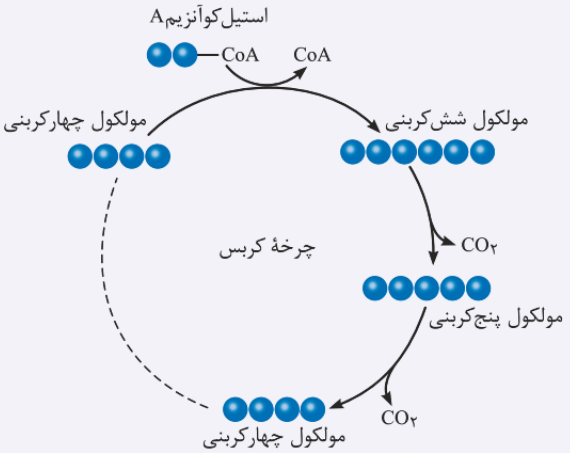
- **چرخهٔ کربس**
  - **الف** نقش: اکسایش استیل‌کوآنزیم A تا حد مولکول‌های CO_2
  - **ب** **محل انجام در هوهسته‌ای‌ها:** بخش داخلی راکیزه
  - **پ** **محل انجام در پیش‌هسته‌ای‌ها:** سیتوپلاسم
  - **ت** وقایع
    - (۱) آزاد شدن کوآنزیم A
    - (۲) آزاد شدن $2CO_2$ در دو مرحلهٔ مختلف
    - (۳) تولید NADH، $FADH_2$ و ATP در مراحل مختلف
- **زنجیرهٔ انتقال الکترون**
  - **الف** نقش: تولید ATP با استفاده از حامل‌های الکترون
    - (۱) NADH
    - (۲) $FADH_2$
  - **ب** محل: غشای درونی راکیزه (در هوهسته‌ای‌ها)
  - **پ** روش تولید ATP: اکسایشی
  - **ت** نحوهٔ عملکرد
    - (۱) جدا شدن الکترون پرانرژی از حامل‌های الکترونی (NADH و $FADH_2$)
    - (۲) پمپ یون‌های H^+ از بخش داخلی به بخش خارجی راکیزه با استفاده از انرژی الکترون
    - (۳) بازگشت یون‌های H^+ به بخش داخلی راکیزه
    - (۴) تولید ATP با استفاده از انرژی حاصل از بازگشت یون‌های H^+
- **تنظیم تنفس یاخته‌ای**
  - **الف** تولید ATP در یاخته‌های متفاوت و متناسب با نیاز بدن فرق می‌کند.
  - **ب** در شرایط بهینهٔ آزمایشگاهی در یاخته‌های یوکاریوتی حداکثر ۳۰ ATP به ازای تجزیهٔ کامل گلوکز

اصل مطلب

- مولکول گلوکز در **تنفس هوازی**، باید تا حد مولکول‌های CO_2 تجزیه شود. تجزیهٔ گلوکز در سه مرحله انجام می‌شود: ۱ قندکافت ۲ اکسایش پیرووات (تبدیل پیرووات به استیل‌کوآنزیم A) ۳ چرخهٔ کربس.
- انرژی حاصل از تجزیهٔ گلوکز، صرف ساختن ATP و **حامل‌های الکترون** (NADH و $FADH_2$) می‌شود.

مراحل چرخهٔ کربس:



مرحلهٔ اول: استیل‌کوآنزیم A با مولکول **چهارکربنی** ترکیب می‌شود. ضمن این واکنش، **کوآنزیم A** آزاد و مولکولی **شش‌کربنی** تولید می‌شود.

مرحلهٔ دوم: مولکول شش‌کربنی با از دست دادن یک مولکول CO_2، به مولکول **پنج‌کربنی** تبدیل می‌شود. در این مرحله، یک مولکول NADH و یون هیدروژن (H^+) نیز تولید می‌شود.

مرحلهٔ سوم: مولکول پنج‌کربنی با از دست دادن یک مولکول CO_2، به مولکول **چهارکربنی** تبدیل می‌شود. در این مرحله نیز، یک مولکول NADH و یون هیدروژن (H^+) تولید می‌شود.

مراحل بعدی: طی مراحل بعدی، مولکول چهارکربنی با تغییراتی به مولکول چهارکربنی **شروع کنندهٔ چرخه** تبدیل می‌شود.

- در واکنش‌های چرخهٔ کربس، ATP، NADH و $FADH_2$ در **مراحل متفاوتی از چرخه** تشکیل می‌شوند.

دقت کنید: در شروع چرخهٔ کربس، ماده‌ای که با مولکول چهارکربنی واکنش می‌دهد **استیل‌کوآنزیم A** است (نه استیل!). در واقع وجود کوآنزیم A برای عملکرد آنزیمی که این واکنش را انجام می‌دهد ضروری است و پس از انجام واکنش، **کوآنزیمA** آزاد و ترکیب شش‌کربنی تولید می‌شود.

۱ چرخهٔ کربس با ورود **استیل‌کوآنزیم A** آغاز می‌شود اما مولکول **آغازگر** چرخهٔ کربس، **ترکیب چهارکربنی** است.

۲ **ویژه** اولین محصول چرخهٔ کربس، مولکول **شش‌کربنی** است اما اولین ماده‌ای که از چرخهٔ کربس خارج می‌شود، **کوآنزیم A** است.

۳ FAD نوعی حامل الکترون است که **دو نوکلئوتید آدنین‌دار** دارد. $FADH_2$ از FAD به اضافه الکترون و پروتون تشکیل می‌شود. FAD با گرفتن الکترون **کاهش** و $FADH_2$ با از دست دادن الکترون **اکسایش** می‌یابد. واکنش ساخته شدن FAD و $FADH_2$ به یکدیگر به‌صورت زیر است:

$$FAD + 2H^+ + 2e^- \rightleftarrows FADH_2$$

۴ مولکول‌های NADH در قندکافت، اکسایش پیرووات و چرخهٔ کربس تولید می‌شوند اما $FADH_2$ فقط در **چرخه کربس** تولید می‌شود. مولکول‌های NADH و $FADH_2$ برای تولید ATP مصرف می‌شوند.

۵ مولکول NADH دو الکترون با خود حمل می‌کند. برای تبدیل NAD^+ به NADH، دو اتم هیدروژن مصرف می‌شود. NAD^+ با دریافت دو الکترون و یک یون هیدرون به NADH تبدیل می‌شود.

۶ مولکول $FADH_2$ همانند NADH، دو الکترون با خود حمل می‌کند. دقت کنید که هنگام تولید $FADH_2$ برخلاف NADH **یون هیدروژن** تولید نمی‌شود.

۷ به ازای هر مولکول گلوکز که قندکافت را آغاز می‌کند، چرخهٔ کربس **دو بار** انجام می‌شود. چون از گلوکز، دو مولکول پیرووات ایجاد و هر یک از آن‌ها به یک استیل‌کوآنزیم A تبدیل می‌شود.

۸ انجام چرخهٔ کربس می‌تواند منجر به افزایش فعالیت آنزیم **کربنیک‌انیدراز** شود؛ چون با انجام این چرخه، **کربن‌دی‌اکسید** آزاد می‌شود و کربن‌دی‌اکسید باید از بافت‌ها دور شود. در خون، آنزیم کربنیک‌انیدراز گویچه‌های قرمز، مقداری از کربن‌دی‌اکسید را با آب ترکیب می‌کند.

۹ در تنفس هوازی، همزمان با آزاد شدن هر مولکول کربن‌دی‌اکسید، دو الکترون از ترکیب آلی به **پذیرندهٔ الکترون** (NAD^+) منتقل می‌شود و آن را به **حامل الکترون** (NADH) تبدیل می‌کند.

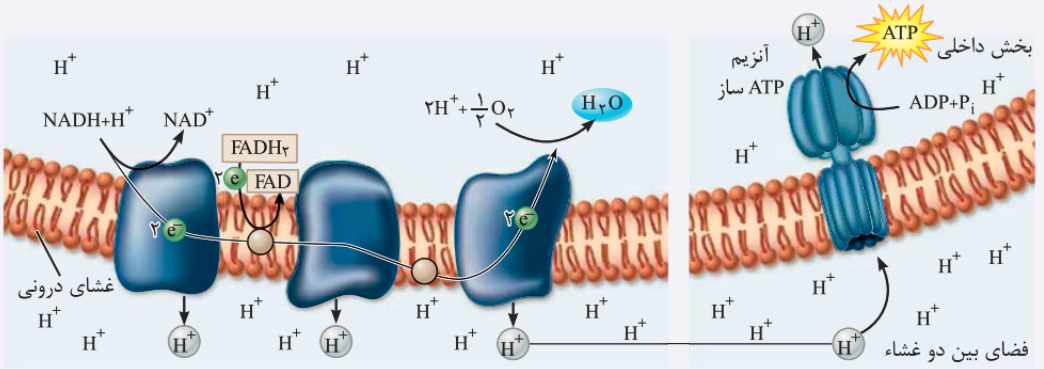
۱۰ بیشتر کربن‌دی‌اکسید تولید شده در طی تنفس یاخته‌ای هوازی، مربوط به **چرخهٔ کربس** است.

