

# پنج فصل از ماده به انرژی



## درسنامه

قطعاً می‌دانید که **جانوران** با خوردن مواد غذایی، انرژی به دست می‌آورند. این جمله ساده حاوی معانی علمی بسیار مهمی است که در این فصل به بررسی آن می‌پردازیم. از طرفی در سال‌های قبل آموختیم که مثلاً پمپ سدیم پتاسیم در غشای یاخته‌ها، با مصرف ATP، انرژی زیستی فرایند خود را به دست می‌آورد. در این فصل می‌خواهیم ببینیم چگونه از مواد غذایی گیاهی یا جانوری که وارد بدن یک جانور می‌شود، مولکول‌هایی انرژی‌زا به نام ATP در بدن ایجاد می‌شوند؟ در حقیقت، ATP **سوخت اصلی و رایج یاخته‌ها یا انرژی زیستی یاخته** می‌باشد و پول نقدی است که واکنش‌های یاخته‌ای خرج می‌کنند تا آنزیم‌ها و سایر عوامل بتوانند کار خود را انجام دهند.

محققین می‌دانند که **گلوکز مهم‌ترین** منبع انرژی برای به دست آوردن ATP در فرایندهایی به نام **تنفس یاخته‌ای** می‌باشد. در این فصل به‌طور کامل به بررسی واکنش‌های تجزیه گلوکز در جهت به دست آوردن انرژی می‌پردازیم.

### نکته

در بدن جانوران، ورزش و فعالیت شدید بدنی، سبب گرم‌زایی بیشتر شده که ضمن آن با عرق کردن باعث از دست دادن آب بدن نیز می‌شود.

### نکته

جانوران گیاه‌خوار (*رُزافه و ملخ*)، گوشت‌خوار (*مرغ*) و همه‌چیزخوار (*انسان*)، منبع غذایی متفاوتی دارند ولی همگی انرژی مورد نیاز را با **شیوه یگسسانی** به دست می‌آورند که به همین دلیل به آن‌ها جانداران **مصرف‌کننده** می‌گویند. این جانداران نمی‌توانند با تولید مواد آلی از مواد معدنی، به ذخیره انرژی بپردازند و محتاجند که این مواد آلی را از محیط کسب کنند.

## تأمین انرژی و تنفس یاخته‌ای



### تنفس یاخته‌ای ← هر نوع آن ATP تولید می‌کند

همه **جانداران** طبیعت از ساده‌ترین که باکتری‌ها (*پروکاریوت‌ها*) هستند تا پیچیده‌ترین که انسان‌ها می‌باشند، از گیاه گرفته تا قارچ و جانور آغازی و تولیدکننده و مصرف‌کننده، همه و همه **برای انجام فعالیت‌های زیستی خود محتاج انرژی می‌باشند**. در همه جانداران با واکنش‌های درون‌یاخته‌ای به نام **تنفس یاخته‌ای**، مقداری **انرژی زیستی** به صورت ATP به دست می‌آید. به‌طور معمول ماده‌ای که طی تنفس یاخته‌ای جانداران تجزیه می‌شود، از گروه **هیدرات‌های کربن** می‌باشد که انرژی حاصل از تجزیه آن، مقداری به صورت **گرما** آزاد شده و مقداری نیز به صورت ATP ذخیره می‌شود.

### سوخت‌وساز (متابولیسم)

**متابولیسم یا سوخت‌وساز** همان انجام واکنش‌ها در درون موجود زنده و به کمک آنزیم‌ها می‌باشد که دو قسمت مهم دارد، یکی واکنش‌های **ساخت مواد آلی** (*آنابولیسم*) که در فصل آینده به آن خواهیم پرداخت و دیگری **سوخت مواد آلی** (*کاتابولیسم*) که در این فصل به‌طور کامل بررسی می‌شود.

### چند نکته مهم در بررسی تست‌ها

- 1 **بسیاری** از جانداران قادرند در صورت نبودن گلوکز یا قند کافی به ترتیب از موادی مثل **چربی‌ها** انرژی‌زایی کنند و اگر ذخیره چربی نیز تمام شد، جاندار به سمت خودسوزی رفته تا با تجزیه پروتئین‌های خود به ویران کردن ساختار بدن برای به دست آوردن انرژی بپردازد تا شاید اندکی مدت زمان حیات خود را طولانی‌تر کند.
- 2 به‌طور طبیعی قند و چربی‌ها به مصرف انرژی‌زایی می‌رسند ولی بدن از پروتئین‌ها و نوکلئیک‌اسیدها در کارهای ساختاری و اطلاعاتی استفاده می‌کند.

۳ اکسایش در اصطلاح شیمی به معنی از دست دادن الکترون یا ترکیب شدن با اکسیژن می‌باشد که سبب افزایش عدد اکسایش آن‌ها می‌شود.

۴ کاهش یا احیا شدن در اصطلاح شیمی به معنی گرفتن الکترون می‌باشد که سبب کاهش عدد اکسایش آن ماده می‌شود.

## انواع تنفس یاخته‌ای و کل فصل در یک نگاه!

در جانداران طبیعت، دو نوع تنفس یاخته‌ای وجود دارد که در هر دو نوع، گلوکز تجزیه یا اکسایش می‌شود و از انرژی حاصل از شکسته شدن پیوندهای بین اتم‌های کربن و هیدروژن آن، مقداری ATP به دست می‌آید.

### نگاه کلی به هدف تنفس یاخته‌ای

در واکنش‌های تنفس یاخته‌ای، هدف، تولید ATP با استفاده از تجزیه مواد آلی می‌باشد. در این واکنش‌ها معمولاً از تجزیه گلوکز به عنوان منبع انرژی استفاده می‌شود. گلوکز طی سلسله مراتبی تجزیه شده و طی اکسایش به مولکول‌های آلی مثل پیرووات یا استیل و... تبدیل می‌شود و مقداری الکترون پرانرژی از دست می‌دهد که باید بالاخره برای هد رفتن این انرژی‌ها، به کمک واکنش‌های آنزیمی به تولید ATP پرداخته شود که در ادامه به بررسی کامل واکنش‌ها می‌پردازیم.

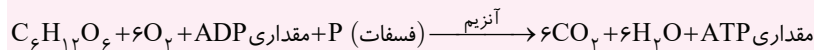
### نوع اول تنفس: تنفس دارای بخش‌های بی‌هوازی و هوازی (معروف به تنفس هوازی)

این تنفس به‌طور کلی به تنفس هوازی مشهور است که برخی واکنش‌های آن به کمک اکسیژن رخ می‌دهد. در این تنفس از اکسایش هر مولکول گلوکز، مقدار زیادی ATP به دست می‌آید (حراثت ATP ۳۰). این نوع تنفس در یوکاریوت‌ها و اغلب پروکاریوت‌ها رخ می‌دهد. مرحله اول این تنفس که در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم رخ می‌دهد به قند کافت (گلیکولیز) معروف است. این مرحله بخش بی‌هوازی تنفس است که بدون نیاز به  $O_2$  صورت می‌گیرد. واکنش‌های قند کافت، مخصوص هر نوع تنفس یاخته‌ای (هوازی یا بی‌هوازی) می‌باشد که طی آن مقدار کمی ATP (نوع سرد) ایجاد می‌شود. سایر مراحل تنفسی که به اختصار در ادامه طبقه‌بندی شده است درون راکیزه یوکاریوت‌ها یا در غشا و سیتوپلاسم پروکاریوت‌های هوازی صورت می‌گیرد.

### نکته

در کتاب درسی معمولاً تعداد ATP تولیدی یا تعداد مولکول‌های ناقل الکترونی مثل  $NADH, H^+$  یا  $FADH_2$  در هر مرحله تنفس را به‌طور دقیق مشخص نکرده است و فقط به تولید محصولات در مراحل مختلف پرداخته است. به همین دلیل شما نیز در اغلب موارد نیازی به دانستن مرحله تولید مواد مختلف را ندارید. در ادامه فصل به بررسی و توضیح کامل مولکول‌های ناقل الکترونی می‌پردازیم!! (نگران نباشید!!)

### ● فرمول کلی اکسایش یا تجزیه گلوکز در تنفس هوازی



### ● طبقه‌بندی کلی مراحل تنفس یاخته‌ای هوازی

### نکته

لازم به ذکر است که اگر اولین بار است این بخش را از درسنامه الگو مطالعه می‌کنید و کل فصل را هنوز نخوانده‌اید، ممکن است در نگاه اول این طبقه‌بندی برای شما دشوار باشد ولی با مرور این مبحث و دوره‌های بعدی پی به اهمیت این قسمت می‌برید!! (انش‌الله!) (می‌توانید بعد از مطالعه دو گفتار اول برگزیده و اهمیت آن را بفهمید!)

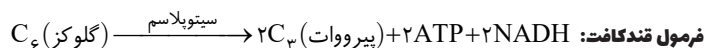
● قندکافت به معنی تجزیه گلوکز می‌باشد.

● این مرحله بدون نیاز به  $O_2$  در هر جاندار رخ می‌دهد.

● همه واکنش‌های آن درون ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم در روز و شب رخ می‌دهد.

● مقدار کمی ATP در سطح پیش‌ماده و مقداری  $NADH$  می‌سازد. (در ادامه توضیح می‌دهیم این چرخ هست!) (مرحله اول = قسمت بی‌هوازی)

●  $CO_2$  تولید و مصرف نمی‌کند یعنی واکنش‌هایی مستقل از نور و  $CO_2$  می‌باشد. (تفسیر قندکافت = گلیکولیز)



● قندکافت، مرحله اول یا بخش اول هر نوع تنفس یاخته‌ای می‌باشد.

● طی واکنش‌های آن که در ادامه مشاهده می‌کنید مقداری ATP (۲ عدد) برای فعال‌سازی اولیه واکنش مصرف

می‌شود ولی مقدار بیشتری ATP (۴ عدد) در انتها تولید می‌شود.

**نکته:** بخش هوازی تنفس، در راکیزه یوکاریوت‌ها یا در غشا و سیتوپلاسم پروکاریوت‌ها رخ می‌دهد. واکنش‌هایی محتاج  $O_2$  بوده که به نسبت قندکافت سبب تولید مقدار ATP بیشتری می‌شود.

اکسایش پیرووات در راکیزه صورت می‌گیرد تا در نهایت گروه استیل دو کربنی تولید شود. **مجموعه آنزیمی** انجام مراحل آن در **غشای درونی راکیزه** یا غشای پروکاریوت‌ها قرار گرفته‌اند. واکنش‌ها درون بستره راکیزه در مجاور سطح غشای داخلی چین خورده انجام می‌شود. علاوه بر دو مولکول استیل کوآنزیم A،  $2CO_2$  و  $2NADH$  نیز تولید می‌کند.

واکنش کلی:  $2C_3H_7O_2 + 2NAD^+ \rightarrow 2C_2H_3O_2CoA + 2CO_2 + 2NADH + H^+$

استیل CoA (A کوآنزیم)  $2CO_2$  (پیرووات)  $2NAD^+$

مرحله دوم یا بخش هوازی تنفس

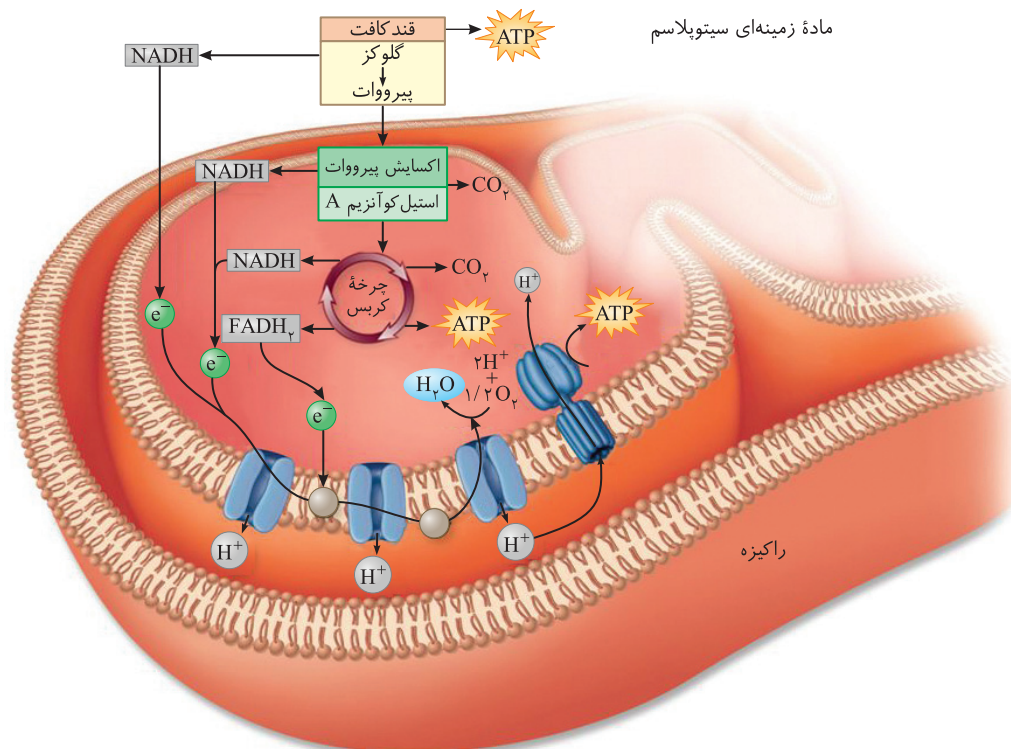
واکنش‌هایی چرخه‌ای برای اکسایش گروه استیل می‌باشد. در بستره (درون راکیزه) یا ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم پروکاریوت‌ها توسط مجموعه‌ای آنزیمی به نام چرخه کربس رخ می‌دهد. مقداری  $NADH, H^+$  و  $FADH_2$  و ATP در سطح پیش‌ماده به همراه  $2CO_2$  در مراحل مختلف هر چرخه کربس ایجاد می‌شود.

مرحله هوازی تنفس یاخته‌ای (اکسایش گروه استیل) چرخه کربس

توسط عوامل موجود در غشای درونی چین خورده راکیزه یا غشای پروکاریوت‌ها رخ می‌دهد. مسئول اکسایش ناقلین الکترونی  $NADH$  و  $FADH_2$  می‌باشد. الکترون‌ها و پروتون‌های  $NADH, H^+$  و  $FADH_2$  را به  $O_2$  می‌رساند تا آب تولید کند. آخرین گیرنده الکترون و پروتون آن **ماده معدنی**  $O_2$  می‌باشد. در تولید مقدار زیادی ATP **اکسایشی** نقش دارد. در غشای درونی راکیزه سبب دوباره‌سازی  $NAD^+$  و FAD می‌شود.

زنجیره انتقال الکترون

## ● تنفس یاخته‌ای در یک شکل

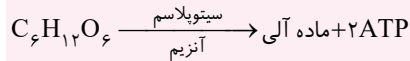


## نوع دوم تنفس: تنفس کاملاً بی‌هوازی (تخمیر)

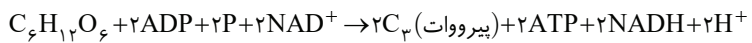
این نوع تنفس در برخی باکتری‌ها مثل باکتری تولید محصولات لبنی یا مواد غذایی مثل خیارشور یا برخی قارچ‌ها (قارچ مخمر نان) و یا حتی در ماهیچه اسکلتی انسان و برخی گیاهان در شرایط کمبود اکسیژن رخ می‌دهد. همه مراحل این نوع تنفس در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم صورت گرفته و دارای واکنش‌هایی است که بدون نیاز به اکسیژن رخ می‌دهد. این تنفس قادر است از اکسایش یک مولکول گلوکز فقط دو مولکول ATP تولید کند. بقیه انرژی مولکول گلوکز در مواد آلی تولید شده در انتهای واکنش‌ها ذخیره می‌شود.

این تنفس نیز در مرحله اول خود واکنش‌های گلیکولیز یا قندکافت دارد ولی برخلاف واکنش‌های تنفس هوازی، ادامه واکنش‌های آن بدون نیاز به  $O_2$  و در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم طی می‌شوند که در گفتار آخر این فصل به‌طور مفصل آن‌ها را بررسی می‌کنیم.

### ● فرمول کلی تنفس بی‌هوازی (تخمیر)



- در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم و بدون نیاز به  $O_2$  در همه جانداران رخ می‌دهد.
  - ۲ATP به همراه  $2NADH$  و دو مولکول پیرووات ایجاد می‌کند.
  - در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسمی برخی یوکاریوت‌ها و برخی پروکاریوت‌ها رخ می‌دهد.
  - طی آن الکترون‌ها و پروتون‌های  $NADH$  به ماده آلی منتقل می‌شود.
  - در این مرحله ATP تولید نمی‌شود ولی دوباره‌سازی  $NAD^+$  رخ می‌دهد. (در ادامه توضیح می‌دهیم).
  - انواع الکلی و لاکتیکی دارد.
- بررسی کلی  
مراحل تخمیر  
(تنفس بی‌هوازی)



ادامه تنفس بی‌هوازی + گلیکولیز (قندکافت)

تخمیر در سیتوپلاسم

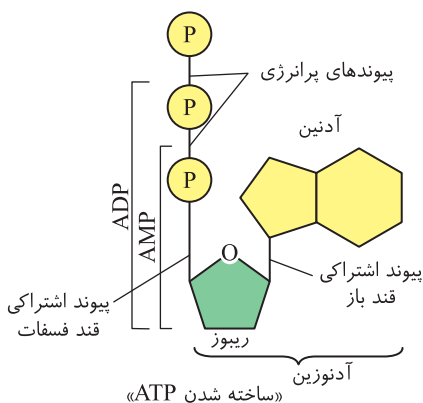
تمام واکنش‌های گفته شده و عوامل مورد نیاز را در ادامه بررسی می‌کنیم. در نگاه اول فقط قصد داشتیم یک نمای کلی از تنفس در ذهن شما شکل بگیرد.

## بررسی ساختمان ATP

ATP انرژی‌زا، نوکلئوتیدی آزاد سه فسفات با قند ریبوز به نام کلی آدنوزین تری فسفات می‌باشد که به عنوان انرژی زیستی رایج و قابل استفاده یاخته برای اغلب واکنش‌های انرژی‌خواه یاخته‌ای می‌باشد. وجود این مولکول که در واکنش‌های تنفس یاخته‌ای ایجاد می‌شود، سبب فعالیت جاندار می‌شود و به جاندار قدرت حفظ ویژگی‌هایی مثل رشد و نمو و تولیدمثل می‌دهد. در حقیقت هیچ جاندار بدون وجود ATP، زنده نمی‌ماند و در حقیقت پس از مدتی، جاندار مورد نظر، دیگر «جان» ندارد.

**نکته:** ATP با قند دوکسی‌ریبوز نیز در یاخته به صورت آزاد وجود دارد ولی از این مولکول فقط برای همانندسازی دنا استفاده می‌شود و مصرف انرژی‌زایی ندارد.

## اجزای ATP



۱) قند پنتوز: قندی با یک حلقه ۵ ضلعی از نوع ریبوز می‌باشد که در نوکلئوتیدهای مورد نیاز در ساخت رنا (RNA) نیز وجود دارد. این قند با پیوندهای اشتراکی (آپوالانج) از یک طرف به باز آلی آدنین متصل می‌شود و مجموعاً مولکول آدنوزین را تشکیل می‌دهند. قند ریبوز از سمت دیگر خود به زنجیره‌ای شامل سه گروه فسفات متصل می‌باشد.

۲) باز آلی آدنین: از نوع پورین‌های دو حلقه‌ای نیتروژن دار می‌باشد که به همراه قند ریبوز سبب ایجاد مولکول آدنوزین می‌شود. (حلقه آلج ۵ و ۶ ضلعی دارد که از حلقه ۵ ضلعی خود با قند ریبوز پیوند اشتراکی دارد).

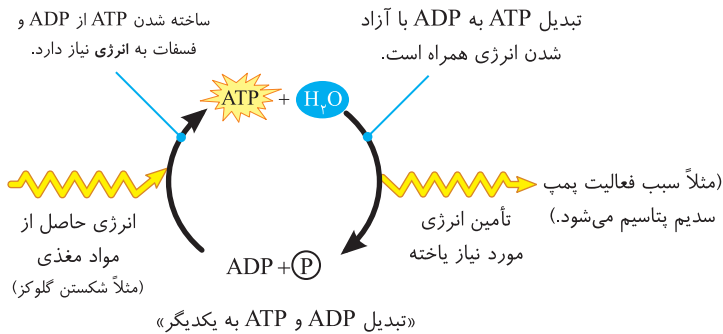
۳) گروه‌های فسفات: سه گروه فسفات متصل به هم، از یک سمت به قند ریبوز ATP متصل می‌شوند. بین فسفات‌ها پیوندهای پرانرژی اشتراکی وجود دارد که با شکستن هر کدام از آن‌ها انرژی مورد نیاز فعالیت‌های زیستی جانداران تأمین می‌شود.

## نکته

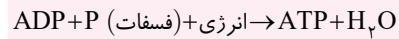
اضافه شدن سه گروه فسفات به آدنوزین، طی سه مرحله صورت می‌گیرد. ابتدا با صرف انرژی و اضافه شدن یک فسفات و تشکیل پیوند کم‌انرژی‌تر، مولکول AMP ایجاد می‌شود، سپس با اضافه شدن هر فسفات و ایجاد پیوند پرانرژی بین فسفات، به ترتیب ابتدا ADP و سپس ATP ایجاد می‌شود.

## تولید و تجزیه ATP در یاخته

### ۱) تبدیل ATP و ADP به همدیگر

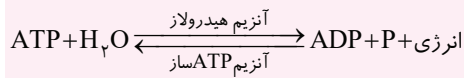


به‌طور معمول واکنش‌های تولید و تجزیه ATP، از طریق ADP صورت می‌گیرد. تولید ATP مانند تولید هر ماده آلی زیستی، واکنشی انرژی‌خواه می‌باشد، یعنی برای ایجاد ATP، ابتدا یک گروه فسفات با پیوند پرانرژی و همراه با واکنش‌های آنزیمی سنتز آبدی به ADP (آنزیم *ATP سنتز*) اضافه می‌شود.

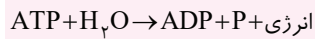


### نکته

انرژی لازم برای تبدیل ADP به ATP، از تجزیه مواد مغذی مثل گلوکز و... حاصل می‌شود.



در موقع نیاز به مصرف انرژی، به‌طور معمول یاخته طی واکنش‌های انرژی‌زایی، همراه با آنزیم‌های هیدرولیزکننده آب، با شکستن پیوند پرانرژی بین فسفات‌ها، ATP را به ADP تبدیل می‌کند.



### درون یاخته، برای تولید ATP از ADP می‌توان به قسمت‌های زیر اشاره کرد: (بر ادامه همه آن‌ها را می‌خوانیم!)

الف) درون ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم، در واکنش‌های مرحله آخر گلیکولیزی (*تندکافت*)

ب) درون بستره راکیزه در واکنش‌های چرخه کربس

ج) در بستره راکیزه توسط آنزیم ATP ساز بعد از عمل واکنش‌های زنجیره انتقال الکترون (*تولید ATP آب‌یخ*)

د) در بستره تیلاکوئیدهای سبز دیسکه‌ها در واکنش‌های *نوری* فتوسنتز (*تولید ATP نوری*)

ه) در تأمین انرژی ماهیچه‌ها از طریق کراتین فسفات ( $CP + ADP \rightarrow C + ATP$ ) کراتین فسفات

و) در مجاورت سر میوزین تارچه‌های ماهیچه‌ای در حال استراحت

### نکته

به‌طور معمول، تقریباً در هر قسمتی از یاخته که *فعالیت‌های زیستی* انرژی‌خواه انجام می‌شود، نیاز به هیدرولیز یا تجزیه ATP وجود دارد. به‌طور مثال عمل پمپ سدیم پتاسیم، انتقال فعال مواد برای جذب در لوله گوارش و قسمت اعظمی از فرایند بازجذب و ترشح در کلیه‌ها، واکنش‌های شروع انقباض ماهیچه‌ای برای اتصال سر میوزین به اکتین و... محتاج مصرف ATP می‌باشند.

### ۲) تبدیل ATP به AMP

در مقدار کمی از واکنش‌های زیستی، ATP با از دست دادن دو گروه فسفات و آزاد کردن انرژی بیشتر، به AMP تبدیل می‌شود. مثلاً برخی هورمون‌های پلی‌پپتیدی در مکانیسم اثر خود نیازمند ایجاد AMP از ATP می‌باشند که البته در کتاب درسی شما این مطلب وجود ندارد.

فقط اطلاع داشته باشید که یاخته همواره گول انرژی بیشتر را نمی‌خورد. مثلاً واکنش تبدیل ATP به AMP، سبب تولید انرژی بیشتری برای یاخته می‌شود ولی چون این واکنش یک‌طرفه بوده و ATP اولیه دوباره‌سازی نمی‌شود، این واکنش به‌طور معمول صورت نمی‌گیرد و برای یاخته مقرون به صرفه نمی‌باشد.

