



FAKULTET ZA SPECIJALNU EDUKACIJU I REHABILITACIJU  
**Medicinska fiziologija - predavanja**

# Izvori energije tokom kontrakcije mišića

Doc. dr Maja Milovanović

# Energetski izvori za mišićnu kontrakciju

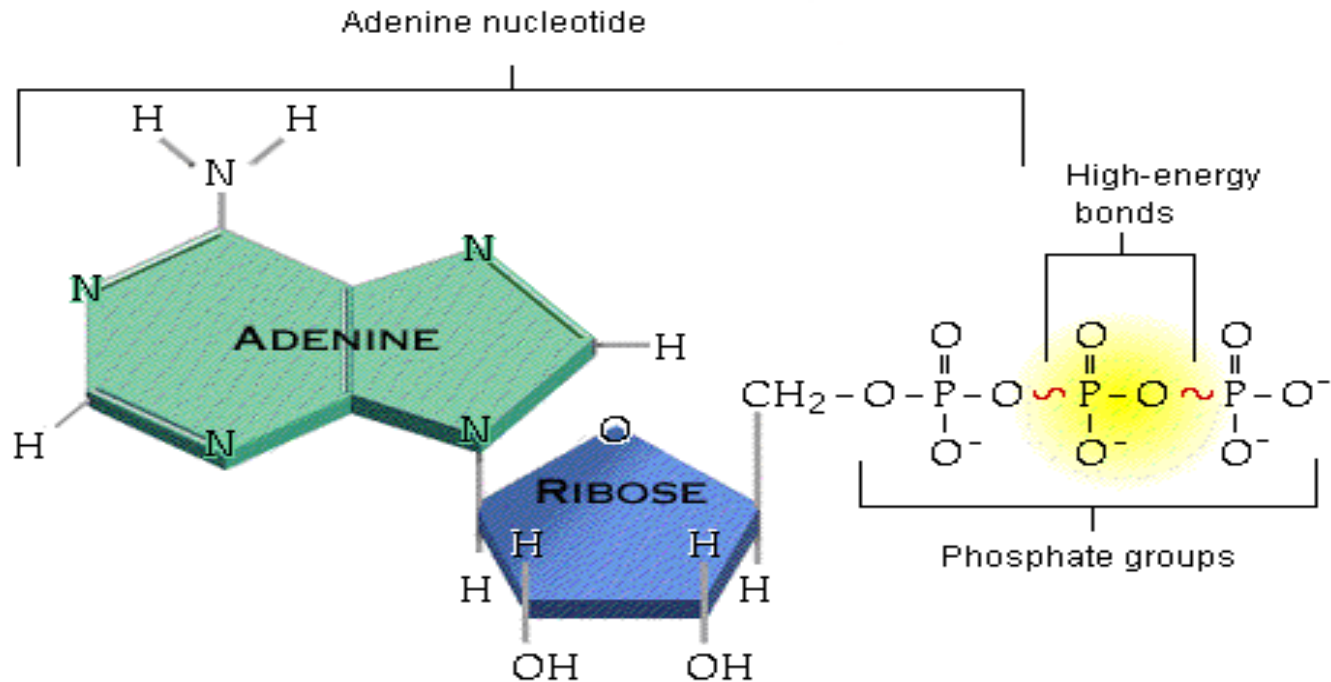
- Zavise od:
  - Intenziteta fizičke aktivnosti
  - Trajanja fizičke aktivnosti

# Neposredni izvor energije za mišićnu kontrakciju je ATP

- **Količina ATP-a je dovoljna za svega par sekundi mišićne kontrakcije**
- Količina ATP koja se nalazi u mišićima, čak i kod sportista koji su dobro utrenirani, dovoljna je za održavanje maksimalne snage mišića samo tokom oko **3s**, što može biti dovoljno za 50 m sprinta. Zbog toga je neophodno, osim u prvih nekoliko sekundi, kontinuirano stvaranje novog ATP, čak i u toku kratkotrajne fizičke aktivnosti

