

## فصل ۵

### تامین انرژی در یاخته



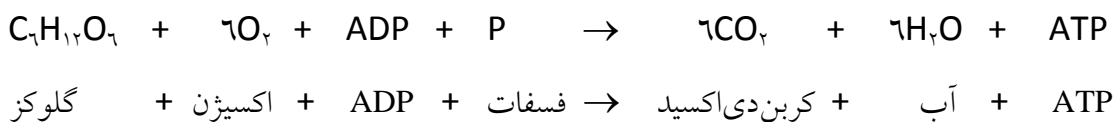
اکنون که در حال خواندن و مطالعه این درس هستید، یاخته های بدنتان انرژی مصرف می کنند. این انرژی از کجا و چگونه تامین می شود؟ چه اندامکی در تامین آن نقش دارد؟ منبع انرژی در ما و جانوران چیست؟ چرا ورزش و فعالیت های بدنی شدید، سبب می شوند تا احساس گرما کنیم و مقداری آب به شکل عرق از دست بدهیم؟ با همه تفاوت هایی که بین ما و این لارو وجود دارد، انرژی مورد نیاز ما به شکل یکسانی از غذایی که می خوریم تامین می شود. در این فصل به فرایندهای آزاد شدن انرژی از موادمغذی در یاخته ها می پردازیم.

## گفتار ۱ : تامین انرژی

### تنفس یاخته ای

به یاد دارید چرا به اکسیژن نیاز داریم؟ در فصل تبادلات گازی در کتاب زیست شناسی ۱، آموختید که نیاز ما به اکسیژن به علت انجام فرایندی به نام تنفس یاخته‌ای است؛ زیرا ATP مورد نیاز ما در این فرایند تولید می‌شود. مثلاً انرژی گلوکز در تنفس یاخته‌ای، برای تشکیل مولکول ATP به کار می‌رود. رابطه زیر خلاصه‌ای از فرایند تنفس یاخته‌ای را نشان می‌دهد که در کتاب زیست شناسی ۱ با آن آشنا شدید.

رابطه (۱)

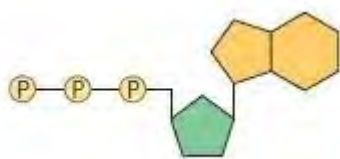


این واکنش تنفس یاخته‌ای هوایی را نشان می‌دهد؛ زیرا تجزیه ماده مغذی و تولید ATP با حضور اکسیژن انجام می‌شود. نوع دیگری از تنفس یاخته‌ای وجود دارد که در آن ATP بدون حضور اکسیژن تولید می‌شود. این نوع تنفس یاخته‌ای را تنفس یاخته‌ای بی‌هوایی می‌نامند.

### ATP مولکول پرانرژی

هیچ جاننداری نمی‌تواند بدون انرژی زنده بماند، رشد و فعالیت کند. حفظ هریک از ویژگی‌های جانداران به تامین و در اختیار داشتن ATP وابسته است.

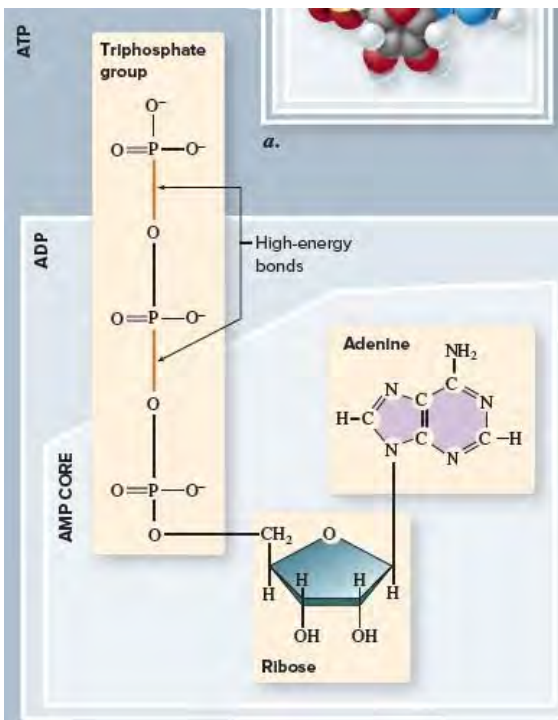
ATP مولکولی پرانرژی و شکل قابل استفاده انرژی در یاخته‌هاست که انرژی مورد نیاز برای جانداران را تامین می‌کند. شکل ۱ ساختار این مولکول را به طور ساده نشان می‌دهد.



شکل ۱- ساختار مولکول ATP

ATP نوکلئوتیدی است که از باز آلی آدنین و قند پنج کربنی ریبوز تشکیل و فسفات دار شده است. همان طور که در شکل ۲ می بینید، افزوده شدن فسفات به آدنین در سه مرحله روی می دهد. در نتیجه در ابتدا AMP، سپس ADP و در نهایت ATP تشکیل می شود.

آدنوزین (آدنین و ریبوز) + گروه فسفات ← AMP (آدنوزین مونوفسفات)  
 AMP + گروه فسفات ← ADP (آدنوزین دی فسفات)  
 ADP + گروه فسفات ← ATP (آدنوزین تری فسفات)

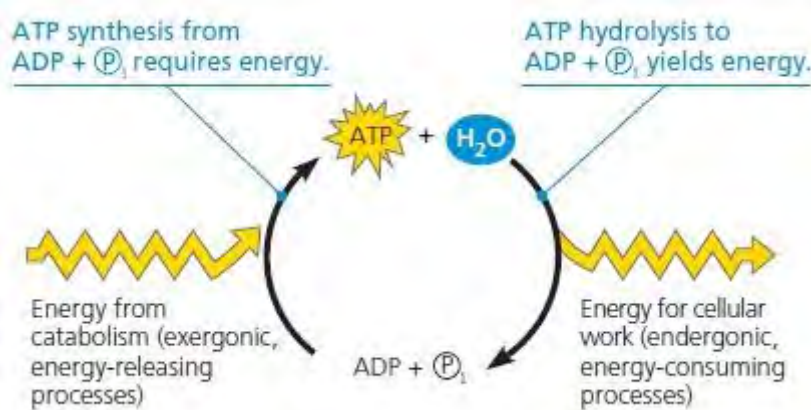


(این توضیح کنار شکل می آید)

شکل ۲. ساخته شدن ATP

(حذف جزییات مولکولی مانند محل هیدروژن ها و ...  
 حذف تعداد باندها به شکل دایره های ساده می آید مانند شکل ۲)

هنگام تشکیل مولکول ATP، پیوندهای پرانرژی بین گروه های فسفات ایجاد و با شکسته شدن این پیوندها، انرژی ذخیره شده در آنها آزاد می شود (شکل ۳). به طور معمول ATP از ADP تشکیل و این دو مولکول به هم تبدیل می شوند.



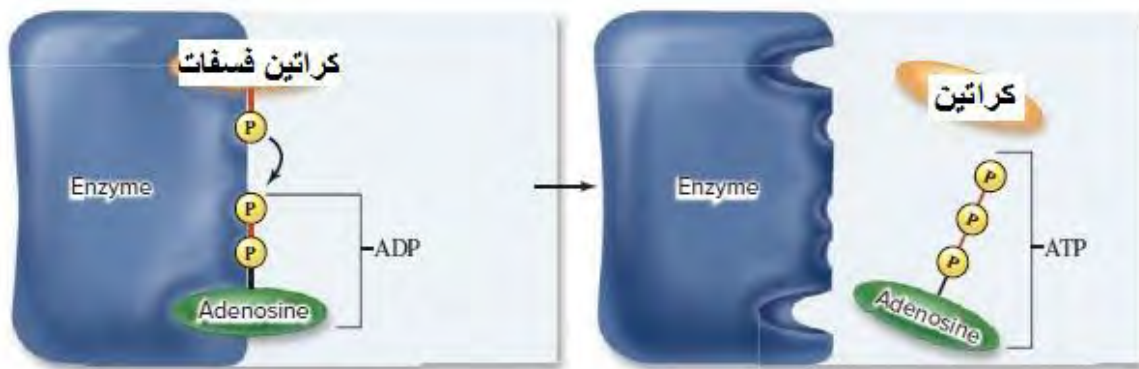
شکل ۳- تبدیل ATP و ADP  
 به یک دیگر. (شرح شکل فارسی می شود)

## ساخته شدن ATP

دیدیم که برای ساخته شدن ATP به فسفات نیاز هست.