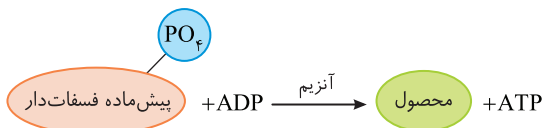
## روش‌های ساخته شدن ATP در واکنش‌های سوخت‌وسازی درون یاخته

الف) تولید ATP در سطح پیش‌ماده

ب) تولید ATP به کمک زنجیره انتقال الکترون - ATP اکسایشی تنفس هوازی

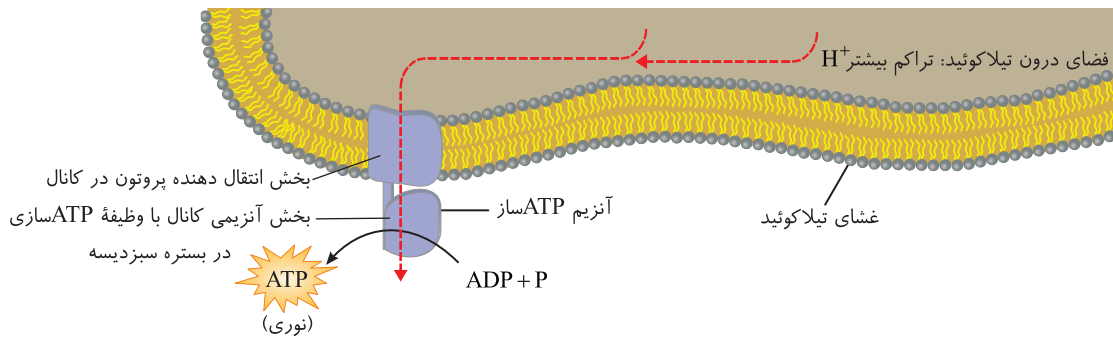
### الف) تولید ATP در سطح پیش‌ماده

در این روش، ابتدا از یک پیش‌ماده فسفات‌دار، گروه فسفات آن جدا می‌شود و سپس با اتصال گروه فسفات به ADP، مولکول ATP تولید می‌شود که به آن **تولید ATP در سطح پیش‌ماده** گفته می‌شود. برای تولید این مدل ATP سازی، نیازی به انتقال الکترون و واکنش‌های دیگری نمی‌باشد.



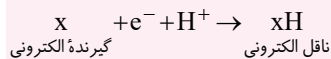


در اینجا فقط در خاطر داشته باشید که چون انرژی الکترون‌های فتوسنتزی در اصل از نور خورشید تأمین می‌شود، به این مولکول، ATP نوری گفته می‌شود.



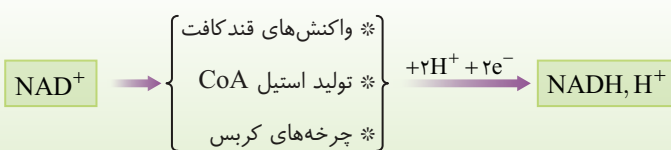
## مولکول‌های آلی گیرنده و ناقل الکترون در واکنش‌های تنفس یاخته‌ای

در تنفس یاخته‌ای، به تدریج باید پیوندهای کربن - هیدروژن در مولکول گلوکز و سپس در مولکول‌های حاصل از تجزیه آن (مثل پیروات یا استیل) شکسته شوند. در اثر شکسته شدن پیوند کووالانسی بین کربن و هیدروژن، مقداری الکترون به همراه پروتون ( $H^+$ ) آزاد می‌شود. این الکترون‌ها پرانرژی هستند که در حقیقت انرژی پیوند کربن - هیدروژن را در خود ذخیره کرده‌اند. این انرژی الکترون‌ها نباید به هدر برود و در نهایت باید در مولکول ATP ذخیره شود تا یاخته در موقع نیاز از آن استفاده کند. به همین دلیل درون یاخته‌ها انواعی از گیرنده‌های الکترون و پروتون وجود دارند که وظیفه جمع کردن این الکترون‌های پرانرژی را دارند و سپس با آزاد کردن آن‌ها به تولید ATP اکسایشی کمک می‌کنند. در ادامه به بررسی این مولکول‌ها می‌پردازیم. (هرگز نرسد الکترون، بعد از جذب الکترون‌ها به عنوان ناقل الکترون عمل می‌کند).



### الف) گیرنده الکترونی $NAD^+$ و ناقل الکترونی $NADH, H^+$

$NAD^+$ ، یونی آلی با ماهیت دی‌نوکلئوتیدی در یاخته به نام «نیکوتین آمید آدنین دی‌نوکلئوتید» بوده که قابلیت کاهش یا احیاء شدن با گرفتن یک الکترون دارد (چون یک بر شبت رار). این مولکول در واکنش‌های بی‌هوازی قند کافت در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم و واکنش‌های هوازی درون راکیزه، الکترون‌ها و پروتون‌های آزاد شده را گرفته و در نهایت به صورت  $NADH + H^+$  درمی‌آید. به مولکول  $NADH$ ، ناقل الکترون و پروتون گفته می‌شود. همواره به ازای تولید هر مولکول  $NADH$  یک یون پروتون ( $H^+$ ) نیز ایجاد می‌شود. در حقیقت هر  $NADH$ ، حاوی دو الکترون و یک پروتون می‌باشد.

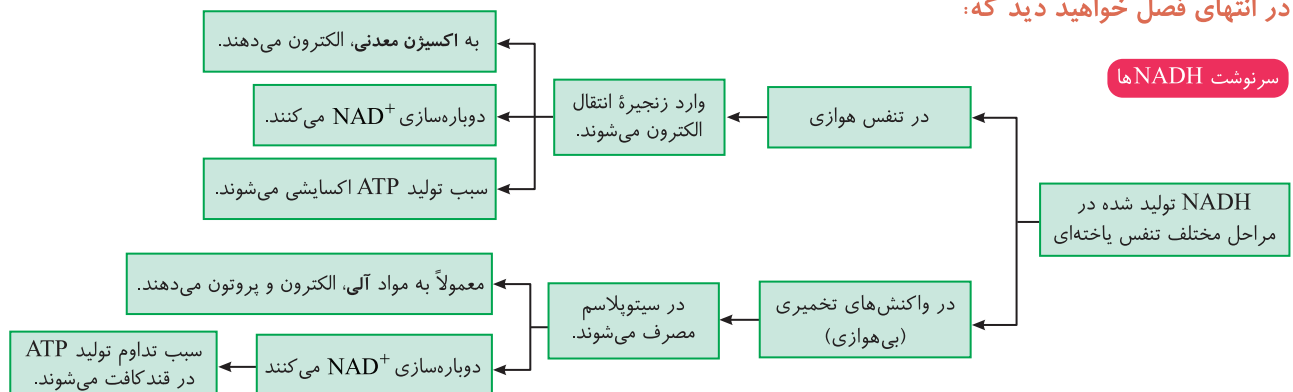


$NAD^+$  یک الکترون را به صورت مستقیم می‌گیرد و یک الکترون و یک پروتون را نیز به صورت اتم هیدروژن می‌پذیرد تا به  $NADH$  تبدیل شود و به همراه یک پروتون به صورت  $NADH, H^+$  در یاخته منتقل می‌شود.

### مقصد $NADH$ ‌های ناقل الکترون پرانرژی کجاست؟

در انتهای فصل تنفس یاخته‌ای، ملاحظه خواهید کرد که مولکول‌های  $NADH$ ، در تنفس هوازی در نهایت وارد زنجیره انتقال الکترون برای آزادسازی انرژی الکترون‌ها و کمک به ساخت ATP اکسایشی می‌شوند که طی این واکنش‌ها دوباره سازی  $NAD^+$  برای تنفس‌های بعدی انجام می‌شود.

### در انتهای فصل خواهید دید که:

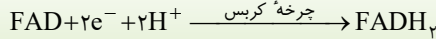


● (ب) گیرنده الکترونی FAD و ناقل الکترونی FADH<sub>۲</sub>

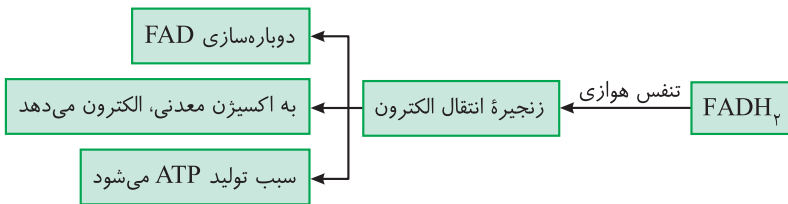
ماده آلی دیگری به عنوان گیرنده الکترون درون یاخته‌های دارای **تنفس هوازی** با ماهیت دی‌نوکلئوتیدی به نام فلاوین آدنین دی‌نوکلئوتید (FAD) وجود دارد. FAD برخلاف NAD<sup>+</sup> **فاقد بار الکتریکی** می‌باشد و با گرفتن دو الکترون و دو پروتون در مرحله‌ای از واکنش‌های چرخه کربس به صورت FADH<sub>۲</sub> درمی‌آید. (این عمل در **بستره** یا **بخش درونی** راکتورهای پروکاریوت‌ها و سیتوپلازم پروکاریوت‌های هوازی رخ می‌دهد).

## نکته

FADH<sub>۲</sub> برخلاف NADH به همراه خود یک یون پروتون (H<sup>+</sup>) حمل نمی‌کند.

◀ مقصد FADH<sub>۲</sub> های ناقل الکترون پراثری کجاست؟

در انتهای تنفس یاخته‌ای هوازی ملاحظه خواهید کرد که FADH<sub>۲</sub> یک مولکول **ناقل الکترون‌های پراثری** و پروتون‌ها می‌باشد که وارد **زنجیره انتقال الکترون** در تنفس **هوازی** شده تا در غشای درونی راکتور ضمن دوباره‌سازی FAD، سبب تولید ATP در کانال آنزیمی ATP‌ساز در سمت بستره راکتور می‌شود.

● **کلی نکات مهم برای بررسی تست‌ها**

- اگر NAD<sup>+</sup> و FAD در پایان انواع تنفس یاخته‌ای، دوباره‌سازی نشوند، پس از مدتی با فقدان یا کاهش این مواد، ادامه واکنش‌های تنفس یاخته‌ای بعدی با مشکل روبه‌رو می‌شود و ATP‌سازی در بدن کم می‌شود تا جاندار به سمت نابودی برود. (خلاصه در **سیتم‌های زیستی**، همه چیز روبروئه آلم باشد، داستان زندگی هم خوب پیش می‌ره!!)
- لازم به یادآوری است، همان‌طور که در شیمی خوانده‌اید، در واکنش‌های شیمیایی، هر ماده‌ای که الکترون بگیرد، کاهش یافته است یا احیا شده است (مثل NAD<sup>+</sup> و FAD) و هر ماده‌ای که اکسیژن بگیرد یا الکترون از دست بدهد را افزایش یافته یا اکسایش یافته می‌گویند (مثل NADH در تبدیل به NAD<sup>+</sup> یا اکسایش FADH<sub>۲</sub> در تبدیل به FAD).
- گیرنده‌های الکترونی مختلف پس از کسب الکترون، کاهش می‌یابند ولی ناقلین الکترون، با از دست دادن الکترون‌ها، اکسایش می‌یابند.
- کربوهیدرات‌ها یا قندها، مولکول‌هایی دارای کربن، هیدروژن و اکسیژن هستند که مونوساکاریدهای آن و به خصوص **گلوکز** به عنوان **منبع اصلی** سوخت بدن جانداران می‌باشد. گلوکز مانند هر کربوهیدرات دیگری دارای پیوندهای کربن-هیدروژن پراثری می‌باشد که در هنگام تنفس یاخته‌ای نقش انرژی‌زایی بسیار مهمی دارند. از مونوساکاریدهای دیگر می‌توان به فروکتوز و گالاکتوز اشاره کرد.
- از زیست دهم به یاد دارید که دی‌ساکاریدهایی مانند مالتوز (قند جوانه جو گندم)، لاکتوز (قند شیر) و ساکارز (قند و شکر معمولی) نیز وجود دارند که باید تحت تأثیر آنزیم‌های آزاد شده از **دیواره روده باریک** (مانند **لاکتاز** یا **ساکراز**) به مونوساکارید تبدیل شوند تا در انرژی‌زایی از آن‌ها استفاده شود.
- پلی‌ساکاریدها یا نقش **ذخیره انرژی** یا **ساختاری** دارند. برخی مثل **نشاسته**، قند **ذخیره‌ای** در **گیاهان** می‌باشد. **گلیکوژن**، قند **ذخیره‌ای** در یاخته‌های **کبد و ماهیچه‌ای جانوران** است. پلی‌ساکاریدهای ساختاری مثل **سلولز** یا **کتین** نیز وجود دارند که سلولز در ساختار دیواره یاخته‌ای و کیتین در دیواره قارچ‌ها و اسکلت خارجی حشرات وجود دارند.
- مونوساکاریدها با اتصال به هم و از طریق پیوند کووالانسی (اشتراک) سبب تولید دی‌ساکارید و پلی‌ساکارید با واکنش‌های سنتز آبدی می‌شوند (زیست دهم) ولی در واکنش‌های مورد نیاز برای تأمین انرژی، ابتدا با هیدرولیز، مونوساکاریدهایی مثل گلوکز ایجاد می‌شوند و سپس در واکنش‌های تنفس یاخته‌ای با تجزیه یا اکسایش گلوکز، مقداری ATP حاصل می‌شود.

- تست ۱** شکستن پیوند میان دو مولکول گلوکز و شکستن پیوندهای موجود در یک مولکول گلوکز به ترتیب در ..... یک فرد سالم انجام می‌گیرد.
- ۱) روده و تمام یاخته‌های فعال (۲) روده و منحصرأ در کبد (۳) کبد و منحصرأ در روده (۴) تمام یاخته‌ها و منحصرأ در روده
- پاسخ ۱** نکته: هیدرولیز مالتوز یا نشاسته که پیوند بین گلوکزها را می‌شکند در روده توسط آنزیم‌های هیدرولاز صورت می‌گیرد ولی شکستن خود گلوکز طی تنفس یاخته‌ای در همه یاخته‌های زنده بدن صورت می‌گیرد.

## زیستن با اکسیژن

بررسی واکنش‌های تنفس یاخته‌ای هوازی (واکنش‌های محتاج O<sub>۲</sub>)

با اینکه چند بار در قسمت‌های قبل گفتیم که هر نوع تنفس یاخته‌ای چه با مصرف اکسیژن و چه بدون مصرف اکسیژن، **مرحله اول** آن به نام قندکافت و به صورت بی‌هوازی یعنی بدون نیاز به اکسیژن صورت می‌گیرد ولی در اغلب موارد واژه تنفس یاخته‌ای را برای تنفس هوازی به کار می‌برند. **از اینجا تا آخر این گفتار نیز ما به بررسی تنفس یاخته‌ای همراه با مصرف اکسیژن یعنی تنفس یاخته‌ای هوازی می‌پردازیم.**





تنفس یاخته‌ای هوازی دو مرحله دارد که مرحله اول آن قند کافت (گلیکولیز) به معنی تجزیه گلوکز می‌باشد. واکنش‌های این مرحله نیازی به اکسیژن ندارند ولی مرحله دوم تنفس که در راکتور یوکاریوت‌ها صورت می‌گیرد و بخش هوازی این تنفس می‌باشد، وابسته به حضور اکسیژن و برای تولید ATP بیشتر می‌باشد.

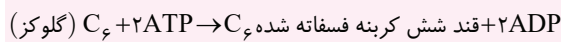
### قند کافت (گلیکولیز)

قند کافت به معنی تجزیه گلوکز، اولین مرحله هر نوع تنفس یاخته‌ای می‌باشد. این مرحله نیازی به  $O_2$  ندارد و در همه جانداران و هر نوع تنفس یاخته‌ای، درون ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم در چهار مرحله به صورت زنجیره‌وار انجام می‌گیرد. طی واکنش‌های قند کافت، گلوکز تجزیه شده و در نهایت دو مولکول سه کربنه به نام پیرووات (بنیان اسید پیروویک)، دو مولکول ATP و دو مولکول  $NADH, H^+$  تولید می‌شود. تمام چهار مرحله این واکنش‌ها در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم پروکاریوت‌ها و یوکاریوت‌های هوازی و بی‌هوازی صورت می‌گیرد. این واکنش‌ها نشان می‌دهند که هر یاخته‌ای، بدون استفاده از اکسیژن نیز می‌تواند ضمن تجزیه گلوکز، مقدار کمی ATP در سطح پیش‌ماده بسازد.

### بررسی مرحله به مرحله واکنش‌های قند کافت

#### مرحله اول (فسفات‌شدن گلوکز)

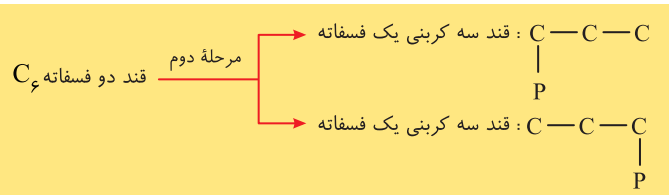
همان‌طور که در فصل اول گفتیم، هر واکنشی برای شروع، نیاز به انرژی فعال‌سازی دارد. در قند کافت نیز برای تجزیه گلوکز و بالا بردن سطح انرژی آن، نیاز به تجزیه دو مولکول ATP می‌باشد. در حقیقت این دو مولکول ATP با هیدرولیز شدن و تبدیل شدن به ADP، دو مولکول فسفات به همراه مقدار زیادی انرژی به گلوکز می‌دهند و آن را به قند فروکتوز دو فسفات یا قند فسفات‌شده تبدیل می‌کنند. این ماده بسیار پرانرژی و ناپایدار می‌باشد و در حقیقت پرانرژی‌ترین ماده واکنش‌های تنفس یاخته‌ای می‌باشد.



### نکته

مرحله اول قند کافت تنها مرحله انرژی‌خواه واکنش‌های تنفس یاخته‌ای می‌باشد.

#### مرحله دوم (تجزیه قند شش کربنی دو فسفات به دو مولکول قندی سه کربنه یک فسفات)



در این مرحله قند فسفات‌شده پرانرژی که مولکولی ناپایدار است، از وسط نصف می‌شود و به دو مولکول قندی سه کربنه یک فسفات تبدیل می‌شود که طی این عمل مقداری الکترون و پروتون در اثر شکستن پیوند آزاد می‌شود.

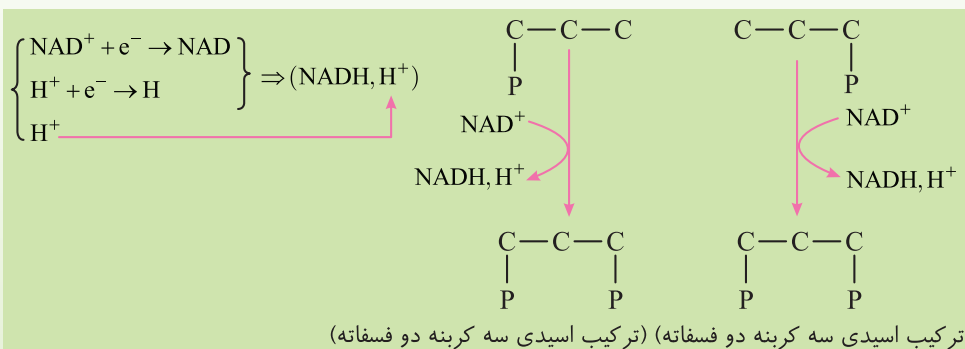
#### مرحله سوم (فسفات‌شدن قندهای سه کربنه)

در این مرحله هر مولکول قند سه کربنه یک فسفات، بدون اینکه ATP تجزیه شود، از فسفات‌های معدنی ذخیره‌ای یاخته، یک گروه فسفات دیگر می‌گیرند و به مولکول اسید سه کربنه دو فسفات تبدیل می‌شوند.

### چند نکته مهم در بررسی تست‌ها

① با اینکه در شکل کتاب عنوان شده است ولی در این مرحله دو مولکول  $NAD^+$ ، الکترون و پروتون‌های آزاد شده از مرحله قبلی را جمع می‌کنند و دو مولکول NADH و دو  $H^+$  نیز تولید می‌شود. (مرحله تولید NADH در کتاب درسی به‌طور دقیق در شکل کتاب عنوان شده است و ارزش نیز سؤال می‌شود. پس باید بدانید که در قند کافت  $NADH, H^+$  ایجاد می‌شود.)

②  $NAD^+$  اولین مولکول الکترون گیرنده در واکنش‌های تنفس یاخته‌ای می‌باشد.

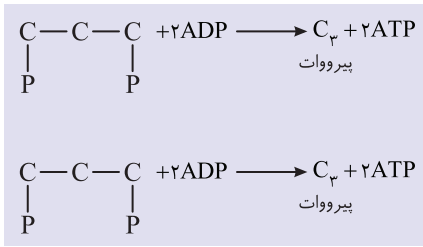


③ برای خنثی کردن  $NAD^+$ ، ابتدا یک الکترون به کار می‌رود و سپس یک  $H^+$  به یک الکترون متصل شده و به صورت اتم هیدروژن به NAD متصل می‌شود تا NADH شود. همواره به همراه NADH یک  $H^+$  نیز منتقل می‌شود ( $NADH, H^+$ ).

④ در قند کافت، طی مراحل اول و سوم، عمل فسفات‌شدن قند صورت می‌گیرد. در مرحله اول، فسفات‌های لازم از هیدرولیز ATP به دست می‌آید ولی در مرحله سوم، فسفات‌های لازم از گروه‌های فسفات معدنی به دست می‌آید.

مرحله چهارم (آخر) (تولید پیرووات و انرژی زایی با تولید ۴ATP)

در این مرحله طی واکنش‌های آنزیمی، گروه‌های فسفات از مولکول‌های اسید سه کربنه دو فسفات جدا شده و به مولکول‌های ADP متصل می‌شوند. سپس در ادامه طی واکنش‌های **سنتز آبدهی**، چهار مولکول ATP در **سطح پیش‌ماده** به همراه دو مولکول سه کربنه پیرووات (بنیان پیرووات اسید) تولید می‌شود.

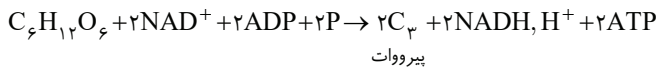


چند نکته مهم در بررسی تست‌ها

- ۱) قندکافت واکنش‌هایی برای اکسایش گلوکز می‌باشد. بازده قندکافت به ازای اکسایش یک مولکول گلوکز، محصولاتی شامل دو پیرووات (۲C<sub>3</sub>)، دو مولکول ATP و دو مولکول NADH, H<sup>+</sup> می‌باشد. البته دقت کنید که در مرحله چهارم قندکافت، همراه تولید دو مولکول پیرووات، چهار مولکول ATP ایجاد می‌شود ولی چون در مرحله اول دو مولکول ATP مصرف شده بود، بازده تجزیه گلوکز در کل مرحله قندکافت، **فقط دو مولکول ATP** می‌باشد که در همه جانداران هوازی و بی‌هوازی ایجاد می‌شود.
- ۲) در واکنش‌های قندکافت، **مولکول اکسیژن و CO<sub>2</sub>، نه تولید می‌شوند و نه مصرف می‌شوند** ولی مولکول‌های ATP و ADP، هم تولید و هم مصرف می‌شوند. (قندکافت مستقل از O<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> انجام می‌شود).
- ۳) مرحله اول قندکافت **انرژی‌خواه** می‌باشد که طی آن گلوکز به قند شش کربنه فسفات تبدیل می‌شود ولی مرحله آخر آن **انرژی‌زا** بوده که همراه با تولید ATP در سطح پیش‌ماده بوده و طی آن از مولکول‌های سه کربنه دو فسفات، مولکول سه کربنه پیرووات ایجاد می‌شود.
- ۴) در واکنش‌های قندکافتی، گلوکز اکسایش یافته و NAD<sup>+</sup>، کاهش یافته است یعنی گلوکز الکترون‌دهی و NAD<sup>+</sup> الکترون‌گیری کرده است.