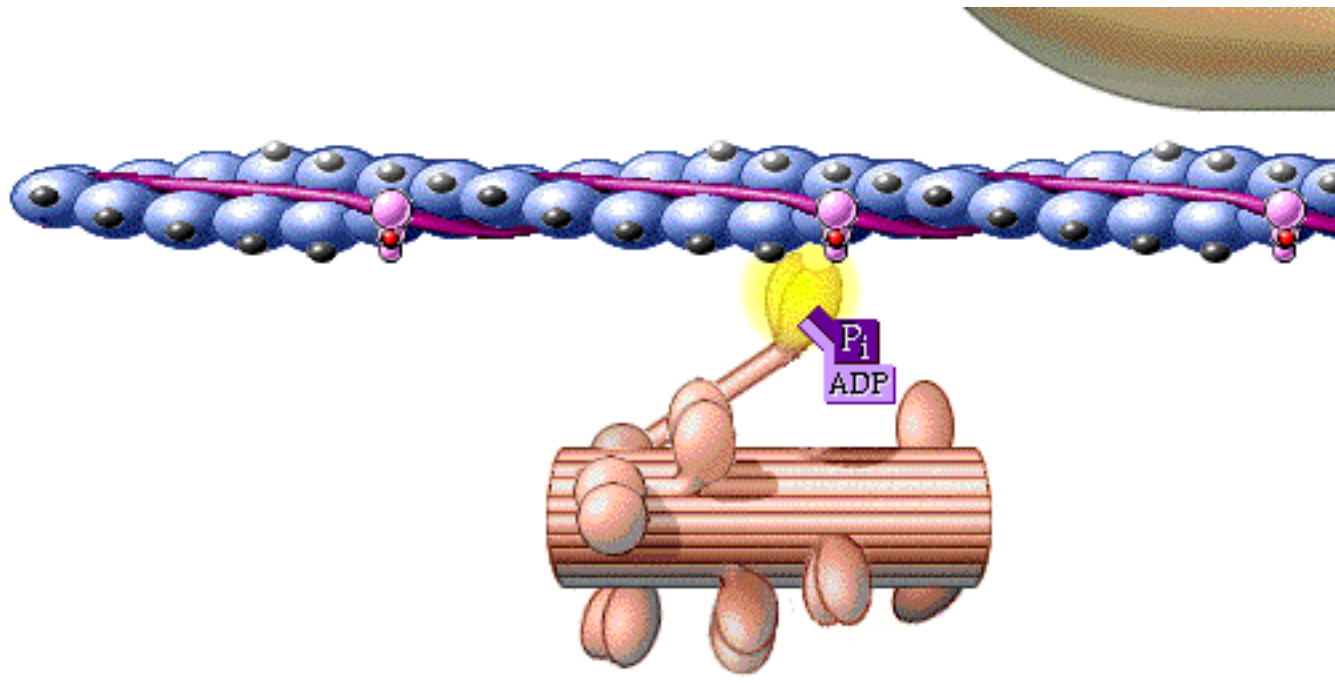
# ATP - izvor energije

- ATP-molekul sadrži molekul adenina i dve fosforne veze bogate energijom
- Hidrolizom molekula ATP-a na ADP i neorganski fosfat oslobađa se energija



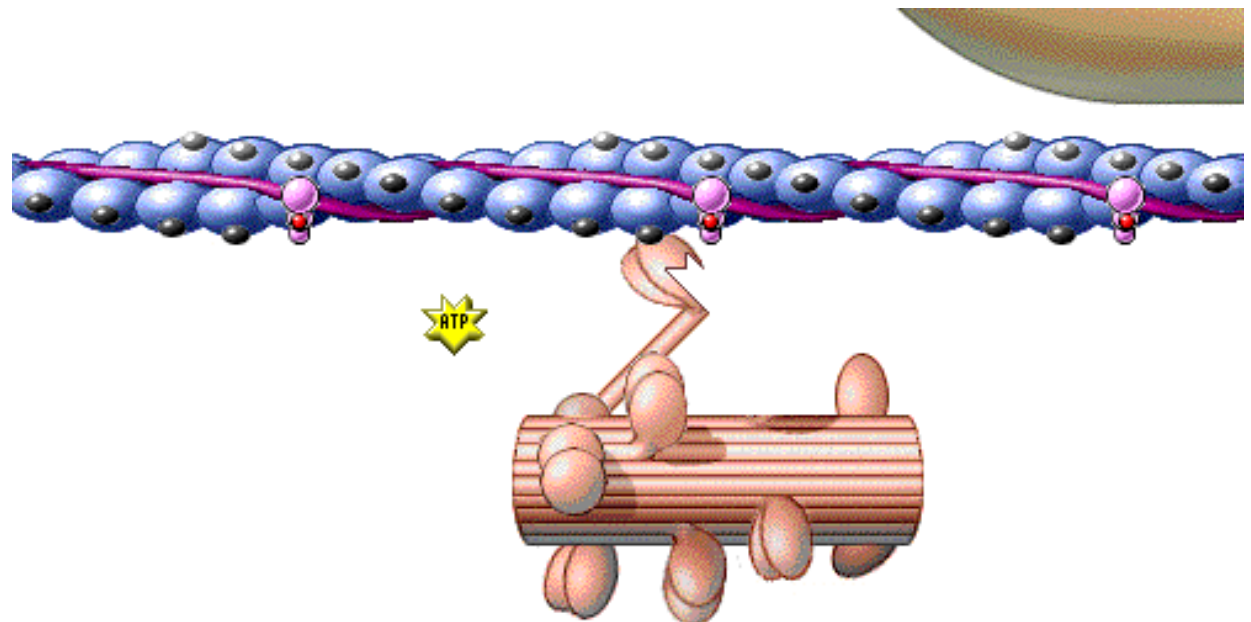
# Uloga molekula ATP-a u mišićnoj ćeliji:

1. Oslobađanje energije za povijanje glavice miozina unazad što dovodi do povlačenja tankog miofilamenta preko debelog.



# Uloga molekula ATP-a u mišićnoj ćeliji:

2. Ponovnom vezivanju molekula ATP-a za glavicu miozina, što dovodi do otpuštanja glavice sa veznog mesta na aktinu, njenog ispravljanja i vezivanja na susedno mesto na aktinu.



# Uloga molekula ATP-a u mišićnoj ćeliji:

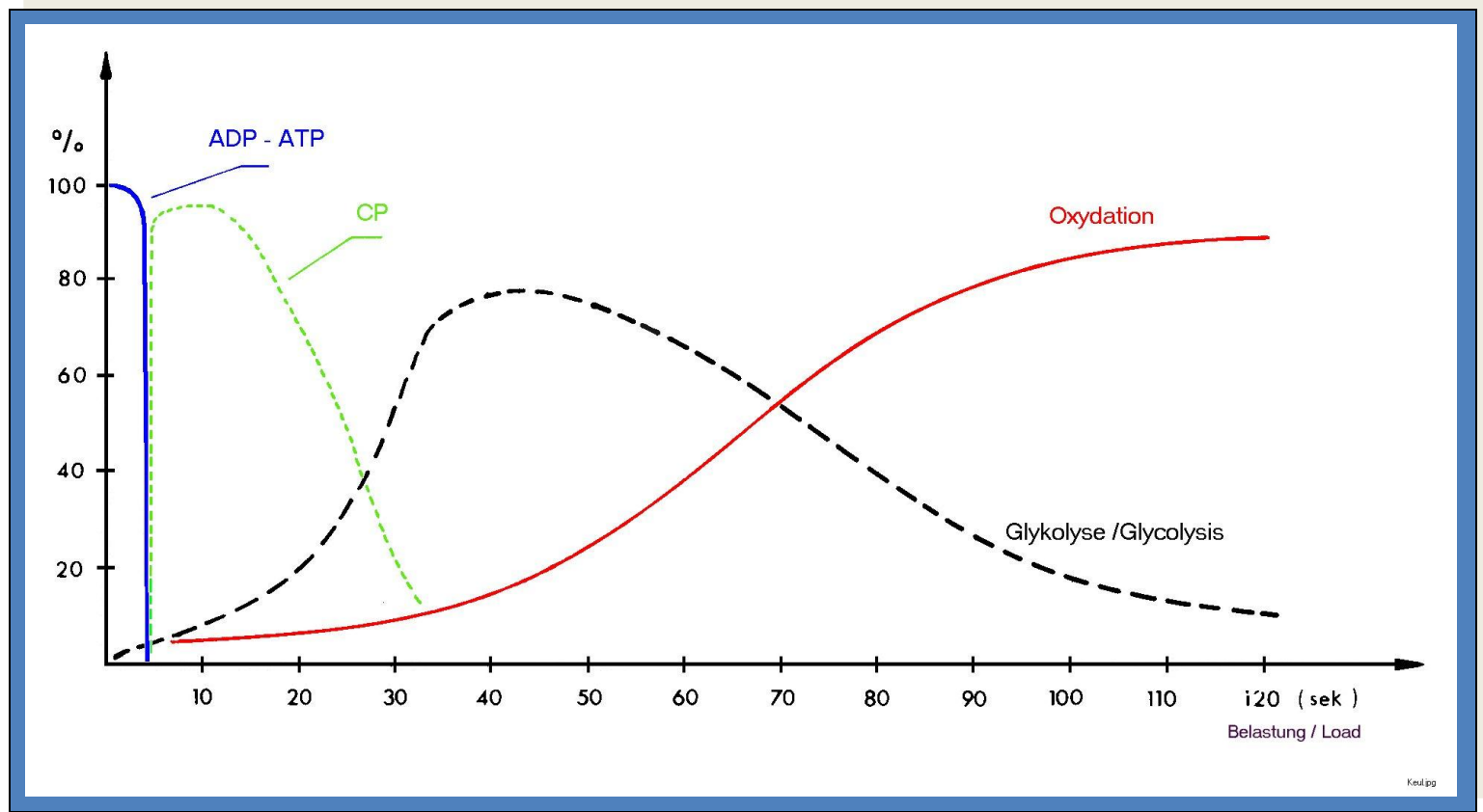
3. Oslobađanju energije za funkcionisanje  $\text{Ca}^{2+}$  - ATP-azne pumpe.

