

OKSİJENLİ SOLUNUM

Oksijenli Solunum(Aerobik Solunum):

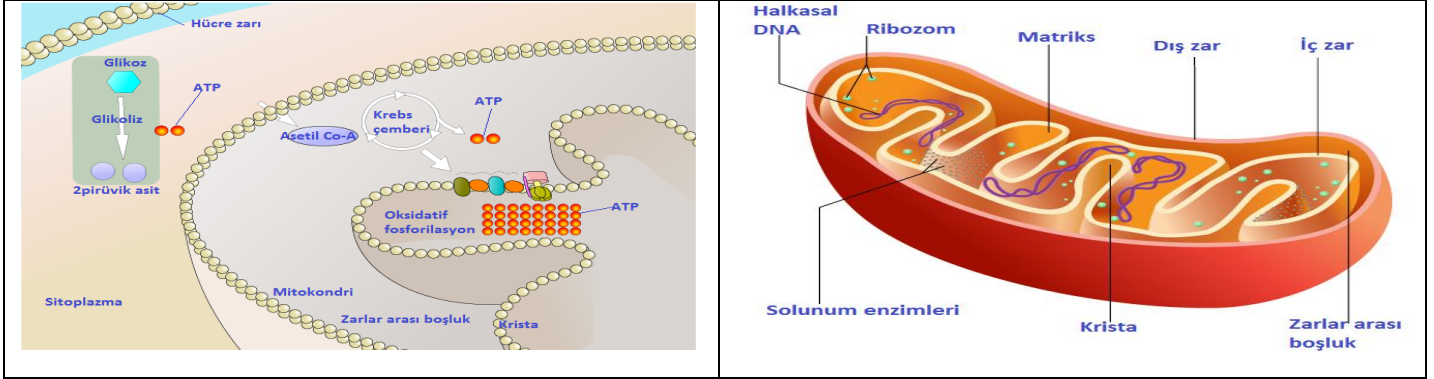
- hücre içinde enerji verici organik moleküllerin oksijen varlığında enzimler yardımıyla CO₂ ve H₂O'ya kadar yıkılmasına **oksijenli solunum(aerobik solunum)** denir.
- oksijenli solunum bazı bakterilerde, bitkilerde, mantarlar, hayvan hücrelerinde gerçekleşen bir dizi tepkime şeklinde gerçekleşir.
- oksijenli solunumda organik besin maddeleri inorganik maddelere kadar yıkıma uğradığı için enerji verimi yüksektir.
- ökaryotik hücrelerde hücre **sitoplazmasında** başlayan yıkım tepkimeleri **mitokondri** içinde devam ederek biter.
- prokaryotik hücrelerde oksijenli solunum reaksiyonları herhangi bir organelle bağlı olmadan hücre zarının oluşturduğu özel bölgesinde gerçekleşir(mitokondrileri bulunmaz).
- oksijenli solunum tepkimelerinin enerji verici organik moleküller inorganik moleküllere ayrılır.
- son elektron alıcısı olarak moleküler oksijen kullanılır(O₂). Elektron ve proton taşıyan farklı koenzimler kullanılır: NAD⁺ ve FAD
- oksijenli solunumda ATP üretimi: **substrat düzeyinde fosforilasyon**(glikoliz ve krebs döngüsünde) ve **oksidatif fosforilasyon** ile ATP üretimi gerçekleşir.
- glikoliz ve krebs döngüsünde organik moleküllerden koparılan hidrojen protonları NAD⁺ ve FAD ile ETS'ye taşınır.
- oksijenli solunum genel olarak dört farklı evrede gerçekleşir: glikoliz, pirüvatın oksidasyonu, krebs çemberi döngüsü, ETS sistemi

Oksijenli solunumun evreleri

Oksijenli Solunumun Evreleri

a-glikoliz evresi	b-pirüvik asit oksidasyonu	c-krebs çemberi(döngüsü)	d-elektron taşıma sistemi
-tamamen sitoplazmada gerçekleşir.	-mitokondrinin matriksinde (mitokondrinin içini dolduran sıvı) gerçekleşir	- mitokondrinin matriksinde (mitokondrinin içini dolduran sıvı) gerçekleşir	-mitokondrinin iç zarının oluşturduğu kıvrımlarda (krista) gerçekleşir.

