

# FOTOSENTEZ TEPKİMELERİ(REAKSİYONLARI)

## Fotosistemler: klorofillerin ışık tarafından etkinleştirilmesi

- pigmentler, proteinler ve başka moleküller birlikte kloroplast içinde yer alan tilakoid zarında kümelenecek **fotosistem** adlı yapıları oluştururlar.
- fotosistemler güneşten gelen ışık enerjisini yakalayan **kümelemeler** olarak bilinir. Herbir **fotosistemde 300 civarında pigment** bulunmaktadır.
- fotosistemlerin yapısında ışığı toplayıp hasat eden **anten kompleksi** ile **reaksiyon merkezi** adı verilen iki ayrı oluşum bulunmaktadır.
- herbir fotosistemde merkez ve anten kompleksi denilen yapılar bulunur. Anten komplekslerinin içinde güneşten gelen ışığı toplayan ve ışığı hasat edip reaksiyon merkezine gönderen **klorofil** ve **karotenoidler** bulunur. Bu pigmentler bu özelliği sayesinde ışık soğurma yüzey alanı ve soğuracak olan ışığın dala boyu aralığını genişletirler. Anten kompleksinde güneşten gelen ışınlar soğurular fakat anten komplekslerinde **enerji transferi gerçekleşmez**. Anten komplekslerin güneş enerjisi kimyasal bağ enerjisine dönüşmez. Güneşten gelen ışın anten kompleksindeki bir pigment tarafından soğrulur ve diğer yandaki pigmente verilir ve en sonunda reaksiyon merkezine verilir. Fotosistemlerin anten kompleksinde yer alan **klorofil-a** molekülleri fotosistemin merkezinde yer alan klorofil moleküllerine göre dalga boyu daha kısa olan ışınları absorbe ederler. Fotosistemin anten kompleksinde yer alan pigmentler proteinli yapılara gömülü olmasından dolayı reaksiyon merkezindeki klorofil-a'lar kadar kaliteli bir ışık absorpsiyonu gerçekleştirmezler.
- fotosistemlerin reaksiyon merkezinde **bir çift klorofil-a ve ilk elektron tutucu** olan özel moleküller yer alır. Reaksiyon merkezinde fotosentezin ışığa bağımlı reaksiyonlarının başlatıldığı yerdir.
- tilakoid zarların yapısında iki çeşit fotosistem bulunur bunlar: **fotosistem-I** ve **fotosistem-II**'dir. Fotosistem-I ile fotosistem-II birlikte çalışırlar.
- fotosistem-II**'nin reaksiyon merkezinde bulunan **klorofil-a dalga boyu 700 nm** olan ışınları daha iyi soğurduğundan **P700** olarak adlandırılır.
- fotosistem-II**'nin reaksiyon merkezinde yer alan **klorofil-a dalga boyu 680 nm** olan ışınları daha iyi soğurduğundan **P680** olarak adlandırılır.
- fotosistemler **keşf edilme sırasına** göre adlandırılmıştır. Fotosentez reaksiyonlarında öncelikle fotosistem-II görev alırken fotosistem-I daha sonra görev alır.

## Fotosentez Reaksiyonları(Tepkimeleri):

### Fotosentez Reaksiyonları(Tepkimeleri):

- güneşten gelen ışınlar da yer alan enerji burada kimyasal bağ enerjisine aktarılır. Yine burada cansız ortamdan canlı ortama enerji transferi gerçekleşir.
- fotosentezin tepkimeleri kloroplast içindeki özel kısımlarda gerçekleşir. Fotosentez reaksiyonları ışığa bağımlı ve ışıktan bağımsız reaksiyonlar olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleşir.

