تشریح کامل چرخه کربس

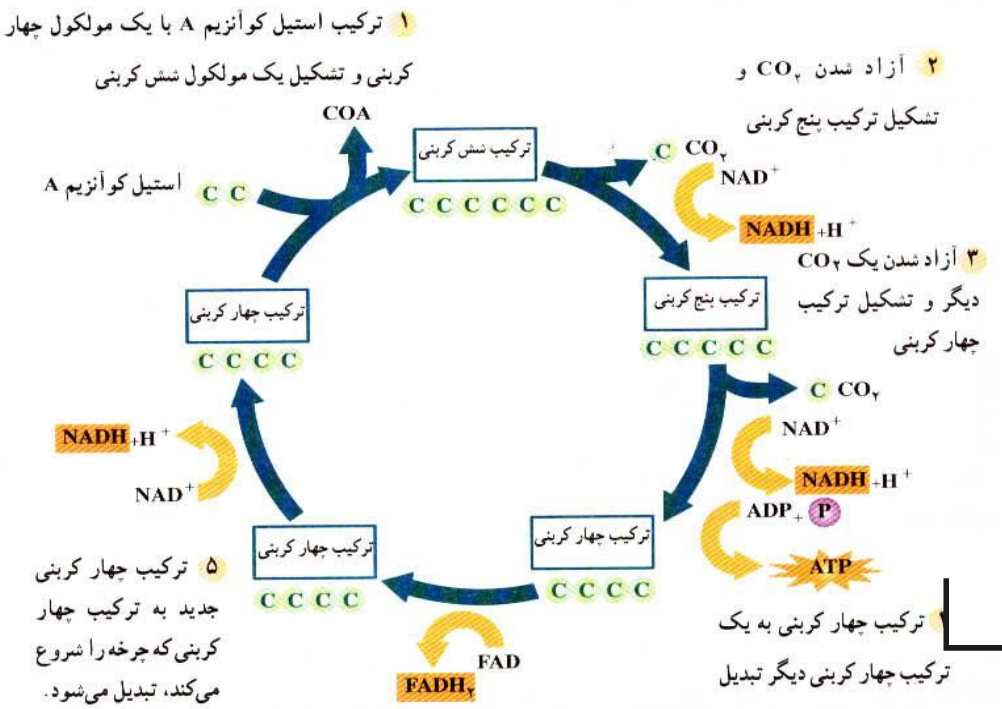
نویسنده: روح اله امرایی

کپی ممنوع

■چرخه‌ی کربس

چرخه‌ی سیتریک اسید به افتخار کاشف آن «هانس کربس» دانشمند آلمانی، به نام چرخه‌ی کربس نام‌گذاری شده است.

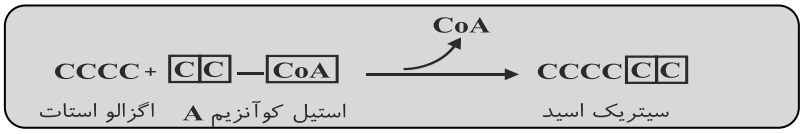
چرخه‌ی کربس با ترکیب استیل کوآنزیم A با یک مولکول ٤ کربنی به نام اگزالواستات شروع می‌شود. محصول این واکنش تشکیل مولکولی شش کربنی، به نام سیتریک اسید است. همراه با تشکیل سیتریک اسید، کوآنزیم A نیز جدا می‌شود. در ادامه‌ی چرخه‌ی کربس با انجام مجموعه‌ای از واکنش‌های آنزیمی و طی مراحل مختلف، دو مولکول CO_2 آزاد می‌شود. هم‌چنین ATP و مولکول‌های پر انرژی NADH و $FADH_2$ تولید می‌شوند. با خروج دو مولکول CO_2 از چرخه، مجدداً مولکول چهار کربنی اگزالواستات تشکیل می‌شود.



شکل ۲۰-۸- چرخه کربس

همان‌طور که در شکل ۲۲-۸ می‌بینید، چرخه‌ی کربس در پنج گام به شرح زیر انجام می‌شود:

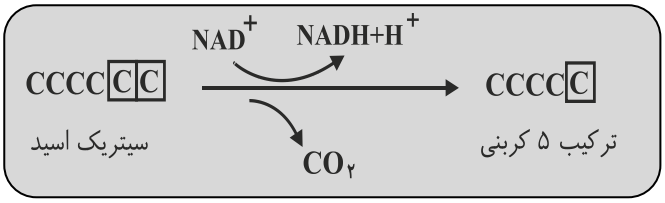
گام ۱: استیل کوآنزیم A به یک مولکول چهار کربنی می‌پیوندد و یک مولکول شش کربنی تولید می‌کند. کوآنزیم A نیز جدا می‌شود.