پیش‌ماده‌ها و محصولات هر مرحله قندکافت

خلاصه واکنش قندکافت:



مراحل قندکافت	پیش‌ماده‌ها	محصولات	شکل
اول	گلوکز + ۲ATP	قند فروکتوز دو فسفات + ۲ADP	گلوکز اول ATP ADP P
دوم	قند فروکتوز دو فسفات	دو تا قند سه کربنه یک فسفات	قند دو فسفات دوم P C C C P
سوم	دو تا قند سه کربنه یک فسفات + دو مولکول فسفات آزاد + ۲NAD <sup>+</sup>	دو مولکول اسید سه کربنه + دو فسفات + ۲NADH, ۲H <sup>+</sup>	قند سه فسفات سوم NADH, H <sup>+</sup> P P اسید دو فسفات P P
چهارم	دو تا مولکول اسید سه کربنه دو فسفات + چهار تا ADP	دو تا پیرووات سه کربنه بدون فسفات + چهار تا ATP (در سطح پیش‌ماده)	پیرووات پیرووات + ۲ATP پیرووات + ۲ATP

**تست ۲** در مرحله انرژی‌خواه قندکافت، کدام واکنش زیر صورت می‌گیرد؟

- (۱) تبدیل دو نوع قند شش کربنه به همدیگر  
 (۲) سنتز آبدی نوعی ماده نوکلئوتیدی  
 (۳) تبدیل ترکیب سه کربنه دو فسفات به پیرووات  
 (۴) تبدیل قند سه کربنه به ترکیب سه کربنی دو فسفات
- مرحله اول قندکافت تنها مرحله انرژی‌خواه تنفس یاخته‌ای است که در طی آن برای تجزیه گلوکز، ابتدا دو تا ATP مصرف شده و انرژی آن صرف تولید قند شش کربنه دو فسفات می‌شود. در مرحله آخر قندکافت، ماده سه کربنه به پیرووات تبدیل می‌شود که انرژی‌زا با تولید چهار ATP می‌باشد. دقت کنید که گزینه (۲) مربوط به تولید ATP و سنتز آبدی می‌باشد ولی در سؤال مرحله انرژی‌خواه را مد نظر قرار داده است که تولید ADP از هیدرولیز ATP صورت می‌گیرد.

**پاسخ ۱**

**تست ۳**

- (۱) یک - ATP (۲) دو - ATP (۳) یک -  $NADH, H^+$  (۴) دو -  $NADH, H^+$
- مرحله آخر قندکافت دو واکنش دارد، یکی تولید ATP در سطح پیش‌ماده و دیگری تولید پیرووات از ماده سه کربنی دو فسفات؛ هر ماده شروع کننده این مرحله در حقیقت یک ترکیب سه کربنی دو فسفات می‌باشد که طی تبدیل به پیرووات، دو مولکول ATP از آن ایجاد می‌شود.

**پاسخ ۲**

**تست ۴**

- در مورد پیش‌ماده‌ای که تأمین کننده فسفات برای تولید ATP در قندکافت می‌باشد، چند مورد زیر نادرست می‌باشد؟
- (الف) از تجزیه یک قند شش کربنی حاصل شده است.  
 (ب) در اثر فسفات شدن یک قند ایجاد شده است.  
 (ج) حاوی دو فسفات است که فقط یکی از آن‌ها از نوعی نوکلئوتید تأمین شده است.  
 (د) هرکدام آن در تولید دو مولکول ATP اکسایشی نقش دارد.

- (۱) ۲ مورد (۲) ۳ مورد (۳) ۱ مورد (۴) ۴ مورد

**پاسخ ۱**

موارد (الف) و (ر) نادرست می‌باشند.  
 منظور این سؤال ترکیب سه کربنی دو فسفات می‌باشد که در مرحله آخر قندکافت به عنوان یک پیش‌ماده فسفات دار سبب تولید دو مولکول ATP از هر مولکول آن می‌شود.

**تله‌های تستی** الف) نادرست است. از تجزیه قند شش کربنی دو فسفات، ابتدا قندهای سه کربنی یک فسفات ایجاد می‌شوند و در مرحله بعد به ماده مورد نظر یعنی ترکیب سه کربنی دو فسفات تبدیل می‌شود. / ب) درست است. در مرحله سوم قندکافت، قند سه کربنی دو فسفات با گرفتن یک فسفات به ترکیب دو فسفات مورد نظر تبدیل می‌شود. / ج) درست است. در ترکیب سه کربنی دو فسفات، یک فسفات در مرحله اول قندکافت از ATP گرفته است و یک فسفات را نیز از منابع فسفاتی آزاد درون یاخته دارد. / د) نادرست است. ATP‌های تولید شده در قندکافت از نوع پیش‌ماده‌ای می‌باشد.

**تست ۵**

- هر مولکول کربن دار اصلی شروع کننده واکنش‌های مراحل مختلف قندکافت، اگر ..... باشند، قطعاً .....
- (۱) فاقد گروه فسفات - به دو ماده سه کربنی تبدیل می‌شود.  
 (۲) حاوی دو گروه فسفات - به نوعی مولکول سه کربنه تبدیل می‌شوند.  
 (۳) فقط حاوی یک گروه فسفات - با تولید ATP به پیرووات تبدیل می‌شوند.  
 (۴) فسفات شده - همراه با تولید ADP ایجاد شده‌اند.

**پاسخ ۲**

در مسیر قندکافت دو ماده حاوی دو گروه فسفات وجود دارد. یکی قند شش کربنه دو فسفات و دیگری ترکیب سه کربنی دو فسفات می‌باشد. قند شش کربنی دو فسفات در مرحله دوم قندکافت از وسط نصف شده تا به قند سه کربنی تبدیل شود و ترکیب سه کربنی دو فسفات نیز در مرحله آخر قندکافت به ماده سه کربنی پیرووات تبدیل می‌شود.

**تله‌های تستی** گزینه (۱): گلوکز اولیه تنها مولکول شروع کننده مراحل قندکافت می‌باشد که فاقد گروه فسفات است. طی قندکافت، گلوکز به قند دوفسفات تبدیل می‌شود. / گزینه (۳): در مراحل قندکافت، قند سه کربنی دو فسفات با گرفتن یک فسفات دیگر به ترکیب سه کربنی دو فسفات تبدیل می‌شود و سپس در مرحله بعدی ATP و پیرووات ایجاد می‌شود. / گزینه (۴): فقط ماده شش کربنی مرحله اول در اثر تجزیه ATP، فسفات شده است ولی در مرحله سوم فسفات شدن از گروه‌های فسفات آزاد استفاده می‌کند.

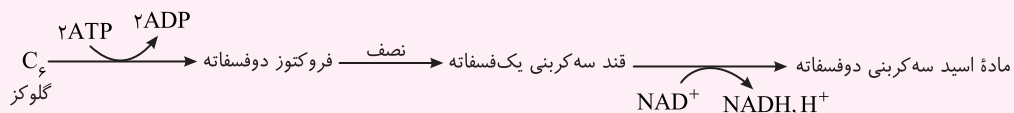
**تست ۶**

در هر یاخته ماهیچه‌ای انسان، طی اولین مرحله تنفس یاخته‌ای، به هنگام مصرف یک مولکول گلوکز و به منظور تولید هر ترکیب سه کربنی غیرقندی دوفسفات به ترتیب از راست به چپ کدام تولید و مصرف می‌شود؟

- (۱)  $NADH, 2ADP$  (۲)  $2NAD^+, 2ADP$  (۳)  $2ATP, 1NADH$  (۴)  $2NAD^+, 2ATP$

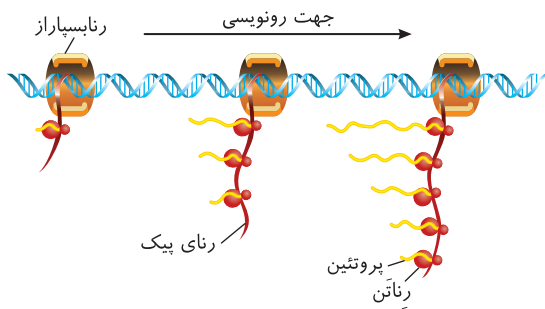
در این تست دقت کنید که بخشی از قندکافت مدنظر بوده است که از گلوکز تا تشکیل یک مولکول اسید سه کربنی دوفسفات می‌باشد. طی این قسمت‌ها دو ATP و یک  $NAD^+$  مصرف می‌شود و دو مولکول ADP و یک  $NADH$  به همراه یک پروتون ( $H^+$ ) ایجاد می‌شود.

**پاسخ ۳**



دقت کنید که فقط تولید یک ماده سه کربنی دوفسفات را خواسته است.

### ساختمان راکیزه (میتو کندری)



«طرحی ساده از رناتن‌هایی که چند رنا در حال رونویسی را ترجمه می‌کنند.»

راکیزه اندامکی دوغشایی در یوکاریوت‌ها می‌باشد که مسئول تبدیل نوعی انرژی شیمیایی به نوع دیگر (از گلوکز به ATP) می‌باشد. در این اندامک واکنش‌های **هوازی** یا محتاج به اکسیژن تنفس یاخته‌ای صورت می‌گیرند و انرژی موجود در پیوند درون مواد غذایی در ATP ذخیره می‌شود. در طی تکامل منشأ این اندامک از باکتری‌های هوازی بوده است، به همین دلیل همانند آن‌ها، DNA حلقوی بدون نوکلئوزوم و فشردگی، **رناتن‌های مخصوص** و تقسیم دوتا شدن دارد. قسمت‌های مختلف راکیزه به همراه برخی فعالیت‌های آن را در ادامه مشاهده می‌کنید.

### چند نکته مهم در بررسی تست‌ها

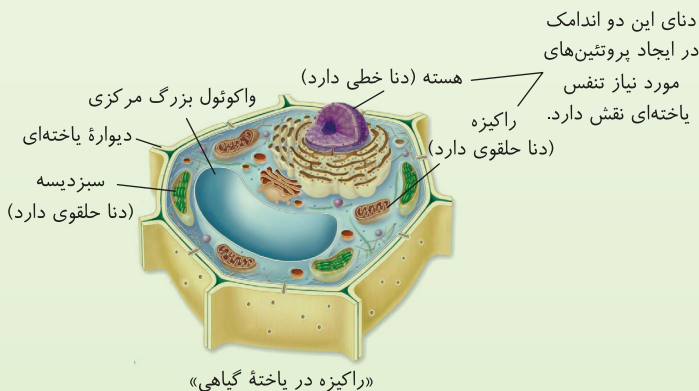
- ① تقسیم راکیزه در درون یاخته همانند باکتری‌ها به صورت دو تا شدن می‌باشد. در این نوع تقسیم، چرخه میتوزی وجود ندارد و تکثیر این اندامک همانند سبزدیسه می‌تواند همراه با تقسیم هسته و یا مستقل از آن صورت گیرد. (البته بیشترین مقدار تکثیر را آب‌رگ‌ها و سبزی‌ها در مرحله  $G_1$  از ایشراختر می‌توانند صورت بگیرد).
- ② درون راکیزه و سبزدیسه نیز همانند پروکاریوت‌ها، می‌توان انجام هم‌زمان فرایند رونویسی برای تولید mRNA و ترجمه برای تولید پروتئین را توسط ریبوزوم‌های متعددی مشاهده کرد.

- ③ اجزای راکیزه
  - دو غشا دارد
    - در تماس می‌باشد.
    - غشای داخلی به سمت **درون** اندامک چین خوردگی دارد
  - فضای بیرونی
    - مملو از  $H^+$  بوده و شیب غلظت  $H^+$  به سمت بخش درونی دارد.
    - محاصره شده توسط غشای درونی راکیزه می‌باشد.
  - بخش داخلی
    - محل واکنش‌های **هوازی** تنفس یاخته‌ای می‌باشد.
    - حاوی DNA حلقوی بدون نوکلئوزوم، هیستون و فشردگی می‌باشد.
    - رناتن مخصوص به خود با عمل ترجمه یا پروتئین‌سازی دارد.
    - **انواعی** از پروتئین‌های تنفس یاخته‌ای توسط ژنوم راکیزه رهبری می‌شوند.
    - راکیزه هم همراه یاخته و هم مستقل از آن، برحسب نیاز یاخته تقسیم دو تا شدن انجام می‌دهد. (برحسب نیاز یاخته در هر زمان می‌تواند تقسیم شود).



$2 \mu m$  / «راکیزه و ترسیمی از آن»

(اندازه آن بیش از  $2$  میکرومتر است)



«راکیزه در یاخته گیاهی»

- ④ پروتئین‌ها و آنزیم‌های مورد نیاز تنفس یاخته‌ای، از روی تعدادی **ژن‌های** مختلف ساخته می‌شوند. مقداری از آن‌ها در ژنوم خطی هسته واقعند و در ریبوزوم‌های **سیتوپلاسمی** ترجمه می‌شوند ولی برخی نیز وابسته به ژن‌ها و ساخته شدن در ریبوزوم‌های راکیزه می‌باشند.
- ⑤ رمز تعدادی از ژن‌های مورد نیاز برای تنفس یاخته‌ای و محصولات پروتئینی آن‌ها در ژنوم حلقوی راکیزه وجود دارد و رنا آن‌ها نیز درون راکیزه رونویسی می‌شوند. ژن‌های مورد نیاز برای همانندسازی، رونویسی و ترجمه مقداری از عوامل تنفس یاخته‌ای نیز توسط ژنوم خطی هسته رمزگردانی می‌شود.

## تست ۷

چند مورد زیر درباره ساختار و اعمال راکیزه‌ها نادرست می‌باشد؟

- (الف) پروتئین‌های مورد نیاز این اندامک توسط ژنوم خطی و حلقوی رمزگردانی می‌شود.  
 (ب) این اندامک، دارای DNA مستقل از هسته و ریبوزوم مخصوص خود می‌باشد.  
 (ج) میتوز راکیزه‌ها، مستقل از چرخه یاخته‌ای بوده ولی می‌تواند هم‌زمان با آن نیز رخ دهد.

(۴) ۳ مورد

(۳) صفر مورد

(۲) ۱ مورد

(۱) ۲ مورد

فقط مورد (ج) نادرست می‌باشد.

## پاسخ ۲

**تله‌های تستی** (الف) درست است. ژن ساخت برخی پروتئین‌هایی که در تنفس یاخته‌ای به کار می‌روند، در دنای حلقوی راکیزه وجود دارد و در رناتن خاص این اندامک ترجمه می‌شوند ولی برخی دیگر از پروتئین‌های مورد نیاز فعالیت‌های راکیزه توسط DNA خطی هسته و ریبوزوم‌های سیتوپلاسمی تولید می‌شوند. / (ب) درست است. راکیزه‌ها دارای یک DNA حلقوی مستقل از ژنوم خطی هسته می‌باشند و رناتن‌های مخصوص به خود دارند. / (ج) نادرست است. میتوز ویژه هسته یاخته‌های یوکاریوتی می‌باشد و این نوع تقسیم را نمی‌توانیم برای تقسیم دو تا شدن که برای پروکاریوت‌ها، راکیزه یا سبز دیسه‌ها کاربرد دارد، استفاده کنیم. نکته: راکیزه‌ها و سبز دیسه‌ها، هم همراه با یاخته و هم مستقل از یاخته تقسیم می‌شوند.

## ادامه تنفس یاخته‌ای بعد از واکنش‌های قندکافت

همان‌طور که بارها گفتیم در همه جانداران و هر نوع تنفس یاخته‌ای، مرحله قندکافت اتفاق می‌افتد و بدون نیاز به اکسیژن، مقدار کمی ATP (برعرب) ایجاد می‌شود. پس از قندکافت، ادامه تنفس، بستگی به نوع یاخته و مقدار اکسیژن محیط دارد. اگر مقدار  $O_2$  محیط کافی باشد و یاخته مورد نظر نیز توانایی تنفس هوازی را داشته باشد، پیرووات‌ها با انتقال فعال و در حضور  $O_2$  کافی از ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم وارد راکیزه یوکاریوت‌ها می‌شوند. در این صورت ادامه واکنش‌ها به صورت هوازی و از اینجا به بعد به عنوان اکسایش پیرووات معرفی می‌شوند تا ATP بیشتری تولید کنند که در ادامه به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

## نکته

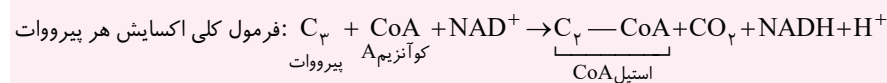
اگر مقدار  $O_2$  محیط کافی نباشد یا یاخته قدرت تنفس هوازی نداشته باشد (مثل گویچه قرمز یا تخم‌مرغ که راکیزه ندارد یا پروکاریوت‌های بی‌هوازی کواکاردی) در این صورت ادامه تنفس یاخته‌ای در همان ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم به صورت تخمیر ادامه می‌یابد که در این صورت ATP بیشتری تولید نمی‌شود (گفته سوم).

## بررسی مراحل بخش هوازی تنفس یاخته‌ای

در صورت وجود  $O_2$  کافی و دارا بودن عوامل مورد نیاز برای تنفس هوازی در یاخته، پیرووات‌های حاصل از قندکافت با مکانیسم انتقال فعال (به صرف انرژی) از ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم وارد راکیزه می‌شوند. در راکیزه اکسایش پیرووات‌ها تا مرحله نهایی تنفس به ترتیب طی سه مرحله به نام‌های اکسایش پیرووات (تولید استیل کوانزیم A)، اکسایش استیل‌ها (چرخه کربس) و زنجیره انتقال الکترون انجام می‌شود تا سبب تولید ATP بیشتری شوند که در ادامه به ترتیب آن‌ها را بررسی می‌کنیم.

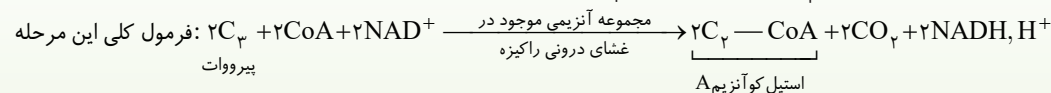
## ● اکسایش پیرووات تا تولید استیل کوانزیم A

واکنش‌های این مرحله در یوکاریوت‌ها توسط مجموعه آنزیم‌هایی انجام می‌شوند. طی این مرحله از هر مولکول پیرووات یک مولکول  $CO_2$  آزاد می‌شود که حاصل این کار تولید بنیان استیل به همراه دو عدد الکترون و دو عدد پروتون ( $H^+$ ) می‌باشد. این الکترون و پروتون‌ها را گیرنده‌ای به نام  $NAD^+$  جمع کرده و به صورت ناقل الکترونی  $NADH, H^+$  درمی‌آیند. سپس بنیان استیل به عامل کمک‌کننده آنزیمی به نام کوانزیم A متصل می‌شود تا به مولکول استیل کوانزیم A (استیل  $CoA$ ) تبدیل شود.



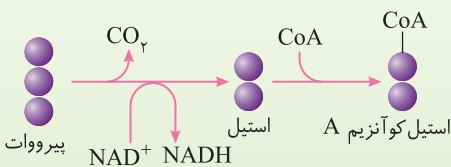
## چند نکته مهم در بررسی تست‌ها

① به دلیل اینکه در ابتدای قندکافت، یک مولکول گلوکز تجزیه شده است و در انتهای قندکافت دو مولکول پیرووات ایجاد می‌شود، پس به ازای تجزیه هر گلوکز، واکنش‌های اکسایش پیرووات و تولید استیل کوانزیم A نیز باید دو بار انجام شود.



② دقت کنید که برای اکسایش پیرووات به استیل کوانزیم A به یک مجموعه آنزیمی نیاز می‌باشد نه فقط یک آنزیم خاص!

③ مجموعه آنزیمی که سبب تبدیل پیرووات به گروه استیل و تولید استیل کوانزیم A می‌شود، برای فعالیت خود به ویتامین  $B_1$  (تیامین) محتاج است.



④ در شکل مقابل ملاحظه می‌کنید که در مرحله اکسایش پیرووات تا تولید استیل کوانزیم A، ابتدا تولید  $CO_2$  و ایجاد NADH صورت می‌گیرد و سپس استیل حاصل به کوانزیم A متصل شده که به صورت استیل کوانزیم A درمی‌آید.

⑤ با توجه به شکل کتاب می‌توان متوجه شد که مجموعه آنزیمی مورد نیاز برای اکسایش پیرووات در بخش درونی راکیزه قرار دارد و واکنش‌ها و جایگاه فعال آن‌ها نیز در بستره راکیزه انجام می‌شوند.

«اکسایش پیرووات و تشکیل استیل کوانزیم A»

نکته ترکیبی مهم با زیست دهم

تولید

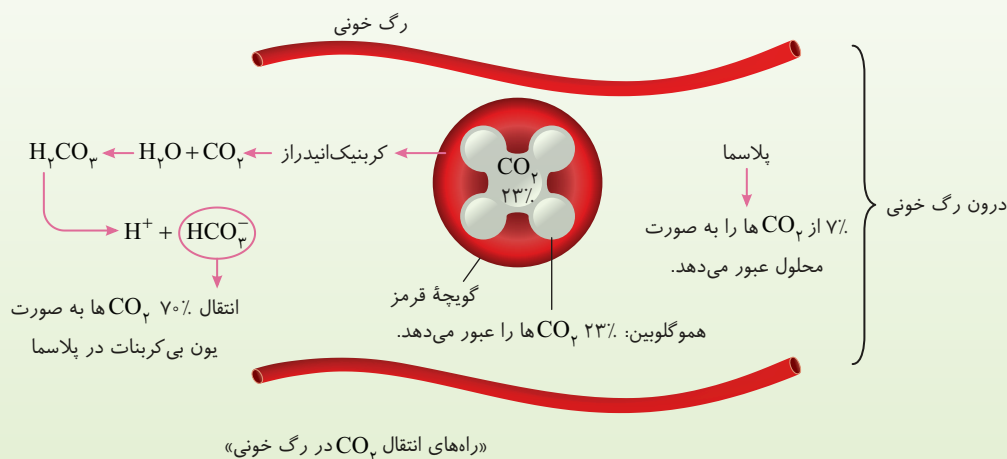
در تنفس یاخته‌ای هوازی، اولین مرحله‌ای که تولید  $CO_2$  در آن رخ می‌دهد همین مرحله تبدیل پیرووات به استیل می‌باشد. از زیست دهم به یاد دارید که  $CO_2$  های حاصل از تنفس یاخته‌ای باید از دو غشای راکیزه و یک غشای یاخته‌ای عبور کنند و از یاخته وارد محیط داخلی یا آب میان‌بافتی (آب سیلولار) شوند. سپس  $CO_2$  ها به دلیل محلول بودن در آب، با سرعت زیاد و انتشار ساده از غشای یاخته‌ها وارد پلاسما می‌شوند. حتماً به خاطر دارید که ۷۰٪  $CO_2$  های ورودی ابتدا در گویچه‌های قرمز خونی به کمک آنزیمی به نام **کربنیک‌انیدراز** با آب ترکیب شده و به اسید کربنیک ( $H_2CO_3$ ) تبدیل می‌شوند. سپس با تجزیه سریع این اسید، **بی‌کربنات و یون هیدروژن** ( $H^+$ ) ایجاد می‌شود. پس بیشترین مقدار (۷۰٪)  $CO_2$  حاصل از تنفس یاخته‌ای به صورت **یون بی‌کربنات** در خون منتقل می‌شود. مقداری دیگر (۲۳٪) از  $CO_2$  های ورودی به خون نیز باز هم وارد گویچه قرمز شده و با هموگلوبین به صورت برگشت‌پذیر ترکیب می‌شوند که به صورت  $HbCO_2$  در خون منتقل می‌شوند. باقی‌مانده (۷٪)  $CO_2$  های خون، به صورت **محلول در پلاسما** به سمت شش‌ها منتقل می‌شوند. در نهایت همه  $CO_2$  ها برای خروج از بدن به سوی شش‌ها رفته تا در مجاورت کیسه‌های هوایی از حالت محلول به صورت گازی تبدیل شوند و با بازدم از مجاری تنفسی خارج شوند.

نکته

گویچه‌های قرمز در انتقال بیش از ۹۰٪  $CO_2$  های خون نقش دارند ولی به‌طور مستقیم ۲۳٪ آن را با هموگلوبین منتقل می‌کند (۷۰٪ آن به کمک عمل آنزیم کربنیک‌انیدراز و یون بی‌کربنات می‌باشد و ۲۳٪ نیز توسط هموگلوبین در درون این یاخته منتقل می‌شود).

نکته

۲۳٪ انتقال  $CO_2$  توسط هماتوکریت (حجم یاخته‌های خونی) و به صورت ترکیب با هموگلوبین صورت می‌گیرد و ۷۷٪ دیگر توسط پلاسما منتقل می‌شود (۷۰٪ یون بی‌کربنات و ۷٪ محلول در پلاسما).



