

Hücresel Solunum ve Fermantasyon

Prof. Dr. Bektaş TEPE

Genel Biyoloji

Bölüm 9

Bu bölümde

- Katabolik yolların organik yakıtları oksitleyerek nasıl enerji sağlar?
- Glikozun piruvata oksidasyonu yoluyla glikoliz süreci
- Piruvatin oksidasyonunu takiben sitrik asit döngüsünün enerji verici oksidasyonları tamamlaması
- Oksidatif fosforilasyonda kemiosmozun elektron taşıma zinciri ile ATP sentezini birleştirmesi
- Fermantasyon ve anaerobik solunumla oksijensiz ortamda ATP üretimi
- Glikoliz ile sitrik asit döngüsünün diğer metabolik yollara bağlantısı



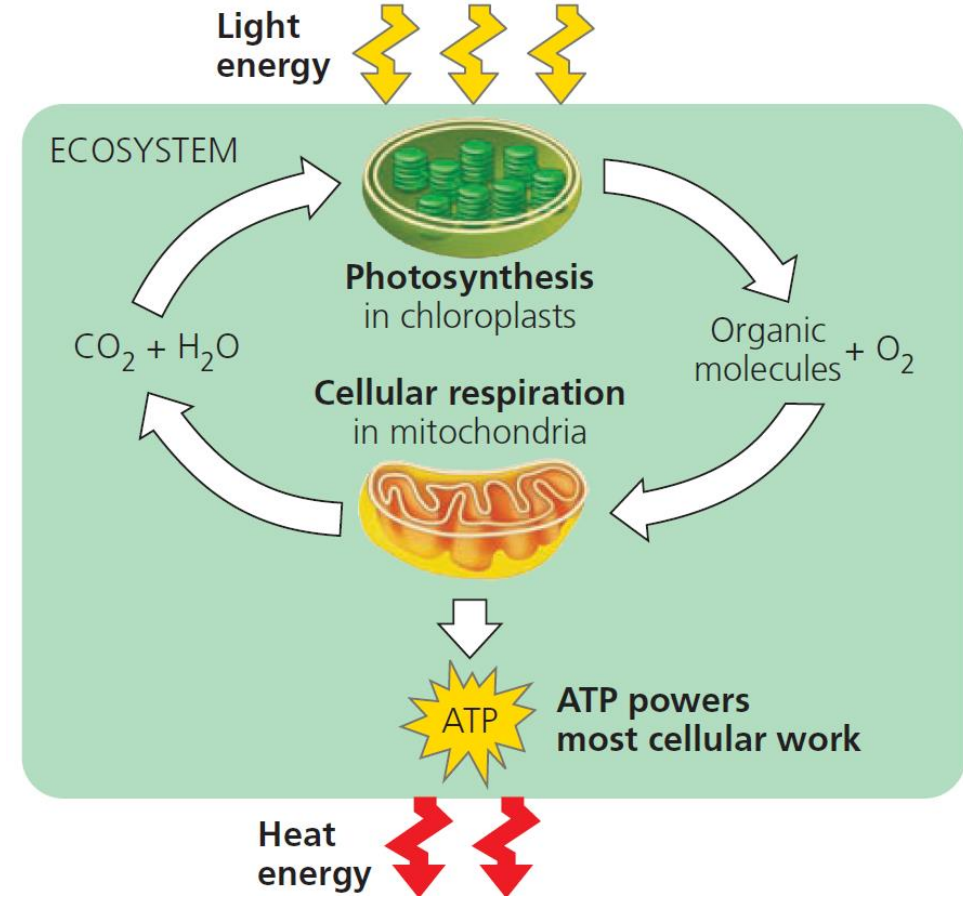
Hücreler Neden Enerjiye Muhtaçtır?

- Canlı hücreler, hareket etmek, çoğalmak, madde taşımak ve polimerleri sentezlemek gibi görevler için dış kaynaklardan enerji alır.
- Örneğin, yandaki puffin, hücrelerine enerji sağlamak için deniz canlılarıyla beslenir.
- Pek çok hayvan ise bu enerjiyi, fotosentetik organizmaları tüketerek elde eder.
- Bu süreçte, yaşamın sürdürülmesi doğrudan enerji aktarımıyla sağlanır.



Güneş Enerjisinin Hücreye Uzanan Yolculuğu

- Gıdalardaki organik moleküllerde depolanan enerji, nihayetinde güneşten gelir.
- Enerji ekosisteme güneş ışığı olarak girer, ısı olarak çıkar; buna karşılık, yaşam için gerekli kimyasal elementler döngüsel olarak geri kazanılır.
- Fotosentez, oksijen ve organik moleküller üretir; bu moleküller, ökaryotların mitokondrilerinde yakıt olarak kullanılır.
- Solunum sürecinde yakıt parçalanır, ATP üretilir ve oluşan atık ürünler—karbondioksit ve su—fotosentez için hammadde olur.



Katabolik Yollar Enerjiyi Nasıl Açığa Çıkarır?

- Katabolik yollar, karmaşık molekülleri parçalayarak depolanmış enerjiyi serbest bırakan metabolik yollardır.
- Bu süreçlerde, yakıt moleküllerinden elektronların başka moleküllere aktarılması temel rol oynar.
- Hücresel solunumun merkezinde yer alan bu kimyasal yollar, hücrelerin enerji elde etmesinde hayati öneme sahiptir.
- Bu bölümde, bu yolların temel kimyasal mantığını inceleyeceğiz.

Katabolizma ve ATP Üretimi

- Organik bileşikler, atomlar arasındaki bağlardaki elektron düzeni nedeniyle potansiyel enerji taşır.
- Hücreler, enzimler sayesinde bu bileşikleri daha az enerjili atık ürünlere dönüştürerek enerjiyi serbest bırakır.
- Açığa çıkan enerjinin bir kısmı işe dönüştürülürken, geri kalanı ısıya dönüşür.
- Bu enerji dönüşüm süreci, yaşamı sürdüren hücresel aktivitelerin temelidir.

Oksijenli ve Oksijensiz Solunum

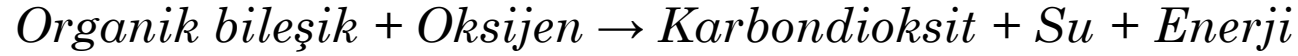
- Fermentasyon, oksijen kullanılmadan şekerlerin kısmen parçalanmasını sağlar.
- En verimli katabolik yol ise, oksijenin organik yakıtla birlikte tüketildiği aerobik solunumdur.
- Birçok ökaryot ve bazı prokaryot hücreler aerobik solunumu gerçekleştirebilir.
- Bazı prokaryotlar ise oksijen yerine başka maddeler kullanarak anaerobik solunum yapar.

Hücresel Solunum Kavramı Üzerine

- "Hücresel solunum" terimi teknik olarak hem aerobik hem de anaerobik süreçleri kapsar.
- Ancak, terim çoğunlukla aerobik solunumu ifade etmek için kullanılır.
- Bu kullanım, hayvanların oksijen alarak yaptığı organizma solunumuyla olan ilişkiden kaynaklanır.
- Bu nedenle, bu bölümde "hücresel solunum" terimini aerobik süreci anlatmak için kullanacağız.

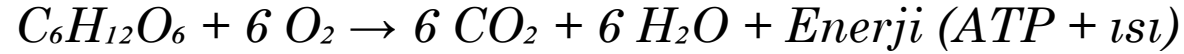
Solunumun Temel Denklemine Giriş

- Mekanizma olarak farklı olsalar da, aerobik solunum ile benzinli motorların çalışması arasında temel bir benzerlik vardır.
- Yiyecekler, solunum sürecinde yakıt olarak işlev görürken; karbondioksit ve su atık ürünlerdir.
- Süreç genel olarak şu denklemle özetlenebilir:



Glikozun Parçalanışı ve Enerji Kazanımı

- Karbonhidratlar, yağlar ve proteinler enerji kaynağı olarak kullanılabilir; hayvanlarda temel karbonhidrat kaynağı nişastadır.
- Nişasta, glikoza parçalanabilir ve hücre solunumunda bu glikozun izini süreceğiz.
- Genel tepkime şu şekildedir:



- Bu parçalanma ekzergoniktir ve her bir glikoz molekülü yaklaşık -686 kcal/mol serbest enerji açığa çıkarır.

ATP ve Hücresel İşin Sürdürülmesi

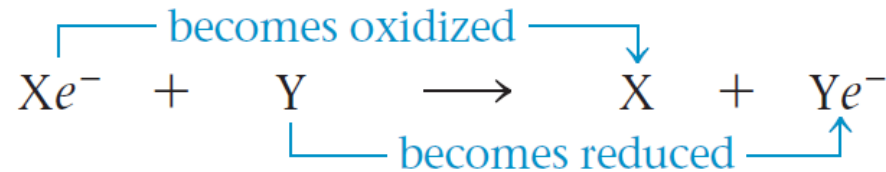
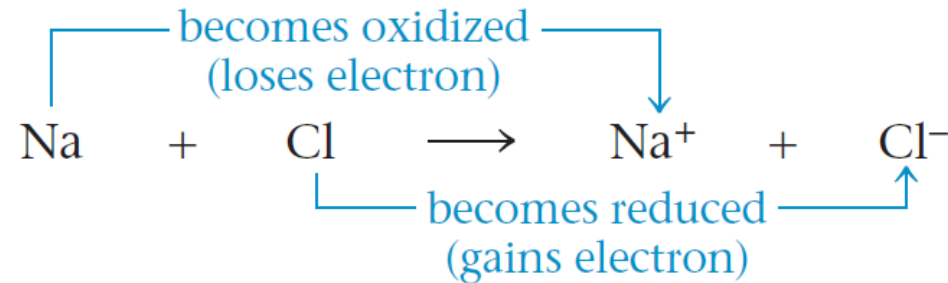
- Negatif ΔG , ürünlerin daha az enerji taşıdığını ve tepkimenin kendiliğinden gerçekleşebileceğini gösterir.
- Katabolik yollar doğrudan hücresel iş yapmaz; bunun yerine ATP üretimiyle işe güç sağlar.
- Hücrenin çalışmaya devam edebilmesi için ADP ve inorganik fosfattan (P_i) ATP üretmesi gerekir.
- Bu sürecin nasıl işlediğini anlayabilmek için şimdi oksidasyon ve indirgenme kavramlarına geçeceğiz.

Enerjinin Kaynağı: Elektronların Yolculuğu

- Glukoz ve diğer organik yakıtların parçalanması sırasında enerji, elektronların taşınması yoluyla açığa çıkar.
- Elektronların yeniden konumlanması, organik moleküllerdeki kimyasal enerjinin açığa çıkmasını sağlar.
- Bu serbest enerji, hücrelerde ATP sentezinde kullanılır.

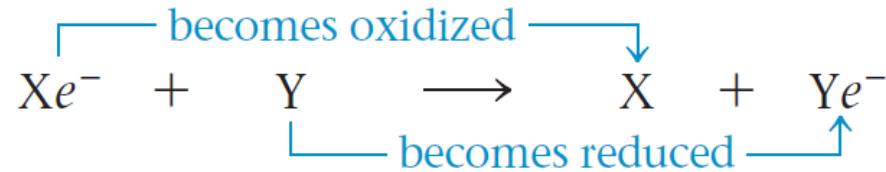
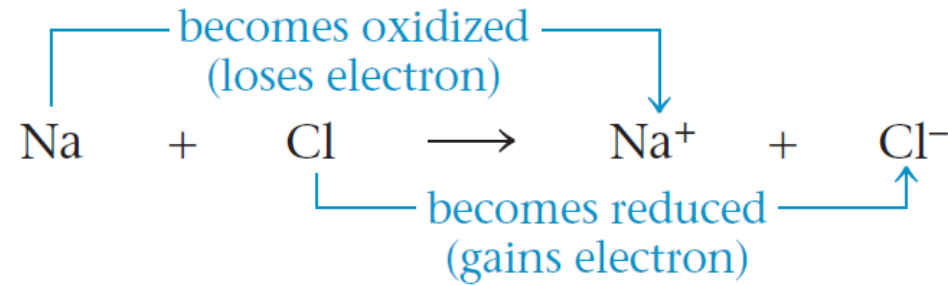
Redoks Reaksiyonlarının Temeli

- Elektron aktarımına dayalı tepkimelere redoks reaksiyonları denir.
- Elektron kaybı “oksidasyon”, elektron kazanımı ise “indirgenme” olarak adlandırılır.
- Negatif yüklü elektronların eklenmesi, atomun pozitifliğini azaltır; bu yüzden adı “indirgenme”dir.



Redoks Reaksiyonlarına Basit Bir Örnek

- Sodyum (Na) ile klor (Cl) arasında gerçekleşen tepkime, bir redoks reaksiyonudur.
- Bu tür tepkimelerde, bir madde elektron vererek indirgen maddeyi oluşturur (indirgen).
- Elektronu kabul eden madde ise oksitleyici maddedir (yükseltgen).

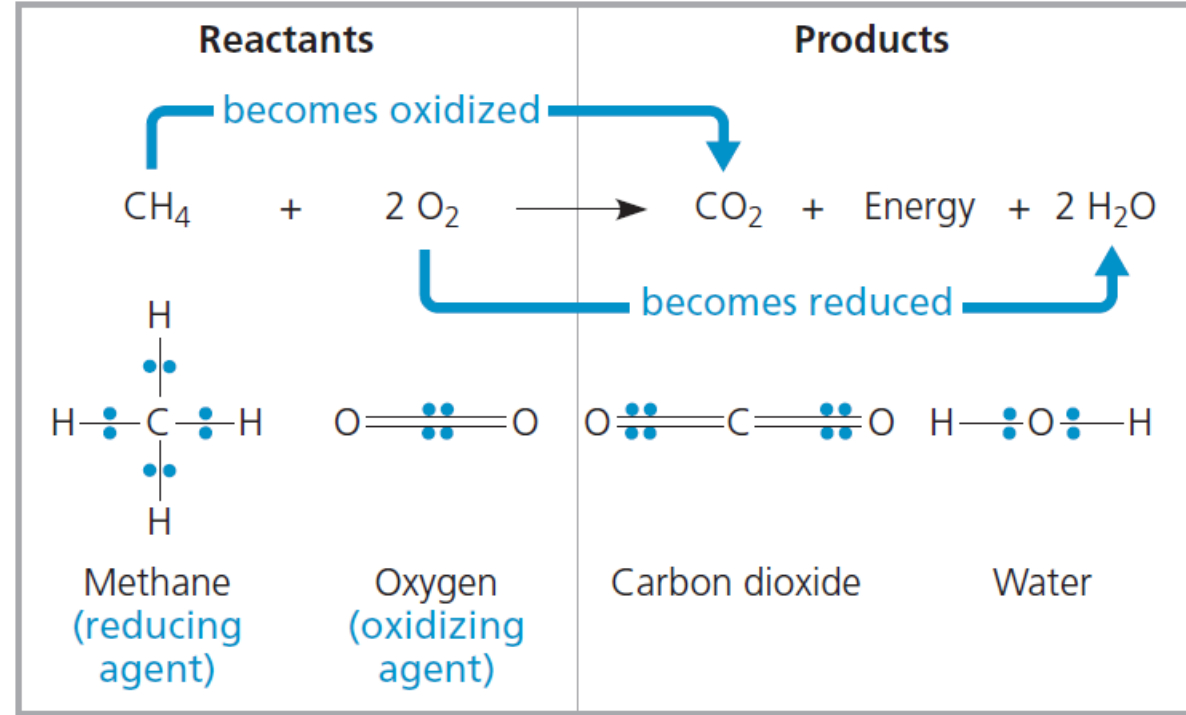


Redoks Her Zaman Tam Elektron Aktarımı Değildir

- Tüm redoks reaksiyonları elektronların tamamen aktarılmasıyla gerçekleşmez.
- Elektronların kovalent bağlar içinde paylaşım derecesi de değişebilir.
- Metan (CH_4) yanması, böyle bir kısmi elektron kaymasıyla gerçekleşen redoks örneğidir.

Metan Yanmasında Oksidasyon ve İndirgenme

- Karbon ve hidrojen benzer elektronegatifliğe sahip olduğundan, elektronlar eşit paylaşılır.
- Oksijen ile tepkime sonrası karbon, elektronlarını kısmen kaybeder ve oksitlenmiş olur.
- Oksijen, hidrojen ile bağ yaptığından elektronlara daha fazla sahip olur; bu nedenle indirgenmiş olur.

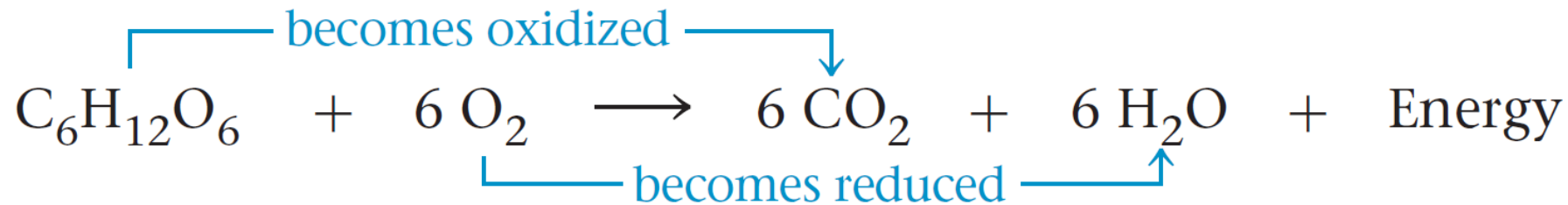


Elektronlar ve Enerji İlişkisi

- Elektronu atomdan uzaklaştırmak enerji gerektirir; bu, topu yokuş yukarı itmeye benzer.
- Daha elektronegatif atomlar, elektronlarını daha sıkı tutar.
- Elektronlar daha elektronegatif bir atoma kaydığında potansiyel enerji azalır.
- Bu enerji düşüşü, kimyasal enerji olarak kullanıma sunulur.

Hücresel Solunumda Redoksun Rolü

- Gaz ocağındaki metan yanması da bir redoks reaksiyonudur.
- *Ancak biyolojide en önemli redoks süreci, glukozun oksitlenmesidir:* hücresel solunum.
- Glukoz oksitlenir, oksijen indirgenir ve süreç boyunca enerji açığa çıkar.



Hidrojen Taşınımı ve Enerji Serbestleşmesi

- Hidrojenin glukozdan oksijene taşınması, elektronların enerji seviyesini düşürür.
- Bu düşüş sırasında açığa çıkan enerji, ATP üretiminde kullanılır.
- C—H bağlarından C—O bağlarına geçiş, redoks sürecinin tipik bir sonucudur.

Elektron Deposu Olarak Organik Moleküller

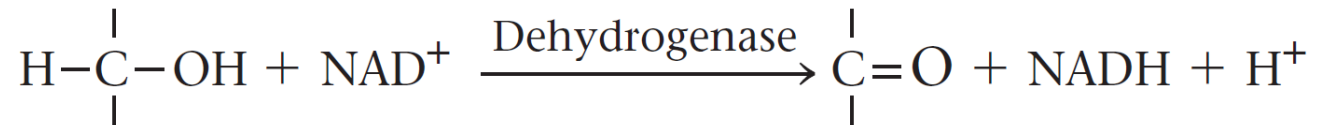
- Karbonhidratlar ve yağlar, C—H bağları sayesinde zengin enerji kaynaklarıdır.
- Bu bağlar, elektronların düşük enerjili hale geçişini sağlar.
- Bu geçişin ani olmaması için aktivasyon enerjisi engeli bulunur.

Enzimlerin Rolü ve Kontrollü Oksidasyon

- Aktivasyon enerjisi engeli olmazsa glukoz, oksijenle hemen tepkimeye girerdi.
- Enzimler, bu engeli düşürerek tepkimenin kontrollü şekilde gerçekleşmesini sağlar.
- Böylece, enerji bir anda ısıya dönüşmeden hücre tarafından kullanılabilir hale gelir.

Enerjiyi Adım Adım Toplamak: Neden Gerekli?

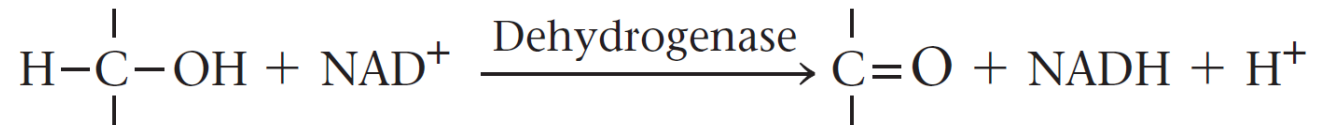
- Enerjinin bir yakıttan tek adımda serbest bırakılması, yapıcı işlerde verimli şekilde kullanılamaz.
- Hücresel solunumda glikoz tek adımda değil, enzimler tarafından katalizlenen ardışık basamaklarda yıkılır.
- Bu süreçte glikozdan elektronlar alınır; her elektron genellikle bir protonla birlikte, yani bir hidrojen atomu şeklinde taşınır.
- Bu hidrojenler doğrudan oksijene aktarılmaz; öncelikle NAD⁺ adlı bir koenzime iletilir.



NAD⁺:

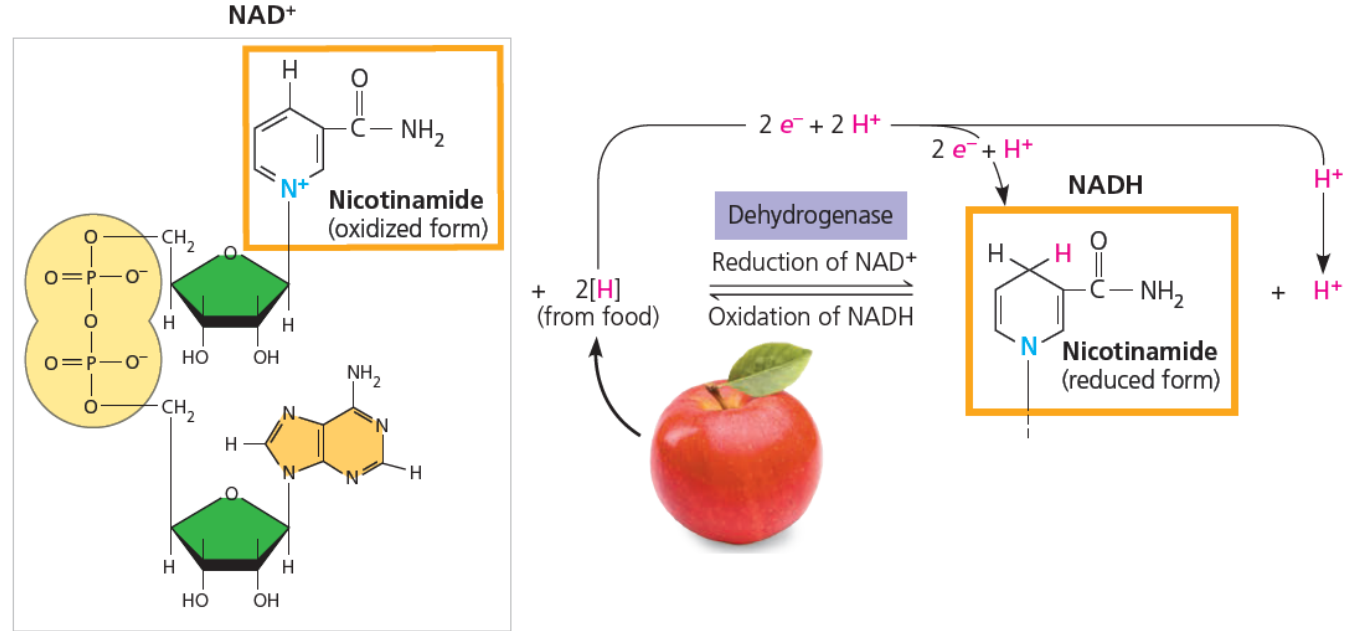
Elektronların Yol Arkadaşı

- NAD⁺, vitamin niasin'den türetilmiş bir koenzim olup, oksitlenmiş hali NAD⁺, indirgenmiş hali NADH olarak görev yapar.
- Bu koenzim, elektron taşıyıcılığı görevine uygun şekilde yapısal olarak indirgenip yükseltgenebilir.
- NAD⁺, hücre solunum sırasında glikozdan elektron alarak oksitleyici ajan olarak işlev görür.
- Böylece, NAD⁺ glikozun parçalanmasında yer alan birçok redoks tepkimesinde aktif bir roldedir.



