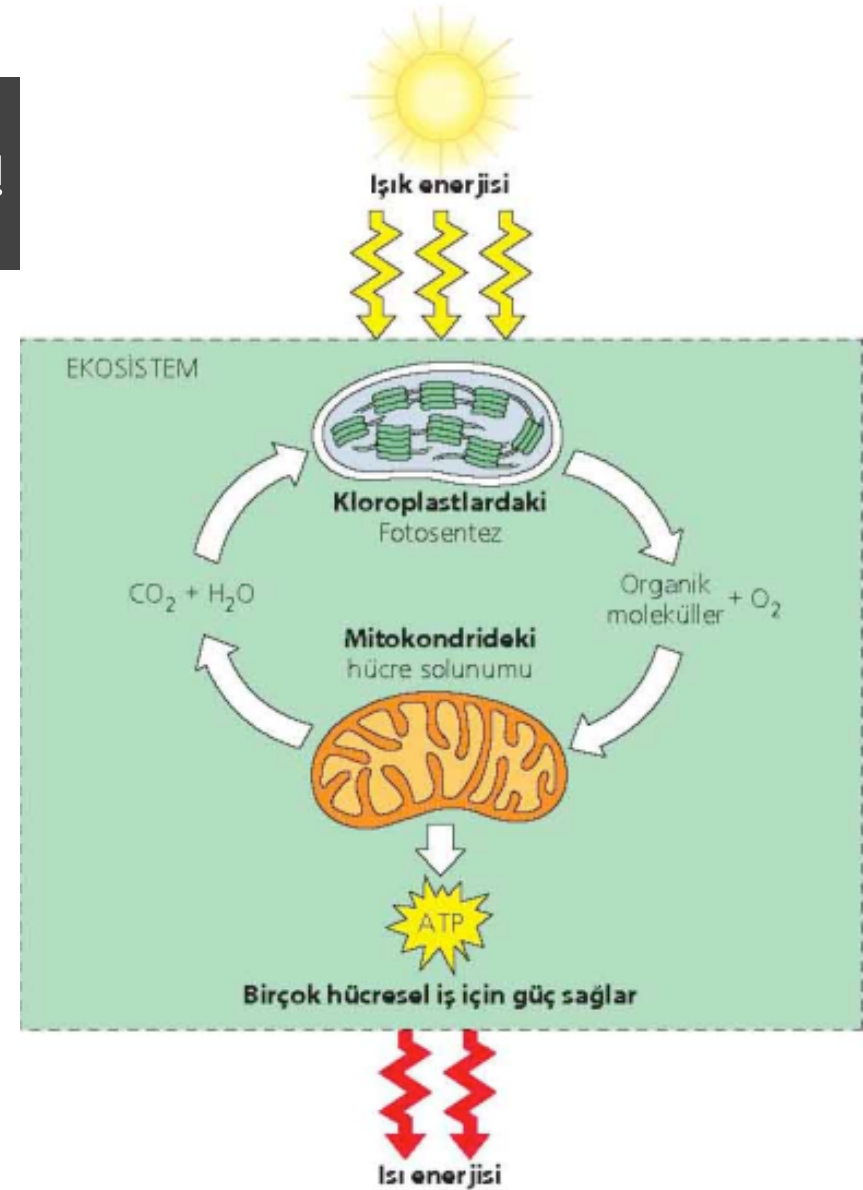


# HÜCRE SOLUNUMU: KİMYASAL ENERJİ ELDESİ



## Güneş: Temel enerji kaynağı !!!

- Güneş ışığı bitkiler ve diğer organizmalar için temel enerji kaynağıdır.



# Katabolik yollar

- Hücreler, enzimler aracılığı ile, potansiyel enerji açısından zengin olan organik moleküllerini sistematik olarak yıkıyorlar ve daha az enerjili basit atık moleküller ortaya çıkarırlar.
- Bu enerjinin bir kısmını iş yapmak için kullanılırken, geri kalanını ısı olarak yayılır.
- Karmaşık organik moleküllerini yıkarak, depolanmış enerjiyi açığa çıkaran metabolik yollara katabolik yollar adı verilir.

# Fermentasyon

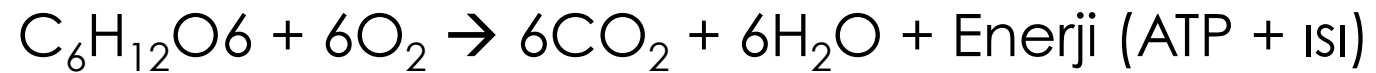
- Katabolik süreçlerden birisidir.
- Oksijen yardımı olmaksızın gerçekteşen kısmi şeker yıkımıdır.

# Hücre solunumu

- En yaygın ve en etkili katabolik yoldur.
- Organik yakıtın yanı sıra oksijen de bir reaktant olarak kullanılır.
- Ökaryotik hücrelerde solunum için gerekli metabolik mekanizma mitokondride yer alır.

## Solunum mekanizmasına genel bakış

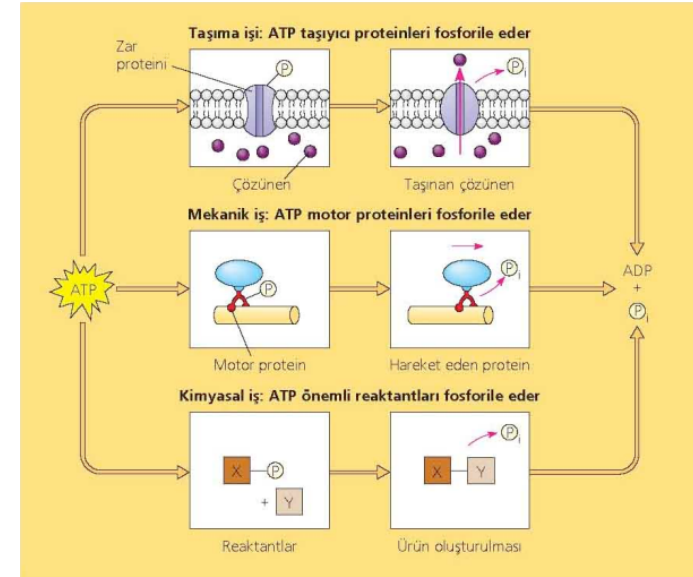
- Karbohidratlar, yağlar ve proteinler yakıt olarak işlenip tüketildikleri halde, hücre solunumu basamaklarını glukozun yıkımını izleyerek öğrenmek gelenek olmuştur.



- Serbest enerji değişimi her glukoz molekülü başına -686 kcl'dir ( $\Delta G = -686 \text{ kcal/mol}$ )

# ATP: Biyoenerjetğin başrol oyuncusu

- ATP molekülü, negatif yük taşıyan ve birbirine yakın konumda bulunan üç adet fosfat grubundan dolayı kararsızdır.
- Enzimler aracılığı ile fosfat gruplarını başka bileşiklere aktararak onları fosforile eder.
- Fosfatlanan molekül, iş yapabilme kapasitesi kazanır.



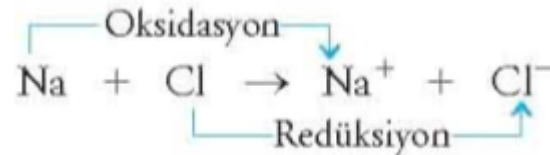
# ATP, yenilenebilen bir kaynaktır!

- İş yapabilmeyi sürdürmek için hücre ADP ve inorganik fosfattan tekrar ATP sentezlemek zorundadır.
- alışan bir kas hcreci saniyede 10 milyon ATP'yi yeniden üretir.
- ATP üretimini anlamak için redoks (oksidasyon ve redüksiyon) tepkimeleri hakkında fikir sahibi olmak gerekir.



