

# SILE V HRBTENICI PRI SKLONJENI LEGI TELESA

Karel Šmigoc

**Povzetek** - Obravnavamo silo na medvretenčno ploščico med petim ledvenim in prvim križnim vretencom v sklonjeni legi telesa pri dviganju ali nošenju bremena na hrbtu. Silo na medvretenčno ploščico določimo na osnovi podrobnih anatomskih podatkov o zgradbi hrbtenice in zakonov o ravnovesju togega telesa.

**Abstract** - We examine the force on the lumbosacral disc that separates the last lumbar vertebra from the sacrum when the body is in a simple bent position. This position occurs when a person is lifting objects or bearing objects on the back. The magnitude and the direction of the force is computed by detailed anatomical measurements combined with the equations of static equilibrium.

## UVOD

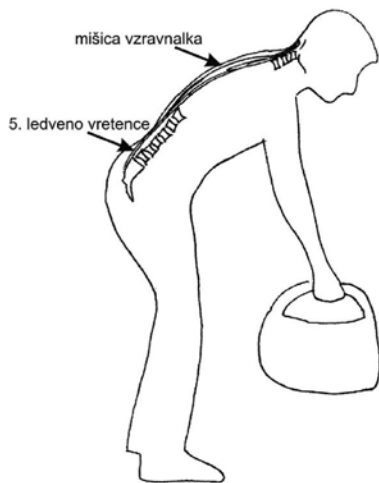
Bolečine v hrbtu se pri ljudeh pogosto pojavljajo, o njih je že obširno poročal Hipokrat pred več kot dva tisoč leti. Navadno nastanejo zaradi prevelike obremenitve hrbtenice pri raznih opravilih, kot je dviganje ali nošenje težkih predmetov, zaradi dolgo trajajoče prisilne lege telesa pri opravljanju določenega poklica, včasih pa so lahko vzrok tudi bolezenska stanja v raznih delih telesa. S podobnimi obremenitvami je povezano tudi učenčevo vsakdanje življenje, na primer nelagodno sedenje v šolski klopi in tudi nošenje pretežke šolske torbe. Medicinske ugotovitve o vzrokih bolečin v ledvenem delu hrbtenice najlažje potrdimo in fizikalno opišemo v položaju sklonjene lege telesa. Če primerjamo hrbtenico s togo palico, na kateri so prijemališča mišičnih sil na eni in sile zaradi obremenitve na drugi strani, ugotovimo, da je primeren model za obremenjeno hrbtenico pri sklonjeni legi telesa vzvod, ki ga obravnavamo z zakoni o ravnovesju ravninskih sil in navorov. Primer je zanimiv tako zaradi utrjevanja fizikalnega znanja kot tudi zaradi samih rezultatov, ki lahko prispevajo k učinkovitejšemu prizadevanju za zdravo hrbtenico.

## OPIS ZGRADBE HRBTENICE IN SIL MED NJENO OBREMITVIJO

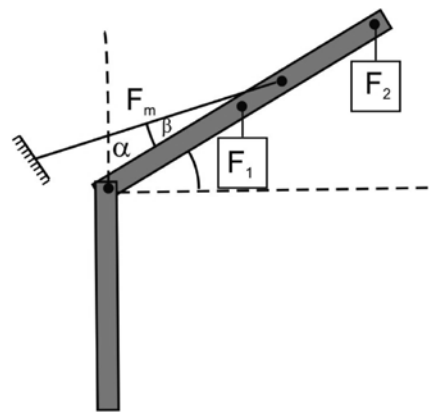
Pri raziskovanju raznih pojavov si pomagamo z modeli, ki ob določenih poenostavitvah ponazarjajo njihov potek. Na primer, ustrezen model za prikazovanje sil v komolcu in kolku je vzvod. Zaradi prepletenega medsebojnega delovanja hrbtenice in nanjo pripetih mišic je pri hrbtenici model vzvoda manj viden kot pri komolcu. Tudi oblika hrbtenice v obliki črke S ni najbolj primerna za določanje ročic sil na vzvodu. Šele novejša natančnejše rentgenske meritve so pokazale [3], da je mogoče določiti sile v hrbtenici, ko je

telo v sklonjeni legi, tudi po principu vzvoda, če obravnavamo hrbtenico kot togo palico in se omejimo samo na tisto skupino mišic, za katere vemo, da vzdržujejo ravnovesje v sklonjeni legi telesa.