Oksijenli solunum Genel Şekli

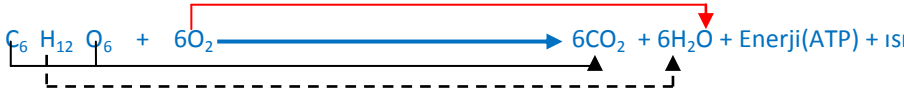


Oksijenli Solunumun denklemleri, kullanılan ve oluşan ürünlerin kaynağı:

Oksijenli solunumun genel denklemi



Oksijenli Solunumun denklemleri, kullanılan ve oluşan ürünlerin kaynağı:

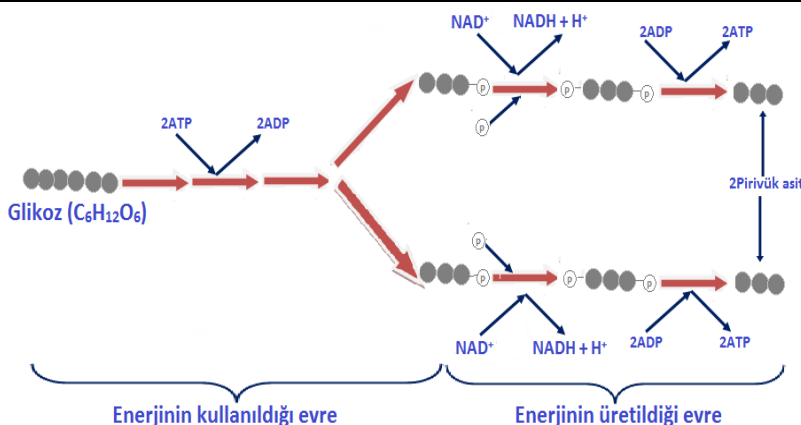


- yukarıda verilen denklemden görüldüğü gibi kullanılan ve oluşan elementlerin kaynağı ve dönüşeceği moleküller **izotropi** yöntemiyle belirlenebilir.
- oluşan karbondioksitteki karbonun(C) kaynağının kullanılan enerji verici besinin yapısında yer alan karbon atomu olduğu görülür.
- oluşan karbondioksitte yer alan oksijenin kaynağının kullanılan enerji verici organik besinin yapısında yer alan oksijen atomunun olduğu görülür.
- kullanılan oksijen molekülleri organik besinin yıkımıyla gelen hidrojenlerle birleşerek su(H₂O) moleküllerini oluşturur.
- oksijenli solunum yapan bir canlının ortamına oksijen atomları **işaretlenmiş(izotropi) O₂¹⁸'nin kullanımı sonucu oksijen atomları işaretli su(H₂O¹⁸) molekülleri** oluşur.

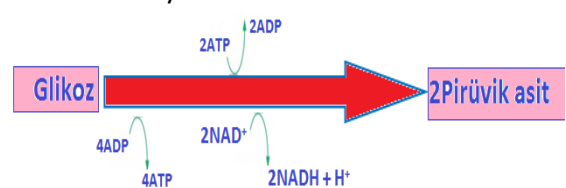
a-Oksijenli Solunumun Glikoliz Reaksiyonları:

Glikoliz reaksiyonları (tüm canlı hücrelerde sitoplazmada ortak olarak gerçekleşir)

- glikoliz reaksiyonları hücre sitoplazmasında gerçekleşir. Glikozun hücre sitoplazmasında enzimler yardımıyla 3C'lu 2 adet pirüvik aside kadar yıkılmasıdır.oluşan mitokondri mitokondri zarlarından geçerek aktif taşıma ile mitokondriye giriş yapar.
- glikoliz reaksiyonları oksijensiz solunum, fermantasyon, oksijenli solunum olaylarında ortak olarak gerçekleşir.
- glikolizin başlangıcında glikozun daha **kolay aktifleşmesi için 2ATP** kullanılır.
- glikoliz enerjinin kullanıldığı evre ile enerjinin olduğu evre diye iki aşamada gerçekleşir.
- glikoliz reaksiyonlarında **substrat düzeyinde fosforilasyonla 4ATP** sentezlenir.
- glikoliz reaksiyonlarında organik maddelerden koparılan hidrojen ve elektronları taşıyan 2NAD⁺ molekülleri indirgenerek 2NADH + 2H⁺ molekülleri oluşur. NAD⁺'ın aldığı hidrojen ve elektronlar ETS'ye taşınır.
- glikolizde: 1 glikozdan → 2 pirüvik asit 2H₂O, 4 ATP oluşur-2ATP kullanılır→kazanç 2ATP, 2NAD⁺ + 4e⁻ + 4H⁺ → 2NADH + 2H⁺



