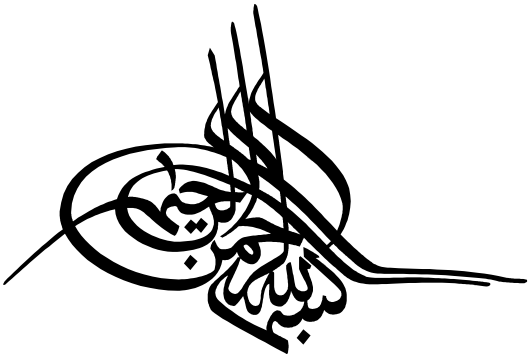


فیزیولوژی بعد از برداشت

سری کتاب‌های کمک آموزشی کارشناسی ارشد

مجموعه کشاورزی – باغبانی

مؤلف: رویا رئیسی زنوز

سرشناسه	: رئیسی زنوز، رویا
عنوان	:فیزیولوژی بعد از برداشت
مشخصات نشر	:تهران: مشاوران صعود ماهان، ۱۴۰۱
مشخصات ظاهری	: ۱۹۰ص
فروست	:سری کتاب‌های کمک آموزشی کارشناسی ارشد
شابک	: ۳-۰۲۱-۳۸۹-۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی	:فیپای مختصر
یادداشت	: این مدرک در آدرس http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است.

کتاب: .....فیزیولوژی بعد از برداشت

مدیر مسئول:..... هادی سیاری، مجید سیاری

مولف:.....رویا زنوز رئیسی

ناشر:.....مشاوران صعود ماهان

مدیر تولید محتوا:.....سمیه بیگی

نوبت و تاریخ چاپ: .....اول/ ۱۴۰۱

تیراژ:.....۱۰۰۰ جلد

قیمت:.....۲/۲۰۰/۰۰۰ریال

شابک:.....۳-۰۲۱-۳۸۹-۶۰۰-۹۷۸ ISBN:

انتشـــارات مشاوران صعود ماهان: خیابان ولیعصر، بالاتر از تقـاطع مطهری،
روبروی قنادی هتل بزرگ تهـــران، جنب بانک ملی، پلاک ۲۰۵۰
تلفن: ۴-۸۸۱۰۰۱۱۳

سخن ناشر

«ن والقلم و ما یسطرون»

کلمه نزد خدا بود و خدا آن را با قلم بر ما نازل کرد.

به پاس تشکر از چنین موهبت الهی، مؤسسه ماهان درصدد برآمده است تا در راستای انتقال دانش و مفاهیم با کمک اساتید مجرب و مجموعه کتب آموزشی خود برای شما داوطلبان ادامه تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد، گام مؤثری بردارد. امید است تلاش‌های خدمتگزاران شما در این مؤسسه پایه‌گذار گام‌های بلند فردای شما باشد.

مجموعه کتاب‌های کمک آموزشی ماهان به‌منظور استفاده داوطلبان کنکور کارشناسی ارشد سراسری و آزاد تألیف شده‌اند. در این کتاب‌ها سعی کرده‌ایم با بهره‌گیری از تجربه اساتید بزرگ و کتب معتبر داوطلبان را از مطالعه کتاب‌های متعدد در هر درس بی‌نیاز کنیم.

دیگر تألیفات ماهان برای سایر دانشجویان به‌صورت ذیل است.

- مجموعه کتاب‌های ۸ آزمون: شامل ۵ مرحله کنکور کارشناسی ارشد ۵ سال اخیر به همراه ۳ مرحله آزمون تألیفی ماهان همراه با پاسخ تشریحی می‌باشد که برای آشنایی با نمونه سوالات کنکور طراحی شده است. این مجموعه کتاب‌ها با توجه به تحلیل ۳ ساله اخیر کنکور و بودجه‌بندی مباحث در هریک از دروس، اطلاعات مناسبی جهت برنامه‌ریزی درسی در اختیار دانشجو قرار می‌دهد.
- مجموعه کتاب‌های کوچک: شامل کلیه نکات کاربردی در گرایش‌های مختلف کنکور کارشناسی ارشد می‌باشد که برای دانشجویان جهت جمع‌بندی مباحث در ۲ ماهه آخر قبل از کنکور مفید است.

بدین‌وسیله از مجموعه اساتید، مولفأن و همکاران محترم خانواده بزرگ ماهان که در تولید و به‌روزرسانی تالیفات ماهان نقش مؤثری داشته‌اند، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌نماییم.

دانشجویان عزیز و اساتید محترم می‌توانند هرگونه انتقاد و پیشنهاد درخصوص تالیفات ماهان را از طریق سایت ماهان به آدرس mahan.ac.ir با ما در میان بگذارند.

مؤسسه آموزش عالی آزاد ماهان

سخن مولف

آمار تولید محصولات کشاورزی سالانه ۱۰۰ میلیون تن عنوان شده است که بخش زیادی از این میزان تولید محصول تبدیل به ضایعات می‌شود. آمارهای متفاوتی از میزان ضایعات بخش کشاورزی ارائه شده است اما تعداد زیادی از تولید کنندگان معتقد هستند که بین ۲۰ تا ۳۰ درصد محصولات کشاورزی در کشور ما به ضایعات تبدیل می‌شوند چرا که گیاهان باغی بویژه میوه‌ها و سبزی‌ها محصولات بسیار حساس بوده و سهل‌انگاری در مسیری که این محصولات می‌پیمایند تا به دست مصرف کننده برسند موجب تلفات محصول برداشت شده گردیده و کیفیت آن را کاهش می‌دهد و از آنجائیکه کشور ما پتانسیل بالایی برای تولید محصولات باغی در دنیا دارد باید امکاناتی فراهم شود تا این ضایعات و ضررهای اقتصادی ناشی از آن کاهش یابد.

علم فیزیولوژی پس از برداشت علمی است که با بیان روش‌های اصولی برداشت، بسته‌بندی و نگهداری و حمل و نقل قادر به انجام این مهم است.

امید است مطالعه این کتاب دانشجویان رشته‌های علوم باغبانی و صنایع غذایی را در این زمینه به طور کامل راهنمایی کند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: فتوسنتز ۱۵

نور ۱۵
رنگدانه‌ها ۱۶
عوامل مؤثر بر تولید و ساز و کار کلروفیل ۱۶
۱) نور ۱۶
۲) اکسیژن ۱۷
۴) ازت ۱۷
۵) منیزیم ۱۷
۶) آهن ۱۷
۷) درجه حرارت ۱۷
۸) آب ۱۷
کاروتنوئیدها ۱۷
کلروپلاست ۱۷
واکنش‌های فتوسنتز ۱۸
واکنش‌های روشنایی ۱۸
واکنش‌های تاریکی ۱۹
مسیر احیای کربن در گیاهان C_3 ..... ۱۹
مسیر احیای کربن در گیاهان C_4 ..... ۲۰
مسیر احیای کربن در گیاهان CAM ۲۱
ویژگی‌های مهم گیاهان C_3، C_4 و CAM ۲۱
سؤالات چهار گزینه‌ای فصل اول ۲۳
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای فصل اول ۲۴

فصل دوم: تنفس ۲۷

۱) مسیر گلیکولیز ۲۷
۲) چرخه تری کربوکسیلیک اسید ۲۷
۳) زنجیره انتقال الکترون ۲۸
کسر تنفسی ۲۸
سرعت تنفس ۲۸
طبقه‌بندی محصولات براساس الگوی تنفس ۲۹
عوامل موثر بر سرعت تنفس ۳۱
۱) شرایط رشد و نوع بافت محصول ۳۱

۲) اندازه محصول ۳۱
۳) دمای محیط ۳۱
۴) ترکیب هوا ۳۱
سؤالات چهار گزینه‌ای فصل دوم ۳۲
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای فصل دوم ۳۵

فصل سوم: مراحل تشکیل، رشد و نمو و رسیدن میوه ۳۹

تشکیل میوه ۳۹
رشد و نمو میوه ۳۹
مراحل رشد میوه‌هایی با منحنی سیگموئید ساده ۴۰
مراحل رشد میوه‌هایی با منحنی سیگموئید مضاعف ۴۰
تغییرات شکل میوه در طی رشد و نمو ۴۰
رشد و نمو روزانه میوه ۴۱
بلوغ ۴۱
۱) بلوغ فیزیولوژیکی ۴۱
۲) بلوغ تجارتی یا بلوغ باغبانی ۴۱
معیارهای تعیین بلوغ ۴۱
۱) معیارهای فیزیکی ۴۱
۲) معیارهای شیمیایی تعیین بلوغ ۴۲
تعیین کیفیت و شاخص‌های برداشت میوه‌ها و سبزی‌ها ۴۲
۱) اندازه و شکل ۴۲
۲) رنگ ۴۲
۳) چگالی ۴۲
۴) سفتی بافت ۴۳
۵) تردی محصول ۴۳
۶) نیروی کندن میوه ۴۳
۷) ضریب رسیدگی (شاخص طعم) ۴۳
۸) آب میوه ۴۳
۹) مواد جامد قابل حل ۴۳
۱۰) سرعت تنفسی ۴۳
۱۱) تقویم فصلی ۴۳
۱۲) ذخیره حرارتی ۴۳
شاخص‌های برداشت برخی از میوه‌ها ۴۴
شاخص‌های برداشت برخی از سبزی‌ها ۴۵
۱۳) رفتار تنفسی ۴۵
نمو و رسیدن و پیری ۴۵
تغییرات مهم ضمن بلوغ و رسیدن میوه‌ها ۴۶
۱) تغییر در سرعت تنفس ۴۶
میوه‌های فرازگرا ۴۶
میوه‌های نافرازگرا ۴۶
۲) تغییر رنگ ۴۷
کلروفیل ۴۷