### a-Fotosentezin Işığa Bağımlı Reaksiyonları(Tepkimeleri):

- bu kısımda ışık enerjisi öncelikle **elektrokimyasal enerjiye** daha sonra da **kimyasal bağ enerjisine** dönüşür.
- ışığa bağımlı reaksiyonlar kloroplastın **tilakoid zarlarında** gerçekleşir. Kloroplastın tilakoid zarlarında yer alan fotosistemler **ETS** adlı yapılarla birbirlerine bağlıdır.
- tilakoid zarlarda yer alan ETS elemanları elektronları yakalama ve bir başka moleküle aktarma yeteneğindedirler. Buradaki ETS elemanları: **ferrodoksin(fd)**, **sitokrom(stk) b ve c**, **plastokinon(pq)**, **plastosiyanin(pc)** örnek olarak verilir.
- ışıktan bağımsız tepkimelerde hücre besin üretimi için gerekli olan **ATP** ve **NADPH** molekülleri sentezlenir ve dışarıya **oksijen gazı** verilir.
- tilakoid zarlarda yer alan fotosistemler ETS elemanları ile birbirine bağlı durumda bulunurlar.
- elektron taşıma sisteminde ETS kullanılır ve ETS'ler ve her bir ETS farklı fotosistemlerden oluşur. Fotosentezin ışığa bağımlı reaksiyonlarında oksijen üretimi gerçekleşir.
- klorofilden ayrılan ilk elektron özel bir elektron tutucusu tarafından tutulur ve klorofilden ayrılan elektron **indirgenme** ve **yükseltgenme** kurallarına göre hareket ederek bir pigmentten diğer pigmentte doğru hareket eder.
- ışığa bağımlı reaksiyonlarda **enzimler, pigmentler ve ETS** molekülleri görev alır

### Işığa Bağlı Reaksiyonların Gerçekleşmesi

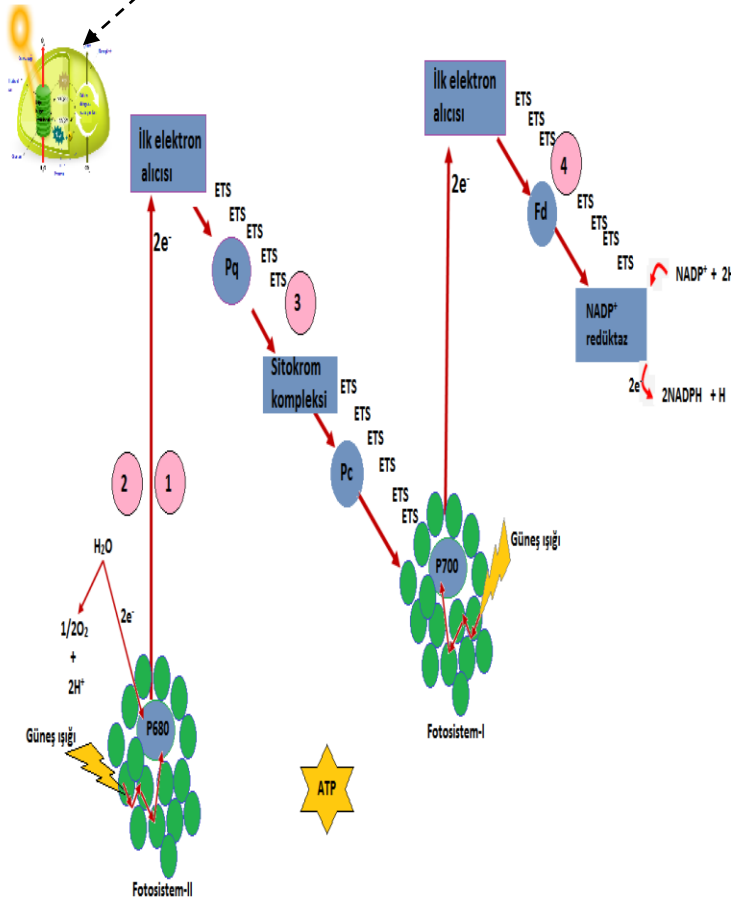
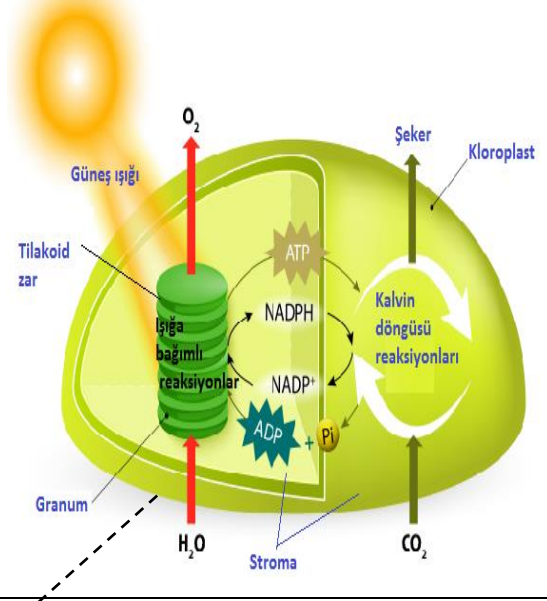
#### Işığa Bağlı Reaksiyonların Gerçekleşmesi

