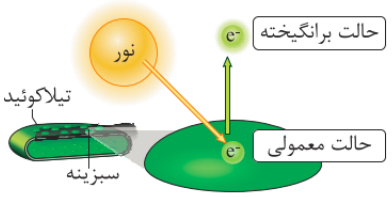
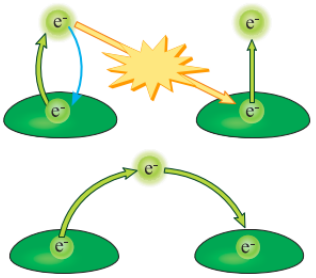
- **واکنش‌های وابسته به نور (تیلاکوئیدی)**
  - **الف** تولید ATP
    - ۱ **روش:** ساخته شدن نوری
    - ۲ **نحوهٔ تولید**
      - الف برخورد نور سبب خروج الکترون از فتوسیستم ۲ می‌شود.
      - ب الکترون وارد زنجیرهٔ انتقال الکترون می‌شود.
      - پ از انرژی الکترون برای پمپ H^+ از بستره به فضای تیلاکوئید استفاده می‌شود.
      - ت تراکم H^+ درون تیلاکوئید زیاد می‌شود.
      - ث آنزیم ATPساز هنگام خروج H^+ از تیلاکوئید، گروه فسفات را به ADP اضافه می‌کند.
  - **ب** تجزیهٔ نوری آب
    - ۱ **واکنش:** $H_2O \rightarrow 2e^- + 2H^+ + \frac{1}{2}O_2$
    - ۲ **نقش:** جبران کمبود الکترون فتوسیستم ۲
  - **پ** تولید NADPH
    - **نحوهٔ تولید**
      - الف برخورد نور سبب خروج الکترون از فتوسیستم ۱ می‌شود.
      - ب الکترون وارد زنجیرهٔ انتقال الکترون می‌شود.
      - پ در انتهای زنجیره، ۲ الکترون و ۱ پروتون به $NADP^+$ می‌پیوندند و آن را به NADPH تبدیل می‌کنند.
- **واکنش‌های مستقل از نور**
  - **الف** **هدف:** تثبیت کربن‌دی‌اکسید
  - **ب** **روش:** چرخهٔ کالوین
    - **مراحل**
      - الف آنزیم روبیسکو CO_2 را به مادهٔ پنج‌کربنی می‌افزاید که حاصل آن ترکیب شش‌کربنی است.
      - ب ماده شش‌کربنی ناپایدار است و به دو اسید سه‌کربنی تجزیه می‌شود.
      - پ هر اسید سه‌کربنی با مصرف ATP و NADPH به قند سه‌کربنی تبدیل می‌شود.
      - ت بعضی قندهای سه‌کربنی از چرخه خارج می‌شوند.



۱ واکنش‌های فتوسنتزی به دو گروه کلی **وابسته به نور** و **مستقل از نور** تقسیم می‌شوند.

۲ وقتی نور به مولکول‌های رنگیزه می‌تابد، ممکن است الکترون با گرفتن **انرژی**، از مدار خود خارج شود. به چنین الکترونی، **الکترون برانگیخته** می‌گویند.

دقت کنید: خارج شدن الکترون از مدار با خارج شدن آن از رنگیزه متفاوت است! اگر الکترون از مدار خود خارج شود، ممکن است با از دست دادن انرژی، به مدار خود بازگردد اما اگر از مولکول رنگیزه خارج شود، دیگر نمی‌تواند به مدار خود باز گردد و به مولکول دیگری (پذیرندهٔ الکترون) منتقل می‌شود.



۳ یکی از حالت‌های ممکن برای **الکترون برانگیخته** این است که با انتقال انرژی به مولکول رنگیزهٔ مجاور، به مدار خود بازگردد. حالت دیگر این است که الکترون از رنگیزه خارج و توسط رنگیزه یا مولکول دیگری گرفته شود. در این حالت، مولکول رنگیزه الکترون از دست می‌دهد و **اکسید** می‌گردد. بدیهی است که مولکول دریافت‌کنندهٔ دیگر، **کاهش** می‌یابد چون الکترون دریافت کرده است.

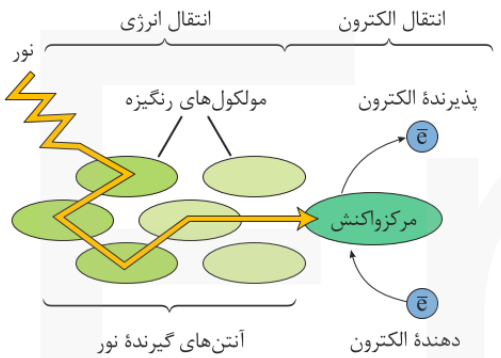
۴ در فتوسنتز، فقط کلروفیل‌های a موجود در **مرکز واکنش** می‌توانند الکترون برانگیخته را آزاد کنند. در صورت برخورد نور به رنگیزه‌های موجود در **آنتن‌ها**، الکترون برانگیختهٔ آن‌ها، انرژی خود را به مولکول مجاور منتقل می‌کند و به سطح انرژی قبلی خود برمی‌گردد. این انتقال تا زمانی که به کلروفیل a مرکز واکنش برسد، ادامه دارد.

۵ کلروفیل a مرکز واکنش، الکترون برانگیختهٔ خود را به یک **پذیرندهٔ الکترون** منتقل می‌کند و در نتیجه، درجهٔ اکسایش کلروفیل a افزایش می‌یابد (اکسید می‌شود). سپس این مولکول با دریافت الکترون از یک دهندهٔ الکترون، درجهٔ اکسایش خود را کاهش می‌دهد (احیا می‌شود).

۶ در آنتن‌های گیرندهٔ نور، **انتقال انرژی** بین رنگیزه‌ها رخ می‌دهد اما **انتقال الکترون** صورت نمی‌گیرد.

۷ برانگیخته شدن الکترون در مرکز واکنش، منجر به **اکسایش سبزینهٔ a** می‌شود اما به‌طور معمول، برانگیخته شدن رنگیزه‌های موجود در آنتن‌ها منجر به اکسایش آن‌ها نمی‌شود.

۸ در سبزدیسه، الکترون خارج شده از هر فتوسیستم، وارد **زنجیرهٔ انتقال الکترون** می‌شود. در غشای تیلاکوئید، دو نوع زنجیرهٔ انتقال الکترون وجود دارد که یکی از آن‌ها بین فتوسیستم‌های ۲ و ۱ و دیگری بین فتوسیستم ۱ و $NADP^+$ قرار دارد.



واکنش‌های وابسته به نور (واکنش‌های تیلاکوئیدی)

اصل مطلب

- در واکنش‌های وابسته به نور که به آن‌ها **واکنش‌های تیلاکوئیدی** نیز گفته می‌شود، پرتوهای نور به مولکول‌های رنگیزه برخورد می‌کنند و موجب تولید الکترون‌های برانگیخته می‌شوند. انرژی این الکترون‌ها برای تولید مولکول‌های ATP و NADPH مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- وقتی نور به **فتوسیستم ۱** برخورد می‌کند، در نهایت کلروفیل a مرکز واکنش ($P_{۷۰۰}$) الکترون برانگیخته آزاد می‌کند. این الکترون با عبور از زنجیرهٔ انتقال الکترون به مولکول $NADP^+$ می‌رسد و مولکول $NADP^+$ با گرفتن دو الکترون و با ایجاد پیوند با پروتون، به مولکول NADPH تبدیل می‌شود:

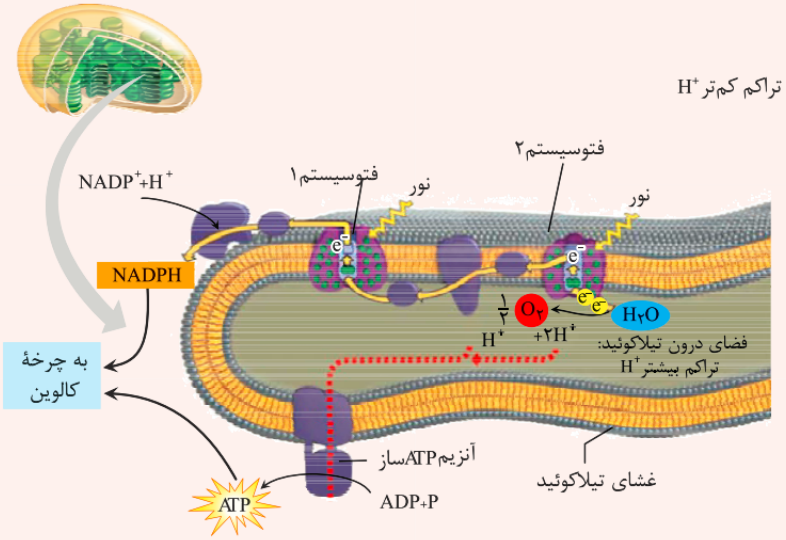
$$NADP^+ + ۲e^- + ۲H^+ \rightarrow NADPH + H^+$$

- وقتی نور به **فتوسیستم ۲** برخورد می‌کند، در نهایت کلروفیل a در مرکز واکنش آن ($P_{۶۸۰}$) الکترون‌های برانگیخته آزاد می‌کند. الکترون‌های برانگیختهٔ خارج شده از فتوسیستم ۲ به سوی فتوسیستم ۱ می‌روند و کمبود الکترونی آن را جبران می‌کنند.
- فتوسیستم ۱ با خروج الکترون برانگیخته از آن، اکسایش و با دریافت الکترون برانگیختهٔ فتوسیستم ۲ کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، کمبود الکترونی فتوسیستم ۱ توسط فتوسیستم ۲ جبران می‌شود.
- کمبود الکترونی فتوسیستم ۲ با **تجزیهٔ نوری آب** جبران می‌شود. به عبارت دیگر وقتی فتوسیستم ۲ الکترون از دست می‌دهد اکسایش می‌یابد اما با دریافت الکترون‌های حاصل از تجزیهٔ آب، کاهش می‌یابد.

نحوهٔ تولید ATP:

۱ وقتی الکترون برانگیختهٔ خارج شده از فتوسیستم ۲ از زنجیرهٔ انتقال الکترون عبور می‌کند تا به فتوسیستم ۱ برسد، یکی از اجزای این زنجیره، پروتئینی است که از انرژی الکترون برای پمپ کردن **یون‌های هیدروژن** از بستره به تیلاکوئید (برخلاف جهت شیب غلظت) استفاده می‌کند.

۲ انتقال فعال یون‌های هیدروژن به درون تیلاکوئید و همچنین تجزیهٔ نوری آب، سبب **افزایش تراکم** یون‌های هیدروژن در درون تیلاکوئید می‌شوند و این یون‌ها تمایل پیدا می‌کنند در جهت شیب غلظت خود از تیلاکوئید خارج شوند (انتشار تسهیل‌شده).



۳ خروج یون‌های هیدروژن از تیلاکوئید، فقط از طریق مجموعهٔ پروتئینی به نام **آنزیم ATP ساز** می‌تواند انجام شود. همزمان با خروج یون‌های هیدروژن، ATP ساخته می‌شود.

نحوهٔ تولید NADPH:

۱ الکترون‌های برانگیختهٔ خارج شده از فتوسیستم۱، به نوعی **پذیرندهٔ الکترون** به نام $NADP^+$ منتقل می‌شوند.

۲ $NADP^+$ با دریافت دو الکترون، بار منفی پیدا می‌کند. سپس با دریافت پروتون، به NADPH تبدیل می‌شود.

$$NADP^+ + 2e^- \rightarrow NADP^-$$

$$\Rightarrow NADP^- + 2H^+ \rightarrow NADPH + H^+$$

۹ غشای تیلاکوئید همانند غشای یاخته از **دو لایهٔ فسفولیپیدی** تشکیل شده است و مولکول‌های **پروتئینی** دارد. مهم‌ترین تفاوت غشای تیلاکوئید با غشای یاخته، وجود **زنجیرهٔ انتقال الکترون** در غشای تیلاکوئیدهاست.

زووم: زنجیره‌های انتقال الکترون، از مولکول‌های پروتئینی و غیرپروتئینی تشکیل شده‌اند. با توجه به پیچیدگی نسبی موضوع، کتاب درسی وارد این بحث نشده است و فقط در یک مورد، به جنس پروتئین **پمپ‌کنندهٔ یون هیدروژن** اشاره کرده است.

۱۰ تجزیهٔ نوری آب در فتوسیستم۲ و در **سطح داخلی تیلاکوئید** انجام می‌شود ($H_2O \rightarrow 2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$). در اثر تجزیهٔ نوری آب در فتوسیستم۲، الکترون، پروتون (H^+) و اکسیژن حاصل می‌شود:

۱ الکترون‌ها، کمبود الکترونی سبزینهٔ a در مرکز واکنش را جبران می‌کنند.

۲ پروتون‌ها در فضای **درون تیلاکوئید** تجمع می‌یابند.

۳ اکسیژن آزاد شده با عبور از غشای تیلاکوئید، به **بستره** می‌رسد و سپس با عبور از دو غشای سبزدیسه وارد **مادهٔ زمینه‌ای سیتوپلاسم** می‌شود. مقداری از اکسیژن وارد میتوکندری می‌شود و در واکنش‌های تنفس هوازی مورد استفاده قرار می‌گیرد و مقدار دیگری از آن با عبور از غشای یاخته، آزاد می‌شود. پس اکسیژن تولید شده در تیلاکوئید با طی کردن مسیر زیر از یاخته خارج می‌شود:

فضای تیلاکوئید ← بستره ← غشای درونی ← فضای بین دو غشا ← غشای بیرونی ← سیتوپلاسم ← غشا ← دیواره ← خارج یاخته

به عبارت دیگر، اکسیژن تولید شده در فتوسنتز گیاهان، با عبور از **۴ غشا** (۸ لایهٔ فسفولیپیدی) از یاخته خارج می‌شود.