تست ۸

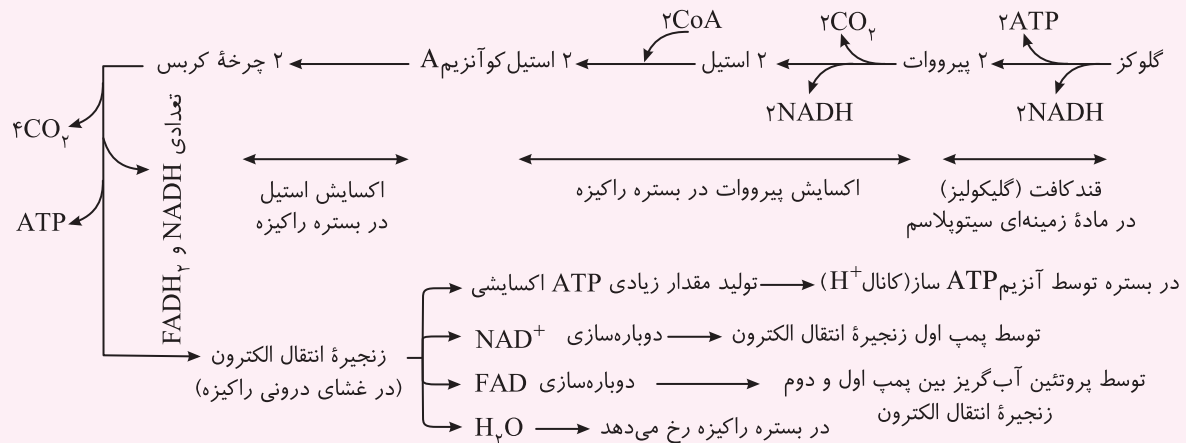
در مرحله‌ای از اکسایش پیرووات که فقط تا تولید ماده دو کربنه حاوی ماده آلی کمک‌کننده به آنزیم صورت می‌گیرد، چند مورد زیر هم‌زمان با هم اتفاق نمی‌افتد؟

- (الف) تولید  $CO_2$  و  $NADH$
  - (ب) تولید استیل و  $NADH$
  - (ج) مصرف کوآنزیم A و تولید  $CO_2$
  - (د) مصرف  $NAD^+$  و اتصال کوآنزیم A به گروه استیل
- مورد ۲ (۱)      مورد ۳ (۲)      مورد ۱ (۳)      مورد ۴ (۴)

پاسخ ۱

موارد (ج) و (د) هم‌زمان رخ نمی‌دهند. اکسایش پیرووات درون راکیزه، ابتدا توسط آنزیم‌های موجود در راکیزه صورت می‌گیرد تا در بستره سبب تولید استیل کوآنزیم A شود. واکنش تبدیل پیرووات به استیل کوآنزیم A نیز دارای دو مرحله یا بخش می‌باشد که در مرحله اول هر پیرووات با از دست دادن یک  $CO_2$  و تولید یک  $NADH, H^+$  به بنیان استیل تبدیل می‌شود ( $C_3 + NAD^+ \rightarrow C_2 + NADH, H^+ + CO_2$ ). در مرحله بعد گروه استیل به کوآنزیم A می‌پیوندد و استیل کوآنزیم A می‌سازد ( $C_2 + CoA \rightarrow C_2CoA$  استیل).

**تله‌های تستی (الف)** درست است. تولید  $CO_2$  و  $NADH$  در مرحله تبدیل پیرووات به استیل اتفاق می‌افتد. / (ب) درست است. تولید بنیان استیل،  $CO_2$  و  $NADH$  هم‌زمان در مرحله تبدیل پیرووات به استیل رخ می‌دهد. / (ج) نادرست است. مصرف  $CoA$  در مرحله دوم ولی تولید  $CO_2$  در مرحله اول اکسایش پیرووات رخ می‌دهد. / (د) نادرست است. مصرف  $NAD^+$  در مرحله اول ولی اتصال  $CoA$  به استیل در مرحله دوم رخ می‌دهد.



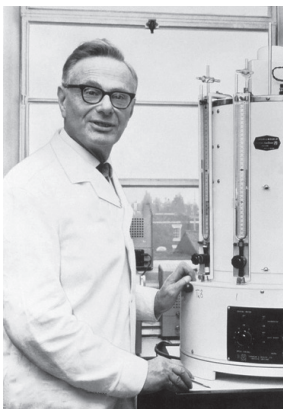
## اکسایش استیل تا تولید ATP های بیشتر

### اکسایش گروه استیل در چرخه کربس

خلاصه مراحل قبلی: تا اینجا تنفس یاخته‌ای، آموختیم که از **اکسایش گلوکز**، در مرحله قندکافت، دو مولکول پیرووات حاصل می‌شود و سپس درون راکیزه، با **اکسایش پیرووات‌ها**، دو مولکول استیل کوآنزیم A ایجاد می‌شود. طی این دو واکنش از یک مولکول گلوکز، دو مولکول استیل کوآنزیم A، دو مولکول ATP در سطح پیش‌ماده‌ای، دو مولکول CO<sub>2</sub> و مقداری NADH (چهار عدد) تشکیل شده است.

### نکته

ماده‌ای که به‌طور مشترک در قندکافت و تولید استیل از پیرووات ایجاد می‌شود، **مولکول NADH** می‌باشد.



هانس آدولف کربس (۱۹۰۰ - ۱۹۸۱)

از اینجا به بعد باید گروه‌های **استیل**، دچار اکسایش شوند و با شکستن پیوندهای کربن - هیدروژن آن‌ها به تولید مقداری دیگر مولکول مثل ATP، CO<sub>2</sub> و... بپردازند. **عمل اکسایش گروه استیل در مولکول استیل کوآنزیم A در بخش داخلی یا همان بستره راکیزه صورت می‌گیرد.** اولین بار هانس آدولف کربس، محقق آلمانی موفق به پیدایش **مراحل چرخه‌ای** اکسایش پیرووات در بستره یا بخش درونی راکیزه شد. وی متوجه شد که واکنش‌های **اکسایش گروه استیل** به صورت زنجیره‌ای نمی‌باشد، بلکه به صورت یک **واکنش چرخه‌ای** (که بعداً به **چرخه کربس** مشهور شد) صورت می‌گیرد. این واکنش‌ها با **یک مولکول چهار کربنی** آغاز می‌شود که این مولکول (**چهار کربنی شروع کننده چرخه**) پس از ترکیب شدن با گروه استیل دو کربنی، یک ماده شش کربنی می‌سازد. این ماده شش کربنی طی مراحل دو مولکول CO<sub>2</sub> آزاد می‌کند. در انتهای چرخه کربس دوباره باید **مولکول چهار کربنی** اولیه تولید شود تا گروه استیل دیگری را بگیرد و اکسایش کند.

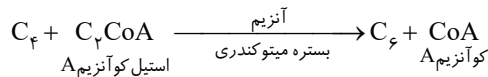
### نکته مهم

در واکنش‌های چرخه‌ای (مثل چرخه کربس) برخلاف واکنش‌های زنجیره‌ای (مثل قندکافت) ماده اولیه شروع کننده چرخه، باید در انتها دوباره‌سازی شود. مثلاً در انتهای قندکافت، گلوکز که شروع کننده واکنش بود، دوباره‌سازی نمی‌شود. ولی در چرخه کربس، ماده چهار کربنی اولیه که با گروه استیل ترکیب می‌شود باید در انتهای واکنش دوباره تولید شود.

### بررسی مراحل چرخه کربس (چرخه اکسایش گروه استیل)

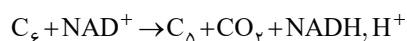
#### ● مرحله اول

این مرحله با یک ترکیب چهار کربنی ذخیره شده در راکیزه آغاز می‌شود. ابتدا استیل کوآنزیم A (دو کربنی) با مولکول چهار کربنی فوق ترکیب می‌شود که ضمن این عمل، **کوآنزیم A** جدا شده تا به گروه استیل دیگری در راکیزه متصل شود. در اثر ترکیب استیل و مولکول چهار کربنی، **یک مولکول شش کربنی** تولید می‌شود.



#### ● مرحله دوم

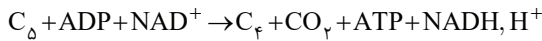
در این مرحله مولکول شش کربنی با از دست دادن یک CO<sub>2</sub> و تولید یک NADH, H<sup>+</sup> به ماده پنج کربنی تبدیل می‌شود.



**پاژویی:** کتاب درسی مراحل که NADH و  $FADH_2$  در چرخه کربس تولید می‌شود را دقیقاً مشخص نکرده است و قطعاً از مرحله دقیق آن‌ها نیز از شما سؤالی نه در این کتاب و نه در کنکور پرسیده نمی‌شود. فقط برای درک بهتر مراحل در اینجا آن‌ها را توضیح داده‌ام.

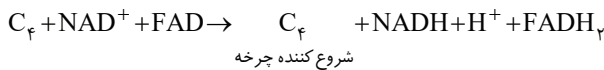
### ● مرحله سوم

در این مرحله مولکول پنج کربنه با از دست دادن کربن، سبب آزادسازی **یک مولکول  $CO_2$**  می‌شود و به مولکول چهار کربنه‌ای تبدیل می‌شود. **این مولکول چهار کربنی با مولکول چهار کربنه شروع کننده چرخه متفاوت می‌باشد.** (لازم به ذکر است که در این مرحله نیز یک مولکول NADH و البته یک مولکول ATP در سطح پیش‌ماده تولید می‌شود که در کتاب درسی به‌طور واضح ذکر نشده است.)



### ● مرحله آخر (چهارم)

در این مرحله طی عمل آنتی‌اکسیدان در همان بخش درونی یا بسته راکبزه، از مولکول چهار کربنه، طی آزاد شدن تعدادی الکترون و پروتون، ماده چهار کربنی شروع کننده چرخه بازسازی می‌شود تا چرخه دوباره تکرار شود. (در این مرحله نیز NADH و  $FADH_2$  تولید می‌شود.)

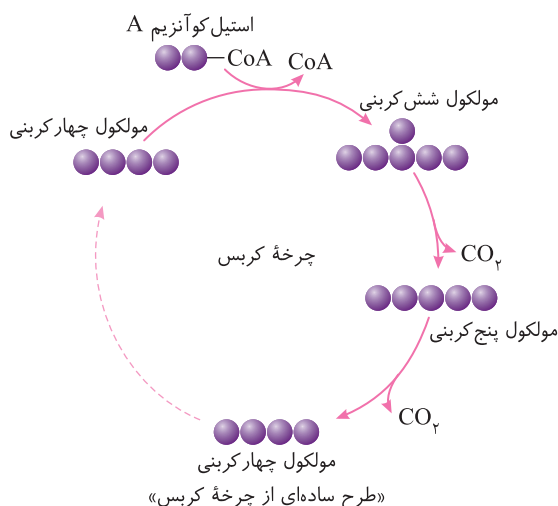
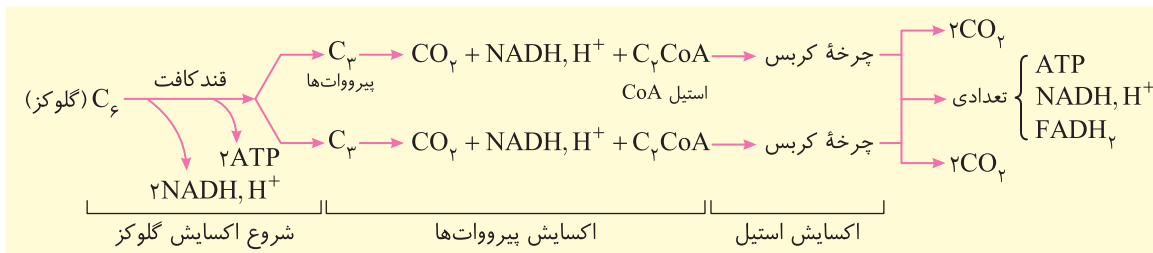


### نکته

طبق خط کتاب درسی، در مرحله اول چرخه کربس یعنی ترکیب  $C_5$  و گروه استیل، فقط ماده شش کربنی تولید می‌شود ولی از اکسایش این ماده شش کربنی تا رسیدن به ماده چهار کربنی اولیه، در محل‌های متفاوتی از چرخه، مولکول‌های ATP،  $CO_2$ ،  $NADH, H^+$  و  $FADH_2$  تولید می‌شود.

### نکاتی مفهومی در مورد واکنش‌های چرخه کربس

- (۱) محل انجام این واکنش‌ها در بسته یا بخش درونی راکبزه یعنی منطقه حاوی DNA حلقوی و ریبوزوم خاص این اندامک می‌باشد.
- (۲) چون از اکسایش هر گلوکز، دو مولکول پیرووات و دو مولکول استیل کوآنزیم A حاصل می‌شود، پس مرحله چرخه کربس نیز به ازای هر گلوکز، دو بار رخ می‌دهد.
- (۳) طی هر چرخه کربس در نهایت از اکسایش هر گروه استیل، دو مولکول  $CO_2$ ، مولکول ATP،  $FADH_2$  و مقداری NADH در مراحل مختلف چرخه کربس ایجاد می‌شود.
- (۴) بازده هر چرخه کربس  $2CO_2$  می‌باشد که در مراحل دوم و سوم واکنش‌های آن ضمن کاهش تعداد کربن  $C_5$  به  $C_4$  و  $C_4$  به  $C_3$  تولید می‌شود. از آنجایی که دو بار این چرخه در اکسایش هر گلوکز، انجام می‌شود، پس ۴ مولکول از ۶ مولکول  $CO_2$  کل واکنش تنفس هوازی، در این مرحله ایجاد می‌شود. جهت حرکت این  $CO_2$  ها نیز به سمت خروج از یاخته و ورود به خون و انتقال به شش‌ها می‌باشد.
- (۵) واکنش‌های چرخه کربس در حقیقت مسئول **اکسایش مولکول دو کربنی استیل** می‌باشند. در زیر می‌توانید کل واکنش‌های تنفس یاخته‌ای را به‌طور خلاصه از ابتدای قند کافت تا انتهای چرخه‌های کربس مشاهده کنید.



- (۶) تا انتهای مرحله چرخه‌های کربس، هر ۶ مولکول  $CO_2$  ای که قرار بود از تجزیه گلوکز در واکنش‌های تنفس هوازی تولید شوند، به دست آمده است ولی تولید همه مولکول‌های آب و مقدار زیادی از ATP‌های کل واکنش هنوز انجام نشده است.
- (۷) همه ATP‌های **پیش‌ماده‌ای** که قرار بود در طی تنفس یاخته‌ای هوازی ایجاد شوند تا **انتهای چرخه‌های کربس** تولید شده‌اند (در قند کافت و چرخه کربس) ولی هنوز هیچ ATP‌ای از نوع مرتبط با زنجیره انتقال الکترونی یا واکنش‌های ساخته شدن ATP **اکسایشی** ایجاد نشده‌اند.
- (۸) از ابتدای قند کافت تا انتهای واکنش چرخه‌های کربس، از هر مولکول گلوکز، ۶ مولکول  $CO_2$  ایجاد شده است. انرژی پیوندهای شکسته شده آن صرف تولید **مقدار کمی ATP پیش‌ماده‌ای** و مقدار **زیادی** مولکول‌های حامل الکترون به نام NADH و  $FADH_2$  شده است.
- (۹) واکنش‌های چرخه‌ای کربس به صورت روبه‌رو می‌باشد که در جدولی که در ادامه آن آمده است، مواد تولید شده و مصرف شده هر مرحله را برای شما مشخص کرده‌ایم.



در جدول زیر قسمت‌هایی که کنار آن‌ها علامت  $\Delta$  خورده است را نیازی ندارید برای کنکور یاد بگیرید و فقط برای اطلاعات عمومی شما گنجانده شده‌اند ولی باید بدانید که در چرخه کربس علاوه بر  $2CO_2$ ، تعدادی  $NADH$ ،  $FADH_2$  و  $ATP$  در **محل‌های متفاوتی** یعنی در واکنش‌های متفاوتی از چرخه نیز ایجاد می‌شود. (رشته کنید که محل تولید همه این مواد واکنش‌های چرخه کربس در بسته را نیز می‌باشد).

۱۰ تا انتهای چرخه‌های کربس، مولکول گلوکز تا سر حد مولکول‌های  $CO_2$  تجزیه شده است که انرژی پیوندهای تجزیه شده آن صرف تولید  $NADH$ ،  $ATP$  و  $FADH_2$  شده است.

مرحله چرخه کربس	پیش ماده‌ها	محصولات
اول	$C_4$ شروع کننده چرخه + $C_4CoA$ (استیل کوآنزیم A)	ماده $CoA + C_6$ آزاد شده
دوم	مولکول $C_6$ $NAD^+$ $\Delta$	مولکول $C_5$ مولکول $CO_2$ $NADH, H^+$ $\Delta$
سوم	مولکول $C_5$ $NAD^+$ $\Delta$	مولکول $C_4$ مولکول $CO_2$ $ATP + NADH, H^+$ $\Delta$
چهارم	مولکول $C_4$ $NAD^+ + FAD$ $\Delta$	مولکول $C_4$ شروع کننده چرخه $NADH, H^+ + FADH_2$ $\Delta$

تست ۹

کدام یک، در مورد مراحل «چرخه کربس» نادرست است؟

- در اولین مرحله، استیل کوآنزیم A با ماده چهار کربنی ترکیب می‌شود و همراه با تشکیل مولکول شش کربنی، کوآنزیم A رها می‌شود.
- در مرحله دوم، با جدا شدن  $CO_2$  از ترکیب شش کربنه، یک مولکول پنج کربنه و یک  $CO_2$  به وجود می‌آید.
- در مرحله سوم، با ایجاد مولکول چهار کربنه، محصولی ایجاد می‌شود که پیش ماده آنزیمی در گویچه قرمز انسان می‌باشد.
- در مرحله آخر، با دوباره سازی مولکول شروع کننده چرخه، یک کوآنزیم A نیز آزاد می‌شود.

پاسخ ۴

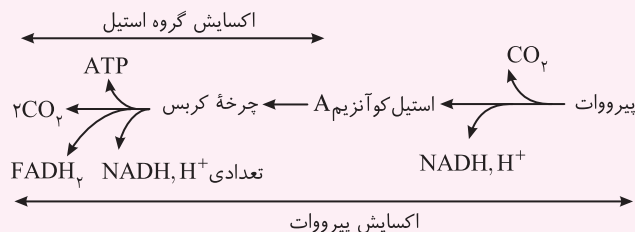
**تله‌های تستی** گزینه (۱): در متن بالا توضیح دادم. / گزینه (۲) و (۳): در مرحله دوم و سوم چرخه کربس با کاهش تعداد کربن، در هر کدام یک مولکول  $CO_2$  ایجاد می‌شود. همان‌طور که می‌دانید  $CO_2$  نوعی پیش ماده برای آنزیم کربنیک‌انیدراز موجود در گویچه قرمز برای ترکیب با  $H_2O$  و ایجاد کربنیک‌اسید می‌باشد که در نهایت ۷۰٪ انتقال  $CO_2$  های خون را به صورت یون بی کربنات ایجاد می‌کنند که توسط پلاسما به سوی شش‌ها منتقل می‌شود.

تست ۱۰

در تنفس یاخته‌ای یوکاریوت‌ها، تعداد ..... حاصل از اکسایش کامل مولکول‌های ..... تا آخر مراحل تنفس، برابر می‌باشد.

- $FADH_2$  های - پیرووات و استیل
- $NADH$  های - پیرووات و استیل
- الکترون‌های  $NAD$  و  $FADH_2$
- $FADH_2$  های - قند شش کربنی دو فسفات و پیرووات

پاسخ ۱



اکسایش هر مولکول پیرووات و استیل در نهایت توسط واکنش‌های یک چرخه کربس به انجام می‌رسد که طی آن‌ها تعداد  $FADH_2$  های یکسانی حاصل می‌شود ولی در اکسایش کامل پیرووات، یک مولکول  $NADH, H^+$  و یک  $CO_2$  بیشتر از اکسایش استیل ایجاد می‌شود.

**تله‌های تستی** گزینه (۲): در اکسایش پیرووات یک  $NADH$  تا مرحله تولید استیل کوآنزیم A تولید می‌شود و سپس گروه استیل حاصل از آن اکسایش می‌شود. پس از اکسایش پیرووات، یک مولکول  $NADH$  و یک مولکول  $CO_2$  بیشتر تولید می‌شود. / گزینه (۳): باید خیلی دقت کنید چون  $NAD^+$  الکترون گیری می‌کند و  $NADH$  همانند  $FADH_2$  به الکترون‌دهی و اکسایش می‌پردازد و در کل  $2e^-$  و  $2H^+$  ایجاد می‌شود. / گزینه (۴): از هر گلوکز در آخر قندکافت دو مولکول پیرووات ایجاد می‌شود و سپس هر پیرووات و استیل پس از آن وارد یک چرخه کربس می‌شوند تا  $FADH_2$  تولید کنند. سپس محصولات هر گلوکز یا قند شش کربنی دو فسفات در نهایت برای اکسایش کامل وارد دو تا چرخه کربس می‌شوند ولی هر پیرووات یا استیل وارد یک چرخه کربس می‌شود و به تعداد نصف هر مولکول گلوکز،  $FADH_2$  تولید می‌کنند.

## زنجیره انتقال الکترون (تولید ATP بیشتر در تنفس هوازی)

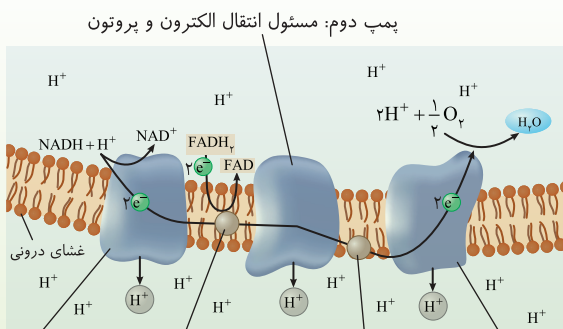
در ابتدای بحث تنفس یاخته‌ای، به یک نکته کلیدی اشاره کردیم که **هدف از تنفس یاخته‌ای، تولید ATP می‌باشد**. تا پایان مراحل چرخه کربس، به این نتیجه رسیدیم که از اکسایش یک مولکول گلوکز فقط تعداد کمی ATP آن هم در سطح پیش‌ماده آلی (۴ عدد) ایجاد شده است (روت در مقدار کماست و روت در چرخه کماست کربس) ولی بازده تجزیه یک مولکول گلوکز، خیلی بیشتر از این مقدار ATP می‌باشد. (حد اکثر ۳۰ ATP می‌تواند از تجزیه یک گلوکز ایجاد شود). باید توجه داشت که در حین واکنش‌های مختلف تنفس یاخته‌ای، در فرایندهای قند کافت، تولید استیل کوآنزیم A و چرخه‌های کربس، علاوه بر ATP و  $\text{CO}_2$ ، مقداری نیز  $\text{NADH}$ ،  $\text{H}^+$  و  $\text{FADH}_2$  ایجاد می‌شود. از آنجایی که  $\text{NADH}$  و  $\text{FADH}_2$  دارای الکترون‌های پرانرژی هستند، در انتهای تنفس یاخته‌ای، سیستم پیچیده‌ای در غشای درونی راکیزه (یا غشای پروکریوت‌ها) به نام زنجیره انتقال الکترون وجود دارد. این زنجیره که از عوامل پروتئینی تشکیل شده است، با اکسایش  $\text{NADH}$ ها و  $\text{FADH}_2$ ها سبب آزادسازی الکترون‌ها و پروتون‌های پرانرژی شده و سپس سبب تولید ATP بیشتر و آب می‌شود. البته ضمن این اعمال، دوباره‌سازی  $\text{NAD}^+$  و  $\text{FAD}$  نیز صورت می‌گیرد.

### اجزای زنجیره انتقال الکترون

این زنجیره از سه پمپ پروتئینی و تعدادی ناقل الکترون در غشای درونی راکیزه تشکیل شده است و مسئول اکسایش یا الکترون‌گیری از  $\text{NADH}$  و  $\text{FADH}_2$ های مراحل قبلی می‌باشد. پمپ‌ها در حقیقت پروتئین‌های سرتاسری در عرض غشای درونی راکیزه هستند که عمل انتقال فعال را برای عبور یون‌های هیدروژن انجام می‌دهند. این پمپ‌ها از الکترون عبوری خود انرژی می‌گیرند (نه از ATP!!!) و  $\text{H}^+$  را از قسمت کم‌تراکم یعنی بخش درونی یا بستره راکیزه به فضای بین دو غشا (بخش بیرون فضای حتماً درون راکیزه) می‌برند.

### چند نکته مهم در بررسی تست‌ها

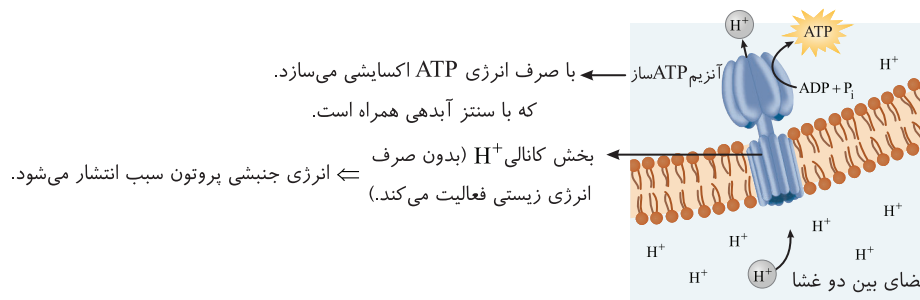
- در این زنجیره، بین پمپ اول و دوم یک ناقل الکترون در قسمت آب‌گریز غشا یعنی در مجاورت دم‌های آب‌گریز اسیدهای چرب وجود دارد ولی بین پمپ دوم و سوم یک ناقل الکترون در بخش آب‌دوست اسیدهای چرب در قسمت خارجی غشای داخلی راکیزه (تزیات به فضای بین غشا) وجود دارد.
- اجزای زنجیره انتقال الکترون شامل سه پمپ و دو ناقل بین پمپ‌ها می‌باشد. در ادامه خواهید دید که پمپ‌ها هم در عبور الکترون و هم در عبور پروتون نقش دارند ولی دو ناقل بین پمپ‌ها، فقط در انتقال الکترون نقش دارند.
- هر مولکول موجود در زنجیره انتقال الکترون، با گرفتن الکترون، کاهش می‌یابد و با از دست دادن الکترون، اکسایش می‌یابد.
- زنجیره انتقال الکترون مسئول اکسایش  $\text{NADH}$  و  $\text{FADH}_2$  می‌باشد تا سبب دوباره‌سازی  $\text{NAD}^+$  و  $\text{FAD}$  شود.