# Dominantni energetske izvori za mišićnu kontrakciju u funkciji vremena

(1) *Kreatinfosfatni energetske sistem*

(2) *Anaerobna glikoliza - sistem glikogen-mlečna kiselina*

(3) *Aerobni sistem*





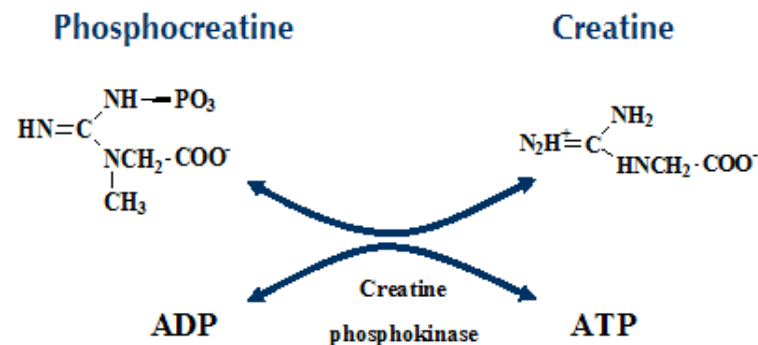
# Izvori energije za mišićnu kontrakciju

- 1. ATP u citoplazmi (ne troši kiseonik)**
  - 2. Kreatin fosfat (ne troši kiseonik)**
  - 3. Anaerobno razlaganje glikoze – glikoliza;**  
sistem glikogen-mlečna kiselina; glikolitički sistem
- 1. Aerobni proces**
    - aerobna glikoliza,
    - Krebsov ciklus ili ciklus limunske kiseline
    - oksidativna fosforilacija ili elektronski transportni lanac

# Kreatin fosfat kao izvor energije za mišićnu kontrakciju

- Osnovna uloga: brza resinteza ATP-a, dok se ne uključe drugi mehanizmi produkcije ATP-a
- Količina 3-4 puta veća od količine ATP-a.