۱۱ زنجیرهٔ انتقال الکترونی که الکترون برانگیخته را از فتوسیستم۱ دریافت می‌کند، تراکم H^+ تیلاکوئید را تغییر نمی‌دهد.

۱۲ در غشای تیلاکوئید، تعداد آنزیم‌های ATPساز کمتر از تعداد پروتئین‌های انتقال‌دهندهٔ یون هیدروژن است.

۱۳ به دو دلیل، فضای درون تیلاکوئید در مقایسه با بسترهٔ سبزدیسه، pH کمتری دارد، یعنی تراکم یون هیدروژن در فضای تیلاکوئید بیشتر از بستره است:

۱ تجزیهٔ نوری آب که منجر به آزاد شدن یون‌های هیدروژن به فضای تیلاکوئید می‌شود.

۲ فعالیت پمپ پروتئینی که با استفاده از انرژی الکترون، یون‌های هیدروژن را به فضای تیلاکوئید انتقال می‌دهد.

۱۴ در غشای هر تیلاکوئید، تعداد زیادی فتوسیستم وجود دارد. این را هم در نظر داشته باشید که تعداد فتوسیستم‌های ۱ و ۲ **برابر** است.

۱۵ فتوسیستم۱ در مقایسه با فتوسیستم۲ **بزرگ‌تر** است و تعداد **بیشتری** آنتن گیرندهٔ نور دارد!

تذکر مهم: فتوسیستم‌های ۱ و ۲ و همچنین زنجیره‌های انتقال الکترونی که بعد از آن‌ها قرار دارند، به‌طور **همزمان** فعالیت می‌کنند. چون در طول روز، در هر لحظه نور می‌تواند به هر دوی آن‌ها برخورد کرده و الکترون برانگیخته ایجاد کند.

۱۶ در زنجیره انتقال الکترونی که بعد از فتوسیستم۱ قرار دارد، آخرین عضو زنجیره دارای **خاصیت آنزیمی** است. این پروتئین با افزودن الکترون و H^+ به $NADP^+$، NADPH تولید می‌کند.

۱۷ عامل اولیه در روند تولید ATP در فتوسنتز، نور است. به همین دلیل به آن **ساخته شدن نوری** ATP می‌گویند.

۱۸ زنجیرهٔ انتقال الکترونی که الکترون خارج شده از فتوسیستم۱ را دریافت می‌کند، فاقد پروتئین پمپ‌کنندهٔ هیدروژن است. فقط یکی از اجزای زنجیرهٔ انتقال الکترون بین فتوسیستم‌های ۲ و ۱ **پمپ پروتئینی** است که با استفاده از انرژی الکترون، یون‌های هیدروژن را از بستره به تیلاکوئید وارد می‌کند.

۱۹ انتقال یون‌های هیدروژن از بستره به تیلاکوئید با روش **انتقال فعال** اما خروج این یون‌ها از تیلاکوئید با روش **انتشار تسهیل‌شده** است.

۲۰ انتقال پروتون‌ها از تیلاکوئیدها به بستره فقط از طریق آنزیم ATP ساز (به روش **انتشار تسهیل‌شده**) صورت می‌گیرد.
۲۱ آنزیمی که در واکنش‌های وابسته به نور فتوسنتز آب را تجزیه می‌کند، برای تأمین انرژی فعال‌سازی به ATP نیاز ندارد.
۲۲ پمپ پروتئینی موجود در غشای تیلاکوئید با عملکرد خود، سبب کاهش تراکم یون‌های هیدروژن در بستره و افزایش تراکم این یون در تیلاکوئید می‌شود و به این ترتیب **شیب غلظت** هیدروژن را افزایش می‌دهد.
۲۳ پذیرندهٔ نهایی الکترون در واکنش‌های وابسته به نور فتوسنتز، مولکول $NADP^+$ است چون الکترون در انتهای زنجیرهٔ انتقال به آن می‌رسد.

تذکر مهم: $NADP^+$ از اجزای زنجیرهٔ انتقال الکترون محسوب **نمی‌شود**.

۲۴ عوامل سازندهٔ ATP و NADPH در غشای تیلاکوئید قرار دارند اما دقت کنید که ATP و NADPH **درون تیلاکوئید** تولید نمی‌شوند. در واقع بخشی از پروتئین‌های سازندهٔ این مولکول‌ها در **بستره** قرار دارد و ATP و NADPH را پس از تولید، به بستره آزاد می‌کند.
۲۵ کمبود الکترونی فتوسیستم۱ توسط **الکترون برانگیخته** خارج شده از فتوسیستم۲ جبران می‌شود در حالی که کمبود الکترونی فتوسیستم۲ با الکترون‌های حاصل از **تجزیهٔ نوری آب** جبران می‌شود (نه الکترون برانگیخته!).
۲۶ با انجام واکنش‌های وابسته به نور فتوسنتز، از میزان آب یاخته **کاسته** می‌شود؛ در نتیجه، فشار اسمزی آن **افزایش** می‌یابد اما با انجام تنفس یاخته‌ای آب تولید می‌شود و با **افزایش** میزان آب یاخته، فشار اسمزی آن **کاهش** می‌یابد.

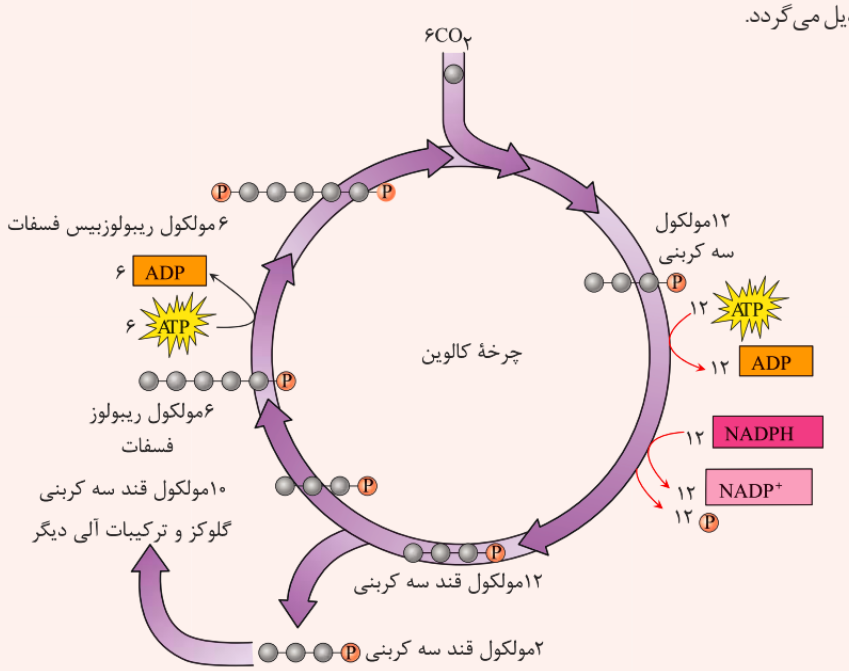
واکنش‌های مستقل از نور فتوسنتز (تثبیت کربن)

اصل مطلب

■ شامل مجموعه واکنش‌هایی است که بدون نیاز به نور، در **بستهٔ سبزدیسه** انجام می‌شوند و طی آن‌ها مولکول‌های CO_2 به **قند** تبدیل می‌شوند. ساخته شدن قند در چرخه‌ای از واکنش‌ها به نام **چرخهٔ کالوین** انجام می‌شود.

■ **مراحل چرخهٔ کالوین:**

۱ مولکول CO_2 با قند پنج‌کربنی دو فسفاته (**ریبولوزبیس‌فسفات**) ترکیب می‌شود که حاصل آن ترکیب **شش‌کربنی دو فسفاته** است. این واکنش با کمک آنزیم **روبیسکو** انجام می‌شود.
۲ ترکیب شش‌کربنی دو فسفاته **ناپایدار** است و بلافاصله به **دو اسید سه‌کربنی یک فسفاته** تجزیه می‌شود. این عمل بدون دخالت آنزیم انجام می‌شود.
۳ هر اسید سه کربنی با مصرف ATP و NADPH به یک **قند سه کربنی** تبدیل می‌شود. قند سه کربنی همانند اسید سه کربنی چرخهٔ کالوین، دارای گروه فسفات است.
۴ بعضی از قندهای سه کربنی ساخته شده، از چرخه خارج شده و برای ساخته شدن **گلوکز** و سایر **ترکیبات آلی** مورد استفاده قرار می‌گیرند.
۵ بعضی دیگر از قندهای سه کربنی برای بازسازی **ریبولوزبیس‌فسفات** مصرف می‌شوند. قندهای سه کربنی یک فسفاته، ابتدا به قند پنج کربنی یک فسفاته (ریبولوزفسفات) تبدیل می‌شوند. سپس هر قند پنج کربنی یک فسفاته با مصرف یک مولکول ATP به قند پنج کربنی دو فسفاته (ریبولوزبیس‌فسفات) تبدیل می‌گردد.



۲۷ عدد اکسایش اتم کربن در مولکول قند نسبت به کربن در CO_2، **کاهش** یافته است.

۲۸ اولین مادهٔ آلی ساخته شده در چرخهٔ کالوین، ترکیب **شش‌کربنی** اما اولین مادهٔ آلی پایدار ساخته شده در این چرخه، ترکیب **سه‌کربنی** (اسید سه‌کربنی) است.

۲۹ در چرخهٔ کالوین، CO_2 برای ساخته شدن **ترکیبات آلی** به‌کار می‌رود. به فرایند استفاده از CO_2 برای تشکیل ترکیب‌های آلی، **تثبیت کربن** می‌گویند.

دقت کنید: ریبولوزفسفات، نوعی قند پنج‌کربنی **یک فسفاته** اما ریبولوزبیس‌فسفات، نوعی قند پنج‌کربنی **دو فسفاته** است.

۳۰ آنزیم روبیسکو (ریبولوزبیس‌فسفات کربوکسیلاز ـ اکسیژناز) دارای دو نوع فعالیت است. این آنزیم هنگام **فعالیت اکسیژنازی** خود، O_2 را ریبولوزبیس‌فسفات (قند پنج‌کربنی) می‌افزاید و آن را اکسیژنه می‌کند و هنگام **فعالیت کربوکسیلازی** نیز با افزودن CO_2 به ریبولوزبیس‌فسفات، آن را کربوکسیله می‌کند و در آن عامل کربوکسیل تشکیل می‌دهد.

۳۱ آنزیم روبیسکو در چرخهٔ کالوین، فعالیت **کربوکسیلازی** دارد؛ فعالیت اکسیژنازی این آنزیم مربوط به فرایند تنفس نوری است.

۳۲ در چرخهٔ کالوین، آنزیم روبیسکو در **تجزیهٔ** ترکیب شش‌کربنی برخلاف تشکیل آن دخالتی ندارد. این مولکول به دلیل ناپایداری به دو اسید سه‌کربنی تجزیه می‌شود.

۳۳ در چرخهٔ کالوین، ATP به عنوان **منبع انرژی** و NADPH به عنوان **منبع انرژی** و **الکترون** استفاده می‌شود. مولکول‌های ATP و NADPH مورد نیاز چرخهٔ کالوین از واکنش‌های وابسته به نور تأمین می‌شوند.

۳۴ در دو مرحله از چرخهٔ کالوین، ATP مصرف می‌شود؛ با این تفاوت که در دومین مرحلهٔ این چرخه، گروه فسفات ATP به اسید سه‌کربنی متصل نمی‌شود اما در مرحلهٔ آخر چرخه، گروه فسفات ATP به ترکیب پنج‌کربنی افزوده می‌شود.

۳۵ واکنش‌های مستقل از نور فتوسنتز (تثبیت کربن) در گیاهان، در بسترهٔ سبزدیسه انجام می‌شوند و طی آن‌ها مولکول‌های CO_2 به قند تبدیل می‌گردند.

۳۶ چرخهٔ کالوین، مستقل از نور انجام می‌شود اما ATP ها و NADPH های مورد نیاز چرخهٔ کالوین، توسط واکنش‌های وابسته به نور تأمین می‌شوند.

۳۷ به ازای تثبیت هر مولکول CO_2 در چرخهٔ کالوین، ۳ مولکول ATP و ۲ مولکول NADPH مصرف می‌شود.

۳۸ برای تولید و خارج شدن یک قند سه کربنی، لازم است ۳ مولکول CO_2 در چرخهٔ کالوین تثبیت شود و برای این کار، ۹ مولکول ATP و ۶ مولکول NADPH مصرف می‌شود.

۳۹ برای تولید یک مولکول گلوکز، به دو قند سه کربنی نیاز است؛ بنابراین برای تولید یک مولکول گلوکز، لازم است ۶ مولکول CO_2 در چرخهٔ کالوین تثبیت شود و برای این کار، ۱۸ مولکول ATP و ۱۲ مولکول NADPH مصرف می‌شود.

۴۰ در تمام مراحل چرخهٔ کالوین، **ترکیبات فسفات‌دار** تولید می‌شوند.

