

**MLADEN MEJOVŠEK**

Fakultet za fizičku kulturu Sveučilišta u Zagrebu

Izvorni znanstveni članak

UDC 572.5:519.237.5

Primljeno 6. 3. 1984.

## EVALUACIJA MATEMATIČKOG MODELA LJUDSKOG TIJELA I NJEGOVA PRIMJENA U PREDIKCIJI SEGMENTALNIH PARAMETARA I SVOJSTAVA TIJELA

antropometrijske karakteristike / tjelesne dimenzije / tjelesni dijelovi / matematički model / regresijska analiza / studenti fizičke kulture / testiranje

Model korišten u ovom istraživanju pokazuje zadovoljavajuću preciznost predikcije segmentalnih težina, gustoće i volumena. Analiza razlika u mjerama i parametrima modela utvrdila je da postoje značajne razlike između segmenata desne i lijeve strane tijela. Obzirom na to može se zaključiti da je, u cilju veće točnosti modela, potrebno provesti antropometrijsko mjerenje parnih segmenata na obje strane tijela.

Analiza modela ukazuje na to da je postupak distribucije težine po segmentima definiran Barterovim regresijskim jednadžbama u prosjeku slabije prediktivan od Clauserovog, ali treba također napomenuti da se prvi postupak ponaša stabilnije. Naime, dok Barterov postupak pokazuje dobru konzistentnost u cijelom rasponu distribucije, dotle je Clauserov sklon precjenjivanju težine težih, a potcjenjivanju težine lakših ispitanika. Razumno je zato upotrijebiti oba postupka, odnosno Clauserov, ako se iz bilo kojih razloga treba odlučiti samo za jedan od njih.

### 1. PROBLEM

Simulacija ili analiza gibanja neuromuskuloskeletnog sistema zahtijeva definiciju antropomorfnog statusa subjekta. Segmentalni parametri i svojstva, uz ostale relevantne parametre, čine bazu ulaznih podataka za algoritme simulacije ljudskog kretanja ili procjene kinetičkih i kinematičkih karakteristika sportske ili bilo koje druge lokomocije.

Stoga nije začuđujući već desetljećima prisutan interes i nastojanje velikog broja istraživača da se što preciznije procijene segmentalna masa i gustoća kao i inercijalna svojstva pojedinih segmenata. U tu su svrhu bili korišteni različiti metodološki pristupi, od onih koji se osnivaju na direktnom mjerenju svojstva segmenata rasčlanjenih leševa i računskih procedura temeljenih na tako dobivenim parametrima, pa do cijelog niza različitih, više ili manje pogodnih metoda primijenjenih in vivo (metoda uranjanja segmenata, metode reakcijskih promjena, mono i stereo fotogrametrijske metode, metode zračenja, metode naglog otpuštanja, metode prigušenja oscilacije itd.).

Posebnu kategoriju u postupku procjene segmentalnih parametara i svojstava čine matematički modeli ljudskog tijela, koji danas imaju nesumljivu prednost zbog etičkih, financijskih, aplikativnih i drugih pogodnosti.

Razvoj tih, u početku nazvanih »inertial parameter« modela, započeo je 60-tih godina i bio potaknut ekspanzijom programa istraživanja svemira. Tako su Simsons i Gardner 1960 (po Miller i Nelson 1973) konstruirali model koji je predhodio modelu Kulwickog i Schleia, 1962, a slijedili su sve složeniji modeli koje su predložili Whittset, 1963. i Hanavan, 1963, te Aleshinsky i Zatsiorsky, 1978, Jensen, 1978. i Hatze, 1979. i 1980. godine.

Spomenuti antropomorfnih modeli se razlikuju u pogledu pristupa konstrukciji, broju i postupku oblikovanja segmenata, broju i načinu kolekcije zahtijevanih antropometrijskih ulaza, itd. Stoga je izbor modela vrlo delikatan postupak, koji ovisi o nizu okolnosti definiranih ciljevima istraživanja, kao i o mogućnostima njihove realizacije.

Obzirom na to da se biomehanička analiza djelomično temelji na osnovnim segmentalnim parametrima i da se u daljnjem postupku na njihovim vrijednostima određuju inercijalna svojstva (momenti i produkti, glavne osi, itd.), važno je konstatirati da loše procijenjeni segmentalni parametri unose nepopravljive greške u daljnu simulaciju modela.

Zbog toga se osnovnim ciljem ovog istraživanja može smatrati utvrđivanje pouzdanosti predikcije segmentalnih parametara na osnovi relevantnog antropometrijskog skupa. U tu svrhu korišten je model koji koristi Hanavanovu reprezentaciju segmentalnih oblika, a konstrukcija modela i provođenje istraživanja bilo je usmjereno sljedećim hipotezama:

- moguće je konstruirati model ljudskog tijela koji može reproducirati ukupnu tjelesnu težinu u granicama od  $\pm 0,5$  kg;
- za simetrične segmente pretpostavlja se bitna razlika lijeve i desne strane.

