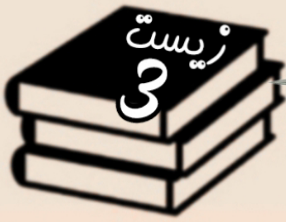
- فصل۵ دوازدهم:

«از ماده به انرژی»



BIOLOGY BOOK

دکتر زهرا همایونی

فصل ۵

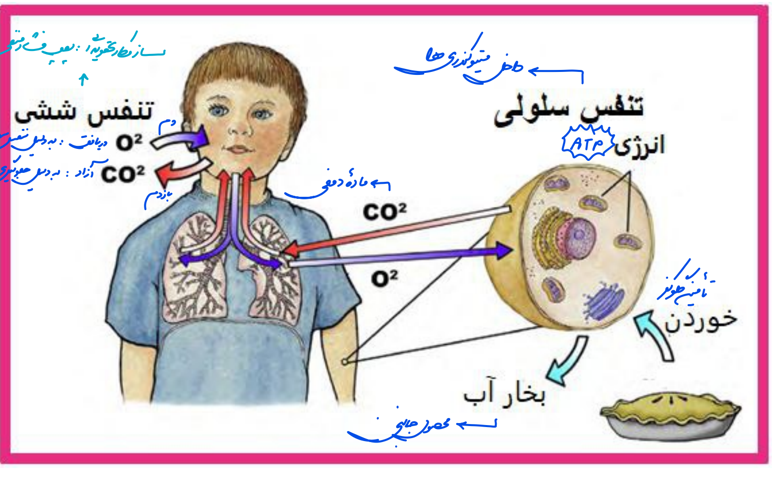
از ماده به انرژی

طرح سؤالات عددی و محاسباتی از مباحث این فصل در همه آزمون‌ها از جمله کنکور سراسری ممنوع است.

اکنون که در حال مطالعه این درس هستید، یاخته‌های بدنتان انرژی مصرف می‌کنند. این انرژی از کجا و چگونه تأمین می‌شود؟

چرا ورزش و فعالیت‌های بدنی شدید، سبب می‌شوند تا احساس گرما کنیم و مقداری آب به شکل عرق از دست بدهیم؟

با همه تفاوت‌هایی که بین ما و زرافه‌ای که در تصویر می‌بینید، وجود دارد؛ انرژی مورد نیاز ما به شیوهٔ یکسانی از غذایی که می‌خوریم تأمین می‌شود. در این فصل به فرایندهای آزاد شدن انرژی از مادهٔ مغذی در یاخته‌ها می‌پردازیم.



- از انرژی (نور خورشید) به ماده (آنزیم) ← فتوسنتز
- از ماده (آنزیم) به انرژی (ATP) ← تنفس سلولی ← همه جانداران

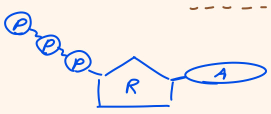
✓ در تنفس سلولی انرژی ذخیره شده در نوعی کربوهیدرات (آنزیم) به انرژی ذخیره شده در نوعی نوکلئوتید (ATP) تبدیل می‌شود.

* در تنفس سلولی ← تعداد محصولات بیشتر از پیش ماده
← و تنوع محصولات کمتر از پیش ماده

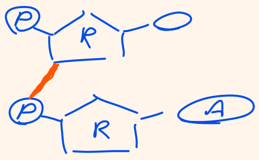
- تنفس سلولی
  - هوازی — در حضور O_2 — در میتوکندری (در یوکاریوت‌ها) (در پروکاریوت‌ها در سیتوپلاسم) — ↑ ATP — تجزیه کامل گلوکز ← 1 گلوکز با 6 کربن به 6 تا CO_2 تجزیه می‌شود.
  - بی‌هوازی — در عدم حضور O_2 — در سیتوپلاسم ← در یوکاریوت و پروکاریوت — ↓ ATP — تجزیه ناقص گلوکز
  ↓ «تخمیر»

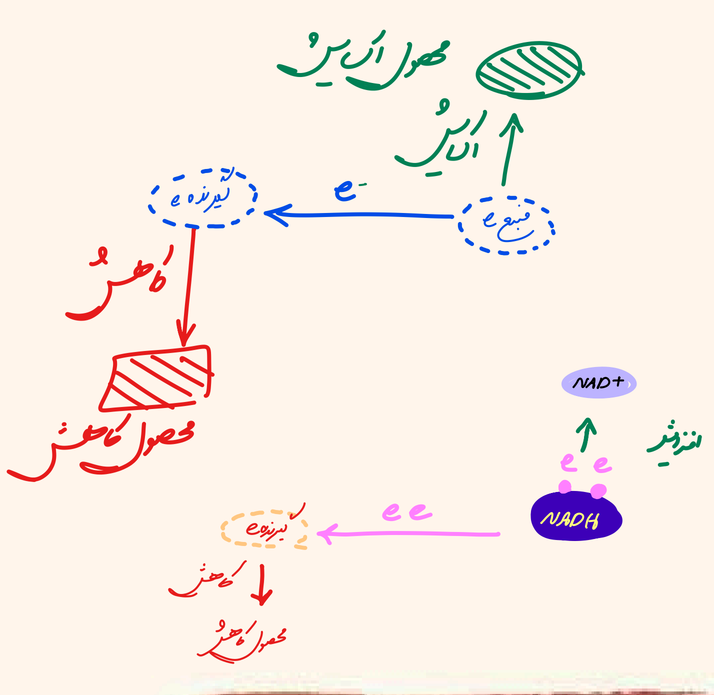
- ATP ← آدنوزین (بخش آلی) ← قند ریبوز + باز آلی آدنین
  ← 3 گروه فسفات (بخش معدنی)

- ATP ← 1 نوکلئوتید 3 فسفاته - حاوی باز دوحلقه‌ای آدنین و قند ریبوز
<آدنوزین تری فسفات>
فاقد پیوند فسفودی استر
* انرژی مصرفی سلول



- NADH ← 2 نوکلئوتید که فسفات‌ها با پیوند اشتراکی به یکدیگر متصل هستند، یکی از آنها باز A دارد
<نیکوتین آمید آدنین دی نوکلئوتید> «1 پیوند فسفودی استر»
* حامل e *





حامل الکترون
NADH
↓
محصول کاهش
<کاهنده>

گیرنده الکترون
NAD^+
↓
محصول اکسایش
<اکسنده>

گفتار ۱ تأمین انرژی

$C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \longrightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O$

(اکسایش — کاهش)

تنفس یاخته‌ای

به یاد دارید چرا به اکسیژن نیاز داریم؟ در کتاب زیست‌شناسی ۱، آموختید که نیاز ما به اکسیژن به علت انجام فرایندی به نام تنفس یاخته‌ای است؛ زیرا در این فرایند ATP تولید می‌شود؛ مثلاً انرژی ذخیره شده در گلوکز در تنفس یاخته‌ای، برای تشکیل مولکول ATP به کار می‌رود (واکنش ۱).

واکنش ۱ـ تنفس یاخته‌ای

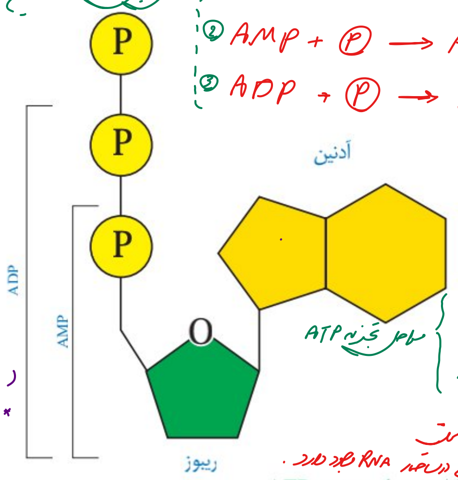
$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + ADP + P(\text{فسفات}) \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + ATP$$

این واکنش **تنفس یاخته‌ای هوازی**[1] را نشان می‌دهد؛ زیرا تجزیهٔ ماده مغذی و تولید ATP با حضور اکسیژن انجام می‌شود. تجزیهٔ ماده مغذی و تولید ATP بدون نیاز به اکسیژن نیز انجام می‌شود که در گفتار ۳ به آن می‌پردازیم.

ATP مولکول پرانرژی

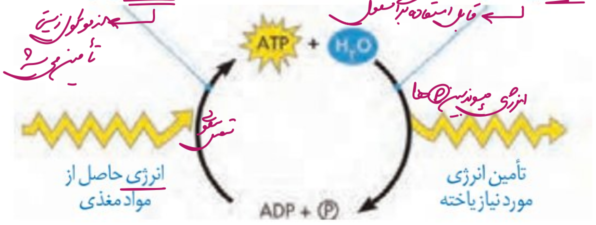
هیچ جانداری نمی‌تواند بدون انرژی زنده بماند، رشد و فعالیت کند. حفظ هریک از ویژگی‌های جانداران مانند رشد و نمو و تولید مثل به در اختیار داشتن ATP وابسته است.

ATP یا **آدنوزین تری فسفات**، شکل رایج و قابل استفادهٔ انرژی در یاخته ها است. این نوکلئوتید از باز آلی آدنین، قند پنج کربنی ریبوز (که با هم آدنوزین نامیده می‌شوند) و سه گروه فسفات تشکیل شده است. افزوده شدن فسفات به آدنوزین در سه مرحله روی می‌دهد. در نتیجه در ابتدا AMP (آدنوزین مونو فسفات)، سپس ADP (آدنوزین دی فسفات) و در نهایت ATP (آدنوزین تری فسفات) تشکیل می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱ـ ساخته شدن ATP

در شکل ۲ تبدیل ATP و ADP را به یکدیگر می‌بینید. تشکیل ATP از ADP، با مصرف انرژی و تبدیل آن به ADP همراه با آزاد شدن انرژی است.



شکل ۲ـ تبدیل ADP و ATP به یکدیگر

روش‌های ساخته شدن ATP: دیدیم که برای ساخته شدن ATP به فسفات نیاز هست. یکی از روش‌های ساخته شدنِ ATP برداشته شدن گروه فسفات از یک ترکیب فسفات‌دار (پیش‌ماده) و

- روش ساخته شدن ATP
  - ① در سطح پیش ماده — در سیتوپلاسم
    - در این روش ADP، فسفات مورد نیاز خود را از یک ماده دیگر می گیرد.
  - ② اکسایشی — در میتوکندری
    - در این روش از انرژی جابجایی e استفاده می شود.
  - ③ نوری — در کلروپلاست
    - در این روش از انرژی نور استفاده می شود.

2 مثال ساخته شدن ATP در سطح پیش ماده:

① $CP + ADP \rightarrow C + ATP$

پیش ماده دهنده P: CP

CP: کراتین فسفات — ADP: آدنوزین دی فسفات (پیش ماده)

C: کراتین — ATP: آدنوزین تری فسفات (محصول)

---

② تولید ATP در سطح پیش ماده در مرحله آخر گلیکولیز

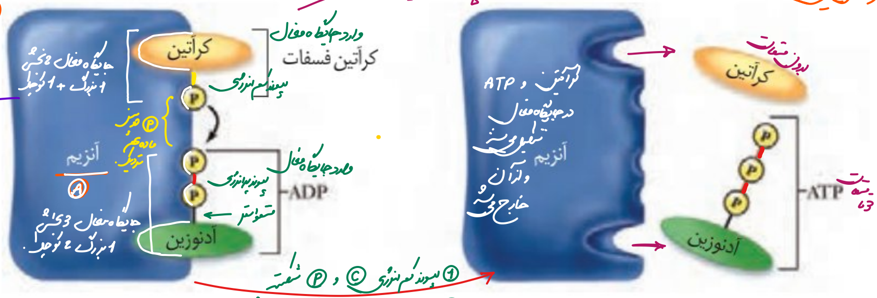
$3C2P + 2ADP \rightarrow 3C + 2ATP$

پیش ماده دهنده P: 3C2P (اسید دو فسفاته)

3C: پیرووات

افزودن آن به ADP است. به همین علت، این روش را **ساخته شدن ATP در سطح پیش‌ماده** می‌نامند.

در کتاب «زیست‌شناسی ۲» با نمونه‌ای از ساخته شدن ATP در سطح پیش‌ماده آشنا شده‌اید، آیا آن را به یاد دارید؟ در آنجا دانستید که ماهیچه‌ها برای انقباض به ATP نیاز دارند و یکی از راه‌های تأمین آن در ماهیچه‌ها، برداشتِ فسفات از مولکولِ کرآتین فسفات و انتقال آن به ADP است (شکل ۳). در این مثال کرآتین فسفات، پیش‌ماده‌ای است که فسفات آن برای ساخته شدن ATP به کار می‌رود.



شکل ۳ـ ساخته شدن ATP در سطح پیش‌ماده

ساخته شدن اکسایشی و ساخته شدن نوری ATP، دو روش دیگرند. در **ساخته شدن اکسایشی**، ATP از یون فسفات و انرژی حاصل از انتقال الکترون‌ها در راکیزه ساخته می‌شود که در ادامهٔ این فصل با آن آشنا می‌شوید. روش دیگر ساخته شدن ATP، **ساخته شدن نوری** است که در سبزدیسه انجام می‌شود (فصل ۶).

پیش‌ماده → محصول

(گیرنده e) $NAD^+ + 2H^+ + 2e^-$ —کاهش→ $NADH + H^+$ (حامل e)

محصول ←اکسایش— پیش‌ماده

✓ تولید NADH (حامل e) ← کاهش ← باعث اکسایش ماده‌ای می‌شود

✓ " " NAD^+ (گیرنده e) ← اکسایش ← " " کاهش ماده‌ای می‌شود.

$$NAD^{+} + 2H^{+} + 2e^{-} \underset{\text{اکسایش}}{\overset{\text{کاهش}}{\rightleftharpoons}} NADH + H^{+}$$

گیرنده e — پروتون — الکترون — حامل e — پروتون

5تا از 3 نوع (محصول اکسایش با فرآورده کاهش)

2تا از 2 نوع (محصول کاهش با فرآورده اکسایش)

خنثی — یون: 2 نوع +، 1 نوع -

خنثی — 1 نوع یون +

تولید NADH باعث کاهش pH محیط می‌شود.

گیرنده e: NAD^+ → NAD → NAD^- → $NADH + H^+$ (e^-، e^-، H^+، H^+)

اولین e جهت خنثی‌سازی

دومین e جهت باردار شدن (اتصال به پروتون)

اولین H^+، جهت خنثی شدن e

دومین H^+ با NADH واکنش نمی‌دهد، بلکه جهت برگشت‌پذیری واکنش

ATP ← انرژی

← نوکلئوتید 3 فسفاته - قند R، باز A

← فسفودی‌استر ندارد

1 NADH ≃ 3 ATP

NADH ← حامل e (2تا) (انرژی معادل 3تا ATP)

← 2 نوکلئوتید 1 فسفاته - قند R - باز A

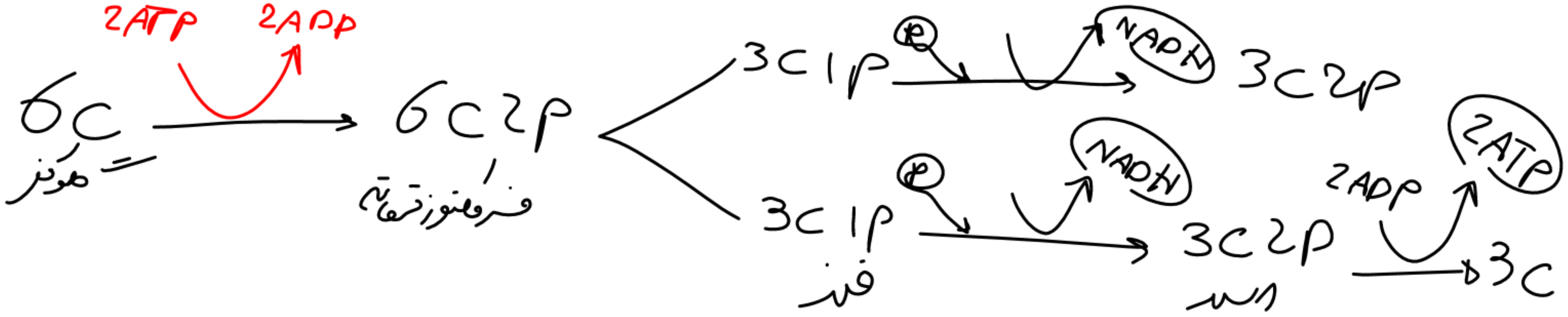
← 1 فسفودی‌استر دارد

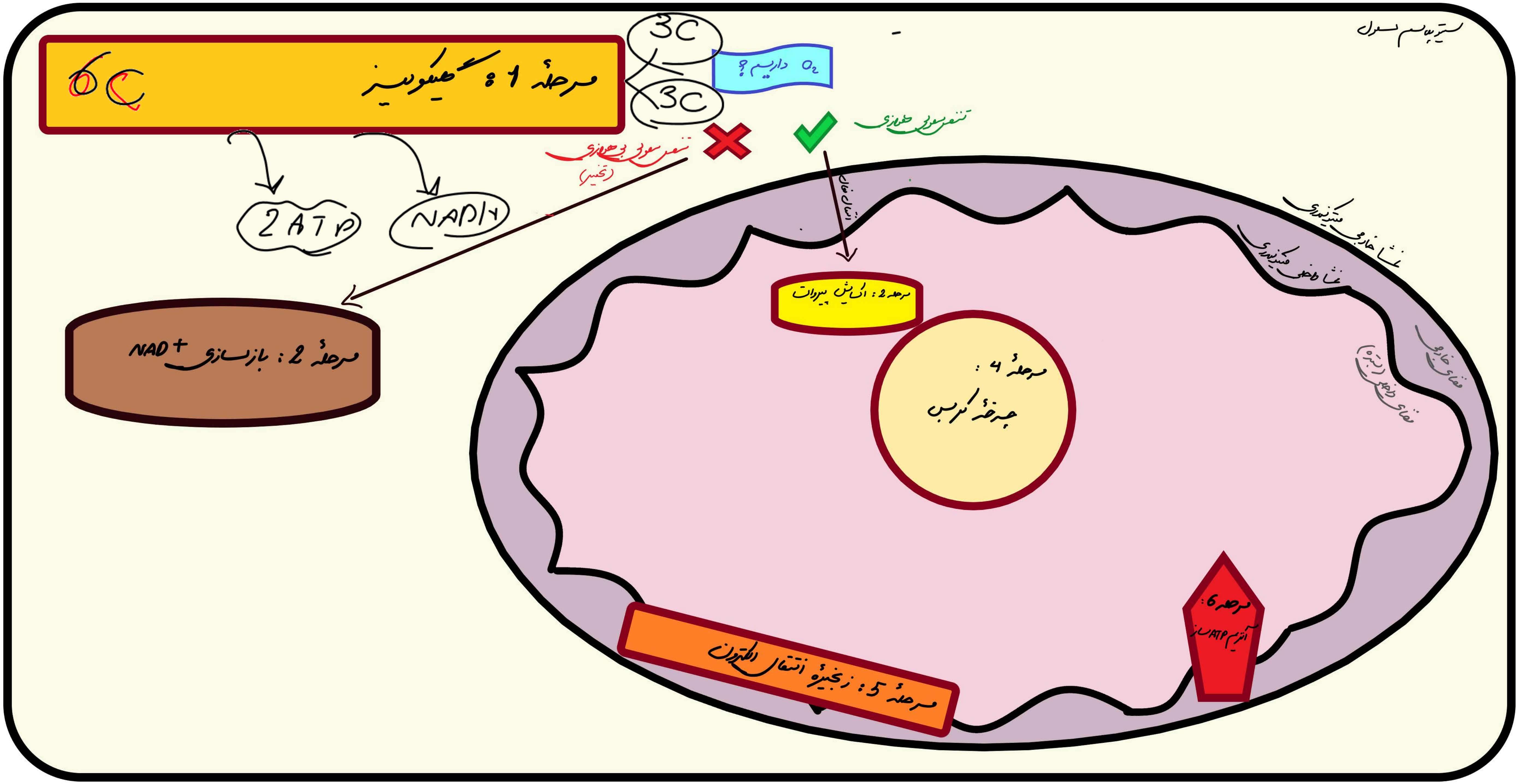
* تعداد Pهای ATP بیشتر از NADH ! (3 و 2)

اسید ←اکسایش (از دست دادن e)— قند

اسید —کاهش (گرفتن e)→ قند

تنفس سلولی


6C
گلوکز
2ATP
2ADP
6C2P
فروکتوز فسفات
3C1P
NADH
3C2P
3C1P
NADH
3C2P
اسید
2ADP
2ATP
3C


سیتوپلاسم سلول
مرحله 1 : گلیکولیز
6C
3C
3C
O2 داریم؟
تنفس سلولی هوازی
تنفس سلولی بی هوازی
(تخمیر)
2ATP
NADH
مرحله 2 : بازسازی NAD+
انتقال فعال
مرحله 3 : اکسایش پیرووات
مرحله 4 :
چرخه کربس
غشا خارجی میتوکندری
غشا داخلی میتوکندری
فضای خارجی
فضای داخلی (بستره)
مرحله 5 : زنجیره انتقال الکترون
مرحله 6 :
آنزیم ATP ساز

زیستن با اکسیژن

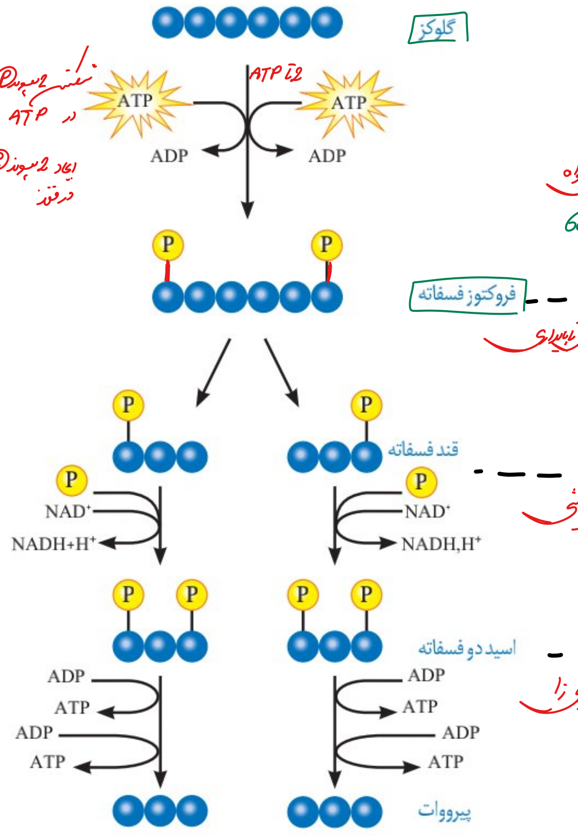
اغلب، واژه تنفس یاخته‌ای را برای تنفس یاخته‌ای هوازی به کار می‌برند. در اینجا ما نیز **تنفس یاخته‌ای** را به جای تنفس یاخته‌ای هوازی به کار می‌بریم.

قندکافت (گلیکولیز): اولین مرحلهٔ تنفس یاخته‌ای، قندکافت و به معنی تجزیهٔ گلوکز است که در مادهٔ زمینه سیتوپلاسم انجام می‌شود. تجزیهٔ گلوکز در قندکافت، نه به‌صورت یک‌باره، بلکه به‌صورت مرحله‌ای انجام می‌شود (شکل ۴).

برای انجام واکنش‌های مربوط به تجزیه گلوکز انرژی فعال‌سازی نیاز هست. این انرژی از ATP تأمین می‌شود.

در شکل ۴ می‌بینید که از گلوکز و ATP، قند فروکتوز با دو فسفات ایجاد می‌شود. از تجزیه این قند، دو قند سه کربنی فسفاته به‌وجود می‌آید. هر یک از این قندها با گرفتن یک گروه فسفات به اسیدی سه‌کربنی تبدیل می‌شود. هر یک از این مولکول‌های سه کربنی در نهایت به پیرووات (بنیان پیرووویک اسید) تبدیل می‌شود. در این واکنش‌ها مولکول‌های ATP و NADH به‌وجود می‌آیند.

NADH حامل الکترون است و دو نوکلئوتید دارد و از NAD^+ به اضافه الکترون و پروتون تشکیل می‌شود. NAD^+ و NADH با گرفتن و از دست دادن الکترون و پروتون، به همدیگر تبدیل می‌شوند (واکنش ۲). NAD^+ با گرفتن الکترون کاهش و NADH با از دست دادن الکترون اکسایش می‌یابد.



شکل ۴_ مراحل قندکافت

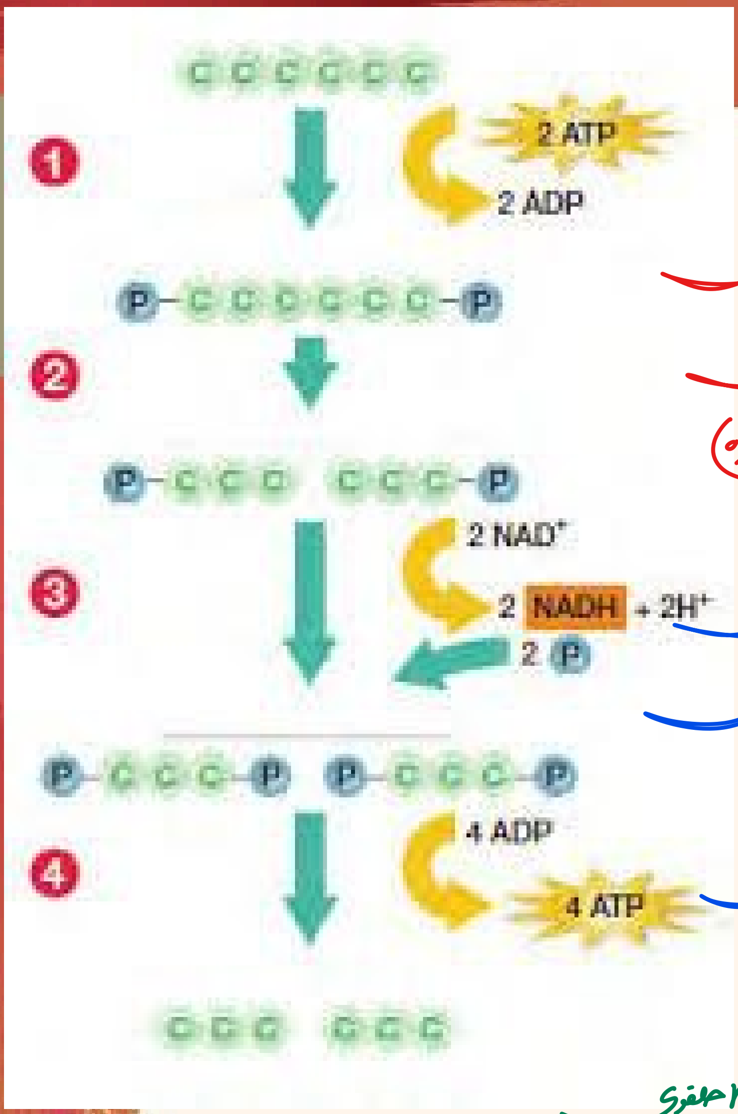
$$NAD^+ + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons NADH + H^+$$

(واکنش ۲_ یک الکترون برای خنثی کردن NAD^+ به کار می‌رود. بنابراین محصول به صورت $NADH + H^+$ در واکنش نوشته می‌شود.)

فعّالیت ۱

گفت‌وگو کنید

همان‌طور که دیدید، در قندکافت ATP ساخته می‌شود. براساس روش‌هایی که دربارهٔ تولید ATP گفتیم، ساخته شدن ATP در قندکافت با کدام روش انجام می‌شود؟



غشای خارجی ← از خارج در تماس با سیتوپلاسم
← از داخل در تماس با فضای بیرونی میتوکندری

غشای داخلی ← از خارج در تماس با فضای بیرونی میتوکندری
← از داخل در تماس با فضای درونی (بستره)
← دارای زنجیره انتقال e

فضای بیرونی میتوکندری (تماس با هر دو غشا) ← از خارج در تماس با غشای خارجی
← از داخل در تماس با غشای داخلی
← محل تجمع H^+
← باریک‌تر از فضای داخلی و در محل چین‌خوردگی‌ها قطر زیاد می‌شود.

فضای داخلی میتوکندری ← از خارج توسط غشای داخلی محصور شده
← دارای ریبوزوم‌های حلقه و DNA حلقوی
← محل همانندسازی، رونویسی، ترجمه، اکسایش پیرووات
← جهت بررسی می‌باشد.
← در محل چین‌خوردگی قطر کاهش یافته.

6C ← 6C2P ← 3C1P ← 3C2P ← 3C
6C2P ← 3C1P ← 3C2P ← 3C

گلوکز ← فروکتوز فسفاته ← قند فسفاته ← اسید دو فسفاته ← پیرووات
فروکتوز فسفاته ← قند فسفاته ← اسید دو فسفاته ← پیرووات

قند بدون P ← قند 2P ← قند 1P ← اسید 2P ← اسید بدون P
قند 2P ← قند 1P ← اسید 2P ← اسید بدون P

انرژی خواه ← میان‌ها ناپایداری ← اکسایش ← انرژی زا

راکیزه مقصد پیرووات

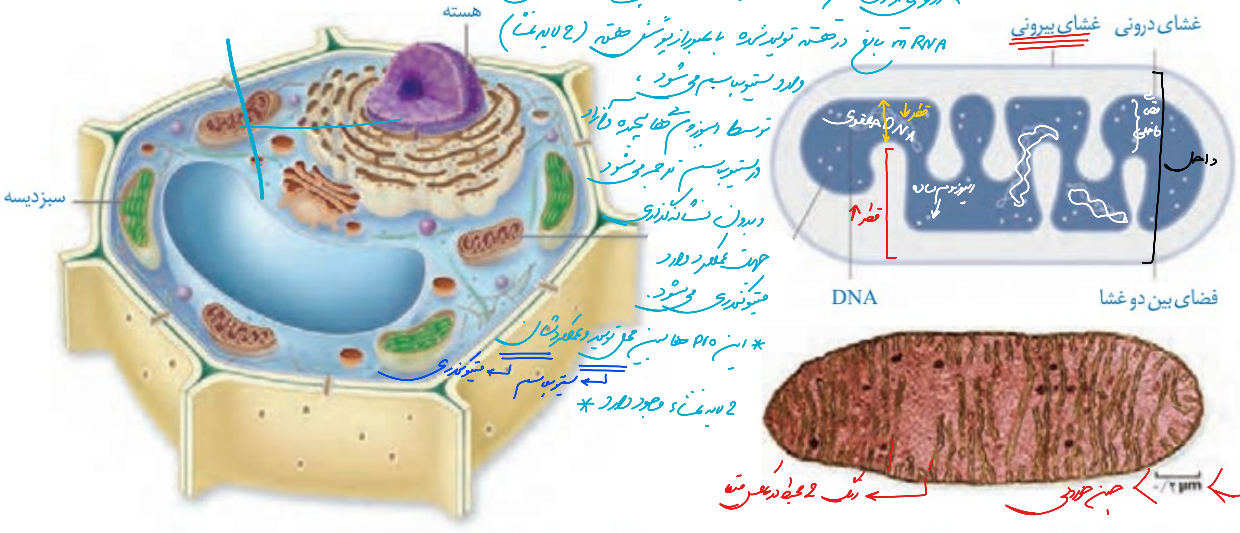
مرحلهٔ دیگر تنفس یاخته‌ای به اکسیژن نیاز دارد و در یوکاریوت‌ها در راکیزه انجام می‌شود.

راکیزه دو غشا دارد: غشای بیرونی صاف، و غشای درونی آن به داخل چین خورده است. درنتیجه، فضای درون آن به بخش داخلی و بخش بیرونی (فضای بین دو غشا) تقسیم می‌شود (شکل ۵).

راکیزه دنای مستقل از هسته و رِناتَن مخصوص به خود را دارد، بنابراین در آن پروتئین‌سازی انجام می‌شود. در دنای راکیزه، ژن‌های مورد نیاز برای ساخته شدن انواعی از پروتئین‌های مورد نیاز در تنفس یاخته‌ای وجود دارند.

