

# STAIGIOSIOS JĖGOS POVEIKIS ŠOKLUMUI: EKSPERIMENTŲ ANALIZĖ IR SKAITINIS MODELIAVIMAS

Kazimieras Muckus<sup>1</sup>, Radvilė Krušinskienė<sup>1,2</sup>

Lietuvos kūno kultūros akademija<sup>1</sup>, Kauno technologijos universitetas<sup>2</sup>, Kaunas, Lietuva

**Kazimieras Muckus.** Habilituotas daktaras. Lietuvos kūno kultūros akademijos Taikomosios fiziologijos ir kineziterapijos katedros profesorius. Mokslinių tyrimų kryptis — biomechaninių sistemų kūrimas ir tobulinimas.

## SANTRAUKA

Tyrimo tikslas — suprasti, nuo kokių dydžių — staigosios ar vidutinės atsispyrimo jėgos — priklauso šuolio aukštis, atsispyrimo trukmė ir santykinė šuolio galia. Tyrimo rezultatais siekėme paneigti nuomonę, kad šoklumą pakanka matuoti tik šuolio aukščiu ir kad šuolio aukštį lemia staigioji jėga. Ištirta 14 Lietuvos rankinio jaunių rinktinės narių. Tiriamieji ant jėgos plokštės atliko po tris šuolius be amortizuojamojo pritūpimo, kelius sulenkdami  $90^\circ$  kampu. Vertinome atsispyrimo trukmę  $t_{at}$ , greitį atitrūkimo nuo atramos momentu  $v_{ab}$ , kūno masės centro (MC) maksimalų pakilimą nuo pradinės padėties,  $h_{max}$ , vidutinę santykinę atsispyrimo jėgą,  $F_{vid}^{sant}$ , santykinę staigiąją jėgą  $R^{sant}$  ir santykinę šuolio galią  $P^{sant}$ . Vertikalūs šuolis modeliuotas kaip taškinės masės vienmatis judėjimas, paveiktas kūno sukuriamos jėgos. Skaitinių eksperimentų metu panaudotos dviejų tipų jėgos kreivės: 1) atsispyrimo metu kūno sukuriama vertikali jėga visą laiką didėja ( $R^{sant} = const.$ ); 2) atsispyrimo jėga per trumpą laiką staigiai padidėja, paskui išlieka pastovi, kol kūno MC atitrūksta nuo atramos plokštumos. Pastarasis atvejis modeliuoja tokią kūno sukuriamą atsispyrimo jėgos kaitą, kokia yra registruojama fizinių krūvių metu. Modeliuodami rėmėmės fizinių tyrimų duomenimis. Parodėme, kad norint pasiekti didesnę šuolio aukštį reikia didinti arba atsispyrimo jėgą, arba atsispyrimo trukmę, arba abu parametrus kartu. Norint pasiekti tą patį aukštį greičiau, reikia didinti atsispyrimo jėgą ir mažinti atsispyrimo laiką, t. y. didinti staigiąją jėgą. Teorinė analizė parodė, kad šuolio aukštis nuo staigosios jėgos gali stipriai priklausyti tik tuo atveju, jei jėga šuolio metu visą laiką didėja. Tačiau tiriamajam pašokant į viršų, jo sukuriama jėga didėja tik trumpą laiko tarpą, todėl staigosios jėgos indėlis į šuolio aukštį yra minimalus. Tuo tarpu atsispyrimo trukmė ir šuolio galia priklauso nuo staigosios jėgos.

Tyrimo metu atlikti skaitinio modeliavimo eksperimentai patvirtino mūsų ir kitų autorių pateikiamų fizinių eksperimentų duomenis ir leidžia daryti išvadą, kad:

- šuolio aukštis mažai priklauso nuo staigosios jėgos, bet priklauso nuo jėgos impulso;
- nuo staigosios jėgos priklauso atsispyrimo trukmė ir santykinė galia;
- šoklumas, kaip žmogaus fizinis gebėjimas, turi būti apibūdinamas ne tik šuolio aukščiu, bet ir šuolio greičiu. Šoklumą, kaip kompleksinį žmogaus fizinį gebėjimą, geriausia vertinti santykinė šuolio galia.

**Raktažodžiai:** šoklumas, staigioji jėga, vertikalus šuolis, skaitinis modeliavimas.

## ĮVADAS

Žmogaus šoklumas yra integralus fizinis gebėjimas, priklausantis nuo kitų — stiprio, greičio, koordinacijos (Aragon-Vargas and Gross, 1997; Kollias et al., 2001; Tomioka et al., 2001). Dauguma autorių, tyrinėjančių šoklumą, matuoja maksimalų šuolio aukštį ir teigia, kad šuolio aukštis priklauso nuo staigosios jėgos (Kraemer, Newton, 1994; Haguenaer et al., 2005; Rudas, Skurvydas, 2005). Eksperimentiniai tyrimų duomenys labai prieštaringi — vieni autoriai ran-

da stiprų koreliacinį ryšį tarp staigosios jėgos ir šuolio aukščio (Young et al., 1999; Paasuke et al., 2001), kiti — kad šuolio aukštis nekoreliuoja su kojų raumenų staigiąja jėga (Young, Bilby, 1993; Kollias et al., 2001).

Ankstesniuose straipsniuose (Čižauskas et al., 2006; Muckus, Čižauskas, 2006) remdamiesi eksperimentiniais tyrimais ir teoriniais skaičiavimais parodėme, kad nuo staigosios jėgos priklauso atsispyrimo trukmė, bet ne šuolio aukštis.