### 2. METODE

Istraživanje je provedeno 1983. godine, a uzorak se sastojao od 68 studenata Fakulteta za fizičku kulturu Sveučilišta u Zagrebu, redovno upisanih u II godinu studija. Dob ispitanika obuhvaćenih uzorkom bila je u rasponu od 20 do 26 godina. Svi ispitanici su na dan provedbe mjere-

nja bili bez akutnih deformacija tijela (oteklina i sl.), koje bi bitnije uzrokovala promjene u konfiguraciji modela.

Uzorak mjernih instrumenata sastojao se od skupa neophodnih antropometrijskih mjera, na osnovi kojih je bilo moguće, za svakog ispitanika, izvršiti konstrukciju modela i simulaciju specifičnih oblika, parametara i svojstava segmenata, kao i cijelog tijela. Od 30 različitih antropometrijskih mjera, 19 ih je mjereno s obje strane tijela, tako da je stvarni broj mjera u uzorku iznosio ukupno 49. Sve su mjere tri puta uzastopno mjerene standardnim antropometrijskim priborom, s točnošću od 0.001 m kod upotrebe antropometra, pelvimetra, kliznog šestara, mjerne trake i kalipera, te 0.1 kg kod upotrebe medicinske vage.

Uzorak je sadržavao slijedeće mjere:

	D	L
1. VTJE visina tijela	(.99)	
2. VRAM visina ramena	(.97)	(.97)
3. VSUB visina substernale	(.90)	
4. VSJE visina sjedeća	(.98)	
5. VTRO visina trohantera	(.96)	(.96)
6. VTIB visina tibiale	(.97)	(.99)
7. VSPH visina sphyrion	(.98)	(.99)
8. DZNDL dužina nadlaktice	(.95)	(.96)
9. DZPDL dužina podlaktice	(.97)	(.98)
10. DZSTO dužina stopala	(.99)	(.90)
11. SGRK širina grudnog koša	(.98)	
12. STRB širina trbuha	(.98)	
13. SKUK širina kukova	(.91)	
14. SRZG širina ručnog zgloba	(.97)	(.99)
15. SŠAK širina šake	(.99)	(.99)
16. OGLA opseg glave	(.98)	
17. ONDL opseg nadlaktice	(.99)	(.98)
18. OLAK opseg lakta	(.99)	(.98)
19. OPDL opseg podlaktice	(.95)	(.98)
20. ORZG opseg ručnog zgloba	(.99)	(.99)
21. OŠAK opseg šake	(.97)	(.99)
22. ONTK opseg natkoljenice	(.97)	(.99)
23. OKOL opseg koljena	(.98)	(.97)
24. OPTK opseg potkoljenice	(.95)	(.97)
25. OSZGG opseg skočnog zgloba	(.98)	(.99)
26. NSIC nabor suprailiocristale	(.99)	
27. DUGRK dubina grudnog koša	(.98)	
28. DUTRB dubina trbuha	(.98)	
29. DUGLR dubina glutealne regije	(.93)	(.98)
30. TTJE težina tijela	(.91)	

(Napomena: uz nazive i pripadajuće kratice antropometrijskih mjera u zagradama se nalaze vrijednosti pouzdanosti pojedine mjere. Dva broja označuju simetrične mjere, a prvi se odnosi na desnu stranu).

Model korišten u ovom istraživanju nužno polazi od nekoliko pretpostavki s kojima gubi na preciznosti, ali zato dobiva na jednostavnosti aplikacije i zahtijeva manji broj varijabli potrebnog ulaznog antropometrijskog skupa.

Pretpostavke su slijedeće:

- segmenti tijela mogu se modelirati kao geometrijska tijela jednostavnog oblika,
- pojedini segmenti su uniformne gustoće,

- regresijske jednadžbe Bartera i Clausera zadovoljavajuće raspodjeljuju težinu po segmentima, te
- segmenti udova se gibaju oko fiksnih točaka, kada mijenjaju međusobne odnose u položajima.

Navedene pretpostavke generiraju greške modela, koje se najviše manifestiraju u inercijalnim svojstvima (momenti i produkti inercije, glavni momenti inercije, a s time u vezi i orijentacija glavnih osi), procjeni gornjeg i donjeg dijela trupa, te procjeni glave zajedno s vratom. Posljednja pretpostavka, kao najveća idealizacija modela, može zadovoljiti samo zahtjeve simulacije jednostavnih poza, ako se ne izvrši dodatna modifikacija modela. Model, kao i gotovo svi drugi modeli takvog tipa, ne računa asimetrični smještaj unutrašnjih organa, deformaciju tkiva u promjeni položaja, preraspodjelu krvi, itd.

Model se djelomično oslanja na regresijske jednadžbe Bartera 1957. temeljene u pogledu distribucije težine glave i vrata na metodi rasčlanjivanja koju je koristio Dampster 1955, pa je zato konstruiran kao petnaestosegmentalni model.