## Phosphocreatine-ATP Interaction



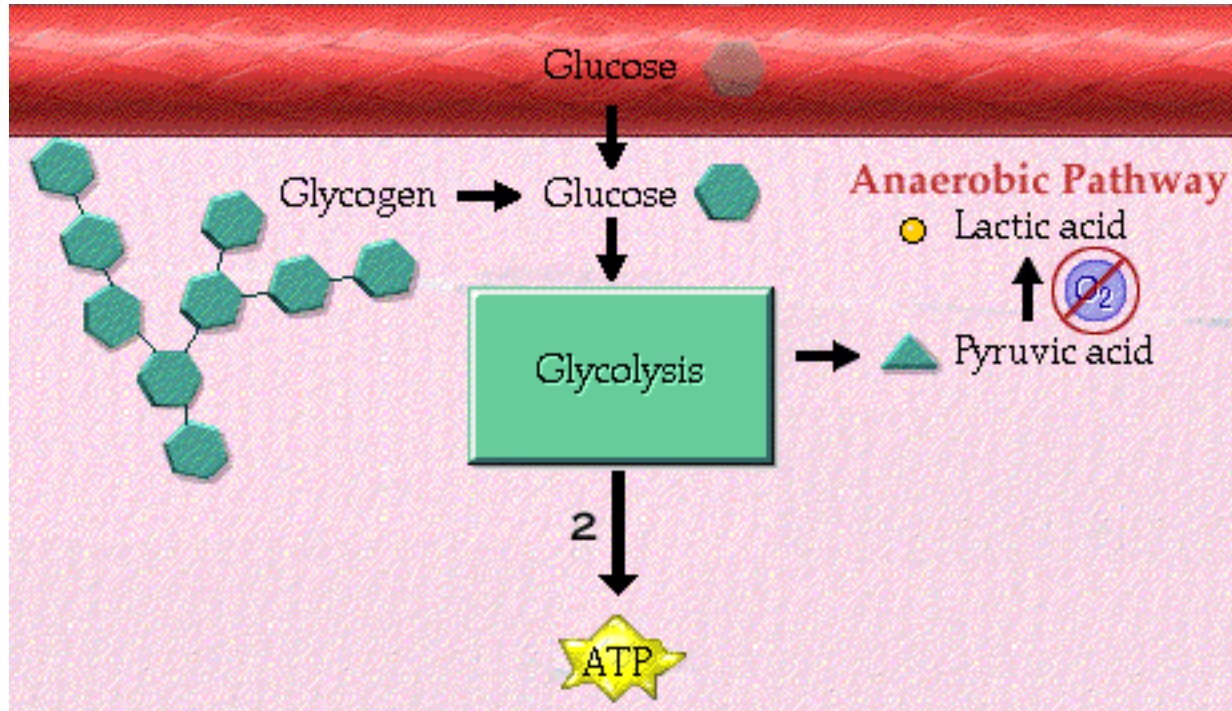
# Kreatin fosfat

- Prenos energije sa kreatin fosfata na ATP se **odvija u deliću sekunde**, što znači da je sva energija koja je deponovana u mišiću u obliku kreatin fosfata trenutno upotrebljiva za mišićnu kontrakciju
- Kreatin fosfat i ATP koji se nalaze u ćeliji zajedno mogu omogućiti maksimalnu snagu mišićne kontrakcije tokom **8 do 10 s**
- Energija iz energetski bogatih fosfatnih jedinjenja se upotrebljava za kratkotrajno maksimalno ispoljavanje mišićne snage.

# Anaerobno razlaganje glikoze - glikoliza (sistem glikogen-mlečna kiselina)

- Glikoza je glavni supstrat za sintezu ATP
- Izvori glikoze u mišićnoj ćeliji su:
  - Glikoza iz krvi (glikogen iz jetre)
  - Glikogen u mišićima

