

## KORIŠĆENJE KACIGE ZA REDUKCIJU MEHANIČKIH POVREDA GLAVE

Dušan Mikičić, Milan Spaić, Elektrotehnički fakultet, VMA, Beograd

**Sadržaj** – Kaciga je tako dizajnirana da redukuje kontaktni napon između glave i nekog drugog čvrstog tela. Kaciga će u mnogim slučajevima sprečiti ili redukovati frakturu lobanje i površinske povrede. Ostaje otvoreno pitanje kakav uticaj ima kaciga na sprečavanje povreda mozga. Povrede mozga mogu biti fokalne i difuzione. Sa kacigom te povrede su difuzione i mogu biti veoma opasne. U jednoj studiji Tompson i dr. su utvrdili su da korišćenje kacige redukuje povrede mozga oko 88% kod biciklista. Ovaj rad prikazuje biomehanički model za proračun udarne sile  $F$  i kontaktni napon  $\sigma$  između lopte i glave, sa i bez kacige. Osim toga u ovome radu biće prikazana uloga "HANS" aparata (Head and Neck Support). Ovaj aparat redukuje udarnu silu  $R_0$ , na vratni pršljen oko 86% prema studiji Daimler Chrysler].

### 1. UVOD:

Korišćenje kacige za zaštitu glave od mehaničkih povreda je poznato već 3000 godina. U staroj Persiji (danas Iran) postoje sačuvani crteži u kamenu sa vojnicima koji su na glavi imali kacige. Vojnici rimske vojske su koristili i metalni oklop za zaštitu grudnog koša. Uloga kacige i oklopa je da zaštiti vojnika od potencijalnih udaraca: kamenom, kopljem, strelom, nožem i dr. Može se slobodno reći da je ova zaštitna oprema spasila život mnogim ljudima, a neki su prošli bez ikakvih povreda, zahvaljujući upotrebi kacige i druge zaštitne opreme. Danas se kaciga koristi u rudniku, građevinarstvu,

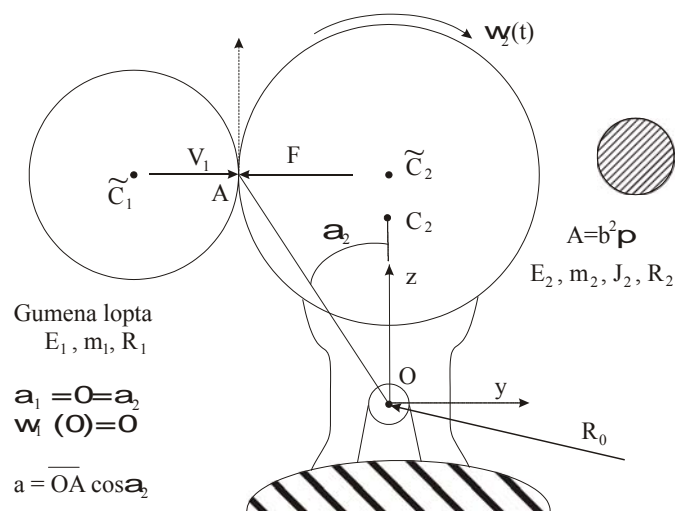
biciklizmu, auto-moto trke, ragbiju, skijanju, boksu i u drugim opasnim sportovima. Korisna uloga kacige nije sporna u slučajevima kada čovom miruje ili se kreće malom brzinom ( $v < 5$  m/s), u trenutku dobijanja udarca. Tada kaciga svojom masom i čvrstinom prihvata kontaktni napon i raspoređuje ga po koži glave na znatno veću površinu. Mehanički pritisak na kožu se tako znatno smanji – oko 100 puta. Slična je situacija i sa kostima lobanje, koje su osetljivije na kontaktne napone, na stabilnost (izvijanje) i savijanje. Kaciga je za kosti lobanje odlična zaštita što će biti pokazano u ovome radu. Osim korisne uloge korišćenje kacige može nekada biti i štetno. To su situacije kada se čovek kreće velikim brzinama,  $v = (10 \div 100)$ m/s. Nakon naglog zaustavljanja (sudar) velika masa glave sa kacigom, a još više povećan moment inercije, uzrokuju velike udarne sile u blizini četvrtog vratnog pršljena. Statistike koje su vodili američki i australijski biomehničari pokazale su povećan broj povredjenih vratnih pršljenova korisnika kacige. Ovaj problem je rešen tako što je konstruisan aparat "HANS" – Head and Neck Support sl. 1., koji štiti vrat u slučaju naglog kočenja. U ovome radu prikazaćemo ovaj aparat uz opis i tabelarni prikaz redukcije povreda.

