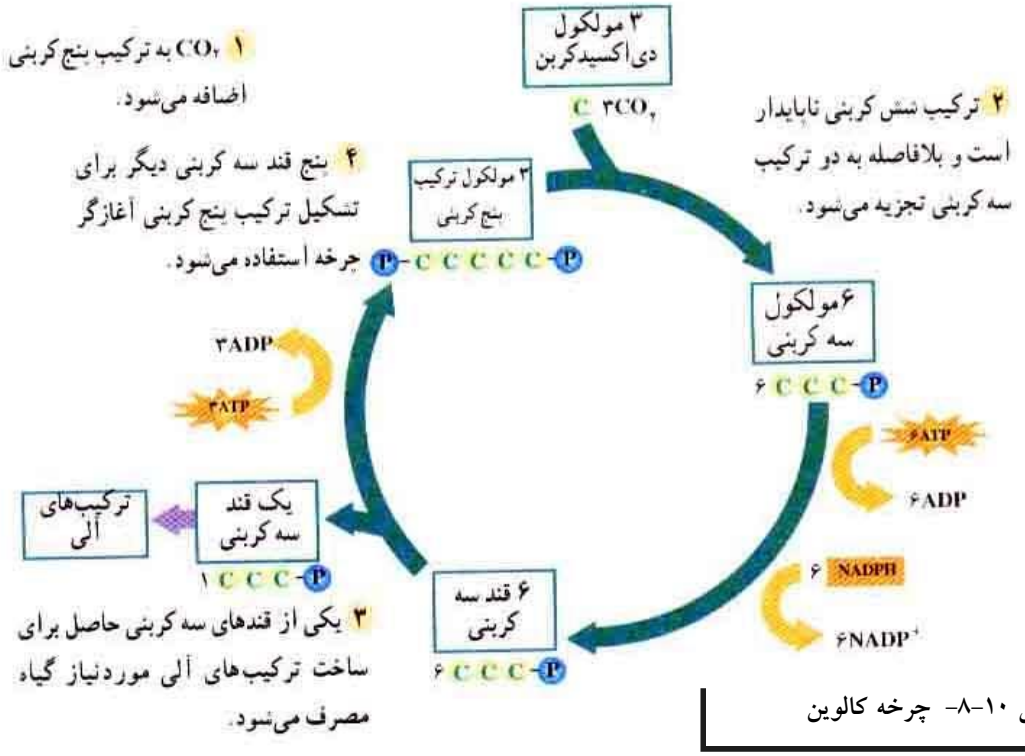
## ■ چرخه‌ی کالوین

چرخه‌ی کالوین مجموعه‌ای از واکنش‌های آنزیمی است که در نهایت منجر به تولید قند سه کربنی می‌شوند. واکنش‌های چرخه‌ی کالوین طی ٤ مرحله یا گام به شرح زیر رخ می‌دهند.




شکل ۱۰-۸- چرخه کالوین

**نکته:** واکنش‌های چرخه‌ی کالوین در درون استروما یا بستره‌ی کلروپلاست روی می‌دهند.

**گام ۱:** هر مولکول دی‌اکسید کربن با کمک آنزیمی به نام روبیسکو به یک ترکیب پنج کربنی اضافه می‌شود و یک ترکیب شش کربنی ناپایدار تولید می‌شود.

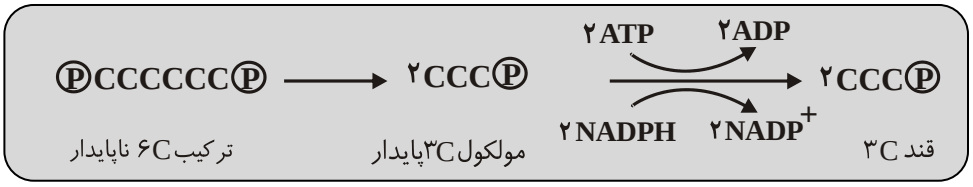
$$\text{Ⓟ-C-C-C-C-C-Ⓟ} + CO_2 \xrightarrow{\text{روبیسکو}} \text{Ⓟ-C-C-C-C-C-C-Ⓟ}$$

