از خاک، به خصوص خاک‌های ریزبافت، مواد شیمیایی نیز به کار می‌رود.

مواد شیمیایی متداول جهت این منظور پیروفسفات‌ها (pyrophosphates) مانند پیروفسفات سدیم به صورت محلول ۲۷/۰ درصد و کلرید سدیم می‌باشند. ساده‌ترین روش شستشو استفاده از دست می‌باشد. در این روش آب روی نمونه خاک حاوی ریشه اسپری شده و خاک ریشه به آرامی با دست نرمش داده می‌شود. این عمل روی الک‌هایی با اندازه سوراخ‌های ۰/۲ تا ۲ میلی‌متر مربع صورت می‌گیرد. هرچه ظرافت ریشه‌ها بیشتر باشد، از الک‌هایی با اندازه سوراخ کوچکتری استفاده می‌شود، ولی متداول‌ترین الک مورد استفاده دارای سوراخ‌های ۰/۵ میلی‌متر مربعی است. لازم به ذکر است که برای شستشوی مکانیکی ریشه‌ها ادواتی ابداع و تهیه شده‌اند (بوهم، ۱۹۷۹).

### ۳-۴-۵ سنجش پارامترهای ریشه

وزن تر و خشک، سطح، حجم، قطر و طول ریشه مهم‌ترین پارامترهای ریشه هستند که در این قسمت به آن‌ها می‌پردازیم. البته قبل از پرداختن به روش اندازه‌گیری باید به این نکته توجه کرد که ریشه را می‌توان به صورت یک استوانه در نظر گرفت که دارای طول  $l$ ، قطر  $d$ ، شعاع  $r$ ، سطح  $A_r$  و حجم  $V_r$  می‌باشد (شکل ۱۴-۵). با توجه به روابطی که بین این متغیرها وجود دارد، می‌توان تعدادی را اندازه‌گیری و

جدول ۲-۵ نحوه به دست آوردن پارامترهای ریشه در آزمایشگاه.

پارامتر	حالت الف	حالت ب
طول ریشه	اندازه‌گیری	اندازه‌گیری
حجم ریشه	اندازه‌گیری	$\pi r^2 l$
سطح ریشه*		$2 \pi r l$
قطر ریشه	$2 \sqrt{\frac{V_r}{\pi l}}$	$\frac{A_r}{2 \pi l} \times 2$

\* سطح کل ریشه، نه سطح بیش آمده.

تعدادی را با معادله برآورد کرد (جدول ۲-۵).

### سطح ریشه

سطح ریشه را می‌توان مثل سطح برگ با استفاده از دستگاه پلانی متر اندازه‌گیری کرد (کوستا، ۲۰۰۰). در این رابطه باید توجه داشت که ریشه‌ها چروکیده و خشک نشوند و باید مثل حالت طبیعی آب جذب کرده و متورم باشند. همچنین، اگر ریشه‌ها شفاف باشند، باید قبل از سنجش با یک ماده رنگی، تیره شوند تا دستگاه قادر به قرائت و دیدن آن‌ها باشد. در موقع سنجش باید دقت شود که ریشه‌ها روی هم نیفتاده باشند. لازم به ذکر است که قرائت دستگاه پلانی متر سطح حقیقی ریشه نبوده، بلکه سطح پیش‌آمده<sup>۱</sup> ریشه است. برای تعیین کل سطح ریشه و در واقع سطح حقیقی آن، سطح به دست آمده به وسیله پلانی متر در  $\pi$  (۳/۱۴) ضرب می‌شود.

### حجم ریشه

برای این منظور می‌توان از استوانه مدرج استفاده کرد. ریشه‌های آب جذب کرده و متورم در آب ریخته شده و با اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی آب در استوانه، حجم ریشه به دست می‌آید (بوهم، ۱۹۷۹).

### قطر ریشه

قطر ریشه از روی نمونه‌های تازه شسته شده و متورم و با استفاده از میکروسکوپ مجهز به میکرومتر اندازه‌گیری می‌شود. لازم به ذکر است در صورتی که ریشه‌ها بزرگتر باشند، می‌توان به کمک ذره‌بین و ابزار معمولی تر نیز سنجش قطر ریشه را انجام داد (بوهم، ۱۹۷۹).

### طول ریشه

طول ریشه را می‌توان با روش نیومن (۱۹۶۶) که توسط تننت (۱۹۷۵) ساده شده است، تخمین زد. روش کار بدین ترتیب است که تعداد برخوردهای ریشه‌ها با یک سری خطوط عمودی و افقی شمارش شده و سپس با کمک تعداد برخوردها، طول ریشه تخمین زده می‌شود. بدین منظور از یک ظرف شیشه‌ای که زیر آن یک کاغذ شطرنجی با ابعاد مختلف قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. برای پخش بهتر ریشه در داخل ظرف، داخل آن مقداری آب ریخته شده و ریشه‌ها داخل آب پراکنده می‌شوند. ابعاد متداول کاغذ شطرنجی ۱×۱، ۲×۲ و ۵×۵ سانتی‌متر می‌باشد، که به ترتیب برای سنجش طول‌های ۱، ۵ و بیشتر از ۵ متر استفاده می‌شوند. پس از پخش یکنواخت ریشه‌ها در داخل ظرف، تعداد برخوردها با خطوط عمودی و افقی شمارش و یادداشت می‌شود (N). سپس طول ریشه (L) با توجه به ابعاد کاغذ شطرنجی و استفاده از روابط ۱-۵، ۲-۵ و ۳-۵ به دست می‌آید.

$$l = 0,786 N$$

$$\text{ابعاد کاغذ } 1 \times 1$$

$$(5-1)$$

۵. ریشه: نقش، رشد و اندازه‌گیری ۱۰۵

$$l = 1,570 \text{ N} \quad \text{ابعاد کاغذ } 2 \times 2 \quad (5-2)$$

$$l = 3,930 \text{ N} \quad \text{ابعاد کاغذ } 5 \times 5 \quad (5-3)$$

لازم به ذکر است که در محاسبه طول ریشه باید سعی شود که تعداد  $N$  شمارش شده در هر نوبت بیشتر از ۴۰۰ و کمتر از ۵۰ عدد نباشد. نکته آخر اینکه طول ریشه را اغلب برای واحد حجم خاک بیان می‌کنند و واحد آن سانتی‌متر طول ریشه بر سانتی‌متر مکعب خاک می‌باشد. این پارامتر تراکم طول ریشه<sup>۱</sup> بوده و با  $L_v$  نشان داده می‌شود.

# آب در خاک

در این فصل می‌خوانیم:

۶-۱ ویژگی‌های مهم خاک در رابطه با آب

۶-۲ نگهداری آب در خاک

۶-۳ حرکت آب در خاک

## مقدمه

در مبحث رابطه آب خاک و گیاه، خاک به‌عنوان محیط رشد ریشه و ذخیره آب، منبع عناصر غذایی و استقرار و نگهداری گیاه مورد توجه می‌باشد. در مقابل، خاک همچنین دارای محدودیت‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی برای رشد ریشه بوده و می‌تواند بر نفوذ و رشد ریشه و جذب مواد غذایی توسط آن تأثیر منفی بگذارد. در این فصل، ابتدا مفاهیم و تعاریف اساسی مربوط به خاک و آب خاک که با گیاه در ارتباط هستند، تعریف شده و سپس نگهداری و حرکت آب در خاک به‌اختصار مورد بحث قرار می‌گیرد.

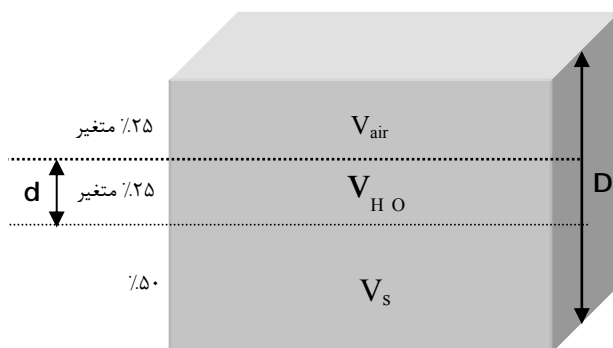
## ۶-۱ ویژگی‌های مهم خاک در رابطه با آب

به‌طور کلی، خاک از سه قسمت جامد، مایع و گاز تشکیل شده است (شکل ۱-۶). مقدار و نسبت هر کدام از این سه جزء در خاک‌های مختلف متفاوت بوده و سبب ایجاد خصوصیات مختلفی برای خاک‌های گوناگون می‌گردد. برای درک بهتر روابط آب و خاک، شناخت این خصوصیات ضروری است. مهم‌ترین خصوصیات و پارامترهای خاک عبارت‌اند از:

### ۶-۱-۱ وزن مخصوص ظاهری<sup>۱</sup> خاک

وزن مخصوص ظاهری خاک ( $\rho_p$ ) عبارت‌است از نسبت وزن ذرات جامد خاک به حجم کل خاک (رابطه ۱-۶). معمولاً خاک‌های شنی و دارای خلل و فرج کمتر به دلیل دارا بودن نسبت ذرات جامد بیشتر، دارای وزن مخصوص ظاهری بیشتری هستند. وزن مخصوص ظاهری خاک‌های زراعی بین ۱/۱ تا ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. برای رشد مناسب گیاه باید وزن مخصوص ظاهری در خاک‌های شنی کمتر از ۱/۶ و در خاک‌های رسی کمتر از ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد.

1. Bulk density



شکل ۱-۶ بیان رطوبت خاک. خاک از سه جزء جامد، مایع و گاز تشکیل شده است که معمولاً به ترتیب ۵۰، ۲۵ و ۲۵ درصد حجم خاک را اشغال می‌کنند. در این شکل، \$D\$ عمق خاک و \$d\$ ضخامت هرکدام از اجزای خاک می‌باشد (از مؤلف).

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_a + V_w + V_s} \text{ g cm}^{-3} \quad (6-1)$$

در اینجا، \$\rho\_b\$ وزن مخصوص ظاهری و \$V\_s, V\_w, V\_a\$ به ترتیب حجم ذرات جامد، آب و هوای خاک هستند.

### ۶-۱-۲ وزن مخصوص حقیقی<sup>۱</sup> خاک

وزن مخصوص حقیقی خاک (\$\rho\_p\$) عبارت از نسبت وزن ذرات جامد خاک به حجم ذرات جامد است (رابطه ۲-۶). به طور معمول وزن مخصوص حقیقی خاک‌های زراعی حدود ۲٫۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.

$$\rho_p = \frac{m_s}{V_s} \text{ g cm}^{-3} \quad (6-2)$$

در این رابطه \$\rho\_p\$ وزن مخصوص حقیقی خاک و \$m\_s\$ و \$V\_s\$ به ترتیب وزن و حجم ذرات جامد خاک هستند.

### ۶-۱-۳ تخلخل<sup>۲</sup> خاک

تخلخل خاک (\$E\_p\$) عبارت است از نسبتی از حجم کل خاک که توسط آب و هوا اشغال شده است (رابطه ۳-۶). معمولاً خاک‌های رسی و دارای بافت ریز نسبت به خاک‌های شنی و دارای بافت درشت، درصد تخلخل بیشتری دارند. مقدار تخلخل خاک از ۳۵٪ در خاک‌های فشرده تا ۶۵٪ در خاک‌های باتخلخل زیاد متغیر است.

$$E_p = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_p}\right) \times 100 = \frac{V_a + V_w}{V_T} \times 100 \quad (6-3)$$

1. Particle density  
2. Porosity



در این رابطه،  $E_p$  درصد تخلخل خاک،  $\rho_p$  و  $\rho_b$  به ترتیب وزن مخصوص ظاهری و حقیقی خاک و  $V_a$ ،  $V_w$  و  $V_T$  به ترتیب حجم هوا، آب و کل خاک هستند. مقدار  $V_T$  از رابطه ۴-۶ به دست می آید:

$$V_T = V_a + V_w + V_s \quad (۴-۶)$$

#### ۴-۱-۶ درصد جرمی رطوبت خاک

درصد جرمی رطوبت خاک عبارت است از نسبت جرم رطوبت خاک به جرم ذرات جامد خاک (رابطه ۵-۶).

$$P_m = \frac{m_w}{m_s} \times 100 = \theta_m \times 100 \quad (۵-۶)$$

در این رابطه  $P_m$  درصد جرمی رطوبت خاک،  $m_w$  جرم رطوبت خاک،  $m_s$  جرم ذرات جامد خاک و  $\theta_m$  نسبت جرمی رطوبت خاک است.

#### ۵-۱-۶ درصد حجمی رطوبت خاک

درصد حجمی رطوبت خاک عبارت از نسبت حجمی رطوبت خاک به حجم کل خاک می باشد (رابطه ۶-۶):

$$P_v = \theta_v \times 100 = \frac{V_w}{V_a + V_w + V_s} \times 100 = \frac{V_w}{V_T} \times 100 = \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_b} \times 100 = \frac{m_w}{V_T} \times 100 \quad (۶-۶)$$

در این رابطه  $P_v$  درصد حجمی رطوبت خاک،  $\theta_v$  نسبت حجمی رطوبت خاک،  $\rho_b$  وزن مخصوص ظاهری خاک،  $V_a$ ،  $V_w$ ،  $V_s$  و  $V_T$  به ترتیب حجم هوا، آب، ذرات جامد و کل خاک،  $m_w$  جرم رطوبت خاک،  $\rho_{H_2O}$  چگالی آب و  $m_s$  جرم ذرات جامد خاک است. درصد حجمی رطوبت خاک و عمق آب از روابط ۷-۶ و ۸-۶ نیز به دست می آیند.

$$P_v = P_m \rho_b \quad (۷-۶)$$

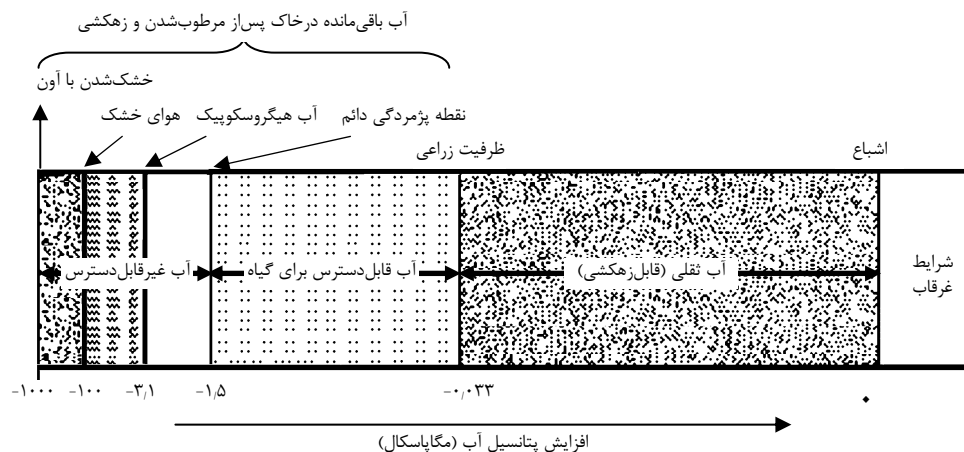
$$d_w = \theta_v d_s \quad (۸-۶)$$

در اینجا  $\theta_v$  میزان رطوبت حجمی بر حسب مترمکعب بر مترمکعب،  $d_s$  عمق خاک بر حسب سانتی متر و  $d_w$  عمق آب بر حسب سانتی متر می باشد. برای محاسبه مقدار آب مناسب تر بوده و در مقایسه با  $\theta_m$  با وضوح بیشتری مقدار آب قابل دسترس برای ریشه گیاه را نشان می دهد.

#### ۶-۱-۶ ظرفیت زراعی

به مقدار رطوبت باقی مانده پس از خروج آب ثقلی از خاک بر اثر نیروی جاذبه، ظرفیت زراعی<sup>۱</sup> (FC) یا حد بالای رطوبت خاک<sup>۲</sup> (DUL) می گویند و با  $P_m$  و  $P_v$  قابل بیان است (شکل ۲-۶). معمولاً در FC، ۵۰٪ تخلخل خاک با آب و ۵۰٪ باقی با هوا پر شده است. به عبارت دیگر، FC مقدار رطوبتی است که در پتانسیل بین ۰٫۱- تا ۰٫۰۳- مگاپاسکال (۰٫۱- تا ۰٫۳- بار) توسط خاک نگهداری می شود (جدول ۱-۶).

1. Field Capacity  
2. Drained Upper Limit



شکل ۲-۶ وضعیت آب در خاک. تنها آب بین ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) قابل استفاده برای گیاه است. در این شرایط آب معمولاً در پتانسیل بین  $-0.33$  تا  $-1.5$  مگاپاسکال توسط خاک نگهداری می‌شود (میلر و داناو، ۱۹۹۰).

### ۶-۱-۷ نقطه پژمردگی دائم

نقطه پژمردگی دائم<sup>۱</sup> (PWP) یا حد تحتانی رطوبت خاک<sup>۲</sup> (LL) مقدار رطوبتی است که در آن، گیاه پژمرده شده قابلیت برگشت خود را از دست بدهد (شکل ۲-۶). پتانسیل آب در نقطه پژمردگی دائم با توجه به گونه گیاهی و میزان توسعه ریشه آن متفاوت بوده، ولی معمولاً بین  $-1.0$  تا  $-2.0$  مگاپاسکال ( $10^0$  تا  $2 \times 10^1$  بار) می‌باشد. در مطالعات زراعی نقطه پژمردگی دائم، تقریباً  $-1.5$  مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود. برای درک بهتر محتوای رطوبتی بافت‌های مختلف خاک در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم،

جدول ۱-۶ مقادیر وزن مخصوص ظاهری ( $\rho_p$ ) و تخلخل چند نوع خاک با بافت‌های مختلف (میلر و داناو، ۱۹۹۰).

تخلخل (%)	وزن مخصوص ظاهری ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	بافت خاک
۲۹٫۴	۱٫۸۷	شنی درشت (gravelly sand)
۳۶٫۶	۱٫۶۸	شن لومی درشت (coarse loamy sand)
۴۳٫۰	۱٫۵۱	لوم شنی (sandy loam)
۴۹٫۴	۱٫۳۴	لومی (loam)
۵۲٫۵	۱٫۲۶	لوم رسی (clay loam)
۵۵٫۵	۱٫۱۸	رسی (clay)

1. Permanent Wilting Point  
2. Lower limit

جدول ۲-۶ درصد جرمی رطوبت خاک ( $P_m$ ) در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دایم در خاک‌های مختلف (میلر و داناهاو، ۱۹۹۰).

درصد رطوبت		بافت خاک
در نقطه پژمردگی دایم	در ظرفیت زراعی	
۱٫۷	۶٫۸	شنی متوسط
۲٫۳	۸٫۵	شنی ریز
۳٫۴	۱۱٫۳	لوم شنی
۴٫۵	۱۴٫۷	لوم شنی ریز
۶٫۸	۱۸٫۱	لوم
۷٫۹	۱۹٫۸	لوم سیلتی
۱۰٫۲	۲۱٫۵	لوم رسی
۱۴٫۷	۲۲٫۶	رسی

مقادیر درصد جرمی رطوبت خاک ( $P_m$ ) درحالت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دایم هشت نمونه خاک با بافت مختلف در جدول ۲-۶ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که درصد جرمی رطوبت خاک با سنگین‌تر شدن بافت خاک افزایش می‌یابد.

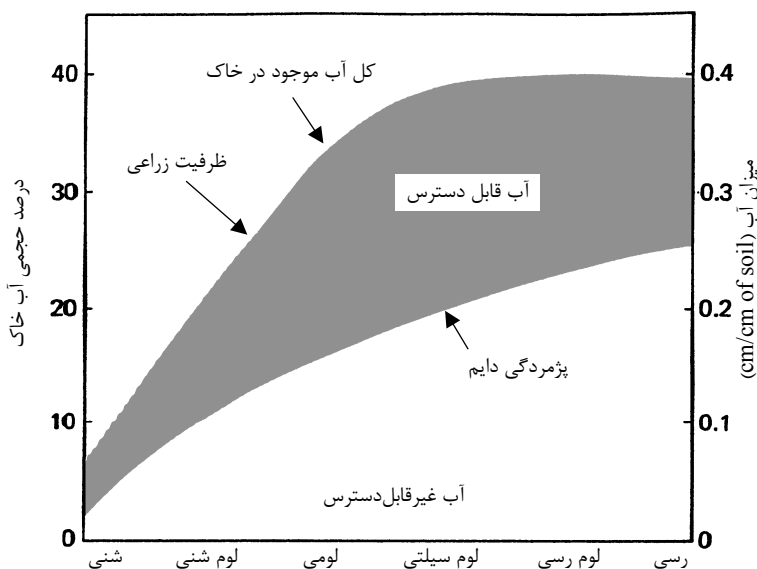
### ۸-۱-۶ نقطه اشباع

نقطه اشباع<sup>۱</sup> عبارت است از مقدار رطوبت خاک به صورت وزنی یا حجمی، وقتی که کل حجم منافذ خاک با آب پر شده باشد (شکل ۲-۶). گرچه گیاهان زراعی مانند برنج به دلیل توانایی انتقال اکسیژن از اندام‌های هوایی به ریشه‌ها قادر هستند تا در خاک‌های اشباع از آب رشد کنند، ولی اکثر گیاهان زراعی در خاک‌های اشباع از آب، قادر به تنفس و ادامه حیات نبوده و در اثر خفگی از بین می‌روند.

### ۹-۱-۶ آب موجود در خاک

عبارت است از میزان آب خاک که در شرایط مختلف رطوبتی وجود دارد. برای تعیین میزان آب موجود در خاک<sup>۲</sup> (ASW)، نمونه‌های خاک از اعماق مختلف گرفته شده و سپس خشک می‌شوند. اختلاف وزن خشک و مرطوب نمونه‌ها بیانگر میزان آب موجود خاک است. لازم به ذکر است که بدون توجه به بافت خاک، مقدار ASW بیان‌کننده میزان آب قابل‌دسترس گیاه نیست. برای مثال، در ASW برابر ۱۷٪ ممکن است یک خاک با بافت شنی درحالت اشباع و یک خاک با بافت رسی در پتانسیل آب کمتر از نقطه پژمردگی دایمی باشد. بنابراین، در استفاده از ASW، دانستن پتانسیل آب خاک یا نقاط FC و PWP آن، در تعیین وضعیت رطوبتی خاک و گیاه ضروری است.

1. Saturation Point  
2. Actual Soil Water



شکل ۳-۶ مقدار آب خاک در نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم در خاک‌های مختلف. فاصله بین میزان آب در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم (ضخامت لایه مشکی) نشان‌دهنده آب قابل‌استفاده گیاه است و این ضخامت در خاک لوم سیلتی بیشترین میزان می‌باشد. مشاهده می‌شود که گرچه از نظر میزان کل آب خاک بین خاک‌های لوم سیلتی و رسی اختلاف چندانی وجود ندارد، ولی به دلیل اینکه در خاک‌های رسی نقطه پژمردگی دائم (پتانسیل حدود  $-1/5$  MPa) در مقادیر رطوبتی بالاتری حادث می‌شود، مقدار آب قابل‌استفاده برای گیاه در خاک‌هایی با بافت متوسط (لوم سیلتی) بیشتر است. درصد حجمی رطوبت در ظرفیت زراعی برای دو خاک فوق حدود ۳۸٪ بوده، ولی درصد رطوبت در نقطه پژمردگی دائم برای خاک رسی حدود ۲۲٪ و برای خاک لوم سیلتی حدود ۱۸٪ است. بنابراین، میزان درصد رطوبت حجمی قابل‌استفاده برای گیاه در خاک لوم سیلتی حدود ۲۰٪ ( $20 = 38 - 18$ ) و در خاک رسی حدود ۱۶٪ ( $16 = 38 - 22$ ) است (کرامر، ۱۹۹۵).

### ۱۰-۱-۶ کل آب قابل دسترس خاک

کل آب قابل دسترس خاک<sup>۱</sup> (TASW) یا ظرفیت آب قابل دسترس گیاه<sup>۲</sup> (PAWC) عبارت از میزان آب موجود در خاک بین ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم (شکل‌های ۲-۶ و ۳-۶) با هر کدام از معیارهای رطوبتی مانند سانتی متر آب یا درصد رطوبت می‌باشد (رابطه ۹-۶):

$$TASW = FC - PWP \quad (۹-۶)$$

1. Total Available Soil Water  
2. Plant Available Water Capacity

مثال مطلوب است مقادیر TASW یک نمونه خاک، (الف) درحالی که میزان رطوبت جرمی ( $\theta_m$ ) در ظرفیت

مزرعه و نقطه پژمردگی دائم به ترتیب ۱۱٫۳ و ۳٫۴٪ می باشد؛ و (ب) درحالی که عمق آب ( $d_w$ ) در خاکی

به عمق ۳۰ سانتی متر در ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم به ترتیب ۵٫۰ و ۱٫۵ سانتی متر می باشد.

$$\text{FC: } \theta_m = 11.3\% \text{ , PWP: } \theta_m = 3.4\% \quad (\text{الف})$$

$$\text{TASW} = \text{PAWC} = \text{FC} - \text{PWP} = 11.3 - 3.4 = 7.9\%$$

$$\text{FC: } d_w(30) = 5 \text{ cm , PWP: } d_w(30) = 1.5 \text{ cm} \quad (\text{ب})$$

$$\text{TASW}(30) = \text{PAWC}(30) = \text{FC} - \text{PWP} = 5.0 - 1.5 = 3.5 \text{ cm}$$

به طور کلی، میانگین TASW در خاک های کشاورزی ۰٫۱۳ مترمکعب بر مترمکعب در نظر گرفته می شود.

### ۱۱-۶ آب قابل دسترس حقیقی خاک

آب قابل دسترس حقیقی خاک<sup>۱</sup> (AASW) مقدار آب قابل دسترسی که حقیقتاً در خاک وجود دارد را

نشان می دهد و عبارت است از تفاضل آب قابل دسترس خاک<sup>۲</sup> (ASW) از نقطه پژمردگی دائم

(رابطه ۱۰-۶). به عنوان مثال، در صورتی که در مثال فوق  $\theta_m$  برابر ۱۰٪ باشد میزان AASW برابر با ۶٫۶٪

می شود ( $\text{AASW} = 10 - 3.4 = 6.6$ ).

$$\text{AASW} = \text{ASW} - \text{PWP} \quad (6-10)$$

### ۱۲-۶ کسر آب قابل دسترس خاک

نسبت آب قابل دسترس حقیقی خاک (AASW) به کل آب قابل دسترس خاک (TASW) را کسر آب

قابل دسترس خاک<sup>۳</sup> (FASW) می گویند (رابطه ۶-۱۱):

$$\text{FASW} = \frac{\text{AASW}}{\text{TASW}} \quad (6-11)$$

کسر آب قابل دسترس خاک نشان می دهد که چه نسبت یا درصدی از کل آب قابل دسترس خاک، در

یک زمان معین در خاک وجود دارد. در مثال بالا، میزان کسر آب قابل دسترس خاک برابر ۰٫۸۴ است

( $\text{FASW} = 6.6 / 7.9 = 0.84$ ). یعنی میزان آب قابل دسترس خاک ۸۴٪ از حد بالقوه خود می باشد. FASW

پارامتر مهمی در زراعت، آبیاری، فیزیولوژی و رابطه آب خاک و گیاه است.

### ۱۳-۶ آب سهل الوصول

تمامی آب قابل دسترس خاک نمی تواند به آسانی توسط گیاه جذب شده و با افزایش تخلیه رطوبت خاک،

جذب رطوبت توسط گیاه، با سختی بیشتری انجام می شود. میزان رطوبتی که به آسانی و بدون ایجاد

شرایط تنش، توسط گیاه جذب می شود آب سهل الوصول<sup>۴</sup> (RASW) نامیده می شود (رابطه ۶-۱۲).

1. Actual Available Soil Water

2. Available Soil Water

3. Fraction of Available Soil Water

4. Readily Available Soil Water

مقدار آب سهل الوصول باتوجه به گونه گیاهی، رقم و خصوصیات خاک متفاوت بوده، ولی مقدار تقریبی آن بین ۵۰ تا ۸۵ درصد از TASW است.

$$RASW = (1 - C_T) \text{ TASW} \quad (۱۲-۶)$$

در این رابطه  $C_T$  مقداری از کسر آب قابل دسترس خاک است که در کمتر از آن میزان، گیاه در جذب آب قابل دسترس با مشکل مواجه شده و در نتیجه دچار تنش می شود (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۰). مقدار  $C_T$  در گیاهان زراعی مختلف متفاوت است، ولی مقادیر تقریبی آن بین ۰/۱۵ تا ۰/۵ می باشد. به عنوان مثال، مقدار  $C_T$  در گندم و سویا حدود ۰/۲۵، در نخود ۰/۳۴ و در سیب زمینی ۰/۵ برآورد شده است. در مثال قبلی برای نخود میزان آب سهل الوصول برابر ۵/۲ درصد  $[RASW = (1 - 0.34) \times 7.9\% = 5.2\%]$  است. یعنی کل آب قابل دسترس گیاه ۷/۹٪ است و گیاه نخود می تواند ۵/۲٪ آب را به صورت سهل الوصول و بدون مواجه شدن با شرایط تنش از خاک جذب کند.

برای درک بهتر مفاهیم رطوبتی خاک، مقادیر تیپیک رطوبت خاک درحالت اشباع (SAT)، ظرفیت زراعی (FC)، نقطه پژمردگی دایم (PWP) و کل آب قابل دسترس خاک (TASW) برای چهار گروه مهم خاک در جدول ۳-۶ آورده شده است.

**مثال** باتوجه به آمار جدول ۳-۶، در یک خاک لوم شنی با عمق ۱۳۰ سانتی متر، مقدار آب خاک در نقاط SAT، FC و PWP را حساب کنید. کل ظرفیت این خاک برای ذخیره آب قابل دسترس گیاه چقدر است. مقدار RASW را برای گیاه سورگوم ( $C_T = 0.15$ ) در نظر بگیرید. اگر در یک روز معین ۱۴ سانتی متر آب در این خاک وجود داشته باشد ( $\theta_v = 0.11$ ) آیا گیاه مورد نظر دچار تنش می شود.

کل آب موجود در خاک وقتی خاک اشباع شود:

$$SAT = (0.32 \text{ cm/cm}) (130 \text{ cm}) = 41.6 \text{ cm}$$

کل آب موجود در خاک وقتی رطوبت در FC باشد:

$$FC = (0.22 \text{ cm/cm}) (130 \text{ cm}) = 28.6 \text{ cm}$$

کل آب موجود در خاک وقتی رطوبت به PWP رسیده باشد:

$$PWP = (0.087 \text{ cm/cm}) (130 \text{ cm}) = 11.31 \text{ cm}$$

ظرفیت این خاک برای ذخیره سازی آب قابل دسترس برای گیاه:

$$TASW = (0.133 \text{ cm/cm}) (130 \text{ cm}) = 17.29 \text{ cm} \quad \text{یا} \quad 28.6 - 11.31 = 17.29$$

مقدار RASW برای گیاه سورگوم:

$$RASW = (1 - 0.15) (17.29 \text{ cm}) = 14.7 \text{ cm}$$

آب قابل دسترس موجود در خاک:

$$ASW = 14 \text{ cm}; \quad AASW = ASW - PWP = 14 - 11.31 = 2.69 \text{ cm}$$

$$FASW = AASW / TASW = (2.69) / (17.29) = 0.16$$

جدول ۳-۶ مقادیر تیپیک SAT، FC، PWP و TASW در چهار گروه مهم خاک<sup>۱</sup> (سلطانی و همکاران، ۱۳۷۷).

TASW	PWP	FC	SAT	بافت خاک
۰٫۱۶۰	۰٫۵۱۷	۰٫۶۷۷	۰٫۷۵۶	رس لومی
۰٫۱۵۱	۰٫۱۱۰	۰٫۲۶۱	۰٫۳۶۱	لوم سیلتی
۰٫۱۳۳	۰٫۰۸۷	۰٫۲۲۰	۰٫۳۲۰	لوم شنی
۰٫۰۷۴	۰٫۰۳۳	۰٫۱۰۷	۰٫۲۶۷	شنی

۱. همگی اعداد برحسب متر مکعب بر متر مکعب یا متر بر متر یا سانتی متر بر سانتی متر هستند.

مشاهده می شود که گیاه تنش نمی بیند، ولی در نزدیکی آستانه صدمه به وسیله تنش خشکی قرار دارد.

**مثال** باتوجه به جدول ۳-۶ در صورتی که عمق خاک (ds) ۱۵۰ سانتی متر باشد، کل آب خاک (TSW) و کل

آب قابل دسترس خاک (TASW) را برای چهار گروه خاک حساب کنید. مقدار RASW برای گیاهی با  $C_T = ۰٫۳$  چقدر است.

کل آب خاک:

$$TSW = FC \cdot ds$$

کل آب قابل دسترس خاک:

$$TASW = (FC - PWP) \cdot ds$$

آب سهل الوصول:

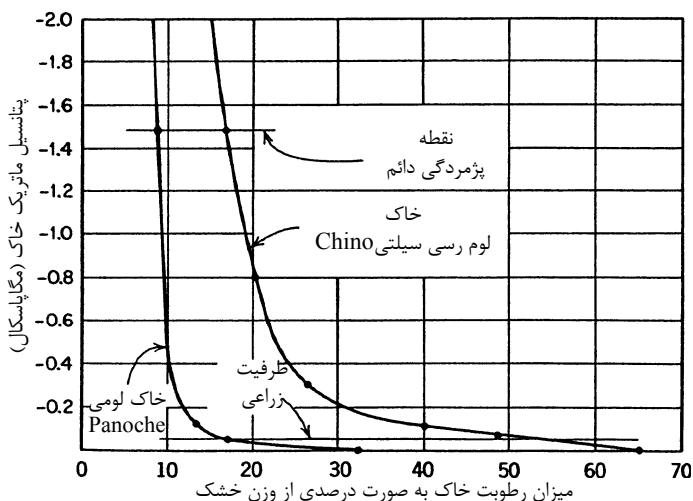
$$RASW = (1 - C_T) \cdot TASW$$

بنابراین:

RASW	TASW	TSW	FC-PWP	PWP	FC	بافت خاک
۱۶٫۸	۲۴٫۰	۱۰۱٫۶	۰٫۱۶۰	۰٫۵۱۷	۰٫۶۷۷	رس لومی
۱۵٫۹	۲۲٫۷	۳۹٫۲	۰٫۱۵۱	۰٫۱۱۰	۰٫۲۶۱	لوم سیلتی
۱۴٫۰	۲۰٫۰	۳۳٫۰	۰٫۱۳۳	۰٫۰۸۷	۰٫۲۲۰	لوم شنی
۷٫۸	۱۱٫۱	۱۶٫۱	۰٫۰۷۴	۰٫۰۳۳	۰٫۱۰۷	شنی

\* تمامی اعداد برحسب سانتی متر بر سانتی متر می باشند.

مشاهده می شود که با سبک تر شدن بافت خاک، کل آب خاک (TSW) به سرعت کاهش می یابد، در حالی که کاهش کل آب قابل دسترس خاک (TASW) با شدت کمتری صورت می گیرد. این مسئله به این علت است که در خاک های سنگین (بافت رسی) نسبت به خاک های سبک (بافت شنی) آب با قدرت بیشتری توسط ذرات خاک جذب و نگهداری شده و دسترسی آن برای گیاه سخت تر است. بنابراین، گرچه با سبک تر شدن بافت خاک میزان آب کمتری توسط خاک ذخیره می شود، ولی به دلیل قدرت کمتر ذرات شن در جذب آب، آسان تر برای گیاه قابل دسترس بوده و در نتیجه اختلاف بین TASW در بافت های مختلف خاک کمتر از اختلاف بین TSW است.



شکل ۴-۶ منحنی مشخصه رطوبت خاک که رابطه پتانسیل ماتریک خاک با مقدار آب آن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در یک پتانسیل ماتریک معین میزان رطوبت خاک در یک خاک با بافت سنگین‌تر (لوم رسی سیلتی Chino) بیشتر از یک خاک با بافت سبک‌تر (لومی Panoche) است (کرامر، ۱۹۹۵).

### ۱۴-۱-۶ منحنی مشخصه آب خاک

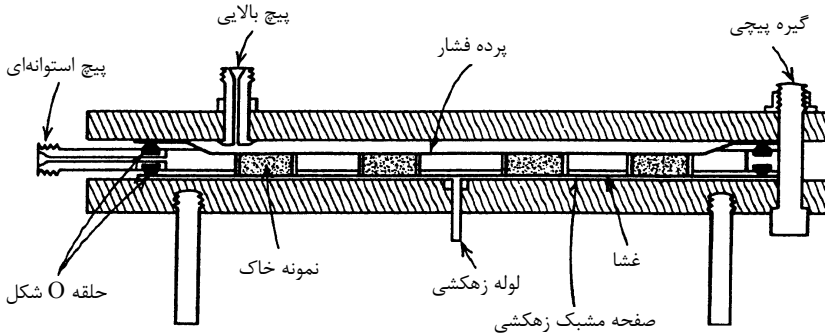
یکی از روش‌های نشان‌دادن وضعیت رطوبتی خاک، استفاده از رابطه بین مکش خاک ( $\Psi_m$ ) و رطوبت خاک است که به وسیله منحنی مشخصه آب خاک<sup>۱</sup> (SWCC) یا منحنی آزادسازی رطوبت خاک<sup>۲</sup> (SMRC) نشان داده می‌شود (حق نیا، ۱۳۷۴، کرامر، ۱۹۹۵).

منحنی مشخصه آب خاک دربرگیرنده یک سری از مشخصات خاک است و خاک‌های مختلف دارای منحنی مشخصه آب خاک مختلفی هستند. شکل منحنی مشخصه آب خاک به توزیع و اندازه منافذ خاک و تخلخل کل خاک بستگی دارد (شکل ۴-۶). هرچه درصد منافذ ریز خاک زیادتر و تخلخل کل آن بیشتر باشد، منحنی در وضعیت بالاتری قرار می‌گیرد. از این منحنی، برای تعیین FC، PWP، حل معادلات مختلف حرکت آب در خاک در آبیاری و تعیین سطوح  $\Psi_w$  در خاک استفاده می‌شود. به‌طور کلی، در مکش‌های پایین (پتانسیل ماتریک حدود  $-0.05$  MPa) تغییرات جزئی در مقدار رطوبت با تغییرات کمی در پتانسیل ماتریک همراه است، در صورتی‌که در مکش‌های بالا (پتانسیل ماتریک حدود  $-1$  MPa) تغییرات جزئی در مقدار رطوبت تغییرات زیادی را در پتانسیل ماتریک سبب می‌شود.

به‌طور معمول، منحنی مشخصه آب خاک با دو روش استفاده از دستگاه صفحات فشاری یا غشای فشاری (شکل‌های ۵-۶ و ۶-۶) و روابط تجربی-تئوریک (مثل رابطه ۱۳-۶) تعیین می‌گردد (کرامر،

1. Soil Water Characteristic Curve  
2. Soil Moisture Release Curve





شکل ۵-۶ ساختمان یک دستگاه صفحات فشاری برای تعیین منحنی مشخصه رطوبت خاک. نمونه خاک در داخل حلقه‌های فلزی که روی غشا گذاشته شده‌اند قرار می‌گیرد. زمانی که فشار به نقطه پتانسیلی موردنظر رسید، خاک داخل محفظه خارج شده و درصد جرمی رطوبت نمونه خاک اندازه‌گیری می‌شود (کرامر، ۱۹۹۵).

۱۹۹۵، کمبل و نورمن، ۱۹۹۸). در واقع، برای تعیین منحنی مشخصه آب خاک مقدار رطوبت خاک در پتانسیل‌های مختلف اندازه‌گیری شده و نسبت به یکدیگر رسم می‌گردند. از این منحنی، در تبدیل پتانسیل و رطوبت خاک به یکدیگر و همچنین تعیین مقدار آب قابل ذخیره در خاک استفاده می‌شود. یک نمونه از روابط تجربی-تئوریک به صورت زیر می‌باشد (کمبل و نورمن، ۱۹۹۸، گیسمن و همکاران، ۲۰۰۳):

$$\Psi_m = A\theta_v^B \quad (6-13)$$

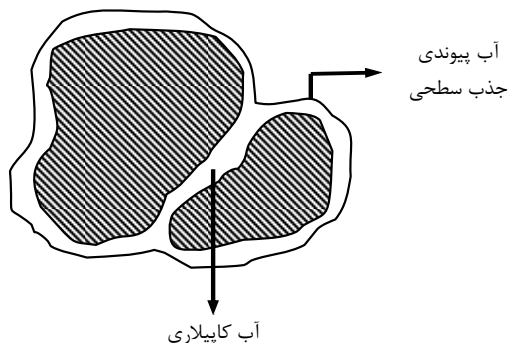
در این رابطه  $\Psi_m$  پتانسیل ماتریک خاک برحسب کیلوپاسکال،  $\theta_v$  مقدار رطوبت حجمی خاک برحسب مترمکعب بر مترمکعب و  $A$  و  $B$  ضرایبی هستند که می‌توان آن‌ها را به ویژگی‌های خاک ارتباط داد. برای مثال، در مطالعه‌ای (ساکستون و همکاران، ۱۹۸۶) روابط زیر برای ضرایب  $A$  و  $B$  حاصل شده است. در این روابط  $C$  درصد رس و  $S$  درصد شن خاک می‌باشد.

$$A = \exp[-4.396 - 0.0715(C) - 4.88 \times 10^{-4}(S)^2 - 4.285 \times 10^{-5}(S)^2(C)] \times 100 \quad (6-14)$$

$$B = -3.14 - 0.0222 C^2 - 3.484 \times 10^{-5} S^2 C \quad (6-15)$$



شکل ۶-۶ تصویر شماتیک نحوه عمل دستگاه صفحات فشاری با غشای استات سلولز و سرامیک منفردار (از مؤلف).



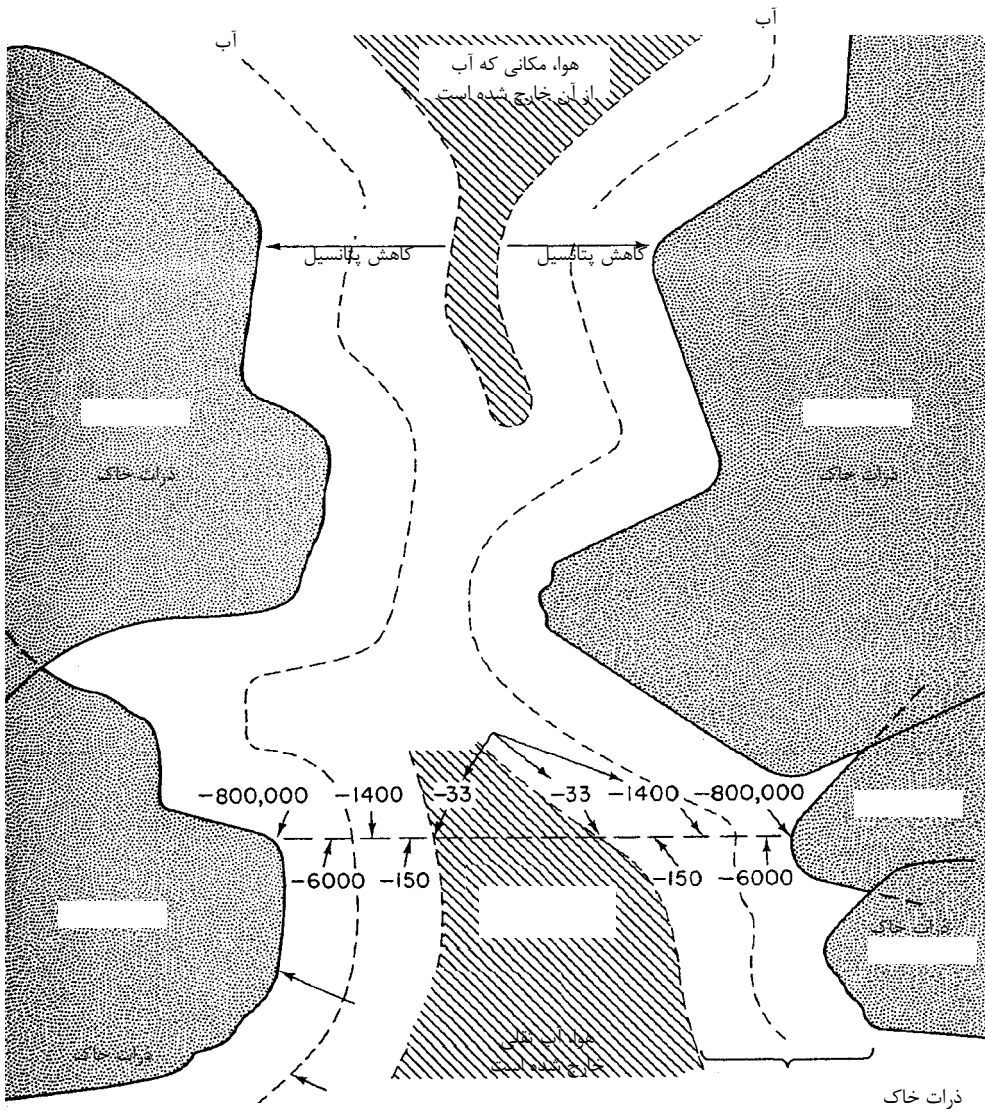
شکل ۶-۷ مکانیسم‌های نگهدارنده آب در خاک. آب به وسیله نیروی کاپیلاری و نیروی جذب سطحی ذرات خاک در خاک نگهداری می‌شود (از مؤلف).

## ۲-۶ نگهداری آب در خاک

نیروهای جذب سطحی و کاپیلاری مکانیسم‌های اصلی نگهداری آب در خاک می‌باشند (شکل ۶-۷). در واقع، پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های آب، نیروی چسبندگی بین مولکول‌های آب و مولکول‌های آب با دیواره‌های منافذ خاک و نیروی کشش سطحی آب توجیه‌کننده دلایل نگهداری و حرکت آب در خاک هستند. منافذ ریز کمتر از ۰/۱ میلی‌متر برای ذخیره آب بسیار مفید هستند. دیواره‌های این منافذ با قدرت بالایی مولکول‌های آب را نگه داشته و از خروج آن‌ها جلوگیری می‌کنند. فاصله بین مولکول‌های آب با دیواره منفذ، نشان‌دهنده قدرت نگهداری آب توسط دیواره است. هرچه این فاصله بیشتر باشد آب با قدرت کمتری توسط دیواره نگه داشته شده و آسان‌تر از خاک خارج می‌شود (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷). بنابراین، منافذ درشت بزرگ‌تر از ۰/۰۶ میلی‌متر امکان نفوذ سریع و زهکشی آب را فراهم آورده و تهویه خاک را افزایش می‌دهند، در حالی که منافذ متوسط با قطر بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۶ میلی‌متر هدایت کاپیلاری را تسهیل کرده و بیشترین نقش را در صعود آب به سطح خاک ایفا می‌کنند (شکل ۶-۸). در منافذ خالی و نیمه‌پر، مقدار پتانسیل ماتریک با قطر منفذ یا قطر هلال آب رابطه معکوس داشته و با روابط ۲-۲۱ و ۲-۲۲ (فصل ۲) قابل محاسبه است.

## ۳-۶ حرکت آب در خاک

حرکت آب در خاک، در دو فاز بخار و مایع انجام می‌گیرد. حرکت به صورت بخار فقط در شرایطی اهمیت دارد که رطوبت خاک کمتر از PWP باشد و این انتقال نمی‌تواند نیاز گیاه به آب در شرایط مزرعه را تأمین کند (کرامر، ۱۹۹۵). با افزایش اختلاف دما بین لایه‌های مختلف خاک، سرعت انتقال بخار افزایش می‌یابد. مثلاً در شب، بخار آب از لایه مرطوب‌تر و گرم‌تر زیرین به لایه خشک‌تر و سردتر سطحی منتقل می‌شود. حرکت مایع آب خاک، از طریق منافذ بین ذرات خاک و نیز لایه‌های آب فراگرفته دور ذرات انجام می‌شود. در شرایط طبیعی، حرکت فاز مایع آب خاک اهمیت بسیار بیشتری نسبت به حرکت فاز بخار دارد.



ضخامت نوار آب  
 $KPa - 180000$   
 آب

شکل ۶-۸ نحوه نگهداری آب در خاک. با نزدیک شدن مولکول‌های آب به سطح ذرات جامد، قدرت جذب آن‌ها بیشتر و پتانسیل آب منفی‌تر می‌شود. بنابراین، با خشک‌تر شدن خاک، جذب آب از خاک توسط گیاه مشکل‌تر شده و در تنش‌های زیاد عملاً غیرممکن می‌گردد. اعداد داخل شکل نشان‌دهنده پتانسیل آب برحسب کیلوپاسکال است (میلر و داناو، ۱۹۹۰).

حرکت یا جریان آب در خاک، در دو حالت قابل بحث است: (۱) جریان اشباع آب در خاک وقتی که خاک اشباع از آب باشد و (۲) جریان غیراشباع آب در خاک وقتی بخشی از منافذ خاک خالی از آب باشند و آب فقط در بخشی از منافذ حرکت کند. برای بیان حرکت آب در هر دو حالت اشباع و غیراشباع از قانون داریسی (Darcy) (روابط ۱۶-۶ و ۱۷-۶) استفاده می شود (اسلاچر، ۱۹۷۷):

$$Q = -Ki \quad (۱۶-۶)$$

$$Q = -K\Delta H/L \quad (۱۷-۶)$$

در این روابط،  $i$  شیب هیدرولیکی یا گرادیان هیدرولیکی،  $Q$  دبی آب انتقال یافته بین دو نقطه یا سرعت انتقال آب،  $K$  هدایت هیدرولیکی خاک (برحسب  $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$  یا  $cm \cdot h^{-1}$ )،  $\Delta H$  اختلاف بار پتانسیل هیدرولیکی و  $L$  طول مسیر یا فاصله بین دو نقطه است. در خاک اشباع از آب  $K$  به صورت  $K_s$  نشان داده می شود.  $K$  سهولت مسیر از نظر حرکت آب را نشان داده و هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع بسیار بیشتر از حالت غیراشباع آن است.  $K$  در حالت غیراشباع، به  $\theta$  بستگی زیاد داشته و با  $K(\theta)$  نشان داده می شود. در اینجا، اجرای قانون داریسی مورد بحث بیشتری قرار می گیرند.

### ۱-۳-۶ اختلاف بار (پتانسیل) هیدرولیکی ( $\Delta H$ )

اختلاف بار (پتانسیل) هیدرولیکی، همان اختلاف پتانسیل آب بین دو نقطه (برحسب متر یا سانتی متر) است و با افزایش آن میزان حرکت و انتقال آب افزایش می یابد. پتانسیل آب در هر نقطه از خاک، برابر با مجموع اجزای پتانسیل آب است ( $\Psi_H = \Psi_M + \Psi_P + \Psi_Z$ ). از آنجایی که پتانسیل اسمزی ( $\Psi_s$ ) تنها در انتقال آب در طرفین غشاها نقش داشته و در انتقال آب در خاک به دلیل عدم وجود غشا نقش ندارد، در محاسبه پتانسیل آب خاک، از آن صرف نظر می شود. بنابراین، پتانسیل هیدرولیکی هر نقطه از خاک، از طریق روابط زیر محاسبه می شود. اندیس های ۱ و ۲، به دو نقطه دلخواه در خاک اشاره دارند.

$$\Psi_H = \Psi_M + \Psi_P + \Psi_Z \quad (۱۸-۶)$$

$$\Delta H = (\Psi_m^2 - \Psi_m^1) + (\Psi_p^2 - \Psi_p^1) + (\Psi_z^2 - \Psi_z^1)$$

$$\Delta H = (\Psi_m^2 + \Psi_p^2 + \Psi_z^2) - (\Psi_m^1 + \Psi_p^1 + \Psi_z^1)$$

در خاک های اشباع از آب پتانسیل ماتریک در انتقال آب نقش ندارد ( $\Psi_m^2 = \Psi_m^1 = 0$ ) و بنابراین:

$$\Delta H = (\Psi_p^2 + \Psi_z^2) - (\Psi_p^1 + \Psi_z^1) \quad (۱۹-۶)$$

در خاک های غیراشباع پتانسیل فشاری در انتقال آب نقش ندارد ( $\Psi_p^2 = \Psi_p^1 = 0$ ) و بنابراین:

$$\Delta H = (\Psi_m^2 + \Psi_z^2) - (\Psi_m^1 + \Psi_z^1) \quad (۲۰-۶)$$

روابط فوق بدین معنی هستند که حرکت آب در خاک های اشباع ناشی از اختلاف پتانسیل فشاری و ثقلی و در خاک های غیراشباع، ناشی از اختلاف پتانسیل ماتریک و ثقلی می باشد.

جدول ۴-۶ مقادیر تیپیک هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) در چهار نمونه خاک با بافت مختلف\*.

هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر ساعت)	بافت خاک
۰/۰۵	رس سیلتی
۰/۲۷	سیلت لوم
۰/۶۹	لوم شنی
۴/۵۸	شنی

\*. مشاهده می‌شود که با سبک‌تر شدن بافت خاک، مقدار  $K_s$  به شدت افزایش می‌یابد.

### ۲-۳-۶ هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ )

هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع به اندازه منافذ، تخلخل کل، درجه پیوستگی منافذ و دمای خاک بستگی دارد (کرامر، ۱۹۹۵). افزایش اندازه منافذ، درصد و نسبت منافذ درشت و تخلخل کل خاک نفوذپذیری خاک را بیشتر کرده و سبب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌شود. همچنین، هرچه منافذ بیشتر به هم پیوسته بوده و کمتر کج و غیرمستقیم باشند، میزان  $K_s$  بیشتر می‌گردد. افزایش دمای خاک از طریق شکستن تعدادی از پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های آب، سبب کاهش ویسکوزیته و حرکت آسان‌تر آب و در نتیجه افزایش  $K_s$  می‌شود.  $K_s$  یک خصوصیت ذاتی برای خاک‌ها بوده و مقدار آن برای هر خاکی عدد مشخصی است (کمبل و نورمن، ۱۹۹۸).

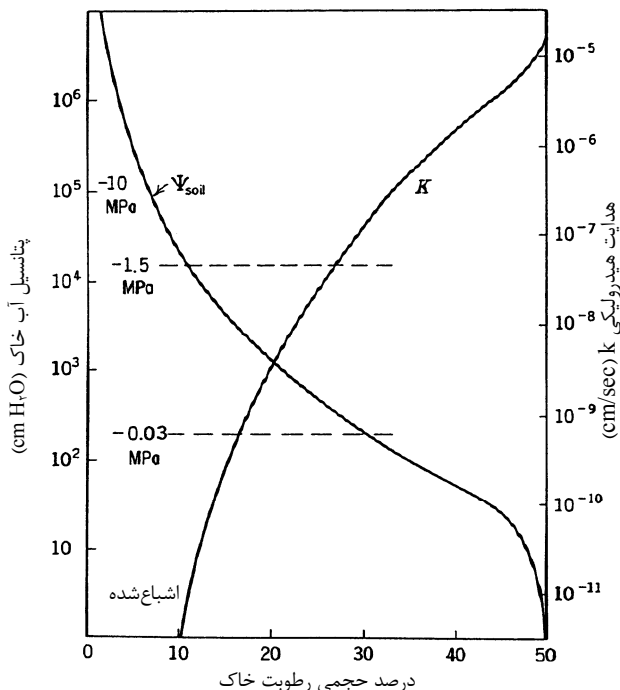
گرچه میزان تخلخل کل خاک در خاک‌های رسی بیشتر از خاک‌های شنی است، ولی به دلیل وجود منافذ کوچکتر و درصد منافذ ریز بیشتر، در خاک‌های رسی میزان  $K_s$  آن کمتر از خاک‌های شنی است. به طور کلی، مقادیر  $K_s$  خاک از حدود ۰/۰۵ سانتی‌متر بر ساعت در خاک‌های رسی تا حدود ۱۰ سانتی‌متر بر ساعت در خاک‌های شنی متغیر است. خاک‌هایی با  $K_s$  کمتر از ۰/۲۵ سانتی‌متر بر ساعت از نظر زهکشی و تهویه دچار مشکل هستند. همچنین، خاک‌هایی با  $K_s$  بیشتر از ۲۵ سانتی‌متر بر ساعت به دلیل خروج زیاد آب، قادر به حفظ رطوبت کافی جهت رشد گیاه نیستند. جهت درک بهتر موضوع، مقادیر تیپیک  $K_s$  در ۴ نمونه خاک با بافت مختلف در جدول ۴-۶ آورده شده است. لازم به ذکر است که مقدار  $K_s$  در حالت اشباع، ثابت بوده و برای هر خاک قابل محاسبه است.

### ۳-۳-۶ هدایت هیدرولیکی غیراشباع $K(\theta)$

هدایت هیدرولیکی در حالت غیراشباع خاک، تابعی از  $K_s$  و رطوبت خاک بوده و به وسیله رابطه ۲۱-۶ بیان می‌شود (محبوبی و نادری، ۱۳۸۰):

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^m \quad (۶-۲۱)$$

در این رابطه،  $\theta$  رطوبت موجود در خاک،  $\theta_s$  رطوبت خاک در حالت اشباع،  $m$  ضریب ثابتی است که مقدار آن بسته به خاک بین ۲ تا ۴ می‌باشد،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی خاک اشباع و  $K(\theta)$  هدایت



شکل ۹-۶ رابطه پتانسیل آب در خاک ( $\Psi_{soil}$ ) و هدایت هیدرولیکی خاک ( $k$ ) با مقدار رطوبت آن. مشاهده می‌شود که با کاهش رطوبت خاک هدایت هیدرولیکی خاک ( $k$ ) به شدت کاهش می‌یابد (کرامر، ۱۹۹۵).

هیدرولیکی خاک غیر اشباع است. با خشک شدن خاک، هدایت هیدرولیکی خاک به سرعت کاهش می‌یابد (شکل ۹-۶). به عنوان مثال، اگر در یک خاک شنی، هدایت هیدرولیکی اشباع برابر ۵ سانتی متر بر ساعت باشد، رسیدن رطوبت خاک به FC ممکن است هدایت هیدرولیکی را به ۰/۰۰۵ سانتی متر بر ساعت کاهش دهد. کاهش سریع هدایت هیدرولیکی در شکل ۹-۶ بدین دلیل است که منافذ درشت تر خاک در ابتدا تخلیه شده و در نتیجه مقطع عرضی برای جریان آب به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. هدایت هیدرولیکی پایین در خاک هایی که در حال خشک شدن هستند موجب محدود شدن جریان آب به سمت ریشه ها و ایجاد شرایط تنش برای گیاه می‌گردد.



# جذب آب از خاک

در این فصل می‌خوانیم:

۷-۱ آناتومی مسیر حرکت آب در ریشه

۷-۲ نیروی محرک در جذب آب

۷-۳ مقاومت در برابر جذب آب

۷-۴ عوامل مؤثر بر جذب آب

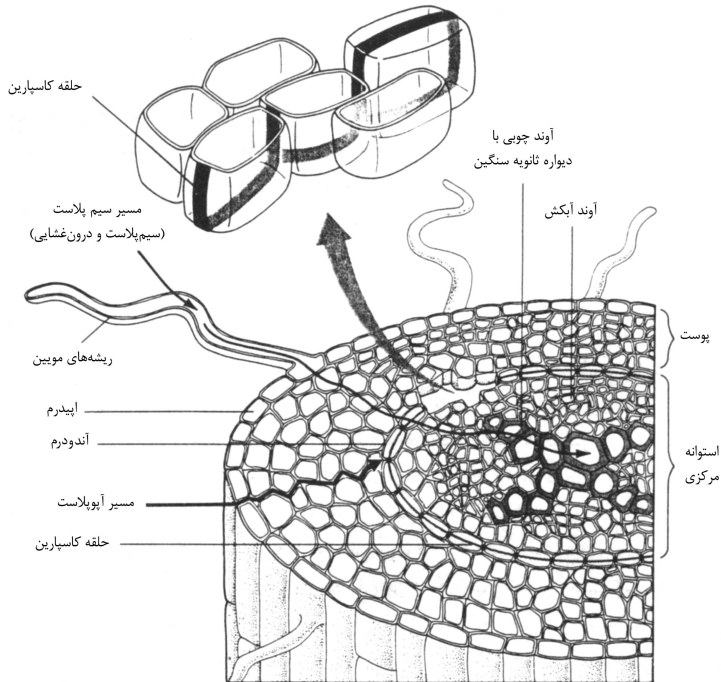
## مقدمه

جذب مداوم آب برای رشد و حیات گیاه ضروری بوده و تنها گیاهان معدودی وجود دارند که می‌توانند بدون جذب آب یک یا دو روز به زندگی خود ادامه دهند. مقدار آبی که گیاه روزانه به صورت تعرق از دست می‌دهد غالباً بیش از مقدار آب موجود در گیاه است بنابراین اگر قسمت اعظم آبی که در اثر تعرق از گیاه خارج می‌شود سریعاً جایگزین نگردد، گیاه در طی یک روز تلف می‌شود.