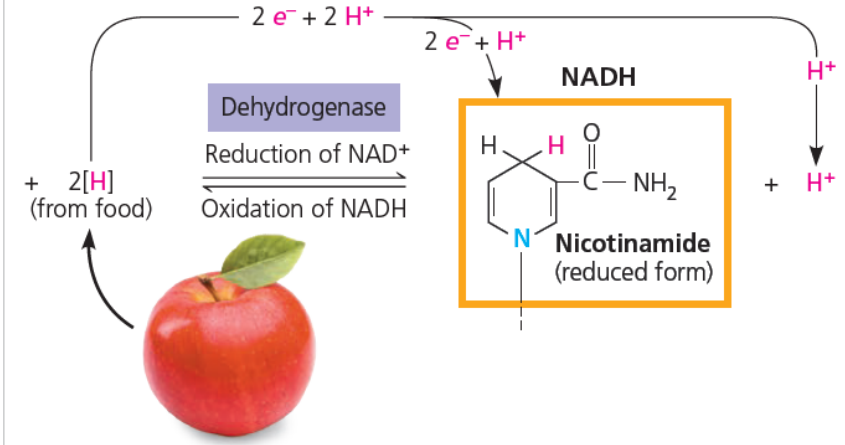
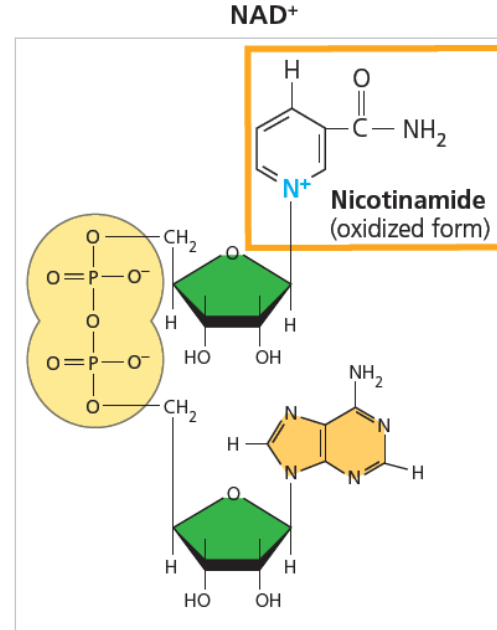
Dehidrogenazlar ve NAD^+ ile Etkileşimi

- Dehidrogenaz enzimleri, glikoz gibi organik moleküllerden 2 elektron ve 2 proton alarak substratı oksitler.
- Bu elektronlardan 2'si ve protonlardan 1'i NAD^+ 'a aktarılır; NAD^+ böylece NADH 'ye indirgenmiş olur.
- Diğer proton (H^+) ise çözeltiliye serbestçe salınır.



NADH: Depolanan Enerji Kaynağı

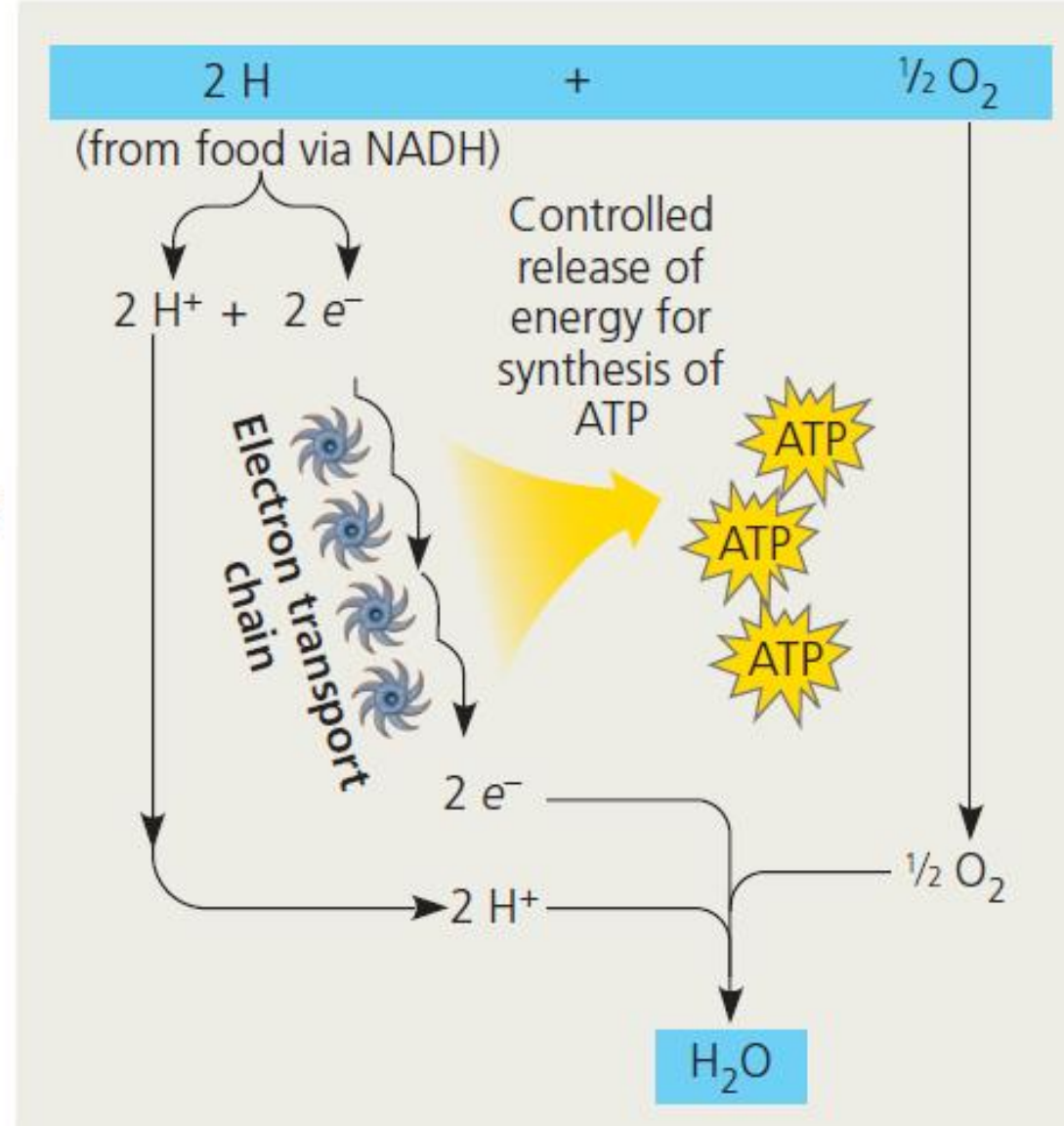
- NAD^+ , 2 negatif yüklü elektron ve yalnızca 1 pozitif yüklü proton olarak indirgenir; bu, net yük nötralizasyonu sağlar.
- NADH adındaki bu ürün, reaksiyonda alınan hidrojeni temsil eder.
- Hücresel solunumda oluşan her NADH molekülü, potansiyel enerji taşır.
- Bu enerji, elektronlar oksijene doğru enerji eğimli bir “düşüş” yaptığında ATP üretiminde kullanılır.



Elektronlar Oksijene Nasıl Ulaşır?

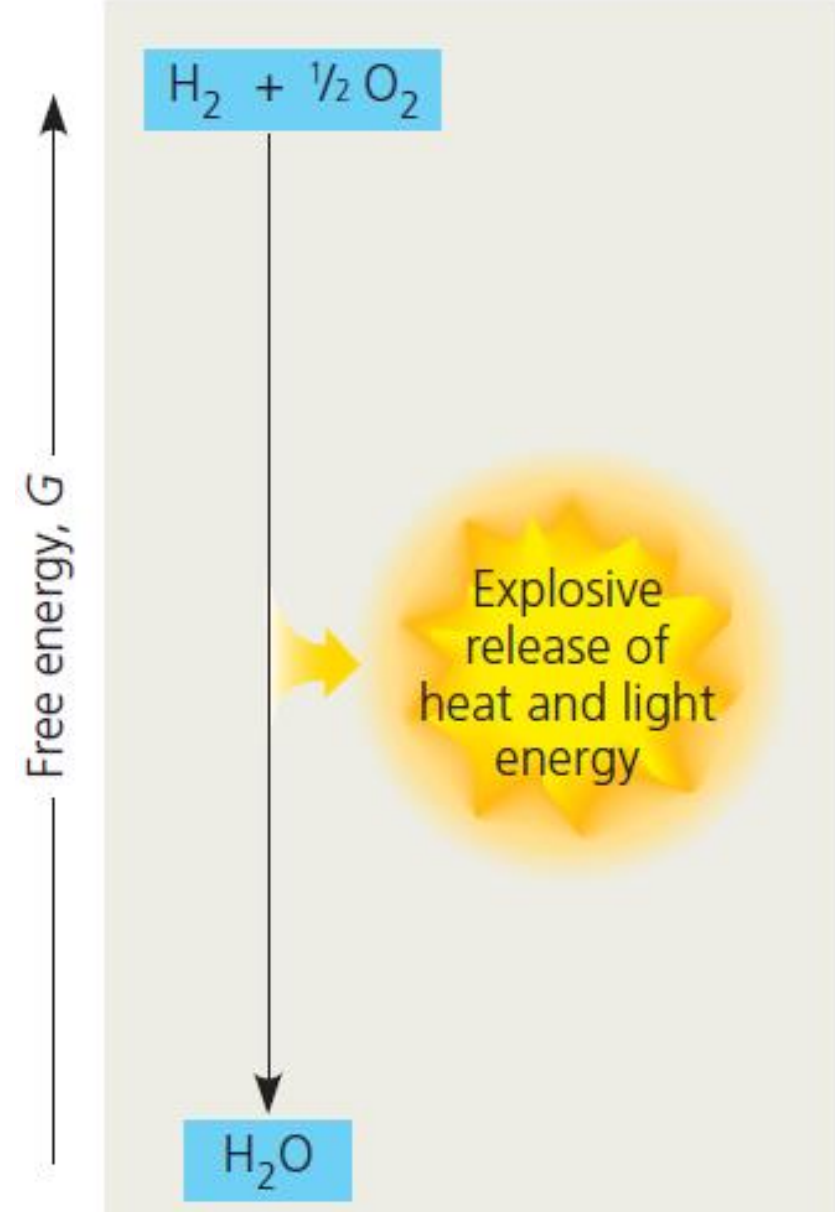
- Elektronlar, glikozdan NADH'ye geçerek potansiyel enerji kazanır.
- Bu elektronlar, bir dizi basamakta oksijene doğru aktarılırken kademeli enerji kaybı yaşar.
- Bu süreç, bir elektron taşıma zinciri aracılığıyla gerçekleşir.

Free energy, G



Elektron Taşıma Zinciri ve Kontrollü Enerji Salınımı

- Hidrojen ve oksijenin ani birleşmesi, yüksek miktarda enerji açığa çıkarır.
- Hücresel solunum ise bu birleşmeyi kontrollü hale getirerek enerjiyi küçük adımlarla serbest bırakır.
- Elektron taşıma zinciri, ökaryotlarda mitokondri iç zarında yer alır.
- Prokaryotlarda ise bu zincir, plazma zarında bulunur.



Zincirde Elektronların İzlediği Rota

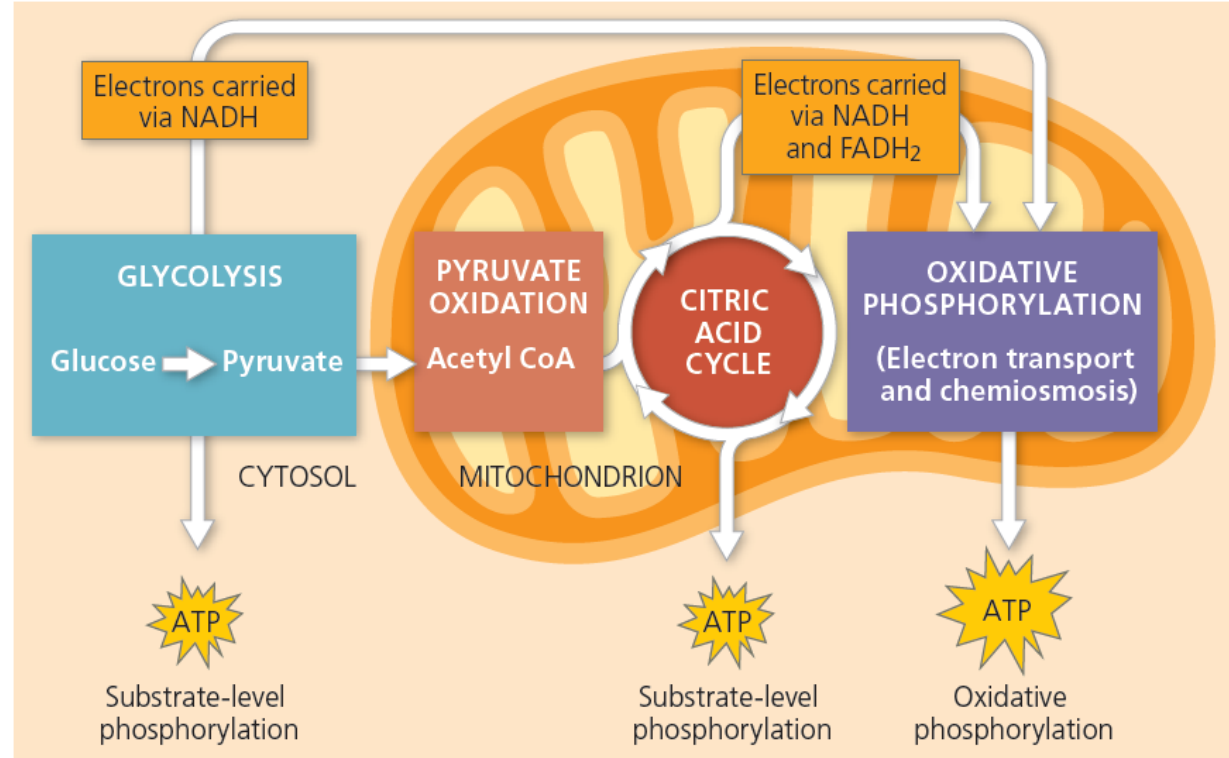
- NADH, elektronları zincirin yüksek enerjili “başlangıç” noktasına taşır.
- Elektronlar, enerji kaybederek “aşağı” doğru taşınır ve sonunda oksijen tarafından yakalanır.
- Bu sırada H^+ iyonları ile birleşerek su oluşur.
- Oksijensiz solunum yapan prokaryotlarda zincirin sonunda farklı bir elektron alıcısı bulunur.

Elektronların Enerji Eğimli Düşüşü

- NADH'den oksijene elektron transferi ekzergonik bir tepkimedir; serbest enerji değişimi -53 kcal/mol'dür.
- Bu enerji, zincirdeki her taşıyıcı molekül aracılığıyla küçük miktarlarda serbest bırakılır.
- Zincirdeki her “alt basamak”, bir öncekinden daha elektronegatiftir ve onu oksitleyebilir.
- Oksijen, zincirin en sonunda yer alır ve en kararlı konumda elektronu tutar.

Hücresel Solunumun Genel Aşamaları

- Hücresel solunum, glikozdan enerji elde edilmesini sağlayan üç ana metabolik aşamadan oluşur.
- **Bu aşamalar:** glikoliz, sitrik asit döngüsü (öncesinde pirüvat oksidasyonu) ve oksidatif fosforilasyondur.
- Bu üç aşama bir bütün halinde çalışarak, glikozun içindeki kimyasal enerjiyi açığa çıkarır.

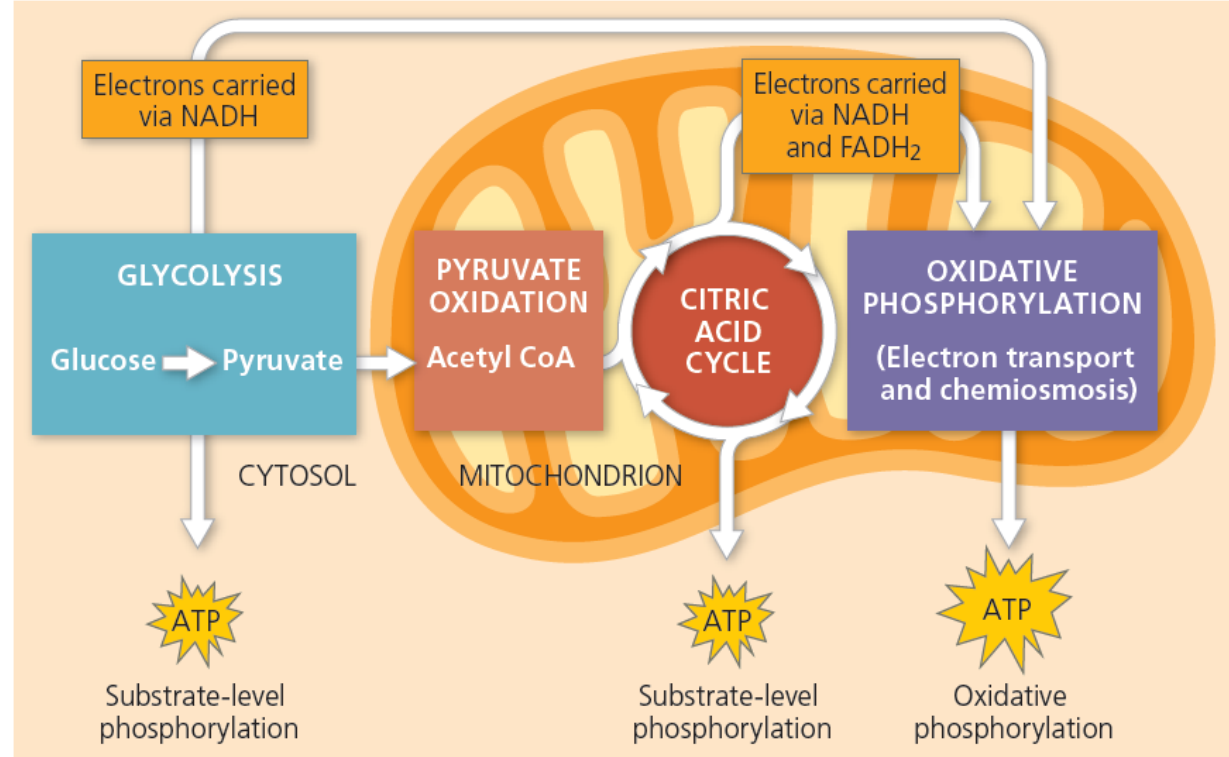


Glikoliz Neden Hücresel Solunuma Dahildir?

- Biyokimyacılar, genellikle hücresel solunumu ikinci ve üçüncü aşamalarla sınırlandırır.
- Ancak burada, glikoliz de hücresel solunuma dahil edilmiştir.
- Çünkü glikoliz, glikozdan elde edilen enerjinin önemli bir kısmını başlatan evredir.
- Birçok hücre, sitrik asit döngüsüne başlamadan önce mutlaka glikolizden geçer.

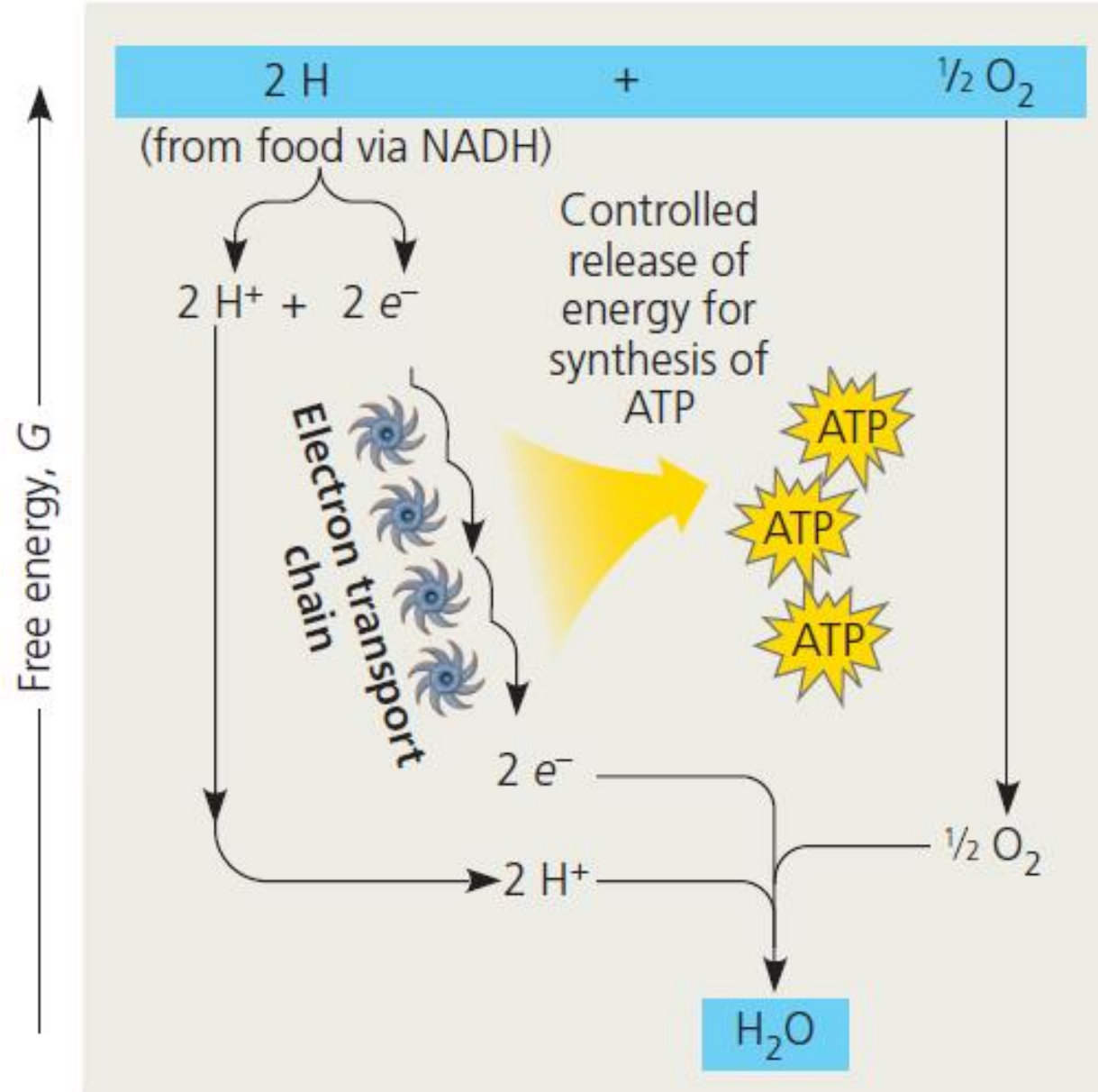
Glikozun Parçalanma Yolculuğu

- Glikoliz, sitozolde gerçekleşir ve glikozu iki pirüvat molekülüne dönüştürür.
- Ökaryotlarda bu pirüvat, mitokondriye girerek asetil CoA'ya oksitlenir.
- Asetil CoA, sitrik asit döngüsüne katılır ve burada glikozun tamamen karbondioksite dönüşümü tamamlanır.
- Prokaryotlarda ise bu süreçlerin tümü sitozolde gerçekleşir.



Elektron Taşınımı ve Enerji Taşınması

- Glikoliz ve sitrik asit döngüsündeki bazı adımlar redoks tepkimeleridir.
- Bu tepkimelerde, dehidrogenaz enzimleri elektronları NAD^+ veya FAD 'a aktararak NADH ve FADH_2 oluşturur.
- Oksidatif fosforilasyon evresinde, bu elektron taşıyıcılar elektronları taşıma zincirine verir.
- Zincirin sonunda elektronlar oksijenle birleşerek su oluşturur.