کاروتنوئید ۴۷
آنتوسیانین‌ها ۴۷
۳) تغییر طعم ۴۸
نشاسته ۴۸
قند ۴۸
اسیدهای آلی ۴۸
ترکیبات فنلی و تانن‌ها ۴۹
۴) تغییر عطر و بو ۴۹
۵) تغییر بافت (نرم شدن) ۴۹
۶) تغییر در ارزش غذایی ۵۰
ویتامین‌ها ۵۰
ترکیبات نیتروژنی ۵۰
تنظیم رسیدن و پیری ۵۰
به تأخیر انداختن رسیدن و پیری ۵۰
سایتوکینین‌ها ۵۰
جیبرلین‌ها ۵۰
اکسین ۵۱
مواد کند کننده رشد ۵۱
مواد جاذب اتیلن ۵۱
تسریع رسیدن و پیری ۵۱
تنظیم ژنتیکی رسیدن ۵۲
سؤالات چهار گزینه‌ای فصل سوم ۵۳
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای فصل سوم ۵۵

فصل چهارم: ترکیبات شیمیایی محصولات باغبانی و تغییرات آنها در خلال رسیدن و پس از برداشت ۵۹

آب ۵۹
کربوهیدرات‌ها ۶۰
۱) قندها ۶۰
۲) نشاسته ۶۰
۳) ترکیبات پکتیکی ۶۰
۴) سلولز و همی سلولز ۶۱
اسیدهای آلی ۶۱
ترکیبات ازت‌دار ۶۲
۱) ترکیبات ازت‌دار قابل حل در آب ۶۲
۲) پروتئین‌ها ۶۲
لیپیدها ۶۲
۱) اسیدهای چرب ۶۲
۲) لیپیدهای ذخیره‌ای ۶۳
۳) لیپیدهای ساختمانی ۶۳
۴) لیپیدهای پوششی ۶۳
الکل‌های قندی ۶۳
ترکیبات فنولی ۶۴

ویتامین‌ها ۶۵
آلکالوئیدها ۶۵
رنگدانه‌ها ۶۵
۱) کاروتنوئیدها ۶۶
۲) آنتوسیانین‌ها ۶۷
ترکیبات معطر ۶۷
عوامل مؤثر در تولید ترکیبات فرار ۶۸
مواد معدنی ۶۸
آنزیم‌ها ۶۹
تغییرات بافت (نرم شدن) ۷۰
سؤالات چهار گزینه‌ای فصل چهارم ۷۱
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای فصل چهارم ۷۴
فصل پنجم: تنظیم کننده‌های رشد گیاهی ۷۹
اتیلن ۷۹
تأثیر عوامل محیطی بر تولید اتیلن ۸۱
تغییرات نامطلوب بعد از برداشت محصولات ناشی از اتیلن ۸۱
نقش اتیلن در رسیدن میوه‌ها ۸۲
تولید اتیلن ۸۲
تأثیر اتیلن در ریزش ۸۲
طرز عمل اتیلن ۸۲
کنترل اتیلن ۸۳
اکسین‌ها ۸۴
اکسین‌های مصنوعی ۸۴
جیبرلین‌ها ۸۴
سایتوکنین‌ها ۸۵
اسید آبسایزیک ۸۵
پلی آمین‌ها ۸۵
سؤالات چهار گزینه‌ای فصل پنجم ۸۷
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای فصل پنجم ۸۹
فصل ششم: عوامل پس از برداشت مؤثر بر کاهش کیفیت محصولات کشاورزی ۹۳
دما ۹۳
دما و سرعت تنفس ۹۳
دما و تعادل قند و نشاسته ۹۴
دمای بالا ۹۴
دمای پایین ۹۴
۱) انجماد ۹۴
حساسیت محصولات مختلف به سرمازدگی ۹۵
۲) سرمازدگی ۹۵
الف) ساز و کار سرمازدگی ۹۶
ب) روش کنترل سرمازدگی ۹۶
گرمازدگی ۹۶
رطوبت و تعرق ۹۷
عوامل مؤثر در تبخیر آب از سطح محصول ۹۷

۱- تهویه و جابه جایی هوا ۹۷
۲- نسبت سطح به حجم محصول ۹۷
۳- پوشش سطح محصول ۹۷
۴- صدمات مکانیکی ۹۸
ترکیب گازها ۹۸
اکسیژن ۹۸
دی اکسید کربن ۹۸
اتیلن ۹۹
آمونیاک ۹۹
نور ۹۹
سؤالات چهار گزینه‌ای فصل ششم ۱۰۰
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای فصل ششم ۱۰۲

فصل هفتم: ناهنجاری‌های فیزیولوژیکی و بیماری‌های محصولات ۱۰۵

بیماری‌های باکتریایی ۱۰۵
بیماری‌های قارچی ۱۰۵
پوسیدگی تلخ (عامل: Colletotrichum) ۱۰۵
پنیسیلیوم ۱۰۵
کپک خاکستری (عامل:Botrytis) ۱۰۶
پوسیدگی سیاه و سخت (عامل: Alternaria) ۱۰۶
پوسیدگی نرم saft rot (عامل: Rhizopus) ۱۰۶
پوسیدگی سبز (عامل: Clados porium) ۱۰۶
پوسیدگی خشک (عامل: Fusarium) ۱۰۶
سفیدک کرکی (عامل: Phytophthora) ۱۰۶
پوسیدگی قهوه‌ای (عامل: Rizoctonia) ۱۰۶
بیماری تراوش کرکی (Pythium)) ۱۰۶
کپک سیاه (عامل: Aspergillus - spp) ۱۰۶
عوامل مؤثر در آلودگی محصولات به بیماری‌ها ۱۰۶
کنترل بیماری‌ها در مراحل بعد از برداشت ۱۰۷
ناهنجاری‌های فیزیولوژیکی ۱۰۹
۱) ناهنجاری‌های ناشی از تنش دمایی ۱۰۹
۲) ناهنجاری‌های ناشی از مواد معدنی ۱۱۰
کلسیم ۱۱۰
پتاسیم ۱۱۰
ازت ۱۱۰
بر ۱۱۱
سایر عناصر معدنی ۱۱۱
ناهنجاری‌های ترک خوردن پوست میوه ۱۱۱
ناهنجاری‌های فیزیولوژیکی میوه‌های دانه‌دار ۱۱۱
سوختگی ناشی از انبارداری (stroge scald) (سوختگی سطحی) ۱۱۱
لکه تلخ Bitter Pit ۱۱۱
لکه چوب پنبه‌ای Cork Spot ۱۱۲
آبگزیدگی water core ۱۱۲
قهوه‌ای شدن درونی (Internal browning) ۱۱۲
قهوه‌ای شدن داخلی میوه (Brown Heart) ۱۱۲
سوختگی نرم (Soft scald) ۱۱۳

آردی شدن بافت میوه Mealy Break down ۱۱۳
لکه جاناتان Janathan spot ۱۱۳
ناهنجاری‌های فیزیولوژیکی میوه‌های مرکبات ۱۱۳
خشک شدن نوک میوه Endoxerocys ۱۱۳
خشک شدن گوشت میوه Xero cystosis ۱۱۳
پف کردن میوه Puffiness ۱۱۳
پیر شدن میوه Aging ۱۱۳
سایر ناهنجاری‌های مرکبات ۱۱۳
ناهنجاری فیزیولوژیکی میوه‌های هسته‌دار ۱۱۴
لکه ناشی از خشکی Drought spot ۱۱۴
نرم شدن گوشت میوه (soft core) ۱۱۴
لکه صمغی Gum spot ۱۱۴
ناهنجاری‌های فیزیولوژیکی میوه‌های انگور ۱۱۴
سیاه شدن درون میوه (Black heart) ۱۱۴
خشک شدن خوشه انگور Cluster dryness ۱۱۴
ناهنجاری‌های فیزیولوژیکی سبزی‌ها ۱۱۴
جوانه زدن غده‌های سیب‌زمینی Sprouting ۱۱۴
سبز شدن غده‌های سیب‌زمینی Potato green back ۱۱۴
سیاه شدن مغز غده‌های سیب‌زمینی ۱۱۴
پوکی مغز سیب زمینی Hollow heart ۱۱۵
ترک خوردن غده سیب‌زمینی ۱۱۵
جوانه زدن پیاز در انبار ۱۱۵
شکاف خوردگی پیاز (Saddle back) ۱۱۵
ضخیم شدن طوقه پیاز (Bull neck) ۱۱۵
عارضه سوختگی گلگاه (Blossom end- rot) ۱۱۵
پوکی میوه گوجه فرنگی (Hollow fruit) ۱۱۵
نیم رس شدن گوجه فرنگی Green back ۱۱۵
شکاف خوردن میوه گوجه فرنگی splitting of fruit ۱۱۵
چنگالی شدن ریشه هویج Fanging ۱۱۵
شکافت خوردن ریشه هویج ۱۱۵
تلخ شدن هویج ۱۱۶
سوختگی نوک برگ کاهو Tip burn ۱۱۶
لکه‌دار شدن برگ کاهو Spotting ۱۱۶
ترک خوردگی ساقه کرفس Cracked stem ۱۱۶
نرم شدن بافت ساقه کرفس ۱۱۶
ناهنجاری‌های گیاهان زینتی ۱۱۶
سؤالات چهار گزینه‌ای فصل هفتم ۱۱۸
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای فصل هفتم ۱۲۰

فصل هشتم: عملیات پس از برداشت محصول، عملیات آماده‌سازی محصول، بسته‌بندی و حمل و نقل محصول ۱۲۳

برداشت ۱۲۳
عملیات قبل از بسته‌بندی ۱۲۴
جدا کردن مواد زائد و محصولات صدمه دیده ۱۲۴
شستشو ۱۲۴
التیام دهی ۱۲۴
تنظیم کننده‌های رشد گیاهی ۱۲۵

