

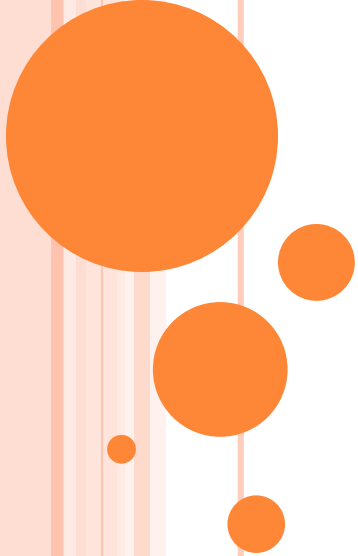
ET TEKNOLOJİSİ

BAHAR DÖNEMİ

Prof. Dr. Ayla Soyer

Kasın kimyasal bileşimi

Kasta kasılma (kontraksiyon) ve gevşeme mekanizması



İSKELET KASININ KİMYASAL KOMPOZİSYONU

- Su-Vücutun sıvı ortamını oluşturur.
- Proteinler-Vücuttaki yapısal ve metabolik reaksiyonlarda yer alırlar.
- Lipitler-Enerji kaynağı, hücre membran yapısında ve fonksiyonunda yer alır ve metabolik işlevleri vardır (vitaminler ve hormonların sentezinde).
- Karbonhidratlar- Vücuttaki oranı düşüktür. Başlıca karbonhidrat, kasta ve karaciğerde bulunan glikojendir.
- Protein olmayan bileşikler
- İnorganik maddeler



Memeli iskelet kası bileşimi (% yaş ağırlık)

Bileşen (değişim aralığı)	%
1. SU (65-80)	75
2. PROTEİN (16-22)	18.5
Başlıca kontraktıl proteinler	
Miyosin	
Aktin	
Regülatör proteinler	
Tropomiyosin	
Troponin	
Tropomodulin	
Hücre iskeletini oluşturan proteinler	
Titin	
Nebulin	
C-protein	
Miyomesin	
M-protein	
Desmin, filamin, vinkulin	
Kreatin kinaz, α -aktinin, H-protein, talin, paranemin, Cap Z, distropin	
Sarkoplazmik proteinler	
Çözünür sarkoplazmik ve mitokondriyal enzimler	
Miyogloblin	
Hemoglobin	
Sitokromlar ve flavoproteinler	
Stroma proteinler	
Kollagen	
Elastin	
Diğer çözünmez proteinler	

Memeli iskelet kası bileşimi (% yaş ağırlık)-devam

3. LİPİD (1.5-13) Nötral lipidler Fosfolipidler Serebrositler Kolesterol	3
4. KARBONHİDRATLAR ve AZOT İÇERMİYEN MADDELER (0.5-1.5) Glikojen Glukoz Hücre metabolizmasının ara ve son ürünleri (heksos ve trioz fosfatlar, laktik asit, sitrik asit, fumarik asit, süksinik asit, aseto asetik asit vd.)	1
5. PROTEİN OLMAYAN AZOTLU BİLEŞİKLER Kreatin ve kreatin fosfat Nükleotitler (adenozin trifosfat, (ATP), adenzin difosfat (ADP) vd. Serbest amino asitler Peptitler (karnosin, anserin vd.) Diğer protein olmayan azotlu maddeler (kreatinin, üre, IMP, NAD, NADP)	1.5
6. İNORGANİK MADDELER Potasyum Toplam fosfor (fosfatlar ve inorganik fosfor) Sülfür Klor, Sodyum Diğerleri (Mg, Ca, Fe, Co, Cu, Zn, Ni, Mn vd.)	1
TOPLAM	100

PROTEİNLER

Et proteinleri çözünebilirlik durumlarına göre üçe ayrılır.

- ❖ Sarkoplazmik proteinler
- ❖ Miyofibrilar proteinler
- ❖ Stroma (bağ doku) proteinleri



SARKOPLAZMIK PROTEİNLER

Suda ve iyonik gücü düşük (0.15 veya daha düşük) çözeltilerde çözünen proteinlerdir.

- Enzimler
- Miyoglobin (kas pigmenti)
- Hemoglobin (kan pigmenti)

Hemoglobin, miyoglobin ve hücre içerisinde (glikoliz, trikarboksilik asit (TCA) döngüsünde ve elektron transport zincirinde) yer alan bir çok enzim sarkoplazmik proteinlerdir.

TCA ve elektron transport sisteminde yer alan enzimler mitokondride bulunur.



MİYOFİBRİLAR PROTEİNLER

- Suda çözünmeyen, iyonik gücü yüksek (0.3 veya daha fazla) tuz çözeltilerinde çözünen proteinlerdir.
- Miyofibrillerde yer alan bir çok fibröz protein suda çözünmez. İyonik gücü yüksek sodyum ve potasyum tuzlarından hazırlanan çözeltilerde çözünür. Bu nedenle bu proteinler “tuzda çözünür proteinler” olarak da adlandırılır.

Bunlar; kontraktıl, regülatör ve hücre iskeletini oluşturan proteinler

- Aktin
- Miyosin
- Troponin
- Tropomiyosin vd.



STROMA (BAĞ DOKU) PROTEİNLER

Suda ve iyonik gücü yüksek tuz çözeltilerinde çözünmez

proteinlerdir.