# Glikoliza kao izvor energije za mišićnu kontrakciju



## Neto efekat glikolize

1. 2 molekula ATP-a
2. 2 molekula piruvata
3. 2 molekula NADH

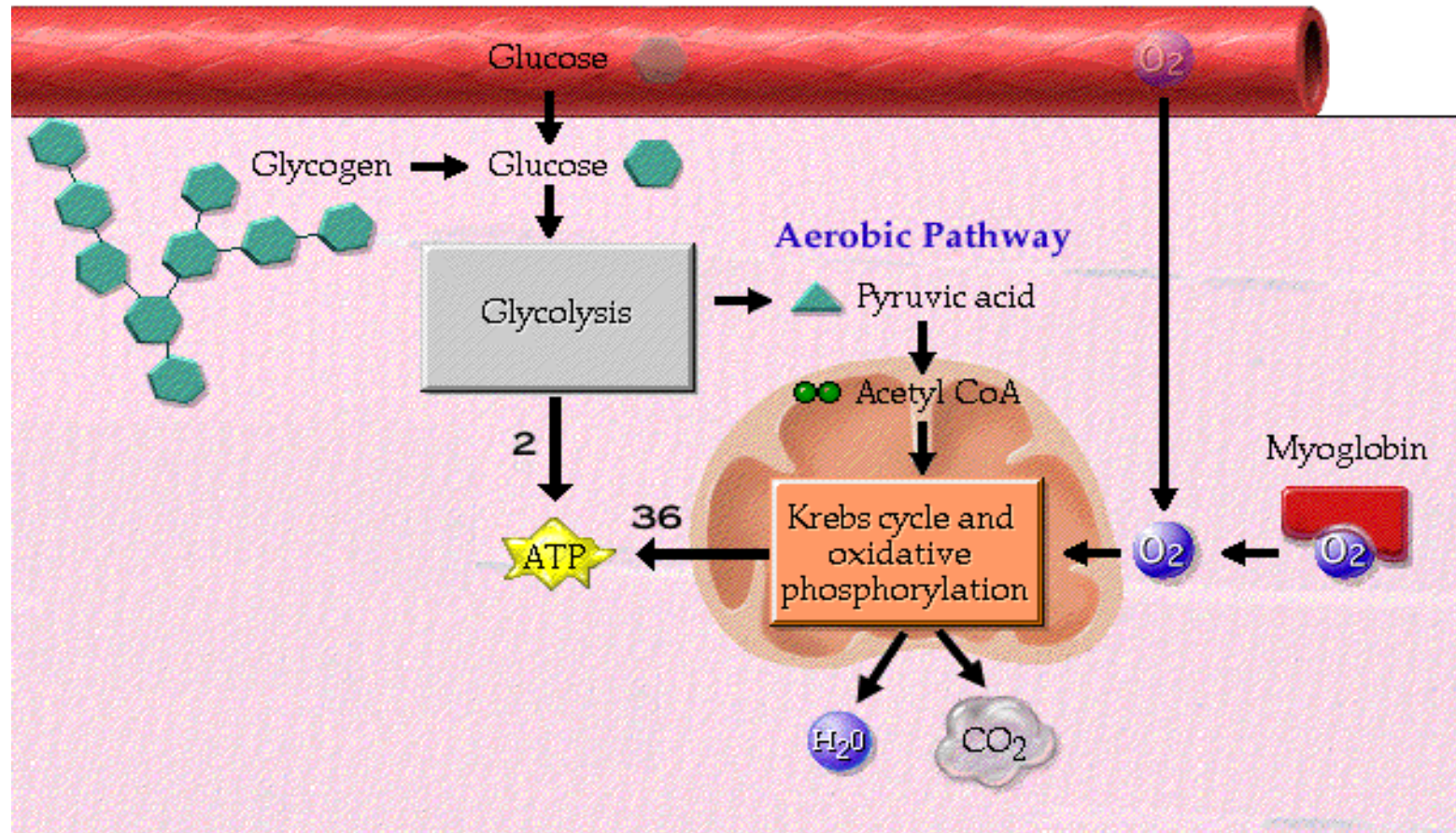
# Sistem glikogen-mlečna kiselina

- Pod optimalnim uslovima, sistem glikogen-mlečna kiselina može da obezbedi energiju za još dodatnih **1,3 do 1,6 minuta** maksimalnog mišićnog rada.

# Aerobni sistem

- Čine ga **proces oksidacije hranljivih supstrata u mitohondrijama**, a koji služe za stvaranje energije u ćeliji.
- **Glukoza, masne kiseline i aminokiseline** iz hrane, posle odgovarajuće obrade, reaguju sa kiseonikom da bi se oslobodila velika količina energije koja se koristi za prevođenje AMP i ADP u ATP.

# Aerobni proces - Krebsov ciklus i oksidativna fosforilacija



## Neto efekat Krebsovog ciklusa i oksidativne fosforilacije

1. 36 molekula ATP-a (2+34)
2.  $H_2O$  i  $CO_2$



# Energetski sistemi u odnosu na izdržljivost - vreme

1. Kreatin fosfat i ATP: **8 – 10 s**
2. Anaerobno razlaganje glukoze: **1,3 – 1,6 min**
3. Aerobni sistem: neograničeno - dok ima hranljivih supstrata

# Anaerobni prag

- Potrebe za energijom prevazilaze raspoloživu količinu kiseonika i energija se stvara u anaerobnim uslovima:

**anerobno → aerobno → anaerobno**

# Laktatni prag

- Nivo gde stvaranje laktata nadmašuje njegovu eliminaciju
- Laktatni prag odražava međuzavisnost aerobnog i anaerobnog energetskeg sistema, tj. **pomak ka anaerobnoj glikolizi pri kojoj dolazi do nagomilavanja mlečne kiseline**
- Laktatni prag je mera anaerobnog metabolizma - predstavlja sposobnost podnošenja opterećenja bez akumulacije laktata u krvi.

# Kiseonički deficit

- Početkom fizičkog opterećenja povećava se potreba za  $O_2$
- ali, protok krvi u mišićima i aerobni oksidacijski metabolizam zahtevaju vreme da se prilagode potrebama → **kiseonički deficit**

# Depoi kiseonika u organizmu

- Telo normalno sadrži **2 litra deponovanog kiseonika** koji se može koristiti za aerobni metabolizam, čak i ako se ne udiše nova količina kiseonika.
- Ovaj kiseonik se nalazi u sledećim depoima:
  - 0,5 l je u vazduhu koji se nalazi u plućima,
  - 0,25 l je rastvoreno u telesnim tečnostima,
  - 1 l je vezan za hemoglobin u krvi i
  - 0,3 l je deponovano u samim mišićnim vlaknima vezano za mioglobin

# Kiseonički dug

- **Energija koja se potroši kontrakcijom mišića je veća od energije koja se dobija aerobnim mehanizmom, što stvara kiseonički dug.**
- Kardiovaskularni i respiratorni sistem povećavaju aktivnost da bi obezbedili kiseonički dug.

# Kiseonički dug

Dodatni kiseonik se upotrebljava za:

1. Obnavljanje rezervi ATP, kreatinin fosfata i glikogena
2. Uklanjanje laktata
3. Vraćanje pH na normalne vrednosti

# **Energetski sistem**

Supstanca koja se koristi

Ograničenje za proizvodnju ATP

Primarna upotreba proizvedenog ATP-a

## **Anaerobni**

1. Kreatinfosfat

Uskladišteni ATP  
kreatin fosfat

Mišići skladište  
veoma malo CP-a  
i ATP-a

Aktivnosti visokog  
intenziteta, veoma kratkog  
trajanja; manje od 10 sekundi  
do zamora