یکی از روش‌های ساخته شدن ATP برداشته شدن گروه فسفات از یک ترکیب فسفات دار و افزودن آن به ADP است. به همین علت، این روش را ساخته شدن ATP در سطح پیش ماده می نامند.

در سال گذشته با نمونه ای از ساخته شدن ATP در سطح پیش ماده آشنا شدید. آیا آن را به یاد دارید؟ در کتاب "زیست شناسی ۲" دانستید که ماهیچه ها برای انقباض به ATP نیاز دارند و یکی از راه های تامین آن در ماهیچه ها، برداشت فسفات از مولکول کراتین فسفات و انتقال آن به ADP است (شکل ۴).



شکل ۴- ساخته شدن ATP در سطح پیش ماده. (به جای پ، کراتین فسفات می نویسیم)

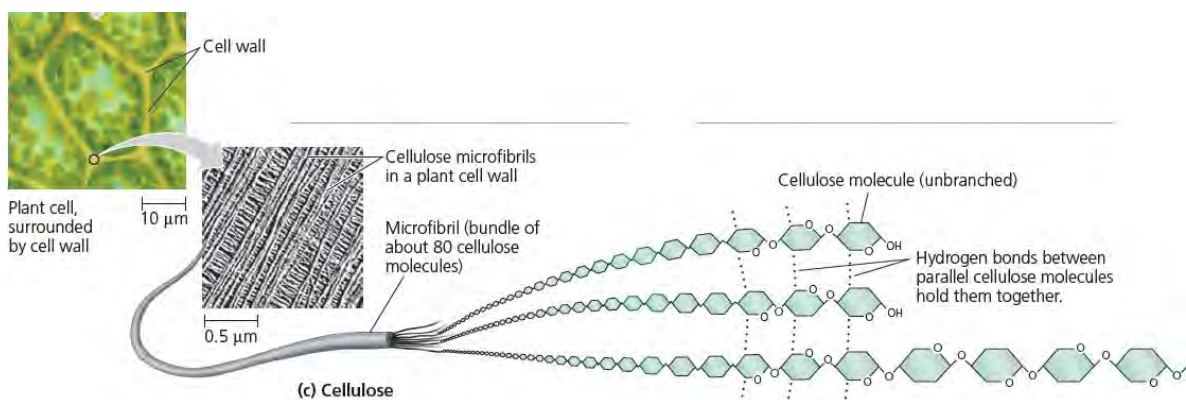
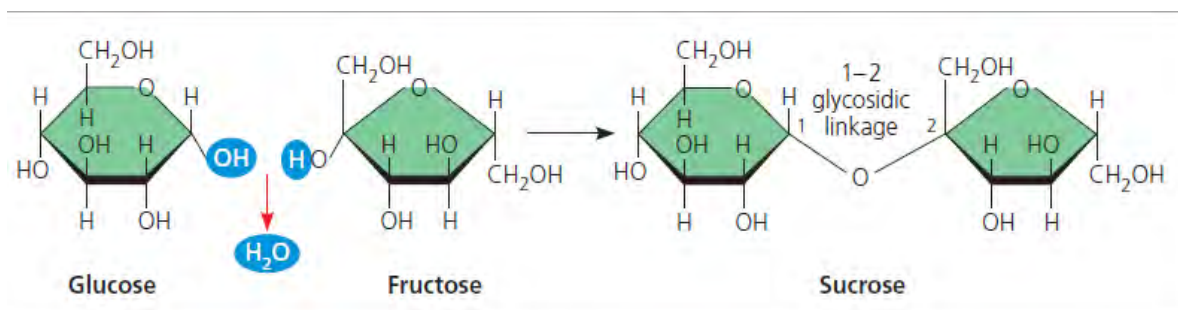
روش دیگر، ساخته شدن اکسایشی ATP است. در این روش ATP از یون فسفات و انرژی حاصل از شیب غلظت پروتون ( $H^+$ ) در میتوکندری هاساخته می شود.

## بیشتر بدانید

### کربوهیدرات ها

کربوهیدرات ها دارای کربن ، هیدروژن و اکسیژن اند. فرمول کلی آنها رابه صورت  $(CH_2O)_n$  نشان می دهند. نقش انرژی زایی کربوهیدرات ها به خوبی شناخته شده است. این ترکیبات به علت داشتن پیوندهای هیدروژن - کربن، انرژی فراوانی در خود ذخیره و هنگام اکسایش آزاد می کنند.

در یک نوع تقسیم بندی، کربوهیدرات ها را در سه گروه مونوساکاریدها (مانند گلوکز) ، دی ساکاریدها (مانند ساکارز) و پلی ساکاریدها (سلولز، نشاسته و گلیکوژن) قرار می دهند. قند و شکر از ساکارز تشکیل شده اند. این دی ساکارید از مونوساکاریدهای گلوکز و فروکتوز تشکیل شده است.



(شکل فارسی می شود)



## زیستن با اکسیژن

اغلب واژه تنفس یاخته‌ای را برای نوع هوازی به کار می‌برند؛ زیرا در جانوران اکسیژن مورد نیاز از طریق نفس کشیدن تامین می‌شود. در اینجا ما نیز **تنفس یاخته‌ای** را به جای تنفس یاخته‌ای هوازی به کار می‌بریم.

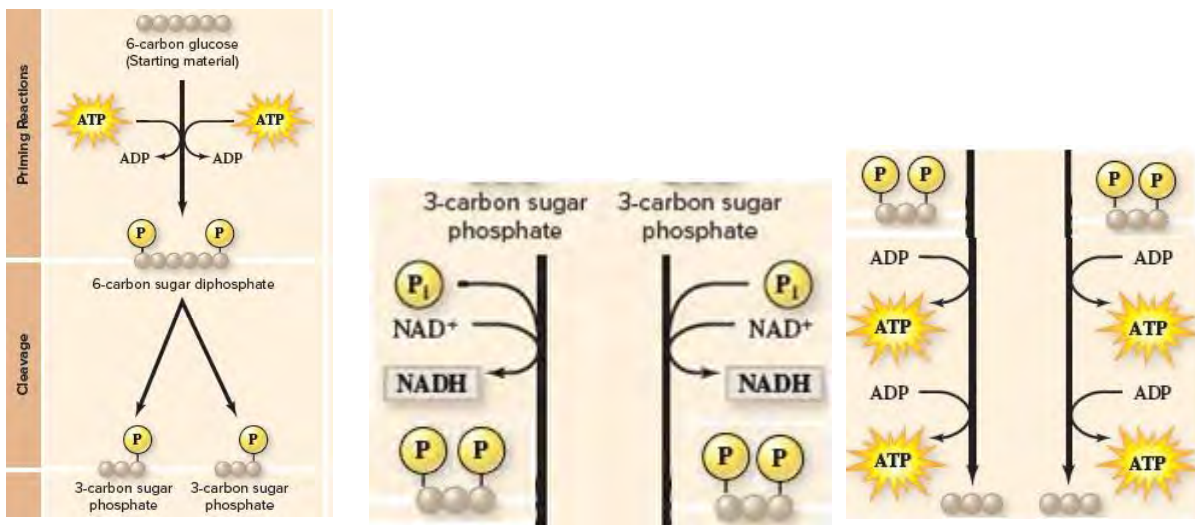
**گلیکولیز**: اولین مرحله تنفس یاخته‌ای، **گلیکولیز** و به معنی تجزیه گلوکز است که در سیتوپلاسم انجام می‌شود.