ترکیب ۵ کربنی ۲ فسفاته — دی‌اکسید کربن — ترکیب ۶C ناپایدار

● در ارتباط با گام ۱ چرخه کالوین به نکات استنباطی زیر توجه کنید:

- ◄ **۱:** این واکنش اولین واکنش از چرخه‌ی کالوین بوده و یک واکنش منفرد است.
- ◄ **۲:** واکنش از نوع سنتز آب‌دهی است و درون استروما روی می‌دهد.
- ◄ **۳:** این واکنش در حضور آنزیمی به نام روبیسکو صورت می‌گیرد که در واقع ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز- اکسیژناز نام دارد.
- ◄ **۴:** فرآورده‌ی حاصل از این واکنش، یک ترکیب شش کربنی حدواسط ناپایدار است که بلافاصله به دو مولکول سه کربنی شکسته می‌شود.

**گام ۲:** ترکیب شش کربنی حاصل به دو ترکیب سه کربنی شکسته می‌شود. از افزودن انرژی گروه‌های فسفات **ATP** و الکترون‌های **NADPH** به این ترکیب‌ها، قندهای سه کربنی تشکیل می‌شود.




● در ارتباط با گام ۲ چرخه کالوین به نکات زیر توجه کنید:

۱- این گام در واقع شامل دو واکنش است.

✔واکنش اول آن شکسته‌شدن ترکیب شش کربنی ناپایدار و تبدیل آن به دو ترکیب سه کربنیپایدار است و در واقع یک واکنش هیدرولیز است.

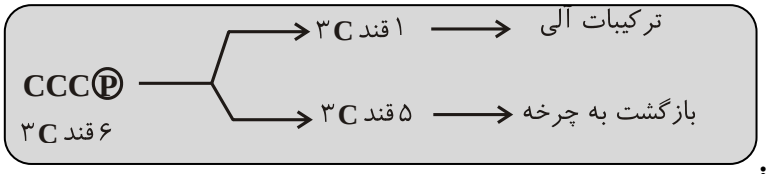
✔واکنش دوم آن تبدیل ماده‌ی سه کربنی به قند سه کربنی است.

۲- اولین مولکول پایدار پس از تثبیت $CO_2$، یک ماده‌ی سه کربناست، به همین خاطر گیاهانی که دی‌اکسید کربن را به این روش تثبیت می‌کنند، گیاهان سه کربنی یا سه کربنیمی‌نامند. به عبارت دیگر در این گیاهان $CO_2$ مستقیماً در چرخه‌ی کالوین تثبیت می‌شود.

۳- قند سه کربنی حاصل در اصل محصول نهایی فتوسنتز می‌باشد، اما هنوز از چرخه خارج نمی‌شود.

٤- برای تبدیل هر مولکول ماده سه کربنی به قند سه کربنی، یک مولکول **ATP** و یک مولکول **NADPH** مورد نیاز است. **ATP** انرژی و **NADPH** الکترون و هیدروژن مورد نیاز را تأمین می‌کند.

**گام ۳:** تعدادی از قندهای سه کربنی حاصل برای ساخت ترکیبات آلی، مانند نشاسته و ساکارز به مصرف می‌رسند.




● توجه کنید در گام۳ :

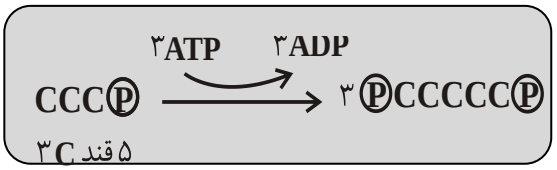
۱- واکنش‌های سنتز آب‌دهی و یا هیدرولیز صورت نمی‌گیرد و آنزیمی در این گام دخالت نمی‌کند. این گام فقط سهمیه‌بندی قندهای ۳ C حاصل را انجام می‌دهد. به‌طوری که از هر ٦ قند یکی را به عنوان قند تولیدی از چرخه خارج می‌کند و ۵ قند ۳ C دیگر سهم چرخه می‌باشند.

۲- در گام ۳ تغییری در تعداد کربن‌های مولکول‌های حاصل ایجاد نمی‌شود.

۳- قند سه کربنی ای که از چرخه خارج می‌شود، محصول نهایی کالوین محسوب می‌شود که برای ساخت ترکیب‌های آلی، مانند نشاسته و ساکارز، به مصرف می‌رسد.