## ۷-۱ آناتومی مسیر حرکت آب در ریشه

در ریشه آب می‌تواند از طریق مسیرهای آپوپلاستی و سیمپلاستی حرکت کرده و وارد آوندهای چوب ریشه شود و سپس از طریق آوندهای چوب به ساقه و سایر اندام‌های هوایی گیاه منتقل گردد (شکل ۱-۷). توزیع ظرفیت حمل بین این دو مسیر به سطح مقطع و مقاومت آن‌ها بستگی دارد (اشتودل و پترسون، ۱۹۹۸، اشتودل، ۲۰۰۰). آپوپلاست بخش‌های غیرزنده گیاه بوده و دیواره‌های سلولی، آوندهای چوب و فضاهای بین‌سلولی را شامل می‌شود، که در آن، جریان آب به صورت پیوسته وجود دارد. در مسیر آپوپلاستی هیچ‌گونه غشایی وجود ندارد و آب از طریق فضاهای بین‌سلولی و دیواره‌ها از اپیدرم تا آندودرم به راحتی در جریان است، اما در آندودرم که دارای غشای سوپرینی (Suberin) بوده، متوقف شده و برای ادامه حرکت به سمت آوندهای چوبی ریشه، اجباراً وارد مسیر سیمپلاستی می‌شود (شکل ۲-۷). وجود نوار کاسپارین (Casparian) دلیل نفوذناپذیری آندودرم نسبت به آب است. نوار کاسپارین به صورت کمربندی غیرقابل نفوذ، دیواره‌های اطراف سلول‌های آندودرم را فراگرفته است. به هر حال، اگر

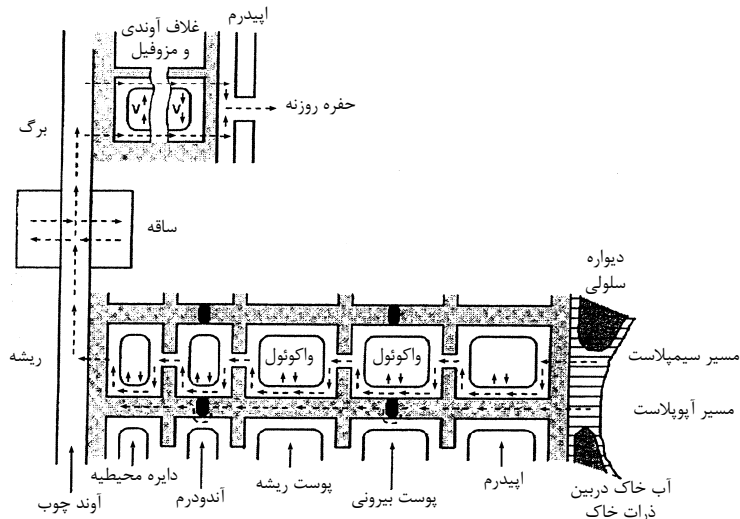




شکل ۱-۷ مسیرهای جذب آب توسط ریشه. آب ممکن است از طریق مسیر آپوپلاست یا مسیر سلولی که شامل مسیرهای درون غشایی و سیم پلاست است، عبور کند (کافی و همکاران، ۱۳۷۸).

قسمت عمده آب از آپوپلاست ریشه عبور کند و نوار کاسپارین آندودرمی یک مانع مهم در برابر جریان آب باشد، صدمه آندودرم می تواند سبب کاهش معنی دار مقاومت ریشه در برابر جریان آب گردد (کرامر، ۱۹۹۵). در سال‌های اخیر معلوم شده است که در بیشتر گیاهان بلافاصله بعد از اپیدرم لایه سلولی به نام آگزودرم وجود دارد که این لایه نیز می تواند دارای نوار کاسپارین با یک لاملای سوپرینی باشد. در چنین گیاهانی عبور آب و املاح تنها از طریق پلاسمودسماتا و در نتیجه مسیر سیم پلاستی صورت می گیرد. لازم به ذکر است که آگزودرم، لایه هیپودرمی است که دارای نوار کاسپارین می باشد. در تعدادی از ریشه‌های گیاهان هر دو لایه آندودرم و آگزودرم تشکیل می شود و می تواند سبب افزایش مقاومت در برابر جریان آپوپلاستی شود (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

به بخش‌های زنده گیاه و سلول‌ها مانند سیتوپلاسم که از طریق منافذ پلاسمودسماتا به هم متصل بوده و یک واحد پیوسته را تشکیل می دهند، سیم پلاست گفته می شود که به عنوان یک مسیر جریان آب شناخته شده است. البته نوع دیگری از انتقال درون سلولی بجز مسیر پلاسمودسماتا وجود دارد که آب به طور مداوم از یک طرف وارد سلول شده و از طرف دیگر خارج می شود. در این مسیر آب حداقل از دو غشای پلاسمایی ورودی و خروجی سلول عبور می کند. به علاوه، آب ممکن است در طی این مسیر از



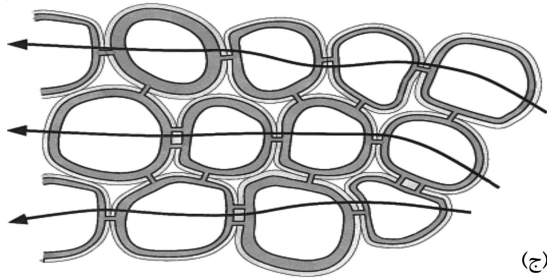
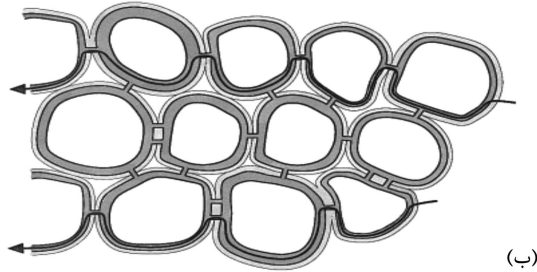
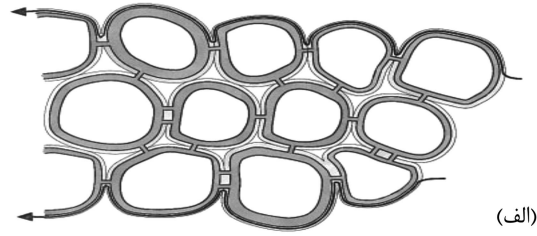
شکل ۷-۲ شمای کلی جریان آب در سیستم خاک و گیاه. آب می‌تواند از طریق مسیرهای آپوپلاستی و سیمپلاستی حرکت کرده و وارد آوندهای چوب شود و سپس به ساقه و سایر اندام‌های هوایی گیاه منتقل گردد. در مسیر آپوپلاستی، آب از طریق فضاهای بین‌سلولی و دیواره‌ها از اپیدرم تا آندودرم به راحتی در جریان است، اما در آندودرم، که دارای غشای سوبرینی بوده، متوقف شده و برای ادامه حرکت اجباراً وارد مسیر سیمپلاستی می‌شود (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۴).

غشای تونوپلاست واکوئل یا غشای اندامک‌های دیگر درون سلولی نیز بگذرد. لازم به ذکر است که آب قبل از ورود به هر سلول موقتاً وارد فضای دیواره سلولی می‌شود. به این مسیر حرکت آب، مسیر درون‌غشایی<sup>۱</sup> می‌گویند (اشتودل و پیترسون، ۱۹۹۸).

از آنجایی که در مسیر سیمپلاستی (مسیرهای پلاسمودسماتا و درون‌غشایی) آب از طریق منافذ پلاسمودسماتا و غشاهای سلولی منتقل می‌شود، کنترل بیشتری بر ورود آب و املاح همراه آن صورت می‌گیرد. در واقع، وجود سیستم کنترل‌کننده قوی در غشاهای سلولی واقع در مسیر سیمپلاستی سبب عدم جذب یا کاهش جذب عناصر مضر و جذب انتخابی مواد غذایی مورد نیاز گیاه می‌گردد. به هر حال، نکته قابل توجه این است که حرکت آب به درون ریشه و به سمت عناصر آوندی عمدتاً به صورت ترکیبی از سه مسیر آپوپلاستی، پلاسمودسماتا و درون‌غشایی می‌باشد (شکل ۳-۷).

## ۷-۲ نیروی محرک در جذب آب

به‌طور کلی، اختلاف پتانسیل آب بین خاک و ریشه عامل و نیروی محرک انتقال آب از خاک به ریشه است که به دو طریق غیرفعال و فعال جذب گیاه می‌شود (رابطه ۱-۷):



شکل ۳-۷ مسیرهای مختلف حرکت آب از طریق سلول‌های ریشه. (الف) مسیر آپوپلاستی؛ (ب) مسیر سیمپلاستی؛ و (ج) مسیر درون‌غشایی. در مسیر سیمپلاست، آب بین سلول‌ها از طریق پلاسمودسماتا و بدون عبور از غشای پلاسمایی جریان می‌یابد. در مسیر درون‌غشایی، آب از غشای پلاسمایی و غشای اندامک‌های درون‌سلولی حرکت می‌کند (اشتودل و پیترسون، ۱۹۹۸).

$$\Delta\Psi_w = \Psi_{w \text{ soil}} - \Psi_{w \text{ root}} \quad (7-1)$$

که در آن،  $\Delta\Psi_w$  اختلاف پتانسیل آب و نیروی محرک انتقال،  $\Psi_{w \text{ soil}}$  پتانسیل آب خاک و  $\Psi_{w \text{ root}}$  پتانسیل آب ریشه هستند. پتانسیل آب خاک و ریشه از طریق رابطه ۲-۷ محاسبه می‌شود، که در آن،  $\Psi_m$  پتانسیل ماتریک،  $\Psi_s$  پتانسیل اسمزی،  $\Psi_p$  پتانسیل فشاری و  $\Psi_g$  پتانسیل ثقلی هستند:

$$\Psi_{w \text{ soil}} \text{ یا } \Psi_{w \text{ root}} = \Psi_m + \Psi_s + \Psi_p + \Psi_g \quad (7-2)$$

از آنجایی که عمدتاً پتانسیل ثقلی و فشاری در خاک و همچنین پتانسیل ثقلی و ماتریک در ریشه ناچیز و در نتیجه قابل صرف‌نظر کردن هستند، اختلاف پتانسیل آب را می‌توان از طریق رابطه ۳-۷ بیان کرد:

$$\Delta\Psi_w = \Psi_{w \text{ soil}} - \Psi_{w \text{ root}} = (\Psi_m + \Psi_s)_{\text{soil}} - (\Psi_p + \Psi_s)_{\text{root}} \quad (7-3)$$

## ۷-۲-۱ جذب غیرفعال

در شرایطی که تعرق کافی یا بالا باشد، شیره آوند چوب رقیق بوده، پتانسیل اسمزی ناچیز و پتانسیل فشاری منفی است. در چنین شرایطی، بر اثر تعرق در دیواره‌های سلولی و سطوح تبخیر پتانسیل فشاری منفی شدید ایجاد شده (قسمت ۲-۲-۲) و به ترتیب به سلول‌های برگ، آوند چوب، ساقه و ریشه منتقل می‌شود. این مسئله سبب می‌شود تا پتانسیل فشاری در آوند چوب ریشه منفی شده و به حدود  $-1/5$  تا  $-2/0$  مگاپاسکال برسد و در نتیجه جذب غیرفعال به کار افتاده و سبب جذب آب از خاک شود (کرامر، ۱۹۹۵).

بنابراین، در جذب غیرفعال، میزان جذب به وسیله مقدار آبی که از طریق اندام‌های هوایی و عمدتاً به صورت تعرق ازدست می‌رود، کنترل می‌شود. در واقع، خروج آب از روزه‌های برگ‌ها سبب ایجاد اختلاف پتانسیل شده و این اختلاف پتانسیل از طریق ستون آب پیوسته آوندهای چوب و دیواره‌های اشباع‌شده از آب سلول‌ها به سیستم ریشه منتقل می‌شود و باعث حرکت آب از ریشه به سمت برگ‌ها می‌گردد. بنابراین، پتانسیل فشاری منفی ایجادشده در دیواره‌های سلولی و آوندهای چوبی ریشه عامل اصلی کاهش پتانسیل آب در ریشه و در نتیجه جذب آب است.

## ۷-۲-۲ جذب فعال و پدیده فشار ریشه

تحت شرایط به خصوص مثل خاک و هوای مرطوب و تعرق کم، جذب آب به طریق مکانیسم دیگری به نام جذب فعال یا جذب اسمزی صورت می‌گیرد، که نتیجه پتانسیل اسمزی منفی‌تر در آوندهای ریشه است. در واقع، جذب اسمزی در شرایطی صورت می‌گیرد که رطوبت خاک بالا و نزدیک ظرفیت زراعی، پتانسیل ماتریک خاک ناچیز، رطوبت نسبی هوا بالا، تعرق کند و در حد قابل اغماض و در گیاه معادل صفر باشد. در چنین شرایطی، باتوجه به معادله  $3-7$  تنها عامل ایجاد اختلاف پتانسیل آب، پتانسیل اسمزی است (جدول ۱-۷). میزان جذب فعال فقط در گیاهانی قابل اندازه‌گیری است که تعرق آن‌ها کند باشد (کرامر، ۱۹۹۶).

در نتیجه کاهش پتانسیل اسمزی، آب از خاک وارد آوند چوب ریشه می‌شود و در نتیجه این ورود آب، پتانسیل فشاری مثبتی در آوند چوب ریشه حادث می‌شود که به فشار ریشه‌ای معروف است. ایجاد فشار ریشه‌ای می‌تواند سبب خروج آب به صورت مایع از برگ‌ها شود که به آن تعریق<sup>۱</sup> می‌گویند. خروج آب به صورت مایع از طریق روزه‌های خاصی که هیداتود (hydathodes) نامیده شده و عمدتاً در نوک و حاشیه برگ‌ها واقع شده‌اند، صورت می‌گیرد. برخلاف تعرق، تعریق عمدتاً در شب انجام شده و آب تعریق‌یافته می‌تواند حاوی املاحی مانند نمک‌ها و قندها باشد. خروج آب به صورت تعریق، نقش چندانی در کنترل دمای گیاه و خنک‌کردن آن ندارد. همچنین ترشح آب، تنها منحصر به برگ‌ها نبوده و در بعضی مواقع از ساقه‌ها و ریشه‌ها نیز صورت می‌گیرد (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۴).

**جدول ۱-۷** مقادیر اجزای تشکیل دهنده پتانسیل آب در جذب غیرفعال و فعال در خاک، پوست و آوند چوب ریشه<sup>۱</sup>.

جذب غیرفعال		جذب فعال یا اسمزی		خاک (ظرفیت زراعی)	پتانسیل
آوند چوب	پوست	آوند چوب	پوست		
-۰٫۰۵	-۰٫۰۵	-۰٫۲	-۰٫۵	-۰٫۰۱	اسمزی
.	.	.	.	-۰٫۰۲	ماتریک
-۰٫۵	-۰٫۳۵	+۰٫۰۵	+۰٫۴	.	فشاری
-۰٫۵۵	-۰٫۴	-۰٫۱۵	-۰٫۱	-۰٫۰۳	پتانسیل آب

۱. تمامی مقادیر پتانسیل برحسب مگاپاسکال است.

فشار ریشه‌ای در گونه‌های گیاهی زیادی مشاهده شده است. میزان ترشح مواد در نتیجه فشار ریشه با اندازه و وضعیت گیاه و عوامل محیطی مانند دما و رطوبت بستگی داشته و در گونه‌های مختلف متفاوت است. مشاهده شده است که میزان ترشح شیره در ساقه نیشکر در مدت ۱۴ ساعت، متجاوز از ۴۰۰ میلی‌متر و در هفته اول پس از قطع قسمت رأس آن، ۱۰۰۰ میلی‌متر است. در نیشکر حداکثر فشار اندازه‌گیری شده، ۰٫۱ مگاپاسکال بود. مشاهده شده است که فشار ریشه‌های پنبه در مزرعه، معادل ۰٫۰۵ تا ۰٫۰۸ مگاپاسکال است.

### ۳-۲-۷ جمع بندی

لازم به ذکر است که نقش و اهمیت اجزای تشکیل دهنده پتانسیل آب در خاک و ریشه، باتوجه به شرایط مختلف، متغیر بوده و این مسئله سبب ایجاد اختلاف در علل جذب آب می‌شود (جدول ۱-۷). به عبارت دیگر، گرچه اختلاف پتانسیل آب دلیل جذب آب توسط ریشه‌های گیاه است، ولی دلیل ایجاد این اختلاف پتانسیل در جذب فعال و غیرفعال متفاوت است. در جذب غیرفعال غلظت املاح شیره آوندی پایین بوده و ایجاد اختلاف پتانسیل به دلیل ایجاد مکش یا فشار منفی در شیره آوندی است که ناشی از پتانسیل فشاری منفی و پدیده تعرق می‌باشد، درحالی‌که در جذب فعال عامل اختلاف پتانسیل آب تجمع املاح در شیره آوندی و پتانسیل اسمزی یا فشار اسمزی است.

به‌طورکلی، جذب فعال آب نسبت به جذب غیرفعال دارای اهمیت ناچیزی بوده و به‌ندرت از چند درصد حجم آب تعرق یافته تجاوز می‌کند. به‌نظر می‌رسد که جذب فعال می‌تواند نقش مهمی در پرکردن مجدد آوندهای چوبی که به‌وسیله حباب‌های هوا که در طی مکش تعرقی شدید یا چرخه‌های یخ‌زدن-ذوب شدن (پدیده حفره‌سازنی یا رگ‌بستگی آوندهای چوبی) ایجاد شده‌اند، داشته باشد (رجوع شود به فصل ۸).

### ۳-۲-۷ مقاومت در برابر جذب آب

سرعت جذب آب به‌مقدار شیب پتانسیل آب و مقاومت خاک و ریشه‌ها درمقابل جریان آب بستگی دارد. درواقع، اختلاف بین جذب و تعرق، به‌علت مقاومتی است که درمقابل حرکت آب در سیستم و

مخصوصاً در سلول‌های ریشه پدید می‌آید. بنابراین، با در نظر گرفتن مقاومت موجود در مسیر جذب آب در خاک و ریشه، میزان جذب آب توسط ریشه به وسیله رابطه ۴-۷ بیان می‌شود (کرامر، ۱۹۹۵):

$$\text{Absorption} = \frac{(\Psi_m + \Psi_s)_{\text{soil}} - (\Psi_p + \Psi_s)_{\text{root}}}{r_{\text{soil}} + r_{\text{root}}} \quad (7-4)$$

مقاومت خاک به طول مسیر حرکت آب از خاک به سطح ریشه (l) و هدایت هیدرولیکی خاک اشباع ( $k_s$ ) یا غیر اشباع ( $k_{(\theta)}$ ) بستگی داشته و به وسیله رابطه ۵-۷ بیان می‌شود (لومیس و کانر، ۱۹۹۲):

$$r_{\text{soil}} = l/k_s \text{ یا } l/k_{(\theta)} \quad (7-5)$$

با افزایش هدایت هیدرولیکی خاک و کاهش طول مسیر جریان، میزان مقاومت خاک کاهش می‌یابد. بدیهی است که اگر ریشه عمیق، پرانشعاب و دارای سطح زیاد باشد، مسیر حرکت آب کوتاه‌تر شده و در نتیجه، جریان آب از خاک به ریشه با سهولت بیشتری صورت خواهد گرفت. مشاهده می‌شود که مقاومت خاک در برابر حرکت آب، بیشتر به میزان رطوبت خاک بستگی دارد؛ در حالی که مقاومت ریشه‌ها بیشتر به میزان خشبی بودن ریشه‌ها و شرایط فیزیکی پروتوپلاسم بستگی دارد. عمق ریشه‌دهی، تراکم طول ریشه (انشعابات) و هدایت هیدرولیکی ریشه (سطح ریشه) مهمترین عوامل مؤثر بر مقدار مقاومت ریشه در برابر جریان آب هستند (رابطه ۶-۷) (لومیس و کانر، ۱۹۹۲):

$$r_{\text{root}} = \frac{1}{L_v \cdot \Delta Z \cdot K_r} \quad (7-6)$$

که در آن،  $L_v$  تراکم طول ریشه،  $\Delta Z$  عمق ریشه‌دهی و  $K_r$  هدایت هیدرولیکی ریشه هستند. با افزایش هدایت هیدرولیکی ریشه، طول و عمق ریشه، مقاومت ریشه کمتر و جریان آب درون آن سهل‌تر صورت می‌گیرد. با افزایش تخلیه رطوبت از منافذ خاک، مقاومت خاک در مقابل حرکت آب به سمت ریشه افزایش می‌یابد. قسمت اعظم مقاومت ریشه در مقابل حرکت آب در سلول‌های زنده آن رخ می‌دهد. مشاهده شده است که مرگ سلول‌های ریشه، مقاومت در برابر ورود آب به طریقه انتشار را کاهش می‌دهد. همچنین، قطع ریشه‌ها منجر به افزایش موقتی میزان جذب آب می‌گردد. گزارش شده است که ترکیباتی مثل اسید سولفونیک، مقاومت ریشه‌ها در برابر حرکت آب را کاهش می‌دهد که به دلیل تأثیر این اسید بر لایه‌های چربی غشای سیتوپلاسمی و صدمه‌ای که به ریشه‌ها می‌زند، است.

## ۷-۴ عوامل مؤثر بر جذب آب

عوامل مؤثر بر جذب آب، شامل عوامل مؤثر بر اختلاف پتانسیل آب از خاک به ریشه‌ها و از ریشه‌ها به داخل آوندها و همچنین عوامل مؤثر بر میزان مقاومت خاک و ریشه‌ها در مسیر جریان آب می‌باشد. عواملی، مانند بافت خاک و هدایت هیدرولیکی، از طریق تأثیر بر مقاومت خاک و سطح ریشه‌ها بر جذب آب مؤثر هستند. عواملی، مانند تهویه و دمای خاک و میزان چوبی بودن ریشه‌ها، از طریق تغییر مقاومت ریشه‌ها بر جذب آب مؤثرند. به هر حال، تأثیر ریشه‌ها بر جذب آب بیشتر به میزان انتشار و نفوذپذیری

ریشه‌ها بستگی دارد. به‌طورکلی، عوامل مؤثر بر جذب آب را می‌توان به دو دسته عوامل درونی و بیرونی تقسیم کرد (کرامر، ۱۹۹۵).

#### ۷-۴-۱ عوامل درونی مؤثر بر جذب

##### گسترده‌گی، سطح و عمق سیستم ریشه

افزایش گسترده‌گی، سطح و عمق ریشه سبب کاهش مقاومت و افزایش جذب آب می‌شود. معمولاً وجود ریشه‌های بزرگتر سبب اشغال حجم بزرگتری از خاک توسط سیستم ریشه‌ای گیاه شده و در نتیجه، حجم بیشتری از آب در دسترس آن می‌باشد. همچنین، وجود سیستم ریشه‌ای عمیق و گسترده این امکان را می‌دهد که حجم آب مورد استفاده در هر نوبت آبیاری، افزایش یافته و فاصله زمانی بین دو نوبت آبیاری بیشتر گردد. در درختان، گرچه معمولاً میزان نفوذپذیری ریشه‌های چوبی کمتر از ریشه‌های جوان‌تر است، ولی به دلیل سطح زیاد ریشه‌های چوبی، که در تماس با خاک و آب می‌باشد، نقش آن‌ها در جذب آب بسیار زیاد است. لازم به ذکر است که به‌طورکلی در گیاهان، سطح ریشه‌ها بسیار بزرگتر از سطح برگ‌ها است. به‌عنوان مثال، مشاهده شده است که در چاودار زمستانه چهارماهه، سطح ریشه‌ها ۵۰ برابر بزرگتر از سطح برگ‌ها است. در گونه‌های چوبی سطح ریشه‌ها حدوداً ۵۰ برابر سطح برگ‌ها و بین ۳۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متر بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. در گونه‌های علفی، سطح ریشه حدوداً بین ۱۰۰ تا ۴۰۰۰ سانتی‌متر بر سانتی‌متر مربع است (کرامر، ۱۹۹۵).

نکته قابل توجه این است که گسترده‌گی، سطح، عمق و مقدار انشعابات ریشه‌ها، بین گونه‌های گیاهی و حتی ارقام مختلف یک گونه متفاوت است و این مسئله سبب اختلاف تحمل گونه‌ها و ارقام نسبت به تنش خشکی می‌شود. به‌عنوان مثال، دوبرابر بودن حجم ریشه‌های نازک در ذرت خوشه‌ای نسبت به ذرت معمولی، سبب تحمل بیشتر ذرت خوشه‌ای نسبت به تنش کمبود آب می‌شود (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

##### نفوذپذیری ریشه

به‌طورکلی، میزان نفوذپذیری ریشه‌ها نسبت به آب متغیر بوده و به سن ریشه، شرایط محیطی و فعالیت ریشه بستگی دارد. در یک سیستم ریشه‌ای، از آنجایی که مراحل مختلف با میزان تمایز دیدگی متفاوت وجود دارد، میزان نفوذپذیری قسمت‌های مختلف آن بسیار متغیر است. به‌عنوان مثال، میزان نفوذپذیری ریشه‌های تازه نسبت به ریشه‌هایی که رشد ثانویه را طی کرده و چوب‌پنبه‌ای شده‌اند، متفاوت است. معمولاً میزان نفوذپذیری ریشه‌های مویی و ریشه‌های جوان چوب‌پنبه‌ای نشده بسیار بیشتر از ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای شده است، گرچه از ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای شده نیز مقدار قابل ملاحظه‌ای آب و املاح جذب می‌شود. به‌هر حال، باتوجه به اینکه در گیاهان چندساله، ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای نشده تنها بخش کوچکی از سیستم ریشه این گیاهان را تشکیل می‌دهد، بنابراین، جذب آب توسط ریشه‌های چوب‌پنبه‌ای شده مهم است (کرامر، ۱۹۹۵).

## ۲-۴-۷ عوامل بیرونی مؤثر بر جذب آب

عوامل محیطی از طریق اثر بر نیروی محرک جذب آب و میزان مقاومت موجود در مسیر، بر جذب آب مؤثر هستند. دما، خشکی، شوری و تهویه خاک مهمترین عوامل محیطی مؤثر بر جذب آب هستند.

### دمای خاک

دمای خاک به طور مستقیم و غیرمستقیم بر جذب آب مؤثر است. کاهش قابلیت دسترسی به آب در خاک‌های سرد یا یخ‌زده یکی از عوامل محدودکننده رشد گیاهان در مناطق قطبی است. کم‌بودن دمای خاک، باعث کاهش رشد ریشه، افزایش ویسکوزیته آب (ویسکوزیته آب در صفر درجه سانتی‌گراد دوبرابر ویسکوزیته آن در  $25^{\circ}\text{C}$  است)، افزایش مقاومت ریشه‌ها در مقابل حرکت آب (به دلیل کاهش نفوذپذیری غشاهای سلولی و اثرات افزایش ویسکوزیته) و کاهش فعالیت‌های متابولیکی سلول‌های ریشه می‌گردد. در خاک‌های سرد و مرطوب، درجه حرارت پایین و شرایط تهویه ضعیف می‌تواند سبب کاهش نفوذپذیری ریشه و افزایش مقاومت ریشه در برابر جریان آب شود (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶). دماهای بالا نیز می‌تواند سبب کاهش جذب آب شود. در گوجه‌فرنگی حداکثر میزان ترشحات ریشه در  $24^{\circ}\text{C}$  اتفاق افتاد و با افزایش دما میزان این ترشحات کاهش یافت که به دلیل کاهش جذب آب و املاح در درجه حرارت‌های بالا بود. البته افزایش دما به نحوی که مانع جذب آب گردد، فقط در مورد ریشه‌هایی که در خاک‌های سطحی و گلدان‌هایی که در معرض تابش آفتاب قرار گرفته بودند، صورت پذیرفت (کرامر، ۱۹۹۵).

### خشکی، شوری و تهویه خاک

وجود شرایط تنش‌زا مانند خشکی و شوری خاک سبب کاهش نفوذپذیری ریشه‌ها نسبت به آب می‌شود. کاهش رطوبت خاک پتانسیل آب را کاهش داده و در نتیجه از طریق افزایش مقاومت خاک و ریشه سبب کاهش جذب آب می‌شود. افزایش مقاومت خاک با خشک شدن آن، به دلیل خالی شدن منافذ بزرگتر از آب است. افزایش سوبرینی شدن ریشه‌ها در خاک‌های در حال خشک شدن نیز می‌تواند سبب کاهش نفوذپذیری ریشه و افزایش مقاومت در برابر جریان آب گردد (اشتودل، ۲۰۰۰).

شوری و تجمع زیاد املاح علاوه بر ایجاد خسارت بر سلول‌های گیاهی و بازدارندگی فعالیت‌های متابولیکی، می‌تواند سبب کاهش رشد ریشه و همچنین کاهش نفوذپذیری آن شود (مونس، ۲۰۰۲). احتمالاً آب‌کشیدگی<sup>۱</sup> سلول‌های ریشه و افزایش چوب‌پنبه‌ای شدن آن‌ها و همچنین توقف رشد ریشه در طولانی مدت، دلیل اصلی کاهش نفوذپذیری ریشه‌ها در شرایط تنش است. غرقاب شدن و تهویه کم خاک نیز از طریق کاهش اکسیژن مورد نیاز برای تنفس ریشه‌ها می‌تواند سبب کاهش نفوذپذیری ریشه‌ها شود. فشرده‌گی خاک‌های زراعی، که معمولاً بر اثر تردد زیاد ماشین‌آلات کشاورزی به خصوص در خاک‌های



بارطوبت زیاد و بافت سنگین حاصل می شود، می تواند سبب کاهش تهویه خاک، افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک، کاهش نفوذ ریشه و در نتیجه کاهش جذب آب توسط گیاه شود (کرامر، ۱۹۹۵).

نکته قابل توجه این است که این عوامل می توانند به صورت چندگانه وجود داشته و اثرات یکدیگر را تشدید کنند. به عنوان مثال، دماهای بالا می تواند سبب تشدید خسارت غرقاب در گونه های درختی شود. به نظر می رسد که افزایش فعالیت های متابولیکی با افزایش دما و در نتیجه نیاز بیشتر گیاه به اکسیژن دلیل اصلی این مسئله باشد. فعالیت متابولیکی ریشه در نفوذ پذیری آن نسبت به آب نقش دارد. ملاحظه شده است که اگر با مواد بازدارنده ای مانند آزید (Azide)، سیانید (Cyanide) و دی نیتروفنول (Dinitrophenol) تنفس ریشه باز داشته شود، جذب اسمزی و غیرفعال کاهش می یابد. کاهش جذب اسمزی یا فعال به دلیل افزایش مقاومت و همچنین کاهش تجمع املاح در آوند چوب ریشه و فضای آپوپلاست و کاهش جذب غیرفعال به دلیل افزایش مقاومت در برابر جریان آب است (کرامر، ۱۹۹۵).

# حرکت آب در گیاه

در این فصل می‌خوانیم:

- ۸-۱ ساختار سیستم هادی
- ۸-۲ نیروی محرکه در انتقال آب
- ۸-۳ سرعت جریان
- ۸-۴ مقاومت در برابر حرکت
- ۸-۵ کارایی سیستم هادی
- ۸-۶ حرکت آب در برگ‌ها
- ۸-۷ مقایسه مقاومت‌ها از خاک تا محل تبخیر
- ۸-۸ کنترل جریان

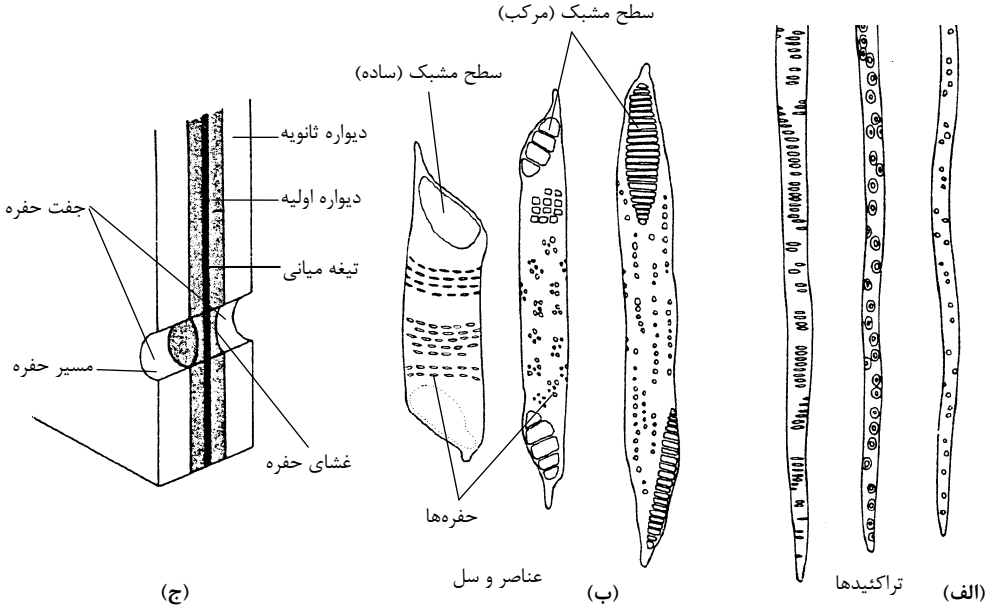
## مقدمه

جهت رساندن آب و املاح جذب‌شده توسط ریشه به اندام‌های هوایی و برگ‌ها، وجود یک سیستم انتقال ضروری است. این سیستم انتقال در گیاهان، شامل اجزای مختلفی می‌باشد. در این فصل، ساختار سیستم انتقال آب در گیاه، نیروی محرکه، سرعت و حجم جریان و میزان مقاومت در طی مسیر انتقال آب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

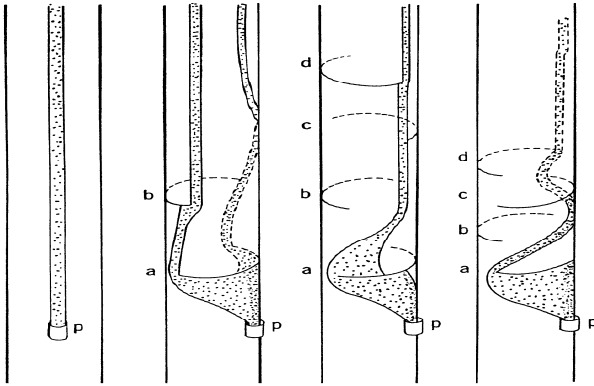
## ۸-۱ ساختار سیستم هادی

آوندهای چوبی شامل چهار نوع سلول تراکتید (Tracheids)، عناصر وسل (Vessel)، فیبر (Fibers) و پارانیشیم آوند چوب<sup>۱</sup> می‌باشند، که از بین این سلول‌ها تراکتیدها و وسل‌ها دارای آرایش عمودی بوده و در کار انتقال آب دخالت دارند (شکل ۸-۱). در آوند چوب، مخصوصاً در درختان، فقط سلول‌های پارانیشیمی زنده هستند. البته سلول‌های فیبر و پارانیشیم در آوند آبکش نیز دیده می‌شوند. سیستم آوند چوب دارای انشعاب‌ها و شاخه‌های متعددی است که انتقال ایمن آب به شاخ و برگ گیاه را تضمین می‌کند، بدین ترتیب که اگر بخشی از آوندها صدمه ببیند، بقیه آن‌ها کار انتقال آب را انجام می‌دهند (شکل‌های ۸-۲ و ۸-۳) (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

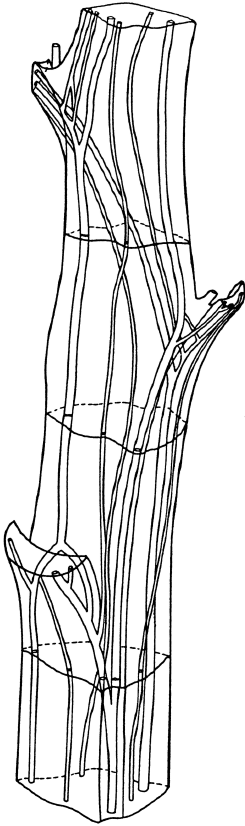
1. Xylem parenchyma



شکل ۸-۱ مقایسه ساختمان تراکئیدها و عناصر و سل که در انتقال آب در آوند چوبی نقش دارند. (الف) تراکئیدها سلول‌هایی طولی، توخالی، با دیواره‌ای شدیداً چوبی‌شده و مرده هستند که تقریباً در تمام گیاهان آوندی وجود دارند؛ (ب) عناصر و سل سلول‌های مرده‌ای هستند که از طریق شبکه‌های مشبک به‌همدیگر متصل بوده و عمدتاً در نهان‌دانگان وجود دارند؛ (ج) عناصر آوندی از طریق حفره‌های بسیار زیاد موجود در دیواره آن‌ها با همدیگر و یا با تراکئیدها متصل هستند. این حفره‌ها منافذ پیت نامیده شده و دارای دیواره اولیه هستند، ولی دیواره ثانویه ندارند (کافی و همکاران، ۱۳۷۸).



شکل ۸-۲ نحوه انتقال فسفر نشان‌دار شده در تنه کاج و در شرایطی که برخی از قسمت‌های سیستم آوندی قطع شده است، مشاهده می‌شود. از آنجایی که دیواره‌های عناصر آوندی از طریق منافذ پیت به‌هم متصل بوده و از طریق این منافذ ارتباطات جانبی آب صورت می‌گیرد، با قطع قسمت‌هایی از تنه، فسفر از طریق عناصر آوندی مجاور منتقل می‌شود (کرامر، ۱۹۹۵).



**شکل ۳-۸** اتصالات و سیستم آوندهای چوبی در ساقه سیب زمینی (یک گیاه نهان دانه). عناصر آوندی دارای آرایش عمودی بوده و سبب انتقال آب و املاح می‌شوند (کرامر، ۱۹۹۵).

در حالی که تقریباً کلیه نهان‌دانگان<sup>۵</sup> و گیاهان گلدار، دارای هم تراکئید و هم وسل می‌باشند. گاهی در تراکئیدها و وسل‌ها ضخیم شدن مارپیچی نیز مشاهده می‌شود.

گرچه در نهان‌دانگان عناصر وسلی با قطر حدود ۵۰۰ و حتی ۸۰۰ میکرومتر نیز مشاهده شده است، ولی به‌طور معمول قطر عناصر وسل بین ۴۰ تا ۸۰ میکرومتر است. لازم‌به‌ذکر است که عموماً تراکئیدها درازتر و باریکتر از عناصر وسل بوده و قطر آنها بین ۱۰ تا ۲۵ میکرومتر و طول آنها معمولاً کمتر از ۵ میلی‌متر است (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

وسل‌ها و تراکئیدها سلول‌های طولی و مرده‌ای هستند که بعد از رشد و تمایز، بخش‌های حیاتی آنها از بین رفته و پروتوپلاست آنها توسط سلول‌های دیگر جذب می‌شود. قبل از مرگ، تغییرات مهمی در دیواره سلولی آنها رخ می‌دهد که از نقطه‌نظر جریان آب مهم می‌باشد. یکی از این تغییرات، تشکیل دیواره ثانویه<sup>۱</sup> است که عمدتاً از سلولز، لیگنین و همی سلولز تشکیل شده و بخش بزرگی از دیواره اولیه<sup>۲</sup> را می‌پوشاند. تشکیل دیواره ثانویه، باعث استحکام وسل‌ها و تراکئیدها شده و از درهم‌ریختن آنها، که معمولاً تحت مکش‌های زیاد در آوند چوب به‌وجود می‌آید، جلوگیری می‌کند.

دیواره ثانویه لیگنینی شده مانند دیواره اولیه نسبت به آب نفوذناپذیر است، اما در آن منافذی<sup>۳</sup> به‌وجود می‌آید که از طریق آن منافذ دو سلول تراکئید یا وسل مجاور هم، تنها توسط دیواره اولیه از هم جدا شده‌اند. معمولاً این منافذ ساده بوده و شامل یک گودال گرد در

دیواره ثانویه هستند، ولی گاهی در تراکئیدها و وسل‌ها منافذی با ساختارهای پیچیده نیز مشاهده می‌شود. به‌طور کلی، بازدانگان<sup>۴</sup> شامل مخروطیان، کاجیان و وابستگان آنها فقط دارای تراکئید هستند،

1. Secondary wall
2. Primary wall
3. pits
4. Gymnosperms
5. Angiosperms

سلول‌های تراکئید، دارای دنباله‌های باریک‌شده‌ای هستند که منافذ یا پیت‌های موجود در این دنباله‌های باریک اجازه عبور آب از یک تراکئید به تراکئید بعدی را می‌دهند (شکل ۱-۸). تعداد زیاد منافذ موجود در تراکئیدها، عبور آب از یک تراکئید به تراکئید دیگر را تسهیل می‌کند. وسل‌ها در دو انتهای خود دارای صفحات سوراخ‌دار<sup>۱</sup> هستند. این صفحات سوراخ‌هایی دارند که دارای دیواره ثانویه نبوده و دیواره اولیه و غشای میانی<sup>۲</sup> آن‌ها نیز حل شده است. عناصر وسل که به این ترتیب به هم متصل می‌شوند، لوله‌های طولی را می‌سازند که وسل نامیده شده و از چند سانتی‌متر تا چند متر در درختان بلندقامت طول دارد. به دلیل وجود عناصر وسل در نهان‌دانگان و باتوجه به اینکه این عناصر قطر بیشتری نسبت به تراکئیدها دارند و همچنین وجود صفحات سوراخ‌دار در آن‌ها، مقاومت در برابر جریان آب در نهان‌دانگان خیلی کمتر از بازدانگان است. بنابراین، حرکت و انتقال آب در آوندهای چوبی نهان‌دانگان با سهولت و سرعت بیشتری نسبت به بازدانگان صورت می‌گیرد (شکل ۳-۸). البته لازم‌به‌ذکر است که قطر بیشتر وسل‌ها همیشه به‌عنوان یک مزیت نبوده و سبب می‌شود تا این عناصر راحت‌تر از تراکئیدها دچار پدیده حفره‌سانی<sup>۳</sup> یا رگ‌بستگی<sup>۴</sup> آوندها شوند. در این حالت، سلول از بخار یا حباب‌های هوا پر شده و قادر به انتقال آب نیست (کرامر، ۱۹۹۵، کوچکی و همکاران، ۱۳۸۴).

## ۲-۸ نیروی محرکه در انتقال آب

در رابطه با علت صعود شیره خام در آوند چوب، چند تئوری مطرح است که شامل تئوری موینگی، تئوری فشار ریشه و تئوری کوهیژن می‌باشد (کرامر، ۱۹۹۵). باتوجه به رابطه ۶-۲ (فصل ۲) و با قراردادن قطر تیپیک آوند چوب، ارتفاع صعود حدود ۰/۷۵ متر می‌باشد و بنابراین تئوری موینگی برای انتقال آب از آوند چوب مناسب نیست.

لازم‌به‌ذکر است که گرچه با قراردادن قطر منافذ دیواره‌ها ارتفاع صعود می‌تواند از نظر تئوری به سه کیلومتر نیز برسد (به فصل ۲ رجوع شود)، ولی از آنجایی که این منافذ بسیار ریز و میزان آب عبور کرده از آن‌ها بسیار پایین است و از طرفی صعود آب به طریق موینگی به چنین ارتفاعی تنها وقتی امکان‌پذیر است که آب خالص بوده و فاقد املاح باشد، درحالی‌که آب موجود در خاک و آوند چوب خالص نیست، بنابراین، تئوری موینگی پاسخگوی انتقال آب از آوند چوب نخواهد بود. همچنین، از آنجایی که فشار ریشه تنها در شرایط خاصی که جذب اسمزی برقرار است، صادق بوده و برای ارسال آب برای درختان کافی نمی‌باشد، تئوری فشار ریشه نیز جهت انتقال آب از آوند چوب مناسب و کافی نیست. بنابراین، امروزه نظریه پذیرفتنی، نظریه کوهیژن است.

---

1. Perforation plates  
2. Middle lamella  
3. Cavitation  
4. Embolism

ویژگی‌های تئوری کوهیژن در رابطه با مکانیسم انتقال آب در آوند چوب عبارت‌اند از (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶):

(۱) آب، دارای نیروی کوهیژن و استحکام کششی بالایی بوده و وقتی در لوله‌ای باریک، مثل عناصر آوند چوب، قرار می‌گیرد می‌تواند تا کشش ۳ و حتی ۳۰ مگاپاسکال را قبل از پاره شدن ستون آب، تحمل کند.

(۲) آب در گیاه، یک سیستم پیوسته را تشکیل داده و از دیواره‌های سلولی اشباع از آب سلول‌های برگ تا آوند چوب و از آنجا تا سطوح جذب‌کننده آب در ریشه‌ها امتداد دارد. در واقع، یک طرف ستون آب در فضاهای بین‌سلولی دیواره سلول‌های تبخیرکننده و طرف دیگر آن در فضاهای بین‌سلولی دیواره سلول‌های جذب‌کننده آب می‌باشد.

(۳) تبخیر آب از سلول‌های برگ، پتانسیل آب دیواره‌های سلولی را کاهش داده و باعث می‌شود تا آب از آوند چوب به سطوح تبخیرکننده به حرکت درآید. این امر باعث کاهش فشار شیره آوند چوب شده و در نتیجه در سیستم هیدرولیک پیوسته گیاه، مکش ایجاد می‌شود.

(۴) کاهش پتانسیل آب در سطوح تبخیری به ریشه‌ها منتقل شده و در آنجا سبب ورود آب از خاک به ریشه می‌شود. بنابراین، در گیاهان در حال تعرق جذب آب توسط سرعت تعرق کنترل می‌شود. ایجاد مکش یا فشار منفی یا پتانسیل فشاری در سطوح تبخیر دیواره‌های سلولی از رابطه ۲-۲۲ (فصل ۲) تبعیت می‌کند که به آن کشش تعرقی<sup>۱</sup> نیز می‌گویند.

پس زمانی که تعرق صورت می‌گیرد پتانسیل فشاری منفی یا مکش ایجاد شده به وسیله تعرق، عامل انتقال و در موقع عدم تعرق و یا تعرق کند، پتانسیل فشاری مثبت عامل انتقال آب و نیروی محرکه مسیر است. در شرایطی که تعرق ناچیز باشد، چنان‌که در قسمت ۲-۳-۷ (فصل ۷) توضیح داده شد، پتانسیل فشاری مثبت در آوند چوبی ریشه ایجاد می‌گردد که خود این پتانسیل فشاری مثبت می‌تواند آب را در آوند چوب به سمت بالا پمپ کند.

بنابراین، به‌طور کلی نیروی محرک جریان در آوند چوب اساساً اختلاف فشار یا پتانسیل فشاری بوده و به وسیله رابطه ۱-۸ قابل بیان است (نوبل، ۱۹۹۴):

$$Q = \frac{\Delta\Psi_p}{R_{xylem}} = \frac{\Delta P}{R_{xylem}} \quad (۸-۱)$$

که در آن، Q میزان یا سرعت جریان آب در آوندهای چوبی (برحسب مترمکعب بر مترمربع در ثانیه یا متربرثانیه)،  $\Delta\Psi_p$  به ترتیب اختلاف فشار و اختلاف پتانسیل فشاری (برحسب مگاپاسکال) و R مقاومت آوند چوب در مسیر جریان است. مجدداً خاطر نشان می‌شود در شرایطی که تعرق اندک بوده و شرایط جذب اسمزی آب برقرار باشد، پتانسیل فشاری ریشه مثبت‌تر شده و در نتیجه این مسئله سبب

انتقال آب به بالا می‌شود. اگر تعرق بالا بوده و شرایط جذب غیرفعال برقرار باشد، پتانسیل فشاری منفی تر ایجاد شده در آوندهای چوب برگ، عامل حرکت آب است.

بدیهی است که در عموم مواقع پتانسیل فشاری منفی یا کشش تعرقی عامل اصلی حرکت آب در آوند چوب است. در واقع، براساس نظریه کوهیژن عامل اصلی صعود آب در آوندهای چوبی، کشش تعرقی ایجاد شده در اثر نیاز اتمسفر است که باتوجه به استقامت زیاد آب در مقابل پاره شدن، سبب انتقال آب به سمت برگ‌ها می‌شود.

### ۳-۸ سرعت جریان

سرعت جریان آب در آوندهای چوب گیاهان را می‌توان به وسیله رابطه هاگن-پوازیه (Hagen-Poiseuille) که جریان آب در لوله‌های باریک را توصیف می‌کند، بیان کرد (نوبل، ۱۹۹۴: رابطه ۲-۸):

$$Q = -\frac{r^4}{8\eta L} \Delta P \quad (۸-۲)$$

در این رابطه Q میزان یا سرعت جریان آب در آوندهای چوبی (برحسب مترمکعب بر مترمربع در ثانیه یا متربرثانیه)،  $\Delta P$  اختلاف فشار (برحسب پاسکال)، L طول عنصر آوندی که عمل انتقال انجام می‌گیرد (برحسب متر) و  $\eta$  ثابت ویسکوزیته (برحسب پاسکال ثانیه) می‌باشد. چنانچه سرعت جریان در چند رشته آوند مدنظر باشد، تعداد رشته (n) نیز به رابطه ۲-۸ اضافه می‌شود.

حجم آب انتقال یافته در آوندهای چوبی گیاهان باتوجه به رابطه ۳-۸ بیان می‌شود (نوبل، ۱۹۹۴):

$$VFR = -\frac{\pi r^4}{8\eta L} \Delta P \quad (۸-۳)$$

که در آن، VFR حجم آب انتقال یافته (برحسب مترمکعب بر ثانیه) است. مشاهده می‌شود که حجم آب انتقال یافته یا میزان هدایت هیدرولیکی با توان چهارم شعاع آوند متناسب بوده و با افزایش قطر آوند به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است از آنجایی که دما بر ویسکوزیته آب مؤثر است، افزایش دما با کاهش پیوندهای هیدروژنی و کاهش ویسکوزیته آب، سبب افزایش سرعت جریان آب در آوندهای چوبی می‌شود.

**مثال (کرامر، ۱۹۹۵)** فرض می‌کنیم یک گیاه ذرت ۲ مترمربع سطح برگ (هر دو طرف برگ)، ۲ مترمربع سطح جذب ریشه و ساقه‌ای به قطر ۲ سانتی‌متر داشته باشد و مقطع عرضی آوند چوب آن ۰٫۲ سانتی‌مترمربع است. این گیاه را درحالی که با سرعت ۲۰۰ گرم بر ساعت تعرق می‌کند در نظر می‌گیریم. سرعت جریان آب در برگ و ریشه برابر است با:

$$۲۰۰ \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1} : (۲ \times ۱۰۰۰۰ \text{ cm}^2) = ۰٫۰۱ \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \text{ یا } \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$$

سرعت جریان آب در آوند چوب برابر است با:

$$۲۰۰ \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1} : ۰٫۲ \text{ cm}^2 = ۱۰۰۰ \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \text{ یا } \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$$

## جدول ۸-۱ مقادیر سرعت جریان آب در آوند چوبی چند گونه گیاهی.

گونه گیاهی	روش	سرعت جریان (متر بر ساعت)
پنبه	پالس حرارتی	۰٫۸-۱٫۱
کاجیان	پالس حرارتی	۰٫۵
<i>Quercus pedunculata</i>	پالس حرارتی	۴۳٫۶
<i>Quercus macrocarpa</i>	Rb <sup>۸۶</sup>	۲۷٫۵-۶۰
<i>Pinus tateda</i>	P <sup>۳۲</sup>	۱٫۲
<i>Juniperus osteosperma</i>	پالس حرارتی	۰٫۲۵

مشاهده می‌شود که سرعت جریان آب در ریشه و برگ اندک بوده و آب با همان سرعتی که از برگ تبخیر می‌شود وارد ریشه نیز می‌شود. اما برخلاف ریشه و برگ، سرعت جریان آب برای آوند چوب بسیار بالا و معادل ۱۰۰۰۰ سانتی‌متر بر ساعت است. به عبارت دیگر، میزان سرعت انتقال آب در ساقه حدود ۱۰۰۰۰۰ برابر ورود آب در ریشه و خروج آب از برگ‌ها می‌باشد. به‌طور کلی، سرعت انتقال آب در آوند چوب گیاهان چوبی<sup>۱</sup> زیاد و اغلب بیشتر از ۲۵۰۰ سانتی‌متر بر ساعت می‌باشد.

**مثال** (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶) فرض کنید یک تراکئید با قطر ۲۰ میکرومتر و دو وصل با قطر ۴۰ و ۸۰ میکرومتر داشته باشیم. نسبت قطر آن‌ها به ترتیب ۲، ۱ و ۴ می‌باشد. مطابق معادله ۳-۸ حجم آب منتقل شده در هر رشته در واحد زمان دارای نسبت‌های ۱، ۱۶ و ۲۵۶ خواهد بود. یعنی با ثابت بودن کلیه شرایط VFR در وصل ۸۰ میکرومتری ۲۵۶ برابر VFR تراکئید ۲۰ میکرومتری خواهد بود. به همین ترتیب، بنابر معادله ۲-۸ بین سرعت جریان در این سه تراکئید و وصل نسبت ۱، ۴ و ۱۶ برقرار می‌باشد.

برای درک بهتر موضوع، مقادیر سرعت جریان انتقال آب و املاح همراه آن در آوند چوبی چندگونه گیاهی که با روش‌های مختلفی اندازه‌گیری شده، در جدول ۸-۱ آورده شده است. روش پالس گرمایی یا ترموالکتریک و تزریق مواد رنگی و رادیواکتیو از متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری سرعت انتقال آب در آوندهای چوبی می‌باشند.

گیاهان از نظر طول و قطر آوند چوبی و در نتیجه سرعت جریان آب و میزان هدایت هیدرولیکی به‌طور قابل‌توجهی بایکدیگر اختلاف دارند. به‌عنوان مثال، گرچه موها دارای ساقه‌های نسبتاً باریکی هستند، ولی در مقایسه با گونه‌های خویشاوند یا گونه‌هایی که از آن‌ها بالا می‌روند، دارای آوندهایی طویل و با قطر بزرگتری هستند. این مسئله سبب می‌شود که سرعت جریان آب در موها بسیار بیشتر از گیاهان دیگر باشد (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۴) (جدول ۲-۸).



## جدول ۲-۸ اختلاف بین گونه‌ها از نظر قطر آوند چوبی، سرعت جریان و میزان هدایت هیدرولیکی.

گونه گیاهی	قطر آوند (میکرومتر)	هدایت هیدرولیکی (مترمربع بر ثانیه در مگاپاسکال)	حداکثر سرعت جریان (میلی متر بر ثانیه)
کاج‌های همیشه‌سبز	> ۳۰	۵-۱۰	۰٫۳-۰٫۶
اسکلروفیل‌های نواحی مدیترانه‌ای	۵-۷۰	۲-۱۰	۰٫۱-۰٫۴
کاج‌های با منافذ پراکنده <sup>۱</sup>	۵-۶۰	۵-۵۰	۰٫۲-۱٫۷
کاج‌های با منافذ حلقوی <sup>۲</sup>	۵-۱۵۰	۵۰-۵۰۰	۱٫۱-۱۲٫۱
علف‌ها	-	۳۰-۶۰	۳-۱۷
موها	۲۰۰-۳۰۰	۳۰۰-۵۰۰	۴۲

لازم به ذکر است که آب می‌تواند در جهت معکوس نیز در آوندها جریان داشته باشد (کرامر، ۱۹۹۵). مشاهده شده است که گاهی در یک شاخه، جریان روبه پایین و در شاخه دیگری که تعلق سریع‌تری داشته است، جریان روبه بالا وجود دارد. در بعضی مواقع، پس از یک بعدازظهر بارانی و به دنبال یک دوره تعلق سریع، حرکت روبه پایین آب در تنه درختان مشاهده می‌شود. در واقع، تحت چنین شرایطی آب از برگ‌ها به ریشه و از ریشه به خاک خشک انتقال می‌یابد.

## ۴-۸ مقاومت در برابر حرکت

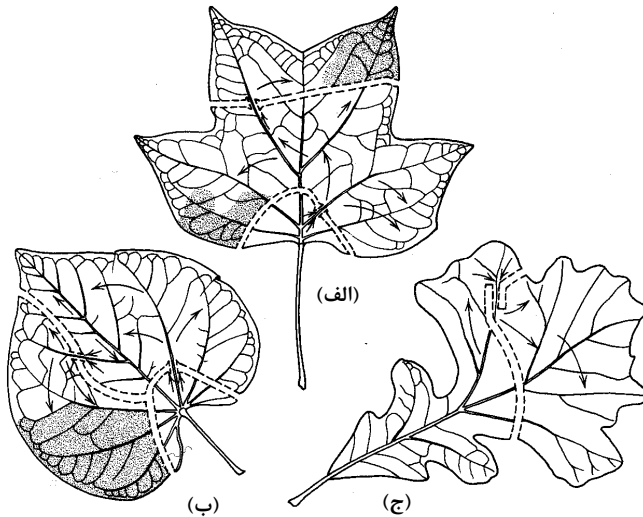
حرکت آب در طی مسیر جریان رابطه معکوسی با میزان مقاومت موجود در مسیر دارد. این مقاومت می‌تواند در نقاط مختلف مسیر مانند ریشه، ساقه و برگ وجود داشته باشد، گرچه میزان آن در ریشه و برگ به مقدار قابل توجهی بیشتر از ساقه است. به طور کلی، مقاومت در برابر جریان آب در آوند چوب را می‌توان با استفاده از رابطه ۴-۸ بیان نمود (نوبل، ۱۹۹۴):

$$R_{\text{xylem}} = \frac{\Delta P}{Q} = \frac{\eta L}{r^4} \quad (۴-۸)$$

که در آن،  $R_{\text{xylem}}$  مقاومت آوند چوبی،  $\Delta P$  اختلاف فشار،  $Q$  میزان یا سرعت جریان،  $L$  طول عنصر آوندی،  $r$  شعاع عنصر آوندی و  $\eta$  ثابت ویسکوزیته می‌باشند. این رابطه از رابطه ۲-۸ به دست آمده است. با افزایش ویسکوزیته ( $\eta$ ) و همچنین افزایش طول مسیر جریان ( $L$ ) میزان مقاومت آوند چوب افزایش می‌یابد، در حالی که افزایش شعاع عنصر آوندی ( $r$ ) می‌تواند سبب کاهش قابل ملاحظه مقاومت شود. بدیهی است که با افزایش تعداد لوله‌های انتقالی، میزان مقاومت کاهش و در نتیجه سرعت انتقال آب افزایش می‌یابد (رابطه ۵-۸):

$$R_{\text{xylem}} = \frac{\eta L}{nr^4} \quad (۵-۸)$$

1. Diffuse-porous  
2. Ring-porous



شکل ۴-۸ کارایی شبکه رگبرگها در رساندن آب به بخش‌های مختلف برگ سه گونه گیاهی، در شرایطی که بخشی از آن‌ها قطع شده‌اند. مشاهده می‌شود که قطع تعدادی از رگبرگها و حتی رگبرگ اصلی سبب توقف انتقال آب به آن قسمت از برگ نشده و به دلیل وجود شبکه رگبرگها و در واقع کارایی بالای آن‌ها، رگبرگهای دیگر به انتقال آب به تمام قسمت‌های برگ کمک می‌کنند. خطوط نقطه‌چین، مکان برش رگبرگها و پیکان‌ها جهت کلی انتقال آب را نشان می‌دهند. مکان‌های سایه‌دار، نشان‌دهنده بافت‌هایی هستند که به دلیل آب‌کشیدگی از بین رفته‌اند. آزمایش نشان‌دهنده ظرفیت بالای رگبرگهای کوچک در انتقال آب به نقاط مختلف برگ است. (الف) گونه *Liriodendron tulipifera*، (ب) گونه *Cercis canadensis*، و (ج) گونه *Quercus velutina*. (کرامر، ۱۹۹۵).