پمپ سوم: مسئول برگرداندن الکترون‌های کم‌انرژی به بستره برای تولید آب  
 ناقل آب‌دوست: مسئول انتقال الکترون  
 ناقل آب‌گریز: مسئول اکسایش  $\text{FADH}_2$   
 پمپ اول: مسئول اکسایش  $\text{NADH}$

### کانال پروتئینی $\text{H}^+$ با نقش ATP‌ساز

در غشای درونی راکیزه ولی در مجاورت زنجیره انتقال الکترون، یک مجموعه پروتئینی در عرض غشا به نام کانال  $\text{H}^+$  وجود دارد. این مجموعه پروتئینی ATP‌ساز، از یک طرف نقش کانال  $\text{H}^+$  را دارد که با انتشار تسهیل شده پروتون‌ها را از قسمت پرتراکم یعنی از فضای بین دو غشای راکیزه (بخش بیرون) به بخش داخلی یعنی فضای درونی یا بستره راکیزه می‌آورد. از طرف دیگر بخشی از این مجموعه در قسمت درونی راکیزه (بستره) دارای نقش آنزیمی می‌باشد. این قسمت با استفاده از انرژی جنبشی پروتون عبوری از کانال، هم‌زمان نقش آنزیمی آن فعال شده و با صرف انرژی سبب ترکیب  $\text{ADP}$  با فسفات و ایجاد  $\text{ATP}$  اکسایشی در بستره راکیزه می‌شود.



آنزیم ATP‌ساز ← با صرف انرژی ATP اکسایشی می‌سازد.  
 که با سنتز آبدهی همراه است.  
 بخش کانالی  $\text{H}^+$  (بدون صرف انرژی زیستی فعالیت می‌کند).  
 ← انرژی جنبشی پروتون سبب انتشار می‌شود.

«مجموعه پروتئینی ATP‌ساز که هم‌زمان نقش ترابری پروتون‌ها و تولید ATP اکسایشی را بر عهده دارد.»

## بررسی اکسایش NADH در زنجیره انتقال الکترون راکیزه

هر مولکول  $\text{NADH}$ ,  $\text{H}^+$  که در مراحل قندکافت، تولید استیل کوآنزیم A از پیرووات‌ها یا چرخه‌های کربس ایجاد شده‌اند، حاوی دو عدد الکترون پراثری و پروتون ( $\text{H}^+$ ) می‌باشد. اگر در شکل زنجیره انتقال الکترون به دقت نگاه کنید، در خواهید یافت که هر  $\text{NADH}$ ,  $\text{H}^+$  برای اکسایش و خالی کردن انرژی الکترون‌های خود از **پمپ اول** وارد زنجیره انتقال الکترون در **غشای درونی راکیزه** می‌شود و ضمن دوباره‌سازی  $\text{NAD}^+$ ، دو الکترون خود را به پمپ اول می‌دهد. این پمپ با گرفتن الکترون‌ها، ابتدا کاهش یافته و سپس مقداری از انرژی الکترون‌ها را گرفته و اکسایش می‌یابد تا الکترون‌ها را به ناقل بعد از خود و سپس به پمپ دوم برساند. پمپ اول با گرفتن انرژی از الکترون‌ها، فعال می‌شود و سبب انتقال فعال  $\text{H}^+$  از فضای درون راکیزه (بستره) به فضای بین دو غشا می‌شود. سپس پمپ دوم نیز مقداری دیگر از انرژی‌های این دو الکترون را می‌گیرد و آن‌ها را با انرژی کمتر به یک ناقل الکترون در مجاور فضای بین دو غشای راکیزه می‌دهد. با این عمل پمپ دوم نیز فعال می‌شود و با استفاده از انرژی الکترون‌ها، سبب انتقال فعال  $\text{H}^+$  از دیگری از بستره راکیزه به فضای بین دو غشا می‌شود. دو الکترون وارد شده به پمپ سوم باز هم در این پمپ مقداری انرژی از دست می‌دهند و پمپ سوم را نیز فعال می‌کنند تا پروتون دیگری نیز در خلاف جهت شیب غلظت از بستره راکیزه وارد فضای بین دو غشای این اندامک شود. (پروتون‌ها از بخش درونی راکیزه توسط پمپ‌ها به فضای خارج درونی این اندامک می‌روند.) با این روند از یک طرف یک شیب غلظت  $\text{H}^+$  در فضای بین دو غشای راکیزه نسبت به فضای درونی آن ایجاد می‌شود و از طرف دیگر پمپ سوم، الکترون‌های کم‌انرژی عبور کرده از خود را وارد بخش درونی راکیزه می‌کند و آن‌ها را به مولکول‌های اکسیژن می‌رساند. در حقیقت مولکول اکسیژن در سطح درونی

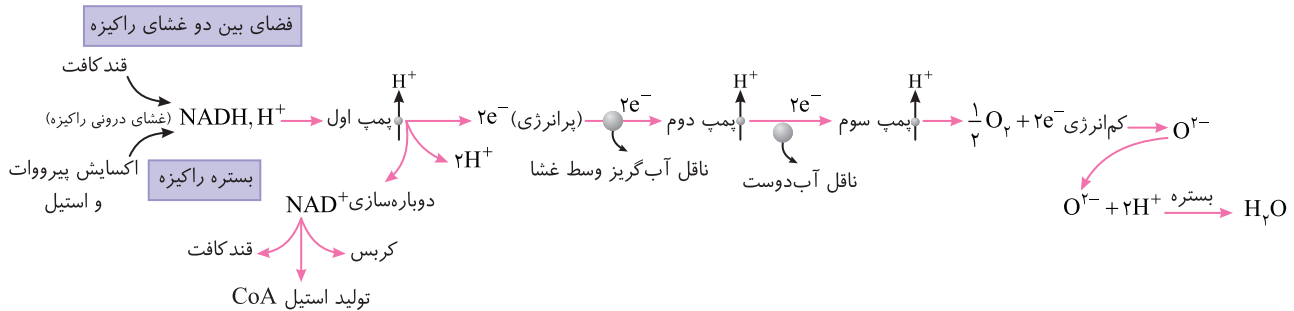
غشای داخلی راکیزه آخرین گیرنده الکترون‌های کم‌انرژی می‌باشد که به صورت یون اکسید با دو بار منفی درمی‌آید. ( $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$ )

در انتهای واکنش‌های زنجیره انتقال الکترون، یون‌های اکسید ( $\text{O}^{2-}$ ) با پروتون‌های باقی‌مانده در بستره ترکیب می‌شوند و یک مولکول آب را تشکیل می‌دهند. این عمل سبب جلوگیری از تولید مقدار زیادی رادیکال آزاد اکسیژن توسط راکیزه می‌شود تا به راکیزه و یاخته آسیبی نرساند.

### نکته

برای تولید هر مولکول آب، به اکسایش یک  $\text{NADH}$ ,  $\text{H}^+$ ، دو الکترون و دو پروتون نیاز می‌باشد.  $\text{O}^{2-} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

### ● واکنش کلی اکسایش NADH

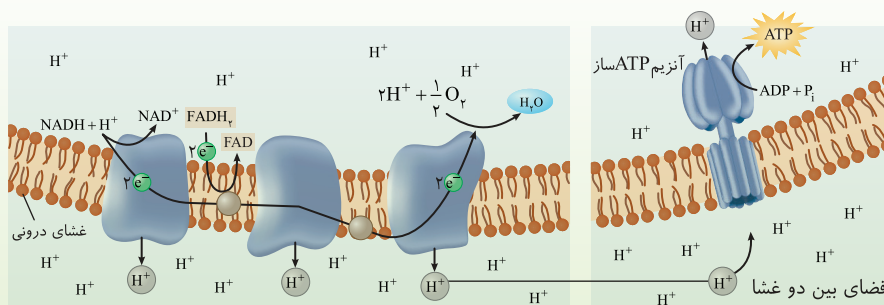


### ● تولید ATP اکسایشی

پس از پایان فعالیت زنجیره انتقال الکترون راکیزه‌ای، تراکمی از  $\text{H}^+$  در فضای بین دو غشای راکیزه به سمت درون راکیزه می‌شود. در این حالت مجموعه پروتئین کانالی  $\text{H}^+$  در مجاور زنجیره انتقال الکترون فعال می‌شود و  $\text{H}^+$ ها (پروتون‌ها) را با انتشار تسهیل شده از فضای بین دو غشا به بستره راکیزه برمی‌گرداند. هنگام عبور  $\text{H}^+$  از بخش کانالی این مجموعه پروتئینی، انرژی لازم برای فعال شدن بخش آنزیمی ATP ساز آن را ایجاد می‌کند که سبب تولید مقداری ATP اکسایشی در اثر ترکیب مقداری ADP با فسفات در بستره ولی در نزدیکی غشای درونی راکیزه می‌شود.

### نکات مفهومی مهم در بررسی تست‌ها

① الکترون‌های  $\text{NADH}$ ، سبب فعال‌سازی هر سه پمپ الکترونی موجود در زنجیره انتقال الکترون می‌شود ولی دوباره‌سازی  $\text{NAD}^+$  فقط در پمپ اول صورت می‌گیرد.



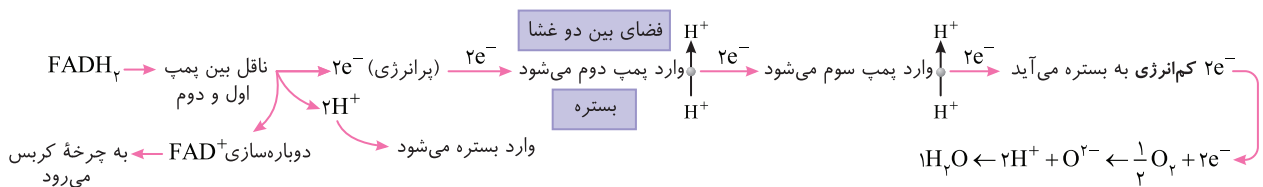
«عمل زنجیره انتقال الکترون در راکیزه برای اکسایش NADH»

- ۲)  $\text{NAD}^+$  اولین گیرنده الکترونی و پروتونی در واکنش‌های قندکافت تنفس یاخته‌ای می‌باشد که نوعی ماده آلی می‌باشد ولی آخرین ماده‌ای که در واکنش‌های تنفس هوازی، الکترون‌گیری می‌کند، مولکول معدنی  $\text{O}_2$  می‌باشد که سبب تولید  $\text{H}_2\text{O}$  می‌شود.
- ۳) در زنجیره انتقال الکترون و پروتئین کانالی، از اکسایش هر  $\text{NADH}$ ، یک مولکول آب تولید می‌شود، نصف مولکول  $\text{O}_2$  الکترون‌گیری می‌کند و مقداری  $\text{ATP}$  اکسایشی ایجاد می‌شود.

### بررسی اکسایش $\text{FADH}_2$ در زنجیره انتقال الکترون

اگر به شکل زنجیره انتقال الکترون راکیزه دوباره دقت کنید، مشاهده می‌کنید که مولکول  $\text{FADH}_2$  که فقط در مرحله‌ای از تنفس هوازی در چرخه کربس ایجاد می‌شود، **وارد پمپ اول زنجیره انتقال الکترون نمی‌شود**. در حقیقت هر  $\text{FADH}_2$  در **ناقل آب گریز** که بین پمپ اول و دوم است، اکسایش می‌شود و  $\text{FAD}$  را بازسازی می‌کند. دو الکترون پراثری حاصل از این عمل ( $\text{FADH}_2 \rightarrow \text{FAD} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+$ ) علاوه بر ناقل اولیه، از پمپ دوم و سوم و ناقل آب دوست بین آن‌ها نیز عبور می‌کنند. پمپ‌های دوم و سوم با استفاده از انرژی الکترون‌های عبوری، فعال می‌شوند و با انتقال فعال سبب تلمبه کردن  $\text{H}^+$  در **خلاف شیب غلظت** از بستره یا داخل راکیزه به فضای بین دو غشای آن می‌شود و باز هم شیب غلظت بیشتری از  $\text{H}^+$  در فضای بین دو غشای راکیزه ایجاد می‌کند. در این عمل نیز، پمپ سوم، الکترون‌های کم‌انرژی  $\text{FADH}_2$  را همانند الکترون‌های  $\text{NADH}$  به مولکول  $\text{O}_2$  می‌رساند و ابتدا سبب تولید یون اکسید ( $\text{O}^{2-}$ ) یا  $\text{O}^{2-}$  شده که در انتها در **بستره راکیزه در اثر ترکیب با پروتون، به تولید آب می‌پردازد**.

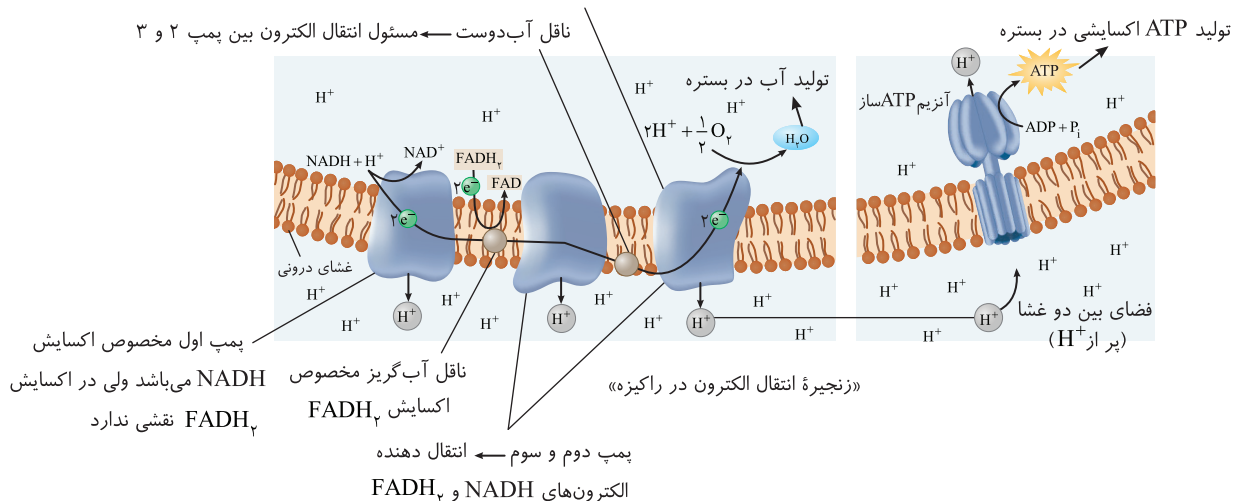
### خلاصه اکسایش $\text{FADH}_2$ در زنجیره انتقال الکترون



### تولید $\text{ATP}$ اکسایشی

پس از عمل زنجیره انتقال الکترون، این بار نیز شیب غلظت  $\text{H}^+$  که در فضای بین دو غشای راکیزه ایجاد شده است، سبب فعال شدن مجموعه پروتئین کانالی  $\text{H}^+$  شده که پروتون‌ها را با انتشار تسهیل شده و به کمک انرژی جنبشی از فضای بین دو غشا (**فضای  $\text{C}_2$  خرج راکیزه**) به بستره یا فضای داخلی راکیزه می‌آورد. انتقال  $\text{H}^+$  سبب فعال شدن بخش آنزیمی  $\text{ATP}$  ساز این کانال **در بستره** شده که با استفاده از انرژی عبور پروتون‌ها، تعدادی  $\text{ATP}$  اکسایشی در بخش درونی راکیزه (بتره) می‌سازد.

پمپ سوم ← مسئول انتقال الکترون‌های کم‌انرژی به اکسیژن و تولید رادیکال آزاد اکسید ( $\text{O}^{2-}$ )



انرژی لازم برای پیوستن یک گروه فسفات به مولکول  $\text{ADP}$  در راکیزه، به طور مستقیم از انرژی ناشی از حرکت ..... تأمین می‌شود.

تست (۱۱)

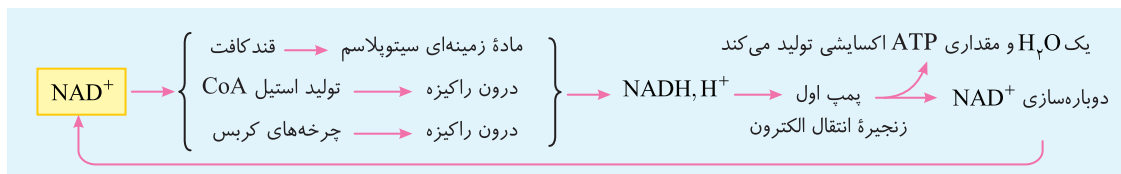
- ۱) الکترون‌ها در پمپ‌های موجود در غشا
- ۲) پروتون‌ها در جهت شیب غلظت خود
- ۳) الکترون‌ها از  $\text{NADH}$  به سوی اکسیژن
- ۴) پروتون‌ها در خلاف جهت شیب غلظت خود

پاسخ (۲)

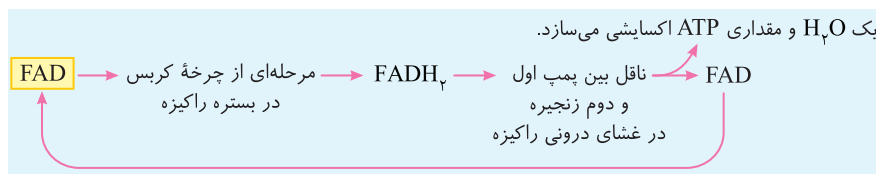
نکته: پمپ‌های موجود در غشای درونی راکیزه، پروتون‌ها را از فضای درونی راکیزه وارد فضای بین دو غشای راکیزه می‌کنند. سپس با افزایش تراکم  $\text{H}^+$  در این فضا، کانال  $\text{ATP}$  ساز با انتقال پروتون‌ها از فضای بین دو غشا به بستره راکیزه، باعث ساخت  $\text{ATP}$  می‌شود. ساخت  $\text{ATP}$  همانند ساخت هر ماده آلی به انرژی نیازمند است که این انرژی از انتقال پروتون‌ها در جهت شیب غلظت فراهم می‌شود.

## نکاتی مفهومی از نتایج واکنش‌های تنفسی هوازی

- مجموعه پروتئینی آنزیم ATP ساز در غشای درونی و بخش درونی راکیزه قرار دارد که عمل ATP سازی را در بستره یا بخش درونی راکیزه (در مجاور غشای درونی) انجام می‌دهد.
- مجموعه پروتئینی آنزیم ATP ساز، از اجزای زنجیره انتقال الکترون می‌باشد. این مجموعه برای انتقال مواد، فقط مخصوص عبور پروتون ( $H^+$ ) می‌باشد ولی **چپ‌های غشای درونی راکیزه**، از اعضای زنجیره انتقال الکترون هستند که علاوه بر الکترون قادر به انتقال فعال پروتون نیز می‌باشند. (تخلیج الکترون بین پمپ‌ها نیز فقط در انتقال الکترون نقش دارند و از اعضای زنجیره انتقال الکترون محسوب نمی‌باشند).
- در انتهای زنجیره انتقال الکترون به ازای اکسایش هر  $NADH + H^+$  یا هر  $FADH_2$ ، یک مولکول آب تولید می‌شود و  $\frac{1}{2}$  مولکول  $O_2$  نیز با الکترون‌گیری کاهش می‌یابد.
- $NAD^+$ ، مولکول گیرنده الکترون و پروتون می‌باشد که در مرحله قندکافت، در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم و در مراحل هوازی، در بخش درونی راکیزه مصرف می‌شود تا  $NADH$  بسازد ولی دوباره سازی  $NAD^+$  در غشای درونی راکیزه یعنی در **چپ اول زنجیره انتقال الکترون** صورت می‌گیرد.



- $FAD$ ، مولکول گیرنده الکترونی است که فقط در بستره راکیزه آن هم در مرحله‌ای از چرخه کربس در تنفس هوازی مصرف می‌شود تا به صورت  $FADH_2$  درآید. دوباره سازی  $FAD$  نیز فقط در ناقل الکترونی بین چپ اول و دوم زنجیره انتقال الکترون یعنی در غشای درونی راکیزه صورت می‌گیرد.

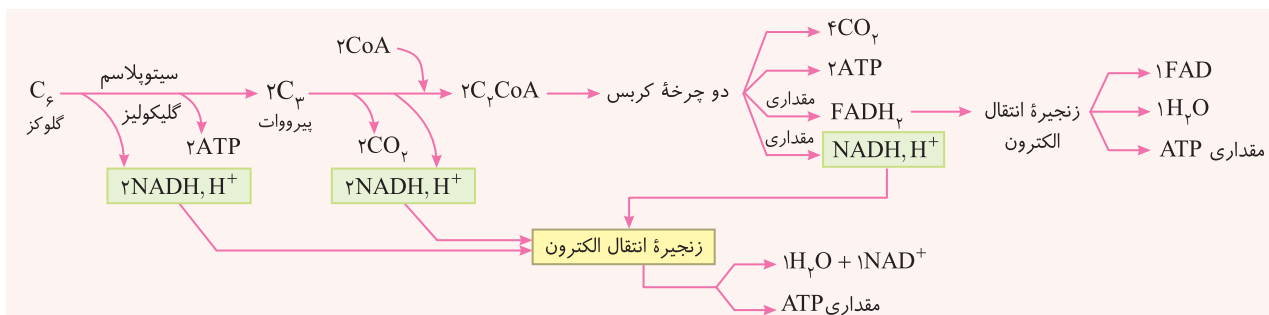


- در یوکاریوت‌ها،  $FAD$ ، فقط در درون راکیزه تولید و مصرف می‌شود ولی  $NAD^+$  می‌تواند علاوه بر واکنش‌های چرخه کربس در بستره راکیزه، در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم نیز در واکنش‌های قندکافت مصرف شود. لازم به ذکر است که تولید این دو نوع گیرنده الکترونی ( $NAD^+$  و  $FAD$ ) در زنجیره انتقال الکترون راکیزه یوکاریوت هوازی صورت می‌گیرد.
- در تنفس هوازی، گیرنده نهایی الکترون و پروتون، مولکول معدنی اکسیژن ( $O_2$ ) می‌باشد.
- اکسیژن،  $NAD^+$  و  $FAD$ ، گیرنده‌های الکترون و پروتون در واکنش‌های تنفس باخته‌ای هستند با این تفاوت که  $NAD^+$  و  $FAD$ ، گیرنده الکترون‌های پراثری هستند ولی  $O_2$  گیرنده الکترون‌های کم‌انرژی عبور کرده از کل زنجیره انتقال الکترون می‌باشد. این الکترون‌ها از پمپ سوم این زنجیره خارج شده و به بستره می‌آیند.
- مرحله اکسایش پیرووات تا تولید استیل کوآنزیم A، تنها مرحله‌ای از تنفس باخته‌ای هوازی می‌باشد که مستقیماً تولید ATP (پیش‌ساز  $ATP$  یا  $ATP$ ) در آن صورت نمی‌گیرد.
- ورود و خروج  $H^+$  بین فضای درونی راکیزه و فضای بین دو غشای آن نیازی به مصرف ATP ندارد. دقت کنید که برای خروج پروتون‌ها از بستره انرژی مصرف می‌شود ولی این انرژی به جای ATP از الکترون‌های عبوری تأمین شده است.

دقت کنید که در تست‌ها، هر جا انرژی دیدید فقط ATP را در ذهن خود تداعی نکنید!! در حقیقت ATP شکل رایج مصرف انرژی در باخته می‌باشد نه تنهاترین شکل برای مصرف انرژی!

- pH فضای بین دو غشای راکیزه از فضای درونی این اندامک اسیدی‌تر می‌باشد چون تراکم  $H^+$  بیشتری دارد.
- الکترون‌های هر  $FADH_2$ ، سبب فعال شدن دو پمپ ولی  $NADH$  سبب فعال شدن سه پمپ پروتونی در زنجیره انتقال الکترون می‌شود.