Segmenti modela su:

1. glava (VGLA)
2. gornji dio trupa (STRU)
3. donji dio trupa (ITRU)
4. desna šaka (DSAK)
5. lijeva šaka (LSAK)
6. desna nadlaktica (DNDL)
7. lijeva nadlaktica (LNDL)
8. desna podlaktica (DPDL)
9. lijeva podlaktica (LPDL)
10. desna natkoljenica (DNTK)
11. lijeva natkoljenica (LNTK)
12. desna potkoljenica (DPTK)
13. lijeva potkoljenica (LTPK)
14. desno stopalo (DSTO)
15. lijevo stopalo (LSTO).

Oblikovanje segmenata modela, kao i određivanje njihovih parametara i svojstava, omogućeno je ulaznim antropometrijskim podacima, tj. baterijom od 30 mjera, od kojih se 19 simetričnih uzima s desne i lijeve strane tijela, kako bi se povećala točnost modela. Osim za oblikovanje segmenata modela dio ulaznih varijabli služi za distribuciju težine pomoću regresijskih jednadžbi Clausera i sur., 1969.

Modeliranje segmentalnih oblika, parametara i svojstava izvodi se pomoću standardnih izraza stereometrije i dinamike krutih tijela. Od navedenih petnaest segmenata, glava zajedno s vratom dizajnira se kao pravilni elipsoid, gornji i donji dio trupa kao valjak eliptične baze, šake kao kugle, a svi preostali segmenti kao krnji stošci.

U svrhu provjere postavljenih hipoteza i u skladu sa ciljem rada provedene su slijedeće obrade podataka;

- 1) analiza pouzdanosti i valjanosti mjera na osnovu kojih su izračunati parametri segmenata modela;
- 2) izračunavanje parametara modela po segmentima; dužina (SL), većih (R) i manjih (RR) radiusa geometrijskih oblika koji reprezentiraju segmente;

3) izračunavanje segmentalnih težina (ST), segmentalnih gustoća (DL) i segmentalnih volumena (VT), i, na temelju toga, procjena težine i određivanje pogrešaka te procjene u odnosu na izmjerenu težinu (Mejovšek, Pavičić i Štalec 1983);

4) statistika mjera i parametara modela;

5) analiza varijance i diskriminativna analiza parametara modela, obzirom na simetriju tijela.

### 3. REZULTATI

Sve antropometrijske mjere imaju visoku pouzdanost, a njihove veličine su date u prethodnom tekstu uz naziv svake mjere. Nešto nižu, ali još uvijek dosta visoku pouzdanost imaju mjere visine substernale (VSUB), dužine lijevog stopala (LDUSTO), širine kukova (SKUK) i težine tijela (TTJE).

Manja pouzdanost mjere visine substernale (VSUB) može se obrazložiti velikom raznolikošću oblika ksifoidnog nastavka, pa tako i težom identifikacijom točke do koje treba izvršiti mjerenje. Slično vrijedi i za mjeru širine kukova (SKUK), za koju je kod dijela ispitanika bilo teže odrediti poziciju trochanteriona.

Tabela 1. prikazuje statistike osnovnih antropometrijskih mjera, kojima se oblikuje model i procjenjuju svojstva.

U svrhu procjene doprinosa preciznosti modela antropometrijske mjere su uzimane s desne i lijeve strane i to sve one kojima se mogu definirati osnovni parametri parnih segmenata. Ovakav pristup oblikovanju modela, koliko je poznato autoru, bio je učinjen samo u radu Mejovšek, Pavičić, Štalec i Ivančević, 1983, u kojem su testirane razlike između antropometrijskih mjera i dobivene značajne razlike između desne i lijeve strane tijela. U ovom radu također je izvršen test razlika, ali na parametrima modela i ponovo je dobivena značajna disproporcija desne i lijeve strane tijela. Naime, multivarijatni F test za zavisne uzorke pokazuje značajne razlike u parametrima desne i lijeve strane.

U tabelama 2, 3 i 4 prikazane su vrijednosti univarijantnih F testova koje, kao i struktura diskriminativne funkcije, ukazuju na to da su opsezi, kao i na temelju njih, dobiveni radiusi, na desnoj ruci veći, što se može objasniti većom aktivnošću dominantne ruke (94% ispitanika pokazivalo je dominaciju desne ruke).

S druge strane, veći parametri natkoljenice iste strane iznenađuju, s obzirom na pretpostavku da dešnjacima lijeva noga služi za odraz, oslonac i sl.

Prema rezultatima vidljivim u tabelama 2, 3 i 4 proizlazi da između desne i lijeve strane tijela postoji značajna razlika, a time se potvrđuje druga hipoteza ovog istraživanja.

Najkritičnija točka modeliranja je distribucija težine po segmenatima, pa je zbog toga tom problemu posvećena posebna pažnja. Za model su u tu svrhu korištene regresijske jednadžbe i Bartera i Clausera.

Clauserove jednadžbe omogućuju određivanje težine segmenata posebno za desnu i za lijevu stranu, što je prikazano u tabeli 5. U toj su tabeli prikazane također razlike u procjeni segmentalnih težina Barterovim, odnosno Clauserovim postupkom, koje je najbolje usporediti s podacima koji su dobiveni sekcijom leševa, bez obzira na nedostatke i ovih metoda.