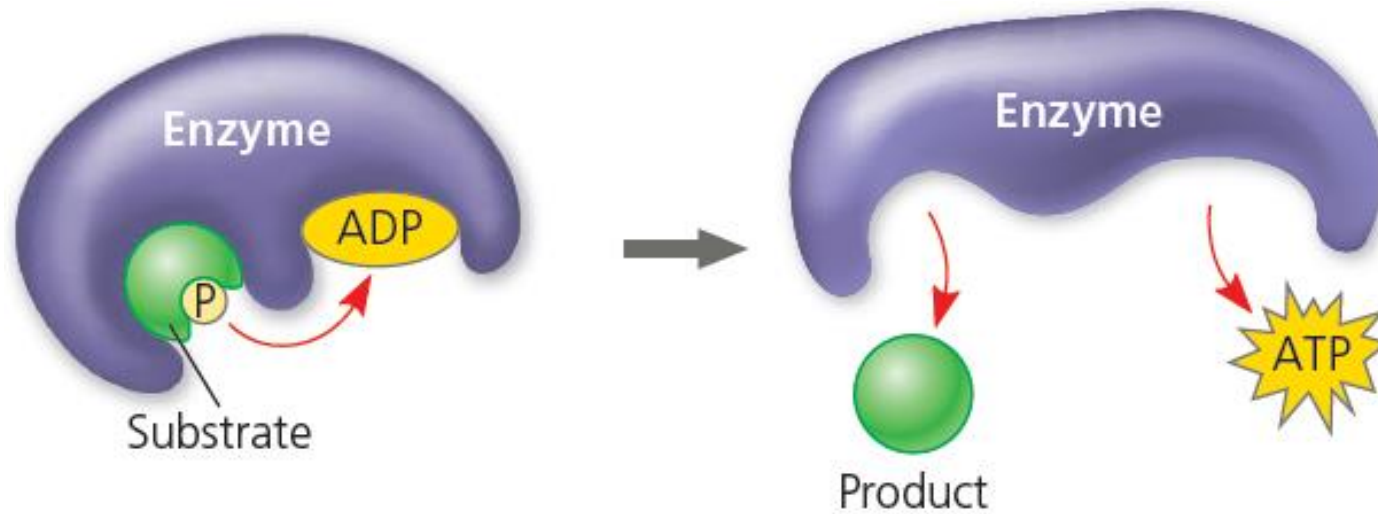


Oksidatif Fosforilasyon ve ATP Üretimi

- Elektron taşıma zincirindeki her adımda serbest kalan enerji, ATP üretimi için kullanılır.
- Bu süreç, redoks tepkimeleriyle çalıştığı için “oksidatif fosforilasyon” adını alır.
- Ökaryotlarda bu olay mitokondrinin iç zarında, prokaryotlarda ise plazma zarında gerçekleşir.
- Oksidatif fosforilasyon, hücresel solunumla üretilen ATP’nin yaklaşık %90’ını oluşturur.

Substrat Düzeyinde Fosforilasyon

- ATP üretiminin daha küçük bir kısmı, glikoliz ve sitrik asit döngüsünde doğrudan gerçekleşir.
- Bu tür ATP üretimi, “substrat düzeyinde fosforilasyon” olarak adlandırılır.
- Burada bir enzim, bir substrat molekülünden ADP’ye doğrudan fosfat grubu aktarır.



Enerji Dönüşümünün Analojiyle Açıklanması

- Hücresel solunumun enerji dönüşümünü, bankadan para çekmeye benzetebiliriz.
- Glikozun içerdiği büyük miktarda enerji, ATP gibi küçük enerji birimlerine dönüştürülür.
- Bu, hücrenin enerji ihtiyacını daha verimli karşılamasını sağlar.
- Bir glikoz molekülü, yaklaşık 32 ATP üretir; her biri 7.3 kcal/mol enerji taşır.

Devam Etmeden Önce: Büyük Resme Genel Bakış

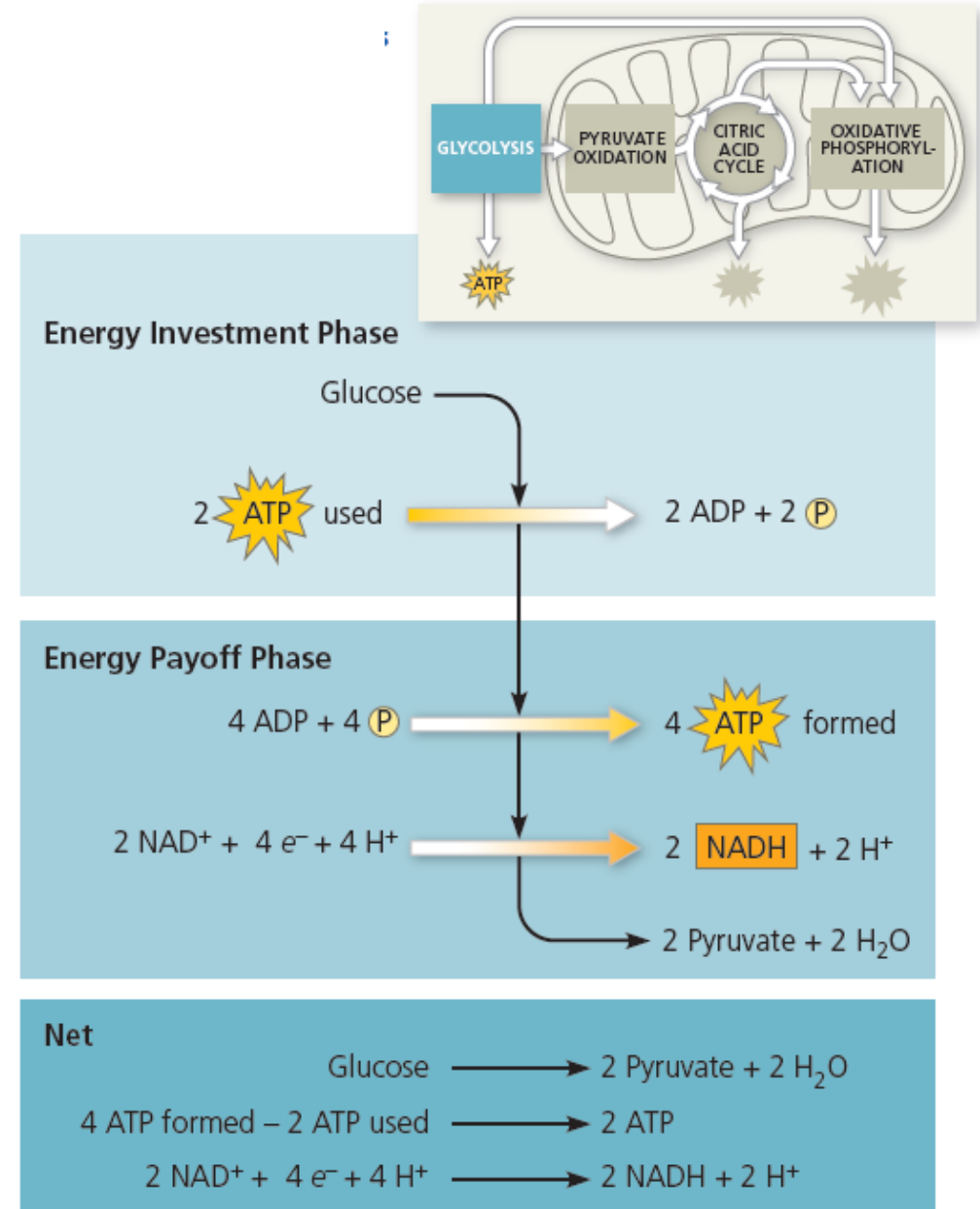
- Şimdiye kadar glikoliz, sitrik asit döngüsü ve oksidatif fosforilasyonun genel hatlarını gördük.
- Bu üç aşama, hücresel solunumun temel taşlarıdır.
- Bundan sonraki kısımda bu aşamaların her birini ayrıntılı olarak inceleyeceğiz.
- Böylece hücrenin enerji üretim sürecini çok daha net anlayabileceğiz.

Glikozun Parçalanmasıyla Enerji Elde Etmek

- Glikoliz, altı karbonlu glikozun iki adet üç karbonlu şekerle bölünmesiyle başlar.
- Bu küçük şekerler daha sonra oksitlenir ve iki adet pirüvat molekülüne dönüştürölür.
- Pirüvat, pirüvik asidin iyonlaşmış hâlidir.
- Bu süreçte karbon kaybı olmaz; tüm karbon atomları pirüvatlarda korunur.

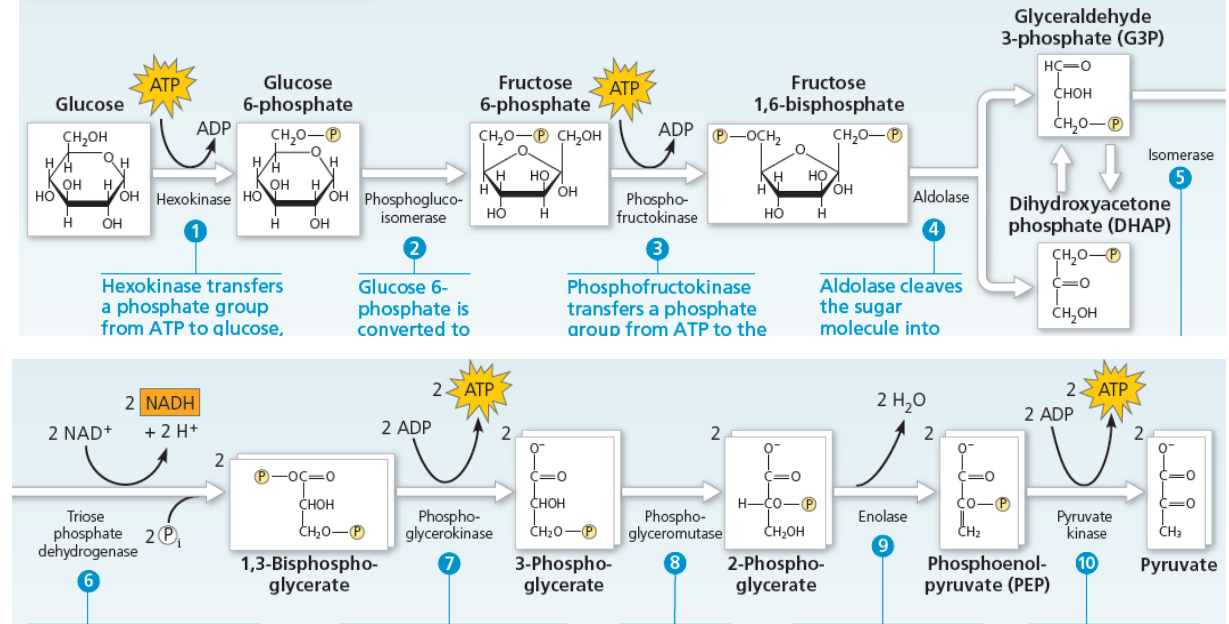
Enerji Yatırımı ve Getirisi

- *Glikoliz iki ana aşamaya ayrılır:* enerji yatırım aşaması ve enerji kazanç aşaması.
- İlk aşamada hücre ATP harcar, ikinci aşamada ise ATP üretimi gerçekleşir.
- Substrat düzeyinde fosforilasyonla ATP üretilirken, NAD^+ molekülü NADH 'ye indirgenir.
- Glikoz başına net enerji kazancı 2 ATP ve 2 NADH şeklindedir.



Glikoliz Basamakları

- Glikoliz on adımdan oluşan bir kimyasal reaksiyonlar dizisidir.
- Her adım, farklı enzimler tarafından katalizlenir ve sürecin sürekliliğini sağlar.
- Bu adımlar enerji dönüşümü ve ara ürünlerin oluşumu açısından kritik öneme sahiptir.



Oksijen Varlığında Glikoliz Sonrası Süreç

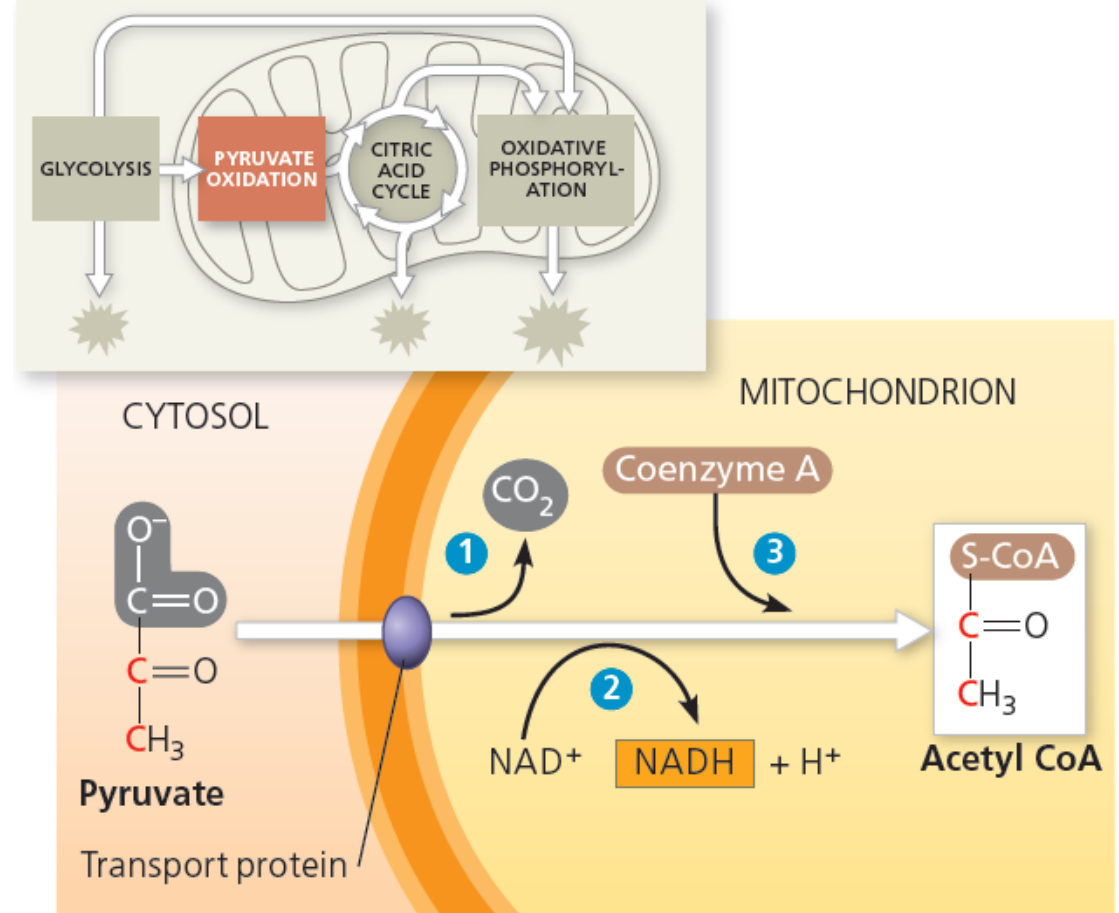
- Glikoliz oksijen varlığından bağımsız olarak gerçekleşebilir.
- Ancak O_2 mevcutsa, pirüvat ve NADH'deki kimyasal enerji daha verimli şekilde kullanılabilir.
- Bu enerji, pirüvat oksidasyonu, sitrik asit döngüsü ve oksidatif fosforilasyonla açığa çıkar.
- Süreç, hücrelerin daha fazla ATP üretmesini sağlar.

Pirüvatın Mitokondriye Taşınması ve Oksidasyonu

- Oksijenli ortamda, ökaryot hücrelerde pirüvat aktif taşıma ile mitokondriye alınır.
- Prokaryot hücrelerde bu reaksiyonlar sitozolde gerçekleşir.
- Bu aşama glikoliz ile sitrik asit döngüsü arasındaki geçiş adımıdır.
- Bir sonraki adımda pirüvat asetil CoA'ya dönüştürülür.

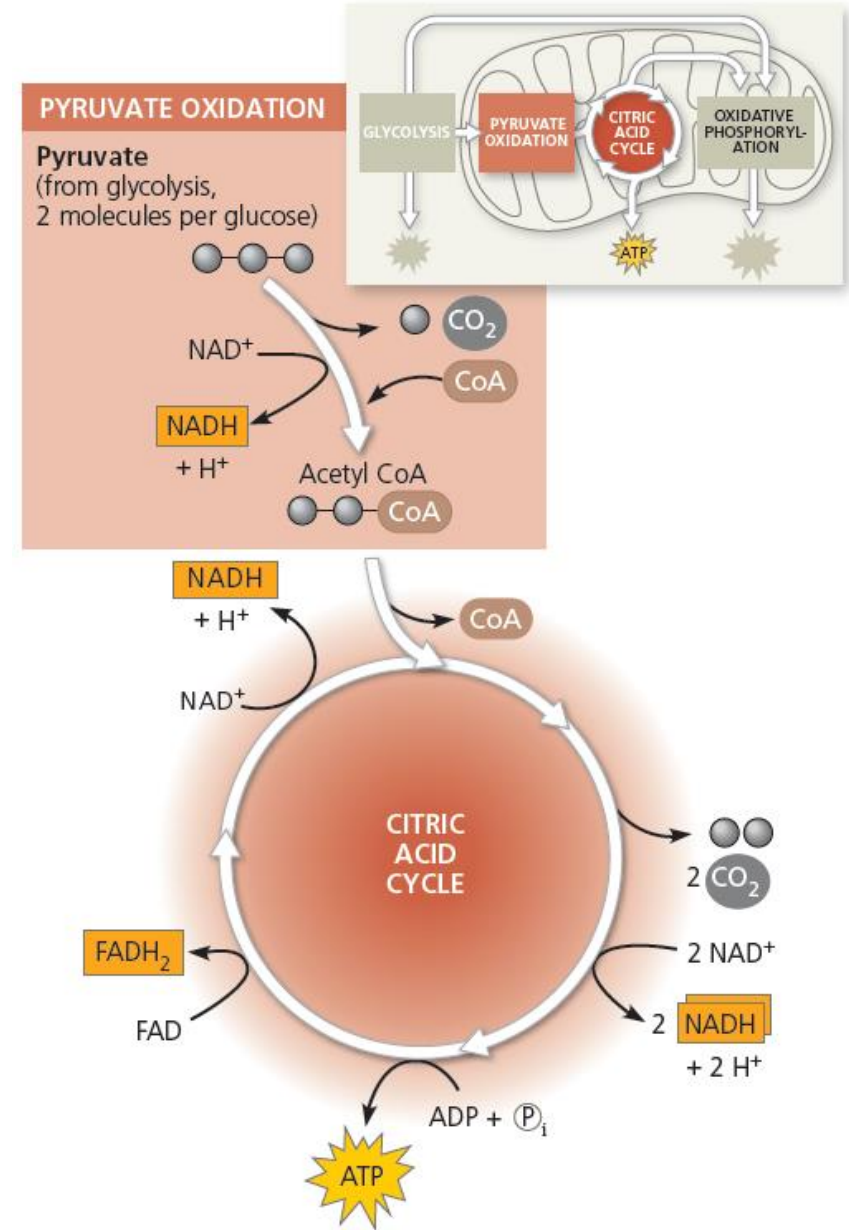
Asetil CoA'ya Dönüşüm Süreci

- İlk olarak, pirüvatın karboksil grubu tam oksitlenir ve CO_2 olarak ayrılır.
- Kalan iki karbonlu yapı NAD^+ tarafından oksitlenir ve NADH oluşur.
- Ardından CoA, bu iki karbonlu yapıya bağlanarak yüksek enerjili asetil CoA'yı oluşturur.
- Bu molekül, sitrik asit döngüsüne asetil grubunu aktararak enerji üretimini başlatır.



Sitrat Döngüsünün Temel Rolü

- Sitrat döngüsü, pirüvattan türeyen organik yakıtları daha da oksitleyen bir metabolik fırın gibi işler.
- Yanda, bu süreçte pirüvatın 3 CO₂ molekülüne dönüşümünü ve buna bağlı giriş-çıkışları özetlenmiştir.
- Her döngü dönüşünde, substrat düzeyinde fosforilasyonla 1 ATP üretilir.
- Kimyasal enerjinin büyük kısmı NAD⁺ ve FAD'a aktarılarak NADH ve FADH₂ oluşur.

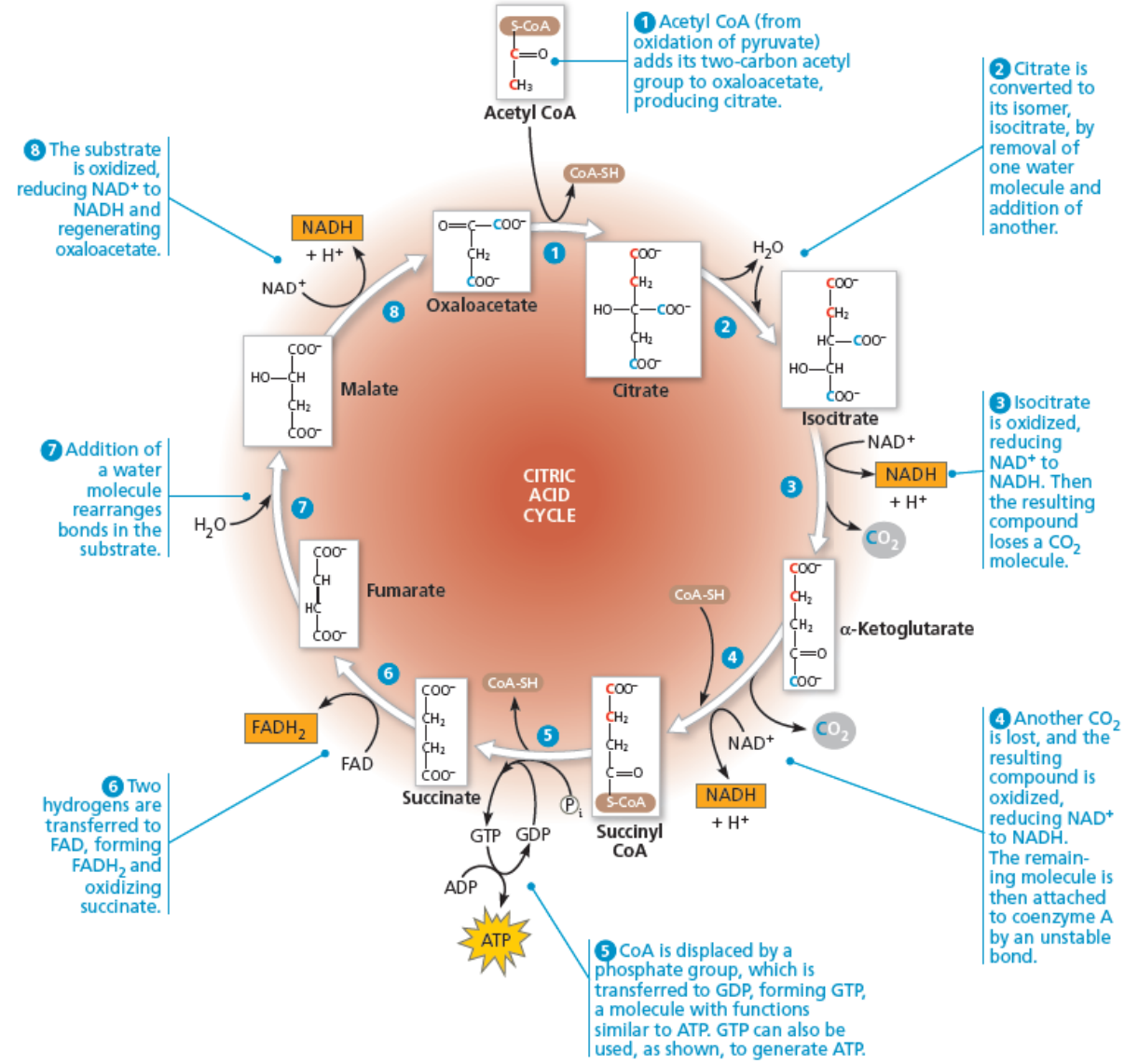


NADH ve FADH₂'nin Önemi

- NADH ve FADH₂, yüksek enerjili elektronları elektron taşıma zincirine taşır.
- Sitrat döngüsüne aynı zamanda trikarboksilik asit döngüsü veya Krebs döngüsü denir.
- "Krebs" ismi, bu yolu 1930'larda ayrıntılı olarak açıklayan bilim insanı Hans Krebs'e atıftır.
- Döngü, glikozdan türeyen karbonların sistemli şekilde oksitlenmesini sağlar.