۱- این واکنش درون ماتریکس میتوکندری روی می‌دهد.

۲- کوآنزیم A مجدداً برای وارد کردن یک بنیان استیل دیگر به چرخه‌ی کربس آزاد می‌شود.

گام ۲: با جدا شدن یک کربن از مولکول شش کربنی، یک مولکول پنج کربنی تولید می‌شود. الکترون‌های حاصل نیز به NAD^+ منتقل می‌شوند و مولکول NADH را می‌سازند.



● در ارتباط با گام ۲چرخه کربس به نکات مفهومی و استنباطی زیر توجه کنید:

۱- از دو کربن اضافه شده به اگزالواستات یک کربن در این گام به شکل CO_2 آزاد می‌شود. این دومین مولکول CO_2 تولید شده در تنفس سلولی هوازی است.

۲- الکترون‌های آزاد شده در گام **۲**، جذب گیرنده‌ی الکترونی NAD^+ می‌شوند و به همراه یون‌های هیدروژن به شکل **NADH** در می‌آیند.

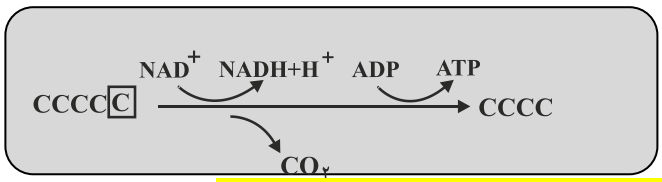
۳- مواد مصرفی گام **۲** عبارتند از: سیتریک اسید، NAD^+

۴- مواد تولیدی گام **۲** عبارتند از: ترکیب پنج کربنی، H^+، **NADH** و CO_2

۵- این واکنش نیز درون ماتریکس رخ می‌دهد.

گام ۳: با خروج CO_2 از مولکول پنج کربنی، مولکول چهار کربنی ساخته می‌شود، هم‌چنین یک مولکول **ATP** و یک مولکول **NADH** تولید می‌شود.

📖 **نکته مقایسه ای:** گام **۲** و **۳** بسیار شبیه‌اند، تفاوت آن‌ها در تولید یک مولکول **ATP** در گام سوم است.



● در ارتباط با گام ۳ چرخه کربس به نکات مفهومی زیر توجه کنید:

۱- در گام **۳**، دومین کربن باقی‌مانده از استیل کوآنزیم **A** نیز جدا می‌شود و دومین CO_2 آزاد می‌شود.

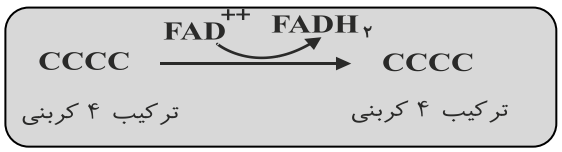
۲- هیدروژن های آزاد شده جذب NAD^+ شده و دومین **NADH** نیز تولید می‌شود.

۳- مواد مصرفی: ماده پنج کربنی، NAD^+ و **ADP**

۴- مواد تولیدی: ماده چهار کربنی، H^+، **NADH**، CO_2 و **ATP**

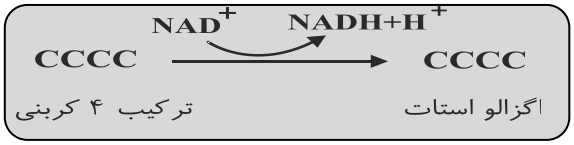
۵- بار دیگر ماده‌ی ٤ کربنی ابتدای گام **۱** بازسازی می‌شود، اما این ترکیب چهار کربنی فقط از نظر تعداد کربن با اگزالواستات مشابه است.

گام ۴: ترکیب چهار کربنی به مولکول چهار کربنی دیگری تبدیل می‌شود. الکترون‌های حاصل از این تبدیل به یک پذیرنده‌ی الکترونی به نام **FAD** منتقل می‌شوند و یک مولکول $FADH_2$ تولید می‌کنند. $FADH_2$ نوعی مولکول حامل الکترون است.



◄دقت کنید که:در گام ۴، تغییری در تعداد کربن‌ها نداریم. اما ترکیب شیمیایی آن‌ها تغییر می‌کند و الکترون آزاد می‌شود. این الکترون‌ها به ناقل FAD^{++} جذب می‌شوند.

گام ۵: مولکول چهار کربنی حاصل از گام ۴ به اگزالواستات تبدیل و NADH دیگری نیز تولید می‌شود.