1-ışığa bağımlı reaksiyonlarda FS-II'nin ışığı absorbe etmesiyle fotosistemin reaksiyon merkezinde bulunan klorofil-a'ya ait olan elektronlar uyarılmış olur ve elektronun enerjisi artmış olur ve elektron klorofilden kopmasıyla **ilk elektron alıcısı** tarafından tutulur. Klorofil-a'dan kopan ilk elektron ve protonlar ilk alıcı tarafından yakalanır ve klorofil elektron **kaybederek(yükseltgenerek)** elektron açığı meydana gelir. Böylece klorofil-a yükseltgenmiş olur ve klorofilin elektron açığı meydana gelir.

2-kloroplastlarda yer alan bir enzim çeşidi su molekülünü ayrıştırarak **iki elektron, iki proton(H<sup>+</sup>)**, **bir oksijen** atomunu oluşturur. Oluşan elektronlar P680 verilerek P680'nin elektron açığı kapanır. Oluşan bir oksijen atomu farklı su moleküllerin ayrışması ile oluşan oksijen atomu ile birleşerek O<sub>2</sub>'yi oluşturur ve oluşan oksijen molekülü(O<sub>2</sub>) atmosfere verilerek diğer canlıların kullanımına sunulur veya kendisi kullanılır.

3- klorofilden kopan elektron ilk elektron alıcısı üzerinden tilakoid zarında yer alan elektron taşıma zinciri elemanlarına verilir. Burada: **plastokinon, sitokrom kompleksi, plastosiyaninden** oluşan ETS elemanları üzerinden geçen elektronlar en son **FS-I'e** geçer. Burada elektronun ETS üzerinden geçişi sırasında tilakoid zarında yer alan **ATP sentaz** adlı enzim açığı bu enerjiden ATP sentezini gerçekleştirir.

4- FS-I'e gelen elektron burada yer alan klorofil-a'nın(P700) elektron açığını kapatır. Daha önceden FS-I'de yer alan elektron klorofil-a'dan ışık ile kopup uzaklaşan elektron ilk alıcı tarafından yakalanmış ve buradaki klorofil-a'nın elektron açığı olmuştur. Burada ilk elektron alıcı adı molekül yükseltgenerek ikinci bir ETS üzerinde bulunan **ferrodoksin** adlı bir ETS elemanına geçer ve ferrodoksin adlı demir içerikli yapı indirgenir. Burada bulunan **NADP<sup>+</sup> redüktaz** adlı bir enzim ferrodoksinin elektronları alarak **NADP<sup>+</sup>** adlı moleküle taşır. NADP<sup>+</sup> molekülü iki elektron ve kloroplastın stromasından aldığı iki proton(H<sup>+</sup>) ile **NADPH + H<sup>+</sup>** adlı moleküle oluşturur. NADP<sup>+</sup> adlı koenzim iki elektron ve bir proton olarak NADPH + H<sup>+</sup>'a indirgenir ve 1 proton ise çözeltide kalır.



# FOTOSENTEZ TEPKİMELERİ(REAKSİYONLARI)

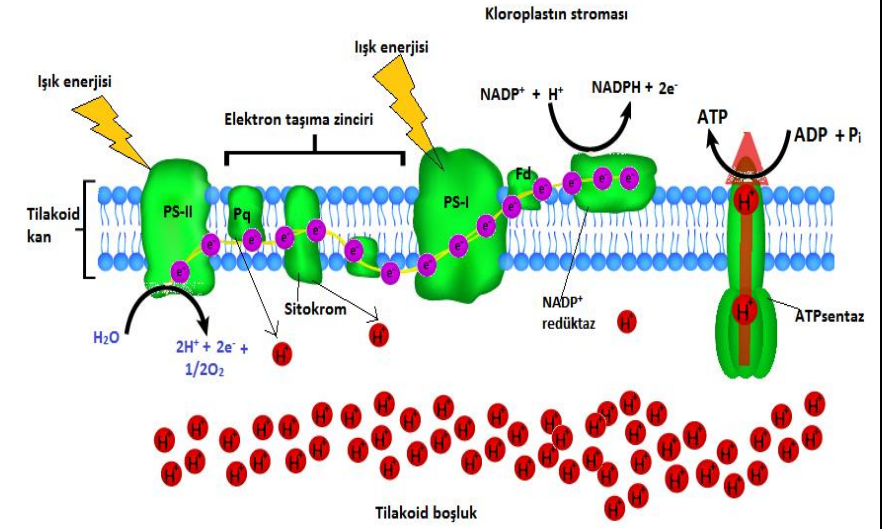
## Tilakoid Zarda Kemiozmotik Hipotezle Enerji Eşleşmesi:

### Tilakoid Zarda Kemiozmotik hipotezle Enerji Eşleşmesi:

-kloroplastın tilakoid zarlarında yer alan ETS'de elektron taşınımı sırasında elektronların enerji **sürekli olarak azalır**. Klorofilden ayrılan elektron ETS'de taşınırken bir enerji seviyesinden **daha düşük bir enerji seviyesine** geçiş yaparak ETS üzerinde ilerler.

-elektronların ETS üzerinden taşınımı sırasında açığa çıkan enerji ile kloroplastın stromasında yer alan **protonlar(H<sup>+</sup>) tilakoid boşluğa** doğru pompalanır. Tilakoid boşlukta proton birikimi meydana gelir ve proton birikiminden dolayı **tilakoid zarda potansiyel** oluşur. Daha önce suyun iyonlaşmasıyla oluşan protonlarda tilakoid boşluğa pomplanır ve tilakoid zar proton geçişine izin vermez ve tilakoid zarda biriken protonlar zarda bulunan ATPsentaz enzimi üzerinden stromaya geçerken **ADP'ye fosfat** eklenmesiyle **ATP** sentezlenmiş olur. Bu olayın başlangıcında ışık enerjisi kullanıldığı için bu olaya **fotofosforilasyon** denir.

-tilakoid zarının iki tarafından meydana gelen proton farkına bağlı olarak **ATPsentaz** üzerinden proton geçişi sırasında ATP sentezlenmesine **kemiozmozis** denir.



### Işığa bağlı reaksiyonların özeti:

- iki farklı fotosistem** kullanılır. Fotosistem-II'nin elektron açığı suyun iyonlaşmasıyla oluşan elektrondan karşılanır.
- fotosistem-I'in elektron açığı ETS üzerinden gelen elektronla karşılanır. **İndirgenme ve yükseltgenme** olayları meydana gelir.
- su moleküllerine iyonlaşır.  $2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2$
- fotosistem-I'den ayrılan ilk elektron alıcısı üzerinden ferredoksinin bulunduğu bir ETS üzerinde taşınır.
- NADP<sup>+</sup> adlı molekül ferredoksininden 2 elektron alarak ve stromadan 2 proton alarak NADPH + H<sup>+</sup> molekülüne indirgenir.
- kloroplastın stromasında bu iki molekül oluşan (**ATP ve NADPH molekülleri**) kloroplastın stromasında ışıktan bağımsız tepkimlerinde kullanılır.
- oksijen molkeülleri(O<sub>2</sub>) ise tilakoid zarda meydana gelip bir kısmı hücre mitokondrisinde kullanılırken bir kısmı atmosfere yani dışarıya verilir.
- kloroplastın stromasında meydana gelen ışıktan bağımsız reaksiyonlarda 1 molekül CO<sub>2</sub>'nin kullanılması için ışığa bağımlı evre 3ATP ve 2NADPH 4 + H<sup>+</sup> molekülünün üretilip gönderilmesi gerekir.