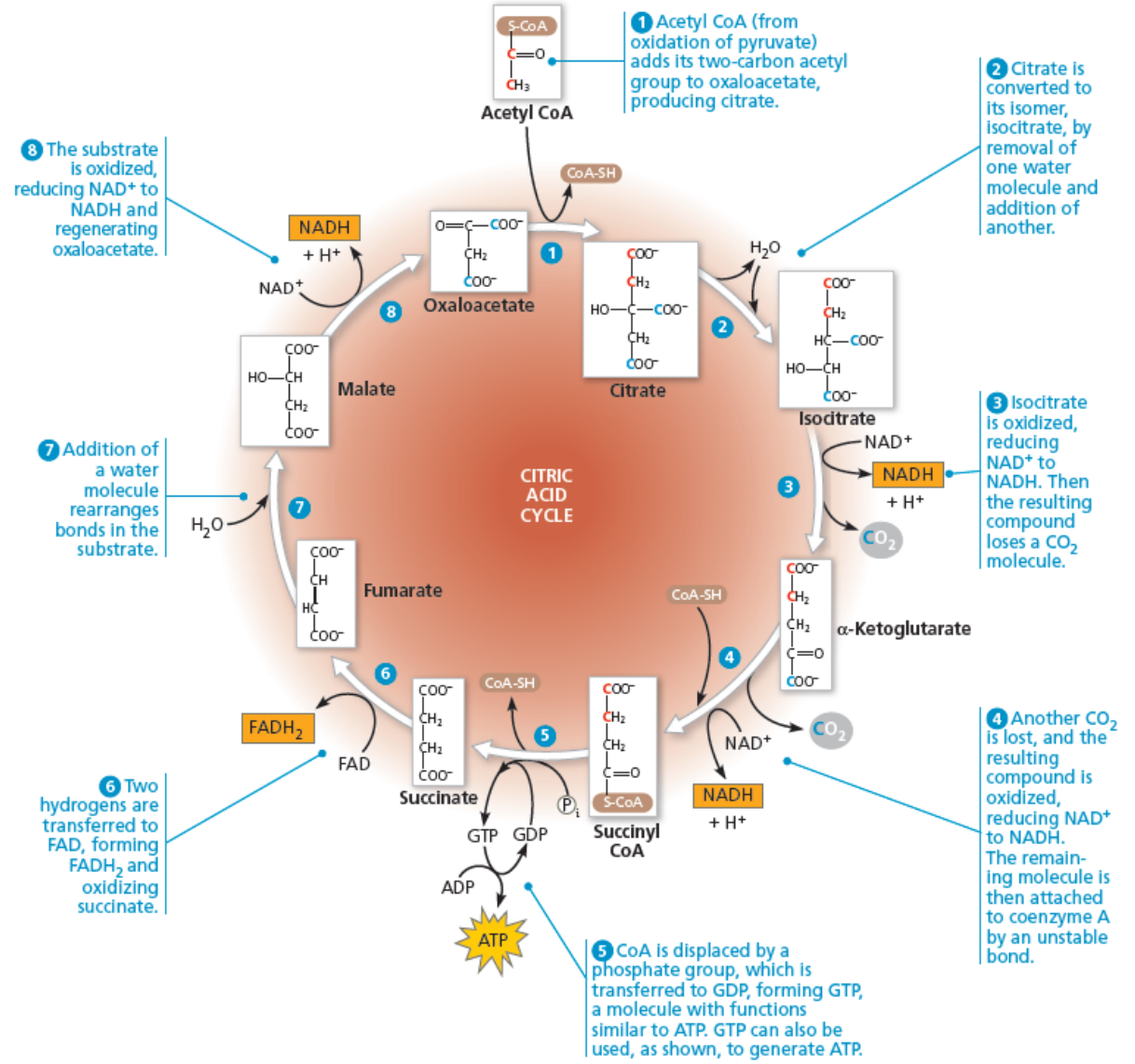
Sitrat Döngüsünün Yapısı ve Başlangıcı

- Döngü sekiz adımdan oluşur ve her adım özel bir enzimle katalizlenir.
- Her dönüşte, iki karbonlu asetil grubu (kırmızı) döngüye girer (Adım 1).
- Farklı iki karbon (mavi) CO₂ olarak dışarı atılır (Adımlar 3 ve 4).
- Asetil CoA, oksaloasetat ile birleşerek sitrati oluşturur (Adım 1).



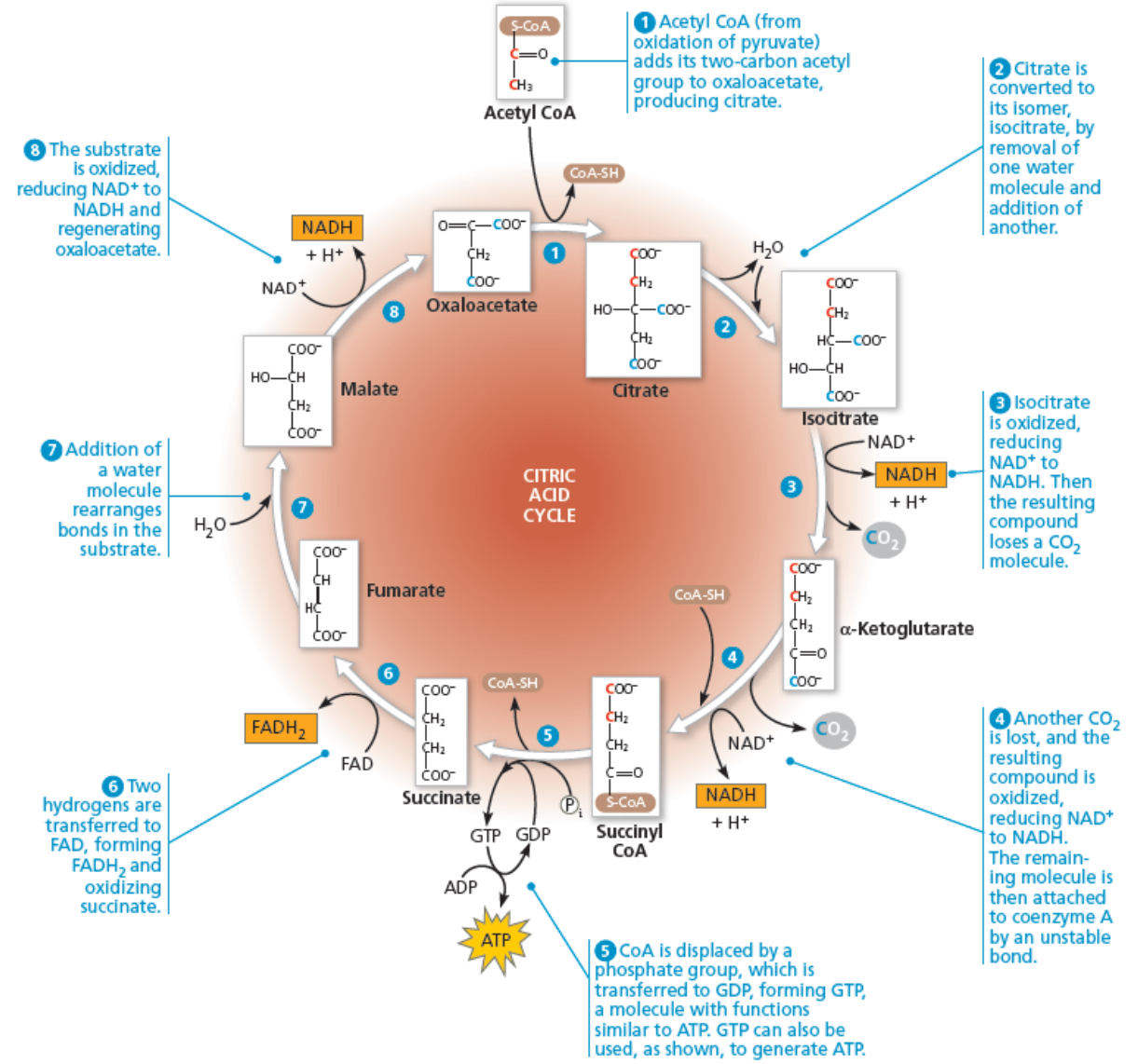
Sitratin Yıkımı ve Döngünün Tamamlanması

- Sitrata, sonraki yedi adımda yeniden oksaloasetata dönüştürülür.
- Bu geri dönüşüm, sürecin bir döngü olmasını sağlar.
- Her dönüşte NAD^+ üç kez NADH 'a indirgenir (Adımlar 3, 4 ve 8).
- Elektronlar bir kez FAD 'a aktarılır ve FADH_2 oluşur (Adım 6).



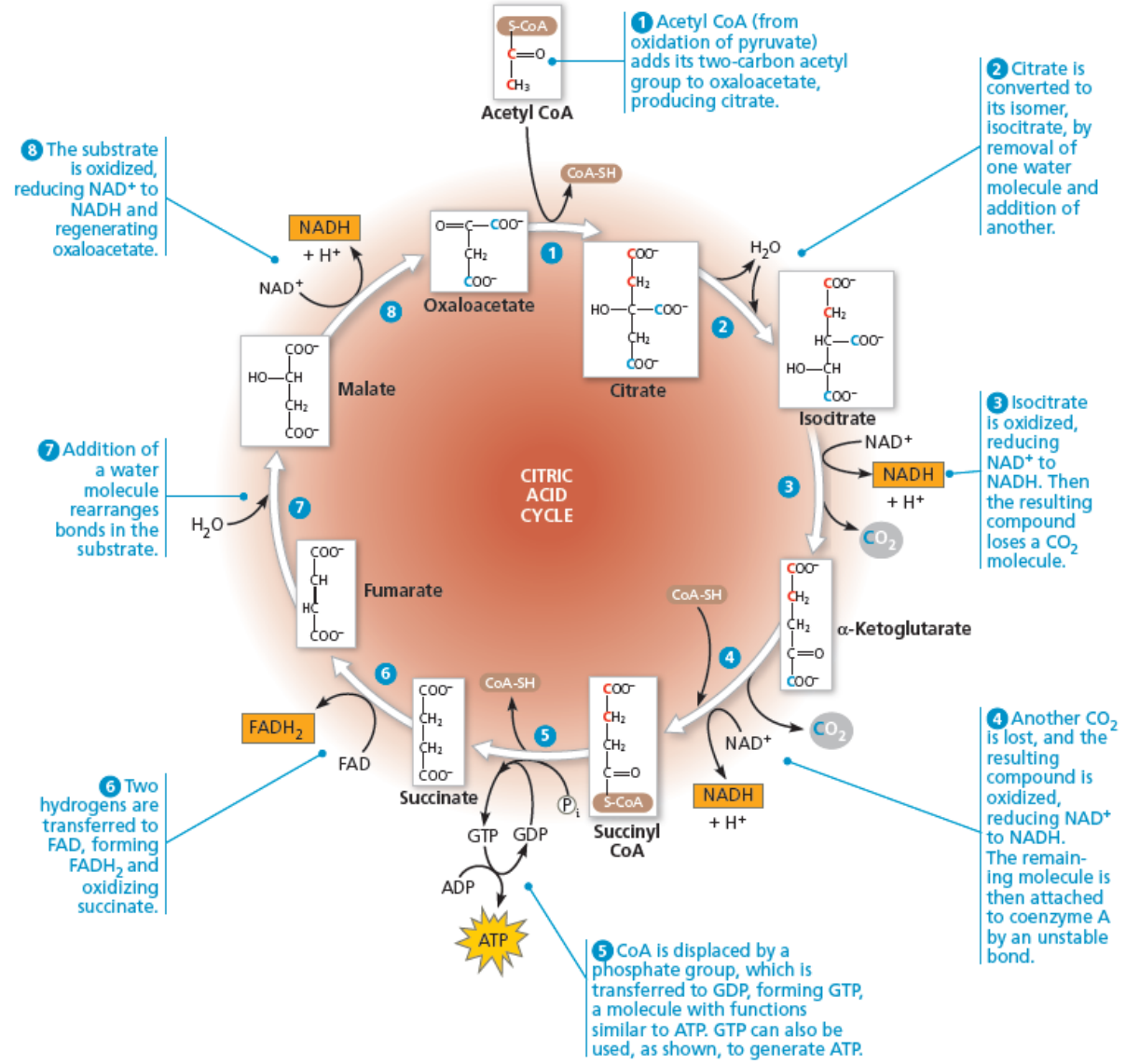
ATP ve GTP Üretimi (Adım 5)

- Hayvan hücrelerinde, 5. adımda substrat düzeyinde fosforilasyonla GTP üretilir.
- GTP, ya doğrudan hücrede işe yarar ya da ATP'ye dönüşebilir.
- Bitki, bakteri ve bazı hayvan hücrelerinde ise doğrudan ATP oluşur.
- Döngü boyunca elde edilen tek ATP, bu adımdaki üretimdir.



Glikoz Başına Toplam Verim

- Her glikozdan iki asetil CoA oluştuğu için döngü iki kez döner.
- Toplamda 6 NADH, 2 FADH₂ ve 2 ATP (ya da eşdeğer GTP) üretilir.
- Enerji açısından zengin bu ürünler sonraki aşamada değerlendirilir.
- Bu moleküller, oksidatif fosforilasyonun temel yakıtıdır.



Oksidatif Fosforilasyona Geçiş

- Solunumdan elde edilen ATP'nin çoğu oksidatif fosforilasyonla üretilir.
- Sitrat döngüsünde oluşan NADH ve FADH₂, elektron taşıma zincirine elektron taşır.
- Bu süreçte serbestlenen enerji, ADP'nin ATP'ye fosforillenmesini sağlar.

Elektron Taşıma Zincirine Genel Bakış

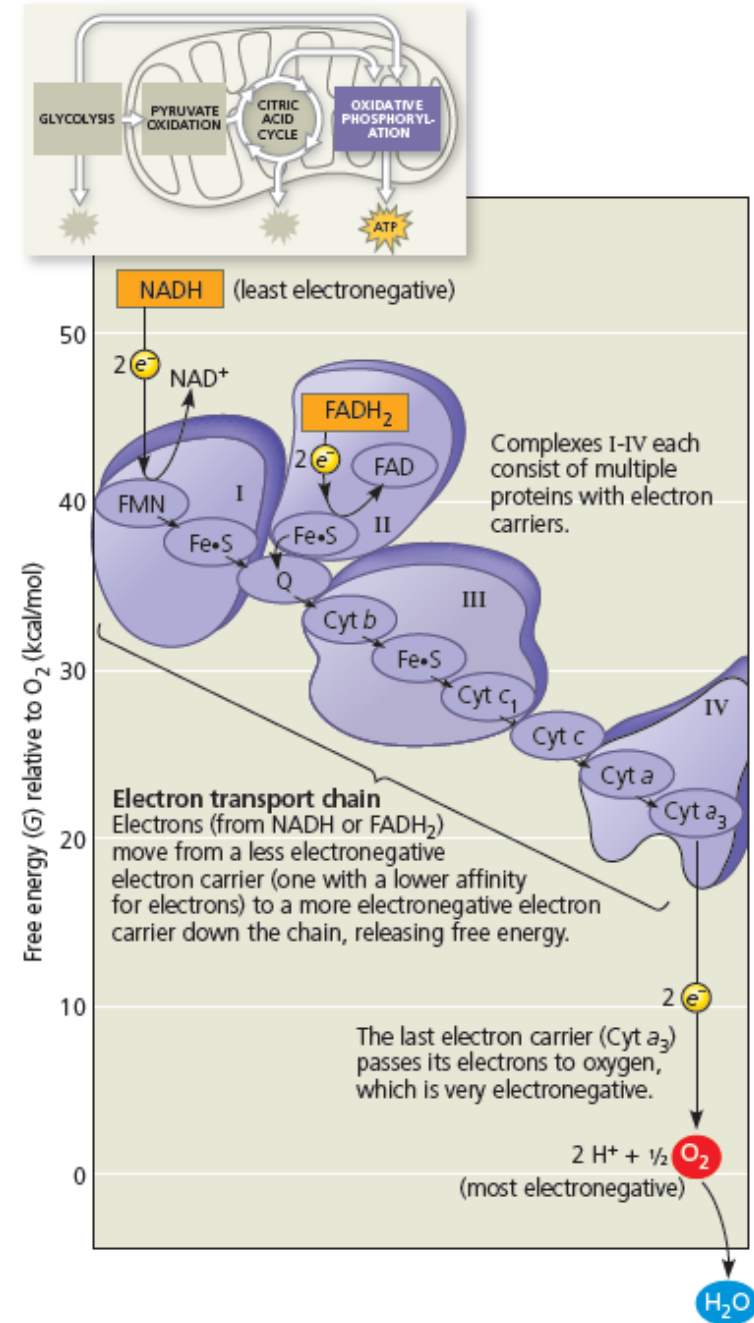
- Elektron taşıma zinciri, ökaryot hücrelerde mitokondrinin iç zarına gömülü moleküllerden oluşan bir sistemdir.
- Prokaryotlarda bu moleküller plazma zarında yer alır.
- İç zarın kıvrımlı yapısı (krista), zincirin her bir bileşeninin binlerce kopyasının yerleşebileceği geniş bir yüzey sunar.
- Bu yapı, sırayla gerçekleşen redoks tepkimeleri için oldukça uygundur.

Zincirin Temel Yapısı ve Görevleri

- Zincirdeki bileşenlerin çoğu, I'den IV'e numaralandırılmış multiprotein kompleksleri şeklinde organize olmuştur.
- Bu proteinlere sıkıca bağlı prostetik gruplar, enzimlerin katalitik işlevleri için hayati önem taşır.
- Prostetik gruplar arasında koenzimler ve kofaktörler yer alır.
- Zincir boyunca gerçekleşen redoks tepkimeleri, elektron taşıma sürecini yönlendirir.

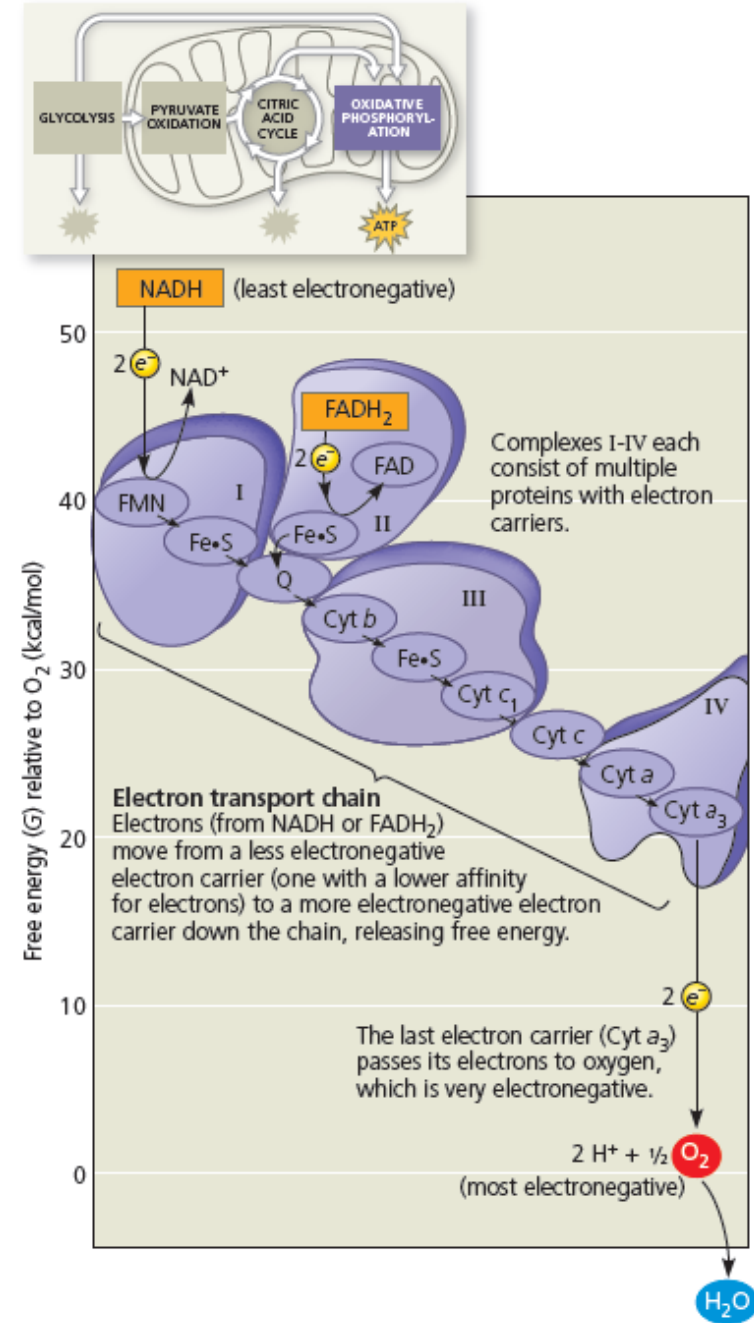
Elektronların Enerji Yolculuğu

- Elektron taşıyıcılar, elektron alıp verdikçe indirgenmiş ve yükseltgenmiş halleri arasında dönüşüm geçirir.
- Her bileşen, elektronu kendisinden daha az elektronegatif olan bir "yukarı komşu"dan alır.
- Ardından, elektronu kendisinden daha çok elektronegatif olan bir "aşağı komşu"ya verir.
- Böylece elektronlar, serbest enerji seviyeleri gittikçe azalarak zincir boyunca yol alır.



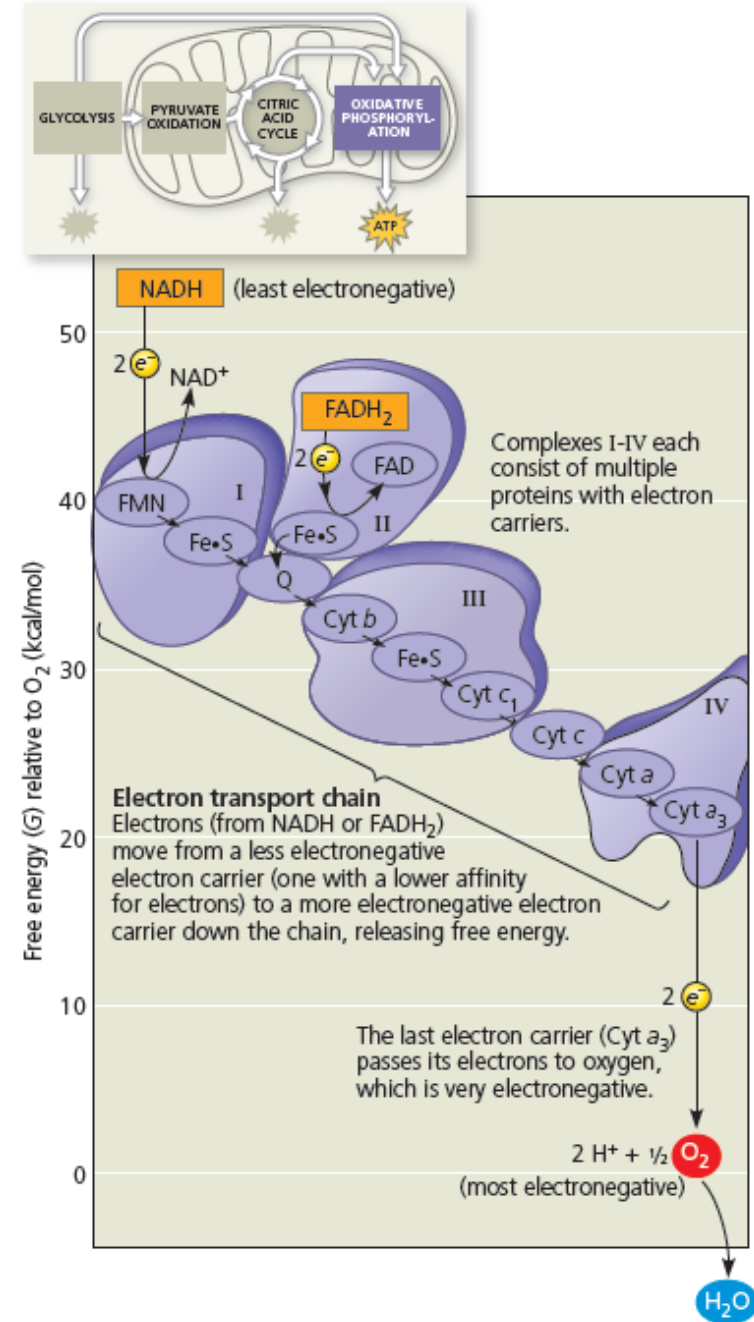
Kompleks I: NADH'tan Başlayan Aktarım

- Glikoliz ve sitrik asit döngüsünden gelen NADH, elektronlarını kompleks I'deki ilk moleküle aktarır.
- Bu molekül, flavin mononükleotid (FMN) içeren bir flavoproteindir.
- FMN, elektronu aldıktan sonra yükseltgenerek onu demir-kükürt (Fe·S) proteinine aktarır.
- Fe·S proteini ise elektronu ubikinona (Q) geçirir.