۴۱ در فتوسنتز گیاهان، همهٔ آنزیم‌های مؤثر در مرحلهٔ وابسته به نور از نوع **غشایی** هستند و در غشای تیلاکوئید قرار دارند اما هیچ یک از آنزیم‌های مؤثر در مرحلهٔ مستقل از نور در غشا قرار ندارند.

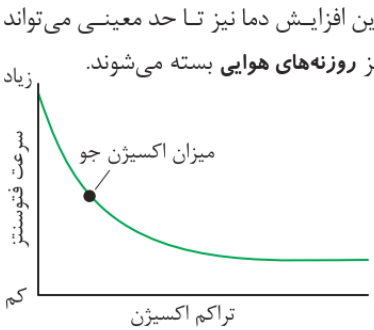
۴۲ بیشتر گیاهان (گیاهان C_3) تثبیت کربن را فقط با **چرخهٔ کالوین** انجام می‌دهند؛ اما بعضی گیاهان علاوه بر چرخهٔ کالوین، تثبیت کربن را با روش دیگری نیز انجام می‌دهند (گیاهان C_4 و CAM).

اثر محیط بر فتوسنتز

۴۳ طول موج، شدت و مدت تابش نور، میزان CO_2، دما و میزان اکسیژن بر فتوسنتز اثر می‌گذارند. البته افزایش **بیش از حد** شدت نور می‌تواند سبب کاهش فتوسنتز شود، چون در شدت نور زیاد **روزنه‌های هوایی** بسته می‌شوند.

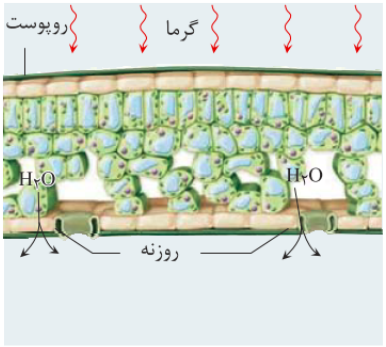
۴۴ فتوسنتز، فرایندی **آنزیمی** است و فعالیت آنزیم‌ها در گسترهٔ دمایی خاصی انجام می‌شود؛ بنابراین افزایش دما نیز تا حد معینی می‌تواند فتوسنتز را افزایش دهد اما افزایش بیش از حد دما نیز موجب کاهش فتوسنتز می‌شود چون در دمای بالا نیز **روزنه‌های هوایی** بسته می‌شوند.

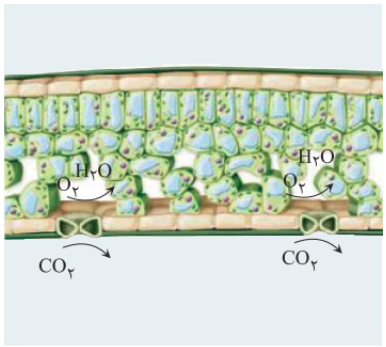
۴۵ نمودار مقابل ارتباط بین تراکم اکسیژن و فتوسنتز را نشان می‌دهد. با افزایش **تراکم اکسیژن** محیط، سرعت و میزان فتوسنتز **کاهش** می‌یابد؛ چون در تراکم زیاد اکسیژن، آنزیم **روبیسکو** در جهت اکسیژنازی فعال می‌شود.



۴۶ با افزایش مقدار هورمون **آبسیزیک‌اسید** در گیاه، روزنه‌های هوایی بسته می‌شوند و با **کاهش** مقدار CO_2 برگ، فتوسنتز **کاهش** می‌یابد.

- **تنفس نوری**
  - **تعریف:** فرایندی که همراه با فتوسنتز انجام می‌شود و طی آن O_2 مصرف و CO_2 آزاد می‌شود.
  - **الف** **شرایط انجام:** کاهش CO_2 برگ به دلیل بسته بودن روزنه‌ها
  - **ب** **مراحل**
    1. آنزیم روبیسکو با فعالیت اکسیژنازی، O_2 را به ریبولوزبیس‌فسفات می‌افزاید.
    2. مولکول حاصل، براثر ناپایداری به دو مولکول سه‌کربنی و دوکربنی تجزیه می‌شود.
    3. مولکول دوکربنی از کلروپلاست خارج می‌شود و CO_2 آزاد می‌کند.
  - **پ** **محل انجام:** بسترهٔ سبزدیسه و بخش داخلی راکیزه
- **گروه‌بندی گیاهان براساس روش تثبیت CO_2**
  - **الف** **گیاهان C_3**
    1. بیشتر گیاهان در این گروه قرار می‌گیرند.
    2. اولین ترکیب پایدار حاصل از تثبیت CO_2: اسید ۳ کربنی
    3. فاقد سازگاری برای مقابله با تنفس نوری
  - **ب** **گیاهان C_4**
    1. **مثال:** ذرت
    2. اولین ترکیب پایدار حاصل از تثبیت CO_2: اسید ۴ کربنی
    3. تثبیت CO_2 طی دو مرحله در دو یاختهٔ مختلف
       - **الف** مرحلهٔ ۱ در میانبرگ: تولید اسید چهارکربنی
       - **ب** مرحلهٔ ۲ در غلاف آوندی: چرخهٔ کالوین
  - **پ** **گیاهان CAM**
    1. **مثال:** آناناس
    2. اولین ترکیب پایدار حاصل از تثبیت CO_2: اسید ۴ کربنی
    3. تثبیت CO_2 طی دو مرحله در یک یاخته در دو زمان مختلف
       - **الف** مرحله ۱ در شب: تولید اسید چهارکربنی
       - **ب** مرحله ۲ در روز: چرخهٔ کالوین
- **جانداران فتوسنتزکنندهٔ دیگر:** بخش عمدهٔ فتوسنتز توسط جاندارانی که گیاه نیستند انجام می‌شود.
  - **باکتری‌های فتوسنتزکننده**
    1. اکسیژن‌زا
       - **الف** **مثال:** سیانوباکتری‌ها
       - **ب** رنگیزهٔ فتوسنتزی: سبزینهٔ a
       - **پ** منبع الکترون: آب
    2. غیراکسیژن‌زا
       - **الف** **مثال:** باکتری‌های گوگردی سبز و گوگردی ارغوانی
       - **ب** رنگیزهٔ فتوسنتزی: باکتریوکلروفیل
       - **پ** منبع الکترون: ترکیبی غیراز آب مانند H_2S
- **شیمیوسنتز:** ساختن مادهٔ آلی با استفاده از انرژی مواد شیمیایی (به‌جای نور)
  - **باکتری‌های شیمیوسنتزکننده**
    1. زیستگاه: معادن، اعماق اقیانوس‌ها، دهانه آتشفشان‌های زیر آب
    2. منبع انرژی: واکنش‌های اکسایش
    3. **مثال:** باکتری نیترات‌ساز





۱ گیاهان در پاسخ به افزایش بیش از حد دما و نور، روزنه‌های هوایی خود را به منظور **کاهش تعرق** می‌بندند. با بسته شدن روزنه‌ها، تبادل گازهای اکسیژن و کربن‌دی‌اکسید از روزنه‌ها نیز متوقف می‌شود اما فتوسنتز همچنان ادامه می‌یابد. به همین دلیل، به‌تدریج از میزان **کربن‌دی‌اکسید** کاسته و به دلیل تجزیهٔ آب، بر میزان **اکسیژن** برگ افزوده می‌شود.

۲ افزایش اکسیژن در اطراف یاخته‌های سبزدیسه‌دار، شرایط را برای **تنفس نوری** (فعالیت اکسیژنازی روبیسکو) فراهم می‌کند.

۳ روزنهٔ هوایی، فضایی است که بین دو یاختهٔ لوبیایی‌شکل به نام **یاخته‌های نگهبان** روزنه ایجاد می‌شود. یاخته‌های نگهبان روزنه، از یاخته‌های تمایزیافتهٔ روپوستی در **اندام‌های هوایی** گیاهان هستند.

فلش‌بَک: باز و بسته شدن روزنه‌ها به دلیل **ساختار خاص** یاخته‌های نگهبان و **تغییر فشار تورژسانس** آن‌هاست. برای باز شدن روزنهٔ هوایی:
۱ **نور** موجب تحریک انباشت ساکارز و یون‌های Cl^- و K^+ در یاخته‌های نگهبان می‌شود.
۲ **پتانسیل آب** در یاخته‌های نگهبان **کاهش** می‌یابد و در نتیجه، آب از یاخته‌های مجاور وارد یاخته‌های نگهبان می‌شود.
۳ یاخته‌های نگهبان دچار **تورژسانس** می‌شوند. هنگام تورژسانس، **آرایش شعاعی** رشته‌های سلولزی مانع از افزایش قطر این یاخته‌ها می‌شود؛ بنابراین فقط طول یاخته افزایش می‌یابد و به دلیل **عدم یکنواختی** ضخامت دیواره، یاخته‌های نگهبان خمیده می‌شوند و روزنهٔ هوایی باز می‌شود.
برای بسته شدن روزنهٔ هوایی، موادی از قبیل یون‌های کلر و پتاسیم از یاخته‌های نگهبان خارج می‌شوند و در نتیجه آب از یاخته‌های نگهبان خارج می‌شود.

۴ **روزنه‌های آبی** برخلاف روزنه‌هایی باز و بسته نمی‌شوند. این روزنه‌ها در انتها یا لبهٔ برگ‌های گیاهان قرار دارند و **همیشه بازند**. خروج آب به‌صورت مایع از این روزنه‌ها، **تعریق** نامیده می‌شود.

زووم: در صفحهٔ ۸۶ کتاب درسی می‌خوانیم: «وقتی روزنه‌ها به‌منظور کاهش تعرق بسته می‌شوند، تبادل گازهای اکسیژن و کربن‌دی‌اکسید از **روزنه‌ها** متوقف می‌شود.» اگر به این جمله‌بندی هوشمندانه دقت کنید، متوجه خواهید شد که در این شرایط، تبادل گازها به طور کامل متوقف نمی‌شود؛ بلکه فقط تبادل گازها از طریق **روزنه‌ها** متوقف می‌شود! گیاهان می‌توانند از مناطقی مانند **عدسک‌ها** و **پوستک** نیز مقدار کمی بخار آب و گازهای تنفسی را با محیط مبادله کنند.

تنفس نوری

اصل مطلب

- با افزایش نسبت اکسیژن به کربن‌دی‌اکسید در اطراف یاخته‌های برگ، وضعیت برای فعالیت **اکسیژنازی** روبیسکو و فرایند تنفس نوری مساعد می‌شود. تنفس نوری، فرایندی **وابسته به نور** است که همراه با فتوسنتز انجام می‌گیرد و در آن، اکسیژن **مصرف** و کربن‌دی‌اکسید آزاد می‌شود.
- **مراحل تنفس نوری:**

۱ آنزیم روبیسکو با فعالیت اکسیژنازی خود، **اکسیژن** را به ریبولوزبیس‌فسفات اضافه می‌کند که حاصل آن، ترکیب **پنج‌کربنی دو فسفاته** است.
۲ ترکیب پنج‌کربنی دو فسفاته ناپایدار است و به دو مولکول (سه‌کربنی و دو کربنی) تجزیه می‌شود.
۳ مولکول سه‌کربنی برای بازسازی ریبولوزبیس فسفات مصرف می‌شود و مولکول **دوکربنی** از سبزدیسه خارج می‌شود.
۴ مولکول دوکربنی در واکنش‌هایی که بخشی از آن‌ها در راکیزه انجام می‌گیرد، تجزیه می‌شود و **کربن‌دی‌اکسید** آزاد می‌کند.

۵ در تنفس نوری، مادهٔ آلی تجزیه می‌شود اما این فرایند برخلاف تنفس یاخته‌ای، ATP **تولید نمی‌کند**.

۶ به طور کلی، آنزیم روبیسکو دو نوع فعالیت دارد: ۱ فعالیت کربوکسیلازی که **چرخهٔ کالوین** را به پیش می‌برد. ۲ فعالیت اکسیژنازی که **تنفس نوری** را به پیش می‌برد. به همین دلیل به آن ریبولوزبیس‌فسفات کربوکسیلاز ـ اکسیژناز می‌گویند.

۷ نوع فعالیت روبیسکو به غلظت اکسیژن و کربن‌دی‌اکسید یاخته بستگی دارد. اگر در اطراف این آنزیم، غلظت **کربن‌دی‌اکسید** بیشتر باشد، در جهت کربوکسیلازی فعالیت می‌کند، اما اگر در اطراف این آنزیم، غلظت **اکسیژن** بیشتر باشد، در جهت اکسیژنازی فعال می‌شود. وقتی روبیسکو در جهت اکسیژنازی فعال می‌شود، چرخهٔ کالوین انجام نمی‌شود. بنابراین تنفس نوری، با جلوگیری از انجام چرخهٔ کالوین، سبب کاهش میزان فراورده‌های نهایی فتوسنتز می‌شود.

۸ محل فعالیت آنزیم روبیسکو در هر دو حالت کربوکسیلازی و اکسیژنازی، **بسترهٔ کلروپلاست** است.

۹ در تنفس نوری از تجزیهٔ ترکیب پنج‌کربنی ناپایدار دو مولکول حاصل می‌شود که یکی سه‌کربنی و دیگری دو کربنی است. هر دوی این مولکول‌ها **یک فسفاته** هستند.