راکیزه همراه با یاخته و نیز مستقل از آن تقسیم می‌شود. به‌نظر شما مستقل بودن تقسیم راکیزه از تقسیم یاخته چه اهمیتی دارد؟

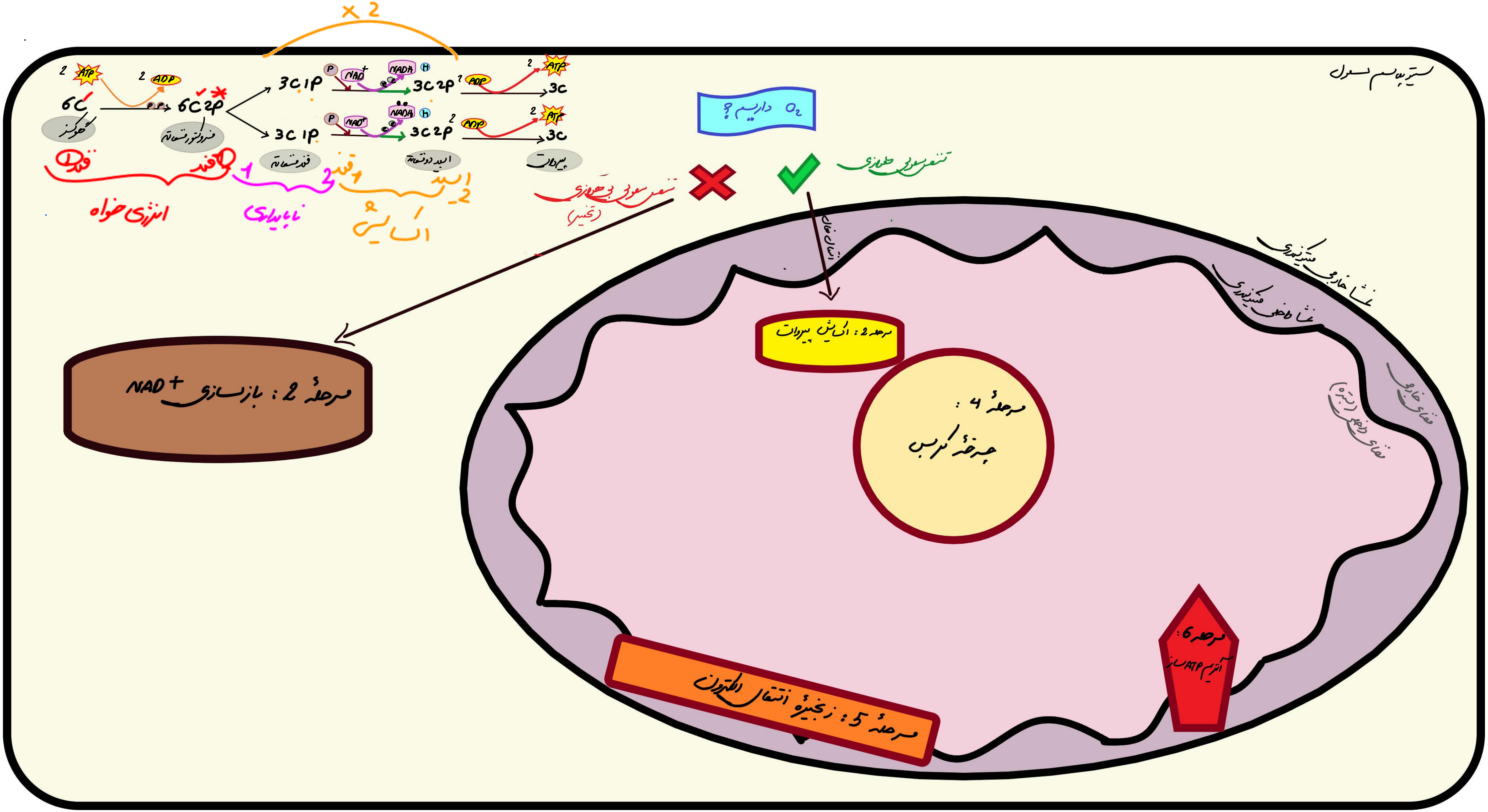
به هر حال راکیزه برای انجام نقش خود در تنفس یاخته‌ای به پروتئین‌هایی وابسته است که ژن‌های آنها در هسته قرار دارند و به‌وسیلهٔ رناتن‌های سیتوپلاسمی ساخته می‌شوند.



شکل ۵_ راکیزه. الف) راکیزه و ترسیمی از آن

ب) راکیزه در یاخته گیاهی

تنفس سلولی



x 2
2 ATP
2 ADP
6C
6C2P
3C1P
NAD+
NADH
3C2P
3C
گلوکز
فروکتوز فسفاته
قند فسفاته
اسید دو فسفاته
پیرووات
انرژی خواه
ناپایداری
اکسایش
سیتوپلاسم سلول
O2 داریم ؟
تنفس سلولی هوازی
تنفس سلولی بی هوازی
(تخمیر)
مرحله 2 : بازسازی NAD+
مرحله 2 : اکسایش پیرووات
مرحله 4 :
چرخه کربس
مرحله 5 : زنجیره انتقال الکترون
مرحله 6 :
آنزیم ATP ساز
غشای خارجی میتوکندری
غشای داخلی میتوکندری
فضای خارجی
فضای داخلی (بستره)

✓ همیشه تراکم پیرووات داخل میتوکندری بیشتر از سیتوپلاسم است.

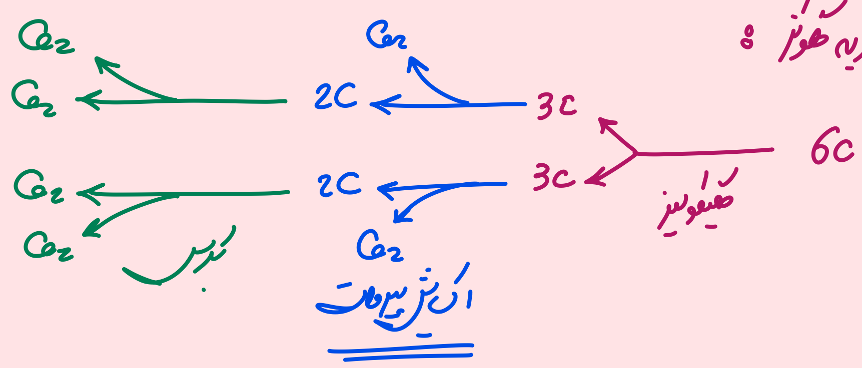
✓ ورود پیرووات به میتوکندری در صورت وجود [illegible] صورت می‌گیره با مصرف ATP و توسط کانال‌های [illegible] غشاء میتوکندری

✓ در ازای هر گلوکز **2 بار** اکسایش پیرووات صورت می‌گیرد.

✓ تولید پیرووات در سیتوپلاسم، مصرف پیرووات در میتوکندری

✓ در اکسایش پیرووات ← اولین CO_2 خارج می‌شود.

✓ تجزیه گلوکز:



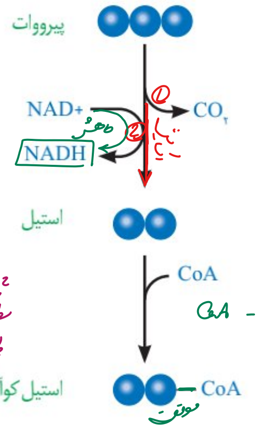
مراحل تنفس هوازی:
1. گلیکولیز
2. اکسایش پیرووات
3. چرخه کربس
4. زنجیره انتقال e
5. آنزیم ATP ساز

مرحله اکسایش هر پیرووات ← برای گلوکز (X2)

تولید	مصرف
1 بنیان استیل 2C	1 پیرووات 3C
NADH 1	NAD^+ 1
CO_2 1	

اکسایش پیرووات: گفتیم که در انتهای قندکافت، پیرووات به‌وجود می‌آید. این مولکول از طریق انتقال فعال وارد راکیزه می‌شود و در آنجا اکسایش می‌یابد. پیرووات در راکیزه یک کربن دی‌اکسید از دست می‌دهد و به بنیان استیل تبدیل می‌شود. استیل با اتصال به مولکولی به‌نام کوآنزیم A، استیل کوآنزیم A را تشکیل می‌دهد. در این واکنش NADH نیز به‌وجود می‌آید (شکل ۶).

اکسایش استیل کوآنزیم A در چرخه‌ای از واکنش‌های آنزیمی، به‌نام **چرخهٔ کِربس**، در بخش داخلی راکیزه انجام می‌گیرد که در گفتار بعدی به آن می‌پردازیم.

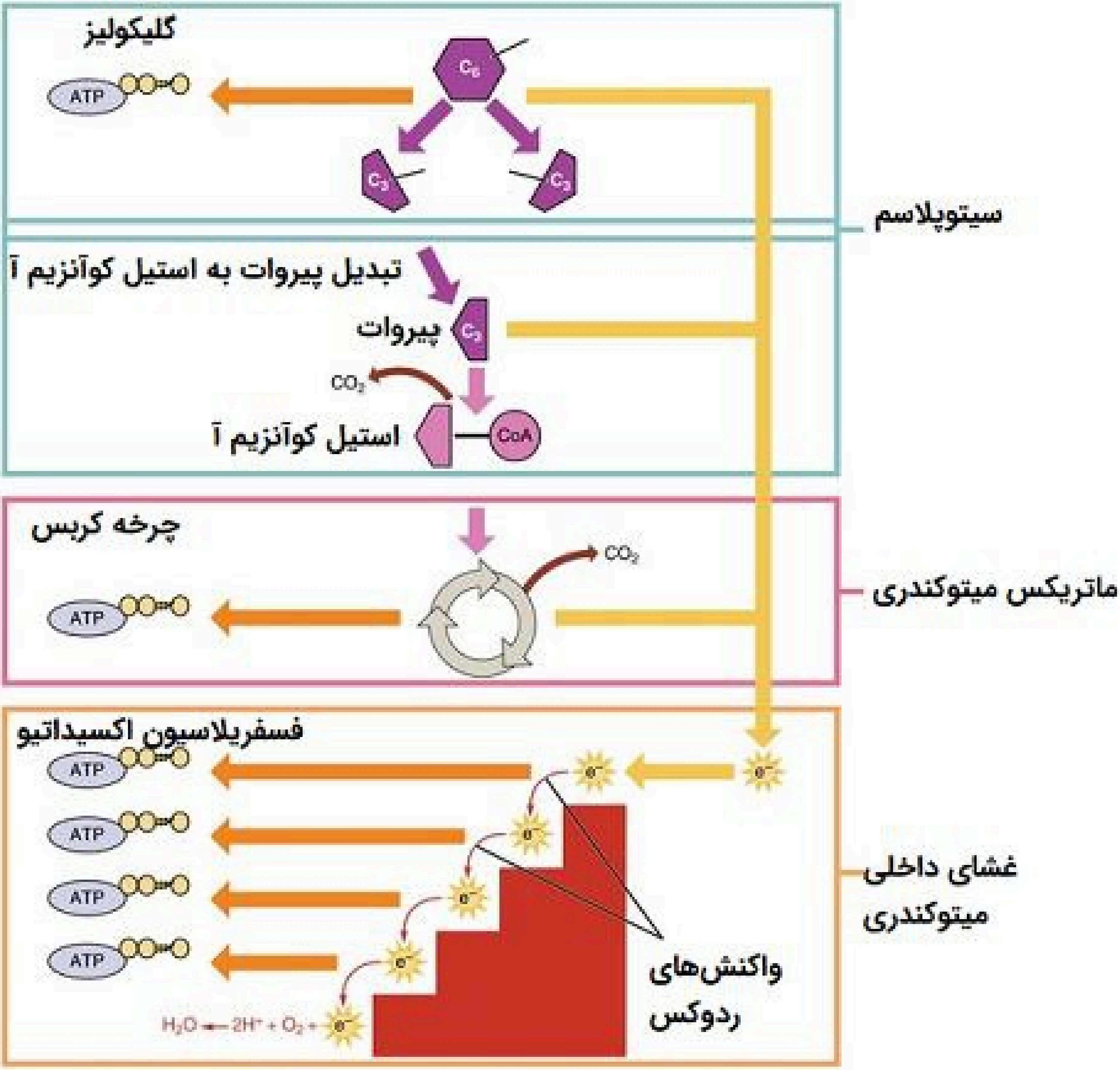


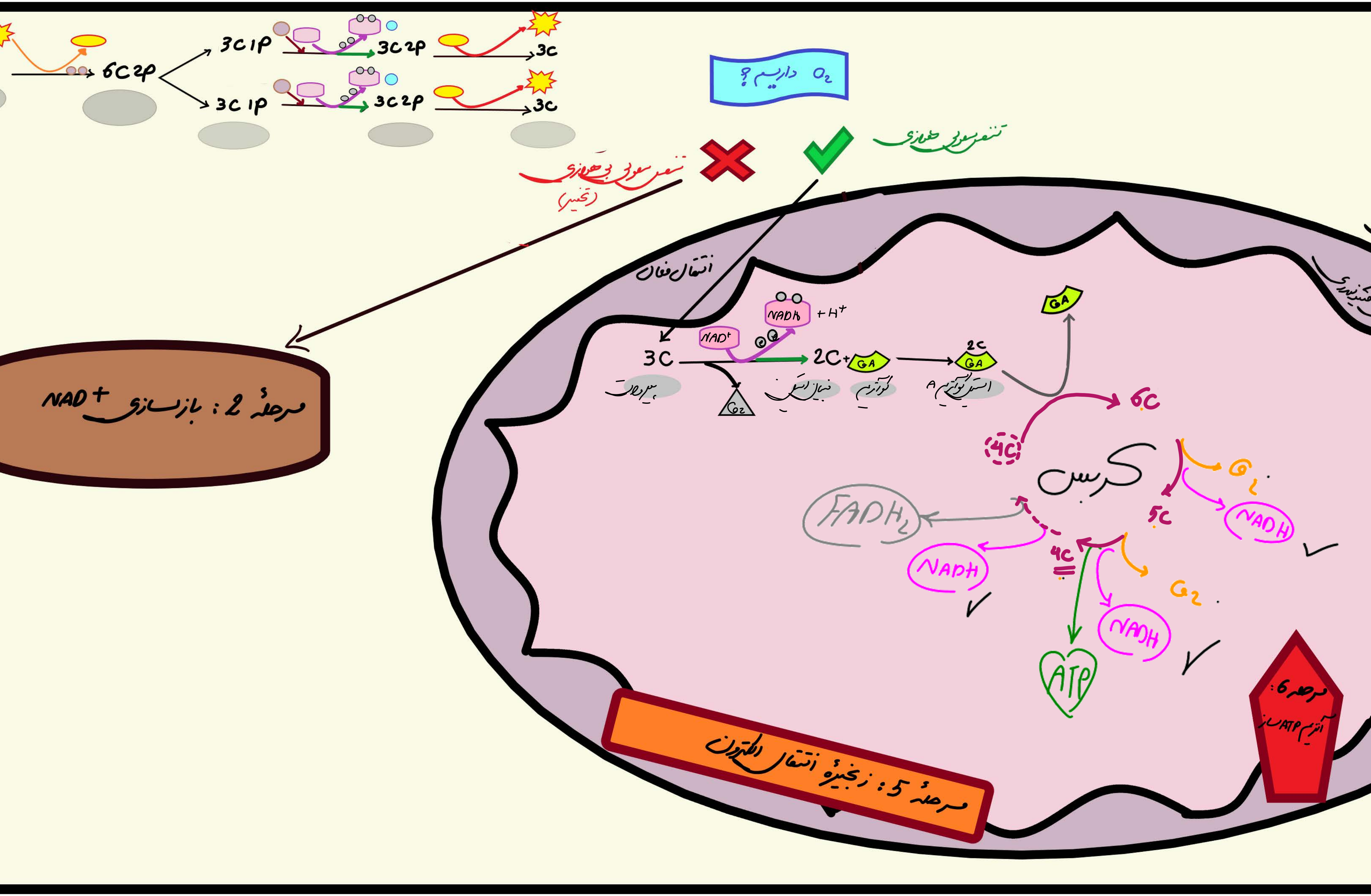
شکل ۶ـ اکسایش پیرووات و تشکیل استیل کوآنزیم A

بیشتر بدانید

دانشمند موفق

هانس آدولف کربس فیزیک‌دان و زیست‌شیمی‌دان




6C2P
3C1P
3C2P
3C
3C1P
3C2P
3C
O2 داریم؟
تنفس سلولی هوازی
تنفس سلولی بی هوازی
(تخمیر)
مرحله 2: بازسازی NAD+
انتقال فعال
NADH
+H+
NAD+
3C
2C+
GA
2C
GA
O2
6C
4C
کربس
5C
CO2
NADH
FADH2
NADH
4C
CO2
NADH
ATP
مرحله 5: زنجیره انتقال الکترون
مرحله 6: آنزیم ATP ساز

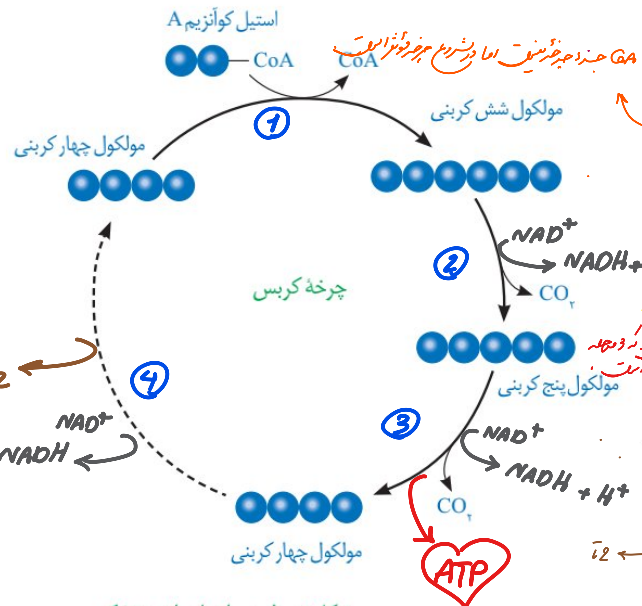
گفتار ۲ اکسایش بیشتر

مولکول گلوکز در تنفس هوازی باید تا حد تشکیل مولکول‌های CO_2 تجزیه شود. بخشی از تجزیه گلوکز در قندکافت و اکسایش پیرووات و بخش دیگر آن در چرخهٔ کربس انجام می‌شود.

چرخهٔ کربس

شکل ۷ ترسیم ساده‌ای از وقایع کلی چرخهٔ کربس را نشان می‌دهد.

در این چرخه، ضمن ترکیب استیل کوآنزیم A با مولکولی چهارکربنی، کوآنزیم A جدا و مولکولی شش کربنی، ایجاد می‌شود. پس از آن در طی واکنش‌های متفاوتی که در چرخهٔ کربس رخ می‌دهد، دو اتم کربن به‌صورت CO_2 آزاد و مولکول چهار کربنی برای گرفتن استیل کوآنزیم دیگر، بازسازی می‌شود.



شکل ۷ــ طرح ساده ای از چرخهٔ کربس

از اکسایش هر مولکول شش کربنی در واکنش‌های چرخهٔ کربس، مولکول‌های NADH، $FADH_2$[۱] و ATP در محل‌های متفاوتی از چرخه تشکیل می‌شوند.

$FADH_2$ ترکیبی نوکلئوتیددار و همانند NADH حامل الکترون است. $FADH_2$ از FAD ساخته می‌شود (واکنش ۳).

$$FAD + ۲H^+ + ۲e^- \rightleftharpoons FADH_2$$

واکنش ۳)

به این ترتیب با انجام قندکافت، اکسایش پیرووات و چرخهٔ کربس، مولکول گلوکز تا تشکیل مولکول‌های CO_2 تجزیه می‌شود. انرژی حاصل از تجزیهٔ گلوکز صرف ساخته شدن ATP و مولکول‌های حامل الکترون ($FADH_2$ و NADH) می‌شود.

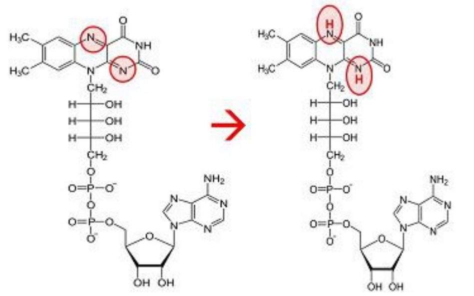
تشکیل ATP بیشتر

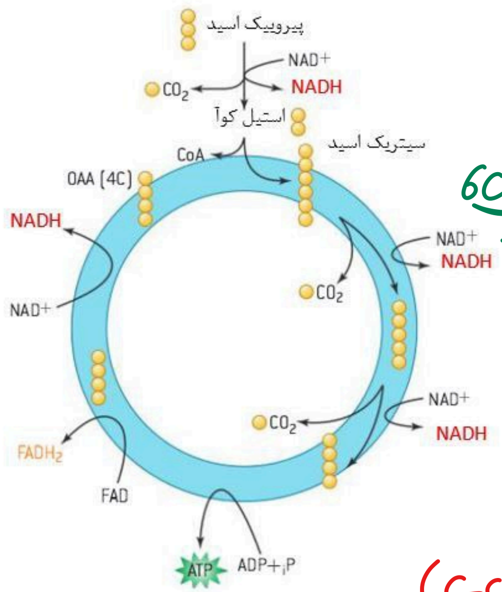
دیدیم که در تنفس یاخته‌ای ATP به‌وجود می‌آید. جالب است بدانیم که مولکول‌های NADH و $FADH_2$ نیز برای تولید ATP مصرف می‌شوند. چگونه انرژی مولکول‌های حامل الکترون برای تولید ATP به کار می‌رود؟

همچنین براساس رابطهٔ کلی تنفس یاخته‌ای می‌دانیم که در این فرایند آب نیز تشکیل می‌شود. آب چگونه در این فرایند تولید می‌شود؟ پاسخ این پرسش‌ها در **زنجیرهٔ انتقال الکترون** در غشای درونی راکیزه نهفته است.

۱ــ Flavin Adenine Dinucleotide

FAD→FADH2





شکل شماره ۴- خلاصه چرخه کربس

مرحله اول:

تنها مرحله افزایش ① C دارد

✓ اول ایجاد پیوند بین استیل CoA با 4C و بعد جدا شدن CoA از ترکیب 6C

✓ CoA مصرف نمیشه.

✓ به ازای هر پیوند ① پیوند C-C ایجاد میشه.

مرحله 2:

6C ⟵ 5C

* اکسایشی

✓ آزاد کردن CO_2 (① پیوند C-C ×)

مرحله 3:

5C ⟵ 4C

* اکسایشی

✓ آزاد کردن CO_2 (① پیوند C-C ×) ⟵ پایان تجزیه گلوکز

تولید ATP در سطح پیش ماده!

انرژی زا

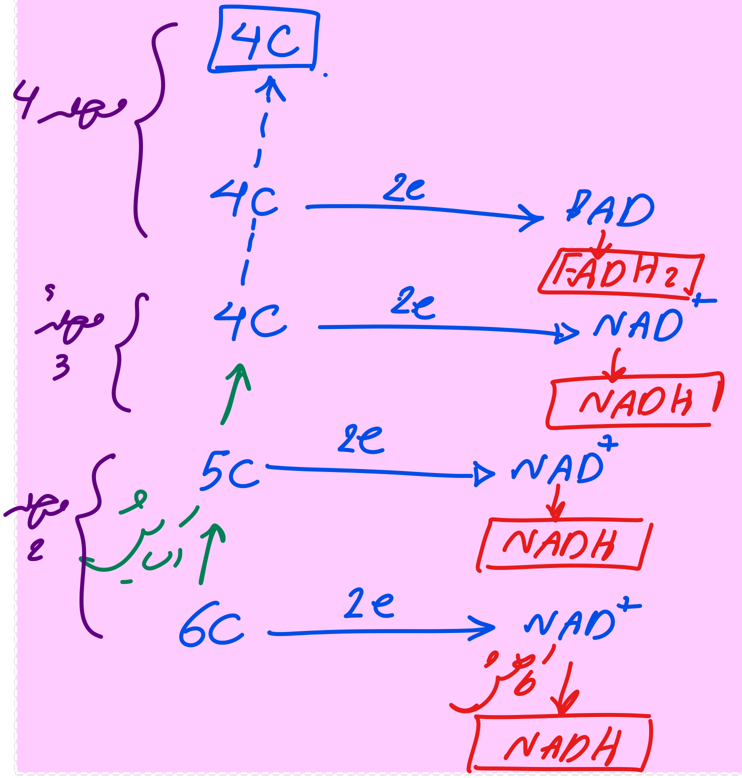
مرحله 4:

4C - - - - -> 4C

* اکسایشی ترین *

تنها مرحله بدون تغییر تعداد C !!

«اکسایش و کاهش های چرخه کربس»

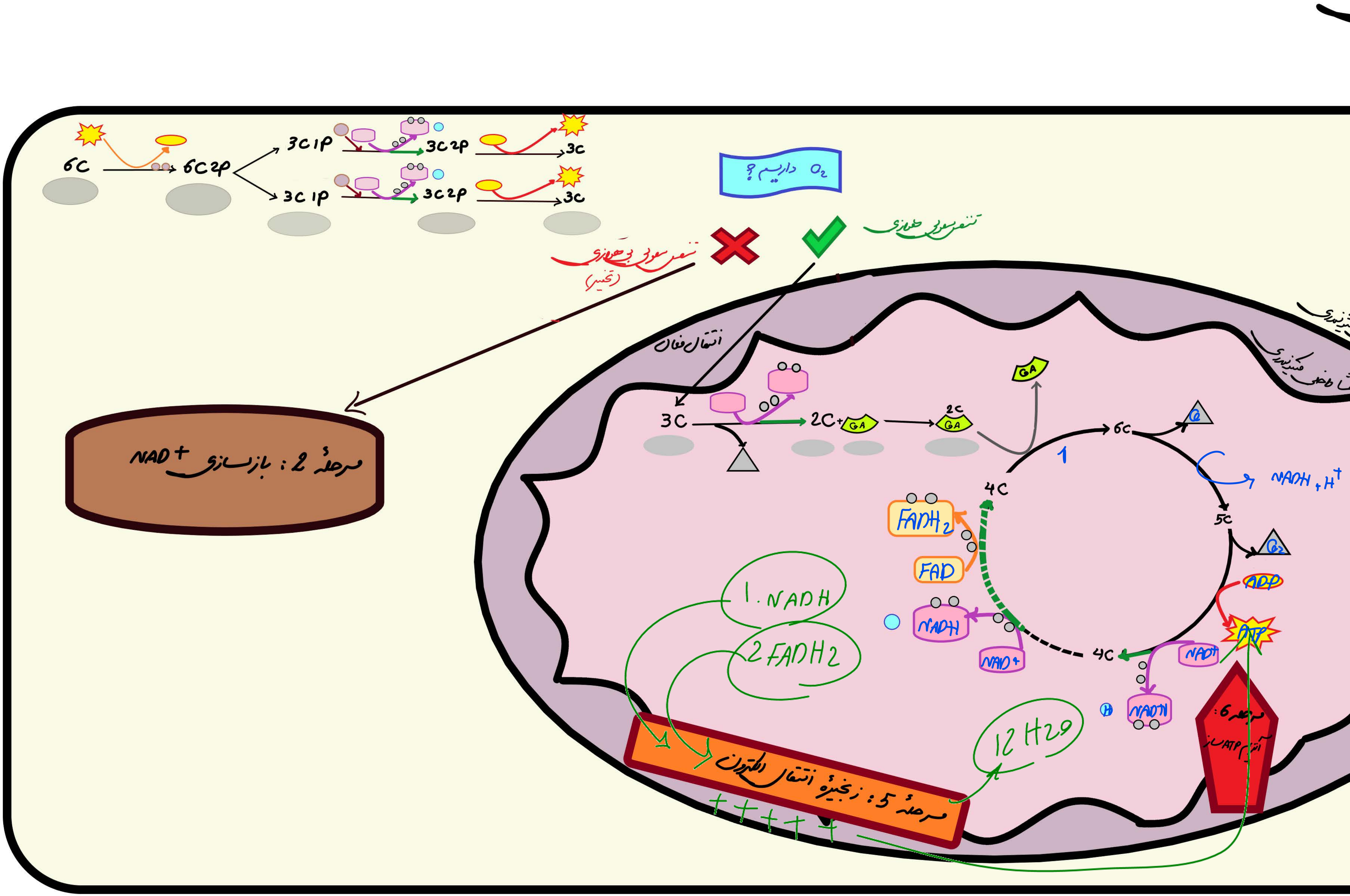


حامل e ≠ ناقل e

↓ NADH, $FADH_2$ (نوكليوتيد)

↓ سلسلة pro

زنجيرة انتقال e

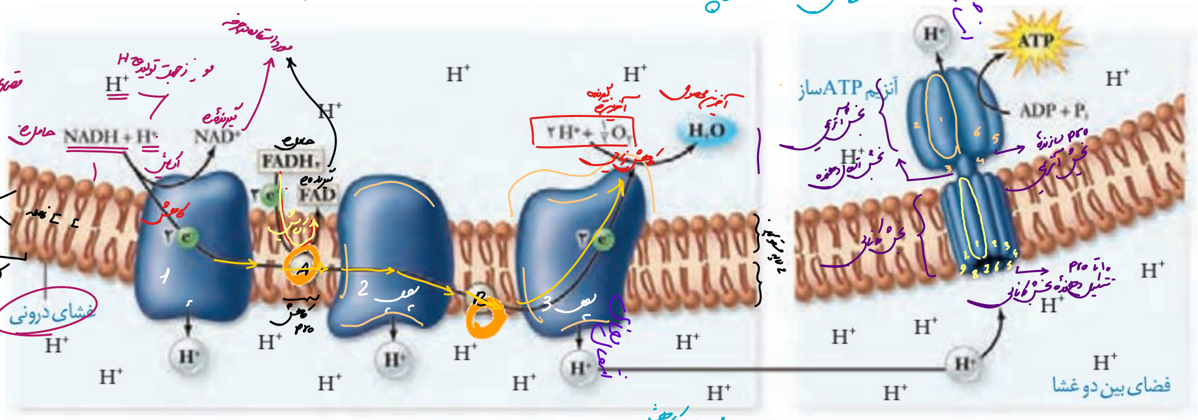


6C
6C2P
3C1P
3C2P
3C
O2 داریم؟
تنفس سلولی هوازی
تنفس سلولی بی‌هوازی
(تخمیر)
مرحله 2: بازسازی NAD+
انتقال فعال
3C
2C+ GA
2C GA
GA
6C
5C
4C
1
NADH, H+
FADH2
FAD
NADH
NAD+
ADP
ATP
1. NADH
2 FADH2
مرحله 5: زنجیره انتقال الکترون
12 H2O
مرحله 6: آنزیم ATP ساز

زنجیره انتقال الکترون

این زنجیره از مولکول‌هایی تشکیل شده است که در غشای درونی راکیزه قرار دارند و می‌توانند الکترون بگیرند یا از دست دهند.

در این زنجیره می‌بینید که الکترون‌ها در نهایت به اکسیژن مولکولی می‌رسند. اکسیژن با گرفتن الکترون به یون اکسید (اتم اکسیژن با دو بار منفی) تبدیل می‌شود.



شکل ۸ــ زنجیره انتقال الکترون در راکیزه و تشکیل ATP

یون‌های اکسید در ترکیب با پروتون‌هایی که در بخش داخلی قرار دارند، مولکول‌های آب را تشکیل می‌دهند (واکنش ۴).

واکنش ۴- تشکیل آب

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

اگر به شکل ۸ توجه کنید، می‌بینید که پروتون‌ها (یون‌های H^+) در سه محل از زنجیرهٔ انتقال الکترون از بخش داخلی به فضای بین دو غشا پمپ می‌شوند. انرژی لازم برای انتقال پروتون‌ها از الکترون‌های پرانرژی $NADH$ و $FADH_2$ فراهم می‌شود.