٤- هر یک از مولکول‌های سه کربنی حاصل در اصل نصف یک مولکول هگزوز است و واکنش سنتز آبدهی دو مولکول قند سه کربنی منجر به تشکیل گلوکز یا فروکتوز می‌شود. در برخی گیاهان گلوکز و فروکتوز، قند ساکاروز تولید می‌کنند و نیز از گلوکز برای ساخت نشاسته و سلولز استفاده می‌شود.

**گام ۴:** از تعدادی دیگر از قندهای سه کربنی (۵ قند سه کربنی) برای تولید مجدد ماده‌ی پنج کربنی اولیه، استفاده می‌شود. در نتیجه آن چرخه یک بار دیگر آغاز می‌شود.




● در مورد گام ۴ به نکات استنباطی زیر توجه کنید :

۱- تعداد کربن ما در مواد مصرفی (۵ قند سه کربنی) با محصولات واکنش (۳ ماده پنج کربنی) برابر است.

۲- این واکنش همانند گام ۲، با مصرف **ATP** همراه است.

۳- در این واکنش **۳ATP** مصرف می‌شود. بنابراین یک واکنش انرژی‌خواه است.

## ■ جمع‌بندی چرخه‌ی کالوین

۱- جهت موازنه واکنش‌ها را با ۳ مولکول $CO_2$ شروع می‌کنیم تا در نهایت ۳ مولکول ترکیب پنج کربنه بازسازی شوند.

۲- این واکنش‌ها به‌طور چرخه‌ای انجام می‌گیرند، زیرا ترکیب پنج کربنی را بازسازی می‌کنند. در مجموع برای تشکیل هر مولکول قند سه کربنی، سه مولکول دی‌اکسید کربن وارد چرخه می‌شود، به‌عبارتی با سه گردش متوالی چرخه‌ی کالوین یک قند سه کربنی ساخته و از چرخه خارج می‌شود. **ATP** و **NADPH** حاصل از واکنش‌های نوری، انرژی و هیدروژن مورد نیاز چرخه‌ی کالوین را فراهم می‌کند.

۳- مواد مصرفی در چرخه‌ی کالوین عبارتند از:

$$CO_2 - ATP - NADPH$$

٤- مواد تولیدی چرخه‌ی کالوین عبارتند از:

$$\text{قند ۳ C} - ADP - NADP^+$$

## ◄ محاسبات چرخه‌ی کالوین

برای محاسبه تعداد **ATP** و **NADPH** و ... باید کل چرخه را مدنظر قرار دهیم.

۱- برای تولید یک قند سه کربنی در چرخه‌ی کالوین **۹ATP** و **٦NADPH** مصرف می‌شود.

۲- با توجه به رابطه‌ی فوق، می‌توان گفت که به ازای تثبیت هر مولکول $CO_2$، **۳ATP** و **۲NADPH** لازم است.

◄ **نتیجه‌گیری**: در محاسبات کافی است که تعداد کربن‌ها را تعیین کنیم و سپس ۳ برابر تعداد آن‌ها **ATP** و دو برابر آن‌ها **NADPH** برای سنتز لازم است.

✔**مثال ۱:** تثبیت یک مولکول دی‌اکسید کربن چند **ATP** و چند مولکول **NADPH** لازم دارد؟

$$CO_2 \Rightarrow ۳ATP, ۲NADPH$$

✔**مثال ۲:** برای سنتز قند سه کربنی حاصل از فتوسنتز، چند **ATP** و **NADPH** مصرف می‌شود؟

$$\text{قند سه کربنی} \Rightarrow ۳C \Rightarrow ۹ATP, ٦NADPH$$

✔**مثال ۳:** برای سنتز قند ریبوز (قند موجود در **ATP**) چند **ATP** و **NADPH** لازم است؟

$$\text{ریبوز} \Rightarrow ۵C \Rightarrow ۱۵ATP, ۱۰NADPH$$

✔**مثال ۴:** برای سنتز قند گلوکز، چند **ATP** و **NADPH** مصرف می‌شود؟

$$\text{گلوکز} \Rightarrow ٦C \Rightarrow ۱۸ATP, ۱۲NADPH$$

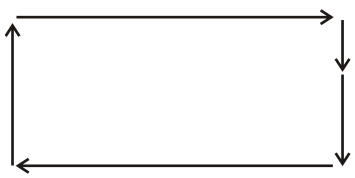
✔**مثال ۵:** برای سنتز یک مولکول لاکتوز چند **ATP** و **NADPH** لازم است؟

