



# **Biomehanika lokomotornog sistema čoveka**

Prof. dr Milan S. Kovačević

# Motivacija

---

- Značaj fizike za medicinu
- Kako je fizika nauka koja proučava osnovna ili suštinska svojstva prirodnih pojava i tela, možda je baš ljudsko telo najbolje mesto gde mogu da se opišu fizički zakoni.

# Dve važne oblasti primene fizike u medicini

---

- **Fizika ljudskog organizma** - opisuje funkcionisanje ljudskog organizma kroz fizičke zakone.
- **Fizika instrumentacije** koja se koristi u dijagnostici i terapiji.

# Lokomotorni (LM) sistem čoveka

---

- Omogućuje čoveku da se kreće u prostoru
- Osnovni elementi
  - pasivni: *kosti i zglobovi*
  - aktivni: *mišići*, u njima se generišu sile koje deluju na kosti i omogućuju funkcionisanje LM sistema

# Kosti - podsetnik

---

- Podela prema obliku
- Funkcije kostiju
- Sastav i struktura:
  - Kolagen
  - Minerali

# Kosti: podela prema obliku

- *Kratke kosti* (kosti šake, stopala, kičmeni pršljenovi)
- *Duge kosti* Sastoje se od srednjeg dela (*dijafiza*) i okrajaka (*epifiza*) koji su prokriveni hrskavicom i ulaze u sastav zglobova.
- *Pljosnate kosti* (kosti lobanje, karlične i grudne kosti)
- *Neppravilne kosti* nemaju ni jedan od parametara koji su nam poslužili u prethodnoj podeli. To su kosti lica i kičmeni pršljenovi.
- *Pneumatične kosti* imaju u svojoj strukturi šupljine ispunjene vazduhom (primer: mastoidni nastavak slepoočne kosti).
- *Sezamoidne kosti* podsećaju svojim oblikom na seme susama. Razvijaju se u tetivama nekih mišića, najčešće u predelu zglobova (primer: čašica – *patela*).

# Kosti: funkcija

---

- održavanje organizma u određenom položaju
- hodanje i druge vrste kretanja organizma
- zaštita osetljivih delova i vitalnih organa (mozak, srce, pluća)
- “stovarište” za određene hemijske elemente koje organizam može koristiti po potrebi
- ishrana organizma (zubi)
- transmisija zvuka (kosti srednjeg uha - jedine kosti koje tokom celog života čoveka zadržavaju veličinu koju su imale pre rođenja)
- stvaranje krvnih ćelija – crvena koštana srž

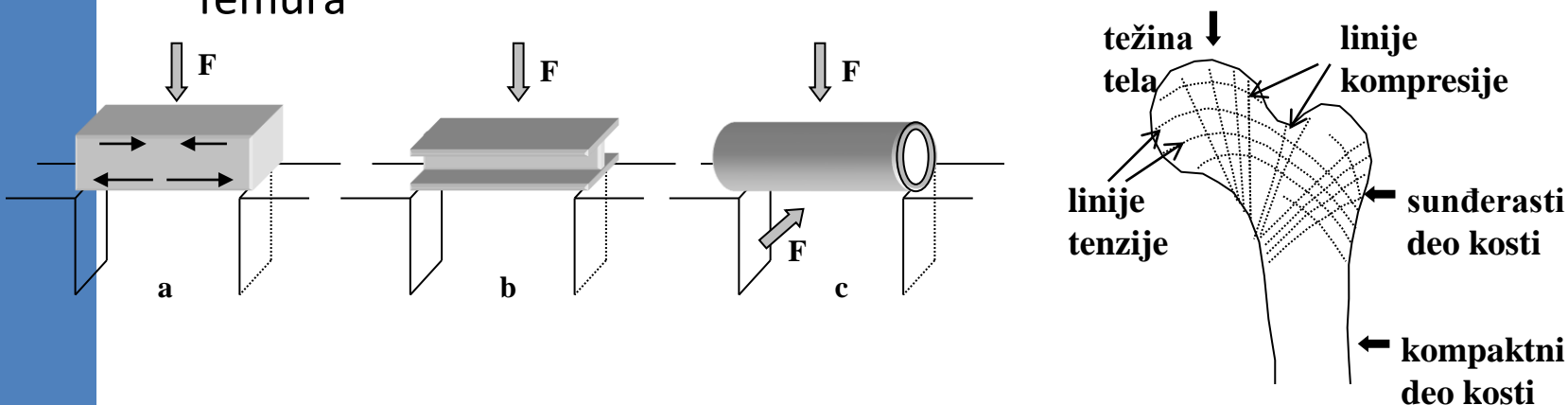
# Kosti: sastav i struktura

- **Kolagen** - organski materijal koji obezbeđuje elastičnost kostima. Kolagen predstavlja podlogu (matricu) u koju su čvrsto ugrađeni neorganski kristali.
- **Minerali** - neorganski deo koji kostima daje neophodnu čvrstinu; neorganski kristali *hidroksilapatit-a*  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , oblika štapića dijametra od 2 - 7 nm i dužine od 5 - 10 nm, ukupne površine kod odraslog čoveka oko  $4 \times 10^5 \text{ m}^2$ ; oko svakog kristala nalazi se sloj vode bogate mnogim hemijskim jedinjenjima potrebnim ljudskom organizmu.



# Kosti: kompaktna i sunderasta struktura

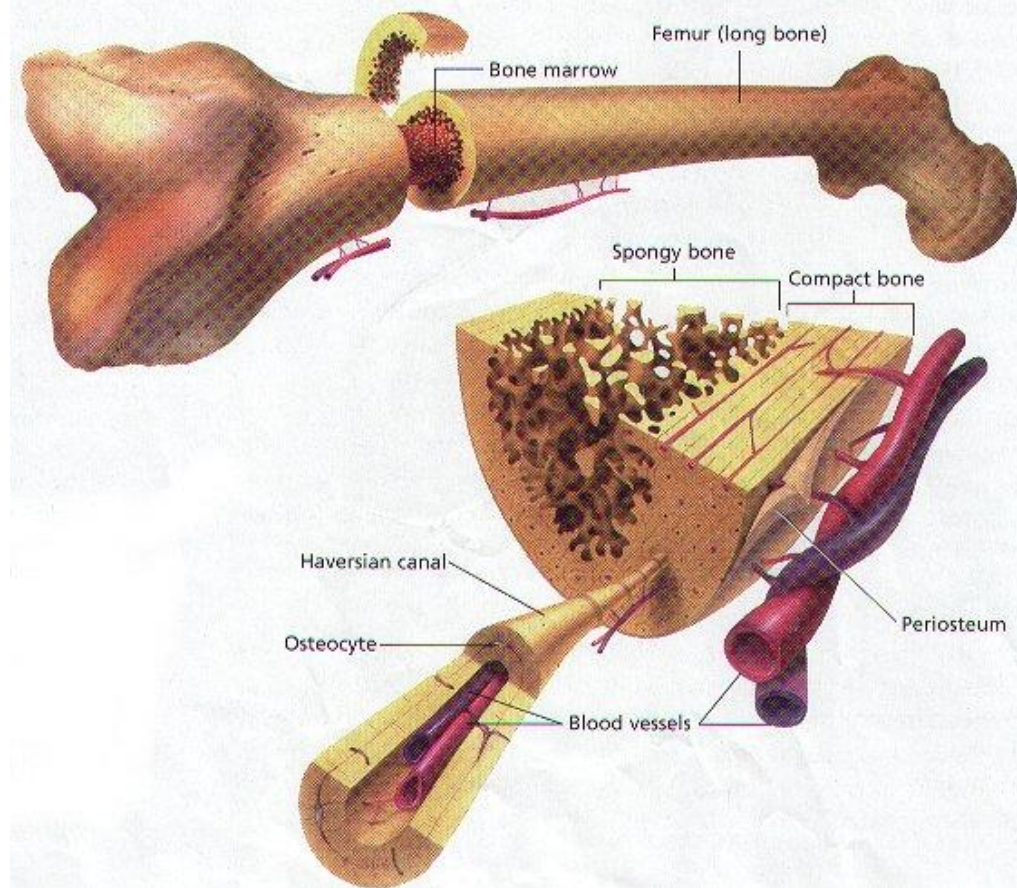
- Svaka kost je sastavljena od sledećih struktura: kompaktne i sunderaste.
- Kompaktni deo kosti se nalazi na mestu koje je izloženo dejstvu sporadičnih spoljnjih sila različitog intenziteta, kao što je srednji deo femura



- Sunderasta struktura kosti karakteristična je za delove koji ulaze zglob. Prednost ovakve strukture u odnosu na kompaktnu strukturu je da:
  - ◆ dejstvu sila u zglobovima pružaju neophodan otpor uz korišćenje manje materijala
  - ◆ zbog veće fleksibilnosti mogu da apsorbuju više energije i kompenzuju dejstvo sila

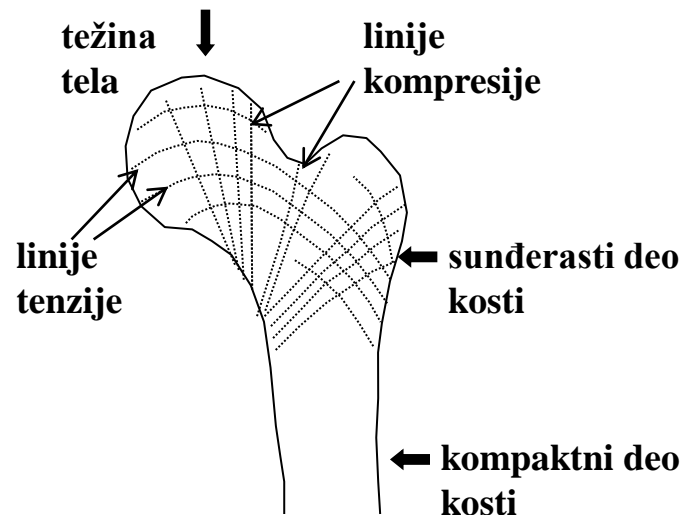
# Osnovni elementi strukture duge kosti - femura

Ogroman procenat koštanog tkiva je inertan, ali to ne znači da je kost mrtva. Oko 2% koštanog tkiva predstavljaju osteociti - ćelije koje se, kao i sve druge žive ćelije, snabdevaju elementima potrebnim za njihovo funkcionisanje putem krvi. Raspoređene su ravnomerno unutar kosti (u kolagenu) tako da održavaju kost u zdravom stanju.



# Trakasta struktura suđerastog dela kosti koji ulazi u sastav zgloba

- Sile koje deluju u zglobu prilikom kretanja imaju definisan pravac, a donekle i jačinu dejstva.
- Struktura suđerastog dela kostiju, podseća na isprepletane trake, čiji se pravci poklapaju sa pravcem dejstva sila tenzije i kompresije pri kretanju.



# Kosti: funkcionalna adaptacija

---

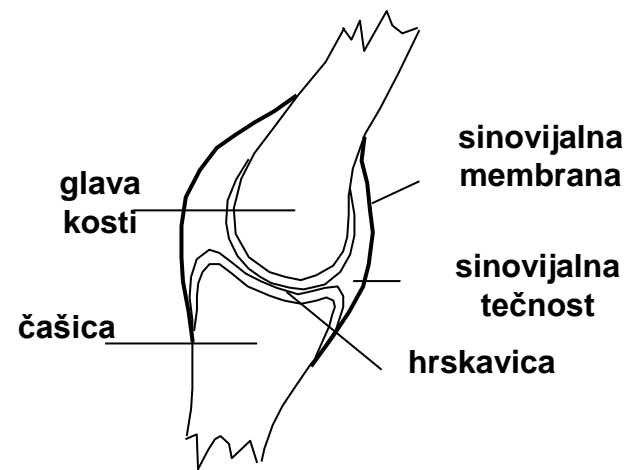
- princip ekonomičnosti u materijalu i energiji
- funkcionalna adaptacija: oblik i struktura kosti je takva, da sa najmanjom količinom materijala uspešno odoleva dejstvu sila i da je naprezanje duž kosti uniformno.

# Zglobovi - podsetnik

- Zglob predstavlja skup koštano-hrskavičavih materijala pomoću kojih se kosti međusobno zglobljuju.
- Sinartroza (nepokretni zglobovi) je kontinuirani spoj između kostiju. Na mestu spajanja elemenata skeleta čitav prostor je ispunjen potpornim tkivom, koje može biti vezivno ili hrskavičavo.
- Diartroza (pokretni zglobovi) je spoj sa prekidom kontinuiteta između kostiju, do kojeg je došlo usled formiranja šupljine u dubini spoja.
- Diartroze čini grupa zglobova koje nazivamo sinovijalni zglobovi.

