

Impact insulation as a footwear design criterion

Udarana izolacija kao kriterij dizajna obuće

Budimir Mijović^{1*}, Josip Jelić-doktorand¹, Petra Brać-student¹

¹Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Prilaz baruna Filipovića 28a, HR-10 000 Zagreb

*e-pošta: budimir.mijovic@tff.hr

Pregledni rad / Review paper

DOI: 10.34187/ko.69.2.3

Abstract

In addition to aesthetic conditions, sports footwear also meets a number of functional conditions (comfort, vibro-impact insulation, thermal-diffusion protection). The construction of certain types of sports footwear must withstand intense dynamic loads, so in the construction of sports footwear, priority is given to meeting the criteria of impact and vibration insulation. Modern techniques of injection molding of the bottom have enabled the realization of a number of new constructive solutions of the sole of the shoes.

Keywords: sports footwear, biomechanics, impact insulation.

Sažetak

Sportska obuća pored estetskih mora zadovoljiti i niz funkcionalnih zahtjeva (komfor, vibro-udarna izolacija, termičko-difuzijska zaštita). Konstrukcija pojedinih tipova sportske obuće mora izdržati intenzivna dinamička opterećenja, pa se stoga u konstruiranju sportske obuće daje prioritet zadovoljenju kriterija udarne i vibracijske izolacije. Nove tehnike injekcijskog prešanja donjišta omogućile su realizaciju niza novih konstruktivnih rješenja donjišta.

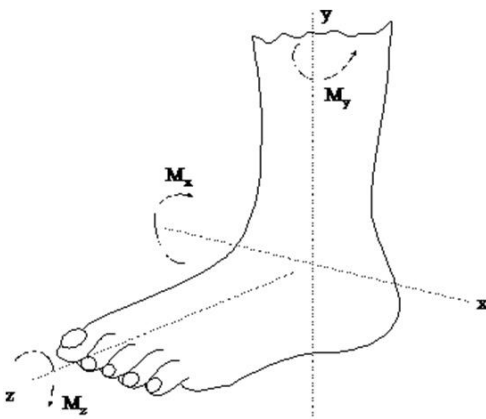
Glavne riječi: sportska obuća, biomehanika, udarna izolacija.

1. Uvod

Prikladna obuća ima veliko značenje pri gibanju tijela čovjeka. Ona štiti stopala, odnosno noge, od klimatskih nepogoda ili opasnog terena. U oblikovanju i održavanju djelatnosti stopala, u održavanju stopalnih lukova kosti djeluju svojim oblikom čvrstih sveza i aktivnim djelovanjem golijenskih i stopalnih mišića [1,2].

Donjište obuće u osnovi mora biti izolator udarnog opterećenja između podloge i stopala. Konstrukcija sportske obuće pored estetskih i modnih zahtjeva mora zadovoljiti i funkcionalne kriterije [3,4]. Pojava novih materijala i tehnologija koncem 80-tih revolucionirala je projektiranje sportske opreme, pa i sportske obuće. Biomehanički i ergonomski kriteriji konstruiranja danas se koriste više nego ikada [5,6].

Stopalo čovjeka s gornjim nožnim zglobom čini vrlo složenu anatomsku i funkcionalnu cjelinu. Postoji uska povezanost funkcija stopala, koljena i kuka, preko kojih se prenosi čitava težina tijela. Stopalo se sastoji od 26 kostiju povezanih međusobno čvrstim ligamentima i mišićima. Najopsežnija gibanja u stopalu su: zglob potkoljenice sa stopalom i donji niži zglob, a između ostalih kostiju stopala su zglobovi s manjim opsegom gibanja. Veliki broj zglobova u stopalu omogućuje gibanje kosti pa time i velik broj ligamenata osigurava te zglobove. Na slici 1 prikazane su tri glavne osi stopala oko kojih se stopalo može gibati. Koljenasti zglob ima dva stupnja slobode i nalazi se između stopala i kuka koji ima tri stupnja slobode gibanja.