- Kollagen
- Elastin
- Retikulin

Toplam stroma proteinlerinin %40-60'ını kollagen, %10-20'sini elastin oluşturur.

Kollagen bileşimi daha önce irdelenmiştir.



ELASTİN

- Belirli dokuların elastikliğinden sorumlu proteinlerdir.
- Büyük damarlar, ligamentler, deri ve akciğer dokuları gibi.
- Miktarları çok azdır ama dokuların elastikliğinde elastin fibrillerinin önemli işlevleri vardır.
- Elastin 1/3 oranında glisin, %10-13 prolin ve %40 diğer amino asitlerden oluşur.

Retikulin

- Kollagenin spesifik bir formu olduğu kabul edilir.
- Kollagenin öncüsüdür. Bu nedenle ayrı bir protein olarak değerlendirilmez.



LİPİTLER

- Kasın lipit içeriği oldukça değişkendir (%1.5-13).

Kas lipitleri başlıca;

- nötral lipitler (trigliseritler) ve
- fosfolipitlerden oluşur.
- Bazı lipitler kas içinde yer alır (intraselüler lipitler). Fakat lipitlerin çoğu kas demetleri arasında adipoz doku olarak yer alır.

Karbonhidratlar

- Kas dokunun karbonhidrat içeriği oldukça düşüktür ve başlıca karbonhidrat, kas ağırlığının %0.5-1.3'ini oluşturan glikojendir.
- Diğer bulunan karbonhidratlar ise konnektif dokuda yer alan glikozaminoglikan, glukoz ve glikolitik metabolizma ile oluşan ara ürünlerdir.



İnorganik maddeler:

- Kalsiyum, magnezyum, potasyum, sodyum, demir, fosfor, sülfür ve klor.

Karkas kompozisyonu

- Et üreticileri ve et bilimi için hayvanın toplam vücut kompozisyonundan daha çok karkas kompozisyonu önemlidir. =

Karkas kompozisyonunda;

- kas
- yağ ve
- kemik oranları önemlidir.
- Karkasın yağ içeriği arttıkça, kas ve kemik oranı azalır.
- Bu kompozisyonel özellik, karkas değerini etkiler.
- Karkas değeri, genetik ve çevresel faktörlerden etkilenir.



MIYOFİBRİLLER

- Miyofibrillerden enine kesit alındığında ve mikroskopta incelendiğinde, iki farklı büyüklükte ve muntazam bir dizi şekilde sıralanmış küçük ve büyük noktalı bir görüntü elde edilir. Bu görüntüleri oluşturan ince (aktin) ve kalın (miyosin) filamentlerin enine kesit yüzeyleridir.
- Mikroskop altında miyofibrilin uzunlamasına kesit yüzeyi incelendiğinde, ince miyofilamentlerin hem fibril boyunca hem de kendi aralarında paralel şekilde olduğu, fakat bunların belirli kısımlarının kalın filamentlerin aralarına düzgün bir şekilde paralel olarak yerleştikleri görülür.



- Canlı kaslar hareketleri ile kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürme yeteneğine sahip özel dokulardır.
- Kasın genel yapısı, hareket oluşturmak üzere kasılma ve gevşeme işlevini yapmak üzere düzenlenmiştir.
- Kasların kontraksiyon yetenekleri, ete dönüşümlerinden sonra kaybolur.
- Fakat, canlı kasların kasılma ve gevşemeleri postmortem değişiklikler ile etin olgunlaşması sırasında oluşan diğer değişikliklerin seyrini büyük ölçüde etkiler.
- Canlı kaslarda kasılma ve gevşeme mekanizmalarının bilinmesi, hayvanın kesilmesinden sonra kaslarda oluşacak postmortem değişikliklerin anlaşılmasını sağlayacaktır.