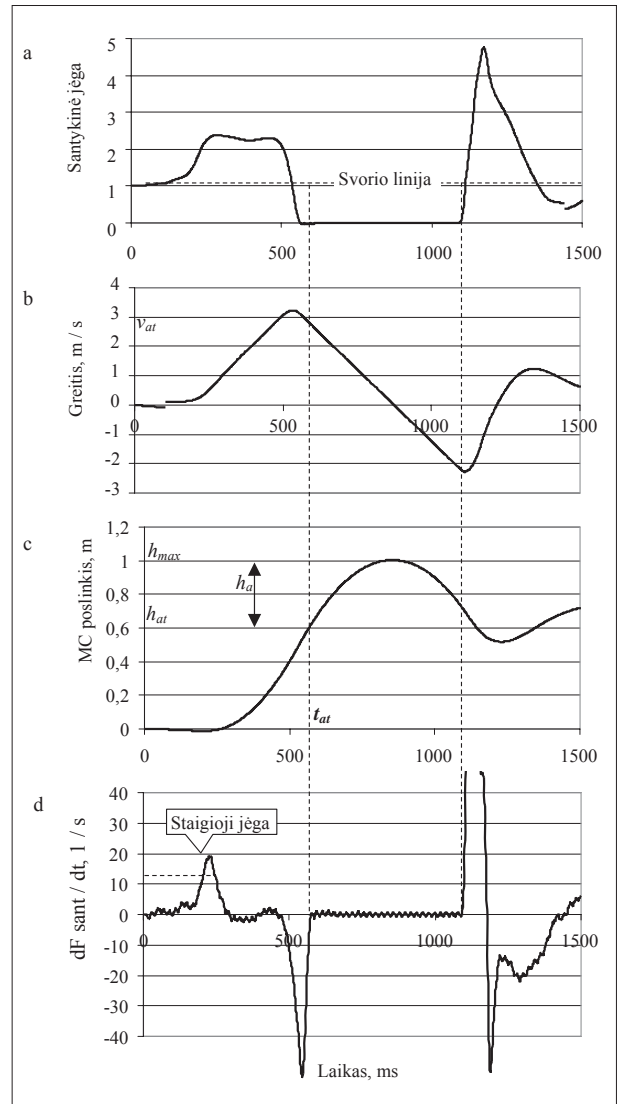
Šuolio aukštis priklauso nuo kūno sukuriamos jėgos impulso dydžio. Šoklumas — žmogaus fizinis gebėjimas — turi būti apibūdinamas ne tik šuolio aukščiu, bet ir šuolio greičiu. Gebėjimas aukštai pašokti ir gebėjimas greitai pašokti — dvi kokybiškai skirtingos šoklumo ypatybės. Vienais atvejais sportininkui svarbu aukštai šokti, nekreipiant dėmesio į tai, kiek laiko trunka šuolis (šuoliai į aukštį, į toli, į vandenį), kitais atvejais jam svarbu tą patį aukštį pasiekti greičiau už varžovą (žaidžiant krepšinį, tinklinį ar futbolą). Šoklumą, kaip sudėtingą žmogaus fizinį gebėjimą, geriausia vertinti šuolio galia.

Šio tyrimo metu papildėme ankstesnius, taisydami paprastą šuolio modelį, kuriuo siekėme išsiaiškinti, nuo kokių dydžių — staigosios ar vidutinės atsispyrimo jėgos — priklauso šuolio aukštis, atsispyrimo trukmė ir santykinė galia. Gautais tyrimo rezultatais siekėme paneigti nuomonę, kad šoklumą pakanka matuoti tik šuolio aukščiu ir kad šuolio aukštį lemia staigioji jėga.

### TYRIMO METODIKA

**Šuolio be amortizuojamojo pritūpimo atlikimo metodika.** Šis šuolių tipas buvo pasirinktas todėl, kad jis leidžia išmatuoti *staigiąją jėgą* — kojų tiesiamųjų raumenų jėgos įgijimo greitį. Atliekant šuolius su amortizuojamuoju pritūpimu, sumuojasi raumenų tampriųjų ir kontraktolinių elementų jėga, o atskirti šias jėgas praktiškai neįmanoma (Muckus, Čižauskas, 2006).

Tiriamasis atlieka maksimaliai aukštą šuolį iš pradinės padėties pritūpus (keliai sulenkti 90° kampu), liemuo vertikaliuos padėties, rankos ant klubų. Tiriamasis turi nusileisti ant atramos plokštumos be tūptelėjimo. Kiekvienas tiriamasis atliko



1 pav. Šuolio metu registruojama atramos plokštumą veikianti santykinė jėga  $F^{sant}$  ir išvestiniai dydžiai: kūno masės centro (MC) vertikalus greitis  $v$ , vertikalus MC poslinkis  $h$  ir santykinės jėgos išvestinė  $F^{sant}$

Biomechaninis rodiklis	Kintamasis	$\bar{x}$	s	min	max
Atsispyrimo trukmė	$t_{at}$ , ms	337,2	53,8	222	458
MC vertikalus greitis atitrūkimo nuo atramos akimirka	$v_{at}$ , m / s	2,618	0,142	2,19	2,87
MC pakilimas atitrūkimo nuo atramos akimirka	$h_{at}$ , m	0,486	0,070	0,345	0,648
MC maksimalus pakilimas nuo atramos plokštumos	$h_{max}$ , m	0,836	0,096	0,641	1,066
Šuolio aukštis	$h_a$ , m	0,350	0,037	0,243	0,421
Vidutinė santykinė atsispyrimo jėga	$F_{vid}^{sant}$	0,81	0,16	0,418	1,084
Santykinė staigioji jėga	$R^{sant}$ , $s^{-1}$	17,089	5,186	8,25	26,92
Santykinė šuolio galia	$R P^{sant}$ , w / kg	24,95	2,95	16,01	29,81

1 lentelė. Šuolio be amortizuojamojo pritūpimo biomechaninių rodiklių reikšmės

Pastaba.  $\bar{x}$  — vidutinė reikšmė, s — kvadratinis nuokrypis.

po tris šuolius. Netinkamai atlikti šuoliai nebuvo vertinami.

**Matavimai.** Šuoliai buvo atliekami ant jėgos plokštės (dinamometrinis kompleksas MA-1). Analizuojant registruojamus signalus naudojama kompiuterinė įranga (Muckus, Kriščiukaitis, 1999). 1 paveiksle parodyta šuolio metu registruojama atramos plokštumą veikiančios santykinės jėgos  $F^{sant}$  kreivė ir išvestiniai dydžiai — kūno MC vertikalusis greitis  $v$ , vertikalusis MC poslinkis  $h$  ir santykinės jėgos laiko išvestinė  $\dot{F}^{sant}$ . Vertinome atsipyrimo trukmę  $t_{at}$ , kūno MC vertikalųjį greitį atitrūkimo nuo atramos plokštumos akimirka  $v_{at}$ , MC pakilimą  $h_{at}$  atitrūkimo nuo atramos plokštumos akimirka, maksimalų pakilimą nuo atramos plokštumos  $h_{max}$ , šuolio aukštį  $h_a$ , vidutinę santykinę jėgą  $F_{vid}^{sant}$ , santykinę staigiąją jėgą  $R^{sant}$  bei santykinę galią  $P^{sant}$ . Matuotų šuolio biomechaninių rodiklių vertės pateiktos 1 lentelėje.

**Tiriamieji.** Ištirta 14 Lietuvos rankinio jaunių rinktinės narių. Tiriamųjų ūgio aritmetinis vidurkis (vidurkis  $\pm$  vidutinis kvadratinis nuokrypis) siekė  $187,3 \pm 3,87$  cm, masės —  $77,1 \pm 7,62$  kg.

**Matematinė statistika.** Analizuodami duomenis naudojome programinį paketą *MS Office EXCEL 2003*.

**Skaitinis modeliavimas.** Skaitinio modeliavimo eksperimentai buvo atlikti naudojant *Matlab 7* paketą. Modelio lygčiai skaitiškai integruoti naudota *Runge-Kutta IV* eilės schema antro laipsnio diferencialinėms lygtims spręsti (Barauskas, 2005).