Slika 1. Glavne osi stopala

Sveze osiguravaju gibanje u zglobovima, ali isto tako ih i ograničavaju. Stopalo ima važnu ulogu vezanu uz uspravan stav čovjeka. Ono statički nosi težinu tijela, a dinamički amortizira udare i omogućava gibanje. Održavanje ravnoteže i pokretanje tijela prema naprijed omogućeno je izmjeničnom akcijom obaju donjih udova gdje su aktivne mišićne, gravitacijske i inercijske sile. Na slici 2. su prikazane tri osnovne osi gornjeg nožnog zgloba.



Slika 2. Tri osnovne osi gornjeg nožnog zgloba

2. Biomehanički model stopala

Kod trčanja, skakanja, klizanja nastaje veliko dinamičko opterećenje koje se ciklički ponavlja i prenosi na donjište obuće. Unutar potpetice nastaje pregib koji ima za posljedicu savijanje materijala [7]. Na to djeluje i težina osobe koja nosi obuću, kao i način hoda. Pri normalnom hodu nastaje relativno nizak tlak, pri hodu po kosoj površini tlak je veći. Savijanja nastaju prije svega na rubovima potpetica. Materijal za izradu donjišta treba zbog toga biti dovoljno elastičan da bi se spriječila opterećenja. Zračni jastučići koji su ukomponirani u donjište sprečavaju kidanje materijala [8]. Bit izolacije udara kod sportske obuće sastoji se u tome da se kinetička energija nastala prilikom sudara obuće s podlogom transformira u energiju elastične deformacije donjišta, te ista ostaje u periodu rasterećenja. Dio kinetičke energije se mehanizmom disipacije transformira u toplinsku energiju i nepovratno gubi i uzima se da sila prenesena na ekstremitete bude minimalna, a uz maksimalnu elastičnost obuće [15].

Za tijelo opterećeno kontaktnom silom F_p u formi trokutnog pulsa određen je odziv $x(t)$, kao rješenje diferencijalne jednadžbe gibanja sustava:

$$m \ddot{x} + k \dot{x} + cx = F_p(t) \quad (1)$$

gdje su:

c i k – konstantne krutosti izolatora i viskoznog prigušenja, a kontaktna sila okoline

$$F_p = c \times x_p$$

Smatrajući da uzbuda dolazi iz okoline bilo u vidu kinematičke uzbude, bilo u vidu sile na sustav, to se ekvivalentno uz zanemarenje prigušenja može pisati:

$$\frac{m}{c} \ddot{x} + x = \varepsilon(t) \quad (2)$$

gdje su:

$x(t)$ – odgovor vibracijskog sustava,

$\varepsilon(t)$ – uzbuda okoline.

Sada postoji mogućnost da se za nekoliko karakterističnih vidova uzbude dobije određeni odzivni sustav. Najčešće se to izvodi u obliku bezdimenzionalnih dijagrama, uvođenjem pojmova faktora povezanosti amplituda ubrzanja T i faktora relativnog pomaka između mase tijela i podloge M :

$$T = \frac{A_{max}}{A_0} \quad (3)$$

$$M = \frac{\delta_{max}}{\Delta_{st}} \quad (4)$$

gdje su:

A_{max} – maksimalno ubrzanje mase tijela,

A_0 – amplituda ubrzanja podloge,

δ_{max} – relativni pomak između podloge i mase,

Δ_{st} – ekvivalentna statička deformacija za maksimalnu silu uzbude.

Za harmonijsku uzbudu prenosivost vibracije definira se kao funkcija relativnog smjera između uzbudnih i vlastitih frekvencija tijela.

2.1. Rezidualni udarni spektar

Parametarska analiza odziva tijela $x = x(t)$ daje odgovor na pitanje koji su to dominantni faktori koji utječu na karakter izolacije podloge. Amplituda uzbude, strmina pulsa, vlastita frekvencija tijela, trajanje pulsa i prigušenje su najutjecajni faktori u analizi problema.

Za tri različite strmine pulsa pobude određen je faktor pojačanja za rezidualni period, odnosno za vrijeme $t > T$ (T - period trajanja pulsa) nakon prestanka djelovanja pulsa.

Nakon prestanka djelovanja opterećenja na tijelo uzima se omjer amplituda:

$$M = \max[x(t)/X_p] \quad (5)$$

gdje je amplituda kontaktne sile F_0 zamijenjena ekvivalentnim pomakom podloge X_p

Udarma izolacija može biti bolja što je omjer t/T manji, no iznos dozvoljene statičke deformacije donjišta može utjecati na deformaciju donjišta.