# Zglob: elementi pokretnog zgloba

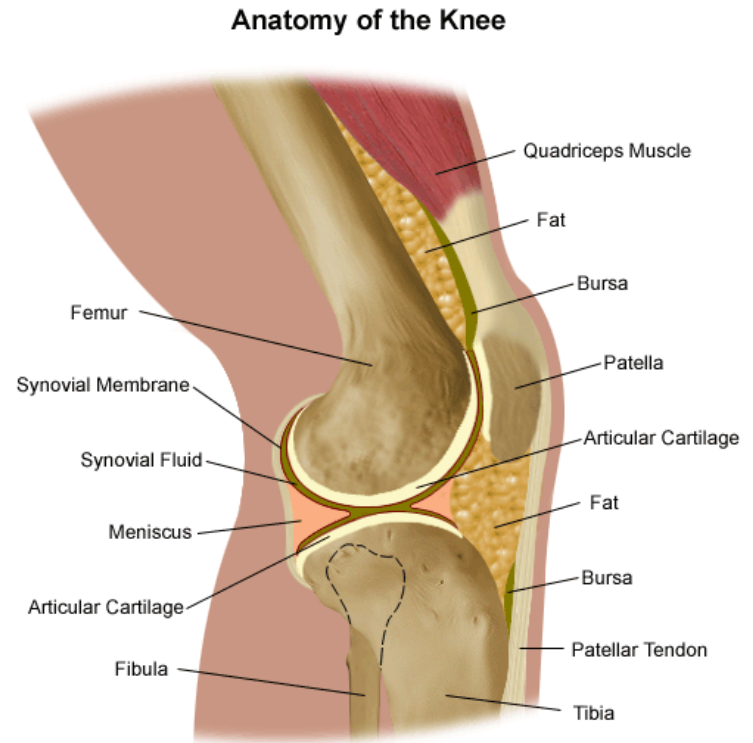
- U sastav pokretnog zgloba ulaze: krajevi (okrajci) kostiju od kojih je jedan ispupčen - glava kosti, a drugi udubljen - čašica.
- Krajevi kostiju su obloženi hrskavicom i odvojeni zglobnom šupljinom.
- U šupljini se nalazi bezbojna sluzava tečnost - *sinovija*, koja je obuhvaćena sinovijalnom membranom.
- U sastav zgloba ulaze još i zglobne veze - *ligamenti*.



Elementi pokretnog zgloba.

# Podmazivanje zglobova

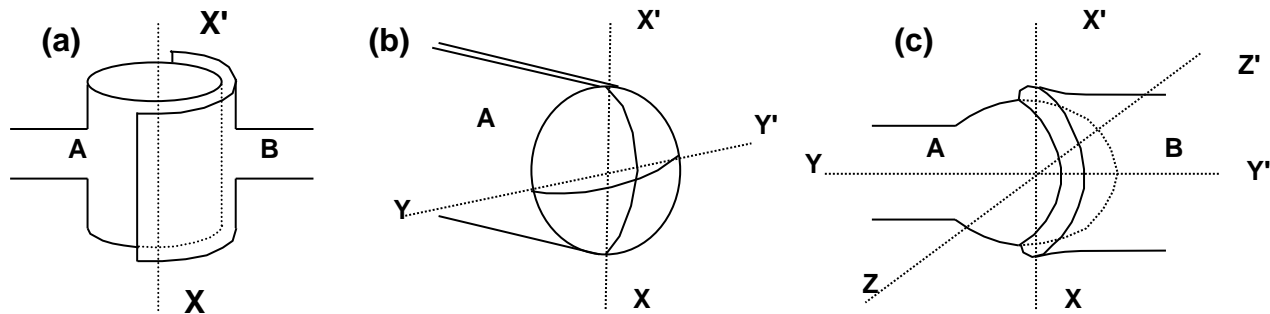
- Pri pokretima postoji trenje između okrajaka kostiju.
- Površina hrskavice koja prekriva okrajak kosti je glatka.
- Da bi se trenje dalje smanjilo, između okrajaka kostiju u sastavu zgloba nalazi se sinovijalna tečnost, koja "podmazuje" zglob.
- Koeficijent trenja u zglobu ima vrednost manju od 0,01.



# Rotacija zglobova

Pokretni zglobovi mogu da rotiraju oko jedne, dve ili tri ose (odnosno, praktično oko više osa).

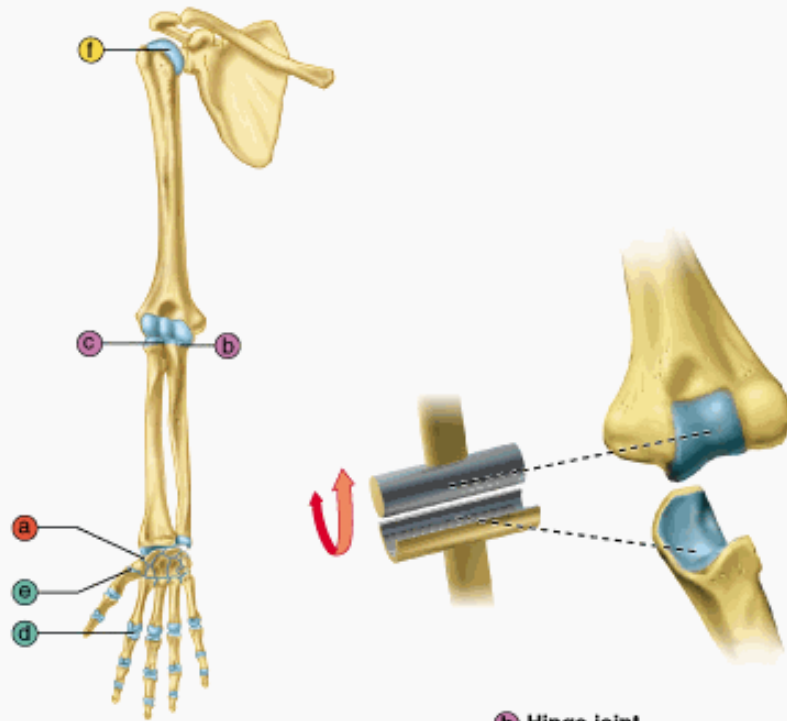
- *Jednoosni zglobovi* mogu da rotiraju samo oko jedne ose.
- Zglobne površine *dvoosnog zgloba* imaju elipsoidni ili sedlasti oblik, koji im obezbeđuje veću pokretljivost pri rotaciji oko dve uzajamno normalne ose.
- Loptasti oblik glave omogućuje rotaciju oko tri međusobno ortogonalne ose (*troosni zglob*).



Modeli jednoosnog (a), dvoosnog (b) i troosnog (c) zgloba.



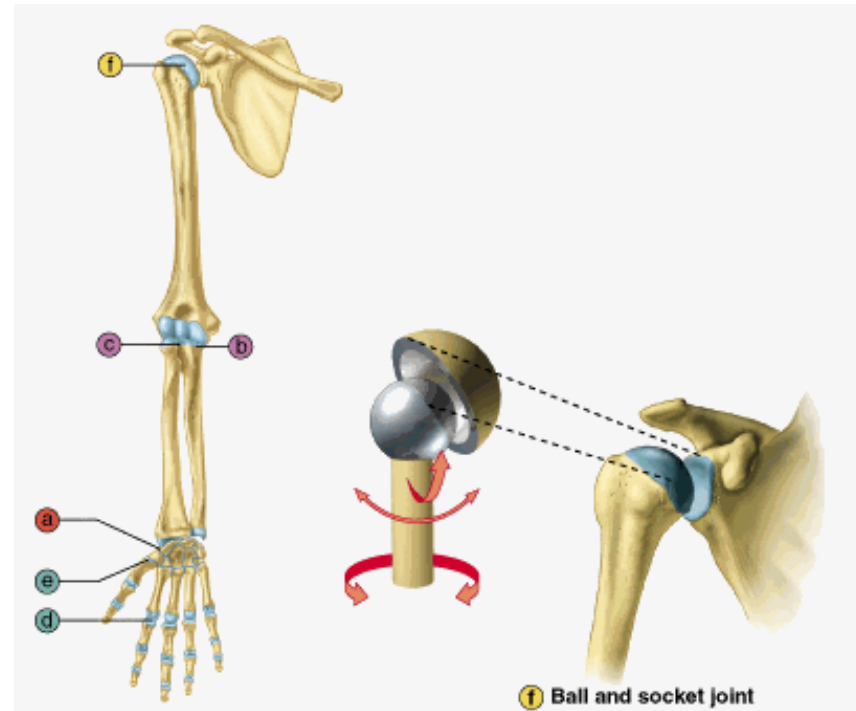
# Primeri



**b** Hinge joint

- Nonaxial
- Uniaxial
- Biaxial
- Multiaxial

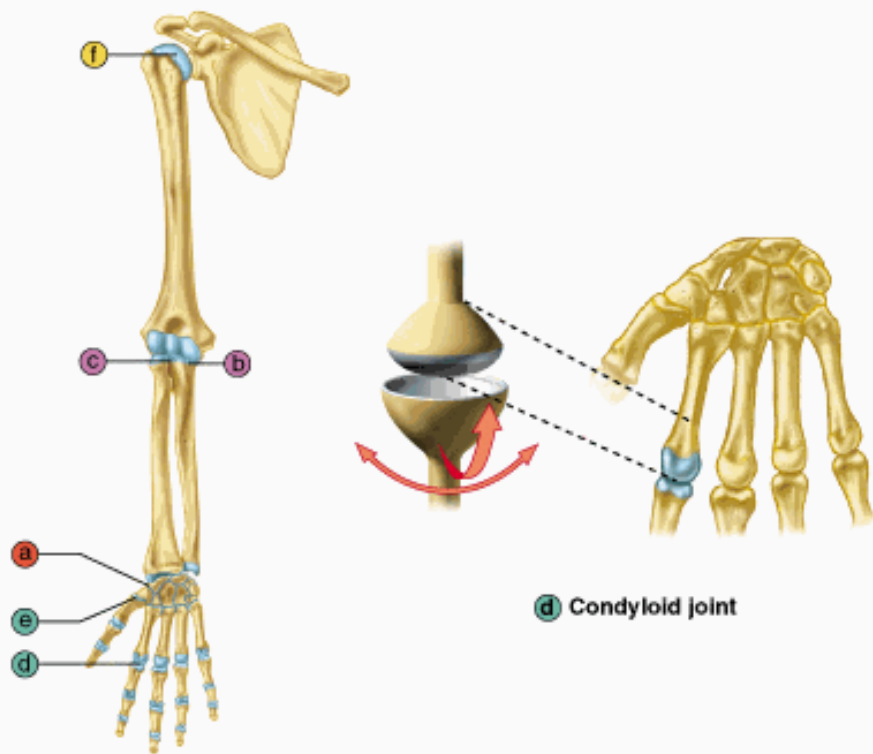
Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.



**f** Ball and socket joint

- Nonaxial
- Uniaxial
- Biaxial
- Multiaxial

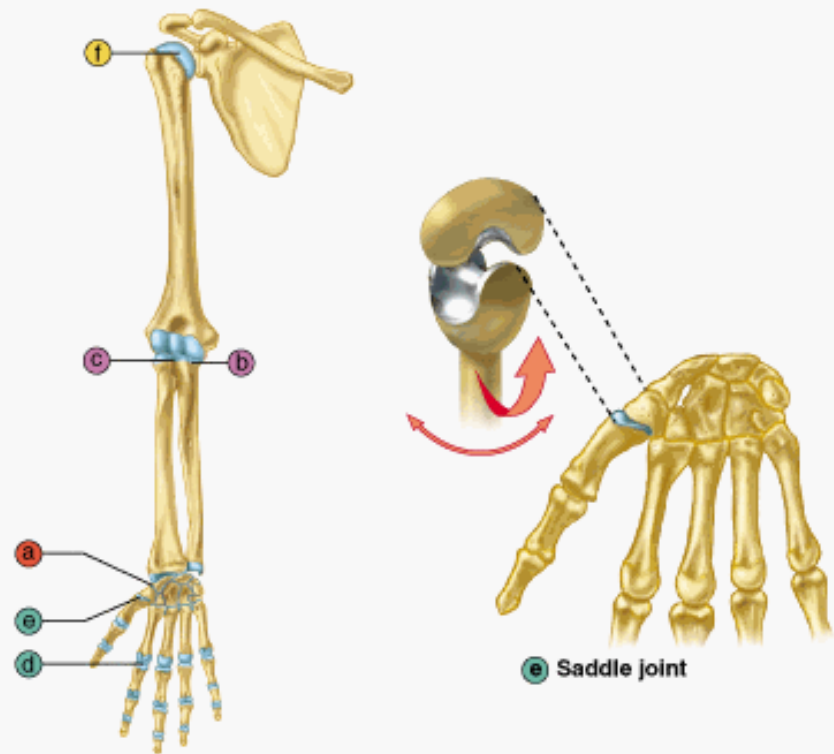
Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.



d Condyloid joint

- Nonaxial
- Uniaxial
- Biaxial
- Multiaxial

Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.



e Saddle joint

- Nonaxial
- Uniaxial
- Biaxial
- Multiaxial

Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.

# Mišići - podsetnik

---

- Mišići su aktivni elementi LM sistema jer se na njihovim krajevima generišu sile prilikom njihove kontrakcije.
- Ove sile preko tetiva, koje povezuju mišiće sa kostima, deluju na kosti i omogućuju njihove pokrete.
- U telu čoveka postoji preko 630 mišića (oko 40% težine tela). 30 od njih su facijalni mišići.