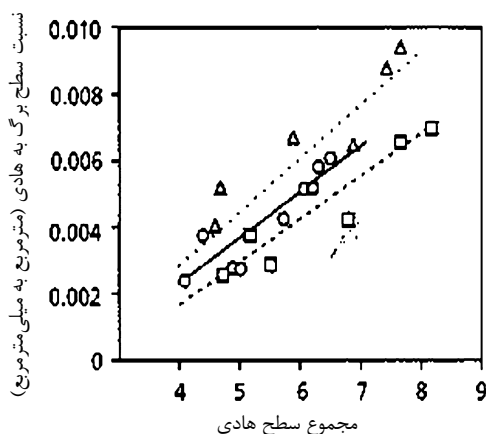
که در آن،  $n$  تعداد عناصر یا لوله‌های آوندی انتقال آب است. لازم به ذکر است که معمولاً مقاومت طولی در انتقال آب در آوند چوب ناچیز است و به ندرت برای عرضه آب به اندام‌های هوایی (برگ‌ها) محدودکننده می‌باشد.

## ۸-۵ کارایی سیستم هادی

کارایی سیستم هادی باتوجه به گونه گیاهی و شرایط رشد متغیر بوده و به‌طور معمول در موها بیشتر از گونه‌های گیاهی دیگر است. این مسئله به دلیل وجود آوندهایی با قطر بیشتر (باتوجه به رابطه ۳-۸) در موها می‌باشد. شکل ۴-۸ کارایی شبکه رگبرگها در رساندن آب به بخش‌های مختلف برگ را نشان می‌دهد. برای بررسی کارایی سیستم هادی انتقال آب، اغلب از دو معیار مهم هدایت ویژه<sup>۱</sup> و سطح هادی نسبی<sup>۲</sup> استفاده می‌شود (کرامر، ۱۹۹۵).

1. Specific conductivity

2. Relative conducting surface



شکل ۵-۸ نسبت سطح برگ به سطح هادی به مجموع سطح هادی در یک گونه گیاهی (*Pseudotsuga menziesii*) که تحت سه شرایط رشدی ضعیف (مربع‌ها)، متوسط (دایره‌ها) و قوی (مثلث‌ها) رشد یافته بود. مشاهده می‌شود که با بهبود شرایط رشد و همچنین افزایش مجموع سطح هادی، نسبت سطح برگ به سطح هادی افزایش می‌یابد (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۴).

### ۱-۵-۸ هدایت ویژه

هدایت ویژه حجم آب جریان یافته در واحد زمان و تحت فشار معین از یک قطعه ساقه با طول و مقطع معین است. باتوجه به رابطه ۳-۸ با افزایش شعاع یا قطر آوند، هدایت ویژه افزایش می‌یابد. در درختان، مقادیر هدایت ویژه شاخه‌ها کمتر از تنه درخت و از قاعده به طرف رأس ممکن است افزایش یا کاهش یابد. مقادیر تیپیک هدایت ویژه در مخروطیان حدود ۲۰، درختان پهن‌برگ خزان‌کننده حدود ۱۲۸-۶۵ و موها که دارای آوندهایی با قطر زیاد هستند حدود ۱۲۷۳-۲۳۶ میلی‌لیتر بر ساعت در سانتی‌مترمربع در مگاپاسکال در متر می‌باشد.

### ۲-۵-۸ سطح هادی نسبی

سطح هادی نسبی، نسبت سطح هادی ( $A_{xylem}$ ) به سطح برگ (AI) یا وزن تر برگ (FWI) بوده و عدد هابر<sup>۱</sup> نیز نامیده می‌شود. مقدار سطح هادی نسبی باتوجه به شرایط رشد و گونه گیاهی متفاوت بوده (شکل ۵-۸) و مقادیر تیپیک آن در درختان حدود ۰/۵، گیاهان علفی واقع در سایه درختان ۰/۲، گیاهان گوستی بیابانی ۰/۱ و برخی از گیاهان آبیزی ۰/۰۲ میلی‌مترمربع بر گرم وزن تر است (کرامر، ۱۹۹۵). به‌طورکلی، گونه‌های مقاوم به آب‌کشیدگی یا گونه‌هایی که در مناطق خشک و تنش‌زا رشد می‌کنند، درمقایسه با گونه‌های حساس دارای سطح برگ کمتری در واحد مجموع قطر عناصر آوندی<sup>۲</sup> هستند.

1. Huber value  
2. Sapwood

از آنجایی که گونه‌های مناطق خشک برای مواجه‌نشدن با حفره‌سانی دارای آوندهای باریک هستند، برای ظرفیت انتقال مشابه به تعداد آوند چوب بیشتر و در نتیجه مقدار مجموع قطر عناصر آوندی بیشتری نیاز دارند. بنابراین، عموماً سطح هادی نسبی گونه‌های مناطق بیابانی بیشتر از گونه‌های مناطق معتدل و مرطوب است.

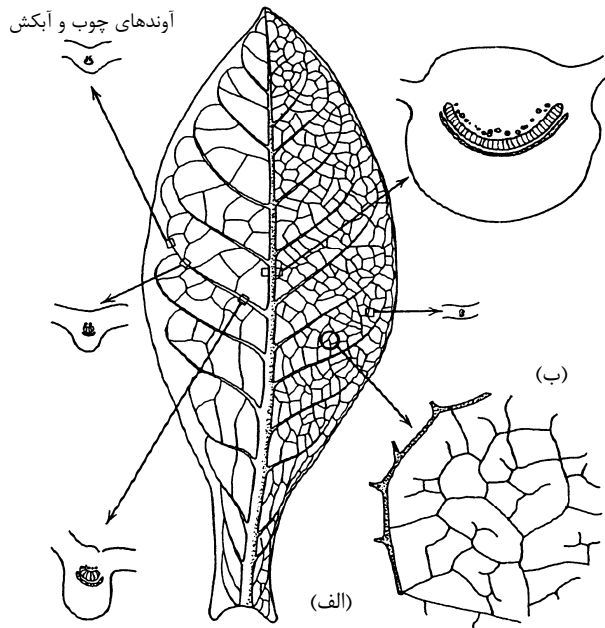
### ۳-۵-۸ حفره‌سانی یا رگ‌بستگی

در شرایطی که آب در سیستم هادی تحت فشار یا مکش زیاد قرار گیرد، پیوستگی بین مولکول‌های آب به‌طور ناگهانی قطع شده و در آوند چوب حباب یا حفره ایجاد می‌گردد. ایجاد حباب به‌وسیله ورود هوا از طریق منافذ (پیت‌ها) بزرگ موجود در دیواره‌های عناصر آوند چوب شروع می‌گردد. سپس حباب‌ها توسعه پیدا کرده و ستون آب را قطع می‌کنند. حفره‌سانی و ایجاد حباب‌های هوا در مسیر انتقال آب در آوند چوب، سبب قطع انتقال آب در برخی نقاط مسیر شده، قابلیت انتقال آب را کاهش می‌دهد و اگر شدت آن کافی باشد، سبب محدودشدن رشد گیاه می‌گردد (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۴).

حفره‌سانی می‌تواند در اثر اختلال در تأمین آب بر اثر خشکی یا یخ‌زدن زمین و در نتیجه آسیب مکانیکی به سیستم انتقال آب صورت گیرد. در واقع، یخ‌زدن زمین و عدم توانایی تأمین آب از دست‌رفته به‌وسیله اندام‌های هوایی بعد از گرم‌شدن مجدد، می‌تواند از طریق ایجاد حباب، سبب قطع ناگهانی پیوستگی بین مولکول‌های آب شود. در این شرایط کشش تعرقی بالا بوده، ولی به‌دلیل یخ‌زدگی زمین، جذب آب صورت نمی‌گیرد (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

البته در این خصوص یک مکانیسم امنیتی بسیار مهم وجود دارد و آن این است که اگر حباب در یک سلول ایجاد شود، به سایر سلول‌ها منتقل نخواهد شد و همان یک سلول از گردونه حذف می‌شود. در واقع این منافذ یا پیت‌ها، که عناصر آوندی را به هم مرتبط می‌کنند، اجازه عبور آب را می‌دهند ولی اجازه عبور حباب‌های هوا را نمی‌دهند. علت این مسئله این است که برای حباب‌گیری سلول مجاور، باید منفذ از آب خالی شود. باتوجه به اینکه قطر منافذ بین عناصر آوندی بسیار باریک بوده و برای تخلیه آن‌ها و سرایت حباب به سلول مجاور به مکش بسیار بالایی نیاز است، بنابراین، هیچ‌گاه این مکش ایجاد نشده و حباب‌ها در همان سلول اول محبوس می‌ماند (نوبل، ۱۹۹۴). از آنجایی که قطر تپییک این منافذ (پیت‌ها) بین ۰٫۴ تا ۰٫۰۵ و حتی در بعضی از گونه‌ها حدود ۰٫۰۱ میکرومتر است، بنابراین، باتوجه به رابطه ۲-۲۲ (فصل ۲، قسمت ۲-۳-۲)، میزان مکش لازم برای خروج آب از آن‌ها به ترتیب حدود ۰٫۷۵، ۶ و ۳۰ مگاپاسکال است.

به‌طور معمول، گونه‌هایی که در مناطق بسیار خشک یا مناطقی که احتمال حفره‌سانی آوندها در آن زیاد است، زندگی می‌کنند دارای آوندهایی با قطر کمتر هستند. این امر سبب می‌شود که این گونه‌ها، گرچه دارای سرعت جریان انتقال آب و مواد غذایی پایین‌تری در آوندهای چوب خود هستند، ولی به‌دلیل داشتن آوندهای باریک‌تر، احتمال وقوع حفره‌سانی و قطع ستون پیوسته آب در آوندهای آن‌ها کمتر باشد. گیاهان چوبی که هدایت ویژه بالایی دارند، به‌دلیل قطر بیشتر عناصر آوندی، در مقایسه با



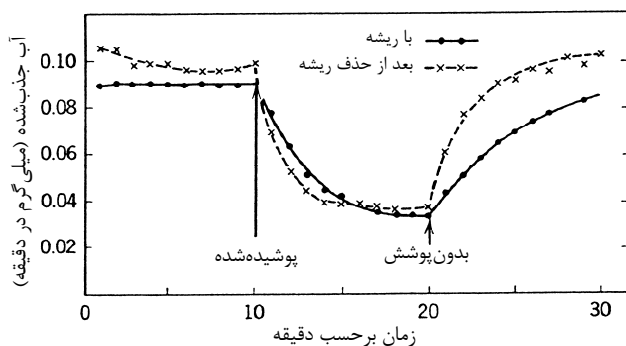
شکل ۶-۸ الف) شبکه رگبرگها در برگ بالغ تنباکو؛ در هر گره برگ، انشعابی از سیستم آوندی جدا و در برگ پراکنده می‌شود؛ ب) نمای بزرگ‌شده یک بخش کوچک از پهنک برگ جهت نمایش رگبرگها (کرامر، ۱۹۹۵).

گیاهانی که عناصر هادی آن‌ها قطر کمی دارند، به تشکیل حباب حساس‌تر می‌باشند. حباب‌گیری در گیاهان علفی هم مشاهده شده است (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۴).

در برخی موارد رفع حفره‌سانی و فعالیت آوندهای بسته شده می‌تواند پس از پرشدن دوباره آوند با آب انجام شود. این عمل می‌تواند تحت شرایط مرطوب شب، یعنی زمانی که افزایش فشار ریشه سبب افزایش فشار مثبت آوند چوبی می‌شود، انجام پذیرد. در موارد شدیدتر ممکن است پرشدن دوباره آوند چوب تا زمانی که باران نیاید، انجام نشود. همچنین، افزایش فشار ریشه‌ای سبب افزایش فشار مثبت در آوند چوبی و کوچک و حل شدن حباب‌های گاز می‌شود. لازم به ذکر است که آوندهای جدید تشکیل شده به وسیله رشد ثانویه گیاه می‌توانند جایگزین آوندهای غیرفعال قبلی شده و سبب انتقال آب و مواد غذایی در گیاه شوند (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

## ۶-۸ حرکت آب در برگ‌ها

گام نهایی در انتقال آب در گیاه، جریان آن به برگ‌ها و توزیع آن در برگ می‌باشد. در هر گره برگ، انشعابی از سیستم آوندی از آوند چوب ساقه جدا و از طریق دم‌برگ وارد برگ شده و در آنجا پراکنده می‌شود (شکل ۶-۸). در این ارتباط، در کاج‌ها یک رگبرگ از مرکز برگ عبور می‌کند، در حالی که در



شکل ۷-۸ جذب آب توسط گیاه آفتابگردان در حالت وجود ریشه و حذف آن. مشاهده می‌شود که با حذف ریشه میزان مقاومت در برابر جریان کاهش و در نتیجه جذب آب توسط گیاه افزایش می‌یابد (کرامر، ۱۹۹۵).

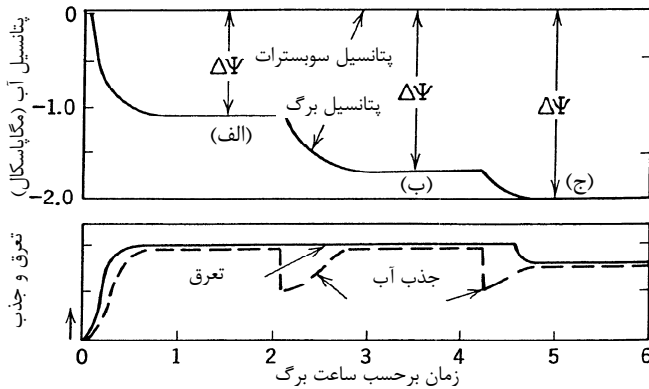
گراس‌ها و تک‌لپه‌ای‌ها رگبرگ‌های متعدد به موازات هم و در پهن‌برگ‌ها شبکه رگبرگ‌ها به وجود می‌آید. رگ‌های کوچکی که از داخل بافت‌های مزوفیل می‌گذرند، سبب ارتباط بین این رگبرگ‌های اولیه می‌شوند. توزیع آب در بین سلول‌های مزوفیل برگ عمدتاً به وسیله آوندهای کوچک، که انشعابات آوندهای اولیه و عمدتاً ثانویه می‌باشند، انجام می‌گیرد (کرامر، ۱۹۹۵).

تعداد این رگبرگ‌های کوچک زیاد بوده و این مسئله سبب می‌شود تا فاصله سلول‌های برگ از رگبرگ مجاور بسیار اندک باشد. فاصله بسیار اندک رگبرگ‌های کوچک از سلول‌های برگ، به انتشار آب از سلولی به سلول دیگر کمک می‌کند. در نهایت انتقال آب به صورت مایع از طریق انتشار در سیم‌پلاست و آپوپلاست و به صورت بخار در فضاهای بین‌سلولی انجام می‌شود.

## ۷-۸ مقایسه مقاومت‌ها از خاک تا محل تبخیر

باتوجه به درجه خشکی هوا و پتانسیل آب بسیار منفی آن (به قسمت ۳-۴، فصل ۴ رجوع شود)، در صورت عدم وجود مقاومت در مسیر جریان آب، تمامی آب موجود در گیاه به سرعت تلف می‌شد. نکته قابل توجه این است که میزان مقاومت در برابر جریان آب در نقاط مختلف مسیر یکسان نیست. به طور کلی، مقاومت ریشه‌ها در برابر جریان آب زیاد می‌باشد. این مسئله را می‌توان با حذف ریشه‌ها، که در نتیجه آن افزایش جذب و کاهش تأخیر انتقال آب تعریف یافته توسط گیاه صورت می‌گیرد، نشان داد. این پدیده در گیاهان مختلف مانند آفتابگردان (شکل ۷-۸) و درختان کاج صادق است. مشاهده شده است که در آفتابگردان، مقاومت ریشه در برابر جریان آب  $\frac{1}{6}$  برابر برگ‌ها و تقریباً چهار برابر آوندهای چوب ساقه می‌باشد. در گوجه‌فرنگی نیز گرچه مقاومت کل به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از آفتابگردان بود، ولی در این مورد نیز مقاومت ریشه  $\frac{1}{4}$  برابر برگ‌ها و چهار برابر ساقه بود (کرامر، ۱۹۹۵).

با اندازه‌گیری پتانسیل آب برگ‌های مختلف روی ساقه و در سرعت‌های مختلف تعرق مشخص شد که مقاومت ساقه در ذرت ۲۵-۱۵٪ و در آفتابگردان تنها ۸٪ کل مقاومت گیاه می‌باشد. همچنین، مقاومت



شکل ۸-۸ تأثیر سرد شدن سیستم ریشه در دو مرحله (ب) و (ج) بر میزان جذب و تعرق آب، پتانسیل آب برگ و اختلاف بین پتانسیل آب برگ و سوبسترات.  $\Delta\psi$  نشان دهنده اختلاف پتانسیل آب برگ و سوبسترات است. در شکل پایین، فاصله بین تعرق و جذب آب، نشان دهنده مقاومت ریشه است (کرامر، ۱۹۹۵).

برگ در ذرت و آفتابگردان به ترتیب ۳۰-۱۵ و ۲۰٪ کل مقاومت گیاه است. در این مطالعه میزان مقاومت موجود در مسیر آب در ریشه‌ها به طور قابل توجهی بیشتر از سایر اندام‌های گیاهی بوده و در ذرت و آفتابگردان به ترتیب ۷۰-۵۰ و ۷۰٪ کل مقاومت موجود در مسیر جریان بود.

در رابطه با مقاومت خاک، اکثر آزمایشات نشان داده است تا زمانی که مقدار آب خاک تا نزدیکی نقطه پژمردگی دایم برسد، مقاومت خاک کمتر از مقاومت گیاه می‌باشد، که این مسئله ناشی از تراکم طول ریشه زیاد است. گاهی چروکیدگی خاک و ریشه‌ها، باعث افزایش مقاومت در فصل مشترک ریشه-خاک می‌شود. به هر حال، میزان مقاومت خاک بستگی زیادی به میزان رطوبت خاک داشته و در صورت وجود رطوبت کافی می‌تواند خیلی کم و در شرایط رطوبت کم، خیلی زیاد باشد. به طور کلی، نقش نسبی مقاومت‌های موجود در مسیر جریان آب را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$R_{\text{root}} > R_{\text{leaf}} > R_{\text{xylem}} \quad (8-1)$$

$\leftarrow R_{\text{soil}} \rightarrow$

که در این رابطه،  $R_{\text{root}}$  مقاومت ریشه،  $R_{\text{leaf}}$  مقاومت برگ،  $R_{\text{xylem}}$  مقاومت آوندهای چوب ساقه و  $R_{\text{soil}}$  مقاومت خاک می‌باشد. یعنی مقاومت ریشه بیشتر از برگ و مقاومت برگ بیشتر از آوند چوب است. مقاومت خاک بسته به رطوبت می‌تواند از مقاومت ریشه بیشتر و یا از مقاومت آوند چوب کمتر باشد. در یک خاک مرطوب، مقاومت ریشه می‌تواند تا حدود ۱۰۰ برابر مقاومت خاک باشد.

با مثالی مکانیسم کنترل جریان آب در گیاه توضیح داده می‌شود (اسلاچر، ۱۹۷۷). در شکل ۸-۸ در زمان صفر، گیاه در تاریکی بوده و پتانسیل ریشه و برگ، برابر و معادل صفر است. با ایجاد روشنایی، تعرق شروع و

روبه افزایش می‌گذارد و بعد از ۳۰ دقیقه به حالت پایدار<sup>۱</sup> می‌رسد. بعد از گذشت یک ساعت، تعلق و جذب با سرعت برابر صورت گرفته و پتانسیل آب، بین برگ و محیط ریشه در مقدار (الف) تثبیت می‌شود. بعد از گذشت دو ساعت، دمای محیط ریشه کاهش داده می‌شود. کاهش دمای محیط ریشه، سبب می‌شود که مقاومت ریشه افزایش و در نتیجه جذب آب کاهش یابد. با به تأخیر افتادن جذب در مقایسه با تعلق، پتانسیل آب برگ به سطح (ب) تنزل می‌یابد و جذب آب در نتیجه افزایش نیروی محرکه به سرعت اولیه خود بازسازی می‌شود. بنابراین، در نقطه (ب) کاهش پتانسیل آب برای بستن روزنه‌ها، به قدر کافی پایین نبوده است. حال اگر محیط ریشه بیشتر سرد شود، جذب آب کاهش بیشتری می‌یابد. در این وضعیت، کاهش پتانسیل آب به اندازه‌ای است که روزنه‌ها تا حدودی بسته می‌شوند. بنابراین، گرچه پتانسیل آب جدید ایجاد شده در نقطه (ج)، سرعت جذب را تا حدودی بازسازی کرده است، ولی به علت بسته شدن جزئی روزنه‌ها، تعلق نیز کاهش یافته و جذب و تعلق در وضعیت جدیدی به تعادل می‌رسند.

## ۸-۸ کنترل جریان

از آنجایی که بیش از ۹۵٪ آب جذب شده در اکثر گیاهان به وسیله جریان تعلق تلف شده و تنها مقدار اندکی از آب جذب شده در گسترش سلول و فرایندهای بیوشیمیایی آن به مصرف می‌رسد، به لحاظ کمی، جریان آب در گیاه توسط تلفات آب در تعلق تنظیم می‌گردد. تبخیر آب از دیواره‌های سلولی باعث ایجاد نیروی ماتریک یا فشار منفی یا جذبی در آن‌ها شده و در نتیجه آب از آوند چوب به سوی دیواره‌های سلولی جاری می‌شود. این امر، باعث ایجاد کشش یا فشار منفی در شیره آوند چوب شده، که به ریشه منتقل و در نتیجه جریان آب به داخل ریشه را ایجاد می‌کند (کرامر، ۱۹۹۵).

بنابراین، افزایش تعلق، باعث افزایش جذب آب و کاهش تعلق، باعث کاهش جذب آب می‌شود. در مقابل، اگر جذب بر اثر عواملی مثل سرما، خشک شدن خاک و تهویه ناکافی کاهش یابد، پتانسیل آب ریشه کاهش می‌یابد. کاهش پتانسیل آب ریشه، سبب افزایش مقاومت ریشه یا کاهش نیروی محرک شده و در نتیجه، تعلق کاهش می‌یابد. اگر گیاه بتواند پتانسیل فشاری منفی تری در برگ‌ها ایجاد کند، مجدداً تعلق به سرعت قبلی خود بازمی‌گردد. به هر حال، در صورتی که کاهش پتانسیل فشاری برگ به قدری باشد که روزنه‌ها بسته شوند، کاهش تعلق ایجاد شده قابل بازسازی نمی‌باشد (کرامر، ۱۹۹۵).

به طور کلی، جریان آب در گیاه به وسیله تعلق کنترل شده و در واقع روزنه‌ها تنظیم کنندگان اصلی جریان آب در گیاه هستند. افزایش مقاومت در برابر جریان آب، به ویژه در خاک و ریشه، تعلق را به طور غیرمستقیم و از طریق کاهش آماس برگ و بسته شدن جزئی تا کامل روزنه‌ها کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، در شرایط مطلوب بودن رطوبت خاک، جذب تابع تعلق و در شرایط محدودیت رطوبت خاک، تعلق تابع جذب است.





# تعرق

در این فصل می‌خوانیم:

- ۹-۱ سطوح تبخیرکننده در تعرق
- ۹-۲ مسیر حرکت بخار آب در تعرق
- ۹-۳ نیروی محرک در تعرق
- ۹-۴ مقاومت‌ها در تعرق
- ۹-۵ مکانیسم عمل روزنه
- ۹-۶ واکنش بازوبسته‌شدن روزنه‌ها به عوامل محیطی
- ۹-۷ عوامل مؤثر بر تعرق
- ۹-۸ روش‌های اندازه‌گیری تعرق
- ۹-۹ مواد ضدتعرق

## مقدمه

تاکنون در مورد نقش و اهمیت تعرق در گیاه اظهار نظرهای ضدونقیضی صورت گرفته است. اظهار شده است که تعرق به دلیل نقش داشتن در خنک کردن برگ‌ها، مؤثر بودن در صعود شیره خام و افزایش جذب عناصر معدنی مفید است. از طرفی، گرچه تعرق به عنوان یک ابزار خنک کردن برگ‌ها نقش دارد، ولی حتی در شرایط آفتاب کامل و زمانی که تعرق بر اثر پژمردگی موقت و بسته شدن روزنه‌ها کاهش می‌یابد، برگ‌ها به ندرت از افزایش دما آسیب می‌بینند. در ضمن، در شرایط عدم وجود تعرق، تابش موج بلند از برگ و انتقال گرمای محسوس نقش مهم‌تری در پراکندن گرما پیدا کرده و مانع افزایش خیلی زیاد دمای برگ می‌شوند (کرامر، ۱۹۹۵).

درباره صعود شیره خام و نقش تعرق بر آن، لازم به ذکر است که تعرق صرفاً سرعت و مقدار جریان آب را افزایش می‌دهد. همچنین، گرچه احتمالاً جذب و انتقال املاح بر اثر تعرق سریع، افزایش می‌یابد، ولی بسیاری از گیاهان حتی در شرایط زیستگاههای مرطوب و سایه‌دار، یعنی جایی که تعرق بسیار پایین است، به خوبی رشد می‌کنند. بنابراین، در بهترین حالت، می‌توان تعرق را به دلیل ایجاد شرایط کمبود آب و آسیب گیاه در اثر آب‌کشیدگی، یک پدیده مضر و به دلیل ساختار برگ‌ها و لزوم وجود روزنه‌ها جهت ورود دی‌اکسیدکربن، یک پدیده غیرقابل اجتناب در نظر گرفت.

## ۹-۱ سطوح تبخیرکننده در تعرق

اتلاف آب به صورت بخار از اندام‌های هوایی گیاه و به خصوص برگ‌ها تعرق نامیده می‌شود. تعرق ممکن است از طریق کوتیکول، عدسک و روزنه انجام شود. کوتیکول یک لایه موممانند است، که روی اپیدرم برگ‌ها و ساقه‌های علفی قرار گرفته است. به دلیل شکاف‌های موجود در کوتیکول، این لایه معمولاً نفوذپذیر بوده و سهم تعرق کوتیکولی از کل تعرق، ممکن است در بعضی از شرایط به ۲۰٪ نیز برسد. به هر حال، ضخامت این لایه تحت تأثیر عوامل محیطی قرار گرفته و از گیاهی به گیاه دیگر تغییر می‌کند (کرامر، ۱۹۹۵).

عدسک‌ها در پوست واقع شده و از سلول‌هایی که به سستی در کنار هم آرایش یافته‌اند، تشکیل شده‌اند. تعرق عدسک‌ها، به دلیل اینکه فقط حدود ۰/۱ درصد از کل تعرق گیاه را شامل می‌شود، کاملاً قابل چشم پوشی است.

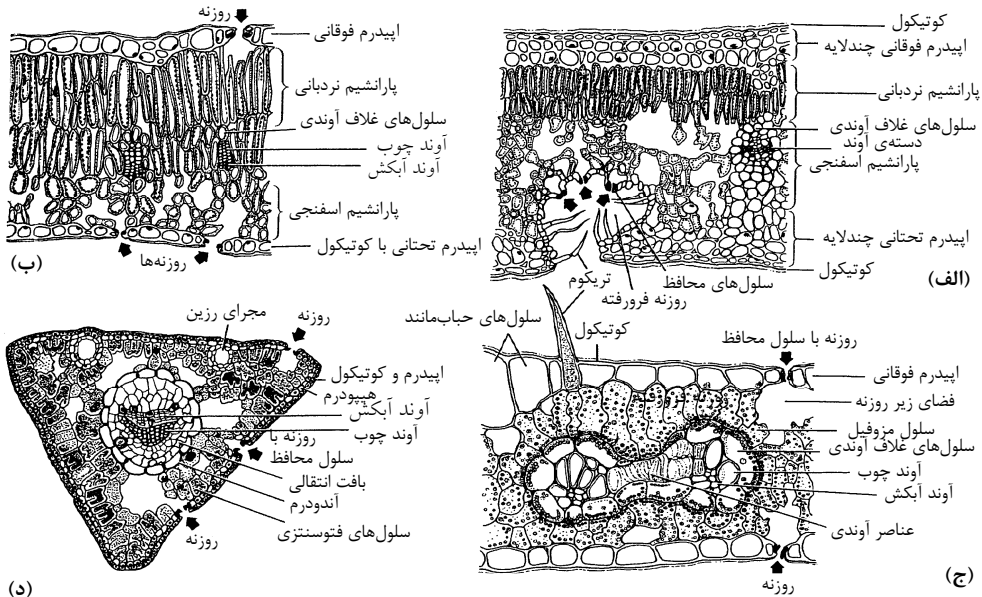
روزنه‌ها منافذ کوچکی در اپیدرم برگ هستند که بازوبسته شدن آن‌ها به وسیله سلول‌های محافظ کنترل می‌شود. روزنه‌ها به طور عمده در برگ‌ها قرار گرفته‌اند، اما در اپیدرم ساقه‌های علفی نیز ممکن است دیده شوند. به طور معمول حدود ۹۰-۸۰ درصد از کل تعرق انجام شده توسط گیاه از طریق روزنه‌ها انجام می‌شود (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

### ۹-۱-۱ آناتومی روزنه‌ها

از آنجایی که وجود کوتیکول مومی<sup>۱</sup> در سطح برگ انتشار آب از آنرا محدود می‌سازد، بخش اعظم ورود و خروج گازها به برگ، از طریق سوراخ روزنه‌ها انجام می‌شود. هر روزنه به وسیله دو سلول اپیدرمی به نام سلول‌های محافظ احاطه شده است (شکل ۱-۹). معمولاً در مجاورت هر سلول محافظ روزنه یک تا چند سلول اپیدرمی تغییر شکل یافته به نام سلول‌های کمکی<sup>۲</sup> وجود دارند، که تعداد و آرایش آن‌ها در گیاهان مختلف متفاوت است و در مکانیسم سلول‌های محافظ و در نتیجه بازوبسته شدن روزنه‌ها نقش دارند. هر سلول محافظ، دارای یک واکوئل مرکزی، سیتوپلاسم، هسته و تعدادی کلروپلاست است که اغلب این کلروپلاست‌ها به طور کامل توسعه نیافته و قادر به فتوسنتز نیستند (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

در گیاهان دولپه، روزنه‌ها از دو سلول محافظ لوبیایی شکل تشکیل شده است، در حالی که گراس‌ها دارای سلول‌های محافظ کشیده‌تر و دمبل‌مانند هستند (شکل ۲-۹). سلول‌های محافظ دارای کلروپلاست هستند، ولی سلول‌های اپیدرمی مجاور آن‌ها معمولاً فاقد کلروپلاست هستند. به طور معمول، سلول‌های محافظ و سلول‌های کمکی از طریق پلاسمودسماتا به هم اتصال نداشته و یا این اتصال ناقص است، ولی ممکن است اتصال از طریق پلاسمودسماتا بین سلول‌های محافظ و سلول‌های مزوفیل زیر آن‌ها برقرار باشد.

1. Waxy cuticle  
2. Accessory cells



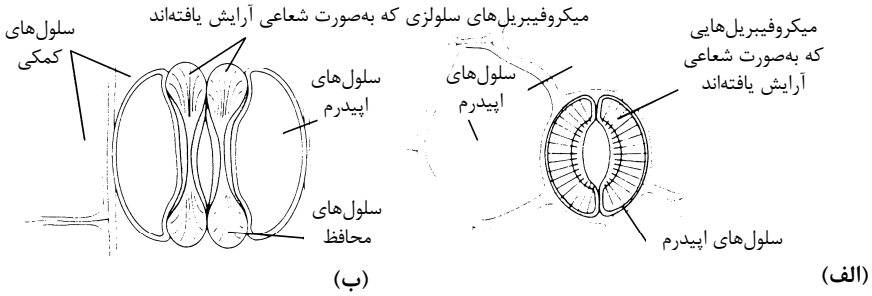
شکل ۱-۹ برش عرضی چهار برگ با سلول‌های محافظ و روزنه‌های آنها. (الف) یک برگ با روزنه کاملاً فرورفته؛ (ب) یک برگ با روزنه معمولی؛ (ج) یک برگ گرامینه با روزنه‌های تقریباً مساوی در دو طرف برگ؛ و (د) یک برگ کاج سوزنی با روزنه تا اندازه‌های فرورفته (سالسیسوری و راس، ۱۹۹۶).

بازشدن روزنه‌ها به واسطه آرایش خاص میکروفیبریل‌های سلولزی<sup>۱</sup> یا میسل‌ها در دیواره سلولی سلول‌های محافظ صورت می‌گیرد (شکل‌های ۲-۹، ۳-۹ و ۴-۹). در واقع، به دلیل وجود یک لایه سلولزی ثانویه در دیواره‌های داخلی سلول‌های محافظ، این دیواره‌ها ضخیم و غیرقابل ارتجاع هستند، اما دیواره سلولی در سایر قسمت‌ها نازک، قابل ارتجاع و نفوذپذیر است. این مسئله سبب می‌شود که در صورت جذب آب توسط سلول‌های محافظ، دیواره خارجی آن‌ها ارتجاع یافته و در نتیجه روزنه‌ها باز شوند (شکل ۴-۹). لازم به ذکر است که ضخامت قسمت‌های درونی سلول‌های محافظ می‌تواند به ۵ میکرومتر برسد، در حالی که سلول‌های اپیدرمی معمولاً ۲-۱ میکرومتر ضخامت دارند.

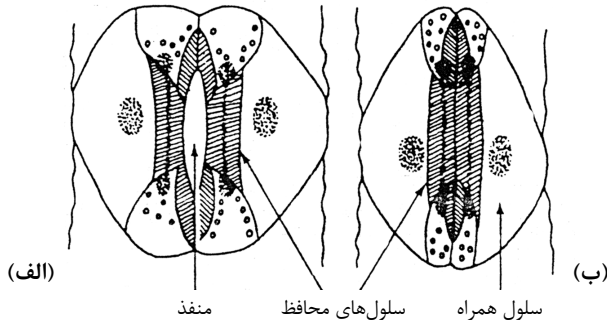
## ۲-۹-۱ تعداد و اندازه روزنه‌ها

در تعداد معدودی از گیاهان روزنه‌ها تنها در یک طرف برگ دیده می‌شوند. گراس‌ها یا گندمیان معمولاً دارای تعداد برابر روزنه در هر دو سطح برگ هستند. به طور معمول گرچه فراوانی روزنه‌ها در سطح زیرین برگ بیشتر است، ولی اغلب هر دو سطح برگ دارای روزنه می‌باشد. به طور کلی، هر میلی‌متر مربع سطح برگ حدود ۱۰۰ روزنه دارد، ولی تعداد روزنه‌ها می‌تواند تا ۱۰ برابر نیز افزایش یابد. بالاترین رقم گزارش شده در مورد تعداد روزنه در هر میلی‌متر مربع سطح برگ ۲۲۳۰ عدد است (سالسیسوری و راس، ۱۹۹۶).

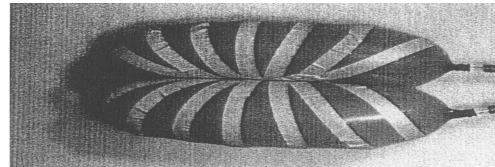
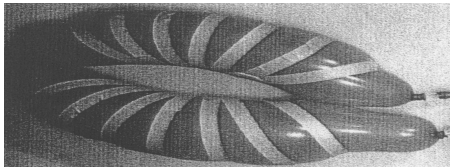
1. Cellulose microfibrils



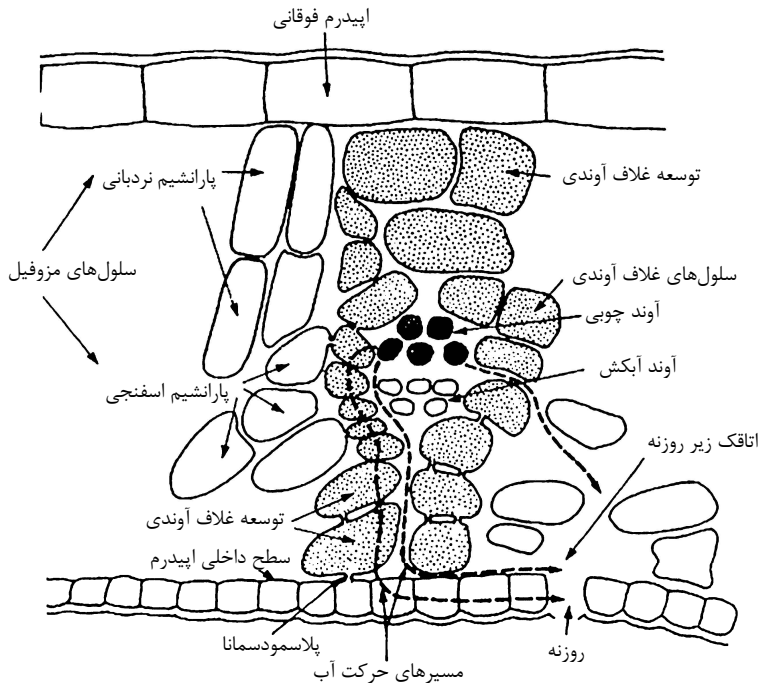
شکل ۲-۹ آرایش میکروفیبریل‌های سلولزی در سلول‌های محافظ یک گیاه دولپه (الف) و تک‌لپه (ب). توجه شود که در گیاهان دولپه روزنه‌ها از دو سلول محافظ لوبیایی شکل تشکیل شده است، در حالی که گراس‌ها دارای سلول‌های محافظ کشیده‌تر و دمبل‌مانند هستند (کافی و همکاران، ۱۳۷۸).



شکل ۳-۹ منظره سطحی روزنه هوایی نیشکر (یک گیاه تک‌لپه) از روبرو. (الف) روزنه باز؛ و (ب) روزنه بسته. دایره‌های کوچک قسمت انتهایی سلول‌های محافظ، کلروپلاست‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۹ سلول‌های محافظ روزنه. وجود یک لایه سلولزی ثانویه در دیواره‌های داخلی سلول‌های محافظ سبب می‌شود تا در صورت جذب آب، دیواره خارجی این سلول‌ها ارتجاع یافته و در نتیجه روزنه‌ها باز شوند (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).



شکل ۹-۵ برش عرضی یک برگ. آب قبل از رسیدن به روزنه‌ها و سلول‌های اپیدرمی باید از غلاف آوندی عبور کرده و سپس از سلول‌های پارانشیم اسفنجی یا نردبانی عبور کند (کافی و همکاران، ۱۳۷۸).

تراکم روزنه یا به عبارت دیگر تعداد روزنه در واحد سطح برگ، به غلظت دی‌اکسیدکربن وابسته بوده و با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، بررسی نمونه‌های برگ هرباریوم‌ها در موزه‌ها نشان داده است که طی دو قرن گذشته، با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن از ۲۸۰ به ۳۵۰ میکرومول بر مول، تعداد روزنه در برگ حدود ۴۰٪ کاهش یافته است (سالیسوری و راس، ۱۹۹۶). لازم به ذکر است که ابعاد روزنه‌ها در گیاهان مختلف متفاوت است؛ و به عنوان مثال در ذرت  $26 \times 4$  و در لوبیا  $7 \times 3$  میکرون می‌باشد. به هر حال، تعداد روزنه‌ها در واحد سطح در گیاهان مختلف متفاوت بوده و معمولاً مساحت آن‌ها ۱-۲ درصد از کل سطح برگ را شامل می‌شود.

## ۹-۲ مسیر حرکت بخار آب در تعرق

شکل ۹-۵ برش عرضی یک برگ را نشان می‌دهد. آب قبل از رسیدن به روزنه و سلول‌های اپیدرمی باید از غلاف آوندی عبور کرده و سپس از سلول‌های پارانشیم اسفنجی یا نردبانی عبور کند. در پدیده تعرق ابتدا آب از دیواره‌های سلولی به داخل فضاهای بین‌سلولی برگ تبخیر شده و سپس بخار آب راه یافته به فضاهای بین‌سلولی برگ به بیرون از گیاه و داخل اتمسفر منتشر می‌شود. در واقع، آب در داخل برگ از

دیواره‌های سلول‌های پارانشیم نردبانی<sup>۱</sup> و اسفنجی<sup>۲</sup> یا مزوفیل به‌داخل فضاهاى بین‌سلولی که از طریق روزنه‌ها با هوا ارتباط دارند، تبخیر می‌شود. پس از آنکه آب از سطح سلول به فضای بین‌سلولی تبخیر می‌شود، از طریق انتشار از برگ خارج می‌گردد (نوبل، ۱۹۹۴).

حرکت آب در بافت‌های برگ، مشابه بافت ریشه بوده (اشتودل و پیترسون، ۱۹۹۸) و می‌تواند از سه مسیر صورت گیرد. در مسیر اول که مسیر درون‌غشایی یا واکوئلی نامیده می‌شود، آب وارد واکوئل سلول‌های غلاف آوندی شده و پس از عبور از غشای واکوئل و غشای پلاسمایی وارد سلول‌های دیگر می‌شود. در مسیر دوم آب از طریق منافذ پلاسمودسماتا وارد پروتوپلاسم سلول‌های غلاف آوندی شده و از سلولی به سلول دیگر منتقل می‌شود. به این مسیر عبور آب، مسیر پلاسمودسماتا می‌گویند. در مسیر سوم که به آن مسیر آپوپلاستی می‌گویند، آب از طریق فضای آزاد بین سلول‌ها و دیواره‌های آن‌ها و بدون وارد شدن به درون سلول منتقل می‌شود. به مسیرهای درون‌غشایی و پلاسمودسماتا مسیر سیم‌پلاستی نیز گفته می‌شود. لازم‌به‌ذکر است از آنجایی که حرکت آب در مسیر آپوپلاستی تنها از طریق فضاهاى بین‌سلولی بوده و در واقع آب وارد غشای پلاسمایی و درون سلول نمی‌شود، بنابراین، حرکت آب در این مسیر تحت تأثیر وضعیت متابولیکی سلول‌های برگ قرار نمی‌گیرد. حرکت آب در دیواره سلول‌ها ۵۰ تا ۶۰ برابر سریع‌تر از جریان آب در داخل سلول‌های مزوفیل برگ است.

### ۳-۹ نیروی محرک در تعرق

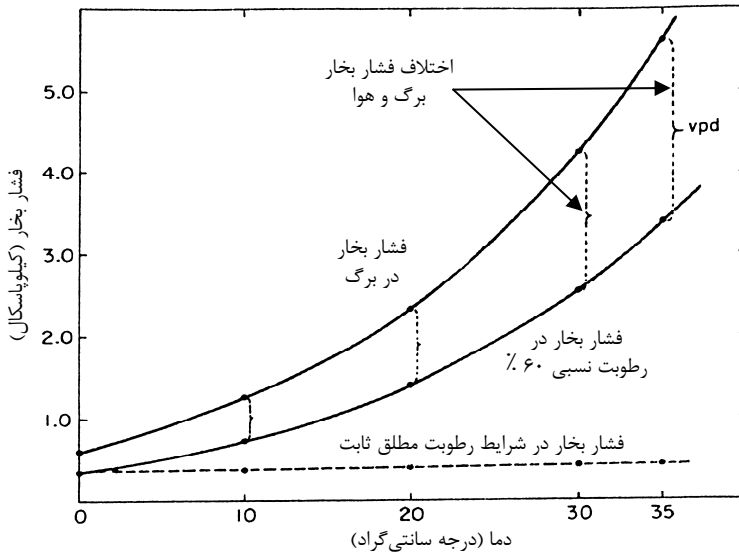
به‌طور کلی، جریان آب از برگ به هوا را می‌توان با استفاده از رابطه ۱-۹ توصیف کرد، که در آن،  $\Psi$  پتانسیل آب،  $R_{leaf}$  مقاومت برگ و  $Q$  سرعت جریان آب یا سرعت تعرق هستند. لازم‌به‌ذکر است که در این رابطه اختلاف پتانسیل آب برگ و هوا (صورت کسر) نیروی محرکه جریان آب می‌باشد (کرامر، ۱۹۹۵):

$$Q = \frac{\Psi_{leaf} - \Psi_{air}}{R_{leaf}} \quad (9-1)$$

باتوجه به رابطه پتانسیل آب با فشار بخار آب و اینکه استفاده از غلظت یا فشار بخار سبب متعادل‌تر شدن اختلافات می‌شود، بهتر است که صورت کسر رابطه ۱-۹، یعنی اختلاف پتانسیل آب با اختلاف غلظت آب یا اختلاف فشار بخار آب جایگزین شود (رابطه ۱۱-۲). به عبارت دیگر، بهتر است در مطالعه حرکت آب در فاز بخار از غلظت بخار یا فشار بخار به‌جای پتانسیل آب استفاده شود.

استفاده از غلظت یا فشار بخار بدین علت است که در تبدیل شیب رطوبتی از فشار بخار یا غلظت بخار به معادل پتانسیل آب در فاز بخار، اختلافات بسیار اغراق‌آمیزی مشاهده می‌شود. برای مثال، پتانسیل آب برگ برابر ۳ MPa- معادل رطوبت نسبی ۹۸٪ و فشار بخار حدود ۴/۱۵ kPa در دمای ۳۰°C می‌باشد. در چنین شرایطی، کاهش رطوبت نسبی از ۹۸ به ۵۰٪، سبب می‌شود تا فشار بخار آب تنها

1. Palisade parenchyma  
2. Spongy parenchyma



شکل ۹-۶ تأثیر افزایش دما بر فشار بخار هوا و برگ و اختلاف فشار بخار آن‌ها. با افزایش دما، فشار بخار برگ و اختلاف فشار بخار به سرعت افزایش می‌یابد (کرامر، ۱۹۹۵).

به نصف کاهش یابد، در صورتی که مقدار پتانسیل آب تقریباً ۲۵ برابر کاهش پیدا می‌کند. بدین دلیل، در مطالعه حرکت آب در فاز بخار، استفاده از غلظت بخار یا فشار بخار نسبت به پتانسیل آب مناسب‌تر بوده و ترجیح داده می‌شود. بنابراین، معادله جریان بخار آب در فاز گازی را می‌توان به صورت رابطه ۹-۲ بیان کرد (کرامر، ۱۹۹۵):

$$Q = T_r = \frac{C_{wv}^L - C_{wv}^a}{R_{leaf}} = \frac{e_{wv}^L - e_{wv}^a}{R_{leaf}} \quad (9-2)$$

که در آن،  $T_r$  یا  $Q$  سرعت تعرق در واحد سطح برگ،  $C_{wv}^L$  و  $C_{wv}^a$  به ترتیب غلظت یا چگالی بخار برگ و هوا برحسب گرم در مترمکعب،  $e_{wv}^L$  و  $e_{wv}^a$  به ترتیب فشار بخار برگ و هوا برحسب پاسکال و  $R_{leaf}$  مقاومت برگ هستند. لازم به ذکر است از آنجایی که  $T_r$  سرعت تعرق در واحد سطح برگ (به عنوان مثال میلی مترمربع) می‌باشد، مقدار تعرق کل سطح برگ از حاصل ضرب  $T_r$  در مساحت برگ به دست خواهد آمد. فشار بخار آب و چگالی آن در حالت اشباع به دمای سیستم بستگی دارد (روابط ۲-۷ و ۲-۱۱) (شکل ۹-۶).

همچنین چگالی بخار آب را می‌توان از طریق رابطه ۹-۳ به فشار بخار ارتباط داد (جونز، ۱۹۹۲):

$$c_{wv} = \left[ \frac{2.17}{T} \right] e_{wv} \quad (9-3)$$

در این رابطه،  $e_{wv}$  فشار بخار آب برحسب پاسکال،  $T$  دما برحسب درجه کلونین و  $c_{wv}$  چگالی یا غلظت بخار آب برحسب گرم بر مترمکعب است. نیروی محرکه جریان را می‌توان در قالب  $\Delta e_{wv}$  بیان کرد،



که باتوجه به رابطه ۳-۹ قابل تبدیل به  $\Delta c_{wv}$  می‌باشد. به عبارت دیگر، اختلاف چگالی یا فشار بخار دلیل اصلی و نیروی محرک انتقال آب در تعرق است. لازم به ذکر است که معمولاً پتانسیل آب سلول‌های درحال تعرق برگ حدود ۱- تا ۵- مگاپاسکال می‌باشد، که از آنجایی که کاهش زیاد در پتانسیل آب، تنها منتهی به کاهش جزئی در فشار بخار آب می‌گردد، بنابراین، این مقادیر پتانسیل آب اهمیت ناچیزی دارند.

برای مثال، اگر پتانسیل آب سلول در دمای  $30^{\circ}\text{C}$ ،  $1/5$ ،  $3$ ، و  $6$ - مگاپاسکال باشد، مقدار فشار بخار آب در سطوح سلولی به ترتیب  $99$ ،  $98$ ،  $96$ % مقدار فشار بخار اشباع در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  است. بنابراین، در چنین شرایطی می‌توان رطوبت نسبی فضاها را بین سلولی، یعنی جایی که تبخیر انجام می‌شود را نزدیک اشباع ( $RH=100$ ) فرض کرد. به عبارت دیگر، در مقادیر مختلف پتانسیل آب، معمولاً فضاها بین سلولی برگ‌ها اشباع از بخار آب بوده و میزان رطوبت نسبی این فضاها حدود  $100$ % می‌باشد. باتوجه به این مسئله فشار بخار آب برگ را می‌توان به صورت رابطه ۴-۹ بیان کرد:

$$e'_{wv} = e_{swv}(T_1) \quad (9-4)$$

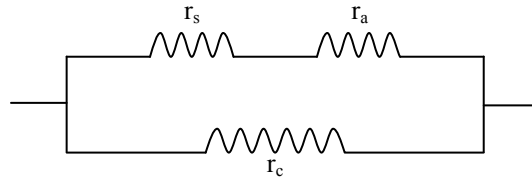
که در آن،  $e'_{wv}$  فشار بخار برگ و برابر با فشار بخار اشباع ( $e_{swv}$ ) در دمای برگ است. به این ترتیب، عامل عمده کنترل‌کننده فشار بخار در برگ، دمای برگ است و با افزایش آن فشار بخار برگ و در نتیجه نیروی محرکه تعرق به سرعت افزایش می‌یابد. در مقابل، با فرض ثابت بودن فشار بخار برگ هر عاملی که دمای برگ را کاهش دهد، فشار بخار برگ و در نتیجه تعرق را کاهش خواهد داد (کرامر، ۱۹۹۵). از آن سو، فشار بخار هوا به دو عامل دما و رطوبت نسبی هوا بستگی دارد و با رابطه ۵-۹ بیان می‌شود:

$$h = \frac{e_{wv}^a}{e_{swv}} \Rightarrow e_{wv}^a = h \cdot e_{swv}(T_a) \quad (9-5)$$

که در آن،  $e_{wv}^a$  فشار بخار هوا،  $h$  رطوبت نسبی هوا،  $e_{swv}$  فشار بخار اشباع و  $T_a$  دمای هوا هستند. نیروی محرک تعرق اختلاف فشار بخار<sup>۱</sup> بین برگ و هوا بوده و از طریق رابطه ۶-۹ محاسبه می‌شود:

$$\Delta e_{wv} = VPD = e'_{wv} - e_{wv}^a \quad (9-6)$$

تأثیر افزایش دما بر اختلاف فشار بخار در شکل ۶-۹ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش دما، فشار بخار برگ و اختلاف فشار بخار به سرعت افزایش می‌یابد. از طرفی، در صورتی که مقدار مطلق رطوبت با افزایش دما ثابت بماند، میزان رطوبت نسبی کاهش یافته و در نتیجه اختلاف فشار بخار با افزایش دما به مقدار زیادی افزایش پیدا می‌کند. در حالت دیگر، اگر مقدار مطلق رطوبت هوا با افزایش دما افزایش یابد و در واقع رطوبت نسبی در درصد مشخصی ثابت بماند، باز هم با افزایش دما، اختلاف فشار بخار افزایش می‌یابد، گرچه مقدار افزایش آن کمتر از حالت قبل است.



شکل ۹-۷ اجزای مقاومت برگ. توجه شود که مقاومت روزنه‌ای ( $r_s$ ) و لایه مرزی ( $r_a$ ) به صورت سری هستند، درحالی‌که مقاومت کوتیکولی ( $r_c$ ) موازی آن‌ها می‌باشد (از مؤلف).

### ۹-۴ مقاومت‌ها در تعرق

به‌طورکلی، مقاومت برگ ( $R_{leaf}$ ) از مقاومت کوتیکولی<sup>۱</sup> ( $r_c$ )، مقاومت روزنه‌ای<sup>۲</sup> ( $r_s$ ) و مقاومت لایه مرزی<sup>۳</sup> ( $r_a$ ) تشکیل شده است (رابطه ۹-۷) (کرامر، ۱۹۹۵):

$$\frac{1}{R_{leaf}} = \frac{1}{r_s + r_a} + \frac{1}{r_c} \quad (9-7)$$

از آنجایی‌که اغلب مقاومت کوتیکولی ( $r_c$ ) در مقابل جریان تعرق خیلی بزرگ است، بنابراین،  $\frac{1}{r_c}$  تقریباً برابر صفر بوده و بدین ترتیب، مقاومت برگ عمدتاً از دو جزء مقاومت روزنه‌ای و مقاومت لایه مرزی تشکیل شده است. بنابراین، سرعت تعرق را می‌توان به صورت رابطه ۸-۹ بیان کرد (کرامر، ۱۹۹۵):

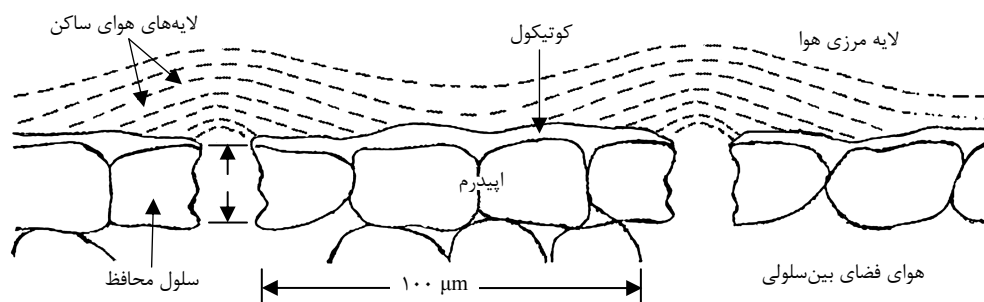
$$T_r = \frac{C'_{wv} - C^a_{wv}}{r_s + r_a} = \frac{e'_{wv} - e^a_{wv}}{r_s + r_a} \quad (9-8)$$

مقاومت روزنه‌ای و لایه مرزی به صورت سری هستند، در صورتی‌که مقاومت کوتیکولی موازی آن‌ها می‌باشد (شکل ۹-۷). مقاومت روزنه‌ای به طول مسیر روزنه و مساحت آن بستگی داشته و به وسیله رابطه ۹-۹ قابل بیان است (جونز، ۱۹۹۲):

$$r_s = \frac{\delta^{st}}{D_{H_2O} n a^{st}} \quad (9-9)$$

که در آن،  $\delta^{st}$ ، طول مسیر روزنه،  $D_{H_2O}$ ، ضریب انتشار بخار آب در هوا،  $n$ ، تعداد روزنه در واحد سطح برگ و  $a^{st}$ ، مساحت هر روزنه هستند. با داشتن معادله فوق می‌توان عوامل مؤثر بر مقاومت روزنه‌ای را مورد بررسی قرار داد. با افزایش طول مسیر روزنه و به‌عنوان مثال قرار گرفتن آن در درون یک حفره، میزان مقاومت روزنه‌ای بیشتر می‌شود. در مقابل، با افزایش تعداد روزنه در واحد سطح برگ و همچنین طول و یا قطر روزنه و در نتیجه مساحت آن، میزان مقاومت روزنه‌ای کاهش می‌یابد. لازم‌به‌ذکر است که ضریب انتشار بخار آب در هوا معادل  $24/2$  میلی‌مترمربع بر ثانیه است و با افزایش دما و همچنین کاهش فشار در مقایسه با فشار هوا در سطح دریا، بر میزان آن افزوده می‌شود.

1. Cuticular resistance  
2. Stomatal resistance  
3. Boundary layer resistance



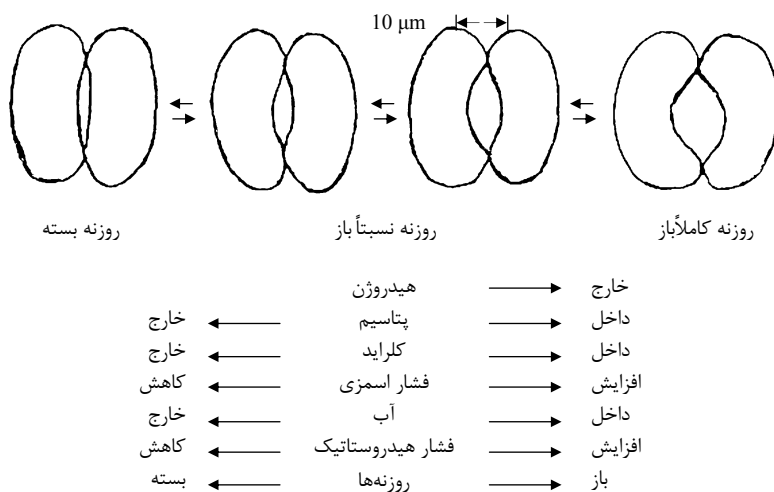
شکل ۹-۸ غلظت لایه بخار آب در بالای روزنه‌های باز، لایه مرزی، لایه‌ای از هوا است که بر اثر اصطکاک بین هوا و برگ ایجاد شده و در این لایه هوا به صورت ساکن و آرام وجود دارد (نوبل، ۱۹۹۴).

لایه مرزی، لایه‌ای از هوا است که بر اثر اصطکاک بین هوا و برگ در سطح برگ ایجاد می‌شود و در این لایه هوا به صورت ساکن و آرام وجود دارد (شکل ۸-۹). مقاومت لایه مرزی و اجزای تشکیل دهنده آن از طریق رابطه ۱۰-۹ قابل محاسبه هستند (جونز، ۱۹۹۲):

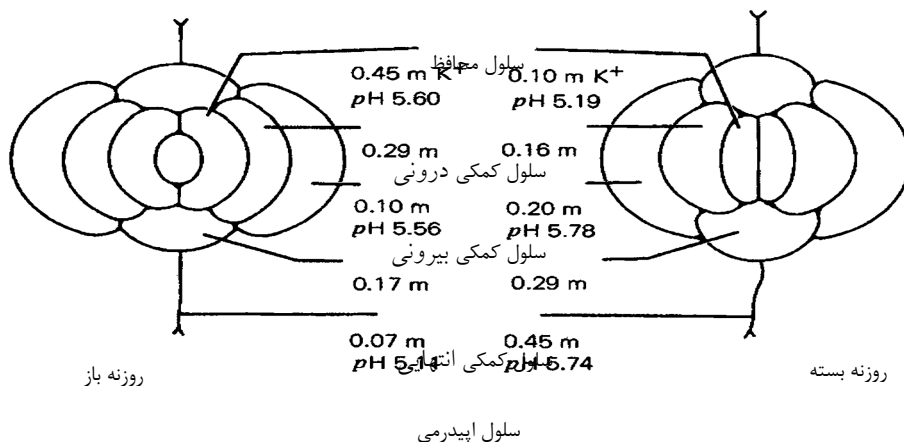
$$r_a = \frac{\delta^{bl}}{D_{H_2O}} \quad \delta^{bl} = \sqrt[4]{\frac{l}{v}} \quad (9-10)$$

که در آن،  $\delta^{bl}$  ضخامت لایه مرزی تشکیل شده روی برگ،  $l$  بعد ویژه برگ یا طول برگ واقع در جهت وزش باد و  $v$  سرعت باد هستند. باتوجه به رابطه فوق مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت لایه مرزی، مقدار مقاومت آن در برابر جریان تعرق افزایش می‌یابد. همچنین، ضخامت لایه مرزی با افزایش طول برگ واقع در جهت وزش باد افزایش و با افزایش سرعت باد کاهش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که طول برگ واقع در جهت وزش باد ( $l$ ) به ابعاد و شکل برگ بستگی دارد. با افزایش ابعاد برگ، این ویژگی افزایش می‌یابد. همچنین، مقدار  $l$  در برگ‌های کشیده و لوب‌دار کمتر از برگ‌های مربع‌مانند و بدون لوب است.