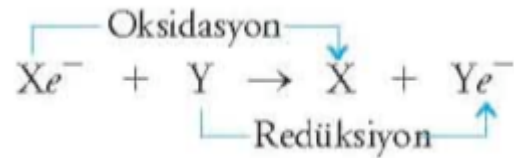
# Redoks tepkimeleri

- Birçok kimyasal tepkimede bir reaktanttan diğerine bir ya da daha çok elektron ( $e^-$ ) aktarılır.
- Bu elektron aktarımı, oksidasyon-redüksiyon tepkimeleri ya da redoks tepkimeleri olarak adlandırılır.
- Bir redoks tepkimesinde bir bileşiğin elektron (ya da hidrojen) kaybetmesine oksidasyon, bir başka bileşiğe elektron (ya da hidrojen) eklenmesine ise redüksiyon adı verilir.



# Genel redoks tepkimesi

- Elektron aktarımı hem bir verici hem de bir alıcı gerektirdiği için oksidasyon ve redüksiyon daima bir arada gerçekleşir.

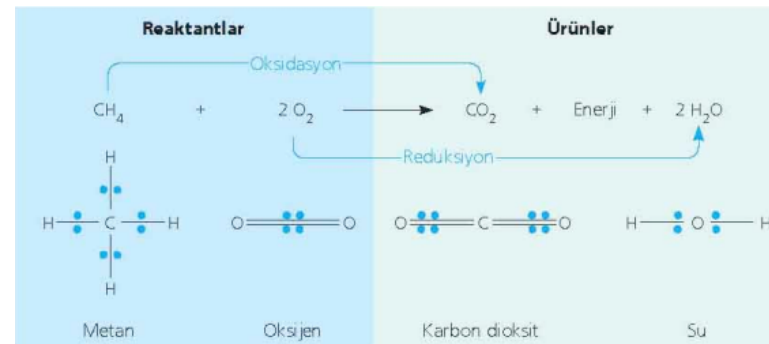


# Elektron paylaşımı

- Bütün redoks tepkimeleri, bir bileşikten diğerine elektronların tümüyle aktarımını içermez.
- Bazı durumlarda, kovalent bağlardaki elektron paylaşımının derecesi değişebilir.

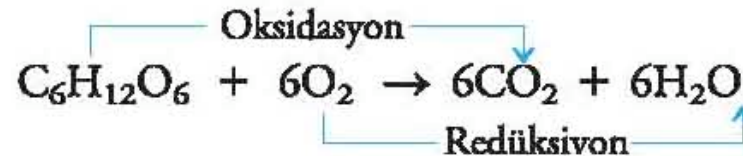
# Elektron paylaşımı

- Aşağıdaki şekilde metan molekülündeki hidrojen atomları, oksijen atomları ile yer değiştirmiştir.
- Oksijen daha elektronegatif olduğu için elektronlar, karondan ziyade oksijene daha yakın konumlanırlar.
- Bu nedenle metan, elektronlarını oksijene doğru yaklaştırma eğiliminden dolayı oksitlenir.



# Elektron paylaşımı

- Aşağıdaki solunum tepkimesinde glukoz molekülü hidrojenlerini kaybetmiştir.
- Her H atomunun bir elektrona sahip olduğu düşünülürse, elektron kaybeden glukozun CO<sub>2</sub>'ye oksitlendiği anlaşılır.
- Tersi bir olay olarak O<sub>2</sub> de hidrojen, yani elektron olarak H<sub>2</sub>O'ya redüklenmiştir.

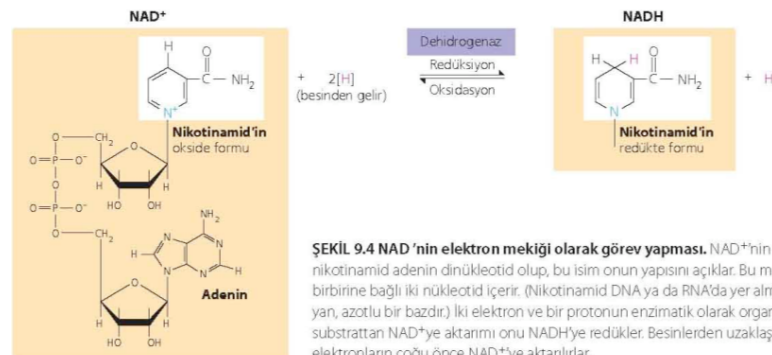
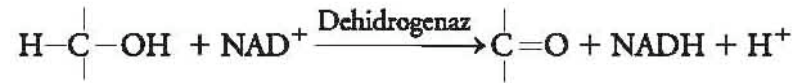


# NAD<sup>+</sup> ve elektron aktarımı

- Enerji, bir tek basamakta serbestlenmez.
- Bunun için hidrojenlerin oksijenlere aktarıldığı ve enzimler tarafından katalizlenen ardışık basamaklar gereklidir.
- Hidrojen atomları glukozdan koparıldıklarında oksijene doğrudan aktarılmazlar.
- Bu hidrojenler genellikle ilk olarak NAD<sup>+</sup> adı verilen bir koenzime verilirler.
- Bu molekül, solunum sırasında oksitleyici ajan gibi davranır.

# NAD<sup>+</sup>'a elektron aktarım mekanizması

- Dehidrogenaz adı verilen enzimler, glukozdan bir çift hidrojen atomu uzaklaştırırlar.
- Enzim, bu iki hidrojenden birini NAD<sup>+</sup>'a verir.
- Diğeri ise H<sup>+</sup> şeklinde çevredeki çözeltiliye bırakılır.



**ŞEKİL 9.4 NAD'nin elektron mekiği olarak görev yapması.** NAD<sup>+</sup>'nin açık adı nikotinamid adenin dinükleotid olup, bu isim onun yapısını açıklar. Bu molekül birbirine bağlı iki nükleotid içerir. (Nikotinamid DNA ya da RNA'da yer almayan, azotlu bir bazdır.) İki elektron ve bir protonun enzimatik olarak organik bir substrattan NAD<sup>+</sup>'ye aktarımı onu NADH'ye redükler. Besinlerden uzaklaştırılan elektronların çoğu önce NAD<sup>+</sup>'ye aktarılırlar.

# NADH, elektronları oksijene nasıl ulaştırır?

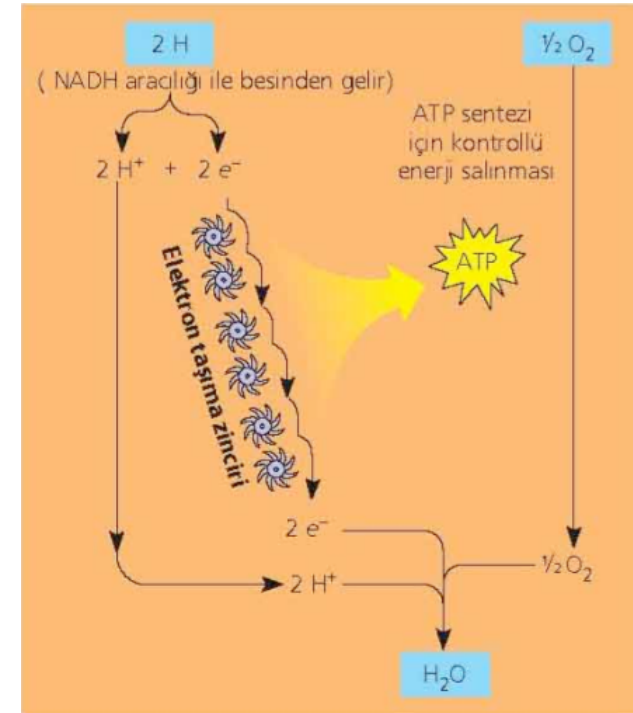
- H<sub>2</sub> ile O<sub>2</sub> doğrudan karıştırılırsa bu gazlar patlama ile birleşerek H<sub>2</sub>O oluştururlar.
- Bu olay kontROLSÜZ bir tepkimedir.





