

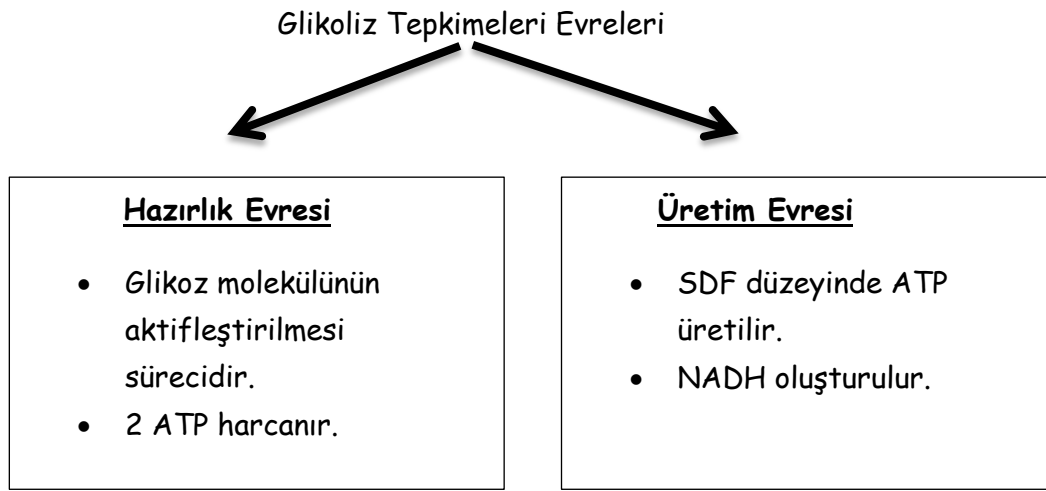
# HÜCRESEL SOLUNUM

- Solunum bütün canlı hücrelerde görülen katabolik(yıkım) bir olaydır.
- Solunum olayının amacı enerji üretmektir.
- Tüm canlı hücreler, enerji gerektiren hayatsal olaylarında kullanacakları ATP enerjisini besinlerin yapısındaki kimyasal bağ enerjisinden hücresel solunumla elde ederler.
- Karbonhidratlar, yağlar ve proteinler hücresel solunumda substrat olarak kullanılırlar. Ancak bunların solunuma katılabilmeleri için önce yapıtaşlarına parçalanmaları gerekir.
- Solunum sistemli bir yanma olayıdır. Buna biyolojik yanma veya biyolojik oksidasyon denir.
- Hücresel solunum glikozun oksidasyonu ile gerçekleşir. (Bir atom ya da molekülün elektron kaybetmesi oksidasyon (yükseltgenme), elektron alması ise redüksiyon (indirgenme) )
- Tüm canlılarda tüm solunum şekillerinde glikoz molekülünü solunum reaksiyonlarına sokabilmek için (aktifleştirmek için) 2 ATP harcanır.
- Tüm solunum şekillerinde glikoz molekülünden başlamak üzere 2 pürvik aside kadar olan reaksiyonlar serisine GLİKOLİZ denir.
- Glikolizde görev yapan enzimler ve bu enzimlerin sentezinden sorumlu genler, tüm canlılarda ortaktır.

NOT: Solunum olayı canlıda ağırlık azalmasına neden olur.

## GLİKOLİZ EVRESİ

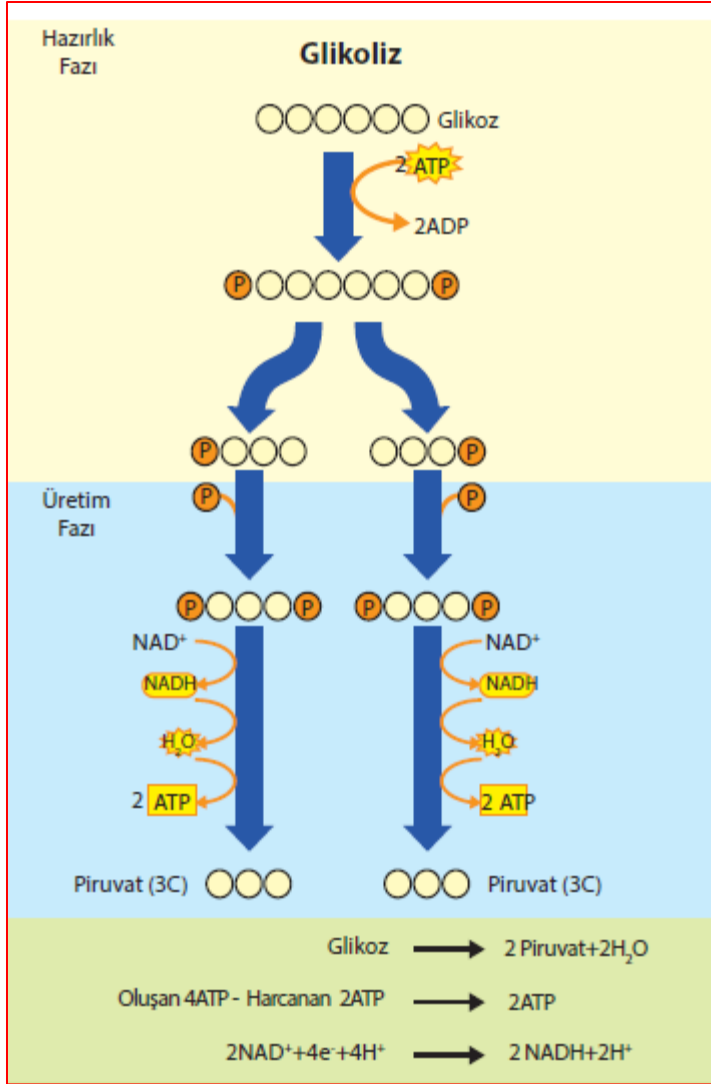
- Glikoliz tüm canlı hücrelerde gerçekleşir.
- Enzimatiktir.
- Sitoplazmada gerçekleşir. Özel bir organel gerekmez.
- Glikozdan 2 pürivik aside kadar olan reaksiyonları içerir.
- Tüm canlılarda glikolizin genleri, enzimleri, reaksiyonları ortaktır.