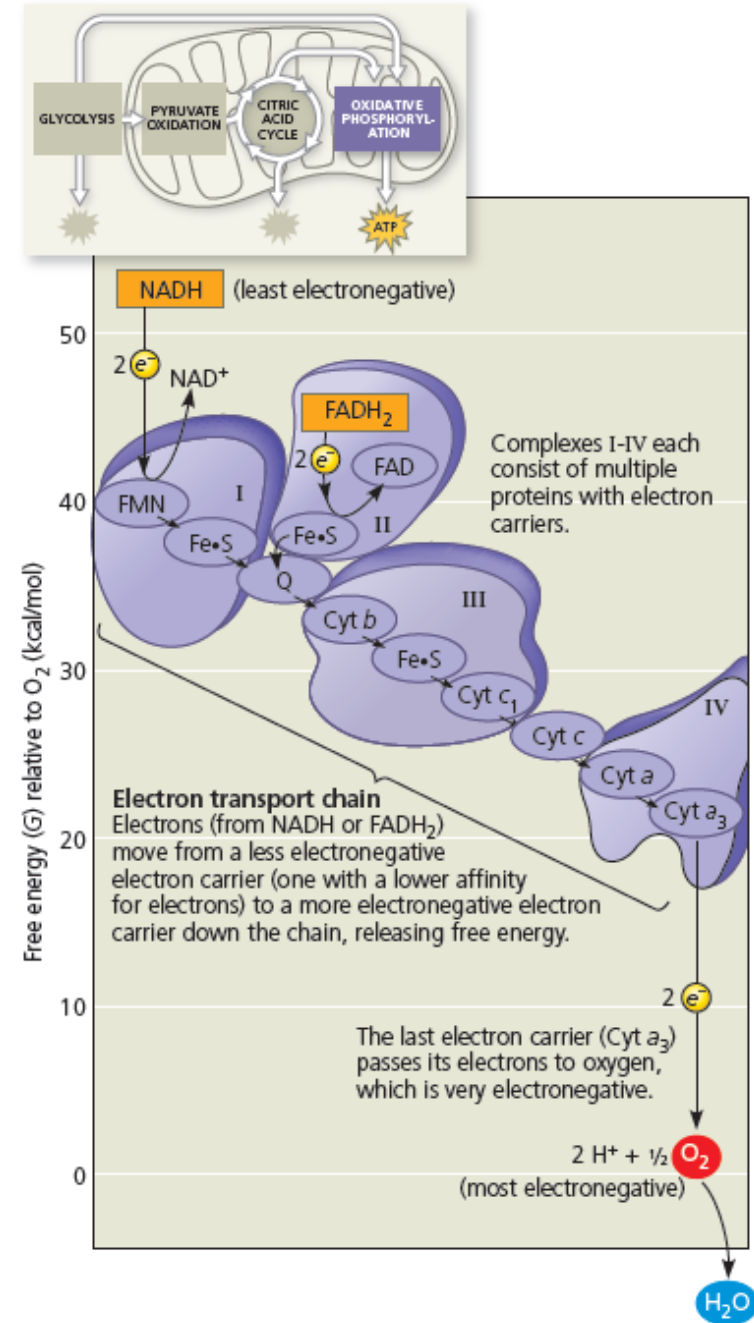
Ubikinon ve Zincirdeki Hareketi

- Ubikinon, zincirdeki tek protein olmayan elektron taşıyıcısıdır.
- Küçük ve hidrofobik yapısıyla zar içinde serbestçe hareket edebilir.
- Diğer adı koenzim Q olan bu molekül, komplekslere bağlı olmadan görev yapar.
- Zincirdeki esnek rolü sayesinde farklı kompleksler arasında bağlantı sağlar.



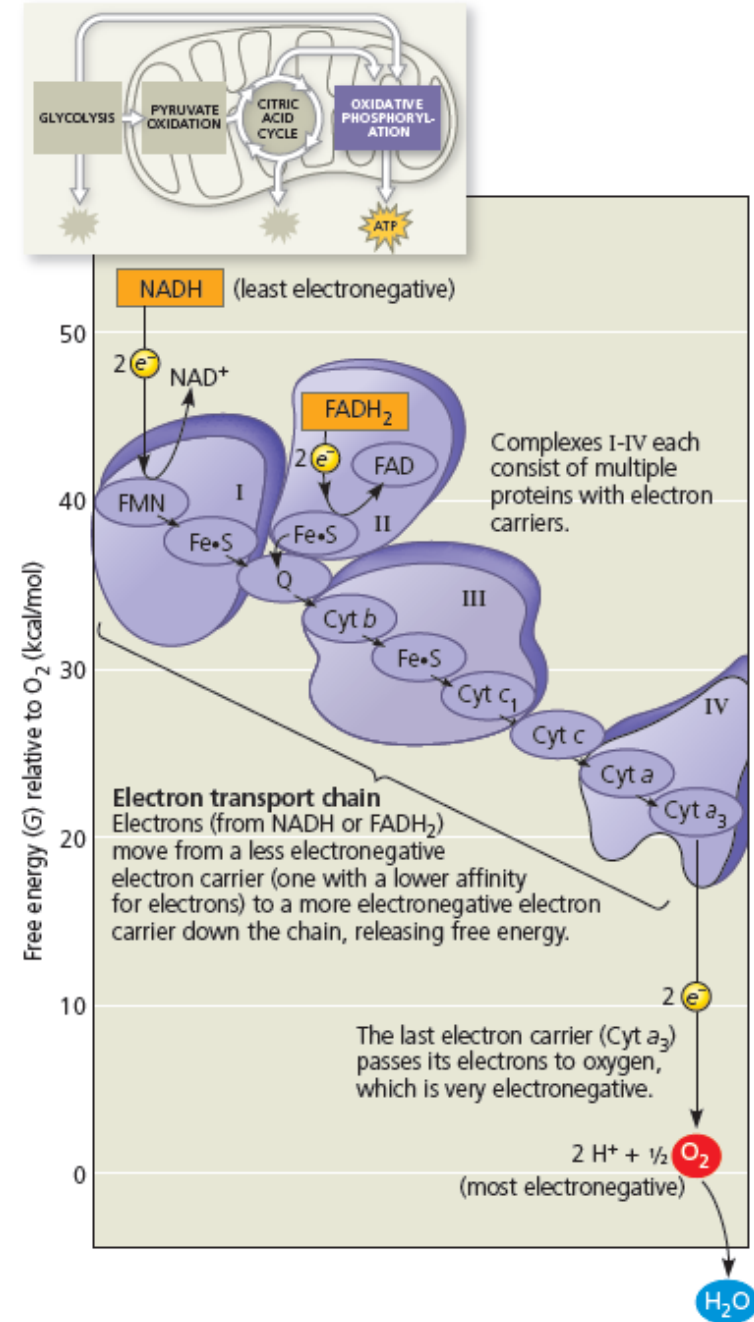
Sitokromlar ve Son Aşama

- Ubikinondan sonra gelen taşıyıcıların çoğu, hem grubu içeren sitokromlardır.
- Bu hem grubu, elektron alıp verebilen bir demir atomu barındırır.
- Farklı sitokromlar "cyt" harfi ve bir harf-sayı kombinasyonu ile adlandırılır.
- Zincirin son halkası olan sitokrom a_3 , elektronu oksijene aktarır.



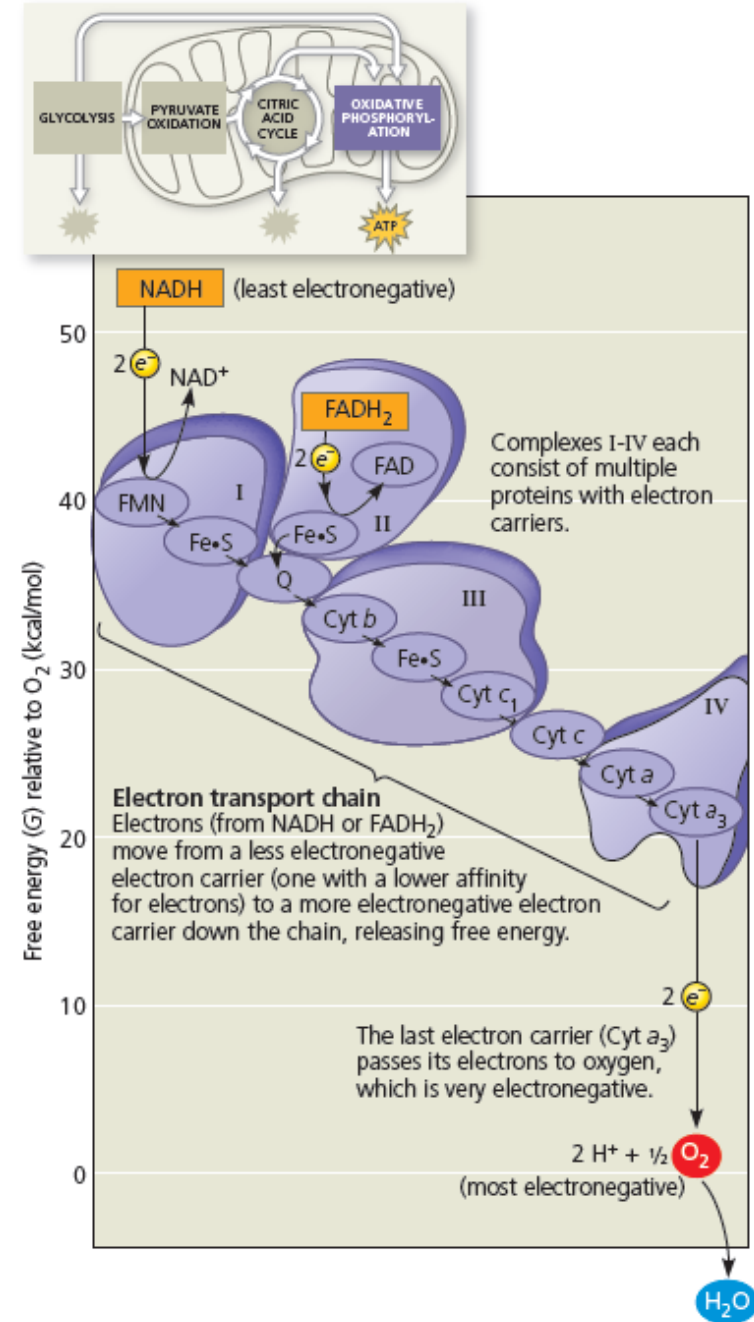
Oksijenin Elektronları Alması ve Su Oluşumu

- Oksijen, zincirdeki en elektronegatif bileşen olarak elektronları kolayca kabul eder.
- Her oksijen atomu, iki elektronla birlikte iki hidrojen iyonunu da alır.
- Bu işlem sonucunda nötr su molekülleri oluşur.
- Bu, hücresel solunumun son aşamasını oluşturur.



FADH₂'nin Elektron Taşımadaki Rolü

- Sitrik asit döngüsünden gelen bir diğer elektron kaynağı FADH₂'dir.
- FADH₂, elektronlarını kompleks II üzerinden, daha düşük bir enerji seviyesinden aktarır.
- Hem NADH hem FADH₂ iki elektron sağlar ancak FADH₂'nin sağladığı enerji daha azdır.
- Bu nedenle, FADH₂'den ATP sentezi için elde edilen enerji yaklaşık üçte bir oranında düşüktür.

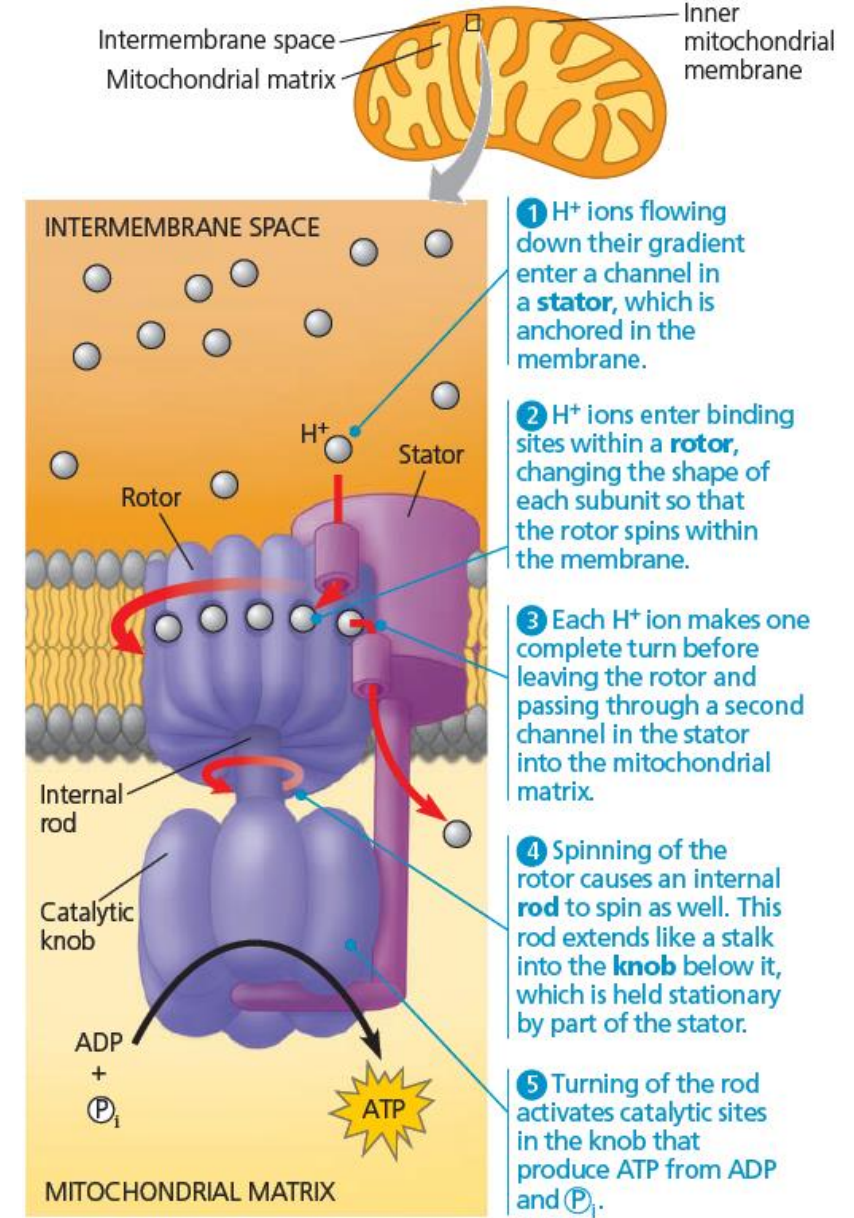


Zincirin Rolü ve Enerji Kazanımı

- Elektron taşıma zinciri doğrudan ATP üretmez.
- Bunun yerine, elektronların oksijene kontrollü geçişiyle enerji küçük adımlarla serbest bırakılır.
- Böylece büyük bir enerji düşüşü, yönetilebilir parçalara ayrılır.
- Bu enerji serbestleşmesi, bir sonraki aşama olan kemiosmoz ile ATP üretimine bağlanır.

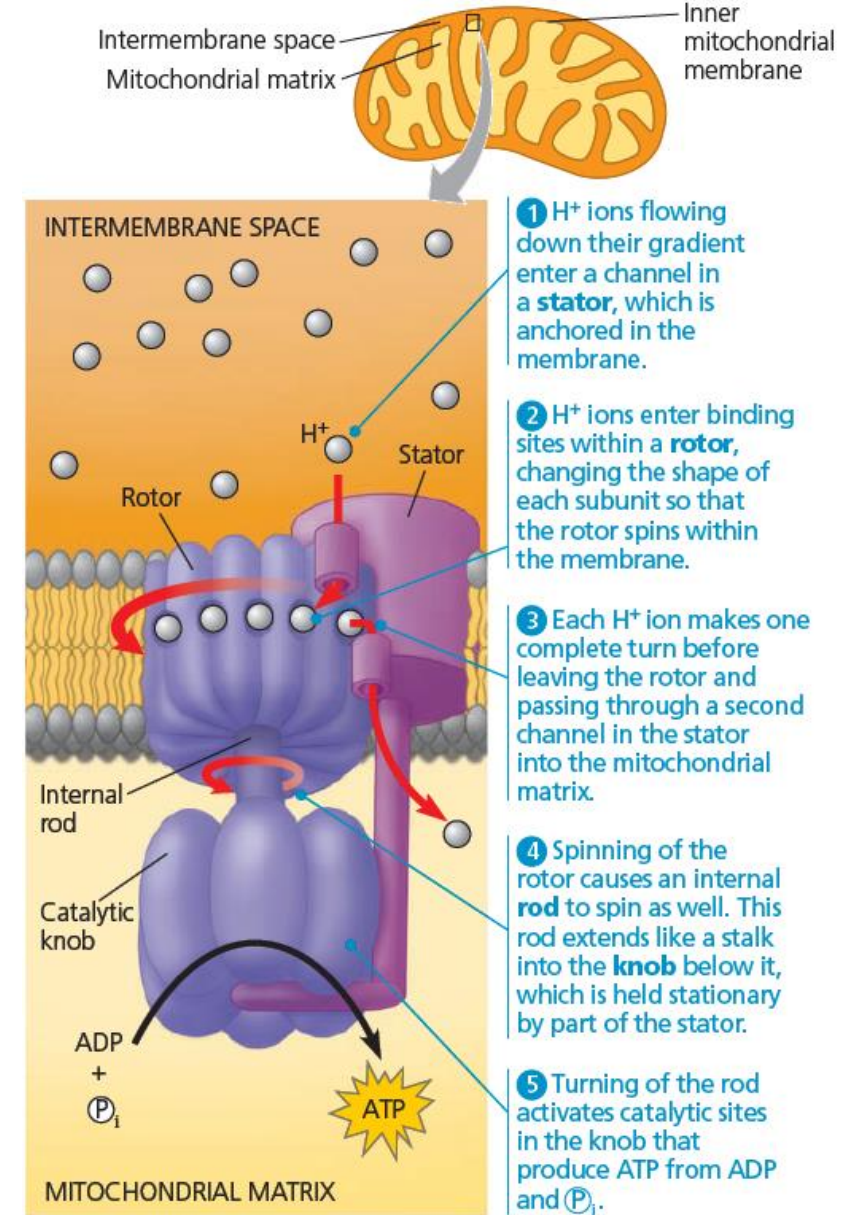
ATP Sentezinin Mimarı: ATP Sentaz

- Mitokondrinin iç zarı veya prokaryot hücre zarında ATP sentaz adlı protein kompleksi yer alır.
- ATP sentaz, ADP ve inorganik fosfattan ATP üretimini gerçekleştiren bir enzimdir.
- Bu enzim, normalde ATP harcayan iyon pompalarının tersine çalışır.
- ATP'yi hidroliz etmek yerine, var olan bir H^+ iyonu gradyanının enerjisini ATP üretmek için kullanır.



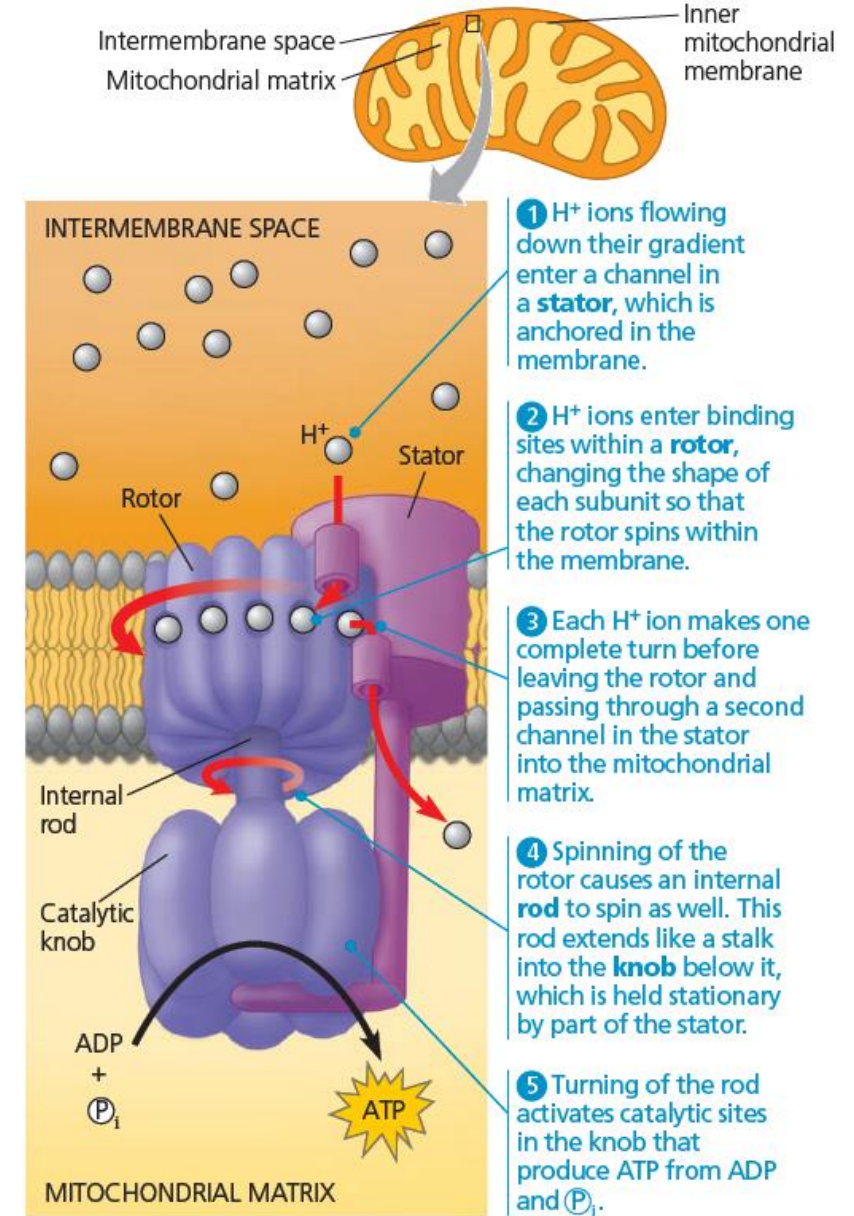
Kemiosmoz Nedir?

- Kemiosmoz, bir H^+ iyon gradyanı boyunca enerji depolanmasını hücresel işe dönüştüren bir mekanizmadır.
- Burada osmoz kelimesi, H^+ akışını ifade eder; suyun geçişinden farklı bir anlamda kullanılır.
- ATP sentaz, H^+ yoğunluk farkını kullanarak ATP üretir.
- Bu süreçte H^+ iyonlarının zar boyunca akışı, ATP oluşumunu tetikler.



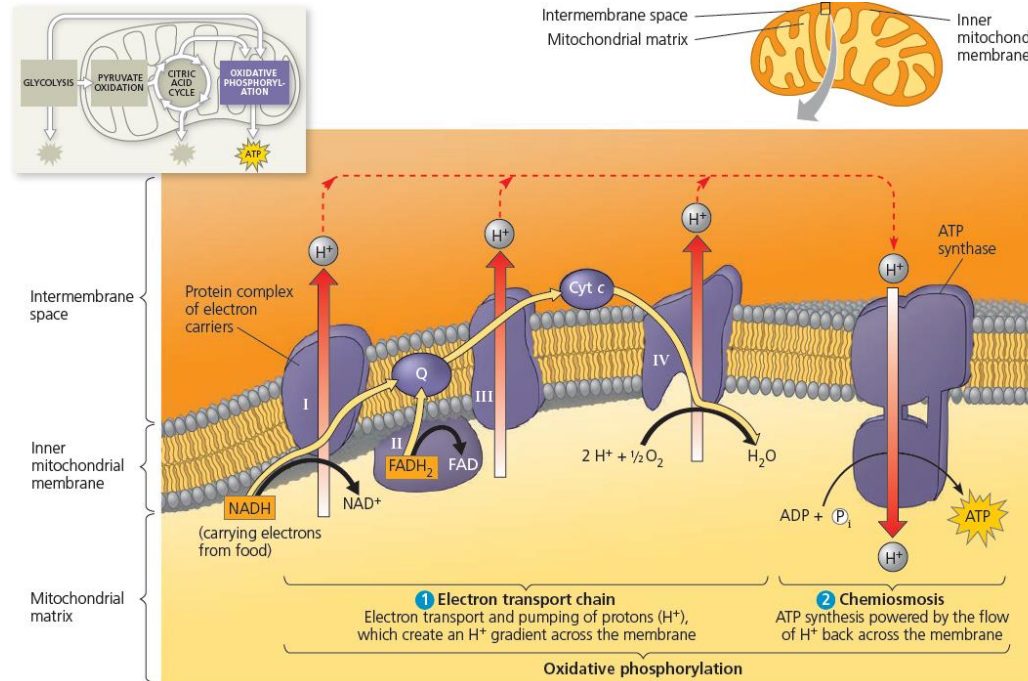
ATP Sentazın Çalışma Prensipleri

- ATP sentaz, dört ana bölümden oluşan çok alt birimli büyük bir enzim kompleksidir.
- H^+ iyonları, rotor kısmındaki bağlanma bölgelerine tek tek girerek bu kısmın dönmesini sağlar.
- Rotorun dönmesi, ADP ile inorganik fosfatın birleşmesini katalizler.
- H^+ akışı, adeta bir su çarkını döndüren akarsu gibi davranır.