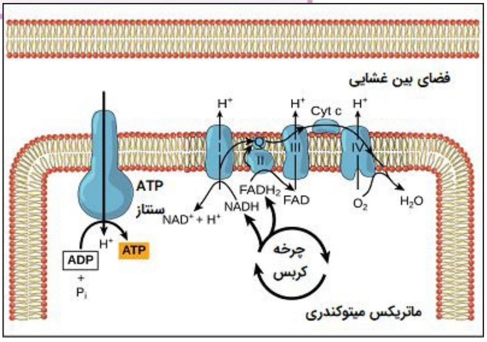
انتظار دارید ادامه ورود پروتون‌ها به فضای بین دو غشا چه نتیجه‌ای در پی داشته باشد؟

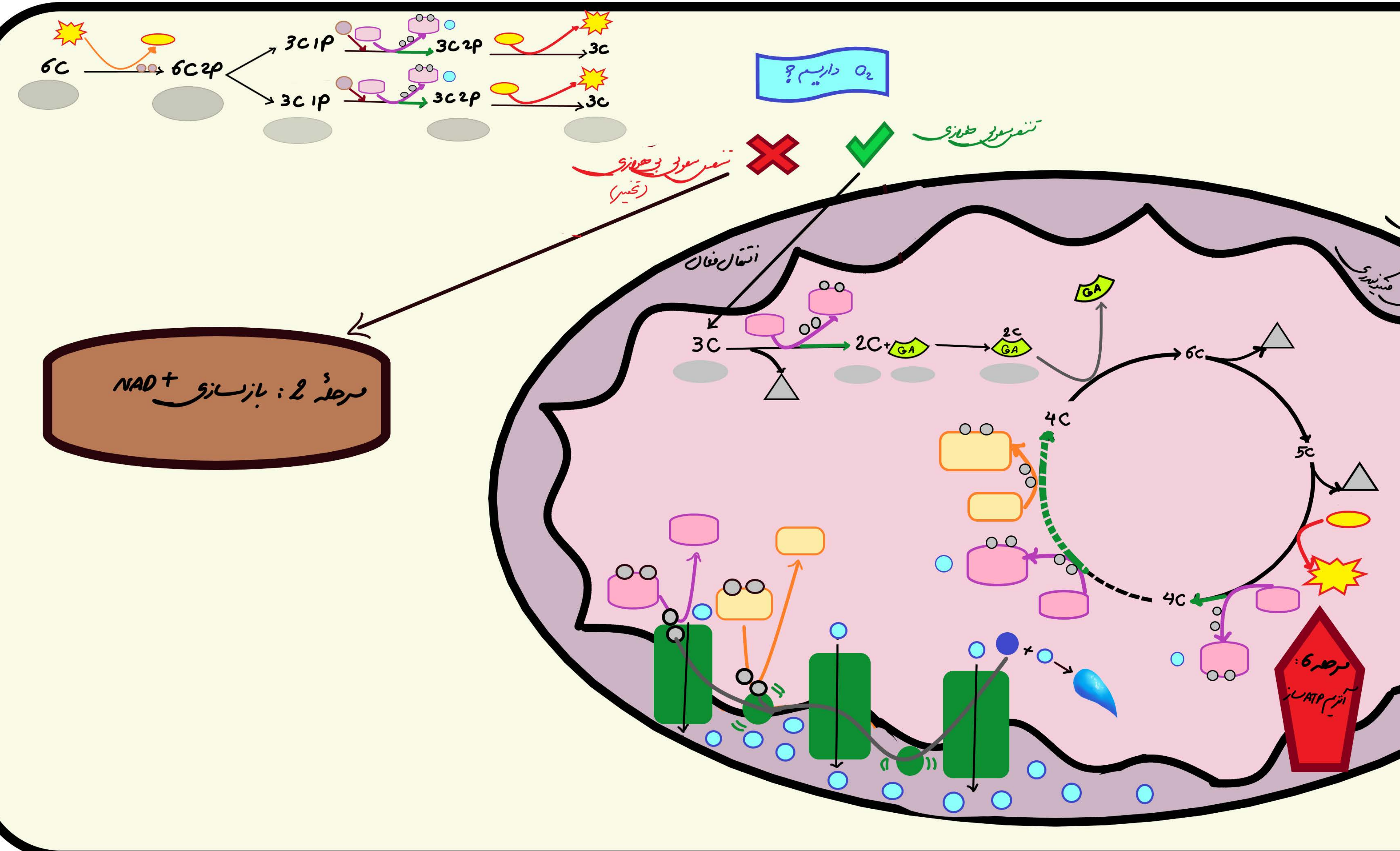
با ورود پروتون‌ها از بخش داخلی به فضای بین دو غشا، تراکم آنها در این فضا، نسبت به بخش داخلی افزایش می‌یابد. پروتون‌ها براساس شیب غلظت، تمایل دارند که به سمت بخش داخلی برگردند، اما تنها راه پیش روی پروتون‌ها برای برگشتن به این بخش، مجموعه‌ای پروتئینی به نام **آنزیم ATP ساز** است. پروتون‌ها از کانالی که در این مجموعه قرار دارد، می‌گذرند و انرژی موردنیاز برای تشکیل ATP از ADP و گروه فسفات فراهم می‌شود.

فعّالیت ۲

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

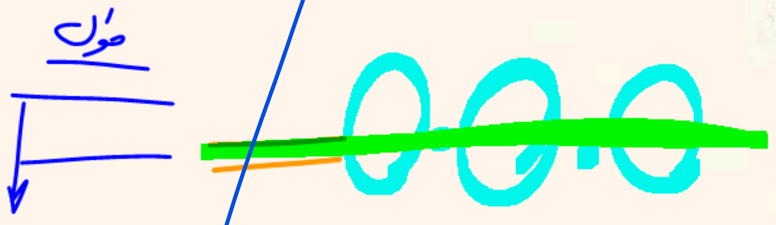
ب) با توجه به نقش غشای درونی راکیزه در تنفس یاخته‌ای، چین خورده بودن آن چه ارزشی برای یاخته دارد؟




6C
6C2P
3C1P
3C2P
3C
O2 داریم؟
تنفس سلولی هوازی
تنفس سلولی بی هوازی
(تخمیر)
مرحله 2 : بازسازی NAD+
انتقال فعال
3C
2C+
GA
2C
6C
5C
4C
4C
مرحله 6:
آنزیم ATP ساز

در زنجیره انتقال e میتوکندری
5 تا از 2 نوع
همگی درون غشای داخلی

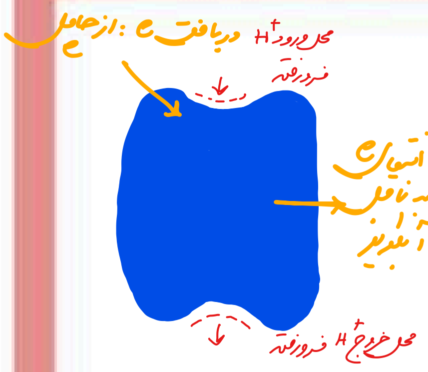
بزرگترین، از عرض غشا طول بیشتری دارند — pro پمپی
ثابت هستند - شکل مشخص داره.
امکان کاهش و اکسایش داره.
حرکت e در طول و عرض غشا.
عبور H^+ (به روش انتقال فعال)
بیشترین pro زنجیره انتقال e



2 سر زنجیره این pro قرار دارد.
کوچکترین، 2 عدد. از عرض غشا کمتر است. شکل تغییر دارند — pro انتقال دهنده مولکول‌ها
کروی - متحرک هستند.
امکان حرکت e دارند
عبور H^+ ندارند
هر دو سری pro ها جابجایی هستند.

حرکت H^+ همیشه در عرض غشا:
* از pro پمپ: انتقال فعال (بستره ← فضای بین دو غشا)
* از آنزیم ATP: انتشار تسهیل شده (فضای بین دو غشا ← بستره)
* حرکت e هم در عرض غشا و هم در طول غشا *

* پمپ 1 - Pro 1



دریافت e از NADH بسیار / انتقال e به ناقل غیرپروتئینی

✓ اولین Pro زنجیره انتقال e ، اولین جایگاه واکنش

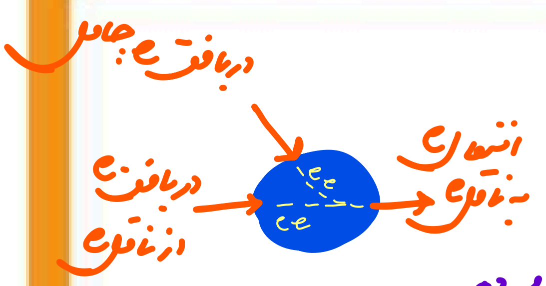
✓ کمترین e عبوری رو داره - فقط e های NADH از این عبور می‌کنند

← بجز پمپ 2 و 3 ، H^+ تقریبی پمپ می‌کنند

✓ محل اکسایش NADH (بازسازی NAD^+)

* از عرض غشا بزرگتر است ⇐ در تماس با هر دو فضای میتوکندری (سطح تماس با فضای داخلی > فضای خارجی)

* پمپ ~~Pro~~ - 2 Pro تغییر آنزیم (یک / مولکول)



✓ شروع مسیر مشترک e های NADH و $FADH_2$.

✓ محل اکسایش $FADH_2$ (بازسازی FAD)

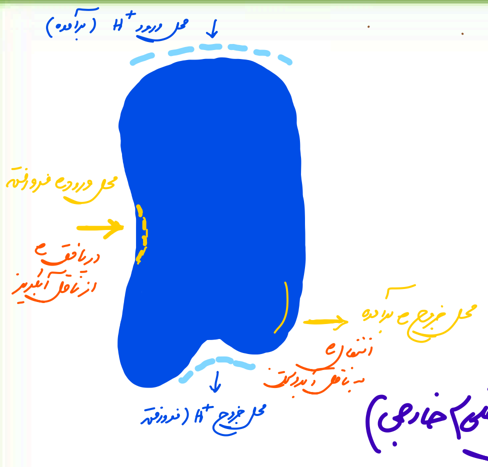
✓ بین پمپ 1 و 2 ✓ e دو دسته از حامل e و دسته از ناقل e می‌گیرد و به ناقل می‌دهد

پمپ اول / $FADH_2$ / پمپ دوم

* در تماس با سطح فضای درون میتوکندری نیست و در عرض غشای داخلی میتوکندری

در تماس با اسیدهای چرب (بخش آنزیمی) هر دو لایه فسفولیپید می‌باشد.

* Pro 3 - پمپ 2 (مولکول)



✓ Pro بین 2 Pro غیرپمپی است. (مولکول)

✓ Pro وسط زنجیره انتقال e

* اولین پمپی که از انرژی e های NADH و $FADH_2$ جهت انتقال فعال H^+ استفاده می‌کند

* از عرض غشاء بزرگتر است و در تماس با هر دو فضای میتوکندری (سطح تماس با فضای داخلی > خارجی)

* Pro 4 - Pro تغییر آبدوست (مولکول / مولکول)

✓ بین پمپ 2 و 3

✓ امکان جابجایی e در فضای بین دو غشا.

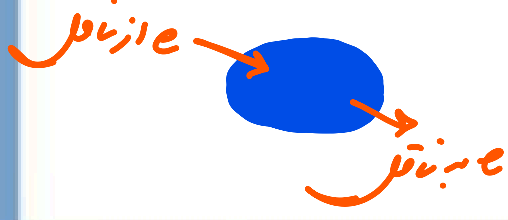
✓ e از ناقل می‌گیرد و به ناقل می‌دهد.

✓ فقط در تماس با فضای خارجی میتوکندری و بخش آبدوست

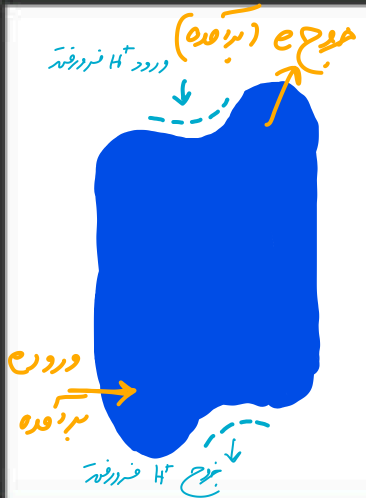
لایه خارجی فسفولیپید غشاء داخلی است.

★ فقط در تماس با فضای خارجی میتوکندری

در تماس با بخش آبدوست لایه فسفولیپید خارجی غشاء داخلی است.



* Pro 5 - پمپ 3 (یک / مولکول)



دریافت e از ناقل آبدوست / انتقال e به مولکول O_2

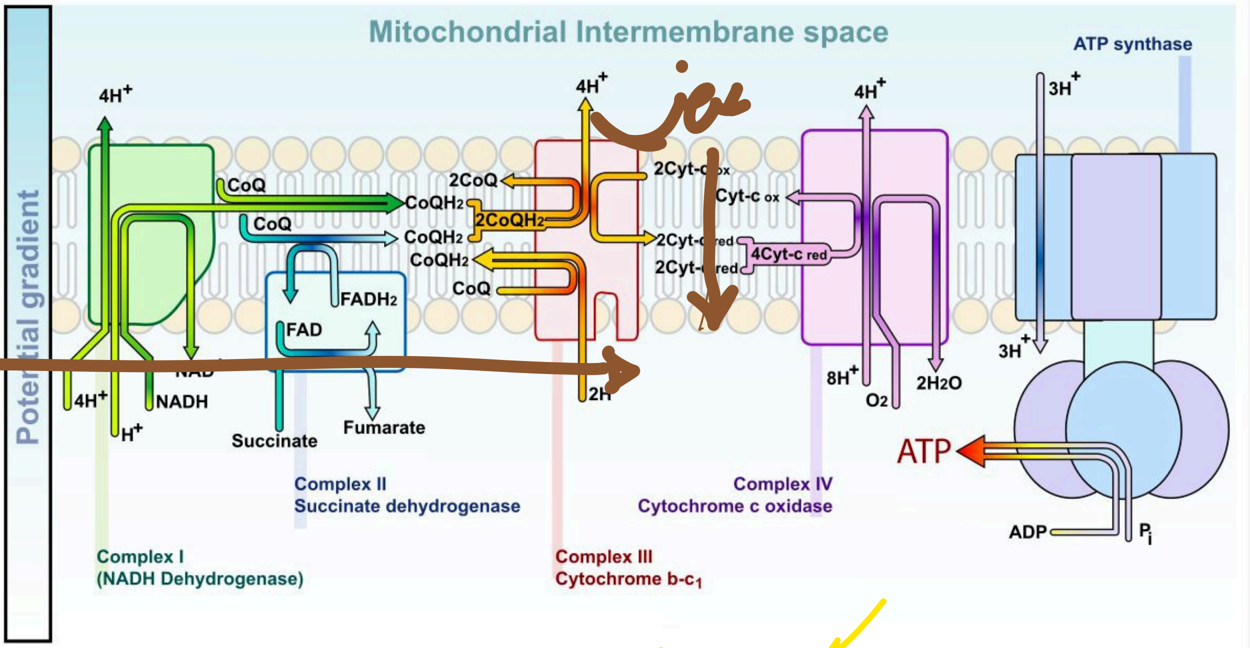
✓ آخرین Pro زنجیره انتقال e . آخرین جایگاه واکنش

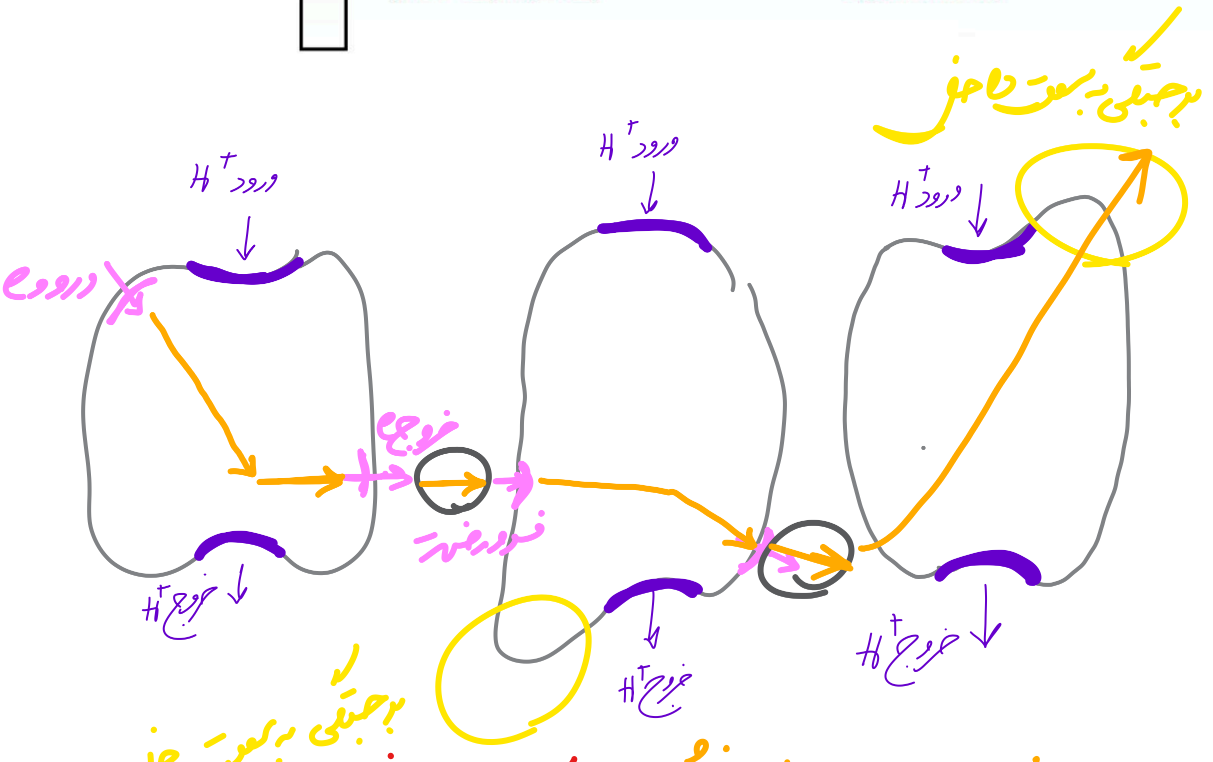
✓ انتهای مسیر e ✓ دریافت e از ناقل و انتقال e به اکسیژن.

✓ استفاده از انرژی e های NADH و $FADH_2$ جهت انتقال فعال H^+

✓ از عرض غشاء بزرگتر است ⇐ در تماس با هر دو فضای میتوکندری

(سطح تماس با فضای داخلی > خارجی)





1 Pro: حرکت

H+ ← در عرض غشا > 2 لایه مستقیم

e ← در عرض غشا > 1 لایه مستقیم ← به سمت خارج

e ← در طول غشا

ورود در غشا

خروج از فضای داخلی

2 Pro: حرکت ← e ← در طول غشا

3 Pro: حرکت

H ← در عرض غشا > 2 لایه مستقیم

e ← در عرض غشا > 1 لایه غیرمستقیم ← به سمت خارج

e ← در طول غشا

4Pro

حرکت e ← در عرض > 1 لایه مستقیم به سمت خارج
حرکت e ← طول غشا

ورود e به فضای خارجی
خروج e از غشا

5Pro

حرکت ← H ← در عرض غشا > 2 لایه مستقیم
حرکت ← e ← طول غشا
حرکت ← e ← در عرض غشا > 2 لایه مستقیم به سمت داخل

خروج e انتقال دهنده و ورود آن به فضای داخلی

Max جابجایی e در عرض غشا
≠ جابجایی e در عرض غشا توسط سایر Pro

• مجموعه آنزیم ATP ساز ← 17 Pro

* بخش کانالی

نسبت به بخش آنزیمی کوچک‌تر است. در عرض غشای داخلی است. ارتفاع آن به اندازه غشا. از 10 Pro ساخته شده که غشایی و سرتاسری هستند و وسطشون یک کانال ایجاد شده. در تماس با هر دو فضای میتوکندری است.

بیشترین Pro های مجموعه ATP ساز
بیشترین " " "

* بخش انتقال دهنده

در اتصال با هر دو بخش اصلی مجموعه ATP ساز. از 1 Pro کوتاه و قطور ساخته شده و وسطش فضایی برای عبور H^+ وجود داره. H^+ از بخش کانالی به آنزیمی می‌بره. کاملاً در فضای داخلی میتوکندری است. در تماس با غشا نیست.

کوتاه‌ترین و کمترین Pro مجموعه ATP ساز. (تنها Pro که H^+ از وسطش عبور می‌کنه)

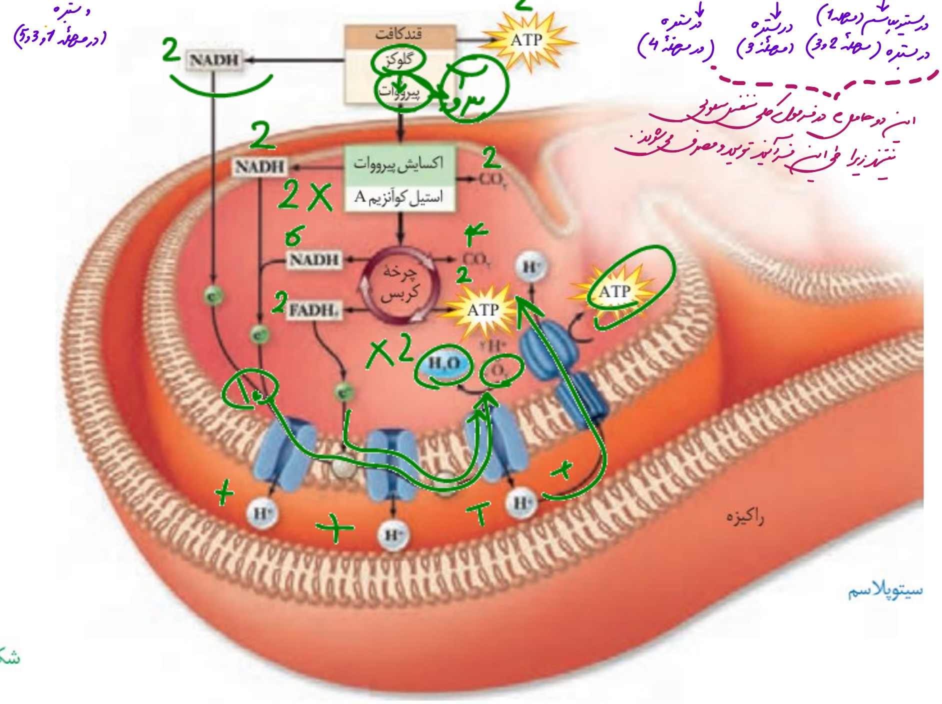
* بخش آنزیمی

بزرگترین بخش مجموعه ATP ساز است. از 6 Pro آنزیمی ساخته شده که وسطش فضایی جهت عبور H^+ وجود داره. از انرژی عبور H^+ استفاده می‌کنه و تولید ATP در فضای داخلی انجام می‌ده. در تماس با غشا نیست. کاملاً در بستره.

بزرگترین Pro های این مجموعه آنزیمی

مروری بر تنفس یاخته‌ای

خلاصه‌ای از تنفس یاخته‌ای را در شکل ۹ مشاهده می‌کنید. همان‌طور که می‌بینید در فرایند قندکافت از گلوکز پیرووات ایجاد می‌شود. پیرووات به راکیزه می‌رود و در آنجا به استیل کوآنزیم A اکسایش می‌یابد. استیل کوآنزیم A وارد چرخهٔ کربس می‌شود. در تنفس یاخته‌ای مولکول‌های کربن دی‌اکسید، ATP، NADH، $FADH_2$ و آب تولید می‌شوند.



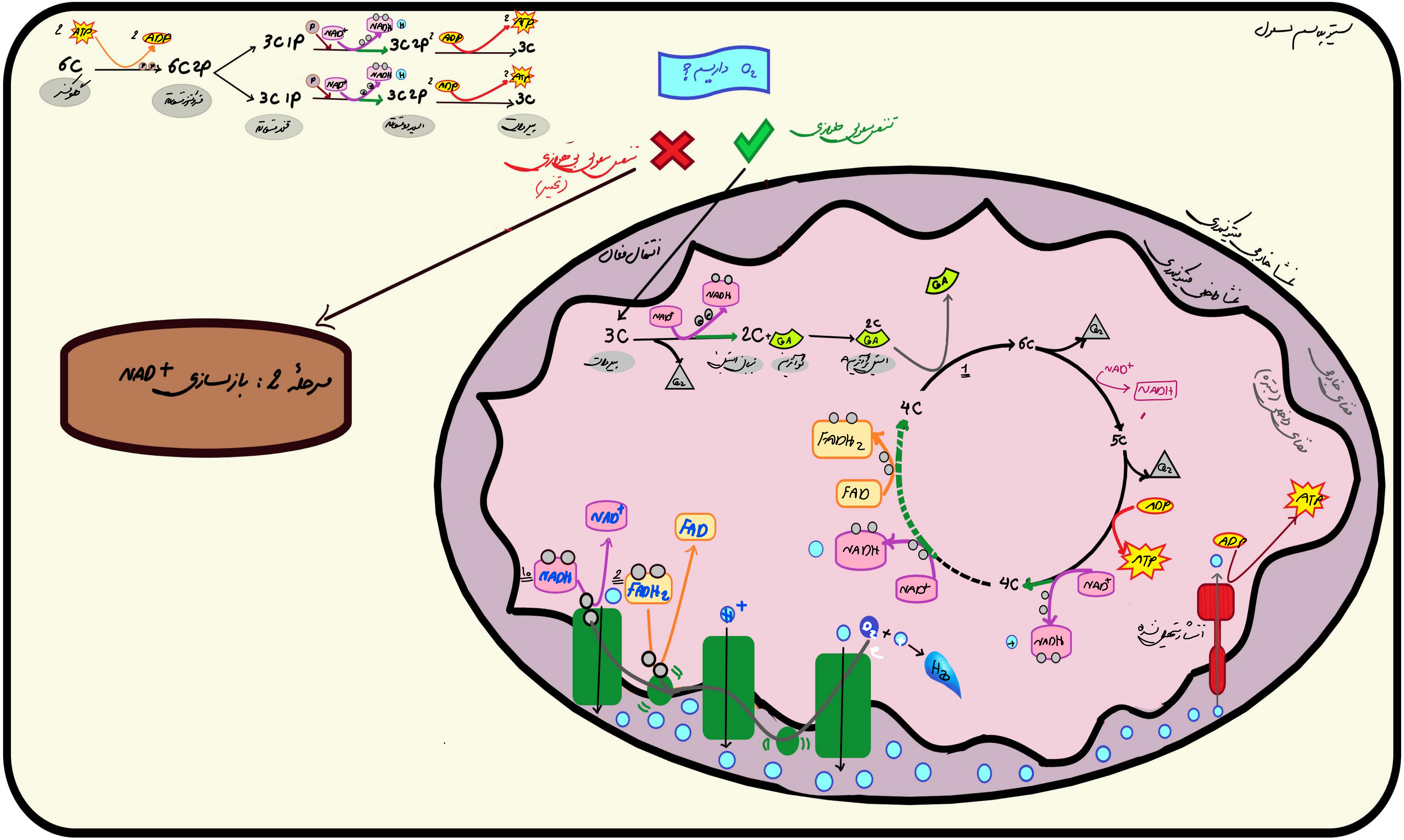
شکل ۹ـ خلاصه‌ای از تنفس هوازی

فعّالیت ۳

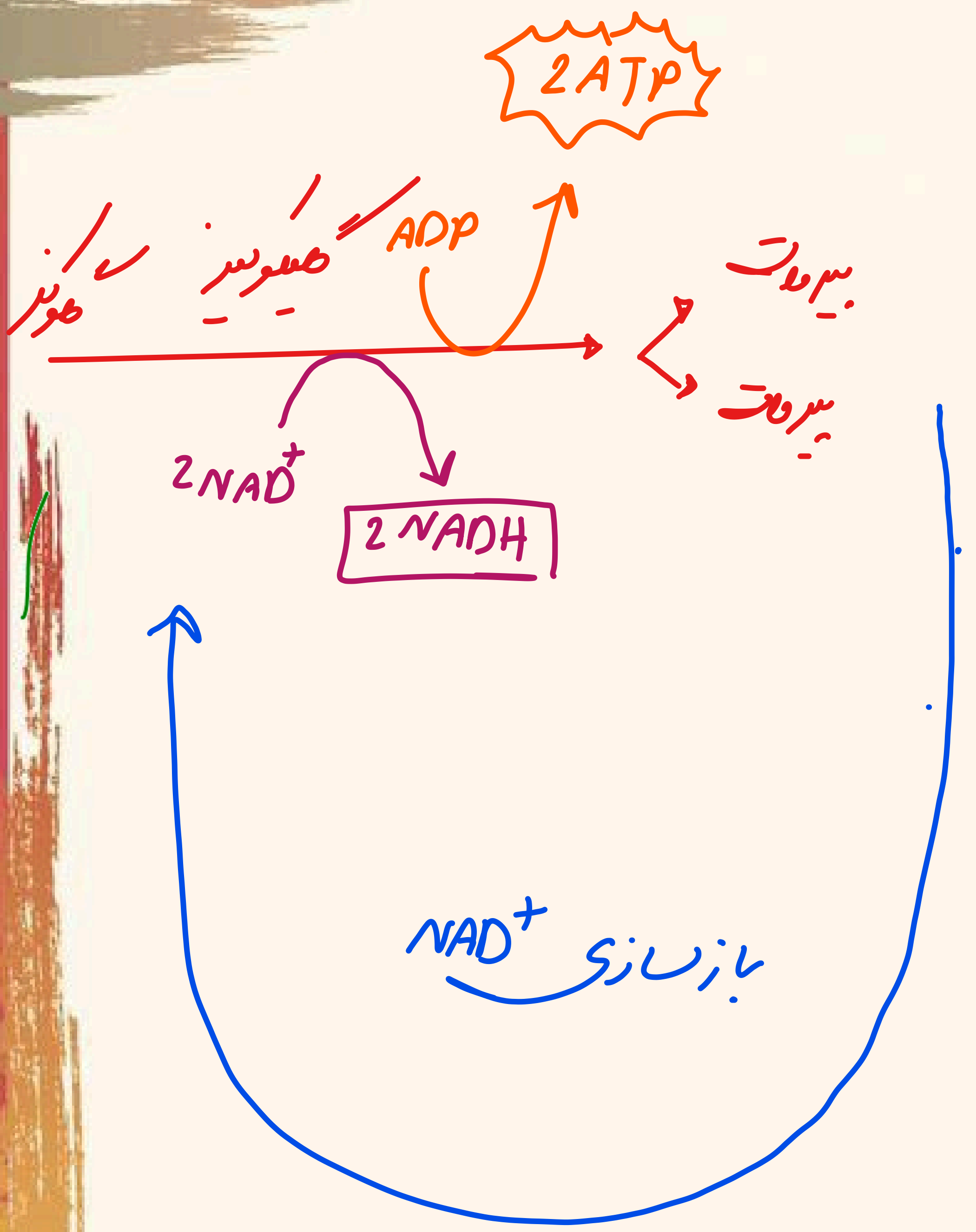
ارائه دهید

با استفاده از شکل ۹، به‌طور گروهی طرحی تصویری و نوشتاری از تنفس یاخته‌ای تولید و سعی کنید حداقل واژه‌ها را به کار ببرید. هر گروه طرح خود را در کلاس ارائه دهد. این طرح را می‌توانید با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای، نقاشی و به‌صورت‌های متفاوت تولید کنید.

تنفس سلولی



سیتوپلاسم سلول
6C
گلوکز
ATP
ADP
6C2P
3C1P
NAD+
NADH
3C2P
3C
پیرووات
داریم؟ O2
تنفس سلولی هوازی
تنفس سلولی بی هوازی
(تخمیر)
مرحله 2 : بازسازی NAD+
انتقال فعال
غشا خارجی میتوکندری
غشا داخلی میتوکندری
2C
GA
6C
5C
4C
FADH2
FAD
H2O


2ATP
ADP
واکنش گلیکولیز
پیرووات
پیرووات
2NAD⁺
2NADH
بازسازی NAD⁺

تنظیم تنفس یاخته‌ای: تولیدی اقتصادی

اندازه‌گیری‌های واقعی در شرایط بهینه آزمایشگاهی نشان می‌دهند که مقدار ATP تولید شده در ازای تجزیهٔ کامل گلوکز در بهترین شرایط در یاخته یوکاریوت، حداکثر ۳۰ ATP است. باید توجه داشت که تولید ATP در یاخته‌های متفاوت و متناسب با نیاز بدن فرق می‌کند. به نظر شما اگر مقدار ATP در یاخته زیاد باشد، واکنش‌های قندکافت و چرخهٔ کربس، به‌همان میزانی انجام می‌شوند که در شرایط کمبود ATP است؟ مشخص شده که تولید ATP تحت کنترل میزان ATP و ADP است. اگر ATP زیاد باشد، آنزیم‌های درگیر در قندکافت و چرخهٔ کربس مهار می‌شوند تا تولید ATP کم شود. در صورتی که مقدار ATP کم و ADP زیاد باشد، این آنزیم‌ها فعال و تولید ATP افزایش می‌یابد. این تنظیم مانع از هدر رفتن منابع می‌شود.

یاخته‌های بدن ما به‌طور معمول از گلوکز و ذخیرهٔ قندی کبد برای تأمین انرژی استفاده می‌کنند. درصورتی که این منابع کافی نباشند، آنها برای تولید ATP به سراغ تجزیهٔ چربی‌ها و پروتئین‌ها می‌روند. به همین علت تحلیل و ضعیف شدن ماهیچه‌های اسکلتی و سیستم ایمنی از عوارض سوء تغذیه و فقر غذایی شدید و طولانی‌مدت در افرادی است که رژیم غذایی نامناسب دارند یا اینکه به دلایل متفاوت غذای کافی دراختیار ندارند.

فعّالیت ۴

گفت‌وگو کنید

شاید دیده باشید که در دانه‌های خشک و بدون آب مانند نخود و لوبیا، حشرات و لارو آنها رشد ونمو می‌کند. با توجه به اینکه این دانه‌ها خشک اند و تقریباً آبی ندارند، آب مورد نیاز این جانوران چگونه تأمین می‌شود؟

گفتار ۳ زیستن مستقل از اکسیژن

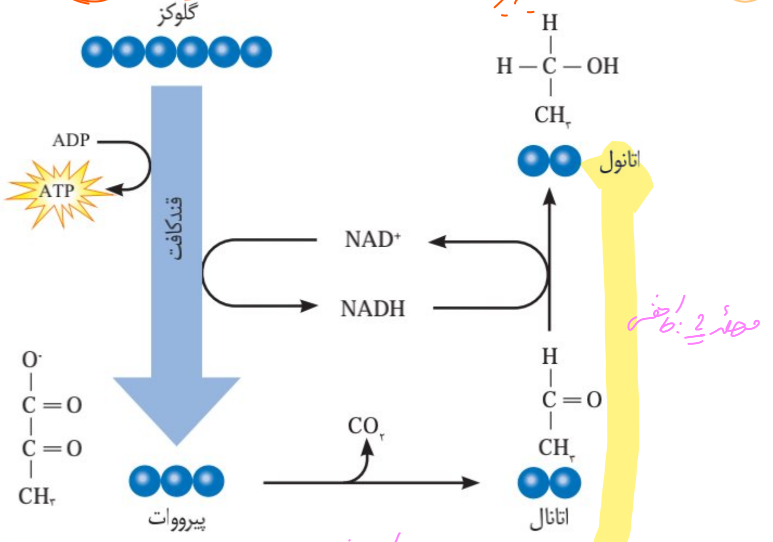
تخمیر

دیدیم که در تنفس یاخته‌ای، اکسیژن گیرندهٔ نهایی الکترون است. آیا تجزیهٔ گلوکز و تأمین انرژی، همیشه وابسته به حضور اکسیژن است؟ آیا در محیط‌هایی که اکسیژن ندارند یا اکسیژن اندکی دارند، حیات وجود ندارد؟ در این صورت ATP مورد نیاز چگونه تأمین می‌شود؟

تخمیر از روش‌های تأمین انرژی در شرایط کمبود یا نبود اکسیژن است که در انواعی از جانداران رخ می‌دهد. در فرایند تخمیر، راکیزه و در نتیجه زنجیره انتقال الکترون نقشی ندارند. **تخمیر الکلی** و **تخمیر لاکتیکی** انواعی از تخمیرند که در صنایع متفاوت از آنها بهره می‌بریم.