SİNİRLER VE UYARI

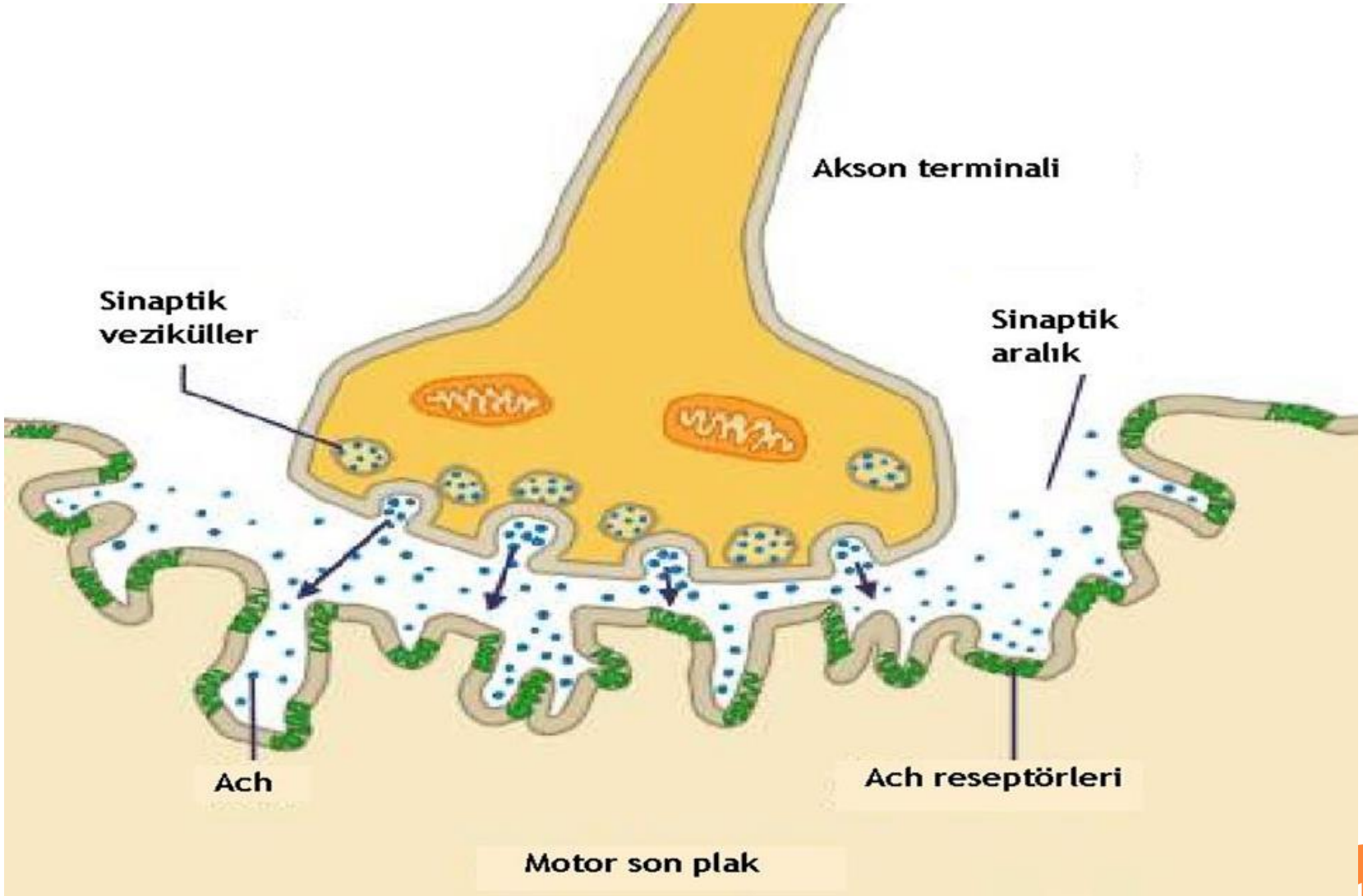
- Kastaki kasılmaların çoğu, kas fibrili yüzeyine (sarkolema) ulaşan uyarı ile başlamaktadır.
- İskelet kasında kontraksiyon, beyin ve omurilikte başlayan elektriksel uyarı ile başlamakta ve sinirler aracılığıyla kasa taşınmaktadır. Uyarıyı taşıyan sinir fibrilleri *motor sinirler* olarak adlandırılır.
- Sinir hücreleri, sahip oldukları elektriksel hareket potansiyelleri aracılığı ile beyinden ve omurilikten aldıkları uyarıları kaslara iletirler.
- Kasları kasılmaya yönlendirecek olan hareket potansiyeli, sinir hücrelerinin kas hücreleri ile birleştikleri kavşak noktalarında kas hücrelerine aktarılır.
- Sinir hücreleri, kas hücreleri ile birleştikleri kavşak noktalarında küçük kesecikler oluşturur. Bunlara “motor son plak” adı verilir.

- Normal istirahat koşullarında bir çok hücrenin içi ve dışı arasında bir elektriksel potansiyel mevcuttur.
- Bu potansiyel hücre tipine bağlı olarak 10-100 milivolt arasında değişir. Fakat istirahat halinde sinir ve kas fibrillerinin membran potansiyeli 90 milivolttur.
- Bu fibrillerin içinde ve dışında bulunan sıvıda pozitif ve negatif yüklü iyonlar bulunur.
- Genellikle hücre içi sıvıda ve özellikle de membranın iç yüzeyinde fazla miktarda negatif yüklü iyonlar, hücre dışı sıvıda ise pozitif yüklü iyonlar fazla miktarda bulunur. Bu şekilde hücre içi ve dışı arasında elektriksel potansiyel veya istirahat durumu membran potansiyeli oluşur (hücre dışında pozitif, içinde negatif).

- Sinir ve kas hücresinde bu membran potansiyelinin oluşması şunlara neden olur:
 - ✓ İyonların membran boyunca aktif transferi
 - ✓ Membranın iyonlar ve küçük moleküller için seçici geçirgenliğe sahip olması
 - ✓ Hücre içi ve hücre dışı sıvının çok özel iyonik bileşime sahip olması
- Ekstraselüler sıvı yüksek oranda sodyum (Na^+) ve klor (Cl^-) iyonları içerir. Hücre içi sıvıda ise tam aksine potasyum (K^+) ve difüze olamayan negatif iyonlar (örn. Proteinler ve peptitler) yüksek, fakat Na^+ ve Cl^- iyonları düşük konsantrasyonda bulunur.