# NADH, elektronları oksijene nasıl ulaştırır?

- Hücre solumu da hidrojen ve oksijeni, su oluşturmak üzere birleştirir.
- Ancak burada oksijen ile tepkimeye giren hidrojen  $H_2$  değil, NADH'tır.
- Ayrıca elektronların oksijene ilerleyişi, çeşitli basamaklara bölünmüştür.
- Bu basamaklara elektron taşıma zinciri adı verilir.



# Elektron taşıma zinciri

- Elektronlar nihai elektron alıcısı olan oksijene ulaşana kadar her basamakta küçük bir miktar enerji kaybederek zincir boyunca bir molekülden diğesine aktarılırlar.
- Zincirdeki her elektron alıcısı, kendisinden bir önceki molekülden daha elektronegatif tir.
- Böylelikle NADH'ın taşıdığı elektronlar kademeli olarak oksijene taşınır.

## Genelleme: Elektronların izlediği yol

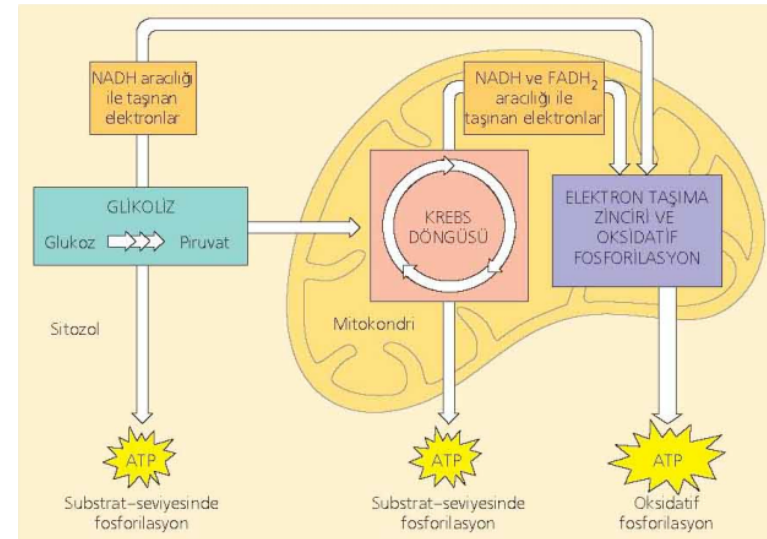
- H¼cre solunumu sırasında elektronların çoğu;

Besin → NADH → Elektron taşıma zinciri → Oksijen

rotasını izleyerek “yokuş aşağı” hareket ederler.

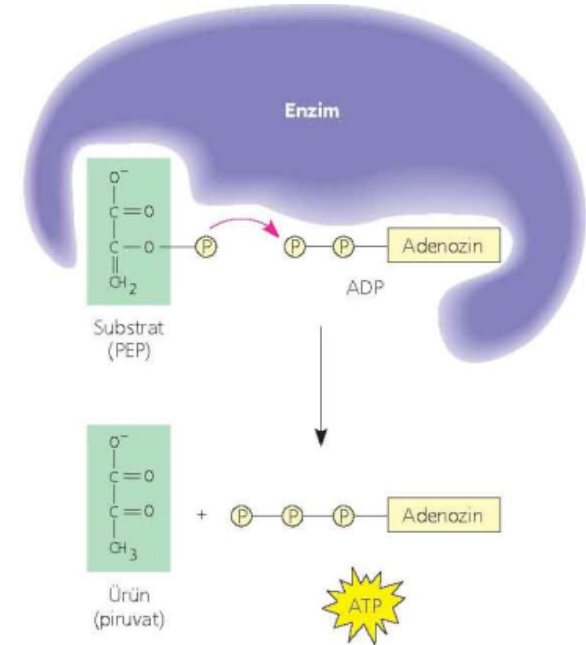
# Hücre solunumunun aşamaları

- Solunumda üç metabolik aşama artarda gerçekleşir:
  - Glikoliz
  - Krebs döngüsü
  - Elektron taşıma zinciri



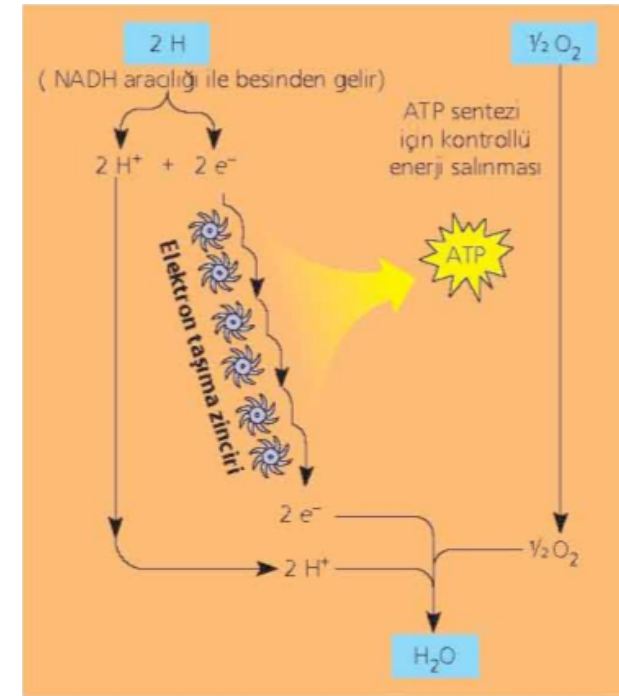
# Fosforilasyon ve ATP sentezi

- Solunum reaksiyonlarının her üç evresinde de fosforilasyon adı verilen tepkimeler yoluyla ATP sentezi gerçekleştirilir.
- Solunumun ilk iki evresinde (glikoliz ve Krebs döngüsü), substrat seviyesinde fosforilasyon gerçekleştirilir.
- Bu mekanizmada bir fosfat grubu enzimatik olarak bir substrat molekülünden ADP'ye aktarılır ve ATP sentezlenmiş olur.



# Oksidatif fosforilasyon

- Solunumun üçüncü basamağı olan elektron taşıma zincirinde ise oksidatif fosforilasyon yoluyla ATP sentezlenir.
- Burada elektronlar zincir boyunca basamaklar halinde ilerlerken, her basamakta açığa çıkan enerji, mitokondrinin ATP yapmak üzere kullanabileceği enerji şeklinde depolanır.