تخمیر الکلی و لاکتیکی مانند تنفس هوازی با قندکافت آغاز می‌شوند و پیرووات ایجاد می‌کنند؛ در قندکافت دیدیم که تشکیل پیرووات از قند فسفاته همراه با ایجاد NADH از NAD^+ است؛ بنابراین برای تداوم قندکافت، NAD^+ ضروری است و اگر نباشد قندکافت متوقف می‌شود و در نتیجه تخمیر انجام نمی‌شود. در تخمیر، مولکول‌هایی ایجاد می‌شوند که در فرایند تشکیل آنها NAD^+ به وجود می‌آید. در ادامه با این دو نوع تخمیر بیشتر آشنا می‌شویم.

تخمیر الکلی: ورآمدن خمیر نان به علت انجام تخمیر الکلی است. شکل ۱۰ طرح ساده‌ای از مراحل این نوع تخمیر را نشان می‌دهد. در این فرایند، پیرووات حاصل از قندکافت با از دست دادن CO_2، به اتانال تبدیل می‌شود. اتانال با گرفتن الکترون‌های NADH اتانول ایجاد می‌کند.



شکل ۱۰ـ تخمیر الکلی

تخمیر ← گلیکولیز اشتراکی (1 بار) ← تولید 2ATP ، تولید 2NADH

تخمیر ← بازسازی NAD^+ کاهش (2 بار ← هر پیرووات 1 بار بازسازی NAD^+)

بازسازی NAD^+ ← در تخمیر الکلی 2 مرحله‌ای (1 مرحله تجزیه، 1 مرحله کاهش)

بازسازی NAD^+ ← در لاکتیکی 1 مرحله‌ای (کاهش)

تخمیر الکلی ← 3 مرحله‌ای

تخمیر لاکتیکی ← 2 مرحله‌ای

	تنفس سلولی هوازی	تخمیر الکلی	تخمیر لاکتیکی
تولید ATP	30 ✓	✓	✓
بازسازی NAD^+	✓ در بستره در مجاورت [illegible]	سیتوپلاسم ✓	✓
آخرین گیرنده e	O_2 (معدنی)	اتانال (آلی)	پیرووات (آلی) اسید
محصول	H_2O (معدنی)	اتانول (آلی) الکل	لاکتات (آلی) اسید
میزان تجزیه مولکول	6C → 3C, 3C → 2C, 2C + CO_2 ... (3 مرحله) Max	6C → 3C, 3C → 2C + CO_2 (2 مرحله)	6C → 3C, 3C (1 مرحله) Min

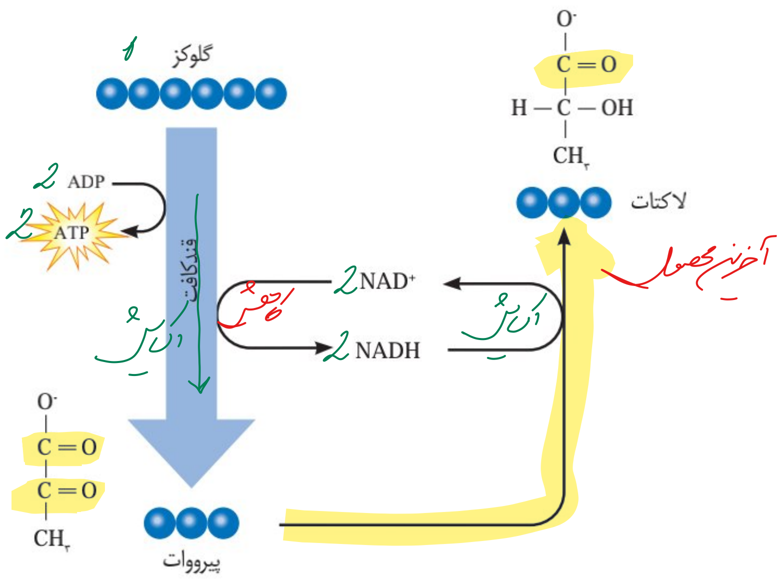
← 1 نوع ماده آلی تولید می‌کند ← لاکتات

← 2 نوع ماده تولید می‌کند ← آلی « اتانول » ← معدنی (CO_2)

← 1 نوع ماده معدنی تولید می‌شود (CO_2)

تخمیر لاکتیکی: در سال گذشته خواندید، ماهیچه‌های اسکلتی برای تجزیه کامل گلوکز به اکسیژن نیاز دارند و اگر اکسیژن کافی نباشد، لاکتات در ماهیچه‌ها تجمع می‌یابد. اما لاکتات با چه سازوکاری ایجاد می‌شود؟

فعالیت شدید ماهیچه‌ها به اکسیژن فراوان نیاز دارد. اگر اکسیژن کافی نباشد، پیرووات حاصل از قندکافت وارد راکیزه نمی‌شود، بلکه با گرفتن الکترون‌های NADH به لاکتات تبدیل می‌شود (شکل ۱۱).

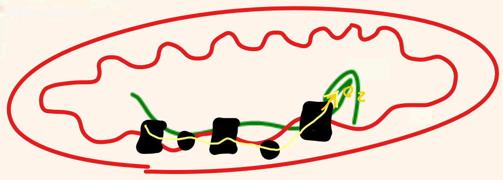


شکل ۱۱ـ تخمیر لاکتیکی. علت ترش شدن شیر، لاکتیک اسید است.

انواعی از باکتری‌ها تخمیر لاکتیکی را انجام می‌دهند. بعضی از این باکتری‌ها، مانند آنچه در ترش شدن شیر رخ می‌دهد، سبب فساد غذا می‌شوند؛ اما انواعی از آنها در تولید فراورده‌های غذایی به کار می‌روند. تخمیر لاکتیکی در تولید فراورده‌های شیری و خوراکی‌هایی مانند خیارشور نقش دارد.

تخمیر در گیاهان: گیاهانی که به طور طبیعی در شرایط غرقابی رشد می‌کنند، سازوکارهایی برای تأمین اکسیژن مورد نیاز دارند. تشکیل بافت پارانشیمی (نرم‌آکنه‌ای) هوادار در گیاهان آبزی و شُش‌ریشه در درخت حَرّا از سازوکارهایی است که قبلاً با آن آشنا شده‌اید.

به هر حال، اگر اکسیژن به هر علتی در محیط نباشد یا کم باشد، تخمیر انجام می‌شود. هر دو نوع تخمیر الکلی و لاکتیکی در گیاهان وجود دارد. توجه داشته باشید که تجمع الکل یا لاکتیک اسید در یاخته گیاهی به مرگ آن می‌انجامد، بنابراین باید از یاخته‌ها دور شوند.



انتهای زنجیره انتقال e (در فضای بستره)

↓

$O_2 + e$

O^{2-}

⟵ 😊 $+H^+$ ⟸ تولید آب

گاهی ⟵ 😟 ⟵ O^{--}

رادیکال آزاد اکسیژن

⟵ در میتوکندری با رادیکال مبارزه می‌شود

* آنتی اکسیدان
* pro زنجیره انتقال e

سرعت تولید رادیکال آزاد > سرعت مبارزه با رادیکال آزاد

⇓

* تجمع رادیکال آزاد *

* در بستره *

O^{--}

↓

واکنش با DNA حلقوی میتوکندری ⟵ نابودی DNA حلقوی میتوکندری ⟵ نابودی میتوکندری

✓ تقارن میتوکندری وابسته به DNA حلقوی آن است

↓

کاهش تولید ATP در سلول و افزایش تخمیر ⟶ نابودی سلول‌ها در اثر کمبود انرژی و تجمع محصولات تخمیر ⟶ بافت مردگی (فاگوسیتوز) ⟶ اختلال در عملکرد اندام

میزان تخمیر در سلول با تعداد میتوکندری رابطه عکس

«علت نابودی سلول‌ها»
✓ کمبود انرژی
✓ تجمع محصولات تخمیر

به دلیل نابودی سلول‌ها

سلامت بدن: پاداکسنده‌ها

در درس شیمی آموختید رادیکال‌های آزاد به علت داشتن الکترون‌های جفت نشده در ساختار خود، واکنش‌پذیری بالایی دارند و می‌توانند در واکنش با مولکول‌های تشکیل دهندهٔ بافت‌های بدن، به آنها آسیب برسانند. امکان تشکیل رادیکال آزاد از اکسیژن در فرایند تنفس هوازی، وجود دارد. اما چگونه؟ دیدیم اکسیژن با پذیرش الکترون در پایان زنجیرهٔ انتقال الکترون، به یون اکسید (O^{2-}) تبدیل می‌شود. یون‌های اکسید با یون‌های هیدروژن (H^{+}) ترکیب می‌شوند و در نتیجه مولکول آب به‌وجود می‌آید اما گاه پیش می‌آید که درصدی از اکسیژن‌ها وارد واکنش تشکیل آب نمی‌شوند، بلکه به‌صورت رادیکال آزاد در می‌آیند. رادیکال‌های آزاد از عوامل ایجاد سرطان‌اند.

راکیزه‌ها برای مقابله با اثر سمی رادیکال‌های آزاد، به ترکیبات پاداکسنده وابسته‌اند. بارها شنیده‌اید که خوردن میوه‌ها و سبزیجات در حفظ سلامت بدن نقش دارند. این موادغذایی دارای پاداکسنده‌هایی مانند کاروتنوئیدها هستند. پاداکسنده‌ها در واکنش با رادیکال‌های آزاد مانع از اثر تخریبی آنها بر مولکول‌های زیستی و درنتیجه تخریب بافت‌های بدن می‌شوند.

تجمع رادیکال‌های آزاد: آیا مبارزه با رادیکال‌های آزاد در راکیزه‌ها همیشه با موفقیت انجام می‌شود؟ اگر به هر علت سرعت تشکیل رادیکال‌های آزاد از سرعت مبارزه با آنها بیشتر باشد، چه اتفاقی را پیش‌بینی می‌کنید؟

مشخص است که در چنین شرایطی، رادیکال‌های آزاد در راکیزه تجمع می‌یابند و آن را تخریب می‌کنند؛ در نتیجه، یاخته هم تخریب می‌شود. رادیکال‌های آزاد برای جبران کمبود الکترونی خود به مولکول‌های سازندهٔ یاخته و اجزای آن، حمله می‌کنند و باعث تخریب آنها می‌شوند. عوامل فراوانی می‌توانند، راکیزه را در مبارزه با رادیکال‌های آزاد با مشکل روبه‌رو کنند؛ مثلاً الکل و انواعی از نقص‌های ژنی در عملکرد راکیزه در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد مشکل ایجاد می‌کنند.

اثر الکل: مطالعات نشان می‌دهد که الکل سرعت تشکیل رادیکال‌های آزاد از اکسیژن را افزایش می‌دهد و مانع از عملکرد راکیزه در جهت کاهش آنها می‌شود. رادیکال‌های آزاد با حمله به DNA راکیزه، سبب تخریب راکیزه و در نتیجه مرگ یاخته‌های کبدی و بافت مردگی (نکروز) کبد می‌شوند. به همین علت اختلال در کار کبد و از کار افتادن آن از شایع‌ترین عوارض نوشیدن مشروبات الکلی است.

نقص ژنی: گاه نقص در ژن‌های مربوط به پروتئین‌های زنجیرهٔ انتقال الکترون، به ساخته شدن پروتئین‌های معیوب می‌انجامد. راکیزه‌ای که این پروتئین‌های معیوب را داشته باشد در مبارزه با رادیکال‌های آزاد، عملکرد مناسبی ندارد.

✓ مواد رنگی گیاهان ← همگی آنتی اکسیدان هستند.

✓ هر آنتی اکسیدانی رنگیزه نیست، اما هر رنگیزه، آنتی اکسیدان است.

مواد رنگی ≠ رنگدانه ≠ رنگیزه ≠ آنتی اکسیدان

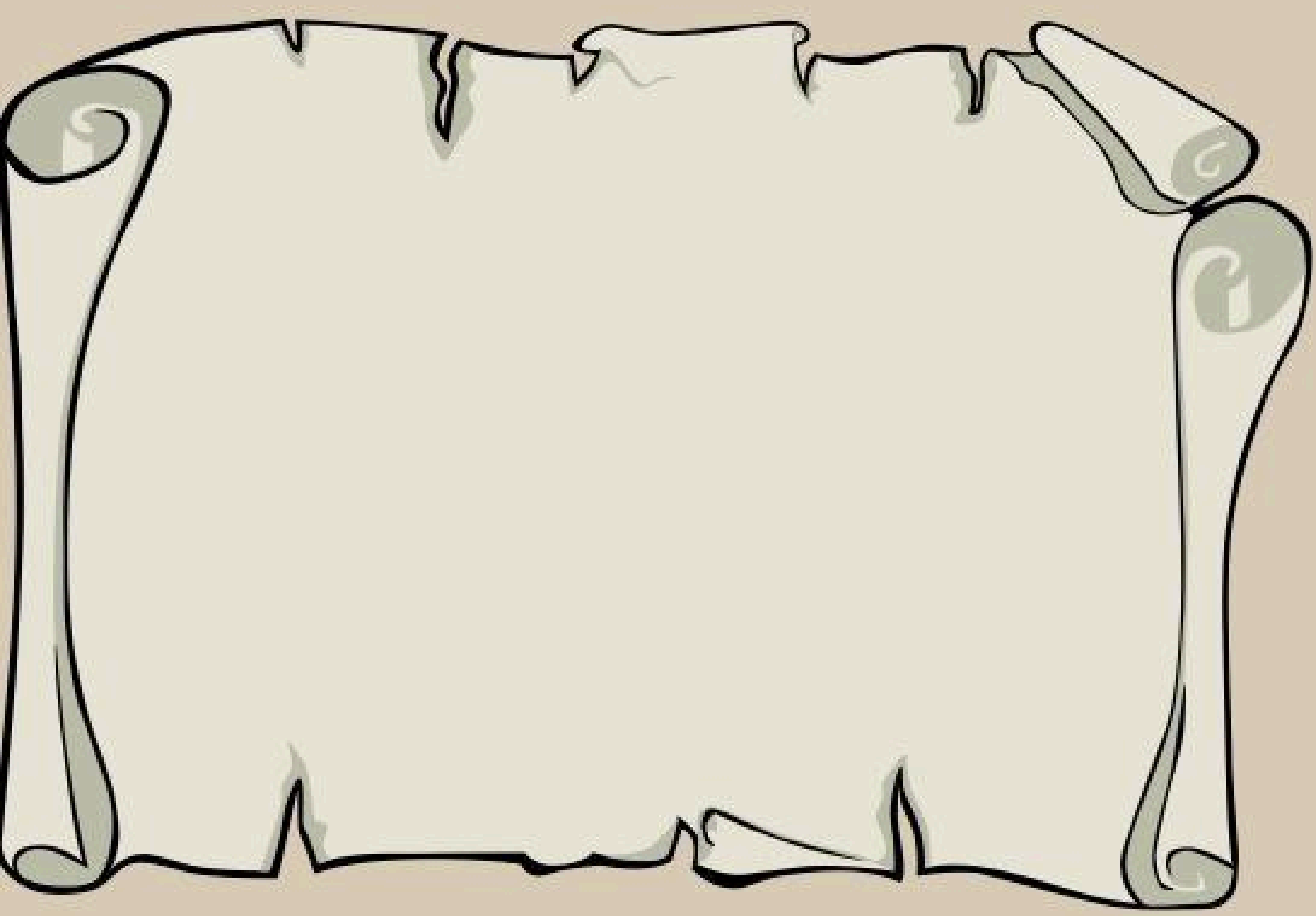
- مواد رنگی: در سلول‌های گیاهی و جانوری، ......
- رنگدانه: در سلول‌های غیر گیاهی باعث ایجاد رنگ می‌شود. EX: هموگلوبین، ملانین
- رنگیزه: گروهی از مواد رنگی سلول‌های فتوسنتز کننده که طول موج مشخصی از نور خورشید را جذب می‌کنند ← باعث ایجاد رنگی می‌شود. EX ← کلروفیل‌ها، کاروتنوئیدها
- آنتی اکسیدان: مواد رنگی در سلول‌های گیاهی

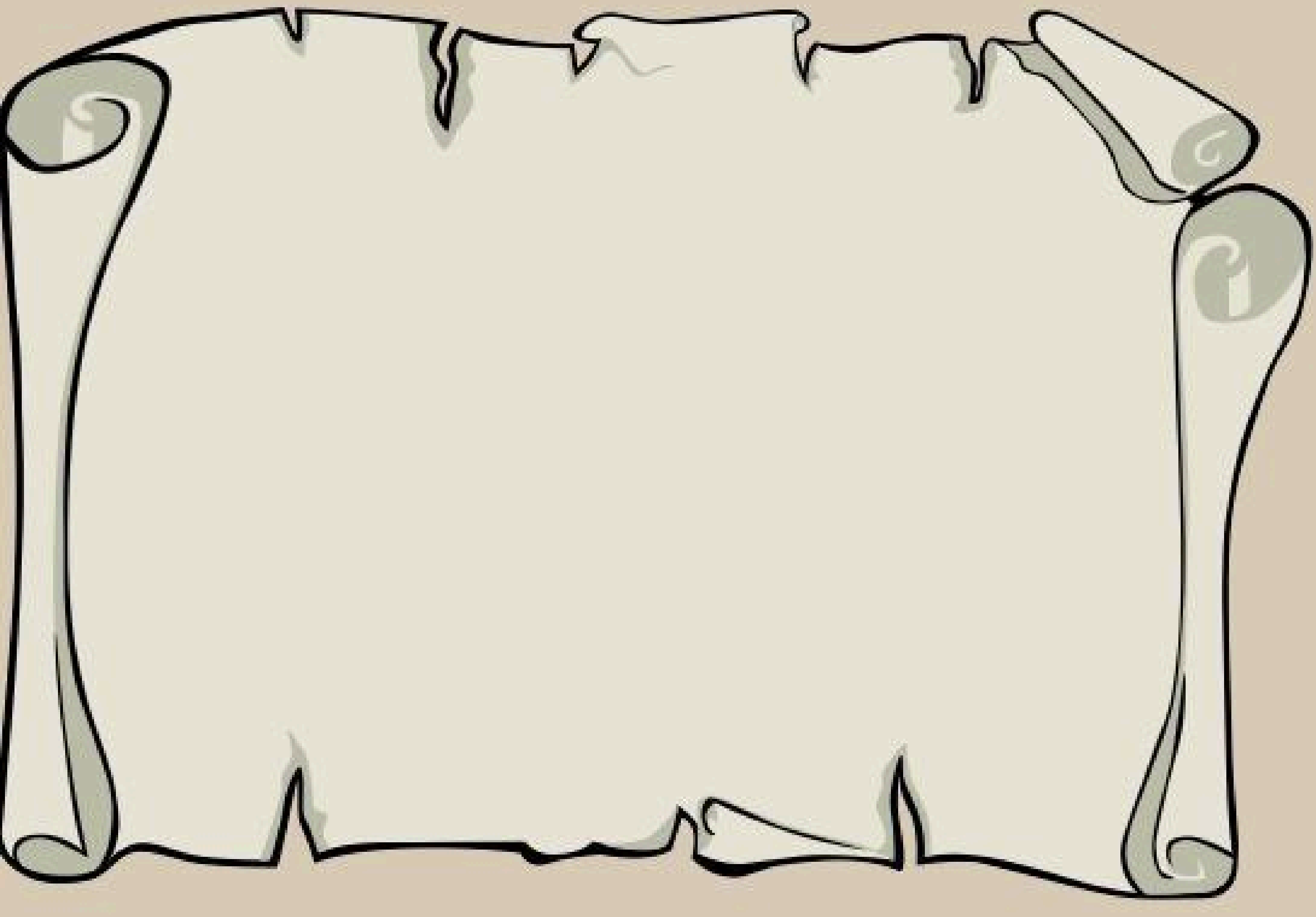
مواد رنگی گیاهان / آنتی اکسیدان ← کلروفیل‌ها + کاروتنوئیدها + آنتوسیانین

(کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها: رنگیزه هستند)

- کلروفیل‌ها:
  - محل: در کلروپلاست
  - وظیفه: فتوسنتز
  - رنگ سبز
- کاروتنوئیدها:
  - محل: کلروپلاست، کروموپلاست
  - وظایف: فتوسنتز / ایجاد رنگ در بخش‌های غیر فتوسنتز کننده
  - رنگ زرد و قرمز و نارنجی
- آنتوسیانین:
  - کریچه (واکوئول)
  - وظیفه: ایجاد رنگ‌های مختلف در pH های مختلف
  - رنگ سرخابی

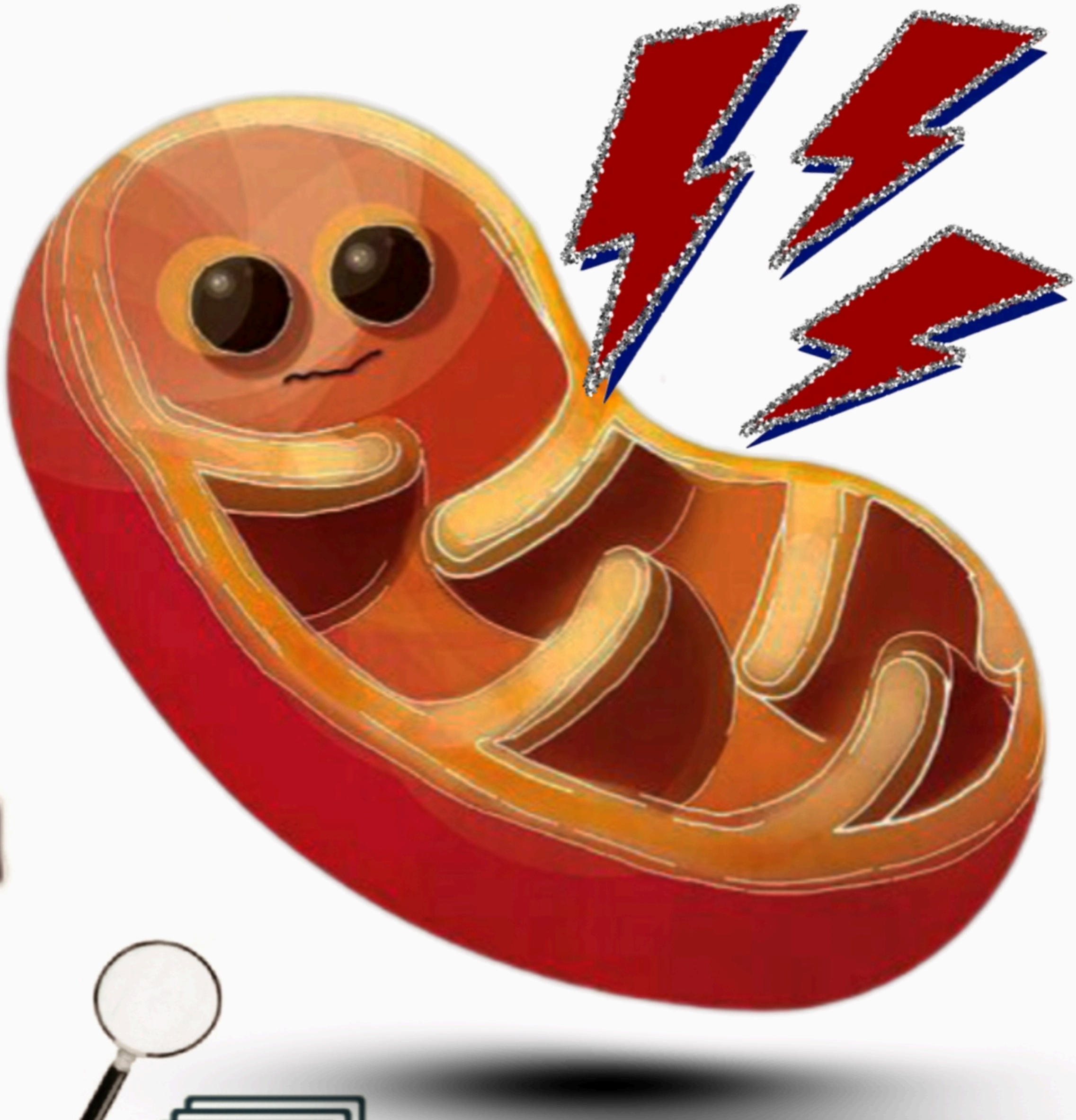
توقف انتقال الکترون: مواد سمی فراوانی وجود دارند که با مهار یک یا تعدادی از واکنش‌های تنفس هوازی، سبب توقف تنفس یاخته و مرگ می‌شوند. **سیانید** یکی از این ترکیب‌هاست که واکنش نهایی مربوط به انتقال الکترون‌ها به O_2 را مهار و در نتیجه باعث توقف زنجیره انتقال الکترون می‌شود. از زیست‌شناسی سال دهم نیز به یاد دارید که گاز کربن مونواکسید با اتصال به هموگلوبین، مانع از اتصال اکسیژن به آن می‌شود و چون به آسانی از هموگلوبین جدا نمی‌شود، ظرفیت حمل اکسیژن در خون را کاهش می‌دهد. این عملکرد مونواکسیدکربن، در واقع در انجام تنفس یاخته‌ای اختلال ایجاد می‌کند. مونواکسید کربن به شکل دیگری نیز بر تنفس یاخته ای اثر می گذارد؛ این گاز سبب توقف واکنش مربوط به انتقال الکترون‌ها به اکسیژن می‌شود. دود خارج شده از خودروها و سیگار، از منابع دیگر تولید مونواکسیدکربن‌اند.





زیست ۳

«از ماده به انرژی»



BIO GALLERY

فصل ۵

دکتر زهرا همایونی

واکنش ۱ـ تنفس یاخته‌ای ✓ (هوازی)

پیش‌ماده‌ها (۹ عدد ـ ۴ نوع) — فراورده‌ها (۱۳ عدد ـ ۳ نوع)

$$1C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 1ADP + 1P(\text{فسفات}) \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 1ATP$$

نوعی سوخت

$C_6H_{12}O_6$ (آلی): «گلوکز»
- * سوخت رایج سلول *
- منبع C است ✓
- منبع اصلی e در تنفس سلولی ✓
- مونوساکارید 6C ✓
- تأمین از طریق مواد غذایی ✓
- در جانوران حاصل عملکرد دستگاه گوارش ✓
- (در جانداران فتوسنتزکننده تولید محصول فتوسنتز است / فتوسنتز شده)

O_2 (معدنی): «اکسیژن»
- مولکول اکسیژن (2 اتم) ✓
- لازمه تنفس سلولی هوازی ✓
- تأمین از طریق دم ✓
- کمترین پیش‌ماده ✓

ADP (آلی): «آدنوزین دی‌فسفات»
- نوکلئوتید ریبوزدار و دارای A ✓
- نوکلئوتید ۲ فسفاته ✓
- نوکلئوتید مصرفی تنفس سلولی ✓

P (معدنی): «PO_4^{3-}»
- گروه فسفات ✓
- یون باردار (-) ✓

CO_2 (معدنی): «کربن دی‌اکسید»
- محصول دفعی تنفس سلولی ✓
- جهت جلوگیری از کاهش PH ✓ محیط داخلی باید از طریق بازدم دفع شود.

H_2O (معدنی): «آب»
- محصول جانبی تنفس سلولی ✓

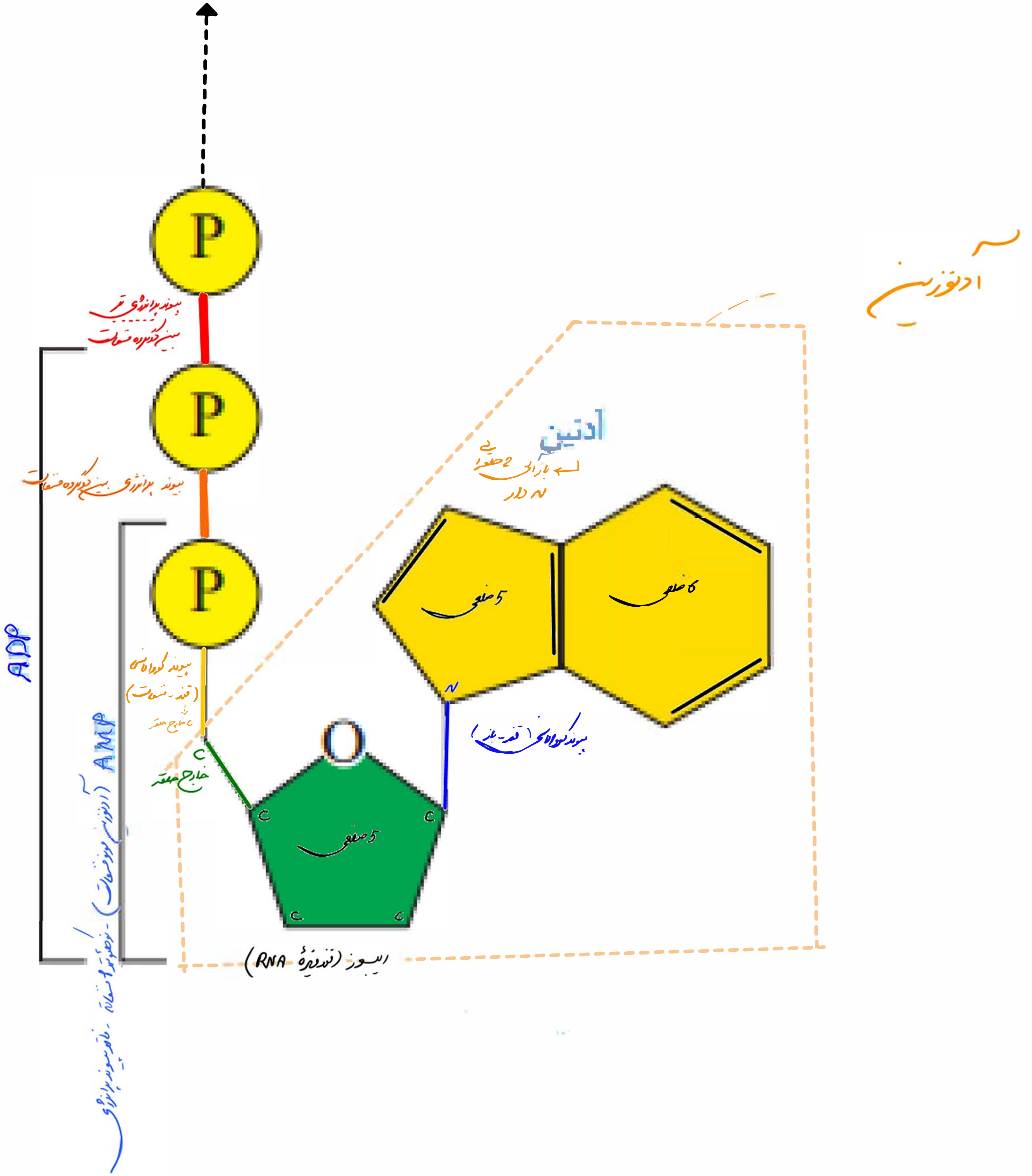
ATP (آلی): «آدنوزین تری‌فسفات»
- نوکلئوتید سه‌فسفاته ✓
- نوکلئوتید تولیدی در تنفس سلولی ✓
- انرژی مصرفی سلول ✓
- کمترین محصول ✓
- محصول اصلی ✓

«از نظر جابه‌جایی e در تنفس سلولی»

$$\text{گلوکز} + 6O_2 \longrightarrow 6H_2O + 6CO_2$$

- گلوکز: منبع e ـ کاهنده ← اکسایش ← CO_2 (محصول اکسایش)
- O_2: اکسنده ـ گیرنده e ← کاهش ← H_2O (محصول کاهش)

~~فسفر~~ $\neq$ (P) = گروه فسفات = PO_4^{3-}



تولید ATP با تولید آب همراه است
پس باعث کاهش فشار اسمزی محیط می‌شود.