### NOT:

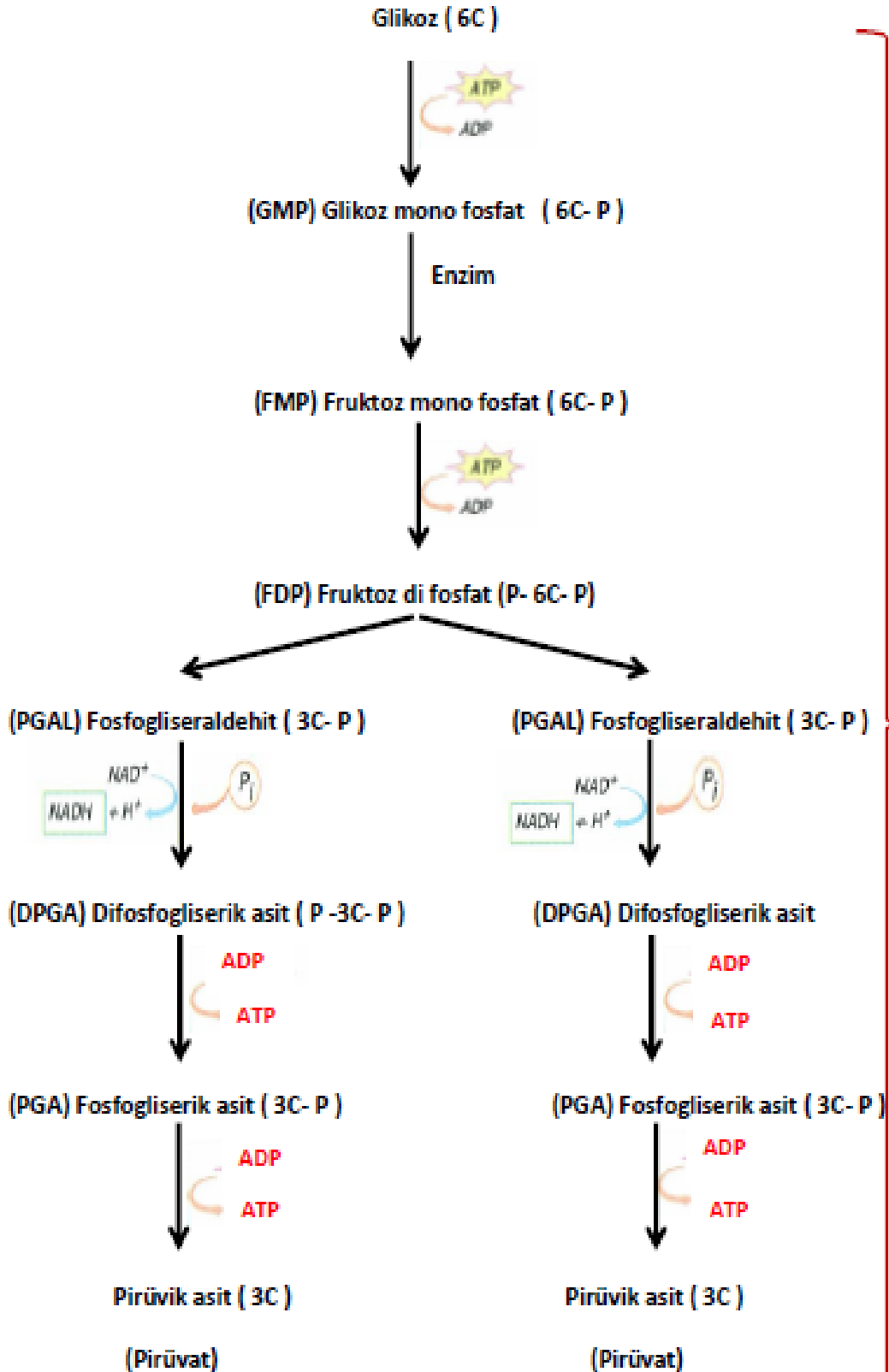
#### NAD (nikotinamid adenin dinükleotit):

- Enerji metabolizmasında bulunan elektron taşıyıcı bir koenzimdir.
- Yükseltgenmiş durumda  $\text{NAD}^+$  formunda olan moleküle iki elektron ve bir proton ( $\text{H}^+$ ) bağlandığında indirgenmiş olur ve NADH oluşur.
- Bu olay enerji aktarımının geri dönüşümlü olarak gerçekleştiği bir türüdür.



HAZIRLIK VE ÜRETİM  
FAZI GÖSTERİMİ

- Glikoliz ile glikozun yapısında bulunan kimyasal enerjinin sadece küçük bir bölümü açığa çıkar. Enerjinin büyük bölümü son ürün olan piruvatın yapısında kalır.



## GLİKOLİZ

\*Sitoplazmada gerçekleşti.

\*Substrat düzeyinde fosforilasyon gerçekleşti.

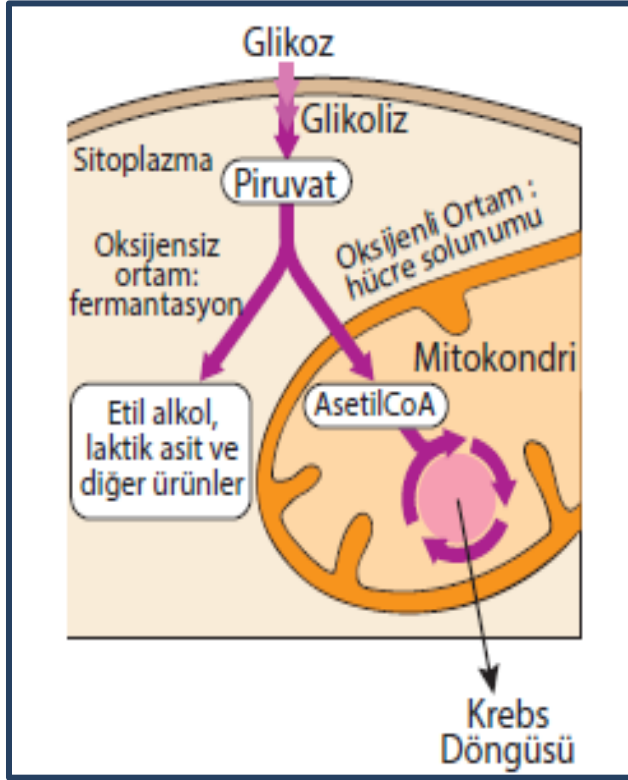
\*4 ATP sentezlendi.

\*2 ATP Glikozu aktifleştirmek için kullanıldı.

\*Net 2 ATP kazanç var.

\* 2 NADH<sub>2</sub> oluştu. NAD koenzimi indirgendi.

\*2 Pirüvat oluştu.



- Solunum olayları glikoliz evresinden sonra oksijenli veya oksijensiz olarak devam eder. Eğer pirüvat oluşumundan sonra ortama oksijen gelirse oksijenli solunum, oksijen olmaz ise oksijensiz solunum meydana gelir.

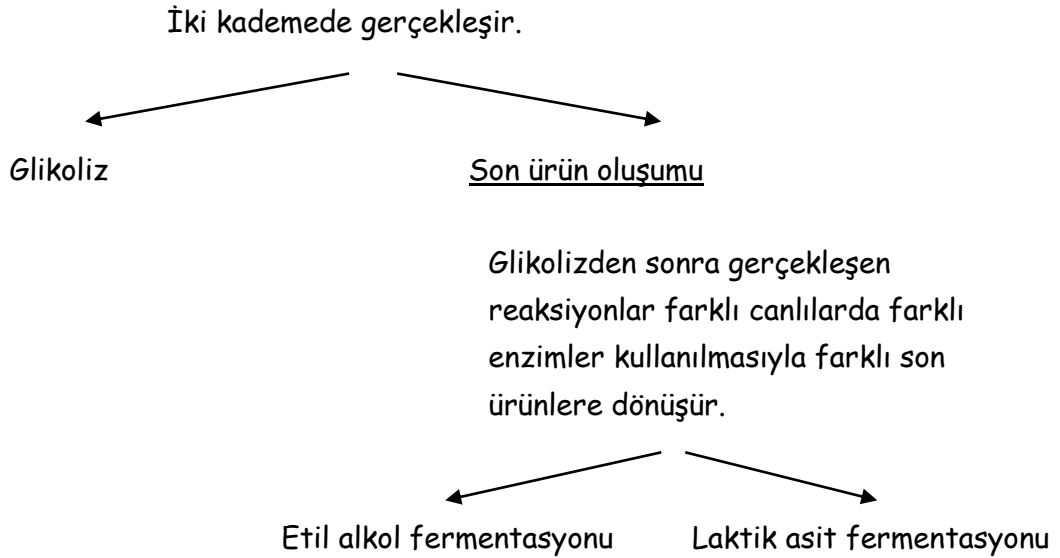
## **OKSİJENSİZ SOLUNUM ( Fermentasyon = Anaerobik Solunum = Mayalanma )**

- Bazı bakteriler, maya mantarları, omurgalıların çizgili kas hücreleri ve tohumlar piruvatı bir dizi tepkimelerle etil alkole veya laktik aside dönüştürürler. Bu işleme **fermantasyon** adı verilir.
- Hücrenin sitoplazmasında görülür.
- Özel bir organel gerekmez.
- Evrimleşmede oksijenli solunumdan önce ortaya çıkmıştır.