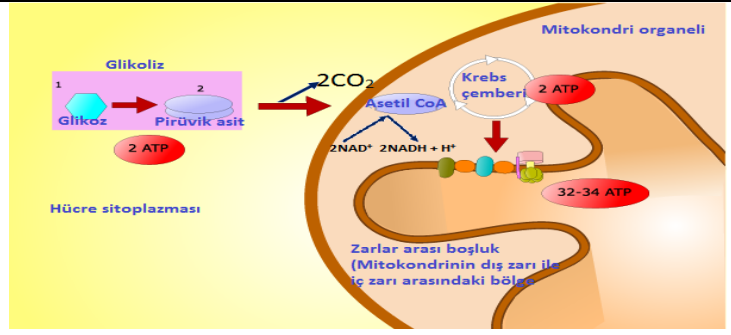
Glikoliz reaksiyonlarının özeti



OKSİJENLİ SOLUNUM

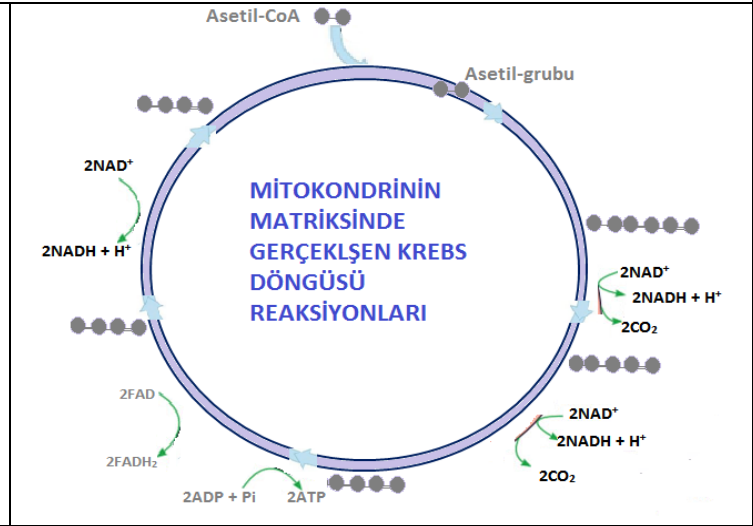
b-Pirüvik Asidin Oksidasyonun Gerçekleşmesi

- hücrenin sitoplazmasında glikolizle oluşan 3C'lu pirüvik asit aktif taşıma ile mitokondrinin içine giriş yapar.
- sitoplazmada oluşan pirüvik asit mitokondri dış zarını doğrudan geçebilirken iç zarını geçemez ve mitokondri iç zarında yer alan proteinlerle matrikse geçiş yapar.
- mitokondrinin matriksine gelen her bir pirüvik asitten 1 molekül CO_2 çıkışının(oksijenli solunumda ilk olarak CO_2 'nin üretildiği kısım burasıdır.) ardından NAD^+ molekülünün indirgenmesi sonucu $\text{NADH} + \text{H}^+$ oluşur ve oluşan bileşik B vitamini türevi olan Koenzim-A ile birleşerek sonunda 2C'lu asetil CoA molekülü oluşur.
- bu aşamada 2 pirüvattan: 2CO_2 , $2\text{NADH} + \text{H}^+$, 2asetil CoA molekülleri oluşur.



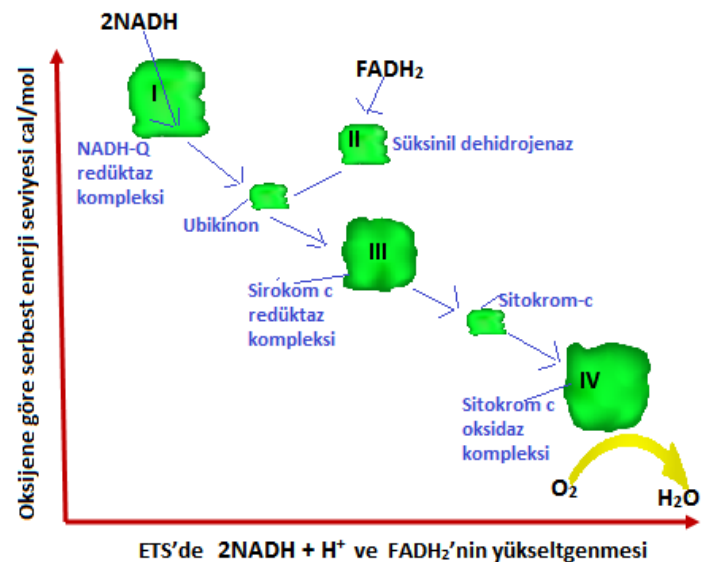
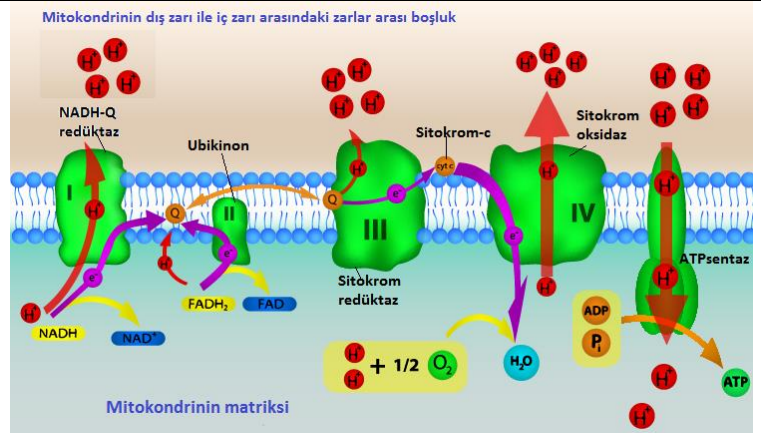
c-Krebs Çemberi Evresi(Sitrik Asit Döğüsü):