● در ارتباط با گام ۵ چرخه کربس به نکات مفهومی زیر توجه کنید:

۱- مواد مصرفی: ماده چهار کربنی و NAD^+

۲- مواد تولیدی: اگزالواستات چهار کربنی و NADH

۳- تعداد کربن‌ها تغییری نمی‌کند اما ترکیب شیمیایی تغییر کرده و الکترون آزاد می‌شود که در NAD^+ به دام می‌افتد.

۴- برای تبدیل هر NAD^+ به $NADH+H^+$، دو الکترون و دو یون هیدروژن مورد نیاز است.

$$NAD^+ + ۲H^+ + ۲e^- \rightarrow NADH + H^+$$

۵-برای تبدیل FAD به $FADH_۲$، دو الکترون و دو یون هیدروژن لازم است.

$$FAD + ۲e^- + ۲H^+ \rightarrow FADH_۲$$

● با توجه به کل فرآیند چرخه کربس به نکات جمع بندی زیر توجه کنید:

۱- در طول چرخه‌ی کربس ۸ پروتون و ۸ الکترون جدا شده و مصرف می‌شوند.

۲- در طول چرخه‌ی کربس به ازای هر مولکول استیل کوآنزیم A، سه مولکول $NADH+H^+$ تولید می‌شود. این مولکول‌ها در گام‌های ۲، ۳ و ۵ تولید می‌شوند.

۳- در طول چرخه‌ی کربس به ازای هر مولکول استیل کوآنزیم A، یک مولکول ATP و یک مولکول $FADH_۲$ تولید می‌شوند به ترتیب در گام ۳ و ٤ .

۴- مواد مصرفی چرخه‌ی کربس عبارتند از: یک مولکول استیل کوآنزیم A، سه مولکول NAD^+، یک مولکول FAD و یک مولکول ADP.

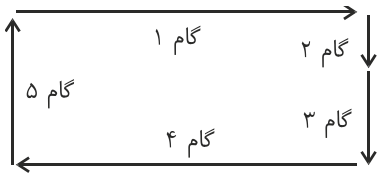
۵- مواد تولیدی در چرخه‌ی کربس: سه مولکول NADH، یک مولکول $FADH_2$، یک مولکول ATP و دو مولکول $CO_۲$

● خلاصه:از آن‌جایی‌که به ازای هر مولکول گلوکز دو مولکول استیل کوآنزیم A تولید می‌شود، دو چرخه کربس نیز برای هر مولکول مورد نیاز است. بعد از دو گردش چرخه، گلوکز اولیه تمام کربن‌های خود را از دست داده و به طور کامل مصرف می‌شود. به طور خلاصه، بازده چرخه‌ی اسید سیتریک به ازای هر مولکول گلوکز عبارتست از:

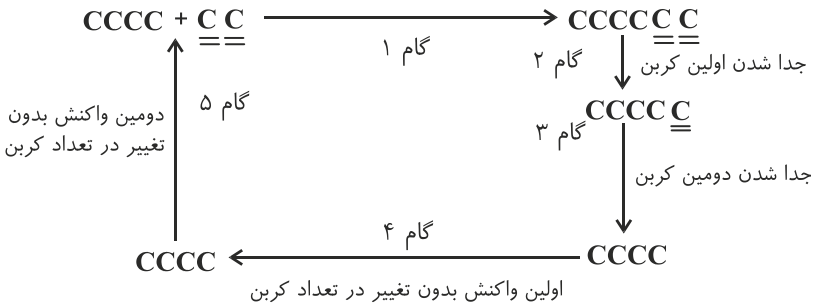
$$٤CO_۲ , ٦NADH , ۲FADH_۲ , ۲ATP$$

☺ روش حفظ کردن چرخه‌ی کربس (روش امرایی)

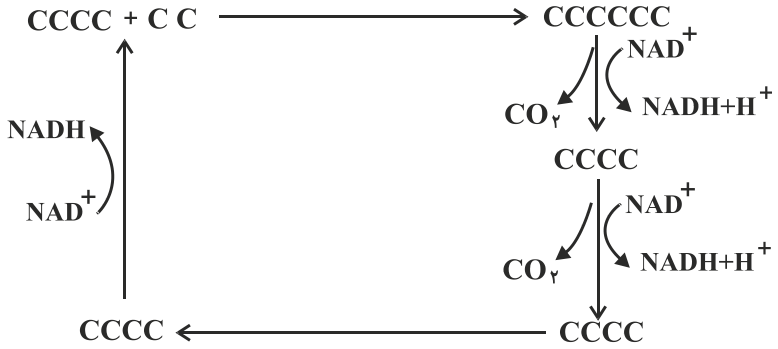
۱- یک مستطیل رسم کنید که ضلع سمت راست آن دو پاره خط باشد. (درست مشابه مستطیل چرخه‌ی کالوین با این تفاوت که در اینجا هر فلش معرف یک گام است.