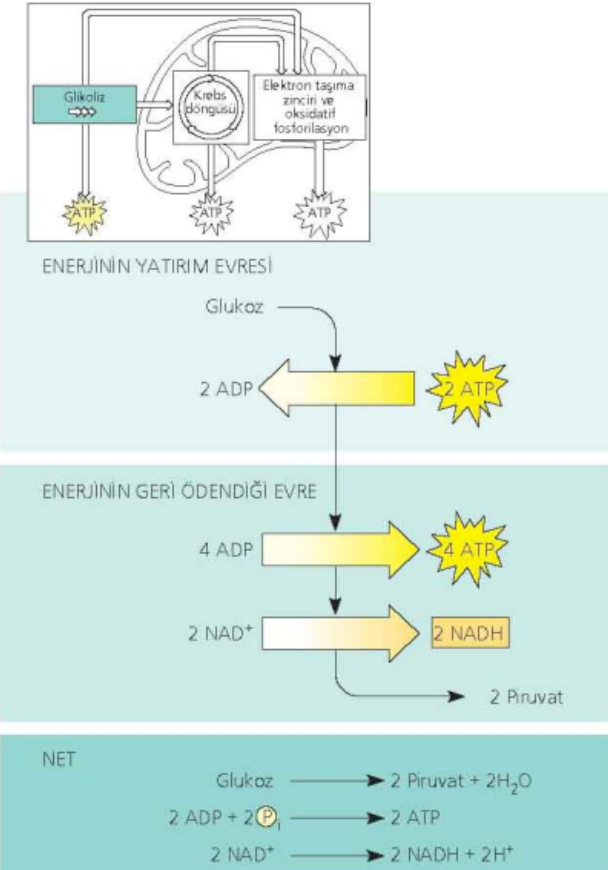


# 1. evre: Glikoliz

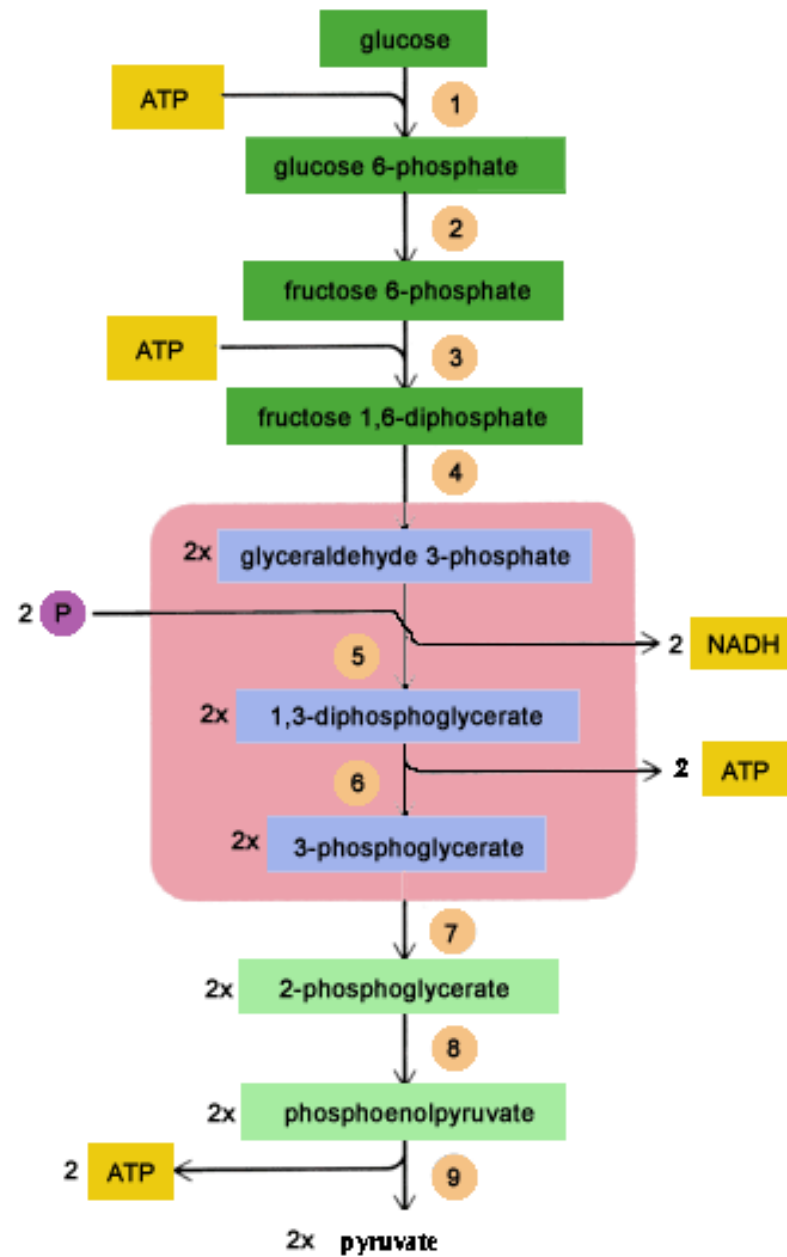
- Glikoliz, şekerin parçalanması anlamına gelir.
- 6 C'lu bir şeker olan glukoz, 3 C'lu iki şekere ykılır.
- 3 C'lu şekerler daha sonra okside edilir ve iki molekül piruvat oluşturulur.

# Glikolizin evreleri

- Glikoliz, her biri özgül enzimler tarafından katalizlenen çeşitli basamaklar içerir.
- Bu basamakları iki evreye ayırabiliriz:
  - Enerjinin yatırımı evresi
  - Enerjinin geri ödendiği evre





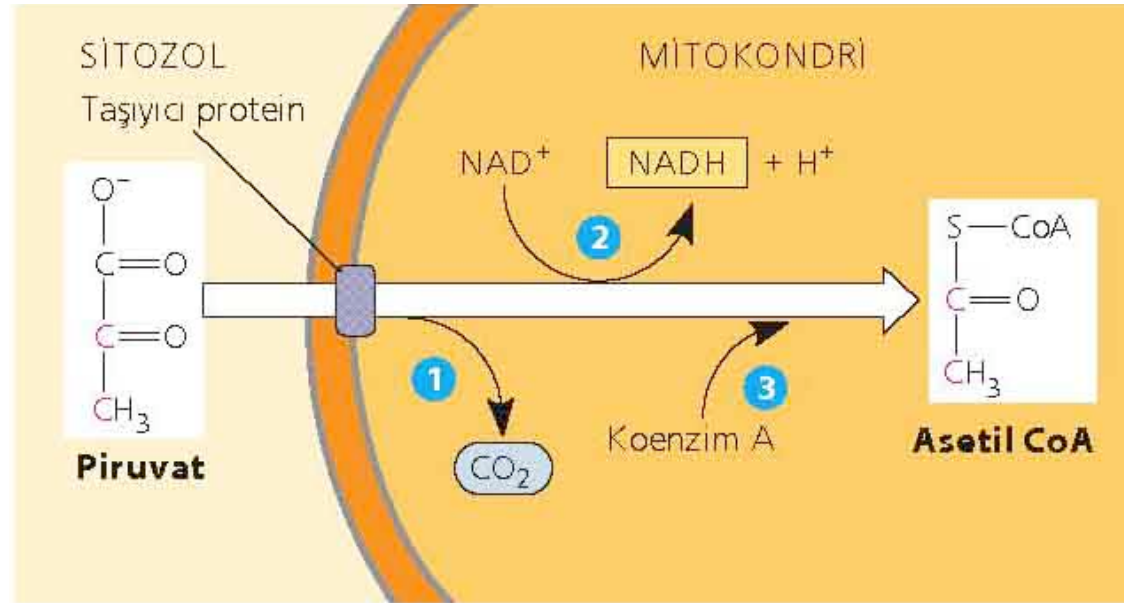


## 2. evre: Krebs dongüsü

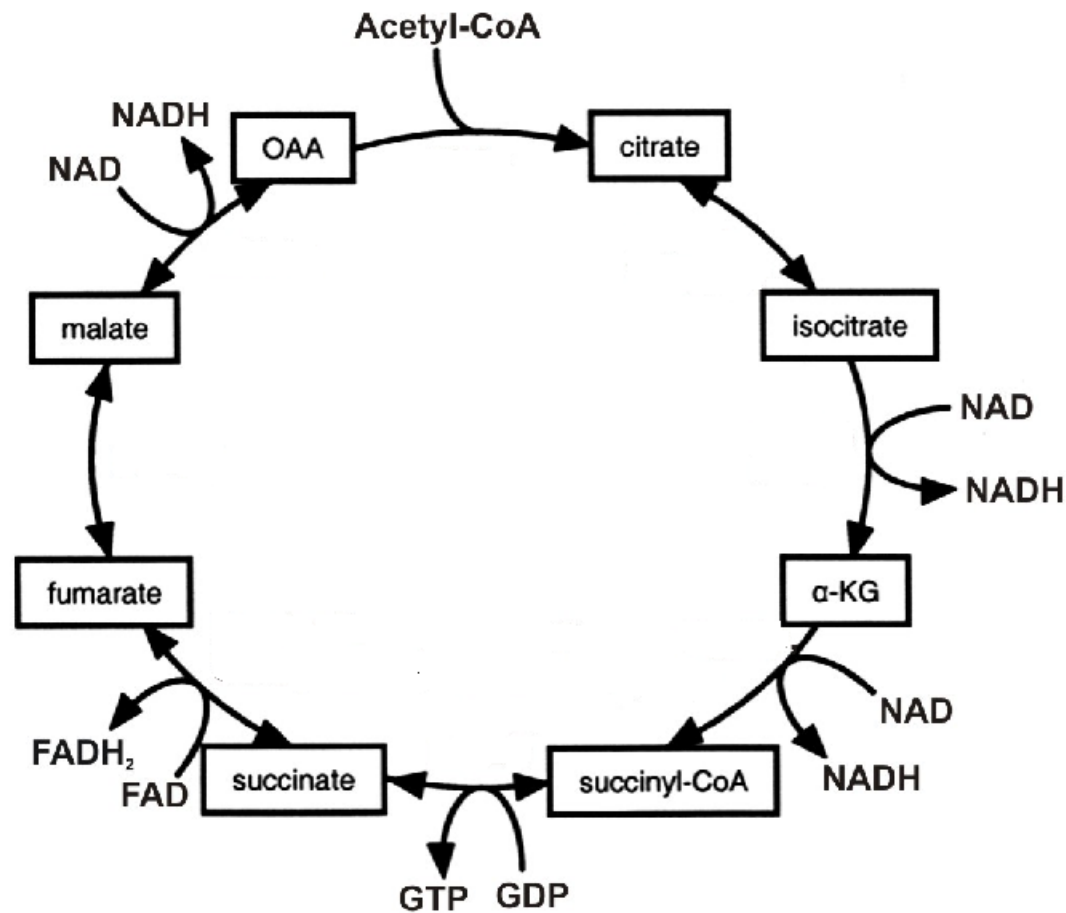
- Glikoliz ile, glukozda depolanmış enerjinin  $\frac{1}{4}$ 'ünden daha az bir kısmı ancak açığa çıkarılabilir.
- Geri kalan kısmı piruvat moleküllerinde kalır.
- Piruvat, mitokondriye girerek Krebs enzimleri tarafından okside edilir.