- pirüvik asidin oksidasyonu ile oluşan 2C'lu Asetil CoA molekülü 4C'lu okzalasetik asit ile birleşerek 6C'lu sitirik asiti oluşturur. Oluşan sitirik asit bir dizi tepkime gerçekleştirerek 4C'lu okzalasetik asiti tekrardan oluştururlar.
- krebs döngüsü tepikemlerini Hans Krebs aslı bilim adamı aydınlatmış olup bu isim verilmiştir.
- krebs döngüsü olayları ökaryotik hücrelerde mitokondrinin matriksinde gerçekleşirken prokaryotik hücrelerin sitoplazmalarında gerçekleşir.
- krebs döngüsünde organik moleküllerin yapısında yer alan C ve H atomları CO_2 şeklinde çıkış yapar.
- NAD^+ ve FAD gibi hidrojen taşıyıcısı olan farklı koenzimler kullanılır. Bu koenzimler organik besinde yer alan hidrojenlerin koparılmasıyla indirgenen NAD^+ ve FAD molekülleri organik besindeki hidrojenleri alıp indirgenirler: $\text{NAD}^+ \rightarrow \text{NADH} + \text{H}^+$, $\text{FAD} \rightarrow \text{FADH}_2$ oluşur ve oluşan bu moleküller daha sonra ETS'ye taşınırlar.
- krebs döngüsü reaksiyonlarının özeti:**
- iki farklı reaksiyonda (farklı aşamalarda) CO_2 çıkışı gerçekleşir
- substrat düzeyinde fosforilasyonla 2ATP sentezlenir.
- 4CO_2 , $6\text{NADH} + 6\text{H}^+$ molekülü ve 2FADH_2 oluşur.



d-Elektron Taşıma Sistemi Reaksiyonları(ETS):

- oksijenli solunumun son evresidir. Olayda en fazla enerjinin elde edildiği reaksiyonlar dizisidir. ETS reaksiyonları mitokondrinin iç zarının oluşturduğu **krista** adlı girintilerde gerçekleşir. Ökaryotik hücrelerde ETS elemanları mitokondrinin iç zarında krista denilen kısımlarda yer alırlar. ETS elemanları Prokaryotik hücrelerde hücre zarında bulunurlar.
- mitokondrinin içi zarında binlerce ETS sistemi bulunur. ETS elemanları 4 adet olup 1'den 4'e kadar numaralandırılmış olup herbirinin ayrı ismi vardır. Bunlar: **NADH-Q redüktaz kompleksi, redüktaz, sitokrom redüktaz, sitokrom oksidaz, sitokrom C** şeklinde bulunurlar.
- ETS elemanları glikoliz ve krebs çemberinden oluşan $\text{NADH} + \text{H}^+$ ve FADH_2 'lerden gelen yüksek enerjili elektronları alıp oksijene taşırlar. Glikoliz ve krebs'ten gelen elektronların ETS üzerinden oksijene aktarılınca açığa çıkan enerjiden ATP sentezlenmesine **oksidatif fosforilasyon** denir.
- elektronların ETS'de taşınması indirgenme-yükseltgenme şeklinde gerçekleşir. ETS'de elektronu alan her bir taşıyıcı **indirgenir** elektronu verdikten sonra **yükseltgenmiş** olur. Elektron alan her bir taşıyıcı elektronu verene göre daha elektronegatifdir. ETS üzerinden elektronlar oksijene doğru taşınırken bir miktar enerji açığa çıkar ki ve bu enerji ATP sentezinde kullanılmaktadır.
- $\text{NADH} + \text{H}^+$ ve FADH_2 'de yer alan elektronlar ETS üzerinde elektron taşıyıcı elemanlara aktarılırken yapılarındaki protonlar(H^+) matrikste kalır. $\text{NADH} + \text{H}^+$ ve FADH_2 'ler proton ve elektronları bırakınca NAD^+ ve FAD moleküllerine yükseltgenmiş olurlar. Oluşan NAD^+ ve FAD 'lar tekrar kullanılmak üzere glikoliz ve krebs çemberine geri dönerler.
- ETS'de elektronların taşınmasıyla açığa çıkan enerjinin bir kısmı ısı şeklinde ortama yayılırken bir kısmı matrikste yer alan hidrojen protonlarının (H^+) zarlar arası bölgeye pomplanmasında kullanılır.
- hidrojen protonlarının (H^+) zarlar arası bölgeye pomplanmasıyla zarlar arası bölgede **proton konsantrasyonu artar** ve zarlar arası bölgede protonların oluşturduğu **potansiyel enerji miktarı artar** ve hidrojen protonları(H^+) **proton itici bir güç** oluştururlar.
- mitokondri iç zarı protonların geçişine izin vermez. Zarlar arası bölgede biriken protonların **ATP sentaz** enziminin içinden matrikse **difüzyonla** geri dönerken protonların oluşturduğu potansiyel burada ATP sentaz üzerinden geçerken ATP sentaz'da yapısal değişimler oluşur ve bununla birlikte aktifleşen ATP sentaz enzimi ADP 'lere fosfat ekleyerek ATP'nin oluşmasını sağlar. Mitokondri iç zarının iki tarafında oluşan proton farkının ATP sentaz enziminin üzerinden geçişle birlikte ATP üretimine **kemiozmotik hipotezle enerji eşleştirmesi** denir.