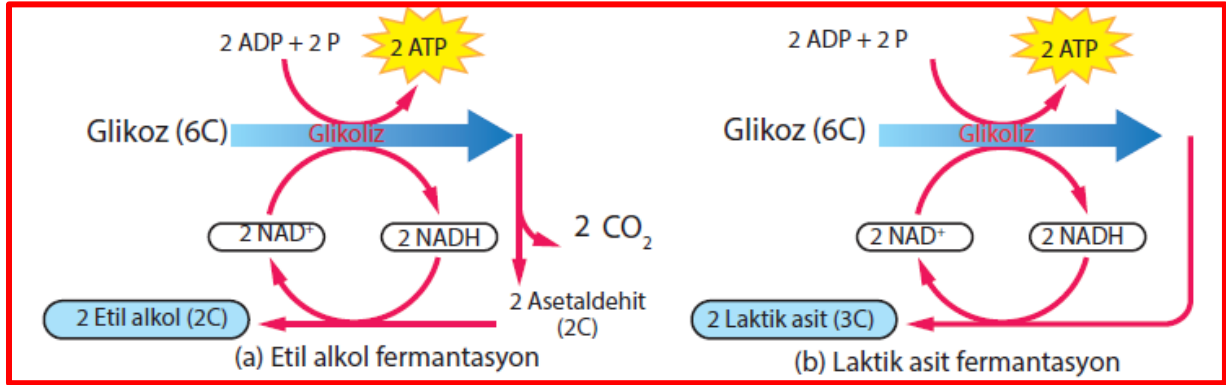
- Oksijen kullanılmaz, yani besin moleküllerinden koparılan elektronlar oksijen dışında bir moleküle aktarılır.
- Bazılarında ETS görev yapmaz. Bunlar etil alkol ve laktik asit fermentasyonlarıdır.
- Ancak ETS kullanılan oksijensiz solunum tipleri de vardır.
- Sadece substrat düzeyinde ATP üretimi yapılır.(Glikoliz evresinde)
- Kullanılan hammadde tam olarak parçalanamadığı için az enerji üretimi olur.
- Ortamdaki glikoz miktarı, sıcaklık ve son ürünler fermentasyon hızını etkileyebilir.

## ETS KULLANILMAYAN OKSİJENSİZ SOLUNUM TIPLERİ

Bakterilerde, mantarlarda, bitki tohumlarında ve bağırsak solucanları gibi oksijensiz ortamda yaşayan bazı hayvanlarda görülür. Hayvanların iskelet kası hücreleri de oksijen yetersizliğinde fermentasyonla enerji elde eder.



- Yıkılan substrat (glikoz) tam olarak  $CO_2$  ve  $H_2O$ 'ya kadar parçalanmaz. Bu nedenle substrattaki enerjinin çoğu yine organik olabilen son ürünlerde saklı kalır. Bu nedenle oksijenli solunuma göre daha az ATP açığa çıkar.



SORU:

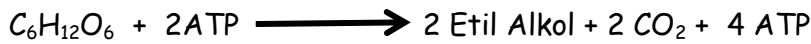
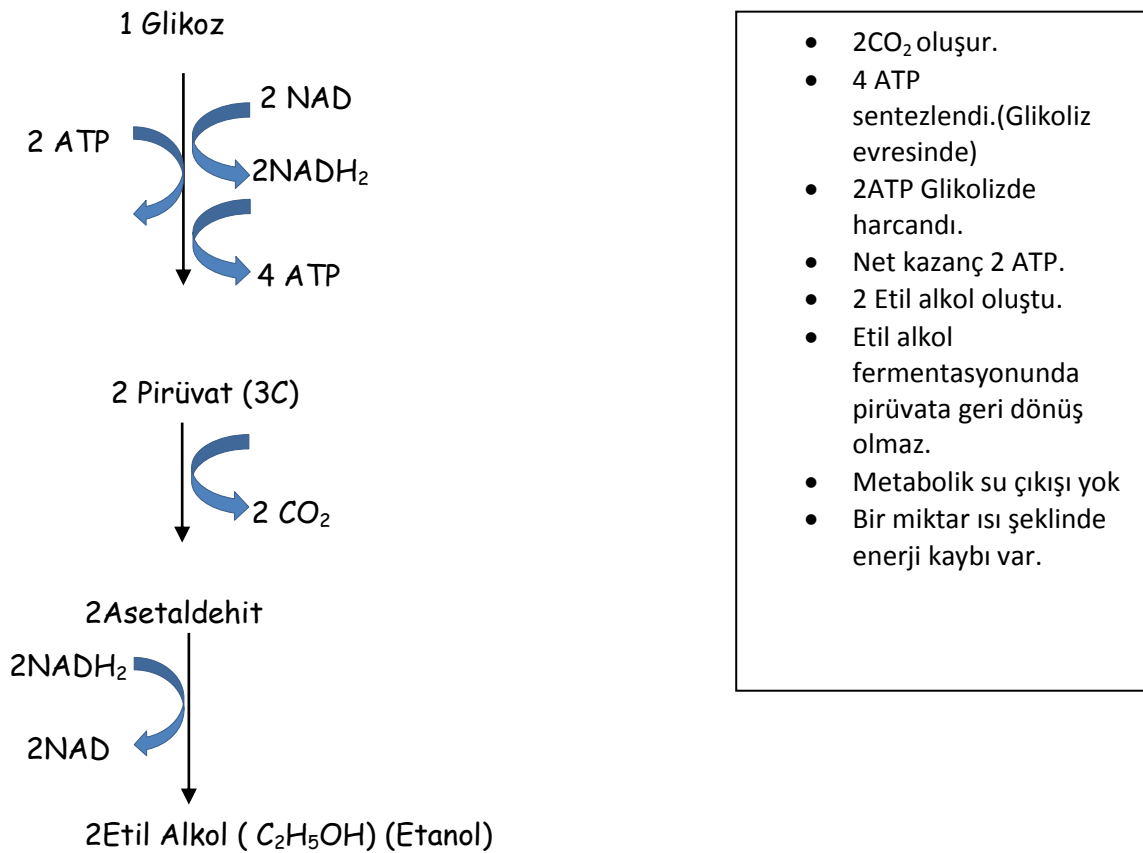
- I.  $O_2$ 'siz solunum
- II.  $O_2$ 'li solunum
- III. Fotosentez

*Yanda verilen olayların son ürünlerinde kalan enerji miktarı çoktan aza doğru nasıl sıralanabilir?*

Cevap: 3 > 1 > 2

## 1. ETİL ALKOL FERMENTASYONU :

- Bira mayası (*Saccharomyces cerevisiae*), maya mantarı , şarap bakterilerinde, alg ve protistalarda görülür.
- Fermantasyon esnasında oluşan  $CO_2$  hamurun kabarmasını sağlar.
- Alkolik fermantasyonda en çok kullanılan mikroorganizma grubu mayalardır. Oksijen varlığında oksijenli solunum yapan mayalar, oksijen yokluğunda fermantasyonla enerji elde ederler.