### 2. METODOLOGIJA:

Na pitanje kada je upotreba kacige korisna, a kada štetna može se odgovoriti biomehničkom analizom modela prikazanog na slici 1. Analizira se sudar lopte ( $m_1, R_1$ ) i glave ( $m_2, R_2$ ) prema sl. 2.



Sl.1. HANS - Head and Neck Support [2], aparat vezan za kacigu



Sl.2. Biomehnički model – udar lopte u glavu

Lopta je homogena, poznatog modula elastičnosti  $E_1$ . Glava je aproksimativno zamenjena loptom mase  $m_2 \sim 5$ kg, prečnika  $2R_2 = 0,2$ m poznatog modula elastičnosti  $E_2$ . Rotacija glave oko četvrtog vratnog pršljena  $Ox$ , uglovnom

brzinom  $\omega_2$ , uzrokuje dve udarne sile: reakciju zgloba  $\vec{R}_0$  i kontaktnu silu  $\vec{F}$  u dodirnoj tački  $A$ . U ovom problemu se zanemaruje trenje klizanja. Glava ima poznat moment inercije oko ose  $Ox$ ,  $J_{Ox}$ . Ako je  $t = 0$  početak sudara, a  $t = \tau$  završetak sudara, tada su:  $v_1(0) = v_1$  – brzina dodirne tačke  $A$  lopte  $m_1$  na početku sudara. Kompletna mehanička analiza je prikazana u radu [5], a ovde će biti dat skraćeni prikaz. Nakon završenog sudara glava će imati ugaonu brzinu:

$$\omega'_2(\tau) = \omega_2(0) + \frac{m_1 a(1+k)(v_1 - a\omega_2(0))}{J_{Ox}(m_2) + m_1 a^2} \quad (1)$$

Udarana sila  $F$  ima maksimalnu vrednost kada se lopte dodiruju po krugu  $A = b^2 \pi$  u trenutku  $t = \tau/2$ , pri čemu je  $\tau$  – trajanje sudara. Pri tome se obe kugle deformišu za  $\Delta_1 + \Delta_2 = \Delta$ . Uz pomoć Herz-ovih formula u granicama elastičnosti udarna sila  $F$  je za  $\omega_0 = 0$  jednaka:

$$F = \left\{ \frac{\left[ 0,22 \frac{m_1(1+k)}{J_{Ox} + m_1 a^2} J_{Ox}(m_2) \right]^3}{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} (X_1 + X_2)^2} \right\}^{0,2} v_1^{1,2} \quad (2)$$

U ovoj formuli:  $m_1$  – masa lopte,  $k$  – koeficijent sudara,  $J_{Ox}(m_2)$  – moment inercije glave u odnosu na osu  $Ox$ ,  $R_1$  i  $R_2$  – poluprečnici lopte i glave,  $a = OC_2$  – rastojanje zgloba  $O$  od pravca brzine  $v_1$ ,  $h = OC_2$  – rastojanje zgloba  $O$  od centra mase glave,  $X_i = (1 - \mu_i^2)/E_i$ ,  $i = 1, 2$ ,  $\mu$  – Poasonov broj,  $E$  – Jungov modul elastičnosti.

$$b = 0,91 \left[ F \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} (X_1 + X_2) \right]^{1/3} \quad (3)$$