۱۰ انواعی از گیاهان (C_4 و CAM) وجود دارند که در محیط‌هایی با دمای بالا و تابش شدید نور خورشید، زندگی می‌کنند. این گیاهان، سازوکارهایی دارند که با کمک آن‌ها تنفس نوری خود را **کاهش** می‌دهند.

۱۱ ریبولوزبیس‌فسفات، نوعی قند پنج‌کربنی است که هم در چرخهٔ کالوین و هم در تنفس نوری به عنوان **پیش‌مادهٔ روبیسکو** مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این تفاوت که در چرخهٔ کالوین با کربن‌دی‌اکسید و در تنفس نوری با اکسیژن ترکیب می‌شود.

۱۲ در درمای بالا و نور شدید که روزنه‌های هوایی بسته و شرایط برای فعالیت اکسیژنازی روبیسکو فراهم می‌شود، مقدار هورمون **آبسیزیک‌اسید** در گیاه بالاست. پس می‌توان گفت که همزمان با تنفس نوری، مقدار این هورمون در گیاه افزایش یافته است.

فتوسنتز در گیاهان C۴

اصل مطلب

- یاخته‌های غلاف آوندی این گیاهان، **سبزدیسه** دارند و چرخهٔ کالوین در آن‌ها انجام می‌شود. در حالی که غلاف آوندی گیاهان C_3، سبزدیسه ندارند.
- این گیاهان، تثبیت کربن را طی دو مرحله با **تقسیم‌بندی مکانی** انجام می‌دهند:

مرحلهٔ اول: در یاخته‌های **میانبرگ**، CO_2 با اسید سه‌کربنی ترکیب می‌شود که حاصل آن **اسید چهارکربنی** است.
اسید چهارکربنی تولید شده در یاخته‌های میانبرگ، از طریق **پلاسمودسم‌ها** به یاخته‌های غلاف آوندی منتقل می‌شود.
مرحلهٔ دوم: در یاخته‌های **غلاف آوندی**، اسید چهارکربنی به CO_2 و اسید سه‌کربنی تجزیه می‌شود. CO_2 وارد چرخهٔ کالوین می‌شود و اسید سه‌کربنی نیز به یاخته‌های میانبرگ بازمی‌گردد.

۱۳ در گیاهان C_4، آنزیمی که در افزودن CO_2 به اسید سه‌کربنی و تشکیل اسید چهارکربنی نقش دارد، برخلاف روبیسکو، تمایلی به O_2 ندارد و به طور اختصاصی، CO_2 را به اسید سه‌کربنی اضافه می‌کند.

۱۴ اولین ترکیب پایدار حاصل از تثبیت کربن در گیاهان C_4، ترکیبی **چهارکربنی** است.

۱۵ در گیاهان C_4، به دلیل عملکرد آنزیم‌های گوناگون در تثبیت کربن و **تقسیم‌بندی مکانی** تثبیت کربن در دو نوع یاخته، میزان CO_2 در محل فعالیت روبیسکو به اندازه‌ای بالا نگه داشته می‌شود که **بازدارندهٔ تنفس نوری** است. بنابراین در گیاهان C_4، **به ندرت** تنفس نوری انجام می‌شود.

۱۶ گیاهان C_4 در دماهای بالا، شدت نورهای زیاد و کمبود آب، با وجود بسته بودن روزنه‌ها، **کارآیی بالاتری** نسبت به گیاهان C_3 دارند.

۱۷ میزان فتوسنتز گیاهان C_4 در شدت نور زیاد و دماهای بالا، حدوداً **دو برابر** گیاهان C_3 است.

۱۸ در گیاهان C_4، حتی هنگام بسته بودن روزنه‌ها، آنزیم روبیسکو در یاخته‌های غلاف آوندی فعالیت **کربوکسیلازی** دارد.

۱۹ در گیاهان C_4، انتقال اسید چهارکربنی حاصل از تثبیت اولیهٔ کربن، از طریق **کانال‌های میان‌یاخته‌ای** صورت می‌گیرد که از یاختهٔ میانبرگ به یاختهٔ غلاف آوندی کشیده شده‌اند و **پلاسمودسم** نامیده می‌شوند.

۲۰ با توجه به شکل مقابل که در آن مورد (الف) مربوط به برگ گیاه C_3 و مورد (ب) مربوط به گیاه C_4 است:

الف) برگ گیاه C_3

ب) برگ گیاه C_4

۱ غلاف آوندی برگ گیاهان C_3 فاقد **سبزدیسه** است است و به همین دلیل، فاقد رنگ سبز است.

۲ غلاف آوندی گیاهان C_4 دارای کلروپلاست و در نتیجه مقادیر فراوانی **سبزینه** است. به همین دلیل به رنگ سبز تیره دیده می‌شود.

۳ یاخته‌های میانبرگ گیاهان تعداد زیادی سبزدیسه دارند که درون هر یک از آن‌ها مقادیر فراوانی سبزینه وجود دارد. چون این یاخته‌ها **همهٔ مراحل فتوسنتز** را انجام می‌دهند.

۴ یاخته‌های میانبرگ گیاهان C_4 به رنگ سبز روشن دیده می‌شوند. چون در این یاخته‌ها، فقط **بخشی از مراحل فتوسنتز** انجام می‌شود و به همین دلیل تعداد کمتری سبزدیسه دارند.

گیاهان CAM

اصل مطلب

- این گیاهان در مناطقی زندگی می‌کنند که با مسئلهٔ دمای بالا و نور شدید در طول روز و همچنین با کمبود آب مواجه‌اند.
- روزنه‌های گیاهان CAM برای جلوگیری از هدر رفتن آب در طول روز بسته و شب‌ها باز می‌شوند. برگ، ساقه و یا هر دوی آن‌ها در گیاهان CAM، گوشتی و پر آب است. **کریچه‌**های این گیاهان، ترکیباتی دارند که آب را نگه می‌دارند.
- گیاهان CAM، تثبیت کربن‌دی‌اکسید را طی دو مرحله در یک یاخته، با **تقسیم‌بندی زمانی** (بدون تقسیم‌بندی مکانی) انجام می‌دهند:

مرحلهٔ اول: کربن‌دی‌اکسید، شب‌ها از طریق روزنه‌های هوایی وارد برگ می‌شود و به صورت **اسیدهای چهارکربنی** تثبیت می‌گردد.
مرحلهٔ دوم: در طول روز، اسیدهای چهارکربنی تجزیه می‌شوند و CO_2 آزاد می‌کنند و CO_2 وارد چرخهٔ کالوین می‌شود.

۲۱ در گیاهان CAM، آنزیم روبیسکو در طول روز با وجود بسته بودن روزنه‌ها، فعالیت **کربوکسیلازی** انجام می‌دهد.

۲۲ ذرت از گیاهان C_4 است و **آناناس** و **کاکتوس** از گیاهان CAM هستند.

۲۳ در گیاهان C_3 هنگام مواجهه با شرایط نامساعد محیطی، آنزیم روبیسکو در جهت **اکسیژنازی** فعال می‌شود اما در گیاهان C_4 و CAM حتی در شرایط محیطی نامساعد، آنزیم روبیسکو می‌تواند فعالیت **کربوکسیلازی** انجام دهد. مثلاً در گیاهان C_4، حتی با وجود بسته بودن روزنه‌ها در هوای گرم، آنزیم روبیسکو در یاخته‌های غلاف آوندی فعالیت کربوکسیلازی انجام می‌دهد.

۲۴ گیاهان C_4 و CAM همانند گیاهان C_3، در بخشی از فرایند تثبیت کربن، آن را به‌صورت اسید سه‌کربنی تثبیت می‌کنند (در چرخهٔ کالوین).

۲۵ گیاهان C_4 و CAM در مقایسه با گیاهان C_3 آنزیم‌های متنوع‌تری برای تثبیت کربن دارند. چون گیاهان C_4 و CAM علاوه بر روبیسکو و سایر آنزیم‌های **چرخهٔ کالوین**، آنزیم‌های دیگری برای تولید **اسید چهارکربنی** دارند.

۲۶ در همهٔ گیاهان (C_3، C_4 و CAM) اولین ترکیب پایدار حاصل از تثبیت کربن، یک **ترکیب اسیدی** است (سه‌کربنی یا چهارکربنی).

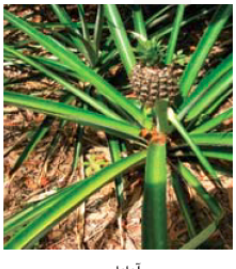
۲۷ گیاهانِ CAM در طول شب اسید چهارکربنی را در یاخته‌های میانبرگ خود ذخیره می‌کنند. بنابراین عصارهٔ برگ این گیاهان در آغاز روشنایی (صبح) نسبت به آغاز تاریکی (شب) **اسیدی‌تر** است.

جمع‌بندی — روش‌های تثبیت کربن‌دی‌اکسید در گیاهان

گیاهان	**فاقد سازش** برای مقابله با تنفس نوری	گیاهان C_3	اغلب گیاهان در این گروه قرار می‌گیرند. مثال: گل‌سرخ
			اولین ترکیب پایدار حاصل از تثبیت کربن: اسید سه‌کربنی
			تثبیت کربن طی یک مرحله (فقط چرخهٔ کالوین)
	دارای سازش برای مقابله با تنفس نوری	گیاهان C_4	بعضی از گیاهان سازگار با شدت نور زیاد، دمای بالا و کمبود آب. مثال: ذرت
			اولین ترکیب پایدار حاصل از تثبیت کربن: اسید چهارکربنی
			تثبیت کربن طی دو مرحله (با تقسیم‌بندی مکانی) — مرحلهٔ ۱: تولید اسید چهارکربنی در میانبرگ
			مرحلهٔ ۲: چرخهٔ کالوین در غلاف آوندی
		گیاهان CAM	بعضی از گیاهان سازگار با شدت نور زیاد، دمای بالا و کمبود آب. مثال: آناناس
			اولین ترکیب پایدار حاصل از تثبیت کربن: اسید چهارکربنی
			تثبیت کربن طی دو مرحله (با تقسیم‌بندی زمانی) — مرحلهٔ ۱: تولید اسید چهارکربنی در طول شب
			مرحلهٔ ۲: چرخهٔ کالوین در طول روز

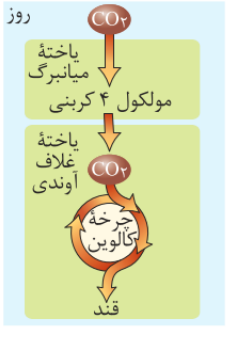
گل رز

ذرت

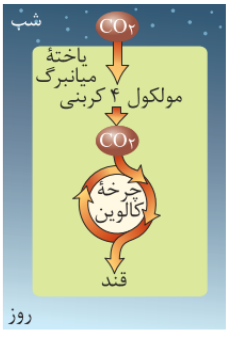


آناناس

الف



ب



پ

جانداران فتوسنتزکنندهٔ دیگر

اصل مطلب

■ بخش عمدهٔ فتوسنتز را جاندارانی انجام می‌دهند که **گیاه نیستند** و در خشکی زندگی نمی‌کنند. انواعی از **باکتری‌ها** و **آغازیان** در محیط‌های متفاوت خشکی و آبی فتوسنتز می‌کنند.

باکتری‌ها: باکتری‌هایی که فتوسنتز می‌کنند، سبزدیسه ندارند اما دارای **رنگیزه‌های جذب‌کنندهٔ نور** هستند. باکتری‌های فتوسنتزکننده به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند:

۱ **باکتری‌های اکسیژن‌زا:** این باکتری‌ها سبزینه دارند. مثلاً سیانوباکتری‌ها **سبزینهٔ a** دارند و همانند گیاهان، با استفاده از آب، CO_2 و نور مادهٔ آلی می‌سازند.

۲ **باکتری‌های غیراکسیژن‌زا:** رنگیزهٔ فتوسنتزی این باکتری‌ها **باکتریوکلروفیل** نام دارد. این باکتری‌ها کربن‌دی‌اکسید را جذب می‌کنند اما اکسیژن تولید نمی‌کنند چون منبع تأمین الکترون در آن‌ها ترکیبی به غیر از آب است. مثلاً در باکتری‌های گوگردی، منبع تأمین الکترون H_2S است. به همین دلیل به جای اکسیژن، **گوگرد** ایجاد می‌شود.

اوگلنا

آغازیان: نقش مهمی در تولید مادهٔ آلی از مواد معدنی دارند. همهٔ انواع **جلبک‌ها** (سبز، قرمز و قهوه‌ای) از آغازیان هستند و فتوسنتزکننده‌اند.

■ اوگلنا، نوعی جاندار **تک‌یاخته‌ای** از آغازیان است که در حضور نور، فتوسنتزکننده است اما در نبود نور، سبزدیسه‌های خود را از دست می‌دهد و با تغذیه از مواد آلی، ترکیبات مورد نیاز خود را می‌سازد.

۲۸ باکتری‌های فتوسنتزکننده‌ای که از آب به عنوان منبع الکترون استفاده می‌کنند، **اکسیژن‌زا** نامیده می‌شوند.

۲۹ سیانوباکتری می‌تواند در آب و یا در خشکی به صورت **همزیست** در پیکر گیاهانی مانند **گونرا** زندگی کند.

۳۰ از باکتری‌های گوگردی در **تصفیهٔ فاضلاب‌ها** برای حذف **هیدروژن‌سولفید** استفاده می‌کنند. هیدروژن سولفید، گازی بی‌رنگ است و بویی شبیه تخم‌مرغ گندیده دارد.