زنجیره انتقال الکترون

اصل مطلب

- این زنجیره از مولکول‌هایی تشکیل شده است که در **غشای درونی راکیزه** قرار دارند و می‌توانند الکترون بگیرند یا از دست بدهند. مولکول‌های حامل الکترون (NADH و $FADH_2$) توسط زنجیرهٔ انتقال الکترون **اکسایش** می‌یابند و الکترون‌های پرانرژی آزاد می‌کنند. برخی اجزای زنجیره از انرژی این الکترون‌ها برای انتقال فعال **یون‌های هیدروژن** از بخش داخلی به **فضای بین دو غشای راکیزه** استفاده می‌کنند. این عمل تراکم یون‌های هیدروژن در فضای بین دو غشا را افزایش می‌دهد و هنگامی که این یون‌ها در جهت شیب غلظت خود به بخش داخلی باز می‌گردند، ATP تولید می‌شود.

در این زنجیره، الکترون‌ها در نهایت به اکسیژن مولکولی می‌رسند و اکسیژن با گرفتن الکترون به **یون اکسید** (اکسیژن با دو بار منفی) تبدیل می‌شود. یون‌های اکسید در ترکیب با پروتون‌هایی که در بخش داخلی راکیزه قرار دارند، مولکول‌های آب را تشکیل می‌دهند.



۱۱ انتقال فعال یون‌های هیدروژن در غشای درونی راکیزه، با استفاده از **انرژی الکترون** انجام می‌شود (نه ATP).

۱۲ در غشای درونی راکیزه، زنجیره‌های انتقال الکترون متعدد با عملکرد یکسان وجود دارد. همچنین غشای درونی راکیزه، تعداد زیادی نیز آنزیم ATP ساز دارد.

۱۳ **نحوهٔ تولید ATP :**

(۱) مولکول NADH توسط **اولین عضو** زنجیرهٔ انتقال الکترون، به NAD^+ ، $2e^-$ و H^+ تبدیل می‌شود.

(۲) ضمن عبور الکترون‌ها از زنجیرهٔ انتقال، در **سه محل** از این زنجیره، از انرژی الکترون‌ها برای پمپ کردن (انتقال فعال) **یون‌های هیدروژن** از بخش داخلی به فضای بین دو غشا (بخش خارجی) استفاده می‌شود.

(۳) تراکم یون‌های هیدروژن در فضای بین دو غشا، بیشتر از بخش داخلی است. با **انتقال فعال** یون‌های هیدروژن، تراکم این یون‌ها **بیشتر** هم می‌شود. این یون‌ها تمایل دارند در جهت شیب غلظت خود به **بخش داخلی** بازگردند.

(۴) بازگشت یون‌های هیدروژن از فضای بین دو غشا به بخش داخلی، فقط می‌تواند از طریق مجموعه‌ای پروتئینی به نام **آنزیم ATP ساز** انجام شود. این مجموعه دارای کانالی برای عبور یون‌های H^+ و همچنین یک موتور مولکولی است که با استفاده از انرژی حاصل از عبور یون‌های H^+ ، گروه فسفات را به ADP می‌افزاید و ATP می‌سازد.

۱۴ پذیرندهٔ نهایی الکترون در این زنجیره، **اکسیژن** است. اکسیژن با دریافت دو الکترون، به **یون اکسید** (O^{2-}) تبدیل می‌شود. سپس می‌تواند با دو یون هیدرون موجود در بخش داخلی ترکیب شود و **آب** تولید کند:

$$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-} \Rightarrow O^{2-} + 2H^+ \rightarrow H_2O$$

۱۵ **ویژه** اکسایش $FADH_2$ ، از **دومین** عضو زنجیرهٔ انتقال الکترون آغاز می‌شود؛ بنابراین الکترون‌های خارج شده از آن، سبب خروج یون‌های هیدروژن کمتری می‌شوند. به همین دلیل، از $FADH_2$ در مقایسه با NADH ، ATP کمتری تولید می‌شود.

۱۶ **ویژه** مجموعهٔ مولکولی ATP ساز، **جزء زنجیرهٔ انتقال الکترون نیست!**

۱۷ انتقال یون‌های هیدروژن از بخش داخلی به فضای بین دو غشای راکیزه از طریق **انتقال فعال** و بازگشت آن‌ها به بخش داخلی از طریق **انتشار تسهیل‌شده** است.

۱۸ در زنجیرهٔ انتقال الکترون راکیزه، الکترون‌های خارج شده از NADH در مقایسه با الکترون‌های خارج شده از $FADH_2$ ، از ناقل‌های الکترونی **بیشتری** عبور می‌کنند. به عبارت دیگر در این زنجیره، محل اکسایش NADH قبل از محل اکسایش $FADH_2$ قرار دارد. این‌طور هم می‌توان گفت که الکترون خارج شده از $FADH_2$ ، از اولین عضو زنجیرهٔ انتقال الکترون عبور نمی‌کند.

۱۹ در زنجیرهٔ انتقال الکترون راکیزه، **اولین پذیرندهٔ الکترون**، یکی از مولکول‌های آلی غشایی (عضو زنجیره) اما **آخرین پذیرندهٔ الکترون**، نوعی مادهٔ معدنی (اکسیژن) است.

۲۰ محل تولید ATP و اکسایش NADH و $FADH_2$ بخش داخلی راکیزه است اما عوامل تولیدکنندهٔ آن‌ها در غشای درونی راکیزه قرار دارند.

۲۱ در طول زنجیرهٔ انتقال الکترون، به تدریج از انرژی الکترون کاسته می‌شود. چون در این زنجیره از انرژی الکترون برای انتقال فعال **یون هیدروژن** استفاده می‌شود.

۲۲ pH فضای بین دو غشای راکیزه در مقایسه با بخش داخلی راکیزه کم‌تر **(اسیدی‌تر)** است؛ چون تراکم یون‌های هیدروژن در فضای بین دو غشا بیشتر است.

۲۳ تراکم یون‌های هیدروژن در بخش داخلی راکیزه به دو دلیل کمتر از فضای بین دوغشای آن است: (۱) این یون‌ها به فضای بین دو غشا **پمپ** می‌شوند. (۲) تعدادی از یون‌های هیدروژن بخش داخلی برای **تولید آب** مصرف می‌شوند.

۲۴ منشأ یون‌های موجود در فضای بین دو غشای راکیزه، NADH و $FADH_2$ است.

۲۵ آنزیم ATP ساز برخلاف زنجیرهٔ انتقال الکترون غشای درونی راکیزه، در جهت **کاهش شیب غلظت** یون‌های هیدروژن عمل می‌کند. چون آنزیم ATP ساز یون‌های هیدروژن را در جهت شیب غلظت آن‌ها عبور می‌دهد اما زنجیرهٔ انتقال الکترون برخلاف جهت شیب غلظت.

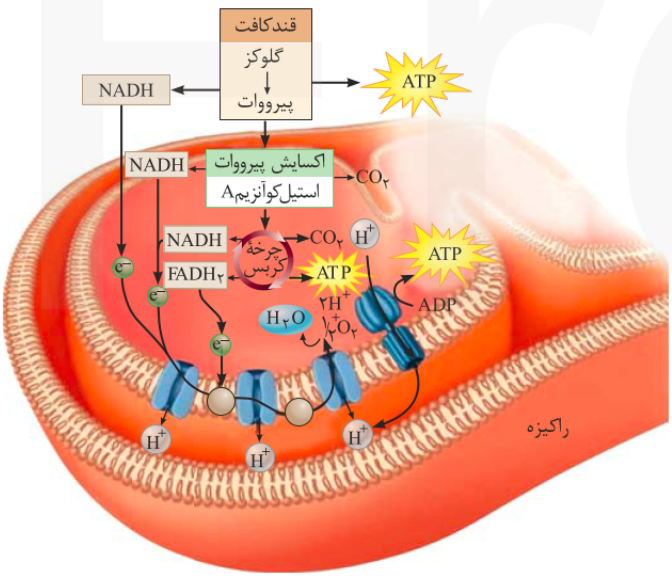
۲۶ به ازای اکسایش هر مولکول NADH یا $FADH_2$، در زنجیرهٔ انتقال الکترون، یک مولکول آب تولید می‌شود. چون هر یک از این مولکول‌ها دو الکترون از دست می‌دهد و این دو الکترون، یک اتم اکسیژن را به یون اکسید (O^{2-}) تبدیل می‌کنند. هر یون اکسید با دو پروتون (H^+) ترکیب می‌شود و یک مولکول آب تولید می‌کند.

۲۷ در زنجیرهٔ انتقال الکترون، مولکول‌های NAD^+ و FAD **بازتولید** می‌شوند. وجود NAD^+ برای مراحل بی‌هوازی و هوازی تنفس یاخته‌ای اما وجود FAD فقط برای انجام یکی از مراحل هوازی (چرخهٔ کربس) ضروری است.

۲۸ لارو حشرات می‌توانند در **دانه‌های خشک** و بدون آب (مانند نخود و لوبیا) رشد و نمو کنند. آب مورد نیاز این جانوران از مولکول‌های آب تولید شده در **تنفس یاخته‌ای** تأمین می‌شود.