# Mišići – osnovna funkcija

---

- Funkcija mišića je da pomera telo.
- Bez mišića ne bismo mogli da pomeramo skelet. Ne bi postojao način da se animira fizičko telo ni da se izgovori misao. Ne bi smo bili sposobni da trepćemo, varimo hranu, dišemo. Naše srce ne bi moglo da pumpa krv. Ne bi smo mogli da se smeujemo, uriniramo, izbacujemo fekalije, ili da izduvamo svoj nos.

# Vrste mišića

Prema strukturi mišićno tkivo se deli na: *glatko* i *poprečno prugasto*.

**Glatki mišići:** zovu se još i nevoljni, jer NISU pod svesnom kontrolom. Nevoljni u ovom slučaju znači da “ne morate da mislite o njima”. Mogu se naći u unutrašnjim organima – digestivni trakt, respiratorni prolazi, urinarni trakt i bešika, žučna kesa, zidovi limfnih i krvnih sudova,...

**Poprečno-prugasti mišići:** zovu se još i voljni, jer su pod svesnom kontrolom. To možemo opisati na sledeći način: ako kažeš ruci “ruko, pomeri se” ona se pomera.

Osnovna podela poprečno-prugastih mišića: *skeletni mišići* i *srčani mišić*

Prema svojoj funkciji svaki mišić pripada jednoj od tri kategorije: glatkim, skeletnim, ili srčanim mišićima



**Skeletal**



**Smooth**

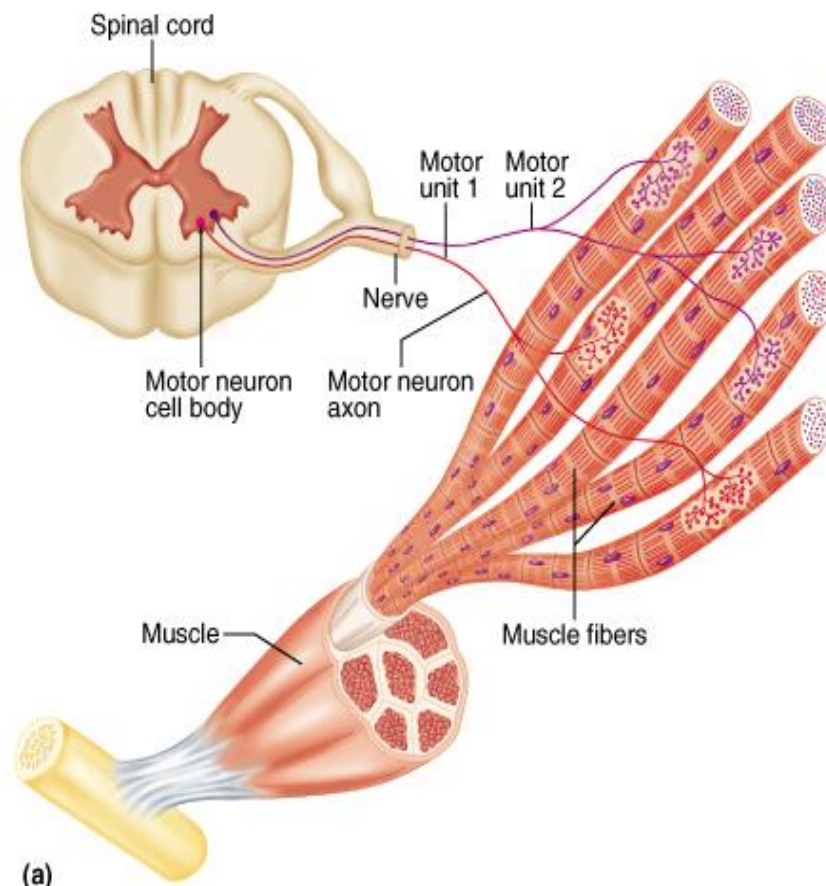


**Cardiac**

# Skeletni mišići

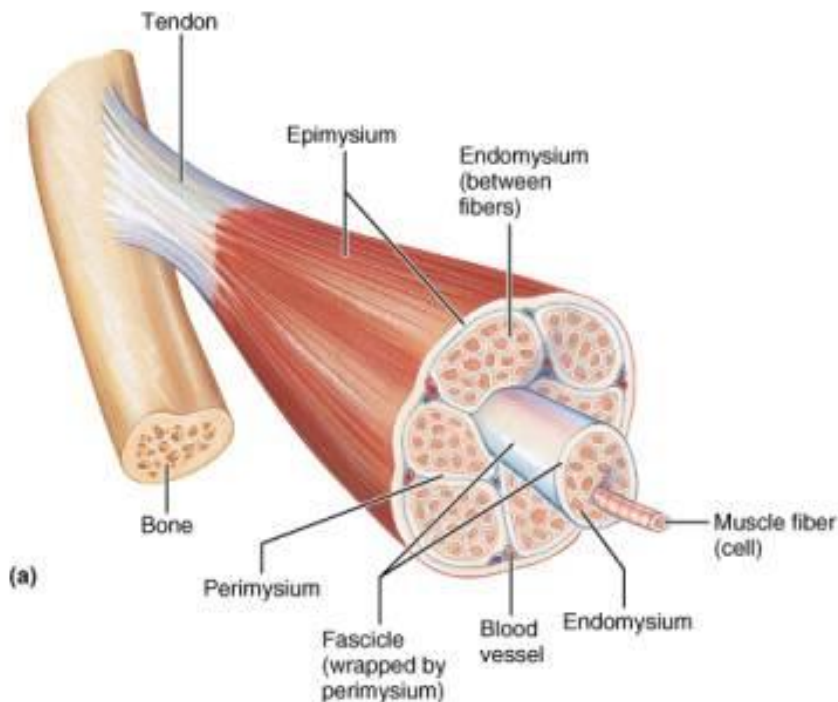
## aktivni elementi lokomotornog sistema

- Skeletni mišići predstavljaju aktivne elemente lokomotornog sistema jer se na njihovim krajevima generišu sile prilikom njihove kontrakcije.
- Uzrok ovih sila vezuje se za generisanje električnih impulsa koji se prostiru duž motornih nerava iz kičmene moždine i, delujući na mišićna vlakna, izazivaju njihovu kontrakciju.
- Ove sile su, dakle, u osnovi električnog porekla.
- Preko tetiva, koje povezuju mišiće sa kostima, sile deluju na kosti i omogućuju njihove pokrete. Vezivanje može biti jednostruko ili višestruko (dvostruko - bicepsi, trostruko - tricepsi, ...).

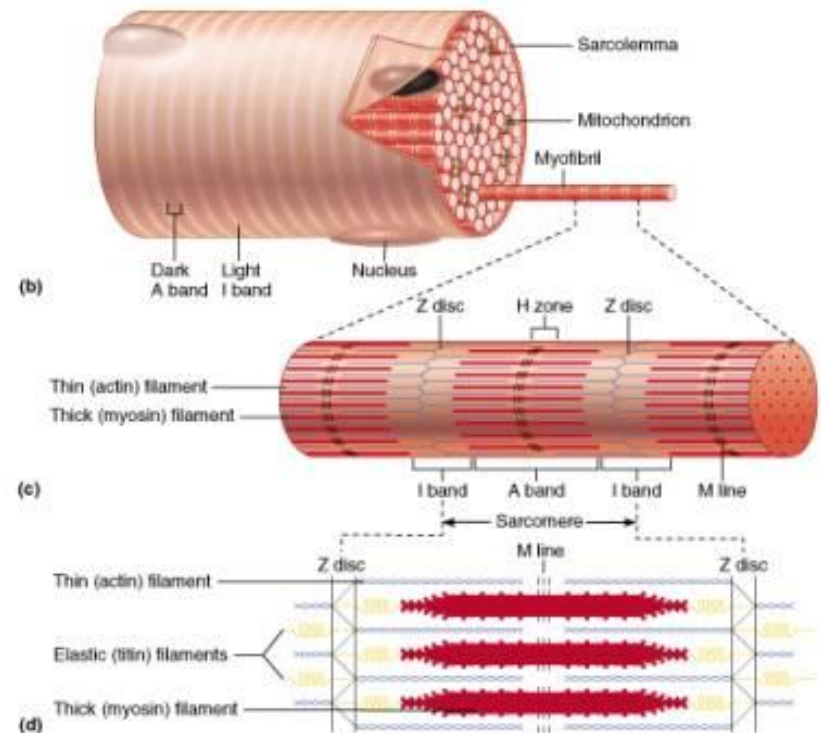


# Struktura skeletnog mišića

- Skeletni mišići se sastoje od vlakana debljine manje od debljine dlake (dijametra 20 - 80 nm), dužine nekoliko santimetara. Svako vlakno je omotano membranom debljine 0,01 nm.
- Vlakna koja formiraju skeletni mišić sastoje se od tankih kontraktilnih niti - *miofibrila*, kojih u jednom vlaknu može biti između 1000 i 2000.



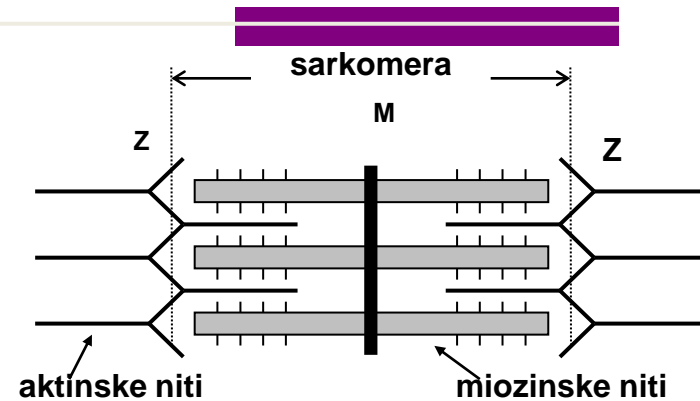
Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.



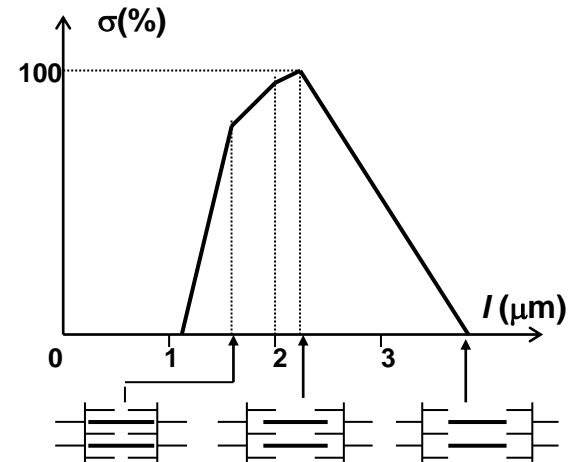
Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.

# Struktura miofibrila - sarkomere

- Miofibrile su po dužini podeljene na **sarkomere**. Ukupna dužina jedne sarkomere iznosi 2,2 mm.
- Sarkomeru formiraju dve vrste proteinskih niti.
- Deblje niti, dijametra 10 nm i dužine 1500 nm, načinjene su od proteina *miozina*, dok su tanje niti dijametra 5 nm i dužine 1000 nm načinjene od proteina *aktina*.
- Z predstavlja granicu između sarkomera.
- M je protein velike elektronske gustine, koji povezuje miozinske niti i održava njihov položaj.
- U procesu mišićne kontrakcije stepen prekrivanja aktinskih i miozinskih niti se menja, a samim tim i dužina sarkomere.



Šematski prikaz strukture sarkomere.

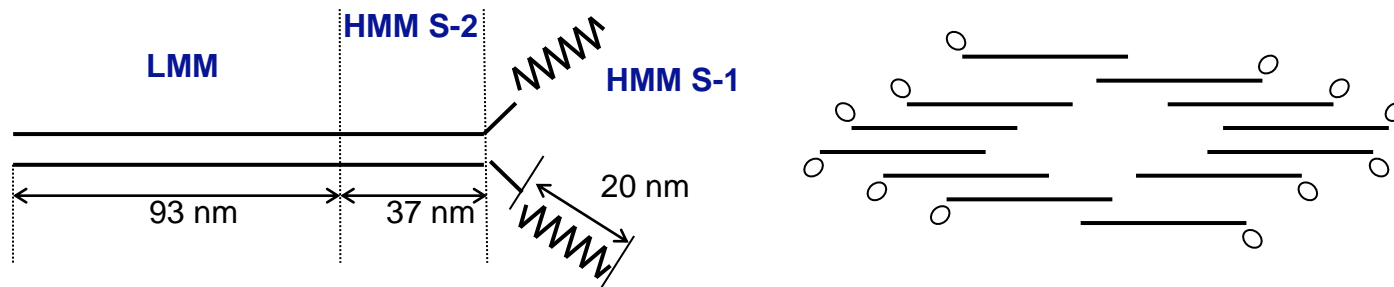


Zavisnost normalnog napona mišića od dužine sarkomere



# Mehanizam mišićne kontrakcije – mišićna sila

■ Mišićna kontrakcija bazira se na interakciji aktinskih i miozinskih niti, generiše se sila mišića.