Kontaktni napon između lopte i glave  $\sigma_{LG}$  ima maksimalnu vrednost u centru dodirnog kruga:

$$|\sigma_{\max}| = 1,5 \frac{F}{b^2 \pi} = 0,6 \left[ F \frac{\left( \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)^2}{(X_1 + X_2)^2} \right]^{1/3} \quad (4)$$

Razmotrimo sada razliku između kontaktnog napona sa i bez kacige. Neka je gumena lopta mase  $m_1 = 0,5 \text{ kg}$ ;  $R_1 = 0,05 \text{ m}$ ;  $E_1 = 10^8 \text{ Pa}$ . Glava bez kacige ima masu  $m_2 = 5 \text{ kg}$ ;  $R_2 = 0,1 \text{ m}$ ;  $E_2 = 10^9 \text{ Pa}$ ;  $a = 0,2 \text{ m}$  – rastojanje zgloba  $O$  od pravca brzine  $v_1$ ;  $h = 0,15 \text{ m}$  – rastojanje zgloba  $O$  i centra mase glave  $OC_2$ .  $J_{Ox}(m_2) = 0,4 m_2 R_2^2 + m_2 h^2 = 0,1325 \text{ kgm}^2$ ,  $J_{Ox}(m_2) + m_1 a^2 = 0,1525 \text{ kgm}^2$ ;  $\mu = 0,4$  – Poasonov broj;  $k = 0,5$  – koeficijent sudara. Zamenom ovih vrednosti u formule (2), (3) i (4) dobija se u SI sistemu:

$$F_{LG} = 258 \cdot v_1^{1,2} \text{ N}; \quad b_{LG} = 3,9 \cdot 10^{-3} v^{0,4} \text{ m};$$

$$\sigma_{LG} = 1,5 F / (b^2 \pi) = 8 \cdot 10^6 v^{0,4} \text{ Pa}$$

Ako se na glavu stavi kaciga tada je masa glave sa kacigom  $m_2 = (5+2) \text{ kg} = 7 \text{ kg}$  – povećanje je 40%,  $h = 0,2 \text{ m}$ ;  $a = 0,2 \text{ m}$ ;  $J_{Ox}(m_2) = 0,4 m_2 R_2^2 + m_2 h^2 = 0,3430 \text{ kgm}^2$  – povećanje je 158%;  $J_{Ox}(m_2) + m_1 a^2 = 0,3630 \text{ kgm}^2$ .

Sada je poluprečnik kacige  $R_2 = 0,15 \text{ m}$ ;  $E_2 = 10^{10} \text{ Pa}$ , jer se kaciga izrađuje od kvalitetne plastike (kevlar i silicijum dioksidna vlakna).

$$F_{LK} = 312 \cdot v_1^{1,2} \text{ N}; \quad b_{LK} = 4,21 \cdot 10^{-3} v^{0,4} \text{ m};$$

$$\sigma_{LK} = 1,5 F / (b^2 \pi) = 8,4 \cdot 10^6 v^{0,4} \text{ Pa}$$

Proračun pokazuje da se upotrebom kacige udarna sila povećala za  $312/258 = 1,21$  što je približno 21%, a kontaktni napon između lopte i kacige  $\sigma_{LK}$  se povećala za oko 5%. Medjutim napon  $\sigma_{LK}$  (lopta – kaciga) se značajno redukuje, jer se kontaktna površina  $b^2 \pi$  (lopta – kaciga) menja u  $R_2^2 \pi = 0,1^2 \pi$ . Kada se uzme u obzir da je  $R_2$  oko 10 puta veće od  $b$ , kontaktna površina  $b^2 \pi$  (lopta – kaciga) se povećala 100 puta (kaciga – glava). To znači redukcija kontaktnog napona na glavu oko 100 puta. Tabela 1 predstavlja numerički prikaz redukcije kontaktnog napona na lobanju korišćenjem kacige.

Tabela 1. Redukcija kontaktnog napona na lobanju korišćenjem kacige.