جمع‌بندی خلاصهٔ تنفس یاخته‌ای

تنفس یاخته‌ای	مرحلهٔ بی‌هوازی (گلیکولیز)		تبدیل گلوکز به دو پیرووات بازده خالص ۲ATP (مصرف ۲ATP و تولید ۴ATP)
			تولید ۲NADH و $2H^+$
	مراحل هوازی	اکسایش پیرووات (تشکیل استیل‌کوآنزیم A)	مرحلهٔ ۱: آزاد شدن CO_2 از پیرووات
			مرحلهٔ ۲: اضافه شده کوآنزیم A به بنیان استیل
		چرخهٔ کربس	اکسایش استیل‌کوآنزیم A
			آزاد شدن $2CO_2$ در مراحل دوم و سوم
			تولید NADH، $FADH_2$ و ATP در مراحل مختلف
		زنجیرهٔ انتقال الکترون	مجموعه‌ای از مولکول‌ها در غشای درونی راکیزه
			تولید ATP با استفاده از مولکول‌های NADH و $FADH_2$
			پذیرندهٔ نهایی الکترون: اکسیژن



مروری بر تنفس یاخته‌ای

۲۹ در قندکافت، مولکول گلوکز به دو مولکول **پیرووات** تبدیل می‌شود. در این مرحله، به‌طور خالص ۲ATP و همچنین ۲NADH تولید می‌شود.

پیرووات‌ها و NADH های حاصل از قندکافت، وارد راکیزه می‌شوند.

۳۰ از اکسایش هر مولکول پیرووات در راکیزه، یک مولکول **استیل‌کوآنزیم A** تولید می‌شود. ضمن تبدیل هر مولکول پیرووات به استیل‌کوآنزیم A، یک مولکول NADH نیز تولید می‌شود.

۳۱ استیل‌کوآنزیم A وارد **چرخهٔ کربس** می‌شود و ضمن تجزیهٔ کامل آن، دو مولکول CO_2 و همچنین مولکول‌های NADH، $FADH_2$ و ATP تولید می‌شوند.

۳۲ در **زنجیرهٔ انتقال الکترون**، از مولکول‌های NADH و $FADH_2$ برای ساختن ATP های بیشتر استفاده می‌شود.

بازده انرژیایی تنفس یاخته‌ای

۳۳ در شرایط بهینهٔ آزمایشگاهی، مقدار ATP تولید شده به ازای تجزیهٔ کامل گلوکز در یاختهٔ **یوکاریوت هوازی**، **حداکثر** ۳۰ATP است. البته تولید ATP در یاخته‌ها متفاوت و متناسب با نیاز بدن فرق می‌کند.

۳۴ بازدهٔ تجزیهٔ کامل گلوکز در یاختهٔ **پروکاریوت هوازی**، بیشتر از یوکاریوت هوازی است (یعنی بیشتر از ۳۰ATP). چون در یوکاریوت‌ها، تعدادی ATP برای انتقال پیرووات‌ها و NADH های تولید شده در گلیکولیز به میتوکندری مصرف می‌شود.

تنظیم تنفس یاخته‌ای (تولیدی اقتصادی)

۳۵ تولید ATP تحت کنترل میزان ATP و ADP است. اگر مقدار ATP یاخته زیاد باشد، آنزیم‌های درگیر در گلیکولیز و چرخهٔ کربس **مهار** می‌شوند تا تولید ATP کم شود. این تنظیم مانع از **هدر رفتن منابع** می‌شود.

۳۶ اگر مقدار ATP کم و مقدار ADP زیاد باشد، این آنزیم‌ها **فعال** می‌شوند تا تولید ATP **افزایش** یابد.

۳۷ به‌طور معمول، یاخته‌های ما از **گلوکز** و **ذخیرهٔ قندی کبد (گلیکوژن)** برای تأمین انرژی استفاده می‌کنند. در صورتی که این منابع کافی نباشند، برای تولید ATP سراغ تجزیهٔ **چربی‌ها و پروتئین‌ها** می‌روند که منجر به تحلیل و **تضعیف ماهیچه‌های اسکلتی** و **سیستم ایمنی** می‌شود.

۳۸ هورمون‌های تیروئیدی با اثر بر یاختهٔ هدف، سبب افزایش **تجزیهٔ گلوکز** و تولید ATP می‌شوند.

- **تخمیر**
  - **الف** **تعریف:** بازسازی NAD^+ با استفاده از ماده‌ای غیر از اکسیژن
  - **ب** **شرایط انجام:** کمبود یا نبود اکسیژن
  - **پ** **انواع**
    - (۱) **تخمیر الکلی** (تبدیل پیرووات به الکل دوکربنی)
      - **مراحل**
        - ۱. قندکافت (تبدیل گلوکز به پیرووات همراه با تولید NADH)
        - ۲. تبدیل پیرووات به اتانال (همراه با آزاد شدن CO_2)
        - ۳. تبدیل اتانال به اتانول (همراه با تبدیل NADH به NAD^+)
    - (۲) **تخمیر لاکتیکی** (تبدیل پیرووات به لاکتات)
      - **مراحل**
        - ۱. قندکافت (تبدیل گلوکز به پیرووات همراه با تولید NADH)
        - ۲. تبدیل پیرووات به لاکتات (همراه با تبدیل NDAH به NAD^+)
  - **ت** **تخمیر در جانداران دیگر**
    - (۱) در باکتری‌ها (تخمیر لاکتیکی)
      - **الف** مضر: ترش شدن شیر، فساد مواد غذایی
      - **ب** مفید: تولید فراورده‌های غذایی شیری و خیارشور
    - (۲) در گیاهان: تخمیر الکلی و تخمیر لاکتیکی در نبود یا کمبود اکسیژن محیط
- **پاداکسنده‌ها**
  - **الف** مقابله با اثرات سمی رادیکال‌های آزاد
    - (۱) ممکن است در تنفس هوازی تشکیل شوند.
    - (۲) می‌توانند به بافت‌های بدن آسیب برسانند.
  - **ب** کمک به مبارزه با رادیکال‌های آزاد در راکیزه
- **توقف انتقال الکترون توسط مواد سمی**
  - **الف** سیانید: توقف زنجیرهٔ انتقال الکترون (مهار انتقال الکترون به اکسیژن)
  - **ب** کربن‌مونواکسید
    - (۱) کاهش ظرفیت حمل اکسیژن با اتصال به هموگلوبین
    - (۲) توقف واکنش مربوط به انتقال الکترون‌ها به اکسیژن

اصل مطلب

■ **تخمیر**، یکی از روش‌های تأمین انرژی در شرایط **کمبود یا نبود اکسیژن** است که در انواعی از جانداران رخ می‌دهد. در این فرایند، راکیزه و زنجیرهٔ انتقال الکترون نقشی ندارند.

■ تخمیر انواع مختلفی دارد. تخمیر **الکلی** و تخمیر **لاکتیکی** انواعی از تخمیرند که در صنایع متفاوت از آن‌ها بهره می‌بریم. تخمیر لاکتیکی و تخمیر الکلی، مانند تنفس هوازی با **گلیکولیز** آغاز می‌شوند و پیرووات ایجاد می‌کنند. در تخمیر، ضمن تشکیل مولکول‌هایی مانند اتانول یا لاکتات، NAD^+ به وجود می‌آید که وجود آن برای **تداوم گلیکولیز** ضروری است. در نبود NAD^+، گلیکولیز متوقف می‌شود و در نتیجه، تخمیر نیز انجام نمی‌شود.

تخمیر الکلی: در این فرایند، پیرووات حاصل از قندکافت، با از دست دادن کربن‌دی‌اکسید به اتانال تبدیل می‌شود و اتانال با گرفتن الکترون‌های NADH، اتانول (الکل دوکربنی) ایجاد می‌کند. به عنوان مثال **ورآمدن خمیر نان** به علت انجام تخمیر الکلی است.

تخمیر لاکتیکی: در این فرایند، پیرووات حاصل از قندکافت، با گرفتن الکترون‌های **NADH** به **لاکتات** تبدیل می‌شود. به عنوان مثال هنگام فعالیت شدید **ماهیچه‌های اسکلتی**، اگر اکسیژن کافی وجود نداشته باشد، تخمیر لاکتیکی انجام می‌شود.

۱ به‌طور طبیعی در یاخته‌های هوازی با انجام زنجیرهٔ انتقال الکترون، حامل‌های الکترون (NADH و $FADH_2$) اکسایش می‌یابند؛ در نتیجه، از یک طرف تعدادی ATP تولید می‌شود و از طرف دیگر پذیرنده‌های الکترون (NAD^+ و FAD) بازسازی می‌شوند. بازسازی این مولکول‌ها باعث می‌شود تا یاخته باز هم بتواند تنفس یاخته‌ای انجام دهد. البته بازسازی NAD^+ اهمیت بیشتری دارد؛ چون یاخته برای انجام قندکافت به NAD^+ نیاز دارد و اگر NAD^+ وجود نداشته باشد، یاخته قادر به تجزیهٔ گلوکز نخواهد بود.

۲ اگر اکسیژن در اختیار یاختهٔ هوازی نباشد، مراحل هوازی تنفس یاخته‌ای متوقف می‌شوند و با از کار افتادن زنجیرهٔ انتقال الکترون، دیگر NAD^+ بازسازی نمی‌شود. در این صورت دیگر قندکافت هم انجام نمی‌شود.

۳ یاخته‌هایی که توانایی **تنفس بی‌هوازی** را دارند، در نبود اکسیژن نیز می‌توانند از تجزیهٔ گلوکز، کمی انرژی به دست بیاورند. این یاخته‌ها می‌توانند بدون نیاز به اکسیژن، NAD^+ را بازسازی کنند. بازسازی NAD^+ با استفاده از مواد دیگری غیر از اکسیژن، **تخمیر** نامیده می‌شود. در تخمیر، ابتدا قندکافت انجام می‌شود و سپس با انجام واکنش‌هایی، NAD^+ مورد نیاز برای قندکافت بعدی تولید می‌گردد.