Konačnu ocjenu za upotrebu jednog od postupaka distribucije težine najbolje je dati na osnovi izmjerene težine tijela.

Na temelju osnovnih parametara segmenata, dužina (SL), većih (R) i manjih (RR) radiusa izračunati su volumeni svakog segmenta, sumirani za svakog ispitanika, a njihove statistike prikazane su u tabeli 6. Statistike procjena ukupnog volumena dobivene su na osnovi mjerenja desne i lijeve, samo desne i samo lijeve strane tijela.

Tabela 7 prikazuje procjenu segmentalnih gustoća kao odnos procijenjene težine i procijenjenog volumena segmenata. Tako dobiveni podaci o segmentalnoj gustoći mogu se komparirati s podacima koji su dobiveni sekcijom leševa (Dempster 1955 i Clauser i sur. 1969), metodom reakcijskih promjena (Drillis i Contini, 1966) ili modelom Hanavan (Miller i Morrison, 1975).

Usporedbom s navedenim eksperimentalnim radovima može se ocijeniti da je podudarnost procjene gustoće za neparne segmente vrlo dobra obzirom na sve metode. Nešto veće odudaranje naših procjena od procjena gustoće segmenata glave može se pripisati različitom modeliranju ovog segmenta. Parni segmenti pokazuju prilično veliki stupanj podudaranja, a posebno s podacima Dempstera, kao i onima dobivenima modelom Hanavan, i s upotrebom Clauserovih jednadžbi.

Kod stopala uočena je velika disproporcija gustoće u odnosu na Hanavanov model. Ove, relativno velike razlike mogu biti posljedica različitog postupka mjerenja visine stopala. Međutim, treba uočiti da su dobiveni rezultati u relativno dobroj podudarnosti s eksperimentalnim metodama.

Za Barterov se pristup može konstatirati da sistematski griješi u smislu procjenjivanja gustoće segmenata podlaktice.

S obzirom na nemogućnost određivanja segmentalnih parametara direktno na živim ispitanicima, procjena točnosti modela implicira točnost procjene volumena i raspodjele težine. Zbog toga je mjera ukupne težine jedini egzaktan kriterij točnosti modela.

Pregledom tabele 8 može se utvrditi da su oba postupka procjenjivanja težine dobra, tj. da Barterov postupak u prosjeku griješi za 1,18 kg, a Clauserov za .38 kg, pa se time može smatrati da je i prva hipoteza potvrđena.

Tabela 1 — STATISTIKA ANTROPOMETRIJSKIH MJERA

	$\bar{X}$	$D\bar{X}$	s	MIN	MAX
NSIC	4.68	.32	1.36	2.85	10.35
VTJE	178.59	1.43	6.02	166.77	194.44
VSJE*	196.69	.73	3.05	188.97	204.29
VSUB	126.76	1.21	5.10	115.37	141.14
SKUK	32.69	.31	1.32	29.79	35.68
DUGRK	21.03	.38	1.61	16.52	24.54
SGRK	34.14	.47	1.99	28.96	38.50
DUTRB	18.27	.28	1.16	15.80	22.08
STRB	28.44	.32	1.36	24.88	31.93
OGLA	56.98	.35	1.47	53.65	59.82
VRAMD	145.82	1.44	6.07	133.72	160.45
VRAML	146.31	1.39	5.83	134.68	161.26
VTROD	92.63	1.36	5.73	80.92	108.08
VTROL	92.83	1.34	5.63	82.05	107.93
VTIBD	33.78	.61	2.59	39.34	52.70
VTIBL	33.70	.62	2.59	39.19	52.70
VSPHD**	8.19	.11	.46	7.18	9.62
VSPHL**	8.16	.11	.47	6.89	9.17
DUGLRD	20.27	.30	1.27	17.27	23.39
DUGLRL	20.17	.28	1.18	16.84	23.44
DZNDLD	32.20	.46	1.94	28.08	37.16
DZNDLL	32.31	.47	1.98	27.66	37.04
DZPDLD	24.68	.47	1.96	20.79	28.61
DZPDLL	24.61	.44	1.84	20.53	28.21
DZSTOR	26.62	.31	1.32	23.08	30.03
DZSTOL	26.55	.32	1.33	22.96	30.16
SRZGD	6.04	.07	.31	5.15	6.66
SRZGL	6.02	.07	.29	5.19	6.64
SSAKD	8.66	.09	.39	7.79	9.44
SSAKL	8.54	.09	.37	7.77	9.23
OSZGH	26.98	.28	1.17	24.55	29.70
OSZGL	27.16	.28	1.20	24.83	29.40
OPTKD	37.76	.51	2.13	32.32	43.36
OPTKL	37.61	.47	1.98	32.46	41.93
OKOLD	38.19	.37	1.54	35.13	41.99
OKOLL	38.08	.39	1.64	34.55	42.18
ONTKD	55.69	.66	2.79	50.77	62.02
ONTKL	55.24	.61	2.59	49.58	61.17
ONDL	31.29	.40	1.67	27.11	35.20
ONDLL	30.84	.38	1.60	26.53	34.23
OLAKD	26.63	.25	1.07	23.14	29.19
OLAKL	26.49	.26	1.09	23.56	29.64
OPDL	27.36	.28	1.19	24.35	29.59
OPDLL	26.88	.28	1.17	23.78	28.98
ORZGD	17.59	.18	.76	16.07	19.30
ORZGL	17.46	.17	.72	15.91	19.12
OSAKD	28.80	.35	1.45	26.08	33.44
OSAKL	28.36	.35	1.47	25.84	32.33