لاکتوز $\Rightarrow$ ۱۲C $\Rightarrow$ ۳٦ ATP ,۲٤ NADPH

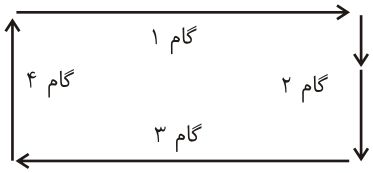
## ☺روش به‌خاطر سپردن چرخه‌ی کالوین (روش امرایی)

**جهت به‌خاطر سپردن چرخه‌ی کالوین به روش زیر به‌صورت گام به گام عمل کنید.**

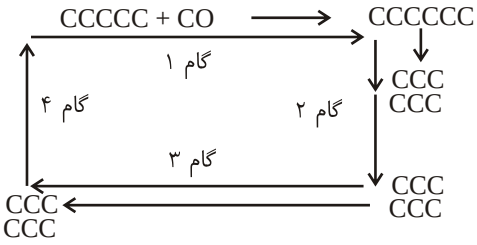
**۱- یک مستطیل مانند شکل مقابل رسم کنید و ضلع راست آن را با دو فلش نشان دهید.**



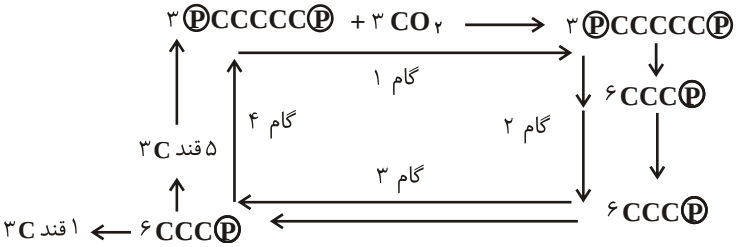
**۲- هر یک از اضلاع این مستطیل یک گام از چرخه‌ی کالوین می‌باشد.**



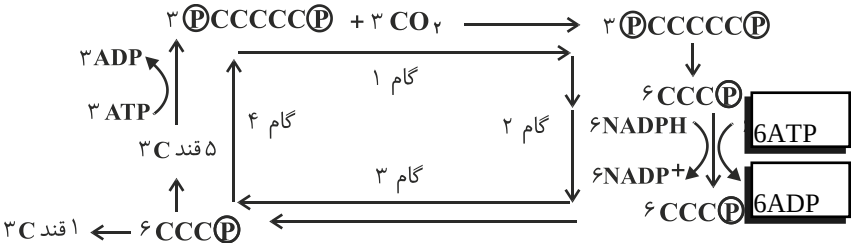

**۳- تعداد کربن‌های واکنش‌های هر گام را مشخص کنید.**




**٤- حال چرخه را از اول با سه مولکول ماده پنج کربنی و سه مولکول $CO_2$ می‌نویسیم و فسفات‌ها را نیز اضافه می‌کنیم.**




**۵- در ادامه مولکول‌های ATP و NADPH را اضافه می‌کنیم. دقت کنید که فقط ضلع‌های راست و چپ (گام ۲ و ٤) ATP مصرف می‌کنند و فقط در ضلع دوم (گام ۲) NADPH مصرف می‌شود.**




---

**تست:** $NADP^+$ ... **(سراسری ۹۰)**

۱) به‌عنوان عضوی از زنجیره‌ی انتقال الکترون بر تولید **ATP** بی‌تأثیر است.

۲) به کلروفیل در به دام انداختن نور کمک می‌کند و در تجزیه‌ی آب توسط فتوسیستم **I** نقش دارد.

۳) در رایج‌ترین روش تثبیت دی‌اکسید کربن، به هنگام تشکیل قند سه کربنی از مولکول سه کربنی تولید می‌شود.

٤) الکترون‌ها را به چرخه‌ی کالوین منتقل می‌کند و در تشکیل ترکیب چهار کربنی از ترکیب پنج کربنی نقش دارد.