## PROBLEMOS FORMULUOTĖ

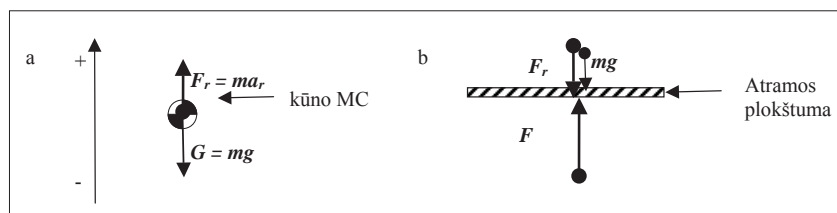
Modeliuojant šuolį aukštyr iš vietos iš pradinės padėties pritūpus, kūno MC ir atramos plokštumą veikiančios jėgos randamos iš laisvųjų kūnų diagramos (2 pav.). Kūno MC veikia kojų tiesiamųjų raumenų jėga  $F_r = ma_r$ , suteikianti kūnui vertikalų teigiamą pagreitį, ir kūno sunkio jėga  $G = mg$ , suteikianti vertikalų neigiamą pagreitį. Atramos plokštumos reakcijos jėga  $F$  yra nukreipta teigiamą kryptimi ir lygi kojų tiesiamųjų raumenų jėgos  $F_r$  ir sunkio jėgos  $G$  atstojamosios sumai:

$$F = F_r + G = m(a_r + g) \quad (1)$$

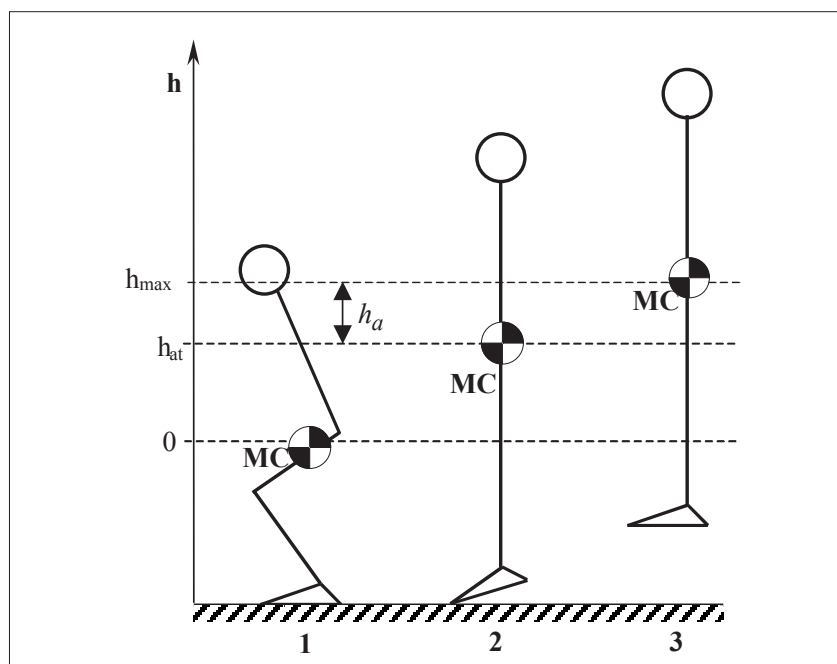
Kadangi mus domina tik jėgos  $F_r$  sukeliamas vertikalus kūno MC judėjimas, tai ją išreiškiame iš fizinių eksperimentų metu registruojamos atramos plokštės reakcijos jėgos  $F$ , naudodami (1) lygtį.

Jėga  $F_r$  veikia tol, kol kūno MC pasiekia aukštį  $h_{at}$ , t. y. iki tol, kol kūnas atitrūksta nuo atramos plokštumos (3 pav.). Toliau vyksta kūno balistinis

2 pav. Vertikalus šuolio modelio laisvųjų kūnų diagrama: a — kūno MC veikiančios jėgos; b — atramos plokštumą veikiančios jėgos



3 pav. Šuolio iš pradinės padėties pritūpus schema



**Pastaba.** MC — kūno masės centras. 1 — pradinė kūno padėtis,  $h = 0$ ; 2 — kūno padėtis atitrūkstant nuo atramos plokštumos,  $h = h_{at}$ ; 3 — kūno MC padėtis aukščiausiam taške,  $h = h_{max}$ .

judėjimas, t. y. kūnas juda veikiamas tik Žemės traukos jėgos. Kūno MC dinamiką aprašo lygtis:

$$a = \begin{cases} a_r - g, & \text{kai } h \geq 0 \\ 0, & \text{kai } h < 0 \end{cases} \quad (2),$$

čia  $a$  — kūno MC pagreitis, kurį sukuria kūną veikiančios jėgos.

Maksimalus kūno MC pakilimo aukštis nuo atramos plokštumos  $h_{max}$  (2 pav.) priklauso nuo kūno greičio atitrūkimo nuo atramos akimirką (Muckus, 2006):

$$h_{max} = \frac{v_{at}^2}{2g} \quad (3),$$

čia  $v_{at}$  — vertikalus MC greitis atitrūkimo nuo atramos plokštumos akimirką (2 pav., 2 poza).

O šuolio aukštis  $h_a$  yra lygus kūno MC maksimalaus pakilimo aukščio  $h_{max}$  ir kūno MC aukščio atitrūkimo nuo atramos plokštumos akimirką  $h_{at}$  skirtumui:

$$h_a = h_{max} - h_{at} \quad (4)$$

Greitis  $v_{at}$  surandamas iš kūno sukuriamo atsispyrimo jėgos impulso  $S_{at}$ :

$$v_{at} = \frac{S_{at}}{m} \quad (5)$$

Atsispyrimo jėgos impulsas  $S_{at}$  išreiškiamas kaip atsispyrimo jėgos  $F_r$  integralas nuo pradinio laiko momento ( $t = 0$ ) iki MC atitrūkimo nuo atramos plokštumos momento  $t_{at}$ :

$$S_{at} = \int_0^{t_{at}} F_r(t) dt \quad (6)$$

Taigi norint suprasti, nuo ko priklauso šuolio aukštis  $h_a$ , reikia išsiaiškinti, kaip jėgos impulsas  $S_{at}$  (ir atitrūkimo greitis  $v_{at}$ ) priklauso nuo atsispyrimo jėgos  $F_r$  dydžio, formos ir staigiosios jėgos  $R$ . Staigioji jėga  $R$  (žmogaus fizinis gebėjimas)

vertikalaus šuolio į aukštį metu apibūdinama kaip tiesiamųjų raumenų sukuriamos jėgos  $F_r$  maksimalioji laiko išvestinė:

$$R = \max \left( \frac{dF_r}{dt} \right)$$

Norint išvengti jėgos impulso  $S_{at}$  priklausomybės nuo kūno masės  $m$ , išryškinti jėgos impulso  $S_{at}$  ir atitrūkimo greičio  $v_{at}$  priklausomybę nuo atsispyrimo jėgos  $F_r$  kitimo bei įvertinti tiriamojo gebėjimą pakelti savo kūną aukšty, fizinių eksperimentų metu vartoti tokie santykiniai dydžiai:

$$\text{santykinė reakcijos jėga } F^{sant} = \frac{F}{mg},$$

santykinė tiesiamųjų raumenų sukuriama jėga

$$F_r^{sant} = \frac{F_r}{mg} \quad (7)$$

ir santykinė staigioji jėga

$$R^{sant} = \frac{R}{mg} \quad (8)$$

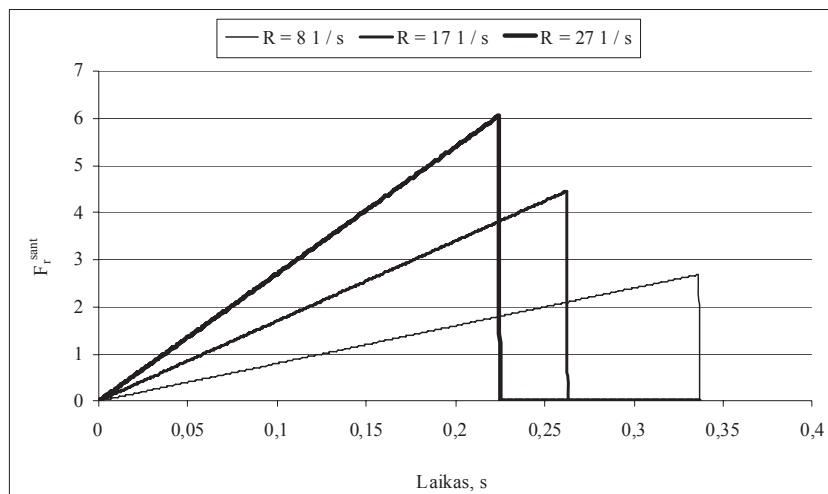
Į (6) lygtį įrašius (7) lygtį, gaunama jėgos impulso  $S_{at}$  išraiška:

$$S_{at} = mg \int_0^{t_{at}} F_r^{sant}(t) dt \quad (9)$$

Santykinį šuolio galingumą  $P^{sant}$  surasime iš potencinės energijos pokyčio ir atsispyrimo trukmės (Muckus, 2006):

$$P^{sant} = \frac{gh_{max}}{t_{at}} \quad (10)$$

Kaip matyti iš (10) lygties, santykinis šuolio galingumas  $P^{sant}$  susieja abi šuolio ypatybes — maksimalų kūno MC pakilimą nuo atramos plokštumos ir atsispyrimo trukmę, todėl gali būti naudojamas kaip integralus šuolio (žmogaus fizinio gebėjimo) kokybę aprašantis dydis.



4 pav. Kūno sukuriamos vertikalios santykinės jėgos kitimas, kol kūno MC pasiekia  $h_{at} = 0,5$  m aukštį

**Vertikalaus šuolio aukščio vertinimas, kai jėgos kitimo greitis pastovus. Analizės išraiška.** Sakykime, kad tiesiamųjų raumenų santykinės jėgos kitimo greitis yra pastovus (t. y. lygus santykiniai staigijai jėgai  $R^{sant}$ ) ir teigiamas:

$$\frac{dF_r^{sant}}{dt} = R^{sant} = const > 0 \quad (11)$$

Vadinasi, tiesiamųjų raumenų sukuriama santykinę jėgą  $F_r^{sant}$  laiko momentu  $t$  galima išreikšti kaip santykinės staigiosios jėgos  $R^{sant}$  ir laiko  $t$  sandaugą:

$$F_r^{sant} = R^{sant} t \quad (12)$$

Tokiu atveju jėga  $F_r^{sant}$  nuolat didėja tol, kol laiko akimirka  $t_{at}$  kūno MC pasiekia aukštį  $h_{at}$  (3 pav.):

$$F_r^{sant} = \begin{cases} R^{sant} t, & \text{kai } t < t_{at} \\ 0, & \text{kai } t \geq t_{at} \end{cases}$$

Tiesiamųjų raumenų santykinės jėgos kitimas, kai kitimo greitis yra pastovus, pavaizduotas 4 pav.

Tokiu atveju laiko akimirka  $t_{at}$  kūno raumenų santykinė jėga bus:

$$F_r^{sant}(t_{at}) = R^{sant} t_{at} \quad (13)$$

Tada atsispyrimo jėgos impulsą  $S_{at}$ , naudodami santykinę staigiąją jėgą  $R^{sant}$ , galime išreikšti į (9) lygtį įrašę (12) lygtį ir suintegravę:

$$S_{at} = mg \int_0^{t_{at}} R^{sant} t dt = mg R^{sant} \frac{t_{at}^2}{2} \quad (14)$$

Greitį atsispyrimo akimirka  $v_{at}$  rasime į 5 lygtį įrašę (14) lygtį:

$$v_{at} = g R^{sant} \frac{t_{at}^2}{2} \quad (15)$$

Tada kūno MC pakilimas nuo atramos plokštumos  $h_{at}$ :

$$h_{at} = \int_0^{t_{at}} v(t) dt = R^{sant} g \frac{t_{at}^3}{6} \quad (16)$$

Kadangi  $h_{at}$  yra žinoma iš antropometrinių tiriamojo duomenų, tai iš (16) lygties randame atsispyrimo trukmę  $t_{at}$ :

$$t_{at} = \sqrt[3]{\frac{6h_{at}}{R^{sant} g}} \quad (17)$$

Į (15) lygtį įrašę (17) lygtį gausime kūno MC vertikalų greitį atsispyrimo momentu  $v_{at}$ :

$$v_{at} = \frac{R^{sant} g}{2} \left( \frac{6h_{at}}{R^{sant} g} \right)^{\frac{2}{3}} = 1,651 (h_{at})^{\frac{2}{3}} (R^{sant} g)^{\frac{1}{3}} \quad (18)$$

Į (3) lygtį įrašę (18) lygtį ir algebriskai pertvarkę gausime maksimalų kūno MC pakilimo aukštį  $h_{max}$ :

$$h_{max} = 0,8255 (h_{at})^{\frac{2}{3}} (g)^{\frac{2}{3}} (R^{sant})^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