$v_1$ (m/s)	0	5	10
$F_{LG}$ (N)	0	1780	4090
$F_{LK}$ (N)	0	2152	4944
$\sigma_{LG}$ (MPa), bez kacige	0	15	20
$\sigma_{LK}$ (MPa)	0	16	21
$\sigma_{KG}$ (MPa), sa kacigom	0	0,11	0,255
$b_{LG}$ (mm), bez kacige	0	7,42	9,8
$b_{LK}$ (mm), sa kacigom	0	8	10,6

Iz prethodne tabele se vidi da se upotrebom kacige kontaktni napon  $\sigma_{LG} = 20 \text{ MPa}$ , pri brzini lopte  $v_1 = 10 \text{ m/s}$  redukuje na  $\sigma_{KG} = 0,255 \text{ MPa}$ . Ovaj napon  $\sigma_{KG}$  može da podnese i koža i kost lobanje, jer je dozvoljen kontaktni kratkotrajni napon za kožu u intervalu  $(3 \div 10) \text{ MPa}$ , a za kost lobanje u intervalu  $(10 \div 30) \text{ MPa}$ . Upotrebom kacige smanjen je kontaktni napon  $\sigma_{LG}$  na  $\sigma_{KG}$  za  $(80 \div 140)$  puta, što zavisi od brzine  $v_1$  kretanja lopte. Kaciga dakle uspešno štiti kožu i kost lobanje za male brzine do  $5 \text{ m/s}$ . Treba imati u vidu da u ovoj analizi nije uzet u obzir napon savijanja i izvijanja. Jako su opasni udarci u temporalni deo glave (blizu slepoočnica, pored uha). Tu je kost lobanje najtanja – oko  $3 \text{ mm}$ , pa je rizik od frakture realan bez kacige i pri maloj brzini lopte  $v_1 = 5 \text{ m/s}$ . Frontalni deo lobanje je znatno deblji – oko  $7 \text{ mm}$ , tako da taj deo glave može osim velikog kontaktnog napona  $\sigma_{LG}$  može da podnese i mehanički napon savijanja. Difuzione povrede mozga se takodje redukuju upotrebom kacige iz sledećih razloga: veličina difuzionih povreda mozga bez frakture lobanje zavisi od ubrzanja (češće usporenja)  $w$ . Uz pretpostavku  $w = v^2/2s$ , svako produženje puta kočenja  $s$  smanjuje ubrzanje  $w$ . Kacige debljine  $5 \text{ cm}$ , povećava put kočenja od  $5$  do  $10$  puta, jer se lobanja ne može deformisati više od  $0,5 \text{ cm}$  bez frakture. Ubrzanje  $w$  se smanji sa  $w_1 = 10^2/0,01 = 10^4 \text{ m/s}^2$  na  $w_2 = 10^2/0,1 = 10^3 \text{ m/s}^2$ . To znači da je skok pritiska u mozgu u drugoj varijanti  $10$  puta manji.

$$\Delta p_2 = \rho w_2 \cdot 2R_2 = 10^3 \cdot 10^3 \cdot 0,2 Pa = 2 \cdot 10^5 Pa$$

Ovaj kratkotrajni skop pritiska mozak može podneti dok bi u prvom slučaju bez kacige bilo:

$$\Delta p_1 = \rho w_1 \cdot 2R_2 = 10^3 \cdot 10^4 \cdot 0,2 Pa = 2 \cdot 10^6 Pa$$

sa verovatno teškim difuzionim povredama mozga.