Pored udarne javlja se i potreba za vibracijskom zaštitom donjih ekstremiteta. Kako su kriteriji vibracijskih udarnih izolacija oprečni, kompromis se postiže uporabom izolatora nelinearne karakteristike. Konstrukcija donjišta izvodi se tako da ima nelinearnu karakteristiku omjera između sile i deformacije [9].

Svrha izolacije od udara sastoji se u tome da se kinetička energija nastala prilikom sudara obuće s podlogom transformira u energiju elastične deformacije donjišta, te ista veličina ostaje u periodu rasterećenja. Kod kinetičke energije se mehanizmom disipacije transformira u toplinsku energiju i nepovratno gubi. Poželjno je da sila prenesena na ekstremitete bude minimalna uz maksimalnu elastičnost obuće, što što je važan zahtjev za konstrukciju obuće. Raspodjela

akumulirane energije elastične deformacije ima dva karakteristična maksimuma. Iznos oslobođene energije je veći u peti nego u prednjem dijelu stopala, što rezultira negativnom vrijednošću akumulacije. Najveća vrijednost disipacije energije je u komponentama prigušenja i podudara s mjestom udarca u petu. Manja vrijednost disipacije podudara se s udarcem u prednji dio stopala. Vrijednost utrošenog rada jednaka je sumi rada akumuliranog u elastičnom elementu i disipaciji energije kontinuirano emitirane u vidu topline. Prostorna raspodjela energije u među-potplatu povezana je sa najnižim tlakom. Udarma sila nastaje kontaktom pete s podlogom, dok se maksimum restorativne sile regenerira u području metatarzalne kosti. U primjeru raspodjele hodom unesenog rada i promjene energije, 11,5 J se troši za deformiranje na među-potplatu, od čega se 7,9 J vraća kao deformacijski rad koji predaje među-potplat, a u procesu rasta 3,6 J se gubi kao toplina [14].

Pored udarnih javlja se i potreba za vibracijske zaštite donjih ekstremiteta. Kako su kriteriji vibracijske i udarne izolacije oprečni, to se kompromis postiže upotrebom izolatora nelinearne karakteristike.

Prema gore navedenim zahtjevima, koriste se tabanice od poroznog materijala, sačasta konstrukcija donjišta, višeslojne sendvič konstrukcije, pneumatski izolatori, itd. U suvremenom dizajnu donjišta pridružuju se razni mehanizmi pneumatske i viskozne izolacije. Potrebno je konstruktivnim oblicima donjišta postići parametre optimalne vibracijske i inercijske zaštite. Nadalje, konstrukcija donjišta mora biti takva da je moguća izrada po prihvatljivoj ekonomskoj cijeni.

2.2. Test lomljivosti obuće

Kao jedan od niza kriterija konstruiranja, opisan je test lomljivosti obuće. Kroz niz konstruktivnih primjera konstrukcije donjišta sportske obuće naznačeni su kriteriji naprednog konstruiranja [10,11]. Prostor oštećenja za zadani tip obuće definiran je kao algebarski prostor, s osi apsčisa preneseno ubrzanje, dok je ordinata promjena brzine pulsa uzbude (slika 3).

Stoga je važno da obuća izdrži sve moguće izvanjske utjecaje. Konstrukcija obuće, između ostalog, mora zadovoljiti kriterije oštećenja uzrokovana udarnim opterećenjem. Kako je gustoća specifične energije na zadanom mjestu konstrukcije pokazatelj potencijalnog oštećenja, to se prostor oštećenja promatra u funkciji prenesenog ubrzanja/sile i razine promjene brzine za period trajanja pulsa.



Slika 3. Test loma sportske obuće

3. Konstrukcija donjišta

Konstrukcija obuće pored estetskih i modnih kriterija mora zadovoljiti i funkcionalne kriterije. Mjesta maksimalnog kontaktnog opterećenja su potencijalni žuljevi, otekline i rane. Konstrukcija obuće mora biti takva da se izbjegnju mjesta visokih kontaktnih tlakova, odnosno mjesta koncentriranog naprezanja unutar stopala. Obuća mora zaštititi stopalo od vanjskih utjecaja, a istovremeno i omogućiti stopalu da "osjeća" podlogu. Zbog toga je potrebno naći optimalnu ravnotežu između oprečnih zahtjeva trošenja, inercijske zaštite i udobnosti. To znači da površina donjišta treba biti žilava, a unutrašnjost mekana i udobna [15].