۳۱ واکنش فتوسنتز در باکتری‌های گوگردی:

$$۶CO_2 + ۱۲H_2S + \text{نور} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + ۱۲S + ۶H_2O$$

شیمیوسنتز

۳۲ روشی برای ساختن مواد آلی با استفاده از مواد معدنی است که در آن، انرژی مورد نیاز برای ساخت ترکیبات آلی، به جای نور از **واکنش‌های اکسایش** به دست می‌آید.

مثال ۱: انواعی از باکتری‌ها که در معادن، اعماق اقیانوس‌ها و اطراف دهانهٔ آتشفشان‌های زیر آب زندگی می‌کنند و بدون نیاز به نور، از کربن‌دی‌اکسید مادهٔ آلی می‌سازند.

مثال ۲: باکتری‌های **نیترات‌ساز** که آمونیوم را به نیترات تبدیل می‌کنند.

جمع‌بندی — روش‌های تثبیت کربن در جانداران

فتوسنتز	**تعریف:** ساختن ترکیبات آلی از مواد معدنی با استفاده از انرژی نور خورشید	
	اغلب گیاهان	همهٔ گیاهان به‌جز گیاهان انگل
	بعضی باکتری‌ها	باکتری‌های فتوسنتزکنندهٔ اکسیژن‌زا (مثل سیانوباکتری): دارای سبزینه
		باکتری‌های فتوسنتزکنندهٔ غیراکسیژن‌زا (مثل باکتری‌های گوگردی): دارای باکتریوکلروفیل
	بعضی آغازیان	مانند جلبک‌ها (سبز، قرمز و قهوه‌ای) و اوگلنا
شیمیوسنتز	**تعریف:** ساختن ترکیبات آلی با استفاده از مواد معدنی و انرژی حاصل از واکنش‌های اکسایش	
	بعضی باکتری‌ها	باکتری‌هایی معادن، اعماق اقیانوس‌ها و دهانهٔ آتشفشان‌های زیر دریایی
		باکتری‌های نیترات‌ساز در خاک

تعریف زیست‌فناوری: هرگونه فعالیت هوشمندانهٔ آدمی در تولید و بهبود محصولات با استفاده از موجودات زنده

تاریخچهٔ زیست‌فناوری

- **الف** زیست‌فناوری سنتی: تولید محصولات تخمیری (سرکه، نان، فراورده‌های لبنی) با کمک فرایندهای زیستی
- **ب** زیست‌فناوری کلاسیک: تولید پادزیست، آنزیم‌ها و مواد غذایی با تخمیر و کشت ریزاندامگان
- **پ** زیست‌فناوری نوین
  - (۱) شروع دوره، با انتقال ژن از یک ریزاندامگان به ریزاندامگان دیگر
  - (۲) تولید ترکیبات جدید با مقادیر بیشتر و کارایی بالاتر با تغییر و اصلاح خصوصیات ریزاندامگان

مهندسی ژنتیک

- **الف** تعریف: انتقال قطعه‌ای از دنا از یک یاخته به یاختهٔ دیگر با کمک ناقل
- **ب** اهداف: تولید انبوه ژن و فراورده‌های آن
- **پ** مراحل
  - (۱) جداسازی قطعه‌ای از دنا
    - **وسیله:** آنزیم برش‌دهنده
      - ۱. تولید توسط باکتری‌ها
      - ۲. شناسایی جایگاه تشخیص
      - ۳. شکستن پیوندهای فسفودی‌استر
    - **مثال:** EcoR۱
  - (۲) اتصال قطعهٔ دنا به ناقل (تشکیل دنای نوترکیب)
    - **الف** ناقل: دنای خارج کروموزومی (دیسک)
      - ۱. باکتری‌ها
      - ۲. بعضی قارچ‌ها (مانند مخمرها)
    - **ب** آنزیم متصل‌کننده: لیگاز ← تشکیل پیوندهای فسفودی‌استر
    - **پ** وارد کردن دنای نوترکیب به یاختهٔ میزبان
      - ۱. ایجاد منافذی در دیوارهٔ باکتری
        - ۱. شوک گرمایی
        - ۲. شوک الکتریکی
      - ۲. قرار دادن دناهای نوترکیب در مجاورت باکتری‌ها
      - ۳. دریافت دنای نوترکیب توسط بعضی باکتری‌ها
    - **ت** جداسازی یاخته‌های تراژنی
      - یکی از روش‌ها: استفاده از پادزیست
        - ۱. باکتری دارای دنای نوترکیب رشد می‌کند.
        - ۲. باکتری فاقد دنای نوترکیب از بین می‌رود.

پلاستیک‌های زیستی قابل تجزیه

۱ امروزه پلاستیک‌های قابل تجزیه به کمک روش‌های **زیست‌فناوری** و با هزینهٔ کمتری تولید می‌شوند. برای تولید این پلاستیک‌ها، ژن سازندهٔ نوعی **بسپار** (پلیمر) را از باکتری به **گیاه** منتقل می‌کنند.

۲ **ترکیبی** در زیست‌فناوری، علاوه بر زیست‌شناسی، از گرایش‌های علمی مختلفی مانند علوم مهندسی، ریاضیات و فیزیک استفاده می‌شود؛ بنابراین تولید پلاستیک‌های قابل تجزیه، با **نگرش بین رشته‌ای** ممکن شده است.

۳ تولید پلاستیک‌های قابل تجزیه به روش زیست‌فناوری، در **گیاهان** انجام می‌شود (نه در باکتری‌ها).

۴ گیاهی که پلاستیک زیستی تولید می‌کند، نوعی **جاندار تراژن** محسوب می‌شود؛ چون ژن جانداری از گونهٔ دیگر (باکتری) را دریافت کرده است.

۵ پلاستیک‌های قابل تجزیهٔ زیستی، پلیمرهایی هستند که توسط یاخته تولید می‌شوند و تولید آن‌ها همانند سایر پلیمرهای طبیعی با تشکیل **پیوندهای اشتراکی** و از طریق **سنتز آبدهی** صورت می‌گیرد.

۶ هر گونه فعالیت هوشمندانهٔ آدمی در تولید و بهبود محصولات گوناگون با استفاده از موجود زنده، **زیست‌فناوری** نامیده می‌شود. زیست‌فناوری قلمروی بسیار گسترده‌ای دارد و روش‌هایی مانند مهندسی ژنتیک، مهندسی پروتئین و مهندسی بافت را دربرمی‌گیرد.

تاریخچهٔ زیست‌فناوری: زیست‌فناوری از سال‌های بسیار دور آغاز شده است و برای آن **سه دوره** در نظر می‌گیرند:

۱ **زیست‌فناوری سنتی:** تولید **محصولات تخمیری** (مانند سرکه، نان و فراورده‌های لبنی) با استفاده از **فرایندهای زیستی** مربوط به این دوره است.

فلش‌بَک: تخمیر فرایندی است که با **قندکافت** آغاز می‌شود و در آن، NAD^+ مورد نیاز برای قندکافت بدون نیاز به اکسیژن بازتولید می‌شود. در **تخمیر الکلی** که در تولید نان کاربرد دارد، پیرووات حاصل از قندکافت ضمن آزاد کردن کربن‌دی‌اکسید به الکل دوکربنی (اتانول) تبدیل می‌شود. در **تخمیر لاکتیکی** که در تولید بعضی فراورده‌هایی غذایی استفاده می‌شود، پیرووات به لاکتات تبدیل می‌گردد.

۲ **زیست‌فناوری کلاسیک:** در این دوره، تولید پادزیست‌ها، آنزیم‌ها و مواد غذایی با استفاده از روش‌های **تخمیر** و **کشت ریزاندامگان‌ها** (میکروارگانیسم‌ها) ممکن شد.

۳ **زیست‌فناوری نوین:** این دوره با **انتقال ژن** از یک ریزاندامگان به ریزاندامگان دیگر آغاز شد. در این دوره دانشمندان توانستند با تغییر و اصلاح خصوصیات ریزاندامگان‌ها، ترکیبات جدید را با مقادیر بیشتر و کارآیی بالاتر تولید کنند.

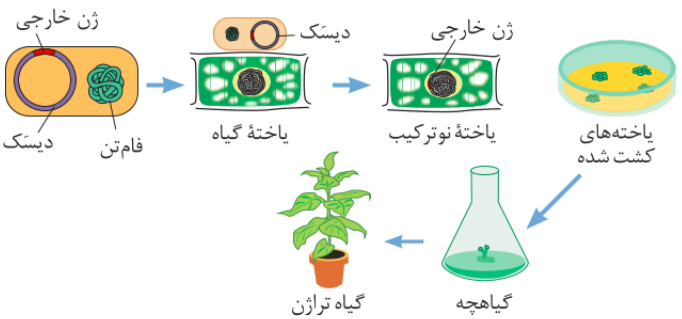
۷ میکروارگانیسم (ریزاندامگان) موجودی است که برای دیدن آن باید از میکروسکوپ استفاده کرد. به عنوان مثال باکتری‌ها، مخمرها (نوعی قارچ) و انواعی از آغازیان، میکروارگانیسم محسوب می‌شوند.

۸ در دورهٔ زیست‌فناوری **سنتی**، بدون این که مکانیسم تولید فراورده‌ها را بدانند از میکروارگانیسم‌ها استفاده می‌کرده‌اند. مثلاً واکنش‌های تخمیری را نمی‌شناختند و نمی‌دانستند که تخمیر موجب تولید سرکه می‌شود. در حالی که در دورهٔ **کلاسیک**، آگاهی کافی از میکروارگانیسم‌ها داشتند و با کشت دادن آن‌ها، فراورده‌های غذایی و دارویی تولید می‌کردند.

مهندسی ژنتیک

اصل مطلب

- یکی از روش‌های مؤثر در زیست‌فناوری است که در آن، قطعه‌ای از دنای یک یاخته توسط **ناقل** به یاخته‌ای دیگر انتقال می‌یابد. در این حالت، یاختهٔ دریافت‌کننده دچار **دست‌ورزیِ ژنی** و دارای صفت جدید می‌شود. یکی از اهداف مهندسی ژنتیک، تولید انبوه ژن یا فراوردهٔ آن است.
- به جانداری که از طریق مهندسی ژنتیک دارای ترکیب جدیدی از مواد ژنتیکی شده است، **جاندار تراژنی** (تغییر یافتهٔ ژنتیکی) می‌گویند.
- اولین جاندار تراژنی تولید شده، **باکتری** بود، اما پیشرفت‌های بعدی در زمینهٔ مهندسی ژنتیک، امکان دست‌ورزی ژنتیکی برای سایر موجودات زنده (مثل گیاهان و جانوران) را نیز فراهم کرد.



۹ مراحل ایجاد گیاهان زراعی تراژنی از طریق مهندسی ژنتیک:

۱ تعیین صفت یا صفات مطلوب

۲ استخراج ژن ایجادکنندهٔ صفت مطلوب و اتصال آن به یک **ناقل همسانه‌سازی** (مانند دیسَک)

۳ انتقال **دیسک نوترکیب** به یاختهٔ گیاهی توسط باکتری

۴ قرار دادن یاختهٔ گیاهی نوترکیبِ حاوی ژن خارجی در **محیط کشت** و تولید گیاه تراژنی

۵ بررسی دقیق **ایمنی زیستی** و اثبات بی‌خطر بودن آن برای سلامت انسان و محیط زیست

۶ تکثیر و کشت **گیاه تراژنی** با رعایت اصول ایمنی زیستی

۱۰ **ترکیبی** از تکثیر یاختهٔ گیاهی در محیط کشت، **تودهٔ یاخته‌ای (کال)** ایجاد می‌شود و با استفاده از هورمون‌های سیتوکینین و اکسین در محیط کشت، گیاه جدید از تمایز کال به‌وجود می‌آید.

۱۱ یاخته‌های دست‌ورزی شده در محیط کشت کاملاً **سترون** (بدون میکروب) قرار داده می‌شوند.

۱۲ در کال، همهٔ یاخته‌ها از نظر ژنی **یکسان**اند؛ بنابراین گیاهانی که از کال به‌وجود می‌آیند نیز یکسان خواهند بود.

۱۳ در مهندسی ژنتیک، می‌توان ژن یک جاندار را به جانداری از **همان گونه** و یا **گونهٔ دیگر** منتقل کرد. اگر ژن به جانداری از گونهٔ دیگر منتقل شود، جاندار دریافت‌کنندهٔ ژن، تراژنی می‌شود.

۱۴ در دوره‌های سنتی و کلاسیکِ زیست‌فناوری برخلاف زیست‌فناوری نوین، **دست‌ورزی ژنتیکی** انجام نشده است.

۱۵ هر جانداری که به آن ژن جاندار دیگری وارد می‌شود، تحت دست‌ورزی ژنتیکی قرار گرفته است و فرقی نمی‌کند که ژن مربوط به جاندار هم‌گونه است یا گونهٔ دیگر!