- Etil alkol fermantasyonu yapan bakterilerin bulunduğu ortamda alkol konsantrasyonu % 12 i geçerse bakteriler için zehir etkisi yapar.
- Etil alkol oksitlenirse Asetik asit oluşur. Buna Asetik asit fermantasyonu denir.

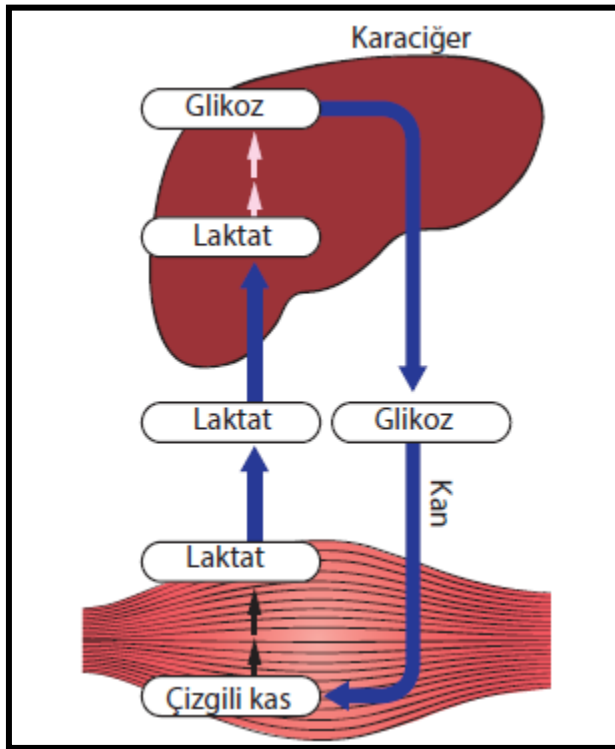


Asetik asit



## 2. LAKTİK ASİT FERMENTASYONU:

- Sütün yoğurda dönüşümünde görev yapan bazı bakterilerde ve mantarlarda görülür. Örneğin Yoğurt, sütün özel koşullar altında *Streptococcus thermophilus* ve *Lactobacillus bulgaricus*'un fermantasyonuyla elde edilen bir üründür.
- Memeli hayvanların çizgili kas hücrelerinde oksijen yetmezliği durumunda gerçekleşir. Kaslarda biriken Laktik asit kana karışarak beyindeki uyku merkezini uyarır ve insanda yorgunluk hissi oluşturur. Aşırı birikmesi kaslarda kramp olayına neden olur.
- Atlarda laktik asit üretimi olmadığı için yorgunluk hissi oluşmaz.

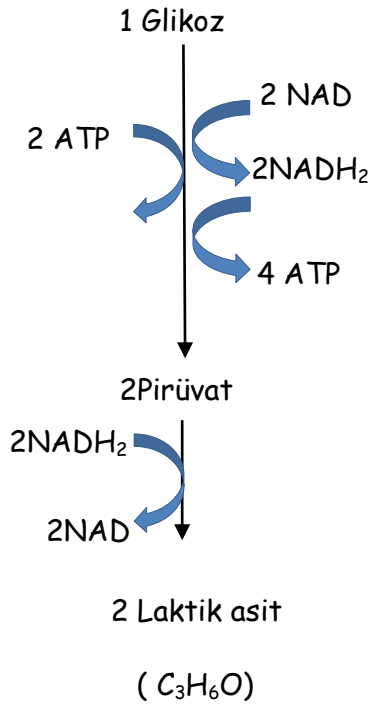


- Biriken laktik asit;

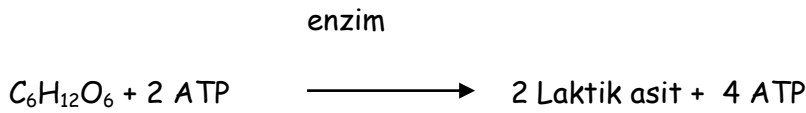
-Bir kısmı kasa yeterli oksijen geldiğinde tekrar pirüvik asite çevrilir ve oksijenli solunuma sokulur.

-Kaslarda oluşan laktik asit kan yoluyla karaciğer ve kalp gibi organlara taşınır. Karaciğerde piruvat ve glikoza dönüştürülebilir. Glikojen olarak depolanır.

- Laktik asit ve laktat birbirlerinden bir hidrojen farklıdır. Bu farklılık fizyolojik pH'da laktik asitin iyonlaşarak laktata dönüşmesinden kaynaklanır.



- Dinlenme halinde kasa gelen yeterli miktarda oksijen varlığında laktik asitler tekrar pirüvata dönüştürülür ve oksijenli solunum başlatılır.
- **CO<sub>2</sub> çıkışı olmaz.**
- 4 ATP sentezlendi(Glikoliz evresinde).
- 2 ATP glikolizde harlandı.
- Net kazanç 2 ATP.
- 2 laktik asit oluşur.
- Metabolik su oluşmaz.



NOT:Kandaki Laktik asit seviyesi eşik değerinin üzerine çıkar ise idrarda laktik asite rastlanır.

NOT:Memeli alyuvarları olgunlaşırken çekirdeklerini ve diğer organellerini kaybederler.Olgun alyuvarlar, mitokondrileri olmadığı için enerji ihtiyaçlarını glikolizden sağlarlar ve bunu laktik asit fermentasyonu izler. Ribozomları olmadığı için glikoliz için gerekli enzimleri sentezleyemezler. Bu nedenle kan dolaşımında ömürleri sınırlıdır. Böylece makrofajlar tarafından yok edilirler.

NOT: Karaciğer ve kalp hücreleri laktatı kolaylıkla içlerine alıp onu pirüvata çevirirler. Sonrada krebs ile metabolize ederler.

NOT: Kanser hücrelerinin çoğunluğu enerjilerini laktik asit fermentasyonu yoluyla karşılar.

NOT: Derin deniz bölgelerinde, bataklık, toprak ya da hayvanların sindirim sistemi gibi oksijensiz ortamlarda yaşayabilen canlılar oksijensiz solunum yaparlar.

NOT: insanların bağırsaklarına yerleşen zararlı bir bakteri türü olan *Escherichia coli* (Eşerişya koli) burada oksijensiz solunum yapar. Bu bakteri oksijen varlığında ise oksijenli solunumu tercih eder.

**NOT: Etil alkol ve Laktik Asit fermentasyonlarında ETS kullanılmaz.**

## **ELEKTRON TAŞIMA SİSTEMİ (ETS) KULLANILAN OKSİJENSİZ SOLUNUM**

\*Bazı bakteriler oksijen olmaksızın ETS'yi kullanarak enerji elde ederler.