Kod konstrukcije donjišta obuće uzimaju se tri osnovna kriterija:

- kriterij raspodjele kontaktnog tlaka,
- kriterij inercijske i vibracijske izolacije,
- kriterij dopuštenih naprezanja u razini stopala.

U tablici 1 je prikazana ovisnost između pojedinih kriterija kod konstrukcije donjišta.

Tablica 1. Integralna ovisnost kriterija kod konstrukcije donjišta.

Kriterij konstrukcije donjišta	Inercijska izolacija	<ul style="list-style-type: none"> • ugradnja izolatora • profiliranje donjišta • ugradnja ukrepa i oslonaca
	Raspodjela kontaktnog tlaka	<ul style="list-style-type: none"> • višeslojni umetci • profilirano donjište • optimalni međuprostor
	Smično naprezanje	<ul style="list-style-type: none"> • smični elementi • profilirana pojačanja

Mjerenje kontaktnog tlaka između stopala i podloge, odnosno kontaktnog tlaka između stopala i donjišta daje raspored kontaktnog tlaka u prostoru i vremenu. Uzima se da konstrukcija donjišta odnosno unutrašnjost obuće bude takva da se izbjegnju mjesta maksimalnih kontaktnih tlakova (odnosno mjesta maksimalne gustoće energije elastične deformacije).

Postoji nekoliko načina izbjegavanja mjesta maksimalnog tlaka. Jedan od načina je preraspodjela opterećenja na donjištu. Drugi način je smještanje mekih umetaka između stopala i donjišta. Deformabilna uložnica amortizira visoke pikove tlaka. Modelirana je i vrlo meka, savitljiva, sačinjena od gumiranog lateksa. Jedinствена geometrijska konstrukcijauložnice meko djeluje na stopalo i petu uzrokujući redistribuciju maksimalne razine [18, 19.] tlaka. Na slici 4. je prikazan postupak izrade donjišta obuće.



Slika 4. Postupak izrade donjišta obuće

Za konstrukciju donjišta obuće potrebno je uključiti sljedeće elemente:

- Materijali za izradu donjišta sportske obuće moraju omogućiti stopalu slobodno gibanje.
- Donjište štiti stopalo na njegovoj donjoj strani, tzv. plantarnoj površini.
- Donjište treba biti meko, fleksibilno i također propusno za zrak i vodu paru.
- Primjenjuju se sendvič konstrukcije koja povećavaju izolacijsku učinkovitost donjišta.
- Međusloj materijala svojim izvijanjem povećava sposobnost akumulacije kinetičke energije.
- Pjenasti polimerni materijal svojom strukturom omogućuje apsorpciju udara.
- Obuća zbog intenzivnog udarnog opterećenja, te potrebe izmjene znoja i zraka, zahtjeva vrlo kompleksnu konstrukciju.
- Od interesa je mogućnost smanjenja udarne izolacije, odnosno što veće mogućnosti postizanja udobnosti obuće.

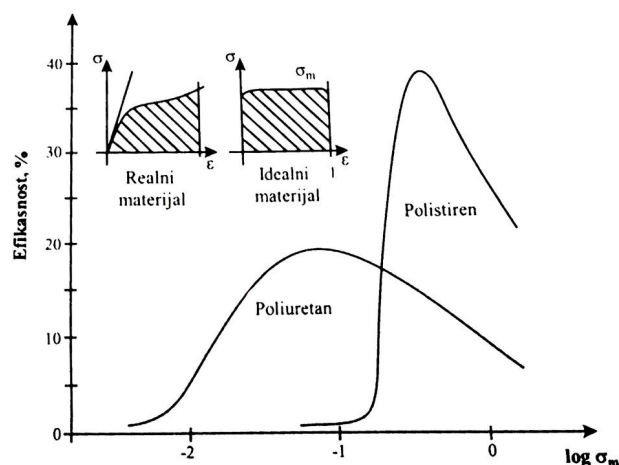
Dizajn donjišta sportske obuće uključuje:

- 3D geometrijsko mjerenje,
- Primjenu biomehaničkih modela,
- Primjenu nove baza podataka sustava veličina,
- Analizu složenih inženjerskih kriterija.