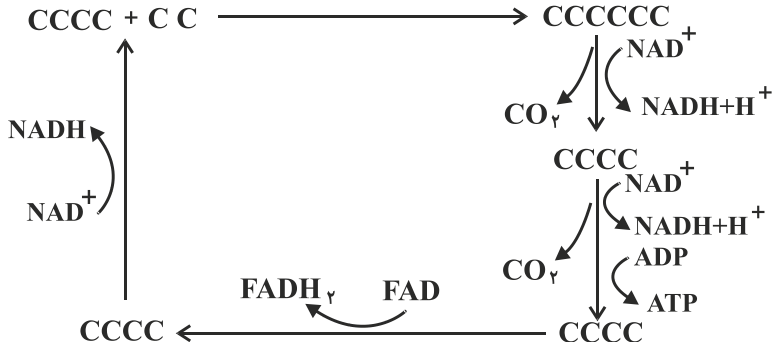
۲- تعداد کربن‌های هر گام را مشخص کنید. دقت کنید که در واکنش گام **۱** دو کربن به اگزالواستات اضافه می‌شود و طی گام‌های **۲** و **۳** این کربن‌ها یکی یکی جدا می‌شوند و گام‌های **۴** و **۵** بدون تغییر در تعداد کربن‌هاست.



۳- سپس با توجه به این که جدا شدن هر کربن یک **NADH** تولید می‌کند، در گام‌های **۲** و **۳** که کربن جدا می‌شود. **NADH** نیز تولید می‌شود و نیز درست ضلع روبه‌رو، یعنی گام **۵** نیز **NADH** تولید می‌کند.



۴- در آخرین مرحله نیز یک مولکول **ATP** را که در گام **۳** تولید می‌شود و **$FADH_2$** که در گام **۴** تولید می‌شود را اضافه می‌کنیم.



● **نکته ۱:** از اکسیداسیون یک مولکول استیل کوآنزیم **A** در چرخه‌ی کربس محصولات زیر به‌دست می‌آیند:

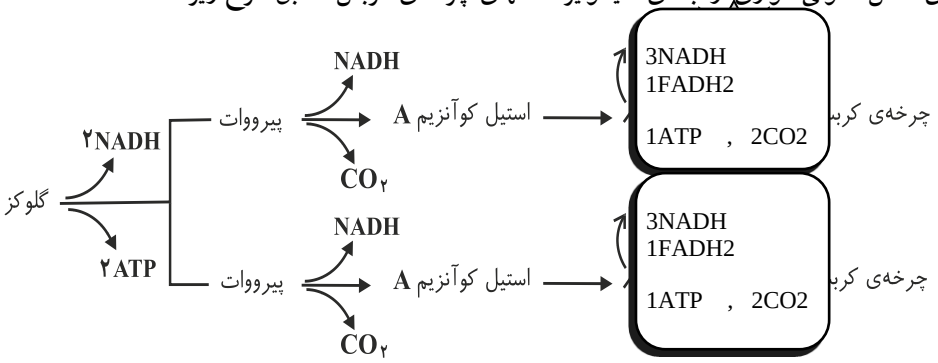
$۱ATP, ۱FADH_۲, ۳NADH, ۲CO_۲$

● **نکته ۲:** از اکسیداسیون یک مولکول پیرووات در چرخه‌ی کربس محصولات زیر به‌دست می‌آیند:

۱ATP ,۱FADH$_۲$,٤ NADH,۳CO$_۲$

● **نکته۳:** پیرووات قبل از ورود به چرخه‌ی کربس و طی تبدیل‌شدن به استیل کوآنزیم **A** یک **NADH** تولید می‌کند.

جمع‌بندی چرخه‌ی تنفس سلولی هوازی از ابتدای گلیکولیز تا انتهای چرخه‌ی کربس مطابق طرح زیر است:



◄ مطابق جمع‌بندی فوق، از اکسیداسیون یک مولکول گلوکز، از ابتدای گلیکولیز تا انتهای چرخه‌ی کربس، محصولات زیر به‌دست می‌آیند:

۴ATP ,۲FADH$_۲$,۱۰NADH,۶CO$_۲$

دقت کنید که در سؤالات کدام ماده مورد سؤال قرار گرفته‌اند و واکنش‌ها تا کدام مرحله مورد سؤال قرار می‌گیرند.