به‌طور کلی، جذب آب و متورم شدن سلول‌های محافظ سبب باز شدن روزنه‌ها می‌شود. مکانیسم اصلی جذب آب در باز شدن روزنه‌ها، اسمزی می‌باشد (شکل ۹-۹). مشاهده شده است که در هنگام بازبودن روزنه‌ها، پتانسیل اسمزی سلول‌های محافظ پایین است. به عبارت دیگر، به دلیل وجود پتانسیل اسمزی پایین در سلول‌های محافظ، آب وارد این سلول‌ها شده و سبب تورم آن‌ها می‌شود. عامل اصلی و اولیه ایجاد چنین پتانسیل اسمزی پایینی، ورود یون‌های پتاسیم ( $K^+$ ) از سلول‌های کمکی اطراف سلول‌های محافظ به درون این سلول‌ها است (شکل ۱۰-۹). ورود یون پتاسیم در تبادل با یون هیدروژن ( $H^+$ ) صورت گرفته و در نتیجه هیدروژن وارد سلول‌های کمکی می‌شود. افزایش pH سلول‌های محافظ در موقع



شکل ۹-۹ قسمت بالا، سلول‌های محافظ را نشان می‌دهد. به دلیل وجود پتانسیل‌های اسمزی پایین در سلول‌های محافظ، آب وارد این سلول‌ها شده و سبب تورم و باز شدن آن‌ها می‌شود. در قسمت پایین روند اتفاقات ایجاد شده جهت باز بسته شدن روزنه‌ها آورده شده است (نویل، ۱۹۹۴).



شکل ۹-۱۰ تغییر مقادیر غلظت‌های پتاسیم در سلول‌های محافظ و سلول‌های کمکی مجاور آن در دو حالت باز بسته بودن روزنه‌ها (سالیسپوری و راس، ۱۹۹۶).

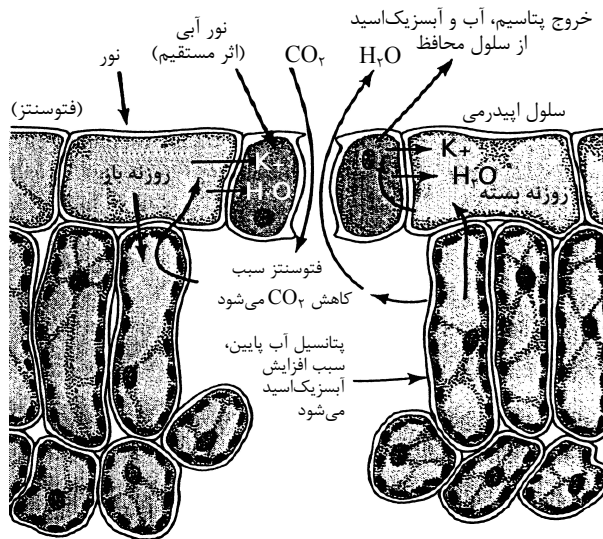
بازبودن روزنه‌ها، که به دلیل خروج هیدروژن صورت می‌گیرد، نیز مؤید این امر است. در واقع، خروج پروتون (یون هیدروژن) به دلیل حفظ تعادل الکتریکی در دو طرف غشا صورت می‌گیرد. البته در بعضی موارد، ورود یون پتاسیم با خروج یون کلر (Cl<sup>-</sup>) و در بعضی مواقع با تجمع املاح آلی به‌ویژه ملات در سلول‌های محافظ همراه است (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

منبع تولیدکننده ملات و گاهی سیترات، نشاسته موجود در سلول‌های محافظ است. در واقع، نخست نشاسته به فسفوانول‌پیروات (PEP) تجزیه می‌شود. سپس فسفوانول‌پیروات با CO<sub>2</sub> ترکیب و تولید اسید آگزالواستیک می‌کند که در مرحله بعد تولید اسید مالیک می‌کند. اسید مالیک تجزیه شده و تولید پروتون و ملات می‌کند. در نهایت، خروج پروتون همراه با ورود پتاسیم صورت گرفته و سبب برقراری تعادل الکتریکی سلول‌های محافظ می‌شود (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

آبسزیک‌اسید (ABA) یک هورمون گیاهی است، که نقش آن در بازوبسته‌شدن روزنه‌ها به‌خوبی شناخته شده است. در شرایط تنش خشکی، آبسزیک‌اسید از سلول‌های مزوفیل آزاد شده و یا اینکه در آن‌ها تولید می‌شود و سپس به سلول‌های محافظ منتقل می‌شود. ورود آبسزیک‌اسید به سلول‌های محافظ سبب خروج پتاسیم، افزایش پتانسیل اسمزی، خروج آب و بسته‌شدن روزنه‌ها می‌شود. لازم‌به‌ذکر است که در صورت خشک‌شدن خاک، آبسزیک‌اسید تولیدشده در سلول‌های ریشه می‌تواند به برگ و سلول‌های محافظ انتقال یافته و سبب بسته‌شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش تلفات آب از طریق تعرق شود.

دو مکانیسم مهم پس‌خور<sup>۱</sup> که کنترل‌کننده بازوبسته‌شدن روزنه‌ها است، در شکل ۱۱-۹ آورده شده است (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶). دی‌اکسیدکربن و آب اجزای اصلی تشکیل‌دهنده این دو مکانیسم هستند. در مکانیسم اول، که به‌وسیله کاهش دی‌اکسیدکربن فعال می‌شود، نور خورشید سبب تحریک فتوسنتز و در نتیجه مصرف دی‌اکسیدکربن توسط گیاه می‌شود. کاهش دی‌اکسیدکربن سبب می‌شود تا گیاه برای جبران کمبود و مصرف آن در فتوسنتز مکانیسم بازشدن روزنه‌ها را فعال کند. برای این منظور و با کاهش دی‌اکسیدکربن، پتاسیم وارد سلول‌های محافظ شده و در نتیجه جذب اسمزی آب و بازشدن روزنه‌ها صورت می‌گیرد.

مکانیسم دوم بازوبسته‌شدن روزنه‌ها به‌وسیله آب فعال شده و هورمون آبسزیک‌اسید در آن نقش دارد. زمانی که در اثر جریان تعرق، خروج آب از برگ بیشتر از مقدار جذب آن توسط ریشه باشد، هورمون آبسزیک‌اسید از سلول‌های مزوفیل رها می‌شود و یا اینکه در اثر خشکی از ریشه تولید و انتقال می‌یابد. خروج یون‌های پتاسیم به بیرون سلول‌های محافظ نتیجه‌ای از واکنش این سلول‌ها به این هورمون است. این مسئله سبب می‌شود که آب در اثر مکانیسم اسمزی از سلول‌های محافظ خارج شده و در نتیجه روزنه‌ها بسته شوند. لازم‌به‌ذکر است در صورتی که سرعت خشک‌شدن برگ‌ها فوق‌العاده سریع باشد، آب مستقیماً از سلول‌های محافظ از دست رفته و روزنه‌ها بدون طی شدن چرخه آبسزیک‌اسید بسته می‌شوند. بنابراین، عوامل مؤثر بر بازوبسته‌شدن روزنه‌ها، با اثر بر فرایند تبادل پروتون و پتاسیم می‌توانند تأثیر خود را بروز دهند (شکل ۱۱-۹).



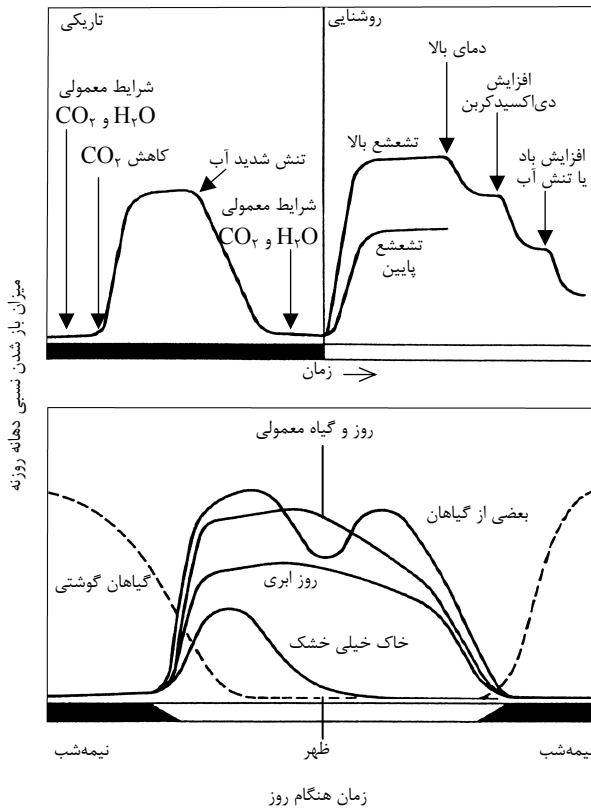
شکل ۹-۱۱ دو مکانیسم بازوبسته شدن روزنه بر مبنای تغییرات آب و دی‌اکسیدکربن. در سمت چپ نور، فتوسنتز را تحریک کرده و در نتیجه غلظت دی‌اکسیدکربن پایین می‌آید. سپس پتاسیم به داخل سلول‌های محافظ جریان یافته و جذب اسمزی آب و باز شدن روزنه رخ می‌دهد. در سمت راست، وقتی آب بر اثر تعرق بیش از مقدار جذب شده از برگ خارج می‌شود، آبسیکاسید از سلول‌های مزوفیل رها شده و یا از ریشه انتقال می‌یابد، که به حرکت پتاسیم به خارج سلول‌های محافظ منتهی می‌شود. در نتیجه آب در اثر مکانیسم اسمزی از سلول‌های محافظ خارج و روزنه‌ها بسته می‌شوند (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

## ۹-۶ واکنش بازوبسته شدن روزنه‌ها به عوامل محیطی

به‌طور کلی نور، دمای محیط، غلظت بخار آب اتمسفر، سرعت باد، غلظت دی‌اکسیدکربن، شدت تشعشع و رطوبت خاک مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بازوبسته شدن روزنه‌ها هستند (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶؛ شکل ۹-۱۲).

### ۹-۶-۱ نور

در اکثر گیاهان، روزنه‌ها با طلوع آفتاب باز شده و بر اثر تاریکی بسته می‌شوند. معمولاً باز شدن روزنه‌ها حدود یک ساعت به طول می‌انجامد، در حالی که اغلب بسته شدن روزنه‌ها به تدریج و در طی بعدازظهر صورت می‌گیرد. تاریک شدن ناگهانی هوا سبب افزایش سرعت بسته شدن روزنه‌ها می‌شود. شکل ۹-۱۲ تأثیر عوامل محیطی بر کنترل روزنه‌ها را خلاصه کرده است. حداقل نور لازم برای باز شدن روزنه‌ها،  $\frac{1}{1000}$  تا  $\frac{1}{3}$  آفتاب کامل و معادل ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ وات بر مترمربع می‌باشد. افزایش تشعشع، سبب باز شدن بیشتر سوراخ روزنه می‌شود. کیفیت نور نیز بر بازوبسته شدن روزنه اثر دارد. نور آبی با طول موج حدود ۴۳۰ تا ۴۶۰ نانومتر بیشترین تأثیر را بر باز شدن روزنه‌ها دارد و حدوداً ۱۰ برابر مؤثرتر از نور قرمز با طول موج ۶۳۰ تا ۶۸۰ نانومتر است. تأثیر نور سبز بر بازوبسته شدن روزنه اندک است.



شکل ۹-۱۲ روند بازوبسته شدن روزنه‌ها در طول روز و شب و تأثیر عوامل مختلف محیطی بر آن. توجه شود که در گیاهان گوشتی روزنه‌ها در شب باز و در روز بسته می‌شوند (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

تأثیر نور بر باز و بسته شدن روزنه‌ها می‌تواند به صورت مستقیم یا غیرمستقیم و از طریق فتوسنتز اعمال شود. در این ارتباط، نور آبی اثر مستقیم دارد در حالی که احتمالاً نور قرمز از طریق فتوسنتز مؤثر است. لازم به ذکر است که فتوسنتز سلول‌های محافظ اندک بوده و نمی‌تواند نقش زیادی در بازوبسته شدن روزنه‌ها داشته باشد.

## ۲-۶-۹ رطوبت

رطوبت خاک و اتمسفر در بازوبسته شدن روزنه‌ها نقش دارد و اگر اختلاف رطوبت بین هوا و فضای بین سلولی زیر روزنه از حد مشخصی فراتر رود، روزنه‌ها بسته می‌شوند. کاهش پتانسیل آب برگ باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌شود. نکته جالب توجه این است که معمولاً تأثیر کاهش پتانسیل آب برگ بر بسته شدن روزنه‌ها غالب بوده و حتی در شرایط غلظت دی‌اکسید کربن پایین و شدت نور بالا، کاهش پتانسیل آب می‌تواند سبب بسته شدن روزنه‌ها شود.

### ۳-۶-۹ دما

معمولاً دماهای بالاتر از ۳۰ تا ۳۵°C باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌شود. تأثیر دماهای زیاد بر بسته شدن روزنه‌ها می‌تواند به‌طور غیرمستقیم و از طریق ایجاد تنش خشکی و یا به‌طور مستقیم و از طریق تشدید تنفس برگ صورت گیرد. با افزایش تنفس برگ غلظت دی‌اکسیدکربن افزایش یافته و در نتیجه روزنه‌ها بسته می‌شوند.

### ۴-۶-۹ باد

باد با تأثیر بر دمای برگ، وضعیت دی‌اکسیدکربن قابل دسترس برگ و پوشش گیاهی و همچنین ضخامت لایه مرزی هوای روی سطح روزنه‌ها، می‌تواند بر بازوبسته شدن روزنه‌ها مؤثر باشد. گاهی وزش نسیم موجب کاهش شکاف روزنه‌ای می‌شود، که احتمالاً نتیجه افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در مجاورت برگ و افزایش انتشار آن به‌درون برگ می‌باشد. باد همچنین می‌تواند از طریق افزایش تعلق و ایجاد تنش خشکی باعث بسته شدن روزنه‌ها شود. لازم‌به‌ذکر است که باد شدید می‌تواند با تأثیر مستقیم بر روزنه‌ها سبب بسته شدن آن‌ها شود.

### ۵-۶-۹ دی‌اکسیدکربن

گیاهان CAM در شب دی‌اکسیدکربن را به‌صورت اسیدهای آلی تثبیت می‌کنند که در نتیجه آن غلظت دی‌اکسیدکربن در داخل برگ کاهش یافته و روزنه‌ها باز می‌شوند. احتمالاً باز شدن روزنه‌ها با کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن فضاها بین سلولی برگ‌ها به‌دلیل نیاز فتوسنتزی دی‌اکسیدکربن و ورود آن به برگ می‌باشد. لازم‌به‌ذکر است که حتی هوای عاری از دی‌اکسیدکربن نیز می‌تواند سبب باز شدن روزنه‌های گیاهان CAM در شب شود. از طرفی، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن باعث بسته شدن جزئی یا کامل روزنه‌ها می‌شود. تأثیر غلظت دی‌اکسیدکربن بر بازوبسته شدن روزنه‌ها، در حقیقت بدین علت است که گیاهان سعی می‌کنند نسبت ثابتی از غلظت دی‌اکسیدکربن بین سلولی به هوا را حفظ کنند. با مصرف دی‌اکسیدکربن در فتوسنتز، این نسبت کاهش یافته و روزنه‌ها باز می‌شوند. برعکس، با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بین سلولی، نسبت غلظت دی‌اکسیدکربن بین سلولی به هوا افزایش یافته و در نتیجه روزنه‌ها بسته می‌شوند.

### ۷-۹ عوامل مؤثر بر تعلق

به‌طور کلی، علاوه بر عواملی که از طریق تأثیر بر بازوبسته شدن روزنه‌ها می‌توانند بر تعلق مؤثر باشند، عوامل مؤثر بر تعلق را می‌توان به دو گروه عوامل گیاهی و عوامل محیطی طبقه‌بندی کرد (کرامر، ۱۹۹۵).

### ۱-۷-۹ عوامل گیاهی مؤثر بر تعلق

#### سطح برگ

از آنجایی که تعلق از کل برگ به سرعت تعلق از واحد سطح برگ و مساحت برگ بستگی دارد، با افزایش سطح برگ میزان تعلق نیز بیشتر می‌شود. البته گاهی مشاهده می‌شود که با کاهش سطح برگ



تعرق کل کاهش نمی‌یابد، زیرا کاهش سطح برگ با افزایش سرعت تعرق از واحد سطح برگ جبران می‌شود. به‌طور کلی، سطح برگ گیاهان از چند سانتی‌متر مربع تا چند متر مربع در بوته متفاوت است. اغلب سطح برگ به‌صورت شاخص سطح برگ بیان می‌شود. شاخص سطح برگ<sup>۱</sup> نسبت مساحت برگ (فقط مساحت یک طرف برگ) به مساحت زمین بوده و فاقد واحد می‌باشد.

شاخص سطح برگ بین گونه‌های گیاهی و حتی ارقام مختلف یک گونه و باتوجه به شرایط مختلف محیطی و مراحل مختلف رشد متفاوت است. به‌عنوان مثال، در چندساله‌های چوبی، شاخص سطح برگ از کمتر از ۲ در جنگل‌های اکالیپتوس تنک نواحی خشک جنوب شرقی استرالیا تا ۴۵-۱۶ در سپیدارهای هیبرید رشد یافته تحت شرایط رشدی مناسب متغیر است. در گیاهان زراعی، معمولاً بیشترین میزان شاخص سطح برگ در اوایل تا اواسط گلدهی بوده و به‌طور معمول ۶-۴ می‌باشد. لازم‌به‌ذکر است که همیشه شاخص سطح برگ بالا به‌عنوان یک مزیت به‌حساب نمی‌آید؛ به‌عنوان مثال در موارد کمبود آب می‌تواند سبب تلفات زیاد آب شود. تعدادی از گیاهان مانند چندساله‌های چوبی در موقع تنش و کمبود آب تعدادی از برگ‌های خود را ازدست می‌دهند که این مسئله سبب کاهش سطح تعرق این گیاهان می‌شود. در شرایط تنش خشکی، جمع‌شدن و پیچ‌خوردن برگ‌ها در ذرت، سورگوم و گراس‌ها می‌تواند سبب کاهش ۷۵-۳۵ درصدی تلفات آب از طریق تعرق شود.

### زاویه برگ

باتوجه به اینکه زاویه برگ بر مقدار تشعشع رسیده به برگ اثر می‌گذارد، بنابراین، می‌تواند بر تعرق مؤثر باشد. برگ‌های عمودی‌تر تشعشع کمتری دریافت کرده و در نتیجه بار تشعشعی کمتر، دمای آن‌ها نیز کمتر خواهد بود. دمای کمتر برگ سبب کاهش فشار بخار برگ و کاهش سرعت تعرق می‌شود.

### شکل برگ

شکل برگ‌ها نیز می‌تواند بر میزان تعرق صورت گرفته از طریق آن مؤثر باشد. برگ‌های کشیده و کوچک یا برگ‌های لوب‌دار و بریده‌بریده در مقایسه با برگ‌های دایره‌ای یا مربع‌شکل، طول برگ واقع در جهت وزش باد کمتری دارند و در نتیجه مقاومت لایه مرزی هوای آن‌ها نیز کمتر خواهد بود. طبیعی است که کاهش مقاومت لایه مرزی می‌تواند سبب افزایش سرعت تعرق شود. با یک مساحت برگ ثابت، بیشترین میزان مقاومت لایه مرزی و در نتیجه کمترین میزان تعرق مربوط به برگ‌هایی است که طول و عرض آن‌ها مساوی باشد.

### خصوصیات سطح برگ

خصوصیات ویژه برگ‌ها از مهمترین عوامل مؤثر بر شدت تعرق می‌باشد. معمولاً وجود کرک در سطح برگ باعث افزایش ضخامت لایه مرزی و کاهش دریافت تشعشع، کاهش دما و در نتیجه کاهش سرعت

1. Leaf area index (LAI)

تعلق می‌شود. رنگ برگ از طریق کاهش یا افزایش تشعشع دریافتی بر دمای برگ مؤثر است. وجود رنگ سفید باعث افزایش انعکاس تشعشع دریافتی، کاهش دمای برگ و در نتیجه کاهش تعلق می‌گردد. گاهی روزنه‌ها در داخل حفره<sup>۱</sup> واقع شده‌اند، که ظاهراً یک سازگاری در جهت کاهش تشعشع دریافتی، کاهش حرارت و در نتیجه کاهش تعلق می‌باشد.

## ۲-۷-۹ عوامل محیطی مؤثر بر تعلق

به‌طور کلی، دمای محیط، غلظت بخار آب اتمسفر، سرعت باد، غلظت دی‌اکسیدکربن، شدت تشعشع و رطوبت خاک از مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر تعلق هستند. معمولاً با افزایش دمای هوا، دمای برگ نیز افزایش می‌یابد. افزایش دمای برگ سبب می‌شود تا فشار بخار اشباع برگ به‌شدت بالا رود و در اثر افزایش اختلاف فشار بخار بین برگ و هوا، سرعت تعلق نیز افزایش یابد. در مقابل، افزایش غلظت بخار اتمسفر و رطوبت نسبی سبب کاهش اختلاف فشار بخار بین برگ و هوا و در نتیجه کاهش سرعت تعلق می‌شود.

تأثیر سرعت باد بر تعلق تا حدودی پیچیده و متغیر است. باد می‌تواند از طریق کاهش ضخامت لایه مرزی تشکیل شده روی برگ، کاهش مقاومت لایه مرزی و همچنین حمل رطوبت از هوای مجاور برگ و در نتیجه کاهش غلظت بخار آب هوا، سبب افزایش تعلق شود. اما اگر باد باعث کاهش دمای برگ شود می‌تواند از طریق کاهش غلظت بخار آب برگ باعث کاهش تعلق شود. به‌هرحال، تأثیر سرعت باد بر مقدار تعلق به‌میزان بار تشعشعی بستگی دارد. در بار تشعشعی کم با افزایش سرعت باد، سرعت تعلق نیز افزایش می‌یابد، در حالی که در بار تشعشعی زیاد عکس این حالت رخ می‌دهد. در بار تشعشعی متوسط معمولاً سرعت تعلق به سرعت باد بستگی ندارد.

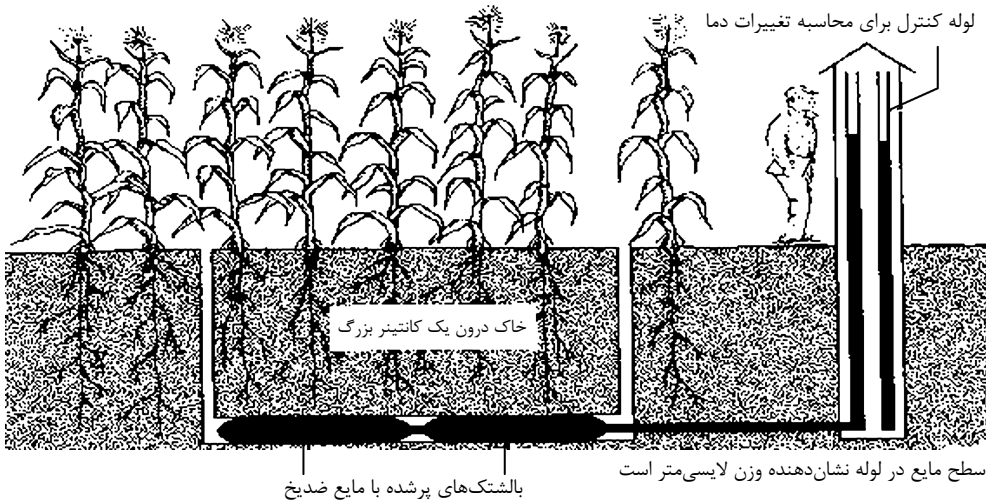
افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن از طریق بستن جزئی روزنه‌ها باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای و در نتیجه کاهش سرعت تعلق می‌شود. تشعشع از طریق بازکردن روزنه‌ها و اثر بر دمای برگ به‌طور معمول سرعت تعلق را افزایش می‌دهد. همچنین، کاهش رطوبت خاک به کمتر از یک حد بحرانی می‌تواند از طریق بستن جزئی یا کامل روزنه‌ها، تعلق را کاهش دهد.

## ۸-۹ روش‌های اندازه‌گیری تعلق

در این قسمت، چهار روش مهم اندازه‌گیری تعلق: روش وزنی، روش لایسی‌متر، روش جریان در ساقه، و روش تبادل گازی مورد بحث قرار می‌گیرند.

### ۱-۸-۹ روش وزنی

در صورتی که گیاه در گلدان باشد، با اندازه‌گیری وزن آن در فواصل مورد نظر می‌توان تعلق را تخمین زد. برای این کار لازم است زهکشی و تبخیر از سطح گلدان کنترل شوند. با پوشاندن سوراخ‌های ته



شکل ۱۳-۹ لایسی‌متر در یک مزرعه ذرت. لایسی‌متر بشکه بزرگی است که در خاک و در روی یک ترازو جاسازی شده و در درون و اطراف آن گیاه کشت می‌گردد (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

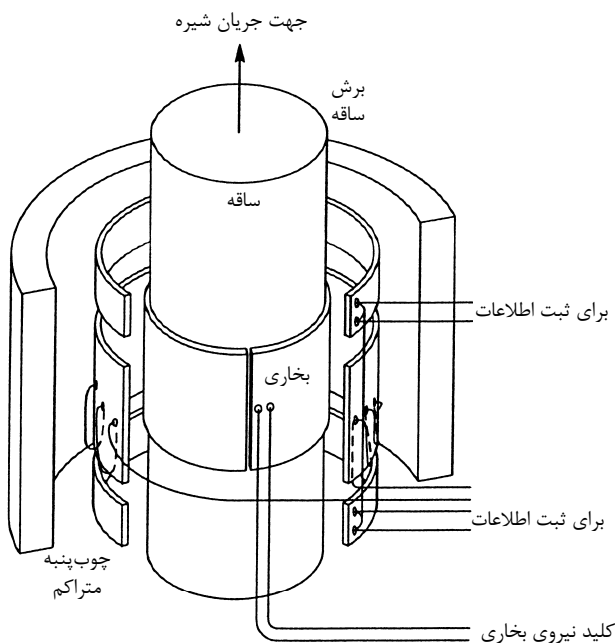
گلدان می‌توان زهکشی را کنترل کرد. البته از آنجایی که این شرایط می‌تواند سبب شرایط تهویه نامناسب برای گیاه شود، میزان آب مورد استفاده برای هر نوبت آبیاری نباید به حدی باشد که رطوبت خاک از حد ظرفیت زراعی بیشتر شود. تبخیر از سطح گلدان را می‌توان با پوشاندن آن با پلاستیک یا پرلیت به حداقل ممکن تقلیل داد.

### ۲-۸-۹ روش لایسی‌متر

لایسی‌متر (Lysimeter) برای تعیین تعرق در شرایط مزرعه به کار رفته و دارای انواع مختلفی است. به‌طور کلی، لایسی‌متر بشکه بزرگی است که در خاک و در روی یک ترازو جاسازی شده و در درون و اطراف آن گیاه کشت می‌گردد (شکل ۱۳-۹). مقدار زهکشی صورت گرفته از لایسی‌متر قابل سنجش بوده و میزان تبخیر را نیز می‌توان با استفاده از ظروف کوچکی اندازه گرفت. بنابراین، با مشخص بودن مقدار آب مورد استفاده در آبیاری، مقدار تعرق قابل محاسبه خواهد بود (سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶).

### ۳-۸-۹ روش جریان در ساقه

در این روش، در یک نقطه در ساقه یک پالس گرمایی ایجاد شده و سپس دما در نقطه‌ای معین و بالاتر روی ساقه اندازه‌گیری می‌شود. زمان لازم برای افزایش دما در این نقطه بالاتر، سرعت جریان شیره خام را نشان می‌دهد. با دانستن قطر ساقه و برخی ضرایب دیگر، می‌توان میزان و سرعت تعرق را تخمین زد (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۴؛ شکل ۱۴-۹).



شکل ۹-۱۴ دستگاه مربوط به روش ایجاد پالس گرمایی و گرم کردن ساقه جهت اندازه‌گیری سرعت حرکت آب در ساقه گیاه (کافی و همکاران، ۱۳۷۸).

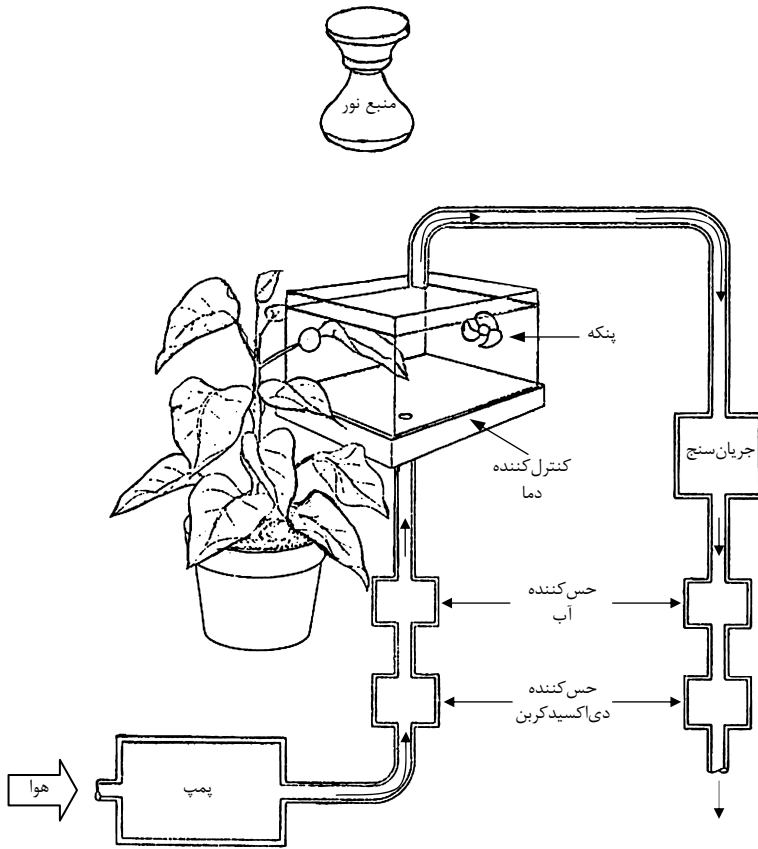
#### ۴-۸-۹ روش تبادل گازی

در این روش برگ داخل محفظه‌ای قرار داده می‌شود که به یک بادبزن<sup>۱</sup> مجهز است. وجود بادبزن سبب می‌شود تا میزان مقاومت لایه مرزی هوای روی برگ داخل محفظه تا حد صفر تنزل یابد. هوا باکمک پمپ از روی برگ داخل محفظه عبور داده شده و غلظت آب و دی‌اکسیدکربن آن در قبل و بعد از عبور از روی برگ اندازه‌گیری می‌شود. با دانستن این اختلاف غلظت و معلوم بودن حجم هوای عبور کرده و سطح برگ داخل محفظه، مقدار تعرق برگ و همچنین میزان فتوسنتز قابل محاسبه خواهد بود (شکل ۱۵-۹). در واقع، افزایش غلظت آب و همچنین کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن هوای خروجی نسبت به آب و دی‌اکسیدکربن هوای ورودی، نشان‌دهنده میزان تعرق و فتوسنتز برگ است (نوبل، ۱۹۹۴).

#### ۹-۹ مواد ضد تعرق

در سالیان اخیر، استفاده از مواد ضد تعرق به‌عنوان راهکاری جهت کاهش تلفات آب مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه شیب اختلاف پتانسیل آب بین برگ و هوا بیشتر از شیب اختلاف غلظت

1. Fan



شکل ۹-۱۵ روش تبادل گازی. هوا باکمک پمپ از روی برگ داخل محفظه عبور داده شده و غلظت آب و دی اکسیدکربن آن، در قبل و بعد از عبور از روی برگ و در نتیجه مقدار تعرق و فتوسنتز، محاسبه می شود (نوبل، ۱۹۹۴).

دی اکسیدکربن بین برگ و هوا می باشد، بسته شدن جزئی روزنه ها می تواند تأثیر کاهشی بیشتری روی ازدست رفتن آب از طریق روزنه ها نسبت به ورود دی اکسیدکربن توسط آن ها داشته باشد. این مسئله سبب می شود که استفاده از مواد ضد تعرق، گرچه باعث کاهش جزئی ورود و تثبیت دی اکسیدکربن توسط برگ ها می شود، ولی به دلیل کاهش زیاد تعرق، کارایی مصرف آب را افزایش دهد. در این ارتباط ترکیبات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته اند که می توانند از طرق مختلف بر روزنه ها تأثیر گذاشته و سبب کاهش تعرق شوند.

ایجاد یک لایه نازک بر روی روزنه ها که اثر ممانعت کننده بیشتری روی آب در مقایسه با دی اکسیدکربن و اکسیژن دارد، می تواند در کاهش تعرق و افزایش کارایی مصرف آب مؤثر باشد. نفوذپذیری انتخابی نسبت به گازها و ارزانی و غیرسمی بودن این مواد جهت کاربرد آن ها در ابعاد وسیع

لازم است. نکته قابل توجه این است که حفظ این لایه نازک ایجاد شده بر روی برگ‌ها، به‌خصوص در شرایط شب‌نیم و بارندگی، بسیار مشکل است و استفاده از آن‌ها را غیرعملی و در بیشتر موارد غیراقتصادی می‌کند. بعضی از بازدارنده‌های متابولیکی و هورمون‌های رشد، علف‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها از طریق بستن نسبی روزنه‌ها می‌توانند سبب کاهش تعرق شوند. فنیل مرکوریک‌استات<sup>۱</sup> که یک قارچ‌کش است می‌تواند سبب کاهش تعرق در تعدادی از گیاهان شود (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷). البته اثر این قارچ‌کش طولانی‌مدت نبوده و روزنه‌های بسته‌شده در اثر کاربرد فنیل مرکوریک‌استات پس از مدت کوتاهی باز می‌شوند. بعضی از ترکیباتی که می‌توانند مقدار تشعشع خورشیدی جذب‌شده توسط برگ‌ها را کاهش دهند نیز می‌توانند به‌منظور کاهش تعرق در تعدادی از گیاهان مورد استفاده قرار گیرند. این مواد باید دارای این خصوصیت باشند که عمدتاً نور مورد استفاده در فتوسنتز را عبور داده و سایر طول‌موج‌ها را منعکس کنند. به‌هرحال، این روش نیز می‌تواند مشکلاتی نظیر روش‌های ذکر شده در بالا داشته باشد.



## موازنه آب خاک

در این فصل می‌خوانیم:

- ۱-۱ موازنه (بیلان) آب خاک
- ۱۰-۲ رواناب
- ۱۰-۳ تبخیر از سطح خاک
- ۱۰-۴ تعرق از گیاه
- ۱۰-۵ زهکشی عمقی

### مقدمه

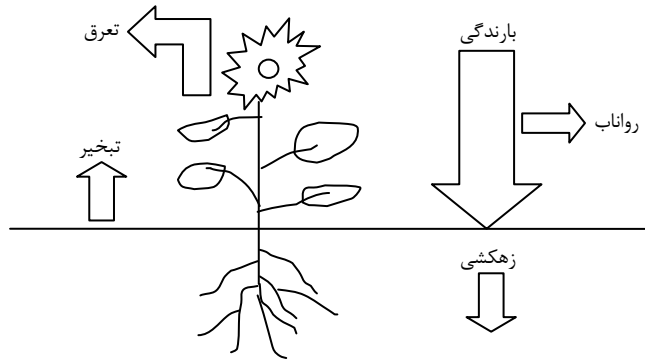
در این فصل به اختصار درباره موازنه (بیلان) آب خاک<sup>۱</sup> توضیح داده می‌شود. شناخت موازنه آب خاک به ما کمک می‌کند تا راههای ورود و خروج آب در خاک را بشناسیم؛ آنچه پس از ورود و خروج در خاک می‌ماند، آب موجود در خاک خواهد بود. در این رابطه، خاک در محدوده رشد ریشه گیاه را می‌توان به یک حساب بانکی تشبیه کرد که مداوماً پول به آن ریخته و از آن خارج می‌شود و آنچه می‌ماند موجودی حساب نام دارد. همچنین، شناخت موازنه آب خاک در مدیریت زراعت دیم، مدیریت آبیاری و زهکشی اهمیت زیادی دارد.

### ۱-۱ موازنه آب خاک

شکل ۱-۱۰ راههای ورود و خروج آب در خاک را نشان می‌دهد. آب از طریق بارندگی<sup>۲</sup> و آبیاری<sup>۳</sup> وارد خاک شده و از طریق رواناب<sup>۴</sup>، زهکشی عمقی<sup>۵</sup>، تبخیر از سطح خاک<sup>۶</sup> و تعرق از گیاه<sup>۷</sup> از خاک خارج می‌گردد. میزان آب موجود در خاک را، که برآیند این ورود و خروج است، در هر دوره زمانی مورد نظر مثل روز، هفته، ماه یا سال می‌توان از رابطه ۱-۱۰ به دست آورد (سلطانی و همکاران، ۱۹۹۹؛ ۲۰۰۱):

1. Soil water balance
2. Precipitation
3. Irrigation
4. Run off
5. Deep drainage
6. Soil evaporation
7. Plant transpiration





شکل ۱-۱ موازنه آب در خاک. مدیریت زراعی باید به گونه‌ای صورت گیرد که میزان تعرق بیشترین نقش را بین اجزای موازنه آب خاک داشته باشد.

$$SW_i = SW_{i-1} + P + I - R - D - E - T \quad (10-1)$$

که در آن،  $SW_i$  میزان آب موجود در خاک در روز  $i$ ،  $SW_{i-1}$  میزان آب موجود در خاک در روز قبل،  $P$  بارندگی،  $I$  آبیاری،  $R$  رواناب،  $D$  زهکشی عمقی،  $E$  تبخیر از سطح خاک و  $T$  تعرق از گیاه هستند و همگی برحسب میلی‌متر یا سانتی‌متر می‌باشند.

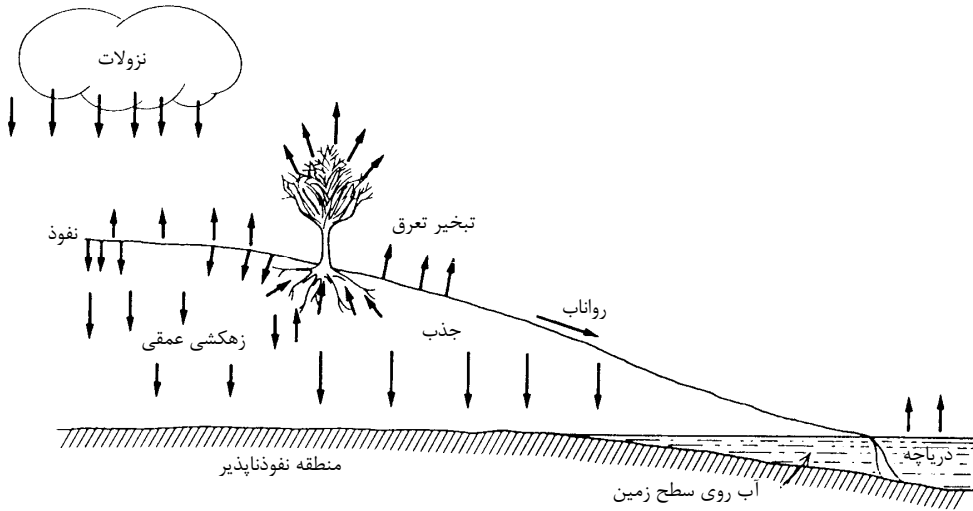
رابطه ۱-۱ را همچنین می‌توان در هر مقیاسی به کار برد: در سطح قاره‌ها و خشکی‌های بزرگ، در سطح آبخیز، در سطح مزرعه و یا برای یک تک‌بوته در مزرعه یا گلدان. در قسمت‌های زیر درباره هر یک از اجزای موازنه آب خاک توضیحاتی ارائه خواهد شد.

## ۱۰-۲ رواناب

رواناب به آبی گفته می‌شود که بعد از بارندگی یا آبیاری در خاک نفوذ نمی‌کند. این آب در سطح خاک جاری شده و از مزرعه یا سطح موردنظر خارج می‌گردد. بدیهی است که رواناب، دیگر در مزرعه موردنظر قابل استفاده نخواهد بود و بنابراین، رواناب، هدرروی آب می‌باشد. رواناب را باید در رابطه با نفوذ<sup>۱</sup> آب در خاک مورد بررسی قرار داد. در زمین‌های شیب‌دار، نقش رواناب در بین اجزای موازنه آب خاک افزایش یافته و این مسئله سبب کاهش ورود و نگهداری آب در خاک می‌شود (شکل ۱۰-۲).

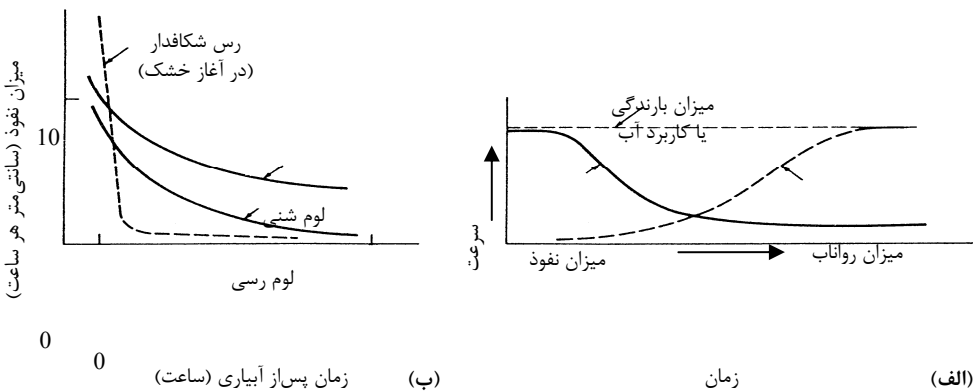
در شکل ۱۰-۳ سرعت نفوذ آب در سه نوع خاک که در ابتدا خشک بوده‌اند و همچنین رابطه نفوذ و رواناب به تصویر کشیده شده است. در ابتدا که خاک خشک می‌باشد، سرعت نفوذ آب زیاد است، ولی با گذشت زمان، روبه‌کاهش می‌گذارد. کاهش سرعت نفوذ آب با گذشت زمان به سه دلیل است (میلر و داناهاو، ۱۹۹۰): (۱) رس‌های خاک با جذب آب متورم شده که در نتیجه آن منافذ خاک کوچکتر می‌شوند و سرعت حرکت آب در خاک کاهش می‌یابد، (۲) ذرات ریز خاک با جریان آب به حرکت درآمده و منافذ زیرین خاک را مسدود می‌نمایند و (۳) با جریان یافتن آب در عمق بیشتر و از طریق منافذ

1. Infiltration



شکل ۲-۱۰ موازنه آب خاک در یک زمین شیب‌دار. در زمین‌های شیب‌دار نقش رواناب در بین اجزای موازنه آب خاک افزایش یافته و این مسئله سبب کاهش ورود و نگهداری آب در خاک می‌شود (کرامر، ۱۹۹۵).

طولانی‌تر، مقاومت در برابر جریان آب افزایش پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال، در خاک‌های رسی ترک‌دار، به‌واسطه وجود شکاف‌های بزرگ و عمیق، سرعت نفوذ آب در خاک در ابتدا بسیار زیاد است، ولی با جذب آب توسط رس‌ها، سرعت نفوذ آب در خاک به‌سرعت کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۳-۱۰ (الف) رابطه منفی بین میزان نفوذ آب در خاک با رواناب با گذشت زمان؛ (ب) رابطه سرعت نفوذ آب در خاک با گذشت زمان در سه نوع بافت خاک. توجه شود که با سنگین‌تر شدن بافت خاک، میزان نفوذ آب در خاک کاهش می‌یابد. در خاک رسی خشک و شکاف‌دار، سرعت نفوذ آب به‌واسطه وجود شکاف‌های بزرگ و عمیق در ابتدا بسیار زیاد است، ولی با جذب آب توسط رس‌ها، سرعت نفوذ آب در خاک به‌سرعت کاهش پیدا می‌کند (حق نیا، ۱۳۷۴).

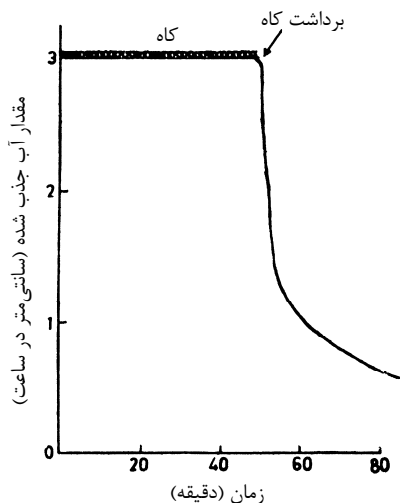
به لحاظ سرعت نفوذ آب، خاک‌ها را به چهار دسته طبقه‌بندی می‌کنند که عبارت‌اند از (میلر و داناهاو، ۱۹۹۰): (۱) سرعت نفوذ آب در خاک بسیار کم (۰/۲۵ سانتی‌متر در ساعت)، (۲) سرعت نفوذ آب در خاک کم (۰/۲۵-۱/۲۵ سانتی‌متر در ساعت)، (۳) سرعت نفوذ آب در خاک متوسط (۲/۵-۱/۲۵ سانتی‌متر در ساعت) و (۴) سرعت نفوذ آب در خاک زیاد (بیشتر از ۲/۵ سانتی‌متر در ساعت).

در کشاورزی نفوذ سریع آب در خاک و در نتیجه کاهش رواناب دارای اهمیت است. این مسئله بدین علت است که ایجاد رواناب و در واقع هدر رفت آب سبب می‌شود تا رطوبت خاک تأمین نگردیده و تجدید نشود. رواناب می‌تواند سبب فرسایش خاک شده و همچنین در اراضی پایین‌دست موجب ایستایی (غرقابی) شدن خاک شود. ویژگی‌های خاک، پوشش زمین، شدت و دوام بارندگی، مقدار آب خاک، شیب زمین و دمای آب و خاک عوامل عمده مؤثر بر نفوذ آب در خاک و رواناب هستند. هر عاملی که سبب کاهش نفوذ آب به داخل خاک می‌شود می‌تواند سبب افزایش رواناب گردد.

ویژگی‌های خاک در ایجاد رواناب نقش مهمی دارند. در خاک‌های دارای درصد شن بیشتر، منافذ بزرگتر بوده و نفوذ آب در خاک را تسریع می‌کنند. عکس این حالت در خاک‌های دارای درصد رس بالاتر رخ می‌دهد. خاک‌های دارای ساختمان و خاک‌دانه‌های مناسب نیز سرعت نفوذ بالاتری را ایجاد می‌کنند. وجود مقادیر بیشتری از ماده آلی در خاک، بافت خاک را درشت‌تر کرده و اجازه ورود آب بیشتری را به خاک می‌دهد. فشردگی خاک، تخلخل خاک را کاهش داده و نفوذ آب را کند می‌کند. وجود لایه‌های سخت در خاک باعث می‌شود که آب به عمق بیشتر نفوذ نکرده و در نتیجه رواناب تولید گردد. زبری سطح خاک نیز حرکت آب در سطح خاک را کند کرده و فرصت بیشتری برای نفوذ آب در خاک به وجود می‌آورد. وجود کلوخه و شخم خوردن خاک، درجه زبری آن را افزایش می‌دهد.

وجود پوشش گیاهی و مالچ نیز موجب کاهش رواناب می‌گردد. در اثر برخورد قطرات باران با خاک، خاک‌دانه‌های سطح خاک متلاشی شده و ذرات حاصله می‌توانند منافذ سطحی خاک را مسدود کنند. این امر نفوذ آب در خاک را به سرعت کاهش می‌دهد. سطح بسیاری از خاک‌های رسی از این طریق به آسانی مسدود شده و قدرت نفوذپذیری آن‌ها در عرض چند دقیقه بعد از بارندگی سنگین به شدت کاهش می‌یابد. وجود گیاه، مالچ‌های کلشی و بقایای گیاهی به علت از بین بردن اثر برخورد قطرات باران با خاک، رواناب را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (شکل ۴-۱۰). مشاهده شده است که وجود مالچ، رواناب را به نصف کاهش می‌دهد. همچنین، وجود پوشش گیاهی فعال و در حال رشد، به دلیل مصرف آب خاک، به طور غیرمستقیم رواناب را کاهش می‌دهد. گیاهان علوفه‌ای و گیاهانی که به طور متراکم کشت می‌شوند (مثل گندم)، مؤثرتر از گیاهان ردیفی یا جینی (مثل پنبه و ذرت) در کاهش رواناب هستند.

شدت و دوام بارندگی نیز در حجم رواناب ایجاد شده مؤثر هستند. در شرایطی که بارندگی شدید و یا طول مدت بارش زیاد باشد، فرصت کمتری برای نفوذ آب در خاک وجود خواهد داشت و در نتیجه رواناب بیشتری ایجاد می‌گردد. رطوبت موجود در خاک نیز اهمیت زیادی دارد. از آنجایی که در



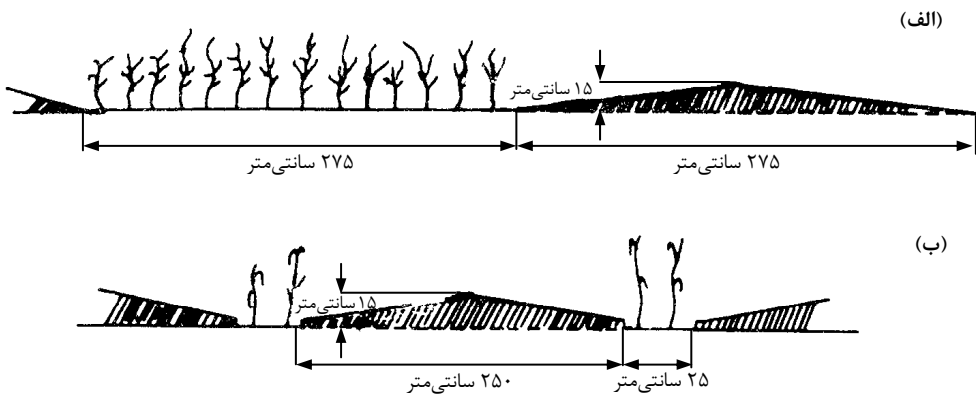
شکل ۴-۱۰ تأثیر باقی ماندن کاه بر جذب آب توسط خاک و در نتیجه کاهش رواناب. وجود گیاه، مالچ‌های کلشی و بقایای گیاهی به علت از بین بردن اثر برخورد قطرات باران با خاک، جذب آب را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند (سرمدنیا و کوچکی، ۱۳۷۱).

خاک‌های مرطوب در مقایسه با خاک‌های خشک، ترک‌ها و منافذ کمتر و کوچکتری برای حرکت آب باقی مانده وجود دارد و معمولاً رس‌ها نیز از قبل متورم شده‌اند، بنابراین، خاک‌های مرطوب در مقایسه با خاک‌های خشک سرعت نفوذ آب کمتر و در نتیجه رواناب بیشتری دارند.

دمای خاک و آب در نفوذ آب در خاک و ایجاد رواناب مؤثر است. در خاک‌های گرم در مقایسه با خاک‌های سرد، سرعت نفوذ آب بیشتر است. این مسئله بدین علت است که گرم شدن خاک و آب می‌تواند سبب شکسته شدن پیوندهای هیدروژنی، کاهش ویسکوزیته و در نتیجه افزایش هدایت هیدرولیکی خاک شود. بدیهی است که یخ زدن خاک سبب کاهش شدید نفوذ آب به داخل خاک و در نتیجه افزایش رواناب می‌شود.

در شرایط خاصی، رواناب به طور مصنوعی ایجاد می‌شود، تا آب حاصله در نقطه دیگری از زمین برای رشد گیاه مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۵-۱۰). این روش در کشاورزی مناطق خشک کاربرد دارد. در این روش نوارهای تأمین‌کننده و همچنین دریافت‌کننده آب وجود دارند. ممکن است برای ایجاد رواناب بیشتر در نوار تأمین‌کننده آب، سطح آن توسط ورقه‌های نازک پلاستیکی یا فلزی پوشانده شود و یا از موادی مثل قیر و کربنات سدیم استفاده شود. کربنات سدیم کلوئیدهای خاک را متلاشی کرده و موجب مسدود شدن منافذ سطح خاک می‌گردد.

در محیط‌های طبیعی، رواناب ایجاد شده منبعی برای تغذیه رودخانه‌های فصلی و دائمی بوده و از این لحاظ، تنها جنبه منفی ندارند.



شکل ۵-۱۰ ایجاد رواناب مصنوعی جهت استفاده از آب حاصل از آن در نقطه‌ای دیگر از مزرعه، (الف) غلات دانه‌ریز؛ (ب) محصولات وجینی. بزرگی نوارهای تأمین‌کننده و همچنین دریافت‌کننده آب باتوجه به میزان رطوبت موجود، نوع گیاه و بافت خاک تعیین می‌شود (سرمدنیا و کوچکی، ۱۳۷۱).

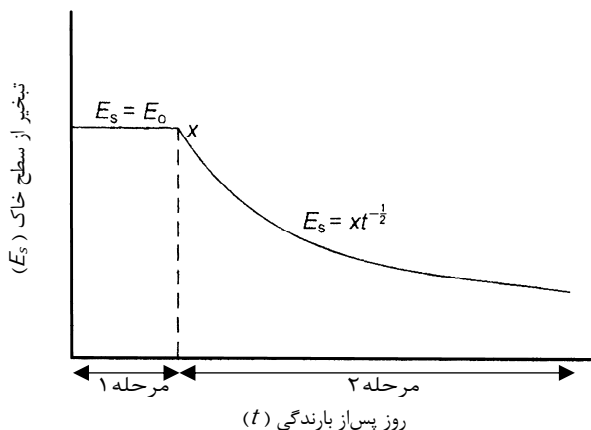
### ۳-۱۰ تبخیر از سطح خاک

بعد از مرطوب شدن خاک پس از بارندگی یا آبیاری، تبخیر از خاک در دو مرحله رخ می‌دهد (لومیس و کانر، ۱۹۹۲؛ شکل ۶-۱۰). در مرحله اول، سرعت تبخیر از سطح خاک مشابه تبخیر تعرق بالقوه بوده و میزان آن به وسیله انرژی موجود برای تبخیر تعیین می‌گردد. در واقع، در این مرحله، آب به اندازه کافی در خاک وجود دارد میزان تبخیر از سطح خاک به وسیله مقدار و شدت تشعشع و حرارت تعیین می‌شود. در مرحله دوم، تبخیر به عرضه رطوبت به سطح تبخیرکننده (خاک) وابسته است همچنان که خاک خشک می‌شود، سرعت تبخیر نیز به سرعت کاهش پیدا می‌کند. در مرحله اول تبخیر، تا زمانی که تبخیر تجمعی به حد معینی برسد، ادامه می‌یابد. این حد معین تبخیر از مشخصات خاک بوده و برای خاک‌های شنی ۶ میلی‌متر و برای خاک‌های لومی و رسی ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین، مرحله اول تبخیر از سطح خاک کوتاه خواهد بود و به طور تپیک ۲۴ تا ۳۶ ساعت به طول می‌انجامد. انتقال به مرحله دوم ناگهانی رخ می‌دهد و چنانچه اندازه‌گیری صورت گیرد، به خوبی مشخص بوده و زمان آن قابل محاسبه است. با خشک شدن خاک در مرحله دوم، انرژی موجود بیشتر صرف گرم کردن خاک خواهد شد.

کاهش تبخیر در مرحله دوم با ریشه دوم زمان از شروع مرحله دوم رابطه عکس داشته و توسط رابطه ۲-۱۰ قابل توصیف است:

$$E_s = ct^{-\frac{1}{2}} \quad (10-2)$$

که در آن،  $E_s$  میزان تبخیر (میلی‌متر در روز)،  $c$  یک ضریب ثابت و  $t$  زمان بعد از شروع مرحله دوم هستند. ضریب  $c$  به ویژگی‌های هیدرولیک خاک بستگی دارد و می‌توان آنرا با اندازه‌گیری تبخیر تجمعی در طی یک چرخه خشک شدن خاک، محاسبه کرد. مقدار تپیک این ضریب ۳ تا ۴ میلی‌متر بر



شکل ۶-۱۰ مراحل تبخیر از سطح خاک بعد از مرطوب شدن خاک پس از بارندگی یا آبیاری. در مرحله اول خشک شدن، تبخیر از سطح خاک ( $E_s$ ) با تبخیر تعرق پتانسیل ( $E_0$ ) برابر است، در حالی که در مرحله دوم خشک شدن، تبخیر از سطح خاک ( $E_s$ ) به نسبت معکوس ریشه دوم زمان ( $t$ ) کاهش می یابد (لومیس و کانر، ۱۹۹۲).

ریشه دوم روز ( $\text{mm d}^{-1/2}$ ) می باشد. علت کاهش سرعت تبخیر در طی مرحله دوم، آن است که با گذشت زمان عمق خاکی که باید رطوبت از آن بیرون کشیده شود، افزایش می یابد. این افزایش فاصله و پایین بودن هدایت هیدرولیکی خاک، که غیر اشباع نیز هست، سرعت تبخیر را محدود می سازد. از آنجایی که تبخیر از سطح خاک می تواند تا ۶۰٪ آب مصرفی (تبخیر تعرق) را تشکیل دهد و با کاهش آن آب بیشتری برای استفاده در تعرق و رشد گیاه باقی خواهد ماند، بنابراین، کاهش تلفات تبخیر از سطح خاک در کشاورزی اهمیت زیادی دارد. این امر به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک اهمیت بیشتری دارد.

تلفات تبخیر را می توان از طریق روش های زیر کاهش داد (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷): (۱) کاهش انتقال تلاطمی بخار آب به هوا از طریق به کارگیری بادشکن و مالچ ها، (۲) کاهش تداوم موینگی از طریق خشک شدن سریع لایه سطحی خاک و (۳) کاهش جریان موینگی آب و ظرفیت نگهداری آب در لایه های سطحی خاک.

چنانچه خاک لایه سطحی دارای ساختمان مناسب نبوده و یا فاقد ساختمان باشد (در اثر شخم زدن و خاک ورزی مکرر)، لوله های مویین سطحی انسداد پیدا کرده و از صعود آب به سطح خاک جلوگیری می شود. این مسئله سبب می شود که در مقایسه با خاک دست نخورده، تلفات تبخیر در خاک با ساختمان نامناسب به طور مؤثری کاهش یابد. در دهه ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ میلادی در منطقه دشت های بزرگ آمریکا سعی شد از این روش استفاده گردد. نکته قابل توجه این است که گرچه این روش در کاهش تبخیر مؤثر بود، ولی خاک بدون ساختمان حاصله بسیار مستعد فرسایش شده و مشکلات زیادی را ایجاد کرد. برای

رفع این مشکل، که منطقه مذکور را به "کاسه گردوغبار" تبدیل کرده بود، سالیان زیادی وقت صرف شد. اکنون استفاده از روش خراب کردن ساختمان سطحی خاک جهت کاهش تبخیر مردود شناخته شده است (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

مالچ کلش نیز از طریق کاهش مقدار انرژی جذب شده توسط خاک و نیز کاهش جریان هوا در بالای سطح زمین موجب کاهش تبخیر می شود. با وجود آنکه مالچ های پلاستیکی تیره و آسفالت از این نظر مؤثرتر هستند، کاربرد آن ها در سطح وسیع اقتصادی و کاربردی نیست. در سطوح محدود، استفاده از مالچ ها معمولاً چندمنظوره است و برای کنترل علف های هرز، کاهش فرسایش خاک، کمک به نفوذ آب در خاک و جلوگیری از پوسیدگی میوه ها، از طریق ممانعت از تماس آن ها با خاک، مورد استفاده قرار می گیرند (سرمدنیا و کوچکی، ۱۳۷۱).