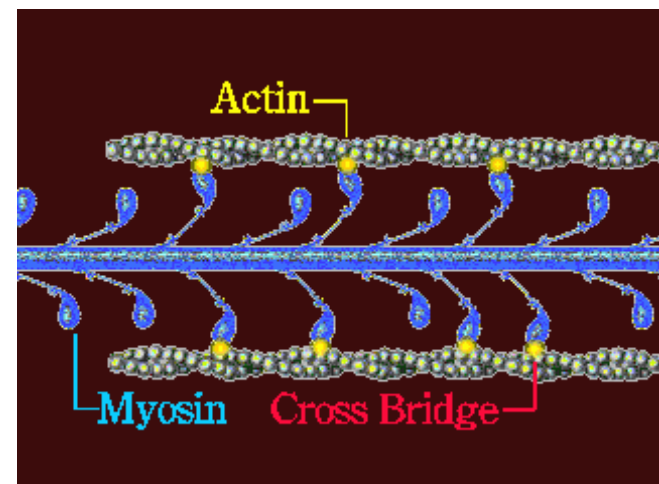
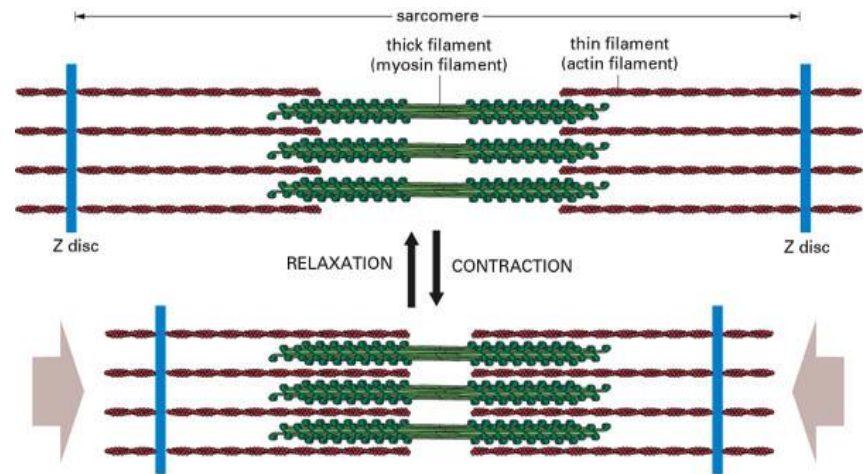
Šematski prikaz strukture molekula miozina i njihove agregacije.

■ U procesu mišićne kontrakcije stepen prekrivanja aktinskih i miozinskih niti se menja, a samim tim i dužina sarkomere.

■ Sa promenom dužine sarkomere menja se i mišićni tonus

# Mehanizam promene dužine sarkomere – klizajući model

- Interakcija aktinskih i miozinskih niti ostvaruje se preko glava miozinskih molekula, koji formiraju most između njih.
  - Pri kontrakciji most menja konformaciju (položaj glave u odnosu na rep) i potiskuje aktin ka centru sarkomere. Zatim se odvaja od aktina, ponovo menja svoju konformaciju i vezuje se za sledeću tačku na aktinskoj niti. Ciklus se zatim ponavlja.
- Kontinuirano pomeranje aktinske niti je rezultat asihronog delovanja mostova



# Izometrička i izotonička kontrakcija

- *Izometrička (statička)* kontrakcija - dužina napregnutog mišića se ne menja, tako da se, termodinamički posmatrano, utrošena hemijska energija transformiše samo u toplotu.
- *Izotonička (dinamička)* kontrakcija - mišić se skraćuje, dolazi do pomeranja tela, ali napregnutost mišića ostaje nepromenjena. U procesu izotoničke kontrakcije hemijska energija se delimično troši na vršenje rada, a jedan deo se transformiše u toplotu.
- Realna kontrakcija mišića je kombinacija ovih dveju vrsta kontrakcije.

# Funkcionisanje LM sistema čoveka: model krutog tela i uslovi ravnoteže

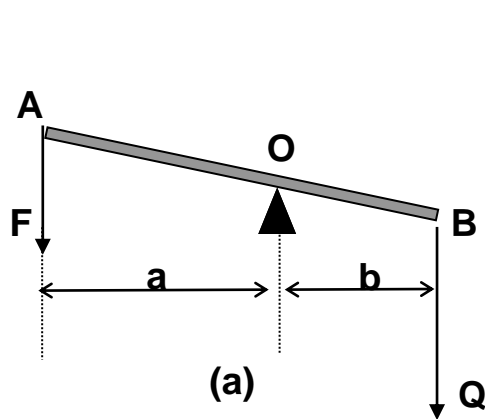
- Šta je kruto telo?
  - *Kruto telo* predstavlja telo kod koga se međusobni položaj pojedinih tačaka ne menja. Takvo telo se ne deformiše pod dejstvom sile. Kruto telo je model - fizička apstrakcija, jer takvih tela u prirodi nema, mada se neka tela po svojim osobinama približavaju definiciji krutog tela (kosti, na primer).
  - Pod dejstvom sile kruto telo se može kretati translaciono i/ili rotaciono.
- Uslovi ravnoteže krutog tela.

$$\sum_i \vec{F}_i = 0 \quad i \quad \sum_i \vec{M}_i = 0$$

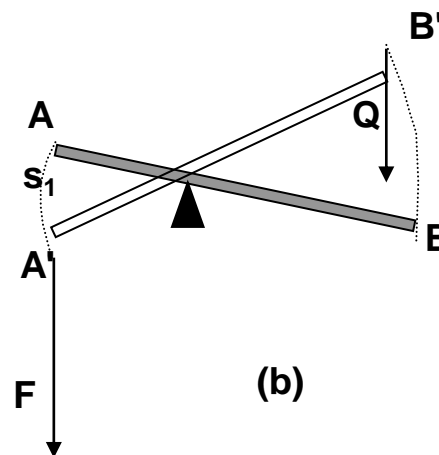
# POLUGE I SISTEMI POLUGA

## Model funkcionisanja lokomotornog sistema

- Osnovnu predstavu o funkcionisanju lokomotornog sistema možemo dobiti ako kosti (ili grupu čvrsto povezanih kostiju) posmatramo kao *poluge*.
- Poluge su fizički posmatrano kruta tela, tj. tela koja se ne deformišu pod dejstvom sile.
- Deformacija realnih kostiju pod dejstvom sila koje se generišu u mišićima relativno je mala, pa se u prvoj aproksimaciji one mogu uspešno modelirati polugom.



(a)



(b)

$$F \cdot a = Q \cdot b$$

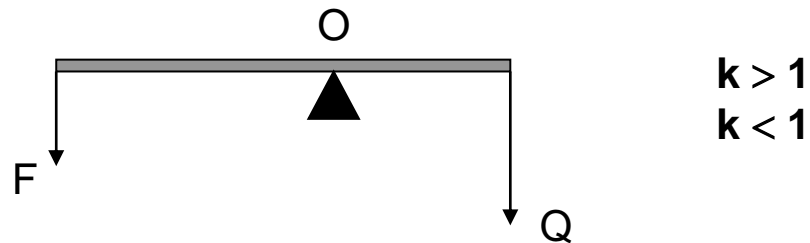
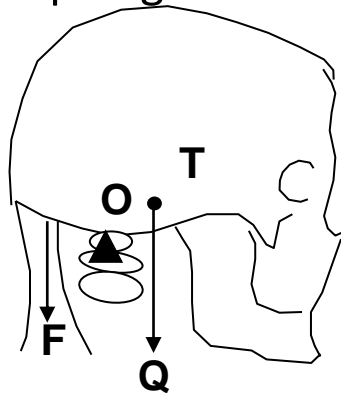
$$k = \frac{Q}{F} = \frac{a}{b}$$

(a) poluge sile:  $k > 1$

(b) poluge brzine:  $k < 1$

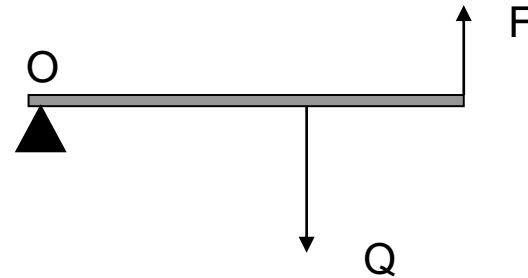
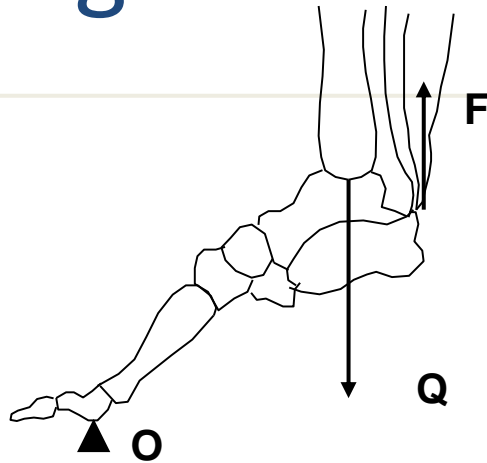
# Poluge - vrste

- Za analizu funkcionisanja poluga u telu čoveka potrebno je znati tačan položaj napadne tačke sile mišića, tačke oslonca i napadne tačke tereta.
- U odnosu na međusobni položaj ovih elemenata poluge se dele na:
  - poluge I vrste
  - poluge II vrste
  - poluge III vrste.



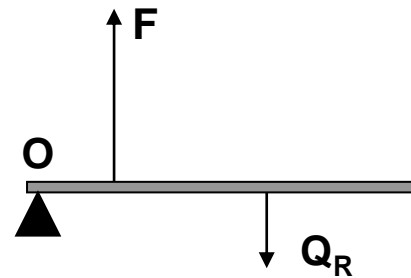
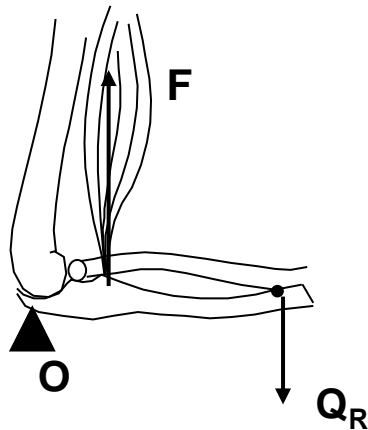
Primer poluge I vrste u organizmu i njen šematski prikaz.

# Poluge II i III vrste



$$k > 1$$

Primer poluge II vrste u organizmu i njen šematski prikaz.

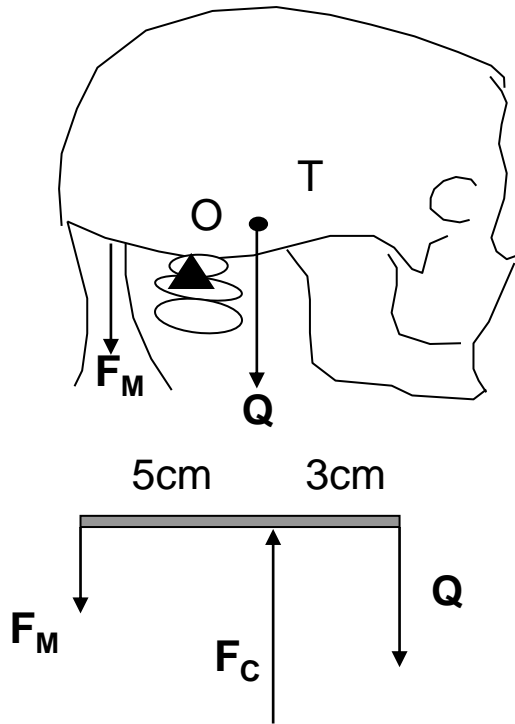


$$k < 1$$

Primer poluge III vrste u organizmu i njen šematski prikaz.