دسته بندی ۱۲۵
روش چیدن محصول در بسته‌ها ۱۲۵
بسته‌بندی مخصوص حمل و نقل ۱۲۶
جعبه‌های چوبی ۱۲۶
جعبه‌های مقوایی ۱۲۶
کیسه‌ها ۱۲۶
بسته بندی با اتمسفر تعدیل شده ۱۲۶
تزریق گاز به درون بسته ۱۲۶
روش‌های حمل و نقل محصول ۱۲۶
روش حمل زمینی ۱۲۶
روش حمل هوایی ۱۲۷
روش حمل دریایی ۱۲۷
روش حمل بوسیله قطار ۱۲۷
عملیات آماده‌سازی محصول ۱۲۷
درجه‌بندی محصول ۱۲۷
واکس زدن یا چرب کردن ۱۲۷
التیام بخشی ۱۲۷
خنک کردن مقدماتی Pre cooling ۱۲۷
روش‌های خنک کردن ۱۲۸
خنک کردن توسط هوای خنک air cooling ۱۲۸
خنک کردن در اتاق room cooling ۱۲۸
خنک کردن تحت فشار air forced cooling ۱۲۸
خنک کردن در خلاء ۱۲۸
خنک کردن با آب ۱۲۹
خنک کردن با یخ ice cooling ۱۲۹
خنک کردن با تبخیر Evaporative cooling ۱۲۹
رساندن مصنوعی ۱۲۹
سبززدایی ۱۳۰
ترکیبات ضد جوانه زنی ۱۳۰
کنترل بیماری‌ها ۱۳۰
کنترل فیزیکی ۱۳۰
کنترل شیمیایی ۱۳۱
ضد عفونی کردن سبزی‌ها و میوه‌ها ۱۳۱
پرتوتابی ۱۳۲
تیمارهای آب گرم ۱۳۲
سؤالات چهار گزینه‌ای فصل هشتم ۱۳۴
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای فصل هشتم ۱۳۵

فصل نهم: انبارها و سردخانه‌ها و شرایط حفظ ویژگی‌های محصول ۱۳۹

انبارهای زیر زمینی (سردابی) (in-ground store) ۱۳۹
انبارهای معمولی (simple storage) ۱۳۹
انبارهای سرد (سردخانه‌های صنعتی) (cold storage) ۱۳۹
انبارهای با اتمسفر کنترل شده (Controlled Atmosphere) (CA) ۱۴۰
انبار کم فشار (Hypobaric) ۱۴۱
شرایط مناسب انبار ۱۴۱
درجه حرارت ۱۴۲

رطوبت نسبی ۱۴۲
ترکیب هوا ۱۴۳
جریان هوا ۱۴۳
تهویه ۱۴۳
فشار هوا ۱۴۳
سؤالات چهار گزینه‌ای فصل نهم ۱۴۴
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای فصل نهم ۱۴۵

فصل دهم: رساندن مصنوعی میوه‌ها ۱۴۹

شرایط محیطی مناسب برای رساندن مصنوعی ۱۴۹
سبز بری (زرد نمودن) پوست مرکبات (degreening) ۱۵۰
رفع گسی در خرمالو ۱۵۰
روش‌های رفع گسی در خرمالو ۱۵۰
تیمار آب گرم ۱۵۰
روش انجماد ۱۵۰
پرتوتابی ۱۵۱
تیمار اتیلن ۱۵۱
تیمار الکل ۱۵۱
تیمار با الکل قبل از برداشت ۱۵۱
تیمار با گاز کربنیک (CO_2) ۱۵۱
یخ خشک (CO_2 جامد) ۱۵۱
گاز نیتروژن (N_2) ۱۵۱
سؤالات چهار گزینه‌ای فصل دهم ۱۵۲
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای فصل دهم ۱۵۳

فصل یازدهم: نگهداری پس از برداشت گل‌های بریده ۱۵۷

پرورش گل‌های بریده ۱۵۷
نگهداری گل‌های شاخه بریده ۱۵۷
روش‌های افزایش عمر گل‌های شاخه بریده ۱۵۸
سؤالات چهار گزینه‌ای فصل یازدهم ۱۶۰
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای فصل یازدهم ۱۶۱
سؤالات چهار گزینه‌ای سال ۹۰ ۱۶۳
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای کنکور ۹۰ ۱۶۶
سؤالات چهار گزینه‌ای سال ۹۱ ۱۶۸
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای کنکور ۹۱ ۱۷۰
سؤالات چهار گزینه‌ای سال ۹۲ ۱۷۱
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای کنکور ۹۲ ۱۷۳
سؤالات چهار گزینه‌ای سال ۹۳ ۱۷۴
پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای کنکور ۹۳ ۱۷۵
سؤالات و پاسخنامه چهار گزینه‌ای سال ۹۵الی ۱۴۰۰ ۱۷۷

فتوسنتز

عناوین اصلی

- نور
- رنگریزه‌ها
- عوامل مؤثر بر تولید و ساز و کار کلروفیل
- کاروتنوئیدها
- کلروپلاست
- واکنش‌های فتوسنتز
- واکنش‌های روشنایی
- واکنش‌های تاریکی

فصل اول

فتوسنتز

فتوسنتز یک پدیده مهم در گیاهان می‌باشد که از طریق آن انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی تبدیل می‌شود. گاز CO_2 مورد نیاز برای فتوسنتز از طریق هوا و از طریق روزنه‌ها و سیستم مجاری پر انشعاب بین سلولی به سلول سبز وارد می‌شود. مولکول گاز کربنیک بعد از روزنه به فضای زیر روزنه‌ای و مجاری متصل به هم جریان هوا وارد شده و از آنجا در سراسر مزوفیل انتشار می‌یابد. وقتی گاز کربنیک به سطح مرطوب سلولی می‌رسد، در آب حل شده، به اسید کربنیک (H_2CO_3) تبدیل می‌شود. اسید مزبور توسط کاتیون‌های سلولی تا حدودی خنثی شده، یون‌های بی کربنات (HCO_3^-) تشکیل می‌گردد. این بی کربنات ذخیره بالقوه CO_2 است که در فتوسنتز مصرف می‌شود.

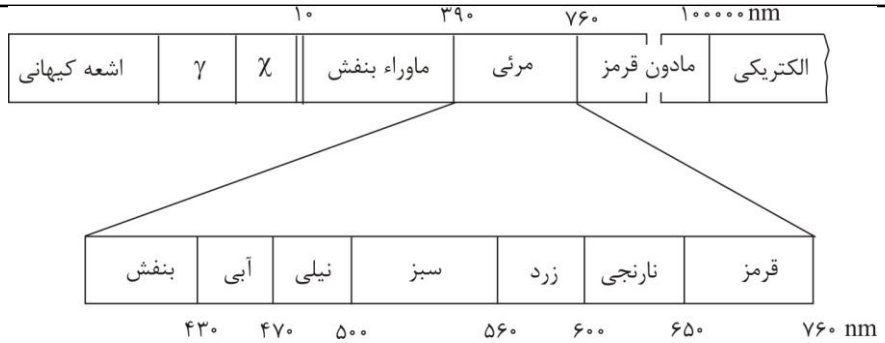
آب لازم در فتوسنتز بخش بسیار ناچیز مقدار آبی است که توسط گیاه جذب و تبخیر می‌شود. برای انجام فتوسنتز در حد مطلوب، برگ‌ها باید متورم و روزنه‌ها باز باشند. بنابراین مقدار آب پایین‌تر از حد مطلوب، به طور غیر مستقیم سبب کاهش میزان فتوسنتز می‌شود، زیرا بسته شدن روزنه‌ها عملاً فرآیند را با محدود ساختن CO_2 متوقف می‌سازد.

تقریباً همه گیاهان در شدتی از نور اشباع می‌شوند که تا حدودی کمتر از نور کامل خورشید و تقریباً ۱۰۰۰۰ فوت- کندل است. تک تک برگ‌ها در نوری برابر ۱۰۰۰ فوت- کندل یا کمتر (بسته به گونه گیاه) اشباع می‌شوند، ولی به علت سایه‌اندازی متقابل بر روی هم، برای اشباع کل گیاه چندین هزار فوت- کندل نور لازم است.

حفظ شدت فتوسنتز در حد مطلوب مستلزم فراهم ساختن مقادیر کافی نور، آب و گاز کربنیک است اگر هر یک از این مواد به حد کافی نباشد آنکه از همه کمتر است، عامل محدود کننده خواهد بود.

نور

انرژی نورانی با توجه به برخی از خواصش این طور به نظر می‌آید که به صورت امواج نوسانی در فضا پخش می‌شود. از جمله این خواص تجزیه نور سفید بعد از عبور از منشور می‌باشد که به طور قانع‌کننده‌ای فقط برحسب این اصل مسلم که نور به صورت موج حرکت می‌کند تشریح می‌شود. اما آثار دیگری از نور وجود دارد که براساس این اصل کاملاً غیر قابل درک است. مهمترین آنها فعل و انفعال فتوشیمیایی و نقش آن در فرآیند فتوسنتز است. این پدیده فقط با فرض اینکه نور ماهیت ذره‌ای دارد تشریح می‌شود پس یک ستون نور به صورت جریان ذرات بسیار کوچک تجسم می‌گردد. هر یک از ذرات یک فتون نامیده می‌شود. طول موج‌هایی که ازخورشید به سطح زمین می‌رسد، از $300nm$ در ماورای بنفش تا 2600_{nm} در مادون قرمز است. نور مرئی فقط بخش کوچکی از طیف انرژی نورانی را تشکیل می‌دهد که طول موج‌هایی که مرئی هستند از ۳۹۰ نانومتر در بنفش تا تقریباً ۷۶۰ نانومتر در قرمز دور است.



اگر نور تک رنگ (با طول موج‌های مختلف) پس از عبور از منشور روی برگ سبزی تابانیده شود و شدت فتوسنتز در طول موج‌های مختلف اندازه‌گیری شود. معلوم می‌گردد که نور آبی (نزدیک به ۴۲۰ نانومتر) و نور قرمز (۶۷۰ نانومتر) حداکثر و نور سبز (۶۰۰-۵۰۰ نانومتر) حداقل تأثیر را در فتوسنتز دارند.

رنگدانه‌ها

برای اینکه نور از نظر فتوشیمیایی مؤثر باشد باید جذب شود. مولکول‌هایی که قادرند نور مرئی را جذب کنند رنگدانه نام دارند. جذب یک کوانتوم نور (فتون) توسط رنگدانه، تابع طرح و توزیع الکترون در مولکول آن است. طول موج نور جذب شده به عواملی چون تعداد و موضع پیوندهای مضاعف و وجود حلقه‌های بنزن در مولکول رنگدانه بستگی دارد.

سبز رنگ عمده جهان گیاه است به ماده سبز رنگ گیاهان واژه کلروفیل اطلاق شده است و عملاً انواع مختلف کلروفیل در گیاهان وجود دارد.