\* Zbog nedostatka mjernog instrumenta stvarne vrijednosti te mjere su umanjene za konstantu 104.0

\*\* Zbog nedostatka mjernog instrumenta stvarne vrijednosti te mjere su umanjene za konstantu 1.0

Tabela 2 — STATISTIKE DUŽINA (SL) SEGMENTA

	$\bar{X}$	$D\bar{X}$	s	MIN	MAX	
VGLA	32.68	.45	1.90	23.05	36.57	
STRU	19.15	.62	2.61	13.03	25.78	
ITRU	40.86	.62	2.61	34.98	46.66	
NDL F = 1.33	D	32.19	.46	1.93	28.08	37.16
CDF = .11	L	32.31	.47	1.98	27.66	37.04
	DIF	.12	.20	.84	-1.92	3.20
PDL F = .86	D	24.68	.46	1.96	20.79	28.61
CDF = -.09	L	24.61	.44	1.84	20.53	28.21
	DIF	-.07	.14	.58	-2.09	1.47
SAK F = 18.78*	D	9.17	.11	.46	8.30	10.64
CDF = -.41	L	9.03	.11	.47	8.23	10.29
	DIF	-.14	.06	.27	-.78	.53
NTK F = 1.50	D	41.12	.73	3.07	35.04	48.84
CDF = .11	L	41.20	.72	3.04	35.00	48.84
	DIF	.08	.12	.52	-1.24	1.65
PTK F = .46	D	37.38	.59	2.48	32.08	44.75
CDF = -.06	L	37.34	.57	2.41	31.99	44.52
	DIF	-.05	.13	.57	-1.86	1.03
STO F = 5.36*	D	26.62	.31	1.31	23.08	30.03
CDF = -.22	L	26.55	.31	1.33	22.96	30.16
	DIF	-.07	.06	.26	-.65	.64

$DF_1 = 1$

$DF_2 = 67$

F vrijednost F testa

CDF korelacija s diskriminativnom funkcijom

D desna strana

L lijeva strana

DIF razlika D-L

\* značajno na nivou 0.01

Tabela 3 — STATISTIKE VEĆIH RADIUSA (R) SEGMENTA

	$\bar{X}$	$D\bar{X}$	s	MIN	MAX	
STRU	17.07	.24	.99	14.48	19.25	
ITRU	16.35	.16	.66	14.90	17.84	
NDL F = 17.78*	D	4.98	.06	.26	4.31	5.60
CDF = -.40	L	4.91	.06	.25	4.22	5.45
	DIF	-.07	.03	.14	-.53	.32
NTK F = 17.65*	D	8.86	.10	.44	8.08	9.87
CDF = .39	L	8.79	.10	.41	7.89	9.74
	DIF	-.07	.03	.14	-.53	.22
STO F = .99	D	3.69	.05	.23	3.19	4.41
CDF = -.09	L	3.68	.06	.24	3.05	4.19
	DIF	-.01	.03	.12	-.31	.25

F vrijednost F testa

CDF korelacija s diskriminativnom funkcijom

D desna strana

L lijeva strana

DIF razlika D-L

\* značajno na nivou 0.01

Tabela 4 — STATISTIKE MANJIH RADIUSA (RR) SEGMENTATA

		$\bar{X}$	D $\bar{X}$	s	MIN	MAX
VGČA		9.07	.06	.23	8.54	9.52
STRU		9.82	.13	.54	8.47	10.86
ITRU		12.15	.15	.64	10.66	13.77
NDL F = 4.72	D	4.24	.04	.17	3.68	4.65
CDF = —.20	L	4.22	.04	.17	3.75	4.72
	DIF	—0.02	.02	.08	—0.24	.20
PDL F = 13.33*	D	2.80	.03	.12	2.56	3.07
CDF = —.34	L	2.78	.03	.11	2.53	3.04
	DIF	—0.02	.01	.05	—0.13	.16
PTK F = 4.95	D	4.29	.04	.19	3.91	4.73
CDF = .21	L	4.32	.04	.19	3.95	4.68
	DIF	.03	.02	.10	—0.28	.30
NTK F = 1.98	D	6.07	.06	.24	5.59	6.68
CDF = —.13	L	6.06	.06	.26	5.50	6.71
	DIF	—0.02	.02	.10	—0.24	.40
STO F = 1.02	D	2.38	.03	.15	2.06	2.84
CDF = —.09	L	2.37	.04	.15	1.96	2.70