### Işıktan Bağımsız Reaksiyonları(Tepkimeler):

- fotosentezin ışıktan bağımsız evreleri Melvin Calvin ve arkadaşları tarafından bulunmasından dolayı calvin döngüsü olarak anılmaktadır.
- ışıktan bağımsız tepkimeler kloroplastın stromasında enzimler aracılığıyla gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlarda ışık doğrudan kullanılmadığı için bu adı almıştır.
- bu reaksiyonlarda ışık doğrudan kullanılmamasına rağmen ışığa bağımlı evrelerde oluşan ATP ve NADPH gibi moleküller bu evrede kullanılır.
- ışıktan bağımsız evrelerde enzimlerin kullanılmasından bu reaksiyonlar sıcaklık değişimlerinden oldukça etkilenirler.
- ışıktan bağımsız evrede inorganik maddelerden organik madde sentezi gerçekleşir. CO<sub>2</sub>'nin indirgenmesiyle çeşitli organik moleküller sentezlenmiş olur.
- dışarıdan alınan CO<sub>2</sub> organik besinlerin yapısında yer alan C ve O kaynağını oluşturur.
- calvin döngüsünde gliseraldehit 3 fosfattır(G3P).
- fotosentezde bir molekül g3p'nin üretimi için döngünün 3 kez tekrar etmesi gerekmektedir.
- calvin döngüsü kloroplastın stromasında üç aşamada gerçekleşir: CO<sub>2</sub> kullanımı(CO<sub>2</sub> fikasayonu), indirgenme(besin üretimi), CO<sub>2</sub> alıcısının yenilenmesi(RuBP'nin üretimi)

#### a- CO<sub>2</sub> kullanımı(CO<sub>2</sub> fikasayonu):

-calvin döngüsünde ilk olarak CO<sub>2</sub> molekülü 5C'lu bir şeker olan **RuBP(ribulaz bi fosfat)**'ye bağlanmasıyla başlar ve CO<sub>2</sub>'nin RuBP'yle birleşmesi sonucu 6C'lu **kararsız ara bir bileşik** olur. Bu bileşik çok kararsız olmasından dolayı ortadan ikiye ayrılarak 3C'lu 1 fosfatlı iki molekül şeklinde **fosfoglisarik asit (3-fosfoglisarat=PGA)** adlı molekül oluşur. PGA adlı bileşik ışıktan bağımsız evrelerde oluşan **ilk kararlı bileşiktir**.

-CO<sub>2</sub>'nin RuBP'yle birleşmesini sağlayan enzimin adı **RuBP veya rubiskodur**.

#### b- İndirgenme(besin üretimi):

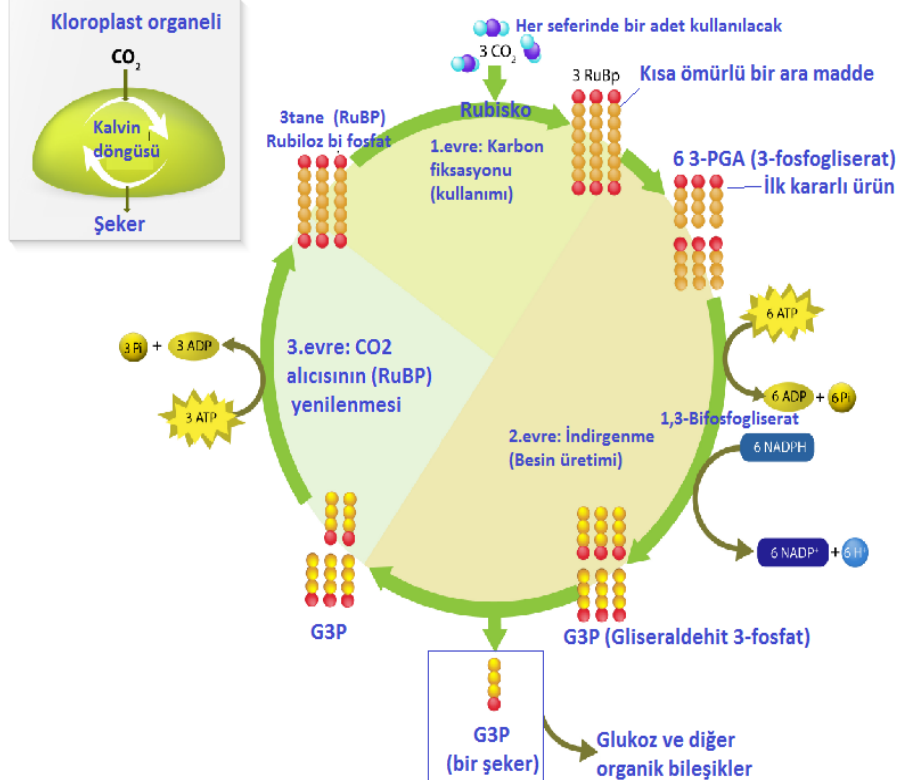
-bir önceki aşamada oluşan her iki **PGA'nın** herbirine ATP'den birer fosfat aktarılmasıyla ile iki tane **difosfoglisarik asit (DPGA)** adlı madde oluşur. .