۴ یاخته‌ها را از نظر روش تنفس یاخته‌ای می‌توان به گروه‌های عمدهٔ زیر تقسیم کرد:

۱ **هوازی:** این یاخته‌ها فقط در حضور اکسیژن قادر به تأمین انرژی مورد نیاز خود هستند. به همین دلیل در نبود اکسیژن و یا از کار افتادن زنجیرهٔ انتقال الکترون به هر دلیلی (مثلاً در اثر مواد سمی) می‌میرند.

۲ **بی‌هوازی:** این یاخته‌ها بود و نبود اکسیژن برایشان اهمیتی ندارد و به هر حال از اکسیژن استفاده نمی‌کنند. به عبارت دیگر، **همواره** از تخمیر برای تأمین انرژی استفاده می‌کنند.

۳ **بی‌هوازی اختیاری:** این یاخته‌ها در صورت کافی بودن اکسیژن، **تنفس هوازی** انجام می‌دهند اما در صورت کمبود یا نبود اکسیژن می‌توانند **تخمیر** انجام دهند. مثلاً یاخته‌های ماهیچه‌ای انسان، ترجیح می‌دهند تنفس یاخته‌ای را با استفاده از اکسیژن انجام دهند؛ چون راندمان بسیار بالاتری دارد اما اگر اکسیژن کافی در دسترس آن‌ها نباشد، می‌توانند تخمیر انجام دهند.

۵ کاهش اکسیژن‌رسانی به یاخته‌های ماهیچه‌ای اسکلتی انسان که منجر به تخمیر لاکتیکی در این یاخته‌ها می‌شود، می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. مثلاً:

۱ **مسمومیت با کربن مونوکسید:** این گاز **سمی** است و با اتصال به هموگلوبین، ظرفیت حمل اکسیژن را کاهش می‌دهد.

۲ **اختلالات تنفسی:** کاهش قطر نایژک‌ها، عفونت مجاری تنفسی یا حبابک‌ها (مثلاً توسط باکتری استرپتوکوکوس نومونیا) و همچنین عدم تولید سورفاکتانت کافی منجر به **کاهش میزان تبادلات گازی** و در نتیجه کاهش اکسیژن خون می‌شود.

۳ **بیماری‌های خونی:** کاهش تعداد گویچه‌های قرمز، کاهش مقدار هموگلوبین و تولید هموگلوبین غیرطبیعی در کم‌خونی داسی‌شکل منجر به **کاهش اکسیژن‌رسانی** به بافت‌ها می‌شود.

۶ مراحل **تخمیر الکلی**:

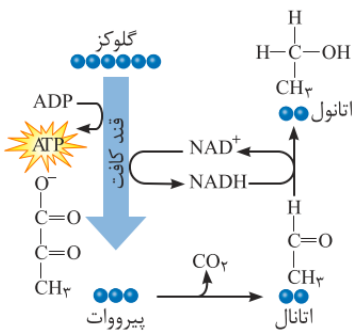
۱ با انجام قندکافت، گلوکز به دو **پیرووات** تبدیل می‌شود.

۲ هر مولکول پیرووات با از دست دادن کربن‌دی‌اکسید، به **اتانال** تبدیل می‌شود.

۳ اتانال با دریافت الکترون‌های NADH به **اتانول** تبدیل شده و ضمن آن NAD^+ تولید می‌شود.

۷ در تخمیر الکلی همانند تنفس هوازی، پیرووات با از دست دادن کربن‌دی‌اکسید به **ترکیب دوکربنی** تبدیل می‌شود.

۸ اتانول از کاهش اتانال حاصل می‌شود و دو اتم **هیدروژن** بیشتر دارد؛ در واقع ضمن تبدیل گلوکز به دو پیرووات در قندکافت، دو مولکول NADH و دو یون هیدروژن تولید می‌شود. این دو مولکول



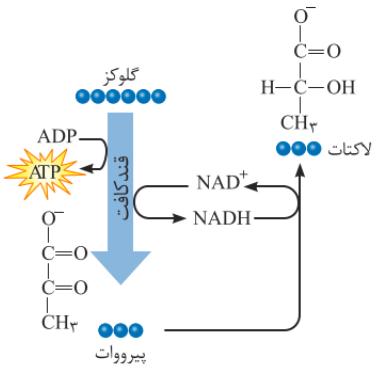
NADH و دو یون هیدروژن صرف تبدیل دو مولکول اتانال به دو مولکول اتانول می‌شود. به عبارت دیگر، هر مولکول اتانال با مصرف یک مولکول NADH و یک یون هیدروژن به اتانول تبدیل می‌شود.

۹ با توجه به این که در مرحلهٔ قندکافت از هر مولکول گلوکز دو مولکول پیرووات حاصل می‌شود، بنابراین در تخمیر الکلی، دو مولکول اتانال، دو مولکول اتانول و دو مولکول NAD^+ تولید و دو مولکول کربن‌دی‌اکسید آزاد می‌شود.

۱۰ مراحل **تخمیر لاکتیکی**:

۱ با انجام قندکافت، گلوکز به دو **پیرووات** تبدیل می‌شود.

۲ هر مولکول پیرووات با دریافت الکترون‌های NADH به **لاکتات** تبدیل شده و ضمن آن NAD^+ تولید می‌شود.



۱۱ در هر دو تخمیر الکلی و لاکتیکی به ازای تجزیهٔ هر مولکول گلوکز، ۲ATP مصرف و ۴ATP تولید می‌شود (یعنی به‌طور خالص ۲ATP). دقت کنید که تولید ATP در تخمیر، فقط در مرحلهٔ قندکافت صورت می‌گیرد.

۱۲ در تخمیر لاکتیکی برخلاف تخمیرالکلی، **کربن‌دی‌اکسید** آزاد نمی‌شود.

۱۳ در همهٔ یاخته‌های بی‌هوازی، همهٔ مراحل تخمیر در **مادهٔ زمینه‌ای سیتوپلاسم** انجام می‌شوند.

۱۴ **ویژه** گویچه‌های قرمز انسان در حالت بلوغ اندامک ندارند؛ بنابراین **فاقد راکیزه** هستند و انرژی خود را به روش **بی‌هوازی** (تخمیر) تأمین می‌کنند.

۱۵ لاکتات همانند پیرووات مولکولی سه‌کربنی است اما نسبت به آن **هیدروژن** بیشتری دارد. هر مولکول پیرووات با مصرف یک مولکول NADH و یک یون هیدروژن به لاکتات تبدیل می‌شود.

۱۶ تخمیر لاکتیکی در فعالیت‌های شدید عضلانی، منجر به تولید و تجمع لاکتات در ماهیچه‌های اسکلتی و تحریک **گیرنده‌های درد** در آن‌ها می‌شود. لاکتات در ماهیچه‌ها به تدریج **تجزیه** و از طریق **جریان خون** از آن‌ها دور می‌شود.

۱۷ لاکتات، یون لاکتیک‌اسید است؛ بنابراین **خاصیت اسیدی** دارد. می‌دانید که لاکتات یکی از مواد دفعی خون است که از بافت‌ها دور می‌شود تا از طریق ادرار دفع شود. افزایش لاکتات در خون می‌تواند منجر به **کاهش pH** خون شود.

۱۸ دانه‌های گیاهان برای جلوگیری از رویش بی‌موقع، تا مدتی در برابر آب و اکسیژن نفوذناپذیرند. در این مدت، یاخته‌های رویان درون دانه، انرژی مورد نیاز خود را از طریق **تخمیر** تأمین می‌کنند. هنگام رویش دانه به انرژی زیادی نیاز است و به همین دلیل **نفوذ اکسیژن** به درون دانه، امکان **تنفس هوازی** را فراهم می‌کند.

تخمیر در باکتری‌ها:

۱۹ انواعی از باکتری‌ها، **تخمیر لاکتیکی** انجام می‌دهند. فعالیت تخمیری که باکتری‌ها انجام می‌دهند، می‌تواند برای انسان **مضر** یا **مفید** باشد:

۱ تخمیر لاکتیکی توسط باکتری، ممکن است موجب **فاسد شدن غذا** شود؛ مانند ترش شدن شیر.

۲ تخمیر لاکتیکی بعضی باکتری‌ها در **تولید فراورده‌های غذایی** به‌کار می‌رود؛ مانند تولید فراورده‌های شیری و خیارشور.

تخمیر در گیاهان:

۲۰ اگر به هر علتی اکسیژن در محیط گیاهان نباشد و یا کم باشد، **تخمیر** انجام می‌شود.

۲۱ هر دو نوع تخمیر **الکلی** و **لاکتیکی** در گیاهان وجود دارد. تجمع الکل یا لاکتیک اسید در یاخته‌های گیاهی به مرگ آن‌ها می‌انجامد و به همین دلیل باید از یاخته‌ها دور شوند.

۲۲ بعضی گیاهان برای زندگی در **محیط‌های کم‌اکسیژن** سازش پیدا کرده‌اند و در این شرایط نیز می‌توانند تنفس هوازی انجام دهند. مثلاً گیاهانی که به‌طور طبیعی در شرایط غرقابی زندگی می‌کنند، ممکن است **شش‌ریشه** و یا **نرم‌آکنهٔ هوادار** داشته باشند.