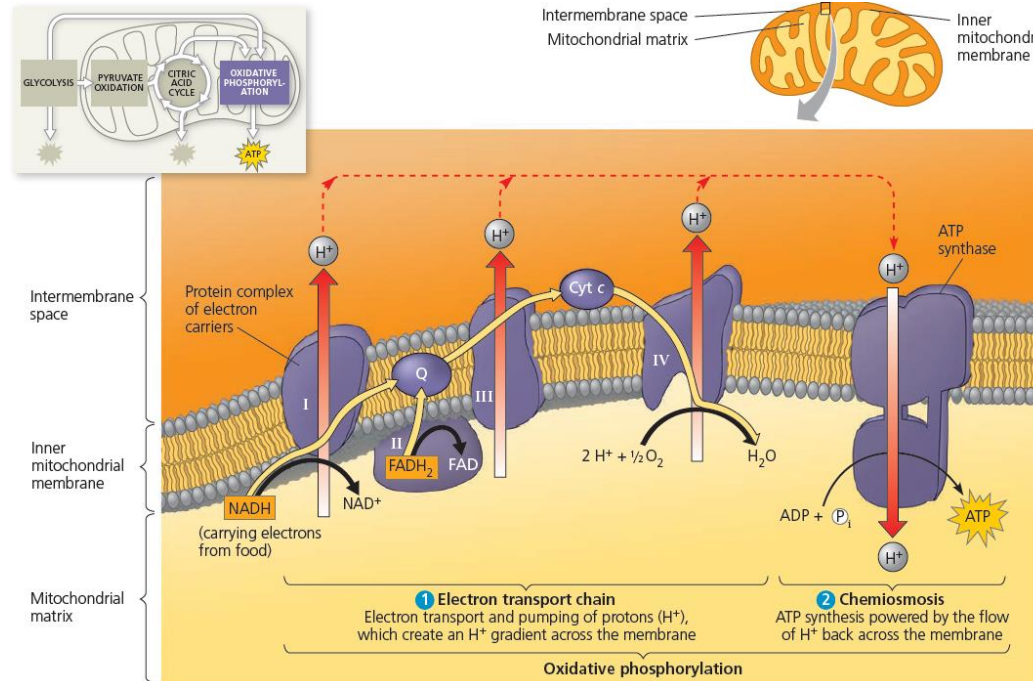
H⁺ Gradyanı Nasıl Oluşur?

- H⁺ gradyanının oluşumu, elektron taşıma zincirinin ana işlevlerinden biridir.
- NADH ve FADH₂'den gelen elektronlar, enerjilerini H⁺ pompalanmasında kullanır.



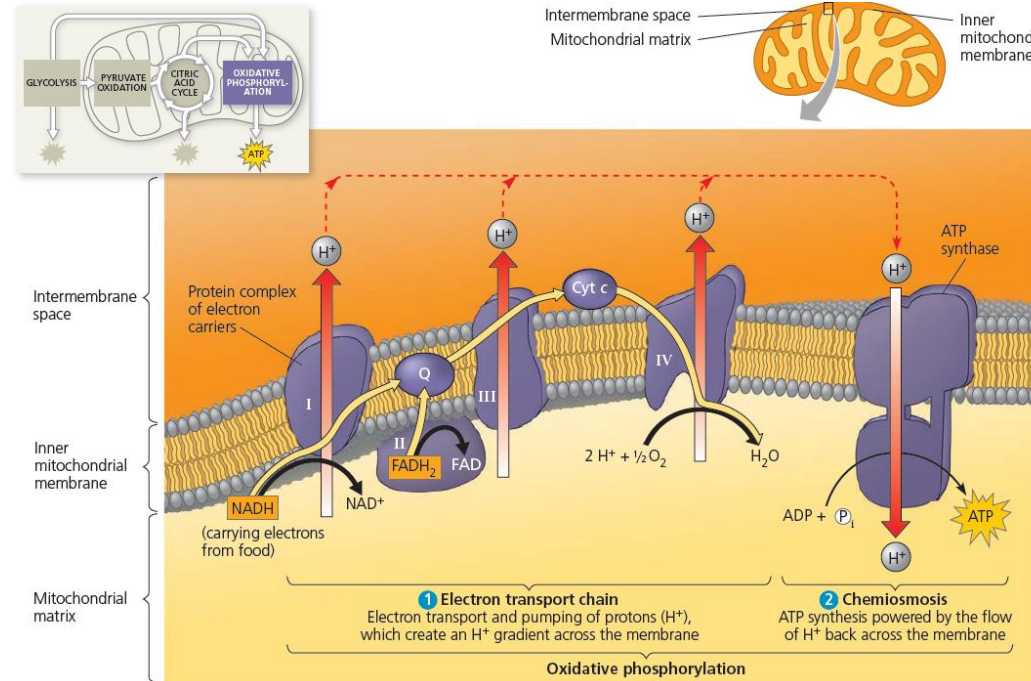
H⁺ Gradyanı Nasıl Oluşur?

- H⁺ iyonları mitokondri matriksinden zarlar arası boşluğa aktarılır.
- Bu gradyan, H⁺'ların geri akış isteğini doğurur ve ATP üretimine temel oluşturur.



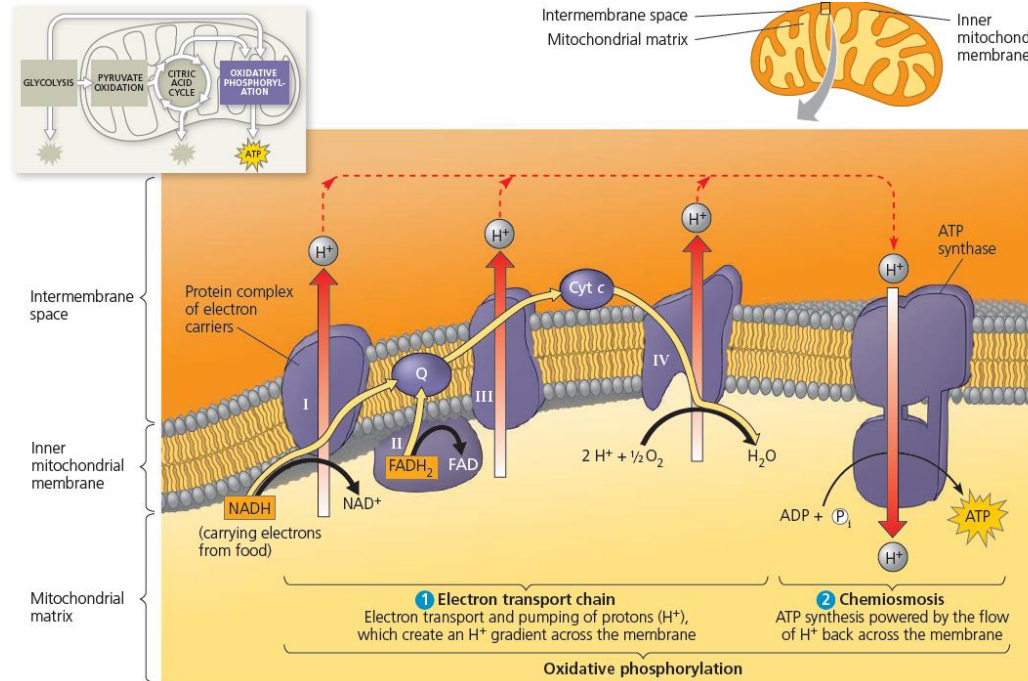
Elektron Taşıma Zinciri ve Proton Pompalama

- Elektron taşıma zincirindeki bazı taşıyıcılar elektronla birlikte H^+ da alıp verir.
- Elektronların aktarımı sırasında H^+ iyonları çevredeki çözeltiye geçer.



Elektron Taşıma Zinciri ve Proton Pompalama

- Taşıyıcılar, mitokondri iç zarında H^+ 'ları matriksten alıp zarlar arası boşluğa bırakacak şekilde düzenlenmiştir.
- Oluşan bu H^+ gradyanı, ATP sentazlar aracılığıyla zar boyunca H^+ akışını sağlar.



Proton-Motor Güç ve Hücresel İşler

- H^+ gradyanı, iş yapabilme kapasitesine sahip olduğu için "proton-motor güç" olarak adlandırılır.
- ATP sentaz, bu güçten yararlanarak ADP'yi fosforiller ve ATP üretir.
- H^+ akışı, enerji dönüşümünü gerçekleştiren temel süreçtir.
- Bu mekanizma, hücresel solunumun enerji üretimindeki son aşamasıdır.

Kemiosmozun Evrenselliği

- Mitokondride, H^+ gradyanı elektron taşıma zincirinden gelen enerjiyle oluşur.
- Kloroplastlarda ise ışık enerjisiyle benzer bir süreç çalışır.
- Prokaryotlar, plazma zarlarında H^+ gradyanı oluşturur ve bu enerjiyi farklı işler için kullanır.
- Kemiosmoz, hem prokaryotlarda hem de ökaryotlarda enerji dönüşümünü açıklayan bir temel ilkedir.

Kemiosmozun Bilimsel Önemi

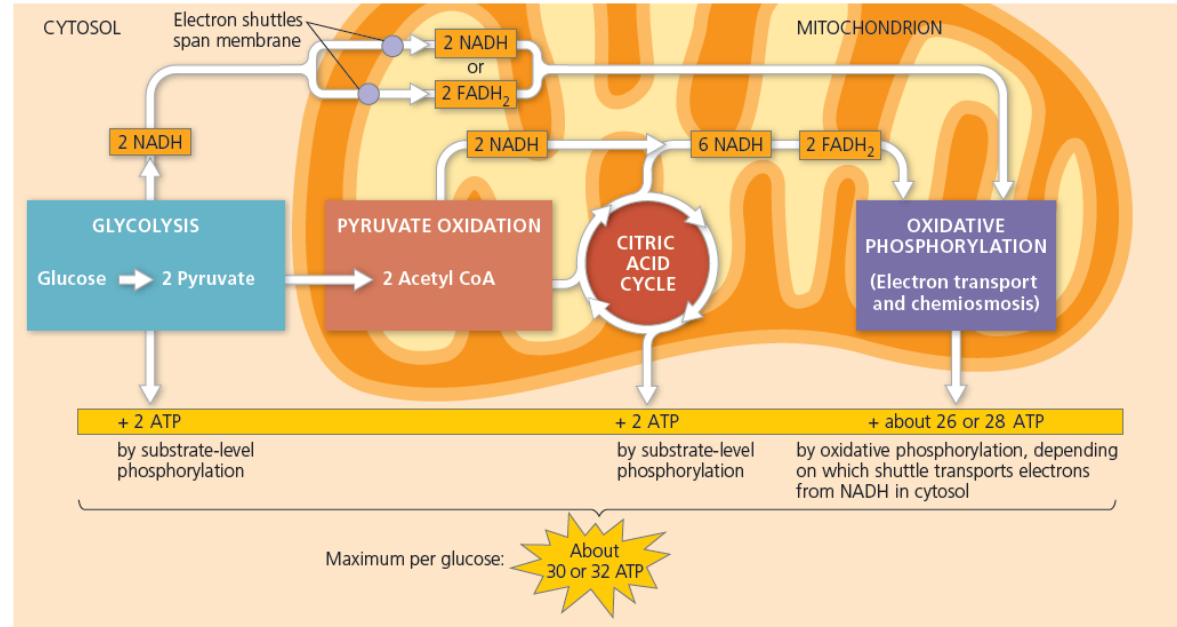
- Prokaryotlar bu mekanizmayla yalnızca ATP üretmez; flagella hareketi ve madde taşımada da kullanır.
- Kemiosmoz, biyolojik enerji dönüşümlerinin ortak paydasını oluşturur.
- Bu modelin önemi, enerji biyokimyası alanında birleştirici bir çerçeve sunmasıdır.
- Peter Mitchell, bu modelin öncüsü olarak 1978'de Nobel Ödülü'ne layık görülmüştür.

Hücresel Solunumun Genel Amacı

- Hücresel solunumun temel amacı, glikozun enerjisini ATP sentezine dönüştürmektir.
- ***Enerji akışı şu sırayı izler:*** glikoz → NADH → elektron taşıma zinciri → proton-motor kuvvet → ATP.
- Glikozun karbondioksit'e tamamen oksitlenmesiyle elde edilen ATP miktarı yaklaşık olarak hesaplanabilir.
- ***Bu süreçte üç temel aşama yer alır:*** glikoliz, piruvat oksidasyonu ve sitrik asit döngüsü, son olarak ise oksidatif fosforilasyonu tetikleyen elektron taşıma zinciri.

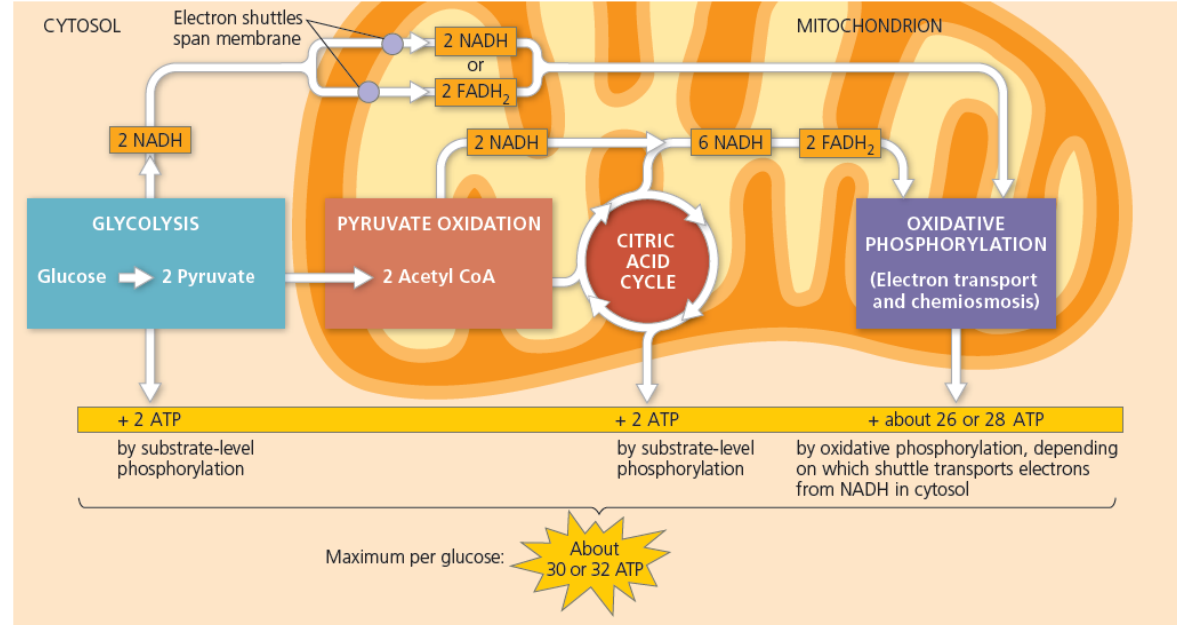
ATP Verimliliğinin Ayrıntılı Hesabı

- Aşağıda, bir glikoz molekülünün oksidasyonu sonucunda üretilen ATP miktarı ayrıntılı şekilde gösterilir.
- Glikoliz ve sitrik asit döngüsünde substrat düzeyinde toplam 4 ATP üretilir.



ATP Verimliliğinin Ayrıntılı Hesabı

- NADH aracılığıyla elektron taşıma zincirine aktarılan elektronlar, proton-motor kuvvet aracılığıyla çok sayıda ATP üretir.
- Bir NADH molekülü, maksimum yaklaşık 3 ATP üretimi sağlayacak kadar proton-motor kuvveti oluşturur.



Neden Net ATP Sayısı Kesin Değil?

- ATP üretim sayısı tam olarak verilemez çünkü fosforilasyon ile redoks reaksiyonları doğrudan bağlantılı değildir.
- NADH başına yaklaşık 10 H^+ taşınsa da, 1 ATP üretimi için gereken H^+ sayısı kesin değildir.
- Günümüzde genel kabul gören değer, 1 ATP sentezi için 4 H^+ gerektiği yönündedir.
- $FADH_2$ 'nin elektronları daha geç zincire girdiği için, her $FADH_2$ yalnızca yaklaşık 1.5 ATP üretimiyle ilişkilidir.

Taşıma Maliyetleri ve Şatıl Sistemleri

- Mitokondri zarları NADH'ye geçirgen değildir; glikolizde oluşan NADH mitokondriye doğrudan giremez.
- ***Elektronlar, 'shuttle' sistemleri ile mitokondri matriksine aktarılır:*** bazı hücrelerde NAD⁺'a, bazılarında FAD'a geçer.
- FAD'a aktarılan elektronlar yalnızca yaklaşık 1.5 ATP üretimine yol açar.
- Karaciğer ve kalp gibi dokularda NAD⁺ aracılığıyla yaklaşık 2.5 ATP verimi elde edilir.

Diğer İşlerde Kullanılan Proton-Motor Kuvvet

- Elektron taşıma zinciri tarafından üretilen proton-motor kuvvet sadece ATP üretiminde kullanılmaz.
- Örneğin, mitokondriye piruvat alınması da bu kuvvetle sağlanır.
- Proton-motor kuvvetin tamamı ATP sentezine harcarsaydı, bir glikozdan 28 ATP (oksidatif fosforilasyon) + 4 ATP (substrat düzeyinde) = 32 ATP elde edilirdi.
- Ancak daha az verimli shuttle sistemleri kullanıldığında bu sayı yaklaşık 30 ATP'ye düşebilir.

Solunumun Enerji Verimliliği

- Glikozun tam oksidasyonu 686 kcal enerji açığa çıkarır ($\Delta G = -686$ kcal/mol).
- Bir ATP sentezi ise yaklaşık 7.3 kcal enerji depolar.
- 32 ATP üzerinden yapılan hesaplamayla, enerjinin %34'ü ATP'ye aktarılmış olur.
- Bu, hücresel solunumun enerji dönüşümünde oldukça verimli olduğunu gösterir.

Isı Üretimi ve Enerji Kaybı

- Glikozun içindeki enerjinin çoğu, ATP'ye değil ısıya dönüşür.
- İnsanlar bu ısıyı vücut sıcaklığını sabit tutmak için kullanır (37°C).
- Kalan ısı ise terleme gibi yollarla ortama yayılır.
- Hücresel solunumun bu ısı üretici yönü, enerji dengesinin sağlanmasında önemlidir.

Verimlilikten Bilinçli Feragat: Kış Uykusu ve Kahverengi Yağ

- Bazı durumlarda, solunumun verimsiz olması organizma için avantajlıdır.
- Kış uykusuna yatan memeliler, metabolizmalarını yavaşlatırken yine de vücut sıcaklıklarını korumak zorundadır.
- Kahverengi yağ dokusunda bulunan mitokondriler, ATP üretmeden ısı üretimi sağlar.
- Bu mitokondrilerdeki "uncoupling protein" sayesinde protonlar ATP sentezi olmadan geri akabilir.



Hücresel Solunumun Esnekliği ve Adaptasyonları

- Kahverengi yağın bu özelliği, depolanan yağların sürekli olarak oksitlenmesini sağlar.
- ATP birikimi engellenir ve böylece hücresel solunum baskılanmaz.
- Bu adaptasyon, organizmanın çevresel koşullara uyum sağlamasını destekler.

Oksijensiz Ortamlarda ATP Üretimi Mümkün mü?

- Oksidatif fosforilasyonun gerçekleşebilmesi için hücreye yeterli oksijenin ulaşması gerekir.
- Elektron taşıma zincirinin sonunda elektronegatif oksijen yer almazsa bu süreç durur.
- Ancak bazı hücreler, oksijen olmadan da organik maddeleri oksitleyip ATP üretebilir.
- ***Bu tür ATP üretimi iki farklı yolla gerçekleşir:*** anaerobik solunum ve fermantasyon.

Anaerobik Solunumun Temel Özellikleri

- Anaerobik solunumda, oksijen yerine başka maddeler son elektron alıcısı olarak görev yapar.
- Bu süreçte bir elektron taşıma zinciri kullanılır, ancak zincirin sonunda oksijen yer almaz.
- Örneğin, bazı deniz bakterileri zincirin sonunda sülfat iyonunu (SO_4^{2-}) kullanır.
- Bu bakterilerin yan ürünü olan H_2S , bataklıklarda duyulan çürük yumurta kokusunun sebebidir.

Fermantasyon: Solunum Zinciri Olmadan Enerji Üretimi

- Fermantasyon, ne oksijen ne de bir elektron taşıma zinciri kullanır.
- Glikoliz süreci burada temel enerji kaynağıdır ve 2 ATP üretimi sağlar.
- Glikolizde glukoz, pirüvata oksitlenir; bu sırada NAD^+ elektron alıcısı olarak görev yapar.
- Bu süreç hem aerobik hem de anaerobik koşullarda aynı şekilde 2 ATP üretir.

Fermantasyonun Glikolize Dayanan Yapısı

- Fermantasyon, glikolizin devamlı ATP üretebilmesi için NAD^+ 'ın yeniden kazanılmasını sağlar.
- Eğer NAD^+ geri kazanılamazsa, hücre glikolizi sürdüremez ve enerji üretimi durur.
- Aerobik ortamda NAD^+ , elektron taşıma zinciri aracılığıyla NADH 'tan geri kazanılır.
- Anaerobik koşullarda ise NADH 'taki elektronlar doğrudan pirüvata aktarılır.



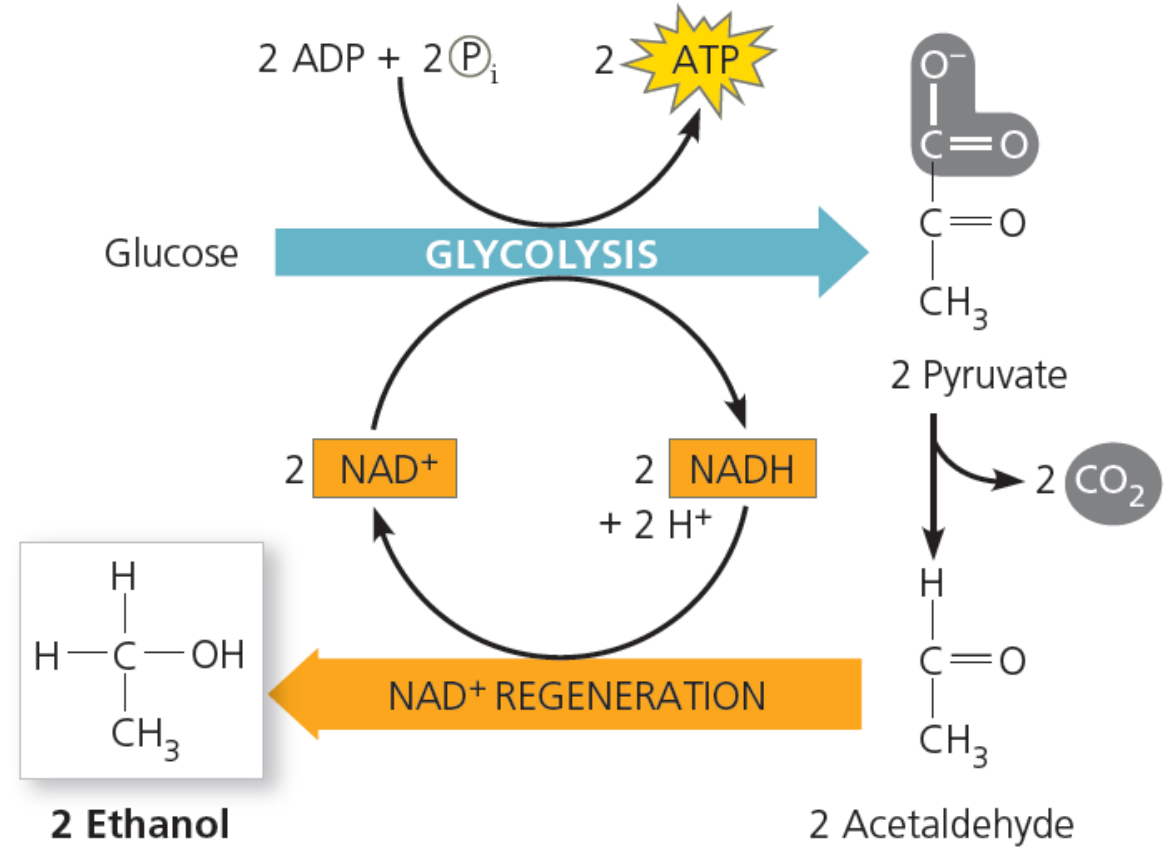
Fermantasyonun Temel Amacı ve Süreci

- Fermantasyon, NAD^+ 'ı yeniden üreten ilave reaksiyonlardan oluşur.
- NADH , pirüvata ya da onun türevlerine elektron aktararak NAD^+ üretimini sağlar.
- Böylece, glikoliz süreci devam eder ve hücre, 2 ATP kazancı ile yetinmiş olur.
- Fermantasyonun farklı türleri vardır ve pirüvattan oluşan son ürünlere göre ayrılır.