۱۶ در همسانه‌سازی دنا، مادهٔ وراثتی با ابزارهای مختلفی در خارج از یاخته تهیه و به وسیلهٔ یک ناقل به درون **ژنوم میزبان** منتقل می‌شود. هدف از این‌کار تولید مقدار زیادی **دنای خالص** است که برای تولید یک مادهٔ خاص و یا مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آنزیم‌های برش دهندهٔ دنا

اصل مطلب

- در مهندسی ژنتیک، برای جدا کردن ژن مورد نظر از یک مولکول دنا، از **آنزیم‌های برش‌دهنده** (محدودکننده) استفاده می‌کنند. این آنزیم‌ها به‌طور طبیعی در باکتری‌ها یافت می‌شوند و قسمتی از **سامانهٔ دفاعی** آن‌ها به حساب می‌آیند و معمولاً دنای بیگانهٔ وارد شده به آن‌ها را برش می‌دهند.
- آنزیم‌های برش‌دهنده انواع مختلفی دارند و هر یک از آن‌ها توالی نوکلئوتیدی خاصی را در مولکول دنا تشخیص داده و سپس آن را برش می‌دهند. به عنوان مثال، **EcoR۱** نوعی آنزیم برش‌دهنده است که در باکتری اشرشیاکلای (E.coli) وجود دارد و توالی شش جفت نوکلئوتیدی $\frac{GAATTC}{CTTAAG}$ را شناسایی می‌کند و آن را برش می‌دهد.
- بخشی از مولکول دنا که آنزیم برش‌دهنده آن را شناسایی می‌کند، **جایگاه تشخیص آنزیم** نامیده می‌شود. به عنوان مثال $\frac{GAATTC}{CTTAAG}$، جایگاه تشخیص آنزیم EcoR۱ است.
- هر آنزیم برش‌دهنده در جایگاه تشخیص خود، **دو** پیوند فسفودی‌استر را برش می‌زند. به عنوان مثال EcoR۱ پیوند فسفودی‌استر بین نوکلئوتیدهای **آدنین‌دار** (A) و **گوانین‌دار** (G) هر دو رشتهٔ جایگاه تشخیص خود را برش می‌زند.
- علاوه بر پیوندهای فسفودی‌استر، پیوندهای هیدروژنی جایگاه تشخیص نیز شکسته می‌شوند و در نتیجه، در محل برش، یک رشته **بلندتر** از رشتهٔ مقابل آن است و به آن انتهای چسبنده می‌گویند.

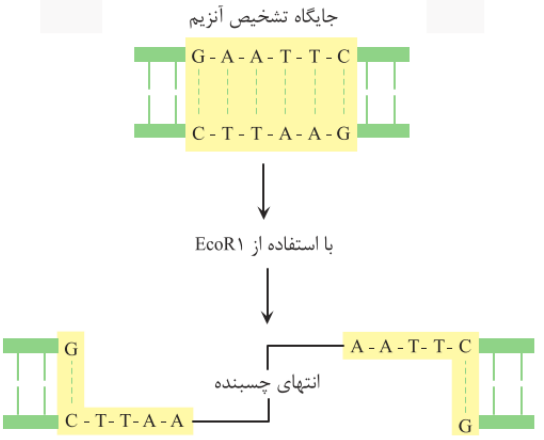
۱۷ در جایگاه تشخیص آنزیم EcoR۱، علاوه بر دو پیوند فسفودی‌استر، پیوندهای هیدروژنی بین نوکلئوتیدهای A و T نیز شکسته می‌شوند.

۱۸ **ویژه** ویژگی‌های جایگاه تشخیص آنزیم برش‌دهنده:

(۱) توالی نوکلئوتیدی دو رشته‌ای در دناست.

(۲) توالی نوکلئوتیدهای دو رشتهٔ آن یکسان اما در دو جهت مخالف است. یعنی باید یک رشته را از راست به چپ و دیگری را از چپ به راست بخوانیم.

(۳) نوکلئوتیدهای هر رشتهٔ جایگاه تشخیص، از دو نیمهٔ مکمل تشکیل شده است. یعنی در یک رشته از این جایگاه، نوکلئوتید اول با نوکلئوتید آخر مکمل است، نوکلئوتید دوم با نوکلئوتیدِ ماقبلِ آخر و ...



۱۹ آنزیم‌های برش‌دهنده می‌توانند دنا را به قطعات کوتاه‌تری تبدیل کنند. مثلاً اگر دنای خطی یک جایگاه تشخیص برای نوعی آنزیم برش‌دهنده داشته باشد، با اثر آنزیم، دو قطعه دنای کوتاه‌تر ایجاد می‌شود.

۲۰ **ویژه** اگر دنای **حلقوی** فقط یک جایگاه تشخیص برای آنزیم برش‌دهنده داشته باشد، بر اثر آنزیم، دنا به قطعات کوتاه‌تر تبدیل نمی‌شود، بلکه فقط از حالت حلقوی به **خطی** تبدیل خواهد شد.

۲۱ **ویژه** بعضی آنزیم‌های برش‌دهنده، **انتهای چسبنده** ایجاد نمی‌کنند. در محل اثر این آنزیم‌ها، **پیوندهای هیدروژنی** شکسته نمی‌شود.

۲۲ ژن سازندهٔ آنزیم برش‌دهنده، فقط در **باکتری‌ها** وجود دارد و به‌طور طبیعی در هیچ یک از یاخته‌های یوکاریوتی یافت نمی‌شود.

۲۳ آنزیم دنابسپاراز همانند آنزیم برش‌دهنده توانایی شکستن پیوند فسفودی‌استر را دارد.

۲۴ آنزیم برش‌دهنده توانایی شکستن پیوندهای هیدروژنی را ندارد امّا در محل اثر این آنزیم، پیوندهای هیدروژنی نیز شکسته می‌شوند!

۲۵ آنزیم‌های برش‌دهنده‌ای که **انتهای چسبنده** تولید می‌کنند:

(۱) اگر دنای **حلقوی** را برش دهند، قطعاً در دو انتهای **همهٔ قطعات** حاصل، توالی تک‌رشته‌ای (انتهای چسبنده) ایجاد خواهند کرد.

(۲) اگر دنای **خطی** را برش دهند، **بعضی** قطعات حاصل دارای **یک** انتهای چسبنده و **بعضی** دیگر از آن‌ها دارای **دو** انتهای چسبنده خواهند بود.

۲۶ **ویژه** هر چقدر تعداد نوکلئوتیدهای جایگاه تشخیص آنزیم برش‌دهنده **بیشتر** باشد، پس از برش دنا با آن، تعداد قطعات **کمتر** و اندازهٔ قطعات **بزرگ‌تر** خواهد بود؛ چون احتمال وجود این توالی‌ها در دنا کمتر است.

ناقل‌های همسانه‌سازی

اصل مطلب

- ناقل‌های همسانه‌سازی (vector)، توالی‌های دنایی هستند که **خارج از فام‌تن اصلی** قرار دارند و می‌توانند **مستقل** از آن تکثیر شوند. یکی از ناقل‌های همسانه‌سازی، **دیسَک (پلازمید)** است. یعنی دیسک علاوه بر تکثیر به هنگام تقسیم باکتری، در مواقع دیگر هم تکثیر می‌شود. دیسک‌ها، **فام‌تن کمکی** نامیده می‌شوند، چون حاوی ژن‌هایی هستند که در فام‌تن اصلی وجود ندارند؛ مانند **ژن مقاومت** به پادزیست.
- دیسک، معمولاً درون **باکتری‌ها** و **بعضی قارچ‌ها** (مثل مخمرها) وجود دارد و می‌تواند مستقل از ژنوم میزبان، همانندسازی کند.
- در صورت اتصال قطعه دنای جدا شده به دیسک و ورود آن به یاختهٔ میزبان، با هر بار همانندسازی دیسک، دنای مورد نظر نیز همانندسازی می‌شود.

۲۷ **بسیاری** از دیسک‌ها، ژن مقاومت در برابر پادزیست را دارند؛ یعنی **بعضی** دیسک‌ها فاقد ژن مقاومت در برابر پادزیست هستند. وجود ژن مقاومت به باکتری این توانایی را می‌دهد که پادزیست‌ها را به موادی **غیرکشنده** و **قابل استفاده** برای خود تبدیل کنند.

۲۸ در مهندسی ژنتیک، بهتر است از دیسکی استفاده شود که **فقط یک جایگاه تشخیص** برای آنزیم برش‌دهنده داشته باشد. با برش این جایگاه، دو سر مولکول دیسک باز می‌شود و می‌توانیم ژن مورد نظر را به آن متصل کنیم.

۲۹ هر دیسک، به‌طور طبیعی **یک جایگاه شروع** همانندسازی دارد.

زووم: در کتاب درسی می‌خوانیم: «یکی از ناقل‌های همسانه‌سازی، دیسک باکتری است.» واقعیت این است که به جز دیسک، ناقل‌های همسانه‌سازی دیگری نیز وجود دارند؛ مثلاً از بعضی ویروس‌ها (مانند باکتریوفاژ) نیز به‌عنوان ناقل همسانه‌سازی استفاده می‌شود.

۳۰ **ویژه** زمانِ همانندسازی دیسک مستقل از فام‌تن اصلی است اما دقت کنید که آنزیم‌های مورد نیاز برای همانندسازی دیسک، توسط یاختهٔ **میزبان** (باکتری) تأمین می‌شود. بنابراین از نظر عوامل مورد نیاز برای همانندسازی به آن وابسته است.

دقت کنید: دیسک می‌تواند مستقل از فام‌تن اصلی باکتری همانندسازی کند اما قادر نیست **خارج از یاختهٔ میزبان** (مستقل از آن) همانندسازی کند.

۳۱ آنزیم برش‌دهنده، پوشینه و دیسک جزء **سامانهٔ دفاعی باکتری‌ها** محسوب می‌شوند. آنزیم برش‌دهنده دنای بیگانه را برش می‌دهد، پوشینه موجب افزایش مقاومت باکتری‌ها در برابر **بیگانه‌خوارهای بدن** میزبان می‌شود و دیسک نیز باکتری را در برابر پادزیست مقاوم می‌کند.

۳۲ **ویژه** یک باکتری می‌تواند **چندین نسخه** از یک دیسک داشته باشد. همچنین یک باکتری می‌تواند دارای **بیش از یک نوع** دیسک باشد. دیسک‌ها انواع مختلفی دارند که **یک نوع** آن، سبب مقاومت در برابر پادزیست می‌شود.

۳۳ **بسیاری** از دیسک‌ها ژن مقاومت دارند؛ یعنی وجود بعضی دیسک‌ها به باکتری‌ها ویژگی‌های دیگری غیر از مقاومت به آن‌ها می‌دهند.

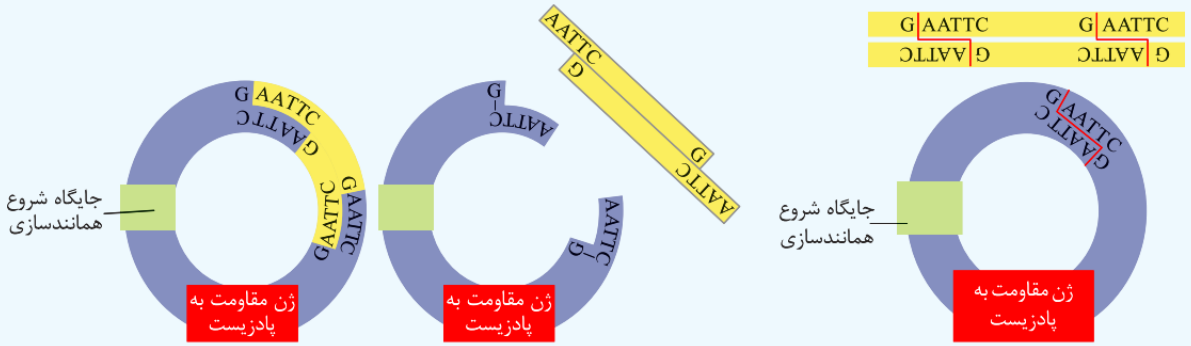
مراحل مهندسی ژنتیک

اصل مطلب

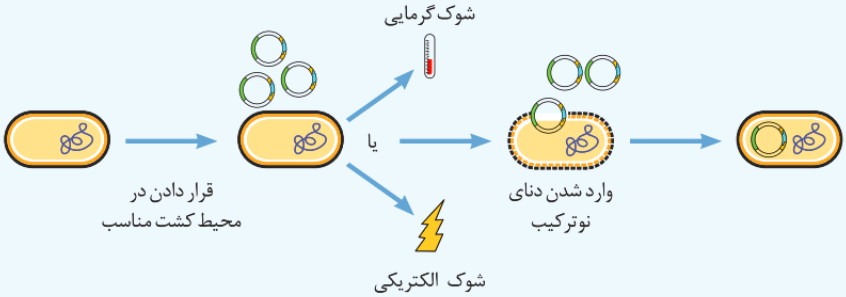
۱ **جداسازی قطعه‌ای از دنا:** با استفاده از **آنزیم برش‌دهنده**، می‌توان ژن مورد نظر را از دنا جدا کرد. در این مرحله باید جدا کردن ژن خارجی و بریدن دنای **ناقل همسانه‌سازی** با یک نوع آنزیم برش‌دهنده انجام شود تا انتهاهای چسبندهٔ آن‌ها مکمل هم باشند.

۲ **اتصال قطعهٔ دنا به ناقل و تشکیل دنای نوترکیب:** در این مرحله، قطعه دنای حاوی ژن مورد نظر در دنای ناقل جاسازی می‌شود. مولکول دنایی که به این ترتیب ساخته می‌شود، **دنای نوترکیب** نامیده می‌شود، چون دنایی با این توالی نوکلئوتیدی قبلاً وجود نداشته است.