جمع‌بندی — دو نوع تخمیر

تخمیر	الکلی	مراحل	۱ـ تبدیل گلوکز به دو پیرووات (قندکافت) همراه با تولید ATP و NADH
			۲ـ تبدیل پیرووات به اتانال همراه با آزاد شدن CO_2
			۳ـ تبدیل اتانال به اتانول همراه با تولید NAD^+
		مثال	مخمر نان و گیاهان هنگام کمبود اکسیژن در محیط
	لاکتیکی	مراحل	۱ـ تبدیل گلوکز به دو پیرووات (قندکافت) همراه با تولید ATP و NADH
			۲ـ تبدیل پیرووات به لاکتات همراه با تولید NAD^+
		مثال	۱ـ یاخته‌های ماهیچه‌ای اسکلتی هنگام کمبود اکسیژن
			۲ـ تولید فراورده‌های شیری و خیارشور توسط باکتری‌ها
			۳ـ فساد مواد غذایی؛ مانند ترش شدن شیر توسط باکتری‌ها
			۴ـ گیاهان هنگام کمبود اکسیژن در محیط

اصل مطلب

■ **رادیکال‌های آزاد**، به دلیل داشتن **الکترون‌های جفت‌نشده** در ساختار خود، واکنش‌پذیری بالایی دارند و می‌توانند با مولکول‌های تشکیل‌دهندهٔ بافت‌های بدن واکنش دهند و به آن‌ها آسیب برسانند. در فرایند تنفس هوازی، ممکن است رادیکال آزاد اکسیژن تشکیل شود. یعنی ممکن است یون‌های اکسید (O^{2-})، به جای ترکیب شدن با یون‌های هیدروژن، به صورت رادیکال آزاد درآیند. رادیکال‌های آزاد، از عوامل **ایجاد سرطان** به‌شمار می‌روند.

■ اگر سرعت تشکیل رادیکال‌های آزاد از سرعت مبارزه با آن‌ها بیشتر باشد، رادیکال‌های آزاد در **راکیزه** تجمع می‌یابند و آن را **تخریب** می‌کنند؛ در نتیجه، یاخته نیز تخریب می‌شود. عوامل فراوانی می‌توانند راکیزه را در مبارزه با رادیکال‌های آزاد با مشکل مواجه کنند. به عنوان مثال **الکل** و انواعی از **نقص‌های ژنی** در عملکرد راکیزه در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد مشکل ایجاد می‌کنند.

۲۳ راکیزه‌ها برای مقابله با اثرات سمی رادیکال‌های آزاد، به ترکیبات **پاداکسنده** (آنتی‌اکسیدان) وابسته‌اند. پاداکسنده‌ها، با رادیکال‌های آزاد **واکنش** می‌دهند و مانع از اثر تخریبی آن‌ها بر مولکول‌های زیستی می‌شوند.

۲۴ ترکیباتی مانند کاروتنوئیدها و آنتوسیانین‌ها پاداکسنده‌اند. **کاروتنوئیدها** ترکیبات رنگی هستند که در سبزدیسه و رنگ‌دیسه وجود دارند. **آنتوسیانین** نوع دیگری از ترکیبات رنگی است که درون کریچه‌های گیاهان ذخیره می‌شود و در ریشهٔ چغندر قرمز، کلم بنفش و میوه‌هایی مانند پرتقال توسرخ به فراوانی وجود دارد.

۲۵ نقاط وارسی در چرخهٔ یاخته‌ای یوکاریوت‌ها توسط پروتئین‌های خاصی کنترل می‌شوند. در صورتی که رادیکال‌های آزاد به این پروتئین‌ها یا ژن‌های سازنده آن‌ها آسیب برسانند، ممکن است تقسیم یاخته‌ای کنترل نشده انجام شود و **تومور سرطانی** ایجاد کند.

۲۶ الکل، سرعت تشکیل رادیکال‌های آزاد از اکسیژن را **افزایش** می‌دهد و مانع از عملکرد راکیزه در جهت کاهش آن‌ها می‌شود. رادیکال‌های آزاد با حمله به **دنای راکیزه**، سبب تخریب راکیزه و در نهایت مرگ یاخته‌های کبد و **بافت‌مردگی (نکروز)** کبد می‌شود.

فلش‌بَک: مهم‌ترین مطالبی که در ارتباط با **اعتیاد به الکل** در کتاب زیست۲ خوانده‌اید:

(۱) حتی مصرف کم‌ترین مقدار الکل، بدن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. (۲) الکل در دستگاه گوارش به سرعت **جذب** می‌شود و به دلیل محلول بودن در چربی، از غشای یاخته‌های عصبی بخش‌های مختلف **مغز** عبور می‌کند و موجب اختلال در فعالیت آن‌ها می‌شود.

(۳) الکل علاوه بر **دوپامین**، بر فعالیت انواعی از **ناقل‌های عصبی** تحریک‌کننده و بازدارنده تأثیر دارد. (۴) الکل فعالیت‌های بدنی را کاهش می‌دهد، موجب آرام‌سازی ماهیچه‌ها، ناهماهنگی در حرکات بدن، اختلال در گفتار، کاهش درد و اضطراب، خواب‌آلودگی، اختلال در حافظه، گیجی و کاهش هوشیاری می‌شود.

(۵) الکل فعالیت مغز را کُند می‌کند و در نتیجه، زمان واکنش فرد به محرک‌های محیطی افزایش می‌یابد. (۶) مشکلات کبدی، سکتهٔ قلبی و انواع سرطان از پیامدهای **مصرف بلندمدت** الکل است.

۲۷ ترکیبی الکل سبب خواب‌آلودگی می‌شود و مرکز خواب **هیپوتالاموس** است؛ بنابراین می‌توان گفت که الکل بر فعالیت هیپوتالاموس تأثیر می‌گذارد.

۲۸ ترکیبی الکل موجب ناهماهنگی در حرکات بدن می‌شود و با توجه به این که مرکز تنظیم تعادل بدن **مخچه** است، می‌توان گفت که الکل بر فعالیت مخچه تأثیر می‌گذارد.

۲۹ ترکیبی الکل سبب اختلال در حافظه می‌شود و با توجه به این که **قشر مخ** و بخشی از **سامانهٔ لیمبیک** به نام **هیپوکامپ** در حافظه نقش دارند، می‌توان گفت که الکل سبب اختلال در کار این مراکز عصبی می‌شود.

۳۰ نکروز (بافت‌مردگی) می‌تواند ناشی از موارد زیر باشد:

(۱) **تشکیل رادیکال‌های آزاد:** مثلاً نوشیدن مشروبات الکلی سبب افزایش سرعت تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌شود که منجر به مرگ یاخته‌های کبدی و بافت‌مردگی (نکروز) کبد می‌شود.

(۲) **پدیده‌های تصادفی:** مانند بریدگی یا سوختگی که موجب آسیب دیدن یاخته‌ها و مرگ آن‌ها می‌شود.

۳۱ ترکیبی مرگ برنامه‌ریزی شده می‌تواند یاخته‌های آسیب‌دیده را از بین ببرد. مثلاً ممکن است یاخته‌های آسیب‌دیده بر اثر رادیکال‌های آزاد، با مرگ برنامه‌ریزی شده از بین بروند.

۳۲ نقص در ژن‌های مربوط به پروتئین‌های زنجیرهٔ انتقال الکترون، منجر به تولید **پروتئین‌های معیوب** می‌شود که در مبارزه با رادیکال‌های آزاد، عملکرد مناسبی ندارند.

۳۳ مواد سمی فراوانی می‌توانند با مهار یک یا تعدادی از واکنش‌های تنفس هوازی، سبب **توقف تنفس یاخته** و **مرگ** شوند.

مثال ۱: **سیانید** نوعی **مادهٔ سمی** است که واکنش نهایی مربوط به **انتقال الکترون‌ها به** O_2 را مهار می‌کند و موجب توقف زنجیرهٔ انتقال الکترون می‌شود.

مثال ۲: **کربن مونوکسید** نوعی **گاز سمی** است که با اتصال به هموگلوبین، مانع از اتصال اکسیژن به آن می‌شود و **ظرفیت حمل اکسیژن** در خون را **کاهش** می‌دهد. این عمل باعث توقف تنفس هوازی می‌شود. همچنین کربن‌مونوکسید، سبب **توقف انتقال الکترون‌ها** به اکسیژن می‌شود.

۳۴ تعدادی از گونه‌های گیاهی، با تولید **ترکیبات سیانیددار** از خود دفاع می‌کنند. ترکیبات سیانیددار پس از خورده شدن توسط گیاهان، تجزیه می‌شوند و **سیانید** که مادهٔ سمی است از آن‌ها جدا می‌شود که اثر آن بر یاخته‌ها، **توقف زنجیرهٔ انتقال الکترون** است.