### 3. ZAKLJUČAK

Nošenje kacige je korisno, jer je redukcija kontaktnog napona na kožu i kost lobanje preko 100 puta. Tabela 1 je rezultat biomehaničkog modela sl.2. sa realnim parametrima. Statistike američkih i australijskih naučnika [1,2] to potvrđuju. Negativne strane upotrebe kacige su povećanje mase  $m_2$  (glava + kaciga) oko 40%, a još više povećanje momenta inercije  $J_{ox}(m_2)$  glave sa kacigom u odnosu na osu rotacije  $O_x$  (više od 100%), oko četvrtog vratnog pršljena. Ove dve činjenice su dobrodošle, ako čovek miruje i tada dobije udarac. Međutim, ako čovek ima veliku brzinu, u slučaju sudara, onda se njegovo telo (torzo) zaustavlja pomoću pojasa. Glavu nema ko da zaustavi, osim vrata, koji je tada izložen velikom smicanju i udarnoj sili  $R_0$ . Statistike ovo potvrđuju povećanim brojem povredjenih vratova korisnika kacige. Ovaj problem se rešava upotrebom "HANS" – Head and Neck Support – aparata, koji preuzima deo smicanja na sebe. Osim toga ovaj aparat amortizuje rotaciju glave, jer je vezan za kacigu i za donji deo kožnog kombinezona sl.1. Kaciga, HANS, i kombinezon od kože sada čine kompletnu zaštitu vozača, u slučaju naglog kočenja. Tabela 2 potvrđuje ove činjenice.

Tabela 2. Redukcija udarne sile  $R_0$  na vrat. [2]

	Injury Threshold	No HANS	With HANS	Reduction
Head motion (inches)	n/a	17	9.5	44 %
Force on neck (pounds)	740	<b>930</b>	<b>128</b>	86 %
Chest deflection (inches)	2	1.5	0.6	60 %
Head injury criterion or head acceleration (HIC)	1000	<b>1681</b>	<b>532</b>	68 %

### LITERATURA

- [1] H.L.A. van den Bosch, "Modelling and specification for an improved helmet design", Eindhoven University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, P.O.Box 513, NL 5600 MB Eindhoven – 2003.,
- [2] H.Gramling and R. Hubbard "Sensitivity Analysis of the HANS Head and Neck Support", *Motor Sports Engineering Conf., Soc. of Auto Engin.* paper no. 2000-01-3541, 2000.
- [3] M. L.J. Apuzzo, M. Y. Wang "The Neurosurgeon in the Arena of Sport", *Clinical Neurosurgery*, chapter 17, pp.333-370, The Legacy of Galen of Pergamon, 2001.
- [4] V. J. Miele, M.D., J. E. Bailes, MD. and J. L. Volker, M.D "Boxing and the Neurosurgeon" *Clinical Neurosurgery*, vol. 49, *Proceedings of the Congress of Neurological Surgeons*, pp.395-406, chapter 19, San Diego, California, 2001.
- [5] D. Mikičić, V. Savanović "Mechanical Injury of the head caused by exterior force", *Facta Universitatis*, Series Mechanics, vol 3. N°11,2001.pp.295-300
- [6] H. J. Proctor, M.D., F.A.C.S., G.W.Palladino, M.S., and D. Fillipo, M.S., "Failure of Autoregulation After closed Head Injury: An Experimental Model", *The Journal of Trauma*, vol.28, No. 3, march, 1998.
- [7] V. Falanga, B. Bucalo "Use of a durometer to assess skin hardness", *Journal Amer. Acad. Dermatol.* vol. 29: pp.47-51, 1993.

**Abstract** – Helmet is primarily designed to reduce the contact stress between head and any second solid body. Helmet will in many cases prevent or reduce skull fractures and superficial head injuries. Less clear is how effective helmets are at preventing injuries to the brain. Brain injuries can be either focal or diffuse. It is the diffuse brain injuries which are most serious. A hospital emergency room case-control study by Tompson et al . found that bicycle helmets reduces brain injuries by 88 percent. This paper represents biomechanical model for calculation of impact force  $F$  and contact stress  $\sigma$  between a ball and head with or without helmet. Besides that this paper presents the role of the "HANS" – Head and Neck Support - apparatus. This apparatus can reduce the impact force  $R_0$ , on the neck vertebra about 86% by Daimler Chrysler study .

### REDUCTION OF THE MECHANICS HEAD INJURIES WITH HELMET USE

Dušan Mikičić, Milan Spaić