V tej skupini mišic je najpomembnejša mišica vzravnalka – *musculus erector spinae*  $F_m$ , katere prijemališče je na  $2/3$  dolžine hrbtenice  $l$  oziroma na vzvodu, ki ponazarja hrbtenico. Z vzvodom oklepa kot  $\beta = 12^\circ$ . Na drugi strani vzvoda sta z mišično silo v ravnovesju sili  $F_1$  in  $F_2$ . Prva ima prijemališče na polovični dolžini vzvoda in predstavlja težo trupa, ki je  $2/5$  teže telesa  $F_g$ , druga sila  $F_2$  ima prijemališče na zgornjem koncu vzvoda in pomeni težo glave in rok, ki je  $1/5 F_g$ . Vzvod oklepa s pokončno lego telesa kot  $\alpha$  in ima začetek pri petem ledvenem vretencu (slika 1 in 1a).



Slika 1: Obremenitev mišice vzravnalke (*musculus erector spinae*) pri sklonjeni legi trupa

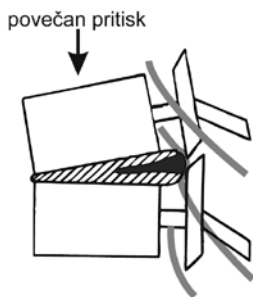


Slika 1a: Model hrbtenice v obliki vzvoda

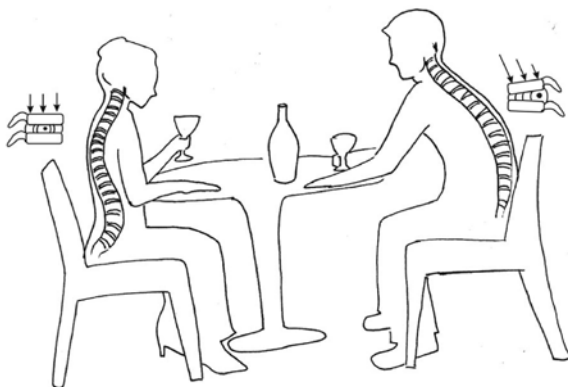
S poznavanjem omenjenih podatkov in pri upoštevanju zgradbe hrbtenice lahko statično opišemo model hrbtenice v obliki vzvoda. Da lahko pojasnimo vzrok nastanka bolečin, je potrebno poiskati še povezavo med silami in tistim delom hrbtenice, ki je nanje najbolj občutljiv. To dosežemo s podrobnejšim opisom hrbtenice, posebno tistega predela, ki je najbolj izpostavljen silam med obremenitvijo.

Hrbtenica je sestavljena iz 24 vretenc, ki jih glede na lego trupa razdelimo na vratna, prsna in ledvena. Gibljivost in prožnost hrbtenice omogočajo medvretenčne ploščice, ki med seboj ločijo posamezna vretenca. Medvretenčne ploščice so sestavljene iz vezivno-hrustančnega ovoja in zdrizastega jedra, ki spreminja svoj položaj med gibanjem hrbtenice (slika 2). Če je pritisk na ploščico prevelik, vezivni ovoj počni, zdrizasto jedro izstopi iz medvretenčne ploščice in začne pritiskati na sosednje živce, ki izstopajo iz hrbtenjače. Ta opis je sicer poenostavljen, vendar zadovoljivo prikazuje nastanek bolečin. V našem primeru je pri predklonu najbolj obremenjena medvretenč-

na ploščica med petim ledvenim in prvim križnim vretencem. Na tem mestu se najpogosteje pojavi zdrs medvretenčne ploščice, ki največkrat povzroči ohromitev kolka in nog. Zdrs medvretenčne ploščice nastane tudi zaradi ukrivljene hrbtenice (slika 2a). Tudi v tem primeru je medvretenčna ploščica nesimetrično obremenjena, in če traja taka obremenitev dalj časa, so poškodbe podobne tistim, ki nastanejo zaradi prevelikih sil.