● **سه سؤال زیر را مقایسه کنید:**

۱- از اکسیداسیون کوآنزیم **A** در طی چرخه‌ی کربس چند **ATP**، **NADH** و **FADH$_۲$** تولید می‌شود؟

۱FADH$_۲$ و **۱ATP** و **۳NADH**

۲- از اکسیداسیون هر مولکول پیرووات، در طی چرخه‌ی کربس چند **ATP**، **NADH** و **FADH$_۲$** تولید می‌شود؟

۱FADH$_۲$ و **۱ATP** و **۴NADH**

✔دقت کنید که هنگام تبدیل پیرووات به استیل کوآنزیم **A** یک **NADH** تولید می‌شود.

۳- از اکسیداسیون هر مولکول گلوکز، در طی چرخه‌ی کربس چند **ATP**، **NADH** و **FADH$_۲$** تولید می‌شود؟

۲FADH$_۲$ و **۴ATP** و **۱۰NADH**

● **نکته**: مولکول‌های **NADH** و **FADH$_۲$** حاصل، مقدار زیادی از انرژی را به‌صورت ذخیره دارند که در زنجیره‌ی انتقال الکترون به **ATP** تبدیل می‌شود.

زیست شناسی امرایی

تست: چرخه‌ی کالوین در ... انجام نمی‌شود. (خارج کشور ۸۷)

۱) کلپ ۲) نوروسپورا ۳) تاژکدار چرخان ٤) کلامیدوموناس

پاسخ تشریحی: *کپک نوروسپورا قارچ و هتروتروف است. چرخه‌ی کالوین در هتروتروف‌ها و شیمیواتوتروف‌ها وجود ندارد.*

پاسخ صحیح گزینه‌ی «۲» است.

تست: در چرخه‌ی کربس، ... در یک گام حاصل می‌شوند. (خارج کشور ۸۷)

۱) ترکیب پنج کربنی و ATP ۲) CO_2 و $FADH_2$

۳) ترکیب پنج کربنی و $FADH_2$ ٤) CO_2 و NADH

پاسخ تشریحی:

$$۶C \xrightarrow[NADH]{NAD^+ + H + e^-} ۵C \xrightarrow[ADP \quad NADH]{NAD^+ + H + e^- \quad ATP} ۴C \xrightarrow[FADH_2]{FAD} ۴C \xrightarrow[NADH]{NAD^+ + H^+} ۴C$$

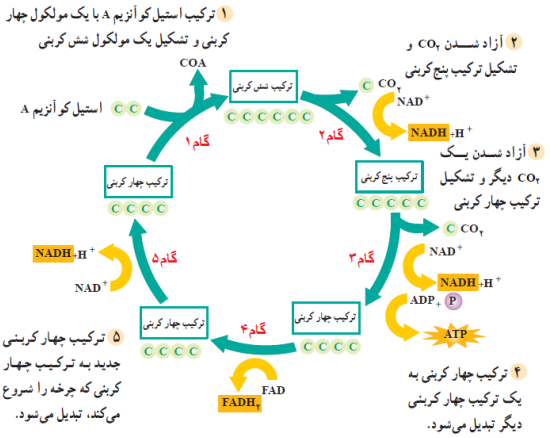
پاسخ صحیح گزینه‌ی «۴» است.

تست: در یک سلول گیرنده‌ی مکانیکی گوش انسان، با مصرف یک مولکول استیل کوانزیم A، در گام ۳ ... گام ۵، ... خواهد شد. (سراسری ۹۲)

۱) همانند- ATP تولید ۲) همانند- NAD^+ مصرف

۳) برخلاف- NADH تولید ٤) برخلاف- FAD مصرف

پاسخ تشریحی: *در گام ۳ چرخه‌ی کربس همانند گام ۵، NAD^+ مصرف می‌شود؛*



پاسخ صحیح گزینه‌ی «۲» است.

تست: به منظور مصرف یک مولکول استیل کوانزیم A توسط گیرنده‌ی مخروطی چشم انسان، لازم است تا در گام ۲ ... گام ۵، ... شود. (خارج کشور ۹۲)

۱) برخلاف- $۲CO_2$ آزاد ۲) همانند- NADH تولید

۳) برخلاف- ATP ساخته ٤) همانند- $۲NAD^+$ مصرف

پاسخ تشریحی: *در گام ۲ همانند گام ۵، NADH تولید می‌شود. پاسخ صحیح گزینه‌ی «۲» است.*