Konstrukcija obuće mora biti takva da se izbjegnju mjesta visokih kontaktnih tlakova, odnosno mjesta koncentriranog naprezanja unutar stopala. Postoji nekoliko načina izbjegavanja mjesta koncentracije naprezanja i visokih gradijenata deformacije [20]. Jedan od njih je pravilan razmještaj upora na donjištu, dok je drugi način ugradnja mekih umetaka u donjištu, te mikroporozne uložne tabanice varijabilne gustoće i debljine. U novije vrijeme donjište nije samo pasivna zaštita stopala, nego uzima ulogu i svojstva aktivne zaštite. Geometrijska konstrukcija umetka "meko" djeluje na stopalo i petu uzrokujući redistribuciju kontaktnog tlaka povećavajući udobnost i pristalost [21].

Stoga inercijalna i vibraciona izolacija nije više uobičajenog karaktera kao kod zdravog stopala. Konstrukcija donjišta mora u prvom redu osigurati uvjete ravnotežne lokomocije uz maksimalni komfor obuće (minimalnu prenosivost sila na ekstremite). Stoga se donjišta izrađuju od zračnih jastučića, ukrepa i višestojnih dijelova, a u novije vrijeme od inteligentnih materijala. Kontakt se ne može promatrati kao problem mehaničke ravnoteže, već se moraju promatrati granični slojevi na površinama koji izmjenjuju i energiju i tvari. Raspodjela naprezanja i deformacija daje informaciju o koncentraciji naprezanja i kontaktnom tlaku [22].

U praksi se krutost donjišta može promijeniti promjenom njene debljine. Najmekši materijal korišten za donjište nogometne obuće je guma, koja je tipična kod sportske obuće. Površina donjišta natjecateljske sportske obuće najčešće je višeslojno ojačana tvrdim materijalima, kao što su poliuretani i polistiren (slika 5).



Slika 5. Ojačanje donjišta obuće različitim materijalima

Kriteriji izbora materijala ne smiju se samo oslanjati na čvrstoću, već i na fiziološkom modelu. Mnogi fenomeni medicinske prakse dobivaju kvantificirani izražaj te ih je kroz numerički model moguće vrednovati. Udobnost nošenja obuće je direktna posljedica mikroklimatskog stanja u međuprostoru između stopala i obuće i karaktera raspodjele kontaktnog naprezanja i deformacija. Mikroklimatsko stanje na mjestu kontakta stopala i unutarnjeg dijela obuće je veoma složeno za kvantitativnu analizu. Parametri udobnosti sadržaj vlage, temperatura i biokompatibilnost određuju se eksperimentalno. U prvoj aproksimaciji stanje naprezanja i deformacija uzima se kao mjerodavan pokazatelj za konstrukciju obuće [23, 25].

4. Zaključak

Simulacija sportskih aktivnosti kroz procese lokomocije unaprijedila je mnoge sportove. Napredni modeli lokomocije sve su precizniji u modeliranju stopala i njegove interakcije s obućom. Kako je većina sportskih aktivnosti dinamičkog karaktera, to svi simulacijski modeli moraju sadržavati vremensku varijablu, a problemi se odvijaju u relativno kratkom vremenu. Napredni biomehanički modeli stopala moraju računati s kompleksnošću biološke građe stopala, te nedostatnim neuromuskulatomnim modelom lokomocije.

Dinamičko opterećenje, te promatranje problema s velikom deformacijom u budućnosti će dati preciznije odgovore na niz iskustvenih i empirijskih postavljenih konstrukcijskih kriterija. Konstrukcija donjišta sportske obuće mora zadovoljiti stroge biomehaničke i ergonomske kriterije. Upotreba računala je nezaobilazna, kako u fazi projektiranja tako i u fazi same izrade donjišta. Dostignućima konstruktora sportske obuće stvorena je i u upotrebi je sportska obuća za rekreativne svrhe i svakodnevnici. Konstruktivna rješenja donjišta moraju biti kompromis

između inercijske i vibracijske zaštite sportske obuće. Širok spektar biomehaničkih eksperimentalnih ispitivanja i kompleksni rezultati simulacije rezultiraju modernim normama i novim kriterijima konstruiranja. Sigurnosni i zdravstveni aspekti sportske obuće dolaze do izražaja više nego ikada.