کلروفیل شامل یک گروه ترکیبات است که بسیار شبیه هم می‌باشند: مولکول کلروفیل شامل یک مجموعه حلقه پورفیرین است که به آن یک زنجیر فیتیل $(C_{۲۰}H_{۳۹})$ بلند متصل است. حلقه پورفیرین از چهار هسته پیرول تشکیل شده که به هم متصلند و زنجیره‌های جانبی دارند. جزء فلزی مولکول، منیزیم در ترکیب این حلقه قرار دارد.

کلروفیل a عمومیت داشته و در همه موجودات فتوسنتزی غیر از باکتری‌های فتوسنتزی وجود دارد . کلروفیل b در همه گیاهان عالی و در جبک‌های سبز یافت می‌شود. کلروفیل C در جلبک‌های قهوه‌ای و دیاتومه‌ها که کلروفیل a وجود ندارد یافت می‌شود.

همه کلروفیل‌ها خاصیت فلورسانس از خود نشان می‌دهند یعنی وقتی در روشنایی قرار می‌گیرند نوری با طول موج دیگر که معمولاً طویل‌تر از نور جذبی است منعکس می‌کنند. زمانی که کلروفیل از برگ استخراج می‌شود دقیقاً در همان طول موج‌هایی که بیشترین تأثیر را در فتوسنتز دارند، مقادیر زیادی نور جذب می‌کند. این تشابه میان طیف جذبی کلروفیل و طیف کنش آن در فتوسنتز از مهمترین دلایل اثبات این است که کلروفیل رنگدانه عمده گیرندهٔ نور در فتوسنتز می‌باشد.

کاروتنوئیدهای زردرنگ که به مقدار زیاد در کلروپلاست وجود دارند و در جذب نور برای این فرآیند فعالیت می‌کنند. چون کاروتنوئیدها بدون کلروفیل نمی‌توانند در فتوسنتز فعال باشند، معمولاً فرض می‌شود که کاروتنوئید فعال شده در اثر نور انرژی جذب شده خود را به کلروفیل منتقل می‌سازد.

تنها جزء کوچکی از مولکول‌های کلروفیل عملاً در انتقال الکترون در فتوسنتز دخالت دارد سایر مولکول‌های کلروفیل گیرنده نامیده شده و به عنوان گردآوردندگان نور به کار می‌آیند.

عوامل مؤثر بر تولید و ساز و کار کلروفیل

۱) نور

در نهاندانگان تولید کلروفیل به نور نیاز دارد اما در جلبک‌ها، خزه‌ها سرخس‌ها و سوزنی برگ‌ها ساخته شدن کلروفیل در تاریکی مانند روشنایی انجام می‌شود هرچند به میزان کم تولید می‌شود در لپه‌های مرکبات و نشاء Nelumbo (ثعلبه باقالی) تولید کلروفیل در تاریکی نیز صورت می‌گیرد.

نشاءهای رشد کرده در تاریکی زرد رنگ بوده و حاوی مقدار کمی رنگدانه سبز به نام پروتو کلروفیل می‌باشند. تفاوت این ماده با کلروفیل a در این است که مولکول آن دو اتم هیدروژن کمتر دارد.

ظاهراً کلروفیل a از احیای پروتوکلروفیل حاصل می‌شود. نور شدید باعث تجزیه کلروفیل می‌شود.

۲) اکسیژن

در غیاب اکسیژن در نشاءهای بی رنگ کلروفیل تولید نمی‌شود حتی اگر سایر شرایط مناسب برای تولید کلروفیل باشد، تنفس هوازی برای ساخته شدن کلروفیل مورد نیاز است.

۳) کربوهیدرات‌ها:

در برگ‌هایی که در تاریکی قرار می‌گیرند و فاقد کربوهیدرات‌ها می‌باشند کلروفیل تولید نمی‌شود با قرار گرفتن برگ‌ها در محلول قند رنگ سبز در برگ‌ها تشکیل می‌شود.

۴) ازت

کمبود این عنصر باعث کند شدن تشکیل کلروفیل می‌شود چرا که ازت بخشی از مولکول کلروفیل است

۵) منیزیم

کمبود این عنصر که نقش ساختمانی در ساختار کلروفیل دارد موجب ایجاد نقاط کلروزی در برگ‌های مسن می‌شود.

۶) آهن

در اثر کمبود آهن کلروفیل در برگ‌ها ساخته نشده و برگ‌ها به رنگ زرد یا سفید درمی‌آیند.

۷) درجه حرارت

ساخت کلروفیل در هر درجه حرارتی در محدوده ۳۰-۴۸ درجه سانتی گراد صورت می‌گیرد با این حال بین ۲۶ و ۳۰ درجه سانتی گراد سریع‌تر صورت می‌گیرد.

در سیب زمینی ساخته شدن کلروفیل در محدوده دمایی ۱۱-۱۹ درجه صورت می‌گیرد.

۸) آب

خشک شدن بافت‌های برگ مانع از ساخته شده کلروفیل می‌شود و همچنین منجر به تخریب کلروفیل نیز می‌شود.

کاروتنوئیدها

این رنگدانه‌ها به رنگ‌های نارنجی، قرمز، زرد، و مایل به قهوه‌ای هستند. کاروتنوئیدهای برگ فقط در کلروپلاست وجود دارند. در باکتری‌ها در کروماتوفورها وجود دارند. در گلبرگ‌های گل‌ها کاروتنوئیدها در کلروپلاست یافت می‌شوند.

کاروتن فراوان‌ترین نوع کاروتنوئیدها می‌باشد که ویتامین A از آن حاصل می‌شود.

لیکوپن قرمز رنگ بوده و در گوجه فرنگی، فلفل قرمز و گلسرخ یافت می‌شود و ایزومر کاروتن است. گزانتوفیل‌ها زرد یا قهوه‌ای می‌باشند لوتین: فراوان‌ترین گزانتوفیل است.

کلروپلاست

پدیده فتوسنتز در کلروپلاست‌ها انجام می‌گیرد. کلروپلاست‌ها از اندامک‌های بزرگ سلول‌ها به شمار می‌آیند و بیضی شکل می‌باشند. طول هر کلروپلاست در حدود ۷/۵ و عرض آن ۳ میکرومتر می‌باشد. کلروپلاست حاوی دو غشاء بیرونی و درونی بوده و غشای درونی آن را تیلاکوئید می‌نامند. تیلاکوئیدها صفحاتی را تشکیل می‌دهند که به موازات محور طولی کلروپلاست قرار می‌گیرند. این صفحات در بعضی قسمت‌ها بر روی یکدیگر قرار گرفته و توده‌هایی را تشکیل می‌دهند که گرانا نامیده می‌شود. این یک گرانوم از تعدادی تیلاکوئید تشکیل شده است و در درون هر تیلاکوئید فضای خالی وجود دارد که لومن نامیده می‌شود فضای داخلی کلروپلاست و اطراف تیلاکوئیدها با مایعی پروتئینی که استروما نامیده می‌شود پر شده است، غشاء بیرونی کلروپلاست به موادی با حجم کوچک نفوذپذیر است اما غشاء درونی نفوذناپذیر است.

واکنش‌های روشنایی فتوسنتز در محل گرانا و واکنش تاریکی در استرومای کلروپلاست انجام می‌گیرد. نقش عمده کلروپلاست در فتوسنتز جذب و انتقال انرژی است.

واکنش‌های فتوسنتز

فتوسنتز از مجموعه صدها واکنش اکسیداسیون- احیا تشکیل یافته است. این واکنش‌ها را اغلب به دو گروه، یعنی واکنش‌های نوری و واکنش‌های تاریکی تقسیم می‌نمایند. انجام واکنش‌های نوری به وجود نور بستگی دارد اما به دما وابسته نیست. واکنش‌های تاریکی به نور بستگی ندارند اما به طور معمول در روشنایی نیز انجام می‌گیرند زیرا برای انجام آنها به ترکیبات تولید شده طی واکنش‌های نوری نیاز است. این ترکیبات عمر کوتاهی دارند و قابل ذخیره شدن نیستند، بنابراین اصطلاح واکنش تاریکی تنها نشانه آن است که نور به طور مستقیم در آنها دخالتی ندارد.

ویژگی منحصر به فرد فتوسنتز تبدیل انرژی نورانی به انرژی شیمیایی طی مرحله فتوشیمیایی فرآیند است.

واکنش‌های روشنایی

انرژی جذب شده توسط کلروفیل و سایر رنگدانه‌های فعال شده توسط نور، به مولکول‌های کلروفیل به نام «تله» در مراکز فعال شیمیایی انتقال می‌یابد. در نتیجه الکترون‌های به خصوصی به قدر کافی انرژی کسب می‌کنند که از مولکول کلروفیل تله جا شده به مولکول‌های مجاور به نام ناقلین الکترون انتقال یابند. با جریان هر الکترون در طول زنجیر ناقلین مقداری از انرژی آن به صورت انرژی شیمیایی درمی‌آید که صرف ساختن ATP از ADP و فسفات معدنی (P_i) می‌شود. مقادیر قابل توجهی انرژی (۱۰-۸ کیلو کالری به ازای هر مول) در این پیوند ذخیره می‌شود. تشکیل ATP از انرژی نور مرئی، فسفوریلاسیون نوری نام دارد.

واکنش‌های روشنایی در فتوسیستم‌ها انجام می‌گیرد و هر فتوسیستم مجموعه بزرگی از ترکیبات پروتئینی رنگدانه‌ها می‌باشد. این فتوسیستم‌ها شامل فتوسیستم یک (PSI) و فتوسیستم دو (PSII) می‌باشند.

حداکثر طول موج‌های دریافتی از طرف PSI در حدود ۷۰۰ نانومتر و برای PSII حدود ۶۸۰ نانومتر می‌باشد. به طوری که فتوسیستم یک را $P_{۷۰۰}$ و دو را $P_{۶۸۰}$ نیز می‌نامند.

فتوسیستم I تنها فتوسیستم در باکتری‌هاست، اکسیژن آزاد نمی‌کند و از آنجا که باکتری‌ها پست‌ترین موجودات اتوتروف وابسته به نور می‌باشند فتوسیستم I احتمالاً در اوایل دوره تکامل زیستی که اتمسفر زمین فاقد اکسیژن بوده غلبه داشته است. پدید آمدن فتوسیستم II طی تکامل، گیاهان را قادر ساخت که اکسیژن مولکولی را از آب جدا سازند.