- اگر ژن خارجی و ناقل همسانه‌سازی را در مجاورت هم قرار دهیم، بین انتهاهای چسبندهٔ آن‌ها **پیوندهای هیدروژنی** ایجاد می‌شوند و **آنزیم لیگاز**، با برقراری پیوندهای فسفودی‌استر بین دو دنا، سبب اتصال آن‌ها به یکدیگر و تشکیل دنای نوترکیب می‌شود.



۳ **وارد کردن دنای نوترکیب به یاختهٔ میزبان:** برای ورود دنای نوترکیب به باکتری، باید در **دیوارهٔ باکتری** منافذی ایجاد شود. ایجاد منفذ در دیوارهٔ باکتری با کمک **شوک الکتریکی** و یا **شوک حرارتی** همراه با مواد شیمیایی انجام می‌شود. در این مرحله، **بعضی** باکتری‌ها دنای نوترکیب را دریافت می‌کنند.

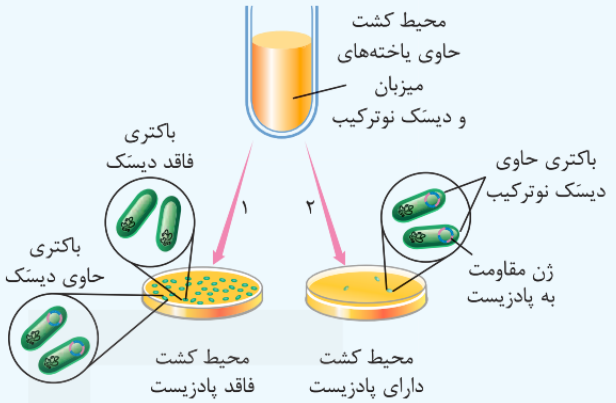


۴ **جداسازی یاخته‌های تراژنی:** در این مرحله، باکتری‌های دارای **دنای نوترکیب** (تراژنی) را از سایر باکتری‌ها جدا می‌کنند. یکی از روش‌های جداسازی، استفاده از **دیسک دارای ژن مقاومت** به پادزیستی مثل آمپی‌سیلین است. اگر در مرحلهٔ ساختن دنای نوترکیب، از دیسک دارای ژن مقاومت استفاده کنیم و محیط کشت حاوی پادزیست مناسب باشد، باکتری‌های فاقد دنای نوترکیب، به دلیل **حساسیت به پادزیست**، از بین می‌روند و فقط باکتری‌های حاوی ژن مورد نظر در محیط کشت رشد می‌کنند.

- دنای خارجی به دو دلیل با سرعت بالا تکثیر می‌شود:

۱ در شرایط مناسب، باکتری‌های تراژنی با سرعت بالایی **تکثیر** می‌شوند.

۲ دنای نوترکیب **مستقل** از فام‌تن اصلی نیز تکثیر می‌شود.



۳۴ دنای حاوی ژن مورد نظر، باید حداقل دو جایگاه تشخیص (یکی قبل از ژن و دیگری بعد از ژن) برای آنزیم برش‌دهنده داشته باشد.

۳۵ اگر آنزیم محدودکننده در دنای حاوی ژن خارجی دو جایگاه تشخیص داشته باشد، چهار پیوند فسفودی‌استر شکسته خواهد شد. با توجه به این که ممکن است تعداد جایگاه‌های تشخیص بیشتر باشد، بهتر است بگوئیم در این مولکول دنا، حداقل چهار پیوند فسفودی‌استر شکسته می‌شود.

۳۶ اگر یک نقطه از دیسک توسط آنزیم محدودکننده بریده شود، دو پیوند فسفودی‌استر شکسته می‌شود.

دقت کنید: هدف ما از بریدن پلازمید فقط این است که بتوانیم یک ژن را به آن متصل کنیم. اگر آنزیم محدودکننده بیش از یک جایگاه تشخیص داشته باشد، بخش‌هایی از پلازمید حذف می‌شود و ممکن است در تکثیر پلازمید و یا ویژگی‌هایی مانند مقاومت در برابر آنتی‌بیوتیک اختلال ایجاد شود.

۳۷ **ویژه** تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین انتهاهای چسبنده، به آنزیم نیاز ندارد؛ چون پیوندهای هیدروژنی خودبه‌خود تشکیل می‌شوند.

۳۸ برای اتصال دو سر ژن خارجی به دنای ناقل، چهار پیوند فسفودی‌استر تشکیل می‌شود.

۳۹ برای همسانه‌سازی دنا در مهندسی ژنتیک، تولید دنای نوترکیب خارج از یاخته و تکثیر آن درون یاختهٔ میزبان انجام می‌شود.

۴۰ آنزیم لیگاز همانند آنزیم‌های دنابسپاراز و رنابسپاراز توانایی تشکیل پیوند فسفودی‌استر را دارد؛ با این تفاوت که لیگاز بین دو مولکول پیوند برقرار می‌کند، در حالی که دنابسپاراز و رنابسپاراز نوکلئوتید را به رشتهٔ در حال ساخت می‌افزایند.

۴۱ در مهندسی ژنتیک، پس از ورود دنای نوترکیب به باکتری، میزان فعالیت بعضی از آنزیم‌های آن (مانند هلیکاز و دنابسپاراز) افزایش می‌یابد.

۴۲ پس از قرار گرفتنِ باکتری دارای دیسک و یا دیسک نوترکیب در محیط کشت حاوی پادزیست، ژن مقاومت در برابر پادزیست بیان می‌شود.

۴۳ **ویژه** اگر دیسکِ نوعی باکتری دارای ژن مقاومت در برابر پادزیست آمپی‌سیلین باشد، با قرار دادن این باکتری در محیط کشت، به تدریج از مقدار آمپی‌سیلین کاسته خواهد شد. چون باکتری می‌تواند پادزیست را به مواد قابل استفاده برای خود تبدیل کند.

۴۴ در مهندسی ژنتیک، دنای نوترکیب با استفاده از آنزیم‌های هلیکاز و دنابسپاراز میزبان (مثلاً باکتری) تکثیر می‌شود.

جمع‌بندی — خلاصهٔ مراحل اصلی مهندسی ژنتیک

مرحله	فرایند	عوامل مورد استفاده
اول	جداسازی قطعه‌ای از دنا	آنزیم برش‌دهنده
دوم	اتصال قطعهٔ دنا به ناقل و تشکیل دنای نوترکیب	آنزیم لیگاز
سوم	وارد کردن دنای نوترکیب به یاختهٔ میزبان	شوک الکتریکی یا حرارتی
چهارم	جداسازی یاخته‌های تراژنی	پادزیست (آنتی‌بیوتیک)

مهندسی پروتئین

- الف) تعریف: ایجاد تغییرات دلخواه در توالی آمینواسیدهای پروتئین
- ب) افزایش پایداری پروتئین‌ها
  - ۱) تولید آمیلازهای مقاوم در برابر گرما
    - الف) **نقش:** تبدیل نشاسته به قطعات کوچک‌تر
    - ب) **کاربرد:** صنایع غذایی، نساجی، تولید شوینده‌ها
    - پ) به‌طور طبیعی در باکتری‌های گرمادوست در چشمه‌های آب‌گرم
  - ۲) اینترفرون
    - الف) **تولیدشده به روش مهندسی ژنتیک:** فعالیت کم‌تر از اینترفرون طبیعی
    - ب) **تولیدشده به روش مهندسی پروتئین**
      1. دارای یک آمینواسید متفاوت
      2. فعالیت ضد ویروسی به اندازهٔ اینترفرون طبیعی
      3. پایداری زیاد (نگهداری طولانی‌مدت)
  - ۳) پلاسمین
    - الف) **نقش**: تجزیهٔ لخته‌ها به‌طور طبیعی در بدن
    - ب) **تولید شده به روش طبیعی:** مدت اثر پلاسمایی کوتاه
    - پ) **تولید شده به روش مهندسی پروتئین**
      1. دارای یک آمینواسید متفاوت
      2. مدت فعالیت پلاسمایی و اثرات درمانی بیشتر

مهندسی بافت و یاخته‌های بنیادی

- الف) تعریف: کشت یاخته‌های بنیادی به‌منظور تولید بافت و اندام
- ب) یاخته‌های بنیادی
  - ۱) یاخته‌هایی که می‌توانند تکثیر شوند و انواع یاخته‌ها را تولید کنند.
  - ۲) یاخته‌های بنیادی بالغ
    - الف) یاخته‌های بنیادی کبد ← تولید یاخته‌های کبد و یاخته‌های مجرای صفراوی
    - ب) یاخته‌های بنیادی مغز استخوان ← تولید
      1. یاخته‌های خونی
      2. یاخته‌های عصبی
      3. یاخته‌های ماهیچه‌ای
      4. یاخته‌های استخوانی
  - ۳) یاخته‌های بنیادی جنینی
    - الف) **یاخته‌های بنیادی مورولا**
      1. همهٔ انواع یاخته‌های جنینی
      2. همهٔ انواع یاخته‌های خارج جنینی (جفت و پرده‌ها)
    - ب) **یاخته‌های بنیادی بلاستولا** ← یاخته‌های تودهٔ داخلی ← انواع یاخته‌های بدن جنین
      1. دستگاه گردش خون
      2. دستگاه عصبی
      3. دستگاه ایمنی

اصل مطلب

- ایجاد تغییرات دلخواه در توالی آمینواسیدهای یک پروتئین، **مهندسی پروتئین** نامیده می‌شود. این کار به منظور تغییر در خصوصیات یک پروتئین و بهبود عملکرد آن به شکل مورد نیاز انجام می‌شود. برای مهندسی پروتئین، شناخت کامل از **ساختار** و **عملکرد** پروتئین الزامی است.
- تغییراتی که در پروتئین ایجاد می‌شوند، ممکن است **جزئی** یا **کلی** باشند. تغییرات جزئی شامل تغییر در رمز یک یا چند آمینواسید پروتئین است در حالی که تغییرات کلی، طیف وسیع‌تری از تغییرات را شامل می‌شوند و می‌توانند از طریق برداشتن قسمتی از ژن سازندهٔ پروتئین و یا ترکیب بخش‌هایی از ژن‌های مختلف باشند.
- از افزایش پایداری پروتئین‌ها در مهندسی پروتئین برای موارد زیر استفاده می‌شود: ۱ افزایش **پایداری** پروتئین در مقابل گرما و تغییر pH ۲ افزایش حداکثری **سرعت** واکنش ۳ افزایش تمایل آنزیم برای **اتصال** به پیش‌ماده
- **چند مثال از افزایش پایداری پروتئین‌ها با مهندسی پروتئین:**

۱ **تولید آمیلازهای مقاوم در برابر گرما:** آمیلاز، نشاسته را به کربوهیدرات‌های کوچک‌تر تبدیل می‌کند و در بخش‌های مختلف صنعتی مانند صنایع غذایی، نساجی و تولید شوینده‌ها کاربرد دارد.

۲ **تغییر در اینترفرون:** میزان فعالیت اینترفرون تولید شده به روش **مهندسی ژنتیک**، کمتر از پروتئین طبیعی است؛ چون برای تولید این پروتئین، ژن آن را وارد باکتری می‌کنند و هنگام تولید این پروتئین در باکتری، تشکیل **پیوندهای نادرست** موجب تغییر شکل و کاهش فعالیت آن می‌شود. با تغییر جزئی در رمز آمینواسید، توالی آمینواسیدهای اینترفرون را طوری تغییر می‌دهند که به جای یکی از آمینواسیدهای آن، آمینواسید دیگری قرار می‌گیرد و میزان **فعالیت** ضد ویروسی و **پایداری** آن افزایش می‌یابد.

۳ **افزایش مدت زمان فعالیت پلاسمین:** تشکیل **لختهٔ خون** در سرخرگ‌های شش، مغز و قلب بسیار خطرناک است و می‌تواند موجب مرگ شود. در بدن، به طور طبیعی لخته‌ها توسط پروتئینی به نام پلاسمین تجزیه می‌شوند. از پلاسمین به عنوان **دارو** استفاده می‌شود اما **مدت اثر** پلاسمایی آن خیلی کوتاه است. با تغییر یکی از آمینواسیدهای پلاسمین با مهندسی پروتئین، مدت زمان **فعالیت پلاسمایی** و اثرات درمانی آن افزایش می‌یابد.

۱ **ویژه** باکتری دارای ژن سازندهٔ **آمیلاز** ممکن است این ژن را از طریق **زیست‌فناوری** دریافت کرده باشد و یا این که به‌طور **طبیعی** دارای این ژن باشد (باکتری گرمادوست).

۲ **ترکیبی** داشتن آنزیم آمیلاز مقاوم در برابر گرما، نوعی **سازگاری** با محیط محسوب می‌شود. بنابراین صفت مقاومت در برابر گرما در باکتری گرمادوست، تحت تأثیر انتخاب طبیعی برگزیده شده است.

۳ **ترکیبی** آنزیم آمیلاز علاوه بر باکتری‌های **گرمادوست**، توسط بسیاری از جانوران (مانند انسان، ملخ و ...) و حتی گیاهان تولید می‌شود. به عنوان مثال هنگام رویش دانهٔ غلات، هورمون **جیبرلین** موجب ترشح آنزیم آمیلاز از لایهٔ گلوتن‌دار می‌شود.