-ışığa bağımlı evrelerden gelen **NADPH + H<sup>+</sup>** yükseltgenmesiyle açığa çıkan elektronları olarak indirgenen DPGA bir fosfat kaybederek **PGAL(G3P)'ye** dönüşür.

-yani 5C'lu RuBP'ye bir CO<sub>2</sub>'nin bağlanmasıyla iki adet **PGAL** molekülü oluşur.

-oluşan iki PGAL'den birisi calvin döngüsünden çıkıp 5C'lu RuBP'nin üretilmesi yeterli olmamaktadır. Ancak döngünün üç kez tekrarlanması durumunda toplam karbon sayısı 18 olur yani 6adet PGAL oluşur ve bunlardan bir tanesi döngüden çıkar ve 3 adet RuBP(5C) yeniden sentezlenmesi için gereken sayıda karbon hazır olmuş olacaktır.

-1 adet **PGAL'nin** üretilmesi için **döngünün 3 kez tekrar etmesi gerekir**. **6C'lu bir glikozun** üretilmesi için döngünün 6 kez tekrar etmesi gerekmektedir.



#### c- CO<sub>2</sub> alıcısının yenilenmesi(RuBP'nin üretimi):

-kloroplastın stromasında oluşan 6adet PGAL'den 5 tanesi 5C'lu 3 adet RuMP'nin oluşumunda kullanılır. Yani 5adet PGAL şekerinin karbon iskeleti yeniden düzenlenerek **5C'lu 3 adet RuMP** sentezlenir. Oluşan bu 5C'lu RuMP'lere ATP'den fosfat aktarılmasıyla üç adet **5C'lu RuBP** molekülü sentezlenmiş olur.

# FOTOSENTEZ TEPKİMELERİ (REAKSİYONLARI)

## Işıktan Bağımsız evrelerde özet olarak:

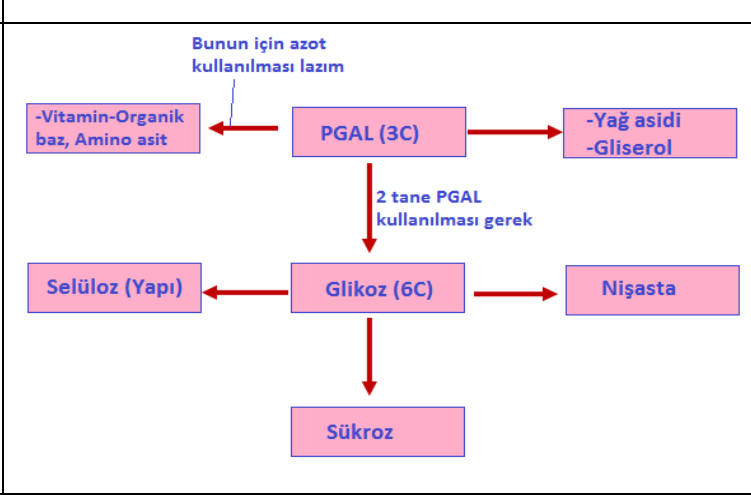
- inorganik moleküllerden organik madde üretilir.
- ışıkla bağımsız reaksiyonlarda ilk üretilen kararlı bileşik PGA adlı moleküldür.
- 1 molekül  $CO_2$ 'nin bağlanması için 3ATP ve 1adet  $NADPH + H^+$  molekülü kullanılır.
- fotosentez reaksiyonlarında 12 adet  $H_2O$  molekülü harcanıp 6 adet  $H_2O$  oluşur.
- fotosentezde harcanan net su molekülü sayısı 12 olmayıp 6'dır.