## Primer 1:

### *Dejstvo glave čoveka na prvi vratni pršljen*



$$Q = mg \cong 30N$$

$$F_M + Q = F_C$$

$$F_M \times 5cm = Q \times 3cm$$

$$F_M = \frac{3}{5}Q = 18N$$

$$\vec{F}_C = 18N + 30N = 48N$$

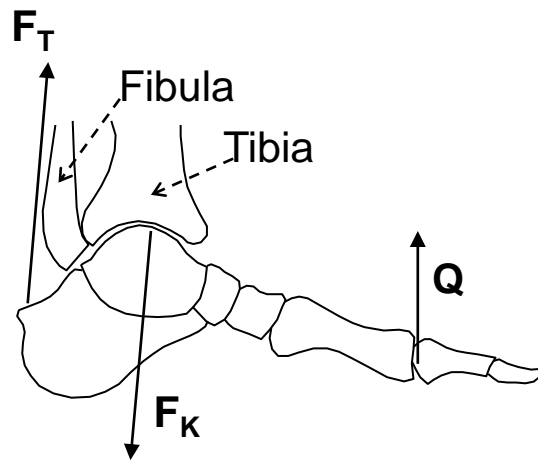
$$\vec{F}_C = 18N + 30N = 48N$$

Uzajamno dejstvo glave čoveka i prvog cervikalnog pršljena na kome leži glava; sila vratnog mišića održava glavu u uspravnom položaju. Uzeti da je  $m=3$  kg



# Primer 2: Izračunavanje sile u Ahilovoj

**tetivi** (sila reakcije podloge na vrhove prstiju jednaka je težini tela)



$$F_T \cos(7^\circ) + Q - F_K \cos \theta = 0$$

$$F_T \sin(7^\circ) - F_K \sin \theta = 0$$

$$10 Q - 5,6 F_T \cos(7^\circ) = 0$$

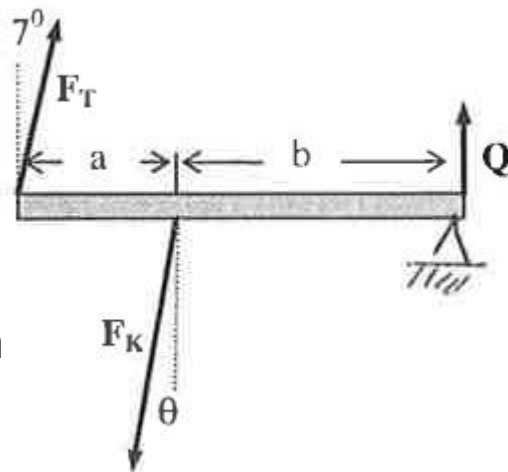
$$F_T = \frac{10}{5,6} Q = 1,8 Q$$

$$2,8 Q = F_K \cos \theta \quad i \quad 0,22 Q = F_K \sin \theta$$

$$F_K = 2,8 Q$$

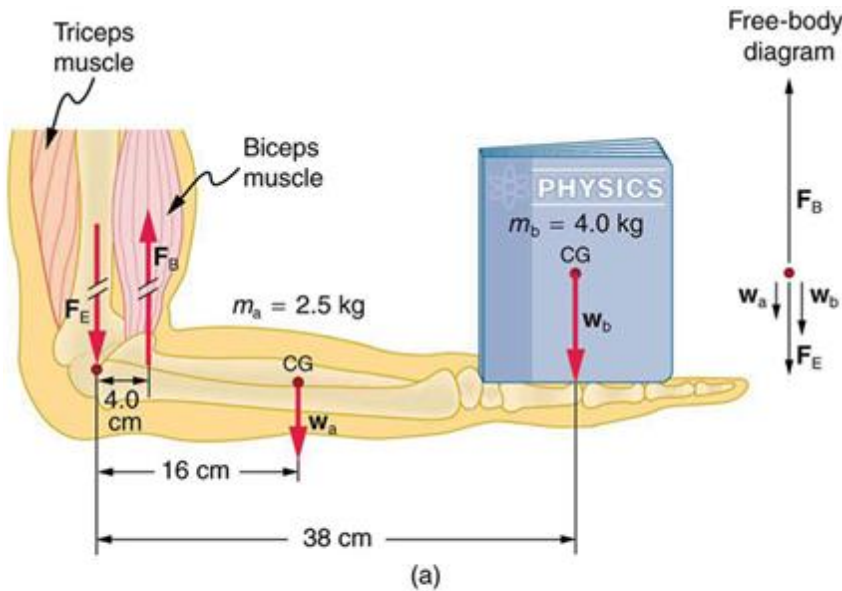
$$\tan \theta = 0,22 / 2,8 = 0,079$$

$$\theta = 4,5^\circ$$



$a = 5,6 \text{ cm}$   
 $b = 10 \text{ cm}$

# Sistemi poluga – Model ruke



$$F_B \cdot r_1 = W_a \cdot r_2 + W_b \cdot r_3$$

$$F_B = \frac{25 \text{ N} \cdot 16 \text{ cm} + 40 \text{ N} \cdot 38 \text{ cm}}{4 \text{ cm}}$$

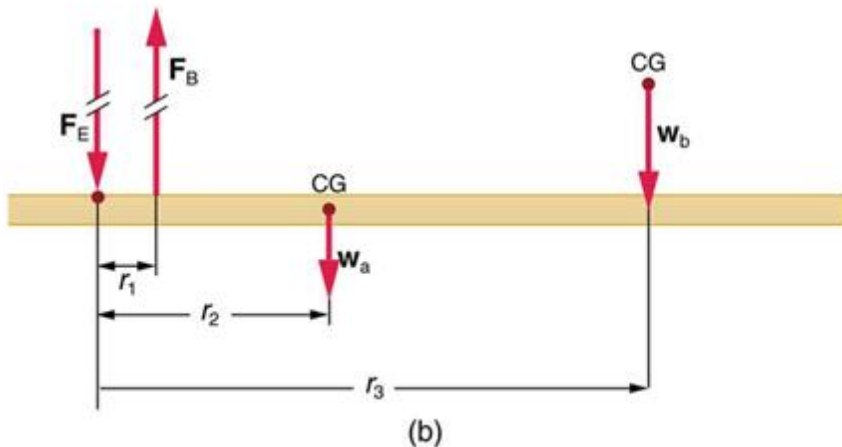
$$F_B = 480 \text{ N}$$

$$\frac{F_B}{W_a + W_b} = \frac{480 \text{ N}}{65 \text{ N}} \approx 7,4$$

$$\vec{F}_E = \vec{F}_B + \vec{W}_a + \vec{W}_b$$

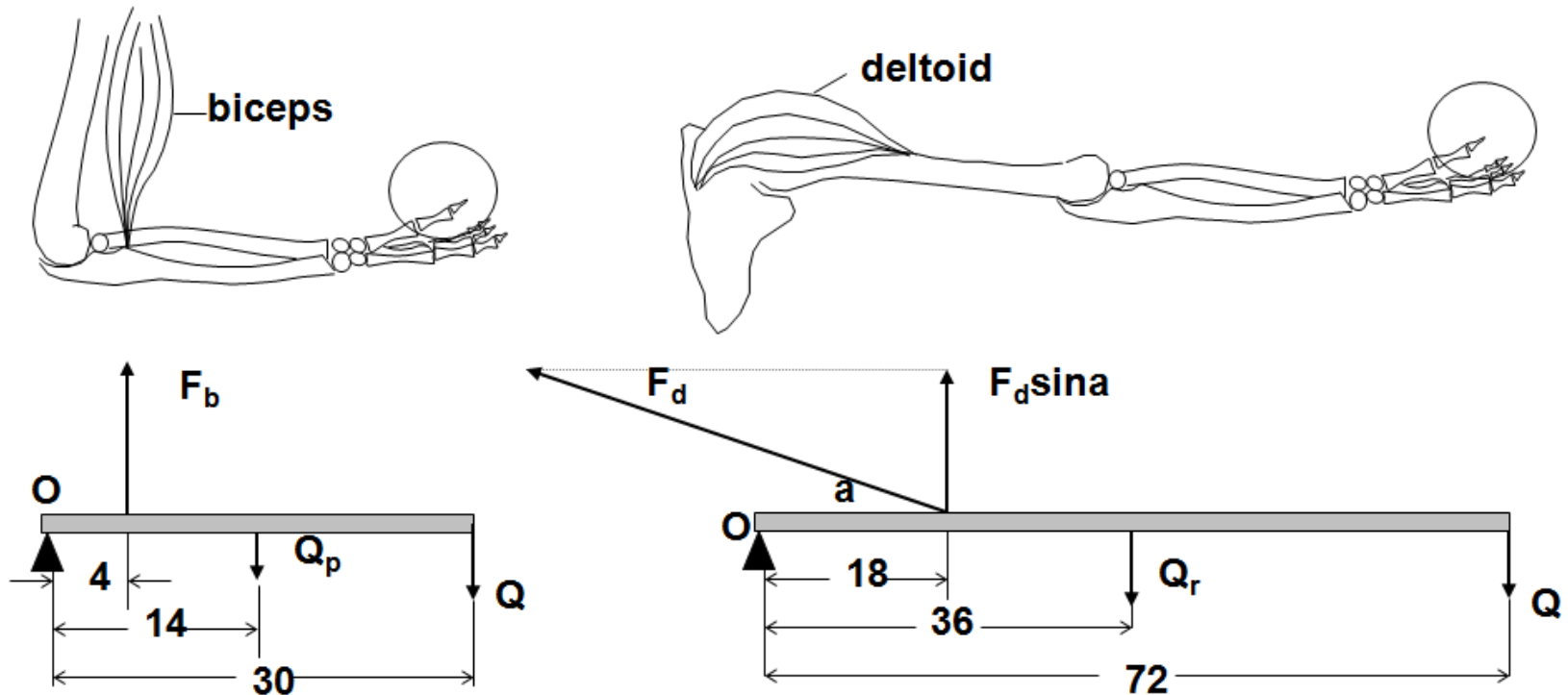
$$F_E = 480 \text{ N} - 25 \text{ N} - 40 \text{ N}$$

$$F_E = 415 \text{ N}$$



# Model ruke

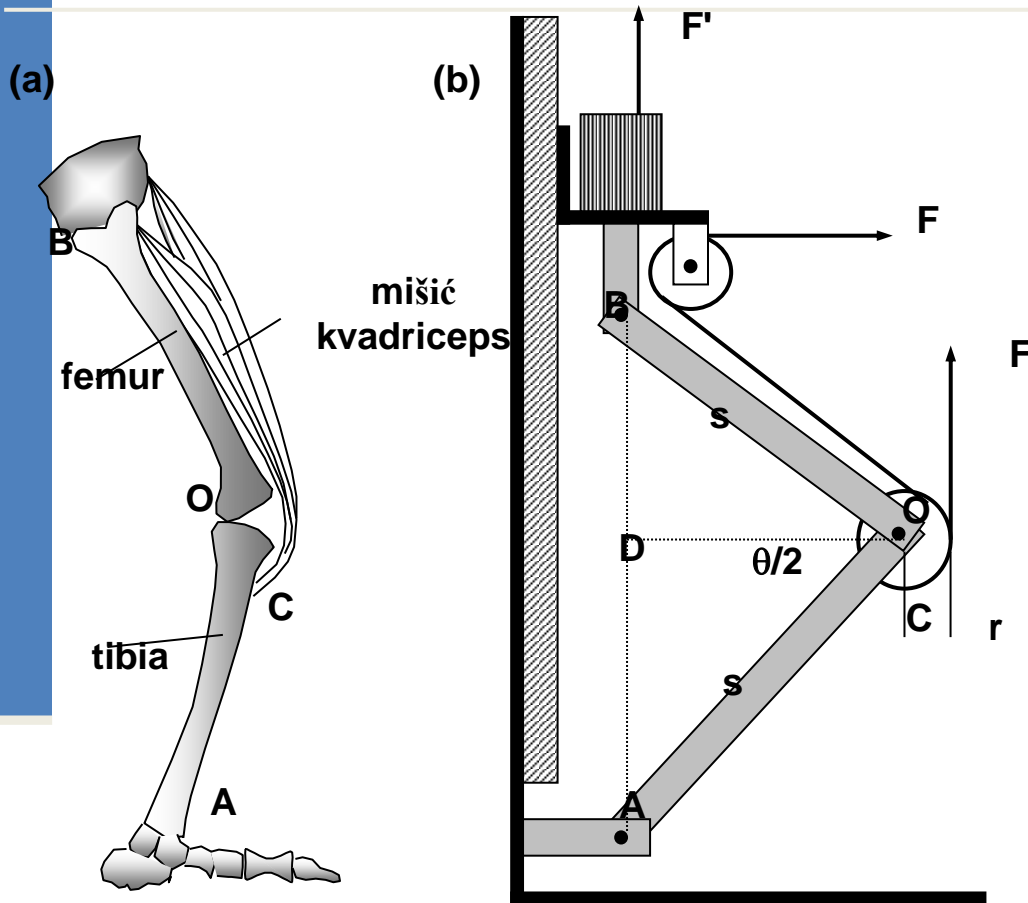
(sva rastojanja na slikama su u cm; težina podlakta  $Q_p=15N$ , a cele ruke  $Q_r=60N$ , težina tela u šaci  $Q=30N$ )



$$\begin{aligned}4\text{cm} \times F_b &= 14\text{cm} \times Q_p + 30\text{cm} \times Q \\F_b &= 3,5 \times 15N + 7,5 \times 30N \\F_b &= 277,5 N\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}18\text{cm} \times F_d \sin a &= 36\text{cm} \times Q_r + 72\text{cm} \times Q \\F_d &= (2 \times 60N + 4 \times 30N) / \sin 16^\circ \\F_d &= 870,7 N\end{aligned}$$

# Sistem poluga – Model noge



Analiza delovanja butnog mišića: delovi noge koji učestvuju u uspravljanju (a); analogan fizički model (b).