**پاسخ تشریحی:** *رایج‌ترین روش تثبیت دی‌اکسیدکربن، چرخه‌ی کالوین است که در گام دوم آن به هنگام تبدیل اسید سه کربنی به قند سه کربنی،* $NADP^+$ *از* **NADPH** *تولید می‌شود.*

*زنجیره‌ی انتقال الکترون شامل مولکول‌هایی در غشای تیلاکوئید است بنابراین* $NADP^+$ *عضوی از زنجیره‌ی انتقال الکترون نیست زیرا در استروما دیده می‌شود.*

*تجزیه‌ی آب توسط آنزیم متصل به فتوسیستم* **II** *صورت می‌گیرد نه فتوسیستم* **I**

**NADPH**، *الکترون‌ها (دو الکترون) را از زنجیره‌ی انتقال الکترون به چرخه‌ی کالوین منتقل می‌کند. اما در چرخه‌ی کالوین ترکیب پنج کربنی به چهار کربنی تبدیل نمی‌شود (این تبدیل در چرخه‌ی کربس روی می‌دهد و طی آن* **NADH** *تولید می‌شود.) پاسخ صحیح گزینه‌ی «۳» است.*

---

**تست:** در جانداران حاوی کلروپلاست، با سه بار گردش متوالیِ چرخه‌ی کالوین ..... **(خارج کشور ۹۰)**

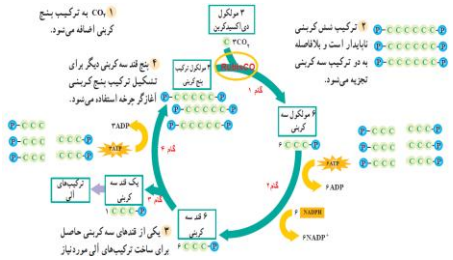
۱) ۳ مولکول قند ٦ کربنی حاصل می‌شود.

۲) ۹ مولکول دی‌اکسید کربن مصرف می‌شود.

۳) ۳ مولکول ترکیب ٦ کربنی ناپایدار تجزیه می‌شود.

٤) ۹ گروه فسفات به ۹ مولکول **ADP** متصل می‌شود.

**پاسخ تشریحی:** *پاسخ صحیح گزینه‌ی «۳» است.*



---

**تست:** در برگ درخت بید، در گامی از چرخه‌ی کالوین که ..... می‌شود، ..... می‌گردد. **(سراسری ۹۱)**

۱) **ATP** ساخته – ترکیب ۵ کربنی تجزیه

۲) **ATP** مصرف– ترکیب شش کربنی ناپایدار تولید

۳) قند سه کربنی ساخته – $NADP^+$ تولید

٤) **NADPH** مصرف – **ATP** تولید

**پاسخ تشریحی:** *درگام دوم چرخه‌ی کالوین ترکیب شش کربنی ناپایدار حاصل از گام اول، به دو ترکیب سه کربنی فسفات‌دار (نوعی اسید) شکسته می‌شود. از افزودن انرژی گروه‌های فسفات* **ATP** *و الکترون‌های* **NADPH** *به این ترکیب‌ها، قندهای سه کربنی فسفات‌دار،* **ADP** *و* $NADP^+$ *تولید می‌شود.*

*پاسخ صحیح گزینه‌ی «۳» است.*

---

**تست:** در سلول‌های کلرانشیم برگ جعفری، $NADP^+$ در ..... و طی واکنش‌های ..... حاصل می‌شود. **(خارج کشور ۹۱)**

۱) درون تیلاکوئید– تبدیل انرژی نورانی به شیمیایی

۲) درون تیلاکوئید– گام دوم چرخه‌ی کالوین

۳) استروما– تبدیل انرژی نورانی به شیمیایی

٤) استروما– گام دوم چرخه‌ی کالوین

**پاسخ تشریحی:** *در گام دوم چرخه‌ی کالوین* **NADPH** *که در طی واکنش‌های وابسته به نور تولید شده بود، مصرف شده و* $NADP^+$ *حاصل می‌شود. محل انجام چرخه‌ی کالوین در موجودات کلروپلاست‌دار، درون استروما است.*

*پاسخ صحیح گزینه‌ی «۴» است.*