فلش‌بَک: اینترفرون‌ها دو نوع‌اند: اینترفرون **نوع یک** از یاخته‌های آلوده به ویروس ترشح می‌شود و علاوه بر یاخته‌های آلوده، بر یاخته‌های سالم مجاور نیز اثر می‌کند و موجب مقاومت آن‌ها در برابر ویروس‌ها می‌شود. اینترفرون **نوع دو** از یاخته‌های کشندهٔ طبیعی و لنفوسیت‌های T ترشح می‌شود و نقش مهمی در مبارزه با یاخته‌های سرطانی دارد.

۴ **ویژه** اینترفرون تولید شده به روش **مهندسی پروتئین** که با تغییر یکی از آمینواسیدها، فعالیت ضد ویروسی آن افزایش یافته، **اینترفرون نوع یک** است.

۵ افزایش پایداری اینترفرون و پلاسمین با روش مهندسی پروتئین، در اثر **تغییرات جزئی** صورت می‌گیرد.

۶ ایجاد تغییر جزئی همانند تغییرات کلی در پروتئین‌ها، سبب تغییر **شکل فضایی** آن‌ها می‌شود.

۷ برای ایجاد تغییرات جزئی یا کلی در توالی آمینواسیدهای پروتئین، توالی نوکلئوتیدی **ژن سازندهٔ آن** را تغییر می‌دهند. تغییر عمده، می‌تواند شامل برداشتن قسمتی از ژن یک پروتئین یا ترکیب بخش‌هایی از ژن‌های مربوط به پروتئین‌های متفاوت باشد.

۸ تغییر در **ساختار اول** پروتئین‌ها می‌تواند سبب تغییر در ساختارهای بعدی پروتئین‌ها شود. با توجه به این که در مهندسی پروتئین، آمینواسید تأثیرگذار در ساختار و عمل پروتئین‌ها را تغییر می‌دهند، تغییر در توالی آمینواسیدها سبب تغییر در شکل فضایی پروتئین می‌شود.

۹ مزایای افزایش پایداری پروتیئن در برابر گرما: ۱ افزایش سرعت واکنش ۲ کاهش خطر آلودگی میکروبی ۳ عدم نیاز به خنک کردن محیط واکنش

۱۰ بسیاری از مراحل تولید صنعتی در دمای بالا انجام می‌شود؛ بنابراین استفاده از آمیلاز مقاوم در برابر گرما ضروری است.

۱۱ در طبیعت نیز آمیلاز مقاوم در برابر گرما وجود دارد. مانند آنزیم آمیلاز موجود در یاخته‌های گرمادوست.

۱۲ در مهندسی پروتئین، تغییر در توالی آمینواسیدی پروتئین‌ها از طریق ایجاد تغییر در ژن سازندهٔ آن‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین خود پروتئین تحت دستورزی قرار نمی‌گیرد.

۱۳ کاهش فعالیت اینترفرون تولید شده به روش مهندسی ژنتیک، به دلیل تشکیل **پیوندهای نادرست** در آن هنگام تولید در باکتری است.

۱۴ فعالیت ضدویروسیِ اینترفرون تولید شده به روش مهندسی ژنتیک **کمتر** از اینترفرون طبیعی است اما کارآیی اینترفرونی که با روش مهندسی پروتئین تولید می‌شود، به اندازهٔ اینترفرون طبیعی است.

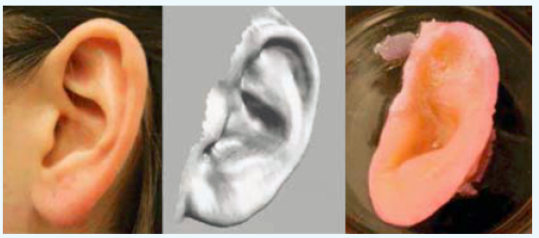
دقت کنید: پلاسمین برخلاف **هپارین** مانع از تشکیل لختهٔ خون نمی‌شود! بلکه پلاسمین پس از تشکیل لختهٔ خون وارد عمل می‌شود و موجب تجزیهٔ آن می‌شود.

۱۵ ترکیبی لختهٔ خون شامل رشته‌های پروتئینی **فیبرین**، یاخته‌های خونی و گرده‌هاست. پلاسمین نوعی پروتئاز است که با شکستن پیوندهای پپتیدی در **رشته‌های فیبرین**، سبب تجزیهٔ لخته می‌شود.

مهندسی بافت

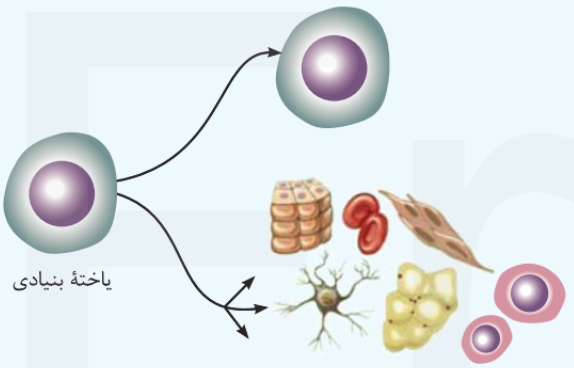
اصل مطلب

- پوست انسان ممکن است بر اثر آسیب و یا بیماری از بین برود. روش‌های درمانی مختلفی برای **ترمیم** پوست آسیب‌دیده وجود دارد. به عنوان مثال در سوختگی‌های شدید می‌توان از روش‌های زیر استفاده کرد: ۱ برداشت پوست از بخشی از بدن بیمار ۲ پیوند پوست از اهداکنندهٔ مناسب ۳ کشت بافت و پیوند پوست



- اگر اهدا کنندهٔ پوست مناسب وجود نداشته باشد و یا این که به علت وسعت سوختگی، برداشت پوست از بدن بیمار وجود نداشته باشد، بهترین راه، **کشت بافت** و پیوند پوست است.
- در پوست، یاخته‌هایی وجود دارند که توانایی **تکثیر زیاد** و تمایز به انواع یاخته‌های پوست را دارند. از این یاخته‌ها در مهندسی بافت استفاده می‌شود.
- برای بازسازی لالهٔ گوش و بینی، یاخته‌های غضروفی را در **محیط کشت** روی داربست مناسب تکثیر می‌کنند.

استفاده از یاخته‌های بنیادی در مهندسی بافت



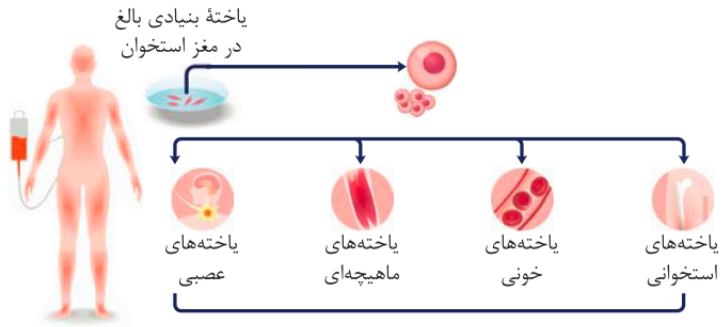
- یاخته‌های تمایز یافته‌ای مانند **یاخته‌های ماهیچه‌ای** در محیط کشت به مقدار کم تکثیر می‌شوند و یا اصلاً تکثیر نمی‌شوند. در مهندسی بافت از **یاخته‌های بنیادی** استفاده می‌کنند که به سرعت تکثیر و به انواع متفاوت یاخته تبدیل می‌شوند.
- یاخته‌های بنیادی توانایی تکثیر و به وجود آوردن یاخته‌های مشابه خود و نیز توانایی تبدیل شدن به سایر یاخته‌ها را دارند. به‌طور کلی دو نوع یاختهٔ بنیادی وجود دارد: ۱ یاخته‌های بنیادی **جنینی** (یاخته‌های تودهٔ یاخته‌ای درونی). ۲ یاخته‌های بنیادی **بالغ** که در بافت‌های مختلف حضور دارند و می‌توانند در محیط کشت تکثیر شوند.
- یاخته‌های بنیادی جنینی:

۱ قادر به تشکیل **همهٔ بافت‌های بدن** جنین هستند.

۲ اگر در مراحل اولیهٔ جنینی جدا شوند، می‌توانند **یک جنین کامل** را تشکیل دهند.

۳ در محیط کشت، برای تشکیل **بسیاری از انواع یاخته‌ها** تحریک می‌شوند.

یاخته‌های بنیادی فرد بالغ



۱۶ ترکیبی غضروف، نوعی **بافت پیوندی** با قابلیت انعطاف‌پذیری زیاد است چون در آن، رشته‌های کشسان از رشته‌های کلاژن بیشترند. یاخته‌های غضروفی می‌توانند در محیط کشت و روی داربست مناسب تکثیر شوند و غضروف جدید را برای **بازسازی اندام آسیب‌دیده** تولید کنند.

۱۷ ویژه پوست انسان یک **اندام** است، نه یک بافت! چون از بافت‌های مختلفی مانند بافت پوششی و بافت پیوندی تشکیل شده است. پوست یاخته‌هایی دارد که توانایی تکثیر زیاد و تمایز به انواع یاخته‌های پوست را دارند.

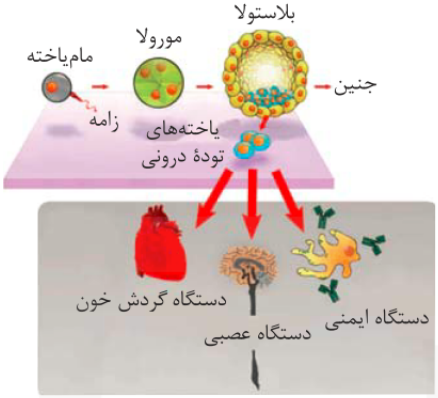
۱۸ یاخته‌های بنیادی موجود در **کبد**، فقط می‌توانند یاخته‌های **کبدی** و یاخته‌های **مجرای صفراوی** را تولید کنند.

۱۹ یاخته‌های بنیادی بالغ که در **مغز استخوان** وجود دارند، می‌توانند انواع یاخته‌های استخوانی، خونی، ماهیچه‌ای و عصبی را به‌وجود بیاورند.

۲۰ در فرد بالغ، یاخته‌های بنیادی سازندهٔ یاخته‌های خونی در مغز قرمز استخوان قرار دارند که در بافت استخوانی اسفنجی قرار دارد. دقت کنید که بافت استخوانی **اسفنجی** می‌تواند مغز قرمز داشته باشد؛ یعنی نمی‌توان گفت که هر بافت استخوانی اسفنجی دارای مغز قرمز است.

۲۱ یاخته‌های بنیادی سازندهٔ یاخته‌های خونی در فرد بالغ، در مغز قرمز استخوان قرار دارند اما در دوران جنینی، این یاخته‌ها علاوه بر مغز استخوان، در اندام‌های دیگری مانند **کبد** و **طحال** نیز وجود دارند.

یاخته‌های بنیادی جنینی:



۲۲ از یاخته‌های بنیادی تودهٔ درونی **بلاستولا** در آزمایشگاه استفاده می‌شود. این یاخته‌ها می‌توانند همهٔ انواع یاخته‌های پیکر یک فرد را تولید کنند. در صورتی که این یاخته‌ها در **مراحل اولیهٔ جنینی** جداسازی شوند، هر گروه جدا شده می‌تواند یک جنین کامل را ایجاد کند. در آزمایشگاه این یاخته‌ها را پس از جداسازی، کشت می‌دهند و آن‌ها را برای تشکیل بسیاری از انواع یاخته‌ها تحریک می‌کنند.

۲۳ یاخته‌های مورولا همانند یاخته‌های تودهٔ درونی بلاستولا **حالت بنیادی** دارند و قادر به ایجاد همهٔ انواع یاخته‌های پیکری هستند. البته یاخته‌های مورولا علاوه بر یاخته‌های پیکر جنین، قادر به ایجاد **پرده‌های محافظ جنین** نیز هستند. به عبارت دیگر یاخته‌های بنیادی مورولا به همهٔ انواع یاخته‌های **جنینی** و **خارج جنینی** (جفت و پرده‌های اطراف جنین) تمایز پیدا می‌کنند.

۲۴ در شرایط آزمایشگاهی، نمی‌توان همهٔ انواع یاخته‌های بدن جنین را تولید کرد.

۲۵ یاخته‌های بنیادی **تودهٔ داخلی** بلاستولا به انواع یاخته‌های بدن جنین تمایز پیدا می‌کنند.

۲۶ ترکیبی اگر یاخته‌های بنیادی مورولا به دو گروه تقسیم شوند، **دو قلوهای همسان** در دو محل جایگزین خواهند شد و جفت و پرده‌های محافظ مجزا خواهند داشت.

۲۷ ترکیبی اگر یاخته‌های بنیادی بلاستولا به دو گروه تقسیم شوند، دو قلوهای همسان دارای **پرده‌های محافظ و جفت مشترک** خواهد بود.

جمع‌بندی — استفاده از یاخته‌های بنیادی در مهندسی بافت

یاخته‌های بنیادی	بالغ	یاخته‌های بنیادی کبدی	یاخته‌های حاصل از تکثیر و تمایز: یاخته‌های کبدی و مجرای صفراوی
		یاخته‌های بنیادی مغز استخوان	یاخته‌های حاصل از تکثیر و تمایز: گویچه‌های سفید و قرمز خون، نورون، یاخته‌های ماهیچه‌ای (اسکلتی و قلبی) و استخوانی
	جنینی	یاخته‌های بنیادی مورولا	یاخته‌های جنینی
			یاخته‌های خارج جنینی (جفت و پرده‌های اطراف جنین)
		یاخته‌های بنیادی بلاستولا	یاخته‌های بدن جنین