# Piruvat'ın asetil CoA'ya dönüşümü

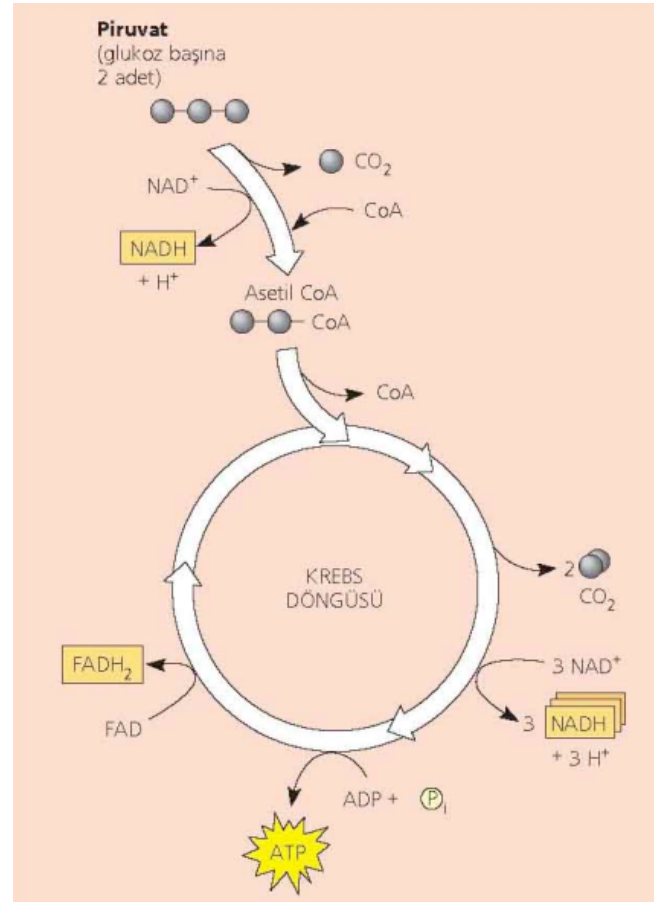
- Mitokondriye giren piruvat ilk önce asetil CoA adlı bileşiğe dönüştürülür.



# Krebs döngüsüne genel bakış

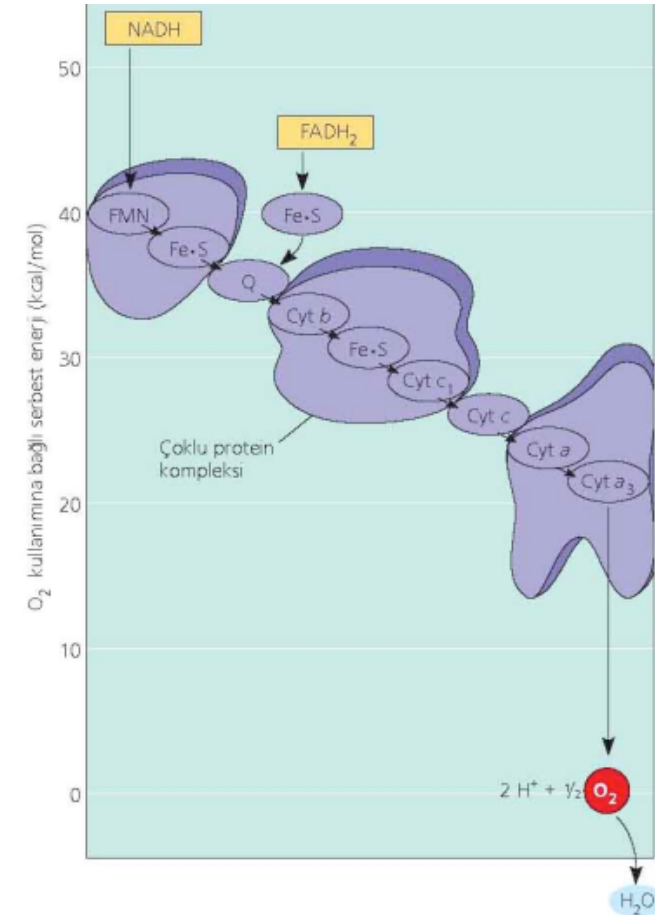


# Krebs döngüsünün özeti



# Elektron taşıma zinciri

- Yandaki şekil elektron taşıma zincirindeki elektron taşıyıcılarının sırasını ve elektronların zincirden aşağı doğru hareketine bağlı olarak serbest enerjideki düşüşü göstermektedir.

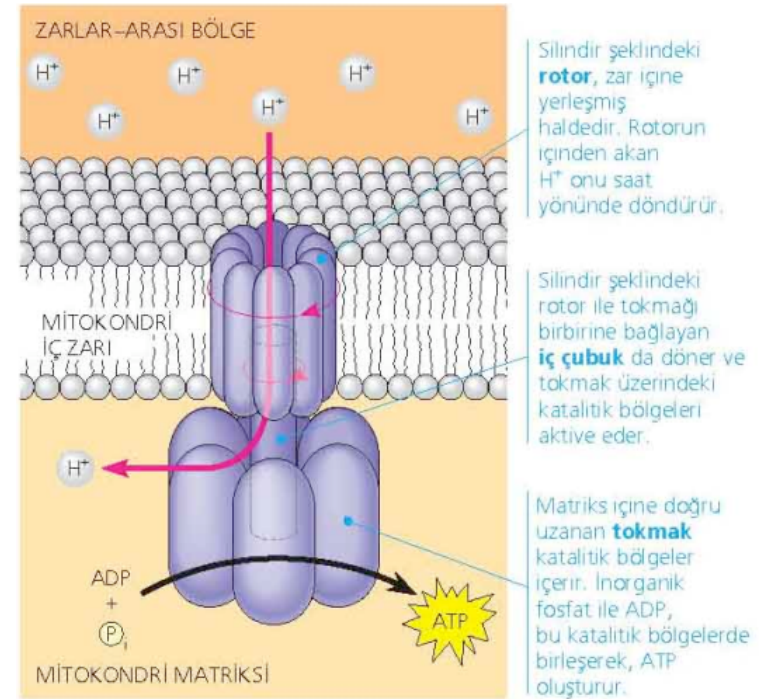


# Elektron taşıma zinciri

- Elektron taşıma zinciri doğrudan ATP üretmez.
- İşlevi, elektronların besinden oksijene düşmesini kolaylaştırmak ve serbest enerjideki büyük düşüşü bir seri küçük basamağa bölerek, kullanılabilir miktarda enerji açığa çıkmasını sağlamaktır.
- Peki ATP nasıl sentezlenir?