Į (19) lygtį įrašę lygtį gausime šuolio aukščio priklausomybę nuo santykinės staigiosios jėgos  $R^{sant}$ :

$$h_a = 0,8255 (h_{at})^{\frac{2}{3}} (g)^{\frac{2}{3}} (R^{sant})^{\frac{1}{3}} - h_{at} = h_{at} \left( 0,8255 (h_{at})^{\frac{1}{3}} (g)^{\frac{2}{3}} (R^{sant})^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \quad (20)$$

Kaip matyti iš (20) lygties, tokia  $h_a$  išraiška remia hipotezę, kad šuolio aukštis  $h_a$  tiesiogiai priklauso nuo santykinės staigiosios jėgos  $R^{sant}$ . Reikia prisiminti, kad ši analizės išraiška yra tiksli tik tuo atveju, kai raumenų sukuriama jėgos kitimo greitis yra pastovus. Iš 1d paveikslo matyti, kad atsispyrimo metu jėgos kitimo greitis  $F_r$  kinta, o staigioji jėga  $R$  yra fiksuojama tik tik trumpą laiko tarpą. Taigi nors lygtis ir rodo tiesioginę šuolio aukščio  $h_a$  priklausomybę nuo santykinės staigiosios jėgos  $R^{sant}$ , reikia iširti iš fizinių eksperimentų duomenų randamos jėgos  $F_r^{sant}$  ir šuolio aukščio priklausomybę.

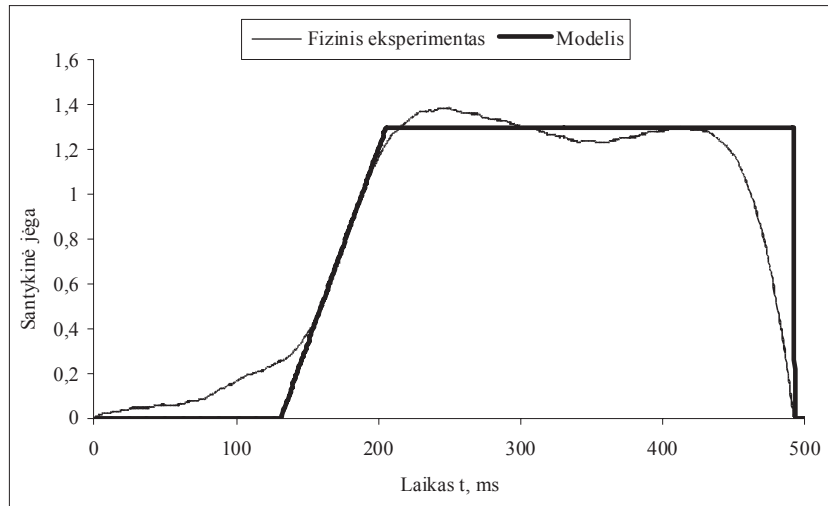
**Vertikalaus šuolio aukščio vertinimas, kai jėgos įgijimo greitis kinta. Skaitinis modeliavimas.** Kaip matyti iš 1d paveikslo, fizinių eksperimentų duomenų randamos atsispyrimo jėgos  $F_r^{sant}$  signalo forma nėra triviali. Ši jėga didėja tik tam tikrą laiką, toliau ji kinta nedidelėse ribose. Norėdami iširti, kokį poveikį šuolio aukščiui  $h_a$ , atsispyrimo trukmei  $t_{at}$  ir santykiniai šuolio galiai  $P^{sant}$  daro santykinės atsispyrimo jėgos  $F_r^{sant}$  signalo forma, kuri, savo ruožtu, priklauso nuo santykinės staigiosios jėgos  $R^{sant}$ , modeliavome kūno MC elgesį, paveiktą santykinės jėgos  $F_r^{sant}$ .

Kūno MC elgesį modeliavome skaitiškai integruodami (2) lygtį su pradinėmis sąlygomis laiko momentu  $t = 0$ :  $h = 0$ ,  $v = 0$ ,  $a = 0$ . Remiantis fizinio eksperimento metu matuotų dydžių reikšmėmis (1 lent.) modeliuojant parinktos santykinės atsispyrimo jėgos  $F^{sant}$  ir staigiosios jėgos  $R^{sant}$  reikšmės (2 lent.). Modelį veikiančios santykinės jėgos  $F^{sant}$  signalo forma sukonstruota taip: parinkus santykinės staigiosios jėgos  $R^{sant}$  dydį, santykinė jėga nuolat didėja ((12) lygtis), kol pasiekia parinktą santykinės atsispyrimo jėgos reikšmę. Santykinės atsispyrimo jėgos reikšmės parinktos remiantis fizinių eksperimentų metu rastomis vidutinės santykinės atsispyrimo jėgos  $F_{vid}^{sant}$  reikšmėmis, kurios geriausiai aproksimuoja fizinio eksperimento metu užregistruotą santykinę jėgą. Nustatyta jėga  $F_{vid}^{sant}$  veikia



Modeliuojamas kintamasis	Reikšmės
$F^{sant}$	0,4 0,7 1
$\dot{F}_S^{sant}$ , $s^{-1}$	8 12 16 20 24 28
$h_{at}$ , m	0,5

2 lentelė. Skaitinio modeliavimo metu naudotos vidutinės santykinės  $F^{sant}$ , staigiosios jėgos  $F_S^{sant}$  reikšmės ir kūno MC aukščio  $h_{at}$  kūno atitrūkimo nuo atramos plokštumos akimirka



5 pav. Kūno sukuriama santykinė jėga  $F^{sant}$  fizinio eksperimento metu užregistruota ir sumodeliuota kreivė, kai  $R^{sant} = 17,5 s^{-1}$ ,  $F_{vid}^{sant} = 0,7$  ir  $h_{at} = 0,5$  m

Rodiklis	$t_{at}$	$v_{at}$	$h_{at}$	$h_{max}$	$h_a$	$F_{vid}^{sant}$	$R^{sant}$	$P^{sant}$
$t_{at}$	1,00							
$v_{at}$	0,09	1,00						
$h_{at}$	0,79	0,54	1,00					
$h_{max}$	0,62	0,78	0,94	1,00				
$h_a$	0,10	1,00	0,54	0,79	1,00			
$F_{vid}^{sant}$	-0,83	0,25	-0,51	-0,27	0,24	1,00		
$R^{sant}$	-0,58	0,17	-0,38	-0,21	0,17	0,46	1,00	
$P^{sant}$	-0,78	0,44	-0,28	-0,03	0,44	0,86	0,51	1,00

3 lentelė. Koreliacijos koeficientai tarp šuolio be amortizuojamojo pritūpimo biomechaninių rodiklių reikšmių

tol, kol kūno MC atitrūksta nuo atramos plokštumos (t. y. kol kūno MC pasiekia  $h_{at} = 0,5$  m aukštį). Pavyzdžiui, 5 paveiksle parodyta fizinio eksperimento metu užregistruota ir sumodeliuota santykinės jėgos  $F^{sant}$  kreivė, parinkus  $R^{sant} = 17,5 s^{-1}$  ir vidutinę santykinės jėgos reikšmę  $F_{vid}^{sant} = 1,3$ .