- Bu iyonların hücre içi ve dışına geçebilmeleri için enerji gereklidir ve bu enerji adenozin trifosfat (ATP) ile sağlanmaktadır.
- Plazma membranının K^+ iyonunu geçirgenliği, Na^+ iyonundan 50-100 kat daha fazladır.
- Dolayısıyla membrandan K^+ iyonu, Na^+ iyonundan daha kolay geçer. Sonuç olarak, K^+ iyonu hücre dışına Na^+ iyonunun hücre içine girişinden daha hızlı çıkar.

- Sinir ve kas fibrilleri membran potansiyeline sahiptir. Aksiyon potansiyeli (uyarı) motor sinirlerden kas fibriline taşındığında kasta kasılma başlar.
- Aksiyon potansiyeli sinir fibrilinden membran yüzeyi boyunca yayılır ve elektriksel yük tersine döner yani depolarizasyon meydana gelir. Bu durum membranda kimyasal değişmelere neden olur. Bu nedenle aksiyon potansiyeli elektrokimyasal proses olarak da ifade edilir.
- Daha önce de belirtildiği gibi, istirahat halinde membranın dış yüzü pozitif, iç yüzü negatif yüklüdür. Aksiyon potansiyeli başladığında membranın Na^+ geçirgenliği artar ve sonuç olarak Na^+ hücre içine geçerek hücre içi ve dışı iyon dengesi oluşturmaya çalışır. Bu sırada membranın K^+ geçirgenliği ise aynı kalır ve hücre içi fazla miktarda pozitif yük dolar. Na^+ geçirgenliğindeki artışın süresi milisaniye sürede olur. Bu olayların başlaması ve bitmesi toplam 0.5-1 milisaniye sürede olur.



MİYONÖRAL NOKTA

- Kas kasılmasını başlatan uyarı, sinir fibrillerinden kas fibrillerine miyonöral noktadan transfer olur. Bu noktada, motor sinirler birkaç kısma (keseye) dallanmış haldedir ve her bir kısım kas fibrili ile temas eder. Bu keseler sarkolemaya yapışık durumdadır, fakat kesinlikle penetre olmamıştır. Miyonöral noktadaki sarkolemaya yapışık bu kesecikler *motor son plak* olarak adlandırılır.
- Uyarı, motor son plağa ulaştığında bu keseciklerde depolanmış kimyasal iletici asetilkolin serbest kalır. Sarkolema asetilkolin ile temas ettiğinde Na^+ iyonu için daha geçirgen bir hal alır ve membran depolarize olur. Sarkolema üzerinde asetilkolinin etkisi de birkaç milisaniye sürer. Motor son plaktan kolinesteraz enzimi serbest kalarak asetilkolini parçalar ve uyarıcı işlevini sona erdirir.

KAS AKSİYON POTANSİYELİ

- Bir çok kas fibrili bir miyonöral nokta içerir. Bilindiği gibi kas fibrili bir çok miyofibrilden oluşmuştur. Bu miyofibrillerin bir çoğu da sarkolemadan uzakta yer almaktadır. Burada aksiyon potansiyelinin bu uzak miyofibrillere nasıl iletildiği sorusu akla gelmektedir. Bu iletimi sağlayan unsur transvers tübüllerdir. T-tübüller, fibrile gelen uyarıyı sarkolemadan alarak miyofibrillere taşır.

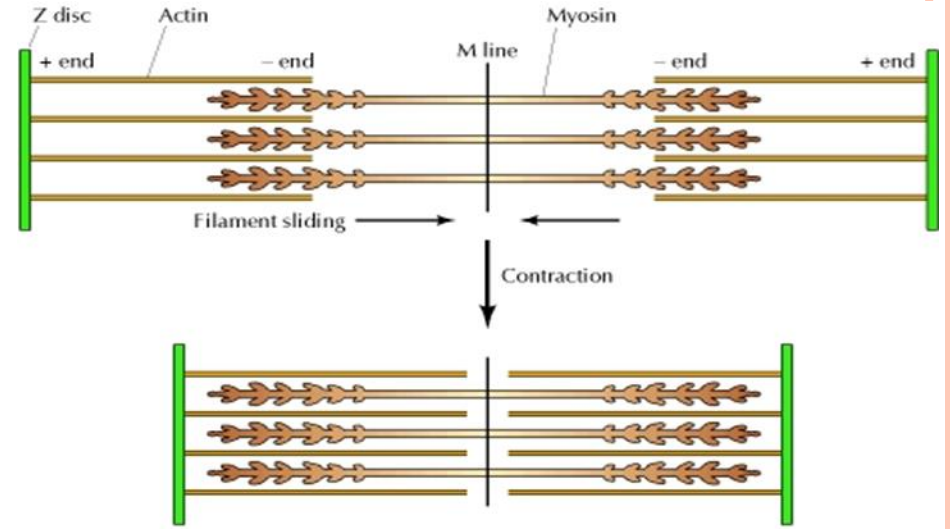
Kalsiyumun serbest kalması

Aksiyon potansiyeli yani uyarı T-tübüller aracılığı ile kasi enine geçer. Uyarıyı alan T-tübüller, her bir miyofibrili çevreleyen sarkoplazmik retikulumda depolanmış Ca^{+} iyonlarının serbest kalmasına neden olur. SR, kas fibrilinin sitoplazmasında kalsiyum iyonları miktarını düzenleyen hücresel bir organeldir. İstirahat halinde hücre sarkoplazmasında kalsiyum iyon konsantrasyonu $0.1 \mu M$ 'den azdır.