تجزیه گلوکز در گلیکولیز، نه به صورت یکباره، بلکه به صورت مرحله‌ای انجام می‌شود. برای انجام واکنش‌های مربوط به تجزیه گلوکز ابتدا به مقداری انرژی نیاز هست. این انرژی از ATP تامین می‌شود.

همان طور که در شکل ۵ می‌بینید، گلوکز با گرفتن فسفات‌های ATP، فسفات‌دار یا اصطلاحاً **فسفات‌ها** می‌شود. از تجزیه گلوکز فسفات‌ها شده، دو قندسه کربنی فسفات‌ها ایجاد می‌شود.

سپس هر یک از این قندها یک فسفات دیگر می‌گیرند و به این ترتیب دارای دو گروه فسفات می‌شوند.

هر یک از قندهای دو فسفات بعد از طی مراحل، به مولکولی سه کربنی به نام پیرووات، که نوعی اسید است، تبدیل می‌شوند. در این تبدیل، مولکول‌های ATP نیز تشکیل می‌شوند (شکل ۵).



تشکیل دو قند سه کربنی فسفات‌ها

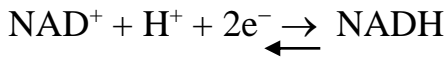
تشکیل قندهای دو فسفات‌ها

تشکیل پیرووات

شکل ۵. تجزیه گلوکز در سیتوپلاسم. (شکل فارسی می‌شود)

همان طور که در شکل ۵ می بینید، در افزوده شدن دومین فسفات به قند سه کربنی، مولکول NADH (ان ای دی اچ) نیز تولید می شود. این مولکول حامل الکترون است، دو نوکلئوتید دارد و می تواند به  $\text{NAD}^+$  (ان ای دی مثبت) تبدیل شود.  $\text{NAD}^+$  و  $\text{NADH}$  با از دست دادن و گرفتن الکترون و پروتون، به هم دیگر تبدیل می شوند.

رابطه (۲)



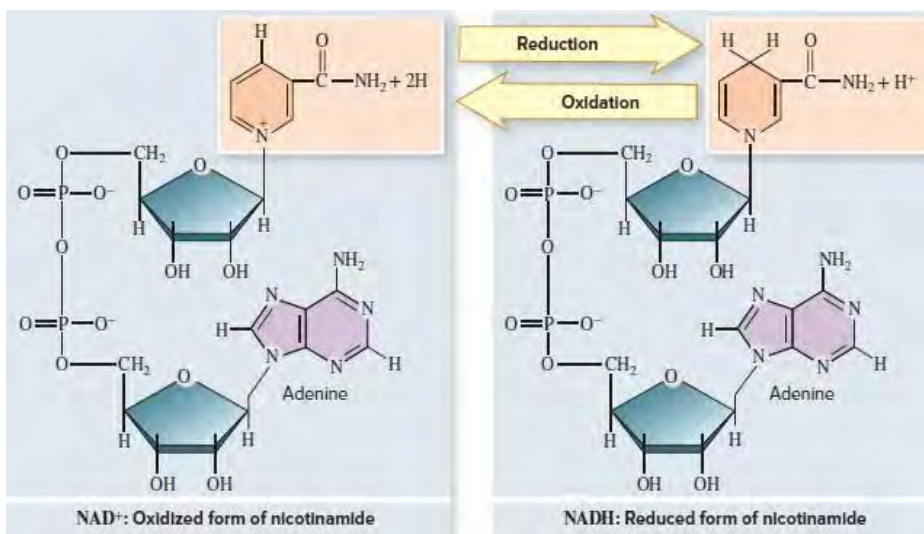
## فعالیت

همان طور که دیدید، در واکنش های گلیکولیز ATP ساخته می شود. بر اساس روش هایی که در باره تولید ATP گفتیم، ساخته شدن ATP در گلیکولیز با کدام روش انجام می شود؟ در فرایند گلیکولیز از هر مولکول گلوکز که به پیرووات تبدیل می شود چند مولکول ATP تولید و چند مولکول ATP مصرف می شود؟

بیشتر بدانید

## انرژی فعال سازی

برای انجام واکنش بین مولکول ها، به انرژی فعال سازی نیاز هست. این انرژی مولکول را برای انجام واکنش آماده می کند. انرژی فعال سازی در واقع سطح انرژی مولکول را به سطح مورد نیاز برای انجام واکنش می رساند. در آغاز گلیکولیز این انرژی از ATP تامین می شود.



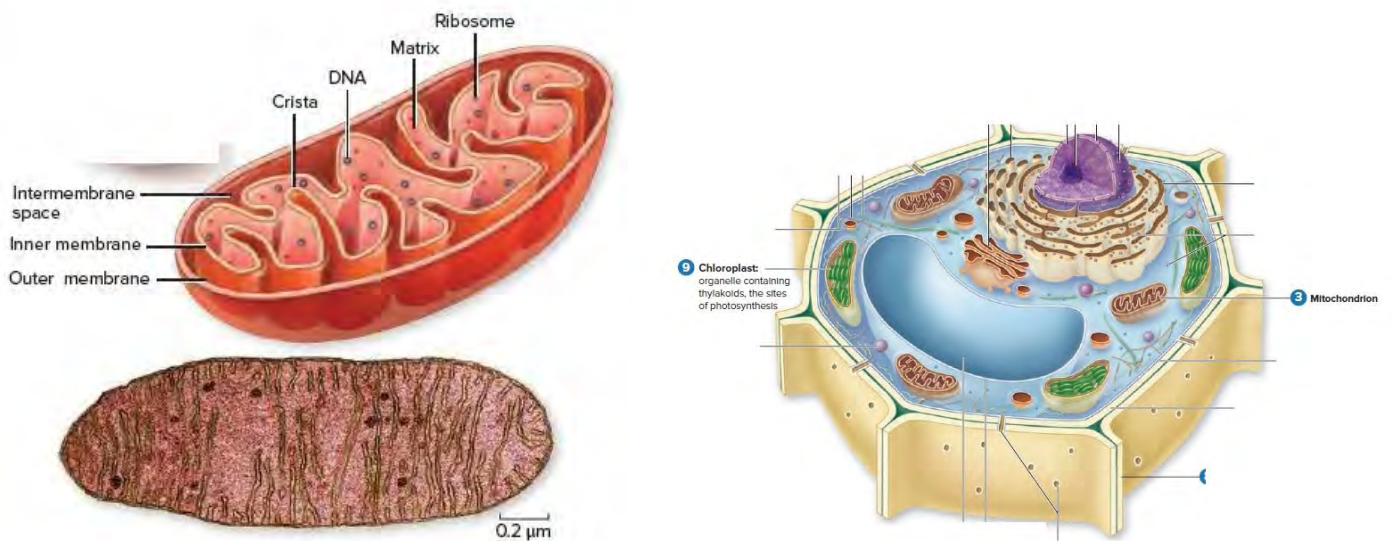
بیشتر بدانید

ساختار نیکوتین آمید آدنین دی نوکلئوتید

(شکل فارسی می شود)

## میتوکندری مقصد پیرووات

مرحله دیگر تنفس یاخته‌ای به اکسیژن نیاز دارد و در میتوکندری‌ها انجام می‌شود. میتوکندری دو غشا دارد (شکل ۶). **غشای بیرونی** میتوکندری صاف، و **غشای درونی** آن به داخل میتوکندری چین خورده است. در نتیجه فضای داخل میتوکندری به دو بخش **فضای داخلی** و **فضای بین دو غشا** تقسیم می‌شود. فضای داخلی **بستره** نام دارد و با غشای داخلی احاطه شده است. جالب است که میتوکندری‌ها دارای دنا مستقل از هسته و ریبوزوم مخصوص به خود هستند و پروتئین سازی در آنها انجام می‌شود. در دنا میتوکندری، ژن‌های مربوط به اطلاعات مورد نیاز برای ساخته شدن تعدادی از پروتئین‌های مهم در تنفس یاخته‌ای وجود دارند. میتوکندری می‌تواند مستقل از تقسیم یاخته‌ای، تقسیم شود؛ اما نمی‌تواند، در شرایط معمول مستقل از یاخته به زندگی خود ادامه دهد. همچنین برای انجام نقش خود در تنفس یاخته‌ای به آنزیم‌هایی وابسته است که ژن‌های آنها در هسته قرار دارند.