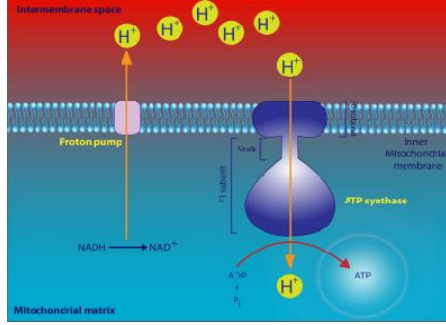
ETS'de $2\text{NADH} + \text{H}^+$ ve FADH_2 'nin yükseltgenmesi

OKSİJENLİ SOLUNUM

Oksijenli solunum için bazı oluşumlar

Karbondioksitin Üretilmesi(CO₂):

- organik molekülde yer alan C ve O atomları CO₂ şeklinde koparılır. Oksijenli solunumun iki ayrı aşamasında CO₂ üretimi gerçekleşir.
- pirüvatın oksidasyonunda 2CO₂ üretilirken krebs döngüsünde 4 molekül CO₂ üretilir.
- 1 molekül glikoz oksijenli solunumda yıkıldığında 6 adet CO₂ molekülü oluşur.



ETS'de Suyun Oluşumu:

- ETS'de taşınan elektronların ve matrikste yer alan protonların oksijenle birleşmesi sonucu su oluşur.
- ETS'de 1 molkül H₂'nin ETS'de taşınmasıyla birlikte 1H₂O molekülü oluşur.
- glikoz şekerinin yıkımıyla birlikte 12H₂ molekülü oluşur ve bunlar ETS'de taşınmasıyla 12H₂O oluşur.
- mitokondrinin krebs döngüsünde 6 adet H₂O molekülü kullanıldığı için toplamda 6H₂O molekülü oluşmuş olur.
- enerji verici olarak yağ asidi, gliserol ve amino asitler yıkıma uğratıldığında glikoza göre çok daha fazla su molekülü oluşur.

ETS için:

- elektronegatifliği en yüksek olan bileşik oksijendir. **Oksijen ETS'den gelen elektronları ve matriksteki protonları alıp suyu oluşturur.**
- ETS'de: oksidatif fosforilasyonla ATP sentezlenir, su molekülleri oluşur. İndirgenme ve yükseltgenme olayları gerçekleşir.
- enerjinin büyük kısmı ETS'de elde edilir.** mitokondrinin iç zarı ile dış zarı arasında proton farkı iki ortamın pH değerini de değiştirir.
- zarlar arasında proton birikimiyle buranın pH'ı çok düşer.
- ETS'de son elektron alıcısı olarak kullanılan bileşen oksijen molekülüdür.
- ETS'de: **elektron taşıma zinciri ve kemiozmotik hipotez enerji üretimi olayları oksidatif fosforilasyon** olarak değerlendirilir.
- kemiozmotik kısım zarlar arası bölgede biriken protonların ATPsentez üzerinden matrikse geri dönerken enzimin aktifleşmesiyle ATP üretilmesini ifade eder.