İSKELET KASINDA KASILMA (KONTRAKSİYON)

Kasılma prosesinde başlıca dört protein yer almaktadır;

- aktin,
- miyosin,
- tropomiyosin ve
- troponin



Aktin ve miyosin başlıca kontraktıl proteinlerdir ve kasılma ile aktin filamentleri miyosin filamentlerine doğru kayar. Aktin filamentlerinin miyosin filamentlerine doğru kayması ile çapraz köprüler oluşur ve kasılma sırasındaki kasılma kuvvetini oluştururlar.

- Troponin ve tropomiyosin molekülleri ise bu olayı düzenleyici rol üstlenirler ve sarkoplazmadaki Ca^{+2} iyonu konsantrasyonuna bağlı olarak aktin ve miyosin filamentlerini kasılma ve gevşeme için hazırlarlar.

- Kasın istirahat halinde kalması için, hücre içi Ca^{+2} iyon konsantrasyonunun düşük olması ve yüksek konsantrasyonda ATP'nin de Mg^{+2} iyonları ile kompleks yapması gereklidir. Bu kompleks (ATP-Mg^{+2}), aktin ve miyosinin çapraz köprü oluşturmasını önler.
- Kasılmanın başlaması için hücre içi kalsiyum iyon konsantrasyonunun $10 \mu\text{M}$ 'ün üzerine çıkması gereklidir. Sarkoplazmada Ca^{+2} iyon konsantrasyonu arttığında, Ca^{+2} iyonları troponin molekülünün troponin C alt birimine bağlanmaktadır.

Troponin molekülü üç alt birimden oluşmaktadır. Bunlar;

- troponin I
- troponin C
- troponin T

Troponin T, tropomiyosine bağlı iken, troponin I aktine bağlanarak, aktinin miyosin ile iletişime geçmesini engeller.

Troponin C ise Ca^{+2} bağlama özelliğindedir ve sarkoplazmada yeterince yüksek düzeyde Ca^{+2} olduğunda Ca^{+2} 'u bağlamaktadır.

Troponin C, Ca^{+2} 'u bağladığında aktin üzerindeki proteinler troponin T ve tropomiyosin değişime uğramakta ve aktin üzerindeki aktif grup miyosin molekülü ile bağlanmaya açık hale gelmektedir.

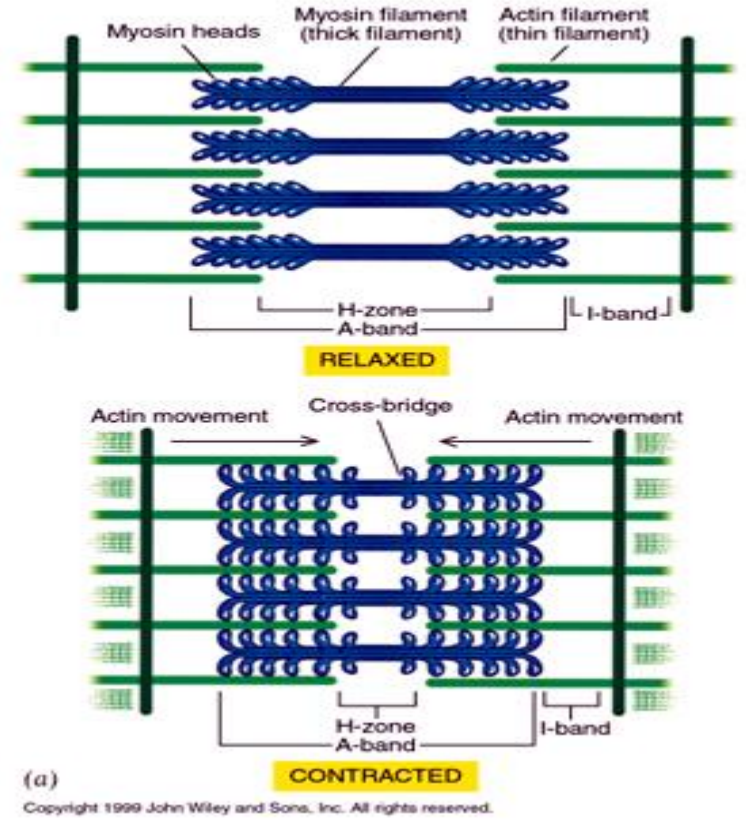
Tropomiyosin molekülünün yer değiştirmesi ile miyosin molekülünün aktif olan baş kısmı aktin ile çapraz köprü oluşturmakta ve kasılma meydana gelmektedir. Sarkomerde yer alan yarım I bantları sarkomerin merkezine doğru kaymaktadır.

Aktin ve miyosin birleşmesi ile oluşan protein kompleksi *aktomiyosin* olarak adlandırılmaktadır.

- Kasılma sırasında aktin ve miyosin filamentlerinin uzunluğu değişmez. Fakat iki Z hattı kalın filamentlere doğru yaklaştığından sarkomerin uzunluğu kısalır.