2. Razgradnja  
glukoze

Glukoza i  
glikogen

Akumuliranje  
mlečne kiseline  
izaziva brzi zamor

Aktivnosti visokog  
intenziteta, kratkog trajanja;  
od 1 do 3 minute do zamora

## **Aerobni**

Masne kiseline,  
glukoza i glikogen

Trošenje mišićnog  
glikogena i šećera;  
nedovoljno  
dopremanje  
kiseonika

Dugotrajne aktivnosti;  
duže od 3 minuta do zamora



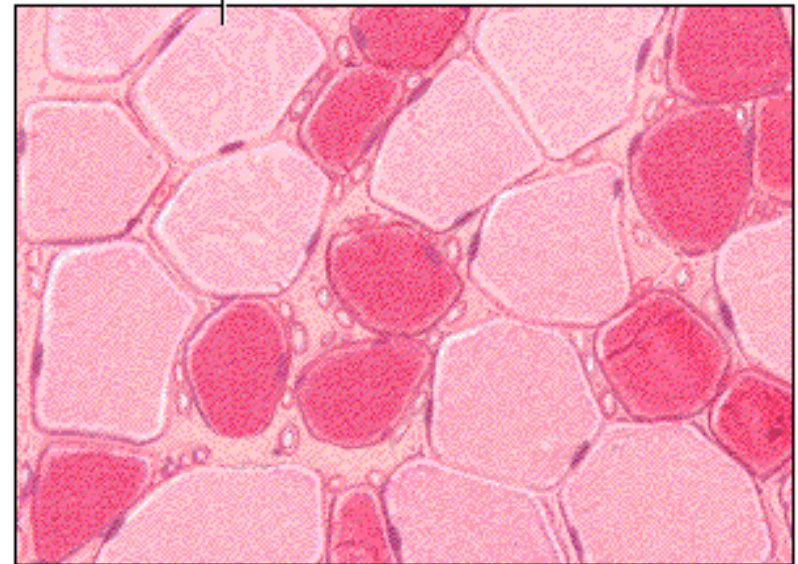
# Podela mišićnih vlakana na spora i brza

- Brza i spora mišićna vlakna (odnos – genetski determinisan)
- **Brza mišićna vlakna (bela mišićna vlakna)**
  - 2-3x aktivniji enzimi koji su odgovorni za brzo oslobađanje energije (iz fosfagenog sistema i sistema glikogen-mlečna kiselina).
  - Brza vlakna imaju oko dva puta veći prečnik
- **Spora mišićna vlakna (crvena mišićna vlakna)**
  - Aktivniji su enzimi koji služe za aerobno oslobađanje energije.
  - Ova vlakna imaju više mitohondrija i mnogo više mioglobina (crvena).
  - Broj kapilara oko sporih mišićnih vlakana je mnogo veći nego oko brzih.

# Brza mišićna vlakna

- Veća vlakna za veću snagu kontrakcije.
- Svetlija prebojenost zbog manje količine mioglobina.
- Slabije snabdevena krvlju.
- Smanjen broj mitohondrija u mišićnoj ćeliji.
- Visok sadržaj glikogena i rezervi kreatin fosfata.
- Sadrže brzo delujuću aktin-miozin ATP-azu čime se skraćuje trajanje kontrakcije i relaksacije – brza mišićna vlakna

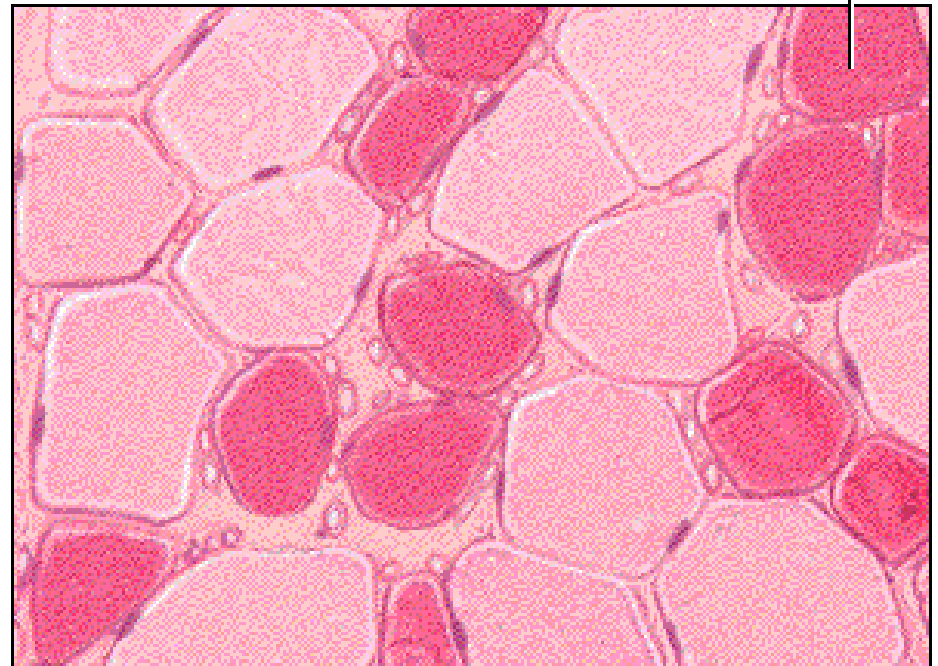
White muscle fiber (cell)