شکل ۶. میتوکندری در یاخته‌های یوکاریوت وجود دارد. الف) میتوکندری در یاخته گیاهی، ب) میتوکندری و ترسیم از

آن. شکل فارسی می‌شود



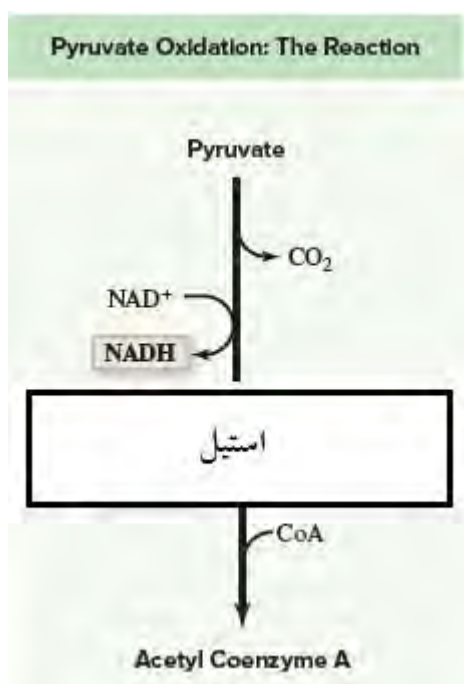
## فعالیت

### گفت و گو کنید

مستقل بودن تقسیم میتوکندری از تقسیم یاخته چه اهمیتی دارد؟

گفتیم که در انتهای گلیکولیز، پیرووات تشکیل می شود. این مولکول وارد میتوکندری می شود و در آنجا اکسایش می یابد. پیرووات در میتوکندری با از دست دادن یک کربن به بنیان استیل تبدیل و با اتصال آن به مولکولی به نام کوآنزیم A، استیل کوآنزیم A تشکیل می شود. در اکسایش پیرووات NADH نیز به وجود می آید (شکل ۷).

اکسایش استیل کوآنزیم A در چرخه ای از واکنش های آنزیمی متفاوت، به نام چرخه کربس، در بستره میتوکندری انجام می گیرد که در گفتار بعدی به آن می پردازیم.



شکل ۷. اکسایش پیرووات و تشکیل استیل کوآنزیم A

(شکل فارسی می شود)

بیشتر بدانید

دانشمند موفق

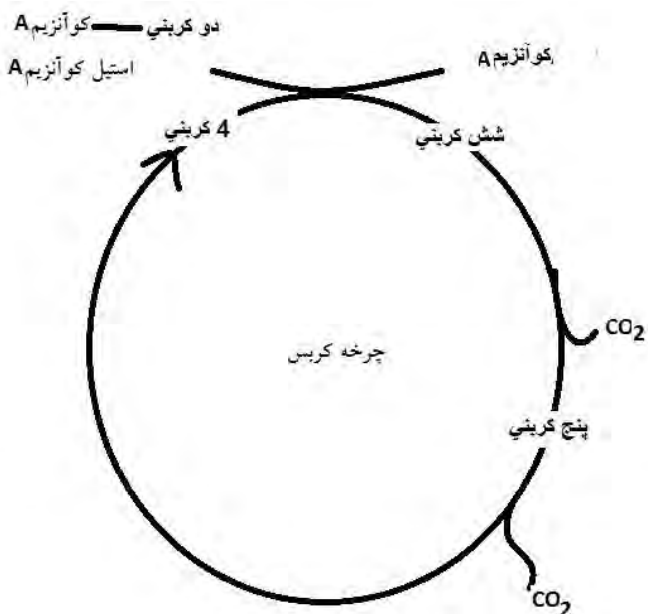
هانس کربس دانشمند آلمانی برای کشف بسیاری از مراحل تنفس یاخته ای، موفق به دریافت جایزه نوبل در سال ۱۹۵۳ شد. از نظر او دانشمند موفق، فردی است که مهارت های فنی و علمی لازم را برای کسب موفقیت های بیشتر با استفاده از امکانات موجود داشته باشد؛ همچنین در راه رسیدن به هدف، سختی ها را تحمل و نتایج پژوهش را به روشنی ارائه دهد.

## گفتار ۲: اکسایش بیشتر

در فرایندهای متفاوت تنفس هوازی، مولکول گلوکز تا حد تشکیل مولکول های CO<sub>2</sub> باید تجزیه شود. بخشی از این تجزیه در گلیکولیز و بخش دیگر آن در چرخه کربس انجام می شود.

### چرخه کربس

شکل ۸ ترسیم ساده ای از وقایع کلی چرخه کربس را نشان می دهد. در این چرخه می بینید ضمن ترکیب استیل و مولکول چهار کربنی، کوآنزیم A جدا و مولکولی شش کربنی، ایجاد می شود. پس از آن در طی واکنش های متفاوتی که در چرخه کربس رخ می دهد، استیل به طور کامل تجزیه و اتم های کربن به صورت CO<sub>2</sub> آزاد می شوند؛ همچنین ترکیب چهار کربنی برای گرفتن استیلی دیگر، بازسازی می شود.

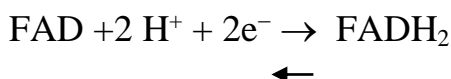


علاوه بر کربن دی اکسید، از اکسایش هر گروه استیل در واکنش های چرخه کربس، سه مولکول NADH، یک مولکول FADH<sub>2</sub> و یک مولکول ATP تشکیل می شوند. این مولکول ها در محل های متفاوتی از چرخه تشکیل می شوند.

FADH<sub>2</sub> ترکیبی نوکلئوتیددار و همانند NADH حامل الکترون است. FADH<sub>2</sub> براساس رابطه (۳) از FAD<sup>+</sup> ساخته می شود.

شکل ۸. طرح ساده ای از چرخه کربس.

رابطه (۳)



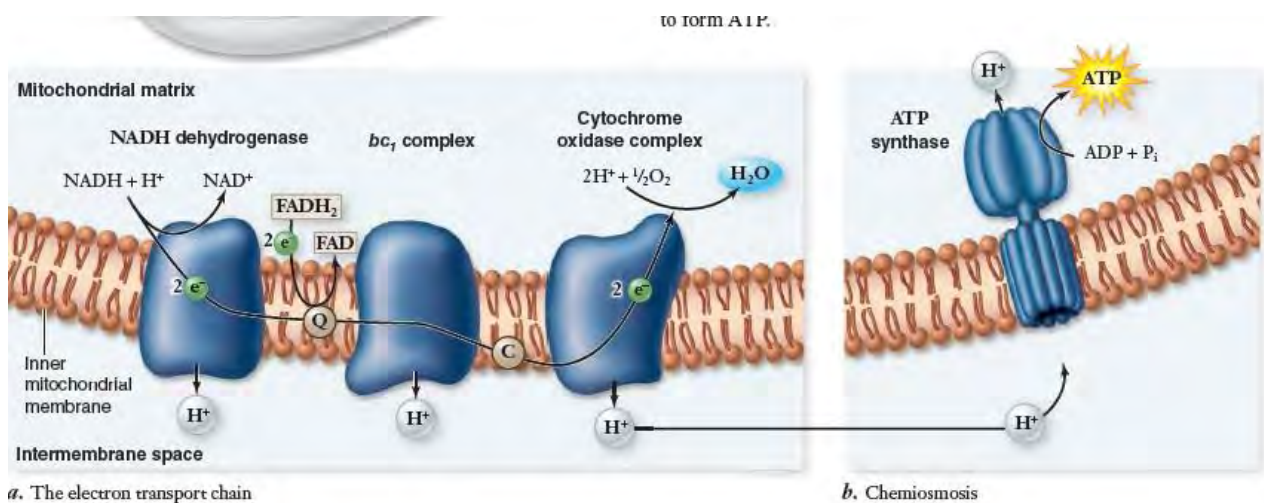
به این ترتیب با انجام گلیکولیز و چرخه کربس، مولکول گلوکز تا تشکیل مولکول های CO<sub>2</sub> تجزیه و انرژی آن صرف ساخته شدن ATP و مولکول های حامل الکترون می شود.