Oksijenli Solunumda Enerji Hesaplanması:

- hüresel solunum olayında enerji verici organik besinde yer alan enerjinin büyük kısmı ortama ısı şeklinde dağılır.
- oluşan ısının büyük çoğunluğu sabit ısı hayvanlarda vücut iç ısısının düzenlenmesinde işlevsellik kazanır.
- başlangıçta glikoz molekülünün daha kolay aktifleşmesi için 2ATP kullanılır.
- glikolizde substrat düzeyinde fosforilasyonlar 4ATP üretilirken krebs çemberinde substrat düzeyinde fosforilasyonla 2ATP üretilir.
- oksijenli solunumda NADH + H⁺'lar tarafından taşınan elektronların oksijen aktarımı sırasında 2,5ATP sentezlenirken, FADH₂'ler tarafından taşınan elektronların oksijen doğru taşınmasında 1,5ATP sentezlenir.
- glikolizden 2NADH + 2H⁺, pirüvik asidin oksidasyonundan 2NADH + 2H⁺, krebs döngüsünde 6NADH + 6H⁺ oluşur. Herbir NADH + H⁺ 2,5ATP değerindedir.
- krebs öngüsünde oluşan 2FADH₂'nin herbirinden ETS'de 1,5ATP üretilir.
- 10NADH + 6H⁺ x 2,5ATP=25ATP, 2FADH₂ x 1,5ATP= 3ATP
- ETS'de toplam 28ATP oluşur. 6ATP'de substrat düzeyinde oluştuğu için toplam 34ATP oluşur. 2ATP'de aktifleşme için kullanıldığı için net ATP üretimi: 32ATP'dir

a- substrat düzeyinde fosforilasyonla ATP üretimi

- organik maddedeki fosfatın koparılması ADP'ye aktarılmasıdır.
- yani bu reaksiyonlar glikoliz(sitoplazmada) ve krebs çemberinde(mitokondride) gerçekleşir
- glikolizde 4ATP üretilir.
- krebs döngüsünde 2ATP üretilir.

Toplam 6ATP üretilir.

b- oksidatif fosforilasyonla ATP üretimi

- organik maddelerden ayrılan elektronların ETS'de taşınmasıyla ATP üretilir.
- 1 molekül glikozda 12H₂ bulunur 12H₂'den 10 tanesi NAD⁺ koenzimi ile ETS taşınırken 10 H₂ x 2,5ATP=25ATP üretilir.
- 2tanesi FAD koenzimi ile ETS'ye taşınır. 2H₂ x 1,5ATP=3 ATP üretilir.

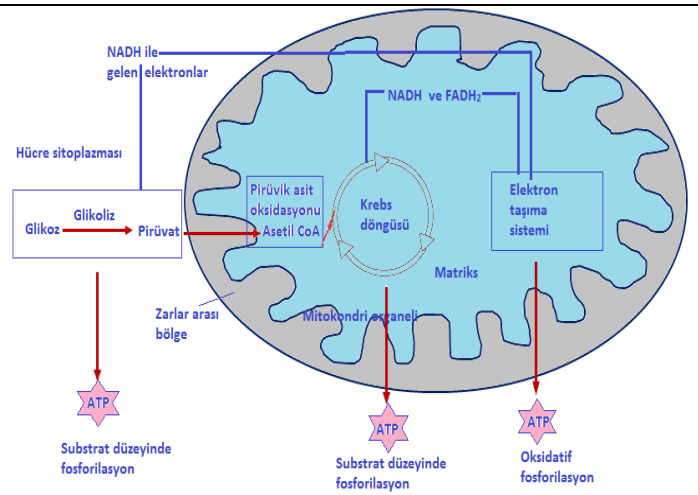
Toplam 28 ATP üretilir.

Başlangıçta 2ATP kullanıldığı için net kazanç:32ATP kadardır.

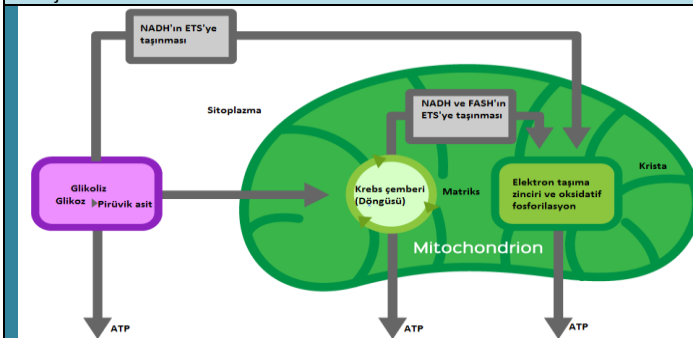
Oksijenli solunumda üretilen ve kullanılan bazı moleküller

	Sitoplazmada gerçekleşenler	Mitokondride gerçekleşen olaylar		
	a-glikoliz	b-pirüvatın oksidasyonu	c-krebs çemberi reaksiyonları	d-ETS
ATP kullanımı	2ATP	-	-	-
NAD ⁺ 'nin indirgenmesi	Var	Var	Var	-
FAD'ın indirgenmesi	-	-	Var	-
Substrat düzeyinde fosforilasyonla ATP üretimi	Var	-	Var	-
Oksidatif fosforilasyonla ATP üretimi	-	-	-	var
Su oluşumu	-	-	-	var
Su kullanımı	-	-	var	-
CO ₂ oluşumu	-	var	var	-