DF<sub>1</sub> = 1DF<sub>2</sub> = 67

F vrijednost F testa

CDF korelacija sa diskriminativnom funkcijom

D desna strana

L lijeva strana

DIF razlika D—L

\* značajno na nivou 0.01

Tabela 5 — STATISTIKE PROCJENE SEGMENTALNIH TEŽINA

		$\bar{X}$	D $\bar{X}$	s	MIN	MAX
VGLA	B	5.85	.12	.51	4.85	6.88
	C	4.85	.05	.20	4.41	5.28
STRU	B	9.11	.33	1.40	6.27	12.46
	C	9.52	.39	1.64	6.20	13.14
ITRU	B	25.28	.51	2.17	17.73	31.13
	C	26.38	.65	2.72	20.09	33.07
NDL	B	2.30	.06	.26	1.80	2.83
	C <sub>D</sub>	1.91	.05	.23	1.38	2.44
	C <sub>L</sub>	1.87	.05	.22	1.27	2.36
PDL	B	1.37	.03	.13	1.11	1.63
	C <sub>D</sub>	1.20	.03	.11	.95	1.42
	C <sub>L</sub>	1.16	.03	.11	.91	1.39
SAK	B	.53	.01	.03	.47	.59
	C <sub>D</sub>	.48	.01	.05	.36	.59
	C <sub>L</sub>	.48	.01	.05	.36	.59
NTK	B	7.39	.14	.58	6.25	8.57
	C <sub>D</sub>	8.24	.19	.79	6.67	10.00
	C <sub>L</sub>	8.18	.18	.77	6.53	9.89
PTK	B	3.64	.08	.35	2.94	4.36
	C <sub>D</sub>	3.99	.09	.36	3.16	4.70
	C <sub>L</sub>	3.99	.08	.35	3.14	4.81

STO	B	1.08	.02	.06	.95	1.21
	C <sub>D</sub>	.72	.02	.07	.57	.88
	C <sub>L</sub>	.73	.02	.07	.58	.86

B — prema Barteru

C — prema Clauseru

C<sub>D</sub> — prema Clauseru desnoC<sub>L</sub> — prema Clauseru lijevo

Tabela 6 — STATISTIKE VOLUMENA TIJELA IZRAČUNATIH NA OSNOVU MODELA

	$\bar{X}$	D $\bar{X}$	s	MIN	MAX
D—L	70.43	1.48	6.21	58.98	82.33
D	70.47	1.51	6.35	58.83	82.43
L	70.37	1.45	6.10	58.83	82.56

D = desno

L = lijevo

D—L = desno—lijevo

Tabela 7 — STATISTIKE PROCJENA SEGMENTALNIH GUSTOĆA

		$\bar{X}$	D $\bar{X}$	s	MIN	MAX
VGLA	B	1.04	.02	.11	.86	1.36
	C	.86	.01	.06	.75	1.20
STRU	B	.90	.01	.05	.81	1.02
	C	.94	.01	.04	.86	1.04
ITRU	B	.99	.01	.05	.89	1.12
	C	1.03	.01	.04	.95	1.14
NDL	B <sub>D</sub>	1.07	.02	.08	.89	1.26
	B <sub>L</sub>	1.09	.02	.09	.92	1.35
	C <sub>D</sub>	.88	.01	.02	.83	.94
	C <sub>L</sub>	.88	.01	.02	.80	.94
PDL	B <sub>D</sub>	1.41	.03	.13	1.19	1.73
	B <sub>L</sub>	1.43	.03	.11	1.22	1.83
	C <sub>D</sub>	1.23	.03	.11	1.03	1.47
	C <sub>L</sub>	1.22	.02	.10	1.01	1.43
SAK	B <sub>D</sub>	1.32	.04	.16	.94	1.87
	B <sub>L</sub>	1.39	.04	.17	.95	1.75
	C <sub>D</sub>	1.21	.03	.12	.90	1.48
	C <sub>L</sub>	1.25	.03	.13	.94	1.49
NTK	B <sub>D</sub>	1.02	.02	.08	.87	1.20
	B <sub>L</sub>	1.03	.02	.08	.86	1.24
	C <sub>D</sub>	1.13	.02	.08	.96	1.37
	C <sub>L</sub>	1.14	.02	.09	.95	1.41
PTK	B <sub>D</sub>	1.14	.02	.06	.99	1.26
	B <sub>L</sub>	1.14	.02	.07	.96	1.32
	C <sub>D</sub>	1.25	.02	.07	1.07	1.40
	C <sub>L</sub>	1.25	.02	.07	1.09	1.39
STO	B <sub>D</sub>	1.40	.04	.19	.92	1.92
	B <sub>L</sub>	1.41	.05	.20	1.02	2.32
	C <sub>D</sub>	.93	.03	.13	.64	1.29
	C <sub>L</sub>	.95	.03	.13	.74	1.55