$$F \cdot r = F' \cdot DO$$

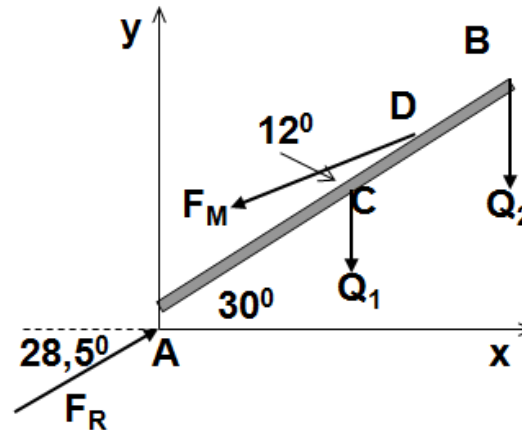
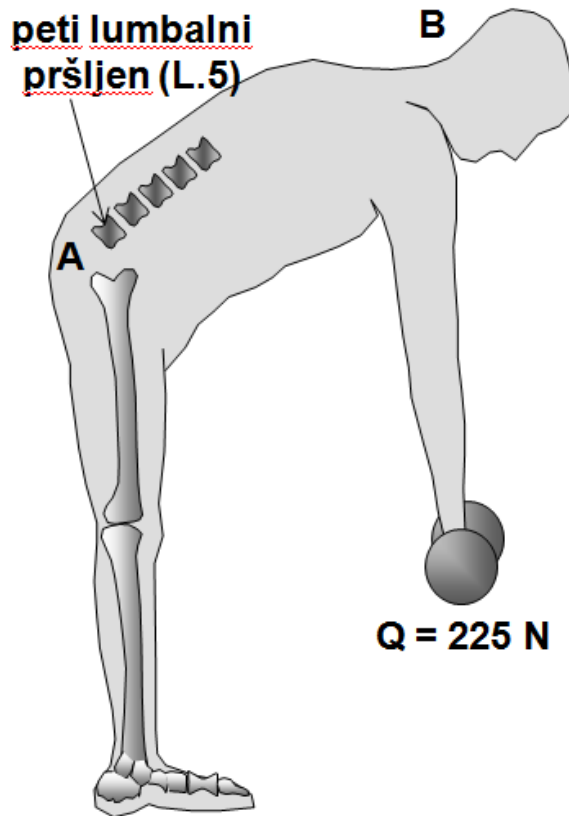
$$DO = s \cdot \cos \frac{\theta}{2}$$

$$F = F' \frac{s \cdot \cos \frac{\theta}{2}}{r}$$

$$k = \frac{F'}{F} = \frac{r}{s \cdot \cos \frac{\theta}{2}}$$

Za vrednosti ugla  $0 < \theta < 160^\circ$  koeficijent  $k < 1$ , što znači da poluga deluje kao poluga brzine pa sila  $F$  mora biti znatno veća od težine tereta  $Q/2$ . Iznad  $160^\circ$ , poluga deluje kao poluga sile što znači da je sila  $F$  manja od težine tereta.

# Model kičmenog stuba



$Q_1$  - težina trupa (320 N)

$Q_2$  - težina ruku, glave i tereta (382 N)

A - tačka oslonca na L.5

AB - poluga kojom se modelira trup

$AC = 1/2 AB$

$AD = 2/3 AB$

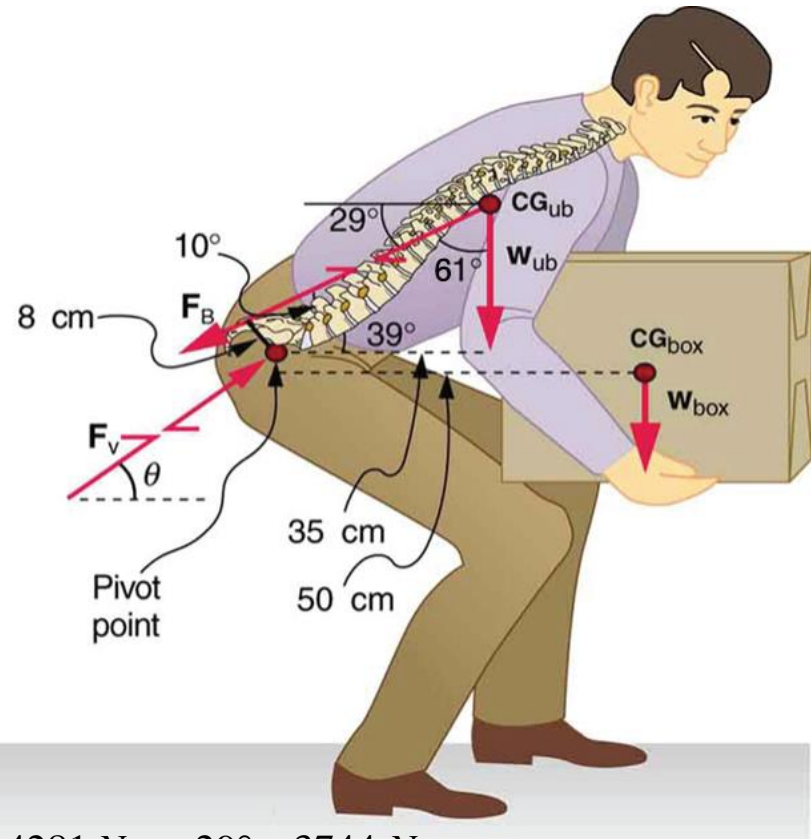
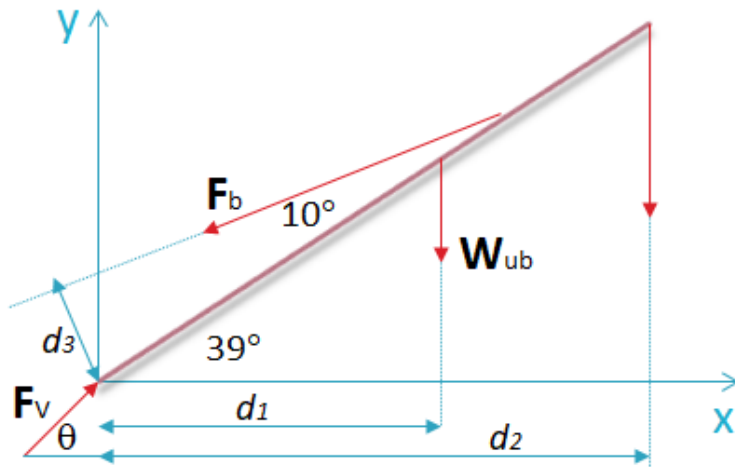
$F_M$  - sila naprezanja u leđnim mišićima

$F_R$  - rezultujuća sila koja deluje na L.5

$F_R = 3664 \text{ N}$

Analiza dejstva sile na peti lumbalni pršljen pri podizanju tereta.

# Model kičmenog stuba pri podizanju tereta



$$F_B \cdot d_3 = W_{box} \cdot d_2 + W_{ub} \cdot d_1$$

$$F_B = \frac{300 \text{ N} \cdot 50 \text{ cm} + 550 \text{ N} \cdot 35 \text{ cm}}{8 \text{ cm}}$$

$$F_B = 4281 \text{ N}$$

$$\frac{F_B}{W_{box} + W_{ub}} = \frac{4281 \text{ N}}{850 \text{ N}} \approx 5$$

$$F_{Vx} = F_B \cdot \cos 29^\circ = 4281 \text{ N} \cos 29^\circ \approx 3744 \text{ N}$$

$$F_{Vy} = F_B \sin 29^\circ + W_{ub} + W_{box} = 2075,5 \text{ N} + 550 \text{ N} + 300 \text{ N} \approx 2926 \text{ N}$$

$$F_V = \sqrt{F_{Vx}^2 + F_{Vy}^2} \Rightarrow F_V = 4752 \text{ N}$$

# Relani sistemi

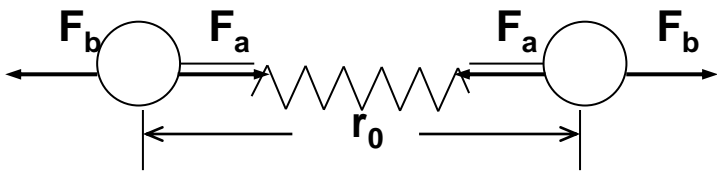
---

- U prethodnom izlaganju kosti su u posmatranju zamenjene modelom - polugama, koje se pod dejstvom sila ne deformišu.
- Kod realnih tela, kao što su kosti, mišići i tetive (elementi lokomotornog sistema) uvek dolazi do izvesnog stepena deformacije pod dejstvom spoljnih sila.
- Kao protivdejstvo spoljnim, javljaju se unutrašnje sile koje teže da telu vrate prvobitan oblik. To su *elastične sile*.
- Intenzitet elastičnih sila zavisi od sila među molekulima od kojih je telo načinjeno.

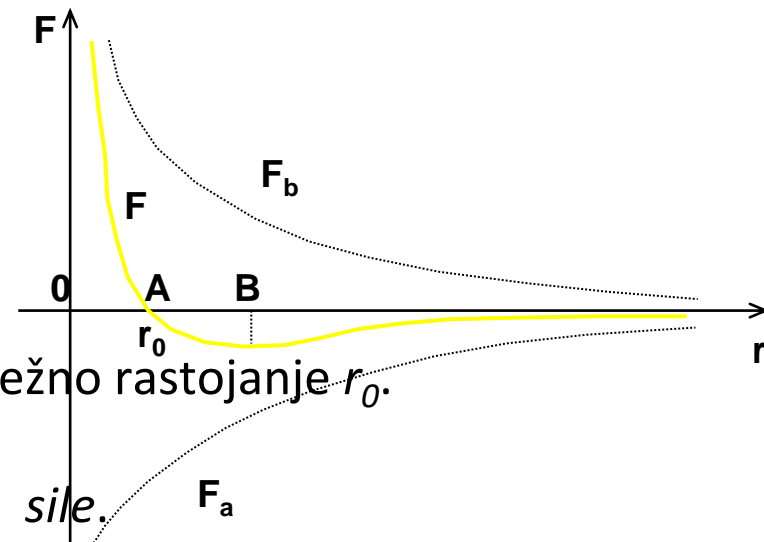
# Priroda međumolekulskih sila.

## Elastičnost i plastičnost

- Međumolekulske sile, čije se dejstvo oseća do rastojanja koje je deset puta veće od dijametra molekula ( $d \sim 10^{-10}$  m), imaju elektrostatičku i kvantnu prirodu.
- Molekuli poseduju pozitivna i negativna naelektrisanja, pa među njima vladaju privlačne i odbojne sile.



$$F_a = -\frac{a}{r^7} \quad i \quad F_b = \frac{b}{r^s} \quad (s \geq 9)$$

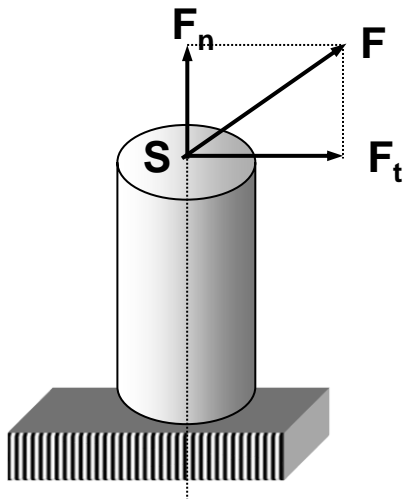


- U odsustvu spoljnih sila održava se ravnotežno rastojanje  $r_0$ .
- Akcija - dejstvo spoljnih sila
- Reakcija - elastične sile tela ili *restitutione sile*.
- Elastične deformacije - plastične deformacije



# Elastične deformacije

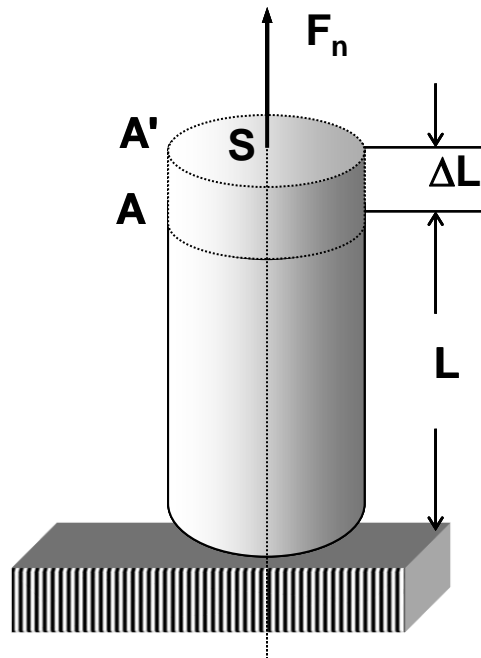
- Postoji više vrsta deformacija zavisno od pravca i smera delovanja spoljnih sila, kao i od mesta napadne tačke sile:
  1. *istezanje i sabijanje* (i *savijanje* kao njihova kombinacija)
  2. *smicanje*
  3. *uvrtanje*.
- U opštem slučaju, pri proizvoljnom dejstvu sile može se istovremeno javiti više deformacija.