### ● خلاصه کل واکنش تنفس هوازی



۱۳ مواد مصرفی و تولیدی در هر مرحله از تنفس یاخته‌ای و محل انجام واکنش:

مرحله	محل قرارگیری آنزیم‌ها	محل انجام واکنش‌ها	پیش‌ماده‌های واکنش	محصولات واکنش
قندکافت	ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم	ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم	<b>گلوکز</b> ( $C_6$ ) $PO_4 - ADP - ATP$ (فسفات) $- NAD^+$	<b>دو مولکول پیرووات</b> $C_3$ $ADP - ATP$ (پیش‌ماده‌ای) $- NADH, H^+$
تولید استیل‌کوآنزیم A (اکسایش پیرووات)	درون راکیزه	فضای درون راکیزه	پیرووات $C_3$ کوآنزیم A $2CoA$ $2NAD^+$	$2C_2CoA$ (استیل‌کوآنزیم A) $2NADH, H^+$ $2CO_2$
	غشای پروکاریوت هوازی	فضای درون یاخته		
چرخه‌های کربس (اکسایش استیل)	بخش درونی راکیزه	بخش درونی راکیزه	دو مولکول استیل‌کوآنزیم A ( $2C_2$ ) $FAD - ADP - NAD^+$	$4CO_2$ (به ازای دو چرخه کربس) مقداری $NADH, H^+$ $FADH_2 - ATP$ (پیش‌ماده‌ای)
	سیتوپلاسم پروکاریوت هوازی	سیتوپلاسم پروکاریوت هوازی		
زنجیره انتقال الکترون و مجموعه پروتئینی ساز ATP	غشای درونی راکیزه	غشای درونی راکیزه و فضای درون راکیزه	$NADH, H^+$ $FADH_2$ $O_2 - (ADP+P)$	دوباره‌سازی $NAD^+$ دوباره‌سازی $FAD$ ATP اکسایشی - $H_2O$
	غشای پروکاریوت هوازی	غشا و سیتوپلاسم پروکاریوت هوازی		

**سؤال:** تا به حال فکر کرده‌اید که آیا تنها ویژگی زنجیره انتقال الکترون فقط تولید بیشتر ATP است یا فایده دیگری هم دارد؟

**پاسخ:** دقت کنید که زنجیره انتقال الکترون علاوه بر کمک به ATP‌سازی، نقش مهمی در **دوباره‌سازی**  $NAD^+$  و  $FAD$  دارد تا این گیرنده‌های الکترونی دوباره در دسترس یاخته قرار گیرند و در **تنفس بعدی** مورد استفاده قرار گیرند. در غیر این صورت اگر عاملی سبب مهار واکنش‌های زنجیره انتقال الکترون شود، پس از مدتی با اینکه گلوکز کافی و  $O_2$  مناسب وجود دارد ولی به دلیل عدم وجود  $NAD^+$  و  $FAD$  به عنوان دو گیرنده الکترونی، ATP مورد نیاز برای جاندار تأمین نمی‌شود.

**تست ۱۲** در مورد عمل زنجیره انتقال الکترون و واکنش‌های مرتبط با آن کدام گزینه زیر نادرست می‌باشد؟

(۱)  $NADH$  در ایجاد شیب غلظت موجود در بخش بیرونی فضای راکیزه از  $FADH_2$  مؤثرتر است.

(۲) اکسیژن از طریق یک نوع پمپ از  $FADH_2$  و  $NADH$  الکترون می‌گیرد.

(۳) عبور پروتون‌ها از پروتئین کانالی غشا، انرژی لازم برای نقش آنزیمی این مجموعه را فراهم می‌کند.

(۴) مجموعه آنزیمی ساز ATP برخلاف پمپ‌ها، بدون صرف انرژی، ضمن عبور الکترون و پروتون به تولید ATP می‌پردازد.

**پاسخ ۱۴** بارها در تست‌ها این موضوع را عنوان کردیم و امیدوارم این بار دیگر در دام نیفتاده باشید. کانال ATP‌ساز فقط عبور پروتون را انجام می‌دهد ولی در عبور الکترون نقشی ندارد.

**تله‌های تستی:** گزینه (۱): الکترون‌های  $NADH$ ، صرف فعال کردن هر سه پمپ زنجیره انتقال الکترون می‌شوند ولی  $FADH_2$ ، سبب فعالیت دو پمپ می‌شود. همان‌طور که می‌دانید، هر پمپ در ایجاد تراکم زیاد  $H^+$  در این فضا نقش دارد. / گزینه (۲): الکترون‌های  $NADH$  و  $FADH_2$ ، به صورت کم‌انرژی از پمپ سوم وارد بستره راکیزه می‌شوند تا با  $O_2$  ترکیب شوند. / گزینه (۳): پروتون‌های عبوری از کانال  $H^+$  غشای داخلی راکیزه، انرژی مورد نیاز برای تشکیل ATP از ADP و گروه فسفات را تأمین می‌کنند.

**تست ۱۳** کدام یک از وظایف پروتئین‌هایی می‌باشد که عمل آن‌ها مستقیماً پس از فعالیت زنجیره انتقال الکترون آغاز می‌شود؟

(۱) اکسایش پیرووات

(۲) انتقال فعال یون بدون استفاده از ATP

(۳) تولید نوعی پیش‌ماده رناسازی با صرف انرژی

(۴) تولید آب در اثر واکنش رادیکال‌های آزاد

## پاسخ ۳

در غشای درونی راکیزه دو مجموعه آنزیمی مهم برای تنفس یاخته‌ای وجود دارد. یکی مجموعه آنزیمی برای اکسایش پیرووات به استیل کوآنزیم A و دیگری زنجیره انتقال الکترون و کانال ATP ساز می‌باشد. منظور این سؤال کانال ATP ساز است که عمل آن وابسته به فعالیت زنجیره انتقال الکترون و ایجاد شیب غلظت  $H^+$  در فضای بین دو غشای راکیزه می‌باشد. این کانال وظیفه انتشار تسهیل شده  $H^+$  از بخش خارجی به بخش داخلی فضاهای راکیزه را دارد و از طرفی سبب تولید ATP اکسایشی نیز می‌شود. ATP هم یک ماده انرژی‌زا می‌باشد و هم به عنوان نوکلئوتیدی با قند ریبوز و سه گروه فسفات می‌تواند به عنوان یک پیش ماده برای رونویسی استفاده شود (در سطح گزینۀ (۳) و در سطح گزینۀ (۲)).

تولید آب در زیر پمپ سوم زنجیره انتقال الکترون یعنی در بستره راکیزه انجام می‌شود (در سطح گزینۀ (۴)).

اکسایش پیرووات توسط آنزیم‌های موجود در غشای درونی راکیزه رخ می‌دهد ولی این عمل به‌طور مستقیم ربطی به واکنش زنجیره انتقال الکترون ندارد (در سطح گزینۀ (۱)).

## تست ۱۴

در مسیر آزادسازی انرژی از گلوکز در صورت فقدان آخرین پذیرنده الکترون در زنجیره انتقال، کدام فرایند متوقف نمی‌شود؟

(۱) بازسازی  $NAD^+$  به طریق هوازی

(۲) تولید  $FADH_2$

(۳) تشکیل استیل کوآنزیم A

(۴) تبدیل گلوکز به پیرووات

## پاسخ ۴

نکته: مولکول‌های اکسیژن آخرین پذیرنده الکترون می‌باشند که در صورت فقدان آن، قندکافت که اولین مرحله هر نوع تنفسی است بدون اشکال به صورت بی‌هوازی انجام می‌شود. پس تبدیل گلوکز به پیرووات بدون اشکال انجام می‌گیرد اما پیرووات‌ها مجبورند در همان ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم، ادامه تنفس بی‌هوازی را به صورت مرحله دوم تخمیر انجام بدهند.

## بازده انرژی در تنفس یاخته‌ای

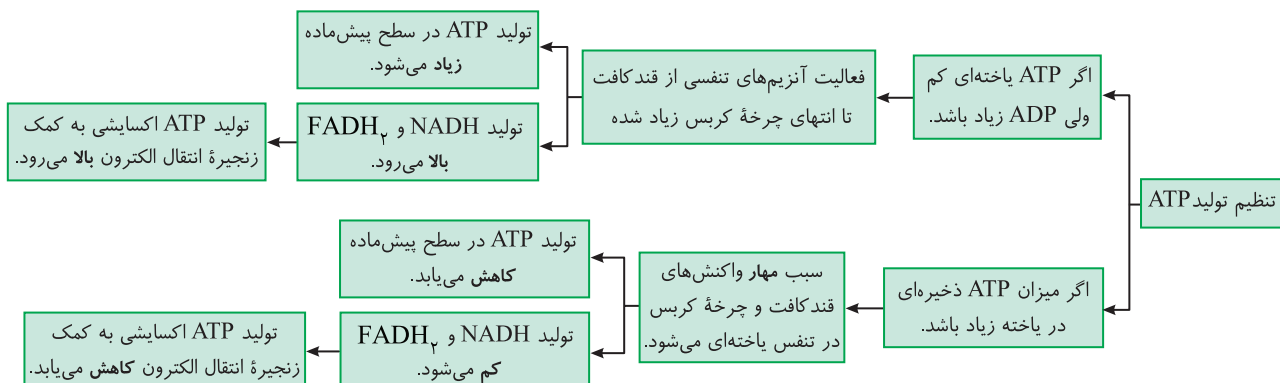
با توجه به اینکه در زمان‌ها و شرایط مختلف محیطی، بازدهی و کارایی ما نیز در زندگی روزمره متفاوت می‌باشد، درون یاخته نیز نمی‌توان به آسانی اعلام کرد که با هر بار تجزیه گلوکز، در تنفس یاخته‌ای همواره چند ATP ایجاد می‌شود. تولید ATP به ازای تجزیه گلوکز، در یاخته‌های متفاوت و متناسب با نیاز بدن متفاوت می‌باشد. اندازه‌گیری‌های واقعی محققین در شرایط آزمایشگاهی نشان داده است که از تجزیه کامل هر گلوکز و در بهترین حالت در حضور  $O_2$ ، حداکثر ۳۰ مولکول ATP می‌توان در یاخته یوکاریوتی به دست آورد. این ۳۰ مولکول شامل مجموع ATP‌های تولیدی در سطح پیش ماده در مراحل قندکافت و چرخه‌های کربس و ATP‌های اکسایشی در زنجیره انتقال الکترون می‌باشد که از انتقال الکترون‌های پرا انرژی  $NADH$  و  $FADH_2$  به دست می‌آیند ولی یک جمله بسیار مهم است:

«نمی‌توان به سادگی گفت که در ازای تجزیه هر مقدار گلوکز چه مقدار ATP در یاخته‌ها تولید می‌شود!!!»

## تنظیم تنفس یاخته‌ای برای تولید اقتصادی تر ATP در یاخته

اگر از زیست یازدهم در فصل هورمون‌ها به خاطر داشته باشید، مکانیسمی به نام بازخوردی یا خودتنظیمی منفی در بدن وجود دارد که سبب تنظیم مقدار ترشح هورمون‌ها برحسب مقدار آن‌ها در خون یا فرآورده آن‌ها در بدن می‌شود. این مکانیسم سبب می‌شود که هرگاه به هورمون بیشتری نیاز داریم، تولید آن بیشتر شود تا انرژی مورد نیاز برای ساخت هورمون‌ها بیهوده مصرف نشود. در اینجا نیز برای تنظیم مقدار ATP یاخته‌ای، مکانیسمی وجود دارد که ابتدا مقدار ATP و ADP یاخته را می‌سنجد و سپس برحسب مقدار مورد نیاز یاخته و بدن، برای انرژی‌زایی به تجزیه گلوکز می‌پردازد. حتماً به خاطر دارید که دو نوع روش تولید ATP در یاخته وجود دارد، یکی به صورت تولید ATP در سطح پیش ماده که در واکنش‌های قندکافت و چرخه‌های کربس صورت می‌گیرد و دیگری واکنش‌های تولید ATP اکسایشی در پی فعالیت زنجیره انتقال الکترون می‌باشد.

محققین مشخص کرده‌اند که تولید ATP یاخته‌ای، تحت کنترل میزان ATP و ADP یاخته می‌باشد و یاخته این عمل تنظیمی را بیشتر با فعال یا مهار کردن واکنش‌های گلیکولیزی (قندکافت) و چرخه‌های کربس انجام می‌دهد. بدین معنی که اگر مقدار ATP یاخته‌ای کم ولی ADP زیاد باشد، واکنش‌های قندکافت و چرخه کربس هم برای تولید ATP در سطح پیش ماده و هم تولید موادی مثل  $NADH$  و  $FADH_2$  (برای تولید ATP در زنجیره انتقال الکترون) افزایش می‌یابد. برعکس اگر مقدار ATP ذخیره‌ای یاخته بیشتر از مقدار مصرفی آن باشد، آنزیم‌های مورد نیاز برای واکنش‌های قندکافت و چرخه کربس مهار می‌شوند تا از ATP‌های ذخیره‌ای قبلی استفاده شود. این تنظیم مانع هدر رفتن منابع و انرژی یاخته‌ای می‌شود.



## چند نکته مهم در بررسی تست‌ها

- ۱) به طور طبیعی، یاخته‌های بدن انسان و سایر جانوران ابتدا از تجزیه گلوکز برای انرژی‌زایی و ساخت ATP مورد نیاز فعالیت‌های خود استفاده می‌کنند. وقتی مقدار گلوکز در دسترس یاخته‌ها کم شد (کمبود قند خون)، در این حالت کبد و سپس ماهیچه‌ها، به ترتیب به کمک هورمون‌های گلوکاگون و آدرنالین، گلیکوژن ذخیره‌ای خود را به گلوکز هیدرولیز کرده تا واکنش‌های تنفس یاخته‌ای با تجزیه گلوکز و ATP سازی افزایش یابند.
- ۲) اگر پس از استفاده از ذخایر قندی، باز هم بدن به انرژی نیاز داشت، مجبور است ابتدا از ذخایر چربی خود استفاده کند و با تجزیه آن‌ها به گلیسرول و اسید چرب از تجزیه آن‌ها طی مراحل مختلف تنفس یاخته‌ای انرژی‌زایی کند.
- ۳) اگر پس از مصرف ذخایر قندی و چربی، باز هم بدن کمبود منابع برای تأمین انرژی داشت (مثل بیماران دیابتی) در این صورت، بدن دست به خودسوزی می‌زند و شروع به تجزیه پروتئین‌های خود می‌کند. پروتئین‌ها اغلب در ساختار بدن و فعالیت‌های بدن شرکت دارند و به طور معمول در انرژی‌زایی به کار نمی‌روند ولی وقتی بدن مجبور شود، متأسفانه رو به سوزاندن و اکسایش پروتئین‌ها می‌آورد. نتیجه این عمل، تحلیل و ضعیف شدن ماهیچه‌های اسکلتی بوده و یا با تجزیه و اکسایش پروتئین‌های دفاعی (برای تأمین انرژی)، بیماری‌های عفونی بیشتر شده و نقص سیستم ایمنی به وجود می‌آید.
- ۴) در افرادی که فقر غذایی و سوء تغذیه شدید و طولانی مدت دارند یا به هر دلیلی میزان غذای کافی در اختیار ندارند، مجبورند برای تأمین انرژی به سمت واکنش‌های تجزیه پروتئین‌ها بروند. این افراد دچار تحلیل و ضعف سیستم ایمنی و ماهیچه اسکلتی بدن می‌شوند.
- ۵) در افراد دیابتی (نوع I و II)، با اینکه قند خون بالاست ولی یاخته‌ها به طور کافی قادر به جذب گلوکز و تأمین انرژی مناسب نمی‌باشند. در این افراد به ترتیب ذخایر گلیکوژنی (قند)، سپس چربی و در آخر پروتئین‌ها و حتی نوکلئیک‌اسیدها برای تأمین انرژی مصرف می‌شوند و فرد در معرض انواع بیماری‌ها قرار می‌گیرد.







## زیستن و تنفس کردن مستقل از اکسیژن (تنفس بی‌هوازی)



ابتدا چند سؤال و چند پاسخ:

در گفتار قبل بررسی کردیم که در محیط دارای اکسیژن کافی، اغلب جانداران قادرند، از تجزیه گلوکز، ATP زیادی ایجاد کنند و به فعالیت‌های حیاتی خود بپردازند. در واکنش‌های هوازی، اکسیژن عاملی است که در نهایت الکترون و پروتون‌های گلوکز تجزیه شده را جمع‌آوری می‌کند ولی اکنون یک سؤال مطرح می‌شود. آیا در محیط دارای اکسیژن کم یا فاقد اکسیژن، حیات وجود ندارد و جانداران زندگی نمی‌کنند؟ پاسخ این سؤال قطعاً منفی است چون برخی قارچ‌ها، باکتری‌ها و حتی جانداران دیگری نیز دیده شده‌اند که در محیط‌های حتی فاقد اکسیژن به حیات و فعالیت‌های زیستی خود ادامه می‌دهند! این جانداران با تنفس بی‌هوازی یا تخمیر به حیات خود ادامه می‌دهند! البته در گفتار قبل بارها تأکید کردیم که در فرایند قندکافت که مخصوص همه جانداران و هر نوع تنفس یاخته‌ای می‌باشد، همواره کمی ATP تولید می‌شود! ولی آیا این ATP جوابگوی نیازهای این جانداران می‌باشد؟ و اینکه مواد اولیه قندکافت مثل  $NAD^+$  چگونه تأمین می‌شوند تا واکنش قندکافت همواره بتواند ATP‌سازی را هر چند اندک ادامه دهد؟ اگر اجازه بدهید می‌خواهم سؤالم را طور دیگری عنوان کنم!!

**سؤال:** همان‌طور که می‌دانید قندکافت یا گلیکولیز واکنش بی‌هوازی زنجیره‌ای است که در چند مرحله انجام می‌شود. عدم انجام هر مرحله آن به معنی قطع زنجیره و عدم طی شدن مراحل بعدی آن می‌باشد! خوب اگر مثلاً ذخیره  $NAD^+$  یاخته تمام شود، چگونه قندکافت می‌تواند همواره به مرحله آخر خود و ایجاد ATP به همراه تولید پیرووات بپردازد؟ به عبارت دیگر، آیا امکان دارد در طبیعت واکنش‌های یک‌طرفه تا مادام‌العمر ادامه یابند؟

**پاسخ:** همان‌طور که قطعاً قبول دارید در زندگی همواره دوطرفه بودن رابطه باعث پایداری رابطه می‌شود!! در اینجا نیز همین‌طور است، مثلاً در گفتار قبل مشاهده کردید که یاخته در مراحل مختلفی از تنفس یاخته‌ای به تولید  $NADH$  و  $FADH_2$  می‌پردازد ولی در انتهای تنفس هوازی و در زنجیره انتقال الکترون، دوباره‌سازی  $NAD^+$  و  $FAD$  رخ می‌دهد تا تنفس یاخته‌ای به تولید  $NADH$  و  $FADH_2$  می‌پردازد ولی  $NAD^+$  یا  $FAD$ ‌های آزاد شده از زنجیره انتقال الکترون یک تنفس، سبب گرفتن الکترون‌ها و پروتون‌های آزاد شده از گلوکز تنفس بعدی می‌شوند. جانداران دارای تنفس بی‌هوازی نیز برای ادامه حیات به مرحله‌ای برای دوباره‌سازی  $NAD^+$  نیازمند هستند تا ادامه تجزیه گلوکزهای دیگر نیز در قندکافت برای تولید ATP صورت گیرد.

**پاسخ کلی:** در قندکافت در مرحله تبدیل قند شش کربنه فسفات به پیرووات ابتدا  $NAD^+$  مصرف شده تا  $NADH$  ساخته شود و سپس در مرحله آخر با تولید پیرووات، مولکول‌های ATP نیز تولید می‌شوند. پس نتیجه می‌گیریم که اگر  $NAD^+$  وجود نداشته باشد، تولید  $NADH$  و پس از آن تولید ATP مختل می‌شود. مرحله دوم تنفس بی‌هوازی یا تخمیر، در حقیقت واکنشی برای دوباره‌سازی  $NAD^+$  می‌باشد تا ادامه تولید ATP در قندکافت به مشکلی برنخورد.

### تخمیر (تنفس بی‌هوازی)

تخمیر نام دیگر تنفس بی‌هوازی یا تنفس بدون نیاز به اکسیژن می‌باشد که همه مراحل آن در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم رخ می‌دهد. تخمیر هیچ‌گاه به راکتور و زنجیره انتقال الکترون نیاز و وابستگی ندارد.

تخمیر یا تنفس بی‌هوازی از دو قسمت تشکیل شده است. (۱) قندکافت (گلیکولیز) (۲) بخش دوباره‌ساز  $NAD^+$

#### ● مرحله اول تخمیر (قندکافت) ← تولید ATP می‌کند.

مرحله اول تخمیر، همان گلیکولیز یا قندکافت می‌باشد که طی آن گلوکز در چهار مرحله، در نهایت به دو مولکول پیرووات تبدیل می‌شود. طی قندکافت، آموختیم که دو مولکول ATP و دو مولکول  $NADH+H^+$  نیز ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که بازده تخمیر یا کل تنفس بی‌هوازی همین دو مولکول ATP از نوع پیش‌ماده‌ای است که در قندکافت ایجاد شده است و جاندار یا یاخته به ادامه زندگی خود با تولید و مصرف همین ATP اندک در شرایط کمبود اکسیژن رضایت داده است.

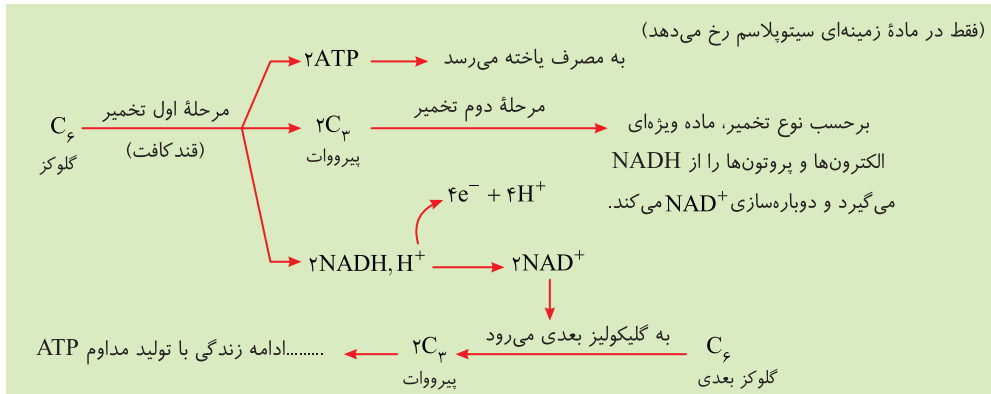
#### نکته

همان‌طور که گفتیم در واکنش‌های زنجیره‌ای قندکافت، بازدهی همین ۲ ATP نیز در صورتی ادامه می‌یابد که  $NAD^+$  مناسب وجود داشته باشد تا  $NADH$  بسازد و قندکافت‌های متوالی به تولید ATP بپردازند ولی اگر عواملی سبب مهار دوباره‌سازی  $NAD^+$  شود، پس از مدتی واکنش‌های قندکافت بعدی و تولید همین ATP اندک نیز متوقف می‌شود و فاتحه مع‌الصلوة!! و الخلاص!

● مرحله دوم تخمیر ← دوباره سازی  $NAD^+$  می کند.

این مرحله در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم و بعد از گلیکولیز (حدکافته) ادامه می‌یابد. مرحله‌ای است که در آن ATP ای تولید نمی‌شود ولی با اکسایش  $NADH$  های تولید شده در قند کافت، الکترون‌ها و پروتون‌های آن معمولاً به یک پذیرنده الکترونی آن (برخلاف  $O_2$  معدنی در تنفس هوازی) می‌رسند و دوباره سازی  $NAD^+$  رخ می‌دهد. در اثر این عمل قند کافت بعدی با تجزیه گلوکز آغاز می‌شود و چون  $NAD^+$  از تخمیر قبلی تأمین شده است، دوباره  $NADH$  ایجاد شده و ATP ها نیز در انتهای قند کافت، همراه با تولید پیرووات ایجاد می‌شوند. جاندار نیز با مصرف این ATP ها به فعالیت‌های زیستی خود ادامه دهد.

● خلاصه تخمیر



انواع تخمیر

در طبیعت انواع مختلفی از تخمیر دیده می‌شود که مرحله اول همه آن‌ها، قند کافت یا گلیکولیز می‌باشد ولی برحسب مرحله دوم آن‌ها و ماده تولید شده در انتهای آن به انواعی تقسیم می‌شوند. دو نوع از مهم‌ترین تخمیرها به نام **تخمیر الکلی** و **تخمیر لاکتیکی** معروفند. از تخمیر در واکنش‌های صنایع مختلف مثل تولید نان یا فرآورده‌های شیری و خوراکی استفاده می‌شود. در برخی موارد، تخمیر می‌تواند در فاسد کردن مواد غذایی نیز نقش داشته باشد.