Kasılma halinde bir sarkomerde meydana gelen değişimler :

- Sarkomer uzunluğu kısalır.
- İki Z-hattı birbirine yaklaşır.
- I-bandı kısalır.
- H zonu küçülür.
- A bandı herhangi bir değişime uğramaz.



- * Bir sarkomerin uzunluğu $\sim 2,4 \mu\text{m}$
- * Kasılma halinde sarkomerin uzunluğu $1,5 \mu\text{m}$ 'ye kısalır.
- * Kas uzadığında ise sarkomerin uzunluğu $3,1 \mu\text{m}$ 'ye kadar uzayabilir.

İSKELET KASINDA GEVŞEME (İSTİRAHAT HALİ)

- Kasın gevşemesi, tekrar eski haline dönmesidir.
- İstirahat halinde kasta çok az gerilim vardır ve kas kolayca uzar. Bunun anlamı aktin ve miyosin filamentleri arasında çapraz köprü oluşumu yoktur.
- İstirahat durumunda; sarkoplazmada Ca^{+2} iyon konsantrasyonu $0.1 \mu M$ 'den azdır ve ATP depolanır. Sarkolema tekrar polarize olmuştur ve membran potansiyeli istirahat durumundaki değerindedir. Sarkoplazmik retikulum kalsiyum depolarını doldurmuştur ve bu durum, sinir ve kas fibrillerinin membranlarında sodyum potasyum dengesini sağlar. SR, kalsiyumu pompalaması ve geri alması için enerji kaynağı olarak ATP'yi kullanır.

İSTİRAHAT HALİ

Kalsiyum, sarkoplazmaya bırakıldığında kas üzerinde bir çok etki yapar:

1. Kalsiyum, troponini aktive eder ve bu şekilde tropomiyosinin şekli değişir ve aktin molekülü miyosinin baş kısmı ile çapraz bağ oluşturur.
2. Kalsiyum, miyosin ATPaz enzimini aktive eder ve bu şekilde kasılma için gerekli enerji serbest kalır.
3. Kalsiyum, kalsiyum pompasındaki ATPazı aktive eder ve bu şekilde kontraksiyonun sona ermesi için T-tübüller aracılığı ile SR'a geri dönmesini sağlar.

Kalıcı kontraksiyon, ölüm sonrası meydana gelmektedir. Ortamda gevşeme için gerekli ATP olmayınca rigormortis meydana gelmektedir. Fibriller ölüm sonrası kasılma pozisyonunda kalır. Bu durum, aktin ve miyosin filamentlerinin pozisyonlarını koruyamayacağı zamana kadar sürer.

KASILMA FAZI

İstirahat hali



Motor sinir aksiyon potansiyeli motor son plağa ulaşır



Asetilkolin serbest kalır, sarkolema ve membranlar depolarize olur (iyonsuzlaşır). (Na^+ , fibrile gider)



Aksiyon potansiyeli T-tübüller aracılığı ile SR'a iletilir



SR terminal sisternae'den Ca^{+2} iyonları serbest kalır ve sarkoplazmada konsantrasyonu artar



Ca^{+2} , troponin C'ye bağlanır



Tropomiyosin, aktin üzerindeki miyosin bağlama bölgesinden çekilir



Aktin-miyosin çapraz köprüsü oluşur



Miyosin ATPaz aktive olur ve ATP hidrolize olur



Çapraz köprülerin tekrar oluşması filamentlerin kaymasına ve sarkomerin kısalmasına neden olur

İSTİRAHAT FAZI

Kolinesteraz serbest kalır ve asetilkolin parçalanır



Sarkolema ve T-tübüller yeniden polarize olur (iyonlaşır)



SR da Ca^{+2} pompası aktif hale gelir ve Ca^{+2} SR terminal sisternae'ye geri döner