یک برداشت و تصور نادرست در رابطه با مالچ ها آن است که مالچ ها به افزایش ذخیره رطوبت نهایی خاک کمک می کنند. مالچ تلفات تبخیر در روزها یا هفته های اول بعد از مرطوب شدن خاک را کاهش می دهد، اما در طول یک مدت زمان طولانی، تلفات تبخیر از یک خاک پوشیده با مالچ به میزان تلفات تبخیر از یک خاک لخت نزدیک می گردد. از این لحاظ مالچ هایی که مانع فیزیکی ایجاد می کنند، یعنی ورقه های پلاستیکی و آسفالت، بسیار مؤثرتر از مالچ های طبیعی، مثل بقایای گیاهی، پوسته بذرها و میوه ها، سنگ ریزه ها و سنگ ها و خرده های چوب، هستند. سایه اندازی ناشی از مالچ های طبیعی، تلفات تبخیری را در طی چندین روز کاهش می دهد و در صورتی که در طی همین روزها گیاه نیز در حال رشد باشد، این کاهش تلفات تبخیر می تواند برای گیاه اهمیت حیاتی پیدا کند (میلر و داناو، ۱۹۹۰).

از مواد شیمیایی نیز برای کاهش تلفات تبخیر استفاده شده است. تحقیقات نشان داده است که اختلاط هگزادکانول (الکلی با زنجیره طولانی) با  $3/5$  سانتی متر لایه سطحی خاک، تلفات تبخیر را تا  $43\%$  کاهش می دهد. این ماده نسبت به تجزیه میکروبی مقاوم بوده و به همین دلیل دوره تأثیر آن در کاهش تبخیر، بیشتر از یک سال است. مشاهده شده است که لایه سطحی خاک آغشته به این ماده سریع تر خشک شده و در نتیجه به صورت مانعی در برابر انتشار بخار آب عمل می کند. همچنین، بیمار خاک با هگزادکانول باعث می شود تا شکاف های کمتری در خاک ایجاد شده و ثبات خاک دانه ها افزایش یابد.

## ۴-۱۰ تعرق از گیاه

باتوجه به اینکه درباره تعرق و عوامل مؤثر بر آن توضیحات کاملی در فصل ۹ ارائه شده است، بنابراین، از تکرار مطلب در این قسمت خودداری می گردد و فقط به ذکر نکات خاصی اکتفا خواهد شد.

تا آنجایی که به تولید گیاهی و کشاورزی مربوط می شود، باید سعی شود که بخش اعظم آب وارد شده به خاک، از طریق تعرق به مصرف برسد. تثبیت دی اکسید کربن و تولید ماده خشک توسط گیاه تا زمانی ادامه دارد که روزنه ها باز باشند و روزنه ها تا زمانی باز هستند که تعرق از گیاه انجام می شود.

بنابراین، کاهش راههای هدررفت آب از مخزن خاک و هدایت آب مصرفی به مسیر تعرق باعث تداوم تثبیت کربن و افزایش تولید خواهد شد.

نکته قابل ملاحظه در این رابطه آن است که در دو حالت تعرق مفید نیست و باید در کشاورزی این دو شکل غیرمفید تعرق را تا حد امکان محدود ساخت. تلفات مفرط و غیرضروری آب در تعرق توسط گیاه و تعرق غیرضروری و مضر توسط علفهای هرز و گیاهان ناخواسته، این دو شکل غیرمفید تعرق می‌باشند. تعرق مفرط را می‌توان از راههای زیر کاهش داد: (۱) افزایش مقاومت برگ نسبت به تعرق با به‌کارگیری مواد ضدتعرق که روزه‌ها را به‌حالت نیمه‌مسدود یا مسدود درمی‌آورند (به فصل ۹، مواد ضدتعرق مراجعه شود)، (۲) کاهش مقدار انرژی خالص جذب‌شده توسط برگ‌ها از طریق افزایش انعکاس از سطح برگ، به‌ویژه انعکاس طول‌موج‌های قرمز دور و مادون قرمز (۰/۷ تا ۱۰ میکرومتر) که فقط اثرات حرارتی دارند، (۳) کاهش رشد غیرضروری و مفرط قسمت‌های هوایی گیاه با استفاده از مواد کندکننده رشد گیاه و (۴) افزایش مقاومت هوا در برابر انتقال بخار آب با استفاده از بادشکن.

لازم به ذکر است از آنجایی که وجود باد سبب کاهش مقاومت لایه مرزی هوا در برابر جریان بخار آب و از این رو افزایش تعرق می‌شود، بنابراین، استفاده از بادشکن می‌تواند با کاهش نفوذ باد به مزرعه، کانوپی و سطح برگ، سبب حفظ لایه مرزی هوا بر روی برگ، افزایش مقاومت در برابر خروج بخار آب از روزه‌ها و در نتیجه کاهش تلفات تعرقی گیاه شود. در شرایط دیم، جلوگیری از رشد رویشی و تعرق زیاد در مراحل رویشی گیاه، موجب می‌شود آب بیشتری در خاک باقی بماند و در نتیجه گیاه بتواند از این آب ذخیره‌شده در مرحله رشد زایشی استفاده کرده و دانه‌هایش را پر کند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

گیاهان هرز نیز با استفاده از رطوبت خاک و مصرف آن در تعرق، سبب تلفات زیاد آب خاک می‌شوند. کنترل گیاهان هرز یکی از مؤثرترین روش‌های افزایش مقدار آب قابل دسترس برای گیاه مفید است. در یک تحقیق، مشاهده گردید که مقدار آب صرفه‌جویی‌شده در اثر حذف علف‌های هرز از یک مزرعه ذرت، معادل یک آبیاری کامل ذرت در زمان حداکثر نیاز آن بود (کوپر و همکاران، ۱۹۸۸).

## ۵-۱۰ زهکشی عمقی

یکی دیگر از اجزای موازنه آب خاک، زهکشی عمقی است. زهکشی عمقی در شرایطی رخ می‌دهد که رطوبت خاک بیشتر از ظرفیت زراعی شود. در این شرایط آب مازاد بر ظرفیت نگهداری خاک از منطقه ریشه گیاه خارج می‌شود. بنابراین، میزان زهکشی عمقی از خاک‌هایی که ظرفیت نگهداری آب کمتری دارند، بیشتر از خاک‌هایی با ظرفیت نگهداری آب بیشتر خواهد بود. خاک‌های شنی بسیار مستعد زهکشی عمقی هستند، درحالی‌که مقدار زهکشی عمقی در خاک‌های رسی کمتر است. به‌هرحال، معمولاً پس از بارندگی یا آبیاری، زهکشی عمقی صورت گرفته و آب مازاد بر ظرفیت زراعی به تدریج و با سرعتی که روبه‌کاهش است، زهکش می‌شود (میلر و داناو، ۱۹۹۰).



باتوجه به اینکه آب ازدست‌رفته در زهکشی عمقی، دیگر برای گیاه قابل‌استفاده نخواهد بود و همچنین برخی از عناصر ضروری برای گیاه همراه با آب زهکشی از منطقه ریشه خارج می‌شوند، بنابراین، در کشاورزی و در شرایط متعارف، زهکشی عمقی مضر تلقی می‌شود. کلسیم، منیزیم، گوگرد، پتاسیم، نیتروژن و تاحدود کمتری فسفر، عناصر پرمصرفی هستند که معمولاً از طریق زهکشی عمقی از خاک خارج می‌شوند. آشنویی نترات که ناشی از خروج یون نترات از منطقه ریشه گیاه توسط آب زهکشی و وارد شدن آن به آب‌های زیرزمینی است، امروزه یکی از مشکلات مهم زیست‌محیطی در سطح دنیا به‌شمار می‌آید.

از طرفی، اغلب میزان زهکشی عمقی در مناطق خشک قابل‌ملاحظه نیست، ولی در مناطق نیمه‌خشک، که بخش عمده بارندگی در ماه‌های معدودی از سال نازل می‌شود، و همچنین در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب حایز اهمیت است. همچنین، در محیط‌های طبیعی زهکشی عمقی همواره نامطلوب نبوده و می‌تواند نقش عمده‌ای در تغذیه منابع آب زیرزمینی داشته باشد. در کشاورزی و تحت شرایط خاصی که خاک شور است، زهکشی مصنوعی ایجاد می‌شود، تا املاح خاک همراه با آب زهکشی عمقی از منطقه ریشه گیاه خارج شوند.

# کارایی مصرف آب

در این فصل می‌خوانیم:

- ۱-۱۱ انواع کارایی مصرف آب
- ۲-۱۱ عوامل مؤثر بر کارایی مصرف آب
- ۳-۱۱ افزایش کارایی مصرف آب در شرایط دیم
- ۴-۱۱ تبعیض علیه ایزوتوپ  $^{13}\text{C}$

## مقدمه

مقدار آب مصرفی به‌ازای هر گرم ماده خشک تولیدشده توسط گیاه، نیاز آبی یا آب موردنیاز گیاه نامیده می‌شود، که در ابتدا به‌وسیله محققان مورد استفاده قرار می‌گرفت. میزان نیاز آبی گونه‌های مختلف گیاهی و حتی ارقام مختلف یک گونه به‌طور قابل توجهی متفاوت است. به‌عنوان مثال، بریگز و شانتر (۱۹۱۴) با مطالعه ۱۵۰ گونه گیاهی مشاهده کردند که میزان نیاز آبی از ۲۱۶ گرم آب بر گرم ماده خشک در ارزن تا ۱۱۳۱ گرم آب بر گرم ماده خشک برای یک گونه علفی محلی متغیر است. در مطالعه آن‌ها، نکته قابل توجه این بود که بین نیاز آبی برای تولید هر گرم ماده خشک با تحمل به خشکی گونه‌های گیاهی مورد مطالعه، هیچ‌گونه رابطه‌ای مشاهده نشد. به‌عنوان مثال، گرچه تحمل به خشکی یونجه بیشتر از ذرت بود، ولی میزان نیاز آبی در شرایط مختلف در یونجه و ذرت به‌ترتیب ۱۱۰۰-۶۶۰ و ۴۰۰-۲۵۰ گرم آب بر گرم ماده خشک بود. نکته مهم دیگری که آزمایش نامبردگان نشان داد این بود که برای تولید هر واحد معین از ماده خشک گیاهی نمی‌توان مقدار مشخصی آب مصرفی در نظر گرفت، یعنی نیاز آبی متغیر است. بنابراین، اصطلاح نیاز آبی گیاه، فاقد معنی صحیح و روشنی بوده و بعدها واژه کارایی مصرف آب<sup>۱</sup> جایگزین آن گردید.

کارایی مصرف آب، عبارت از مقدار ماده خشک تولیدشده توسط گیاه به‌ازای هر واحد آب مصرف‌شده می‌باشد. با توجه به اینکه محققان مختلف، بسته به هدف و تخصص خود تعریف‌های متفاوتی برای "مقدار ماده خشک تولیدشده" (y) و "واحد آب مصرف‌شده" (x) در نظر گرفته‌اند، بنابراین، تعاریف مختلفی نیز برای کارایی مصرف آب وجود دارد (کرامر، ۱۹۹۵).

1. Water use efficiency (WUE)

## ۱۱-۱ انواع کارایی مصرف آب

تعاریف مختلف و متعددی برای کارایی مصرف آب وجود دارد. در این بخش به سه مورد متداول پرداخته می‌شود.

### ۱۱-۱-۱ کارایی مصرف آب فیزیولوژیکی<sup>۱</sup> یا کارایی تعرق<sup>۲</sup>

در این حالت،  $y$  عبارت از مقدار ماده خشک تولید شده توسط گیاه و  $x$  عبارت از مقدار آب مصرف شده در تعرق گیاه می‌باشد و به کارایی تعرق شهرت دارد. کارایی تعرق نشان می‌دهد که گیاه به ازای هر واحد آب مصرف کرده در تعرق، چه مقدار ماده خشک تولید کرده است (رابطه ۱-۱۱):

$$WUE_p = TE = \frac{A}{T} = \frac{K}{VPD} \quad (11-1)$$

که در آن،  $A$  مقدار ماده خشک تولید شده یا عملکرد بیولوژیکی<sup>۳</sup> ( $BY$ )،  $T$  تعرق گیاه،  $K$  یک ضریب گیاهی وابسته به گیاه،  $VPD$  کمبود فشار بخار اتمسفر،  $TE$  کارایی تعرق و  $WUE_p$  کارایی مصرف آب فیزیولوژیکی هستند. مطابق رابطه ۱-۱۱، کارایی تعرق به دو عامل ضریب گیاهی و اختلاف فشار بخار آب بستگی دارد. ضریب گیاهی به نوع و گونه گیاهی وابسته بوده و به طور کلی در گیاهان تیپ  $C_4$  به دلیل توان فتوسنتزی بالاتر، بیشتر از گیاهان تیپ  $C_3$  است. همچنین، در گیاهانی که درصد کربوهیدرات آن‌ها در مقایسه با درصد پروتئین و چربی بیشتر است، مقدار ضریب گیاهی بالاتر می‌باشد (تنر و سینکلر، ۱۹۸۳).

کمبود فشار بخار آب اتمسفر، شاخص خشکی هوا بوده و با افزایش خشکی محیط بیشتر می‌شود. با افزایش خشکی هوا و در نتیجه افزایش اختلاف فشار بخار آب هوا در آن شرایط با فشار بخار آب هوا در شرایط اشباع، میزان آب تعرق یافته به ازای تولید هر واحد ماده خشک افزایش یافته و در نتیجه کارایی تعرق مطابق رابطه ۱-۱۱ کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که رابطه ۱-۱۱ برای دوره‌های زمانی مختلف (از ساعت تا فصل رشد) قابل استفاده است.

### ۱۱-۱-۲ کارایی مصرف آب پایه<sup>۴</sup>

در این حالت،  $y$  عبارت از عملکرد بیولوژیکی یا کل ماده خشک تولید شده توسط گیاه در طول دوره رشد و  $x$  عبارت از کل آب مصرف شده توسط گیاه در طی دوره کاشت تا برداشت است (رابطه ۱-۲):

$$WUE_b = \frac{BY}{WU} \quad (11-2)$$

- 
1. Physiological water use efficiency ( $WUE_p$ )
  2. Transpiration efficiency ( $TE$ )
  3. Biological yield ( $BY$ )
  4. Basic water use efficiency ( $WUE_b$ )

که در آن،  $WUE_b$  کارایی مصرف آب پایه،  $BY$  عملکرد بیولوژیک و  $WU$  آب مصرفی در طی فصل رشد است. آب مصرف شده شامل مجموع تعرق ( $T$ )، تبخیر ( $E$ )، رواناب ( $R$ )، برگاب ( $I$ )، زهکشی عمقی ( $D$ ) و آب مصرف شده توسط گیاهان هرز ( $M$ ) از زمان کاشت تا برداشت گیاه می باشد (رابطه ۳-۱۱):

$$WU = T + E + R + I + D + M \quad (11-3)$$

برگاب شامل آبی است که روی شاخ و برگ گیاه فرار گرفته باشد و مستقیماً از همان جا به اتمسفر تبخیر می شود. لازم به ذکر است که سهم عمده مصرف آب در دو جزء تعرق و تبخیر واقع شده است، بنابراین، می توان در محاسبه کارایی مصرف آب پایه، از اجزای دیگر آب مصرفی صرف نظر کرد و آب مصرفی در طی فصل رشد را از طریق رابطه ۴-۱۱ بیان نمود:

$$WU \approx T + E \quad (11-4)$$

از آنجایی که عملکرد بیولوژیک از حاصل ضرب تعرق ( $T$ ) در کارایی تعرق ( $TE$ ) به دست می آید، می توان با قراردادن اجزای تشکیل دهنده صورت و مخرج کسر در رابطه ۲-۱۱ به رابطه ۵-۱۱ دست یافت (کوپر و همکاران، ۱۹۸۸؛ ریچاردز و همکاران، ۲۰۰۲):

$$WUE_b = \frac{T \cdot TE}{T + E + R + I + D + M} = \frac{TE}{1 + \left( \frac{E + R + I + D + M}{T} \right)} \quad (11-5)$$

در مناطق خشک و نیمه خشک رواناب، زهکشی عمقی و برگاب اجزای مهمی در موازنه آب نیستند و می توان از آن ها صرف نظر کرد. با توجه به رابطه ۵-۱۱ مشاهده می شود که کارایی مصرف آب پایه به دو عامل کارایی تعرق و نسبت میزان آب مصرف شده از طریق تبخیر، رواناب، برگاب، زهکشی عمقی و گیاهان هرز به آب مصرف شده از طریق تعرق بستگی دارد. کارایی تعرق به شرایط رشد، گونه گیاهی و حتی ارقام یک گونه بستگی دارد و با افزایش آن، کارایی مصرف آب پایه افزایش می یابد. همچنین، با افزایش نسبت آب مصرف شده در تعرق نسبت به اجزای دیگر آب مصرفی و در واقع کوچک تر شدن نسبت  $\frac{E + R + I + D + M}{T}$ ، کارایی مصرف آب پایه افزایش می یابد.

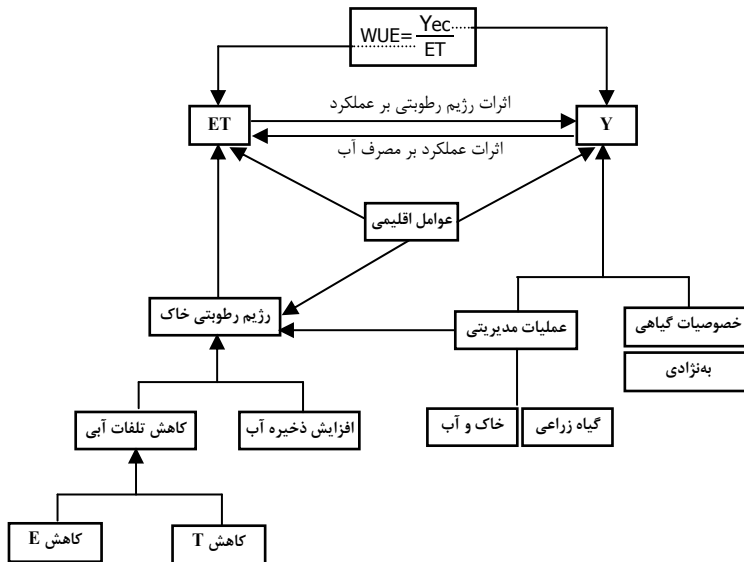
### ۳-۱-۱۱ کارایی مصرف آب اقتصادی<sup>۱</sup>

میزان عملکرد اقتصادی تولید شده توسط گیاه به ازای هر واحد آب مصرف شده، کارایی مصرف آب اقتصادی نامیده می شود (رابطه ۶-۱۱):

$$WUE_g = \frac{GY}{WU} = \frac{Y_{ec}}{WU} \quad (11-6)$$

که در آن،  $GY$  یا  $Y_{ec}$  عملکرد اقتصادی یا عملکرد دانه<sup>۲</sup> و  $WUE_g$  کارایی مصرف آب اقتصادی هستند. در واقع، در این حالت کارایی مصرف آب، میزان آب مصرف شده شامل کل آب مصرف شده در گیاه و

1. Economic water use efficiency (WUEg)  
2. Grain yield



شکل ۱-۱۱ عوامل مؤثر بر کارایی مصرف آب و روابط بین آن‌ها. Y عملکرد اقتصادی و E و T به‌ترتیب تبخیر و تعرق هستند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

صورت کسر یا عملکرد شامل تنها قسمتی از عملکرد بیولوژیک است که از نظر اقتصادی حائز اهمیت می‌باشد. عملکرد اقتصادی می‌تواند به‌عنوان مثال عملکرد دانه در گیاهان دانه‌ای و یا عملکرد قند در چغندر قند و نیشکر باشد.

## ۲-۱۱ عوامل مؤثر بر کارایی مصرف آب

عوامل مؤثر در کارایی مصرف آب و روابط بین آن‌ها در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷). از آنجایی که خصوصیات گیاهی، عوامل محیطی و عملیات مدیریتی از طریق تأثیر بر روی عملکرد یا تبخیر/تعرق و یا هر دو بر کارایی مصرف آب اثر می‌گذارند، عملاً کلیه فعالیت‌های محققان و کشاورزان پیشرو در مناطق خشک و نیمه‌خشک به افزایش کارایی مصرف آب معطوف شده است. به‌طورکلی، خصوصیات گیاهی، شرایط اقلیمی، شرایط خاک و عوامل مدیریتی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کارایی مصرف آب هستند، که در این قسمت به‌طور خلاصه مرور می‌شوند.

### ۱-۲-۱۱ خصوصیات گیاهی

به‌طورکلی، از نظر مقدار آب لازم برای تولید یک واحد ماده خشک بین گونه‌های گیاهی، اختلاف قابل‌توجهی وجود دارد. گیاهان دارای فرایندهای متفاوتی جهت افزایش کارایی مصرف آب هستند. مسیرهای متفاوت تثبیت کربن در گونه‌های  $C_3$ ،  $C_4$  و CAM از مهم‌ترین این فرایندها و خصوصیات

گیاهی است. به عنوان مثال، برخی از گیاهان زراعی گرمسیری دارای مسیر فتوسنتزی C<sub>4</sub> هستند که در شرایط تابش خورشیدی زیاد و دمای بالا، کارآمدتر از مسیر فتوسنتزی C<sub>3</sub> می باشد.

لازم به ذکر است که گونه های C<sub>4</sub> گیاهانی هستند که اولین محصول فتوسنتزی آنها یک اسید چهارکربنه است، در حالی که اولین محصول فتوسنتزی گونه های C<sub>3</sub> یک اسید سه کربنه می باشد. به طور معمول کارایی تعرق گونه های C<sub>4</sub> به مقدار قابل توجهی بیشتر از گونه های C<sub>3</sub> است. به عبارت دیگر، میزان ماده خشک تولید شده به ازای واحد آب مصرف شده در تعرق، در گونه های C<sub>4</sub> به طور قابل توجهی بیشتر از گونه های C<sub>3</sub> است. ذرت، نیشکر، سورگوم نمونه هایی از گونه های C<sub>4</sub> و برنج، گندم و جو نمونه هایی از گونه های C<sub>3</sub> هستند. گزارش شده است که در شرایط دیم مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری، مقادیر فصلی کارایی مصرف آب گیاهان زراعی C<sub>3</sub> و C<sub>4</sub> به ترتیب ۳۳-۱٫۲ و ۶۷-۳٫۳ گرم ماده خشک بر کیلوگرم آب مصرفی می باشد.

در این ارتباط، تیپ دیگری از گونه های گیاهی وجود دارند که به گونه های CAM (گیاهان دارای متابولیسم اسید کراسولاسه) معروف هستند. این گونه های گیاهی برعکس گیاهان C<sub>3</sub> و C<sub>4</sub> روزنه های خود را در شب باز کرده و عمل تثبیت دی اکسید کربن به صورت اسید مالیک را در شب انجام می دهند. با طلوع آفتاب روزنه های گیاهان CAM بسته شده و در طول روز و در شرایطی که هیچ گونه تعرقی صورت نمی گیرد، دی اکسید کربن جذب شده در شب، از طریق مسیر C<sub>3</sub> تثبیت می شود.

میزان تثبیت کربن گیاهان CAM به اندازه واکوئل های آنها برای ذخیره مالات بستگی دارد. حجم محدود واکوئل ها برای ذخیره مالات سبب می شود که گرچه در بین گونه های گیاهی، گیاهان CAM دارای بالاترین کارایی مصرف آب هستند، ولی سرعت و میزان رشد آنها کمتر از گونه های گیاهی دیگر باشد. مقادیر تیپیک کارایی مصرف آب در گیاهان C<sub>3</sub>، C<sub>4</sub> و CAM به ترتیب ۳-۱، ۵-۲ و ۴۰-۱۰ گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم آب مصرفی است (کاندون و همکاران، ۲۰۰۴).

از آنجایی که در گیاهان CAM عمل باز شدن روزنه ها در شب صورت می گیرد، میزان کل تعرق آنها نسبتاً پایین بوده و این مسئله برای شرایط خشک و با بارندگی بسیار کم حائز اهمیت می باشد. لازم به ذکر است که به دلیل اهمیت کم گونه های CAM در اکوسیستم های زراعی و همچنین میزان عملکرد پایین آنها، این گونه های گیاهی کمتر مورد توجه قرار گرفته اند.

نوع مواد تجمع یافته در اندام های گیاه و میزان و درصد آنها و در واقع ترکیب بیوشیمیایی سلول های تشکیل دهنده بافت های گیاه بر ضریب تعرق مؤثر است. به عبارت دیگر، ضریب تعرق در گیاهانی که درصد کربوهیدرات بیشتری در مقایسه با درصد پروتئین و چربی دارند، بیشتر است. این مسئله بدین علت است که میزان آب و مواد فتوسنتزی مورد نیاز برای ساخت هر گرم چربی و پروتئین به طور قابل توجهی بیشتر از هر گرم کربوهیدرات است. بنابراین، گیاهانی که کربوهیدرات بیشتری در اندام های ذخیره ای خود جمع می کنند قادرند به ازای هر واحد آب مصرفی در تعرق میزان ماده خشک بیشتری نسبت به گیاهانی تولید کنند که میزان پروتئین و به خصوص چربی بیشتری در اندام های خود دارند. البته

جدول ۱-۱۱ مقادیر آب مصرفی، ماده خشک و کارایی مصرف آب سه گونه گیاهی در نیجریه (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

ارزان مروارید (C <sub>۲</sub> )	ذرت (C <sub>۲</sub> )	بادام زمینی (C <sub>۲</sub> )	
۸۵	۱۱۷	۱۲۵	دوره رشد (روز)
۳۳۰	۴۸۶	۴۳۸	کل آب مصرفی (میلی‌متر)
۳٫۹	۴٫۲	۳٫۵	متوسط مصرف آب روزانه (میلی‌متر)
۲۲٫۵	۱۹٫۱	۸٫۴	ماده خشک تولیدشده (تن در هکتار)
۲۶۴	۱۶۳	۶۷	متوسط تولید ماده خشک روزانه (کیلوگرم در هکتار)
۶٫۶	۳٫۹	۱٫۷	کارایی مصرف آب (گرم ماده خشک بر کیلوگرم آب)

لازم به ذکر است که میزان انرژی موجود به ازای واحد وزن این ترکیبات متفاوت بوده و در چربی بیشتر از پروتئین و در پروتئین بیشتر از کربوهیدرات است.

از آنجایی که گونه‌های زراعی و حتی ارقام مختلف یک گونه با سرعت‌های متفاوتی کانوپی (Canopy) خود را توسعه می‌دهند، مقادیر کارایی مصرف آب در بین آن‌ها و باتوجه به شرایط زمان‌های مختلف، متفاوت است. به عنوان مثال، زمانی که دو گیاه زراعی یونجه و ذرت تحت شرایط یکسان برای تولید علوفه کشت شدند، یونجه به چهار تا شش برابر آب بیشتر برای تولید یک کیلوگرم ماده خشک نیازمند بود. در میان گیاهان زراعی ذرت، سورگوم و چغندر علوفه‌ای دارای بالاترین کارایی مصرف آب هستند. مقادیر کارایی مصرف آب در گیاهان زراعی مانند جو، یولاف، گندم و ماش در حد متوسط و برای گیاهان زراعی مانند یونجه بسیار کم می‌باشد. برای درک بهتر موضوع نمونه‌هایی از روابط بین آب مصرفی، میزان تولید ماده خشک و کارایی مصرف آب سه گونه گیاهی بادام زمینی، ذرت و ارزن مروارید در جدول ۱-۱۱ آورده شده است.

بالابودن کارایی مصرف آب نشان‌دهنده تحمل به خشکی نیست. برای مثال، گرچه کارایی مصرف آب ذرت بیشتر از یونجه می‌باشد، ولی تحمل به خشکی یونجه به مراتب بیشتر از ذرت است. حتی گیاهانی مثل ذرت و سورگوم که دارای کارایی مصرف آب بالایی هستند، به لحاظ تحمل به خشکی دارای تفاوت قابل توجهی هستند. از طرفی، احتمالاً در کلیه گونه‌های گیاهی، تنوع ژنتیکی درون‌گونه‌ای کافی برای صفات دخیل در استفاده مؤثر از آب وجود دارد. انجام کارهای اصلاحی و انتقال ژن‌ها و صفات مؤثر بر افزایش کارایی مصرف آب به ارقام با پتانسیل عملکرد بالا می‌تواند در افزایش کارایی مصرف آب ارقام مورد نظر بسیار مؤثر باشد.

جدول ۲-۱۱ اختلاف کارایی مصرف آب دو رقم سنتی و اصلاح‌شده در سه شرایط متفاوت رطوبتی در آمریکا را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در هر سه مکان مورد بررسی، رقم اصلاح‌شده در مقایسه با رقم سنتی از آب به طور کارآمدتری استفاده کرده است. حتی در لیند، که در خشک‌ترین منطقه آمریکا

جدول ۲-۱۱ اثر رقم بر کارایی مصرف آب در سه محل در منطقه شمال غربی آمریکا (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

مکان	تعداد سال	میانگین بارندگی (میلی متر)	میانگین کارایی مصرف آب (گرم ماده خشک بر کیلوگرم آب)	
			رقم سنتی	رقم اصلاح شده
پندلتون	۴۶	۴۰۵	۷،۰۴	۸،۸۷
مورو	۶۵	۲۹۰	۶،۲۰	۷،۱۰
لیند	۵۵	۲۴۱	۶،۶۰	۷،۳۰

واقع است و در آن گندم به صورت دیم کشت می شود، رقم اصلاح شده دارای کارایی مصرف آب بالاتری می باشد. میانگین کارایی مصرف آب در ناحیه پندلتون با بالاترین مقدار بارندگی، بیشتر از دو ناحیه دیگر است. این موضوع نشان می دهد که دست یابی به پتانسیل کامل کارایی مصرف آب در ارقام اصلاح شده، به رژیم رطوبتی مناسب خاک بستگی دارد.

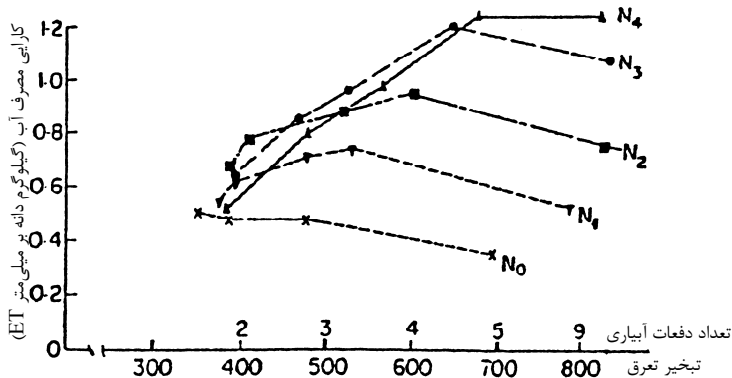
## ۲-۱۱ شرایط اقلیمی

به طور کلی، شرایط آب و هوایی بر کارایی مصرف آب مؤثر است. مقدار تشعشع، دما، طول روز و بارندگی بر فتوسنتز و سایر فرایندهای فیزیولوژیکی گیاه و در نتیجه عملکرد دانه اثر دارند. از طرفی، تبخیر تعرق نیز به طور مستقیم تحت تأثیر عوامل اقلیمی قرار می گیرد. سرعت تعرق تقریباً متناسب با شدت تشعشع خورشیدی افزایش پیدا می کند، در حالی که معمولاً در برخی از گیاهان زراعی مانند چغندر قند، سرعت افزایش فتوسنتز کمتر است. برخی از گونه های گیاهی در شرایط ابری و مرطوب، در مقایسه با شرایط آفتابی و خشک، ماده خشک بیشتری به ازای هر واحد آب تعرق یافته تولید می کنند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷؛ آنگوس و وان هرواردن، ۲۰۰۱).

در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری که دارای فصل خنک هستند، در مقایسه با مناطق گرمسیری گرم، حتی در شرایطی که رژیم بارندگی یکسان است، کارایی مصرف آب ۶۰-۳۰ درصد بیشتر می باشد. این مسئله بدین علت است که در مناطق گرمسیری دارای فصل خنک، میزان تبخیر تعرق کمتر است و در نتیجه سرعت فتوسنتز خالص بالاتر می باشد. در گیاهان سردسیری مثل گندم و یولاف، افزایش دما می تواند سبب کاهش کارایی مصرف آب شود، در حالی که در یک محدوده دمایی معین، افزایش دما می تواند سبب افزایش کارایی مصرف آب گیاهان زراعی گرمسیری مثل ذرت و سورگوم شود.

از طرفی، با افزایش رطوبت نسبی هوا، میزان تبخیر تعرق کاهش می یابد. مشاهده شده است که رابطه معکوسی بین کارایی مصرف آب و سرعت تبخیر وجود دارد. به عنوان مثال، کارایی مصرف آب یونجه در داکوتای شمالی با سرعت تبخیر متوسط روزانه ۳/۹۸ میلی متر حدود دو برابر تگزاس با سرعت تبخیر متوسط روزانه ۷/۶۵ میلی متر بود.





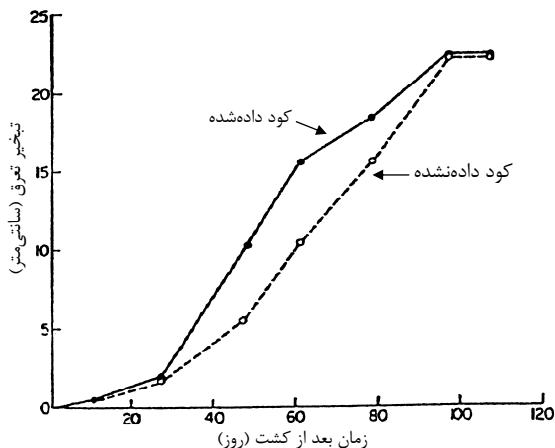
شکل ۱۱-۲ رابطه بین رژیم رطوبتی خاک و کارایی مصرف آب در پنج سطح مصرف کود. N<sub>0</sub> شاهد؛ N<sub>1</sub> ۵۲/۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار؛ N<sub>2</sub> ۱۰/۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار؛ N<sub>3</sub> ۲۱۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار؛ N<sub>4</sub> ۴۲۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

### ۳-۲-۱۱ شرایط خاک

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کارایی مصرف آب دارد. مقدار آب ذخیره‌شده خاک از طریق تأثیر بر سرعت نفوذ آب، میزان رواناب، زهکشی عمقی و صعود کاپیلاری و قابلیت دسترسی به آب ذخیره‌شده در خاک جهت استفاده در تعرق، می‌تواند بر کارایی مصرف آب مؤثر باشند. دمای کم خاک می‌تواند جذب آب را محدود کرده و بنابراین تعرق را کاهش دهد. عدم کفایت و همچنین افزایش زیاد رطوبت خاک تأثیر سویی بر رشد و عملکرد گیاه و در نتیجه کارایی مصرف آب دارد. بنابراین، شرایط دیم و تنش خشکی نمی‌تواند سبب افزایش کارایی مصرف آب گیاهان زراعی شود (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

به‌طور کلی، عملکرد اکثر گیاهان زراعی در شرایط رطوبتی نزدیک به ظرفیت زراعی خاک بیشترین میزان است، اما معمولاً کارایی مصرف آب در سطوح کمتر رطوبت خاک، بالاتر است. مشاهده شده است زمانی که حاصلخیزی خاک محدودکننده نیست، با افزایش تأمین آب، کارایی مصرف آب افزایش می‌یابد. در شرایطی که مصرف کود کم است، با افزایش تأمین آب، کارایی مصرف آب کاهش پیدا می‌کند (شکل ۲-۱۱). زمانی که آب به‌وسیله آبیاری تأمین می‌شود، کارایی مصرف آب می‌تواند تحت تأثیر روش، زمان، مقدار و حتی نحوه کاربرد آب قرار گیرد. برای مثال، آبیاری قطره‌ای می‌تواند مقدار تبخیر را بیشتر از آبیاری بارانی یا سطحی کاهش دهد، اما این روش می‌تواند باعث تجمع املاح شود.

از طرفی، در نواحی که مقدار تبخیر تعرق بیشتر از مقدار بارندگی باشد، مشکل شوری خاک می‌تواند بروز کند. شورشیدن خاک موجب کاهش فراهمی رطوبت، افزایش تنش آب در گیاه، بسته‌شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش کارایی مصرف آب می‌شود (قلی‌پور و همکاران، ۲۰۰۲). در کشاورزی فاریاب، ممکن است برای خارج کردن نمک‌ها از منطقه ریشه به آبشویی نیاز باشد، که این مسئله نیز سبب کاهش کارایی مصرف آب می‌گردد.



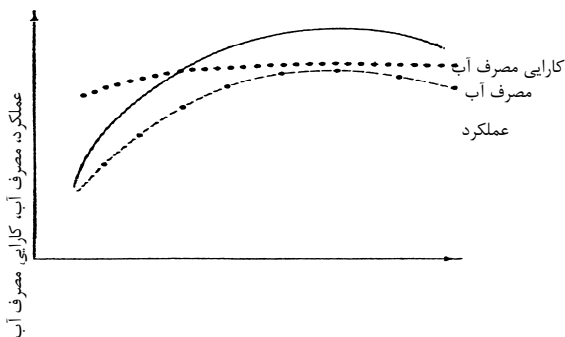
شکل ۱۱-۳ تبخیر تعرق از یک مزرعه با مصرف کود و بدون آن در سراسر فصل رشد. در حالت مصرف کود، ۱۵۷ کیلوگرم نیتروژن در هکتار مصرف شده است (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

#### ۱۱-۲-۴ عملیات مدیریتی

به طور کلی، هر گونه عملیات مدیریتی که سبب افزایش عملکرد گیاه گردد، می تواند سبب افزایش کارایی مصرف آب شود (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷؛ شکل های ۱۱-۳ و ۱۱-۴).

#### افزایش تعرق

حتی اگر کارایی تعرق تغییر قابل ملاحظه ای نکند، افزایش کارایی مصرف آب در نتیجه بهبود مدیریت زراعی، می تواند در نتیجه کاهش تبخیر و افزایش تعرق صورت پذیرد. در زراعت دیم، افزایش جزء تعرق



حاصلخیزی خاک

شکل ۱۱-۴ رابطه عمومی بین حاصلخیزی خاک و عملکرد دانه، مقدار مصرف آب و کارایی (راندمان) مصرف آب (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

## جدول ۳-۱۱ عملکرد و کارایی مصرف آب گندم تحت شرایط آیش و کشت ممتد در دشت‌های شمالی آمریکا.

مکان	تعداد سال مورد مطالعه	متوسط بارندگی (میلی‌متر)	میانگین عملکرد (کیلوگرم در هکتار)		کارایی مصرف آب (کیلوگرم در هکتار در میلی‌متر آب)	
			کشت ممتد	آیش	کشت ممتد	آیش
اکرون، کلمبیا	۶۰	۴۱۹	۴۹۸	۱۴۲۶	۱,۲۰	۱,۷۲
کلبی، کانزاس	۴۹	۴۷۰	۶۲۶	۱۳۱۷	۱,۳۰	۱,۴۰
نورث‌پلیت، نبراسکا	۵۶	۴۹۵	۸۳۴	۲۱۴۶	۱,۷۰	۲,۲۰

گیاه زراعی را می‌توان به‌وسیله روش‌های حفاظت آب، کاهش رواناب سطحی، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی آب خاک و عملیات خاک ورزی که موجب کاهش تبخیر از سطح خاک و همچنین کاهش تعرق علف‌های هرز می‌شوند، محقق ساخت. در واقع، مدیریت‌های زراعی باید به‌طریقی صورت گیرد تا از طریق افزایش آب مصرفی در تعرق و کاهش اجزای دیگر آب مصرفی، کارایی مصرف آب افزایش پیدا کند. به‌عنوان مثال، کشت زودهنگام و با تراکم مناسب بوته که سبب بسته‌شدن سریع کانوپی و پوشش سریع و کامل زمین توسط گیاه می‌شود، می‌تواند در کاهش تبخیر از سطح خاک و در نتیجه افزایش سهم تعرق گیاه مؤثر باشد (سلطانی و گالشی، ۲۰۰۲).

نکته قابل‌توجه این‌است که معمولاً اثر افزایش آب مصرفی بر افزایش تعرق به تناسب بیشتر از افزایش آن بر تبخیر، رواناب و زهکشی عمقی می‌باشد. بنابراین، این مسئله سبب می‌شود که گرچه افزایش تأمین آب سبب افزایش تبخیر، رواناب، زهکشی عمقی و اجزای دیگر تلف‌کننده آب می‌شود، ولی عموماً کارایی مصرف آب بر اثر افزایش تأمین آب، بهبود پیدا می‌کند.

## آیش

در شرایط محدودیت بارندگی در تعدادی از شرایط، اختصاص دادن یک فصل به ذخیره آب باران در خاک، تنها راه اطمینان از تولید مناسب محصول می‌باشد. در جدول ۳-۱۱ نتایج اثر آیش و کشت متوالی بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم زمستانه مقایسه شده است (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷). مشاهده می‌شود که آیش سبب افزایش عملکرد دانه و کارایی مصرف آب گندم در هر سه ناحیه مورد مطالعه شده است. افزایش عملکرد دانه در اثر آیش ناشی از این حقیقت است که تولید محصول در تناوب آیش-گندم، به رطوبت تأمین شده در طی دو فصل نیازمند است.

به‌هرحال، ممکن است تنها ۱۰ تا ۲۰٪ از بارندگی نازل‌شده در طی دوره آیش برای گیاه زراعی بعد از آن قابل‌دسترس باقی بماند. در شرایطی که بخش اعظم آب باران بر اثر تبخیر از دست رفته و همچنین علف‌های هرز کنترل نشوند، آیش نمی‌تواند به‌عنوان یک راه مؤثر برای ذخیره رطوبت خاک مدنظر قرار گیرد.

## تاریخ کاشت

از آنجایی که منطبق شدن الگوی رشد گیاه با الگوی تأمین رطوبت و عدم برخورد مراحل حساس رشدی گیاه با تنش کمبود آب بسیار مهم است، بنابراین، زمان مطلوب استقرار گیاه ممکن است اثر قابل توجهی بر کارایی مصرف آب داشته باشد. اگر تا زمان مطلوب کاشت، بارندگی کافی رخ ندهد، ممکن است عملکرد گیاه زراعی به دلیل تأخیر در کاشت یا تأخیر در سبز شدن و استقرار بوته‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد.

در مناطق سردتر، تأخیر در سبز شدن بوته‌ها ممکن است سبب شود که گیاه نتواند رشد رویشی کافی جهت تحمل سرمای احتمالی در اواسط دوره داشته باشد. از طرفی، معمولاً تأخیر در کاشت سبب می‌شود که عملکرد دانه به دلیل کاهش رشد رویشی و کاهش طول دوره رشد کاهش یابد. ابداع خطی کارهای عمیق<sup>۱</sup> امکان کاشت مستقیم بذر در عمق دارای رطوبت مناسب را فراهم کرده و در نتیجه کنترل بیشتری بر زمان کاشت و استقرار محصول وجود دارد.

## پوشش گیاهی

وجود یک مقدار حداقل شاخص سطح برگ، برای دریافت کل تشعشع خورشیدی توسط گیاه لازم است. عدم دریافت کل تشعشع خورشیدی توسط گیاه، سبب برخورد تشعشع با زمین و افزایش تبخیر می‌شود. آستانه شاخص سطح برگ برای دریافت کل یا ۹۵٪ تشعشع خورشیدی در اکثر گیاهان زراعی حدود ۲ الی ۵ می‌باشد. در چنین شاخص سطح برگی، تعرق به حد اکثر رسیده و تبخیر از سطح خاک به حدود صفر می‌رسد. بدیهی است که گیاهان باریک برگ و گیاهانی که برگ‌های عمودی تری نسبت به سطح زمین دارند، در مقایسه با گیاهان پهن برگ و دارای برگ‌های افقی‌تر، برای دریافت کل و یا قسمت اعظم تشعشع خورشیدی، نیاز به شاخص سطح برگ بیشتری دارند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

## کنترل آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز

گیاهان سالم در مقایسه با گیاهان آلوده به بیماری‌ها، آفات و علف‌های هرز دارای قابلیت بهتری در استفاده از آب قابل دسترس هستند. وجود بیماری‌ها، آفات و علف‌های هرز علاوه بر تأثیر مستقیم بر کاهش عملکرد دانه گیاه، می‌تواند از طرق غیرمستقیم بر کارایی مصرف آب تأثیر گذاشته و سبب کاهش آن شوند. به عنوان مثال، میسلیم بیرونی عامل بیماری‌زا ممکن است سبب افزایش تلفات آب شود. عرضه آب به گیاه می‌تواند بر اثر صدمه دیدگی شاخ و برگ و یا سیستم ریشه کاهش پیدا کند. حشرات و نماتدهایی که به سیستم ریشه حمله می‌کنند نیز ممکن است اثر مشابهی داشته و سبب کاهش جذب و انتقال آب به گیاه، کاهش عملکرد و کارایی مصرف آب شوند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

### ۳-۱۱ افزایش کارایی مصرف آب در شرایط دیم

از آنجایی که مدیریت زراعی بر سرعت تلفات آب از طریق تبخیر از خاک، که خود تحت تأثیر مقدار تابش رسیده به سطح خاک است، مؤثر می‌باشد، بنابراین، مدیریت زراعی به خصوص در سال‌های خشک تأثیر زیادی بر کارایی مصرف آب دارد. سرعت و مقدار توسعه کانوپی، نقش اصلی را در تعیین سرعت تلفات تبخیر از سطح خاک دارد. مشاهده شده است که در شرایط مدیریت زراعی ضعیف و در نتیجه پوشش ناقص سطح زمین به وسیله کانوپی غلات، سهم تلفات آب از طریق تبخیر و تعرق به ترتیب ۸۰ و ۲۰٪ بود. بنابراین، در سال‌ها یا مکان‌های خشک، کارایی مصرف آب را می‌توان بدون افزایش مصرف آب، بهبود بخشید. از طرفی، در سال‌هایی که تأمین رطوبت بیشتر است، افزایش رشد گیاه موجب افزایش توانایی گیاه در استخراج رطوبت خاک می‌شود.

از مشخصات مناطق دیم‌کاری آن است که عملیات زراعی در طی سال‌ها طوری توسعه یافته‌اند که تحت شرایط محدودیت رطوبت و بارندگی متغیر، راندمان تولید محصول افزایش یابد. آمار جدول ۴-۱۱ نمونه‌ای از موفقیت حاصله در شمال غربی آمریکا را نشان می‌دهد. در هر سه محل مورد مطالعه، در طی دوره ۱۹۷۴-۱۹۵۳ در مقایسه با ۲۲ سال قبل، گرچه مقدار بارندگی قدری کاهش یافته است، ولی افزایش عملکرد ملاحظه می‌شود. لازم به ذکر است از آنجایی که در هر دو رقم اصلاح‌شده و سنتی، افزایش عملکرد وجود دارد، می‌توان گفت که عملیات مدیریتی سهم زیادی در افزایش عملکرد داشته است. در کشورهای در حال توسعه، معمولاً کاهش عملکرد در شرایط دیم به بارندگی ناکافی نسبت داده می‌شود که خارج از کنترل کشاورز است. از طرفی، آمار جدول ۴-۱۱ نشان می‌دهد که صرفاً استناد عملکرد کم به کمبود بارندگی صحیح نیست و می‌توان در شرایط دیم با ترکیب مدیریت خوب خاک، استفاده از ارقام اصلاح‌شده و کودها، کنترل علف‌های هرز و به کارگیری سایر عملیات زراعی مناسب، به عملکرد قابل قبول و کارایی مصرف آب نسبتاً بالا دست یافت.

### ۴-۱۱ تبعیض علیه ایزوتوپ $^{13}\text{C}$

کربن هوا از ایزوتوپ‌های مختلفی تشکیل شده است. قسمت عمده آن گاز  $\text{CO}_2^{12}$  و حدود یک درصد از کل  $\text{CO}_2$  جوی  $\text{CO}_2^{13}$  می‌باشد. در مسیر فضای بین سلولی تا روپیسکو (Rubisco) (آنزیم مسئول تثبیت دی‌اکسید کربن در کلروپلاست سلول‌های مزوفیل گیاهان  $\text{C}_3$  و کلروپلاست سلول‌های غلاف آوندی گیاهان  $\text{C}_4$ ) مکان‌ها و واکنش‌هایی وجود دارند که طی آن ممکن است مقداری تبعیض ایزوتوپی کربن علیه  $^{13}\text{C}$  صورت گیرد. در واقع، به دلیل خصوصیات فیزیکی-شیمیایی و تغییر متابولیکی ایزوتوپ سنگین  $^{13}\text{C}$ ، جزء ناچیزی از آن در مقایسه با کربن معمولی ( $^{12}\text{C}$ ) در ترکیب مواد آلی حاصل از فتوسنتز وارد می‌شود. انتشار، عمل روپیسکو و تراوش  $\text{CO}_2$  به بیرون از مکان کربوکسیلاسیون مهم‌ترین عوامل تبعیض ایزوتوپی کربن می‌باشند (آراز و همکاران، ۲۰۰۳).

جدول ۴-۱۱ عملکرد دانه، بارندگی و کارایی مصرف آب سه ناحیه در شمال غربی آمریکا.

کارایی مصرف آب (کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر آب)		کل رطوبت <sup>۱</sup> (میلی‌متر)	عملکرد (تن در هکتار)		
رقم سننتی	رقم اصلاح‌شده		رقم سننتی	رقم اصلاح‌شده	
<i>پندلتون</i>					
۳/۴۶	۳/۰۸	۸۲۰	۲/۸۴	۲/۵۳	۱۹۳۱-۱۹۵۲
۵/۲۰	۳/۹۳	۸۰۰	۴/۱۶	۳/۱۵	۱۹۵۳-۱۹۷۴
۵/۰۳	۲/۷۶	-۲/۵	۴/۶۵	۲/۴۵	درصد افزایش
<i>مورو</i>					
۳/۱۳	۲/۸۹	۵۸۱	۱/۸۲	۱/۶۸	۱۹۳۱-۱۹۵۲
۴/۰۵	۳/۱۸	۵۶۹	۲/۳۱	۱/۸۱	۱۹۵۳-۱۹۷۴
۲/۹۴	۱/۰	-۲/۱	۲/۶۹	۷/۷	درصد افزایش
<i>لیند</i>					
۲/۶۰	۲/۶۰	۵۱۸	۱/۳۵	۱/۳۵	۱۹۳۱-۱۹۵۲
۵/۱۶	۴/۳۹	۴۵۷	۲/۳۶	۲/۰۲	۱۹۵۳-۱۹۷۴
۹/۸۴	۶/۸۸	-۱۱/۸	۷/۴۸	۴/۸۹	درصد افزایش

۱. شامل بارندگی طی دوره آیش.

### ۱-۴-۱۱ برآورد میزان تبعیض

تبعیض و تخلیه علیه ایزوتوپ  $^{13}\text{C}$  از طریق تهیه و خالص‌سازی  $\text{CO}_2$  مواد آلی گیاهی اندازه‌گیری شده و به وسیله یک اسپکترومتر جرمی نسبت ایزوتوپی<sup>۱</sup> تجزیه و تحلیل می‌گردد و نتایج به صورت ایزوتوپ کربن ( $\delta^{13}\text{C}$ ) برحسب قسمت در هزار (‰)  $\delta$  به وسیله رابطه ۷-۱۱ بیان می‌شود:

$$\delta (\text{‰}) = \left[ \frac{R}{R_{\text{استاندارد}}} - R_{\text{نمونه}} \right] \times 1000 \quad (11-7)$$

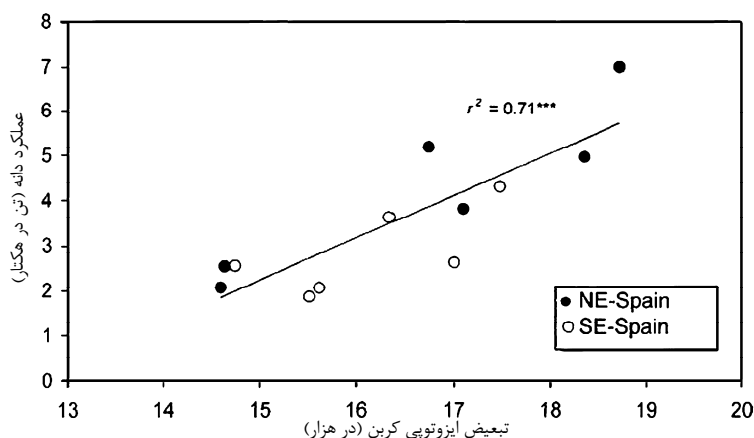
در این رابطه، R نسبت فراوانی مولکولی نمونه بوده و به صورت در هزار بیان می‌شود. R استاندارد عدد ثابتی بوده و معادل ۱/۱۲۴ در هزار در نظر گرفته می‌شود. از طرفی، به منظور تسهیل در تفسیر اثرات ایزوتوپی، برخی از محققین از ترکیب نمونه و منبع و در واقع میزان تبعیض ایزوتوپی کربن استفاده می‌کنند (کاندون و همکاران، ۲۰۰۲؛ رابطه ۸-۱۱):

$$\Delta = (\delta_a - \delta_p) / (1 + \delta_p) \quad (11-8)$$

که در آن،  $\delta_a$  نسبت فراوانی  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  هوا،  $\delta_p$  نسبت فراوانی  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  مواد گیاهی و  $\Delta$  میزان تبعیض علیه ایزوتوپ  $^{13}\text{C}$  هستند. مجموعه اثرات ایزوتوپی در گیاهان را می‌توان با معادله تجربی ۹-۱۱ برآورد کرد:

$$R_a/R_p = 1.044 \left[ \frac{P_a - P_i}{P_a} \right] + 1.027 P_i/P_a \quad (11-9)$$

که در این معادله  $R_p$  و  $R_a$  به ترتیب نسبت‌های فراوانی مولی  $\text{CO}_2$  جوی و تثبیت‌شده در گیاه و  $P_i$  و  $P_a$  به ترتیب فشار نسبی  $\text{CO}_2$  جوی و بین‌سلولی هستند. مقدار ۱/۰۲۷ یک مقدار تجربی



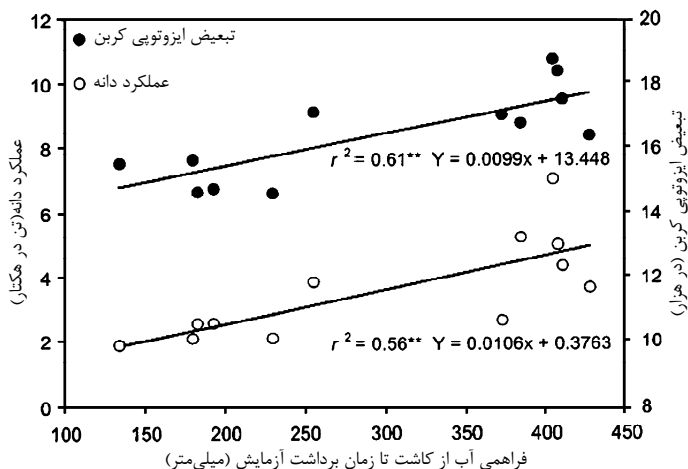
شکل ۵-۱۱ رابطه بین تبعیض ایزوتوپی کربن دانه‌های رسیده و عملکرد دانه ۲۵ ژنوتیپ گندم در شمال شرقی (NE) و جنوب شرقی (SE) اسپانیا در چند مکان و در طی سه سال. جنوب شرقی اسپانیا دارای میانگین بارندگی سالیانه کمتر، درجه حرارت بیشتر، تبخیرتغرق بالاتر و میانگین وزن هزار دانه و عملکرد دانه پایین‌تری نسبت به منطقه شمال اسپانیا در طی سال‌های انجام آزمایش بود (آراز و همکاران، ۲۰۰۳).

است که به‌طور عمده برای تبعیض ایزوتوپی رویسکو، تبعیض ایزوتوپی PEP کربوکسیلاز و کاهش فشار نسبی  $CO_2$  بین فضای سلولی و کلروپلاست‌ها به‌کار می‌رود.

اگر نسبت  $P_i/P_a$  بالا باشد، بخش عمده‌ای از  $^{13}CO_2$  توسط رویسکو تبعیض شده و به جو برمی‌گردد و در نتیجه میزان تبعیض ایزوتوپی کربن بزرگ می‌شود. در واقع، بازبودن روزنه‌ها که با نسبت بالای  $P_i/P_a$  همراه است، سبب افزایش تبعیض ایزوتوپی کربن می‌گردد. هنگامی که نسبت  $P_i/P_a$  کوچک است تبعیض کمتری توسط رویسکو صورت می‌گیرد، زیرا روزنه‌ها حرکت انتشاری روبه‌خارج  $^{13}CO_2$  را محدود کرده و در نتیجه میزان تبعیض ایزوتوپی کربن کوچک می‌شود.

## ۲-۴-۱۱ میزان تبعیض در گونه‌های مختلف گیاهی

مقادیر تبعیض ایزوتوپی کربن در بین گونه‌های گیاهی با مسیر فتوسنتزی متفاوت، متغیر است. در گیاهان  $C_4$  بخش عمده  $^{13}CO_2$  که توسط رویسکو تبعیض می‌شود، به هوا بازگردانده نمی‌شود. در واقع، موانع انتشاری موجود بین غلاف آوندی و سلول‌های مزوفیل و همچنین وجود کربنیک آنهیدراز (یک آنزیم مهم جهت تثبیت  $CO_2$  در گیاهان  $C_4$ ) و فسفوانول پیرووات (PEP) کربوکسیلاز (که تبعیض کمتری را در برابر  $^{13}CO_2$  اعمال می‌کنند) سبب جلوگیری از بازگردانده شدن  $^{13}CO_2$  تبعیض شده به‌وسیله رویسکو به جو می‌شوند. لازم‌به‌ذکر است که فسفوانول پیرووات کربوکسیلاز آنزیم مسئول تثبیت یا جذب دی‌اکسیدکربن در کلروپلاست سلول‌های مزوفیل گیاهان  $C_4$  است (باومن و همکاران، ۱۹۸۹).



شکل ۱۱-۶ رابطه بین فراهمی آب از کاشت تا زمان برداشت با عملکرد دانه و تبعیض ایزوتوپی کربن در ۲۵ ژنوتیپ گندم در چند ناحیه از اسپانیا و در طی سه سال. مشاهده می‌شود که عملکرد دانه و تبعیض علیه ایزوتوپ  $^{13}C$  وابستگی زیادی با فراهمی آب در طی فصل رشد دارد (آراز و همکاران، ۲۰۰۳).

درواقع در گیاهان،  $C_4$ ، کربن معدنی که به سلول‌های مزوفیل برگشت می‌نماید، مجدداً توسط PEP کربوکسیلاز، که دارای تمایل ترکیبی بسیار بالایی برای ترکیب با کربنات بوده و تبعیض بسیار کمی بین ایزوتوپ‌های کربن قائل می‌شود، تثبیت خواهد شد. بنابراین، تبعیض در برابر  $^{13}CO_2$  در گونه‌های  $C_4$  بسیار اندک است. این مسئله در مورد گیاهان CAM نیز صادق است و از آنجایی که روزنه‌ها در اغلب اوقات بسته هستند، ایزوتوپ‌های سنگینی که در برابر آن‌ها تبعیض اعمال شده است نمی‌توانند به‌سادگی از برگ به خارج منتشر شوند. در گیاهان CAM نیز تبعیض ایزوتوپی کربن به مقدار قابل توجهی کمتر از گونه‌های  $C_3$  بوده و تقریباً با گونه‌های  $C_4$  یکسان است. به عبارت دیگر، در گیاهان CAM، از آنجایی که روزنه‌ها در طی تثبیت  $CO_2$  توسط روبیسکو بسته هستند، تنها مقدار بسیار اندکی از کربن معدنی از برگ‌ها به اتمسفر برگشت می‌گردد.