[24] Morag, E. and Cavanagh, P. R., Structural and functional predictors of regional peak pressures under the foot during walking, *J. of Biomechanics*, 32 (1999), 359-370

[25] Baksa, S., Baksa, I., Mijović, B.: Primjena 3d skenera u funkciji digitalne antropometrije stopala, *Koža i obuća*, 68, 2 (2019), 20-24.

Literatura

- [1] Kouchi, M., Human Foot Morphology, www.nibh.go.jp, Posjećeno: 2021-03-02
- [2] Timchenko, R. S., Osnovi racionalnovo konstruirivanja kolodok i obući, Leghaja i pisheva promisljenost, Moskva, 1981
- [3] Mustin, G.S.: Theory and practice of Cushion design, US Department of Defense, SVM-2, Washington, D.C., 1968
- [4] Sadeghi, H., et al., Main functional roles of knee flexors/extensors in able-bodied gait using principal component analysis, *Knee*, (2002), 47-53
- [5] Nigg, B.M.: biomechanics of running shoe, *Muman Kinetics Publ. Champaining* (1986), 117-137
- [6] Rethinking the shoe, sports design, International Design conference, Aspen, 1998
- [7] Vasu, M., Mital, A., Evaluation of the validity of anthropometric design assumptions, *Industrial Ergonomics*, 26 (2000), 19-37
- [8] Fendley, A.E. and Marpet, M.I, Required Coefficient of friction versus walking speed: potential influences of footwear and walkaway surfaces, *J of testing and evaluation*, 24 (1996) 6, 359-367
- [9] A. Agić, B. Mijović, Advanced biomechanical model of the human foot, *Proceedings 8th IMECO-TC-13, Dubrovnik*, 1998, 8.49 – 8.52.
- [10] Jacob, H. A. C., Forces acting in the forefoot during normal gait – an estimate, *Clinical Biomechanics*, 16 (2001), 783-792
- [11] Scott, S.H., Winter, D.A., : Biomechanical Model of the Human Foot, Kinematics and Kinetics During the stance Phase of walking, *J. Biomechanics*, 26 (1993) 1091-1104
- [12] Hardle, W., and Simar, L., *Applied Multivariate Statistical Analysis*, MD-Tech, 1999
- [13] Dieter, G.E., *Engenering design: A Materials and approach*, Prentice-Hall, N.Y., 1991
- [14] Cavanagh, P.R., et al : The relationship of Static foot structure to dynamics foot function, *J. of biomechanics*, 30 (1997) 3, 243-250
- [15] Cheng, F. T. and Perng, D. B., A systematic approach for developing a foot size information system for shoe last design, *Industrial Ergonomics*, 25 (2002), 171-185
- [16] Harris, C.M., Crede, C.E.: *The shock and vibration handbook*, McGraw Hill, NY, 1961
- [17] Segerlind, L.: *Applied Finite Element Analysis*, J. Wiley & Sons Inc, NY, 1976
- [18] Australian Design Awards, Shock protection system, 1997
- [19] Shorten, M., SKYDEX, cushioning technologies, 1998
- [20] Valiant, G.A., and Borchers, R.E.: Development of Running Shoe from digitized foot shapes, *Proceedings of the 3th Symposium on Footwear Biomechanics, Tokyo*, 1997, 3-6
- [21] Mijović, B., Lencur, S.: Baropodometrija stopala u odnosu na težinu tijela, *Koža i obuća*, 68, 3 (2019), 22-23.
- [22] S. H. Scott, D. A. Winter, Biomechanical model of the human foot: Kinematics and kinetics during the stance phase of walking, *J. Biomechanics*, 26 (1993), 1091-1104
- [23] Gefen, A., Stress analysis of the standing foot following surgical plantar fascia release, *J. of Biomechanics*, 35 (2002), 629-637