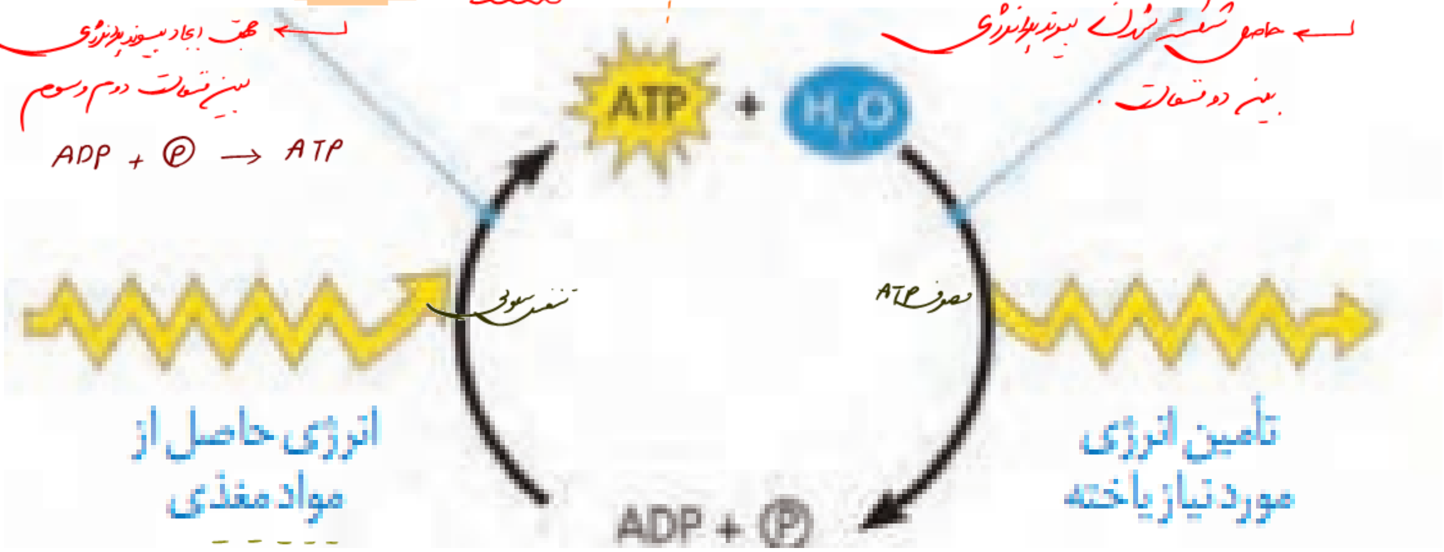
تولید ATP با تنفس سلولی

تجزیه ATP

ساخته شدن ATP از ADP و فسفات به انرژی نیاز دارد.

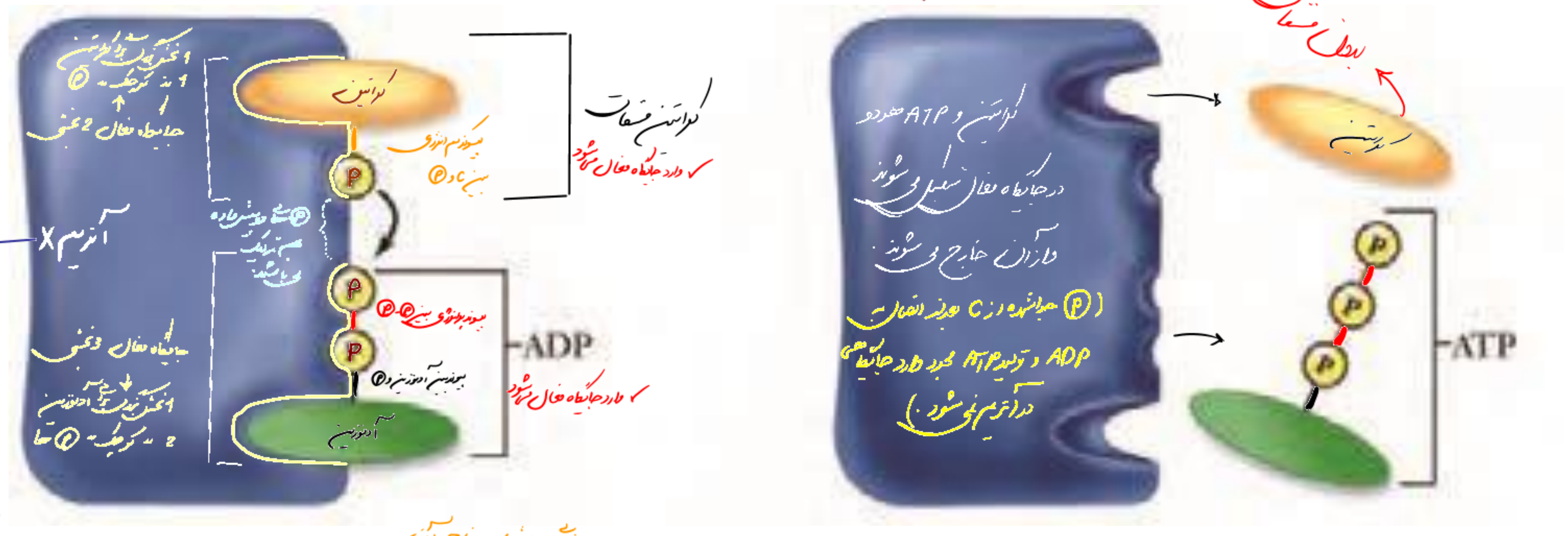
تبدیل ATP به ADP با آزاد شدن انرژی همراه است.

مولکول پرانرژی



شکل ۲ـ تبدیل ADP و ATP به یکدیگر

جابه‌جایی P بین دو پیش‌ماده (خارج آنزیم صورت می‌گیرد)
1) ابتدا شکستن پیوند پر انرژی C—P
2) بعد ایجاد " پر انرژی P—P



یک pro آنزیمی - توسط ریبوزوم‌های آزاد ساخته شده بدون نشانه‌گذاری در سیتوپلاسم فعالیت می‌کند

* دارای 2 جایگاه فعال است که بخشی از پیش‌ماده‌ها خود متصل است - 2 محصول دارد.

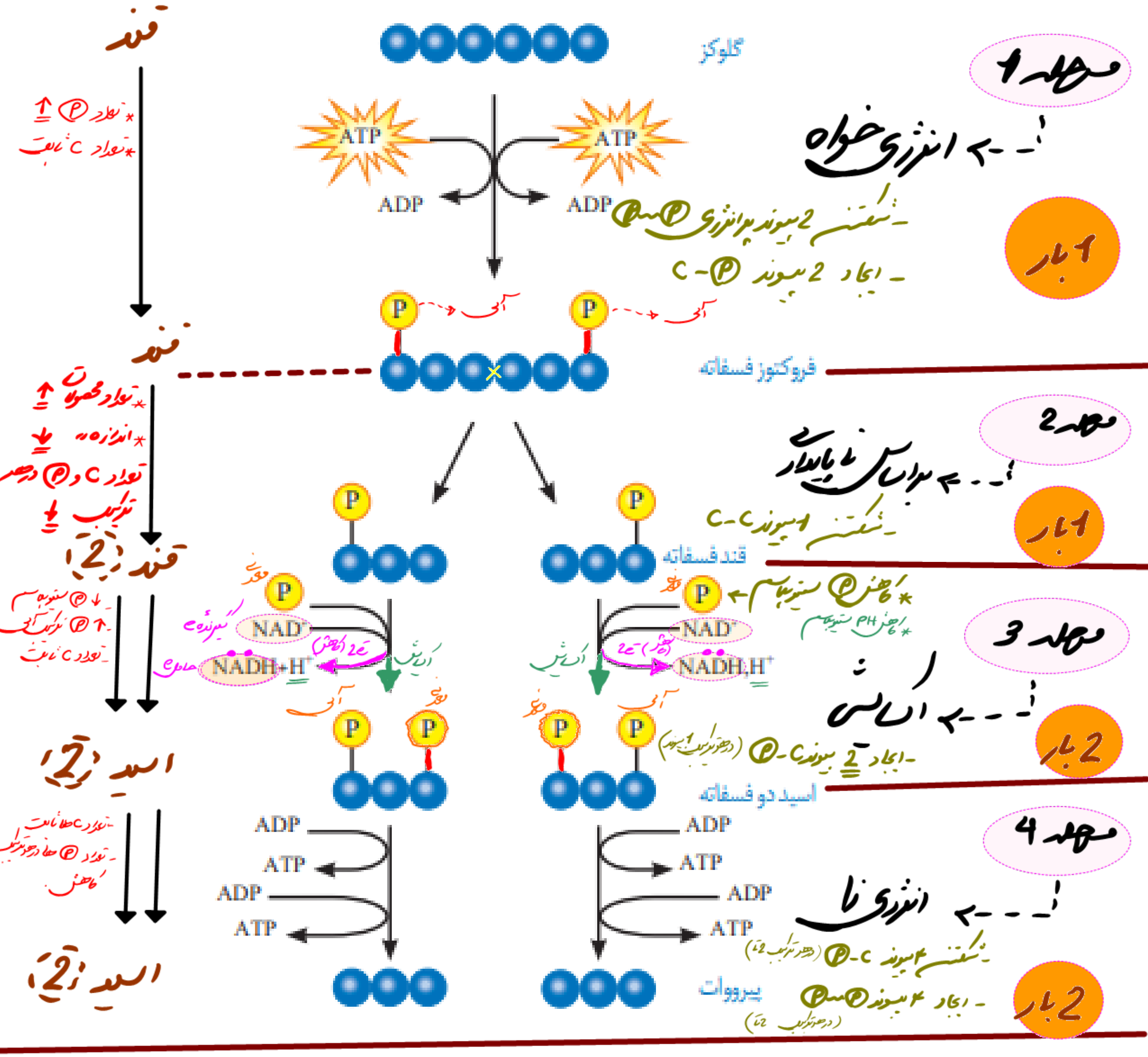
* پیوندهای دو پیش‌ماده خارج آنزیم می‌باشند (در سطح خارج آن)

* مثالی از تولید ATP در سطح پیش‌ماده

CP + ADP —(توسط آنزیم X)→ C + ATP

CP: کراتین فسفات «پیش‌ماده منبع فسفات»
ADP: آدنوزین دی‌فسفات
C: کراتین
ATP: آدنوزین تری‌فسفات

گلیکولیز

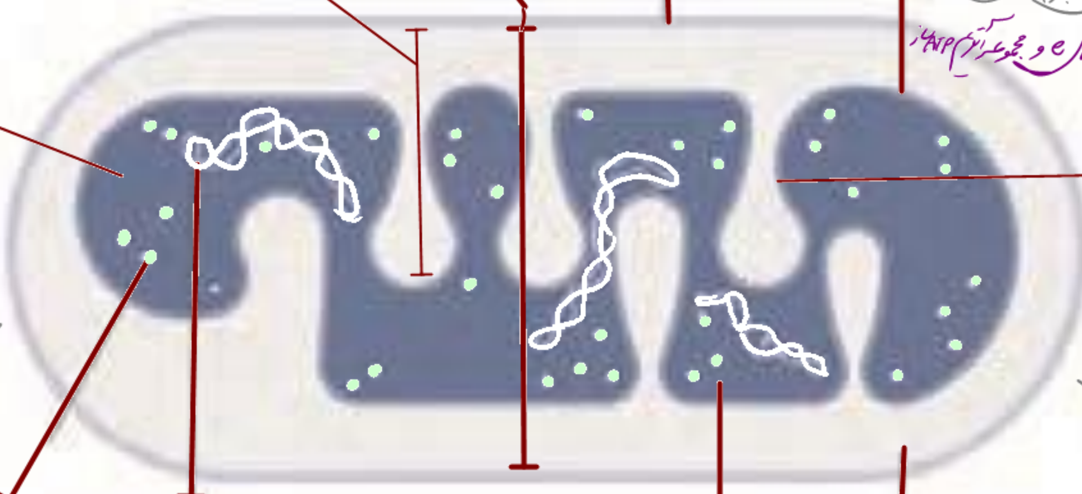


شکل ۲ـ مراحل قندکافت

	مصرف	تولید	خالص: تولید	خالص: مصرف
مرحله 1	2 ATP	2 ADP	2تا ATP	2تا ADP
مرحله 2	–	–	2تا NADH	2تا NAD+
مرحله 3	ـ فسفات سیتوپلاسم 2تا ـ 2تا NAD+	2 NADH 2 H+	2تا H+	2تا P
مرحله 4	4تا ADP	4تا ATP		

ATP 2تا
NADH 2تا

شکل ترسیمی از میتوکندری



با فضای درونی میتوکندری اشتباه نشود - دارای ۱ غشاء چین خورده بین دو فضای میتوکندری است.

غشای بیرونی: از سطح خارجی در تماس با سیتوپلاسم و از سطح داخلی در تماس با فضای بین دو غشا است.

غشای درونی: مساحت بیشتری دارد - به سمت داخل چین خوردگی دارد و سازنده تیغه‌های غشایی کریستا است - از سطح خارجی در تماس با فضای بین دو غشا و از سطح داخلی در تماس با فضای درونی (ستره) است.

* محل قرارگیری زنجیره انتقال e و مجموعه آنزیم ATP ساز

کریستا ← حاصل چین خوردگی غشای داخلی به داخل

ستره ← حالت مایع دارد و فضای درونی را پر کرده. دارای DNA، ریبوزوم، انواع پروتئین‌ها و ... می‌باشد - محل وقوع اکسایش پیرووات و چرخه کربس است.

ریبوزوم ساده کوچک ← شبیه به ریبوزوم‌های باکتری‌ها امکان ترجمه mRNAهای حاصل از DNA حلقوی

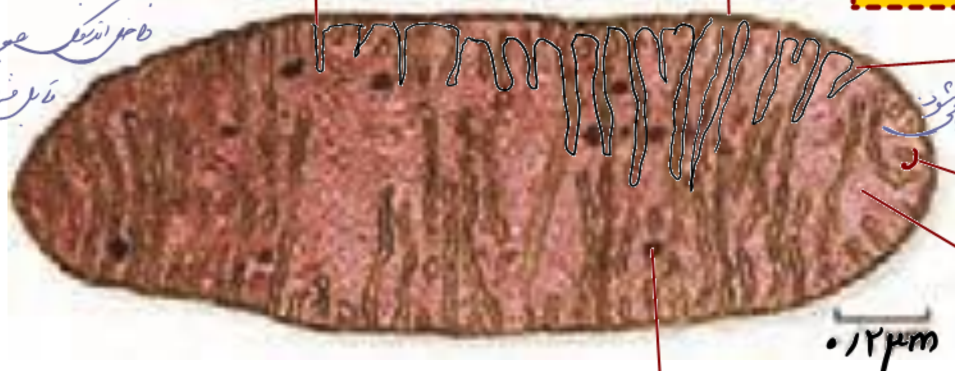
DNA حلقوی ← خود ژنوم سیتوپلاسمی است - تعداد زیادی از آن‌ها در داخل ستره است.

فضای بین دو غشا: این فضای باریک قطر متغیر دارد بین دو غشای میتوکندری است - در تماس با سطح داخلی غشای خارجی و سطح خارجی غشای داخلی است - قطر این فضا در محل تیغه‌های غشایی بیشتر است.

* محل تجمع H^+ *

فضای درونی ← در تماس با سطح داخلی غشای داخلی و پر شده با ستره است.

تصویر گرفته شده با میکروسکوپ نوری



غشای خارجی ← در سطح خارجی اندامک به صورت تیره مشاهده می‌شود

غشای داخلی ← نسبت به غشای خارجی نامشخص‌تر - داخل اندامک به صورت خطوط تیره قابل مشاهده است.

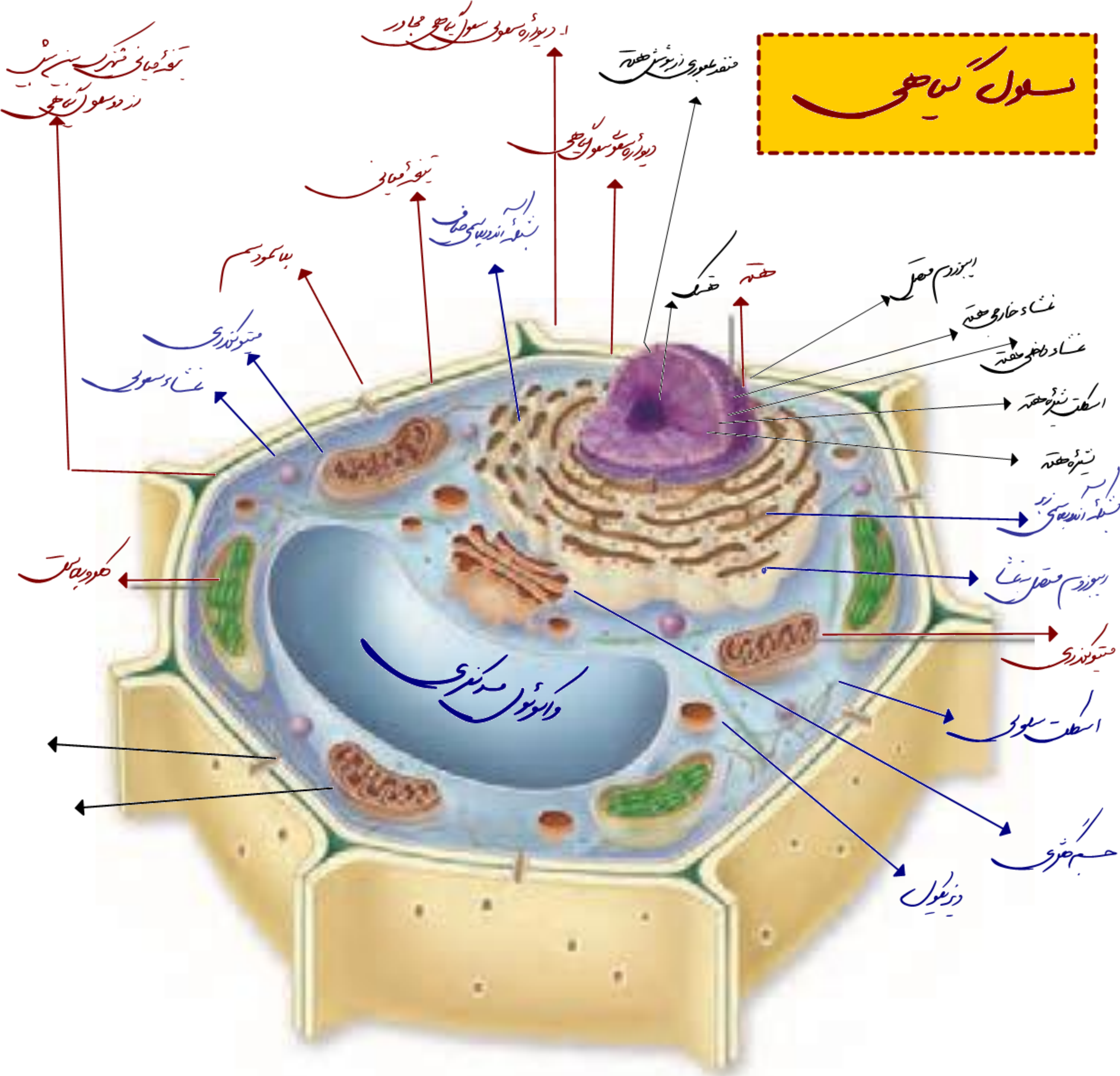
فضای بین دو غشا ← نسبت به فضای داخلی نامشخص‌تر و تیره‌تر دیده می‌شود.

ستره ← همه فضای داخل میتوکندری مشاهده می‌شود.

ریبوزوم ها ← تیره‌ترین نقاط داخل ستره.

میتوکندری > 0/2µm > تیغه‌های غشایی > ریبوزوم‌ها

سلول گیاهی



تیغه میانی مشترک بین دو سلول گیاهی
دیواره سلولی سلول گیاهی مجاور
منفذ عبوری از پوشش هسته
دیواره سلول گیاهی
تیغه میانی
شبکه آندوپلاسمی صاف
پلاسمودسم
میتوکندری
غشاء سلولی
هستک
هسته
ریبوزوم متصل
غشاء خارجی هسته
غشاء داخلی هسته
اسکلت شیره هسته
شیره هسته
شبکه آندوپلاسمی زبر
ریبوزوم متصل به غشا
کلروپلاست
میتوکندری
واکوئول مرکزی
اسکلت سلولی
جسم گلژی
وزیکول

پیش ماده — محصول

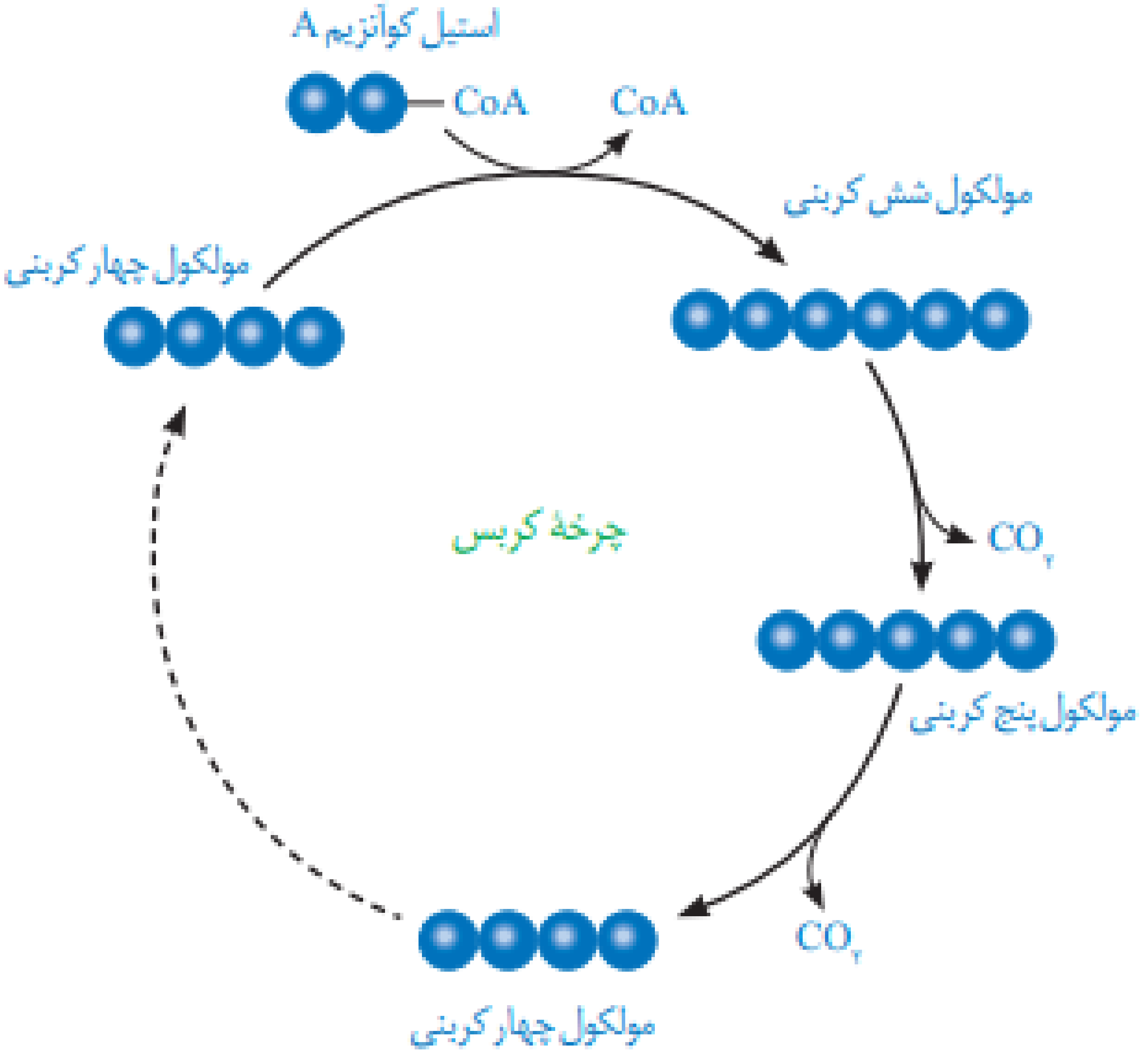
گیرنده الکترون — کاهش — حامل الکترون

$$NAD^{+} + ۲H^{+} + ۲e^{-} \rightleftharpoons NADH + H^{+}$$

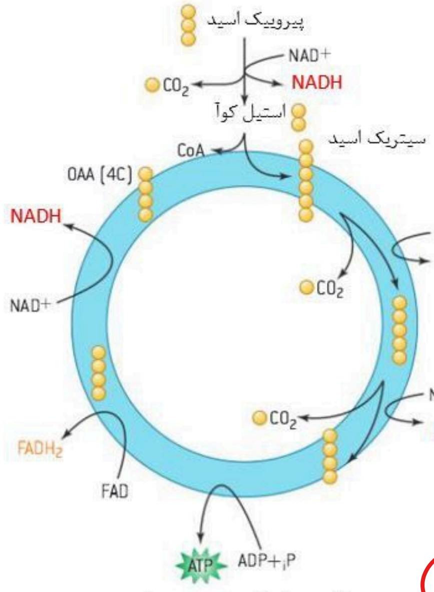
آلی — معدنی — معدنی — اکسایش — آلی — معدنی

محصول — پیش ماده

$$FAD + ۲H^{+} + ۲e^{-} \rightleftharpoons FADH_{۲}$$



استیل کوآنزیم A
CoA
CoA
مولکول شش کربنی
مولکول چهار کربنی
چرخهٔ کربس
CO_2
مولکول پنج کربنی
CO_2
مولکول چهار کربنی



شکل شماره ۴- خلاصه چرخه کربس

مرحله اول :

تنها مرحله که درش ① C ↑ داریم

✓ اول ایجاد پیوند بین استیل CoA با 4C و بعد جدا شدن CoA از ترکیب 6C

✓ CoA مصرف نمی‌شه.

✓ به ازای هر پیوستن ① پیوند C-C ایجاد می‌شه.

مرحله 2 :

6C ⟵ 5C

* اکسایش ✓ آزاد کردن CO_2 (① پیوند C-C ×)

مرحله 3 :

5C ⟵ 4C

* اکسایش ✓ آزاد کردن CO_2 (① پیوند C-C ×) ⟵ پایان تجزیه گلوکز

انرژی‌زا

تولید ATP در سطح پیش‌ماده!

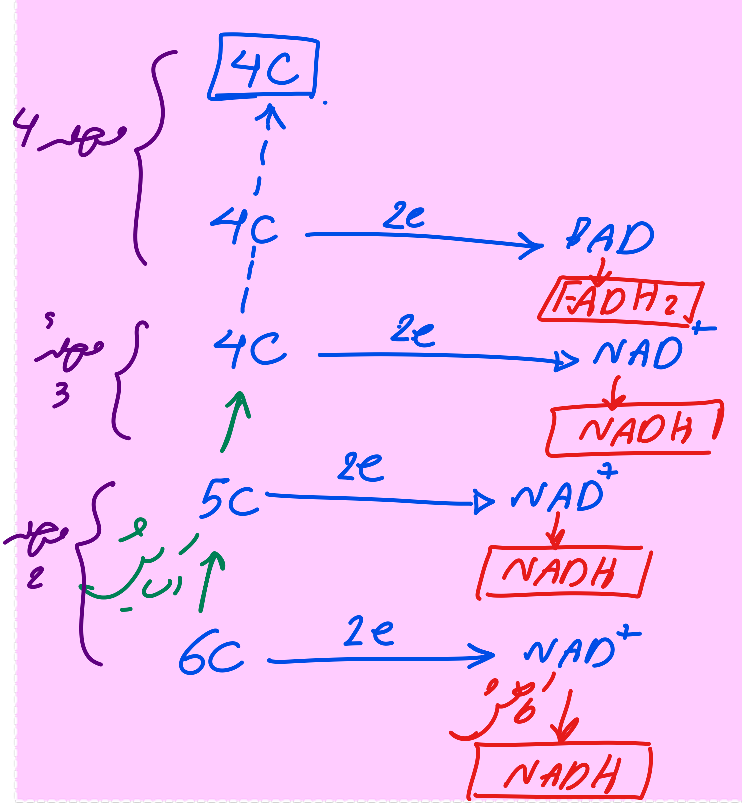
مرحله 4 :

4C - - - - -> 4C

* اکسایشی‌ترین *

تنها مرحله بدون تغییر تعداد C!!

«اکسایش و کاهش‌های چرخه کربس»



موشکافی زنجیرهٔ انتقال الکترون راکیزه

پنجمین مولکول زنجیره:

۱- نوعی پروتئین سراسری است.

۲- فعالیت پمپی داشته و یون‌های هیدروژن را درخلاف جهت شیب غلظت به فضای بین دو غشا منتقل می‌کند.

۳- برای انجام این فعالیت ATP مصرف نمی‌کند.

۴- یک بخش برجسته به سمت فضای درونی راکیزه دارد.

۵- با انتقال الکترون‌ها به اکسیژن مولکولی، سبب تولید یون اکسید می‌شود.

سومین مولکول زنجیره:

۱- نوعی پروتئین سراسری است

۲- فعالیت پمپی داشته و یون‌های هیدروژن را درخلاف جهت شیب غلظت به فضای بین دو غشا منتقل می‌کند.

۳- برای انجام این فعالیت ATP مصرف نمی‌کند.

۴- در حد فاصل بین دو مولکول غیرپمپی و غیرسراسری قرار دارد.

۵- یک بخش برجسته به سمت فضای بین دو غشا دارد.

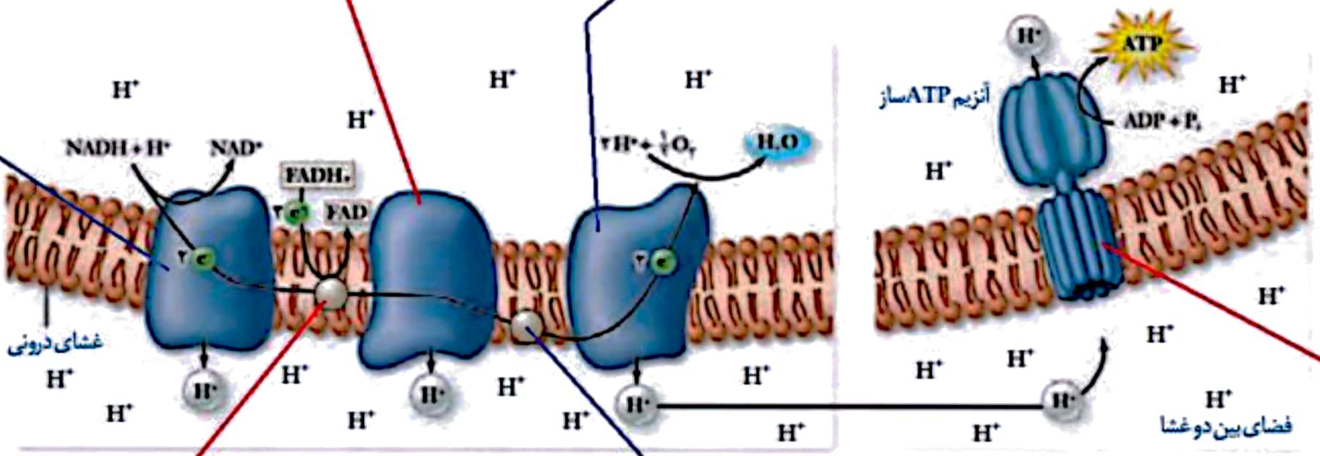
اولین مولکول زنجیره:

۱- نوعی پروتئین سراسری است.

۲- فعالیت پمپی داشته و یون‌های هیدروژن را درخلاف جهت شیب غلظت به فضای بین دو غشا منتقل می‌کند.

۳- برای انجام این فعالیت ATP مصرف نمی‌کند.

۴- الکترون‌های NADH را دریافت می‌کند ولی توانایی دریافت الکترون از $FADH_2$ را ندارد.



دومین مولکول زنجیره:

۱- نوعی مولکول غیرسراسری است که فعالیت پمپی هم ندارد.

۲- آبگریزترین مولکول زنجیرهٔ انتقال الکترون است.

۳- در حد فاصل بین دو پمپ غشایی قرار دارد.

۴- نخستین مولکولی است که الکترون‌های $FADH_2$ را دریافت می‌نماید.

۵- الکترون‌های $FADH_2$ را به طور مستقیم و الکترون‌های NADH را به طور غیرمستقیم دریافت می‌کند.

چهارمین مولکول زنجیره:

۱- نوعی مولکول غیرسراسری است که فعالیت پمپی هم ندارد.

۲- به فضای بین دو غشای راکیزه نزدیک‌تر از فضای داخلی راکیزه است.

۳- در حد فاصل بین دو پروتئین سراسری قرار دارد.

۴- آبدوست است.