تفاوت:

مرحله اول ← ATP می‌دهد واسه زندگی / مرحله دوم ←  $NAD^+$  می‌دهد واسه ادامه زندگی

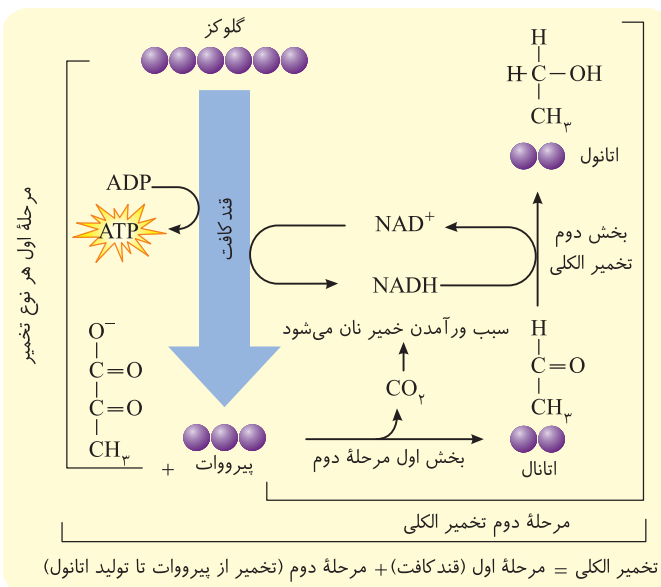
نکته

گیرنده الکترون و پروتون در واکنش‌های قند کافت،  $NAD^+$  می‌باشد ولی در واکنش‌های مرحله دوم تخمیر، معمولاً گیرنده الکترون و پروتون، یک ماده آلی می‌باشد (در تخمیر الکلی و لاکتیکی همواره یک ماده آلی با گرفتن الکترون و کاهیده شدن به دوباره سازی  $NAD^+$  می‌پردازد ولی در بیشتر بدانید که گیرنده بودن برخی مواد معدنی در تخمیر نیز اشاره شده است).

تخمیر الکلی

نوعی تنفس بی‌هوازی است که نمونه آن را در قارچ مخمر نان می‌توان مشاهده کرد. این تخمیر با اضافه کردن قارچ مخمر نان به خمیر نان انجام شده و باعث ورآمدن یا رسیدن خمیر شده تا سبب تردی نان شود. محصول مرحله اول این تخمیر که بارها گفتیم همان قند کافت است و محصول آن دو مولکول پیرووات، دو مولکول ATP و دو مولکول  $NADH, H^+$  می‌باشد.

مرحله دوم تخمیر الکلی خود، دارای دو بخش می‌باشد. در بخش اول آن یک  $CO_2$  از پیرووات جدا می‌شود و ماده‌ای آلی به نام **اتانال** ایجاد می‌شود. **گاز  $CO_2$  آزاد شده باعث ورآمدن خمیر نان می‌شود.** در بخش دوم این مرحله، ماده آلی **اتانال** با گرفتن الکترون‌ها و پروتون‌های  $NADH$  های تولید شده در قند کافت، کاهش یافته (الکترون می‌گیرد و احیا می‌شود) و ضمن دوباره سازی  $NAD^+$ ، به مولکول الکل اتیلیک (اتنول) تبدیل می‌شود.



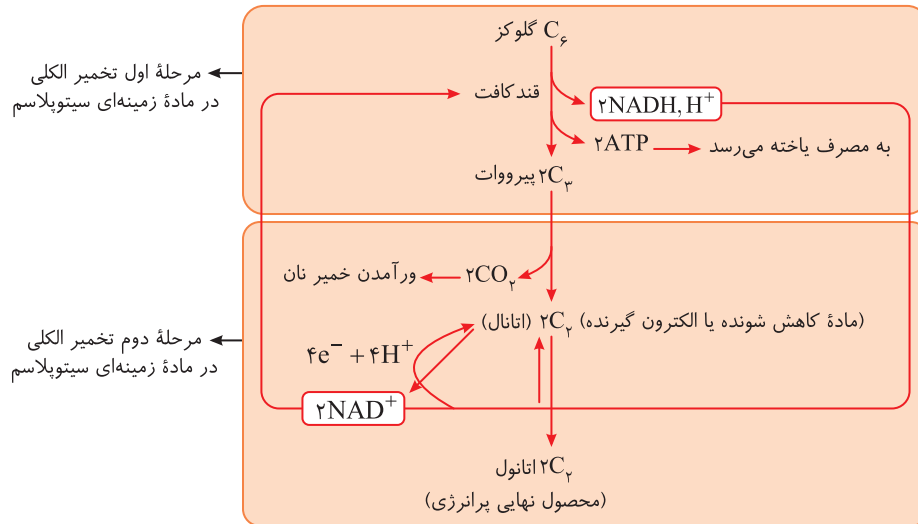
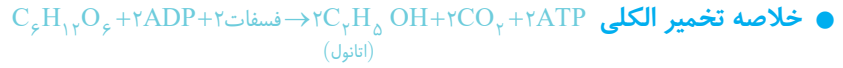
تخمیر الکلی = مرحله اول (قند کافت) + مرحله دوم (تخمیر از پیرووات تا تولید اتانول)

## نکته

همهٔ مراحل اول و دوم هر نوع تخمیری، در مادهٔ زمینه‌ای سیتوپلاسم یاخته صورت می‌گیرد.

## نکته

تخمیر الکلی همانند تنفس هوازی به تولید  $\text{CO}_2$  می‌پردازد و مرحلهٔ اول آن قندکافت می‌باشد ولی مصرف  $\text{O}_2$  و  $\text{FAD}$  در آن صورت نمی‌گیرد.



◀ جدول زیر واکنش‌ها، پیش‌ماده‌ها و محصولات هر قسمت تخمیر الکلی را نشان می‌دهد:

گیرنده نهایی الکترون و پروتون (ماده کاهش یافته)	محصولات	پیش‌ماده‌ها	واکنش	محل واکنش	مراحل تخمیر الکلی
مولکول $\text{NAD}^+$	$2\text{C}_3$ (پیرووات) $2\text{ATP} - 2(\text{NADH}, \text{H}^+)$	گلوکز $\text{C}_6$ $2\text{NAD}^+ - 2\text{ADP}$	$\begin{array}{c} \text{C}_6 \\ \swarrow \searrow \\ 2\text{C}_3 \end{array} \begin{array}{l} \text{2ATP} \\ \text{2NADH, H}^+ \end{array}$	ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم	مرحله اول (قندکافت)
ماده دو کربنه آلی (اتانال)	دو مولکول اتانول دو مولکول $\text{CO}_2$ دو تا $\text{NAD}^+$	دو تا پیرووات دو مولکول $\text{NADH}$	$\begin{array}{c} 2\text{C}_3 \\ \swarrow \searrow \\ 2\text{C}_2 \end{array} \begin{array}{l} \text{2CO}_2 \\ \text{2NAD}^+ \end{array}$	ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم	مرحله دوم

تست ۱۵ در تخمیر الکلی بازسازی  $\text{NAD}^+$  با استفاده از کدام پذیرنده آلی الکترون انجام می‌گیرد؟

(۲)  $\text{NADH} + \text{H}^+$

(۱) اتانول

(۴) ترکیب دو کربنی حاصل از تجزیهٔ پیرووات

(۳) پیرووات حاصل از قندکافت

پاسخ ۴ در تخمیر الکلی، پیرووات با از دست دادن یک  $\text{CO}_2$  به ترکیب دو کربنه اتانال تبدیل می‌شود و این ترکیب دو کربنه با گرفتن الکترون‌های  $\text{H}^+$  و

$\text{NADH}$  کاهش یافته و طی آن  $\text{NAD}^+$  ساخته می‌شود.

تست ۱۶ در تخمیر الکلی برای تولید اتانول، الکترون‌های یک مولکول ..... منتقل می‌شود.

(۲)  $\text{NADH}$  به ترکیب سه کربنی

(۱) پیرووات به  $\text{NAD}^+$

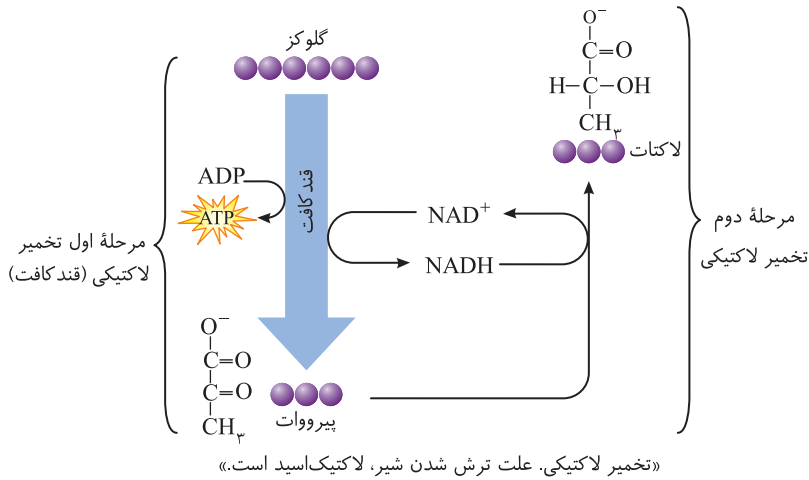
(۴) پیرووات به استیل کوآنزیم A

(۳)  $\text{NADH}$  به ترکیب دو کربنی

پاسخ ۳ در تخمیر الکلی، الکترون‌های  $\text{NADH}$  به مادهٔ دو کربنه اتانال حاصل از تجزیه پیرووات منتقل شده و تولید اتانول یا الکل اتیلیک می‌کند.

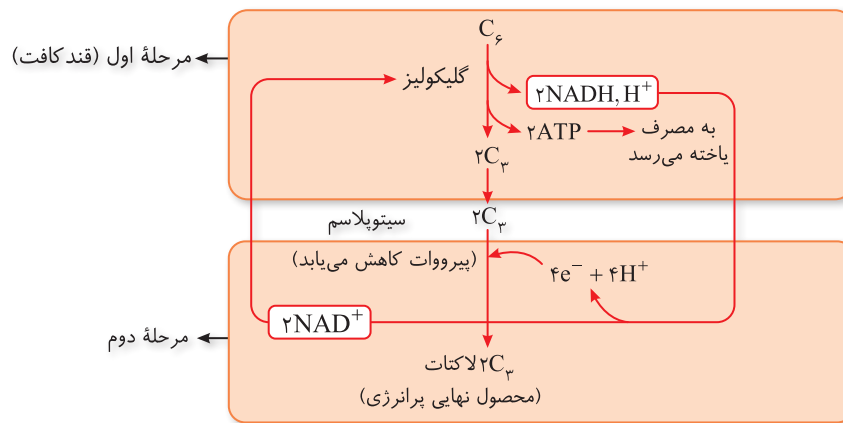
### تخمیر لاکتیکی

این نوع تخمیر در باکتری‌هایی که سبب ترش شدن شیر و فاسد شدن آن می‌شود و انواعی که سبب تولید فرآورده‌های غذایی لبنی (مثل ماست و پنیر) یا فرآورده خوراکی مثل تولید خیارشور می‌شوند، دیده می‌شود که دلیل ترشی آن‌ها تولید لاکتیک‌اسید (لاکتات) می‌باشد. همچنین یاخته‌های ماهیچه اسکلتی انسان در صورت وجود  $O_2$  کافی، قادر به اکسایش کامل گلوکز در تنفس هوازی و تولید  $CO_2$  به همراه ATP فراوان هستند ولی در صورت نبودن اکسیژن کافی که مثلاً در فعالیت‌های بدنی و ورزشی شدید رخ می‌دهد، به تخمیر بی‌هوازی لاکتیکی می‌پردازند. لاکتات اضافی تجمع یافته در ماهیچه سبب درد و گرفتگی ماهیچه‌ای می‌شود. بعد از استراحت، به تدریج لاکتیک‌اسید اضافی تجزیه شده و اثرات درد و گرفتگی ماهیچه از بین می‌رود. (این ویژگی فقط در ماهیچه اسکلتی وجود دارد.)



در این نوع تنفس که همانند هر تخمیری کاملاً در ماده زمینهای سیتوپلاسم صورت می‌گیرد، باز هم مرحله اول همان گلیکولیز یا قند کافت است که سبب تجزیه گلوکز به پیرووات و تولید دو مولکول ATP به همراه دو مولکول NADH می‌باشد. در مرحله دوم تخمیر لاکتیکی، خود پیرووات، ماده آلی گیرنده الکترون‌ها و پروتون‌های NADH می‌باشد که به لاکتات (بنیان لاکتیک‌اسید) تبدیل می‌شوند. این واکنش یک مرحله‌ای بوده و  $CO_2$  ای در این نوع تنفس ایجاد نمی‌شود بلکه با دوباره‌سازی  $NAD^+$  و الکترون‌گیری مولکول پیرووات، ماده‌ای آلی پرانرژی به نام لاکتات ایجاد می‌شود.

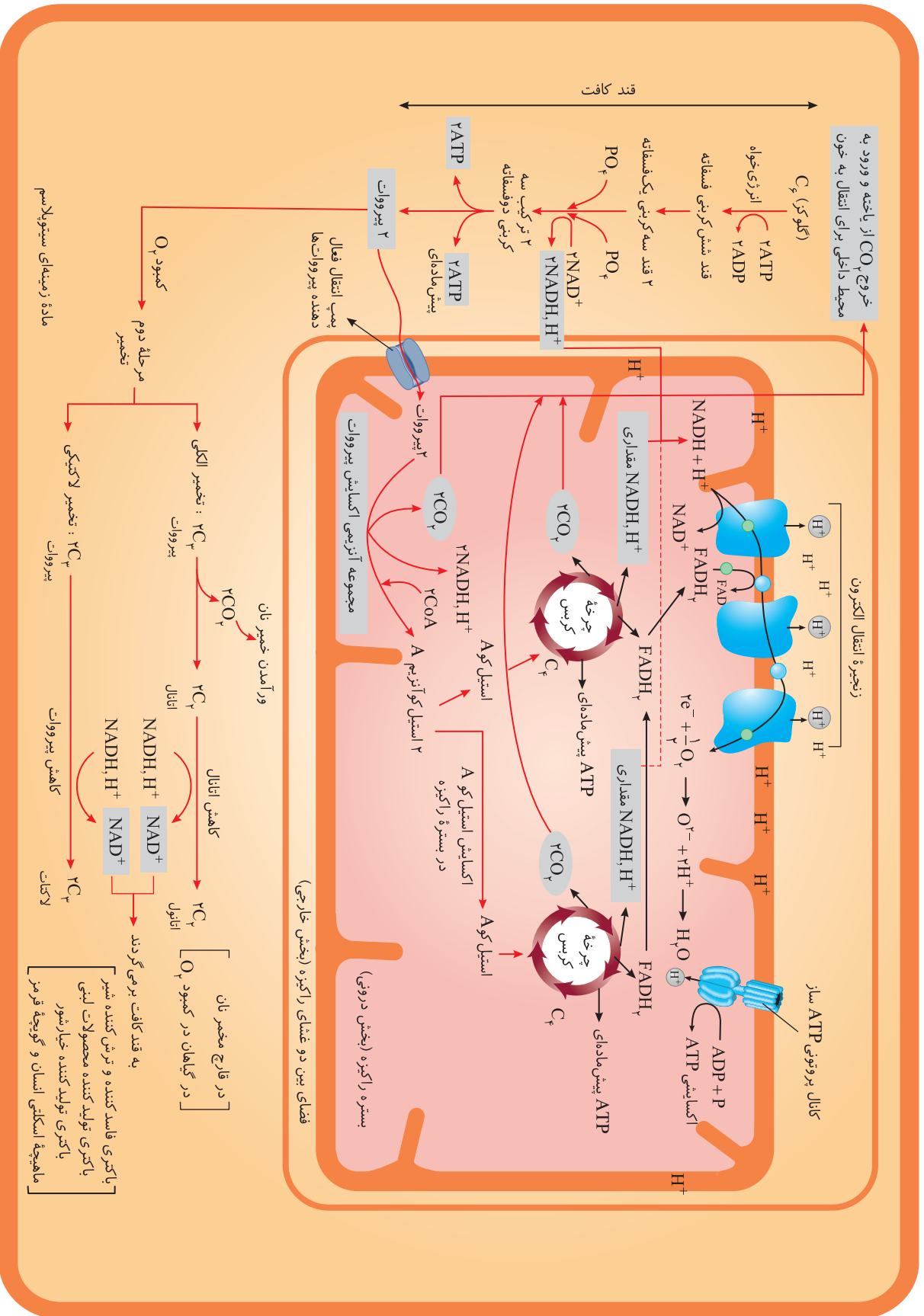
### خلاصه تخمیر لاکتیکی



جدول زیر خلاصه تخمیر لاکتیکی را با پیش‌ماده و محصولات هر مرحله نشان می‌دهد:

مراحل تخمیر لاکتیکی	محل واکنش	واکنش	پیش‌ماده‌ها	محصولات	گیرنده الکترون و پروتون
مرحله اول (قندکافت)	ماده زمینهای سیتوپلاسم	$C_6 \xrightarrow{2ATP} 2C_3$ $2C_3 \xrightarrow{2NADH, H^+}$	$C_6$ (گلوکز) $2ADP - 2NAD^+$	پیرووات ( $2C_3$ ) $2ATP$ $2(NADH, H^+)$	$2NAD^+$
مرحله دوم	ماده زمینهای سیتوپلاسم	$2C_3 \xrightarrow{2NADH, 2H^+} 2C_3$ $2C_3 \xrightarrow{2NAD^+}$	پیرووات $2C_3$ $2NADH, H^+$	لاکتات $2C_3$ $2NAD^+$	پیرووات‌ها

# خلاصه انواع تنفس یاخته‌ای در باخته



در فارغ مخمر نان  
در گیاهان در کمیودوم O<sub>2</sub>  
به قند کافت برمی گردند

باکتری فاسد کننده و ترش کننده شیر  
باکتری تولید کننده محصولات لبنی  
باکتری تولید کننده خیار شور  
ماهیچه اسکلتی انسان و گویچه قرمز

نکاتی از تخمیر

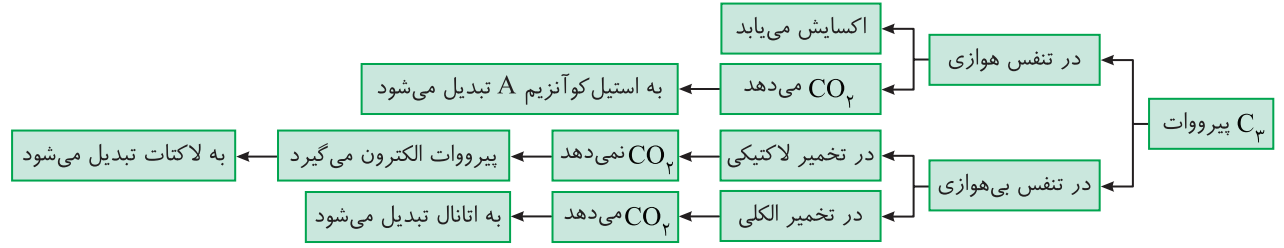
- ۱) در تخمیر الکلی و لاکتیکی برخلاف تنفس هوازی، گیرنده نهایی الکترون و پروتون، **یک ماده آن** می‌باشد. (در تخمیر،  $NAD^+$  به  $NADH$  یا  $NADPH$  پذیرنده آنجاست)
- ۲) در تخمیر الکلی و تنفس هوازی برخلاف تخمیر لاکتیکی،  $CO_2$  تولید می‌شود. (عدم تولید  $CO_2$  فقط در تنفس لاکتیکی دیده می‌شود).
- ۳) در هر نوع تخمیر، مراحل بعد از قند کافت، قدرت تولید ATP ندارند.
- ۴) **در صورت نبودن**  $O_2$  کافی به عنوان آخرین پذیرنده الکترون و پروتون واکنش‌های تنفس هوازی، زنجیره انتقال الکترون در یاخته کارآمد نمی‌باشد. به همین دلیل فرایندهای تخمیر، به سمت گرفتن الکترون و پروتون می‌روند.
- ۵) در تنفس هوازی، مرحله‌ای که تولید  $CO_2$  می‌کنند به تولید  $NADH$  نیز می‌پردازند ولی در تخمیر الکلی،  $CO_2$  تولید می‌شود و سپس با تجزیه  $NADH$ ، مولکول  $NAD^+$  تولید می‌شود. (تولید  $CO_2$  در تنفس به هوازی همراه با تولید  $NADH$  نمی‌باشد).
- ۶) تارهای ماهیچه اسکلتی، گویچه‌های قرمز خونی، قارچ‌های مخمر و یاخته آبکشی بالغ در گیاهان، با اینکه مربوط به جاندار یوکاریوتی هستند ولی قدرت انجام تخمیر بی‌هوازی دارند. (گویچه‌های قرمز و یاخته آبکشی بالغ فاقد راکتیزه می‌باشند).
- ۷) گیاهانی که به‌طور طبیعی در شرایط غرقابی رشد می‌کنند، هم تولید هورمون اتیلن در آن‌ها بالاست و هم با ایجاد بافت‌های پارانشیمی هوادار یا شش ریشه‌ها که در درختان حرا دیده می‌شود، سازوکارهایی برای تأمین اکسیژن فراهم کرده‌اند. البته هر دو نوع تخمیر الکلی و لاکتیکی در موارد کمبود اکسیژن در گیاهان مختلف دیده می‌شود که تجمع **الکل یا لاکتیک اسید** در یاخته گیاهی، سبب مرگ می‌شود. به همین دلیل این محصولات سریعاً باید از یاخته دور شوند.

- الف) واکنش‌های تخمیر الکلی در تجزیه پیرووات به اتانال
- ب) واکنش تبدیل پیرووات به استیل کوآنزیم A در تنفس هوازی
- ج) واکنش تبدیل ماده شش کربنه به پنج کربنه در چرخه کربس
- د) واکنش تبدیل ماده پنج کربنه به چهار کربنه در چرخه کربس
- ه) تجزیه بی‌کربنات و  $HbCO_2$  (هموگلوبین ترکیب شده با  $CO_2$ ) در مویرگ مجاور شش‌های انسان برای خروج  $CO_2$  تنفسی.
- و) تبدیل اسید  $C_4$  به  $CO_2$  و اسید  $C_3$  در غلاف آوندی گیاهان  $C_4$  (فصل ۶)
- ز) تبدیل اسید  $C_4$  به  $CO_2$  و اسید  $C_3$  در گیاهان CAM (فصل ۶)
- ح) آزاد شدن  $CO_2$  از ماده دو کربنی در راکتیزه در انتهای تنفس نوری (فصل ۶)

- ۱) مرحله آخر قندکافت
  - ۲) مرحله‌ای از چرخه کربس
  - ۳) واکنش‌های مرتبط با زنجیره انتقال الکترون راکتیزه (ATP آب‌یخ)
  - ۴) تولید ATP نوری در واکنش‌های نوری فتوسنتز (فصل ۶)
  - ۵) تجزیه کراتین فسفات و تولید کراتین
- ۹) واکنش‌هایی که به تولید ATP می‌انجامند

- در تنفس هوازی
- با الکترون‌گیری  $O_2$  معدنی
- در سطح درونی راکتیزه در پمپ اول زنجیره انتقال الکترون
- ۱۰) واکنش‌های بازسازی  $NAD^+$
- در تنفس بی‌هوازی
- تخمیر الکلی
- تخمیر لاکتیکی
- همراه با تولید لاکتات از پیرووات
- همراه با تولید اتانول از اتانال
- در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم
- همراه با تولید لاکتات از پیرووات

- ۱۱) مرحله دوم هر تخمیری، فرایندی از نوع الکترون‌گیری یا کاهش برای دوباره‌سازی  $NAD^+$  در ماده زمینه‌ای سیتوپلاسم می‌باشد.
- ۱۲) **اکسایش یا الکترون‌دهی پیرووات** مربوط به تنفس هوازی در بخش درونی راکتیزه برای ایجاد استیل کوآنزیم A می‌باشد.
- ۱۳) **کاهش یا الکترون‌گیری پیرووات** مربوط به تخمیر لاکتیکی در سیتوپلاسم می‌باشد که به تولید لاکتات یا لاکتیک اسید می‌انجامد.
- ۱۴) در تخمیر لاکتیکی عدد اکسایش کربن در لاکتات از پیرووات کمتر می‌باشد و در تخمیر الکلی، عدد اکسایش اتانول از اتانال کمتر می‌باشد چون شکل کاهش یافته ماده قبلی می‌باشد.
- ۱۵) واکنش‌هایی که منجر به آزادسازی  $CO_2$  از پیرووات می‌شود را هم در **تنفس هوازی** و همراه **اکسایش** آن برای تبدیل به استیل کوآنزیم A و هم در **تخمیر الکلی** و همراه با **تولید اتانال** می‌توان مشاهده کرد.