## Kalvin döngüsünün özet olarak gösterimi



## Fotosentezde organik Madde Sentezi:

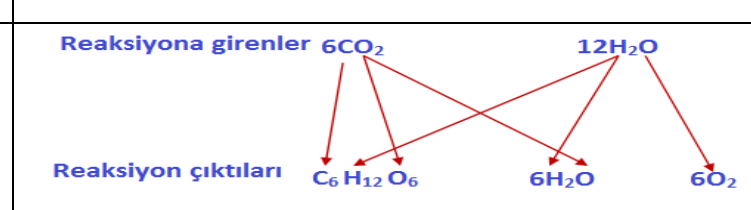
- kloroplastın stromasında ışıkla bağımsız tepkimelerde oluşan PGAL(G3P) adlı moleküllerin bir kısmından çeşitli organik moleküller oluşur.
- calvin döngüsünün son ürünü olan 3C'lu PGAL'ler kullanılarak farklı organik moleküller oluşur. PGAL adlı molekül aslında 3C'lu bir şekerdir.
- ışıkla bağımsız reaksiyonlarda üretilen PGAL'ler ihtiyaca göre organik baz, amino asit, yağ asidi, gliserol, yağ asidi, vitamin gibi maddelerin sentezinde kullanılır.
- PGAL'den amino asit, vitamin, organik baz gibi maddelerin sentezlenmesi için azot yani **nitrat** ve **amonyum** gibi maddelerin eklenmesi gerekir.
- fotosentezde kullanılan  $CO_2$ 'nin karbon atomu oluşan organik besinin yapısındaki karbon atomlarını oluşturur.
- $CO_2$ 'nin yapısında yer alan oksijen atomu oluşan organik maddelerin yapısına katıldığı gibi oluşan suyun( $H_2O$ ) yapısına da katılmaktadır.
- fotosentezde kullanılan suyun( $H_2O$ ) hidrojenleri oluşan besinin yapısına hidrojen kaynağı olarak katıldığı gibi oluşan suyun yapısına da katılmaktadır.



## Fotosentez kullanılan maddelerin hangi moleküllerin yapısına katılacağını gösterimi

### Fotosentez kullanılan maddelerin hangi moleküllerin yapısına katılacağı

- fotosentezde  $CO_2$ 'nin karbon atomu oluşan organik besinin yapısındaki karbon atomlarını oluşturur.
- $CO_2$ 'nin yapısında yer alan oksijen atomu oluşan organik maddelerin yapısına katıldığı gibi oluşan suyun yapısına da katılmaktadır.
- fotosentezde kullanılan suyun( $H_2O$ ) hidrojenleri oluşan besinin yapısına hidrojen kaynağı olarak katıldığı gibi oluşan suyun yapısına da katılmaktadır.



## Mitokondri ile kloroplastın kemiozmozis mekanizmalarının karşılaştırılması

### Mitokondri ile kloroplastın kemiozmozis mekanizmalarının karşılaştırılması

#### a-mitokondride gerçekleşen kemiozmozis

- ETS elemanları ve ATPsentaz enzimi mitokondrinin iç zarındaki girintiler olarak kabul edilen **kristalarda** yer alır.
- elektron taşıma zincirinde elektron aktarılması sırasında **elektron enerjisi** giderek azalır.
- ETS'den geçen elektronlar daha önceden organik moleküllerden koparılmıştır. Mitokondrinin iç zarı protonları mitokondrinin matriksinden zarlar arası boşluğa doğru pompalar.
- elektronun ETS'de taşınımı sırasında açığa çıkan enerji ile protonların az olduğu matriksten çok olduğu zarlar arası bölgeye doğru pomplanır.
- mitokondrinin iç ve dış zarı arasındaki **zarlar arası bölge** proton depo olarak işlev görür. Oksidatif fosforilasyonla ATP sentezi gerçekleşir.
- iç zarda yer alan ATPsentaz adlı enzim zarlar arası bölgede biriken protonların matrikse doğru difüzyonla akmasında ATP sentezler.

#### b-kloroplastta gerçekleşen kemiozmozis

- kloroplastın tilakoid zarlarında ETS elemanları ile ATPsentaz adlı enzim **tilakoid zarda** yer alır.
- elektronların ETS'deki taşınımı sırasında açığa çıkan enerji ATPsentaz ile ATP yapımında kullanılır ve bu enerji stromadaki protonların tilakoid boşluğa aktarılmasında kullanılır.
- tilakoid boşluk geçici olarak proton deposu olarak kullanılır.
- kloroplastlarda ATP üretmek için fotosistemler ışık enerjisini yakalar ve bu enerjiyi sudan gelen elektronları elektron taşıma zincirine taşıyıp burada enerji üretilmesini sağlarlar.
- elektron kaynağı su ve klorofillerdir.
- tilakoid boşlukta biriken protonlar ATPsentaz üzerinden stromaya aktarılırken ATP üretilmesine **foto-fosforilasyon** denir.

## Kloroplast ve mitokondri karşılaştırmaları