PSI از کمپلکس کلروفیل a و پروتئین تشکیل شده و PSII از کمپلکس کلروفیل a، کلروفیل b و گزانتوفیل از نوع لوتین و پروتئین تشکیل شده است.

مرکز واکنش PSII و کلروفیل‌های گیرنده و پروتئین‌های ناقل الکترون مربوط به آن عمدتاً در مناطق متراکم تیغه گرانایی قرار دارند. مرکز واکنش PSI در رنگدانه‌ها و پروتئین‌های ناقل الکترون و نیز آنزیمی که تشکیل ATP را کاتالیز می‌کند فقط در تیغه استرومایی و انتهای تیغه گرانایی یافت می‌شوند، مولکول کلروفیل تله در فتوسیستم I، $P_{۷۰۰}$ نام دارد. جذب یک کوانتوم نور توسط $P_{۷۰۰}$ یکی از الکترون‌های آن را به حالت تهییج شده درمی‌آورد که توسط پروتئین حاوی آهن و گوگرد (Fes) گرفته شده و به ناقل دیگری به نام فرودوکسین منتقل می‌شود. الکترون سپس یکی از دو مسیر را طی می‌کند: یک مسیر (یعنی فسفوریلاسیون نوری چرخه‌ای) متضمن انتقال مجدد الکترون از فرودوکسین به $P_{۷۰۰}$ است که از طریق ناقل‌های میانی در این مسیر، شامل فلاووپروتئین‌های حاوی ویتامین $B_۲$ و سیتوکروم‌های هِم‌دار انجام می‌گیرد، در طول این مسیر، الکترون در پیوند دادن ADP به P_i به منظور تشکیل ATP مصرف می‌شود. در فسفوریلاسیون نوری چرخه‌ای اکسیژن آزاد نمی‌شود و تنها مسیر فتوسنتزی است که قادر به انجام وظیفه در نور تک رنگی به طول موج بیشتر از ۷۰۰ نانومتر است و در طول آن یک ATP تشکیل می‌شود و هیچ NADP + احیا نمی‌گردد.

وقتی روزنه‌ها باز بوده، نوری مخلوط از طول موج‌های مختلف توسط کلروپلاست جذب می‌شود. فتوسیستم یک و دو زوج شده، ترتیبی را که فسفوریلاسیون نوری غیر چرخه‌ای است ایجاد می‌کند.

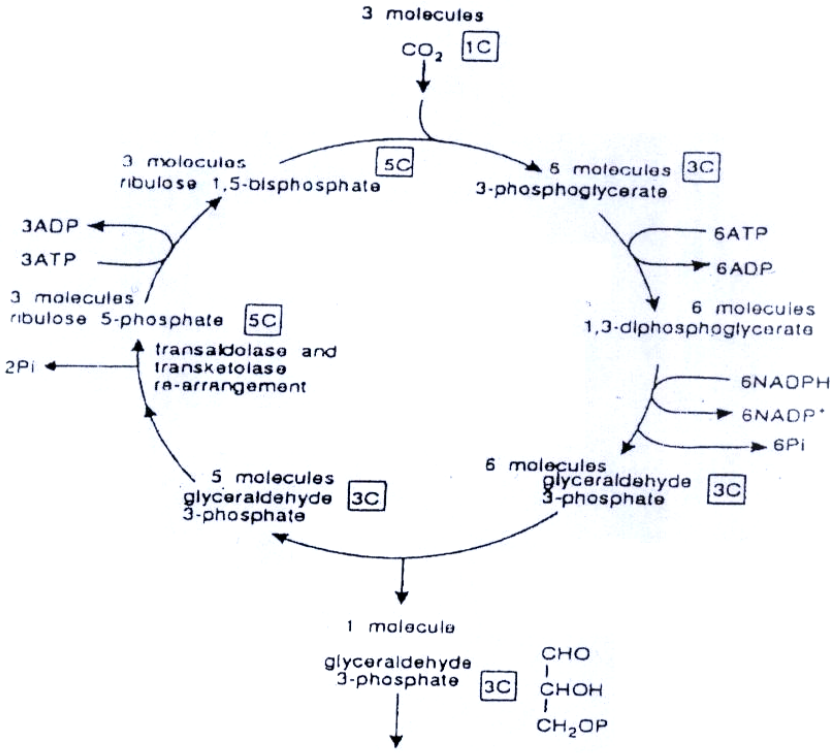
معمولاً برای احیای یک مولکول $CO_۲$ در واکنش تاریکی به سه مولکول ATP و دو مولکول NADPH نیاز می‌باشد. در واکنش‌های روشنایی چهار فتون به وسیله هر سیستم مصرف می‌شود که منجر به تولید یک مولکول $۲NADPH, O_۲$ و ۶ پروتون می‌گردد. از پروتون‌های تولید شده حداقل دو مولکول ATP حاصل می‌شود. زیرا برای تولید هر مولکول ATP به سه پروتون نیاز می‌باشد. بنابراین محصولات فتوفسفوریلاسیون غیر چرخه‌ای عبارتند از: یک مولکول $O_۲$، ۲NADPH و ۲ATP. پس برای تکمیل ۳ مولکول ATP مورد نیاز برای احیای $CO_۲$ به یک ATP تولید شده از فتوفسفوریلاسیون چرخه‌ای نیاز است.

واکنش‌های تاریکی

اکثر نهاندانگان، CO_2 را از طریق یک مکانیزم پایه مشابه، تحت عنوان چرخه احیای کربن فتوسنتزی C_3 (PCR)، به کربوهیدرات احیا می‌کنند. چرخه PCR به افتخار کاشف آن چرخه کالوین نامیده می‌شود. سایر مسیرهای متابولیکی کربن مربوط به تثبیت فتوسنتز CO_2، همچون چرخه کربن فتوسنتزی C_4 (PCA) می‌باشند.

مسیر احیای کربن در گیاهان C_3

اولین اسید آلی تولید شده در مسیر احیای گیاهان C_3 یک اسید سه کربنه به نام اسید فسفوگلیسیریک می‌باشد و بدین علت این گیاهان را C_3 می‌نامند. در سلول‌های مزوفیل گیاهان C_3 مولکول پذیرنده CO_2 یک ماده ۵ کربنه به نام ریبولوز بی فسفات بوده و کاتالیزور این واکنش آنزیم ریبولوز بی فسفات کربوکسیلاز است. CO_2 وارد شده به برگ گیاهان C_3 ابتدا توسط آنزیم کربنیک آن هیدراد به بی کربنات $\left(HCO_3^-\right)$ تبدیل شده و سپس وارد کلروپلاست می‌گردد. سه مولکول CO_2 به سه مولکول ریبولوز بی فسفات واکنش نشان داده و در نهایت ۶ مولکول گلیسرآلوئید ۳ فسفات حاصل می‌شود. در طی فرایند فوق ۶ مولکول ATP و ۶ مولکول NDPH مصرف می‌شود. از ۶ مولکول گلیسرآلدئید ۳ فسفات حاصل شده، یک مولکول برای تشکیل قند و نشاسته و ۵ مولکول با مصرف ۳ مولکول ATP برای بازسازی ریبولوز بی فسفات مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین در گیاهان C_3 برای احیای یک مولکول CO_2 به سه مولکول ATP و دو مولکول NADPH نیاز می‌باشد.

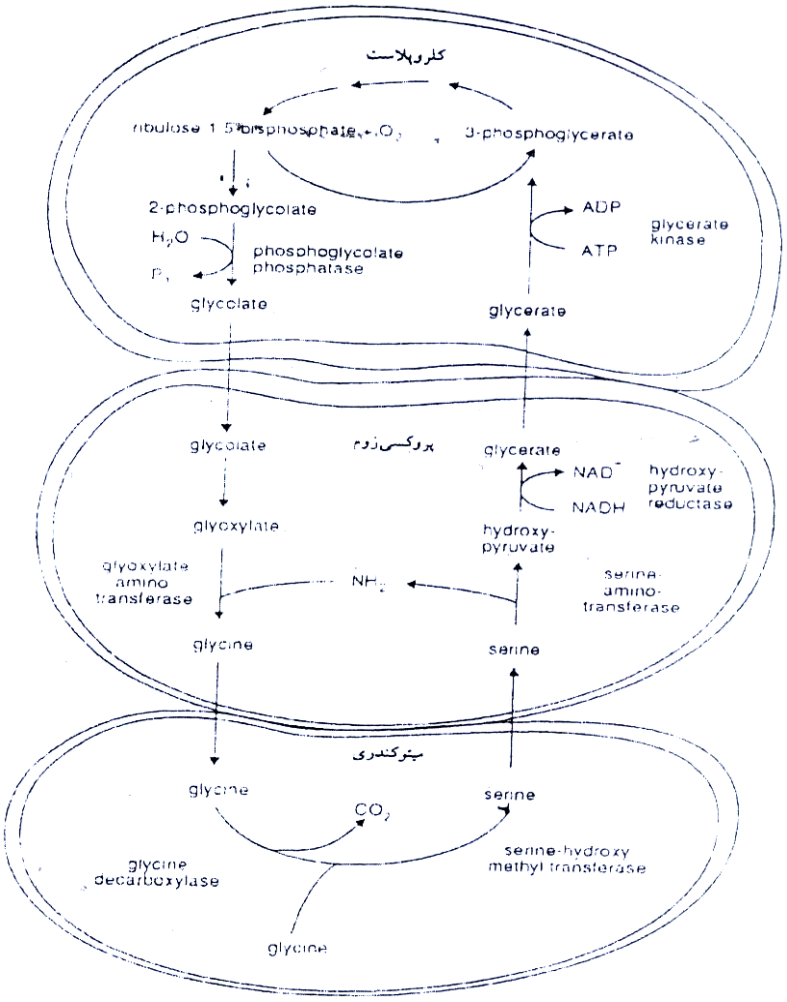


اسیدهای آمینه، چربی‌ها و قندها

نشاسته و ساکاروز از گلیسر آلدئید ۳- فسفات‌های اضافی که تریوز فسفات به شمار می‌آیند، ساخته می‌شود. در طی ساخته شدن نشاسته در کلروپلاست، دو مولکول تریوز فسفات برای تشکیل یک قند هگزوز یعنی فروکتور ۱ و ۶- بی فسفات ترکیب می‌شوند که پس از طی یک سری تغییرات منجر به تشکیل گلوکز- فسفات می‌گردد و این ترکیب در نهایت به نشاسته تبدیل می‌شود.