Modeliavimo rezultatai parodė, kad atsispyrimo laikas  $t_{at}$  nuo staigiosios jėgos  $R^{sant}$  labiausiai priklauso esant didesnėms vidutinės santykinės jėgos  $F_{vid}^{sant}$  reikšmėms (6 a pav.), kai vidutinė  $F_{vid}^{sant} = 1,0$ , didėjant staigiajai jėgai  $R^{sant}$  nuo 8 iki 28, atsispyrimo trukmė  $t_{at}$  mažėja nuo 0,38 s iki 0,34 s. Kaip matyti iš pateikto grafiko, atsispyrimo trukmė  $t_{at}$  labiausiai priklauso nuo išugdytos santykinės vidutinės jėgos  $F_{vid}^{sant}$ . Modeliavimo rezultatai patvirtina ir fizinių eksperimentų duomenų analizę: koreliacijos koeficientas tarp  $t_{at}$  ir vidutinės  $F_{vid}^{sant}$  yra lygus  $-0,83$  (3 lent.), o koreliacijos koeficientas tarp  $R^{sant}$  ir  $t_{at}$  lygus  $-0,58$ .

Kaip matyti iš 6 b paveikslo, šuolio aukščiui  $h_a$  didesnę poveikį daro išugdoma vidutinė santykinė

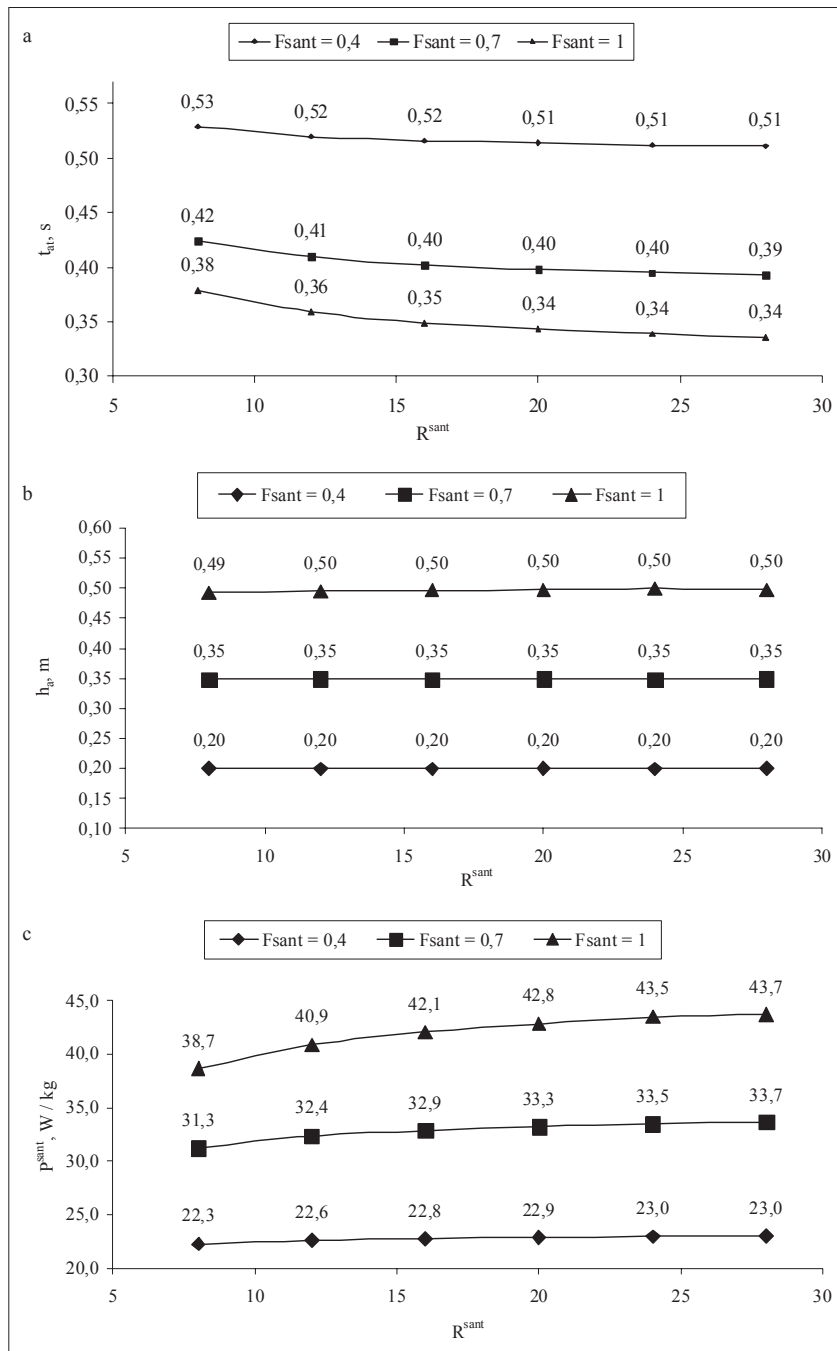
jėga  $F_{vid}^{sant}$ , o ne staigioji jėga  $R^{sant}$ . Fizinių eksperimentų duomenys rodo (3 lent.), kad koreliacijos koeficientas tarp  $h_a$  ir vidutinės  $F_{vid}^{sant}$  lygus 0,24, o koreliacijos koeficientas tarp  $R^{sant}$  ir  $h_a$   $-0,17$ .

Santykinė šuolio galia  $P^{sant}$ , didėjant staigiajai jėgai  $R^{sant}$ , labiau didėja esant didesnėms santykinėms vidutinėms jėgoms; ją labiau veikia didėjanti santykinė atsispyrimo jėga  $F_{vid}^{sant}$  (6 c pav.). Modeliavimo rezultatai kokybiškai sutampa su fizinių eksperimentų metu nustatytais duomenų koreliaciniais ryšiais (3 lent.): koreliacijos koeficientas tarp santykinės šuolio galios  $P^{sant}$  ir santykinės atsispyrimo jėgos  $F_{vid}^{sant}$  lygus 0,86, o koreliacijos koeficientas tarp santykinės šuolio galios  $P^{sant}$  ir  $R^{sant}$   $-0,51$ .

## REZULTATŲ APTARIMAS

Dauguma autorių nurodo, kad šoklumas yra integralus fizinis gebėjimas, priklausantis nuo kitų — jėgos, greičio, koordinacijos (Aragon-Vargas,

6 pav. Šuolio trukmės  $t_{at}$  (a), šuolio aukščio  $h_a$  (b) ir šuolio santykinės galios  $P^{sant}$  (c) priklausomybė nuo santykinės staigiosios jėgos  $R^{sant}$ .