تعریف فتوسنتز: تبدیل CO_2 به مادهٔ آلی با استفاده از انرژی نور خورشید

برگ، ساختار تخصص‌یافته برای فتوسنتز

- **الف ویژگی‌ها**
  - ۱ مناسب‌ترین ساختار برای فتوسنتز در اکثر گیاهان
  - ۲ دارای تعداد فراوانی سبزدیسه
- **ب اجزا**
  - ۱ روپوست
  - ۲ میانبرگ
    - در تک لپه‌ای‌ها: میانبرگ اسفنجی
    - در دو لپه‌ای‌ها: میانبرگ اسفنجی و نرده‌ای
  - ۳ دسته‌های آوندی (رگبرگ)
  - ۴ غلاف آوندی

سبزدیسه

- **الف** اندامک مسئول فتوسنتز در گیاهان و آغازیان فتوسنتزکننده
- **ب اجزا**
  - ۱ **غشاها:** غشای بیرونی و غشای درونی (هر دو صاف)
  - ۲ **تیلاکوئیدها:** محل قرارگرفتن رنگیزه‌ها
  - ۳ **بستره:** حاوی دنا، رنا و رناتن
- **پ رنگیزه‌ها**
  - ۱ سبزینه (کلروفیل): در گیاهان دو نوع a و b
  - ۲ کاروتنوئیدها: به رنگ‌های زرد، نارنجی و قرمز
- **ت فتوسیستم**
  - ۱ سامانه‌ای در غشای تیلاکوئیدها، شامل رنگیزه‌ها و پروتئین‌ها
  - ۲ **اجزا**
    - **الف** آنتن‌های گیرندهٔ نور
      - ۱. رنگیزه‌ها: کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها
      - ۲. انواعی از پروتئین‌ها
    - **ب** مرکز واکنش: کلروفیل‌های a در بستری پروتئینی
  - ۳ **انواع**
    - **الف** فتوسیستم ۱: دارای نوعی کلروفیل a به‌نام $P_{۷۰۰}$
    - **ب** فتوسیستم ۲: دارای نوعی کلروفیل a به‌نام $P_{۶۸۰}$

۱ واکنش کلی فتوسنتز به‌صورت $6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$ است.

دقت کنید: این واکنش، نشان‌دهندهٔ فتوسنتز در بسیاری از فتوسنتزکننده‌ها از جمله **گیاهان** است اما واکنش فتوسنتز در بعضی جانداران فتوسنتزکننده با این واکنش مطابقت ندارد!

۲ در سمت چپ واکنش کلی فتوسنتز، دو ماده اکسیژن دارند (آب و کربن‌دی‌اکسید) اما منشأ اکسیژنی که طی فتوسنتز آزاد می‌شود، فقط **آب** است.

۳ جانداران فتوسنتزکننده ممکن است **یوکاریوتی** (مانند گیاهان و جلبک‌ها) و یا **پروکاریوتی** (مانند سیانوباکتری) باشند. همهٔ جانداران فتوسنتزکننده، **مولکول‌های رنگیزه‌ای** دارند که بتوانند انرژی نور خورشید را جذب کنند؛ همچنین **سامانه‌ای برای تبدیل انرژی** نوری به انرژی شیمیایی دارند.

۴ همهٔ جانداران فتوسنتزکننده، CO_2 را با استفاده از انرژی **نور خورشید** به مادهٔ آلی تبدیل می‌کنند. در فتوسنتزِ گیاهان، علاوه بر کربن‌دی‌اکسید، آب نیز مصرف می‌شود. به همین دلیل، علاوه بر تولید قند، **اکسیژن** نیز آزاد می‌کنند.

۵ میزان فتوسنتز در گیاهان را می‌توان با تعیین میزان CO_2 **مصرف** شده و یا O_2 **تولید** شده اندازه گرفت.

۶ **ویژه** در واکنش‌های فتوسنتز، آب و کربن‌دی‌اکسید با هم ترکیب نمی‌شوند؛ آب در مرحلهٔ **وابسته به نور** مصرف می‌شود در حالی که تثبیت کربن‌دی‌اکسید مربوط به مرحلهٔ **مستقل از نور** است.

۷ **ویژه** اکسیژنی که طی فتوسنتز آزاد می‌شود، مربوط به **تجزیهٔ آب** است. به همین دلیل، جانداران فتوسنتزکننده‌ای که منبع الکترون آن‌ها ترکیبی **غیر از آب** است، اکسیژن آزاد نمی‌کنند!

۸ بیشتر گیاهان فتوسنتزکننده و بعضی از آن‌ها غیرفتوسنتزکننده هستند. در تست‌های کنکور ممکن است به‌جای «گیاهان فتوسنتزکننده» از عنوان «**گیاهان سبز**» استفاده شود. گیاهان انگل، همه یا بخشی از آب و مواد غذایی مورد نیاز خود را از گیاهان فتوسنتزکننده دریافت می‌کنند. پس گیاهان انگل دو دسته‌اند:

۱) گیاهان انگلی که توانایی فتوسنتز دارند و **بخشی** از مواد مورد نیاز خود را می‌سازند و بخش دیگری از آن را از گیاهان دیگر می‌گیرند.

۲) گیاهان انگلی که توانایی فتوسنتز ندارند و **همهٔ** مواد غذایی مورد نیاز خود را از گیاهان دیگر می‌گیرند (مانند گیاه سس و گل جالیز).

۹ گیاهان **انگل**، مانند سس و گل جالیز برگ ندارند و فتوسنتز انجام نمی‌دهند.

۱۰ گیاهان **گوشتخوار** (مثل توبره‌واش) فتوسنتزکننده‌اند اما در مناطقی زندگی می‌کنند که از نظر **نیتروژن** فقیرند. در این گیاهان، برگ‌ها برای شکار و گوارش جانوران کوچک (مانند حشرات) تغییر کرده‌اند.

۱۱ ساقه‌های **زیرزمینی** مانند زمین‌ساقه (ریزوم)، غده و پیاز و همچنین ساقه‌های چوبی شده و چندساله **سبزینه ندارند** و فتوسنتز انجام نمی‌دهند.

۱۲ برگ‌های خوراکی **پیاز** که به ساقهٔ زیرزمینیِ کوتاه و تکمه‌مانند آن متصل‌اند، سبزدیسه ندارند و فتوسنتز انجام نمی‌دهند.

۱۳ لپه‌های دانهٔ برخی گیاهان (مانند لوبیا) که به آن‌ها **برگ‌های رویانی** نیز می‌گویند، می‌توانند پس از خارج شدن از خاک، تا مدتی فتوسنتز انجام دهند.

برگ

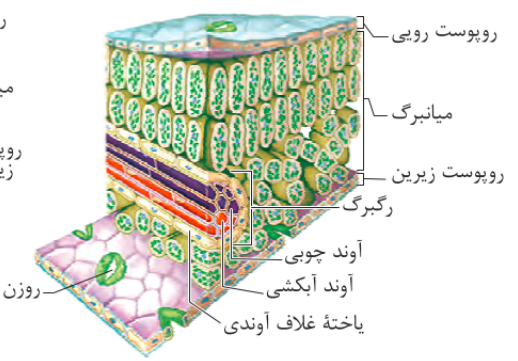
اصل مطلب

- در گیاهان، برگ ساختار تخصص‌یافته برای فتوسنتز است. برگ گیاهان دو لپه‌ای دارای **پهنک** و **دمبرگ** است.
- پهنک شامل بخش‌های زیر است:

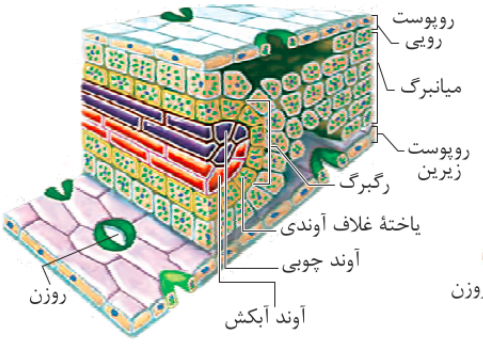
۱ **روپوست:** بافتی است که سطح **رویی** و سطح **زیرین** پهنک برگ را می‌پوشاند.

۲ **میانبرگ:** شامل یاخته‌های **نرم‌آکنه‌ای** نرده‌ای و اسفنجی است. یاخته‌های **نرده‌ای** در زیر روپوست بالایی قرار دارند و به‌هم فشرده‌اند؛ در حالی که یاخته‌های **اسفنجی** به سمت روپوست زیرین قرار گرفته‌اند.

۳ **دسته‌های آوندی:** شامل آوندهای چوبی و آبکش است. آوندهای چوبی آب و مواد معدنی (شیرهٔ خام) را به برگ انتقال می‌دهند و آوندهای آبکش، ترکیبات آلی (شیرهٔ پرورده) ساخته شده در برگ را به سایر بخش‌های گیاه منتقل می‌کنند.



برگِ گیاه دو لپه



برگِ گیاه تک لپه

جمع‌بندی مقایسهٔ برگ تک‌لپه‌ای‌ها و دولپه‌ای‌ها

اجزای برگ		دو لپه‌ای‌ها	تک لپه‌ای‌ها
دمبرگ		دارند	ندارند
پهنک	روپوست بالایی	دارای روزنهٔ هوایی کم	دارای روزنهٔ هوایی
	روپوست پایینی	دارای روزنهٔ هوایی زیاد	دارای روزنهٔ هوایی
	میانبرگ	نرده‌ای و اسفنجی	فقط اسفنجی
	رگبرگ: دسته‌های آوندی	آوندهای چوبی و آبکش	آوندهای چوبی و آبکش
	رگبرگ: غلاف آوندی	فاقد کلروپلاست	دارای کلروپلاست

۱۴ برگ، مناسب‌ترین ساختار برای فتوسنتز در **اکثر** گیاهان است. یعنی اولاً به جز برگ، ساختارهای فتوسنتزکنندهٔ دیگری نیز وجود دارند (مانند ساقه‌های سبز و جوان)؛ ثانیاً، بعضی گیاهان فاقد برگ‌های فتوسنتزکننده‌اند.