ریبولوز بی فسفات کربوکسیلاز می‌تواند به عنوان یک اکسیژناز عمل کند نام این آنزیم ریبولوز بی فسفات کربوکسیلاز / اکسیژناز می‌باشد که به صورت مخفف آن را رابیسکو می‌نامند. در این واکنش ریبولوز بی فسفات با اکسیژن ترکیب شده و در نتیجه یک مولکول ۳- فسفوگلیسرات و یک مولکول ۲- فسفو گلیکولات حاصل می‌شود. این پدیده تنفس نوری نامیده می‌شود و در گیاهان C_3 قابل مشاهده است. گلیکولات بوجود آمده در کلروپلاست به پروکسی زوم منتقل شده و پس از تبدیل آن به گلیسین، این ترکیب از

پروکسی‌زوم به میتوکندری انتقال می‌یابد. در میتوکندری گلیسین به سرین تبدیل می‌شود. برگشت سرین بـه پروکسـی زوم و تبـدیل آن به گلیسرات و انتقال آن به کلروپلاست و تبدیل به ۳- فسفوگلیسرات ادامه پدیده تنفس نوری می باشد.



در پدیده تنفس نوری O_2 مصرف شده CO_2 آزاد می‌گردد. بنابراین این چرخه را چرخه اکسیداسیونی کربن مربوط به تـنفس نوری C_2 (PCO) می‌نامند.

آزاد شدن CO_2 موجب کاهش وزن گیاه و نیز کاهش سرعت فتوسنتز می‌گردد. در چرخه تنفس نوری فقط سه چهـارم کـربن موجود در ۲- فسفو گلیکولات بازیافت می‌گردد. در ازای آزاد شدن هـر مولکـول CO_2 در پدیـده تـنفس نـوری، دو مولکـول O_2 مصرف می‌شود. با افزایش دما و نیز با افزایش میزان اکسیژن سرعت تنفس نوری افزایش می‌یابد.

مسیر احیای کربن در گیاهان C_4

مسیر احیای کربن در گیاهان C_4 را چرخه هاچ و اسلاک نیز می‌نامند. برخی گیاهان از جمله، ذرت، سـورگوم، نیشـکر، چمـن پوآ، برخی گیاهان تیره اسفناج و تاج خروس از این گیاهان به شمار می‌آیند.

در این گیاهان اولین اسید آلی تولید شده در مسیر احیای کربن، یک اسید آلی چهار کربنه می‌باشد و به همین دلیـل ایـن گیاهان C_4 نامیده می‌شوند. CO_2 ابتدا وارد حفره زیر روزنه می‌شود و از آنجا جذب سـلول‌هـای مزوفیـل بـرگ گردیـده و بـا فسفوانول پیروات (PEP) واکنش داده و اگزالواستات حاصل می‌شود. این واکنش را آنزیم فسفوانول پیرووات کربوکسیلاز کاتالیز می‌کند. سپس اگزالواستات بوسیله مالات دهیدروژناز وابسته به NADP به مالات احیا مـی‌شـود. مـالات از طریـق انتقـال درون سلولی وارد سلول‌های غلاف آوندی می‌شود. کلروپلاست سلول‌های غـلات آونـدی نسـبت بـه کلروپلاسـت‌هـای مزوفیـل بـرگ درشت‌تر بوده و فاقد گرانا می‌باشند، فعالیـت PSII ایـن کلروپلاسـت‌هـا پـایین بـوده و O_2 کمتـری آزاد مـی‌کننـد. مـالات در سلول‌های غلاف آوندی توسط آنزیم مالیک وابسته به NADP دکربوکسیله شده و در نتیجه به CO_2 و پیروات تبدیل می‌شـود.

پیرووات دوباره به سلول‌های مزوفیل برمی‌گردد. تا در چرخه کربوکسیلاسیون شرکت کند. CO_2 آزاد شده در سلول‌های غلاف آوندی نیز وارد چرخه کالوین می‌شود.

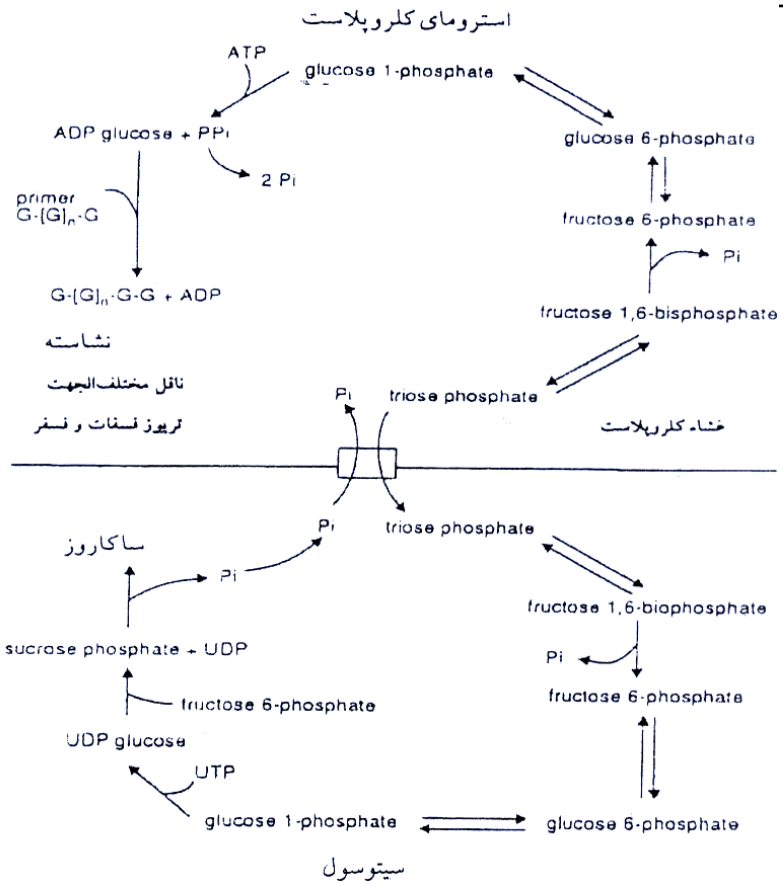
مسیر احیای کربن در گیاهان CAM

این مسیر احیای کربن برای اولین بار در گیاهان تیره کراسولاسه مشاهده گردید. برخی گیاهان از جمله کاکتوس‌ها، آگاو، آناناس، پیرومیا، برخی گیاهان تیره شمعدانی، افوربیا، ارکیده‌ها و نعناع نیز از گیاهان CAM به شمار می‌آیند. مسیر احیای کربن در این گیاهان شبیه گیاهان C_4 می‌باشد. اما در گیاهان C_4 محل تشکیل اسیدهای آلی از نظر مکانی جدا بوده و در مزوفیل برگ و سلول‌های غلاف آوندی حاصل می‌شوند. در گیاهان CAM اسیدهای آلی فقط در مزوفیل برگ تشکیل می‌شوند زیرا این نوع گیاهان فاقد غلاف آوندی می‌باشند. در گیاهان C_4 تشکیل اسیدهای آلی در مزوفیل برگ و سلول‌های غلاف آوندی هم زمان می‌باشد. اما در گیاهان CAM همزمان نبوده و جذب CO_2 در طی شب انجام می‌گیرد و CO_2 با فسفو انول پیرووات کربوکسیله شده و در واکوئل سلول‌ها ذخیره می‌شود. در طی روز مالات به سیتوسول انتقال یافته و در آنجا دکربوکسیلاسیون انجام می‌گیرد و در نتیجه پیرووات و CO_2 تولید می‌شود و CO_2 وارد چرخه کالوین می‌گردد. روزنه‌های گیاهان CAM در طی روز به دلیل وجود CO_2 در فضاهای بین سلولی بسته هستند. این امر موجب می‌شود که در طی روز خروج CO_2 یا بخار به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و قدرت رقابت گیاهان CAM در مناطق بیابانی بیشتر است.

میزان pH برگ گیاهان CAM در طی شب به علت تجمع اسیدهای آلی کاهش می‌یابد و در طی روز دوباره افزایش نشان می‌دهد اما میزان نشاسته در طی شب کاهش و در طی روز بر اثر فعالیت چرخه کالوین افزایش می‌یابد.

ویژگی‌های مهم گیاهان C_3، C_4 و CAM

C_3	C_4	CAM
آوندهای برگ‌ها دارای غلاف ناقص یا فاقد غلاف	آوندهای برگ‌ها حاوی غلاف آوندی	فاقد غلاف آوندی
پراکنش کلروپلاست در برگ‌ها مساوی	تعداد کلروپلاست در سلول‌های غلاف آوندی بیشتر و کلروپلاست‌ها درشت‌تر از کلروپلاست‌های مزوفیل برگ	کلروپلاست‌ها اکثراً در طبقات بالایی سلول‌های مزوفیل برگ
برگ‌ها دارای یک نوع کلروپلاست حاوی گرانا	کلروپلاست‌های مزوفیل برگ کوچکتر و دارای گرانا اما کلروپلاست‌های غلاف آوندی درشت‌تر و فاقد گرانا	برگ‌ها دارای یک نوع کلروپلاست حاوی گرانا
نسبت کلروفیل a به b سه به یک یا کمتر	نسبت کلروفیل a به b چهار به یک	نسبت کلروفیل a به b سه به یک یا کمتر
دارای تنفس نوری	فاقد تنفس نوری	فاقد تنفس نوری
روزنه‌ها در طی روز کاملاً باز	روزنه‌ها در طی روز نیمه باز	روزنه‌ها در طی روز بسته
تعرق بالا	تعرق متوسط	کمترین تعرق
کارایی مصرف آب (WUE) کمتر از دو گروه دیگر	-	-
بازده متوسط فتوسنتز	بازده بالای فتوسنتز	بازده کمتر فتوسنتز نسبت به دو گروه قبل
سرعت متوسط رشد محصول و عملکرد (CGR)	سرعت بالای رشد محصول و عملکرد بالا	سرعت کم رشد محصول و عملکرد پایین
کمترین مقاومت روزنه‌ای به دلیل باز بودن روزنه‌ها در طول روز	مقاومت روزنه‌ای متوسط	بیشترین مقاومت روزنه‌ای در طول روز
بومی مناطق سرد و مرطوب و مقاوم به سرما	بومی مناقط گرم و مرطوب	بومی مناطق گرم و خشک
دمای مناسب برای فتوسنتز $^{\circ}C$ ۲۵ – ۳۰	قادر به فتوسنتز در دمای بالاتر	قادر به فتوسنتز در دماهای بالاتر