Gross, 1997; Kollias et al., 2001; Tomioka et al., 2001). Šoklumas, kaip žmogaus fizinis gebėjimas, apibūdinamas įvairiai: „Šoklumas — gebėjimas, kuriuo pasižymi žmonės ir kai kurios gyvūnų rūšys. Tai procesas, kurio metu žmogus ar gyvūnas trumpam atkelia savo kūną nuo Žemės paviršiaus naudodami tik savo jėgas. Paprastai šokdamas individas stumia save aukštyn sulenkdamas ir valingai ištiesdamas kojas. Šokama norint pasiekti tam tikrą aukštį, peršokti kliūtį ar griovį, nušokti žemyn. Šuolis gali būti atliekamas šokant ar sportuojant. Kai kurie gyvūnai, pavyzdžiui, kengūros, šokinėjimą naudoja kaip priemonę judėti“ (*Enciklopedinis žodynas*, 2005).

Sporto terminų žodyne (*Sporto terminų žodynas*, 2002) šoklumas apibūdinamas taip: „Gebėjimas atsispyrimo jėga pakylėti save aukštyn, tolyn. Šoklumas yra vienas svarbiausių sportininko kompleksinių gebėjimų, priklausantis nuo kojų raumenų susitraukimo greičio ir judesių koordinacijos (rankų mosto)“.

Staigioji jėga matuojama atliekant maksimalų izometrinių, koncentrinį ar pliometrinių susitraukimą (Kraemer, Newton, 1994; Stone, Lamont, 2007). Kadangi mes tyrėme staigiosios jėgos ryšį su šuolio biomechaniniais rodikliais, pasirinkome šuolį be amortizuojamojo pritūpimo, kurio metu galima matuoti kojų raumenų koncentrinio susitraukimo staigiąją jėgą.

Staigioji jėga apibrėžiama kaip jėgos įgijimo maksimalus greitis (Kraemer, Newton, 1994; Stone, Lamont, 2007). Ši jėga yra neatskiriama nuo pavienio judesio trukmės (Muckus, 2006). Paprastai didėjant staigiajai jėgai, judesio trukmė mažėja.

Dažniausiai vertinant šoklumą yra vertinamas šuolio aukštis, bet ne šuolio greitumas. Ankstesniais tyrimais (Čižauskas et al., 2006; Muckus, Čižauskas, 2006) stengėmės parodyti, kad šoklumas — žmogaus fizinis gebėjimas — turi būti apibūdinamas ne tik šuolio aukščiu, bet ir šuolio greičiu. Šoklumas apibūdinamas kaip kompleksinis žmogaus greitumo stiprio gebėjimas (Young et al., 1999).

Iš (3), (5), (6) lygčių matyti, kad norint pasiekti didesnę šuolio aukštį reikia didinti arba atsispyrimo jėgą, arba atsispyrimo trukmę, arba abu parametrus kartu. Norint pasiekti tą patį aukštį greičiau, reikia didinti atsispyrimo jėgą ir mažinti atsispyrimo laiką, t. y. didinti staigiąją jėgą. Šuolio aukštis nuo staigosios jėgos gali kur kas labiau priklausyti tik tuo atveju, jei jėga šuolio metu visą laiką didėja ((19) ir (20) lygtys). Tačiau tiriamajam asmeniui pašokant į viršų, jėga didėja tik trumpą laiką tarpą (1 ir 5 pav.), todėl staigosios jėgos indėlis į šuolio aukštį yra minimalus (6 b pav.). Tuo tarpu atsispyrimo trukmė ir šuolio galia priklauso nuo staigosios jėgos (6 a ir 6 c pav.).

Kaip parodė fiziniai šio tyrimo eksperimentai, kūno MC pakilimo aukštis  $h_{max}$  geriausiai koreliuoja su atsispyrimo greičiu  $v_{at}$  ir trukme  $t_{at}$  (atitinkamai  $r = 0,78$ ;  $p < 0,001$  ir  $r = 0,62$ ;  $p < 0,001$ ) (3 lent.). Tyrimo rezultatai patvirtina teorinę prielaidą (lygtis), kad MC pakilimo aukštis priklauso nuo greičio kūno atitrūkimo nuo atramos plokštumos akimirka. Stiprus koreliacinis ryšys tarp MC pakilimo aukščio ir atsispyrimo trukmės remia teorinę prielaidą, kad MC pakilimas turi būti tuo didesnis, kuo ilgiau veikia jėga, t. y. kuo didesnis įgyjamas vertikalusis greitis atsispyrimo momentu.

$h_{max}$  koreliacinis ryšys su  $R^{sant}$  yra silpnas ir atvirkštinis ( $r = -0,21$ ) (3 lent.). Įdomu, kad atlik-

dami panašius tyrimus I. Kollias su bendrautoriais (2001) nustatė labai panašų koreliacijos koeficientą tarp šių dydžių ( $r = -0,088$ ). Didžiausia koreliacijos koeficiento reikšmė ( $r = -0,83$ ) pastebėta tarp  $F_{vid}$  ir atsispyrimo trukmės (3 lent.). Šie tyrimų duomenys patvirtina mūsų teiginį, kad norint pasiekti tą patį aukštį greičiau, reikia didinti atsispyrimo jėgą ir mažinti atsispyrimo trukmę.  $R^{sant}$  geriausiai koreliuoja su atsispyrimo trukme  $t_{at}$  ( $r = -0,58$ ;  $p < 0,001$ ) (3 lent.). I. Kollias su bendrautoriais (2001) nustatė labai panašų koreliacijos koeficientą tarp šių dydžių ( $r = -0,589$ ). Šie duomenys patvirtina teiginį, kad šuolio trukmė priklauso nuo staigosios jėgos.

Atsižvelgiant į tai, kad gebėjimas aukštai pašokti ir greitai pašokti yra dvi kokybiškai skirtingos šoklumo ypatybės, šoklumas turėtų būti vertinamas šuolio aukščiu ir šuolio trukme. Tačiau šoklumą bendrai galima vertinti vienu integraliu rodikliu — santykinė šuolio galia (10 lygtis).

Matome, kad šuolio galia priklauso nuo šuolio aukščio ir trukmės. Todėl, mūsų nuomone, šoklumas, kaip kompleksinis fizinis gebėjimas, turi būti vertinamas santykinė šuolio galia.