B — prema Barteru

C — prema Clauseru

D — desno

L — lijevo

Tabela 8 — STATISTIČKE PROCJENE TEŽINE TIJELA I GREŠKE PROCJENE NA OŠNOVU MODELA

	X	DX	s	MIN	MAX
Mjereno	74.05	1.53	6.42	61.34	87.15
Barter Procjena	75.22	1.66	7.00	61.37	89.50
Greška	1.18	.14	.58	.03	2.35
Clouser					
Procjena (D)	74.43	1.57	6.59	61.19	89.21
Greška (D)	.38	.35	1.45	—3.40	5.17
Procjena (L)	74.36	1.67	7.02	55.70	89.76
Greška (L)	.31	.40	1.66	—6.18	5.72
Procjena (D—L)	74.39	1.61	6.78	59.70	89.49
Greška (D—L)	.34	.34	1.45	—2.63	5.45

D desno

L lijevo

D—L desno—lijevo

#### 4. ZAKLJUČAK

Istraživanjem se pokušalo evaluirati, jednom od niza mogućnosti, antropomorfnu model ljudskog tijela, s posebnim cilje testiranja pouzdanosti predikcije segmentalnih parametara i svojstava. Cilj je bio definiran slijedećim hipotezama:

— moguće je konstruirati model ljudskog tijela, koji može reproducirati ukupnu tjelesnu masu u granicama od  $\pm 0,5$  kg;

— za simetrične segmente se pretpostavlja bitna razlika lijeve i desne strane.

U tu svrhu je konstruiran petnaestsegmentalni model ljudskog tijela, koji je u aplikaciji prilagođen za upotrebu različitih regresijskih jednadžbi distribucije težine, a čiji se segmenti modeliraju uobičajenim postupcima stereometrije.

Oblikovanje segmenata modela bilo je omogućeno na osnovi skupa od 49 antropometrijskih mjera, od kojih je 19 bilo mjereno s obje strane tijela kako bi se testirale razlike u mjerama i parametrima parnih segmenata tijela. Svaka mjera uzimana je tri puta, na uzorku od 68 studenata Fakulteta za fizičku kulturu Sveučilišta u Zagrebu.

Analiza dobivenih rezultata ukazuje na zadovoljavajući nivo preciznosti predikcije segmentalnih masa, gustoće i volumena, kao i na to da postoje značajne razlike u odnosu na simetriju i tijela i modela. Naime, analiza razlika nedvojbeno potvrđuje hipotezu o značajnoj diferenciji lijeve i desne strane kako na mjerama tijela, tako i na parametrima segmenata modela.

Distribucija mase po segmentima definirana Barterovim regresijskim postupkom (srednja pogreška 1,18 kg) u prosjeku je manje prediktivna od Clouserovog (srednja pogreška 0,38 kg), mada se ne smije izgubiti iz vida da je Barterov postupak konzistentan u cijelom rasponu distribucije, dok je Clouserov sklon precjenjivanju mase težih, a potcjenjivanju mase lakših ispitanika.

Korišteni je model, u smislu dizajna segmenata, relativno skroman, ali s druge strane omogućuje jednostavnost i brzu kolekciju ulaznih varijabli, što je svakako prednost u laboratorijskoj aplikaciji. Model je uz male adaptacije sposoban oblikovati segmente složenijeg oblika, ukoliko istraživanje zahtijeva veću kongruenciju s oblicima tijela.

Zbog dobre procjene segmentalnih masa, gustoća i volumena na temelju izračunatih parametara model se može smatrati zadovoljavajućim instrumentom u biomehaničkim i, uopće, u kineziološkim istraživanjima.

#### 5. LITERATURA

1. Aleshinsky, S.Y. i V. M. Zatsiorsky: Human locomotion in space analysed biomechanically through a multi-link chain model. *Journal of Biomechanics*, 11, 101—108, 1978.
2. Barter, J.T.: Estimation of the mass of body segments. WADC Technical Report, 57—280, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1957.
3. Clouser, C.E., J.T. McConville, i J.W. Young: Weight, volume and centre of mass of segments of the human body. ARML-TR-69-70, Wright Patterson AFB, Ohio, 1969.
4. Dempster, W.T.: Space requirements of the seated operator WADC Technical Report 55—159, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1955.
5. Drillis, R., i R. Contini: Body segment parameters. Technical Report 1166.03, School of Engineering and Science, New York University, 1966.
6. Hanavan, E.P. Jr.: A mathematical model of the human body. AMRL Technical Report, 64—102, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1964.
7. Hatze, H.: A model for the computational determination of parameter values of anthropomorphic segments. CSIR Technical Report TWISK 79, Pretoria, 1979.
8. Hatze, H.: A mathematical model for the computational determination of parameter values of anthropomorphic segments. *Journal of Biomechanics*, 13, 833—843, 1980.
9. Jensen, R.K.: Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method, *Journal of Biomechanics*, 11, 349—358, 1978.
10. Kulwicki, P.V. i E.J. Schlei: Weightless man: self rotation techniques. AMRL-TDR-62-129. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1962.
11. Mejovšek, M., L. Pavčić, J. Štalec i Klara Ivančević: Prediction of inertial properties of human body. *International Sports Dialogue*, Dubrovnik, 1983.
12. Mejovšek, M., L. Pavčić, i J. Štalec: Hanavanov humanoidni biomehanički model na električnom računalu. 5. međunarodni simpozij »Kompjuter na Sveučilištu«, 695—699, Cavtat, 1983.
13. Miller, D.I. i W.E. Morrison: Prediction of segmental parameters using the Hanavan body model. *Medicine and Science in Sports*, 7, 207—212, 1975.
14. Miller, D.I. i R.C. Nelson: *Biomechanics of Sport*. Lea and Febiger, Philadelphia, 1973.
15. Whitsett, E.C.: Some dynamic response characteristics of weightless man. AMRL-TDR-63-18, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1963.