۱۶) جدول مقایسه تخمیر الکلی و لاکتیکی به صورت زیر می باشد:

نوع تخمیر	نوع جاندار	ماده نهایی الکترون گیرنده از NADH	بازده نهایی محصولات
الکلی	قارچ تولید نان	اتانال دو کربنه	$2C_2H_5OH + 2CO_2 + 2ATP$ اتانول
لاکتیکی	باکتری تولید محصولات لبنی باکتری فاسدکننده شیر باکتری تولید خیارشور ماهیچه اسکلتی انسان (گلوبینهای قرمز خون Rbc)	پیرووات سه کربنه	$2C_3H_4O_3 + 2ATP$ لاکتات

تست ۱۷) در تخمیر لاکتیکی ..... تخمیر الکلی، ..... تولید نمی شود.

۱) برخلاف - ATP (۲) همانند -  $NAD^+$  (۳) همانند - ماده دو کربنه (۴) برخلاف -  $CO_2$   
در تخمیر لاکتیکی،  $CO_2$  تولید نمی شود ولی در مرحله دوم هر دو تخمیر الکلی و لاکتیکی، تولید ATP وجود ندارد.  $NAD^+$  در هر تخمیری دوباره سازی می شود ولی تولید ماده دو کربنه ویژه تخمیر الکلی است.

پاسخ ۴

تست ۱۸) در تار ماهیچه ای، در صورت وجود اکسیژن کافی، پیرووات در ..... به ..... تبدیل می شود.

۱) ماده زمينه ای سیتوپلاسم - لاکتیک اسید (۲) ماده زمينه ای سیتوپلاسم - بنیان استیل (۳) بستره راکیزه - لاکتیک اسید (۴) بستره راکیزه - بنیان استیل  
اگر  $O_2$  محیط کافی باشد، یاخته پس از قندکافت، از اکسایش پیرووات در راکیزه ها، استیل CoA ایجاد می کند که این فرایند در بستره یا بخش درونی راکیزه ها رخ می دهد.

پاسخ ۴

تست ۱۹) در تخمیر الکلی، پذیرنده اولیه الکترون ..... است که در ..... بازسازی شده است.

۱) ترکیب دو کربنی - مرحله آخر قندکافت (۲) ترکیب دو کربنی - ماده زمينه ای سیتوپلاسم (۳)  $NAD^+$  - در ضمن مصرف اتانال (۴)  $NAD^+$  - ضمن ایجاد اتانال  
وقتی صحبت کلی از تخمیر می شود، دقت کنید که واکنش های قندکافت نیز مرحله اول تخمیر به حساب می آیند. در هر نوع تنفس یاخته ای،  $NAD^+$  اولین مولکول گیرنده الکترون می باشد. همان طور که می دانید  $NAD^+$  در مرحله دوم تخمیر الکلی و هم زمان با تبدیل اتانال به اتانول دوباره سازی می شود. گیرنده های الکترونی:

پاسخ ۳

نوع تنفس	اولین نوع گیرنده الکترونی	دومین نوع گیرنده الکترونی	سومین نوع گیرنده الکترونی
هوازی	$NAD^+$ قندکافت	FAD در چرخه کربس	$O_2$ در انتهای زنجیره انتقال الکترون
تخمیر الکلی	$NAD^+$ قندکافت	اتانال دو کربنی	ندارد
تخمیر لاکتیکی	$NAD^+$ قندکافت	پیرووات سه کربنی	ندارد

تست ۲۰) کدام در انجام مرحله دوم فرایند تخمیر مؤثر نیست؟

۱) تراکم خیلی زیاد  $NADH, H^+$  (۲) تراکم زیاد  $NAD^+$  (۳) وجود یک پذیرنده آلی هیدروژن (۴) فقدان آخرین پذیرنده الکترون  
وقتی تراکم  $NAD^+$  در یاخته زیاد است دیگر نیاز به تخمیر نیست زیرا هدف اصلی فرایند مرحله دوم تخمیر، تولید  $NAD^+$  می باشد. تراکم خیلی زیاد  $NADH$  در یاخته، فقدان آخرین پذیرنده الکترون یعنی اکسیژن و وجود پذیرنده آلی الکترونی باعث می شود که تنفس بی هوازی به صورت تخمیر ادامه یابد.

پاسخ ۲

تست ۲۱) در تخمیر لاکتیکی ..... نمی شود.

۱)  $NADH$  به  $NAD^+$ ، تبدیل (۲) ترکیب سه کربنه، کاهیده (۳) کربن دی اکسید از ترکیب سه کربنه، تولید (۴) ترکیب سه کربنه دو فسفات از ترکیب سه کربنه یک فسفات، تولید  
هدف اصلی از انجام تخمیر لاکتیکی، تولید  $NAD^+$  از  $NADH, H^+$  می باشد که طی آن خود پیرووات (ترکیب سه کربنه) کاهش می یابد و ترکیب سه کربنی دیگری به نام لاکتات را تولید می کند، اما طی این واکنش ها،  $CO_2$  ای تولید نمی شود. (گزینه ۴) در قندکافت که مرحله اول تخمیر است رخ می دهد.

پاسخ ۳

تست ۲۲) در مرحله دوم تخمیر لاکتیکی برخلاف مرحله دوم تخمیر الکلی، ..... تولید نمی شود.

۱) ATP (۲)  $NAD^+$  (۳)  $NADH+H^+$  (۴)  $CO_2$   
تخمیر لاکتیکی در نهایت دو تا لاکتات سه کربنه می سازد و  $CO_2$  در آن تولید نمی شود ولی هر دو تخمیر دوباره سازی  $NAD^+$  دارند.

پاسخ ۴

تست ۲۳

در شرایطی که یک یاخته با مصرف گلوکز، بسازد، این واکنش توانایی تولید ..... را ندارد.

(۱) لاکتات -  $NAD^+$  (۲) اتانول -  $NADH$  (۳) پیرووات - کربن دی اکسید (۴) استیل کوآنزیم A - لاکتات

پاسخ ۴

تولید استیل CoA در یک واکنش، نشان دهنده **هوازی** بودن تنفس می باشد که در این نوع تنفس اتانول و لاکتات تولید نمی شود. (گزینه ۱) و (۲) در مورد تخمیرها متنوع و گریز (۳) در تنفس هوازی رخ می دهد.

تست ۲۴

در همه باکتری ها ..... یاخته های ماهیچه ای انسان ..... ساخته می شود.

(۱) همانند -  $CO_2$  (۲) همانند -  $NADH$  (۳) برخلاف - اتانول (۴) برخلاف - گلوکز

پاسخ ۲

همه یاخته های زنده طبیعت می توانند در فندکافت یا واکنش های فندکافت،  $NADH$  بسازند ولی ساخت گلوکز مخصوص فتوسنتزکننده هاست، تولید  $CO_2$  و اتانول نیز در تخمیر لاکتیکی صورت نمی گیرد.

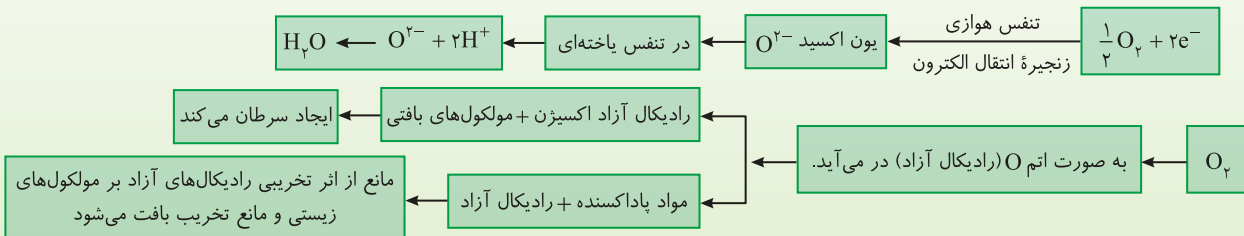
### سلامت بدن (پاداکننده ها)

**تعریف رادیکال های آزاد:** رادیکال های آزاد، اتم ها یا ترکیباتی با الکترون های جفت نشده می باشند که قدرت واکنش پذیری بالایی دارند. این رادیکال های آزاد می توانند در واکنش با مولکول های تشکیل دهنده بافت های بدن به آن ها آسیب برسانند. لازم به ذکر می باشد که رادیکال های آزادی که در راکیزه ایجاد می شوند، مانند سایر رادیکال های آزاد می توانند با مولکول های تشکیل دهنده بافت های بدن واکنش دهند و الکترون های خود را جفت کنند. در این صورت احتمال ایجاد سرطان را بالا می برند. در مرحله آخر تنفس هوازی، مولکول های اکسیژن ابتدا به صورت اتم اکسیژن درمی آیند و سپس اغلب ابتدا با الکترون های آزاد ترکیب می شوند و به صورت یون اکسید دو بار منفی ( $O^{2-}$ ) درمی آیند، گاهی ممکن است قبل از پیوند این یون ها با پروتون ها برای تشکیل آب، درصدی از این اکسیژن های اتمی، تبدیل به رادیکال آزاد شده و با مولکول های بدن واکنش دهند و ایجاد بیماری کنند. به همین دلیل راکیزه ها نیز مانند سایر اندامک ها به مواد پاداکننده ای مثل کاروتنوئیدها یا رنگیزه های درون واکنش ها نیاز دارند تا با واکنش بین رادیکال های آزاد و پاداکننده ها، از اثر تخریبی این رادیکال ها ممانعت به عمل بیاید.

### چند نکته مهم در بررسی تست ها

- عزیزان توجه کنید که انواع مختلفی رادیکال آزاد وجود دارد که یکی از آن ها رادیکال آزاد اکسیژن می باشد.
- از کتاب دهم به یاد دارید که مواد رنگی درون واکوئول ها (آنتوسیانین ها) و مواد رنگی پلاست های رنگی (کاروتنوئیدها) مثل کلروفیل و...، از مواد پاداکننده ای هستند که در پیشگیری از سرطان و بهبود کارکرد مغز و اندام های دیگر نقش مثبت دارند. به همین دلیل خوردن میوه و سبزیجات، در حفظ سلامت بدن مؤثر است.

۳) مقصد یون اکسید ( $O^{2-}$ ) تولید شده در تنفس هوازی در بدن:



### تجمع رادیکال های آزاد

اگر به هر دلیلی، سرعت تشکیل رادیکال های آزاد از سرعت مبارزه با آن ها یا خنثی کردن آن ها توسط موادی مثل پاداکننده ها، بیشتر باشد، تجمع رادیکال آزاد در راکیزه ایجاد شده که در این صورت راکیزه تخریب شده و در ادامه سبب نابودی یاخته می شود. عواملی از نوع نقص های ژنی یا مصرف زیاد الکل سبب می شود که مبارزه راکیزه ها با رادیکال های آزاد و ترکیب شدن آن ها با مواد پاداکننده به مشکل برخورد کند و در نتیجه سرعت تخریب یاخته و بافت در بدن زیاد شود که در ادامه به بررسی این عوامل می پردازیم.

### • اثر الکل بر ایجاد رادیکال آزاد

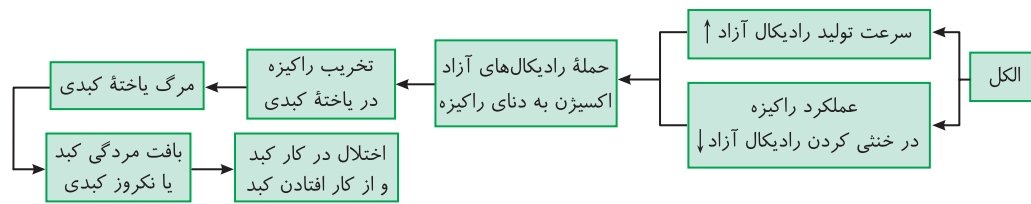
نوشیدن مشروبات الکلی، سبب افزایش سرعت تشکیل رادیکال های آزاد اکسیژن در راکیزه های یاخته های کبدی می شود. در این صورت راکیزه قدرت ترکیب کردن همه اکسیژن ها با پروتون و تشکیل آب ندارد. با حمله رادیکال های آزاد حاصل از اکسیژن درون راکیزه به DNA حلقوی این اندامک، ساخت اغلب پروتئین های تنفس یاخته ای و سایر فعالیت های راکیزه مختل می شود. از بین رفتن DNA راکیزه سبب مرگ یاخته های کبدی و نکرور یا مرگ بافت کبدی می شود. به همین دلیل یکی از اثرات کشنده اعتیاد به الکل، اختلال در کار کبد می باشد.

### نکته

الکل علاوه بر اینکه سرعت تشکیل رادیکال آزاد از اکسیژن را بالا می برد، مانع خنثی شدن این رادیکال های آزاد نیز می شود یعنی مانع ترکیب آن ها با مواد پاداکننده می شود. به همین دلیل مصرف زیاد الکل سبب اختلال در بقای دمای راکیزه و مرگ یاخته کبدی می شود و احتمال سرطان زایی را بالا می برد.



## اثر الکل بر ایجاد رادیکال آزاد حاصل از اکسیژن‌های ترکیب نشده با الکترون:



### یادآوری

در سال قبل آموختید که کمترین مقدار الکل (اتنول) نیز بدن را تحت تأثیر قرار می‌دهد چون هم از دستگاه گوارش به سرعت جذب می‌شود و هم روی مغز اثر می‌گذارد تا علاوه بر دوپامین انوعی از ناقل‌های تحریک‌کننده و بازدارنده را ترشح کند. همچنین این ماده در ایجاد گامت نامناسب و تشکیل ناهنجاری کروموزومی بین نسل‌ها اثرگذار است.

### ● تأثیر نقص ژنی در ایجاد رادیکال‌های آزاد

همان‌طور که می‌دانید ساخت برخی پروتئین‌های مورد نیاز تنفس یاخته‌ای بر عهده ژن‌های راکیزه و برخی بر عهده هسته می‌باشد. پروتئین‌هایی که باعث انتقال فعال  $H^+$  می‌شوند نیز از همین پروتئین‌ها می‌باشند. مثلاً برخی از آن‌ها مثل پمپ سوم، سبب ورود الکترون‌ها به بستره و ترکیب آن‌ها با اکسیژن شده و سپس ترکیب یون اکسید با پروتون‌ها باعث کامل شدن فرایند ایجاد آب می‌شود. در برخی موارد، **نقص ژنی** مربوط به ساخت **پروتئین‌های زنجیره انتقال الکترون** رخ می‌دهد و پروتئین‌های **غیرعادی** می‌سازد، راکیزه‌ای که این پروتئین‌های معیوب را دارد، نمی‌تواند سبب ایجاد یون اکسید  $O_2^-$  و ترکیب آن‌ها با پروتون شود، در نتیجه این راکیزه‌ها، عملکرد تنفسی مناسب و قدرت کافی برای خنثی کردن رادیکال‌های آزاد نخواهند داشت.

### توقف انتقال الکترون و نکات مهم در بررسی تست‌ها

۱) مواد سمی **زیادی** وجود دارند که با مهار **یک یا تعدادی** از واکنش‌های تنفس **هوازی**، سبب توقف این نوع تنفس و تولید ATP اکسایشی شده که به دنبال آن مرگ یاخته‌ای و در صورت تأثیر وسیع مرگ ایجاد می‌شود.  
 ۲) موادی سمی مثل سیانیدهای آزاد شده از ترکیبات سیانیددار و مونواکسید کربن می‌توانند زنجیره انتقال الکترون راکیزه‌ای را مختل کنند و **مانع رسیدن الکترون به اکسیژن** شوند. این مواد سمی مانع تولید یون اکسید می‌شوند و در ادامه سبب توقف زنجیره انتقال الکترون و توقف تولید ATP اکسایشی می‌شوند.  
 ۳) **سیانید** نوعی ماده **سمی** است که **چپ سوم** زنجیره انتقال الکترون را مهار کرده و مانع واکنش **نهایی** آن برای انتقال الکترون‌ها به مولکول اکسیژن و تشکیل  $O_2^-$  می‌شود. در حقیقت سیانیدها مستقیماً **مانع ایجاد یون اکسید** می‌شوند ولی به‌طور غیرمستقیم باعث توقف زنجیره انتقال الکترون شده و در نهایت تولید ATP اکسایشی را مهار می‌کنند که در نهایت سبب مرگ یاخته‌ای و یا حتی مرگ جاندار می‌شوند.

### نکته مهم

چون سیانیدها، **مراحل نهایی** زنجیره انتقال الکترون در رسیدن الکترون به  $O_2$  را متوقف می‌کنند، پس در دوباره‌سازی  $NAD^+$  یا FAD که در مراحل ابتدایی زنجیره صورت می‌گیرد، مستقیماً تأثیری ندارند.

۴) **کربن مونواکسید**، گازی سمی است که وقتی از طریق دود سیگار یا دود خارج شده از خودروها با تنفس وارد خون شود، تمایل زیادی به ترکیب شدن **پایدار** با هموگلوبین دارد. **این گاز سمی به محل اتصال اکسیژن در هموگلوبین متصل می‌شود ولی برخلاف اکسیژن اتصال پایدار** با این مولکول پروتئینی دارد و به سختی از آن جدا می‌شود و شخص را دچار گاز گرفتگی می‌کند. اتصال این گاز به هموگلوبین سبب عدم اتصال مناسب اکسیژن به هموگلوبین می‌شود. با کمبود اکسیژن خون و اکسیژن بافت‌ها، واکنش‌های تنفس هوازی دچار اختلال می‌شود و شخص دچار کمبود انرژی می‌شود.  
 ۵) وجود کربن مونواکسید، سبب **توقف واکنش‌های مربوط به انتقال الکترون به اکسیژن** نیز می‌شود و با ایجاد اشکال در زنجیره انتقال الکترون تولید ATP اکسایشی را نیز کاهش می‌دهد. در حقیقت مونواکسید کربن، همانند سم سیانید، مانع تولید یون اکسید تنفسی  $O_2^-$  می‌شود. این مواد نه تنها احتمال ایجاد رادیکال آزاد از اکسیژن را به‌طور غیرمستقیم بالا می‌برند بلکه کارایی تنفسی جاندار را کاهش می‌دهند.

عامل مؤثر	اثر در تولید رادیکال آزاد اکسید	اثر در خنثی کردن یون اکسید $O_2^-$
الکل	سرعت تولید رادیکال آزاد از اکسیژن را بالا می‌برد.	قدرت راکیزه را در خنثی کردن $O_2^-$ پایین می‌آورد.
نقص ژنی	کتاب به این موضوع اشاره‌ای نکرده است.	با تولید پروتئین معیوب در زنجیره انتقال الکترون، مانع ترکیب یون اکسید $O_2^-$ با پروتون می‌شود و مقدار بیشتری از اتم‌های اکسیژن می‌توانند به رادیکال آزاد تبدیل شوند.
ترکیبات سیانیددار و مونواکسید کربن	مانع مرحله نهایی الکترون‌رسانی به $O_2$ شده و مانع ایجاد یون اکسید می‌شوند. یعنی سبب توقف زنجیره انتقال الکترون و ATP‌سازی می‌شوند.	-

## نکته

کربن مونواکسید از روش دیگری هم باعث کاهش کارایی تنفس می‌شود که ارتباطی به رادیکال‌های آزاد ندارد.

## تست ۲۵

چند مورد زیر درباره عوامل مؤثر در تنفس یاخته‌ای، نادرست می‌باشد؟

- (الف) مونواکسید کربن و سیانید از عوامل ایجادکننده یون اکسید به عنوان رادیکال‌های آزاد در تنفس یاخته‌ای می‌باشند.  
 (ب) سیانید در انتقال الکترون بین پمپ‌های زنجیره انتقال الکترونی راکیزه اختلال ایجاد می‌کند.  
 (ج) تولید اتانول زیاد برخلاف ترکیبات سیانیددار، در گیاه سبب مرگ یاخته‌ای می‌شود.  
 (د) مونواکسید کربن با اتصال به هموگلوبین سبب توقف واکنش انتقال الکترون به اکسیژن می‌شود.

(۱) مورد ۱ (۲) مورد ۲ (۳) مورد ۳ (۴) مورد ۴

## پاسخ ۳

موارد (اف)، (ب) و (ر) نادرست هستند. در گیاهان تجمع اتانول و لاکتیک‌اسید سبب مرگ یاخته‌های گیاهی می‌شوند ولی ترکیبات سیانیددار گیاهی برای خود گیاه مضر نمی‌باشد (درستی ج).

**تله‌های تستی** الف) مونواکسید کربن و سیانیدها مانع ایجاد یون اکسید می‌شود (که ایراد یون رادیکال آزاد نمی‌باشد). این مواد مانع عمل زنجیره انتقال الکترون شده و از انتقال الکترون به اکسیژن و تولید یون اکسید اکسیژنی ممانعت می‌کنند. / ب) سیانیدها در مراحل **نهایی** انتقال الکترون در زنجیره انتقال الکترونی، مهار یا اختلال ایجاد می‌کنند ولی در مراحل اولیه که الکترون بین پمپ‌ها منتقل می‌شود اثر زیادی ندارند. / د) مونواکسید کربن دو اثر دارد، یکی با اتصال به هموگلوبین و ظرفیت حمل  $O_2$  خون را کاهش می‌دهد و دیگری توقف در زنجیره انتقال الکترون برای رساندن الکترون‌ها به اکسیژن عمل می‌کند (توجه داشته باشید که ایراد **رو مکانیسم**، متفاوت هستند و ربطی به هم ندارند).

## تست ۲۶

در انسان، محصول نهایی نوعی تنفس یاخته‌ای سبب افزایش احتمال حمله رادیکال‌های آزاد به DNA حلقوی می‌شود، در این نوع تنفس چند واکنش زیر رخ نمی‌دهد؟

- الف) تولید ATP در عدم وجود اکسیژن  
 ب) بازدهی ATP و  $CO_2$  در مرحله دوم تنفس آن  
 ج) تولید ماده‌ای که سبب درد ماهیچه‌ای در ورزش طولانی می‌شود. / د) تولید  $FADH_2$  و  $NADH_2$  در حین اکسایش ماده دو کربنی

(۱) مورد ۳ (۲) مورد ۲ (۳) مورد ۴ (۴) مورد ۱

## پاسخ ۱

موارد (ب)، (ج) و (د) رخ نمی‌دهند.

منظور سؤال **تخمیر الکلی** است که الکل حاصله می‌تواند با افزایش تولید رادیکال‌های آزاد سبب تخریب دمای راکیزه و مرگ یاخته کبدی شود.

**تله‌های تستی** الف) رخ می‌دهد. مرحله اول تخمیر، همان قندکافت است که بدون نیاز به  $O_2$  می‌تواند ATP در سطح پیش‌ماده ایجاد کند. / ب) رخ نمی‌دهد. مرحله دوم تخمیر یعنی مراحل پس از قندکافت، که تولید ATP در این مراحل صورت نمی‌گیرد.  
 نکته: تمام ATP محصول تخمیر در مرحله اول و همه  $NAD^+$  محصول آن در مرحله دوم ایجاد می‌شوند.

ج) رخ نمی‌دهد. تجمع لاکتیک‌اسید در ماهیچه سبب درد ماهیچه‌ای می‌شود که در تخمیر لاکتیکی ایجاد می‌شود نه الکلی!! / د) رخ نمی‌دهد. ایجاد  $FADH_2$  و  $NADH_2$  به‌طور هم‌زمان در واکنش‌های اکسایش ماده دو کربنی استیل در چرخه کربس رخ می‌دهد ولی در تخمیر که بی‌هوازی است تولید  $FADH_2$  صورت نمی‌گیرد.

## تست ۲۷

سیانید به کدام طریق بر یاخته جانوری تأثیر می‌گذارد؟

- (۱) آنزیم ATP ساز موجود در غشای خارجی راکیزه (میتوکندری) را غیرفعال می‌سازد.  
 (۲) مانع از پمپ شدن یون‌های هیدروژن به فضای داخلی راکیزه (میتوکندری) می‌شود.  
 (۳) از تشکیل آب در بخش داخلی راکیزه (میتوکندری) ممانعت به عمل می‌آورد.  
 (۴) ابتدا بر تجزیه  $NADH$  تأثیر می‌نماید.

سیانیدها مانع ورود الکترون‌ها به بستره شده و تولید آب را مختل می‌کنند.

## پاسخ ۳

**تله‌های تستی** گزینه (۱): این آنزیم‌ها در غشای درونی راکیزه قرار دارند. / گزینه (۲): سیانید روی ورود  $H^+$  نقشی ندارد. / گزینه (۴): سیانید روی تجزیه  $NADH$  اثری ندارد.

## یادآوری

- (۱) به یاد دارید که **سیانیدها و آرسنیک‌ها** موادی سمی هستند که سبب **پرسیدن جایگاه فعال آنزیم‌ها** می‌شوند و اتصال پیش‌ماده به آنزیم را مهار می‌کنند.  
 (۲) برخی گیاهان، **ترکیبات سیانیددار** تولید می‌کنند که **با توقف در تنفس یاخته‌ای**، سبب مرگ یا بیماری در گیاه‌خواران می‌شوند. جالب است بدانید که این ترکیبات سیانیددار روی تنفس یاخته‌ای خود گیاه اثری ندارد ولی در جانور گیاه‌خوار، این **ترکیبات تجزیه شده** و سیانید سمی جدا شده از آن، سبب توقف تنفس یاخته‌ای در جانور فوق می‌شود (ریست یزرهم).