## IŠVADOS

Tyrimo metu atlikti skaitinio modeliavimo eksperimentai patvirtino mūsų ir kitų autorių pateiktą fizinių eksperimentų duomenis ir leidžia daryti išvadas, kad:

- a) šuolio aukštis mažai priklauso nuo staigosios jėgos, bet priklauso nuo jėgos impulso;
- b) nuo staigosios jėgos priklauso atsispyrimo trukmė ir santykinė galia;
- c) šoklumas, kaip žmogaus fizinis gebėjimas, turi būti apibūdinamas ne tik šuolio aukščiu, bet ir šuolio greičiu. Šoklumą, kaip kompleksinį žmogaus fizinį gebėjimą, geriausia vertinti santykinė šuolio galia.

## LITERATŪRA

Aragon-Vargas, L. F., Gross, M. M. (1997). Kinesiological factors in vertical jump performance: differences within individuals. *Journal of Applied Biomechanics*, 13, 45—65.

Barauskas, R. (2005). *Konstrukcijų virpesiai*. Kaunas: KTU, Technika.

Čižauskas, G., Muckus, K., Eidukynas, V. (2006). Height of jump reflects the explosive force of leg muscles: Myth or reality? *Journal of Vibroengineering*, 8 (2), 63—67.

*Enciklopedinis žodynas*. (2005). Prieiga internetu: <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Jumping>

Haguenaer, M., Legreneur, P., Monteil, K. M. (2005). Vertical jumping reorganization with aging: A kinematic

comparison between young and elderly men. *Journal of Applied Biomechanics*, 21, 236—246.

Kollias, I., Hatzitaki, V., Papaikovou, G., Giatsis, G. (2001). Using principal components analysis to identify individual differences in vertical jump performance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 72 (1), 62—67.

Kraemer, W. J., Newton, R. U. (1994). Training for improved vertical jump. *Sports Science Exchange SSE#53—7* (6), 53—57. Prieiga internetu: <http://www.gssiweb.com/reflib/refs/26/d0000000200000067.cfm?pid=38>

Muckus, K. (2006). *Biomechanikos pagrindai*. Kaunas: Lietuvos kūno kultūros akademija.



Muckus, K., Čižauskas, G. (2006). Šuolio aukštis rodo kojų tiesiamųjų raumenų staigiąją jėgą: mitas ar tikrovė? *Ugdymas. Kūno kultūra. Sportas*, 3 (62), 43—48.

Muckus, K., Kriščiukaitis, A. (1999). Computer controlled system for psychomotoric reaction tests: Evaluation of validity and reliability of parameters: *Biomedical engineering: proceedings of international conference* (pp. 142—145). Kaunas: KTU.

Paasuke, M., Ereline, J., Gapeyeva, H. (2001). Knee extension strength and vertical jumping performance in nordic combined athletes. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 41 (3), 354—361.

Rudas, A., Skurvydas, A. (2005). Jaunesniojo mokyklinio amžiaus mergaičių šoklumo kaita per du mėnesius. *Ugdymas. Kūno kultūra. Sportas*, 1 (55), 43—48.

*Sporto terminų žodynas*. (1996). Parengė S. Stonkus. D. 1.

Kaunas: LKKI. P. 675.

Stone, M., Stone, M., Lamont, H. (2007). *Explosive Exercise*. Prieiga internetu: [http://www.coachesinfo.com/category/strength\\_and\\_conditioning/242](http://www.coachesinfo.com/category/strength_and_conditioning/242)

Tomioka, M., Owings, T. M., Grabiner, M. D. (2001). Lower extremity strength and coordination are independent contributors to maximum vertical jump height. *Journal of Applied Biomechanics*, 17, 81—187.

Young, W. B., Bilby, G. E. (1993). The effect of voluntary effort to influence speed of contraction on strength, muscular power and hypertrophy development. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 7, 172—178.

Young, W., Wilson, C., Byrne, C. (1999). Relationship between strength qualities and performance in standing and run-up vertical jumps. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 39 (4), 285—293.

## IMPACT OF EXPLOSIVE FORCE ON VERTICAL JUMP: EXPERIMENT ANALYSIS AND NUMERICAL MODELLING

Kazimieras Muckus<sup>1</sup>, Radvilė Krušinskienė<sup>1,2</sup>

Lithuanian Academy of Physical Education<sup>1</sup>, Kaunas University of Technology<sup>2</sup>,  
Kaunas, Lithuania

### ABSTRACT

The aim of this work is to understand which factor — explosive force  $R$  or average take-off force  $F_{vid}$  — influences vertical jump height, take-off time and relative jump power. We also want to contradict the opinion that ability to jump may be evaluated using only height of a jump and that height of a jump is specified by explosive force. 14 members of Lithuanian junior handball team were examined. Each of them performed three jumps on the force platform without damping squat, knees bent at 90° angle. We measured take-off time  $t_{at}$ , velocity at the take-off moment  $v_{at}$ , maximum height reached by the center of body mass (COM)  $h_{max}$ , average relative take-off force  $F_{vid}^{sant}$ , relative explosive force  $R^{sant}$  and relative jump power  $P^{sant}$ . Vertical jump was modelled as vertical movement of point of mass affected by internal body force. Two types of internal body force were constructed for use in numerical experiments: 1) during the take-off vertical internal body force grows constantly (i. e.  $R^{sant} = const$ ); 2) internal body force grows for some short time period then stays fixed till the take-off moment. The latter case models the dynamics of internal body force which is observed during physical experiments. Model parameters (take-off time, averaged internal body force, etc.) were used from the data of physical experiments. Modelling results show that in order to jump higher the vertical internal body force or take-off time (or both parameters) must be increased. In order to reach the same height quicker the internal vertical body force must be increased and the take-off time must be decreased, i. e. the explosive force must be increased. Analytical study of the model revealed that height of a jump is strongly affected by the explosive force only in the case when internal vertical body force grows constantly. However, during physical experiments when subject jumps the generated internal vertical force grows only for a very short time period, therefore the impact of explosive force to the height of a vertical jump is minimal ( $r = 0.17$ ). Meanwhile, the take-off time and jump power depends on a magnitude of explosive force ( $r = -0.58$  and  $r = -0.78$  respectively).

Numerical experiments conducted in this work confirmed the data from our and other authors' physical experiments and allow us to conclude that:

a) Jump height is barely affected by explosive force and mainly depends on impulse of an internal vertical body force; b) explosive force affects the take-off time and magnitude of relative power; c) hopping, as a physical ability of a human body, must be evaluated using both height and speed of a jump. The best parameter to describe jumping ability is relative jump power.

**Keywords:** hop, explosive force, vertical jump, numerical modelling.

Gauta 2008 m. spalio 3 d.  
Received on October 3, 2008

Priimta 2008 m. gruodžio 9 d.  
Accepted on December 9, 2008

Radvilė Krušinskienė  
Kauno technologijos universitetas  
(Kaunas University of Technology)  
Studentų g. 48—407, LT-51368 Kaunas  
Lietuva (Lithuania)  
Tel +370 682 34002  
E-mail radvile.krusinskiene@ktu.lt