# Kemiosmozis: ATP sentez mekanizması

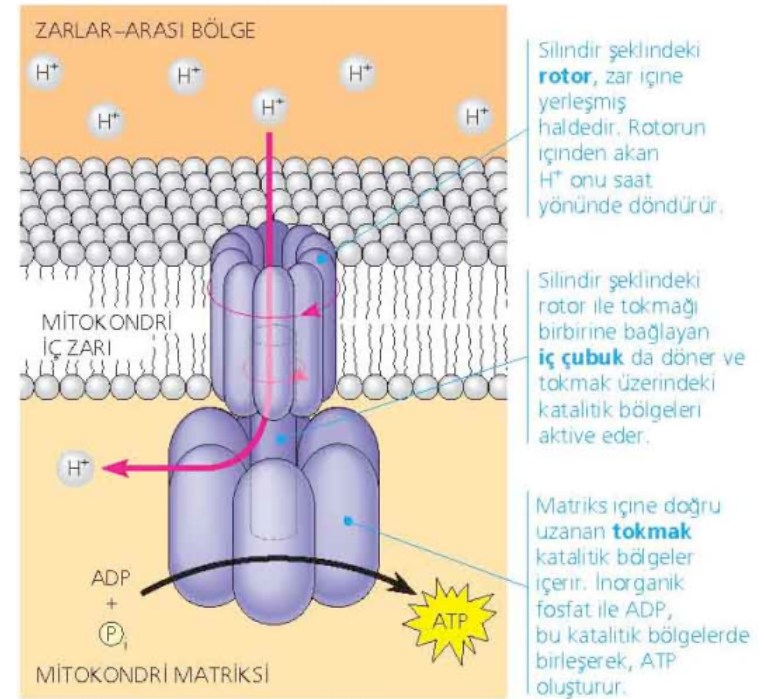
- Mitokondri iç zarında  $ADP + P_i$  = ATP işlemini gerçekleştiren ATP sentaz enzimi mevcuttur.
- Elektron taşıma zinciri sonucunda açığa çıkan  $H^+$  iyonları, mitokondri iç zarı ile dış zarı arasındaki bölmeye pompalanır.



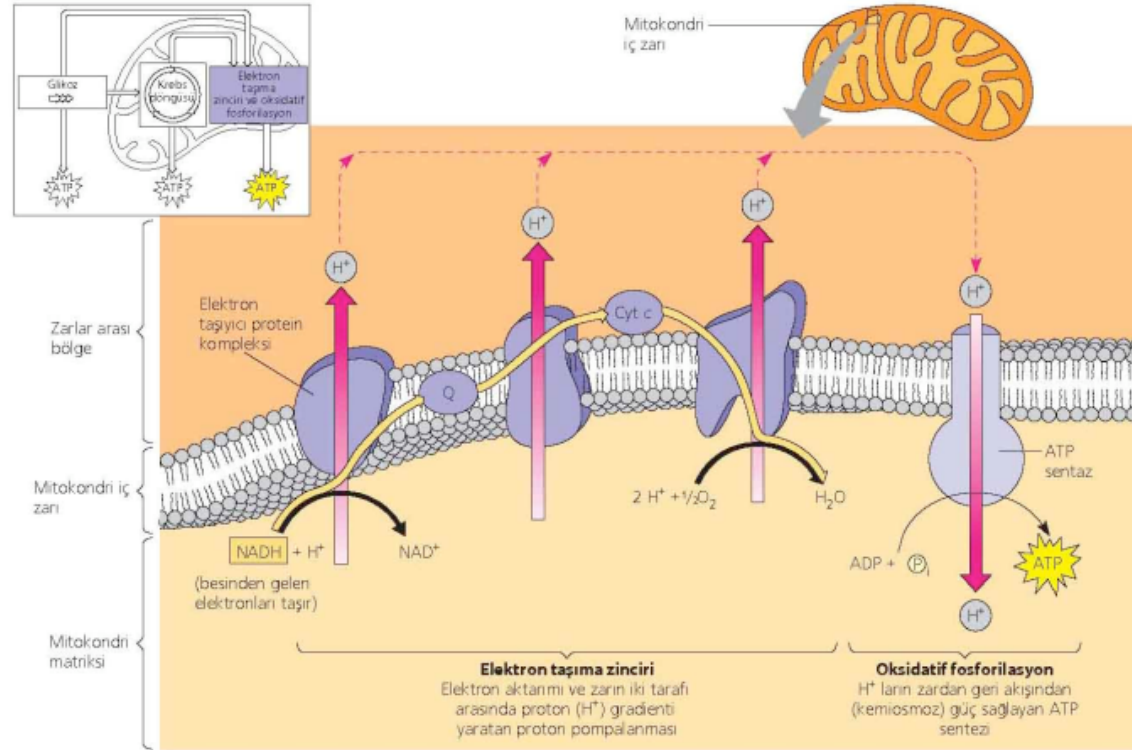


# Kemiosmozis: ATP sentez mekanizması

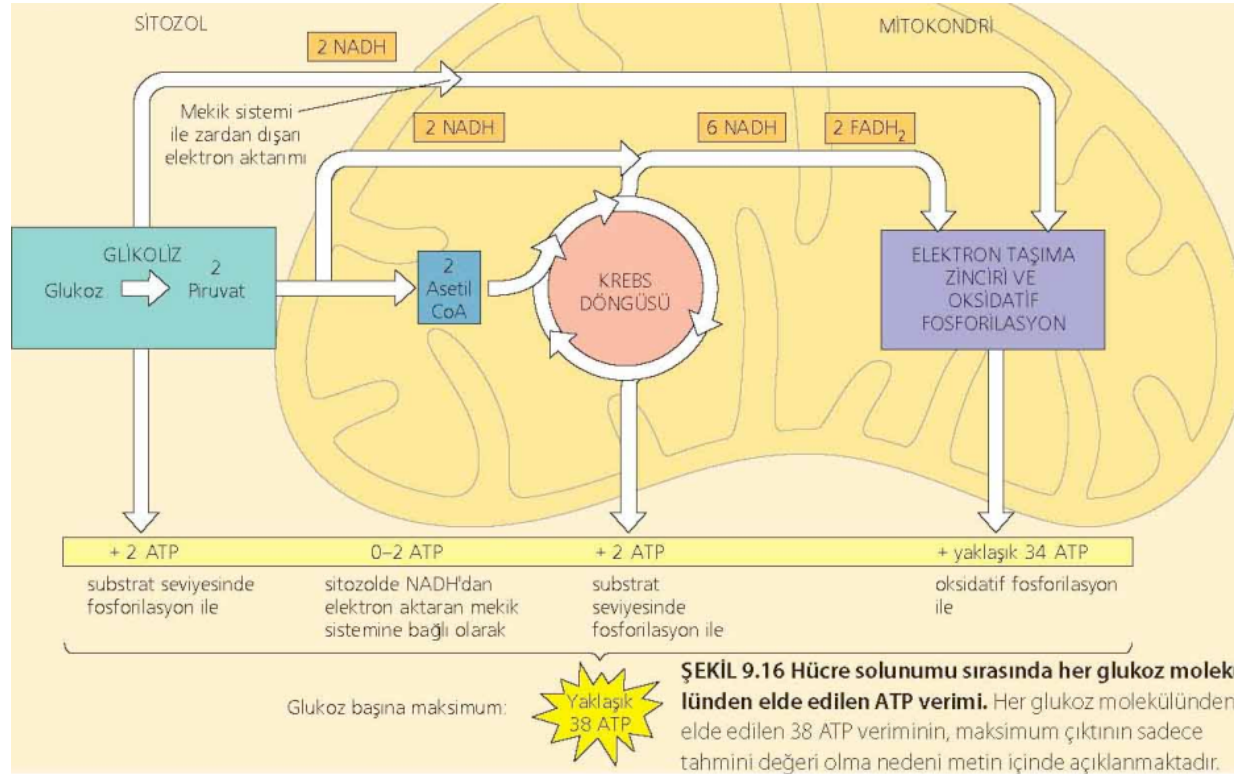
- Mitokondri zarları arasında derişimi artan  $H^+$  iyonları, ATP sentez bulunan kısımlardan tekrar mitokondri matriksine sızar.
- Bu sırada ATP sentez, kanaldan geçen iyon akışını, ADP'nin oksidatif fosforilasyonu için kullanır.
- Böylelikle ATP sentezi gerçekleştirilir.
- Bu tip ATP sentez mekanizmasına kemiosmoz adı verilir.