واکنش‌های بیوسنتز نشاسته و ساکارز

سؤالات چهار گزینه‌ای فصل اول

۱- نور قرمز (R) توسط کدام یک از رنگدانه‌ها جذب می‌شود؟ **(سراسری ۸۲)**

۱) P_{F_r} ۲) P_r ۳) P_r و P_{F_r} ۴) فیکواریترین

۲- روش کلروفیل فلورسنس (Chlorophyll Fluorescence) بر مبنای تخریب کلروفیل از طریق جذب نور در ..... صورت می‌گیرد. **(سراسری ۸۶)**

۱) فتوسیستم II ۲) فتوسیستم I ۳) غشای کلروپلاست ۴) استرومای کلروپلاست

۳-کلروفیل در حین پخته شدن سبزی به کدام یک از ترکیبات زیر تبدیل می‌شود؟

۱) آنتوسیانین ۲) فئوفایتین ۳) فلاونوئید ۴) فئوفورباید

۴- فایتوکروم نوع P_{F_r} تحت تأثیر کدام نور به وجود می‌آید؟ **(سراسری ۸۶)**

۱) نور قرمز دور ۲) نور با طول موج ۷۳۰ نانومتر ۳) نور قرمز ۴) نور با طول موج ۴۶۰ نانومتر

۵- اگر ضمن تخریب مولکول کلروفیل Mg^{2+} از ساختمان آن جدا شود ترکیبی به نام ..... تشکیل می‌شود.

۱) فئوفایتین ۲) فیتول ۳) کلروفیلید ۴) فئوفورباید

۶- کدام اسید حاصل از چرخه TCA در سنتز کلروفیل دخالت می‌کند؟ **(سراسری ۸۷)**

۱) اگزالیک ۲) پیرونیک ۳) گلیکولیک ۴) سوکسنیک

۷- در اثر جدا شدن Mg^{++} از مولکول کلروفیل در محیط اسیدی کدام ماده حاصل می‌شود؟

۱) فایتول قهوه‌ای ۲) فئوفایتین زیتونی ۳) فئوفایتین قهوه‌ای ۴) فئوفورباید قهوه‌ای

۸- کدام گزینه در مورد فتوسنتز صحیح نیست؟

۱) در نقطه جبران CO_2 شدت ظاهری فتوسنتز صفر است.
۲) شدت ظاهری فتوسنتز همان شدت غیر واقعی فتوسنتز است.
۳) شدت کلی فتوسنتز همان شدت خالص فتوسنتز است.
۴) شدت کلی فتوسنتز همان شدت حقیقی فتوسنتز است.

۹- منظور از تشعشع فعال فتوسنتزی (Photosyntheticaly active) چیست؟ **(سراسری ۸۸)**

۱) نور آبی ۲) نور قرمز
۳) نور قرمز و آبی ۴) بخش مرئی طیف نور یعنی بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر

پاسخنامه سؤالات چهار گزینه‌ای فصل اول

۱- گزینه ۲ صحیح است.

۲- گزینه ۱ صحیح است.

در این روش کلروفیل در اثر جذب نور در فتوسیستم ۲ تخریب می‌شود.

۳- گزینه ۲ صحیح است.

۴- گزینه ۳ صحیح است.

۵- گزینه ۱ صحیح است.

۶- گزینه ۴ صحیح است.

۷- گزینه ۲ صحیح است.

فئوفایتین مولکول کلروفیل فاقد Mg^{++} می‌باشد که در شرایط اسیدی زیتونی رنگ است.

۸- گزینه ۳ صحیح است.

در نقطه جبران CO_2 مواد حاصل از فتوسنتز، صرف تنفس شده و شدت ظاهری تنفس صفر است. شدت ظاهری همان شدت غیرواقعی تنفس بوده و شدت حقیقی فتوسنتز شدت کلی آن است.

۹- گزینه ۴ صحیح است.

فصل دوم

تنفس

عناوین اصلی

- مسیر گلیکولیز
- چرخه تری‌کربوکسیلیک اسید
- زنجیره انتقال الکترون
- کسر تنفسی
- سرعت تنفس
- طبقه‌بندی محصولات براساس الگوی تنفس
- عوامل مؤثر بر سرعت تنفس

فصل دوم

تنفس

تنفس هوازی: تنفس هوازی یک فرایند بیولوژیکی می‌باشد که به وسیله آن ترکیبات آلی احیا شده به روش کنترل شده اکسیده می‌شوند.

$$C_۶H_{۱۲}O_۶ + ۶O_۲ + ۶H_۲O + ۳۲ADP + ۳۲P_i \rightarrow ۶CO_۲ + ۱۲H_۲O + ۳۲ATP$$

واکنش‌های مربوط به تنفس شامل مراحل گلیکولیز، چرخه تری کربوکسیلیک اسید (TCA) و زنجیره انتقال الکترون می‌باشد.

مرحله گلیکولیز توسط برخی از آنزیم‌ها و در سیتوسول میتوکندری انجام می‌شود. مرحله تری کربوکسیلیک و زنجیره انتقال الکترون در میتوکندری به وقوع می‌پیوندد. تمامی کربن وارد شده به مسیر تنفس به صورت $CO_۲$ درنمی‌آید بلکه امکان تولید ترکیبات حد واسط در مسیرهای گلیکولیز و چرخه TCA فراهم می‌گردد.

۱) مسیر گلیکولیز

اولین مرحله تنفس مسیر گلیکولیز می‌باشد که آن را مسیر EMP نیز می‌نامند. این مرحله بدون نیاز به $O_۲$ انجام می‌شود بنابراین می‌تواند روشی برای تولید انرژی در بافت‌های گیاهی مواجه با کمبود اکسیژن باشد. دو مولکول ATP به ازای هر مولکول گلوکز حاصل می‌شود محصول نهایی این مسیر دو مولکول NADH، دو مولکول ATP و دو مولکول پیرووات می‌باشد.

۲) چرخه تری کربوکسیلیک اسید

این چرخه در میتوکندری انجام می‌گیرد. میتوکندری حاوی یک غشاء خارجی و غشاء داخلی چین خورده بنام کریستا می‌باشد حد فاصل دو غشاء را ماتریکس می‌نامند.

چرخه TCA در ماتریکس انجام می‌گیرد. هر مولکول پیرووات حاصل از مسیر گلیکولیز پس از واکنش NADH، اسید استیک تولید می‌کند و آنزیم این واکنش پیرووات دهیدروژناز می‌باشد که ابتدا پیرووات را به استیل کوآنزیم A تبدیل کرده سپس آنزیم سیترات سنتاز آن را به سیترات تبدیل می‌کند.

سیترات تولید شده به ایزوسیترات تبدیل می‌شود. سوکسینیل- کوآنزیم A توسط آنزیم سوکسینیل- کوآنزیم A سنتاز موجب ساخته شدن یک مولکول ATP می‌شود این واکنش از نوع فسفوریلاسیون سوبسترایی می‌باشد. در پایان این چرخه، اگزالواستات حاصل می‌شود و این ماده مجدداً با یک استیل کوآنزیم A ترکیب شده و چرخه ادامه می‌یابد. در اکسیداسیون مرحله‌ای پیرووات، در چرخه TCA، سه مولکول $CO_۲$، چهار مولکول NADH، یک مولکول فلاوین آدنین دی نوکلئوتید احیا شده $(FADH_۲)$ و یک مولکول ATP حاصل می‌شود. با درنظر گرفتن دو مولکول پیروات بوجود آمده در مسیر گلیکوزی جمعاً هشت مولکول NADH، دو مولکول $FADH_۲$، دو مولکول ATP و شش مولکول $CO_۲$ ساخته می‌شود.

۳) زنجیره انتقال الکترون

هر مولکول که از طریق مسیر گلیکولیز و چرخه TCA اکسیده می‌شود دو مولکول NADH در سیتوسول و هشت مولکول NADH و دو مولکول $FADH_2$ در ماتریکس میتوکندری حاصل می‌شود. این ترکیبات احیا شده از طریق ناقلین الکترون (سیتوکروم a، b و c) اکسیده می‌شوند و الکترون‌ها به اکسیژن که آخرین گیرنده الکترون در تنفس می‌باشد منتقل شده موجب احیای آن به مولکول آب می‌گردند اکسیداسیون کامل یک مولکول گلوکز منجر به تشکیل چهار مولکول ATP به وسیله فسفوریلاسیون سوبستراتی (دو مولکول طی گلیکولیز و دو مولکول در چرخه TCA) می‌شود و در حین اکسیداسیون ۱۰ مولکول NADH و دو مولکول $FADH_2$ جمعاً ۲۸ مولکول ATP تشکیل می‌شود. بنابراین ۳۲ مولکول ATP از اکسیداسیون یک مولکول گلوکز حاصل می‌شود.

کسر تنفسی

کسر تنفسی (RQ) یا ضریب تنفسی عبارت از میلی گرم CO_2 تولید شده به میلی گرم O_2 مصرف شده در بافت‌های گیاهی می‌باشد. آگاهی از شاخص کسر تنفسی می‌تواند تا اندازه‌ای نوع سوبسترای مصرف شده را مشخص نماید. کسر تنفسی اندام‌هایی که مواد ذخیره‌ای آنها را نشاسته تشکیل می‌دهد حدود ۱ می‌باشد. اگر سوبسترای تنفسی، لیپیدها، پروتئین‌ها، یا دیگر ترکیبات بسیار احیا شده باشند، کسر تنفسی کمتر از ۱ خواهد بود.