### ۳-۴-۱۱ تبعیض ایزوتوپی کربن و کارایی مصرف آب

به‌طور کلی، مدارک زیادی وجود دارد که بروز صفات ویژه گیاهی در برنامه‌های اصلاحی، می‌تواند سبب افزایش کارایی مصرف آب گردد. مشخص شده است که تأثیر هر یک از این صفات را باید در ارتباط با محیطی که گیاه در آن رشد می‌کند، در نظر گرفت. تحت شرایط رشدی مناسب، همبستگی خوبی بین کارایی مصرف آب و تبعیض ایزوتوپی کربن وجود دارد (شکل ۵-۱۱) و ترکیب ایزوتوپی را می‌توان برای گزینش ژنوتیپ‌هایی با کارایی مصرف آب و عملکرد دانه بالاتر مورد استفاده قرار داد. برای غلات رشد یافته در نواحی دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای و محیط‌های آبیاری شده به نظر می‌رسد که عملکردهای بالاتر با مقادیر  $\Delta^{13}C$  (تبعیض علیه ایزوتوپ کربن ۱۳) بالای دانه همبستگی داشته باشد (شکل ۵-۱۱ و ۶-۱۱). برای نواحی مدیترانه‌ای ممکن است این ارتباط نتیجه رابطه بین  $\Delta^{13}C$  بالا و رشد گیاهی سریع باشد.



از رابطه نزدیک بین کارایی مصرف آب و  $\Delta^{13}\text{C}$ ، می‌توان برای اطلاع یافتن از متوسط کارایی مصرف آب در طی دوره رشد گیاه استفاده کرد. برای مثال،  $\Delta^{13}\text{C}$  در گیاهان بیابانی کمتر از گیاهان مناطق نیمه‌مرطوب است و همچنین در اندام‌های گیاهی تولیدشده در طی فصول خشک و یا در سال‌های خشک‌تر کمتر از اندام‌های تولیدشده در طی فصول مرطوب و یا سال‌های مرطوب‌تر می‌باشد. این مسئله نشان می‌دهد که گیاهان روئیده‌شده در شرایط خشک، معمولاً دارای  $P_i$  کوچکتری نسبت به گیاهان روئیده‌شده در شرایط مرطوب هستند. به عبارت دیگر، کم‌تر بودن غلظت  $\text{CO}_2$  درون سلول نسبت به غلظت  $\text{CO}_2$  هوا (کم‌تر بودن  $P_i$  نسبت به  $P_a$ )، سبب کاهش حرکت انتشاری روبه‌خارج  $^{13}\text{CO}_2$  درون سلولی شده و در نتیجه میزان تبعیض علیه ایزوتوپ  $^{13}\text{C}$  کاهش باشد.

درواقع به دلیل وجود شرایط تقریباً مناسب در مناطق مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب و مرطوب، معمولاً گیاه با تنش رطوبتی کمتری مواجه شده و در نتیجه میزان و طول دوره بازبودن روزنه‌ها بیشتر است. بنابراین، تحت شرایط مناسب، این مسئله سبب افزایش تبعیض ایزوتوپی کربن، افزایش کارایی مصرف آب و در نتیجه وجود رابطه مثبت بین دو صفت فوق می‌گردد. مقادیر  $\Delta^{13}\text{C}$  بالاتر دانه می‌تواند نشان‌دهنده دست‌یابی بیشتر به رطوبت خاک در طی پرشدن دانه (به دلیل ریشه‌دهی بیشتر، گلدهی زودتر و یا توانایی حفظ روزنه‌های باز به میزان بیشتری بعد از گرده‌افشانی)، به‌رغم وجود تنش آب اتمسفری و خشکی خاک باشد. لازم‌به‌ذکر است که تمامی این خصوصیات (سرعت بالای رشد گیاه، توانایی انتقال مجدد مواد ذخیره‌شده، گلدهی زودتر، استخراج بهتر آب و عدم یا کاهش حساسیت روزنه‌ای به کمبود آب) می‌تواند برای گیاهان محیط‌های مدیترانه‌ای مفید باشد.

میزان  $\Delta^{13}\text{C}$  در نقاط مختلف کانوپی متفاوت بوده و میزان آن در پایین کانوپی کمتر از بالای کانوپی است. این امر به دلیل سهم  $\text{CO}_2$  فاقد  $^{13}\text{C}$  از تنفس خاک می‌باشد. همچنین، ممکن است برگ‌های ضخیم از نظر  $^{13}\text{C}$  غنی شده باشند که می‌تواند نشان‌دهنده یک مقاومت درونی بالاتر در مقابل انتشار، در برگ‌های ضخیم‌تر باشد.

## نیاز آبی گیاه و بهینه‌سازی مصرف آب

در این فصل می‌خوانیم:

- ۱-۱۲ تعیین تبخیر تعرق یا و نیاز آبی
- ۲-۱۲ تعیین تبخیر تعرق مرجع
- ۳-۱۲ تعیین ضریب گیاهی
- ۴-۱۲ مقدار و زمان آبیاری
- ۵-۱۲ کم‌آبیاری و بهینه‌سازی مصرف آب

### مقدمه

باتوجه به اینکه از خاک و جامعه گیاهی به‌طور مداوم تبخیر و تعرق انجام می‌گیرد، بنابراین، برای جبران آب از دست‌رفته به‌وسیله تبخیر تعرق و درحقیقت عدم‌مواجه‌شدن گیاه با تنش خشکی، وجود بارندگی و یا انجام آبیاری ضروری است. مقدار آب موردنیاز برای جبران تبخیر تعرق گیاه<sup>۱</sup> در شرایط مطلوب، نیاز آبی گیاه<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. لازم‌به‌ذکر است که شرایط مطلوب رشد به شرایطی گفته می‌شود که گیاه دچار بیماری، کمبود موادغذایی و حتی کمبود آب خاک نبوده و درواقع شرایط برای رشدونمو آن ایده‌آل باشد.

### ۱-۱۲ تعیین تبخیر تعرق یا نیاز آبی

به‌طورکلی، نیاز آبی یا تبخیر تعرق را می‌توان برای دوره‌های مختلف زمانی مانند میلی‌متر در هفته، میلی‌متر در ماه و میلی‌متر در سال محاسبه کرد. برای هر دوره زمانی موردنظر، نیاز آبی گیاه از طریق رابطه ۱-۱۲ بیان می‌شود (لومیس و کانر، ۱۹۹۲):

$$CWR = ET_c = ET_0 K_c \quad (12-1)$$

که در آن،  $ET_c$  تبخیر تعرق گیاه،  $ET_0$  تبخیر تعرق مرجع و  $K_c$  ضریب گیاهی هستند. تبخیر تعرق مرجع عبارت از تبخیر تعرق از یک پوشش چمنی یکنواخت به ارتفاع ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر است. این پوشش چمنی باید دارای رشد فعال بوده، زمین را کاملاً پوشانده باشد و با کمبود آب نیز مواجه نباشد.  $K_c$  ضریبی است که به نوع و گونه گیاهی و مرحله رشد بستگی داشته و درحقیقت نسبت تبخیر تعرق گیاه زراعی به تبخیر تعرق مرجع می‌باشد.

1. Crop Evapotranspiration (ETC)  
2. Crop water requirement (CWR)

به عبارت دیگر، تبخیرتعرق گیاه یا نیاز آبی معادل مقدار آبی است که باید در طی هر ماه در اختیار گیاه قرار گیرد. لازم به ذکر است که قسمتی از این آب توسط بارندگی و قسمتی دیگر توسط ذخیره خاک در اول فصل تأمین می‌شود و مابقی آن باید به صورت آبیاری به خاک اضافه شود.

## ۱۲-۲ تعیین تبخیرتعرق مرجع

روش‌های مختلفی برای تعیین تبخیرتعرق مرجع وجود دارند. چهارروش بلانی-کریدل (Blaney-Criddle)، تشعشع<sup>۱</sup>، پنمن (Penman) و تشت تبخیر<sup>۲</sup> اغلب مورد توجه قرار گرفته و همراه با روش پرستلی-تیلور (Priestly & Taylor) مهم‌ترین روش‌های اندازه‌گیری و برآورد تبخیرتعرق مرجع هستند (دورنبوس و پرویت، ۱۹۷۷). از این میان، روش پنمن و به‌خصوص روش پنمن-مونتیث بهترین نتایج را به دست داده و به صورت‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در این بخش برای اندازه‌گیری تبخیرتعرق مرجع از روش پرستلی-تیلور استفاده شده و دوره محاسبه آن را ماه در نظر می‌گیریم. علت استفاده از این روش آن است که به داده‌های محدودی نیاز دارد و کاربرد آن آسان است.

به هر حال، هدف اصلی تعیین تبخیرتعرق مرجع، محاسبه تبخیرتعرق گیاه می‌باشد. تبخیرتعرق مرجع را می‌توان با هر روشی، بسته به دقت مورد نیاز و داده‌های در دسترس، حساب کرد. به‌طور کلی، دمای حداکثر، دمای حداقل، تشعشع خورشیدی، سرعت باد، رطوبت نسبی و بارندگی داده‌های معمول و مورد نیاز برای محاسبه تبخیرتعرق مرجع هستند و با توجه به روش به کار رفته، می‌توان از همه یا تعدادی از این متغیرها استفاده کرد. در روش پرستلی-تیلور، تبخیرتعرق مرجع از طریق رابطه ۱۲-۲ محاسبه می‌شود (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۴):

$$ET_o = EEQ \times 0.701 \times e^{[0.18 \times (T_{max} + 20)]} \quad T_{max} < 5 \quad \text{اگر} \quad (12-2)$$

$$ET_o = EEQ \times 1.7 \quad 5 \leq T_{max} \leq 34 \quad \text{اگر}$$

$$ET_o = EEQ \times [(T_{max} - 34) \times 0.05 + 1.7] \quad T_{max} > 34 \quad \text{اگر}$$

که در آن،  $T_{max}$  دمای حداکثر و  $EEQ$  تبخیرتعرق معادل<sup>۳</sup> است و از طریق رابطه ۱۲-۳ بیان می‌شود:

$$EEQ = (SRAD \times 0.0387) \times (TD + 29) \quad (12-3)$$

$$TD = 0.6 \times T_{max} + 0.4 \times T_{min}$$

که در آن،  $T_{min}$  دمای حداقل،  $SRAD$  تشعشع خورشیدی رسیده به سطح زمین برحسب مگاژول بر مترمربع در روز و  $TD$  میانگین دمای روزانه هستند. بنابراین، در این روش فقط به سه داده دمای حداکثر، دمای حداقل و تشعشع خورشیدی نیاز است.

---

1. Radiation  
2. Pan evaporation  
3. Evapotranspiration equilibrium

جدول ۱-۱۲ مقادیر طول روز (N) و تشعشع خورشیدی (DSO) در بالای اتمسفر برای عرض‌های مختلف جغرافیایی و ماههای مختلف.

عرض جغرافیایی	ماه											
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۳۰	۱۰,۲۷	۱۰,۹۷	۱۱,۷۸	۱۲,۷۱	۱۳,۴۹	۱۳,۹۲	۱۳,۷۵	۱۳,۰۷	۱۲,۱۷	۱۱,۲۸	۱۰,۴۸	۱۰,۰۸
DSO	۲۱,۱۴	۲۵,۹۴	۳۱,۴۴	۳۶,۷۵	۴۰,۰	۴۱,۲۵	۴۰,۶۳	۳۸,۰۶	۳۳,۴۸	۲۷,۷۹	۲۲,۴	۱۹,۷۹
۳۲	۱۰,۱۳	۱۰,۸۸	۱۱,۷۶	۱۲,۷۷	۱۳,۶۱	۱۴,۰۸	۱۳,۹	۱۳,۱۶	۱۲,۱۹	۱۱,۲۲	۱۰,۳۵	۹,۹۲
DSO	۱۹,۹۴	۲۴,۹	۳۰,۶۷	۳۶,۳۹	۴۰,۰۱	۴۱,۴۶	۴۰,۷۶	۳۷,۸۷	۳۲,۸۸	۲۶,۸۵	۲۱,۲۵	۱۸,۵۷
۳۴	۹,۹۸	۱۰,۷۹	۱۱,۷۴	۱۲,۸۳	۱۳,۷۴	۱۴,۲۵	۱۴,۰۵	۱۳,۲۵	۱۲,۲	۱۱,۱۶	۱۰,۲۲	۹,۷۵
DSO	۱۸,۷۳	۲۳,۸۳	۲۹,۸۶	۳۵,۹۸	۳۹,۹۷	۴۱,۶۳	۴۰,۸۵	۳۷,۶۴	۳۲,۲۴	۲۵,۸۸	۲۰,۰۸	۱۷,۳۴
۳۶	۹,۸۲	۱۰,۷	۱۱,۷۲	۱۲,۸۹	۱۳,۸۸	۱۴,۴۳	۱۴,۲۱	۱۳,۳۵	۱۲,۲۲	۱۱,۰۹	۱۰,۰۸	۹,۵۷
DSO	۱۷,۵۲	۲۲,۷۳	۲۹,۰۲	۳۵,۵۳	۳۹,۹	۴۱,۷۷	۴۰,۹	۳۷,۳۶	۳۱,۵۶	۲۴,۸۸	۱۸,۸۹	۱۶,۱
۳۸	۹,۶۵	۱۰,۶	۱۱,۷	۱۲,۹۶	۱۴,۰۲	۱۴,۶۲	۱۴,۳۸	۱۳,۴۵	۱۲,۳۳	۱۱,۰۲	۹,۹۳	۹,۳۸
DSO	۱۶,۲۹	۲۱,۶۲	۲۸,۱۴	۳۵,۰۴	۳۹,۷۹	۴۱,۸۷	۴۰,۹۲	۳۷,۰۵	۳۰,۸۴	۲۳,۸۵	۱۷,۷	۱۴,۸۶
۴۰	۹,۴۷	۱۰,۵	۱۱,۶۸	۱۳,۰۳	۱۴,۱۸	۱۴,۸۲	۱۴,۵۷	۱۳,۵۶	۱۲,۲۵	۱۰,۹۵	۹,۷۷	۹,۱۷
DSO	۱۵,۰۵	۲۰,۴۸	۲۷,۲۳	۳۴,۵۱	۳۹,۶۳	۴۱,۹۳	۴۰,۹	۳۶,۶۹	۳۰,۰۸	۲۲,۸	۱۶,۴۹	۱۳,۶۲
۴۲	۹,۲۷	۱۰,۳۹	۱۱,۶۶	۱۳,۱۱	۱۴,۳۴	۱۵,۰۴	۱۴,۷۶	۱۳,۶۸	۱۲,۲۷	۱۰,۸۷	۹,۶۱	۸,۹۶
DSO	۱۳,۸۲	۱۹,۳۲	۲۶,۲۸	۳۳,۹۴	۳۹,۴۴	۴۱,۹۶	۴۰,۸۴	۳۶,۳	۲۹,۲۹	۲۱,۷۲	۱۵,۲۸	۱۲,۳۸

\* تشعشع خورشیدی در بالای اتمسفر، برحسب مگازول بر مترمربع در روز می‌باشد.

در بسیاری از موارد تشعشع خورشیدی در دست نبوده و لازم است مقدار آن تخمین زده شود. تشعشع خورشیدی را می‌توان با استفاده از تشعشع خورشیدی رسیده به بالای اتمسفر و تعداد ساعات آفتابی برآورد کرد (دورنبوس و پرویت، ۱۹۷۷؛ رابطه ۴-۱۲):

$$SRAD = 0,25 + \left(0,5 \times \frac{n}{N}\right) DSO \quad (12-4)$$

در این رابطه، DSO تشعشع خورشیدی رسیده به بالای اتمسفر برحسب مگازول بر مترمربع در روز، n تعداد ساعات آفتابی و N تعداد ساعات روز یا طول روز هستند. تشعشع خورشیدی رسیده به بالای اتمسفر و طول روز با استفاده از معادلات استاندارد اقلیم‌شناسی قابل محاسبه‌اند. در جدول ۱-۱۲، مقادیر این دو متغیر برای ماههای مختلف میلادی سال در عرض‌های جغرافیایی مختلف آورده شده است. با استفاده از جدول ۱-۱۲ و داشتن ماه موردنظر و عرض جغرافیایی، می‌توان مقدار تشعشع خورشیدی رسیده به بالای اتمسفر و طول روز را به دست آورد و با قراردادن آن‌ها در معادله ۴-۱۲ تشعشع خورشیدی رسیده به سطح زمین را محاسبه کرد.

مثال در صورتی که میانگین دمای حداکثر، میانگین دمای حداقل و میانگین تعداد ساعات آفتابی ماه پنجم سال در گرگان به ترتیب ۲۷,۴، ۱۶,۲ و ۶,۳ باشند، مقدار تبخیر تفرق مرجع این ماه را محاسبه کنید.

$$T_{max} = 27,4^{\circ}C, \quad T_{min} = 16,2^{\circ}C, \quad n = 6,3 \text{ h. d}^{-1}$$

باتوجه به اینکه عرض جغرافیایی گرگان حدود ۳۶ درجه شمالی است، بنابراین، با استفاده از جدول ۱-۱۲ مقادیر DSO و N قابل تعیین هستند. مقادیر تشعشع خورشیدی رسیده به سطح زمین (SRAD)، میانگین دمای روزانه (TD) و تبخیرتعرق معادل (EEQ) به صورت زیر حساب می‌شوند:

$$N = 13,88 \text{ h d}^{-1}, \text{ DSO} = 39,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

$$\text{SRAD} = (0,25 + 0,5 \times 0,45) \times 39,9 = 18,95 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

$$\text{TD} = (0,6 \times 27,4) + (0,4 \times 16,2) = 16,44 + 6,48 = 22,92$$

$$\text{EEQ} = (18,95 \times 0,0387) \times (22,92 + 29) = (0,07) \times (51,92) = 3,61$$

چون در این ماه Tmax بین ۵°C و ۳۴°C است پس:

$$\text{ET}_0 = 3,61 \times 1,1 = 4,19 \text{ mm d}^{-1}$$

این مقدار تبخیرتعرق مرجع، میانگین روزانه برای ماه پنجم سال است. یعنی در ماه پنجم سال به طور متوسط در هر روز ۴/۱۹ میلی‌متر تبخیرتعرق بالقوه وجود دارد. اگر برای کل ماه تبخیرتعرق مرجع موردنظر باشد، باید این رقم در تعداد روزهای ماه ضرب شود که حدود ۱۳۰ میلی‌متر خواهد بود.

### ۳-۱۲ تعیین ضریب گیاهی

به طور کلی، ضریب گیاهی ( $K_c$ ) به درصد پوشش زمین توسط گیاه بستگی دارد. معمولاً مقادیر ضریب گیاهی در هر مرحله از رشد گیاهان مختلف مشخص بوده و قبلاً توسط آزمایش‌های مختلف تعیین شده است، ولی در صورت مشخص نبودن ضریب گیاهی می‌توان ضریب گیاهی را مستقیماً اندازه‌گیری کرد. برای تعیین ضریب گیاهی در گیاهان زراعی دانه‌ای، فصل رشد گیاه به چهار دوره تقسیم می‌شود (دورنبوس و پرویت، ۱۹۷۷):

(۱) مرحله اول. سبزشدن و رشد اولیه در این مرحله رخ می‌دهد و سطح زمین دارای پوشش گیاهی کمتر از ۱۰٪ می‌باشد.

(۲) مرحله دوم یا مرحله رشد خطی. از خاتمه مرحله اول تا زمانی است که گیاه زمین را تقریباً به طور کامل بپوشاند. در واقع، پوشش زمین در انتهای مرحله دوم حدود ۸۰-۷۰٪ است.

(۳) مرحله سوم یا مرحله میانی. از زمان حصول پوشش کامل زمین توسط کانوبی تا زمانی که بر اثر ریزش و پیرشدن برگ‌ها، پوشش زمین روبه‌نزول و کاهش بگذارد. معمولاً در گیاهان زراعی، انتهای مرحله سوم بعد از گلدهی و زمان دانه بستن حادث می‌شود.

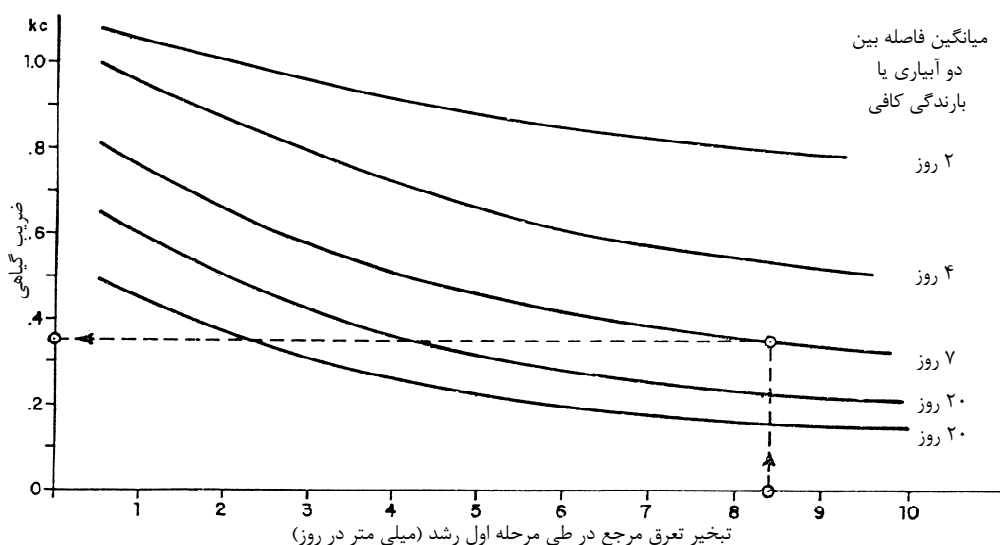
(۴) مرحله چهارم یا مرحله آخر. از پایان مرحله سوم تا زمان رسیدگی کامل گیاه طول می‌کشد. برای تعیین ضریب گیاهی، ابتدا باید طول هر یک از مراحل رشدی فوق برای گیاه موردنظر و باتوجه به تاریخ کاشت و شرایط محیطی تعیین شود. در صورتی که چنین اطلاعاتی در دسترس نباشد، برای این منظور می‌توان از جدول‌هایی مانند جدول ۲-۱۲ استفاده کرد. مثلاً طول دوره‌های رشدی اول، دوم، سوم

جدول ۲-۱۲ طول مراحل نمو و مجموع دوره رشد چند گیاه زراعی در نواحی و تاریخ‌های کاشت مختلف<sup>۱</sup> (دورنبوس و پرویت، ۱۹۷۷).

گیاه	مکان	تاریخ کاشت	مرحله				دوره رشد
			اول	دوم	سوم	چهارم	
جو، گندم و یولاف	هند	نوامبر	۱۵	۲۵	۵۰	۳۰	۱۲۰
	شرق آفریقا	جولای	۱۵	۳۰	۶۵	۴۰	۱۵۰
لوبیا سبز	کالیفرنیا	فوریه و مارس	۲۰	۳۰	۳۰	۱۰	۹۰
	کالیفرنیا و مصر	آگوست و سپتامبر	۱۵	۲۵	۲۵	۱۰	۷۵
چغندر قند	نواحی مدیترانه‌ای	بهار	۱۵	۲۵	۲۰	۱۰	۷۰
	نواحی مدیترانه‌ای	اوایل بهار	۲۵	۳۰	۲۵	۱۰	۹۰
ذرت شیرین	فیلیپین	اوایل مارس	۲۰	۲۰	۳۰	۱۰	۸۰
	نواحی خشک	اوایل فصل خنک	۲۰	۳۰	۵۰	۱۰	۱۱۰
ذرت دانه‌ای	شرق آفریقا	بهار	۳۰	۵۰	۶۰	۴۰	۱۸۰
	جنوب اسپانیا	اوایل بهار	۳۰	۴۰	۵۰	۳۰	۱۵۰
پنبه	مصر	مارس	۳۰	۵۰	۶۰	۵۵	۱۹۵
	تگزاس	بهار	۳۰	۵۰	۵۵	۴۵	۱۸۰
کاهو	نواحی مدیترانه‌ای	بهار	۲۰	۳۰	۱۵	۱۰	۷۵
	نواحی مدیترانه‌ای	اواخر زمستان	۳۰	۴۰	۲۵	۱۰	۱۰۵
نخود	نواحی سرد	اوایل تابستان	۱۵	۲۵	۳۵	۱۵	۹۰
	نواحی مدیترانه‌ای	اواخر زمستان	۲۵	۳۰	۳۰	۱۵	۱۰۰
سورگوم	نواحی خشک	تابستان	۲۰	۳۰	۴۰	۳۰	۱۲۰
	نواحی گرم و خشک	اوایل بهار	۲۰	۳۵	۴۵	۳۰	۱۳۰
لوبیا روغنی	ایالات متحده آمریکا	مه	۲۰	۳۵	۶۰	۲۵	۱۴۰
	ژاپن	اوایل تا اواسط ژوئن	۲۰	۲۵	۷۵	۳۰	۱۵۰
آفتابگردان	نواحی مدیترانه‌ای	بهار	۲۵	۳۵	۴۵	۲۵	۱۳۰
	کالیفرنیا	اوایل تابستان	۲۰	۳۵	۴۵	۲۵	۱۲۵
گوجه‌فرنگی	نواحی خشک	اواخر پاییز	۳۵	۴۵	۷۰	۳۰	۱۸۰
	نواحی مدیترانه‌ای	بهار	۳۰	۴۰	۴۵	۳۰	۱۴۵
خانواده کراسیفر	نواحی مدیترانه‌ای	کشت بهاره	۲۰	۳۰	۲۰	۱۰	۸۰
	نواحی مدیترانه‌ای	کشت پاییزه	۳۰	۳۵	۹۰	۴۰	۱۹۵

۱. مرحله اول شامل سبزشدن و رشد اولیه، مرحله دوم شامل رشد خطی، مرحله سوم از پوشش کامل زمین تا شروع پیرشدن برگ‌ها و مرحله چهارم از شروع پیرشدن تا رسیدگی کامل گیاه است.

و چهارم در گیاه پنبه برای گرگان، با استفاده از مقادیر ارائه شده در جدول ۲-۱۲ برای شرایط تگزاس، که از لحاظ تاریخ کاشت و طول دوره رشد تقریباً مشابه گرگان است، به ترتیب ۳۰، ۵۰، ۵۵ و ۴۵ روز می‌باشد که مجموعاً ۱۸۰ روز است.



شکل ۱-۱۲ تعیین مقدار میانگین ضریب گیاهی ( $k_c$ ) برای مراحل ابتدایی رشد گیاه با استفاده از تبخیر تعرق مرجع و مقدار بارندگی و آبیاری. به عنوان مثال، خطوط نقطه چین نشان می‌دهد، در صورتی که تبخیر تعرق مرجع حدود ۸/۵ میلی متر در روز و میانگین فاصله بین دو آبیاری ۷ روز باشد، ضریب گیاهی مرحله اول رشد حدود ۰/۳۵ خواهد بود (دورنبوس و پرویت، ۱۹۷۷).

در مرحله اول رشد گیاه، ضریب گیاهی با استفاده از شکل ۱-۱۲ و با استفاده از تبخیر تعرق مرجعی که در این مرحله حادث می‌شود و با توجه به فواصل زمانی مرطوب شدن خاک توسط آبیاری یا بارندگی به دست می‌آید. برای مثال، اگر پنبه در گرگان در اول ماه مه (۱۱ اردیبهشت) کشت شود، دوره ۳۰ روزه مرحله اول آن در ماه پنجم میلادی رخ می‌دهد، که میانگین تبخیر تعرق مرجع در طی این دوره حدود ۴/۱۹ میلی متر در روز می‌باشد. اگر فرض شود که در ماه مه، هر ۱۰ روز یکبار آبیاری یا بارندگی قابل ملاحظه صورت می‌گیرد، مقدار ضریب گیاهی برای مرحله اول، حدود ۰/۳۵ خواهد بود.

برای مراحل سوم و چهارم رشد گیاه، ضریب گیاهی را می‌توان از جدول‌هایی مانند جدول ۳-۱۲ به دست آورد. برای مثال، در گرگان، مراحل سوم و چهارم رشد پنبه در طی ماه‌های هفتم تا دهم سال رخ می‌دهد که معمولاً در طی این دوره رطوبت نسبی (RH) بیشتر از ۵۰٪ و سرعت باد بین ۰ تا ۵ متر بر ثانیه می‌باشد. بنابراین، ضریب گیاهی پنبه در مرحله سوم و چهارم رشد، به ترتیب معادل ۱/۰۵ و ۰/۶۵ خواهد بود. لازم به ذکر است که برای مرحله دوم رشد گیاه، ضریب گیاهی از طریق درونیابی خطی به دست می‌آید. شکل ۲-۱۲ مقادیر ضریب گیاهی برای ذرت را به عنوان نمونه نشان می‌دهد.

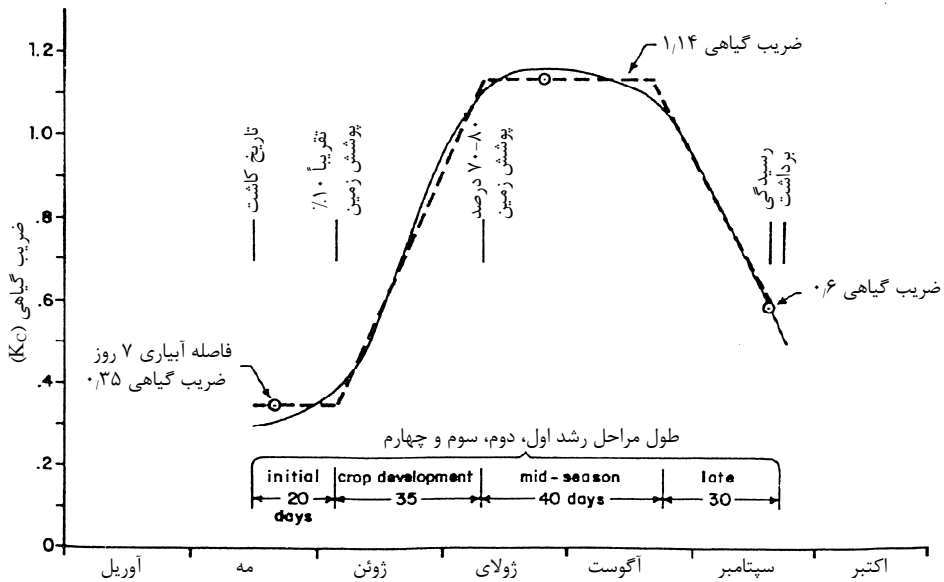
جدول ۳-۱۲ ضرایب گیاهی مراحل نمو چند گیاه زراعی تحت رطوبت نسبی و سرعت‌های باد متفاوت<sup>۱</sup> (دورنیوس و پرویت، ۱۹۷۷).

نام گیاه	مرحله نمو	رطوبت نسبی			
		(کمتر از ۵۰٪)		(بیشتر از ۵۰٪)	
		سرعت باد ۵-۸	سرعت باد ۰-۵	سرعت باد ۵-۸	سرعت باد ۰-۵
جو، گندم و یولاف	۳	۱٫۰۵	۱٫۱	۰٫۲۵	۰٫۲
	۴	۰٫۲۵	۰٫۲۵	۰٫۲۵	۰٫۲
لوبیا سبز	۳	۰٫۹۵	۰٫۹۵	۰٫۹۵	۱٫۰
	۴	۰٫۸۵	۰٫۸۵	۰٫۸۵	۰٫۹
چغندر قند	۳	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۱
	۴	۰٫۹	۰٫۹	۰٫۹	۰٫۹۵
ذرت شیرین	۳	۱٫۰۵	۱٫۱	۱٫۰۵	۱٫۲
	۴	۰٫۹۵	۱٫۰	۰٫۹۵	۱٫۱
ذرت دانه‌ای	۳	۱٫۰۵	۱٫۱	۱٫۰۵	۱٫۲
	۴	۰٫۵۵	۰٫۵۵	۰٫۵۵	۰٫۶
پنبه	۳	۱٫۰۵	۱٫۱۵	۱٫۰۵	۱٫۲۵
	۴	۰٫۶۵	۰٫۶۵	۰٫۶۵	۰٫۷
کاهو	۳	۰٫۹۵	۰٫۹۵	۰٫۹۵	۱٫۰۵
	۴	۰٫۹	۰٫۹	۰٫۹	۱٫۰
نخود	۳	۱٫۰۵	۱٫۱	۱٫۰۵	۱٫۲
	۴	۰٫۹۵	۱٫۰	۰٫۹۵	۱٫۱
سورگوم	۳	۱٫۰	۱٫۰۵	۱٫۰	۱٫۱۵
	۴	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵۵
لوبیا روغنی	۳	۱٫۰	۱٫۰۵	۱٫۰	۱٫۱۵
	۴	۰٫۴۵	۰٫۴۵	۰٫۴۵	۰٫۴۵
آفتابگردان	۳	۱٫۰۵	۱٫۱	۱٫۰۵	۱٫۲
	۴	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۳۵
گوجه‌فرنگی	۳	۱٫۰۵	۱٫۱	۱٫۰۵	۱٫۲۵
	۴	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶۵
خانواده کراسیفر	۳	۰٫۹۵	۱٫۰	۰٫۹۵	۱٫۱
	۴	۰٫۸	۰٫۸۵	۰٫۸۵	۰٫۹۵

۱. ضریب گیاهی مرحله اول با استفاده از شکل ۱-۱۲ و مرحله دوم با استفاده از درون‌یابی تعیین می‌شود. سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه است.

حال اگر ضریب گیاهی برای یک ماه معین مورد نظر باشد، می‌توان برای وسط آن ماه ضریب گیاهی را پیدا کرده و مورد استفاده قرار داد. برای مثال، در جدول ۴-۱۲ آمار هواشناسی، تبخیر تعرق مرجع، تبخیر تعرق گیاه و مقادیر تقریبی ضریب گیاهی پنبه در گرگان در ماه‌های مختلف سال آورده شده است. در شکل ۳-۱۲ نیز مقادیر ضریب گیاهی پنبه به تصویر کشیده شده است.





شکل ۲-۱۲ نمونه‌ای از ضریب گیاهی ( $k_c$ ) برای ذرت در مراحل مختلف رشد. مشاهده می‌شود که طول مراحل اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۲۰، ۳۵، ۴۰ و ۳۰ روز است.

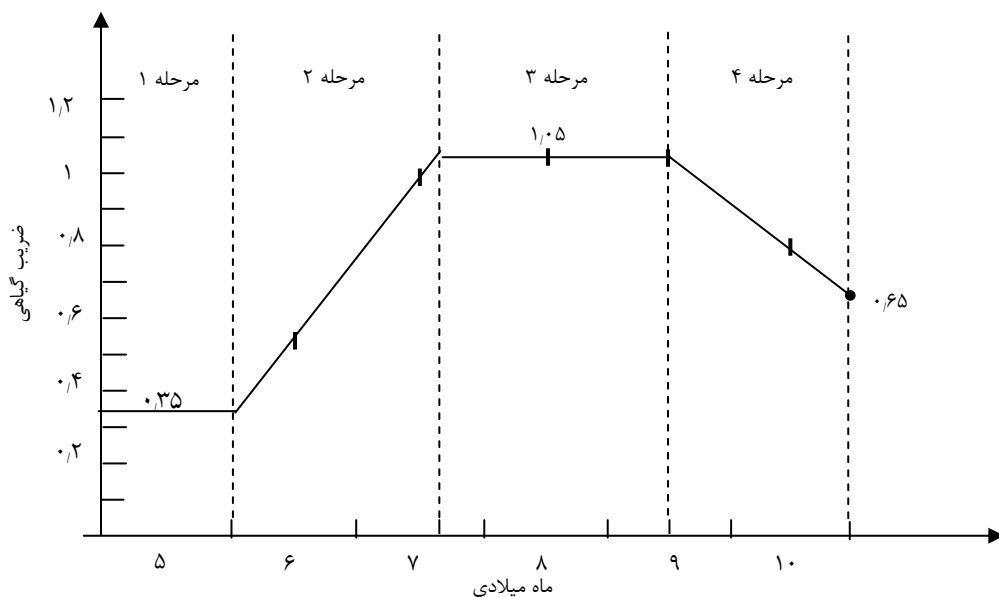
باتوجه به جدول ۴-۱۲ مشاهده می‌شود که گرچه بسته به مرحله رشد و در نتیجه ضریب گیاهی، تبخیرتعرق گیاه می‌تواند بیشتر، مساوی و کمتر از تبخیرتعرق مرجع باشد، ولی از آنجایی که در قسمت عمده فصل رشد، پوشش کانوپی به دلیل کوچک بودن بوته‌ها و یا ریزش و پیر شدن برگ‌ها، کامل نبوده و در نتیجه ضریب گیاهی کمتر از یک است، بنابراین، مقدار تبخیرتعرق گیاه عموماً کمتر از تبخیرتعرق مرجع می‌باشد.

طبقه‌بندی کلی وضعیت متغیرهای آب و هوا در جدول ۵-۱۲ آورده شده است.

جدول ۴-۱۲ آمار هواشناسی، تبخیرتعرق مرجع، تبخیرتعرق گیاه و مقادیر تقریبی ضریب گیاهی پنبه در گرگان.

ماه میلادی	دمای حداکثر (°C)	طول روز (ساعت)	تشنه رسیدگی		تبخیرتعرق مرجع (میلی‌متر در ماه)	ضریب گیاهی	تبخیرتعرق گیاه (میلی‌متر در ماه)
			مگاژول بر مترمربع در روز) بالای اتمسفر	سطح زمین			
۵	۲۷٫۴	۱۳٫۸۸	۳۹٫۹	۱۸٫۹۵	۱۳٫۰	۰٫۳۵	۴۵٫۵
۶	۳۱٫۰	۱۴٫۴۳	۴۱٫۷۷	۲۱٫۰۱	۱۴٫۸۵	۰٫۵۵	۸۱٫۷
۷	۳۲٫۶	۱۴٫۲۱	۴۰٫۹۰	۲۱٫۵۹	۱۶٫۴۰	۰٫۹۵	۱۵۵٫۸
۸	۳۳٫۲	۱۳٫۳۵	۳۷٫۳۶	۲۰٫۵۳	۱۵٫۶۹	۱٫۰۵	۱۶۴٫۷
۹	۲۹٫۸	۱۲٫۱۲	۳۱٫۵۶	۱۸٫۰۹	۱۲٫۶۱	۱٫۰۵	۱۳۲٫۴
۱۰	۲۴٫۳	۱۱٫۰۹	۲۴٫۸۸	۱۲٫۳۹	۸٫۰۵	۰٫۷۵	۳۰٫۴

۱۲. نیاز آبی گیاه و بهینه‌سازی مصرف آب ۲۰۵



شکل ۳-۱۲ ضریب گیاهی ( $k_c$ ) در مراحل مختلف رشد پنبه در گرگان. توجه شود که در مرحله دوم رشد گیاه، ضریب گیاهی به صورت درونیابی خطی تعیین می‌شود (از مؤلف).

جدول ۵-۱۲ طبقه‌بندی عمومی متغیرهای اقلیمی و آب‌وهوایی دما، رطوبت، باد و تشعشع (دورنیوس و پرویت، ۱۹۷۷).

<b>دما</b>	
میانگین دما بیشتر از $30^{\circ}\text{C}$ است	گرم
میانگین دما کمتر از $15^{\circ}\text{C}$ است	خنک
<b>رطوبت</b>	
میانگین رطوبت نسبی کمتر از ۴۰ درصد	پایین
میانگین رطوبت نسبی بین ۴۰-۵۵ درصد	متوسط-پایین
میانگین رطوبت نسبی حدود ۵۵ درصد	متوسط
میانگین رطوبت نسبی بین ۵۵-۷۰ درصد	متوسط-بالا
میانگین رطوبت نسبی بیشتر از ۷۰ درصد	بالا
<b>باد</b>	
سرعت باد کمتر از ۲ متر در ثانیه	آرام
سرعت باد بین ۲-۵ متر در ثانیه	متوسط
سرعت باد بین ۵-۸ متر در ثانیه	شدید
سرعت باد بیشتر از ۸ متر در ثانیه	خیلی شدید
<b>تشعشع</b>	
نسبت ساعات آفتابی کمتر از ۰/۶	پایین
نسبت ساعات آفتابی بین ۰/۶-۰/۸	متوسط
نسبت ساعات آفتابی بیشتر از ۰/۸	بالا

## ۴-۱۲ مقدار و زمان آبیاری

به طور کلی، میزان آب مورد استفاده در آبیاری را می‌توان براساس مترمکعب در دقیقه یا لیتر بر ثانیه محاسبه کرد. حجم آب مورد استفاده براساس مترمکعب در هکتار یا ارتفاع آب روی خاک و براساس میلی‌متر یا سانتی‌متر بیان می‌شود. هر ۱۰ مترمکعب آب در هکتار معادل ۱ میلی‌متر آب است. بنابراین، برای یک گیاه که میزان نیاز آبی آن حدود ۷۰۰۰ مترمکعب (۷۰۰ میلی‌متر) است و مجموع میزان آب ذخیره شده در خاک و بارندگی در طی فصل رشد حدود ۵۰۰۰ مترمکعب (۵۰۰ میلی‌متر) باشد، میزان آب آبیاری مورد نیاز حدود ۲۰۰۰ مترمکعب (۲۰۰ میلی‌متر) است (میلر و داناهاو، ۱۹۹۰).

در بخش‌های قبلی ذکر گردید که به میزان آب خاک بین ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم، آب قابل استفاده گفته می‌شود که تنها قسمتی از این آب، که آب سهل‌الوصول نامیده می‌شود، به آسانی در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. جهت دستیابی به حداکثر عملکرد، انجام آبیاری گیاه، پس از خروج آب سهل‌الوصول ضروری است، که در اکثر گیاهان زراعی پس از خروج حدود ۷۵-۵۰٪ از کل آب قابل استفاده باید صورت گیرد.

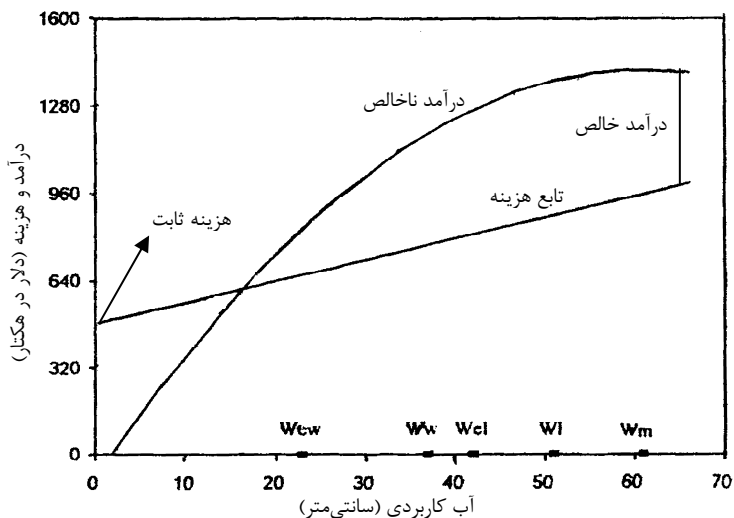
از آنجایی که میزان نیاز آبی گیاهان مختلف و میزان تحمل آن‌ها نسبت به خشکی متفاوت است، بنابراین، زمان انجام آبیاری با توجه به خروج رطوبت از خاک نیز در گونه‌های مختلف گیاهی، ارقام مختلف یک گونه و خاک‌های مختلف، متفاوت است. ذکر این نکته ضروری است که حساسیت گیاهان به کمبود رطوبت و در نتیجه آبیاری در طی مراحل مختلف رشد متفاوت است. با توجه به اینکه مراحل گلدهی، گرده‌افشانی و تشکیل دانه نسبت به کمبود آب حساسیت بیشتری داشته و کاهش رطوبت در طی این مراحل یا مراحل حساس دیگر سبب کاهش شدید عملکرد می‌شود، بنابراین، آبیاری گیاه در طی این مراحل، عمدتاً باید با خروج مقادیر کمتری از رطوبت قابل استفاده خاک صورت گیرد.

نوع بافت خاک، سن گیاه و عمق و توسعه ریشه در تعیین تعداد دفعات انجام آبیاری بسیار مهم است. خاک‌های ریزبافت در مقایسه با خاک‌های درشت‌بافت دارای قابلیت نگهداری آب بیشتری بوده و بنابراین انجام آبیاری در خاک‌های ریزبافت را می‌توان با فواصل بیشتر و میزان آب بیشتر در هر نوبت آبیاری انجام داد. این مسئله در مورد سن گیاه و عمق و توسعه ریشه نیز صادق است و با افزایش سن گیاه و عمق ریشه‌ها، بهتر است میزان آب در هر نوبت آبیاری افزایش و تعداد دفعات آبیاری کاهش یابد.

## ۵-۱۲ کم آبیاری<sup>۱</sup> و بهینه‌سازی مصرف آب

در کم آبیاری، به گیاه مورد نظر، کمتر از میزان آبی که جهت دستیابی به حداکثر عملکرد لازم است، آب داده می‌شود. این کار به صورت سیستماتیک و عمدتاً صورت گرفته و هدف از آن، استفاده بهینه و

1. Deficit irrigation



شکل ۴-۱۲ تابع درآمد ناخالص و هزینه انجام شده درمقابل آب کاربردی در گندم زمستانه. اختلاف بین دو منحنی نشان‌دهنده درآمد خالص می‌باشد.  $W_m$  مقدار آب آبیاری موردنیاز جهت به‌حداکثر رساندن عملکرد،  $W_l$  مقدار آب لازم جهت به‌حداکثر رساندن درآمد خالص تحت شرایط محدودیت زمین،  $W_w$  مقدار آب لازم جهت به‌حداکثر رساندن درآمد خالص در شرایط محدودیت آب و  $W_{ew}$  مقدار آب لازم برای کم‌آبیاری است که درآمد خالص برابر شرایط آبیاری کامل تحت شرایط محدودیت آب می‌باشد (انگلیش و راجا، ۱۹۹۶).

اقتصادی از آب موجود است. درواقع، (الف) افزایش راندمان آبیاری، (ب) کاهش هزینه آبیاری و (ج) صرفه‌جویی در مصرف آب جهت استفاده در مکان یا زمانی دیگر از اهداف اصلی کم‌آبیاری می‌باشند. برای درک بهتر مبحث کم‌آبیاری، اشکال و اهداف عمده کم‌آبیاری و استفاده بهینه از آب در قالب شکل ۴-۱۲ توضیح داده می‌شود (انگلیش و راجا، ۱۹۹۶).

شکل ۴-۱۲ نشان‌دهنده وضعیت تیبیک عملکرد و هزینه در مبحث کم‌آبیاری است و درآمد کل را به‌صورت تابع درجه دوم و آب کاربردی یا هزینه را به‌صورت تابع درجه اول نشان می‌دهد. توجه شود که فاصله بین نقطه شروع خط هزینه بر روی محور عمودی از نقطه صفر یا مبدأ مختصات، نشان‌دهنده هزینه‌های ثابت موردنیاز برای انجام آبیاری است. اختلاف بین دو منحنی نشان‌دهنده درآمد خالص می‌باشد. مقدار آب آبیاری موردنیاز جهت به‌حداکثر رساندن عملکرد به‌وسیله نقطه  $W_m$  مشخص شده است. افزایش آب بیشتر از نقطه  $W_m$  سبب افزایش عملکرد نمی‌شود.

با کاهش میزان آب کاربردی نسبت به نقطه  $W_m$ ، راندمان آب مصرفی افزایش یافته (هدف اول کم‌آبیاری) و افزایش عملکرد به‌ازای واحد آب مصرفی بیشتر خواهد شد. زمانی که میزان آب کاربردی به نقطه  $W_l$  رسید، درآمد خالص به‌ازای واحد سطح زمین به‌حداکثر می‌رسد. درحقیقت در نقطه  $W_l$  شیب

خط هزینه با شیب خط درآمد خالص برابر است و میزان درآمد خالص از هر واحد سطح زمین به حد اکثر می‌رسد. با افزایش میزان آب به بیشتر از نقطه  $w_1$ ، افزایش شیب خط هزینه یا آبیاری بیشتر از افزایش شیب خط درآمد ناخالص یا عملکرد می‌باشد و در نتیجه گرچه میزان درآمد ناخالص افزایش می‌یابد، ولی هزینه با شدت بیشتری افزایش یافته و در نتیجه درآمد خالص کاهش می‌یابد. توجه شود که در دامنه بین دو نقطه  $w_m$  و  $w_1$  کشاورز می‌تواند از طریق کاهش هزینه (هدف دوم کم‌آبیاری)، از کم‌آبیاری سود ببرد. تعیین دو نقطه  $w_m$  و  $w_1$  برای گونه‌های مختلف گیاهی و شرایط مختلف مهم بوده و تولیدکننده می‌تواند با توجه به میزان آب و زمین موجود حداکثر بهره را از آب ببرد.

یک نقطه مهم دیگر در شکل مشخص است. اگر آب کاربردی بیشتر کاهش یابد، به نقطه‌ای می‌رسیم که در آن نقطه، درآمد خالص برابر نقطه  $w_m$  می‌شود. این نقطه به وسیله  $w_{el}$  برای موارد با محدودیت زمین نشان داده شده است.

در شرایط عدم محدودیت زمین جهت کشت، اگر بتوان آب ذخیره شده را جهت کشت قطعه زمین دیگری مورد استفاده قرار داد (با وجود درآمد خالص مشابه به‌ازای واحد سطح زمین)، درآمد خالص کل افزایش بیشتری می‌یابد. در شرایط محدودیت آب و عدم محدودیت زمین جهت کشت، این وضعیت برای نقطه  $w_{ew}$  صادق است و گرچه در این نقطه میزان درآمد خالص از آن قطعه از زمین کاهش یافته است، ولی با مصرف آب جهت اراضی دیگر، میزان درآمد خالص کل افزایش می‌یابد. در واقع، در شرایطی که محدودیت زمین وجود ندارد و تنها محدودیت آب وجود داشته باشد، می‌توان از آب صرفه‌جویی شده جهت به‌زیرکشت بردن یا مصرف در بخش دیگری از زمین استفاده کرد و در نتیجه درآمد خالص را به حد اکثر رساند. در این حالت، درآمد خالص کل، که به وسیله نقطه  $w_w$  نشان داده شده است، برابر نقطه  $w_m$  است. در حقیقت با این روش می‌توان در میزان آبی معادل نقطه  $w_w$  درآمد خالصی معادل نقطه  $w_m$  به دست آورد.

واکنش عملکرد دانه به بارندگی و آب آبیاری را می‌توان به وسیله رابطه ۵-۱۲ بیان کرد:

$$Y(w) = b_0 + b_1(p+w) + b_2(p+w)^2 \quad (12-5)$$

که در آن،  $Y$  عملکرد دانه بر حسب تن در هکتار،  $w$  آب آبیاری (میلی‌متر)،  $p$  نزولات در طی فصل رشد بر حسب میلی‌متر و  $b_0$ ،  $b_1$  و  $b_2$  ضرایب رگرسیون هستند. به منظور تعیین مقدار آب مورد نیاز تحت شرایط بارندگی متفاوت، می‌توان میزان نزولات در رابطه ۶-۱۲ را ثابت در نظر گرفت و واکنش عملکرد به آب آبیاری را تعیین کرد (رابطه ۶-۱۲):

$$Y(w) = c_0 + c_1w + c_2w^2 \quad (12-6)$$

که در آن:  $c_0 = b_0 + b_1p + b_2p^2$ ،  $c_1 = b_1 + 2b_2p$  و  $c_2 = b_2$  هستند.

جهت بهینه‌کردن مدیریت آبیاری، درک صحیح تابع هزینه علاوه بر تابع تولید، ضروری است. تابع هزینه از طریق رابطه خطی ۷-۱۲ بیان می‌شود:

$$c(w) = a_1 + a_2 w \quad (12-7)$$

که در آن،  $c(w)$  هزینه،  $w$  آب آبیاری بر حسب میلی‌متر و  $a_1$  و  $a_2$  به ترتیب هزینه‌های ثابت و متغیر تولید هستند. در مبحث کم‌آبیاری، با داشتن توابع فوق، میزان آب آبیاری برای موارد مختلف ذکر شده قابل تعیین می‌باشد:

(الف) مقدار آب آبیاری برای حصول حداکثر عملکرد از هر واحد سطح زمین ( $w_m$ ):

$$w_m = c_1 / (-2 c_2) \quad (12-8)$$

(ب) مقدار آب آبیاری برای حصول حداکثر درآمد خالص در شرایط محدودیت زمین ( $w_1$ ):

$$w_1 = (c_1 - a_1/p_y) / (-2c_2) \quad (12-9)$$

(ج) مقدار آب آبیاری برای حصول حداکثر درآمد خالص در شرایط محدودیت آب ( $w_w$ ):

$$w_w = [(p_y b_1 - a_1) (p_y b_2) - p] \quad (12-10)$$

(د) مقدار آب آبیاری که در آن، درآمد خالص برابر است با درآمد خالص در شرایط آبیاری کامل در شرایط محدودیت آب ( $w_{ew}$ ):

$$w_{ew} = (-z_1 + [(z_1^2 - 4 p_y b_2 (p_y b_1 - a_1))]^{1/2} / 2 p_y b_2 - p \quad (12-11)$$

که در آن، مقدار  $z_1$  از طریق رابطه ۱۲-۱۲ به دست می‌آید:

$$z_1 = (p_y b_1^2 - 4 a_1 b_2 + 4 p_y b_1 b_2) / 2 b_2 \quad (12-12)$$

مقدار آب آبیاری ( $W_t$ ) برای رسیدن به عملکرد هدف یا عملکرد مورد انتظار ( $Y_t$ ) از طریق رابطه ۱۲-۱۳ بیان می‌شود:

$$W_t = [-(c_1 + (c_1^2 - 4 c_2 (c_0 - Y_t))^{1/2})] / (-2 c_2) \quad (12-13)$$

لازم به ذکر است که کم‌آبیاری همیشه مؤثر و مفید نبوده و ممکن است در بعضی از مواقع تأثیر منفی بر روی کیفیت یا کمیت محصول داشته باشد. به عنوان مثال، کم‌آبیاری سیب‌زمینی می‌تواند سبب تغییر اندازه و شکل غده شده و در نتیجه روی کیفیت، بازارپسندی و قیمت سیب‌زمینی اثر منفی ایجاد کند. تحت شرایط گرم و خشک در کلزا، کم‌آبیاری ممکن است سبب افزایش اسید اروسیک روغن و گلوکوزینولیت کنجاله شده و در نتیجه سبب کاهش کیفیت روغن و کنجاله گردد. در مقابل، تحت تعدادی از شرایط، کم‌آبیاری می‌تواند سبب افزایش کیفیت و کمیت اقتصادی محصول مورد نظر شود. به عنوان مثال، کم‌آبیاری ممکن است سبب افزایش درصد پروتئین گندم و جو، افزایش طول لیاف پنبه و افزایش درصد قند چغندر قند گردد.

برای درک بهتر کم‌آبیاری و بهینه‌سازی مصرف آب و نقش آن در افزایش درآمد خالص، به خصوص تحت شرایط محدودیت آب، مقادیر برآورد شده و زمان آبیاری تکمیلی جهت به حداکثر رساندن عملکرد، درآمد خالص و عملکرد مورد انتظار یا هدف تحت شرایط بارندگی مختلف در جدول ۶-۱۲ نشان داده شده است (زانگ و اویس، ۱۹۹۹).

جدول ۶-۱۲ مقدار و زمان آبیاری تکمیلی جهت به حداکثر رساندن عملکرد و درآمد خالص تحت شرایط بارندگی مختلف\* .

مقدار بارندگی	$W_m$	$W_1$	$W_w$	$W_{ew}$	$W_t$	زمان آبیاری
<i>گندم نان</i>						
۲۵۰	۴۳۰	۳۳۶	۲۶۰	۱۶۱	۱۸۰-۲۵۴	طول شدن ساقه، خروج خوشه از برگ پرچم، گلدهی و پرشدن دانه
۳۰۰	۳۸۰	۲۸۶	۲۱۰	۱۱۱	۱۰۸-۲۰۴	طول شدن ساقه، گلدهی یا پرشدن دانه
۳۵۰	۳۳۰	۲۳۶	۱۶۰	۶۱	۵۸-۱۵۵	گلدهی یا پرشدن دانه
۴۰۰	۲۸۰	۱۸۶	۱۱۰	۱۱	۰-۱۴۴	پرشدن دانه
۴۵۰	۲۳۰	۱۳۶	۶۰	۰	۰-۵۵	پرشدن دانه
<i>گندم دوروم</i>						
۲۵۰	۵۱۰	۴۵۴	۳۱۴	۱۸۰	۱۴۴-۲۰۷	طول شدن ساقه، خروج خوشه از برگ پرچم، گلدهی و پرشدن دانه
۳۰۰	۴۶۰	۴۰۴	۲۹۴	۱۳۰	۹۴-۱۵۷	طول شدن ساقه، گلدهی یا پرشدن دانه
۳۵۰	۴۱۰	۳۵۴	۲۴۴	۸۰	۴۴-۱۰۷	گلدهی یا پرشدن دانه
۴۰۰	۳۶۰	۳۰۴	۱۹۴	۳۰	۰-۵۷	پرشدن دانه
۴۵۰	۳۱۰	۲۵۴	۱۴۴	۰	-	-

\* بارندگی برحسب میلی‌متر،  $W_m$  مقدار آب لازم جهت به حداکثر رساندن عملکرد،  $W_1$  مقدار آب لازم جهت به حداکثر رساندن درآمد خالص تحت شرایط محدودیت زمین،  $W_w$  مقدار آب لازم جهت به حداکثر رساندن درآمد خالص در شرایط محدودیت آب،  $W_{ew}$  مقدار آب لازم برای کم آبیاری که درآمد خالص برابر شرایط آبیاری کامل تحت شرایط محدودیت آب است و  $W_t$  مقدار آب لازم جهت دست‌یابی به عملکرد موردانتظار یا هدف می‌باشند.

## تنش کمبود آب: توسعه، اثرات، سازگاری

در این فصل می‌خوانیم:

۱-۱۳ انواع خشکی و نحوه توسعه آن‌ها

۲-۱۳ اثرات تنش کمبود آب

۳-۱۳ اثرات تأمین مجدد آب بعد از یک دوره تنش

۴-۱۳ سازگاری و تحمل خشکی

### مقدمه

زمانی که تلفات آب از گیاه بر اثر تعرق، بیشتر از جذب آب شود، در گیاه کمبود آب حادث شده و گیاه دچار تنش خشکی می‌گردد. تنش آب می‌تواند آناتومی، مورفولوژی، فیزیولوژی و بیوشیمی گیاهان را تحت تأثیر قرار دهد و تقریباً بر کلیه جنبه‌های رشد و نمو آن‌ها اثر بگذارد. یک گیاه ممکن است در سراسر دوره رشد و یا در مراحل خاصی از نمو خود مثل سبزشدن، رشد رویشی، گلدهی، پرشدن دانه و رسیدگی در معرض تنش کمبود آب باشد، ولی به‌طور کلی در اکثر گیاهان، به‌ویژه گیاهان زراعی، زمان گرده‌افشانی، تلقیح و تشکیل اندام‌های زایشی حساس‌ترین مراحل نسبت به کمبود آب هستند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

### ۱-۱۳ انواع خشکی و نحوه توسعه آن‌ها

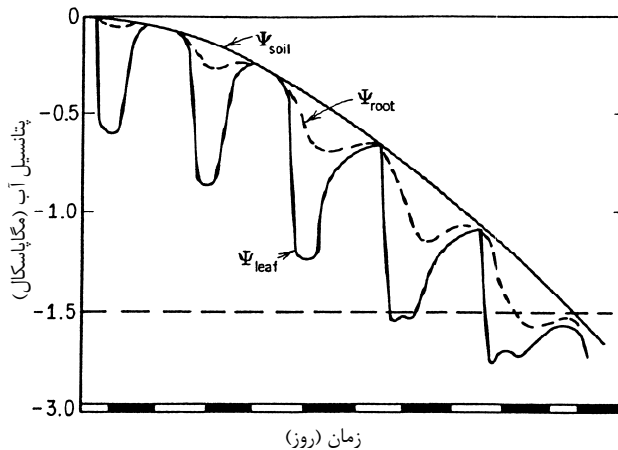
در بحث خشکی و سازگاری به آن، باید به این نکته توجه شود که منظور از خشکی چه چیزی بوده و الگوی وقوع خشکی چیست؟ به‌طور کلی دو نوع تنش کمبود آب در گیاه و سه نوع اصلی الگوی خشکی در مزرعه و شرایط طبیعی ایجاد می‌شود (لومیس و کانر، ۱۹۹۲).