## تشکیل ATP بیشتر

تا اینجا دیدیم که در تنفس یاخته ای ATP به وجود می آید. مولکول های NADH و  $FADH_2$  که در گلیکولیز و چرخه کربس تولید می شوند، نیز ATP تولید می کنند. همچنین، بر اساس رابطه کلی تنفس یاخته ای می دانیم که در این فرایند آب نیز تشکیل می شود. اکنون پرسش این است که چگونه انرژی مولکول های حامل الکترون برای تولید ATP به کار می رود و آب چگونه تولید می شود؟ پاسخ این پرسش ها در زنجیره انتقال الکترون در میتوکندری نهفته است.

## غشای درونی میتوکندری جایگاه زنجیره

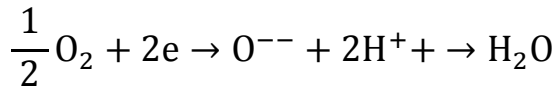
زنجیره انتقال الکترون از تعدادی مجموعه مولکولی تشکیل شده است که در غشای داخلی میتوکندری قرار دارند. درجه اکسایش هر مجموعه با گرفتن الکترون کاهش، و با از دست دادن الکترون افزایش می یابد. همان طور که در شکل ۹ می بینید، الکترون های NADH و  $FADH_2$  به وسیله یکی از این مجموعه ها گرفته و به مجموعه های دیگر منتقل می شوند.



شکل ۹. زنجیره انتقال الکترون در میتوکندری. تعدادی پروتون در بستره اضافه می شود (شکل فارسی)

می شود)

در این زنجیره می بینید که الکترون‌ها در نهایت به اکسیژن مولکولی می‌رسند. اکسیژن با گرفتن الکترون به شکل فعال اکسیژن، یعنی  $O^{--}$  (اتم اکسیژن با دو بار منفی) درمی‌آید. اکسیژن‌های فعال، شدیداً اکسید کننده‌اند و در ترکیب با پروتون‌هایی که در بستره قرار دارند، مولکول‌های آب را تشکیل می‌دهند.



اگر به شکل ۹ توجه کنید، می بینید که پروتون‌ها (یون‌های  $H^+$ ) به وسیله هر یک از این مجموعه‌ها به فضای بین دو غشا وارد می‌شوند. عبور الکترون در زنجیره انتقال الکترون، انرژی لازم برای انتقال پروتون‌ها از بستره به فضای بین دو غشا را فراهم می‌کند.

منشا این پروتون‌ها واکنش‌های متفاوتی‌اند که در چرخه کربس رخ می‌دهند (در شکل ۹ باید). به نظر شما ادامه ورود پروتون‌ها به فضای بین دو غشا چه نتیجه‌ای در پی دارد؟ شاید درست حدس زده باشید. تراکم پروتون‌ها در فضای بین دو غشا، نسبت به بستره افزایش می‌یابد. پروتون‌ها براساس شیب غلظت، تمایل دارند که به سمت بستره برگردند؛ اما تنها راه پیش‌روی پروتون‌ها برای برگشتن به بستره، آنزیمی به نام آنزیم **ATP** ساز است. این آنزیم در واقع یک موتور مولکولی است. پروتون‌ها هنگام عبور از این آنزیم، انرژی موردنیاز برای تشکیل **ATP** از **ADP** و گروه فسفات را فراهم می‌کنند.

## فعالیت

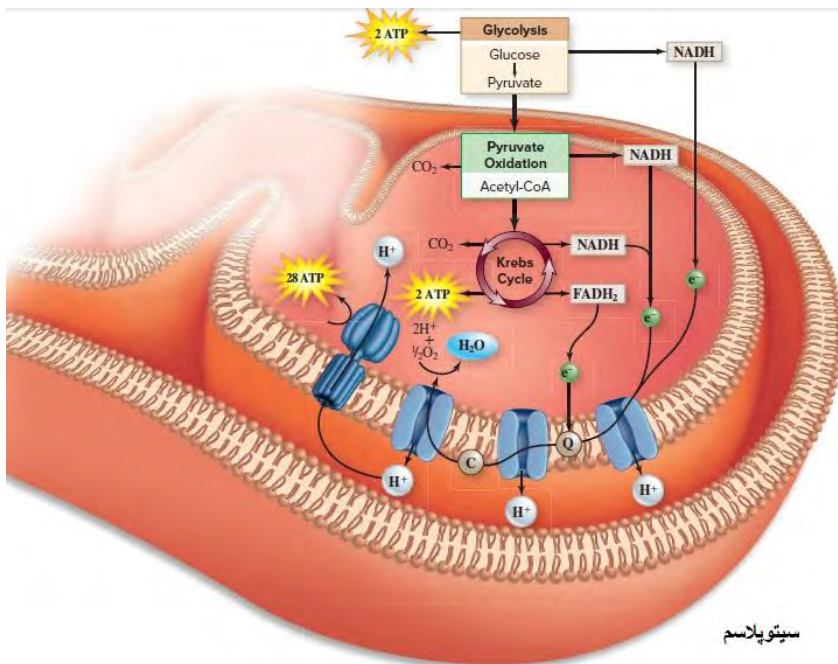
الف) توضیح دهید چرا ساخته شدن **ATP** در زنجیره انتقال الکترون، از نوع ساخته شدن اکسایشی **ATP** است؟

ب) با توجه به نقش غشای داخلی در تنفس یاخته‌ای، چپین خورده بودن آن چه ارزشی برای یاخته دارد؟

## مروری بر تنفس هوازی

خلاصه‌ای از تنفس هوازی را در شکل ۱۰ مشاهده می‌کنید. همان‌طور که می‌بینید در فرایند گلیکولیز از گلوکز پیرووات ایجاد می‌شود. پیرووات به میتوکندری می‌رود و در آنجا به استیل کوآنزیم **A** اکسایش می‌یابد. استیل کوآنزیم **A** وارد چرخه کربس می‌شود تا باقی مانده پیرووات به طور کامل اکسایش یابد.

در این واکنش ها علاوه بر آزاد شدن مولکول های کربن دی اکسید، ATP، NADH و  $FADH_2$  نیز تولید می شوند.



شکل ۱۰. خلاصه ای از تنفس هوازی. (سی و کیو حذف می شود) شکل فارسی می شود.

## فعالیت

### ارائه دهید

با استفاده از شکل ده، به طور گروهی طرحی تصویری و نوشتاری از تنفس یاخته ای هوازی تولید کنید. سعی کنید حداقل واژه ها را به کاربرید. هر گروه طرح خود را در کلاس ارائه دهد. این طرح را می توانید با استفاده از نرم افزارهای رایانه ای، نقاشی، ... و به صورت های متفاوت تولید کنید.