Slika 2: Nepravilno obremenjena medvretenčna ploščica



Slika 2a: Položaj hrbtenice in medv. ploščice pri pravilnem sedenju (levo) in nepravilnem sedenju (desno)

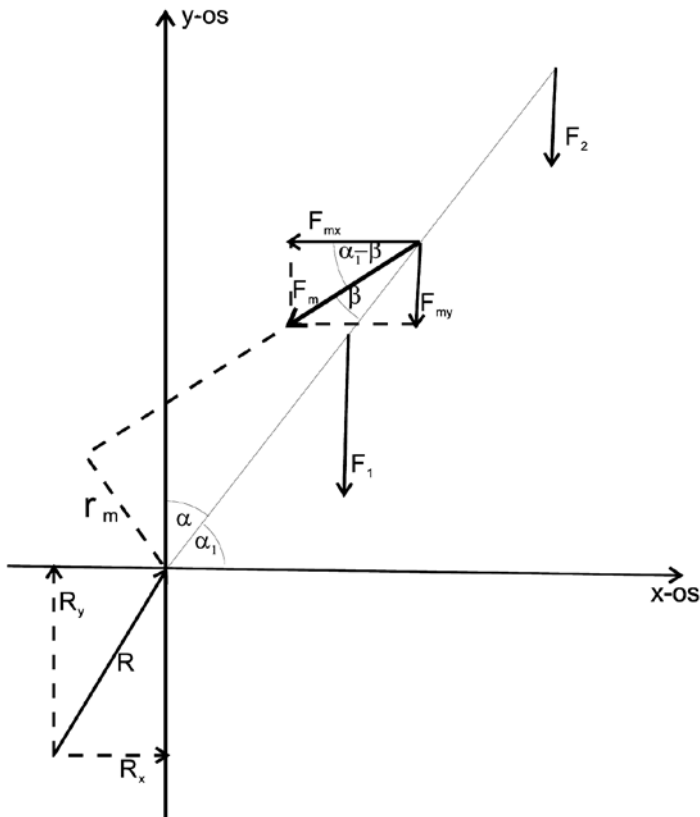
## POVEZAVA ANATOMSKIH PODATKOV HRBTENICE Z NJENIM MODELOM V OBLIKI VZVODA

Sile in navori v hrbtenici, ko je telo v sklonjeni legi, obravnavamo v ravninskem koordinatnem sistemu, katerega izhodišče postavimo med petim ledvenim in prvim križnim vretencem (slika 1 in 3). Vzvod oklepa s pozitivno koordinatno osjo  $y$  kot  $\alpha$ . Z rezultanto sil  $F_m$ ,  $F_1$  in  $F_2$  je v ravnovesju sila prvega križnega vretenca  $R$ . Ravnovesje vzvoda zapišemo z dvema enačbama o ravnovesju sil:

$$\sum_{i=1}^n F_{ix} = 0, \quad \sum_{i=1}^n F_{iy} = 0, \quad (1)$$

kjer pomenita  $F_{ix}$  in  $F_{iy}$  komponenti  $i$ -te sile v smeri osi  $x$  in  $y$ , in z eno enačbo o ravnovesju navorov

$$\sum_{i=1}^n F_i r_i = 0. \quad (1a)$$



Slika 3: Shematični prikaz delovanja sil v obremenjeni hrbtenici  
 $F_m$ : mišična sila  
 $F_1$ : teža trupa  
 $F_2$ : teža glave in rok  
 kot  $\beta = 12^\circ$   
 $R$ : sila na medvretenčno ploščico

Če razstavimo mišično silo  $F_m$  na komponenti  $F_{mx}$  in  $F_{my}$ , silo  $R$  na medvretenčno ploščico pa na komponenti  $R_x$  in  $R_y$ , zapišemo pogoj (1) o ravnovesju sil z enačbama:

$$R_x - F_{mx} = 0, \quad R_y - F_{my} - (F_1 + F_2) = 0, \quad (2)$$

iz katerih lahko izračunamo komponenti sile  $R$ . Iz pogoja o ravnovesju navorov (1a) izračunamo najprej mišično silo in nato z upoštevanjem označenih kotov še njuni komponenti (slika 3). Navor mišične sile je  $F_m l_m \sin \beta$ , kjer je  $l_m$  razdalja med prijemališčem sile in koordinatnim izhodiščem, navora sil  $F_1$  in  $F_2$  pa sta  $F_1 l_1 \sin \alpha$  oziroma  $F_2 l_2 \sin \alpha$ , kjer smo z  $l_1$  in  $l_2$  prav tako označili razdalji njunih prijemališč od koordinatnega izhodišča. Ker sta oba navora nasprotno usmerjena, velja enačba  $l_m F_m \sin \beta = (l_1 F_1 + l_2 F_2) \sin \alpha$ , iz katere izračunamo mišično silo  $F_m$ :

$$F_m = \frac{(l_1 F_1 + l_2 F_2) \cdot \sin \alpha}{l_m \cdot \sin \beta}. \quad (3)$$