#### ۱-۱-۱۳ تنش کمبود آب در گیاه

معمولاً دو نوع مهم تنش کمبود آب در گیاه وجود دارد. نوع اول که تنش کمبود آب وسط روز<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، به‌دلیل تأخیر جذب آب در مقابل تعرق صورت می‌گیرد و اغلب در روزهای آفتابی و گرم حادث می‌شود. این نوع تنش خشکی موقتی بوده و اغلب بیش از چند ساعت دوام ندارد و گیاه در غروب و شب بعد، مجدداً آماس خود را باز می‌یابد.

1. Midday deficit





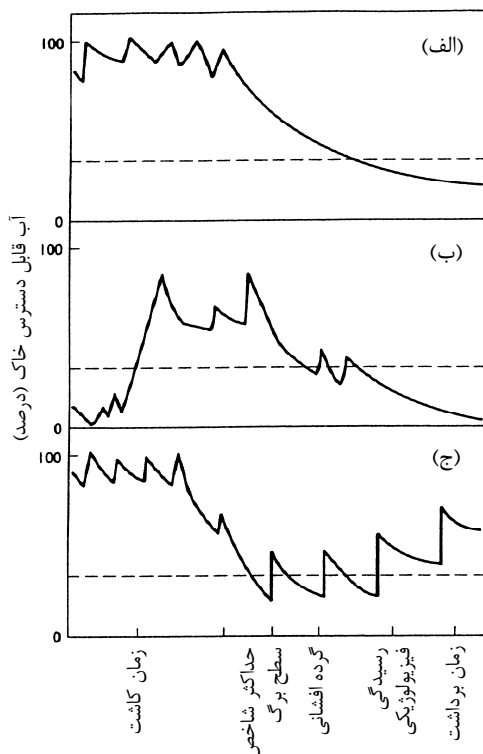
شکل ۱۳-۱ تغییرات پتانسیل آب برگ ( $\Psi_{leaf}$ )، ریشه ( $\Psi_{root}$ ) و خاک ( $\Psi_{soil}$ )، در یک خاک درحال خشک شدن در طی ۶ روز متوالی (اسلاچر، ۱۹۷۷).

نوع اصلی خشکی، کمبود آب طولی‌المدت<sup>۱</sup> است و وقتی به وجود می‌آید که دسترسی گیاه به آب به تدریج کاهش می‌یابد. در شکل ۱۳-۱ توسعه این نوع خشکی در گیاه به خوبی نشان داده شده است. در ابتدا پتانسیل آب ( $\Psi_w$ ) برگ در شب بازیابی شده و مساوی پتانسیل آب خاک می‌شود، ولی با خشک‌تر شدن خاک، بازیابی رطوبت از دست‌رفته کمتر و کمتر می‌گردد. توجه شود که منحنی پتانسیل آب برگ و خاک، در شب‌های اول و دوم کاملاً به هم چسبیده بوده، ولی در شب‌های سوم و چهارم از هم جدا می‌شوند. در روزهای سوم و چهارم که خاک خشک‌تر شده و حرکت آب به طرف ریشه‌ها خیلی کند است، جذب آب کمتر از تعرق انجام شده است و در نتیجه گیاه پژمرده می‌شود. در این شرایط، پتانسیل آب برگ به زیر  $-1.5$  MPa می‌رسد، که یک پژمردگی موقتی<sup>۲</sup> بوده و با فرارسیدن شب و افزایش پتانسیل آب برگ برطرف می‌شود. در روز پنجم و زمانی که پتانسیل آب خاک نیز به کمتر از  $-1.5$  مگاپاسکال می‌رسد، برگ قادر به آماس مجدد در شب نبوده و ممکن است با تأمین مجدد آب، گیاه بهبود نیابد و در نتیجه پژمردگی دائم<sup>۳</sup> حادث شود (اسلاچر، ۱۹۷۷).

## ۱۳-۱-۲ الگوهای وقوع خشکی

به‌طور کلی، سه الگوی وقوع خشکی وجود دارد (لومیس و کانر، ۱۹۹۲؛ شکل ۲-۱۳). در الگوی اول، در اوایل و اواسط فصل رشد شرایط رطوبتی مناسبی وجود دارد، ولی معمولاً خشکی در انتهای فصل<sup>۴</sup>

1. Long term deficit
2. Transient Wilting
3. Permanent Wilting
4. Terminal drought



شکل ۲-۱۳ الگوهای قابلیت دسترسی آب خاک، که نشان‌دهنده سه نوع خشکی است. (الف) خشکی انتهای فصل رشد؛ (ب) خشکی در ابتدا و انتهای فصل رشد؛ و (ج) خشکی نامنظم و با تغییرات زیاد بارندگی در طی فصل رشد (لومیس و کانر، ۱۹۹۲).

ایجاد می‌شود. در واقع، با پیشرفت فصل رشد، محیط و خاک خشک‌تر شده و قابلیت دسترسی به آب توسط گیاه کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در ایران، در بسیاری از نقاط دیم‌کاری کشور چنین الگویی فراهم بوده و در زمستان و اوایل بهار مشکل کمبود آب وجود ندارد، ولی با حرکت به سمت اواسط و اواخر بهار و تابستان، خشکی فزاینده‌ای حادث می‌شود.

در الگوی دوم، یک مرحله اولیه و یک مرحله انتهایی خشکی وجود دارد. این الگو در مناطق گرمسیری که دارای بارندگی موسمی هستند، دیده می‌شود. در این مناطق، کاشت گیاه در قبل از فصل بارندگی صورت گرفته و معمولاً گیاه در اوائل فصل رشد با تنش کمبود آب مواجه است. مرحله دوم خشکی با نزدیک شدن به پایان فصل بارندگی و انتهای فصل رشد، بروز می‌کند.

الگوی سوم وقوع خشکی، حالتی است که تغییرات بارندگی در داخل فصل بارندگی زیاد بوده و در هر زمانی در طی فصل رشد، ممکن است کمبود آب رخ دهد. معمولاً در بسیاری از مناطق نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک می‌توان الگوی سوم وقوع خشکی را مشاهده کرد.

## ۱۳-۲ اثرات تنش کمبود آب

باتوجه به درجه کمبود آب و طول مدت آن، می‌توان سه نوع پژمردگی آبی<sup>۱</sup>، موقتی و دائمی را در گیاهان دید. یک کاهش مختصر در آماس برگ باعث پژمردگی آبی می‌شود، که معمولاً در بسیاری از روزهای گرم و خشک، حتی اگر خاک مرطوب باشد، رخ می‌دهد. در این پژمردگی علائم قابل‌رؤیت وجود ندارد. کاهش بیشتر آماس برگ، باعث آویزان‌شدن بیشتر برگ شده و رشد را کاهش خواهد داد. در این حالت، اگر با تأمین مجدد آب، گیاه آماس خود را بازیابد، به آن پژمردگی موقت گویند. اگر کاهش زیاد آماس برگ به مدت طولانی ادامه داشته باشد، بعد از تأمین مجدد آب و حتی در اتمسفر اشباع از رطوبت، گیاه آماس خود را باز نیافته، که به آن پژمردگی دائمی می‌گویند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

### ۱۳-۲-۱ اثرات آناتومیکی و فیزیولوژیکی

تنش آب تغییرات آناتومیکی و فیزیولوژیکی زیادی در گیاه ایجاد می‌کند و می‌تواند باعث کاهش اندازه سلول‌ها و فضاهای بین‌سلولی، ضخیم‌تر شدن دیواره‌های سلولی و توسعه بیشتر بافت‌های مکانیکی شود. با افزایش تنش آب، فتوسنتز به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته و حتی در سطوح بالاتر تنش می‌تواند به صفر برسد. تنش آب می‌تواند به‌طور مستقیم، از طریق اثر بر فرایندهای مختلف بیوشیمیایی فتوسنتز و به‌طور غیرمستقیم، از طریق کاهش جذب دی‌اکسیدکربن، که در نتیجه بسته‌شدن روزنه‌ها حادث می‌شود، بر فتوسنتز اثر بگذارد. در مقابل، عموماً تنفس به کاهش پتانسیل آب سریعاً واکنش نشان می‌دهد، در ابتدا سرعت آن افزایش و سپس با تشدید کمبود آب، سرعت آن کاهش می‌یابد.

یک اثر دیگر کمبود آب، کاهش سطح برگ و تشدید پیری برگ است، که در نتیجه آن قابلیت تولید گیاه زراعی کاهش می‌یابد. تأثیر تنش کمبود آب بر کاهش سطح برگ درمقایسه با اثر آن بر کاهش فتوسنتز، بیشتر است. برای مثال، مشاهده شده است که تنش آبی که سبب توقف کامل رشد برگ‌ها گردید، سرعت آسیمیلاسیون خالص را تنها ۵۰٪ کاهش داد. این امر نشان می‌دهد که گسترش سطح برگ درمقایسه با سرعت آسیمیلاسیون خالص، به تنش آب حساس‌تر است (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

### ۱۳-۲-۲ واکنش‌های متابولیکی و هورمونی

تقریباً کلیه واکنش‌های متابولیکی سلول تحت تأثیر کمبود آب قرار گرفته و حتی نوسانات بسیار کوچک در میزان آب می‌تواند در متابولیسم گیاه اختلال ایجاد کند. تنش آب سبب افزایش واکنش‌های هیدرولیتیک، هیدرولیز نشاسته به قندها و همچنین پروتئین‌ها به اسیدهای آمینه می‌شود. مشاهده شده است که در نتیجه تنش آب، مقدار قند برگ‌های پنبه افزایش و مقدار نشاسته آن‌ها کاهش می‌یابد. تبدیل نشاسته به قندها و تجمع آن‌ها پتانسیل اسمزی سلول را کاهش داده و سبب افزایش قدرت جذب آب

توسط سلول می‌شود. کمبود آب با افزایش تجزیه ریبونوکلیک‌اسید (RNA)، سیستم نوکلئیک‌اسید را دچار اختلال می‌کند. این مسئله سبب می‌شود که تولید و فعالیت آنزیم‌ها و در نتیجه پروتئین‌ها کاهش یافته و حتی در تنش‌های شدید از بین برود.

از طرفی، مشاهده شده است که وقتی گیاه تحت تنش آب قرار می‌گیرد، تعدادی از هورمون‌ها دچار تغییر می‌شوند. مقدار اسید آبسزیک تا زمانی که پتانسیل آب برگ به مقدار آستانه‌ای برسد، تغییر نمی‌کند، ولی پس از آن با تغییر بیشتر در پتانسیل آب، مقدار اسید آبسزیک به‌طور چشمگیر افزایش پیدا می‌کند. افزایش اسید آبسزیک می‌تواند سبب ریزش برگ‌ها و اندام‌های زایشی گیاه، مانند گل‌ها و میوه‌ها، شود. لازم به ذکر است که افزایش مقدار اسید آبسزیک بر اثر تنش آب، صرف‌نظر از اینکه تغییرات پتانسیل آب ناشی از خشکی خاک، نیاز تبخیری بالا یا شوری باشد، حادث می‌شود.

### ۳-۲-۱۳ رشد و عملکرد

تنش آب بر کلیه اندام‌های گیاهی به‌طور یکسان اثر نمی‌گذارد. معمولاً بر اثر تنش آب، نسبت برگ به ساقه کاهش یافته و برگ‌های مسن‌تر و برگ‌هایی که در سایه قرار دارند، زودتر از برگ‌های دیگر از بین می‌روند. کمبود آب باعث آب‌کشیدگی پروتوپلاسم و افت آماس، کاهش تقسیم و گسترش سلول‌ها و در نتیجه کاهش رشد ساقه، برگ و میوه می‌شود. این امکان وجود دارد که کاهش رطوبت خاک تاحد معینی، تنها سبب کاهش رشد اندام‌های رویشی یا ذخیره‌ای گیاه شود، ولی بر عملکرد دانه مؤثر واقع نشود. از طرفی، تنش رطوبت در طی مرحله رویشی، ممکن است سبب تحریک و سرعت‌بخشیدن رشد زایشی در تعدادی از گیاهان شود (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

در اکثر گیاهان زراعی، تنش رطوبت در دوره گلدهی دارای بیشترین اثرات سوء می‌باشد. حتی یک دوره کوتاه تنش آب در زمان گرده‌افشانی، می‌تواند به‌طور چشمگیری تعداد گل‌هایی را که به دانه تبدیل می‌شوند، کاهش دهد. این امر به‌ویژه در گیاهان زراعی که گلدهی محدود دارند و در آن‌ها دوره گرده‌افشانی تا تشکیل بذر نسبتاً کوتاه است، مهم می‌باشد. در چنین گیاهانی، یک تنش کوتاه‌مدت در طی این دوره، می‌تواند سبب کاهش شدید عملکرد دانه شود. در غلات، دوره بحرانی تنش کمبود آب با ظهور سلول‌های مادر گرده شروع شده و بعد از گرده‌افشانی به پایان می‌رسد. در زمان کاکل‌دهی ذرت، مشاهده شده است که وقتی رطوبت خاک تنها به‌مدت دو روز به نقطه پژمردگی دائم می‌رسد، عملکرد دانه ۲۵٪ کاهش می‌یابد. تنش کمبود آب در طی دوره رسیدگی دانه‌ها، معمولاً سبب کاهش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی شده و در نتیجه دانه‌ها کوچک و چروکیده می‌شوند.

به‌هرحال، اثر تنش کمبود آب بر عملکرد دانه تا حدود زیادی به بخشی از گیاه که عملکرد قابل‌برداشت را تشکیل می‌دهد، بستگی دارد. در گیاهان علوفه‌ای و گیاهان ذخیره‌ای مانند سیب‌زمینی، اثر تنش آب بر عملکرد، مشابه اثر آن بر رشد گیاه است. زمانی که عملکرد از بذور یا میوه‌ها تشکیل می‌شود،

وضعیت بسیار متفاوت است. در تعدادی از گیاهان زراعی نشان داده شده است که ماده خشک ذخیره شده در بذرها عمدتاً حاصل فتوسنتز بعد از گلدهی است. بنابراین، اثر تنش آب به مرحله وقوع تنش بستگی دارد و وقوع تنش در مراحل اولیه رشد، ممکن است تعداد آغازی‌های تشکیل شده را کاهش دهد. به‌طور کلی، به‌استثنای زمانی که تنش در مراحل بحرانی رخ می‌دهد، اثر تنش بر عملکرد دانه معمولاً کمتر از اثر آن بر رشد گیاه است. از طرفی، در بعضی از گیاهان زراعی مثل یونجه، وقوع تنش ملایم در طول دوره گلدهی ممکن است به‌بذرنشستن و عملکرد دانه را افزایش دهد. این مسئله به افزایش شیرینی شهد گل‌ها بر اثر تنش ملایم آب و در نتیجه افزایش جذب حشرات گرده‌افشان نسبت داده شده است. زمانی که عملکرد یک ترکیب شیمیایی مانند قند، مواد دارویی و لیاف می‌باشد، بخش بارزش گیاه فقط شامل قسمت کوچکی از کل ماده خشک تولیدشده است و تنش ملایم که معمولاً بر رشد اثر می‌گذارد، ممکن است هیچ تأثیری بر عملکرد نداشته و حتی آن‌را بهبود بخشد. به‌عنوان مثال، مقدار روغن‌های ضروری نعنا بلافاصله بعد از تنش ملایم آب افزایش می‌یابد، که احتمالاً به دلیل افزایش تجزیه نشاسته و پروتئین‌ها و تحریک تشکیل روغن‌های ضروری است. بنابراین، لازم است که برای هر گیاه زراعی مراحل تحمل به کمبود آب خاک مشخص شود، به‌طوری‌که در شرایط محدودیت آب، بتوان برنامه‌ریزی آبیاری را طوری انجام داد که حداکثر عملکرد اقتصادی به‌ازای هر واحد آب یا واحد سطح زمین حاصل شود (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

تنش خشکی بسته به گیاه و شدت و زمان وقوع خشکی می‌تواند باعث کاهش قدرت جوانه‌زنی بذر برداشت‌شده گردد (قاسمی-گلعدانی و همکاران، ۱۹۹۷).

### ۳-۱۳ اثرات تأمین مجدد آب بعد از یک دوره تنش

گرچه در مناطق خشک و حتی نیمه‌خشک، مواردی وجود دارد که گیاهان دچار آب‌کشیدگی کامل شده و از بین می‌روند، اما عموماً گیاهان با دوره‌های تنش کمبود آب، که طول و شدت آن‌ها متغیر است، برخوردار می‌کنند. به‌هرحال، از آنجایی که معمولاً کشاورزان قادر به کنترل کامل زمان انجام آبیاری نیستند و یا نمی‌توانند آب کافی در اختیار زراعت خود قرار دهند، دوره‌های تنش کمبود آب حتی در زراعت‌های فاریاب نیز رخ می‌دهد.

نیاز به آب برای آبیاری گیاهان دیگر در همان زمان، نیاز به صرفه‌جویی در مصرف آب، شرایط استثنایی اتمسفر و نیاز زیاد آن برای تبخیر آب، از جمله مشکلاتی است که ممکن است در تأمین آب برای گیاه به‌وجود آید. بنابراین، آگاهی از واکنش‌های گیاه به تأمین مجدد آب، بعد از دوره‌های تنش با شدت و زمان متفاوت و در مراحل مختلف رشد، حائز اهمیت است.

به‌طور کلی، واکنش گیاهان به تأمین مجدد آب، به شدت و طول دوره تنش بستگی دارد و باتوجه به گونه‌های مختلف گیاهی، ارقام مختلف یک گونه، مراحل مختلف رشد و شرایط مختلف محیطی متغیر

است. معمولاً با کاهش مقدار رطوبت به کمتر از یک سطح معین، سرعت فتوسنتز به تدریج کاهش می‌یابد، که ناشی از آب‌کشیدگی پروتوپلاسم، کاهش پتانسیل فشاری، بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش تأمین دی‌اکسیدکربن است. وقوع سریع شرایط کمبود آب بیشتر از وقوع آرام آن بر سرعت فتوسنتز اثر منفی دارد.

در تعدادی از تنش‌های شدید یا طولانی‌مدت، ممکن است توانایی روزنه‌ها از نظر بهبودیافتن بعد از وقوع شرایط تنش رطوبتی دچار اختلال شده و گیاه نتواند حتی بعد از تأمین مجدد آب و آماس کامل فعالیت‌های طبیعی خود را باز یابد. به‌نظر می‌رسد که بین گیاهان مختلف از نظر توانایی بهبود روزنه‌ها بعد از تنش آب، تنوع قابل‌ملاحظه‌ای وجود داشته و این امر ممکن است در تحمل آن‌ها به خشکی مؤثر باشد. به‌عنوان مثال، توانایی بهبود بهتر و سریع‌تر روزنه‌ها بعد از تنش آب، یکی از دلایل اصلی تحمل بیشتر سورگوم به تنش خشکی نسبت به ذرت، ذکر شده است.

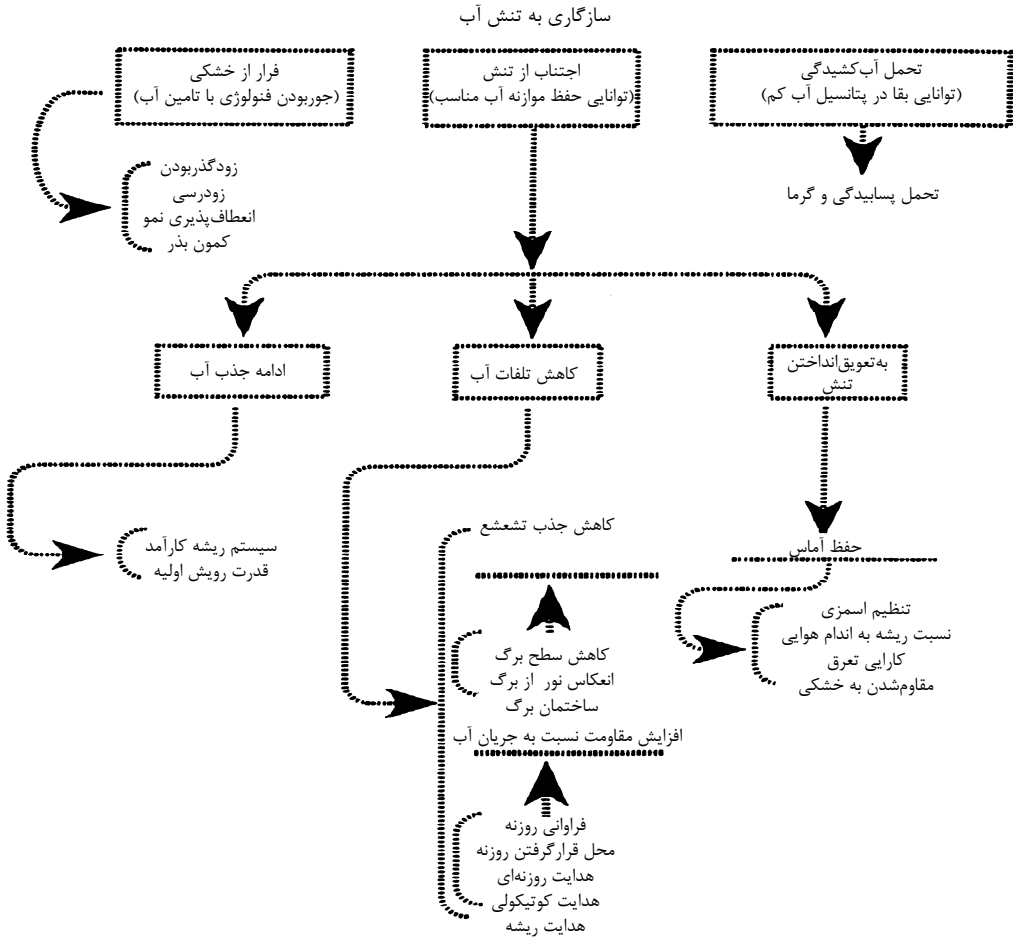
نکته قابل‌توجه این است که اگر تأمین مجدد رطوبت به فاصله کوتاهی قبل از وقوع مرگ گیاه صورت گیرد، فعالیت‌های متابولیکی بلافاصله به‌حالت طبیعی بر نمی‌گردند. از بین رفتن ریشه‌های مویی و چوب‌پنبه‌ای شدن ریشه‌ها از طریق کاهش ظرفیت جذب آب در گیاه، می‌تواند سبب تأخیر بهبود گیاه بعد از تنش آب شود. به‌هرحال، بهبود گیاه بعد از تنش شدید آب به مرحله رشدی که در آن، تنش رخ داده است، بستگی دارد.

کربوهیدرات‌ها شامل قندها، نشاسته و تاحدودی سلولز بوده و ارزان‌ترین و فراوان‌ترین منبع کالری در تغذیه بشر هستند. این امکان وجود دارد که در طول دوره‌های خشکی، کربوهیدرات‌ها به‌دلیل افزایش تنفس تلف شوند. بنابراین، کاهش فتوسنتز و افزایش تنفس می‌تواند باعث کاهش ذخایر کربوهیدرات گیاه شوند. کاهش رشد رویشی و کاهش استفاده از کربوهیدرات‌ها در رشد، ممکن است تاحدودی به‌دلیل کاهش ذخایر کربوهیدرات گیاه باشد. با کاهش موادغذایی قابل‌دسترس برای فرایندهای مختلف بیوشیمیایی، ممکن است تغییرات مهمی در ترکیب شیمیایی گیاه رخ دهد.

در شرایط تنش آب، هیدرولیز نشاسته به‌علت افزایش فعالیت آنزیم آمیلاز که نشاسته را تجزیه می‌کند، تسریع شده و غلظت قند افزایش می‌یابد. در گیاهان واقع در معرض کمبود آب، این مسئله سبب کاهش نسبت نشاسته به قند می‌شود. این اثرات ممکن است حتی در مواردی که تنش رطوبت موجب پژمردگی گیاه نمی‌شود، مشاهده شود (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

#### ۴-۱۳ سازگاری و تحمل خشکی

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، گیاهان در مراحل مختلف نمو خود، به‌طور مکرر در معرض کمبود آب قرار دارند و در طول تکامل مکانیسم‌هایی را برای سازگاری و تحمل آن کسب کرده‌اند، گرچه عموماً به‌رغم این سازگاری‌ها، کمبود آب اثرات سوئی بر گیاهان داشته و ممکن است برخی از این اثرات برگشت‌ناپذیر باشند.



شکل ۳-۱۳ مکانیسم های سازگاری به خشکی در گیاهان. گریز یا فرار از دوره خشکی، اجتناب از خشکی و بقا در خشکی سه مکانیسم عمده سازگاری و تحمل گیاهان به خشکی هستند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

به طور کلی، توانایی یک گیاه برای رشد رضایت بخش در نواحی با کمبود آب را تحمل به خشکی می گویند. تغییرات ساختمانی و فیزیولوژیکی را که احتمال بقا و تولید گیاه در یک محیط خاص را افزایش می دهند، سازگاری می گویند. سازگاری می تواند وراثت پذیر یا غیرقابل توارث باشد. تطابق عبارت از توانایی سازگارشده تدریجی به شرایط محیطی جدید است.

تحمل به خشکی ناشی از تعدادی از مکانیسم های سازگاری بوده (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷؛ شکل ۳-۱۳) و عموماً گریز یا فرار از دوره خشکی، اجتناب از خشکی و بقا در خشکی سه مکانیسم عمده سازگاری و تحمل گیاهان به خشکی هستند. در شرایط اجتناب از خشکی، حفظ یک موازنه

آب مناسب در داخل گیاه که در نتیجه آن اثرات منفی خشکی به تعویق می‌افتد، لازم است. به‌هرحال، بیشتر مکانیسم‌های تحمل به خشکی بدون‌هزینه نبوده و می‌توانند فتوسنتز، رشد محصول و عملکرد را کاهش دهند.

## ۱-۴-۱۳ فرار از خشکی

### گیاهان زودگذر

گریز از خشکی ساده‌ترین راه سازگاری گیاهان به شرایط بیابانی است. بسیاری از گیاهان بیابانی در شروع فصل بارندگی جوانه زده و دارای یک دوره رشد فوق‌العاده کوتاه هستند، به‌طوری‌که دوره حیات آن‌ها فقط به دوره بارندگی منحصر می‌شود. دوره بین جوانه‌زدن تا رسیدگی در این گیاهان پنج تا شش هفته است. در سال‌هایی با بارندگی بیشتر، این گیاهان ممکن است به‌وفور رشد کنند، در صورتی‌که در سال‌هایی که بارندگی خیلی کم است، معمولاً به‌شکل بذر یا میوه به خواب می‌روند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

به‌هرحال، تنها گونه‌های معدودی از گیاهان زراعی دارای چنان فصل رشد کوتاهی هستند که بتوان آن‌ها را مثل گیاهان زودگذر دانست. بعضی از ارقام ارزن، که می‌توانند طی ۶۰ روز به مرحله رسیدگی برسند، از این قاعده مستثنی بوده و حتی زودرس‌ترین ارقام اکثر گیاهان زراعی از دوره رشد طولانی‌تری برخوردار هستند و معمولاً در طول حیات خود یک یا چند دوره تنش رطوبتی را تجربه می‌کنند.

### زودرسی

از آن‌جایی‌که زودرسی گیاه می‌تواند تعداد دوره‌های تنش خشکی را کاهش دهد و معمولاً ارقام زودرس از تنش خشکی انتهایی اجتناب می‌کنند، بنابراین، زودرسی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک و مناطق دارای تنش خشکی انتهای فصل رشد، صفت مهم و غالباً مطلوبی است (سلطانی و همکاران، ۱۳۷۸). مشاهده شده است که در شرایط تنش رطوبتی انتهای فصل رشد، هر روز زودرسی می‌تواند عملکرد دانه گندم، جو و تریتی‌کاله را به‌میزان ۳۰ کیلوگرم در هکتار افزایش دهد.

از طرفی، باید توجه داشت که معمولاً زودرسی پتانسیل عملکرد گیاه را به‌وسیله کاهش مقدار ماده خشک موجود در مرحله گرده‌افشانی و کاهش تعداد مقصدهای موجود برای پرشدن در بعد از گرده‌افشانی، کاهش می‌دهد. بنابراین، کاهش دوره رشد برای مقابله با خشکی، با توجه به شرایط مختلف می‌تواند تأثیر دوگانه مثبت و منفی بر عملکرد دانه داشته باشد. لازم‌به‌ذکر است که هر مکانیسمی که بتواند طول دوره پرشدن دانه را بدون‌تغییر در طول دوره رشد افزایش دهد، غالباً می‌تواند در مناطق با رطوبت کم و تنش خشکی انتهای فصل رشد، سبب افزایش عملکرد دانه شود. کاهش طول دوره و میزان رشد رویشی گیاه تا یک حد معین و حفظ رطوبت جهت مرحله زایشی و پرشدن دانه‌ها، در بهبود عملکرد دانه گیاهان زراعی، در محیط‌هایی با رطوبت محدود و تنش خشکی انتهای فصل رشد، بسیار مؤثر است (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).



## انعطاف‌پذیری نمو

انعطاف‌پذیری نمو، مکانیسمی است که در نتیجه آن طول دوره رشد گیاه بسته به شدت و زمان وقوع کمبود آب، تغییر می‌یابد. در واقع، انعطاف‌پذیری نمو موجب تطبیق رشد با فراهمی رطوبت می‌شود، که عمدتاً در ارقام رشد نامحدود یا ارقامی که رشد رویشی پس از شروع رشد زایشی متوقف نشده و همزمان با آن ادامه دارد، مشاهده شده و تحت تعدادی از شرایط می‌تواند به‌عنوان یک مزیت محسوب شود. به‌عنوان مثال، این امکان وجود دارد که تنش آب سبب القای زودرسی در گیاه شود، که این امر در سال‌های خشک یک مزیت محسوب می‌شود. از طرفی، در سال‌های مرطوب‌تر انعطاف‌پذیری نمو سبب تأخیر در رسیدگی شده و گیاه می‌تواند از دوره رشد طولانی‌تر، بهره برده و در نتیجه عملکرد بیشتری تولید کند.

بنابراین، درحالی‌که ایجاد ارقام زودرس برای مناطقی که بارندگی فصلی یا سطوح رطوبت خاک آن‌ها قابل‌پیش‌بینی است، مفید می‌باشد؛ در سایر موارد که تأمین رطوبت گیاه قابل‌پیش‌بینی نیست، انعطاف‌پذیری فنولوژی بهتر از زودرسی است. بسیاری از گیاهان زراعی دارای درجه‌ای از انعطاف‌پذیری نمو هستند که آن‌ها را قادر می‌سازد از شرایط مساعدتر استفاده ببرند. حتی در یک گیاه زراعی رشد محدود مثل گندم، اگر خشکی رخ ندهد و زمان وقوع رسیدگی فیزیولوژیکی طولانی‌تر شود، تعداد پنجه حامل خوشه، تعداد سنبلچه و گل و اندازه دانه‌ها می‌تواند افزایش یابد. مشاهده شده است که برخی از ارقام ارزن مروارید با به‌تأخیر انداختن گلدهی و تحریک رشد پنجه‌های ثانویه، به خشکی واکنش نشان می‌دهند. در شرایط تنش رطوبتی، به‌نظر می‌رسد برتری ماش نسبت به بقولات دیگر، به‌واسطه توانایی ماش در به‌تأخیر انداختن نمو تحت این شرایط باشد، به‌طوری‌که گلدهی و تشکیل غلاف بعد از تأمین مجدد رطوبت، از سر گرفته می‌شود (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

مشاهده شده است که در شرایط تنش آب، ارقام رشد نامحدود پنبه در مقایسه با انواع رشد محدود عملکرد بیشتری تولید کردند، ولی این برتری با افزایش تأمین آب کاهش پیدا کرد. به‌هرحال، نکته قابل‌توجه این است که نامحدود بودن رشد معایبی نیز دارد. در گیاهان زراعی رشد نامحدود ممکن است در پایان فصل و در زمان برداشت، بخش مهمی از گیاه به‌دلیل آسیب زیاد تأخیر در برداشت، که به‌سبب منتظر ماندن جهت رسیدگی قسمت‌های جوان‌تر صورت می‌گیرد و همچنین عدم رسیدگی بخش‌هایی از بوته ازدست برود. به‌طور کلی، در کشاورزی مدرن و معیشتی که امکان وقوع کمبودهای موقتی و آبی آب وجود دارد، انعطاف‌پذیری نمو می‌تواند یک مزیت باشد، اما لزوم برداشت مکانیکی معمولاً به تولید ارقام رشد محدود نیازمند است.

## خواب بذر

بذر بسیاری از گونه‌های گیاهی که در مناطق دارای فصول گرم و خشک می‌رویند، در دماهای بالا قادر به جوانه‌زنی نبوده و در نتیجه بر اثر دمای بالا از بین نمی‌روند. در بسیاری از گیاهان بیابانی، فرایند جوانه‌زدن

می تواند در مراحل مختلفی، بین مرحله جذب آب توسط بذر و ظهور ریشه چه و ساقچه در گیاهچه، متوقف شده و مجدداً از سر گرفته شود. بذور تاحدی مرطوب شده، ممکن است بدون ازدست دادن قابلیت حیات خود تا مدتی باقی مانده و سپس جوانه بزنند. همچنین، این امکان وجود دارد که بذور آب جذب کرده و سپس بدون ازدست دادن قابلیت حیات خود مجدداً به خواب ثانویه<sup>۱</sup> فرو روند و یا اینکه بعد از مرطوب شدن، بدون ازدست دادن قابلیت جوانه زنی خود، به طور کامل خشک شوند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

به نظر می رسد که وجود مواد بازدارنده جوانه زنی در چنین بذرهایی یک سیستم باران سنج داخلی را برای آن ها ایجاد کرده باشد و عمدتاً این بذور تنها در شرایطی جوانه می زنند که بارندگی کافی نازل شده و مواد بازدارنده جوانه زنی شسته شده باشند. همچنان که بذر جوانه می زند، واکوئل ها در داخل سلول ها تشکیل شده و در نتیجه تحمل به خشکی با جوانه زنی بذر و قبل از سبز شدن، به مقدار زیادی کاهش می یابد.

## ۲-۴-۱۳ اجتناب از تنش

در شرایط محدودیت آب، گیاه می تواند به وسیله افزایش متناسب جذب آب و محدود ساختن تعرق قبل یا بلافاصله بعد از تنش، از اثرات تنش اجتناب کرده و در داخل خود یک موازنه آبی مناسب را حفظ کند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

## تداوم جذب آب

به طور کلی در گیاهان، سیستم ریشه ای توسعه یافته با تحمل به خشکی ارتباط دارد. در گیاهان یک ساله مناطق گرمسیری خشک، ریشه ممکن است ۴۰-۳۰٪ کل ماده خشک گیاه را شامل شود، در صورتی که این نسبت در گونه های چندساله بیابانی ممکن است به ۹۰٪ برسد. در نقطه مقابل، گونه های زودگذر یک ساله که در طی دوره های مرطوب کوتاه مدت یا در گودال هایی که در آن ها آب جمع می شود، رشد می کنند، از سیستم ریشه ای ضعیف برخوردار هستند. نکته جالب توجه این است که در گیاهان خشکی پسند، هرچه محیط خشک تر باشد، تمایل به افزایش توسعه ریشه و کاهش توسعه اندام های هوایی بیشتر است.

وضعیت ریشه دهی بستگی به میزان آب موجود در خاک دارد. در شرایط وجود رطوبت کافی در خاک، افزایش عمق ریشه دهی می تواند سبب افزایش عملکرد شود، در صورتی که در صورت عدم وجود رطوبت کافی، معمولاً افزایش ریشه دهی بدون مزیت بوده یا مزیت ناچیزی دارد. به عنوان مثال، با استفاده از یک مدل شبیه سازی گیاهان زراعی، مشاهده شده است که در یک سوم سال های یک مطالعه ۳۰ ساله، سیستم ریشه عمیق تر سبب افزایش ۲۰ درصدی عملکرد سورگوم گردید، در حالی که در سال های مرطوب تر و سال های خیلی خشک، که به ترتیب محدودیت آب وجود نداشته یا هیچ آبی در پروفیل خاک موجود نبود، افزایش عمق ریشه دهی بر عملکرد بی تأثیر بود.

به هر حال، رشد بیشتر ریشه و نگهداری آن، به مقدار بیشتری مواد پرورده نیاز دارد که ممکن است در غیر این صورت برای رشد اندام‌های هوایی و عملکرد مورد استفاده قرار گیرد. احتمالاً در شرایطی که هر ساله ریشه‌ها بتوانند کل آب قابل دسترس خاک را خارج کنند، گزینش در جهت یک سیستم ریشه کوچکتر می‌تواند از طریق کاهش هزینه مواد فتوسنتزی سبب افزایش عملکرد شود. از طرفی، از آنجایی که وزن خشک ریشه کم بوده و بخش بسیار کوچکی از کل وزن خشک گیاه را تشکیل می‌دهد، بنابراین، به نظر می‌رسد که مزیت ناشی از صرفه‌جویی مواد پرورده به وسیله کاهش عمق ریشه‌دهی، ناچیز بوده و اهمیت چندانی نداشته باشد.

در شرایطی که خشکی از نوع انتهایی باشد، به دلیل افزایش تخلیه رطوبت قابل دسترس خاک در اوایل فصل رشد و در نتیجه افزایش احتمال وقوع تنش‌های بعدی، افزایش عمق و تراکم ریشه می‌تواند نامطلوب باشد. در غلات معتدله، زمانی که لایه فوقانی خاک مرطوب است، ریشه‌های طوقه‌ای به سرعت توسعه یافته و سبب افزایش عرضه آب به اندام‌های هوایی و در نتیجه افزایش رشد می‌شوند. با خشک شدن لایه فوقانی خاک، ریشه‌های جانبی که به عمق خاک نفوذ می‌کنند، آب را از لایه‌های تحتانی خاک جذب کرده و در اختیار گیاه قرار می‌دهند.

### کاهش تلفات آب

متداول‌ترین راه تنظیم موازنه آب و حفظ آماس در گیاهان، کاهش تلفات آب است. کاهش جذب تشعشع و افزایش مقاومت روزنه‌ای، کوتیکولی و ریشه از مهم‌ترین مکانیسم‌های کاهش تلفات آب در گیاه هستند.

### کاهش جذب تشعشع

کاهش سطح برگ، کوچک نگاه داشتن اندام‌های هوایی، حرکت فعال برگ، انعکاس نور از برگ، ریشک و ریزش برگ از مهم‌ترین روش‌های کاهش تلفات آب در گیاهان خشکی پسند هستند. بسیاری از گونه‌های گیاهی بیابانی مانند آرتمیزی<sup>۱</sup> دارای دو نوع برگ هستند. برگ‌های بزرگ و زمستانه در پایان فصل بارندگی ریزش یافته و برگ‌های کوچک و تابستانی جایگزین آن‌ها می‌شوند. از طرفی، در حالی که مکانیسم‌های کاهش سطح برگ از طریق حفاظت آب، باعث افزایش بقای گیاه می‌شوند، در شرایط وقوع تنش‌های موقتی و بعد از تأمین مجدد آب می‌توانند برای دست‌یابی به حداکثر تولید مضر باشند.

به طور کلی، برای اکثر گیاهان، کاهش جذب تشعشع و کاهش سرعت تعرق که بر اثر مکانیسم‌های کاهش سطح برگ ایجاد می‌شود، می‌تواند اثر منفی بر عملکرد داشته باشد و معمولاً به حداکثر رسیدن سطح برگ تا یک مقدار شاخص سطح برگ حدود ۳، می‌تواند به عنوان یک صفت خوب مدنظر قرار گیرد. بنابراین، نقش کاهش سطح برگ یا ریزش آن در افزایش یا کاهش عملکرد به نوع و میزان تنش خشکی و گونه گیاهی بستگی دارد. در شرایط وقوع خشکی انتهایی فصل رشد، کاهش سطح برگ، احتمال از بین رفتن

1. *Artemisia herba-alba*

گیاه در قبل از رسیدگی را کاهش داده و در نتیجه یک صفت مفید است، در صورتی که در شرایط خشکی موقتی کاهش سطح برگ یا ریزش آن یک صفت نامناسب به شمار می آید (سلطانی و گالشی، ۲۰۰۲).

ساده ترین شکل کاهش سطح برگ، لوله ای شدن، تا خوردن و پژمردگی برگ ها در زمان وقوع تنش کمبود آب است. این حرکات برگ ها به کاهش بار حرارتی گیاه و تلفات آب کمک می کند. مشاهده شده است که لوله ای شدن برگ ها در شرایط نیمه خشک و بیابانی، تعرق گیاه را به ترتیب ۵۵ و ۷۵٪ کاهش می دهد. بعضی از ژنوتیپ های سورگوم و ذرت، وقتی در معرض تنش شدید قرار می گیرند، برگ های خود را لوله ای کرده و سپس دو یا سه روز بعد از تأمین مجدد رطوبت، رشد خود را از سر می گیرند. این صفت برای گیاهانی که در شرایط وقوع خشکی موقت رشد می کنند، یک صفت مفید به شمار می آید. بهرحال، این حرکات برگ فقط در شرایط وقوع تنش انجام شده، برای گیاه هزینه بر نبوده و برگشت پذیر است.

خصوصیات مختلف مورفولوژیکی برگ به کاهش سرعت تعرق کمک کرده و ممکن است بر رشد، عملکرد و بقای گیاه در شرایط خشکی تأثیر بگذارد. در این ارتباط، وجود برگ های دارای کوتیکول ضخیم، سطوح موم دار، روزنه های فرورفته در حفره های سطح برگ و وجود کرک می تواند مؤثر باشد. برگ های کوچک، ضخیم و همیشه سبز یکی از خصوصیات مهم سازگاری به اقلیم های مدیترانه ای خشک می باشد. در بعضی از گونه های گیاهی، خشکی می تواند تولید کرک های اپیدرمی را تحریک کند، که این کرک ها از طریق افزایش آلبیدوی سطح برگ (افزایش انعکاس نور از سطح برگ) سبب کاهش تعرق می شوند.

در مناطق گرم و خشک معمولاً عملکرد ارقام ریشک دار گندم در مقایسه با ارقام فاقد ریشک بیشتر است. ریشک ها دارای کلروپلاست و روزنه بوده و بنابراین می توانند فتوسنتز نمایند. سهم ریشک ها از کل وزن خشک دانه می تواند به ۱۲٪ برسد. معمولاً سرعت تعرق در ریشک ها چند برابر کمتر از برگ پرچم و پوشش های دانه است. مشاهده شده است که ریشک ها، گرچه می توانند حدود ۸۰-۴۰٪ کل فتوسنتز خوشه را شامل شوند، ولی فقط ۲۰-۱۰٪ تعرق خوشه را تشکیل می دهند. بنابراین، وجود تعداد زیاد ریشک در خوشه غلات می تواند به عنوان یک صفت مقاوم به خشکی در نظر گرفته شده و از این نظر گندم تتراپلوئید بر هگزاپلوئید و جو شش ردیفه بر دوردیفه برتری دارد.

*افزایش مقاومت نسبت به جریان آب در گیاه.* واکنش سریع روزنه ها نسبت به تغییر رطوبت هوا و بسته شدن آن ها در واکنش به کاهش پتانسیل آب خاک، به ترتیب اولین و دومین مکانیسم دفاعی گیاه در مقابل تنش رطوبت می باشند. هر دو مکانیسم ذکر شده ممکن است بر فتوسنتز تأثیر منفی داشته و در نتیجه صرفه جویی در آب به وسیله بسته شدن روزنه ها برای گیاه هزینه داشته و حتی ممکن است باعث گرسنگی گیاه تحت شرایط تنش خشکی شود.

نکته قابل توجه این است که در مقایسه با اثرات برگشت‌ناپذیر کاهش سطح برگ، که در قسمت قبلی شرح داده شد، کاهش هدایت روزنه‌ای از طریق کاهش تلفات آب و کاهش خطر تخلیه رطوبت خاک در قبل از رسیدگی، باعث پایداری عملکرد می‌شود. به عنوان مثال، تحمل به خشکی در سورگوم و بعضی از واریته‌های ذرت و بادام زمینی تا حدودی به توانایی روزنه‌های آن‌ها برای از سرگیری فعالیت طبیعی خود بعد از اتمام تنش خشکی، نسبت داده شده است.

وجود روزنه‌های کمتر می‌تواند سبب کاهش ازدست‌رفتن آب از طریق آن‌ها شود. برخی گیاهان بیابانی در هر سانتی‌متر مربع سطح برگ کمتر از ۱۰۰ روزنه دارند، در حالی که در گیاهان مزوفیت این رقم به ۱۰۰۰۰ روزنه در هر سانتی‌متر مربع بالغ می‌شود. در بسیاری از گونه‌های مقاوم به خشکی روزنه‌ها در حفره‌های موجود در سطح برگ قرار دارند، که این خصوصیت از طریق اختلال در جریان هوا، تعرق را کاهش می‌دهد. در شرایط کمبود رطوبت، کاهش هدایت هیدرولیکی ریشه به خصوص در اوایل دوره رشد می‌تواند به کاهش تلفات آب کمک کند. تحت چنین شرایطی، مقاومت بالاتر ریشه نسبت به انتقال آب، به‌طور مؤثری پتانسیل آب برگ را کاهش داده و در نتیجه علاوه بر رشد گیاه، کل آب مصرفی در طول دوره رشد رویشی نیز کاهش می‌یابد. محدود شدن رشد گیاه در طی دوره قبل از گرده‌افشانی، خطر از بین رفتن گیاه زراعی بر اثر تخلیه زودهنگام رطوبت قابل‌دسترس خاک را کاهش می‌دهد. در واقع، در نتیجه محدود شدن استخراج آب به وسیله ریشه‌های جوان در طی رشد رویشی، آب بیشتری برای مراحل بعدی رشد، یعنی زمانی که گیاهان حساسیت زیادی به تنش آب دارند، باقی می‌ماند.

به‌طور کلی، کاهش هدایت هیدرولیکی ریشه‌های جنینی و در حقیقت افزایش مقاومت نسبت به جریان آب در آن‌ها می‌تواند از طریق کاهش تعداد ریشه‌های جنینی، کاهش قطر آوند چوب اصلی و جایگزینی آوند چوب اصلی با آوندهای کوچکتر صورت گیرد. مشاهده شده است که در فصول خشک، میزان عملکرد دانه لاین‌های گندم دارای آوند چوب ریشه کوچک‌تر، بیشتر از عملکرد دانه لاین‌های گندم با آوند چوب ریشه بزرگتر است، در صورتی که در فصول مرطوب اختلافی بین آن‌ها وجود ندارد. قطر آوند چوب به وسیله چند ژن کنترل شده، دارای تنوع ژنتیکی بالایی بوده و صفی توارث‌پذیر می‌باشد. بنابراین، این صفت می‌تواند باعث افزایش پایداری عملکرد شود.

### به‌تعویق‌انداختن تنش

تعدادی از سازگاری‌ها به خشکی سبب می‌شود تا گیاه پتانسیل آب بالایی را در شرایط تنش داشته باشد. در واقع، این مکانیسم‌ها باعث می‌شوند که آماس و رشد سلول حفظ شده و صدمات مستقیم و غیرمستقیم آب‌کشیدگی کاهش یابد. بسیاری از فرایندهای بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی به آماس برگ حساس هستند، بنابراین، حفظ آماس برگ به‌رغم وجود کمبود آب، یک عامل اصلی در به‌تعویق‌انداختن تنش می‌باشد. تنظیم اسمزی که به وسیله افزایش سنتز و تجمع مواد فعال از نظر اسمزی مثل ساکارز حاصل می‌شود، یک فرایند سازگاری بوده و گیاه را قادر می‌سازد آماس خود را حفظ کند.

بهبود آماس باعث می‌شود روزنه‌ها در پتانسیل آب پایین‌تری باز شده و در نتیجه رشد ادامه پیدا کند (کوچکی و همکاران، ۱۳۷۶).

بنابراین، گرچه تنظیم اسمزی در گیاهان زراعی مانند سویا و ماش وجود ندارد، ولی می‌توان آن‌را به‌عنوان یک مکانیسم تحمل در نظر گرفت. ژنوتیپ‌های گندم و سورگوم دارای تنظیم اسمزی بالا، حجم ریشه بیشتر و با تراکم بالاتری تولید می‌کنند. به‌هرحال، در شرایط تنش خشکی تنظیم اسمزی می‌تواند از طریق بهبود بقای پنجه و گل و افزایش دانه‌بستن، بهبود ظهور خوشه و کاهش سقط سنبلیچه، افزایش تولید مواد پرورده در طول دوره پرشدن دانه از طریق کاهش پیری برگ و حفظ فعالیت فتوسنتزی در برگ‌های باقی‌مانده و تداوم رشد ریشه و استخراج رطوبت خاک در افزایش پایداری عملکرد مؤثر باشد. از سوی دیگر، سراج و سینکلر (۲۰۰۲) اظهار کرده‌اند که تنظیم اسمزی نمی‌تواند در افزایش عملکرد در شرایط خشکی مؤثر باشد.

از طرف دیگر، نسبت بالای ریشه به اندام‌های هوایی یک روش بسیار مؤثر سازگاری گیاه به تنش آب است. در شرایط تنش آب کوتاه‌مدت، بسته‌شدن روزنه‌ها می‌تواند بین جذب و تلفات آب تعادل برقرار سازد، اما تعادل اساسی به‌خصوص در شرایط خشکی درازمدت، به‌وسیله نسبت ریشه به سطح برگ برقرار می‌شود. ثابت شده است که گیاهانی که در شرایط تنش قرار دارند، دارای نسبت بالاتر ریشه به اندام‌های هوایی هستند. به‌عبارت دیگر، تأمین آب به‌وسیله سیستم ریشه، برای یک سطح برگ کمتر ساده‌تر است. تغییرات نسبت ریشه به اندام‌های هوایی موازنه کارکردی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. زمانی که میزان آب قابل دسترس زیاد است، مواد پرورده عمدتاً به اندام‌های هوایی اختصاص پیدا می‌کنند. با تشدید تنش آب، ابتدا رشد اندام‌های هوایی تحت تأثیر واقع می‌شود، درحالی‌که فتوسنتز و رشد ریشه همچنان ادامه داشته و بدین‌ترتیب یک موازنه برقرار می‌شود. این موازنه باعث تغییرات زیاد در نسبت ریشه به اندام‌های هوایی می‌شود. به‌عنوان مثال، ممکن است در گندم وقتی رطوبت محدودکننده نیست، وزن خشک ریشه تنها ۱۰٪ کل ماده خشک را شامل شود، در صورتی‌که تحت تنش خشکی، این رقم می‌تواند به ۳۰٪ بالغ می‌شود.

### ۳-۴-۱۳ تحمل نسبت به آب‌کشیدگی

#### توانایی تحمل پسابیدگی<sup>۲</sup>

تحمل بخش‌های مختلف گیاه نسبت به پسابیدگی به‌صورت مقدار آب نسبی یا پتانسیل آبی که در آن، اندام‌ها از بین می‌روند، بیان شده و میزان آن می‌تواند باتوجه به شرایط مختلف، متفاوت باشد. به این مقادیر آب نسبی یا پتانسیل آب که در آن، پسابیدگی صورت می‌گیرد، حد بحرانی یا کشنده گیاه می‌گویند. بین گونه‌های مختلف گیاهی، ارقام مختلف یک گونه و حتی اندام‌های مختلف یک گیاه تنوع

1. Functional balance  
2. Dessication

زیادی از نظر تحمل پسابدگی وجود دارد. در بسیاری از گونه‌های گیاهی چندساله، با شروع فصل خشک و بسیار گرم، اندام‌های هوایی از بین می‌روند، اما اندام‌های زیرزمینی مثل ریزوم‌ها، پیازها و غده‌ها به خواب رفته و زنده باقی می‌مانند.

بذور با ذخایر غذایی کامل و سلول‌های فاقد واکوئل می‌توانند دوره‌های بسیار طولانی و خشک را حتی به مدت چند سال پشت سر بگذارند. معمولاً جوانه گیاهان که فاقد واکوئل است، نسبت به پسابدگی بسیار مقاوم می‌باشد. بعضی از گیاهان بیابانی می‌توانند شرایط پسابدگی را که باعث از بین رفتن برگ آن‌ها می‌شود، تحمل کنند. البته جوانه‌های روی ساقه این گیاهان زنده مانده و پس از پایان خشکی، رشد خود را از سر می‌گیرند. برگ بعضی از علف‌های هرز چمنی C<sub>4</sub> بومی مناطق خشک بیابانی آفریقا، ممکن است به مدت چند ماه در حالت کاملاً خشک باقی مانده و سپس با فراهم شدن مجدد آب، بهبود پیدا کنند.

### توانایی ذخیره آب در بافت‌ها

بعضی از گیاهان خشکی‌پسند دارای اندام‌های زیرزمینی بزرگ و عمدتاً بسیار متورم برای ذخیره آب می‌باشند، که این مسئله سبب می‌شود تا گیاه بتواند آب مورد نیاز خود را به‌طور موقت فراهم کند. تحت تعدادی از شرایط، ذخیره آب ساقه مهم می‌باشد. برای مثال، در جنگل‌های خشک گرمسیری، ذخیره آب ساقه نقش مهمی را در تأمین آب مورد نیاز برای گلدهی و گسترش برگ در طی فصل خشک ایفا می‌کند. ذخیره آب در ساقه‌های آکاردیون شکل نوعی کاکتوس<sup>۱</sup> که می‌تواند حدود ۵۰۰۰ کیلوگرم آب در ساقه خود نگه دارد، قابل توجه می‌باشد.

گیاهان گوشتی یا آبدار<sup>۲</sup>، که اغلب در بیابان‌های خشک و با یک فصل کوتاه بارندگی سالیانه آمریکای جنوبی مشاهده می‌شوند، قادرند دوره‌های خشکی مطلق را سپری کنند. در واقع، این گیاهان در طی دوره‌های خشک تحت تأثیر محیط هوا و خاک اطراف خود واقع نشده و حتی می‌توانند تا حدودی از آب ذخیره‌شده اندام‌های خود استفاده کنند. به‌رحال، آب ذخیره‌شده در گیاهان گوشتی ممکن است اجازه دهد تا تعرق برای چند هفته بعد از توقف جذب آب از خاک ادامه یابد (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

### آب کشیدگی پروتوپلاسمی

به‌طور کلی، با افزایش آب کشیدگی بافت‌ها، پروتوپلاسم متراکم‌تر شده و لزوجت آن به تدریج افزایش پیدا می‌کند. زمانی که آب کشیدگی شدید است، پروتوپلاسم کاملاً ژله‌ای شده و سرانجام ممکن است سخت و شکننده شود. این مسئله می‌تواند سبب مرگ سلول و بافت‌های گیاهان حساس به آب کشیدگی پروتوپلاسمی شود. نکته قابل توجه این است که عوامل مؤثر بر تحمل بافت‌های گیاهی نسبت به آب کشیدگی، عمدتاً در سطح پروتوپلاسمی عمل می‌کنند.

1. *Carnegia gigantea*  
2. Succulents

ساختمان سلول، ترکیب پروتوپلاسم و لزوجت آن، فعالیت‌های آنزیمی و ویژگی‌های حفظ آب دیواره‌های سلولی در بقا، تحت شرایط تنش آب تأثیر دارند. بین گونه‌های گیاهی از نظر توانایی تحمل پسابیدگی بسته به دوام و شدت آن، اختلافات زیادی وجود دارد. تحت شرایط تنش، معمولاً با افزایش توانایی حفظ آب بافت توسط گیاه، توانایی پروتوپلاسم برای تحمل صدمات، بیشتر خواهد شد (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).

### ۵-۱۳ مسیرهای فتوسنتزی و تحمل به خشکی

به‌طور کلی، مسیرهای فتوسنتزی C<sub>۴</sub> و CAM مکانیسم‌های سازگاری اکولوژیکی بعضی از گونه‌های گیاهی به شرایط مختلف محیطی می‌باشند. مسیر فتوسنتزی CAM سبب می‌شود تا گیاهان دارای این مکانیسم حتی تحت شرایط اقلیمی سخت زنده بمانند. مزیت مسیر C<sub>۴</sub> به لحاظ سازگاری به شرایط نیمه‌خشک و بسیار گرم که دارای دوره‌های بارندگی کوتاه و نامنظم، وقوع مکرر تنش آب در طول روز و فصل رشد، شدت نور زیاد، دمای روزانه زیاد و نیاز تبخیری بالا هستند، می‌باشد. در واقع، به‌نظر می‌رسد که گیاهان C<sub>۴</sub> برای سازگاری به شرایط بسیار گرم و خشک تکامل یافته‌اند. به‌عنوان مثال، در شرایط گرم و خشک، برگ‌های جوان بسیاری از گونه‌های C<sub>۴</sub> می‌توانند پتانسیل‌های آب حدود ۱۰ MPa- را بدون آسیب دیدگی، تحمل کنند.

وقتی فتوسنتز توسط عوامل محیطی و فیزیولوژیکی محدود نمی‌شود، علف‌های چمنی C<sub>۴</sub> حتی در تابستان و شدت‌های بسیار بالای نور وسط روز به اشباع نوری نمی‌رسند، در حالی که برگ‌های گیاهان C<sub>۳</sub> در یک سوم تا نصف این مقدار نور، اشباع می‌شوند. لازم به ذکر است که نقطه اشباع نوری، شدت نوری است که در بالاتر از آن فتوسنتز افزایش نمی‌یابد. دامنه دمای مطلوب برای گیاهان C<sub>۴</sub> بین ۳۰-۴۵ درجه سانتی‌گراد و برای گیاهان C<sub>۳</sub> بین ۲۵-۱۰ درجه سانتی‌گراد است. تحت شرایط دمای بالا و شدت نور زیاد، سرعت فتوسنتز گیاهان C<sub>۴</sub> به میزان قابل توجهی بیشتر از گیاهان C<sub>۳</sub> است. سرعت رشد و کارایی مصرف آب بالاتر گیاهان C<sub>۴</sub> به بقای آن‌ها تحت شرایط نیمه‌خشک و بارندگی متغیر و ناگهانی کمک می‌کند (کوچکی و سلطانی، ۱۳۷۷).





# آزمایش‌هایی برای رابطه آب خاک و گیاه

در این فصل می‌خوانیم:

- ۱-۱۴ تعیین مقدار آب نسبی و پتانسیل آب بافت گیاهی
- ۲-۱۴ ایجاد محلول‌های اسمزی و اثر آن‌ها بر جوانه‌زنی
- ۳-۱۴ تعیین ظرفیت گلدانی، ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم
- ۴-۱۴ تعیین دمای برگ، مشاهده روزنه‌ها و حرکت آب در گیاه
- ۵-۱۴ کار با دستگاه‌های اندازه‌گیری آب خاک
- ۶-۱۴ نمونه‌برداری، شستشو و اندازه‌گیری معیارهای رشد ریشه
- ۷-۱۴ تعیین نیاز آبی گیاه

## مقدمه

در مقطع کارشناسی رشته‌های کشاورزی و منابع طبیعی، درس رابطه آب خاک و گیاه دارای یک واحد عملی می‌باشد که در آن، دانشجویان باید به‌طور عملی با برخی (حداقل) از جنبه‌های توضیح داده‌شده در فصل‌های قبلی این کتاب آشنا شوند. در این فصل تعدادی از آزمایش‌های ساده که برای انجام آن‌ها نیاز به امکانات خاصی نیست، توضیح داده می‌شوند. البته این توضیح به‌اختصار صورت گرفته و شامل جزئیات نخواهد بود، که در غیراین‌صورت، خود این جزئیات نیازمند کتابی جداگانه می‌بود.