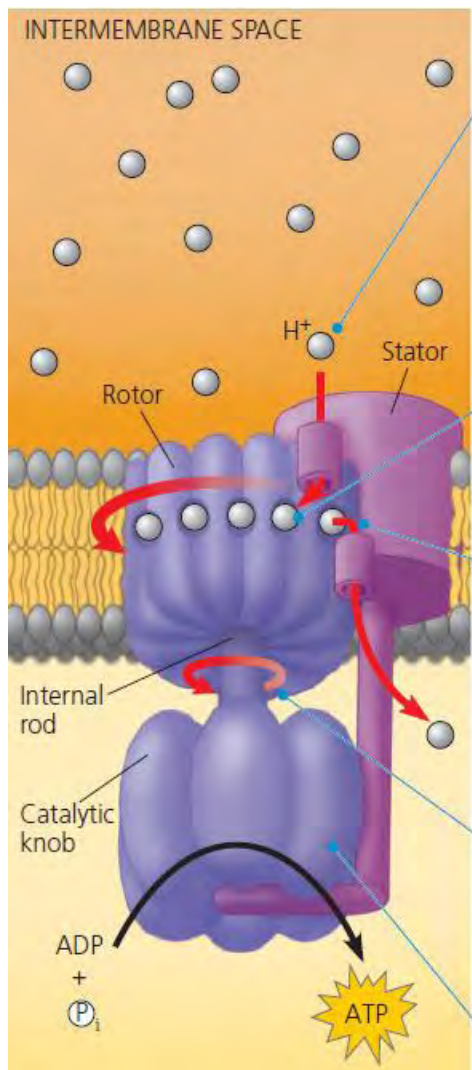
### بیشتر بدانید

#### موتور چرخنده

آنزیم ATP ساز در واقع یک موتور چرخنده است. این موتور از سه بخش سر، پایه و چرخنده تشکیل شده است. کانالی که پروتون ها می توانند از آن عبور کنند، از دو نیمه تشکیل شده و به شکلی در غشا قرار دارد که دو نیمه آن در یک امتداد نیستند. پروتون وارد یک نیمه کانال می شود. پروتون از زیر واحدی به



زیر واحدی دیگر از بخش چرخنده متصل و باعث چرخش آن می شود. این چرخش به سر منتقل و سبب می شود که سر در وضعیت مناسب برای ساختن ATP قرار گیرد. در واقع انرژی مکانیکی حاصل از چرخش بخش چرخنده، سر را در وضعیت مناسب برای ساختن ATP قرار می دهد (شکل i).



شکل فارسی می شود

### بازده انرژی تنفس هوازی

دانستیم که از مولکول های NADH و FADH<sub>2</sub> در زنجیره انتقال الکترون ATP تولید می شود. اکنون پرسش این است که به ازای هر NADH و FADH<sub>2</sub> چه مقدار ATP تولید می شود. اندازه گیری های واقعی در شرایط بهینه آزمایشگاهی نشان می دهند که مقدار ATP تولید شده به ازای هر NADH ۲/۵ و به ازای هر FADH<sub>2</sub> ۱/۵ است. انتقال هر NADH از سیتوپلاسم به میتوکندری به یک ATP نیاز دارد، بنابراین درازای تجزیه کامل گلوکز در بهترین شرایط در یاخته یوکاریوت، حداکثر ۳۰ ATP تولید می شود. باید توجه داشت که تولید ATP در یاخته های متفاوت و متناسب با شرایط فیزیولوژیک فرق می کند. بنابراین نمی توان به سادگی به این پرسش پاسخ داد که در ازای تجزیه هر مقدار گلوکز چه مقدار ATP در یاخته ها تولید می شود.

## بیشتر بدانید

### انرژی در دسترس

مقدار انرژی آزاد شده از اکسایش گلوکز  $686 \text{ Kcal/mol}$  و انرژی قابل استفاده (آزاد) در هر پروتون حدود  $7.3 \text{ Kcal/mol}$  است. بنابراین انرژی قابل دسترس برای یک یاخته هوازی یوکاریوت حدود  $32\% = (7/3 \times 30) / 686$  است.

## گفت‌وگو کنید

باکتری‌ها میتوکندری ندارند؛ بنابراین در باکتری‌های هوازی گلیکولیز و چرخه کربس در سیتوپلاسم آنها انجام می‌شوند. به ازای اکسایش هر مولکول گلوکز در باکتری‌ها  $32 \text{ ATP}$  تولید می‌شود. آیا می‌دانید چرا؟

### تنظیم تنفس هوازی: تولیدی اقتصادی

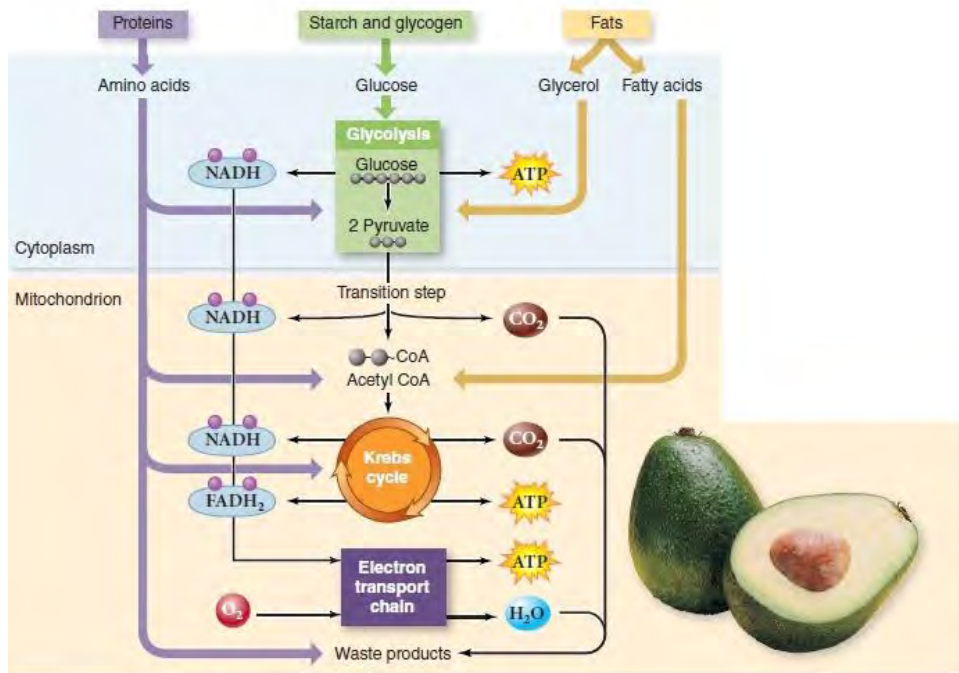
به نظر شما اگر مقدار  $\text{ATP}$  در یاخته زیاد باشد، واکنش‌های گلیکولیز و چرخه کربس، به همان میزانی انجام می‌شوند که در شرایط کمبود  $\text{ATP}$  است؟ مشخص شده که تولید  $\text{ATP}$  تحت کنترل میزان  $\text{ATP}$  و  $\text{ADP}$  است. اگر  $\text{ATP}$  زیاد باشد، آنزیم‌های درگیر در گلیکولیز و چرخه کربس مهار می‌شوند تا تولید  $\text{ATP}$  کم شود. در صورتی که مقدار  $\text{ATP}$  کم و  $\text{ADP}$  زیاد باشد، این آنزیم‌ها فعال و تولید  $\text{ATP}$  افزایش می‌یابد. این تنظیم مانع از هدر رفتن منابع یاخته می‌شود.