Z upoštevanjem že zapisanih zvez med dolžinami  $l_m$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  in celotno dolžino vzvoda  $l$  ter odvisnosti sil  $F_1$  in  $F_2$  od teže telesa  $F_g$  zapišemo mišično silo:

$$F_m = \frac{3}{5} F_g \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (3a)$$

Komponenti mišične sile izrazimo še v odvisnosti od kotov, ki so označeni na sliki 3. Ker je kot  $\alpha_1$  komplementaren kotu  $\alpha$  in velja zveza  $\alpha_1 - \beta = 90^\circ - (\alpha + \beta)$ , dobimo komponenti mišične sile končno obliko:  $F_{mx} = F_m \sin(\alpha + \beta)$ ,  $F_{my} = F_m \cos(\alpha + \beta)$ . Iz enačb (2) izračunamo iskani komponenti sile  $R$ :

$$R_x = F_m \sin(\alpha + \beta), \quad R_y = F_m \cos(\alpha + \beta) + (F_1 + F_2), \quad (4)$$

ki ju z upoštevanjem enačbe (3a) za mišično silo in oznako  $k$  za količnik  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$  zapišemo v obliki:  $R_x = \frac{3}{5} F_g k \sin(\alpha + \beta)$ ,  $R_y = \frac{3}{5} F_g (1 + k \cos(\alpha + \beta))$ . Po Pitagorovem izreku  $R^2 = R_x^2 + R_y^2$  dobimo končen izraz za silo  $R$  na medvretenčno ploščico:

$$R = \frac{3}{5} F_g \sqrt{1 + 2k \cos(\alpha + \beta) + k^2}. \quad (4a)$$

V pokončni legi telesa, ko je kot  $\alpha$  enak nič, je sila  $R$  na medvretenčno ploščico  $3/5 F_g$ , kar predstavlja težo trupa, glave in rok in potrjuje pravilnost izraza (4a) za silo  $R$ . Če vzamemo za primer človeka z maso 80 kg, ki je sklonjen za  $60^\circ$  od pokončne lege, je v tem primeru konstanta  $k = 4,3$  in dobimo iz obrazca (4a) silo na medvretenčno ploščico  $R = 2260$  N.

## NOŠENJE BREMENA NA HRBTU IN DRŽANJE BREMENA V ROKAH V POLOŽAJU PREDKLONA

Pri hoji z bremenom na hrbtu je telo zaradi stabilnosti tudi v sklonjeni legi, zato se sila na medvretenčno ploščico dodatno poveča. Ta primer se pojavlja v vsakdanjem življenju pri nošenju težkih nahrbtnikov, šolskih torb in podobno. Največja obremenitev hrbtenice v sklonjeni legi telesa pa je pri dviganju ali držanju bremena v rokah. Obremenitev hrbtenice pri nošenju in dviganju obravnavamo tako kot pri neobremenjeni hrbtenici: razdalji  $l_1$  in  $l_2$  ostaneta v obeh primerih enaki, pri nošenju prištejemo v izrazu (3) težo bremena k sili  $F_1$ , pri dviganju pa k sili  $F_2$ . Razmerje med težo bremena  $F_B$  in težo telesa  $F_g$  opišemo s konstanto  $u$ ,  $F_B = u F_g$ , in privzamemo, da je to razmerje 1 : 5, kar se najpogosteje ujema pri nošenju bremena na hrbtu. V primeru nošenja dobimo iz izraza (3) mišično silo:

$$F_m = 3/20 (4 + 5u) k F_g, \text{ oziroma } 3/4 F_g k \text{ pri upoštevanju } u = 1/5.$$

Po obrazcu (4) izračunamo komponenti sile  $R$ :  $R_x = 3/4 F_g k \sin(\alpha + \beta)$  in  $R_y = F_g (3/4 k \cos(\alpha + \beta) + 4/5)$  ter po Pitagorovem izreku še silo  $R$ :

$R = F_g \sqrt{\left(\frac{3}{4}k\right)^2 + \frac{6}{5}k \cos(\alpha + \beta) + \frac{16}{25}}$  .. Pri pokončni legi telesa, ko je kot  $\alpha$  enak nič, je sila  $R \frac{4}{5}F_g$ , kar je dejanska obremenitev hrbtenice pri pokončni legi telesa z bremenom na hrbtu.