### ۱-۱۴ تعیین مقدار آب نسبی، پتانسیل آب بافت گیاهی

محققان از دیرباز به دنبال یافتن معیار مناسبی درباره وضعیت آبی گیاه بودند. یکی از شاخص‌های نشان‌دهنده وضعیت آبی گیاه، مقدار آب نسبی<sup>۱</sup> است. تفاوت وزن تر و خشک بافت گیاهی مقدار آب موجود در بافت را نشان می‌دهد، ولی به‌تنهایی قابل‌استفاده نبوده و باید نسبت به چیزی سنجیده شود. مقدار آب نسبی یک برگ یا نمونه بافت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (کرامر، ۱۹۹۵):

1. Relative water content

$$RWC = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100 \quad (14-1)$$

که در آن، RWC مقدار آب نسبی، FW وزن تر بافت<sup>۱</sup>، DW وزن خشک بافت<sup>۲</sup> و TW<sup>۳</sup> وزن بافت در شرایطی که به طور کامل آب جذب کرده باشد، هستند. صورت کسر مقدار آب حقیقی موجود در بافت را نشان می‌دهد و مخرج کسر بیان‌کننده مقدار آبی است که می‌توانست در مرطوب‌ترین شرایط در بافت وجود داشته باشد. در واقع، مقدار آب نسبی به نوعی مشابه کسر آب قابل‌دسترس در خاک است.

برای تعیین مقدار آب نسبی، دانشجویان باید برگ کامل یا قطعه‌ای از برگ را از گیاهی جدا کرده و به آزمایشگاه انتقال دهند. این انتقال باید سریع بوده و در داخل یک ظرف خنک و در تاریکی انجام شود. برای مثال، انتقال برگ به صورتی که داخل پلاستیک بوده و روی یخ قرار داده شده باشد، می‌تواند روشی مناسب برای این منظور باشد. پس از آوردن نمونه به آزمایشگاه، وزن تر بافت بلافاصله اندازه‌گیری می‌شود. سپس نمونه در داخل یک بشر یا ظرف مشابه دیگری در داخل آب مقطر قرار داده می‌شود تا آب جذب نموده و به آماس کامل برسد. لازم است جهت جلوگیری از خروج احتمالی بخار آب از ظرف، درب این ظرف با کاغذ آلومینیومی یا پلاستیک پوشانده شود. ظرف حاوی نمونه به مدت ۴ تا ۶ ساعت در تاریکی (جهت جلوگیری از فتوسنتز) و در دمای پایین (حدود ۴°C، جهت جلوگیری از تنفس) نگهداری می‌شود.

پس از این مدت، برگ از داخل ظرف خارج شده، آب سطحی آن، باکمک دستمال کاغذی، خشک می‌شود (بدون فشار دادن) و سپس توزین می‌گردد. وزن حاصله، وزن بافت کاملاً آب‌جذب‌کرده (آماس‌کرده) خواهد بود. در مرحله بعد، این نمونه برگ در داخل پاکت قرار داده شده و در آن در دمای ۷۰°C به مدت ۲۴ تا ۷۲ ساعت (بسته به درجه نرمی و خشبی بودن برگ) خشک می‌شود. البته بهتر است تا زمانی که وزن نمونه ثابت شده و پس از آن کاهش وزنی وجود نداشته باشد، نمونه برگ در داخل آن باقی بماند. پس از طی شدن این مدت، با وزن کردن نمونه برگ، وزن خشک برگ به دست می‌آید. با در دست داشتن وزن تر، وزن آماس‌کرده و وزن خشک، میزان آب نسبی برگ با توجه به رابطه ۱-۱۴ قابل محاسبه خواهد بود.

در موقع نمونه برداری، لازم است دانشجویان به موارد زیر توجه داده شوند: زمان نمونه برداری در طول سال، طی روز و در رابطه با مرحله رشدی گیاه مورد نظر، محل برداشتن نمونه در گیاه یعنی از میان برگ‌های جوان یا مسن تر، از بخش‌های درونی (قرار گرفته در سایه) یا بیرونی (قرار گرفته در آفتاب) بوته و در صورتی که بخشی از برگ نمونه را تشکیل می‌دهد، اینکه نمونه از قسمت انتهایی، میانی یا نوک برگ برداشته می‌شود، باید مورد توجه قرار گرفته و دقیقاً مشخص شوند.

- 
1. Fresh weight
  2. Dry weight
  3. Turgid weight

## ۲-۱۴ ایجاد محلول‌های اسمزی

با کمک گرفتن از رابطه وانت هوف (به فصل ۲، رابطه ۲۰-۲ مراجعه شود)، می‌توان با کمک موادی مثل ساکارز و نمک‌هایی مثل کلرید سدیم نسبت به تهیه محلول‌هایی با پتانسیل‌های اسمزی متفاوت اقدام نمود (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۲). توضیح بیشتر در رابطه با معادله وانت هوف در فصل ۲، قسمت ۲-۲-۲ ارائه شده است. در اینجا، با ذکر یک مثال، نحوه تهیه محلول‌ها توضیح داده می‌شود.

فرض شود تهیه محلول‌هایی با پتانسیل اسمزی ۰، ۰٫۵، -۱، -۱٫۵ و -۲ مگاپاسکال در دمای ۴°C با حجم نهایی ۲۰۰ میلی‌لیتر مورد نظر باشد. در چند مرحله نسبت به انجام این کار اقدام می‌شود. در مرحله اول، پتانسیل اسمزی محلول مولال ساکارز در دمای ۴°C محاسبه می‌شود:

$$\Psi_S = -CiRT$$

$$\Psi_S = -(1)(1)(0,008314)(277) = -2,3 \text{ MPa}$$

بنابراین، می‌توان با تهیه یک محلول مولال و رقیق کردن بعدی آن به محلول‌های مورد نظر دست یافت. چون ماده مورد نظر ساکارز است که دارای وزن مولکولی ۳۴۲٫۳ گرم می‌باشد، با حل کردن این مقدار ساکارز در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر، محلول یک مولال ساکارز به دست خواهد آمد.

در مرحله دوم، لازم است با رقیق کردن محلول مولال، محلول‌های مورد نظر تهیه شوند. برای این منظور از رابطه ۳-۴ (فصل ۴) استفاده می‌شود. برای مثال، اگر تهیه محلول ۰٫۵ MPa مدنظر باشد، محاسبات به صورت زیر خواهد بود:

$$\Psi_{S1} V_1 = \Psi_{S2} V_2$$

$$(2,3)(V_1) = (0,5)(200)$$

$$V_1 = 43 \text{ ml}$$

یعنی، اگر بخواهیم ۲۰۰ میلی‌لیتر محلول ساکارز با پتانسیل اسمزی ۰٫۵ MPa داشته باشیم، باید ۴۳ میلی‌لیتر از محلول مولال برداریم و به آن آب مقطر اضافه کنیم تا حجم نهایی به ۲۰۰ میلی‌لیتر برسد. محاسبات برای تعیین پتانسیل‌های اسمزی ذکر شده در جدول ۱-۱۴ خلاصه شده‌اند.

**جدول ۱-۱۴ حجم مورد نیاز از محلول مولال و حجم آب مقطر برای تهیه محلول‌هایی با پتانسیل‌های اسمزی مختلف<sup>۱</sup>.**

پتانسیل اسمزی مورد نظر ( $\Psi_S$ )	حجم مورد نیاز از محلول مولال ( $V_1$ )	حجم آب مقطر ( $V_w$ )	حجم نهایی محلول ( $V_2$ )
۰	۰	۲۰۰	۲۰۰
-۰٫۵	۴۳	۱۵۷	۲۰۰
-۱٫۰	۸۷	۱۱۳	۲۰۰
-۱٫۵	۱۳۰	۷۰	۲۰۰
-۲٫۰	۱۷۴	۲۶	۲۰۰

۱. تمامی مقادیر حجم برحسب میلی‌لیتر می‌باشد.

جدول ۲-۱۴ غلظت‌های موردنیاز پلی‌اتیلن گلیکول (گرم بر گرم آب مقطر) برای ایجاد پتانسیل‌های اسمزی (مگاپاسکال) در دماهای مختلف. معادلات مورد استفاده برای تهیه جدول، در زیر جدول آورده شده است (میشل، ۱۹۸۳).

دما (°C)									پتانسیل اسمزی (Ψ <sub>s</sub> )
۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۰	
۰,۰۸۶۰	۰,۰۸۴۰	۰,۰۸۲	۰,۰۸۰	۰,۰۷۸	۰,۰۷۶	۰,۰۷۴	۰,۰۷۳	۰,۰۷۱	-۱
۰,۰۱۲۹	۰,۰۱۲۶	۰,۰۱۲۲	۰,۰۱۱۹	۰,۰۱۱۶	۰,۰۱۱۳	۰,۰۱۱۱	۰,۰۱۰۸	۰,۰۱۰۶	-۲
۰,۰۱۶۳	۰,۰۱۵۸	۰,۰۱۵۳	۰,۰۱۴۹	۰,۰۱۴۶	۰,۰۱۴۲	۰,۰۱۳۹	۰,۰۱۳۶	۰,۰۱۳۳	-۳
۰,۰۱۹۱	۰,۰۱۸۵	۰,۰۱۸۰	۰,۰۱۷۵	۰,۰۱۷۰	۰,۰۱۶۶	۰,۰۱۶۲	۰,۰۱۵۹	۰,۰۱۵۵	-۴
۰,۰۲۱۹	۰,۰۲۰۹	۰,۰۲۰۳	۰,۰۱۹۸	۰,۰۱۹۲	۰,۰۱۸۸	۰,۰۱۸۳	۰,۰۱۷۹	۰,۰۱۷۵	-۵
۰,۰۲۳۹	۰,۰۲۳۱	۰,۰۲۲۴	۰,۰۲۱۸	۰,۰۲۱۲	۰,۰۲۰۷	۰,۰۲۰۲	۰,۰۱۹۸	۰,۰۱۹۳	-۶
۰,۰۲۶۰	۰,۰۲۵۱	۰,۰۲۴۴	۰,۰۲۳۷	۰,۰۲۳۱	۰,۰۲۲۵	۰,۰۲۱۹	۰,۰۲۱۴	۰,۰۲۱۰	-۷
۰,۰۲۷۹	۰,۰۲۷۰	۰,۰۲۶۲	۰,۰۲۵۵	۰,۰۲۴۸	۰,۰۲۴۱	۰,۰۲۳۶	۰,۰۲۳	۰,۰۲۲۵	-۸
۰,۰۲۹۷	۰,۰۲۸۸	۰,۰۲۷۹	۰,۰۲۷۱	۰,۰۲۶۴	۰,۰۲۵۷	۰,۰۲۵۱	۰,۰۲۴۵	۰,۰۲۴	-۹
۰,۰۳۱۴	۰,۰۳۰۴	۰,۰۲۹۵	۰,۰۲۸۷	۰,۰۲۷۹	۰,۰۲۷۲	۰,۰۲۶۵	۰,۰۲۵۹	۰,۰۲۵۳	-۱۰
۰,۰۳۳۱	۰,۰۳۲۰	۰,۰۳۱۰	۰,۰۳۰۱	۰,۰۲۹۳	۰,۰۲۸۶	۰,۰۲۷۹	۰,۰۲۷۲	۰,۰۲۶۶	-۱۱
۰,۰۳۴۷	۰,۰۳۳۵	۰,۰۳۲۵	۰,۰۳۱۶	۰,۰۳۰۷	۰,۰۲۹۹	۰,۰۲۹۲	۰,۰۲۸۵	۰,۰۲۷۹	-۱۲
۰,۰۳۶۲	۰,۰۳۵۰	۰,۰۳۳۹	۰,۰۳۲۹	۰,۰۳۲۰	۰,۰۳۱۲	۰,۰۳۰۴	۰,۰۲۹۷	۰,۰۲۹۱	-۱۳
۰,۰۳۷۶	۰,۰۳۶۴	۰,۰۳۵۳	۰,۰۳۴۲	۰,۰۳۳۳	۰,۰۳۲۴	۰,۰۳۱۷	۰,۰۳۰۹	۰,۰۳۰۲	-۱۴
۰,۰۳۹۰	۰,۰۳۷۷	۰,۰۳۶۶	۰,۰۳۵۵	۰,۰۳۴۵	۰,۰۳۳۶	۰,۰۳۲۸	۰,۰۳۲۰	۰,۰۳۱۳	-۱۵
۰,۰۴۰۳	۰,۰۳۹۰	۰,۰۳۷۸	۰,۰۳۶۷	۰,۰۳۵۷	۰,۰۳۴۸	۰,۰۳۳۹	۰,۰۳۳۱	۰,۰۳۲۴	-۱۶
۰,۰۴۱۶	۰,۰۴۰۳	۰,۰۳۹۰	۰,۰۳۷۹	۰,۰۳۶۹	۰,۰۳۵۹	۰,۰۳۵۰	۰,۰۳۴۲	۰,۰۳۳۴	۱۷
۰,۰۴۲۹	۰,۰۴۱۵	۰,۰۴۰۲	۰,۰۳۹۱	۰,۰۳۸۰	۰,۰۳۷۰	۰,۰۳۶۱	۰,۰۳۵۲	۰,۰۳۴۵	-۱۸
۰,۰۴۴۲	۰,۰۴۲۷	۰,۰۴۱۴	۰,۰۴۰۲	۰,۰۳۹۱	۰,۰۳۸۱	۰,۰۳۷۱	۰,۰۳۶۳	۰,۰۳۵۴	-۱۹
۰,۰۴۵۴	۰,۰۴۳۹	۰,۰۴۲۵	۰,۰۴۱۳	۰,۰۴۰۱	۰,۰۳۹۱	۰,۰۳۸۱	۰,۰۳۷۲	۰,۰۳۶۴	-۲۰

$$\Psi_s = 1,29 (PEG)^T T - 140 (PEG)^T - 4 (PEG)$$

$$(PEG) = (4 - (5,16 \Psi_s T - 560 \Psi_s + 16)^{1/5}) / (2,58 T - 280)$$

با جمع‌زدن حجم‌های موردنیاز از محلول مولال، مشخص می‌شود که به ۴۳۴ میلی‌لیتر محلول مولال نیاز خواهد بود. بنابراین، برای تهیه محلول مولال می‌توان به جای حل کردن ۳۴۲,۳ گرم ساکارز در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب، ۱۷۱,۲ گرم ساکارز را در ۵۰۰ میلی‌لیتر آب حل نمود. برای تهیه محلول با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول (polyethyleneglycol)، رابطه وانت هوف قابل استفاده نیست. بدین منظور می‌توان از داده‌های جدول ۲-۱۴ یا رابطه درج شده در زیر آن استفاده کرد.

## ۳-۱۴ تأثیر پتانسیل آب بر جوانه‌زنی بذر

یکی از راه‌های نسبتاً آسان برای مشاهده تأثیر پتانسیل آب بر جذب آب به وسیله بذر و اختلاف بین پتانسیل‌های مختلف، بررسی تأثیر پتانسیل‌های مختلف آب بر جوانه‌زنی بذر می‌باشد (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۶). برای این منظور می‌توان از بذر گندم استفاده نمود. برای ایجاد پتانسیل‌های آب نیز می‌توان محلول‌های اسمزی تهیه نمود. جهت مشاهده تفاوت بین نمک‌ها و مولکول‌های درشت، می‌توان از نمک کلرید سدیم، ساکارز و پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) استفاده کرد.

ساده‌ترین حالت، بررسی تأثیر پتانسیل‌های اسمزی  $-0.9$  و  $-1.8$  مگاپاسکال است که با کمک کلرید سدیم، ساکارز و پلی‌اتیلن گلیکول تهیه شده باشند. بدیهی است که یک تیمار آب مقطر ( $\Psi_s = \Psi_w = 0$ ) نیز در آزمایش گنجانده می‌شود. حجم نهایی محلول مورد نیاز برای هر یک از پتانسیل‌ها حدود ۵۰ میلی‌لیتر (حداکثر) می‌باشد. آزمایش مورد نظر در چند مرحله انجام می‌شود:

در مرحله اول، محلول‌های مورد نظر تهیه می‌شوند. در مورد کلرید سدیم می‌توان ابتدا یک محلول نیم مولال تهیه کرد که پتانسیل اسمزی آن در دمای  $25^\circ\text{C}$ ،  $2.2 \text{ MPa}$  می‌باشد. سپس می‌توان با رقیق کردن محلول فوق، به محلول‌های  $-0.9$  و  $-1.8$  مگاپاسکال دست یافت. چنانچه تهیه ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول نیم مولال کلرید سدیم مدنظر باشد (هر مول کلرید سدیم  $58.4$  گرم وزن دارد)، با حل کردن  $2.92$  گرم کلرید سدیم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب، محلول مورد نظر به دست خواهد آمد (توجه شود که برای تهیه ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول یک مولال کلرید سدیم نیاز به  $5.84$  گرم کلرید سدیم است، که معادل  $0.1$  مول از ماده فوق می‌باشد). برای تهیه ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول مولال ساکارز با پتانسیل اسمزی  $2.5 \text{ MPa}$  در دمای  $25^\circ\text{C}$ ، می‌توان  $34.2$  گرم ساکارز را در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل کرد. برای تهیه محلولی با پتانسیل اسمزی  $2.0 \text{ MPa}$  از پلی‌اتیلن گلیکول مطابق جدول ۲-۱۴ می‌توان  $0.413$  گرم از آن را در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب حل نمود. با رقیق کردن محلول‌های فوق، محلول‌های مورد نظر حاصل خواهند شد.

در مرحله دوم، نسبت به کاشت بذور گندم در کاغذ صافی مرطوب شده با محلول‌های مورد نظر، اقدام می‌شود. برای هر محلول حداقل سه پتری‌دیش مورد نیاز است که در حقیقت سه تکرار را تشکیل می‌دهند. در هر پتری‌دیش باید حداقل ۵۰ عدد بذر گندم روی کاغذ صافی قرار داده شده و سپس با محلول‌های مورد نظر آبیاری شوند. پتری‌دیش‌ها در دمای  $25^\circ\text{C}$  نگهداری خواهند شد.

پس از کاشت بذور، هر روز نسبت به شمارش بذور جوانه‌زده اقدام می‌شود. بذر جوانه‌زده به بذری گفته می‌شود که ریشه‌چه آن، به طول بزرگتر یا مساوی ۲ میلی‌متر، از بذر خارج شده باشد. پس از هر بار شمارش می‌توان بذور جوانه‌زده را از پتری‌دیش‌ها حذف کرد. جمع تعداد بذور جوانه‌زده در طی روزهای مختلف، جوانه‌زنی نهایی را به دست می‌دهد که به درصد نیز قابل بیان است. بهتر است که برای هر پتری‌دیش که تحت محلول معینی می‌باشد، سرعت جوانه‌زنی<sup>۱</sup> (در روز) به صورت زیر محاسبه شود (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۲):

$$GR = \frac{\sum G_i}{\sum n_i G_i} \quad (14-2)$$

که در آن، GR سرعت جوانه‌زنی،  $G_i$  تعداد بذر جوانه‌زده در هر روز و  $n_i$  شماره روز (۱، ۲، ۳ و...) هستند. برای مثال، فرض شود که در طی سه روز اول، تعداد بذر جوانه‌زده در محلول شاهد، به ترتیب ۸۰، ۱۵ و ۰ عدد هستند (تعداد کل بذر ۱۰۰ عدد است). در این صورت، سرعت جوانه‌زنی برابر ۰/۷۳ در روز است:

$$GR = (80+15+0)/[(80 \times 1) + (15 \times 2) + (0 \times 3)] = 0.73$$

می‌توان هر پتری‌دیش را یک واحد آزمایشی و هر محلول را یک تیمار در نظر گرفت و سپس نسبت به تجزیه آماری نتایج و بررسی اختلافات موجود بین پتانسیل‌های مختلف، اقدام نمود. نتایج آزمایش به‌روشنی نشان خواهد داد که چگونه در پتانسیل‌های اسمزی منفی‌تر، جذب آب و در نتیجه آن سرعت و درصد جوانه‌زنی کاهش یافته است. همچنین، باید توجه داشت که کلرید سدیم می‌تواند جذب بذر شود، ولی برای ساکارز و پلی‌اتیلن‌گلیکول مقدار جذب نزدیک به صفر است.

#### ۴-۱۴ تعیین پتانسیل آب بافت گیاهی

ساده‌ترین روش تعیین پتانسیل آب بافت گیاه، که به‌دستگاه خاصی نیز نیاز ندارد، روش تعادل مایع است که در قسمت ۱-۵-۴ (به فصل ۴ رجوع شود) توضیح داده شده است (کرامر، ۱۹۹۵؛ سالیسبوری و راس، ۱۹۹۶). در ساده‌ترین آزمایش، می‌توان با این روش پتانسیل آب در بافت غده سیب‌زمینی را اندازه‌گیری نمود. برای این منظور، ابتدا محلول‌های اسمزی مختلف (برای دمای  $4^{\circ}\text{C}$ ) تهیه می‌شوند که نحوه درست کردن آن‌ها در قسمت ۲-۱۴ توضیح داده شد. از طرف دیگر، قطعاتی از غده سیب‌زمینی باید آماده شوند. غده باید شسته شده و سپس پوست کنده شود. قطعات سیب‌زمینی، بلافاصله پس از آماده‌شدن، وزن شده و در داخل محلول‌های مختلف قرار داده می‌شوند. توجه شود که اندازه قطعات غده نباید بزرگ باشد، چون بزرگ‌بودن اندازه غده، سبب کاهش نسبت سطح به حجم شده و در نتیجه جذب مناسب محلول توسط غده و برقراری تعادل پتانسیل آب بین محلول و غده، طولانی‌تر و سخت‌تر می‌شود. هر محلول باید در داخل بشری که حداقل گنجایش ۳۰۰ میلی‌لیتر محلول را دارد، ریخته شود. سپس درپوش بشرها با کاغذ آلومینیومی یا پلاستیک پوشیده شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  قرار داده می‌شوند تا بین بافت غده و محلول از نظر پتانسیل آب تعادل برقرار شود.

پس از طی شدن زمان ۲۴ ساعت، غده‌ها از محلول‌ها خارج شده و وزن آن‌ها مجدداً اندازه‌گیری می‌شود. چنانچه غده در محلولی قرار گرفته باشد که پتانسیل آن کمتر از پتانسیل آب غده است، آب از غده به‌درون محلول خارج شده و در نتیجه وزن دوم غده از وزن اول آن کمتر خواهد بود و برعکس. باید توجه داشت که لازم است قبل از توزین دوم، آب سطحی غده‌ها با دستمال کاغذی گرفته شود (خشک شود). از تفاضل وزن اول و دوم و تقسیم آن بر وزن اول نسبت تغییر وزن غده به‌دست می‌آید. لازم است این نسبت برای هر یک از محلول‌ها محاسبه شود.

با ترسیم یک نمودار که محور عمودی آن نسبت تغییر وزن غده و محور افقی آن پتانسیل اسمزی محلول است و یافتن نقطه‌ای که در آن، تغییر وزن صفر می‌باشد، پتانسیل آب غده به دست خواهد آمد. در واقع، پتانسیل آب غده یا هر بافت مورد نظر برابر پتانسیل آب محلولی است، که پس از قرار گرفتن غده یا بافت در آن محلول، آب نه از غده یا بافت خارج شده و نه از محلول به درون غده یا بافت برود.

## ۵-۱۴ کار با دستگاه‌های سنجش رطوبت خاک

اندازه‌گیری رطوبت خاک و یا پتانسیل آب یا ماتریک خاک نیز می‌تواند در واحد عملی درس رابطه آب خاک و گیاه لحاظ شود. از دستگاه‌های تانسیمتر، بلوک‌های گچی و نوترون‌متر می‌توان برای این منظور استفاده کرد. به نظر می‌رسد حتی کم‌امکان‌ترین دانشکده‌های کشاورزی نیز یکی از این سه دستگاه را داشته باشند، به‌ویژه تانسیمتر که دستگاه ارزان‌قیمتی نیز می‌باشد.

در این آزمایش، ابتدا دانشجویان با ظاهر و ابعاد دستگاه(های) مورد نظر آشنا شده و سپس قطعات دستگاه و نحوه کار با آن توضیح داده می‌شود. از آنجایی که جزئیات در این رابطه بسته به دستگاه و شرکت سازنده آن متغیر بوده و به‌طور معمول در راهنمای کار با دستگاه آمده است، بنابراین، از ذکر جزئیات خودداری می‌شود. برای مثال، چنانچه کار با دستگاه تانسیمتر مدنظر باشد، می‌توان درباره ساختمان آن، مکانیسم کار دستگاه، پرکردن دستگاه با آب، هواگیری و نحوه نصب آن در خاک توضیح داد. سپس بایستی این مراحل را به‌طور عملی انجام داده و تانسیمتر را در یک گلدان تازه‌آبیاری شده در آزمایشگاه نصب کرد. در مرحله بعد، از دانشجویان خواسته شود که در طول ۳-۱ هفته (بسته به شرایط محیطی) به‌طور روزانه مقدار پتانسیل ماتریک را از دستگاه قرائت نمایند و در نموداری رسم کنند.

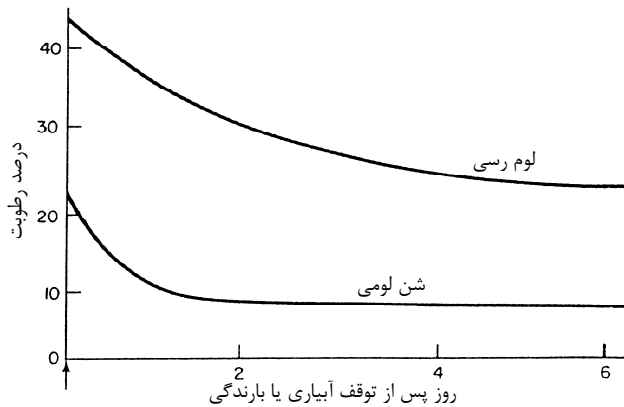
## ۶-۱۴ تعیین ظرفیت گلدانی و ظرفیت زراعی

یکی از ویژگی‌های مهم رطوبتی خاک، ظرفیت آن در نگهداری رطوبت است، که به ظرفیت زراعی<sup>۱</sup> مشهور بوده و در قسمت ۶-۱-۶ (فصل ۶) درباره آن صحبت شد. ظرفیت خاک در نگهداری رطوبت در شرایط گلدان، ظرفیت گلدانی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. با توجه به اینکه ظرفیت زراعی و ظرفیت گلدانی حد فوقانی رطوبت خاک پس از زهکشی را نشان می‌دهند، بنابراین، تعیین این دو حد رطوبتی در مدیریت آب خاک و در آزمایش‌های تحقیقاتی اهمیت زیادی دارد.

برای تعیین ظرفیت گلدانی، خاک مورد نظر در داخل گلدان سفالی یا پلاستیکی زهکش‌دار (سوراخ‌دار) ریخته می‌شود و پس از اشباع خاک با انجام آبیاری فراوان، سطح گلدان پوشیده شده و در شرایط سایه، طوری که در معرض آفتاب نباشد، قرار داده می‌شود. برای پوشاندن گلدان می‌توان از پلاستیک یا کاغذ آلومینیومی استفاده کرد. میزان رطوبت خاک پس از گذشت ۲ تا ۶ روز (بسته به نوع

1. Field capacity  
2. Pot capacity





شکل ۱-۱۴ تعیین ظرفیت زراعی (گلدانی) دو نوع خاک با بافت مختلف. ظرفیت زراعی (گلدانی) زمانی است که منحنی درصد رطوبت خاک به شکل یک خط راست تمایل پیدا می‌کند. توجه شود که در خاک با بافت درشت‌تر (خاک شن لومی) زهکشی سریع‌تر صورت می‌گیرد (میلر و داناو، ۱۹۹۰).

خاک)، تقریباً ظرفیت گلدانی را نشان می‌دهد. بدیهی است که برای خاک‌های سبک‌تر زمان موردانتظار کوتاه‌تر خواهد بود. در تعیین ظرفیت گلدانی باید مراقب بود که آب از سطح خاک تبخیر نشده و در واقع تنها راه خروج آب از خاک زهکشی باشد. چنان‌که تعیین ظرفیت گلدانی به‌طور دقیق مدنظر باشد، باید نمونه‌برداری و تعیین رطوبت خاک به‌طور روزانه تا ۷ روز انجام شود. رطوبت خاک، در زمانی که ثابت می‌شود، نشان‌دهنده ظرفیت گلدانی است (شکل ۱-۱۴).

برای تعیین ظرفیت زراعی به‌طریق مشابهی عمل می‌شود، با این تفاوت که نقطه‌ای از مزرعه برای انجام کار انتخاب شده و اندازه‌گیری در شرایط مزرعه صورت می‌گیرد. بدین‌منظور، مراحل زیر باید انجام گردد: ابتدا در محل موردنظر کرت کوچکی (مثلاً به ابعاد ۱×۱ متر) ایجاد شده و سپس رطوبت خاک این کرت با آبیاری فراوان، به‌حد اشباع رسانده می‌شود. پس از اشباع خاک باید سطح خاک در محل کرت و حتی در مساحت بزرگتری با پلاستیک پوشانده شود. سپس روی پلاستیک خاک ریخته و یا حالت برجستگی یا کپه در محل کرت ایجاد گردیده و سرانجام با استفاده از یک پلاستیک دیگر روی خاک کپه نیز پوشانده می‌شود. این عمل به‌منظور جلوگیری از نفوذ باران احتمالی به کرت موردنظر اهمیت دارد. پوشاندن خاک نیز برای جلوگیری از تبخیر از سطح کرت اهمیت زیادی دارد (میلر و داناو، ۱۹۹۰).

مراحل بعدی انجام کار مشابه تعیین ظرفیت گلدانی است: چنانچه یک اندازه‌گیری مدنظر باشد، بعد از ۲ تا ۶ روز انجام می‌گیرد و چنانچه حصول منحنی تغییرات رطوبت خاک و تعیین دقیق‌تر ظرفیت زراعی مدنظر باشد، اندازه‌گیری به‌طور روزانه در طی یک هفته انجام می‌گیرد (شکل ۱-۱۴). پس از هر بار اندازه‌گیری لازم است پوشاندن سطح خاک با پلاستیک و کپه کردن خاک روی آن مجدداً با دقت انجام شود. رطوبت خاک در زمانی که ثابت می‌شود، ظرفیت زراعی را نشان می‌دهد.

تعیین ظرفیت گلدانی و زراعی را می‌توان برای یک خاک معین انجام داد. در این صورت مقایسه این دو نیز میسر خواهد شد. به‌طور معمول ظرفیت گلدانی بیشتر از ظرفیت زراعی خواهد بود. این مسئله بدین علت است که معمولاً در داخل گلدان و در قسمت ته آن، جایی که خاک با سوراخ‌های گلدانی در تماس قرار می‌گیرد، پیوستگی لوله‌های مویین قطع می‌شود، که در نتیجه آن زهکشی کندتر و کمتر شده و آب بیشتری در خاک باقی می‌ماند.

در انجام این آزمایش، اگر هدف تعیین منحنی تغییرات رطوبت خاک و سپس تعیین ظرفیت گلدانی و زراعی خاک باشد، ممکن است به دو جلسه آزمایشگاه نیاز داشته باشد.

### ۷-۱۴ تعیین حد تحتانی رطوبت خاک

حد تحتانی رطوبت خاک، عبارت از مقدار رطوبتی است که در کمتر از آن، گیاه قادر به جذب آب بیشتر نیست. توجه شود که حد تحتانی رطوبت خاک دقیقاً برابر با نقطه پژمردگی دائم قراردادی، که برابر مقدار رطوبت خاک در پتانسیل  $1/5 \text{ MPa}$  می‌باشد، نیست. برای تعیین حد تحتانی رطوبت خاک می‌بایستی از قبل نسبت به کاشت یک گیاه، مثل آفتابگردان، در داخل گلدان‌های حاوی خاک مورد نظر اقدام کرد. وقتی بوته‌ها به مرحله ۴-۵ برگی رسیدند، سطح خاک گلدان (ها) با استفاده از پلاستیک یا کاغذ آلومینیومی پوشانده می‌شود تا تلفات تبخیر از خاک گلدان (ها) به صفر رسیده و تنها راه خروج آب از آن‌ها از طریق گیاه باشد. همچنین، گلدان (ها) باید در شرایط تبخیری نسبتاً پایین، یعنی شرایطی که تبخیر تعرق شدید ایجاد نمی‌کند، قرار داده شود. برای مثال، نباید گلدان (ها) را در معرض آفتاب مستقیم قرار داد.

پس از پوشاندن سطح گلدان (ها) و عدم آبیاری آن، به تدریج رطوبت خاک کاهش یافته و سرانجام به نقطه‌ای می‌رسد که گیاه قادر به جذب آب بیشتر نبوده و در نتیجه پژمرده می‌شود. وقتی برگ‌ها علائم پژمردگی را نشان دادند، باید گلدان (ها) به محیطی بارطوبت نسبی بالا، مثل گلخانه‌ای مرطوب، منتقل شود. اگر در این شرایط، برگ‌ها همچنان پژمرده باقی بمانند و بهبود پیدا نکنند، می‌توان گفت که رطوبت خاک به حد تحتانی خود، یعنی نقطه پژمردگی دائم، رسیده است. چنانچه برگ‌ها در شرایط مرطوب بهبود یابند، رطوبت خاک به نقطه پژمردگی دائم نرسیده و باید مدت بیشتری به انتظار ماند.

حد تحتانی رطوبت خاک را می‌توان در شرایط مزرعه نیز اندازه‌گیری کرد، اما این امر به زمان و کار بیشتری نیاز خواهد داشت. برای مثال، فرض کنید حد تحتانی رطوبت خاک برای گندم در یک خاک معین مورد نظر باشد. برای تعیین حد تحتانی رطوبت خاک، در زمان گلدهی بخشی از مزرعه با استفاده از یک چادر و یا یک پوشش پلاستیکی دیگر پوشانده می‌شود، تا آب باران وارد خاک نشود. پوشش پلاستیکی نباید در تهویه مزرعه اختلال ایجاد کند. آبیاری نیز انجام نمی‌گیرد. پس از رسیدگی گیاه، می‌توان رطوبت خاک را در لایه‌های مختلف خاک اندازه‌گیری کرد، که نشان‌دهنده حد تحتانی رطوبت خاک برای آن لایه خواهد بود.

## ۸-۱۴ مشاهده و اندازه‌گیری حرکت آب در گیاه

برای انجام این آزمایش، باید گیاه از قبل کشت شده باشد. به‌عنوان مثال، می‌توان از گیاه آفتابگردان که ارتفاع بوته آن حداقل ۵۰ سانتی‌متر باشد، استفاده کرد. ابتدا به‌اندازه ۵۰۰-۱۰۰ میلی‌لیتر محلول فوشین اسیدی (۲۵/۰ درصد حجمی) تهیه می‌شود. بوته آفتابگردان موردنظر همراه با ریشه‌هایش از خاک خارج می‌شود. ریشه‌ها در داخل یک لگن پُر از آب تمیز شده و سپس از بوته قطع می‌شوند، طوری که فقط ۵ سانتی‌متر ریشه در قاعده بوته باقی بماند. پس از چند دقیقه، گیاه به‌داخل محلول فوشین اسیدی انتقال داده شده و بلافاصله تمامی ریشه، به‌استثنای ۲ سانتی‌متر بالای آن، بریده می‌شود. قطع ریشه‌ها به‌دلیل کاهش مقاومت ریشه در برابر جریان محلول و در نتیجه افزایش میزان و سرعت جذب محلول توسط بوته صورت می‌گیرد. توجه شود که بوته همچنان در محلول نگهداری می‌شود. لازم‌به‌ذکر است که برای جذب محلول توسط گیاه، شرایط اطراف بوته باید به‌گونه‌ای باشد تا گیاه تعرق نکند. به‌عبارت دیگر، نگهداری بوته در داخل محلول باید تحت شرایط آفتابی صورت گیرد.

با نگهداری بوته آفتابگردان در داخل محلول، می‌توان مشاهده کرد که تعرق صورت گرفته و در نتیجه، رنگ از ساقه بوته به‌آرامی بالا می‌رود و سپس در سراسر برگ‌ها نیز پخش می‌گردد. این حرکت رنگ در بوته، مسیر انتقال آب در گیاه را نشان می‌دهد. در صورت تمایل می‌توان سرعت انتقال آب را نیز اندازه‌گیری کرد. مثلاً مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا رنگ از ارتفاع ۵ سانتی‌متری ساقه به ارتفاع ۴۵ سانتی‌متری آن برسد، نشان‌دهنده سرعت انتقال آب در بوته است.

## ۹-۱۴ مشاهده روزنه‌ها

مشاهده روزنه‌ها به‌سادگی و بدون نیاز به امکانات خاص قابل‌اجرا است. بدین منظور لازم‌است ابتدا لاک ناخن بی‌رنگ تهیه شود. تجربه نگارنده نشان می‌دهد که برای این منظور لاک‌های ارزان‌تر بهتر هستند. برای مشاهده روزنه‌ها در سطوح زیرین و بالایی برگ گیاه موردنظر، روی این سطوح لاک زده می‌شود. سپس باید منتظر ماند تا لاک خشک گردد. لاک خشک‌شده را باید با احتیاط از برگ جدا کرد و زیر میکروسکوپ بررسی نمود. با تنظیم میکروسکوپ، روزنه‌ها ظاهر خواهند شد. باید توجه داشت که برخی گیاهان فقط در یک طرف سطح برگ خود دارای روزنه هستند. چنانچه میکروسکوپ دارای بزرگ‌نمایی کافی و امکانات مناسب باشد، می‌توان نسبت به‌شمارش روزنه‌ها در واحد معین سطح برگ و اندازه‌گیری طول و عرض آن‌ها اقدام کرد.

## ۱۰-۱۴ سنجش ویژگی‌های ریشه

از آن‌جایی که در فصل ۵ درباره استخراج، شستشو و سنجش ویژگی‌های رشد ریشه توضیحات کاملی ارائه شده است، بنابراین، از تکرار مطالب فوق در این قسمت خودداری می‌شود. طی دو یا سه جلسه آزمایش

می‌توان این عملیات را به‌طور کامل اجرا کرد. بدیهی است چنانچه قبلاً نسبت به کاشت گیاه در گلدان اقدام شده باشد، کار استخراج و شستشوی ریشه‌ها آسان‌تر خواهد بود. از دانشجویان خواسته می‌شود مراحل مختلف سنجش ویژگی‌های ریشه را انجام دهند.

## ۱۴-۱۱ تعیین نیاز آبی

تعیین نیاز آبی بخش مهمی از سرفصل واحد عملی درس رابطه آب خاک و گیاه را تشکیل می‌دهد. در طی دو تا سه جلسه آزمایشگاه می‌توان از دانشجویان خواست تا نیاز آبی یک گیاه معین را در شرایط محیطی یک شهر معین محاسبه نمایند. بهتر آن است که هر دانشجو یک گیاه و یک شهر جداگانه را انتخاب کند. مراحل تعیین نیاز آبی در فصل ۱۲، همراه با یک مثال توضیح داده شده است. جدول ۳-۱۴ حاوی داده‌های آب‌وهوایی برای چند شهر مهم کشور است، که می‌تواند در محاسبه نیاز آبی مورد استفاده دانشجویان قرار گیرد.

جدول ۳-۱۴ میانگین‌های چندساله آمارهواشناسی شهرهای گرگان، تبریز، اصفهان، شیراز، اهواز و مشهد.

مکان: گرگان ارتفاع: ۱۵۵ متر عرض جغرافیایی: ۳۶/۴۹ طول جغرافیایی: ۵۴/۲۸ تعداد سال‌های مورد استفاده: ۱۶ سال

ماه	دما (°C)		رطوبت نسبی (درصد)	سرعت باد (کیلومتر در روز)	تعداد ساعات آفتابی (روز)
	حداکثر	حداقل			
ژانویه	۱۲٫۷	۴٫۱	۷۴	۱۰۴	۴٫۴
فوریه	۱۳٫۹	۴٫۴	۷۵	۱۵۶	۴٫۸
مارس	۱۵٫۷	۶٫۵	۷۷	۱۵۶	۴٫۱
آوریل	۱۹٫۸	۱۰٫۵	۷۴	۱۸۱	۳٫۹
مه	۲۷٫۴	۱۶٫۲	۶۹	۱۸۱	۶٫۳
ژوئن	۳۱٫۰	۱۹٫۴	۶۶	۲۰۷	۷٫۳
ژولای	۳۲٫۶	۲۲٫۴	۶۷	۱۸۱	۷٫۹
آگوست	۳۳٫۲	۲۲٫۵	۶۸	۱۸۱	۸٫۰
سپتامبر	۲۹٫۸	۱۹٫۳	۶۸	۱۸۱	۷٫۹
اکتبر	۲۴٫۳	۱۳٫۹	۷۳	۲۰۷	۵٫۵
نوامبر	۱۸٫۸	۸٫۸	۷۴	۱۸۱	۴٫۵
دسامبر	۱۴٫۵	۵٫۶	۷۳	۲۰۷	۴٫۷
میانگین سال	۲۲٫۸	۱۲٫۸	۷۲	۱۷۷	۵٫۸

مکان: تبریز ارتفاع: ۱۳۶۷ متر عرض جغرافیایی: ۳۸٫۰۵ طول جغرافیایی: ۴۶٫۱۷ تعداد سال‌های مورد استفاده: ۱۳ سال

تعداد ساعات آفتابی (روز)	سرعت باد (کیلومتر در روز)	رطوبت نسبی (درصد)	دما (°C)		ماه
			حداقل	حداکثر	
۴٫۱	۹۵	۸۳	-۵٫۰	۳٫۹	ژانویه
۵٫۸	۱۴۷	۷۹	-۴٫۰	۵٫۶	فوریه
۵٫۱	۱۹۰	۷۶	-۰٫۳	۱۰٫۱	مارس
۵٫۶	۱۸۱	۶۵	۵٫۸	۱۶٫۷	آوریل
۷٫۸	۱۵۶	۶۰	۹٫۴	۲۲٫۵	مه
۹٫۴	۱۳۸	۵۴	۱۳٫۰	۲۷٫۹	ژوئن
۱۰٫۹	۱۵۶	۴۸	۱۸٫۴	۳۰٫۵	ژولای
۱۰٫۲	۱۴۷	۴۸	۱۷٫۳	۳۱٫۰	آگوست
۱۰٫۰	۱۳۸	۵۴	۱۳٫۲	۲۸٫۰	سپتامبر
۷٫۰	۱۱۲	۶۴	۷٫۶	۲۰٫۲	اکتبر
۵٫۴	۹۵	۷۵	۱٫۲	۱۰٫۷	نوامبر
۴٫۰	۱۰۴	۸۲	-۳٫۷	۴٫۴	دسامبر
۷٫۱	۱۳۸	۶۶	۶٫۱	۱۷٫۶	میانگین سال

مکان: اصفهان ارتفاع: ۱۵۹۰ متر عرض جغرافیایی: ۳۲٫۳۷ طول جغرافیایی: ۵۱٫۴۰ تعداد سال‌های مورد استفاده: ۲۵ سال

تعداد ساعات آفتابی (روز)	سرعت باد (کیلومتر در روز)	رطوبت نسبی (درصد)	دما (°C)		ماه
			حداقل	حداکثر	
۶٫۶	۹۵	۶۸	-۲٫۶	۹٫۶	ژانویه
۷٫۵	۱۴۷	۶۲	-۰٫۶	۱۳٫۰	فوریه
۸٫۲	۱۹۰	۵۲	۳٫۸	۱۷٫۵	مارس
۸٫۱	۱۸۱	۵۰	۷٫۹	۲۲٫۱	آوریل
۹٫۳	۱۵۶	۴۴	۱۲٫۷	۲۸٫۳	مه
۱۱٫۲	۱۳۸	۳۶	۱۷٫۲	۳۴٫۴	ژوئن
۱۱٫۰	۱۵۶	۳۴	۱۹٫۶	۳۶٫۹	ژولای
۱۰٫۸	۱۴۷	۳۷	۱۷٫۸	۳۵٫۸	آگوست
۱۰٫۱	۱۳۸	۴۰	۱۳٫۴	۳۲٫۲	سپتامبر
۹٫۰	۱۱۲	۴۸	۷٫۴	۲۵٫۱	اکتبر
۷٫۲	۹۵	۶۰	۲٫۴	۱۷٫۰	نوامبر
۶٫۴	۱۰۴	۶۶	-۱٫۶	۱۰٫۴	دسامبر
۸٫۸	۱۳۸	۵۰	۸٫۱	۲۳٫۵	میانگین سال

مکان: شیراز ارتفاع: ۱۴۸۶ متر عرض جغرافیایی: ۲۹٫۳۲ طول جغرافیایی: ۵۲٫۳۵ تعداد سال‌های مورد استفاده: ۲۲ سال

ماه	دما (°C)		رطوبت نسبی (درصد)	سرعت باد (کیلومتر در روز)	تعداد ساعات آفتابی (روز)
	حداکثر	حداقل			
ژانویه	۱۲٫۴	-۰٫۱	۷۴	۱۳۰	۷٫۱
فوریه	۱۴٫۷	۱٫۲	۶۵	۱۵۶	۷٫۵
مارس	۱۹٫۱	۴٫۵	۶۲	۲۰۷	۷٫۹
آوریل	۲۳٫۴	۷٫۸	۵۴	۱۸۱	۷٫۸
مه	۳۰٫۰	۱۲٫۷	۴۳	۱۸۱	۱۰٫۴
ژوئن	۳۵٫۲	۱۶٫۵	۳۲	۱۸۱	۱۱٫۳
ژولای	۳۷٫۲	۱۹٫۶	۳۰	۱۳۰	۱۰٫۸
اگوست	۳۶٫۴	۱۸٫۴	۲۹	۱۳۰	۱۰٫۶
سپتامبر	۳۳٫۳	۱۴٫۳	۳۶	۱۵۶	۱۰٫۶
اکتبر	۲۷٫۷	۸٫۷	۴۳	۱۰۴	۹٫۸
نوامبر	۲۰٫۰	۳٫۷	۵۸	۱۵۶	۸٫۱
دسامبر	۱۴٫۲	۰٫۵	۷۴	۱۳۰	۷٫۲
میانگین سال	۲۵٫۳	۹٫۰	۵۰	۱۵۴	۹٫۱

مکان: اهواز ارتفاع: ۲۰ متر عرض جغرافیایی: ۳۱٫۲۰ طول جغرافیایی: ۴۸٫۴۰ تعداد سال‌های مورد استفاده: ۳۰ سال

ماه	دما (°C)		رطوبت نسبی (درصد)	سرعت باد (کیلومتر در روز)	تعداد ساعات آفتابی (روز)
	حداکثر	حداقل			
ژانویه	۱۷٫۸	۶٫۹	۷۶	۱۷۳	۵٫۲
فوریه	۲۰٫۶	۸٫۳	۷۱	۱۹۰	۶٫۵
مارس	۲۵٫۷	۱۲٫۵	۶۱	۲۰۷	۶٫۲
آوریل	۳۱٫۶	۱۶٫۴	۵۶	۲۰۷	۶٫۰
مه	۳۸٫۷	۲۱٫۹	۴۳	۱۹۰	۸٫۶
ژوئن	۴۴٫۱	۲۴٫۴	۳۶	۲۲۵	۱۰٫۵
ژولای	۴۵٫۸	۲۶٫۶	۴۰	۱۹۰	۱۰٫۲
اگوست	۴۵٫۳	۲۵٫۸	۴۲	۲۰۷	۱۰٫۱
سپتامبر	۴۲٫۱	۲۱٫۶	۴۶	۱۹۰	۹٫۷
اکتبر	۳۵٫۶	۱۷٫۶	۵۵	۱۹۰	۸٫۰
نوامبر	۲۴٫۶	۲۴٫۴	۶۴	۲۰۷	۶٫۵
دسامبر	۱۹٫۴	۷٫۵	۸۲	۱۹۰	۵٫۳
میانگین سال	۳۲٫۸	۱۶٫۸	۵۶	۱۹۷	۷٫۷

مکان: مشهد ارتفاع: ۹۸۹ متر عرض جغرافیایی: ۳۶/۱۶ طول جغرافیایی: ۵۹/۳۸ تعداد سال‌های مورد استفاده: ۲۲ سال

تعداد ساعات آفتابی (روز)	سرعت باد (کیلومتر در روز)	رطوبت نسبی (درصد)	دما (°C)		ماه
			حداقل	حداکثر	
۵,۴	۲۰,۷	۸۲	-۴,۳	۷,۴	ژانویه
۵,۳	۱۵,۶	۸۰	-۱,۸	۹,۵	فوریه
۴,۸	۲۰,۷	۷۵	۲,۹	۱۳,۲	مارس
۶,۱	۲۰,۷	۵۹	۷,۶	۱۹,۲	آوریل
۹,۲	۱۸,۱	۵۲	۱۱,۹	۲۶,۲	مه
۱۱,۷	۲۲,۵	۳۹	۱۵,۴	۳۱,۰	ژوئن
۱۱,۷	۲۲,۵	۳۷	۱۸,۰	۳۳,۷	ژولای
۱۱,۳	۲۲,۵	۳۷	۱۵,۶	۳۲,۶	اگوست
۱۰,۰	۱۸,۱	۴۳	۱۱,۰	۲۸,۳	سپتامبر
۷,۸	۱۸,۱	۶۰	۵,۶	۲۲,۳	اکتبر
۶,۴	۱۵,۶	۷۲	۰,۷	۱۴,۷	نوامبر
۵,۳	۱۵,۶	۷۹	-۲,۹	۹,۶	دسامبر
۷,۹	۱۹,۲	۶۰	۶,۶	۲۰,۶	میانگین سال

## منابع

- حق‌نیا، غ. ۱۳۷۴. خاک‌شناخت (ترجمه). انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ۶۳۰ صفحه.
- سرمندیا، غ.ج. و ع. کوچکی. ۱۳۷۱. جنبه‌های فیزیولوژیکی زراعت دیم (ترجمه). انتشارات جهاددانشگاهی مشهد. ۴۲۴ صفحه.
- سلطانی، ا.، ف. رحیمزاد خوئی، ک. قاسمی گلعدانی، م. مقدم. ۱۳۷۷. شبیه‌سازی اثر ویژگی‌های خاک بر عملکرد نخود تحت شرایط دیم. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۵، شماره ۳ و ۴، صفحه ۸۵ تا ۹۵.
- سلطانی، ا.، م. قلی‌پور، و ح. حاجی‌زاده. ۱۳۸۴. SBEET یک مدل ساده برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد چغندر قند. مجله علوم و صنایع کشاورزی. جلد ۱۹، شماره ۲، ص ۱۱ تا ۲۶.
- سلطانی، ا.، ف. رحیمزاد خوئی، ک. قاسمی گلعدانی، و م. مقدم. ۱۳۷۸. تعیین صفات مطلوب گیاهی برای نخود تحت شرایط دیم با استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای. دانش کشاورزی، جلد ۹، شماره ۴، صفحه ۶۵ تا ۸۲.
- کافی، م.، م. لاهوتی، ا. زند، ح.ر. شریفی و م. گلدانی. ۱۳۷۸. فیزیولوژی گیاهی (ترجمه). انتشارات جهاددانشگاهی مشهد. ۴۴۷ صفحه.
- کوچکی، ع.، ا. سلطانی، و م. عزیزی. ۱۳۷۶. اکوفیزیولوژی گیاهی. انتشارات جهاددانشگاهی مشهد، ۲۷۱ صفحه.
- کوچکی، ع. و ا. سلطانی. ۱۳۷۷. اصول و عملیات کشاورزی در مناطق خشک (ترجمه). انتشارات نشر آموزش کشاورزی. ۹۴۲ صفحه.
- کوچکی، ع.ر.، ا. زند، م. بنایان اول، پ. رضوانی مقدم، ع.م. مهدوی دامغانی، م. جامی الاحمدی و س.ر. وصال. ۱۳۸۴. اکوفیزیولوژی گیاهی (ترجمه). انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ۴۴۶ صفحه.
- علیزاده، ا. ۱۳۸۳. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). ۴۷۰ صفحه.
- محبوبی، ع.ا. و ع.ا. نادری. ۱۳۸۰. فیزیک خاک کاربردی. انتشارات دانشگاه بوعلی سینا. ۲۱۴ صفحه.



- Araus, J.L., D. Villegas, N. Aparicio, L.F. Garcia del Moral, S. El Hani, Y. Rharrabti, J.P. Ferrio, and C. Royo. 2003. *Environmental factors Determining carbon isotope discrimination and yield in durum wheat under Mediterranean conditions*. Crop Sci. 43: 170-180.
- Bohm, W. 1979. *Methods of studying root systems*. Springer-Verlag, Berlin.
- Bowman, W.D., K.T. Hubick, S. von Caemmerer, and G.D. Farquhar. 1989. *Short-term changes in leaf carbon isotope discrimination in salt- and water-stressed C<sub>4</sub> grasses*. Plant Physiol. 90: 162-166.
- Boyer, J.S. 1995. *Measuring the water status of plants and soils*. Academic Press, San Diego.
- Briggs, L.J., and H.L. Shantz. 1914. *Relative water requirement of plants*. J. Agric. Res. (Washington, D.C.). 3: 1-63.
- Campbell, G.S., and J.M. Norman. 1998. *An Introduction to Environmental Biophysics*. Springer, New York.
- Condon, A.G., R.A. Richards, G.J. Rebetzke, and G.D. Farquhar. 2004. *Breeding for high water use efficiency*. J. Exp. Bot. 55: 2447-2460.
- Cooper, P.J.M. J.D.H. Keatinge and G. Hughes. 1983. *Crop evapotranspiration: technique for calculation of its components by field measurements*. Field Crops Res. 7: 299-312.
- Cooper, P.J.M., P.J. Gregory, D. Tully and H.C. Harris. 1987. *Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of West Asia and North Africa*. Exp. Agric. 23: 113-158.
- Cooper, P.J.M., G.S. Campbell, M.C. Heath, and P.D. Hebblethwaite. 1988. *Factors which affect water use efficiency in rainfed production of food legumes, and their measurement*. In: Summerfield, R.J. (Ed.), World crops: Cool season food legumes. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands, pp. 813-829.
- Costa, C., L.M., Dwyer, R.I. Hamilton, C. Hamel, L. Nantais, and D.L. Smith. 2000. *A sampling method for measuring of large root systems with scanner-based image analysis*. Agron. J. 92: 621-627.
- Doorenbos, J., and W.O. Pruitt. 1977. *Crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper. 21: FAO. Rome.
- Duley, F.L. 1939. *Surface factors affecting the rate of intake of waters by soils*. Proc. Soil Sci. Soc. Am. 4: 60-64.
- English, M., and S.N. Raja. 1996. *Perspectives on deficit irrigation*. Agric. Water Manag. 32:1-14.
- Ghassemi-Golezani, K., A. Soltani, and S. Atashi. 1997. *The effect of water limitation in the field on seed quality of maize and sorghum*. Seed Sci. Technol. 25: 321-324.
- Gijsman, A.J., S.S. Jagtap, and J.W. Jones. 2003. *Wading through a swamp of complete confusion: how to choose a method for estimating soil water retention parameters for crop models*. Eur. J. Agron. 18: 77-106.
- Gholipour, M., A. Soltani, F. Shekari, and Fb. Shekari. 2002. *Effect of salinity on water use efficiency and its components in chickpea*. Acta Agronomica Hungarica 50(2): 127-134.
- Jones, H.G. 1992. *Plant and microclimate*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kramer, P.J. 1995. *Water relations of plants and soils*. Academic Press. 495pp.
- Loomis, R.S. and D.J. Connor. 1992. *Crop ecology: productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Michel, B.E. 1983. *Evaluation of the water potentials of solutions of Polyethylene Glycol 8000 both in the absence and presence of other solutes*. Plant Physiol. 72: 66-70.

- Miller, R.W. and R.L. Donahue. 1990. *An introduction to soils and plant growth*. Prentice-Hall International Editions.
- Munns, R. 2002. *Comparative physiology of salt and water stress*. Plant Cell Env. 25: 239-250.
- Newman, E.L. 1966. *A method of estimating the total length of root in a sample*. J. Appl. Ecol. 3: 139-145.
- Nilsen, E.T. and D.M. Orcutt. 1996. *The physiology of plant under stress*. John Wiley In, N.Y.
- Nobel, P.S. 1994. *Physicochemical and environmental plant physiology*. Academic Press, London.
- Passioura, J.B. 2002. *Soil conditions and plant growth*. Plant Cell Env. 25: 311-318.
- Richards, R.A. 1996. *Defining selection criteria to improve yield under drought*. Plant Growth Regul. 20: 157-166.
- Richards, R.A. 2000. *Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops*. J. Exp. Bot. 51: 447-458.
- Richards, R.A., G.J. Rebetzke, A.G. Condon, and A.F. van Herwaarden. 2002. *Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals*. Crop Sci. 42: 111-121.
- Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1996. *Plant physiology*. Wadsworth Publ. Co., Belmont, CA.
- Saxton, K.E., W.J. Rawls, J.S. Romberger, R.I. Papendick. 1986. *Estimating generalized soil- water characteristics from texture*. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 1031-1036.
- Serraj, R., and T.R. Sinclair. 2002. *Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions?* Plant Cell Env. 25: 333-341.
- Sinclair, T.R., and F.P. Gardner. 1998. *Principles of ecology in plant production*. CAB International, Wallingford.
- Slatyer, R.O. 1977. *Plant water relationships*. Academic Press, New York.
- Slatyer, R.O. and S.A. Taylor. 1960. *Terminology in plant and soil water relations*. Nature (London). 187: 922-924.
- Soltani, A., K. Ghassemi-Golezani, F. R. Khooie, and M. Moghaddam. 1999. *A simple model for chickpea growth and yield*. Field Crops Res. 62: 213-224.
- Soltani, A., F. R. Khooie, K. Ghassemi-Golezani, and M. Moghaddam. 2000. *Thresholds for chickpea leaf expansion and transpiration response to soil water deficit*. Field Crops Res. 68: 205-210.
- Soltani, A., F. R. Khooie, K. Ghassemi-Golezani, and M. Moghaddam. 2001. *A simulation study of chickpea crop response to limited irrigation in a semiarid environment*. Agric. Water Manag. 49: 225-237.
- Soltani, A., and S. Galeshi. 2002. *Importance of rapid canopy closure for wheat production in a temperate sub-humid environment: Experimentation and simulation*. Field Crops Res. 77: 17-30.
- Soltani, A., E. Zeinali, S. Galeshi, and N. Latifi. 2002. *Germination, seed reserve utilization and seedling growth of chickpea as affected by salinity and seed size*. Seed Sci. Technol. 30: 51-60.
- Solatni, A., M. Gholipoor, and E. Zeinali. 2006. *Seed reserve utilization and seedling of weath as affected by drought and salinity*. Env. Exp Bot. 55: 195-200.
- Stuedle, E. 2000. *Water uptake by roots: effects o water deficit*. J. Exp. Bot. 51: 1531-1542.
- Stuedle, E. and C.A. Peterson. 1998. *How does water get through roots?* J. Exp. Bot. 49 (322): 775-788.

- Stewart, B.A. and D.R. Nielsen. 1990. *Irrigation of agricultural crops*. ASA. No 30. Madison. Wisconsin.
- Tanner, C.B., and T.R. Sinclair. 1983. *Efficient water use in crop production: Research or re-search?* In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R.,(Eds.), *Limitations to efficient water use in crop production*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 1-27.
- Tenant, D. 1975. *A test of a modified line intersect method for estimating root length*. J. Ecol. 63: 995-1001.
- Turner, N.C. 1986. Crop water deficits: *A decade of progress*. Adv. Agron. 39: 1-51.
- Yeo A. 1998. *Molecular biology of salt tolerance in the context of whole-plant physiology*. J..Exp.Bot. 49: 915-929.
- Zhang J., H.T. Nguyen, and A. Blum. 1999. *Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plants*. J. Exp. Bot. 50: 291-302.
- Zhang, H., and T. Oweis.1999. *Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region*. Agric. Water Manag. 38: 195-211.