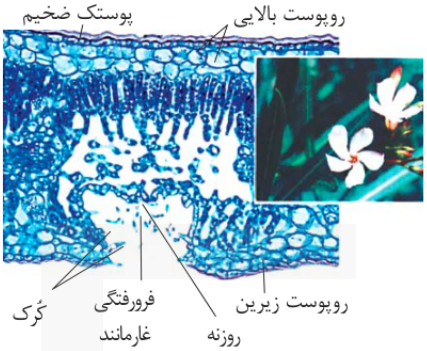
۱۵ تعداد روزنه‌های هوایی در روپوست **زیرین**، بیشتر از روپوست زبرین است.

۱۶ روپوست برگ معمولاً از **یک ردیف** یاخته تشکیل شده است و در آن، بیشتر یاخته‌ها فاقد کلروپلاست‌اند و فقط یاخته‌های نگهبان روزنه، کلروپلاست دارند.

۱۷ به‌طور معمول میانبرگ گیاهان **دولپه‌ای** از یاخته‌های نرم‌آکنه‌ایِ نرده‌ای و اسفنجی اما میانبرگ گیاهان **تک‌لپه‌ای** فقط از یاخته‌های نرم‌آکنه‌ای اسفنجی تشکیل شده است.

۱۸ در گیاهان فتوسنتزکننده، یاخته‌های میانبرگ اسفنجی و میانبرگ نرده‌ای کلروپلاست‌دارند.

۱۹ رگبرگ شامل آوندهای چوبی، آوندهای آبکش و غلاف آوندی است. **غلاف آوندی** در گیاهان دولپه‌ای **فاقد** سبزدیسه و در گیاهان تک‌لپه‌ای **دارای** سبزدیسه است.



۲۰ در دسته‌های آوندی هر رگبرگ، آوندهای چوبی در بالا و آوندهای آبکشی در پایین قرار دارند.

۲۱ در برگ تک‌لپه‌ای‌ها، غلاف آوندی توسط یاخته‌هایی احاطه شده است که **به‌هم فشرده‌اند** و بین آن‌ها فضای چندانی وجود ندارد.

۲۲ روپوست برگ معمولاً از یک لایه یاخته تشکیل شده است اما در برگ‌های بعضی گیاهان، روپوست **بیش از یک لایه** دارد؛ مانند برگ‌های گیاه **خرزهره**.

۲۳ یاخته‌های روپوست برگ و ساقه، با ترشح نوعی مادهٔ لیپیدی در سطح بیرونی خود لایه‌ای به نام **پوستک** می‌سازند که **نقش محافظتی** دارد و از برگ در برابر تبخیر آب، سرما، نیش حشرات و ورود عوامل بیماری‌زا محافظت می‌کند.

زووم: در صفحهٔ ۷۹ کتاب درسی می‌خوانیم: «میانبرگ در **بعضی** گیاهان از یاخته‌های اسفنجی تشکیل شده است.» این جمله‌بندی نشان می‌دهد استثناهایی وجود دارد و نمی‌توان گفت هر گیاه تک‌لپه‌ای، فقط **یک نوع** میانبرگ دارد! البته با توجه به شکل ۱ کتاب درسی در صفحهٔ ۷۸ که برگ یک نمونه از گیاهان تک‌لپه‌ای را با یک نمونه از گیاهان دولپه‌ای مقایسه کرده است، فرض را بر این می‌گذاریم که نهاندانگان تک‌لپه‌ای یک نوع و دولپه‌ای‌ها دو نوع میانبرگ دارند.

۲۴ یاخته‌های میانبرگ نرده‌ای به‌صورت مرتب در چند لایه، کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند در حالی که بین یاخته‌های میانبرگ اسفنجی، فضاهای خالی زیادی وجود دارد. به عبارت دیگر، میزان فضای بین یاخته‌ای در میانبرگ نرده‌ای **کمتر** از میانبرگ اسفنجی است.

۲۵ در سامانهٔ بافت آوندی (چوبی و آبکش)، علاوه بر یاخته‌های آوندی، یاخته‌های دیگری از قبیل **یاخته‌های پارانشیمی** (نرم‌آکنه‌ای و فیبر) نیز وجود دارند.

جمع‌بندی مقایسهٔ برگ، ریشه و ساقه در نهان‌دانگان

گیاه	برگ	ریشه	ساقه
تک‌لپه‌ای	یک نوع میانبرگ (اسفنجی) غلاف آوندی سبزدیسه‌دار فاقد دمبرگ	آوندهای چوبی داخل و آبکش خارج روی یک دایره دارای مغز متشکل از بافت نرم‌آکنه‌ای دارای پوست مشخص بین روپوست و استوانهٔ آوندی	دسته‌های آوندی چوبی و آبکش پراکنده فاقد مغز ساقه پوست نامشخص
دولپه‌ای	دو نوع میانبرگ (نرده‌ای و اسفنجی) غلاف آوندی فاقد سبزدیسه دارای دمبرگ	آوندهای چوبی و آبکش به‌صورت یک در میان فاقد مغز ریشه دارای پوست مشخص بین روپوست و استوانهٔ آوندی	دسته‌های آوندی چوبی و آبکش روی یک دایره دارای مغز متشکل از بافت نرم‌آکنه‌ای دارای پوست مشخص بین روپوست و استوانهٔ آوندی

سبزدیسه

اصل مطلب

- دیسه‌ها اندامک‌هایی هستند که در گیاهان و آغازیان **فتوسنتزکننده** یافت می‌شوند. انواع مختلفی از دیسه وجود دارند؛ مانند **سبزدیسه** (کلروپلاست)، **نشادیسه** (آمیلوپلاست) و **رنگ‌دیسه** (کروموپلاست) که از میان آن‌ها، سبزدیسه مهم‌تر از بقیه است.
- سبزدیسه (کلروپلاست) اندامکی است که همانند راکیزه، دارای **دو غشا** (غشای بیرونی و غشای درونی) است که از هم فاصله دارند.
- فضای درون سبزدیسه با سامانه‌ای غشایی به نام **تیلاکوئید** به دو بخش درون تیلاکوئید و **بستره** (بیرون تیلاکوئید) تقسیم شده است. تیلاکوئیدها، ساختارهای غشایی کیسه‌مانندی هستند که به‌هم متصل‌اند.
- بستره دارای دنا، رنا و رناتن است؛ بنابراین سبزدیسه همانند راکیزه می‌تواند بعضی از پروتئین‌های مورد نیاز خود را بسازد. سبزدیسه همانند راکیزه می‌تواند همراه یاخته و مستقل از آن **تقسیم** شود.

۲۶ تیلاکوئیدهای هر سبزدیسه، به‌صورت **دسته‌های چندتایی** قرار دارند. علاوه بر این که تیلاکوئیدهای هر دسته به هم راه دارند؛ دسته‌های تیلاکوئیدی نیز توسط لوله‌هایی به هم مرتبط‌اند.

۲۷ غشاهای خارجی و داخلی سبزدیسه، رنگیزه ندارند! رنگیزه‌های فتوسنتزی در **غشای تیلاکوئیدها** قرار گرفته‌اند.

۲۸ محل انجام فتوسنتز در گیاهان و آغازیان فتوسنتزکننده، **سبزدیسه** (کلروپلاست) است اما باکتری‌ها سبزدیسه ندارند. در باکتری‌های فتوسنتزکننده، **رنگیزه‌های جذب‌کنندهٔ نور** در غشای یاخته قرار دارند. در این جانداران، بخشی از فرایند فتوسنتز در غشا و بخشی دیگر از آن در سیتوپلاسم انجام می‌شود.

۲۹ سبزدیسه دارای سه فضای درونی است: ۱ فضای **بین دو غشای** درونی و بیرونی ۲ فضایی که توسط غشای درونی احاطه شده است و **بستره** نامیده می‌شود. ۳ فضای **درون تیلاکوئیدها**.

۳۰ بستره حاوی مادهٔ وراثتی (DNA) سبزدیسه است. سبزدیسه می‌تواند چندین نسخه **دنای حلقوی** داشته باشد. این اندامک، دنابسپاراز، رنابسپاراز و رناتن‌های خاص خود را دارد و گروهی از پروتئین‌های مورد نیاز خود را می‌سازد. گروهی دیگر از این پروتئین با استفاده از دنای هسته‌ای، در **مادهٔ زمینه‌ای سیتوپلاسم** تولید و سپس به سبزدیسه منتقل می‌گردند.

۳۱ رنگ‌دیسه‌ها مقادیر فراوانی رنگیزه‌های کاروتنوئیدی دارند اما در رنگ‌دیسه‌ها فتوسنتز انجام نمی‌شود. نشادیسه **فاقد رنگیزه** است و در آن مقادیر فراوانی نشاسته ذخیره می‌شود.

۳۲ قبلاً گفتیم که سبزدیسه همانند راکیزه می‌تواند **مستقل** از تقسیم یاخته، تقسیم شود. یعنی علاوه بر این که هنگام تقسیم یاخته تقسیم می‌شود، در مواقعی که یاخته تقسیم نمی‌شود نیز سبزدیسه می‌تواند تقسیم شود. بدیهی است که قبل از تقسیم سبزدیسه، لازم است دنای آن **همانندسازی** کند.

۳۳ با کاهش طول روز و کم شدن نور در پاییز، **ساختار سبزدیسه‌ها** در بعضی گیاهان تغییر می‌کند و به **رنگ‌دیسه** تبدیل می‌شوند. در این هنگام، سبزینه در برگ **تجزیه** می‌شود و مقدار کاروتنوئیدها افزایش می‌یابد.