# ETS ve kemiosmozise genel bakış (tekrar)



# Solunumda elde edilen ATP verimi



# Oksijensiz solunum

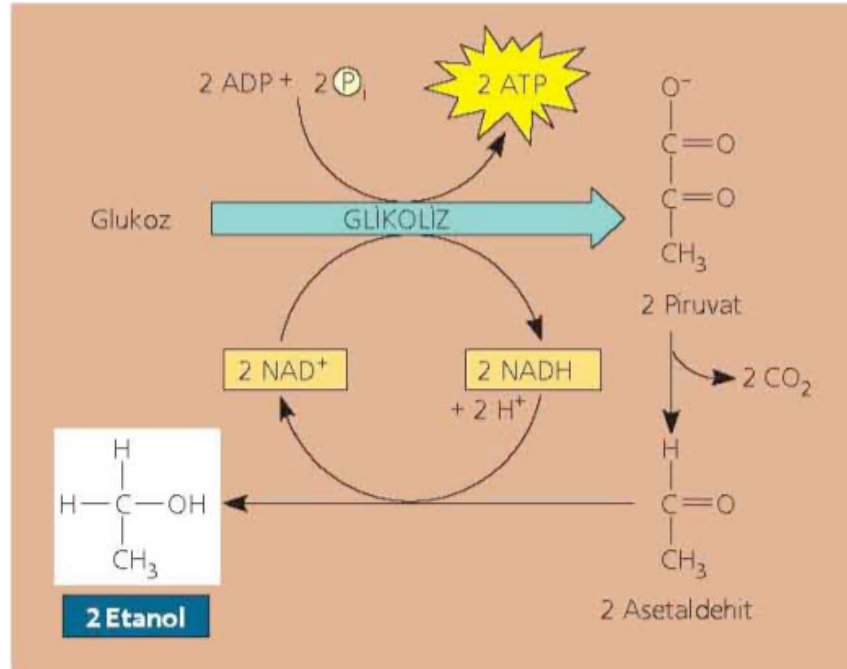
- Hatırlanacağı üzere glikoliz sonunda glukoz, iki molekül piruvata oksitlenir.
- Eğer ortamda oksijen varsa glukozdan kopan elektronlar NAD<sup>+</sup> sayesinde elektron taşıma zincirine taşınır ve oksidatif fosforilasyon ile ATP sentezlenir.
- Ancak oksijen yok ise, süreç fermantasyon ile devam eder.

# Fermentasyon

- Glikoliz ile elektronların NADH'dan piruvata ya da piruvat türevlerine aktarılmasıyla yeniden NADH<sup>+</sup> üreten tepkimeleri kapsar.
- NAD<sup>+</sup>, glikoliz için tekrar kullanılır.
- Piruvattan oluşturulan son ürünler açısından iki çeşit fermantasyon tipi mevcuttur.

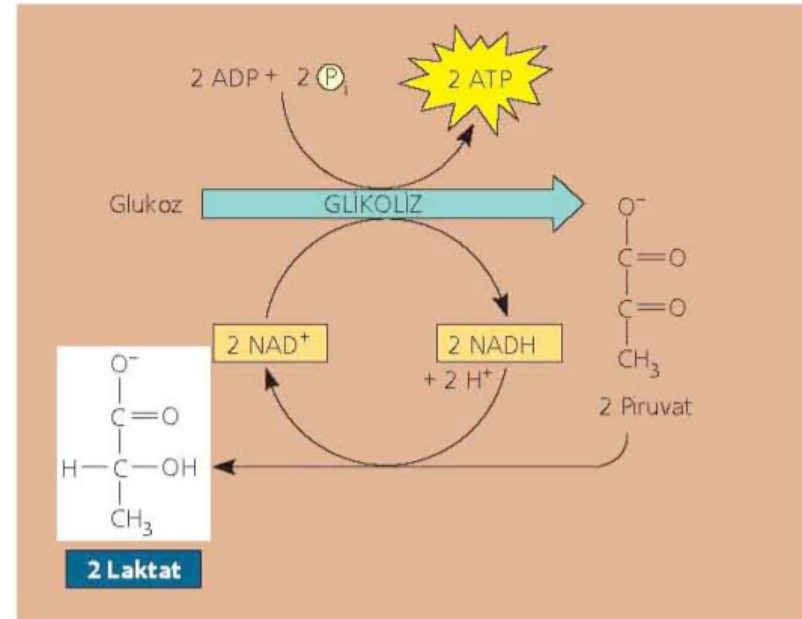
# Alkolik fermentasyon

- Birçok bakteri anaerobik koşullarda alkolik fermantasyon yapar.



# Laktik asit fermentasyonu

- Bazı fungus ve bakteriler tarafından gerçekleştirilir.
- Süt endüstrisinde peynir ve yoğurt yapımı için kullanılır.
- Ticari önemi olan mikrobiyal fermentasyonlar ile aseton ve metanol üretilir.



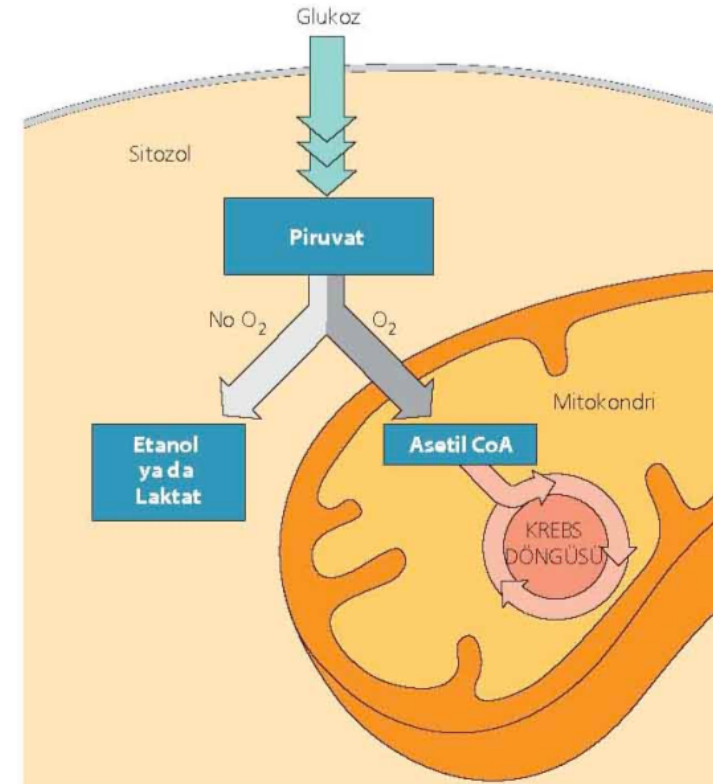
# Laktik asit fermentasyonu

- İnsan kas h¼creleri O<sub>2</sub> eksikliğinde laktik asit fermantasyonu ile ATP üretir.
- Böylelikle acil enerji ihtiyacı karşılanmış olur.
- Son ürün olan laktatın kasta birikmesi yorgunluk ve ağrıya neden olur.
- Laktat kan ile karaciğere taşınır ve tekrar piruvata dönüştürülür.