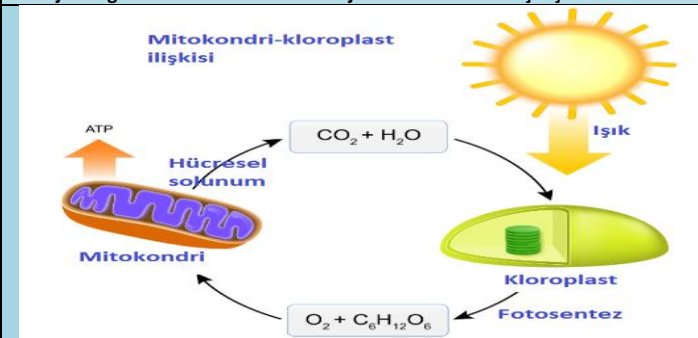
Oksijenli solunumun genel şekli



Oksijenli solunumun farklı bir denklemi



Enerji Döngüsünde fotosentez ile oksijenli solunumun karşılaştırılması



OKSİJENLİ SOLUNUM

Besinlerin Oksijenli Solunuma Girme Yolları:

- oksijenli solunum olayında enerji verici maddelerin **monomer** yapıları kullanılır.
- monomer olmayan enerji verici maddelerin solunumunda kullanılabilmesi için monomerlerine **hidroliz(sindirim)** edilmesi gerekir.
- oksijenli solunum enerji verici besinlerin kullanımıyla mutlak krebs döngüsü reaksiyonları gerçekleşir.
- enerji verici organik besin monomerlerin mitokondri iç zarnın iki tarafında oluşan proton sayısı ve organik moleküllerin solunuma katılma basamakları oluşan enerji miktarını etkiler.
- oksijenli solunumun ara reaksiyonlarında bazı ürünlerin hem yıkımı hem de üretimi gerçekleşebilmektedir: amino asit, gliserol, yağ asidi örnek olarak verilebilir.

Karbonhidratların solunumda kullanılması: Oksijenli solunum olaylarının denklemleri yazıldığında genel olarak glikoz molekülü yazılarak gösterilir. Glikoz bir karbonhidrat molekülüdür. Karbonhidratların vücuda alındıktan sonra veya hücre içinde daha önceden yer alan disakkarit ve polisakkarit gibi maddelerin enerji verici olarak kullanılabilmesi için monomerlerine sindirilmesi gerekir. Karbonhidratların sindirilmesi sonucu glikoz, fruktoz ve galaktoz adlı karbonhidrat monomerleri oluşur. Oluşan fruktoz ve galaktoz şekerleri izomeraz adlı enzimlerle glikoz şekere dönüşür ve oluşan şeker molekülleri oksijenli solunumda enerji verici olarak kullanılır. karbonhidratların kullanımıyla çeşitli sayılarda CO₂ ve H₂O molekülleri oluşur. -karbonhidratların oksijenli solunumda fazla kullanılması sonucu oluşan bazı PGAL molekülleri önce gliserole daha sonra yağ sentezinde kullanılır.

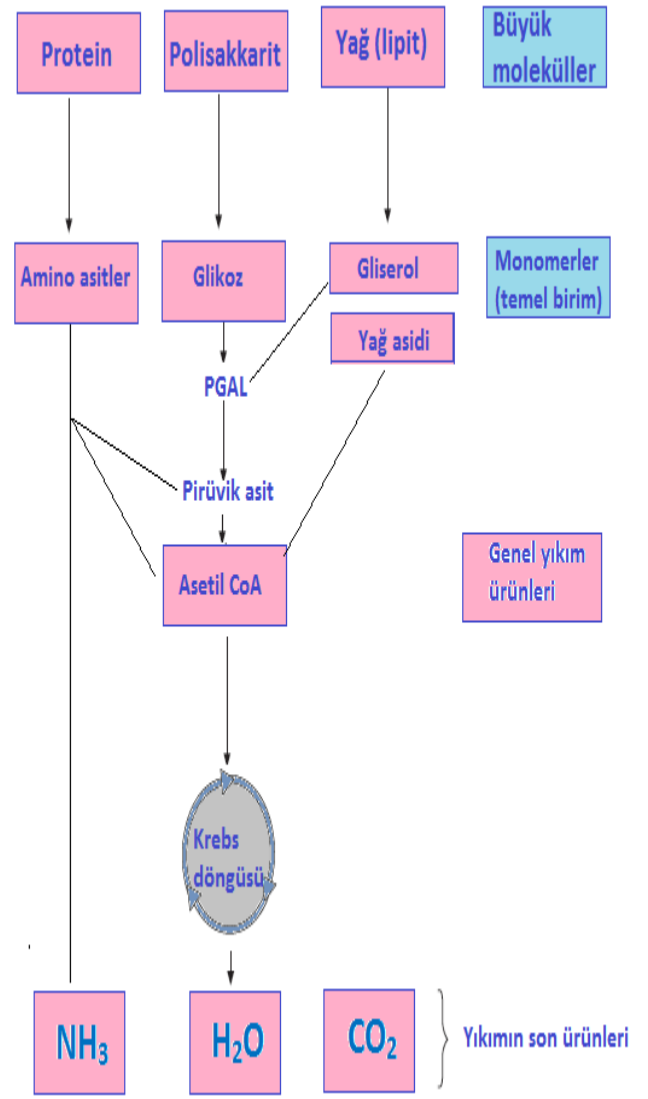
- Yağların solunumda kullanılması: Dışarıdan alınan yağ molekülleri ince bağırsakta monomerlerine hidroliz edilir. Yağların monomerlerine hidroliz edilmesiyle yağ asidi ve gliserol oluşur. Oluşan gliserol adlı molekül glikoliz reaksiyonlarında PGAL adlı gliseraldehit-3fosfata dönüşerek glikoliz tepkimelerinde yıkılır. Sindirim ile oluşan yağ asitleri **beta oksidasyon** denilen bir olayla Asetil-CoA moleküllerine dönüşüp solunum reaksiyonlarına katılmış olur. Yağların 2C'lu asetil-CoA dönüşmesi sırasında NADH + H⁺ ve FADH₂ gibi moleküller oluşur oluşun bu moleküller ETS'ye taşınmasıyla karbonhidratlara göre çok daha fazla ATP üretilmiş olur. Yağların kullanımıyla çeşitli sayılarda CO₂ ve H₂O molekülleri oluşur.