۳۴ کاروتنوئیدها، هم در سبزدیسه و هم در رنگ‌دیسه وجود دارند. کاروتنوئیدهای موجود در سبزدیسه همراه با سبزینه‌ها در فتوسیستم قرار دارند و از **رنگیزه‌های فتوسنتزی** محسوب می‌شوند در حالی که کاروتنوئیدهای موجود در **رنگ‌دیسه** نقشی در فتوسنتز ندارند.

۳۵ نمی‌توان گفت هر یاخته‌ای که رنگیزه دارد، قادر به انجام فتوسنتز است؛ مثلاً گیرنده‌های نوری چشم انسان رنگیزه دارند اما این رنگیزه‌ها مربوط به فتوسنتز نیستند. به عبارت دیگر فقط یاخته‌هایی می‌توانند فتوسنتز انجام دهند که **رنگیزه‌های فتوسنتزی** داشته باشند.

دقت کنید: نوع رنگیزه‌های فتوسنتزی در جانداران فتوسنتزکننده می‌تواند **متفاوت** باشد. مثلاً باکتری‌ها می‌توانند رنگیزه‌های متفاوت با گیاهان داشته باشند.

۳۶ بعضی از آنزیم‌های مورد استفاده در فتوسنتز، در حضور نور ساخته می‌شوند. در واقع نور می‌تواند باعث **فعال شدن** ژنِ سازندهٔ آنزیمی شود که در فتوسنتز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نبود نور، این ژن بیان نمی‌شود.

فتوسیستم: سامانهٔ تبدیل انرژی

اصل مطلب

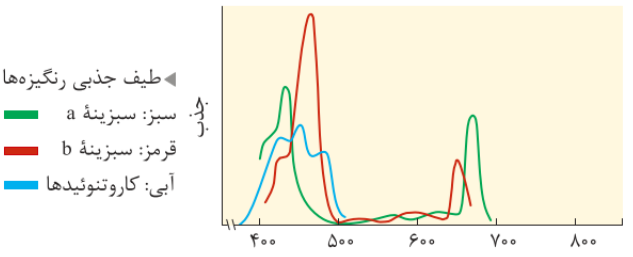
- رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاهان در **غشای تیلاکوئیدها** قرار دارند. گیاهان دو نوع سبزینهٔ a و b و همچنین انواعی از کاروتنوئیدها دارند. وجود رنگیزه‌های متفاوت، کارآیی گیاه را در استفاده از طول موج‌های متفاوت نور **افزایش** می‌دهد.
- رنگیزه‌های فتوسنتزی همراه با انواعی از پروتئین‌ها در سامانه‌هایی به نام **فتوسیستم**‌های ۱ و ۲ در غشای تیلاکوئید جای گرفته‌اند. تفاوت دو نوع فتوسیستم در نوع **کلروفیل** a آن‌هاست. هر فتوسیستم، شامل یک **مرکز واکنش** و تعدادی **آنتن گیرندهٔ نور** است.
- مرکز واکنش، شامل **مولکول‌های کلروفیل** a است که در بستری از **پروتئین** قرار دارند. هر آنتن گیرندهٔ نور، از **رنگیزه‌های متفاوت** (کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها) و انواعی از پروتئین ساخته شده است.

■ حداکثر جذب سبزینهٔ a در مرکز واکنش فتوسیستم۱، در طول موج **۷۰۰ نانومتر** است؛ به همین دلیل، سبزینهٔ a موجود در این فتوسیستم را $P_{۷۰۰}$ می‌نامند. حداکثر جذب سبزینهٔ a در فتوسیستم۲، در طول موج **۶۸۰ نانومتر** است و به همین دلیل به آن $P_{۶۸۰}$ می‌گویند.

■ فتوسیستم‌ها در غشای تیلاکوئید قرار دارند و توسط مولکول‌هایی به نام **ناقل الکترون** به هم مرتبط می‌شوند. این مولکول‌ها می‌توانند الکترون بگیرند و یا این که از دست بدهند (کاهش و اکسایش).

۳۷ **سبزینه** بیشترین رنگیزهٔ موجود در سبزدیسه است و همان‌طور که از نام آن مشخص است، به رنگ سبز دیده می‌شود؛ چون پرتوهای سبز را منعکس می‌کند. بیشترین جذب نوری سبزینه‌ها (a و b) در طول موج ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر (بنفش ـ آبی) و ۶۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر (نارنجی ـ قرمز) است.

۳۸ **کاروتنوئیدها** به رنگ‌های زرد، نارنجی و قرمز دیده می‌شوند؛ چون این پرتوها را منعکس می‌کنند. بیشترین جذب کاروتنوئیدها در بخش **آبی و سبز** نور مرئی است.



۳۹ کلروفیل a هم در مرکز واکنش و هم در آنتن‌های گیرندهٔ نور وجود دارد در حالی که کلروفیل b و کاروتنوئیدها فقط در **آنتن‌ها** قرار دارند.

۴۰ با توجه به طیف جذبی رنگیزه‌های مختلف فتوسنتزی، بیشترین میزان جذب نور مربوط به کلروفیل b است که در طول موج حدود ۴۷۰ نانومتر انجام می‌شود.

۴۱ طیف جذبی سبزینهٔ a موجود در فتوسیستم۱، محدود به طول موج ۷۰۰ نانومتر نیست و این رنگیزه می‌تواند طول موج‌های دیگری را نیز جذب کند. همچنین طیف جذبی سبزینهٔ a موجود در فتوسیستم۲ نیز به طول موج ۶۸۰ نانومتر محدود نمی‌شود و این رنگیزه نیز قادر به جذب طول موج‌های دیگری از نور مرئی هست.

۴۲ بیشترین میزان جذب نور، مربوط به طول موج‌های ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر است. پس این طول موج‌ها **بیشترین اهمیت** را در فتوسنتز دارند.

۴۳ با توجه به شکل طیف جذبی رنگیزه‌های فتوسنتزی:

۱) در محدودهٔ ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر، هر سه نوع رنگیزهٔ فتوسنتزی **بیشترین میزان جذب** نوری را دارند.

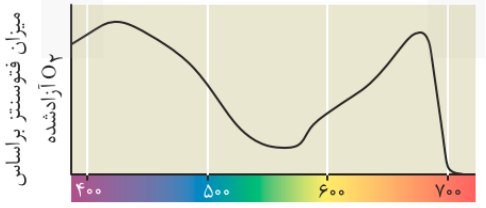
۲) کمترین میزان جذب نوری رنگیزه‌ها مربوط به طول موج‌های محدودهٔ ۵۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر است.

۳) کاروتنوئیدها قادر به جذب پرتوهایی با طول موج **کمتر از ۴۰۰ نانومتر** نیز هستند.

۴) یک طول موج خاص در محدودهٔ (بنفش ـ آبی) توسط کلروفیل‌های a و b و کاروتنوئیدها به **یک اندازه** جذب می‌شود (روی نمودار طیف جذبی، نقطه‌ای که در آن منحنی‌های قرمز، سبز و آبی همدیگر را قطع می‌کنند).

۵) دو طول موج خاص در محدودهٔ (نارنجی ـ قرمز) توسط کلروفیل‌های a و b به **یک اندازه** جذب می‌شود (روی نمودار طیف جذبی، دو نقطه‌ای که در آن‌ها منحنی‌های قرمز و سبز همدیگر را قطع می‌کنند).

۴۴ نمودار مقابل، میزان فتوسنتز یک گیاه را بر اساس **میزان اکسیژن آزاد شده** نشان می‌دهد. قبلاً گفتیم که هر چه میزان اکسیژن آزاد شده از گیاه **بیشتر** باشد، میزان فتوسنتز **بیشتر** است. از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که **سبزینه**، مهم‌ترین رنگیزهٔ فتوسنتزی است؛ چون سبزینه پرتوهای نوری سبز را جذب نمی‌کند و در محدودهٔ طول موج‌های نور سبز، میزان فتوسنتز پایین است اما در محدوده‌هایی که سبزینه‌ها جذب بالایی دارند (محدودهٔ بنفش ـ آبی و همچنین نارنجی ـ قرمز) میزان فتوسنتز بالاست.



۴۵ **اسپیروژیر** نوعی جلبک سبز رشته‌ای است که پیکر آن از **یک ردیف** یاخته تشکیل شده است و **سبزدیسه‌های نواری‌شکل** و دراز دارد.

۴۶ هر یاختهٔ پیکر این جلبک سیتوپلاسم کمی دارد که به شکل **ستاره‌مانند**، اطراف هسته قرار گرفته است.

۴۷ در آزمایشی جلبک اسپیروژیر را در سطحی ثابت کردند و سپس درون لولهٔ آزمایشی شامل آب و **باکتری‌های هوازی** قرار دادند. سپس لولهٔ آزمایش در برابر نوری قرار گرفت که از منشور عبور کرده و به طیف‌های مختلف تجزیه شده بود. بعد از گذشت مدتی، مشخص شد که باکتری‌ها در بعضی قسمت‌ها تجمع یافته‌اند که به معنی تراکم بالاتر اکسیژن در آن قسمت‌ها بود.

۴۸ با توجه به شکل، می‌توان از این آزمایش نتیجه گرفت که تمام طول موج‌های نور مرئی در فتوسنتز مؤثرند اما محدودهٔ پرتوهای نوری (بنفش ـ آبی) و سپس (نارنجی ـ قرمز) **بیشترین تأثیر** را در فتوسنتز دارد.