\*Bunlar besin moleküllerinden kopardıkları elektronları oksijen dışında bir inorganik moleküle aktarırlar. Sülfat ( $SO_4$ ), kükürt (S), Nitrat ( $NO_3$ ),  $CO_2$  ve  $Fe^{+3}$  oksijensiz solunumda son elektron alıcısı olarak kullanılan inorganik moleküllerdir.

\*Oksijensiz solunum yapan canlıların bazıları sadece oksijensiz ortamlarda yaşayabilirler. Bunların bir kısmı için oksijen, toksik etki yapar.

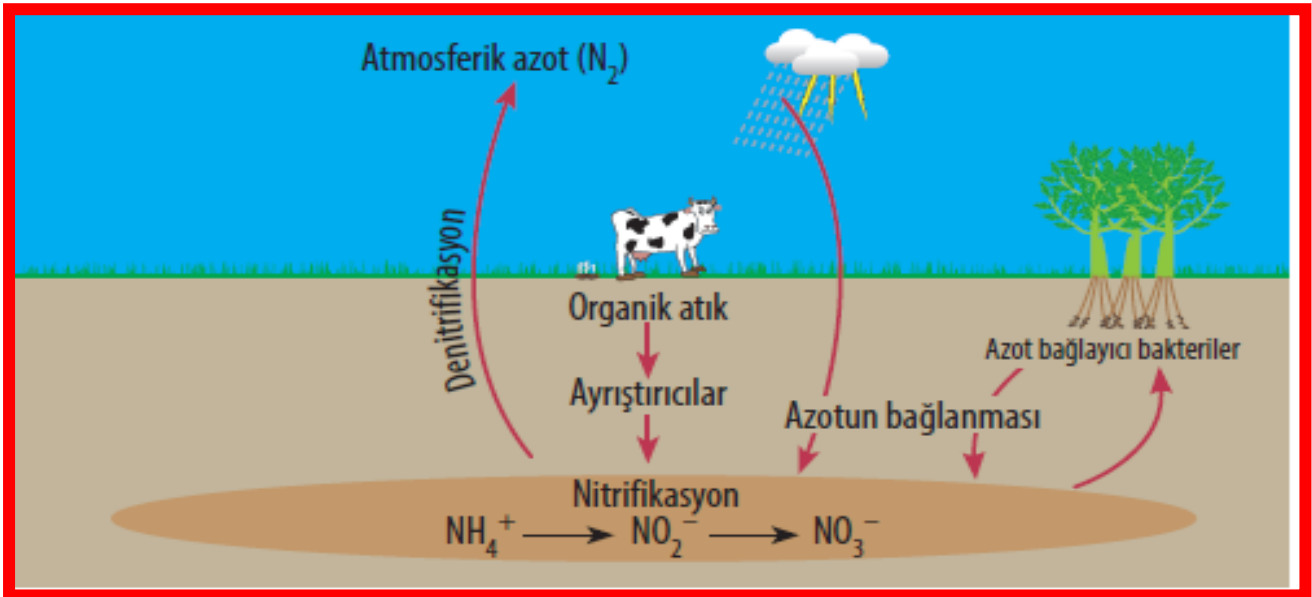
\*Bataklık gibi oksijensiz ortamda yaşayan bazı bakteriler besin moleküllerinden kopardıkları elektronları ETS üzerinden sülfat iyonuna aktarırlar.

\*Elektronların ETS'de taşınması sırasında açığa çıkan enerji ile ATP sentezlenir.

Sülfat iyonunun elektron alarak indirgenmesi sonucunda hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S) oluşur. Bataklıklardan gelen çürük yumurta kokusunun sebebi buradaki oksijensiz solunum yapan bakterilerin oluşturduğu H<sub>2</sub>S'dir.

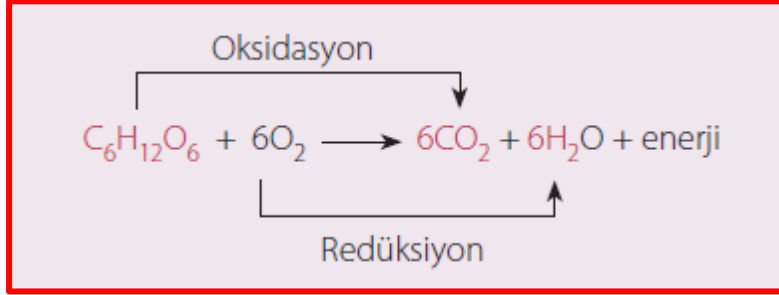
\* Ayrıca H<sub>2</sub>S ile demirin reaksiyonu sonucu suyun rengi siyahlaşır.

\*Toprakta ve suda bulunan nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), oksijensiz solunum yapan bakteriler tarafından moleküler azota (N<sub>2</sub>) dönüştürülür. Bu bakteriler oksijensiz ortamda ETS'lerinde son elektron alıcısı olarak nitratı kullanır. Nitrat elektron alarak birkaç basamakta moleküler azota dönüşür. **DENİTRİFİKASYON** adı verilen bu olay biyosferdeki azot dengesinin korunmasına katkı sağlar .



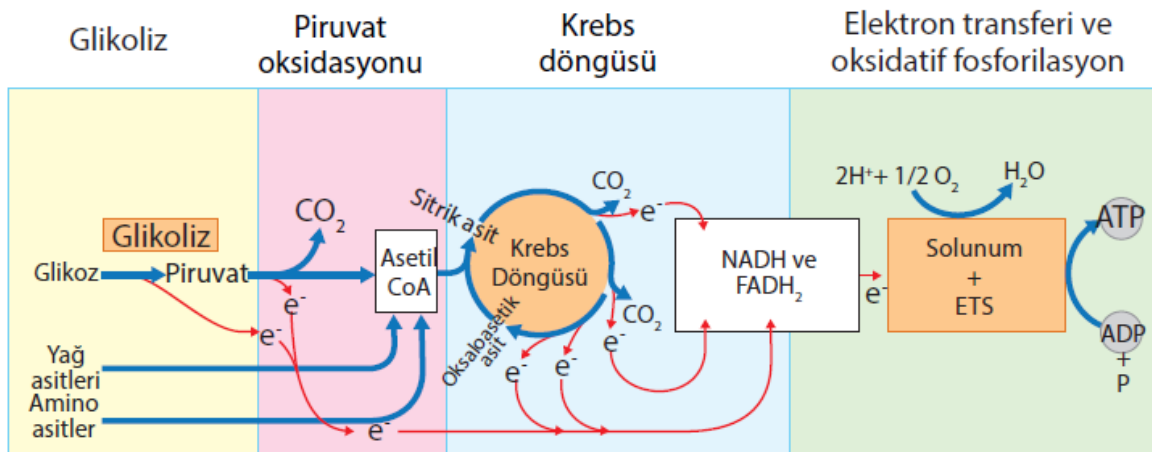
# OKSİJENLİ SOLUNUM

Glikoz, oksijenli solunumda  $CO_2$  ve  $H_2O$ 'ya kadar parçalanır. Bu sırada glikoz elektron kaybederek okside olurken oksijen de elektron alarak indirgenir.