یاخته‌های بدن به طور معمول از گلوکز و ذخیره قندی کبد برای تامین انرژی استفاده می‌کنند. در صورتی که این منابع کافی نباشند، آنها برای تولید  $\text{ATP}$  به سراغ تجزیه پروتئین‌ها و لیپیدها می‌روند. به همین علت تحلیل و ضعیف شدن ماهیچه‌ها از عوارض فقر غذایی شدید و طولانی مدت در افرادی است که رژیم غذایی نامناسب دارند یا اینکه به دلایل متفاوت غذای کافی در اختیار ندارند.

بیشتر بدانید

اگر کربوهیدرات ها کافی نباشند

همان طور که در شکل می بینید پروتئین ها و چربی ها نیز برای تامین انرژی به کار می روند. از این مولکول ها نیز در نهایت استیل کوآنزیم A تولید می شود.



فارسی می شود

فعالیت

شاید دیده باشید که در دانه های خشک و بدون آب مانند نخود و لوبیا ، حشرات و لارو آنها رشد و نمو می کند. با توجه به اینکه این دانه ها خشک اند و تقریباً آبی ندارند، آب مورد نیاز این جانوران چگونه تامین می شود؟

## گفتار ۳: زیستن مستقل از اکسیژن

### تنفس بی هوازی

دیدیم که در تنفس هوازی، اکسیژن گیرنده نهایی الکترون است. آیا تجزیه گلوکز و تامین انرژی، همیشه وابسته به حضور اکسیژن است؟ آیا در محیط هایی که اکسیژن ندارند یا اکسیژن اندکی دارند، حیات وجود ندارد؟

یکی از راه های تامین ATP در چنین شرایطی، تنفس بی هوازی است. در این نوع تنفس، به جای اکسیژن ترکیبات دیگری گیرنده نهایی الکترون هستند.

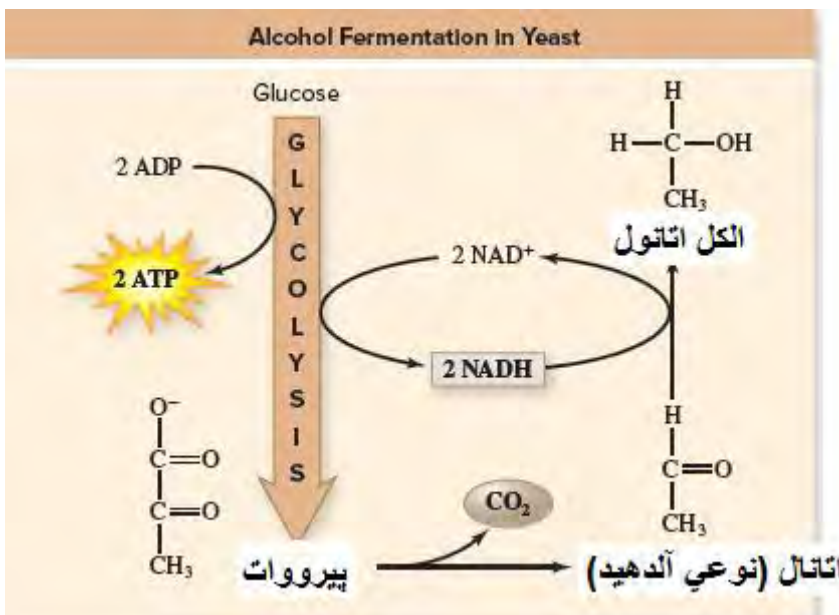
تخمیر از روش های تامین انرژی در شرایط کمبود یا نبود اکسیژن است که در انواعی از جانداران رخ می دهد. تخمیر الکلی و تخمیر لاکتیکی انواعی از تخمیرند که در صنایع متفاوت از آنها بهره می بریم.

تخمیر الکلی و لاکتیکی مانند تنفس هوازی با گلیکولیز آغاز می شوند و تا تشکیل پیرووات ادامه می یابند. بعد از تشکیل پیرووات، الکترون های NADH به ماده ای به جز اکسیژن منتقل می شوند. در ادامه با این دو نوع تخمیر بیشتر آشنا می شویم.

### تخمیر الکلی

ورآمدن خمیر نان به علت انجام تخمیر الکلی است. شکل ۱۱ طرح ساده ای از مراحل این نوع تخمیر را نشان می دهد. در این فرایند پیرووات حاصل از گلیکولیز با از دست دادن CO<sub>2</sub>، به ترکیبی دو کربنی تبدیل می شود. این ترکیب با گرفتن الکترون های NADH به اتانول تبدیل و به این ترتیب NAD<sup>+</sup> مورد نیاز برای انجام گلیکولیز نیز فراهم می شود. اگر NAD<sup>+</sup> بازسازی نشود، گلیکولیز متوقف می شود و در نتیجه تخمیر

الکلی انجام نمی شود.



شکل ۱۱. تخمیر الکلی.

شکل فارسی می شود.

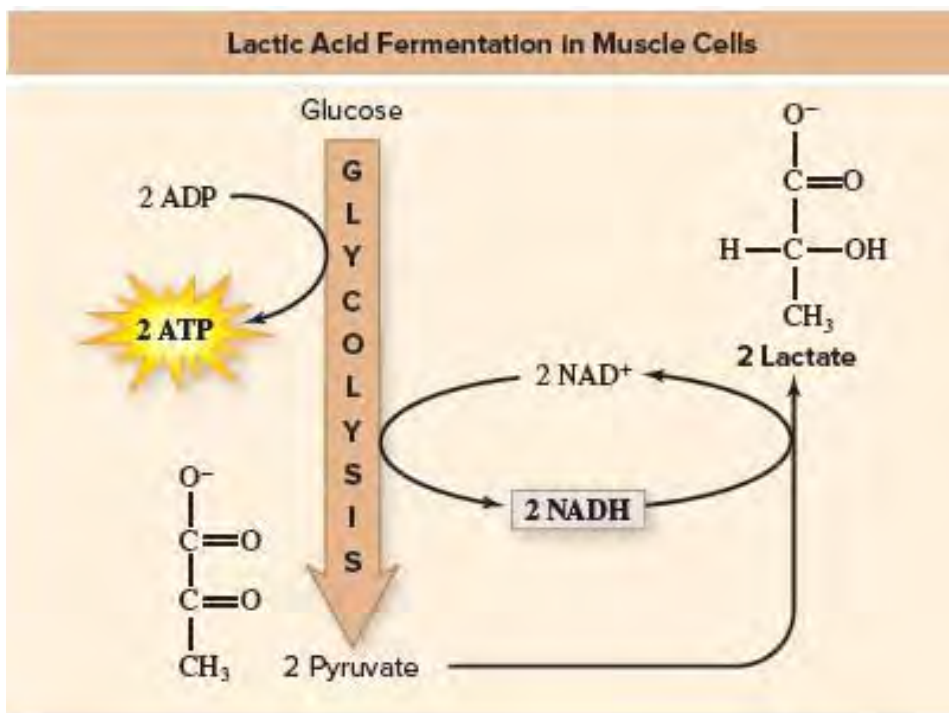
بیشتر بدانید

### تخمیر الکلی در پخت نان

*Saccharomyces cerevisiae* قارچی تک یاخته ای است که نشاسته را تجزیه می کند. در فرایند پخت نان، این قارچ به خمیر اضافه و خمیر در شرایط مناسب نگه داری شود.  $\text{CO}_2$  حاصل از تخمیر الکلی در خمیر حباب هایی ایجاد می کند که سبب **ور آمدن یا رسیدن خمیر** می شود. اتانول تولید شده در خمیر بر اثر حرارت، تبخیر می شود.