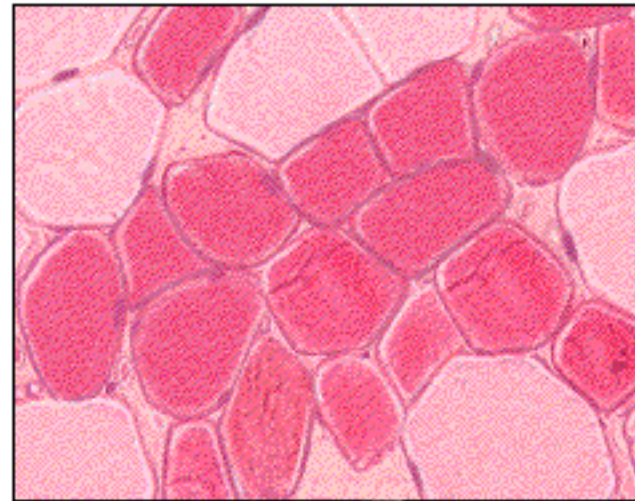
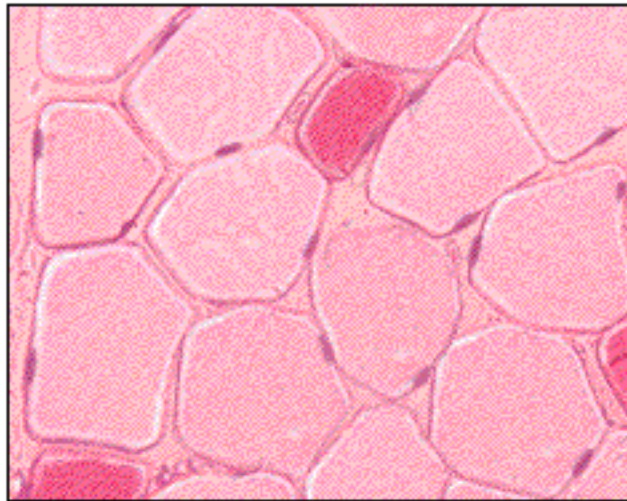


# Spora mišićna vlakna

- Manja mišićna vlakna.
- Crvena prebojenost zbog prisustva mioglobina.
- Razvijen sistem krvnih sudova i kapilara.
- Znatno veći broj mitohondrija u mišićnoj ćeliji postavljenih periferno blizu kapilara
- Sadrže sporo delujuću aktin-miozin ATP-azu – spora mišićna vlakna

Red muscle fiber (cell)





- Brza mišićna vlakna – beli mišići
- Anaerobni metabolizam
- Brzo zamaranje
- Mišići važni za precizne pokrete npr. miš. pokretači oka

- Spora mišićna vlakna – crveni mišići
- Aerobni metabolizam
- Sporo zamaranje
- Mišići koji odgovaraju sporo ali sa produženom kontrakcijom

# Odnos brzih i sporih mišićnih vlakana u kvadricepsu različitih sportista

	<b>Brza vlakna</b>	<b>Spora vlakna</b>
<b>Maratonci</b>	<b>18</b>	<b>82</b>
<b>Plivači</b>	<b>26</b>	<b>74</b>
<b>Prosečan muškarac</b>	<b>55</b>	<b>45</b>
<b>Dizači tegova</b>	<b>55</b>	<b>45</b>
<b>Sprinteri</b>	<b>63</b>	<b>37</b>
<b>Skakači</b>	<b>63</b>	<b>37</b>

# Skeletni mišići sadrže mešavinu mišićnih vlakana različitog tipa:

- **Tip 1**
  - sporo-kontrahujuća, visok aerobni kapacitet
- **Tip 2a**
  - brzo-kontrahujuća, umeren aerobni kapacitet
- **Tip 2b**
  - brzo-kontrahujuća, nizak aerobni ali visok glikolitički kapacitet
- **Tip 2c**
  - intermitentna vlakna

# Zamor

- Centralni zamor (psihički)
- Iscrpljenost energetskega sistema
- Akumulacija metaboličnih produktov
- Nervno-mišični zamor (nervnomišična spojina)