Alkol Fermantasyonu

- Bu fermantasyonda, pirüvat iki basamakta etanole dönüştürülür.
- İlk basamakta CO_2 ayrılarak asetaldehit oluşur.
- İkinci basamakta ise asetaldehit, NADH tarafından indirgenerek etanol meydana gelir.
- Bu süreçte NAD^+ geri kazanılır ve glikoliz devam eder.

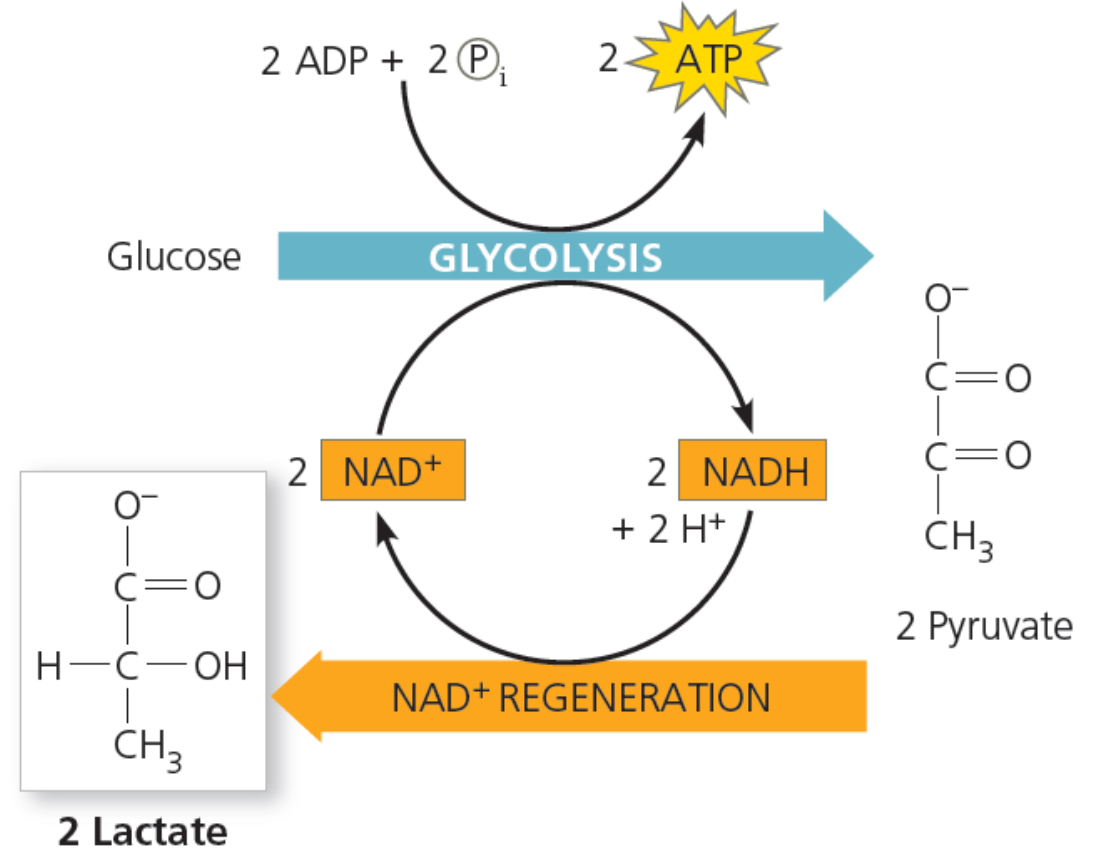


Alkol Fermantasyonunun Kullanım Alanları

- Alkol fermantasyonu, bakteriler ve mayalar tarafından gerçekleştirilir.
- Maya, hem aerobik solunum hem de alkol fermantasyonu yapabilir.
- Binlerce yıldır insanlar bu özelliği bira, şarap ve ekmek üretiminde kullanmaktadır.
- Ekmeğin kabarması, maya fermantasyonuyla açığa çıkan CO₂ gazı sayesinde.

Laktik Asit Fermantasyonu

- Bu fermantasyonda pirüvat, NADH tarafından doğrudan laktata indirgenir.
- CO₂ oluşmaz; NAD⁺ geri kazanılarak glikoliz devam eder.
- Laktat, laktik asidin iyonlaşmış hâlidir.
- Bu süreç, peynir ve yoğurt gibi süt ürünlerinin üretiminde kullanılır.



İnsan Kaslarında Laktik Asit Fermantasyonu

- Yoğun egzersiz sırasında kaslara yeterince oksijen ulaşamaz.
- Bu durumda kas hücreleri, ATP üretmek için laktik asit fermantasyonuna yönelir.
- Biriken laktat, kana geçerek karaciğere taşınır ve burada tekrar pirüvata dönüştürülür.
- Oksijen varlığında bu pirüvat mitokondriye girerek solunuma devam eder.

Laktat ve Kas Ağrısı: Gerçek Neden Ne?

- Önceden, egzersiz sonrası kas ağrılarının sebebinin laktat olduğu sanılıyordu.
- Ancak günümüzde bu ağrının, kas liflerinde oluşan küçük hasarlar ve iltihaplanmalardan kaynaklandığı bilinmektedir.
- Laktat, egzersizden sonraki bir saat içinde karaciğer tarafından işlenir.
- Dolayısıyla ertesi gün hissedilen ağrının nedeni laktat birikimi değildir.

Enerji Üretiminin Üç Alternatif Yolu

- *Hücreler, besinlerdeki kimyasal enerjiyi ATP'ye dönüştürmek için üç farklı yol kullanabilir:* fermentasyon, anaerobik solunum ve aerobik solunum.
- Bu üç yolun ortak noktası, glukozun pirüvata kadar parçalandığı glikoliz basamağıdır.
- Glikolizde, substrat düzeyinde fosforilasyon ile net 2 ATP üretilir.

Glikolizde NAD^+ 'ın Rolü ve Farklı Yeniden Oksidasyon Yolları

- Glikoliz sırasında NAD^+ , besinden elektron alarak NADH 'ye dönüşür.
- Bu NADH 'nin tekrar NAD^+ 'a okside edilmesi gerekir ki glikoliz devam edebilsin.
- Fermentasyonda, son elektron alıcısı organik moleküllerdir (örneğin, laktik asit fermantasyonunda pirüvat).

Solunumda NADH'nin Kullanımı

- Solunumda NADH, elektronlarını bir elektron taşıma zincirine aktarır.
- Bu süreç NAD^+ 'ın yeniden kazanılmasını sağlar ve glikolizin sürmesini destekler.
- Elektron taşıma zinciri, glikoliz ürünlerinin daha fazla enerjiye dönüştürülmesini sağlar.

ATP Üretimi Açısından Fermentasyon ve Solunumun Farkı

- Fermentasyon sadece glikolizden gelen 2 ATP ile sınırlıdır.
- Pirüvat daha fazla parçalanmadığı için içindeki enerji kullanılamaz.
- Buna karşılık, hücresel solunumda pirüvat tamamen oksitlenir ve bu da daha fazla ATP üretimini mümkün kılar.

Elektron Taşıma Zinciri ve Nihai Elektron Alıcısı

- Elektronlar, taşıma zincirinde basamak basamak indirgenme-oksidasyon reaksiyonlarıyla ilerler.
- Aerobik solunumda son elektron alıcısı oksijendir; anaerobik solunumda ise oksijenden daha az elektronegatif başka moleküller kullanılır.
- Bu taşıma zinciri, oksidatif fosforilasyonu tetikleyerek büyük miktarda ATP üretimini sağlar.

ATP Verimi: Fermentasyon vs. Aerobik Solunum

- Fermentasyonda sadece 2 ATP üretilirken, aerobik solunumda bu sayı glukoz başına 32 ATP'ye kadar çıkabilir.
- Yani aerobik solunum, fermentasyona göre 16 kat daha fazla enerji sağlar.
- Bu fark, hücrelerin enerji ihtiyacına göre farklı yolları seçmesini etkiler.

Oksijensiz Yaşayanlar: Zorunlu Anaeroblar

- Zorunlu anaeroblar sadece fermentasyon ya da anaerobik solunum yapabilir.
- Oksijen bu canlılar için toksik olabilir; hücrede koruyucu sistemler yoksa oksijenle yaşayamazlar.
- Bu nedenle bu canlılar yalnızca oksijensiz ortamlarda hayatta kalabilir.

Sadece Oksijenle Yaşayabilenler: Örnek Hücre Tipleri

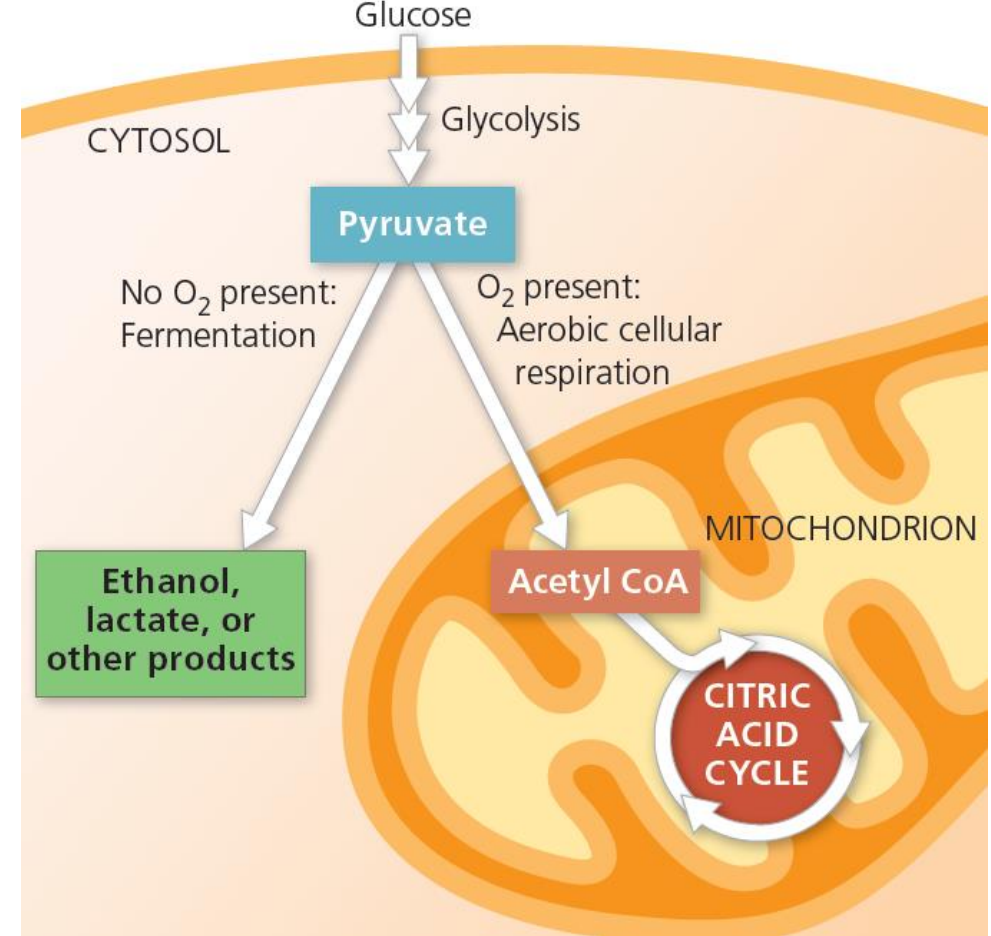
- Örneğin omurgalıların beyin hücreleri, sadece aerobik solunumla enerji üretebilir.
- Bu hücreler fermentasyonla ATP üretemez.
- Enerji ihtiyacını yalnızca oksijen varlığında karşılayabilirler.

Hem Fermentasyon Hem Solunum Yapabilenler

- Bazı canlılar, ortam koşullarına göre fermentasyon ya da solunum arasında geçiş yapabilir.
- Bu tür canlılara "fakültatif anaerob" denir.
- Örneğin maya hücreleri ve bazı bakteriler bu gruptandır.

İnsan Kas Hücreleri de Fakültatif Anaerobdur

- İnsan kas hücreleri, oksijen yoksa laktik asit fermentasyonuna geçebilir.
- Bu durumda pirüvat, NAD^+ 'ı geri kazanmak için son elektron alıcısı olarak kullanılır.
- Oksijen varlığında ise pirüvat, asetil CoA'ya çevrilerek sitrik asit döngüsüne girer.



Fermentasyonda Enerji Üretimi İçin Glukoz Tüketimi

- Fakültatif anaeroblar, fermentasyonla aynı miktarda ATP üretmek için daha fazla glukoz tüketmek zorundadır.
- Fermentasyon, enerji açısından verimsizdir ama oksijen olmadığında hayatta kalmayı sağlar.
- Bu adaptasyon, canlıların çevresel değişimlere esnek yanıt vermesini mümkün kılar.

Glikolizin Evrimsel Önemi

- Glikoliz, hem fermentasyon hem de solunumun ortak başlangıç noktasıdır.
- Bu yolun çok eski canlılarda bile bulunması, onun evrimsel kökeninin çok derin olduğunu gösterir.
- Glikoliz, oksijenin olmadığı eski Dünya koşullarında ATP üretimini sağlayan temel mekanizmaydı.

Glikolizin Evrimsel Kanıtları

- Dünyadaki en eski bakteriyel fosiller 3.5 milyar yıl öncesine aittir.
- Oksijen ise atmosferde yaklaşık 2.7 milyar yıl önce birikmeye başlamıştır.
- Bu nedenle ilk prokaryotlar, sadece glikoliz ile ATP üretmiş olabilir.

Glikolizin Hücre İçi Konumu ve Evrimsel Süreç

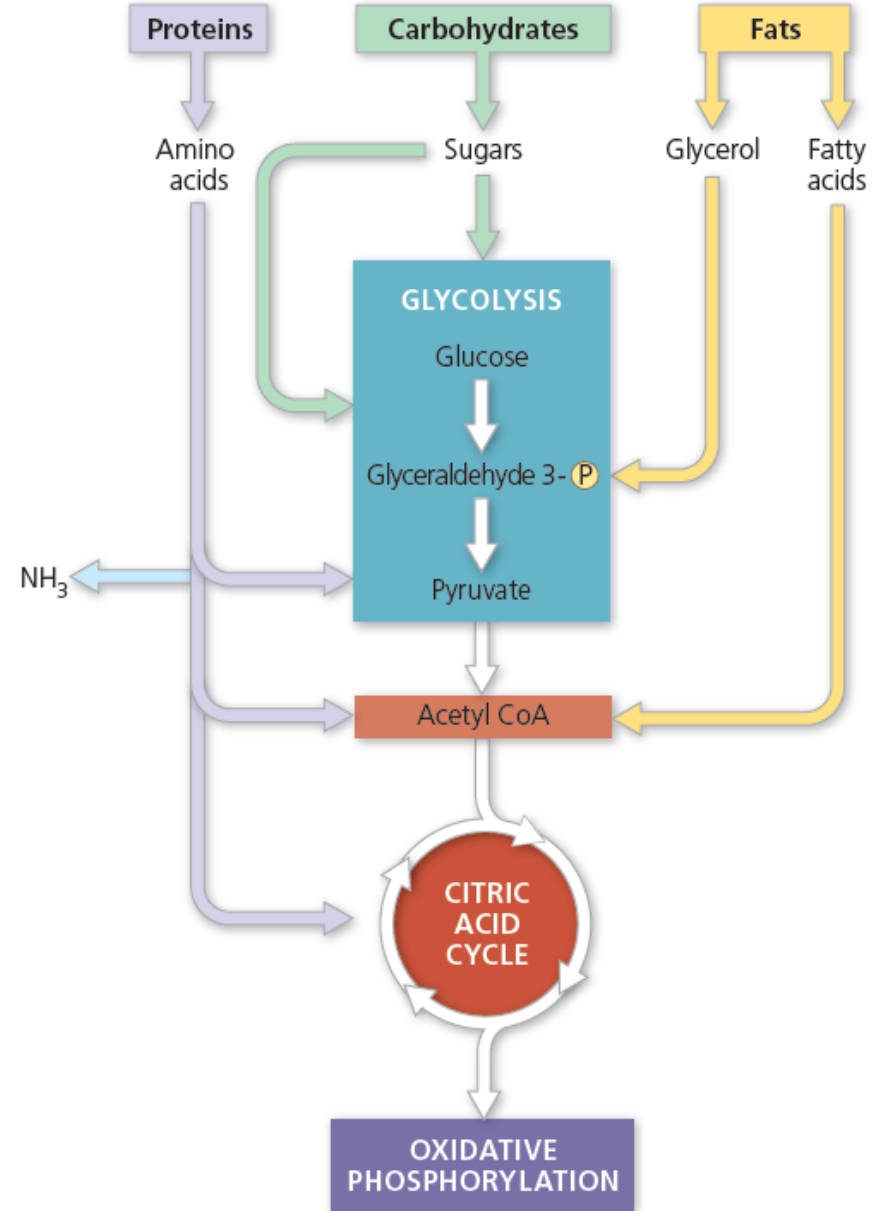
- Glikoliz, sitoplazmada gerçekleşir ve zarla çevrili organellere ihtiyaç duymaz.
- Bu yönüyle, ökaryotlardan önce yaşamış prokaryotlara ait bir metabolik mirastır.
- Bugün hâlâ glikoliz, hem fermentasyonda hem de solunumun ilk basamağında aktif olarak kullanılmaktadır.

Hücresel Metabolizmanın Merkezi Oyuncuları: Glikoliz ve Sitrik Asit Döngüsü

- Glikoliz ve sitrik asit döngüsü, hücrenin metabolik yollarının tam merkezinde yer alır.
- Bu iki yol, yalnızca glikozun yıkımıyla sınırlı değildir; birçok farklı bileşiğin katabolik ve anabolik dönüşümlerine bağlanır.
- Hücrede enerji üretimi kadar yapı taşı sentezine de hizmet eden bu yollar, adeta birer metabolik kavşak gibidir.
- Yani, glikoliz ve sitrik asit döngüsü sadece enerji değil, aynı zamanda hücresel yapıların sentezine katkı sağlar.

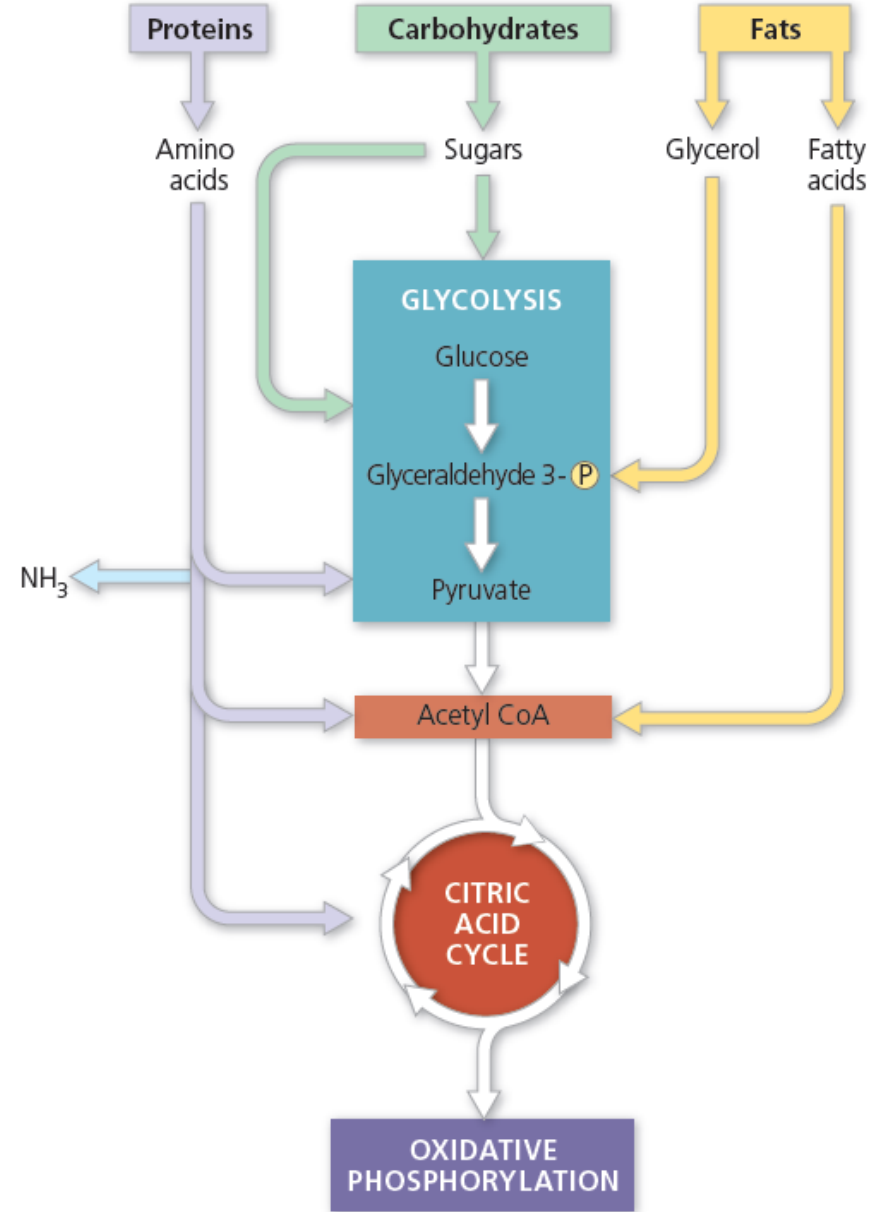
Enerji İçin Sadece Glikoz Yeterli Değildir

- Hücresel solunumda glikoz örnek bileşik olarak kullanılsa da, besinlerimizin çoğu serbest glikoz içermez.
- İnsanlar başta olmak üzere birçok hayvan, enerjiyi yağ, protein ve kompleks karbonhidratlardan sağlar.
- Bu farklı moleküller, hücresel solunum süreçlerine çeşitli noktalardan dahil olabilir.



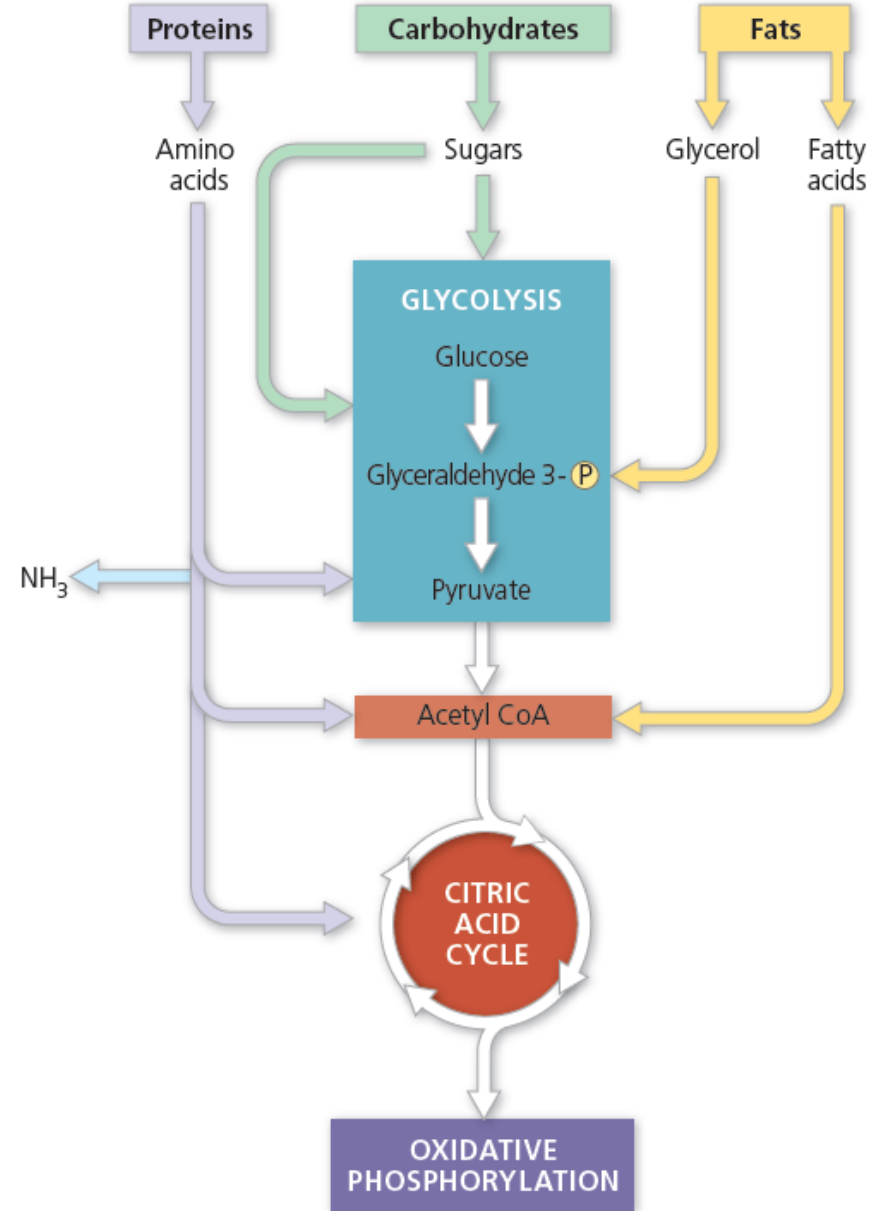
Karbonhidratlar Solunumda Nasıl Kullanılır?