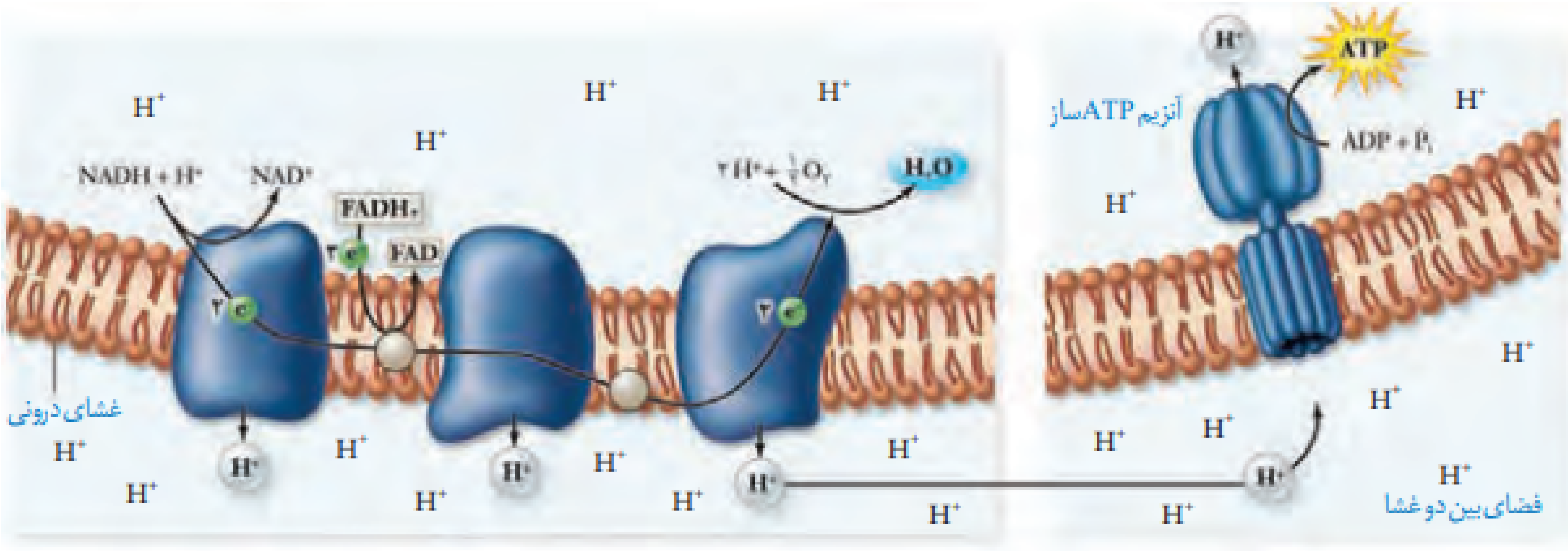
آنزیم ATP ساز:

۱- جزء زنجیرهٔ انتقال الکترون نیست.

۲- از یک قسمت داخل غشایی و یک قسمت خارج غشایی تشکیل شده است که به سمت فضای درونی راکیزه قرار دارد.

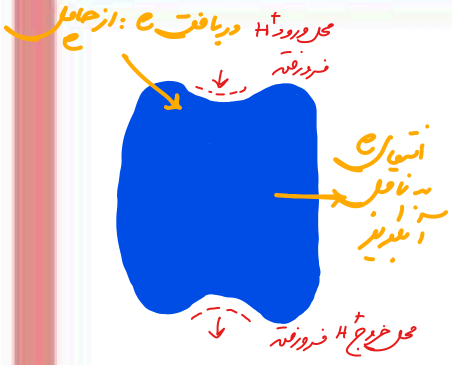
۳- یون‌های هیدروژن را از فضای بین دو غشا به فضای داخلی راکیزه منتقل می‌کند.

۴- با متصل کردن فسفات به ADP سبب تولید ATP می‌شود.



NADH + H⁺
NAD⁺
FADH۲
FAD
۲ e⁻
۲H⁺ + ½ O۲
H۲O
ATP
آنزیم ATPساز
ADP + Pi
غشای درونی
فضای بین دو غشا
H⁺

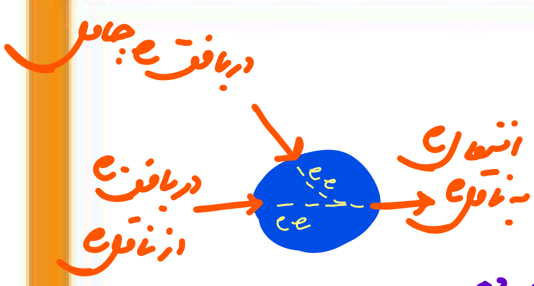
* پمپ 1 - pro 1



دریافت e از NADH ، بزرگترین
انتقال e به ناقل آنزیمی

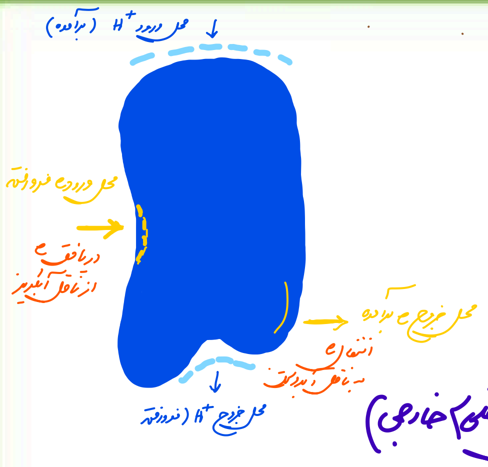
✓ اولین pro زنجیره انتقال e ، اولین جایگاه واکنش
✓ کمترین e عبوری رو داره - فقط e های NADH ازش عبور میکنن
↲ بجز پمپ 2 و 3 ، H^+ تقریبی همه پمپ ها می کنند
✓ محل اکسایش NADH (بازسازی NAD^+)
* از عرض غشا بزرگتر است ⇐ در تماس با هر دو فضای میتوکندری (سطح تماس با فضای داخلی < فضای خارجی)

* پمپ 2 - pro 2 کمترین آنزیمی



✓ شروع مسیر مشترک e های NADH و $FADH_2$.
✓ محل اکسایش $FADH_2$ (بازسازی FAD)
✓ بین پمپ 1 و 2 ✓ e رو هم از حامل e و هم از ناقل e می گیره و به ناقل می ده
پمپ اول ← $FADH_2$ ←
پمپ دوم ←
* در تماس با سطح فضای درون میتوکندری نیست و در عرض غشای داخلی میتوکندری
در تماس با اسیدهای چرب (بخش آنزیمی) هر دو لایه فسفولیپید می باشد.

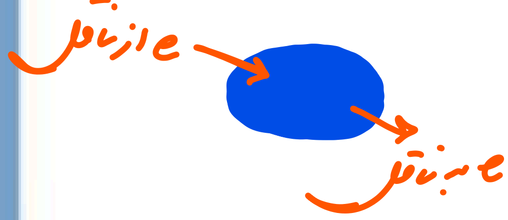
* pro 3 - پمپ 2



✓ pro بین pro 2 غیر پمپی است.
✓ pro وسط زنجیره انتقال e
* اولین پمپی که از انرژی e های NADH و $FADH_2$ جهت انتقال فعال H^+ استفاده می کند
* از عرض غشا بزرگتر است و در تماس با هر دو فضای میتوکندری (سطح تماس با فضای داخلی < خارجی)

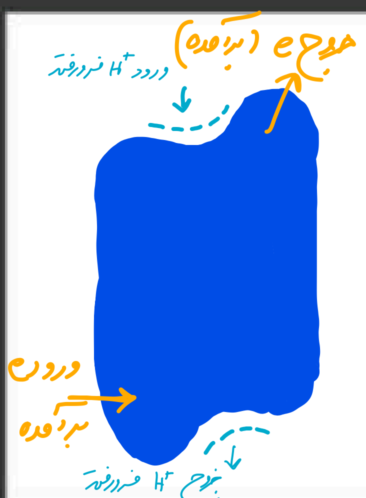
* pro 4 - pro کمترین آبدوست

★ فقط در تماس با فضای خارجی میتوکندری
در تماس با بخش آبدوست لایه فسفولیپید خارجی غشای داخلی است.



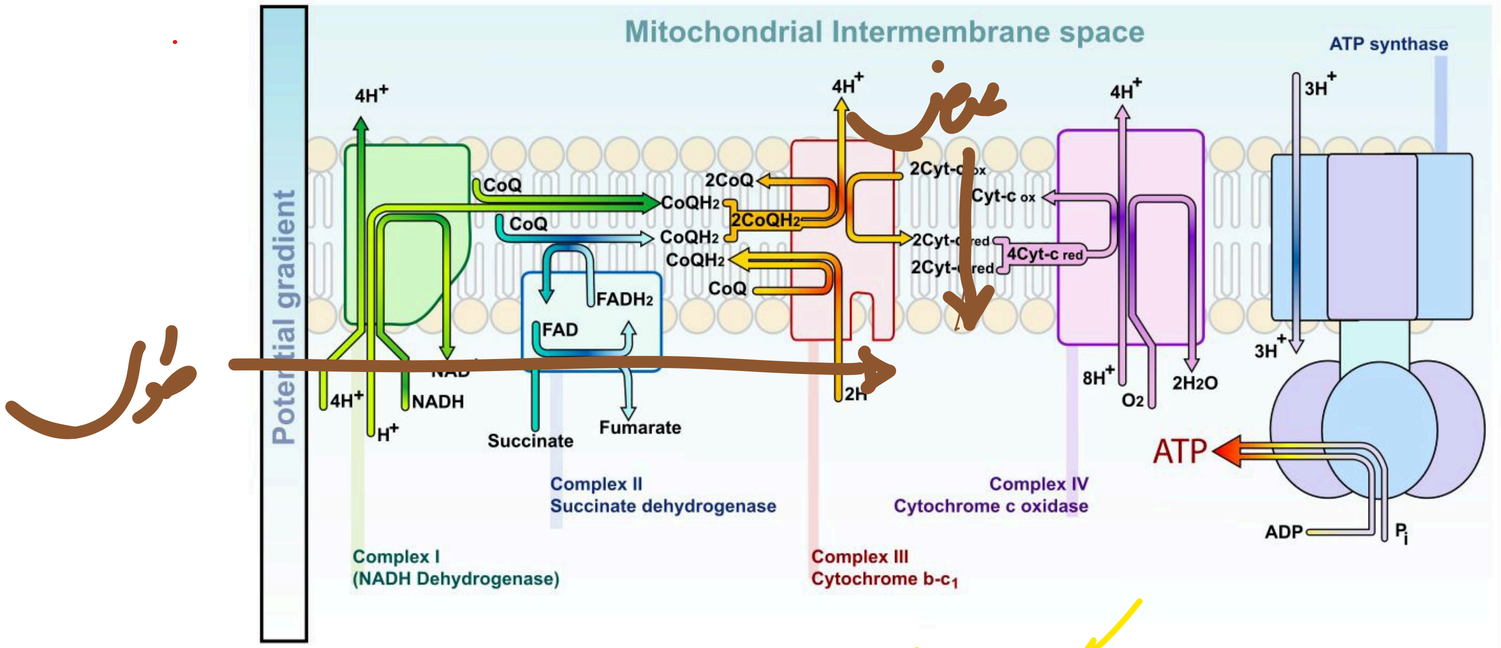
✓ بین پمپ 2 و 3
✓ امکان جابجایی e در فضای بین دو غشا.
✓ e از ناقل می گیره و به ناقل می ده.
✓ فقط در تماس با فضای خارجی میتوکندری و بخش آبدوست
لایه خارجی فسفولیپید غشای داخلی است.

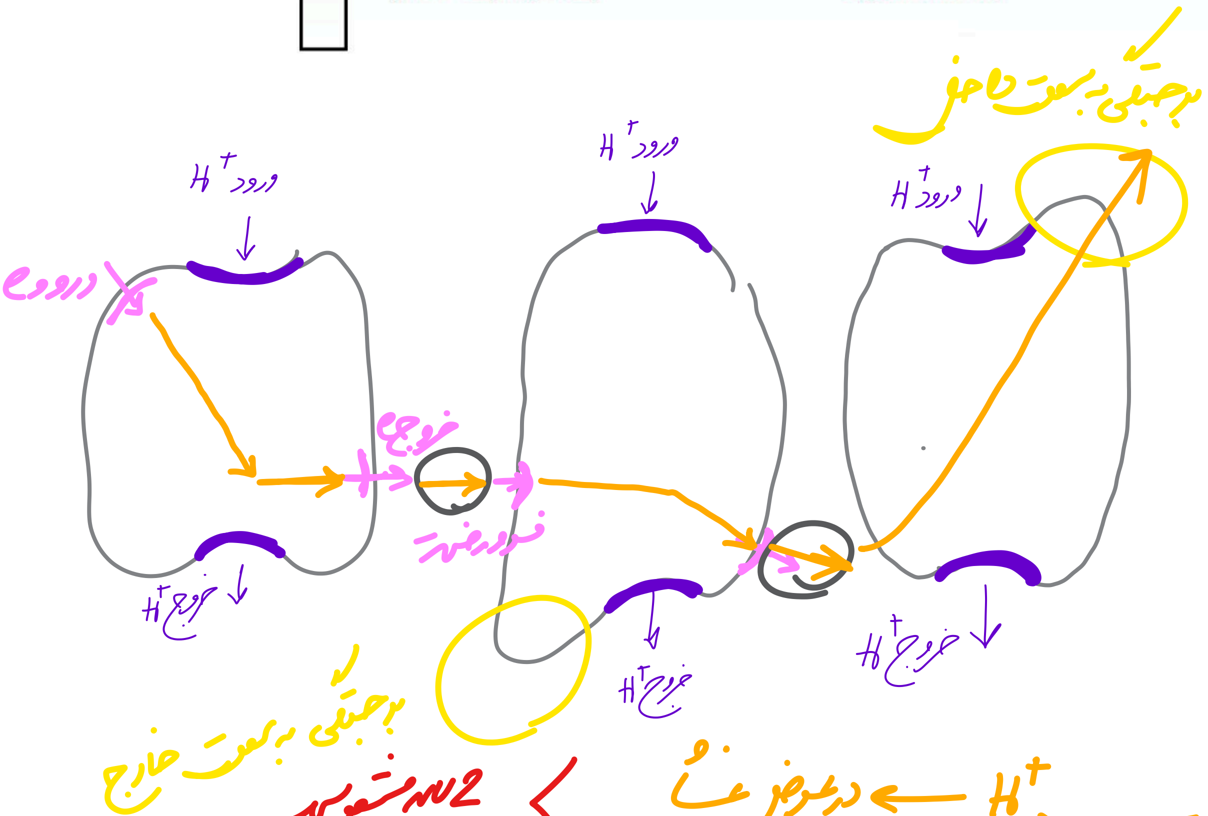
* pro 5 - پمپ 3



دریافت e از ناقل آبدوست
انتقال e به مولکول O_2

✓ آخرین pro زنجیره انتقال e . آخرین جایگاه واکنش
✓ انتهای مسیر e ✓ دریافت e از ناقل و انتقال e به اکسیژن.
✓ استفاده از انرژی e های NADH و $FADH_2$ جهت انتقال فعال H^+
✓ از عرض غشا بزرگتر است ⇐ در تماس با هر دو فضای میتوکندری (سطح تماس با فضای داخلی < خارجی)





1 pro

حرکت > H+ ← در عرض غشا < 2 لایه فسفولیپید

حرکت > e ← در عرض غشا < 1 لایه فسفولیپید ← به سمت خارج

e ← در طول غشا

ورود e در غشا

خروج e از فضای داخلی

2 pro

حرکت ← e ← در طول غشا

3 pro

حرکت ← H ← در عرض غشا < 2 لایه فسفولیپید

e ← در عرض غشا > 1 لایه فسفولیپید ← به سمت خارج

e ← در طول غشا

4Pro

حرکت e ← در عرض > 1 لایه مستقیم بگذرد. به سمت خارج
حرکت e ← طول غشا

ورود e به فضای خارجی
خروج e از غشا

5Pro

حرکت ← H ← در عرض غشا > 2 لایه مستقیم بگذرد.
حرکت ← e ← طول غشا
حرکت ← e ← در عرض غشا > 2 لایه مستقیم بگذرد. به سمت داخل

خروج e از فضای بیرونی و ورود آن به فضای داخلی

Max جا به جایی e در عرض غشا

≠ جابه‌جایی e در عرض غشا توسط سایر Pro

• مجموعه آنزیم ATP ساز • ← Pro 17

* کانالی:
نصف بخش آنزیمی کوچک‌تر است. در عرض غشاء داخلی است. ارتفاع آن به اندازه غشا. از 10 Pro ساخته شده که غشایی و سرتاسری هستند و وسطشون یک کانال ایجاد شده. در تماس با هر دو فضای میتوکندری است.

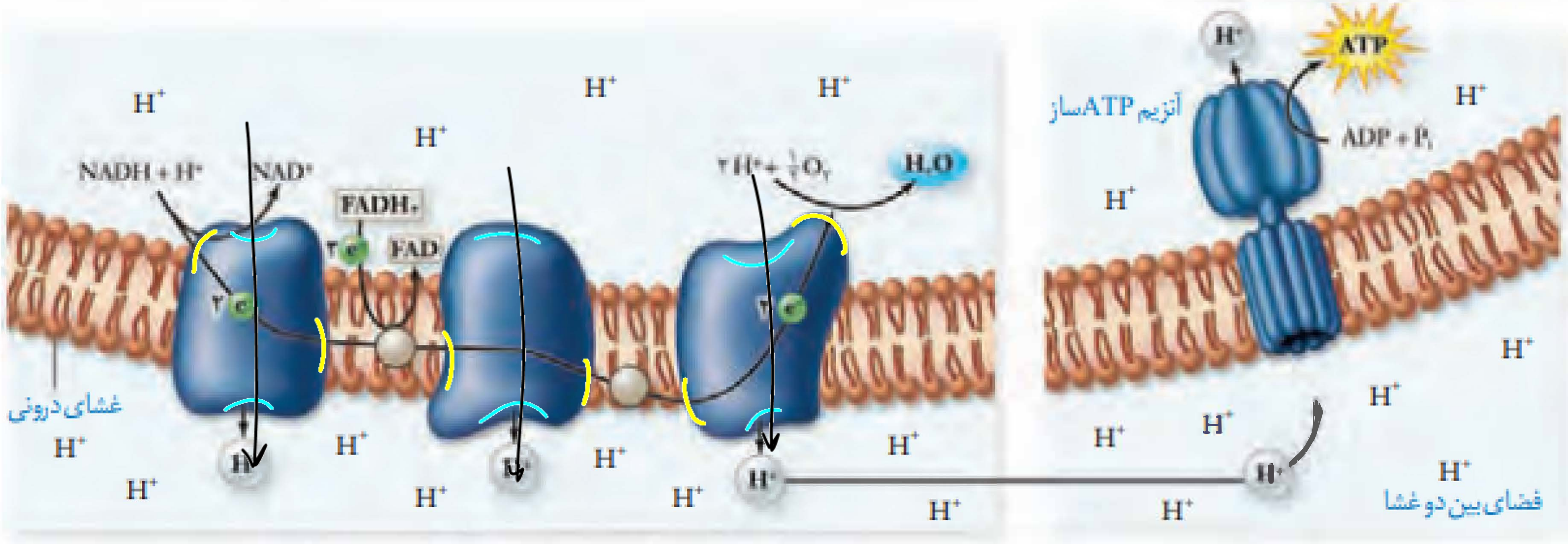
بیشترین Pro های مجموعه ATP ساز
شبیه‌ترین " " "

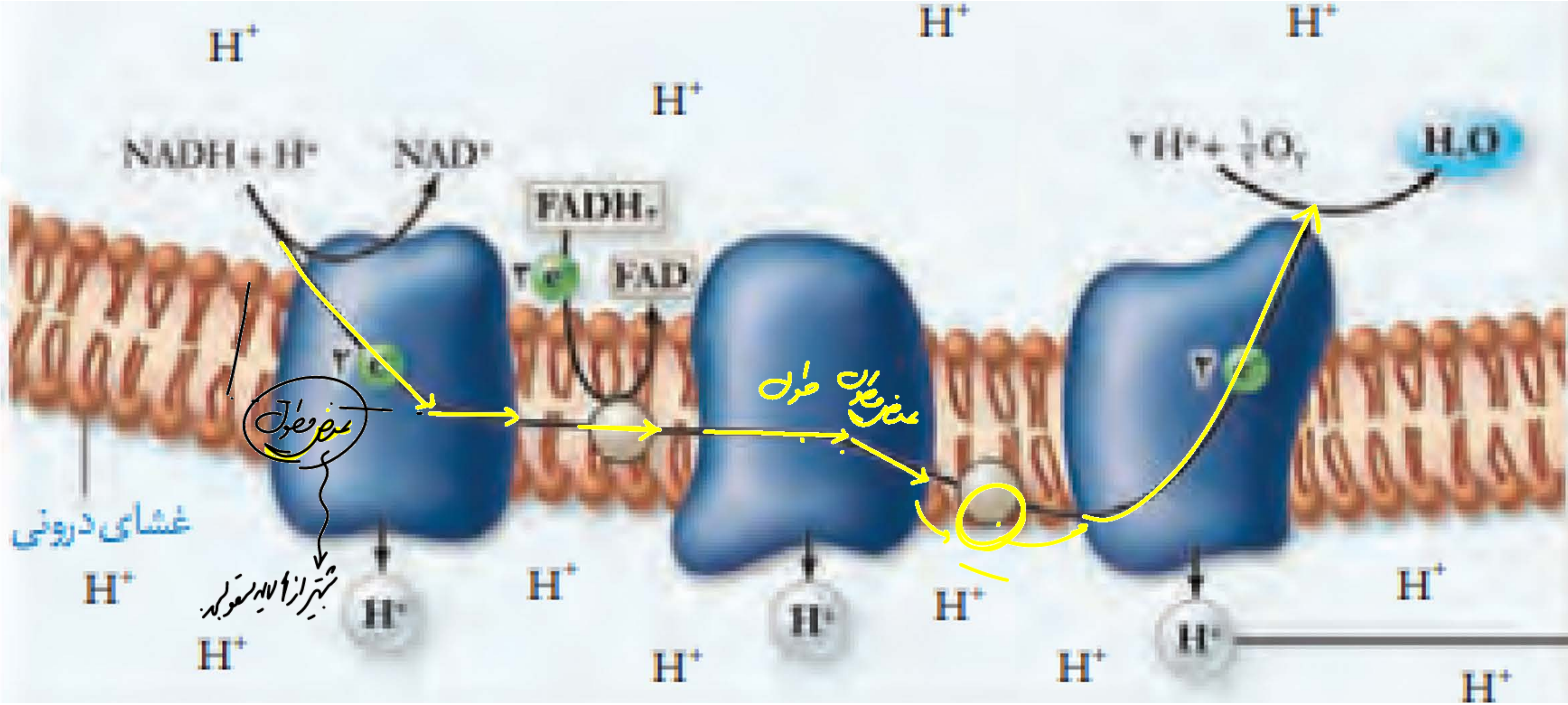
* انتقال دهنده
در اتصال با هر دو بخش دیگر مجموعه ATP ساز. از 1 Pro کوتاه و قطور ساخته شده و در وسطش فضایی برای عبور H^+ وجود داره. H^+ از بخش کانالی به آنزیمی می‌بره. کاملاً در فضای داخلی میتوکندری است. در تماس با بخش بیرونی نیست.

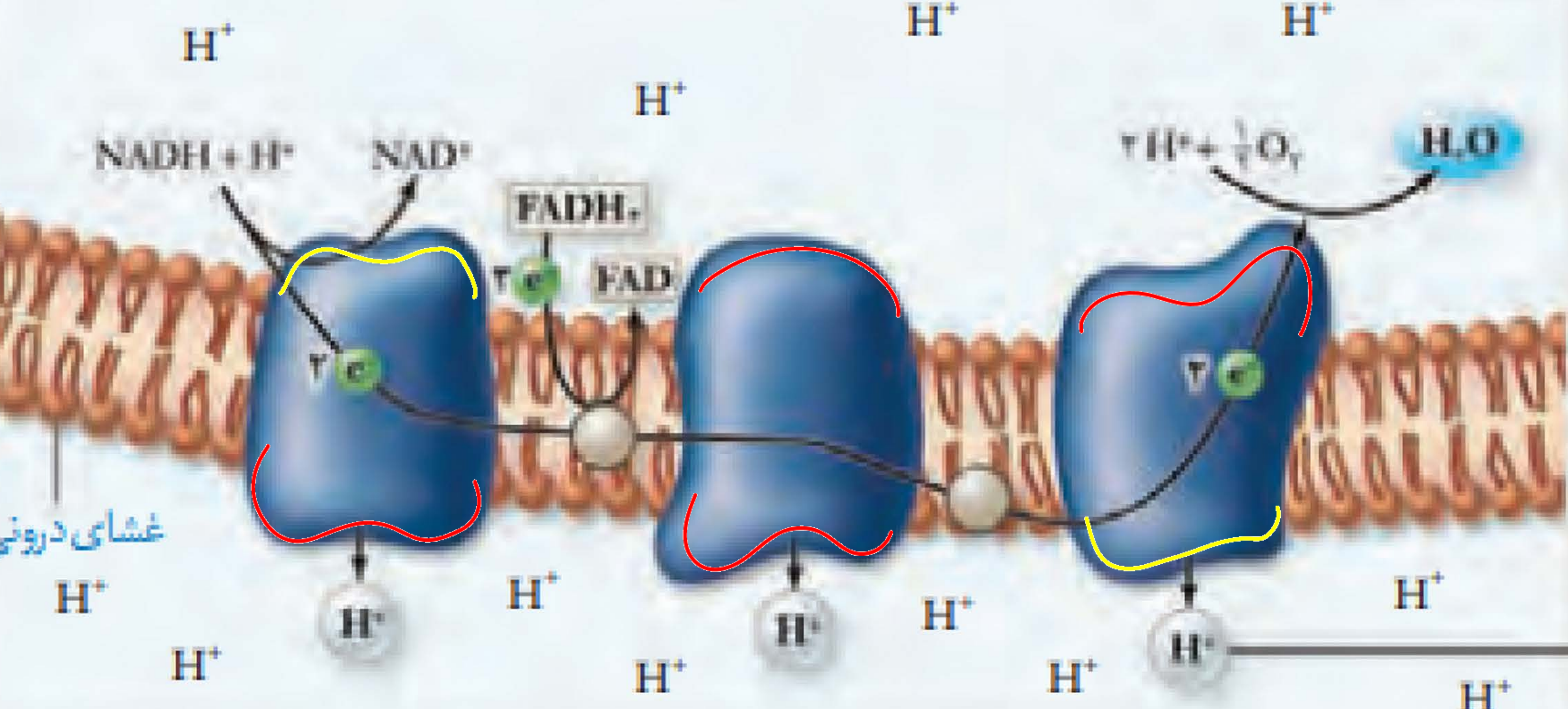
کوتاه‌ترین و کمترین Pro مجموعه ATP ساز (تنها Pro که H^+ از وسطش عبور می‌کند)

* بخش آنزیمی
بزرگترین بخش مجموعه ATP ساز است. از 6 Pro آنزیمی ساخته شده و وسطشان فضایی جهت عبور H^+ وجود داره. از انرژی عبور H^+ استفاده می‌کنه و تولید ATP در فضای داخلی انجام می‌ده. در تماس با بخش بیرونی نیست. کاملاً در بستره.

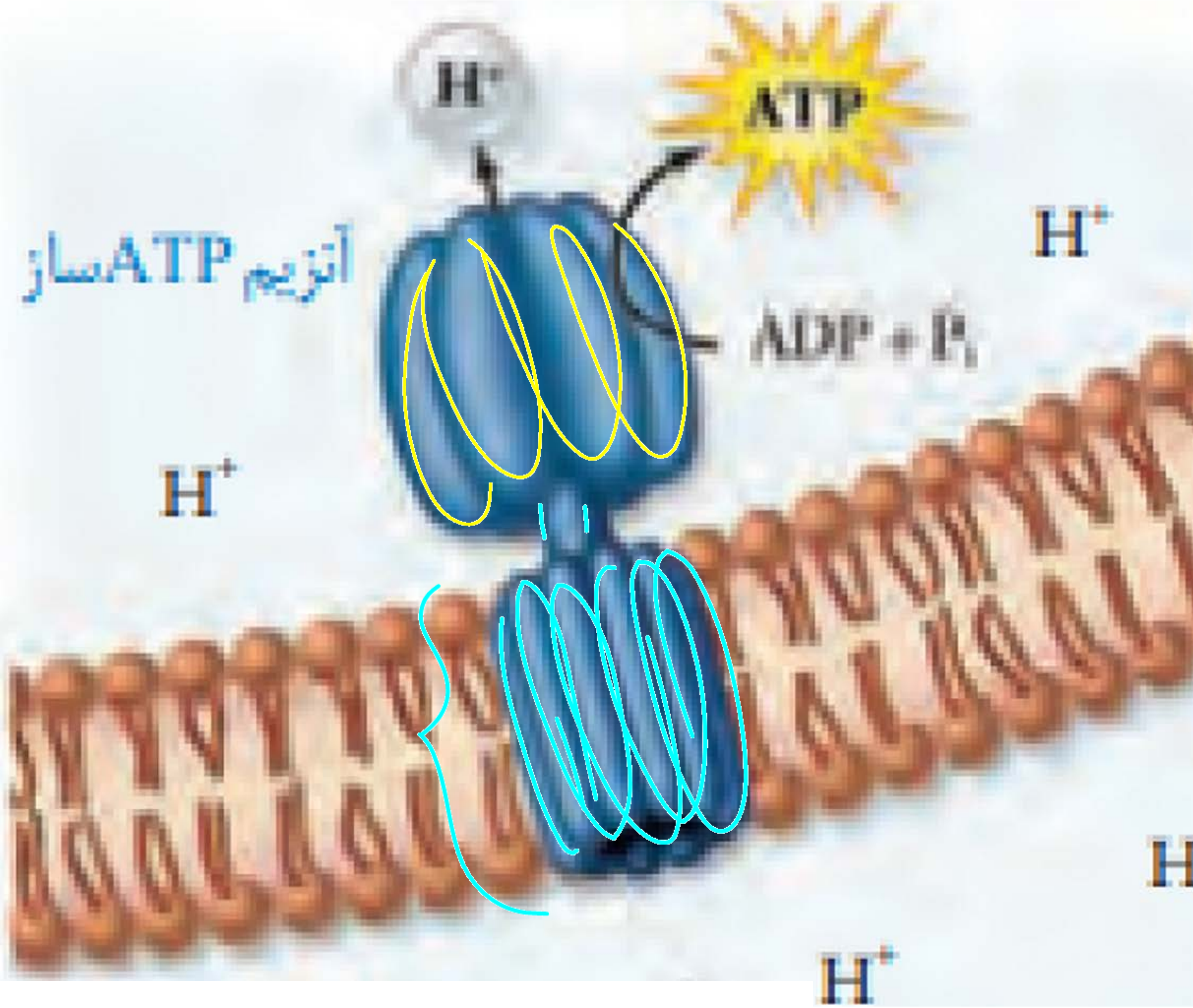
بزرگترین Pro های این مجموعه آنزیمی

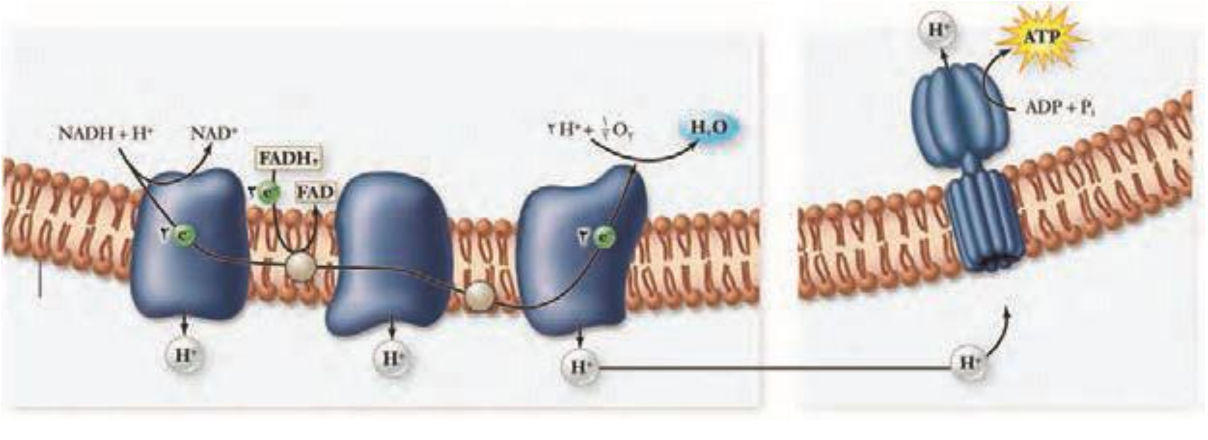

H⁺
NADH + H⁺
NAD⁺
FADH₂
FAD
۲ H⁺ + ½ O₂
H₂O
ATP
ADP + Pᵢ
آنزیم ATPساز
غشای درونی
فضای بین دو غشا