### تخمیر لاکتیکی

در سال گذشته خواندید، ماهیچه ها برای تجزیه کامل گلوکز به اکسیژن نیاز دارند و اگر اکسیژن کافی نباشد، لاکتات در ماهیچه ها تجمع می یابد. اما لاکتات با چه ساز و کاری ایجاد می شود؟  
فعالیت شدید ماهیچه ها به اکسیژن فراوان نیاز دارد. اگر اکسیژن کافی نباشد، پیرووات حاصل از گلیکولیز وارد میتوکندری ها نمی شود، بلکه با گرفتن الکترون های  $\text{NADH}$  به لاکتات تبدیل می شود (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. تخمیر لاکتیکی. علت ترش شدن شیر لاکتیک اسید است. **شکل فارسی می شود**



انواعی از باکتری ها تخمیر لاکتیکی را انجام می دهند. بعضی از این باکتری ها ، مانند آنچه در ترش شدن شیر رخ می دهد، سبب فساد غذا می شوند؛ اما انواعی از آنها در تولید فراورده های غذایی به کار می روند. تخمیر لاکتیکی در تولید فراورده های لبنی و خوراکی هایی مانند خیارشور به کار می رود.

## فعالیت

### گفت و گو کنید

انواعی از باکتری ها می توانند ، با استفاده از تنفس غیر هوازی انرژی را از مواد مغذی به دست آورند. مثلا پذیرنده نهایی الکترون در باکتری های متانزا (متانوژن) که در خاک و دستگاه گوارش نشخوارکنندگان زندگی می کنند ، کربن دی اکسید است. در این فرایند گاز متان نیز تشکیل می شود. این باکتری ها می توانند با تجزیه فاضلاب، آن را تصفیه کنند. از طرفی، گاز متان از گازهای گلخانه ای و افزایش دمای کره زمین است. چه پیشنهادی برای حل مشکل تولید گاز متان دارید؟

### سلامت بدن : پاداکسنده ها

در درس شیمی آموختید که رادیکال های آزاد به علت داشتن الکترون های جفت نشده در ساختار خود، واکنش پذیری بالایی دارند و می توانند در واکنش با مولکول های تشکیل دهنده بافت های بدن، به آنها آسیب برسانند. در فرایند تنفس هوازی ، امکان تشکیل رادیکال آزاد از مولکول اکسیژن وجود دارد. اما چگونه؟

دیدیم که مولکول اکسیژن با پذیرش الکترون ها در پایان زنجیره انتقال الکترون ، به یون دو بار منفی اکسیژن ( $O^{2-}$ ) یا یون اکسید تبدیل می شود. یون های اکسید با یون های هیدروژن ( $H^+$ ) ترکیب و در نتیجه مولکول آب به وجود می آید. اما گاه پیش می آید که یون های اکسید وارد واکنش تشکیل آب نمی شوند و به صورت رادیکال های آزاد باقی می ماند. رادیکال های آزاد، الکترون ها را از مولکول های زیستی (کربوهیدرات ها، پروتئین ها، لیپیدها و نوکلئیک اسیدها) می گیرند و ساختار کربنی آنها را تخریب می کنند.

بارها شنیده اید که خوردن میوه ها و سبزیجات در حفظ سلامت بدن نقش دارند. این مواد غذایی دارای پاداکسنده هایی مانند کاروتنوئیدها هستند. پاداکسنده ها با گرفتن الکترون های اضافی از رادیکال های آزاد مانع از حمله رادیکال ها به مولکول های زیستی و در نتیجه تخریب بافت های بدن می شوند.

## تجمع رادیکال های آزاد

آیا خنثی سازی رادیکال های آزاد همیشه با موفقیت انجام می شود؟ اگر به هر علت سرعت تشکیل رادیکال های آزاد بر خنثی سازی آنها بیشتر باشد، چه اتفاقی را پیش بینی می کنید؟

مشخص است که در چنین شرایطی، رادیکال های آزاد در میتوکندری تجمع می یابند و آن را تخریب می کنند، در نتیجه یاخته هم تخریب می شود.

عوامل فراوانی، از جمله تغذیه ای و ژنی می توانند، میتوکندری را در خنثی سازی رادیکال های آزاد با مشکل روبه رو کنند. مثلاً الکل و انواعی از نقص های ژنی در عملکرد میتوکندری در خنثی سازی رادیکال های آزاد مشکل ایجاد می کنند.

مطالعات نشان می دهد که الکل سرعت تشکیل رادیکال های آزاد اکسیژن را افزایش می دهد و مانع از عملکرد میتوکندری در جهت کاهش آنها می شود. رادیکال های آزاد به DNA میتوکندری حمله و بعد از مرگ میتوکندری، سبب مرگ یاخته ای و در نتیجه بافت مردگی (نکروز) کبد می شوند. به همین علت اختلال در کار کبد و ازکار افتادن آن از شایع ترین عوارض نوشیدن مشروبات الکلی است.

گاه نقص در ژن های مربوط به پروتئین های زنجیره انتقال الکترون، به ساخته شدن پروتئین های معیوب می انجامد. میتوکندری با این پروتئین های معیوب در خنثی سازی رادیکال ها ضعیف عمل می کند.

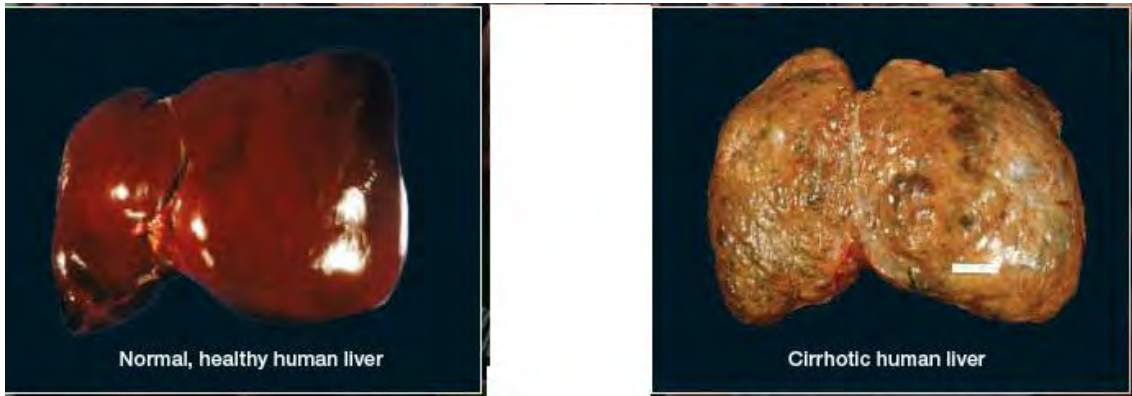
مواد سمی فراوانی وجود دارند که با مهار یک یا تعدادی از واکنش های تنفس هوازی، باعث مرگ می شوند. سیانید یکی از این ترکیب هاست که واکنش نهایی مربوط به انتقال الکترون ها به  $O_2$  را مهار و در نتیجه باعث توقف زنجیره انتقال الکترون می شود.

از زیست شناسی سال دهم به یاد دارید که گاز مونواکسید کربن با اتصال به هموگلوبین، مانع از اتصال اکسیژن به آن می شود و چون به آسانی از هموگلوبین جدا نمی شود، ظرفیت حمل اکسیژن در خون را کاهش می دهد. اکنون می دانید این عملکرد مونواکسید کربن، در واقع در انجام تنفس یاخته ای اختلال ایجاد می کند. مونواکسید کربن به شکل دیگری نیز بر تنفس یاخته ای اثر می گذارد. این گاز سبب توقف واکنش مربوط به انتقال الکترون ها به اکسیژن می شود. دود خارج شده از خودروها و سیگار از منابع دیگر تولید مونواکسید کربن اند.

## بیشتر بدانید

### الکل و سرطان کبد

سیروز کبدی از عوارض دیگر مصرف طولانی مدت الکل است. الکل بر تجزیه چربی ها اثر منفی دارد بنابراین، مصرف الکل سبب تجمع چربی ها در یاخته های کبدی و ممانعت از عملکرد آن می شود. سیروز کبدی احتمال ابتلا به سرطان کبد را افزایش می دهد.



کبد سالم

کبد سیروزی