Glikolizle üretilen piruvat, oksijenli ortamda  $CO_2$  ve  $H_2O$ 'ya kadar yıkılır. Böylelikle glikozda bulunan kimyasal enerjinin büyük bir bölümü hücrelerin kullanabileceği forma dönüşmüş olur. Bu işlem üç ana basamakta gerçekleşir:

- İlk basamakta piruvat iki karbonlu aktif bir bileşik olan asetil koenzim A (Asetil-CoA)'ya dönüştürülür. (**Piruvat oksidasyonu**)
- İkinci aşamada Asetil CoA, dört karbonlu oksaloasetik asitle birleşerek altı karbonlu sitrik asiti oluşturur ve Krebs döngüsü başlar. Döngü sürecinde salınan enerji elektron taşıyıcıları olan  $NAD^+$  ve  $FAD^+$ 'a aktarılır. (**Krebs Döngüsü**)
- Solunumun üçüncü basamağında ise bu taşıyıcı moleküller elektronlarını mitokondri iç zarı üzerindeki elektron taşıma sistemi (ETS) elemanlarına aktarır. Bu süreçte bir dizi işlem sonucunda oksidatif fosforilasyon ile ATP üretimi gerçekleştirilir. (Oksidatif Fosforilasyon)



Oksijenli solunum;

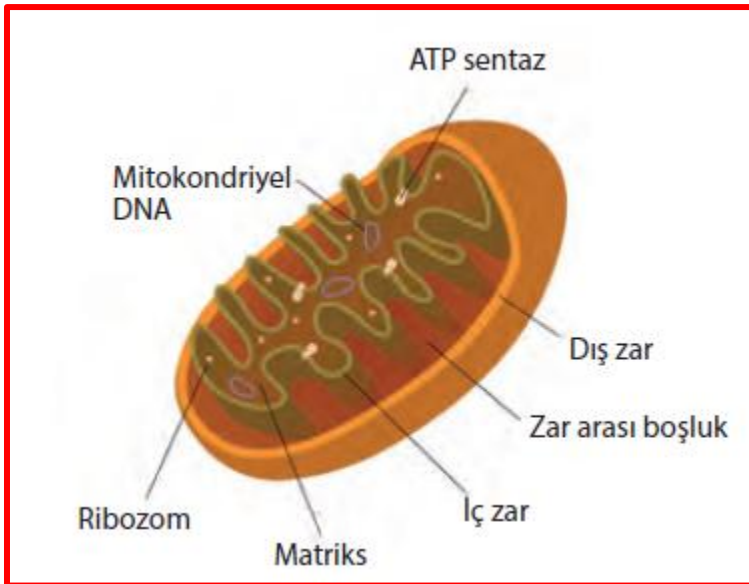
Hücre prokaryot ise:

- Sitoplazmada.....Glikoliz, Fermentasyon, Krebs Döngüsü gerçekleşir.
- Plazma zarının iç yüzeyinde (Mezozomlarda)..... Pirüvatın Asetil Co A'ya dönüşümü ve elektron taşınması (Oksidatif Fosforilasyon)

Hücre Ökaryot ise :

- Sitoplazmada.....Glikoliz, Fermentasyon
- Mitokondri Matrixinde..... Pirüvatın Asetil Co A'ya dönüşümü ve Krebs döngüsü
- Mitokondri iç zarında (Krista).....Elektron taşınması (Oksidatif fosforilasyon)

### MİTOKONDRİNİN YAPISI:

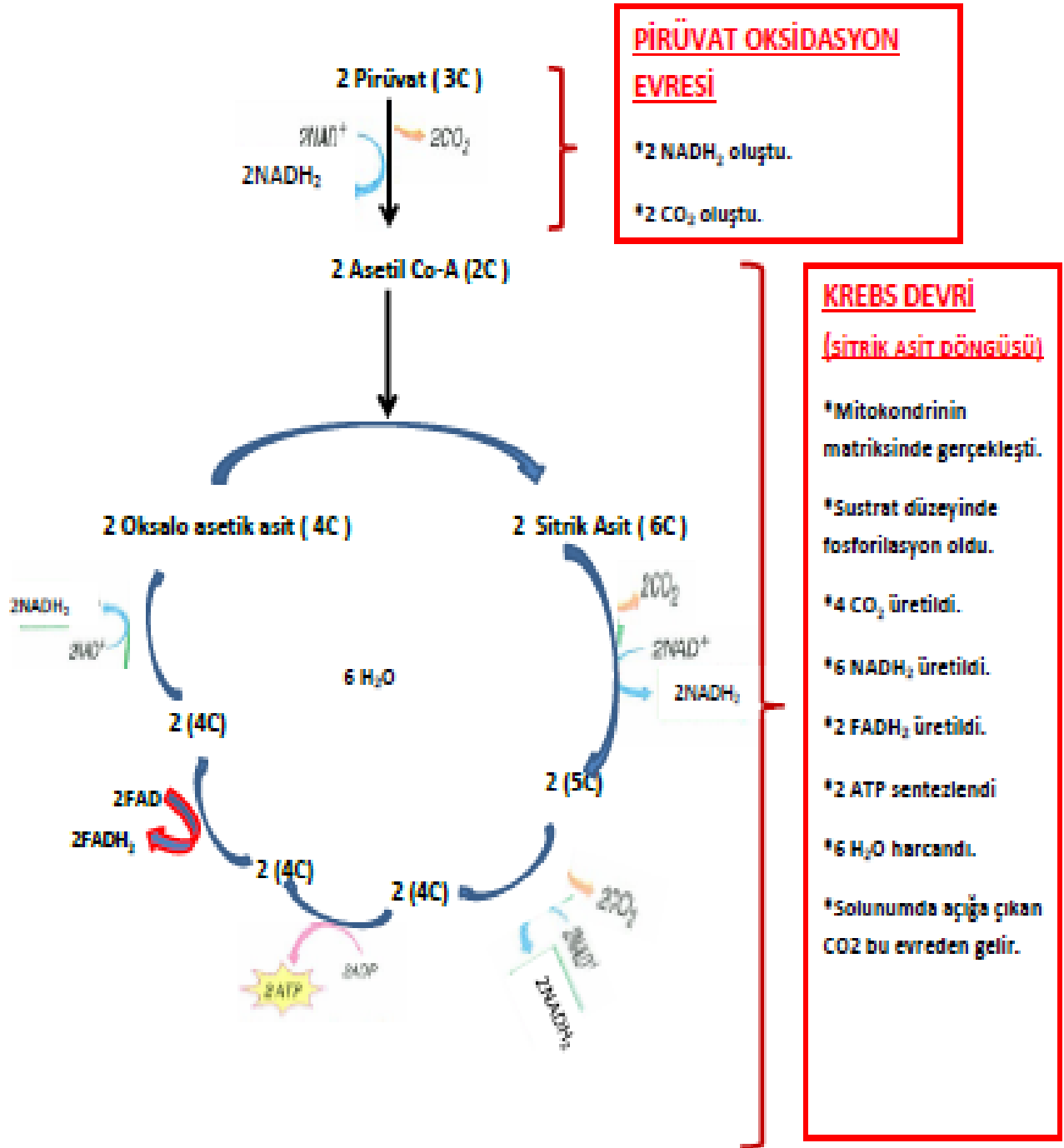


\*Mitokondrinin iç zarı, oksidatif fosforilasyon tepkimelerine geniş yüzey alanı oluşturmak amacıyla kıvrımlı bir yapıya sahiptir.