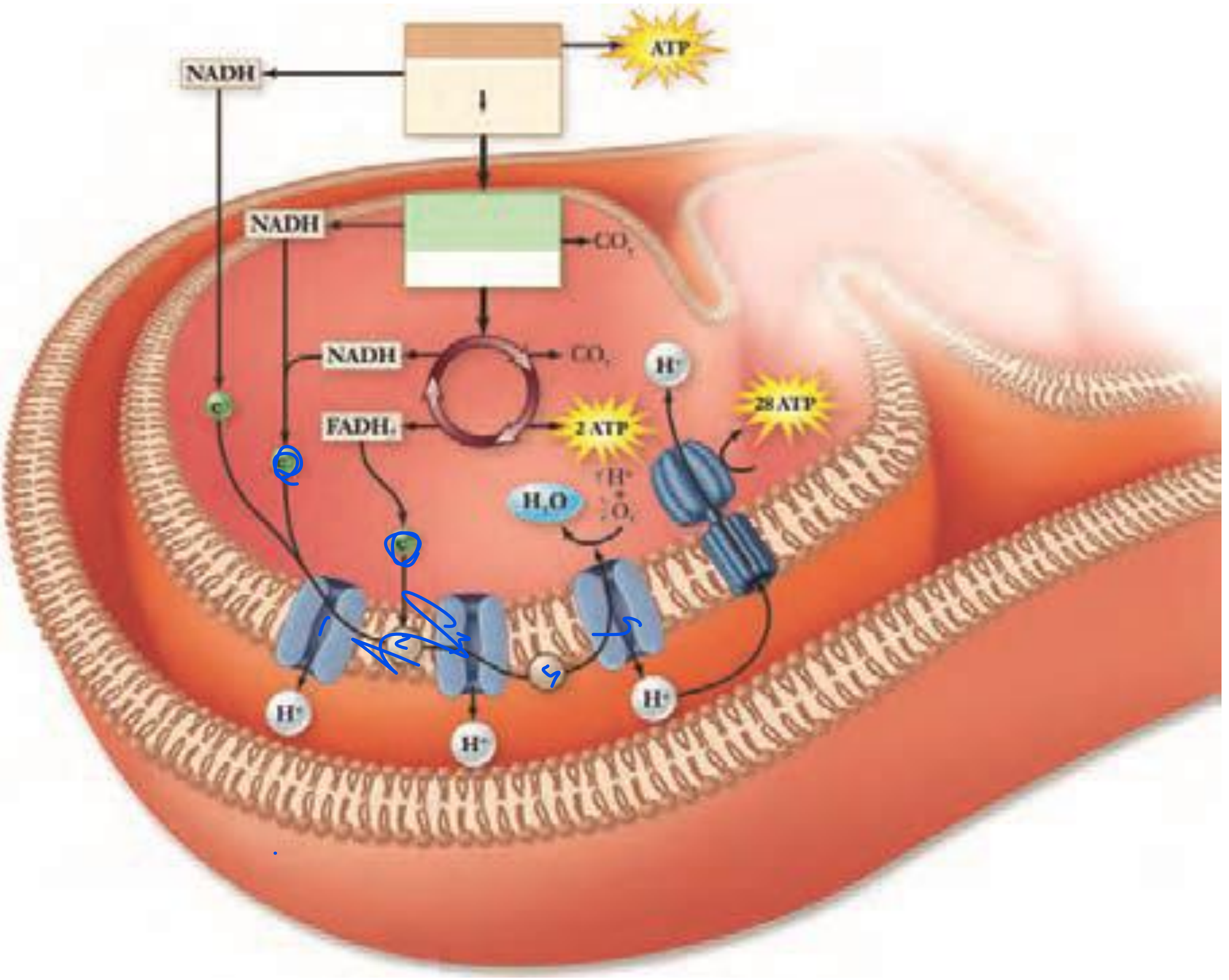

H+
NADH + H+
NAD+
FADH۲
۲ e-
FAD
۲ e-
۲ H+ + ۱/۲ O۲
H۲O
غشای درونی

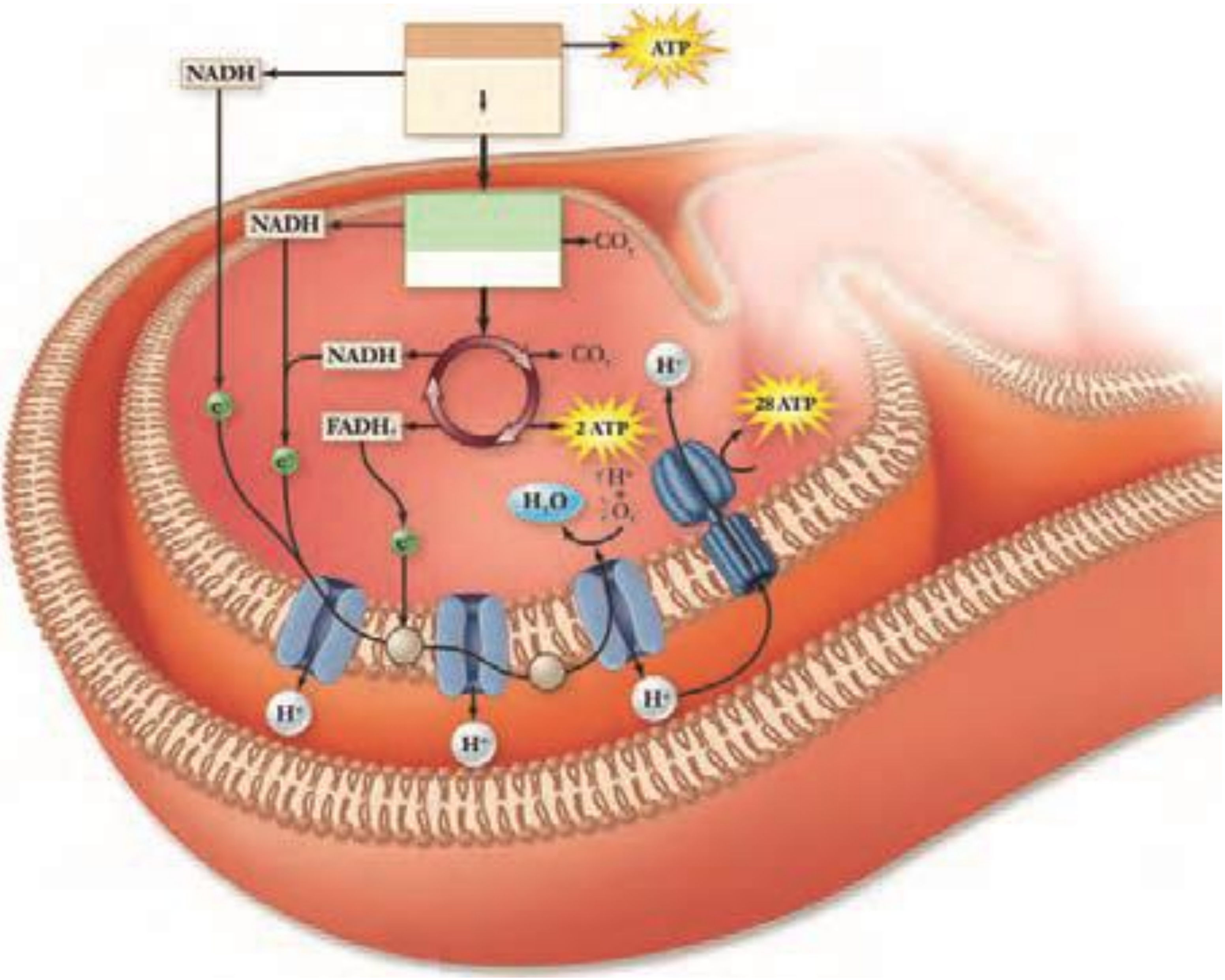


NADH + H⁺
NAD⁺
FADH₂
FAD
H₂O
غشای درونی

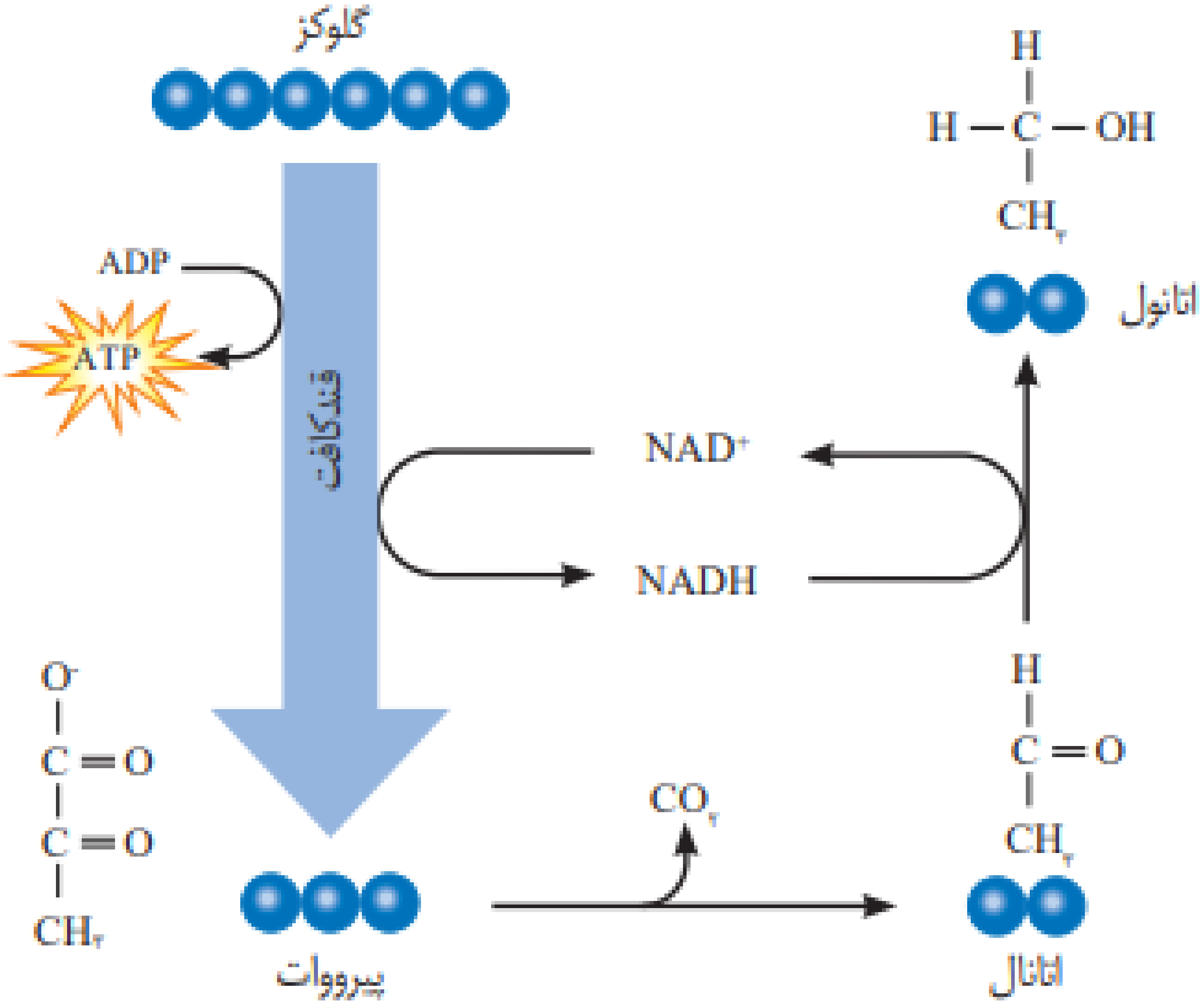

H+
ATP
آنزیم ATPساز
ADP + Pi
H+
H+
H+
H


NADH + H+
NAD+
FADH۲
FAD
۲ H+ + ½ O۲
H۲O
ATP
ADP + Pi
H+

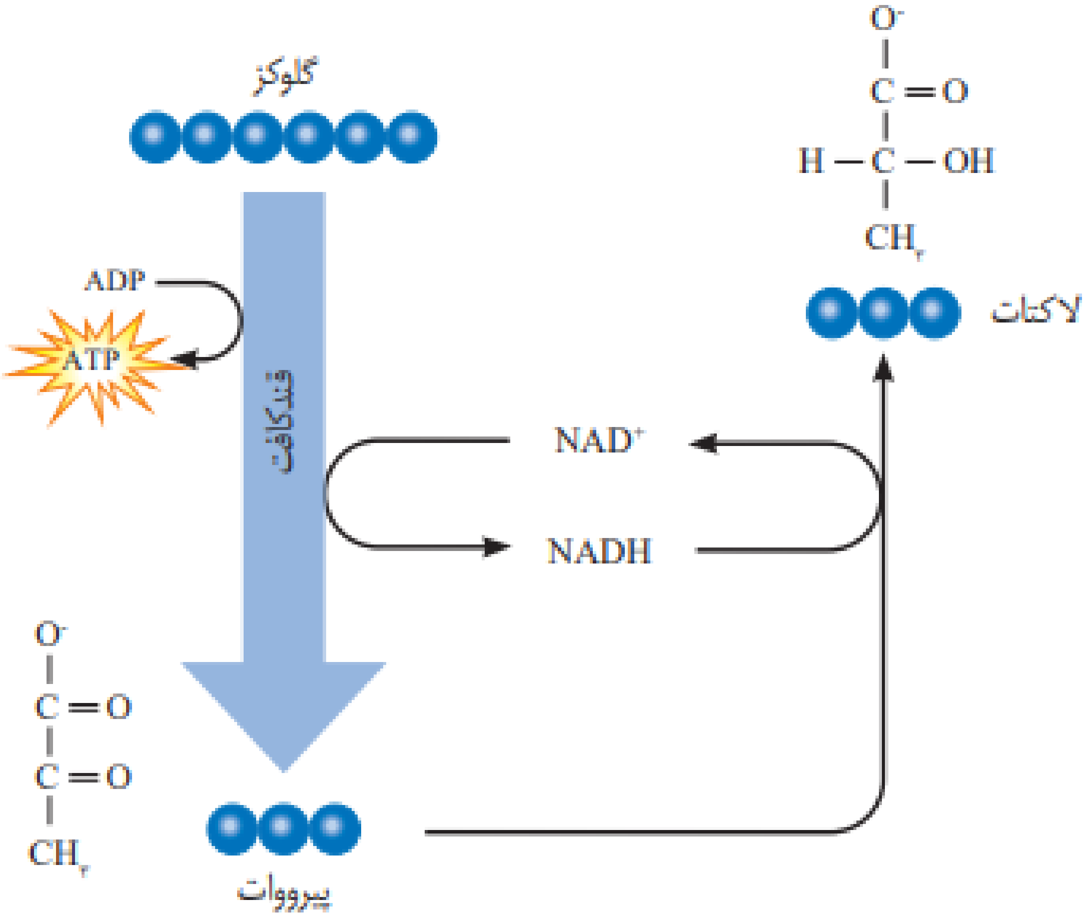

ATP
NADH
NADH
CO_2
NADH
CO_2
$FADH_2$
2 ATP
28 ATP
H^+
H_2O
H^+
H^+
H^+
H^+



ATP
NADH
NADH
CO2
NADH
CO2
FADH2
2 ATP
28 ATP
H+
H2O
H+
H+
H+
H+



گلوکز
ADP
ATP
قندکافت
NAD+
NADH
H
H — C — OH
CH۳
اتانول
O-
C = O
C = O
CH۳
پیرووات
CO۲
H
C = O
CH۳
اتانال



گلوکز
ADP
ATP
قندکافت
NAD^+
NADH
O^-
$C=O$
$C=O$
CH_3
پیرووات
O^-
$C=O$
$H-C-OH$
CH_3
لاکتات

NAD^+ — گیرنده e - محصول اکسایش «اکسنده»

↓ ee ↑ ee

NADH — حامل e - محصول کاهش
کاهنده

$NADP^+$ → (کاهش) → NADPH
NADPH → (اکسایش) → $NADP^+$

NADH

کوچک‌ترین اسید نوکلئیک دی نوکلئوتید

* حامل دو الکترون پرانرژی که انرژی های

هر NADH معادل حدود 3ATP

* 2 نوکلئوتید دارد *

ATP

آدنوزین تری فسفات

* انرژی مصرفی سلول *

ریبونوکلئیک اسید

* ۱ نوکلئوتید و متشکله دارای باز آدنین

تنفس سلولی ← پروکاریوت‌ها { هوازی و بی‌هوازی / در سیتوپلاسم }

تنفس سلولی ← یوکاریوت‌ها ← هوازی: در میتوکندری
← بی‌هوازی: در سیتوپلاسم

قند ← (اکسایش (از دست دادن e)) ← اسید
اسید → (کاهش (گرفتن e)) → قند

جانداران
- پروکاریوت‌ها
  - برخی هوازی
  - برخی بی‌هوازی
  - ← همگی تک‌یاخته‌ای
- یوکاریوت‌ها
  - اغلب هوازی ← مثل جانوران
  - برخی بی‌هوازی ← مثل مخمر (قارچ تک‌یاخته‌ای)
  - ← برخی تک‌یاخته‌ای و برخی پریاخته‌ای

در پیکر یوکاریوت‌های پریاخته‌ای
- برخی یاخته‌ها فقط هوازی‌اند.
  (مثل یاخته‌های بافت پوششی در انسان)
- برخی یاخته‌ها فقط بی‌هوازی‌اند.
  (مثل گویچه‌های قرمز در خون انسان و آوند آبکش نهاندانگان)
- برخی یاخته‌ها هم هوازی و هم بی‌هوازی‌اند.
  (مثل یاخته‌های ماهیچهٔ اسکلتی انسان)

اکسایش (اکسیداسیون) ← فرآیند از دست دادن e
کاهش ← " " دریافت e

منبع e (* کاهنده *) ← e ← گیرنده e (* اکسنده *)
منبع e ← اکسایش ← محصول اکسایش
گیرنده e ← کاهش ← محصول کاهش

* گروهی مولکول حامل e (حاوی 2 الکترون) - همگی از جنس نوکلئیک اسید هستند و دارای 2 نوکلئوتید

FADH2, NADH } حامل e در تنفس سلولی
NADPH } حامل e در فتوسنتز

نکته ۱

تنفس سلولی: نوعی تجزیه گلوکز جهت تولید ATP

- هوازی ← درصورت وجود O_2 کافی ← شروع در سیتوپلاسم و ادامه در میتوکندری ← تجزیه کامل گلوکز ← ATP زیاد
- بی‌هوازی = تخمیر ← درصورت کمبود O_2 ← کاملاً در سیتوپلاسم ← تجزیه ناکامل گلوکز ← ATP کمتر

ATP آدنوزین تری فسفات — شکل رایج و رایج استفاده انرژی

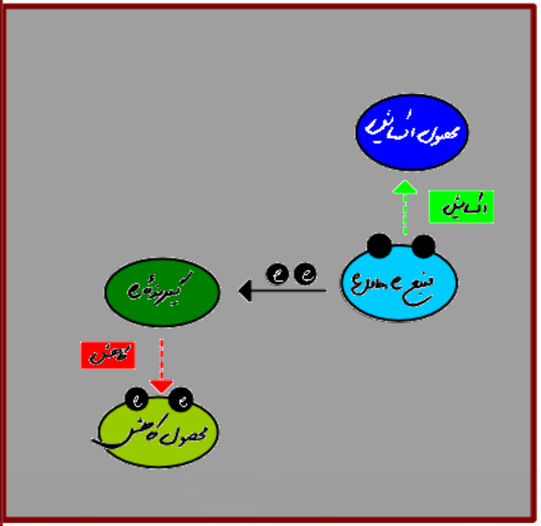
روش‌های ساخت ATP:

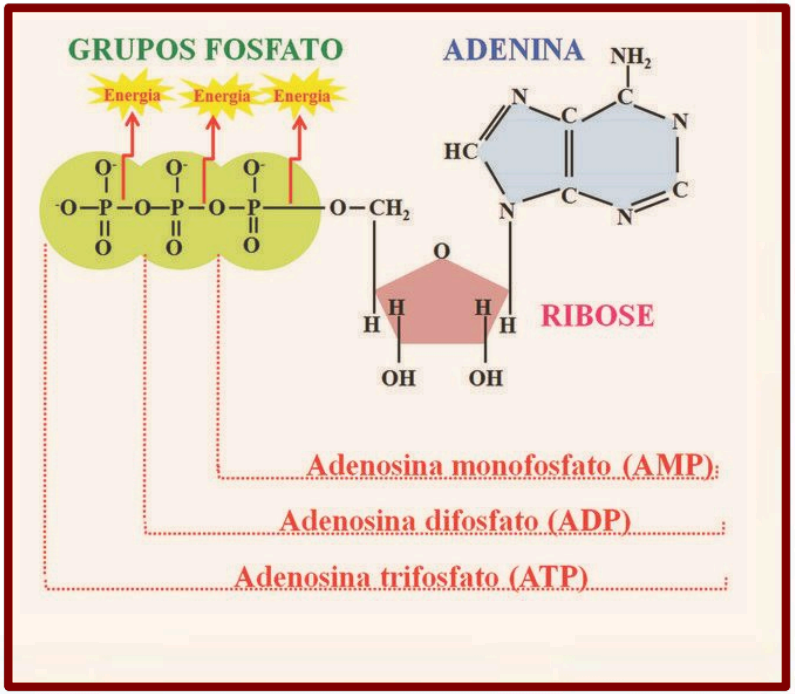
- تولید ATP در سطح پیش‌ماده ← در سیتوپلاسم
- تولید اکسایشی ATP ← در میتوکندری
- تولید نوری ATP ← در کلروپلاست

NADH: نیکوتین آمید آدنین دی نوکلئوتید
2 نوکلئوتید ≃ 3ATP

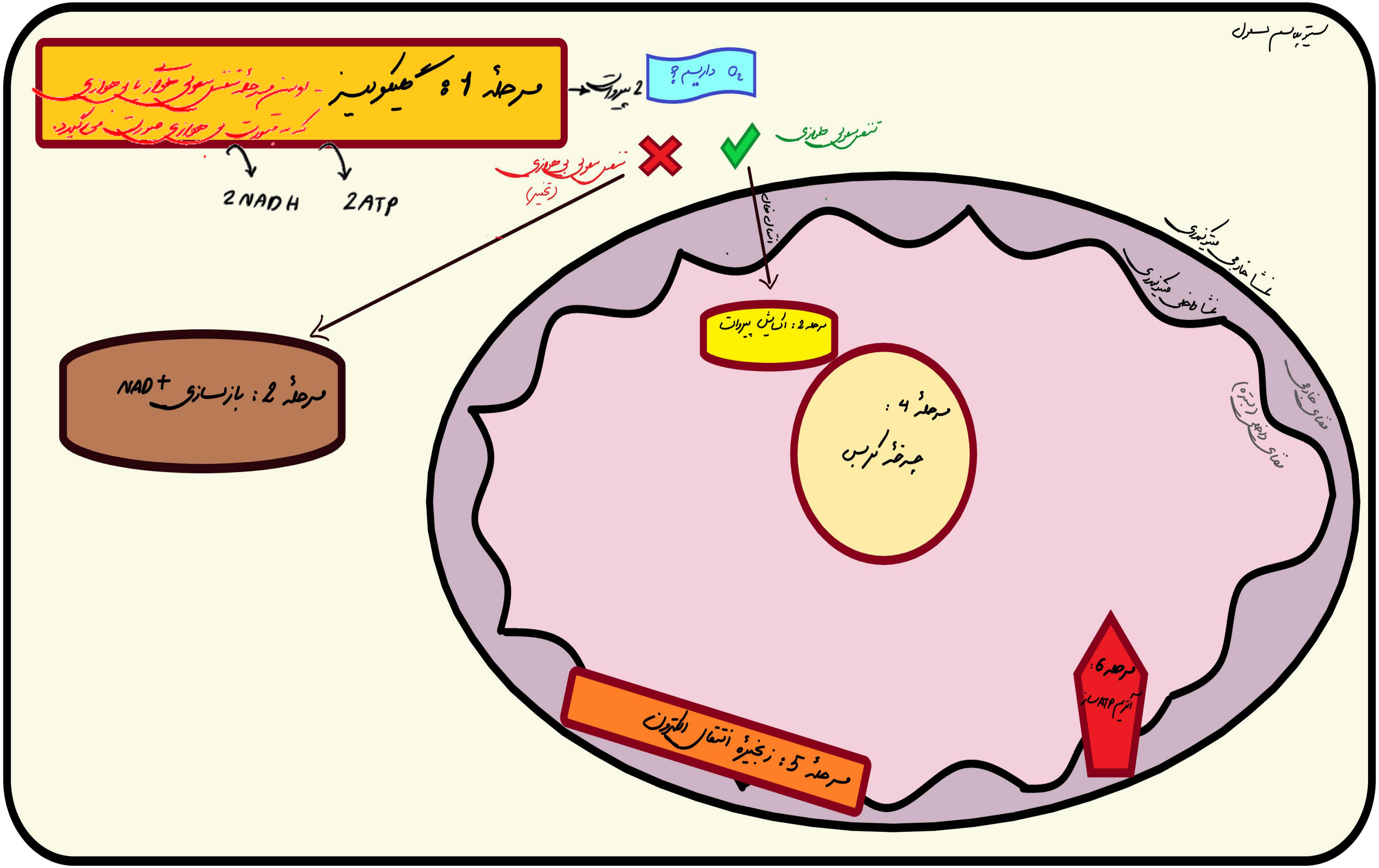
$FADH_2$: فلاوین آدنین دی نوکلئوتید
2 نوکلئوتید ≃ 2ATP

ATP: آدنوزین تری فسفات



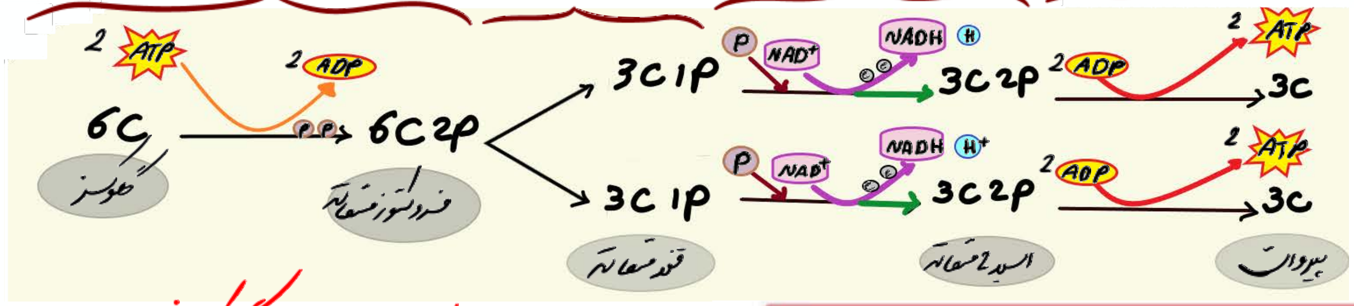


گفتار 2 — تنفس سلولی



گلیکولیز

مرحله 1: انرژی خواه — مرحله 2: واپاشی ناپایدار — مرحله 3: اکسایش — مرحله 4: انرژی زا

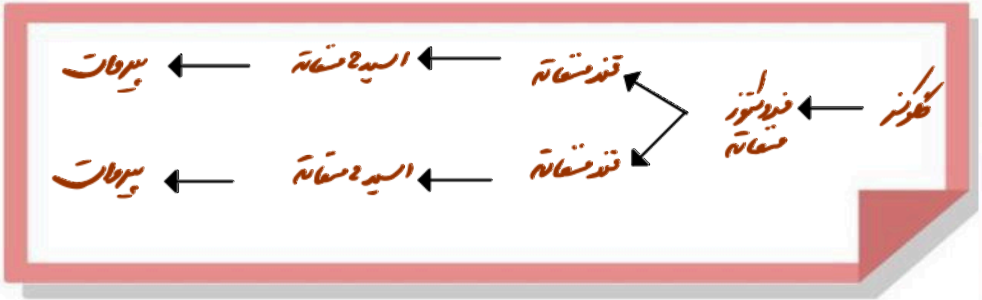


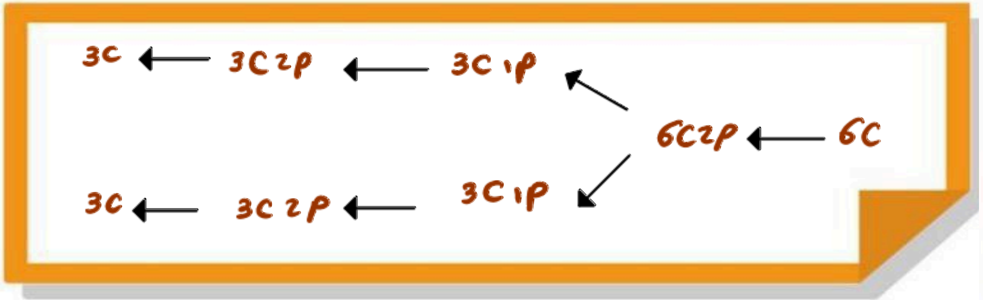
محصولات خالص و نهایی گلیکولیز

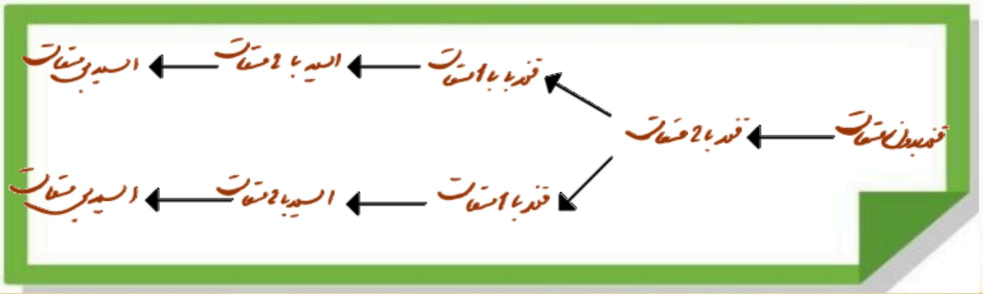
- 2ATP
- 2NADH
- 2 پیرووات

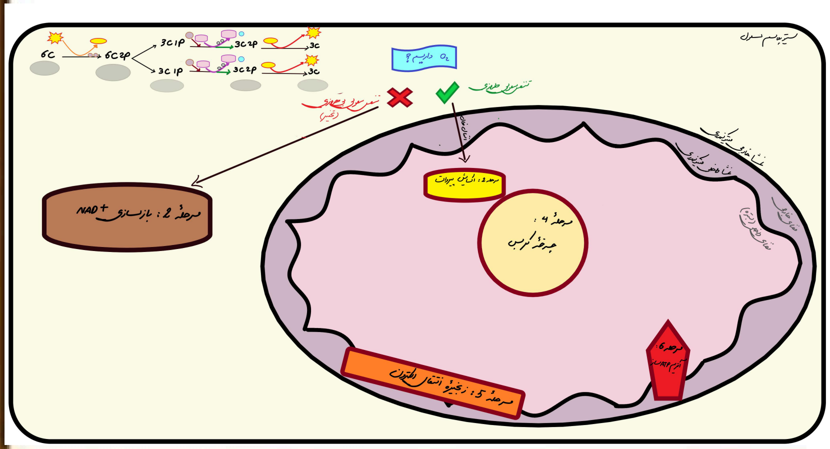
درصورت حضور O_2 وارد میتوکندری شده

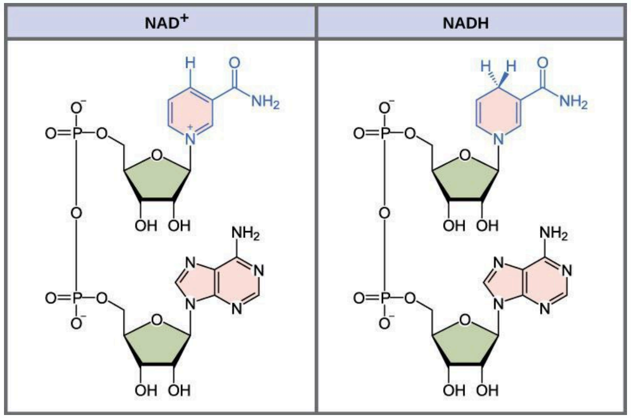
و در نبود O_2 در سیتوپلاسم تغییر می‌کند.











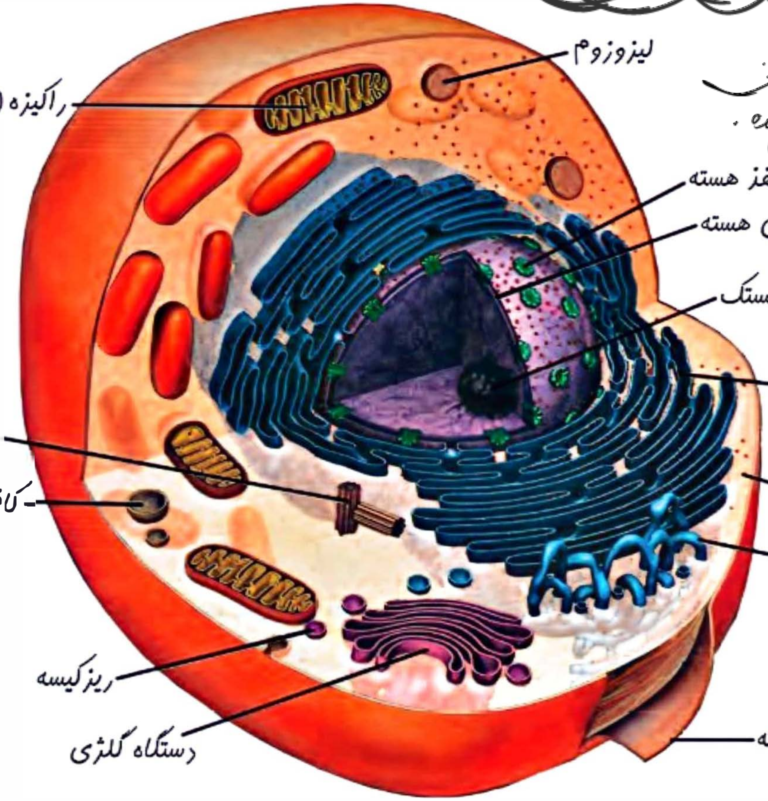
تخته ۶

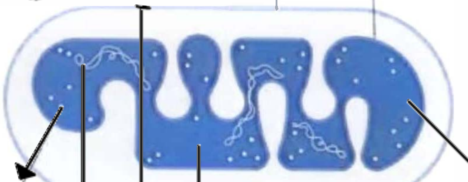
میتوکندری ← اندامک ۲ غشایی:

- غشای خارجی: بدون چین خوردگی
  - از خارج در تماس با سیتوپلاسم
  - از داخل در تماس با فضای بین دو غشاء
- غشای داخلی: دارای چین خوردگی ← مساحت بیشتر
  - از خارج در تماس با فضای بین دو غشا
  - از داخل در تماس با فضای درونی

میتوکندری ← ۲ فضا:

- فضای بین ۲ غشاء
- فضای درونی پر شده با بستره.