$$\sigma_n = \frac{F_n}{S} \quad i \quad \sigma_t = \frac{F_t}{S}$$

# Hukov zakon za longitudinalne deformacije – istezanje i sabijanje

$$\delta \sim \sigma$$



$$\sigma_n = F_n / S$$

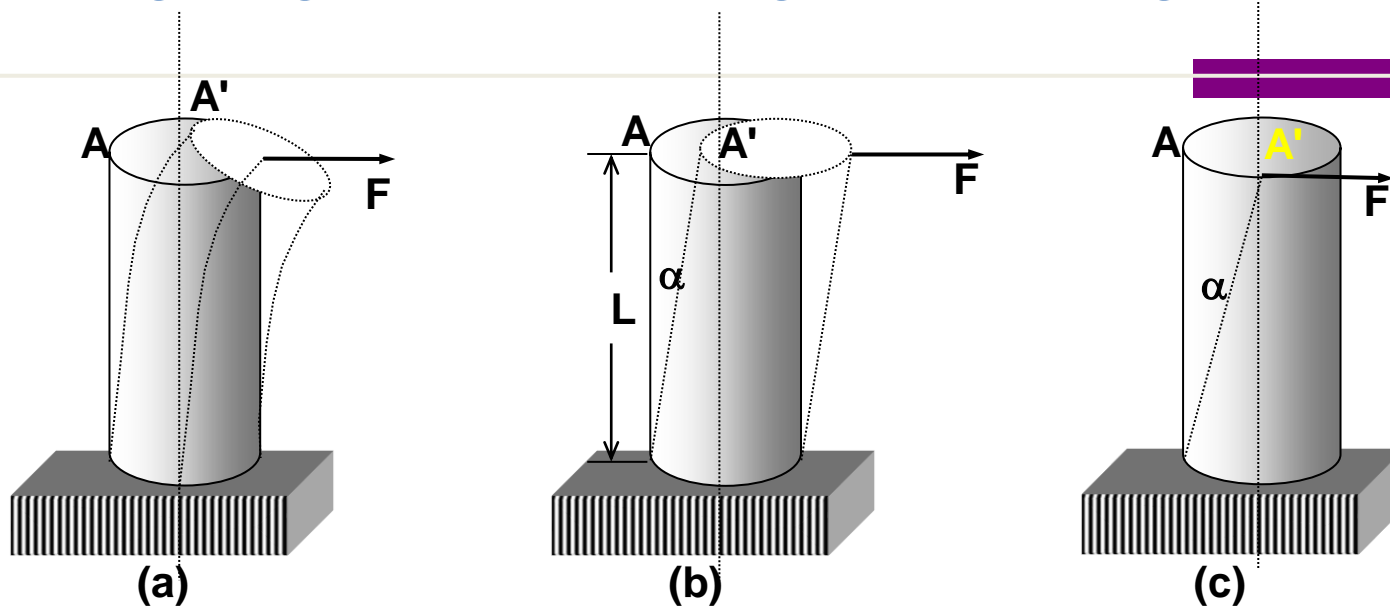
$$\delta = \Delta L / L$$

$$\delta = \frac{1}{E_\gamma} \sigma$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{E_\gamma} \cdot \frac{F_n}{S}$$

- $E_\gamma$  Jangov modul elastičnosti karakteriše osobine materijala od koga je telo načinjeno, odnosno stepen elastičnosti tela.
- Materijali velikog modula elastičnosti se srazmerno malo deformišu pod uticajem sile.

# Savijanje, smicanje i torzija

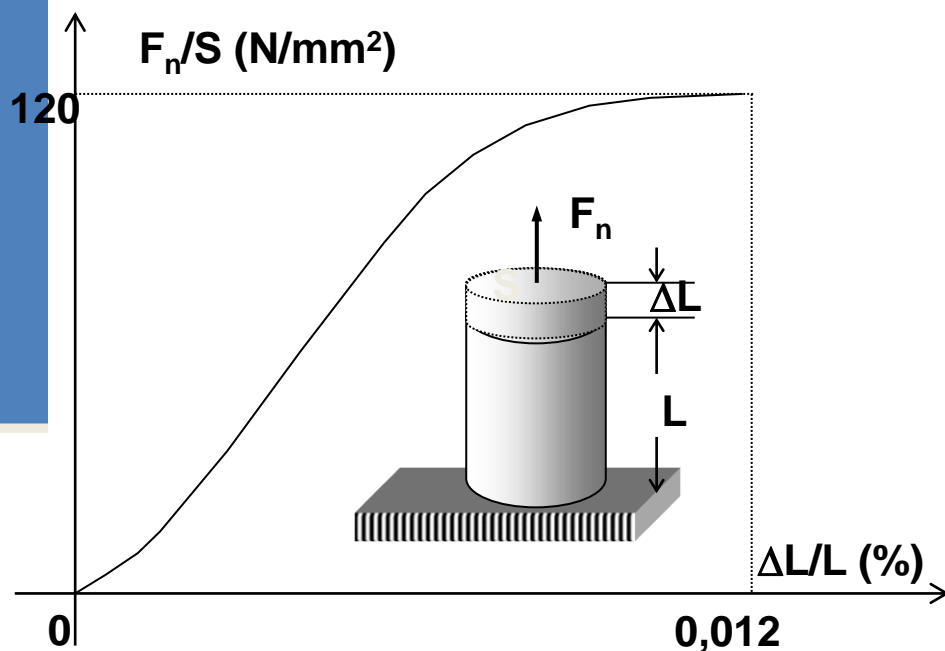


Deformacije savijanja (a), smicanja (b) i torzije (c).

- *Savijanje* - kvazi-longitudinalna deformacija, kombinacija sabijanja i istezanja (a).
- *Smicanje* – deformacija pod dejstvom tangencijalne sile čija je napadna tačka na obodu poprečnog preseka, a pravac dejstva prolazi kroz osu tela.
- *Torzija* (uvrtanje) - specijalan slučaj smicanja. Javlja se kada sila deluje kao tangenta na površinu poprečnog preseka tela.

# Energetika koštane frakture

- Energija deformisanog tela, prema zakonu o održanju energije, biće jednaka radu spoljnih sila koje su tu deformaciju izazvale



Grafik zavisnosti relativne deformacije istezanja kompaktne kosti od normalnog napona.

$$A = E_p = \int_0^{\Delta L} F_n d(\Delta L)$$

$$F_n = E_\gamma S \frac{\Delta L}{L}$$

$$E_p = E_\gamma \frac{S}{L} \int_0^{\Delta L} \Delta L d(\Delta L) = E_\gamma \frac{S}{L} \cdot \frac{(\Delta L)^2}{2}$$

$$E_p = E_\gamma \frac{SL}{2} \cdot \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 = \frac{1}{2} E_\gamma V \delta^2.$$

$$\varepsilon = \frac{E_p}{V} = \frac{1}{2} E_\gamma \delta^2 \quad \delta = \frac{1}{E_\gamma} \sigma_n$$

$$\varepsilon_p = \frac{1}{2E_\gamma} \sigma_n^2$$

# Kritični napon, kritična sila

Materijal	Kritični napon pri sabijanju (x10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup> )	Kritični napon pri istezanju (x10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup> )	Jangov modul elastčnosti (x10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup> )	Modul smicanja (x10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup> )
Čelik	552	827	207	80
Aluminijum	-	200	70	25
Porcelan	552	5	-	-
Guma	-	2	0,1	-
Kompaktna kost	170	120	18	-
Suđerasta kost	2	-	0,08	10
Tetiva	-	69	-	-
Mišić	-	0,55	-	-

## Kritični napon i kritična sila. Impulsne sile

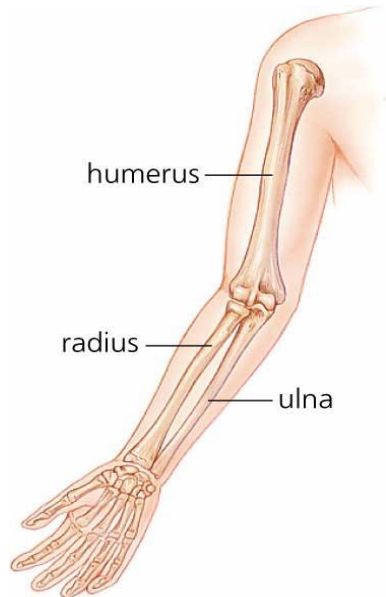
$$\sigma_c = \frac{F_c}{S} \Rightarrow F_c = \sigma_c S \quad F_c = 120 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2} \times 2 \cdot 10^{-4} m^2 = 2,4 \cdot 10^4 N$$

Čovek mase  $m = 70$  kg u automobilu koji se sudara sa nepomičnom preprekom pri brzini  $v_1 = 70$  km/h. Pretpostavimo da se automobil posle sudara zaustavio na rastojanju od 0,5 m u odnosu na svoj položaj u trenutku početka sudara.

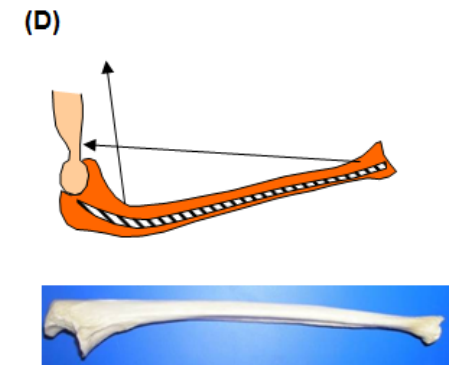
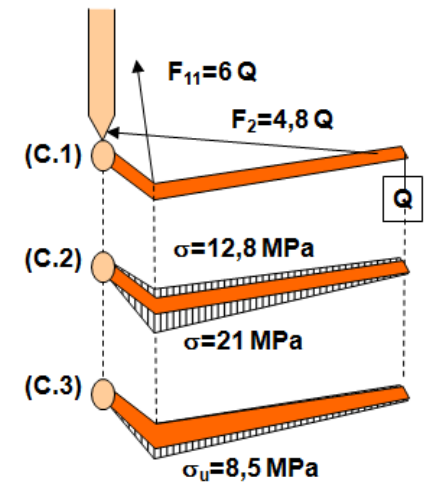
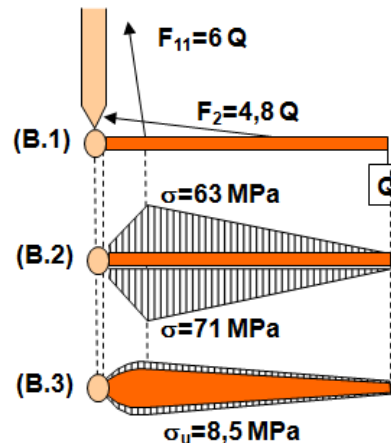
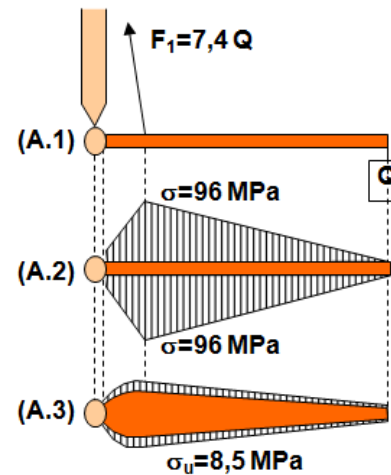
$$F = m \frac{\Delta v}{\Delta t} = m \frac{(v_2 - v_1)}{\Delta t} \quad \begin{matrix} v_2^2 = v_1^2 - 2as \\ v_2 = 0 \end{matrix} \quad F = ma = m \frac{v_1^2}{2s} = 70 \text{ kg} \cdot \frac{(19,4 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 0,5 \text{ m}} = 2204 \text{ N}$$

# Funkcionalna adaptacija kostiju

- Funkcionalna adaptacija kostiju podrazumeva takvu promenu strukture i oblika kosti, koja će obezbediti uniformnost naprezanja sa minimumom upotrebljenog materijala



Carlyn Iverson



# Pitanja i zadaci

- ▶ Izvući odgovore na sva pitanja sa ove prezentacije koristeći se sadržajima sa predavanja.
- ▶ Naučiti odgovore na postavljena pitanja.
- ▶ Ukoliko ima teškoća u pripremi ispita, konsultacije su putem *Zoom* aplikacije, i/ili putem *emaila*, ili *Skype* sistema (moj *Skype* nalog: kovac\_bb).
- ▶ Ispitni test će sadržati određeni broj pitanja sa ove prezentacije.

# Pitanje 1

---

- Skicirati deo kosti koji ulazi u sastav zgloba (npr. deo *femura*), i naznačiti trakastu strukturu sunderastog dela kosti.
- Koje su prednosti ovakve strukture u odnosu na kompaktnu strukturu (analiza sa aspekta sila koje dejstvuju na zglobove).



# Pitanje 2

---

- Skicirati jedan pokretan zglob i naznačiti osnovne elemente pokretnog zgloba.
- Objasniti kako se vrši podmazivanje zgloba u cilju smanjenja trenja između okrajaka kostiju.
- Skicirati jednoosni, dvoosni i troosni zglob, i navesti po jedan primer ovih zglobova u lokomotornom sistemu čoveka.