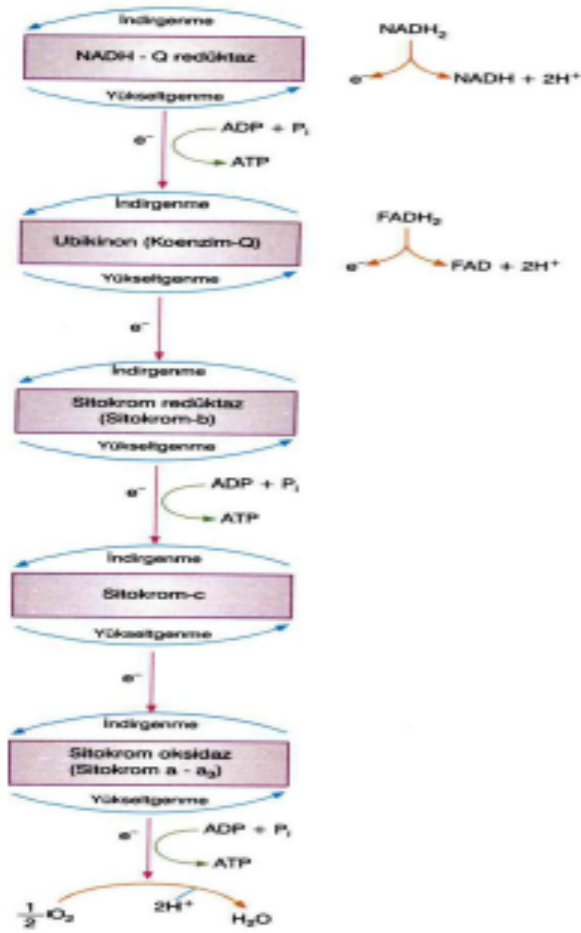
\*Bu kıvrımlara **krista**, iç ve dış zarlar arasında kalan bölgeye **zarlar arası boşluk**, iç zarın içinde kalan sıvı ortama da **matriks** adı verilir.

\*Oksijenli solunumun Krebs döngüsü bu sıvı ortamda gerçekleşir.

Sitoplazmada glikoliz evresi sonucu oluşan pirüvatlar mitokondriye geçerek oksijenli solunum reaksiyonlarının devamlılığını sağlarlar.



## OKSİDATİF FOSFORİLASYON EVRESİ



### ELEKTRON TAŞIMA SİSTEMİ

\* Mitokondrinin kristalarında gerçekleşti.

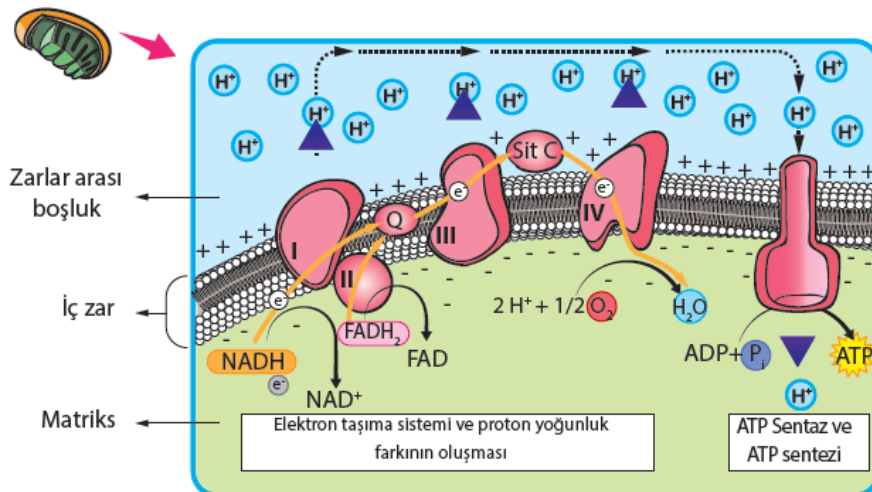
\* Oksidatif fosforilasyon gerçekleşti.

\* Solunumda en fazla ATP bu evrede üretilir.

\* Mitokondri sıvısında bekletilen H protonları O<sub>2</sub> ile birleşerek H<sub>2</sub>O'ya dönüşür.



6 tanesi krebste harcanır.





ETS elemanları, bu aşamaya kadar oluşturulan NADH ve FADH<sub>2</sub> moleküllerinin getirdiği elektronları alır.

- NADH'in elektronları I numaralı komplekste, FADH<sub>2</sub>'nin elektronları ise II numaralı komplekste ETS'ye aktarılır.
- I ve II numaralı komplekslere aktarılan elektronlar, iç zar üzerinde bulunan küçük ve hareketli bir elektron taşıyıcısı ile III numaralı komplekse aktarılır.
- III numaralı kompleksteki elektronların aynı şekilde başka bir elektron taşıyıcısı ile IV numaralı komplekse aktarılması, NADH ve FADH<sub>2</sub>'deki elektronların moleküler oksijene verilerek solunum ile açığa çıkan suyun oluşumunu sağlar.

Elektronların ETS'deki bu geçişiyle; I, III ve IV numaralı komplekslerde, matriks içerisinde bulunan hidrojen iyonlarının (=proton veya H<sup>+</sup>) zarlar arasındaki boşluğa pompalanması için enerji sağlanır. Hidrojen iyonlarının geçişiyle de matriks ile zarlar arası boşluk arasında proton konsantrasyonu farklılığı oluşturulur.

Ayrıca matriks içerisinde bulunan protonların su oluşturmak üzere oksijenle tepkimeye girmesi sonucu matriks proton miktarı düşmekte ve konsantrasyon farklılığının oluşmasına ilave katkıda bulunmaktadır. Bu durum iç zarın iki yüzü arasında elektriksel bir yük farkının oluşmasına neden olmaktadır.

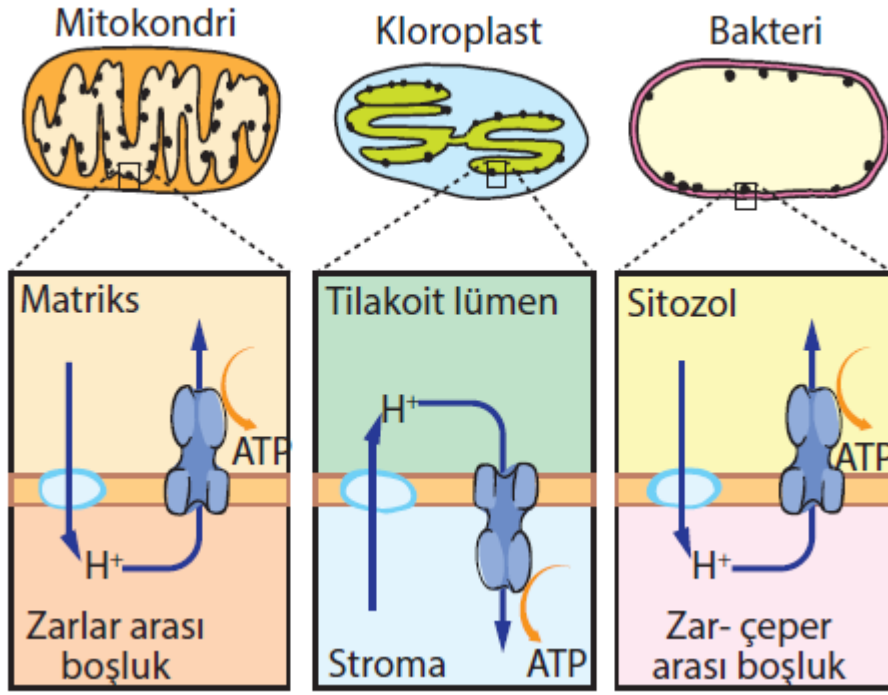
Mitokondrinin iki farklı bölümü arasında oluşan bu konsantrasyon farklılığının ATP'ye dönüştürülmesi, 1961 yılında İngiliz biyokimyacı Peter Mitchell tarafından öne sürülen **KEMİOZMOZİS** olayı ile açıklanmıştır.