* تعداد میتوکندری‌ها در هر سلول بسته به نیاز آن سلول به ATP است.

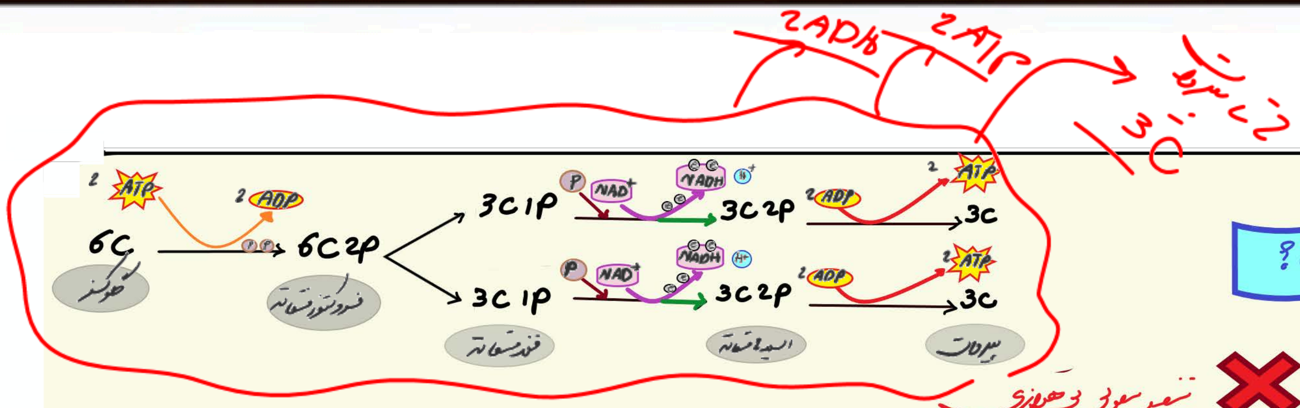
تقسیم میتوکندری:

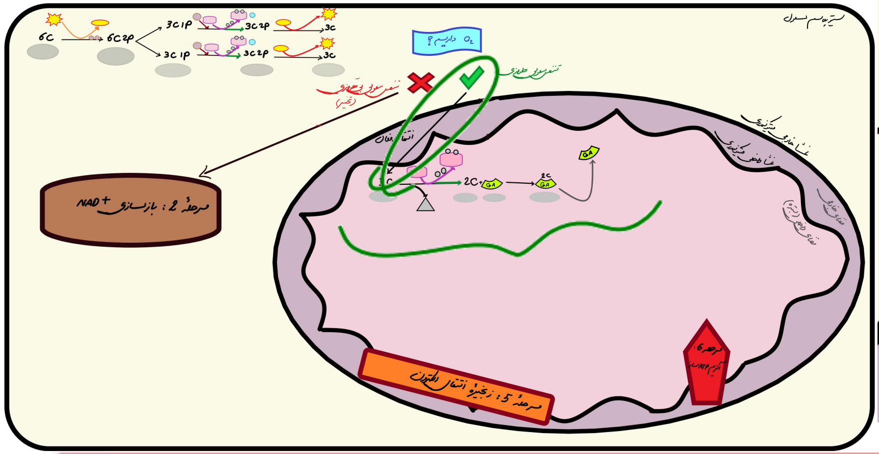
- ← با تقسیم سلولی در مرحله G2
- ← مستقل با تقسیم سلول ← زمانی که سلول به ATP بیشتر نیاز دارد.

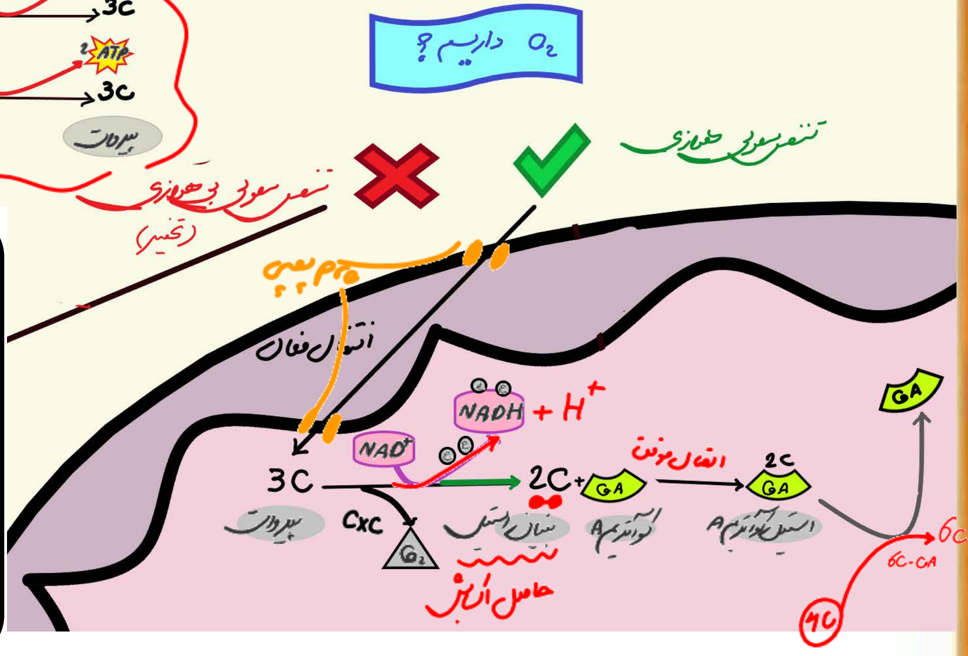
پروتئین‌های مورد نیاز میتوکندری:

- ← بعضی ژن آن‌ها در DNA خطی هسته
- ← بعضی ژن آن‌ها در DNA حلقوی میتوکندری

اکسایش پیرووات







به ازای هر گلوکز ← 2 بار اکسایش پیرووات داریم

در اکسایش پیرووات به ازای:
پیرووات: $1CO_2$ و 1NADH تولید می‌شود.
گلوکز: $2CO_2$ و 2NADH " " .

در اکسایش پیرووات ابتدا CO_2 جدا شده و بعد اکسایش می‌یابد.

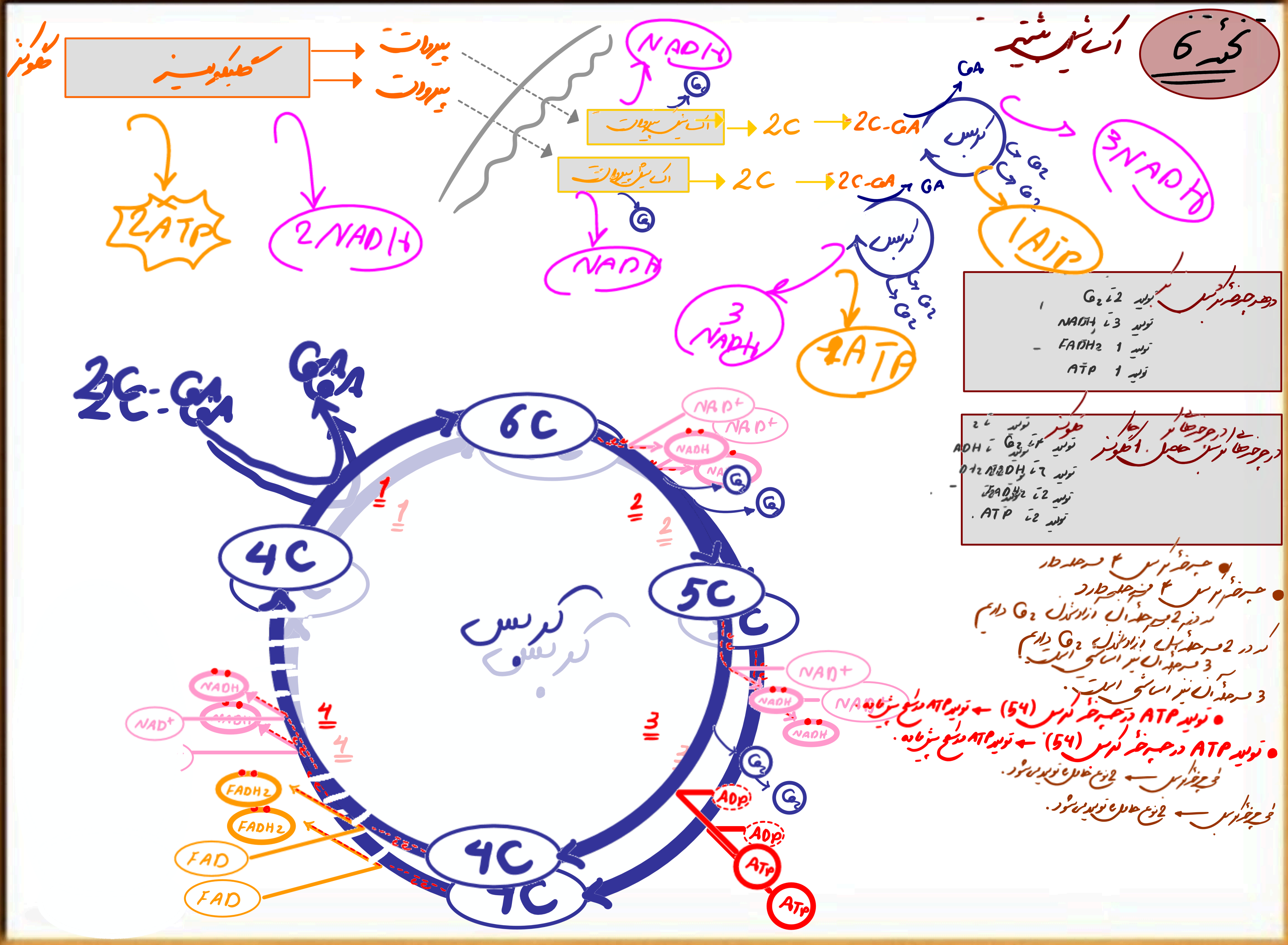
محل تولید پیرووات ← در سیتوپلاسم

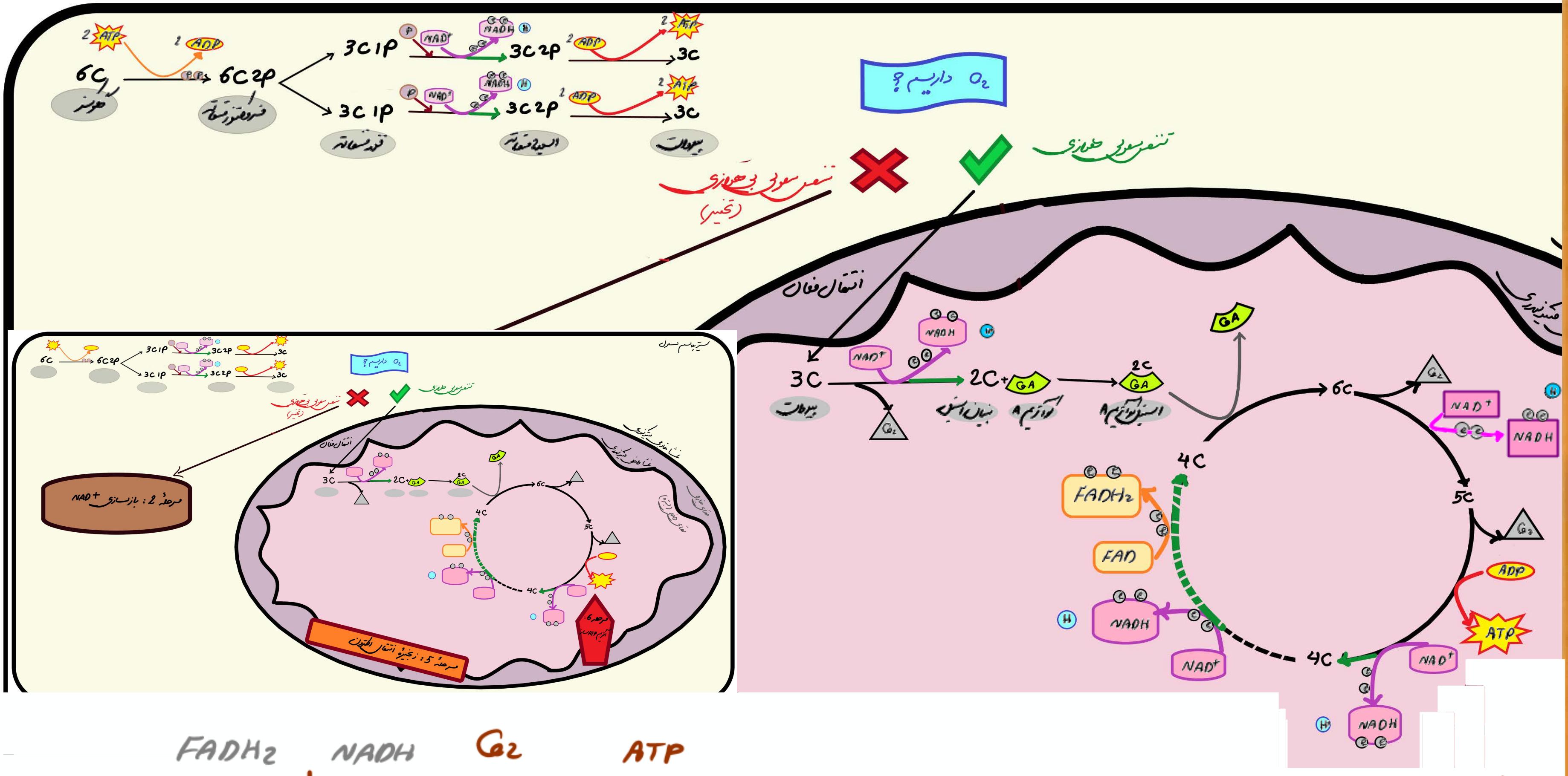
محل مصرف پیرووات یا اکسایش پیرووات ← در بستره میتوکندری

اکسایش پیرووات ← اولین مرحله هوازی تنفس سلولی ← تولید اولین CO_2

✓ شروع تجزیه گلوکز ← گلیکولیز

✓ اولین " " ← اکسایش پیرووات.


گفتار 6
اکسایش شدید
گلوکز
گلیکولیز
پیرووات
2ATP
2NADH
اکسایش پیرووات
NADH
2C
2C-CA
کربس
3NADH
1ATP
در هر چرخه کربس
تولید 3 تا NADH
تولید 1 FADH2
تولید 1 ATP
2C-CA
6C
5C
4C
NAD+
NADH
FAD
FADH2
ADP
ATP
چرخه کربس ۴ مرحله دارد
تولید ATP در چرخه کربس



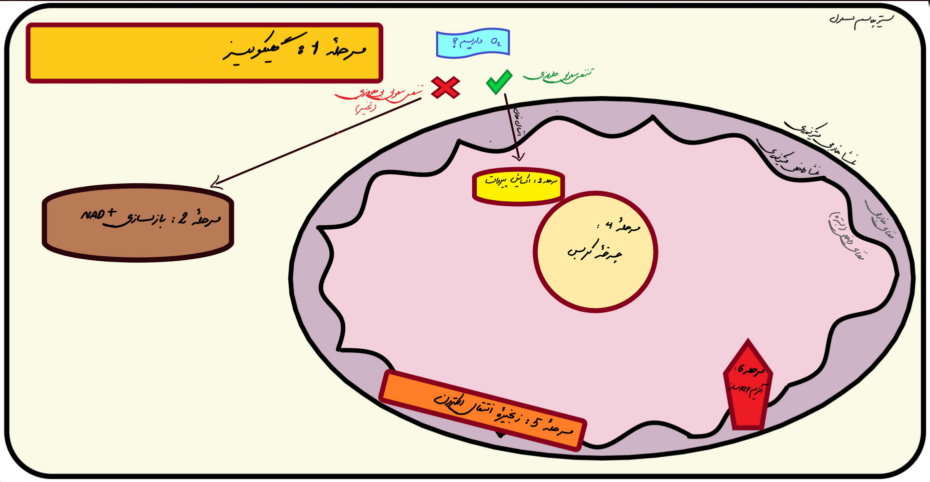
	زمان	مکان	تعداد	مراحل	نوع	ATP	CO_2	NADH	$FADH_2$
گلیکولیز	سیتوپلاسم	۱ بار	۴ مرحله	بی‌هوازی	تا 2	-	2	-
اکسایش پیرووات	میتوکندری (البته)	2 بار	2 مرحله	هوازی	-	(2x1)2	2 (1x2)	-
چرخه کربس	میتوکندری (البته)	2 بار	4 مرحله	هوازی	(1x2) تا 2	(2x2)4	6 (3x2)	2 (1x2)

ATP تا 4

✓ CO_2 تا 6

تا 10 — تا 2

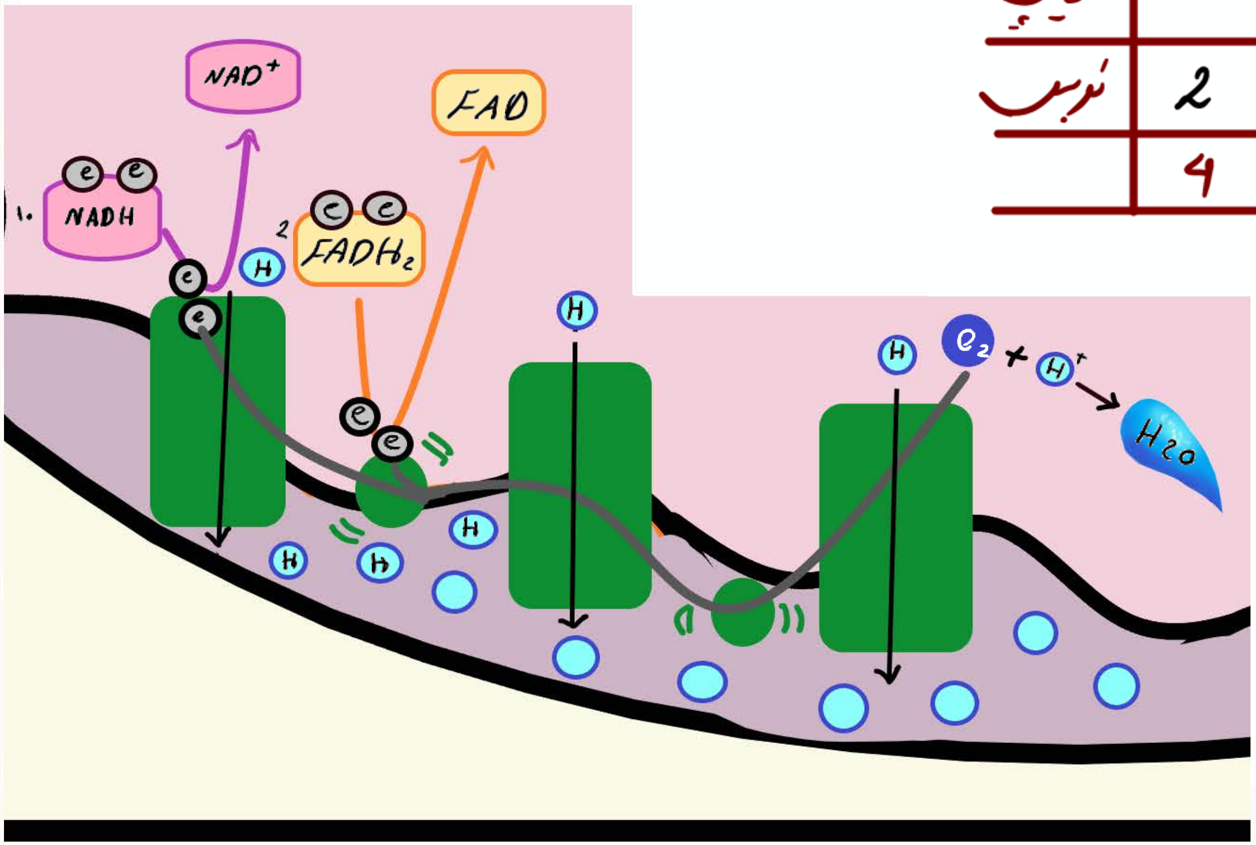
12 تا حامل

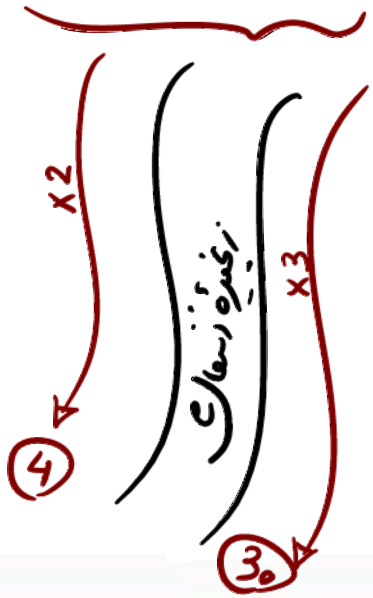


نکته ۷

زنجیره انتقال

	ATP	$FADH_2$	NADH	CO_2
گلیکولیز	2	-	2	-
اکسایش پیرووات	-	-	2	2
کربس	2	2	6	4
	4	2	10	6





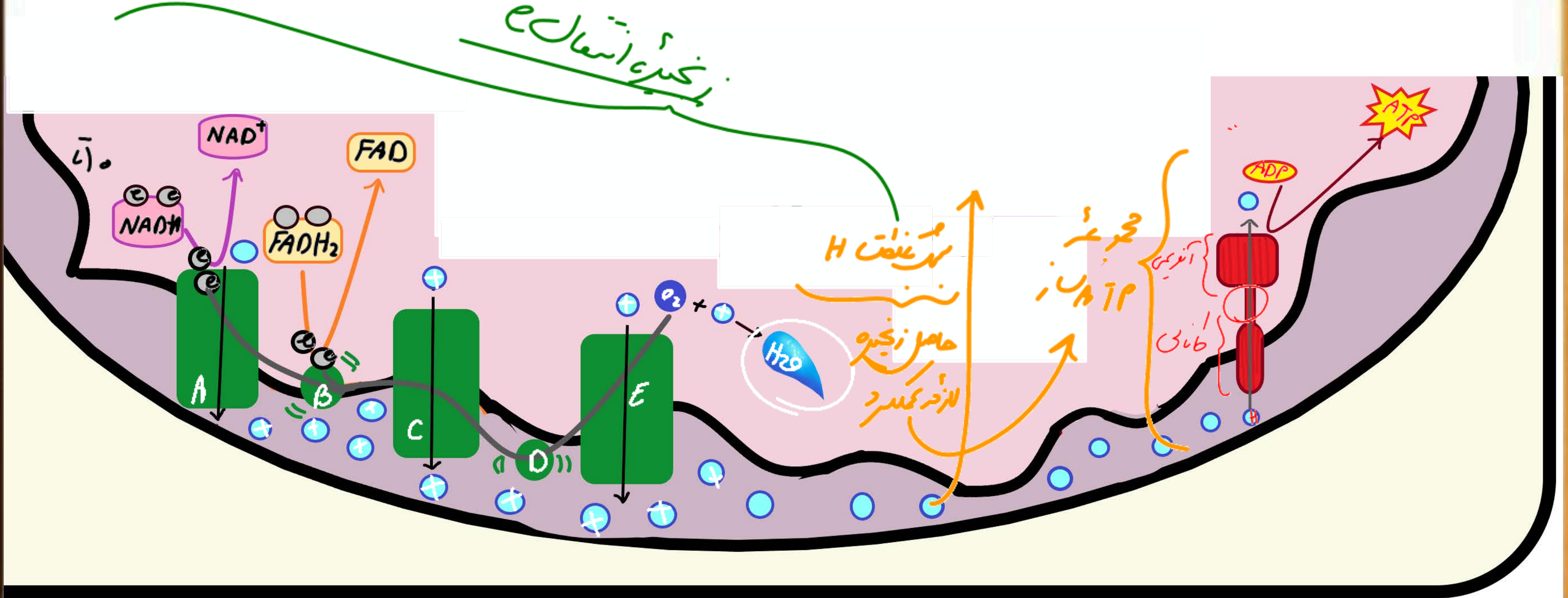
نکته ۸

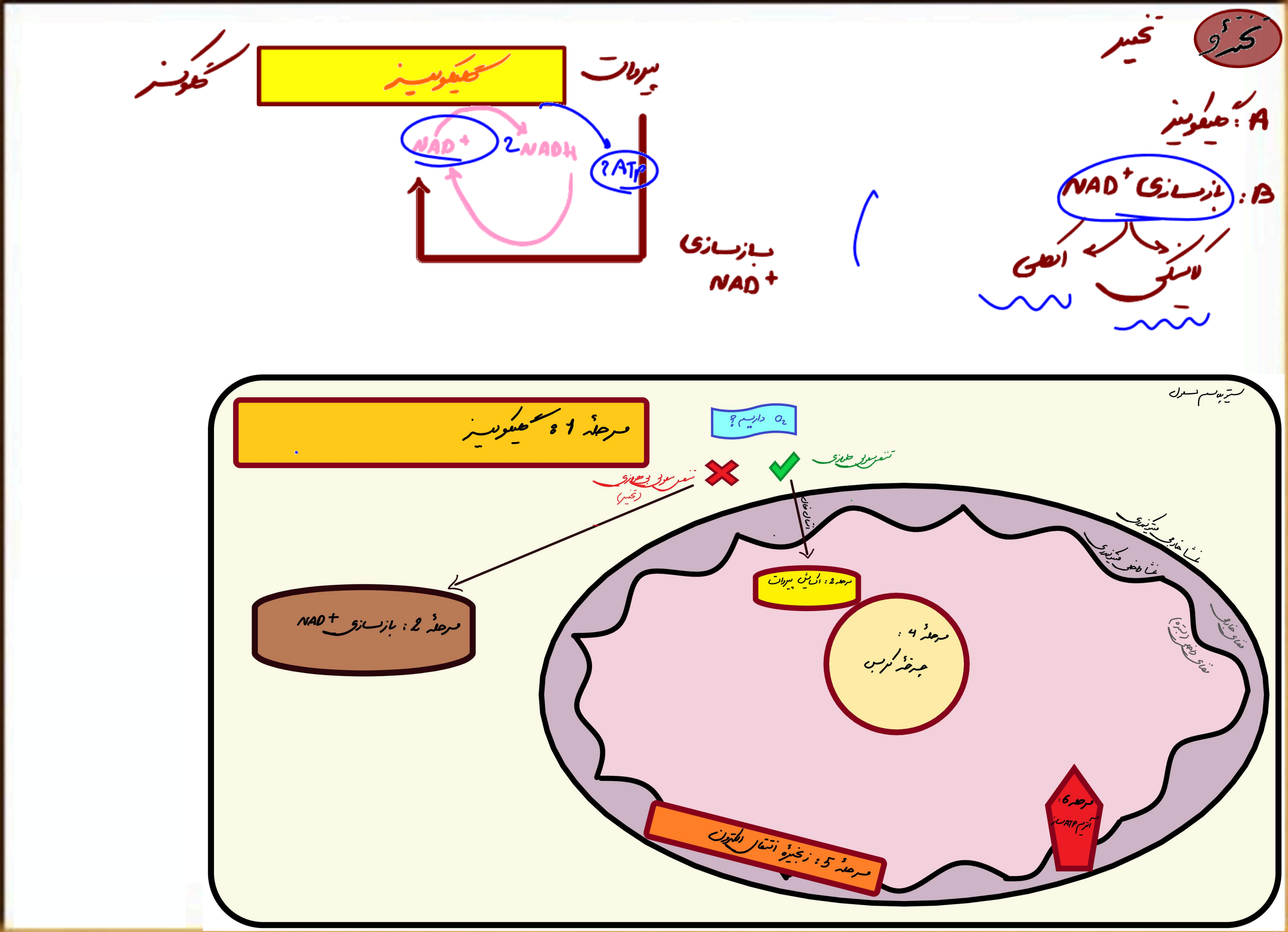
$4ATP + 2FADH_2 + 10NADH \simeq 38ATP$

2 جفت e از این حاملین e وارد زنجیرهٔ انتقال e شده و درنهایت به O_2 منتقل شده و نهایتاً 12 آب تولید می‌شود.

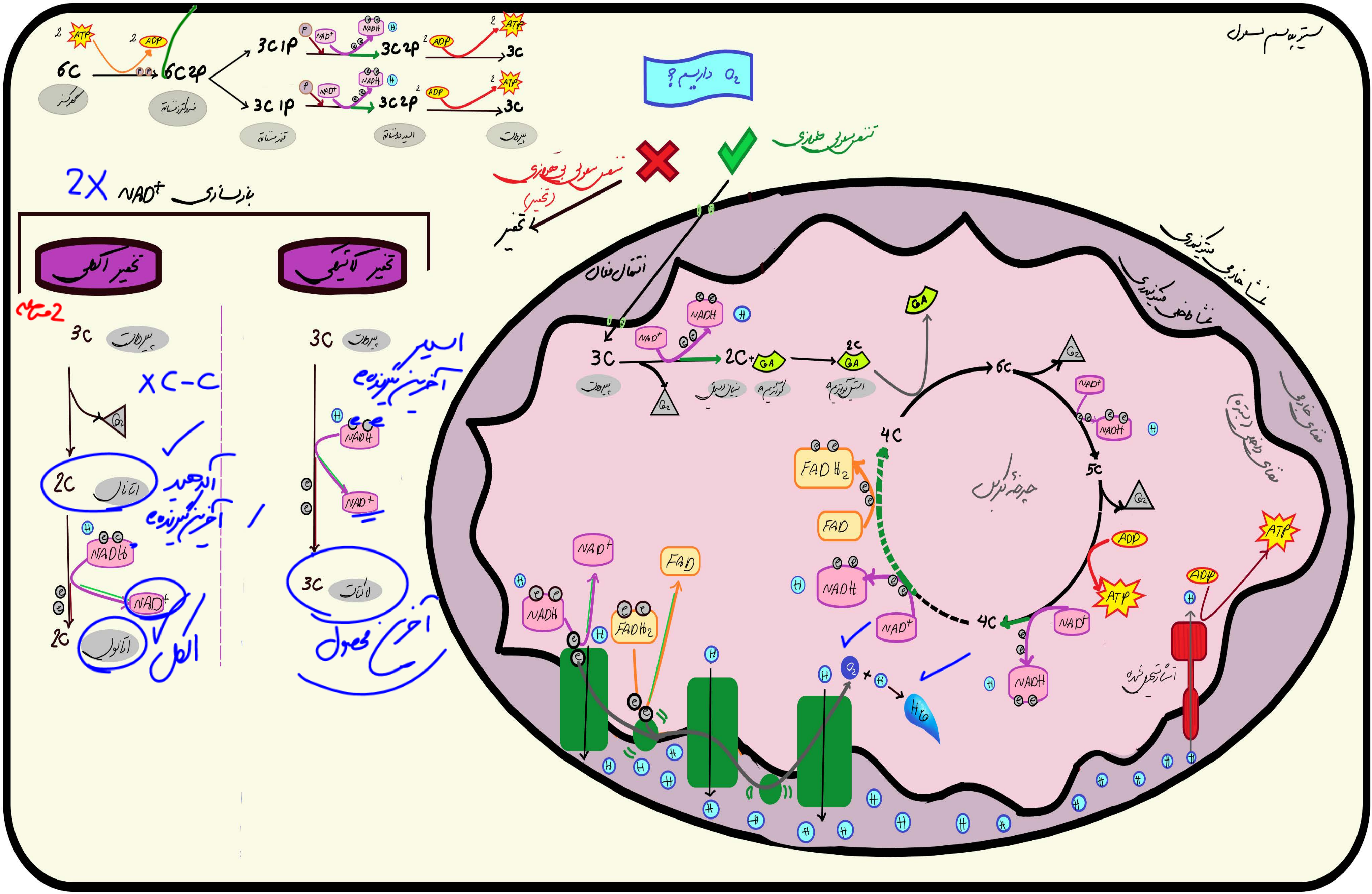
انرژی هر NADH ≃ 3ATP

انرژی هر $FADH_2$ ≃ 2ATP





تخمیر
A: گلیکولیز
B: بازسازی NAD+
الکلی
لاکتیکی
گلوکز
گلیکولیز
پیروات
NAD+
2NADH
?ATP
بازسازی NAD+
سیتوپلاسم سلول
مرحلهٔ 1: گلیکولیز
O_2 داریم؟
تنفس سلولی هوازی
تنفس سلولی بی‌هوازی (تخمیر)
مرحلهٔ 2: بازسازی NAD+
مرحلهٔ 2: اکسایش پیروات
غشا خارجی میتوکندری
غشا داخلی میتوکندری
فضای خارجی
فضای داخلی (بستره)
مرحلهٔ ۴:
چرخهٔ کربس
مرحلهٔ 5: زنجیرهٔ انتقال الکترون
مرحلهٔ 6: آنزیم ATP ساز

تنفس سلولی

گلوکز $+ O_2 + ADP + Ⓟ \longrightarrow CO_2 + H_2O + ATP$