-yağların solunumda kullanılması sonucu karbonhidrat ve proteince göre daha fazla enerji oluşmasının nedeni yağların yapısında oransal olarak daha fazla hidrojenlerin olmasıdır. Yağların oksijenli solunumda kullanılmasıyla birlikte daha fazla enerji ve daha fazla su molekülleri oluşur.

-proteinlerin solunumda kullanılması: Proteinlerin oksijenli solunumda kullanılması için monomerlerine ayrışması gerekmektedir.

-proteinlerin sindirimi ile çeşitli amino asitler oluşur. Oluşan amino asit moleküllerinden **deaminasyon** denilen bir yöntemle amino asitlerden amino grubu ayrılır ve amonyak oluşur. Amino grubunun ayrılmasıyla geriye kalan moleküller karbon sayısına göre farklı basamaklarda hücresel solunuma katılırlar. Proteinlerin kullanımıyla çeşitli sayılarda CO₂, H₂O ve NH₃ gibi molekülleri oluşur. Amino asitlerden amino grubunun ayrılmasıyla amonyak oluşur. Oluşan amonyak molekülü çok zehirli bir bazdır. Hayvanlar amonyağı çeşitli moleküllere çevirip vücuttan uzaklaştırırlar. Amonyakın çeşitli şekilde(üre, ürik asit, amonyak) vücuttan uzaklaştırılmasının temel nedeni **vücudun su degesini** korumaktır.

Besinlerin Oksijenli Solunuma Girme Yolları:



Solunum Kat Sayısı Nedir?

-oksijenli solunum olaylarında üretilen karbondioksit miktarının oksidatif fosforilasyonda tüketilen oksijen miktarına oranına solunum kat sayısı denir.
Solunum kat sayısı = $\frac{\text{üretilen CO}_2 \text{ miktarı}}{\text{Tüketilen O}_2 \text{ miktarı}}$

Solunum Kat Sayısı Nedir?

-Karbonhidratların solunum kat sayısı: 1 molekül glikozun oksijenli solunumda kullanılması sonucu 6O₂ molekül harcanırken 6CO₂ meydana gelir. Dolayısıyla glikoz molekülünün oksijenli solunumda kullanılması sonucu solunum kat sayısı: 6CO₂/6O₂=1'dir.

-Yağların solunum kat sayısı: Oksijenli solunumda kullanılan enerji verici besinde yer alan hidrojen sayısı arttıkça daha fazla oksijen kullanılır. Yağ asidi adlı monomerlerin karbon zincirlerinin yapısında bol miktarda hidrojen bulunur. Yağ asitlerinin oksijenli solunumda kullanılmasıyla diğer besinlere çok daha fazla oksijen tüketilir. Yağların kullanımıyla tüketilen O₂ miktarı üretilen CO₂ miktarından daha fazladır. Yağların solunum kat sayısı=0,7 civarındadır.

-Proteinlerin solunum kat sayısı: Proteinlerin solunum kat sayısı ortalama olarak 0,8 civarındadır. Proteinlerin yapısını oluşturan amino asitlerin çeşidine göre solunum katları 1'den büyük olabileceği gibi 1'den küçük de olabilmektedir.