Enako postopamo pri držanju bremena v rokah v sklonjeni legi. V obrazcu (3) prištejemo k sili  $F_2$  še teža bremena  $F_B = uF_g$ , upoštevamo za konstanto  $u = 1/5$  in dobimo mišično silo  $F_m = 9/10 F_g k$ . Z novo vrednostjo za mišično silo dobimo zopet po obrazcu (4) komponenti sile  $R$ :  $R_x = \frac{9}{10} k F_g \sin(\alpha + \beta)$ ,  $R_y = F_g \left( \frac{9}{10} k \cos(\alpha + \beta) + \frac{4}{5} \right)$  in dalje kot v prejšnjem primeru tudi silo  $R$ .

## REZULTATI IN ZAKLJUČEK

V tabeli 1 je pregled številčnih vrednosti za mišične sile in sile na medvretenčno ploščico pri obremenitvi hrbtenice v sklonjeni legi telesa.

*Tabela 1: Pregled mišičnih sil in sil na medvretenčno ploščico pri sklonjeni legi trupa za 30° od pokončne lege telesa pri masi človeka 60 kg in masi bremena 12 kg.  $F_m$  pomeni ustrezno mišično silo,  $R$  pa silo na medvretenčno ploščico. Pri računanju mišične sile so upoštevana razmerja ročic:  $l_1 = l/2$ ,  $l_2 = l$ ,  $l_m = 2/3l$  in vrednosti za sili  $F_1$  in  $F_2$ :  $F_1 = 2/5 F_g$ ,  $F_2 = 1/5 F_g$ .*

Način obremenitve	$F_m$	$R$
Dodatno neobremenjena hrbtenica	900 N	1188 N
Breme na hrbtu	1125 N	1500 N
Dvig izpred predklona	1350 N	1728 N

Iz tabele je razvidno, da so sile na medvretenčno ploščico pri vseh treh načinih obremenitve hrbtenice izredno velike. Najpogostejša obremenitev hrbtenice zaradi sklonjene lege telesa, ki jo pogosto spregledamo, je nepravilno dolgo trajno sedenje na delovnem mestu, na primer sedenje v šolski klopi, pri vožnji z avtomobilom in podobno. Takojšnje bolečine v križu zaradi sklonjene lege občutimo, če smo dalj časa sklonjeni, ko opravljamo razna dela na vrtu ali na polju, ko je trup skoraj v vodoravni legi. Ko se zravnamo, bolečine prenehajo. Kako nevarno je dviganje težkih predmetov iz predklona, nam lahko povedo delavci v železarnah in gradbeništvu. Pri takih opravilih so poškodbe manjše, če znamo pravilno dvigati, to je, če dvignemo breme tako, da je ročica teže bremena glede na medvretenčno ploščico čim manjša. S tako tehniko dviganja so seznanjeni dvigalci uteži. Kot zanimivost povejmo primer velike obremenitve hrbtenice v vsakdanjem življenju: če dvigne mati otroka iz predklona, ko je trup skoraj v vodoravni legi, je sila na medvretenčno ploščico 2725 N.

Nadaljnje razpravljanje o posledicah velikih obremenitev hrbtenice je področje medicine oziroma ortopedije. Namen prispevka je predvsem pokazati, kako lahko uporabimo manj znane primere pri obravnavanju sil in navorov pri fizikalnem pouku in hkrati tudi prispevamo k večji osveščenosti pri skrbi za zdravo hrbtenico.

## LITERATURA

- [1] France Sevšek, *Biomehanika*, Visoka šola za zdravstvo, Ljubljana 2004
- [2] Janko Popovič, *Bolečina v križu in išias*, Mladinska knjiga, Ljubljana 1989
- [3] George B. Benedek, Felix M. H. Villars, *Physics With Illustrative Examples From Medicine and Biology MECHANICS*, Springer – Verlag, New York 2000
- [4] Rene Chaillet, MD, *Low back pain Syndrome*, F. A. Davis Company, Philadelphia 1995
- [5] T. McClurg Anderson, *Biomechanics of Human motion*, Sport publication, New Delhi-2 2007