Aktin-miyosin çapraz köprü oluşumu sona erer



Tropomiyosin aktin üzerindeki miyosin bağlama bölgesine geri döner



ATP ile Mg^{+2} kompleksi oluşur



Aktin filamentleri, miyosin filamentinden ayrılır ve eski haline döner



Sarkomerler istirahat pozisyonuna geri döner

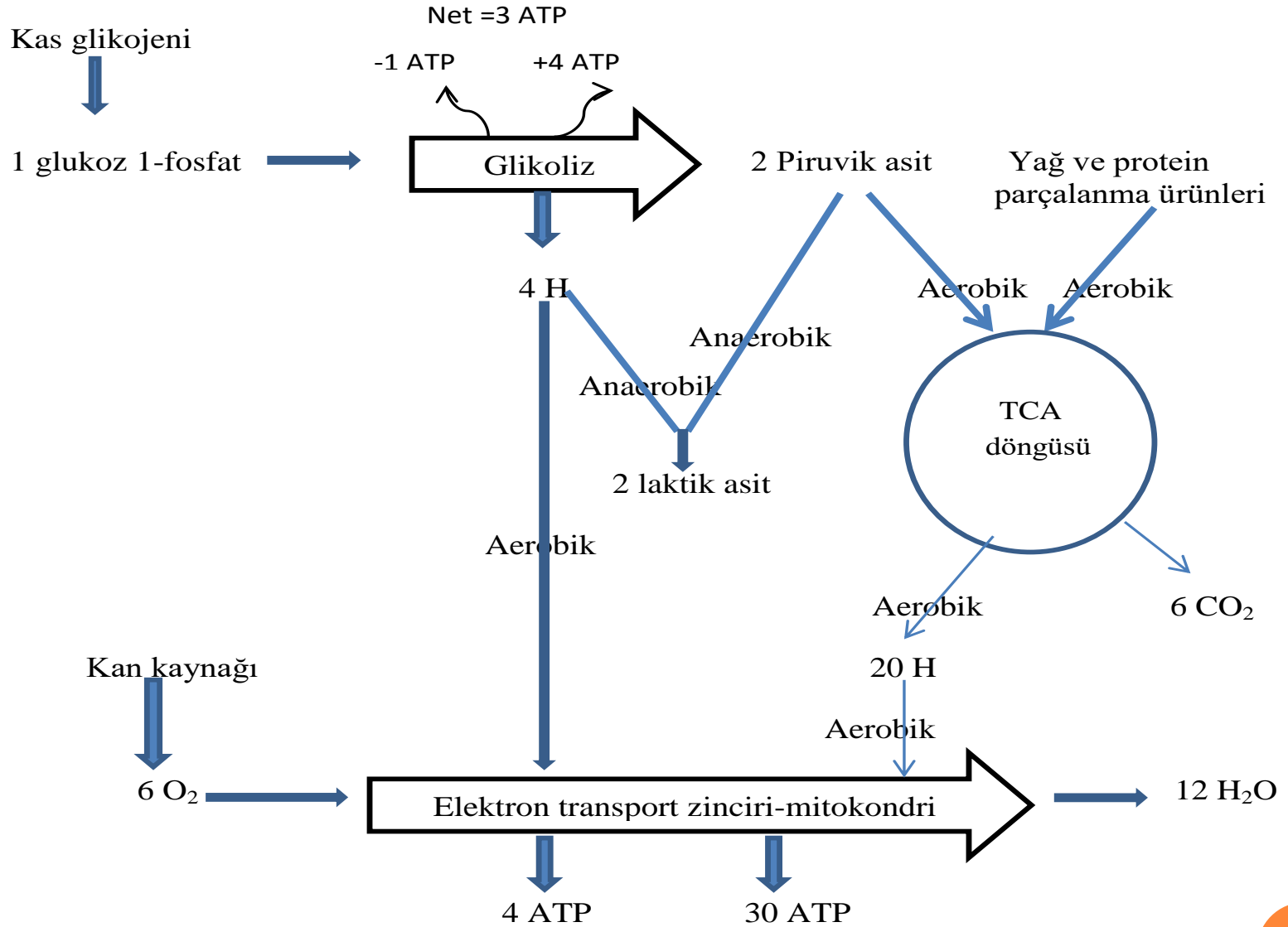
KAS KASILMASI VE İŞLEVİ İÇİN ENERJİ KAYNAĞI

- Kas kasılmasında adenozin trifosfat (ATP) başlıca enerji kaynağıdır. ATP başlıca aşağıdaki işlemler için gereklidir;
- ✚ Kasılma prosesi
- ✚ İstirahat sırasında kalsiyumu sarkoplazmik retikuluma geri gönderme
- ✚ Sarkolema üzerinden sodyum/potasyum iyon dengesini sağlamak
- Bunlar içerisinde en fazla enerji gerektiren işlem, kas kontraksiyonu yani kasılmasıdır. Örneğin tek bir kas kasılması sırasında gerekli enerji, membran potansiyelinin eski haline gelmesi için gerekli enerjinin 1000 katı, sarkoplazmik retikuluma kalsiyumun pompalanması için gerekli enerjinin 10 katı kadardır.

- Kasta mevcut ATP, sadece birkaç kasılma için yeterli miktardadır. Bu nedenle canlı kasta düzenli olarak ATP üreten bir sisteme ihtiyaç vardır.
- Hayvan kesildiğinde, kas bu üretimi devam ettiremediği için ete dönüşmektedir.
- ATP sentezi için metabolik yol refosforilasyondur (ADP'nin ATP'ye dönüşümü) ve ölümden sonra da bu sentez bir süre devam ettirilir.
- En hazır enerji kaynağı **fosfokreatin**dir. Fosfokreatin aşağıdaki reaksiyonla ATP ve kreatin oluşturur:



- Bu reaksiyon sarkoplazmada gerçekleşir ve kreatin kinaz enzimi ile katalizlenir. Buna göre kontraksiyon sırasında harcanan ATP süratle yeniden oluşur. İstirahat halindeki kasta fosfokreatin miktarı ATP miktarının iki katıdır. Kreatinin refosforilasyonu mitokondride gerçekleşmektedir.



Kas faaliyeti için gerekli enerji oluşum yolları

AEROBİK METABOLİZMA

- ATP üretimi en fazla, aerobik metabolizma ile oluşmaktadır.
- Bu metabolizmada gıda bileşenleri olan karbonhidratlar, proteinler ve lipitler karbondioksite ve suya kadar parçalanmaktadır. Bu sırada serbest kalan enerjinin bir kısmı ATP üretimi için kullanılmaktadır.
- Daha önce de belirtildiği gibi, glikojen kasta depolanan ve kas ağırlığının %1'ini oluşturan bir karbonhidrattır.
- Glikojen, *glikoliz* olarak adlandırılan bir prosesle bağımsız glukoz moleküllerine parçalanmaktadır. Tüm bu proses sarkoplazmada meydana gelmektedir. Glikojen önce glukoz 1-fosfata daha sonra ise 3 karbonlu bileşiklere ayrışmaktadır. Glukozun son parçalanma ürünü piruvik asittir.