- Nişasta, sindirim sırasında glikoza parçalanır ve bu glikoz hücrelerde glikoliz yoluna girer.
- İnsanların karaciğer ve kas hücrelerinde depo ettiği glikojen de glikoza çevrilerek solunumda yakıt olarak kullanılır.
- Sakkaroz gibi disakkaritlerin sindirilmesiyle açığa çıkan glikoz ve diğer monosakkaritler de bu sürece dahil olur.
- Sonuç olarak, glikoliz karbonhidratların çeşitli formlarını enerjiye dönüştürebilecek esnekliğe sahiptir.



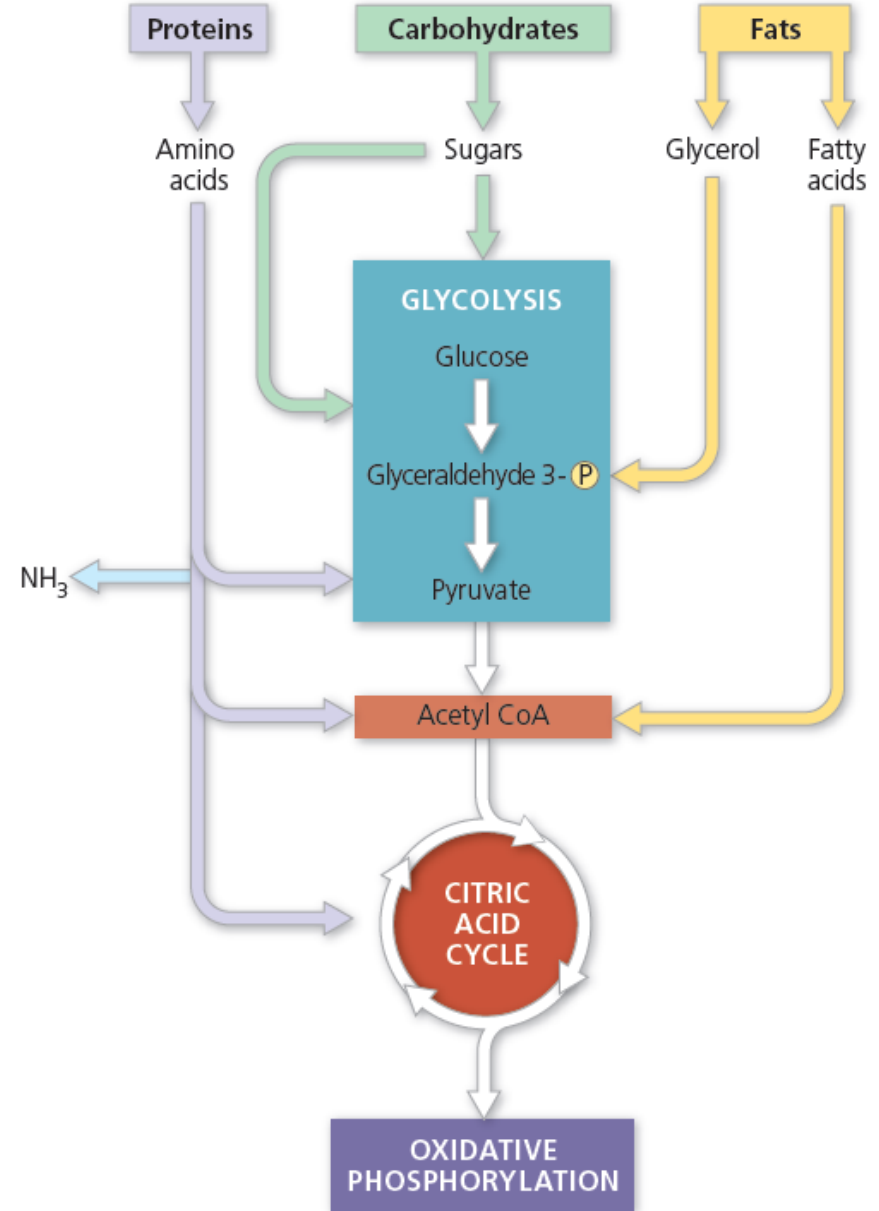
Proteinler Enerji Kaynağı Olarak Nasıl Kullanılır?

- Proteinlerin enerji kaynağı olabilmesi için önce amino asitlere sindirilmesi gerekir.
- Vücut bu amino asitlerin çoğunu yeni protein sentezinde kullanır; yalnızca fazlası enerji üretiminde değerlendirilir.
- Amino asitlerin solunuma katılabilmesi için önce amino grupları uzaklaştırılır; bu işleme deaminasyon denir.
- Deaminasyon sonrası oluşan azotlu atıklar amonyak (NH_3), üre veya başka bileşikler olarak vücuttan atılır.



Yağlar Neden Mükemmel Enerji Kaynağıdır?

- Yağlar, sindirimde gliserol ve yağ asitlerine ayrılır.
- Gliserol, glikoliz yoluna dahil olabilir.
- Yağ asitleri ise beta oksidasyon yoluyla iki karbonlu birimlere ayrılır ve asetil-CoA olarak sitrik asit döngüsüne girer.
- Bu süreçte ayrıca NADH ve FADH₂ üretilir; bu moleküller elektron taşıma zincirine katılarak ATP üretimini artırır.



Yağ Yakımı ve Kilo Kaybı Arasındaki Zorluk

- Yağların yapısal özellikleri, onları karbonhidratlardan çok daha verimli bir enerji kaynağı haline getirir.
- Çünkü C—H bağları bol miktarda yüksek enerjili elektron içerir ve bu elektronlar ATP üretiminde etkilidir.
- Aynı miktarda karbonhidratla karşılaştırıldığında, yağların oksidasyonu iki kat daha fazla ATP üretir.
- Ancak bu durum, yağları yakmanın zorluğunu da artırır; çünkü her gram yağ çok yüksek miktarda kalori taşır.

Hücrelerin Yapı Taşlarına Olan İhtiyacı

- Hücreler yalnızca enerjiye değil, aynı zamanda maddeye de ihtiyaç duyar.
- Besinlerdeki tüm organik moleküller ATP üretimi için kullanılmaz.
- Hücrelerin kendi moleküllerini üretmeleri için karbon iskeletlerine gereksinimi vardır.
- Sindirimle elde edilen bazı organik monomerler doğrudan kullanılabilir; örneğin, amino asitler protein sentezinde görev alabilir.

Anabolik Yollar ve Ara Metabolitler

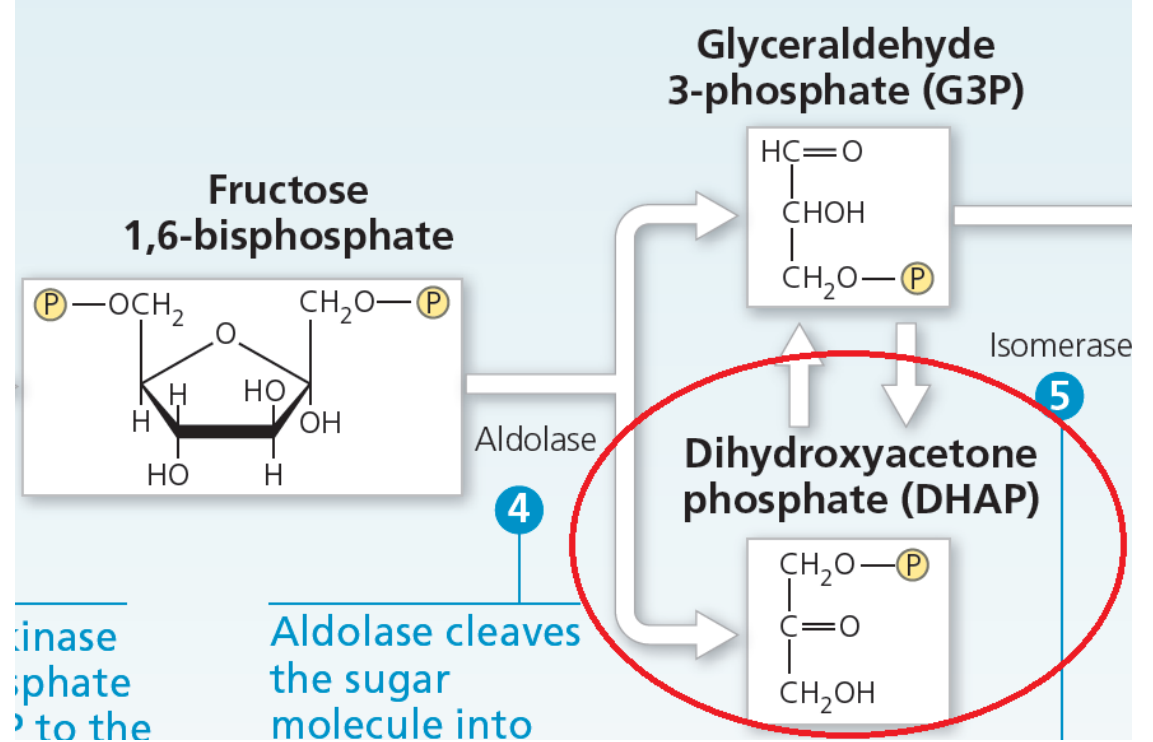
- Besinlerle alınamayan özel moleküller, hücre içinde sentezlenebilir.
- Glikoliz ve sitrik asit döngüsündeki bazı ara ürünler, anabolik yollar için başlangıç maddesi olarak kullanılır.
- Örneğin, insan vücudu proteinlerdeki 20 amino asitten yaklaşık yarısını sitrik asit döngüsünden elde edilen bileşiklerle sentezleyebilir.
- Geri kalan amino asitler ise “esansiyel” olarak tanımlanır ve diyetle alınmalıdır.

Glikoz ve Yağ Asidi Sentezi

- Hücre, pirüvattan glikoz, asetil CoA'dan ise yağ asitleri sentezleyebilir.
- Bu biyosentetik yollar enerji üretmez; tersine ATP harcarlar.
- Hücre, bu sayede yapı taşı ihtiyacını enerji üretiminden farklı yollardan karşılayabilir.
- Anabolik yolların enerji maliyeti olduğu unutulmamalıdır.

Metabolik Esneklik ve Dönüşümler

- Glikoliz ve sitrik asit döngüsü, hücrenin ihtiyaçlarına göre farklı moleküllere dönüşüm sağlar.
- Örneğin, glikolizde oluşan dihidroksi aseton fosfat (bkz. adım 5), yağ sentezinin öncül maddesine dönüştürülebilir.
- Yağsız beslensek bile, fazla kalori alımı yağ olarak depolanabilir.
- Bu süreçler, metabolizmanın ne kadar esnek ve uyumlu olduğunu gösterir.

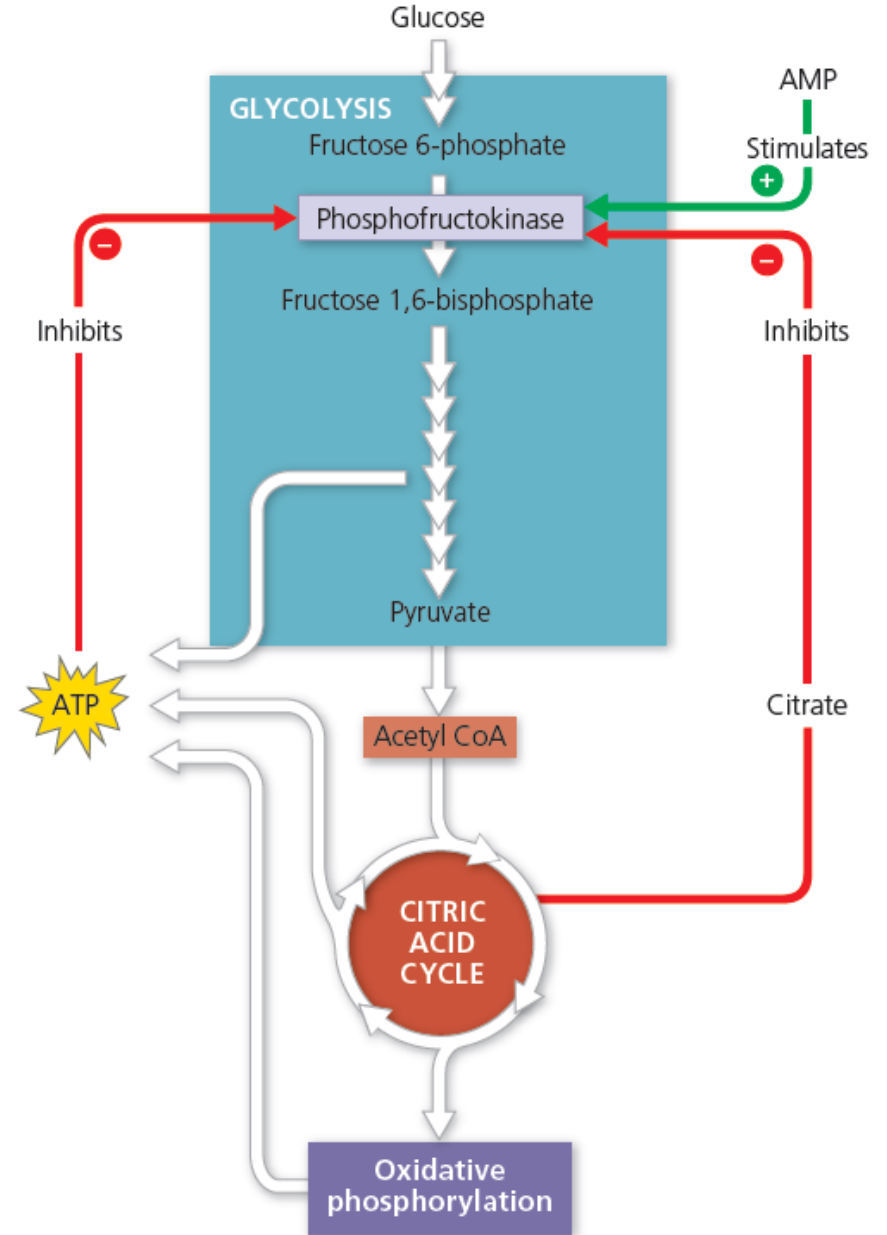


Hücresel Solunumun Geri Bildirimle Düzenlenmesi

- Hücre, ihtiyaçtan fazla ürün üretmemek için geri bildirim mekanizmaları kullanır.
- Örneğin, bir amino asidin fazlalığı durumunda, onun sentezini sağlayan anabolik yol kapatılır.
- En yaygın kontrol mekanizması geri bildirim inhibisyonudur.
- Bu mekanizma, sitrik asit döngüsünün önemli ara ürünlerinin gereksiz yere tüketilmesini engeller.

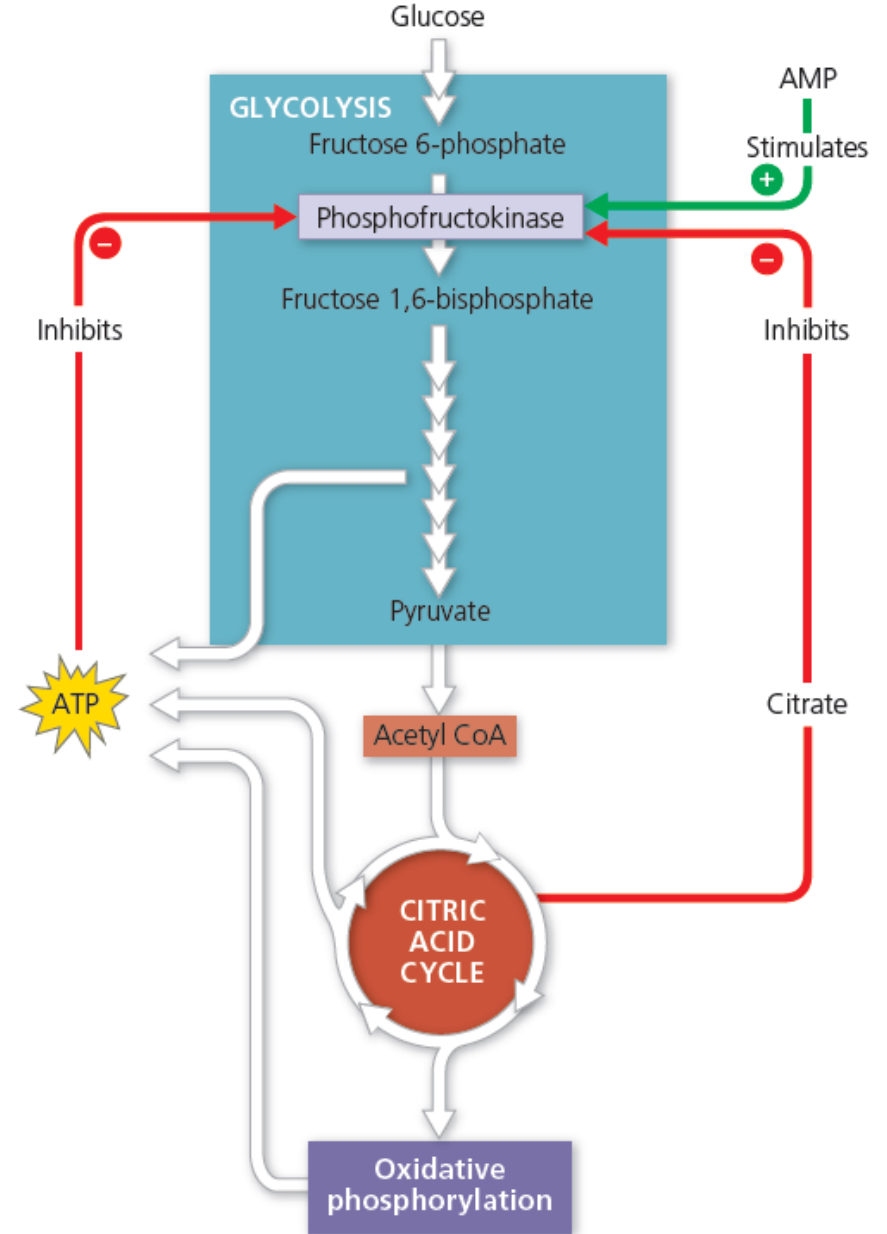
Katabolik Yolların Kontrolü

- Hücre enerjiye ihtiyaç duyduğunda solunum hızlanır, ATP seviyesi düştüğünde süreç aktive olur.
- ATP yeterli düzeyde olduğunda ise solunum yavaşlatılır, böylece kaynaklar korunur.
- Bu kontrol, katabolik yolun stratejik enzimlerinin düzenlenmesiyle sağlanır.
- Bu enzimlerden biri, glikolizinin 3. adımında görev alan fosfofruktokinazdır.



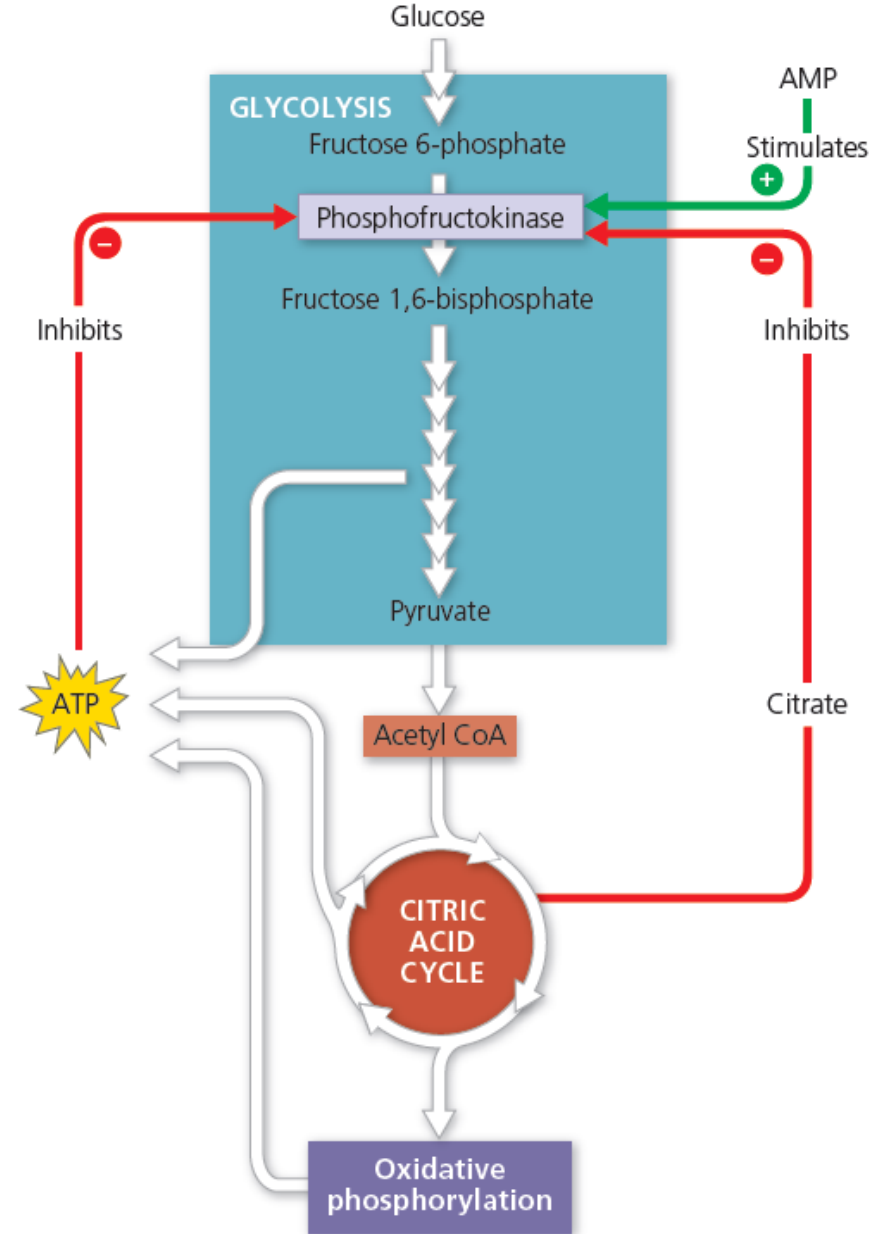
Fosfofruktokinaz: Hücresel Solunumun Ritm Tutucusu

- Fosfofruktokinaz, glikolize bağlılığı geri dönüşümsüz hale getiren ilk basamağı katalizler.
- Bu nedenle, glikoliz hızını belirleyen temel “ritim tutucu” enzimlerden biridir.
- Enzim, ATP ile inhibe edilir; AMP tarafından ise aktive edilir.
- Hücrede ATP arttıkça glikoliz yavaşlar; ATP azaldıkça tekrar hızlanır.



Sitrat ile Glikoliz Arasındaki Uyum

- Sitrik asit döngüsünün ilk ürünü olan sitrat, fosfofruktokinaz enzimini inhibe eder.
- Sitrat mitokondriden sitoplazmaya geçerek bu enzimin aktivitesini azaltır.
- Bu mekanizma, glikoliz ile sitrik asit döngüsünün hızlarının senkronize çalışmasını sağlar.
- Sitrat seviyesi düştüğünde, glikoliz hızlanarak döngünün gereksinimlerini karşılar.



Metabolik Dengenin Sağlanması

- Glikoliz ve sitrik asit döngüsünün diğer anahtar enzimleri de benzer şekilde kontrol edilir.
- Hücreler, enerji üretiminde oldukça tasarruflu, pratik ve çevik davranır.
- Metabolizma, hem yapı taşlarının üretimini hem de enerji dengesini hassas bir şekilde yönetir.
- Bu bütünlük sayesinde hücreler, değişen koşullara hızla uyum sağlayabilir.

Hücresel Solunumun Ekosistemdeki Yeri

- Hücresel solunum, organizmalarda merkezi bir öneme sahiptir.
- Bu süreç, canlılara enerji sağlamaz; halihazırda besinlerde depolanmış enerjiyi açığa çıkarır.
- Bu enerjinin kaynağı ise fotosentezdir.

Teşekkür ederim

Prof. Dr. Bektaş TEPE