# Pitanje 3

---

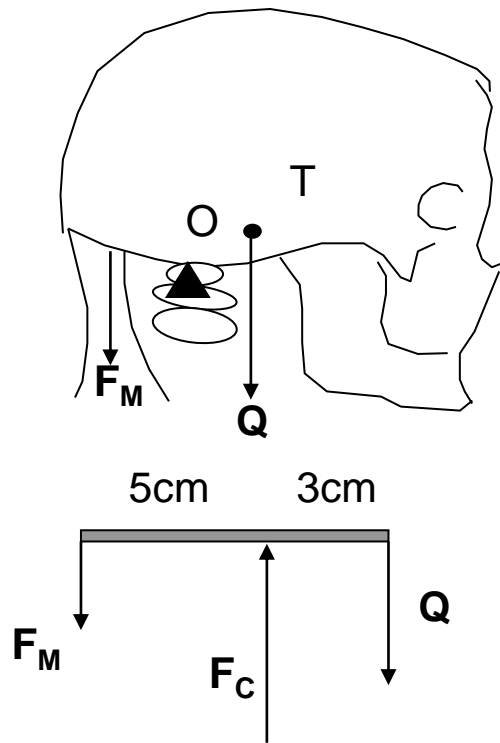
- Šematski prikazati strukturu sarkomere i naznačiti osnovne njene elemente.
- Objasniti mehanizam mišićne kontrakcije primenom klizajućeg modela.
- Šta su *izometrička* i *izotonička* kontrakcija?

# Pitanje 4

---

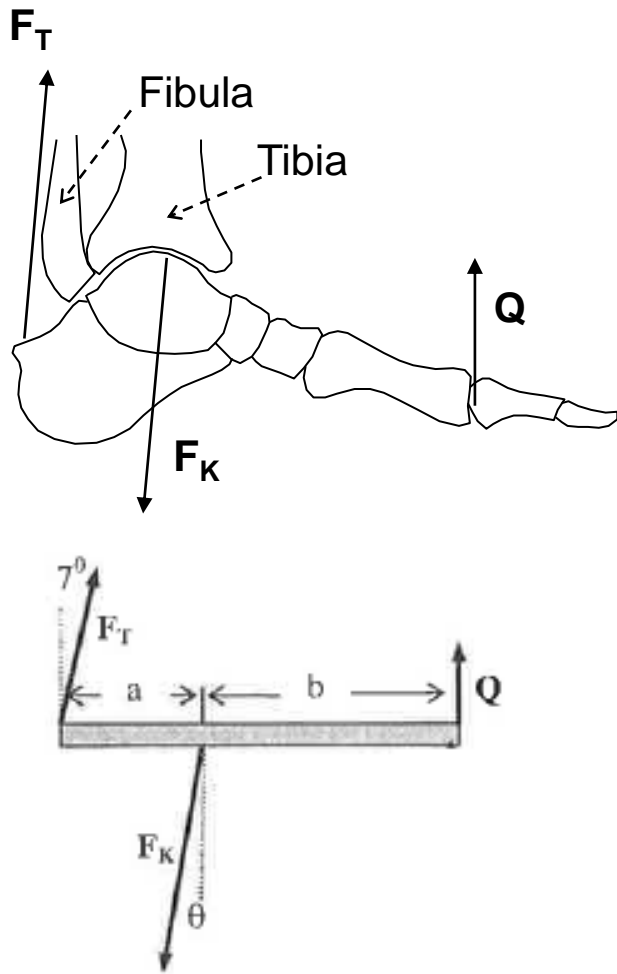
- Ispisati uslove (formule) ravnoteže krutog tela.
- Skicirati jednu dvokraku polugu, naznačiti osnovne elemente poluge, sile koje deluju i napisati jednačinu ravnoteže poluge.

# Pitanje 5



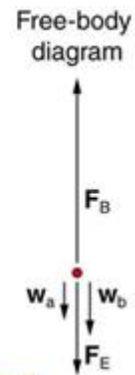
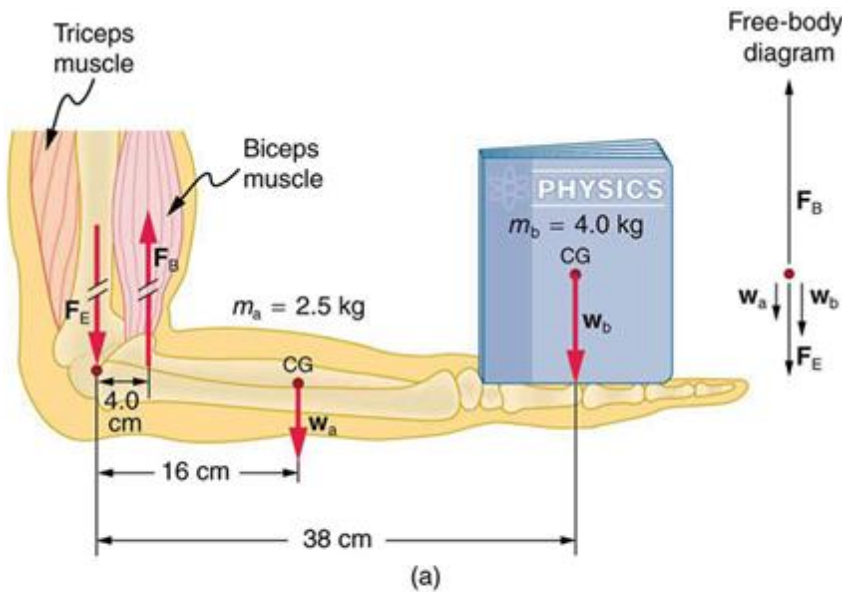
- U primeru sa slike analizirati dejstvo glave čoveka na prvi vratni pršljen. Koristiti model poluge i uslov ravnoteže. Razmotriti slučaj kada je masa glave 3 kg.

# Pitanje 6

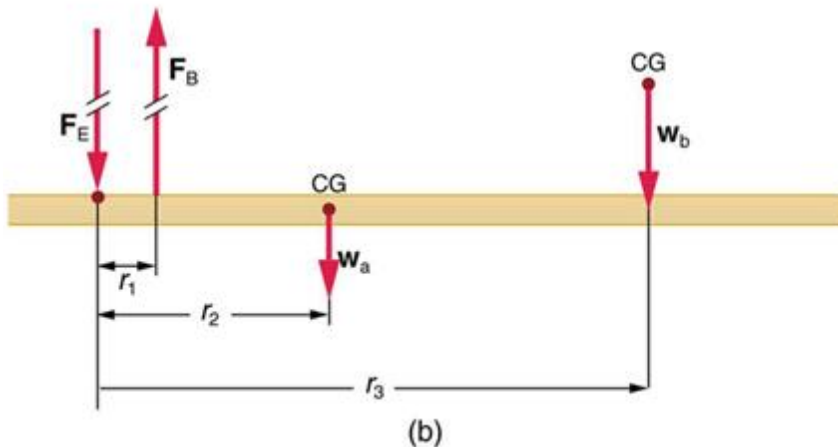


- U primeru sa slike, izračunati silu u Ahilovoj tetivi. Koristiti model poluge i uslov ravnoteže poluge. Položaj Ahileove tetive je oko  $7^\circ$  u odnosu na vertikalnu kada se čovek nalazi u stanju ravnoteže, dok su vrednosti za  $a$  i  $b$  za neku prosečnu osobu 5.6 cm i 10 cm, respektivno.

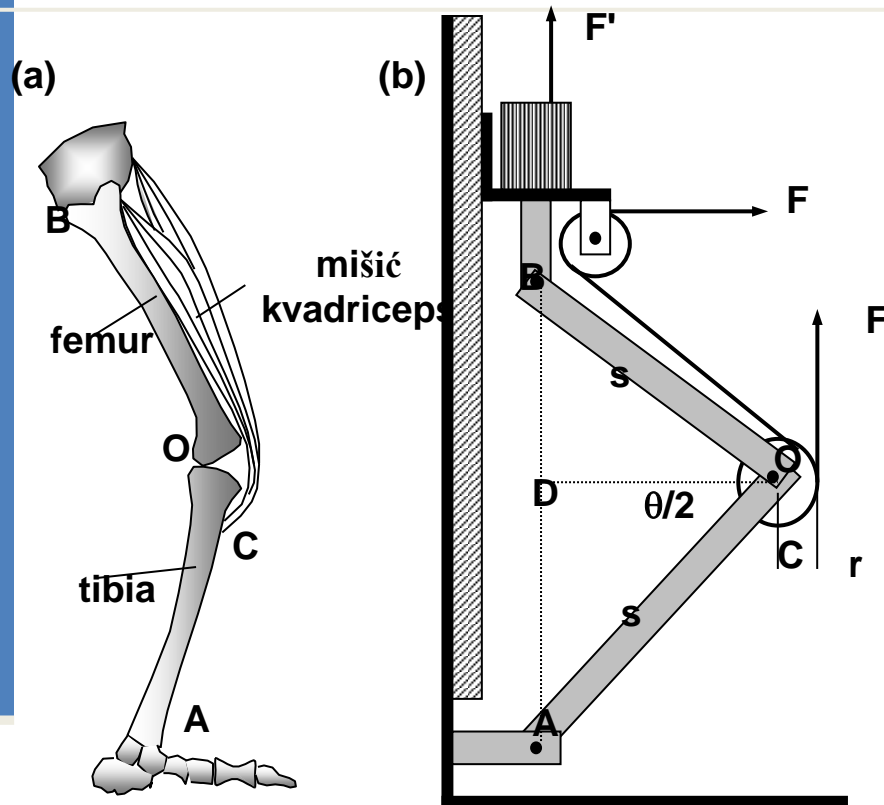
# Pitanje 7



- U modelu ruke koji je prikazan na slici, analizirati dejstvo sile mišića bicepsa. Koristiti model poluge gde je oslonac u zglobu lakta (koristiti podatke sa slike)

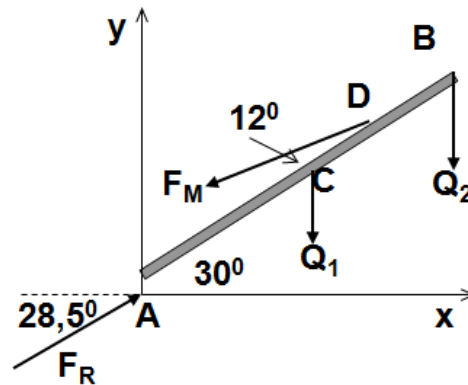
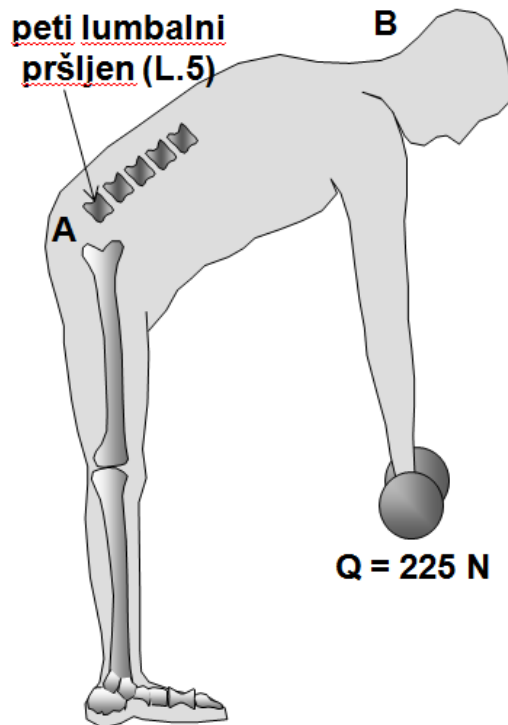


# Pitanje 8



- U prikazanom modelu noge (sistem poluga), analizirati zavisnost sile mišića od uzajamnog položaja kostiju nogu (napisati izraz za silu mišića  $F$  u funkciji od ugla  $\theta$ ; dužine poluga  $OA$  i  $OB$  su jednake i iznose  $s$ ; sistem poluga je fiksiran u tački  $A$ , dok u tački  $B$  na polugu deluje sila  $F' = Q/2$ , gde je  $Q$  težina tela).

# Pitanje 9



$Q_1$  - težina trupa (320 N)

$Q_2$  - težina ruku, glave i tereta (382 N)

A - tačka oslonca na L.5

AB - poluga kojom se modelira trup

AC = 1/2 AB

AD = 2/3 AB

$F_M$  - sila naprezanja u leđnim mišićima

$F_R$  - rezultujuća sila koja deluje na L.5

$F_R = 3664 \text{ N}$

- Analizirati dejstva sila na peti lumbalni pršljen. Koristiti model kičmenog stuba u obliku poluge i uslove ravnoteže poluge. Uzeti podatke koji su dati na slici uz zadatak)

Analiza dejstva sile na peti lumbalni pršljen pri podizanju tereta.



# Pitanje 10

---

- Šta su elastične deformacije? Navesti vrste elastičnih deformacija (skicirati sliku).
- Napisati Hukov zakon za longitudinalne deformacije. Definisati kritični napon i kritičnu silu.