M. Mejovšek

UDC 572.5 : 519.237.5

## AN EVALUATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE HUMAN BODY AND ITS APPLICATION IN PREDICTING THE SEGMENTAL PARAMETERS AND FEATURES OF THE BODY

anthropometric characteristics / body dimensions / body parts / mathematical model / regression analysis / physical education students / testing

This research was completed as one of a number of possibilities for evaluation of anthropomorphic models with the aim to validate the model by testing the reliability of prediction of segmental parameters and features. The aim was defined by these hypotheses:

- it is possible to construct a model of the human body which can reproduce the total body mass within the limits of  $\pm 0.5$  kg;
- a significant difference is assumed for symmetrical segments of the left and right side of the body.

For this purpose a 15-segment model was constructed, adapted for use of various regression equations for weight distribution, whose segments are modeled through the usual stereometric procedures.

It was possible to form the segments of the model on the basis of a group of 49 anthropometric measures, 19 of which were taken on both sides of the body in order to test the differences in measurements and parameters of the segments. Each measure was taken three times one after another, on a sample of 68 students of the Faculty for Physical Culture, University of Zagreb.

The analysis of the obtained results indicates a satisfactory level of prediction of segmental masses, density and volume. It also indicates that there are significant differences as to the symmetry of the body and the model. Namely, the analysis of the differences undoubtedly confirms the hypothesis about the difference of the left and the right side, both in measures of the body and on the parameters of the segments of the model.

Distribution of mass by segments as defined by Barter's regression procedure (average error 1.18 kg) is on the average less predictive than Clouser's (average error 0.38 kg) even though it must not be overlooked that Barter's procedure is consistent within the whole range of distribution, while Clouser's procedure tends to overestimate the mass of the heavier and underestimate the mass of the lighter subjects.

The utilized model is, with respect to design of the segments, relatively modest but, on the other hand, it ensures a simple and quick collection of input variables which is definitely an advantage in laboratory application. The model is, with smaller adaptations, capable of forming segments of more complex shape if the research requires a greater congruence with the shapes of the body.

With good assessment of segmental masses, densities and volumes on the basis of calculated parameters, the model may be considered a satisfactory instrument in biomechanic and other kinesiological research.

Младен Мейовшек

## ОЦЕНКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОТДЕЛЬНЫХ СЕГМЕНТОВ И СВОЙСТВ ТЕЛА

В исследовании получена одна из возможных оценок антропоморфических моделей с целью определения ценности модели на основе испытания достоверности предсказания параметров и свойств тела. В работе поставлены следующие гипотезы:

- возможно построить модель тела человека, которая позволяет репродуцировать массу тела в пределах  $\pm 0,5$  кг.
- можно предположить, что симметричные сегменты имеют различия в измерениях и параметрах.

С этой целью построена модель, состоящая из пятнадцати сегментов. Модель приспособлена для применения различных регрессионных распределений веса, при чем сегменты моделированы принятыми методами стереометрии.

Построение сегментов модели проведено на основе 49 антропометрических измерений, из которых 19 отнеслось к обеим сторонам тела, так как было необходимо установить разницу в измерениях и параметрах сегментов. Каждое из приведенных измерений определялось три раза под ряд в выборке, состоящей из 68 студентов Факультета физической культуры Загребского университета.

Анализ полученных результатов указывает на удовлетворительную точность предсказания массы сегментов, плотности и объема, а также на разницу между симметричными сегментами тела и модели. Анализ несомненно подтверждает гипотезу о достоверной разнице левой и правой сторонах измерений тел и параметров сегментов тела.

Распределение массы по сегментам, определенное при помощи регрессионного приема Бартера (ошибка в среднем 1,18 кг), предсказывается менее надежно, чем при помощи приема Клоусера (ошибка в среднем 0,38 кг), хотя надо иметь в виду, что прием Бартера консистентный для всего диапазона распределения, в то время как при помощи приема Клоусера переоцениваются массы более тяжелых, а недооцениваются массы более легких испытуемых.

Использованная модель является относительно скромной, но в то же время она позволяет простой и быстрый выбор входных переменных, что представляет преимущество в лабораторных условиях. При помощи небольших изменений модели можно построить более сложные сегменты, если в исследовании требуется более полное соответствие формам тела.

Так-как при помощи модели получается хорошая оценка массы сегментов, плотности и объемов на основе вычисленных параметров, настоящую модель можно считать удовлетворительным инструментом в биомеханических и вообще кинезиологических исследованиях.