# Fakültatif anaeroblar

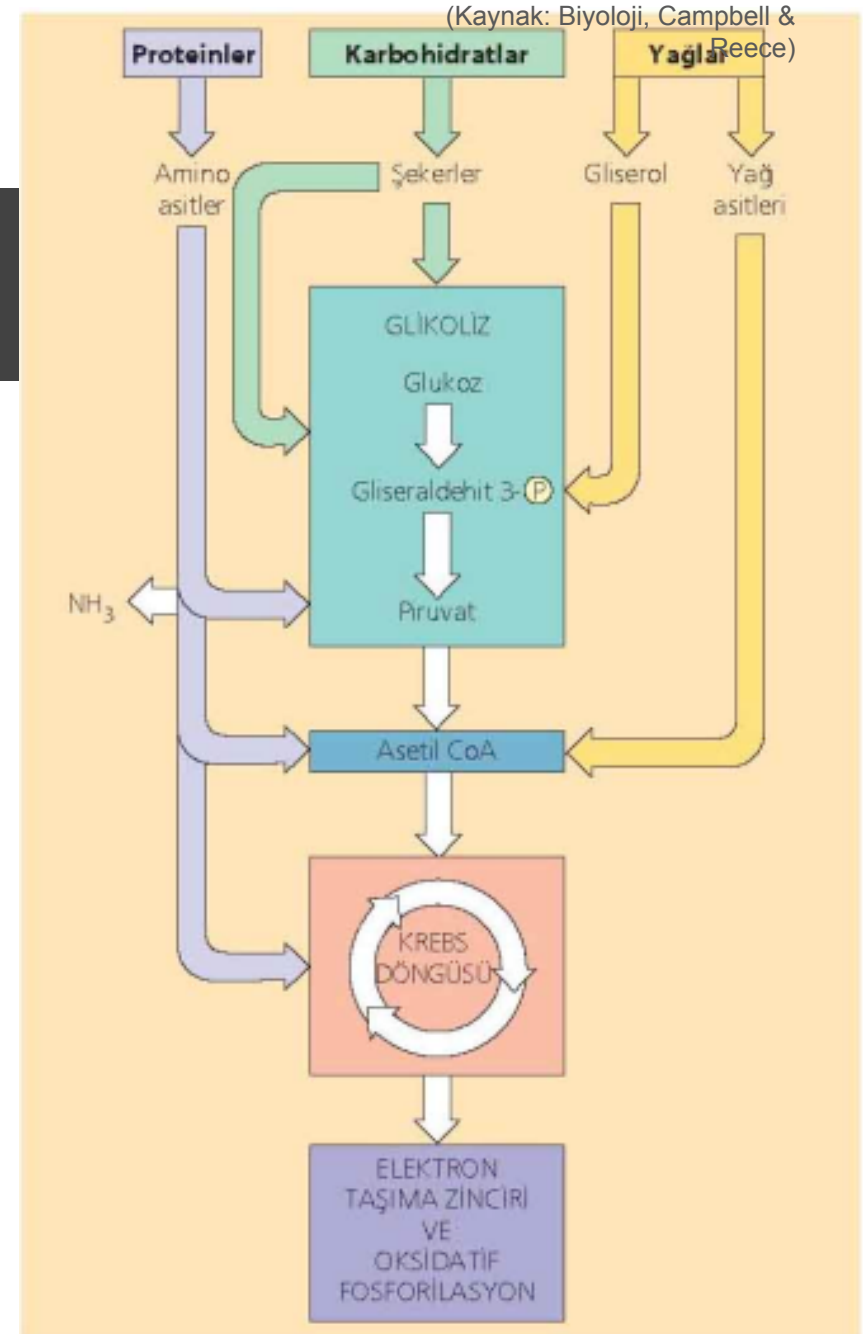
- Maya ve birçok bakteri, solunum ya da fermantasyondan herhangi birini kullanarak, hayatta kalmaya yetecek kadar ATP üretir.
- Bu türlere fakültatif anaeroblar adı verilir.
- İnsan kas hücreleri de ortamda  $O_2$  bulunup bulunmamasına göre iki farklı rota izleyebilir.



# Glikolizin evrimsel önemi

- Bilinen en eski bakteri fosilleri 3.5 milyar yıl öncesine aittir.
- Ancak dünyada yeterli oksijenin birikmeye başlaması 2.7 milyar yıl öncesine dayanmaktadır.
- Dolayısıyla, ilk prokaryotlar ATP üretimini oksijen gerektirmeyen glikoliz ile yapmış olabilirler.
- Ayrıca glikoliz, tüm canlıları kapsayan evrensel bir yoldur.
- Dolayısı ile bu durum, glikolizin canlılık tarihinin çok erken döneminde evrimleştiğini gösterir.

## Diğer organik moleküllerin oksidatif yıkımı

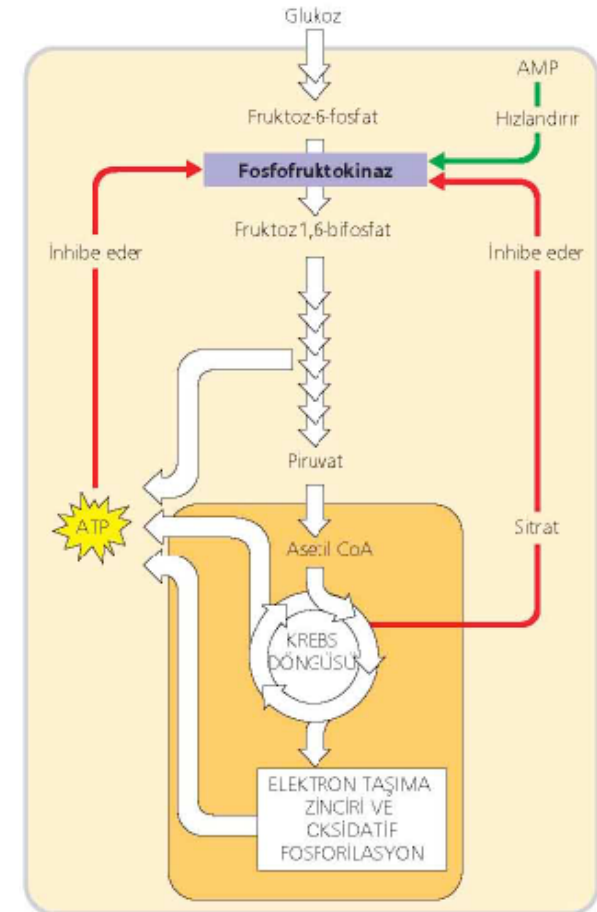


# Biyosentez

- Hücre, enerjiye gereksinim duyduğu gibi, maddeye de ihtiyaç duyar.
- Besinlerdeki organik moleküllerin tümü ATP üretiminde yakıt olarak okside edilmez.
- Elde edilen kaloriye ek olarak, hücrelerin kendi moleküllerini yapabilmek için gereksindikleri karbon iskeletlerini de sağlamak zorundadırlar.
- Örneğin; besinlerdeki proteinlerin hidrolizi ile açığa çıkan aminoasitler, organizmanın kendi proteinine katılabilir.

# Solunumun geri beslemeli kontrolü

- Hücre, belirli bir bileşiği, gereksinim duyduğu miktardan daha fazla yapmaz ve enerjiyi ziyan etmez.
- Örneğin; belirli bir aminoasit açısından doygunluk söz konusu ise, bu aminoasiti Krebs döngüsü ara ürününden sentezleyen yol durdurulur.
- Bu kontrol, geri beslemeli inhibisyon yardımıyla yapılır.



# Solunumun geri beslemeli kontrolü

- Diğer yandan, hücre yoğun bir çalışma içinde ise ATP üretiminin artırılması için solunum hızlanır.
- Buradaki kontrol, glikolizin 3. basamağını katalizleyen fosfofruktokinaz ile sağlanır.
- Bu enzim, Krebs döngüsünün ilk ürünü olan sitrat'a duyarlıdır.