سرعت تنفس

سرعت تنفس محصولات گیاهی را که بلافاصله بعد از برداشت تا چند ساعت بعد از آن تعیین می‌شود، سرعت اولیه تنفس می‌گویند. سرعت اولیه تنفس در محصولات گیاهی مختلف بسیار متفاوت است. این تغییرات در دمای ۱۵ درجه از ۱۰ میلی گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم در ساعت برای سیب‌زمینی، تا نزدیک ۳۰ برابر این مقدار در کلم بروکلی است.

سرعت تنفس ربطی به میزان ذخیره غذایی گیاه ندارد.

اگر محصولات براساس ساختمان گیاهی طبقه‌بندی شوند، رابطه نزدیکی بین ساختمان و سرعت تنفس آنها مشاهده می‌شود. این طبقه‌بندی محصولات کشاورزی را در سه گروه با سرعت تنفس زیاد، کم و متوسط قرار می‌دهد:

۱- اندام‌های جوان مانند مارچوبه و گل‌های جوان مثل کلم بروکلی و دانه‌های در حال نمو مثل نخود سبز و میوه‌های نارس مانند ذرت شیرین و بامیه، سرعت تنفس زیادی دارند.

۲- اندام‌های ذخیره‌ای مانند ریشه‌ها (سیب‌زمینی شیرین)، غده‌ها (سیب زمینی) و پیازها دارای سرعت تنفس کم می‌باشند.

۳- میوه‌های نارس مانند خیار و بیشتر سبزی‌های برگی سرعت متوسط دارند.

در گروه سبزی‌های برگی اسفناج بیشترین سرعت تنفس و کلم کمترین سرعت را دارا می‌باشد.

سرعت اولیه تنفس (گرمای تولید شده برحسب بی‌تی‌یو بر تن در روز) در تعدادی از سبزی‌ها در دماهای مختلف

محصول	دما (درجه سانتی‌گراد)				
	صفر	۴/۵	۱۰	۱۵	۲۰
آرتیشو	۹۹۰۰	۱۳۲۰۰	۲۱۶۰۰	۳۱۹۰۰	۵۱۳۰۰
مارچوبه	۱۷۶۰۰	۳۰۰۰۰	۷۶۰۰۰	۷۲۰۰۰	۱۱۰۰۰۰
لوبیا سبز	۴۴۰۰	–	۱۲۸۰۰	۲۰۵۰۰	۲۸۶۰۰
چغندر قرمز	۱۶۰۰	۲۱۰۰	۳۰۰۰	۵۱۰۰	–
کلم بروکلی	–	۱۶۰۰۰	–	۶۴۰۰۰	–
کلم فندقی	۵۳۰۰	۱۰۷۰۰	۱۸۶۰۰	۲۳۵۰۰	–
هویج	–	۴۳۰۰	۶۹۰۰	۸۷۰۰	۱۵۵۰۰
کرفس	۱۶۰۰	۴۰۰	–	۸۲۰۰	۱۴۲۰۰
خیار	–	–	–	۷۳۰۰	۱۰۶۰۰
سیر	۶۶۰	۱۳۰۰	۲۰۰۰	۲۴۰۰۰	۲۲۰۰
کاهو پیچ	۳۷۰۰	۴۴۰۰	۸۸۰۰	۹۰۰۰	۱۳۲۰۰
کاهو باز	–	۶۴۰۰	۸۶۰۰	۱۳۸۰۰	۲۲۱۰۰
خربزه	–	۲۰۰۰	۳۴۰۰	۷۹۰۰	۱۰۶۰۰
بامیه	–	–	۱۹۰۰	۳۲۱۰۰	۵۷۴۰۰
پیاز (خشک)	–	۷۵۰	۱۶۰۰	۲۴۰۰	۳۷۰۰
پیازچه	۴۲۰۰	۶۲۰۰	۱۱۴۰۰	۱۹۶۰۰	۲۷۷۰۰
فلفل شیرین	–	۲۲۰۰	۳۲۰۰	۵۰۰۰	۹۶۰۰
سیب‌زمینی	–	۱۳۰۰	۲۲۰۰	۲۶۰۰	۳۵۰۰
تربچه، بدون برگ	۲۱۰۰	۲۹۰۰	–	۹۳۰۰	۱۲۷۰۰
تربچه با برگ	۳۸۰۰	۴۶۰۰	–	۱۷۱۰۰	۳۰۰۰۰
اسفناج	–	۱۰۱۰۰	۲۴۳۰۰	۳۹۳۰۰	۵۰۶۰۰
ذرت شیرین	–	۱۷۱۰۰	۲۴۶۰۰	۳۵۸۰۰	۶۳۴۰۰
گوجه فرنگی- سبز	–	۱۵۴۰	۳۳۰۰	۴۵۰۰	۷۶۰۰
هندوانه	–	۸۰۰	۱۵۶۰	–	۴۷۰۰

طبقه‌بندی محصولات براساس الگوی تنفس

میوه‌ها و سبزی‌های در حال رشد و نمو از تنفس بالا در واحد وزن برخوردار می‌باشند و میزان تنفس به طور هماهنگ با رسیدن محصول تدریجاً کاهش می‌یابد.

علت عمده کاهش تنفس در دوره بزرگ شدن سلول‌ها ناشی از تجمع سریع آب در سلول‌ها، کاهش نسبت سطح بر حجم میوه، کاهش تبادلات گازی محصول و در ضمن ضخیم شدن لایه کوتیکول بر روی اپیدرم می‌باشد.

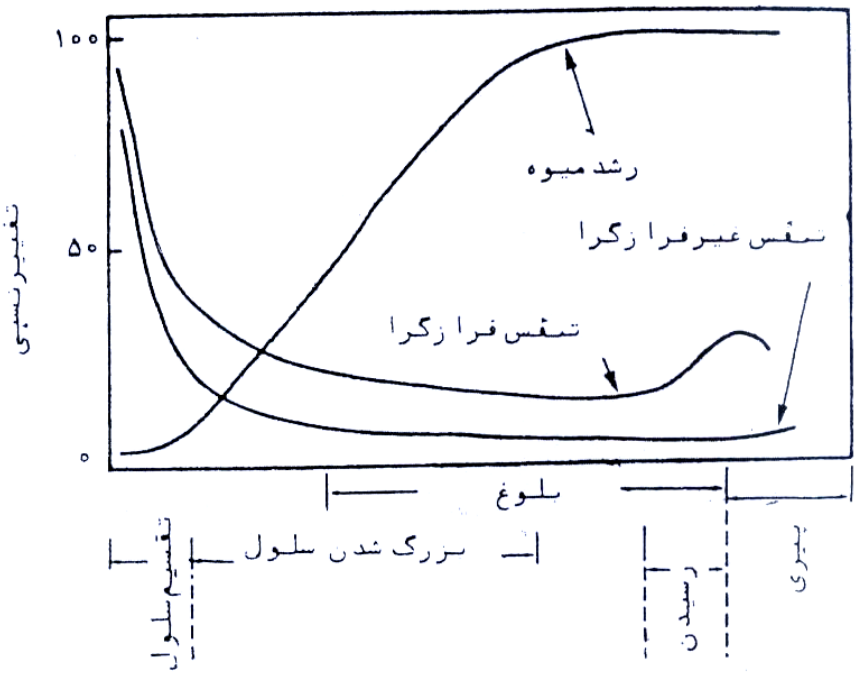
در برخی از میوه‌ها در مراحل رسیدن میوه شدت تنفس افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. افزایش تنفس در مرحله رسیدن محصول، به تنفس فرازگرا معروف می‌باشد.

در این مرحله میزان تنفس محصول افزایش یافته و به اوج تنفسی می‌رسد. میزان اوج تنفسی و مدت آن به جنس، گونه گیاهی و شرایط محیطی بستگی دارد. میوه‌هایی که هنگام رسیدن دارای اوج تنفسی می‌باشند میوه‌های فرازگرا نامیده می‌شوند.

تنفس فرازگرا و رسیدن کامل محصول ممکن است بعد از جدا شدن میوه از گیاه و یا هنگامی که روی گیاه می‌باشد انجام گیرد. به طور استثنا در میوه‌های آواکادو، اوج تنفسی بعد از برداشت محصول اتفاق می‌افتد.

رسیدن بعد از برداشت در میوه‌های فرازگرا امکان برداشت میوه را قبل از رسیدن کامل برای حمل و نقل راحت‌تر و نگهداری طولانی مدت در انبار را فراهم می‌سازد.

برخی محصولات از جمله آناناس، مرکبات، توت فرنگی و سبزی‌های برگی هنگام رسیدن، فاقد اوج تنفسی بوده و محصولات نافرازگرا می‌باشد.



نمودار تنفس فرازگرا و غیر فرازگرا در مرحله رسیدن

در مرحله اوج تنفسی اکثر اسیدهای آلی وارد چرخه تنفسی می‌شوند و کسر تنفسی به بیش از یک افزایش می‌یابد: رسیدن میوه را اتیلن داخلی محصول کنترل می‌کند. بنابراین اوج تنفسی با اتیلن داخلی رابطه مستقیم داشته و با تأمین انرژی لازم برای رسیدن میوه رابطه غیر مستقیم دارد. میزان تولید اتیلن در میوه‌های فرازگرا بیشتر از میوه‌های نافرازگراست.

طبقه‌بندی برخی از محصولات براساس الگوی تنفسی

محصولات فرازگر		محصولات نافرازگر	
سیب	آواکادو	گیلاس	پرتغال
گلابی	موز	آلبالو	نارنگی ساتسوما
به	میوه گل ساعتی	انگور	لیمو
زردآلو	خرمالو	توت فرنگی	گریپ فروت
هلو	انجیر	تمشک	کاکائو
گوجه	کیوی فروت	انار	خیار
آلو	سنجد	خرما	سبزی‌های برگ
خربزه درختی	گوجه فرنگی	آناناس	بامیه
انبه	هندوانه	زیتون	بادمجان
گواوا	خربزه	ذغال اخته آبی	فلفل
فی جوآ		لایم	نخود سبز

زمان مناسب برداشت میوه‌های فرازگرا برای نگهداری در انبار، هنگام بلوغ فیزیولوژیکی می‌باشد.