- Glikoliz prosesinden, her bir glukoz 1-fosfattan net 3 ATP ve 4 hidrojen iyonu (H^+) oluşmaktadır. Hidrojen iyonları *nikotinamid adenin dinükleotid* (NAD^+) adı verilen taşıyıcı bileşikler aracılığı ile mitokondriye taşınmakta diğer bir refosforilasyon olayı için kullanılmaktadırlar.
- Aerobik metabolizmanın ikinci kısmı, mitokondride gerçekleşen *trikarboksilik asit (TCA) döngüsü* olarak adlandırılan reaksiyonlar serisidir. Bu döngüde, piruvik asitten karbondioksit ve H^+ iyonları oluşmaktadır. Bu karbondoksit hücre dışına difüze olmakta ve kan yoluyla vücuttan uzaklaştırılmaktadır.
- Elektron taşıyıcısı NAD^+ , H^+ iyonunu alarak $NADH$ oluşturmaktadır. Yağların ve proteinlerin parçalanma ürünleri de bu döngüye katılmakta ve yararlı enerjiye dönüşmektedir.

- En faydalı refosforilasyon işlemi aerobik metabolizma ile gerçekleşen *elektron transport zinciridir*.
- Elektron transport zinciri, mitokondride bulunan demir içeren enzim grubudur. Bu enzim grubuna TCA döngüsünde yer alan enzimler de dahil olmaktadır.
- Elektron transport zincirinde, glikoliz ve TCA döngüsünden oluşan H^+ iyonları, NAD^+ 'den taşınmakta ve su oluşturmak üzere oksijenle birleşmektedir. Serbest kalan enerjinin büyük bir kısmı ADP'yi refosforile etmek için kullanılmakta, kalanı ise ısı olarak kaybolmaktadır. TCA döngüsünde açığa çıkan her bir çift H^+ den 3 ATP oluşmaktadır. İlaveten, glikoliz olayından serbest kalan her bir çift H^+ 'den de 2 ATP oluşmaktadır.

- Bir molekül glukoz glikojenden ayrıldığında ve metabolik proses tamamlandığında, 37 ATP oluşan bir net enerji ortaya çıkmaktadır. ATP molekülünün 3 tanesi glikoliz ile oluşmakta ve 4 H⁺ açığa çıkmaktadır. Bu reaksiyonun devamında elektron transport zinciri ile 4 adet daha ATP oluşmaktadır. Glikoliz sonunda bir molekül glukozdan 2 piruvik asit oluşmaktadır. Her bir piruvik asitten TCA döngüsü ile 10 adet H⁺ iyonu olmak üzere toplam 20 H⁺ iyonu oluşmaktadır. Bu 20 H⁺ iyonundan ise elektron transport zinciri ile 30 adet ATP molekülü oluşmaktadır.

ANAEROBİK METABOLİZMA

- Eğer kas yavaş çalışıyor ise yeterli miktarda oksijen sağlanmaktadır. Aerobik metabolizma ve fosfokreatin yıkımı ile dokudaki enerji ihtiyacı karşılanmaktadır.
- Fakat, kas faaliyeti fazla ve kas hızlı kasılıyorsa, aerobik metabolizma ile oluşan ATP sentezi yetersiz gelmektedir. Bu durumda yani yetersiz oksijen varlığında kasta kısa süreli anaerobik solunum meydana gelmekte ve enerji kaynağı oluşturmaktadır.
- Anaerobik metabolizmanın başlıca özelliği, son ürün olarak laktik asit oluşması ve kasta birikmesidir.
- Oksijen yetersizliğinde, glikoliz ile oluşan H^+ iyonlarının tümü ve TCA döngüsü oksijen ile birleşmemektedir. Böylece H^+ iyonları kasta birikmektedir.
- Fazla H^+ iyonları, piruvik asiti laktik aside indirgemek üzere kullanılmaktadır.

- Daha önce belirtildiği gibi, her bir glukozdan glikoliz yolu ile 3 adet ATP oluşmakta ve anaerobik metabolizma kas çalışması için bu enerjiyi kullanmaktadır.
- Fakat, anaerobik yolla kas dokuda kullanılabilir enerji miktarı sınırlıdır. Zira oluşan laktik asidin kasta birikimi, pH'nın düşmesine neden olur. Kas pH değeri 6.0-6.5 düzeylerine düştüğünde glikoliz hızı ve ATP sentezi süratle düşer. Bu durumda kas yetersiz enerji ve fazla asitlik (düşük pH) nedeniyle kasılamaz.
- Bu proses bir çok hayvan kasında gözlenen bir durumdur. Yorgunluk ortadan kalktığında laktik asit kan aracılığı ile taşınmakta ve karaciğerde glukozla dönüşmekte veya kalp tarafından karbondioksit ve suya metabolize edilmektedir. Kas tekrar normal aerobik solunuma dönmektedir.