### **Kemiozmotik modele göre**

NADH aracılığı ile dahil olması neticesinde toplam 2,5 ATP üretilirken elektronların FADH<sub>2</sub> aracılığı ile dahil olması neticesinde 1,5 ATP sentezi gerçekleşmektedir.

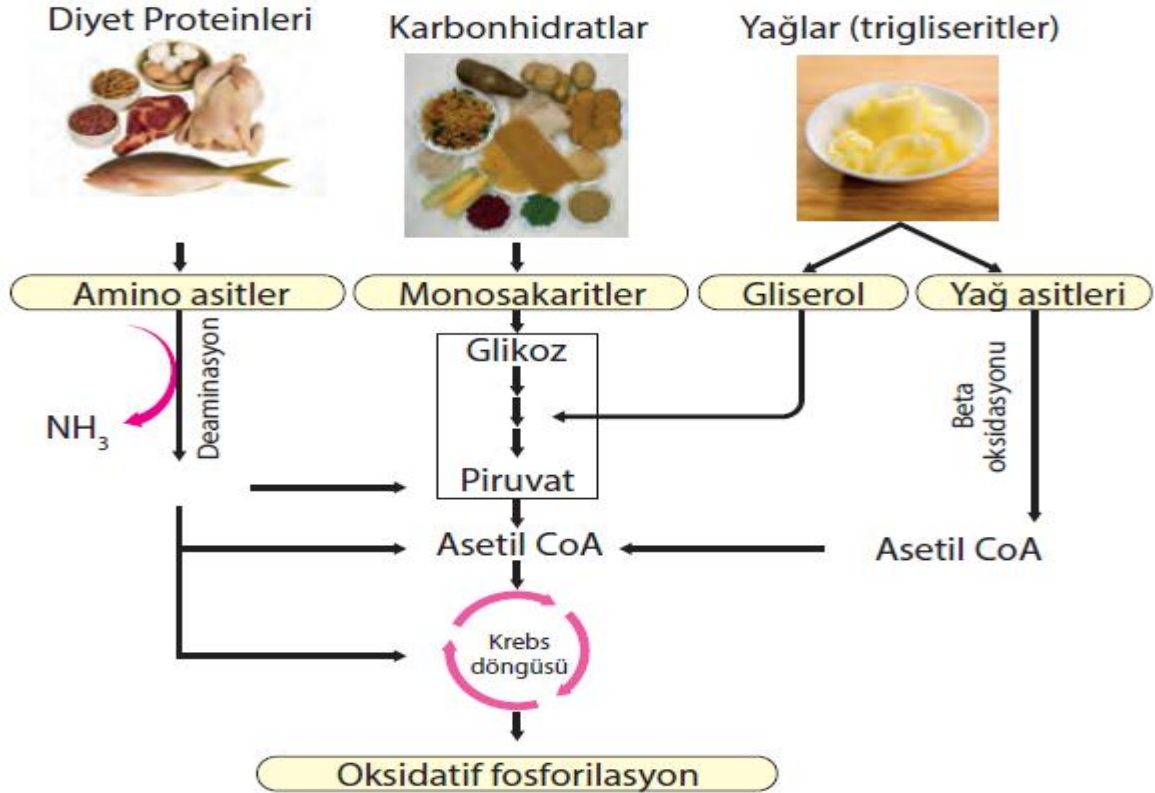
Bu bağlamda bir glikoz molekülünün CO<sub>2</sub>'ye kadar indirgenmesi ile sonuçlanan yıkım tepkimelerinde toplam 30-32 ATP sentezi gerçekleşmektedir. ATP sayısındaki bu farklılık, sitoplazmada glikolizle oluşturulan NADH moleküllerinin değişik dokularda ETS'ye farklı mekanizmalarla katılmalarından kaynaklanmaktadır.

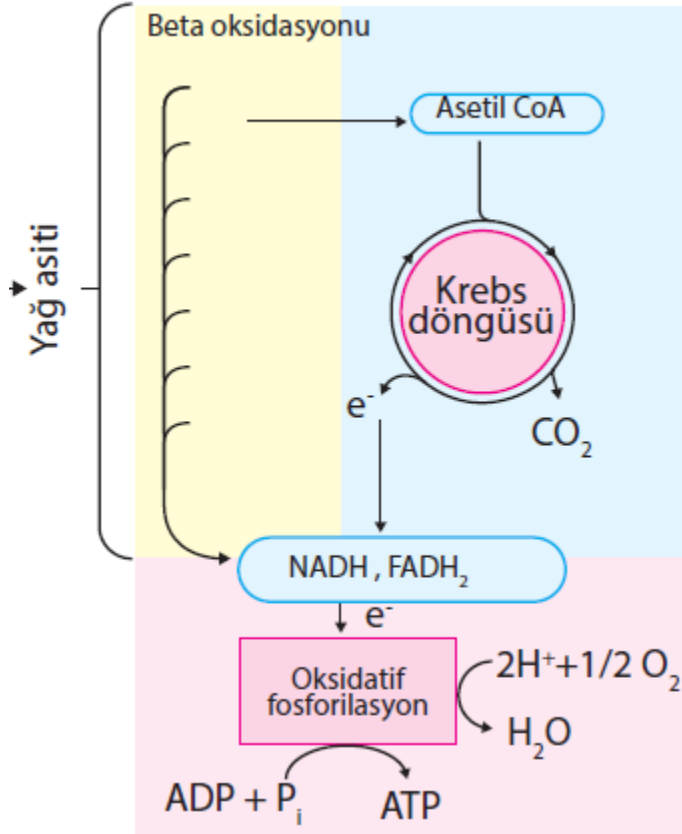
Örneğin iskelet kası ve beyin hücrelerinde 30; karaciğer, böbrek ve kalp hücrelerinde 32 ATP üretilir.



Kemiosmotik olay mitokondri, kloroplast ve bakterilerde benzer özellik gösterir.

### BESİNLERİN OKSİJENLİ SOLUNUMA KATILMASI





Yağların sindirimiyle yağ asitleri ve gliserol oluşur. Gliserol glikoliz ara bileşenlerine enzimatik olarak dönüştürüldükten sonra enerji üretiminde kullanılır.

Yağ asitleri ise mitokondride **beta oksidasyonu** adı verilen tepkimelerle iki karbonlu asetil-CoA moleküllerine dönüştürüldükten sonra solunuma katılır. Kimyasal yapılarındaki karbon-hidrojen bağlarının daha fazla olması nedeniyle, yağlardan karbohidratlara oranla çok daha fazla enerji elde edilir.

Yağlar beta oksidasyonu sonucunda asetil-CoA molekülüne kademeli olarak indirgenirken, oluşan asetil-CoA Krebs döngüsünde başlangıç materyali; NADH ve FADH<sub>2</sub>'ler ise oksidatif fosforilasyonda elektron kaynağı olarak kullanılır.