

UNIVERZITET U BEOGRADU  
FAKULTET SPORTA I FIZIČKOG VASPITANJA

Ivan D. Ćuk

**Mehaničke osobine mišića nogu procenjene  
u uslovima skokova sa različitim  
opterećenjem**

doktorska disertacija

Beograd, 2014

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF SPORT AND PHYSICAL EDUCATION

Ivan D. Cuk

**Mechanical properties of leg muscles  
assessed by vertical jumps with different  
loading**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014

**MENTOR:**

1. Redovni profesor dr Slobodan Jarić, Fakultet sporta i fizičkog vaspitanja, Univerzitet u Beogradu; Department of Kinesiology and Applied Physiology, University of Delaware, USA.

---

**ČLANOVI KOMISIJE:**

1. Redovni profesor dr Miloš Kukulj, Fakultet sporta i fizičkog vaspitanja, Univerzitet u Beogradu;

---

2. Vanredni profesor dr Aleksandar Nedeljković, Fakultet sporta i fizičkog vaspitanja, Univerzitet u Beogradu;

---

3. Naučni saradnik dr Predrag Božić, Zavod za sport i medicinu sporta Republike Srbije.

---

---

Datum odbrane

## **Zahvaljujem se**

*Mentoru, prof. dr Slobodanu Jariću na pomoći, strpljenju i konstantnom motivisanju da istrajem u svim fazama izrade doktorske disertacije.*

*Prof. dr Aleksandru Nedeljkoviću na ukazanom poverenju i ogromnom strpljenju tokom sve tri godine doktorskih studija i mog angažovanja na istraživačkom projektu, koji su imali svoje uspone i padove.*

*Prof. dr Draganu Mirkovu na ukazanom poverenju i saradnji tokom akademskih i doktorskih studija, kao i u finalnom delu izrade disertacije.*

*Prof. dr Milošu Kukulju na strpljenju i konstruktivnim savetima u vezi sa terminologijom, koji su ovu disertaciju učinili kvalitetnijom, kao i članu komisije dr Predragu Božiću na korisnim sugestijama koje su doprinele da ova disertacija dobije svoj krajnji oblik.*

*Kolegama, a pre svega prijateljima Milošu Markoviću i Saši Đuriću na bezuslovnoj pomoći u pripremi i sprovođenju testiranja u okviru ove disertacije.*

*Profesorima i kolegama sa fakulteta, koje ne mogu nabrojati ponaosob, a koji su često bili uz mene kada je to bilo najpotrebnije i ispitanicima na uloženom velikom naporu i svom slobodnom vremenu kako bi učestvovali u testiranjima u okviru ove disertacije.*

*Ocu Danku, majci Snežani i sestri Sofiji koji su imali strpljenja i poverenja u mene tokom svih ovih godina i pružali mi podršku da istrajem u svemu što radim, kao i devojci Dragani, na neizmerno mnogo razumevanja i moralne podrške tokom pisanja ove disertacije.*

# Mehaničke osobine mišića nogu procenjene u uslovima skokova sa različitim opterećenjem

## Rezime:

Mehaničke osobine mišića su često predmet istraživanja, pre svega zbog njihovog značaja za razumevanje građe i funkcije mišićno-skeletnog sistema kod čoveka, kao i zbog traženja novih mogućnosti za poboljšanje efikasnosti različitih sportskih treninga i intervencija u rehabilitaciji. Istraživanja na ovu temu su najčešće bila usmerena na istraživanje relacije sila-brzina ( $F$ - $V$  relacija), odnosno sposobnosti mišićnog sistema da ispolji veliku silu ( $F$ ) pri što većoj brzini pokreta ( $V$ ), a time i maksimalnu snagu ( $P$ ). U novijim istraživanjima,  $F$ - $V$  relacija je kod različitih složenih pokreta maksimalnog intenziteta (skokovi, okretanje pedala, opružanja nogu, pokreti rukama, čučnjevi), opisana kao približno linearna, a ne hiperbolična kako se ranije mislilo. Ipak, primena linearne  $F$ - $V$  relacije u cilju analize mehaničkih osobina mišića nogu kod složenih pokreta nije dovoljno istražena, a niz nedostataka ograničavaju njenu praktičnu primenu u sportu, fizikalnoj medicini i rehabilitaciji. Iz toga je proizašao i opšti cilj ovog istraživanja, a to je da se utvrde i analiziraju mehaničke osobine mišića nogu preko linearne  $F$ - $V$  relacije primenom pozitivnog i negativnog spoljašnjeg opterećenja u uslovima različitih skokova uvis.

Na osnovu opšteg cilja planirana su i sprovedena 2 eksperimenta. U oba eksperimenta korišćeno je 7 pozitivnih i negativnih opterećenja (od 0.7 telesne težine ( $TT$ ) do 1.3  $TT$ ) kako bi se dobio opseg  $F$  i  $V$  za izračunavanje linearnih  $F$ - $V$  relacija. Za potrebe ovog istraživanja, napravljena je konstrukcija koja simulira povećanje ili smanjenje  $TT$ . Spoljašnje opterećenje je predstavljalo delovanje konstantne spoljne sile naviše (negativno opterećenje) ili nadole (pozitivno opterećenje), a izvršeno je uz pomoć dve dugačke gume rastegnute preko sistema plastičnih koturova niske inercije i trenja. U *Eksperimentu 1* učestvovalo je 10 fizički aktivnih ispitanika sa ciljem da se ispituju oblik i povezanost  $F$ - $V$  i  $P$ - $V$  (snaga-brzina) relacija, kao i pouzdanost  $F$ - $V$  relacija. Osim toga, u ovom

eksperimentu su ispitivane i razlike između parametara linearnih  $F$ - $V$  relacija (presek sile,  $F_0$ ; presek brzine,  $V_0$ ; nagib regresije,  $a$ ; maksimalna snaga,  $P_{max}$ ) i konkurentna validnost parametara  $F_0$  i  $P_{max}$ . Za tu svrhu primenjivano je pozitivno i negativno spoljašnje opterećenje u uslovima 3 različita skoka (skok uvis iz polučučnja,  $SJ$ ; skok uvis bez zamaha rukama,  $CMJ$ ; skok uvis sa zamahom rukama,  $CMJa$ ), a korišćene su varijable dobijene iz maksimalnih i prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ . *Eksperiment 2* je imao za cilj ispitivanje osetljivosti linearnih  $F$ - $V$  relacija za uočavanje razlika u mišićnoj sili i snazi kod ispitanika različite fizičke pripremljenosti. Osim toga, cilj je bio i poređenje parametara  $F$ - $V$  relacija, dobijenih u uslovima 2 različita skoka ( $SJ$  i  $CMJ$ ), korišćenjem varijabli iz maksimalnih i prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ , primenom pozitivnog i negativnog spoljašnjeg opterećenja. U eksperimentu je učestvovalo 30 ispitanika koji su na osnovu fizičke pripremljenosti podeljeni u tri grupe od po 10 ispitanika (*Bodibilderi*, *Aktivni* i *Neaktivni*).

Kada su u pitanju rezultati *Eksperimenta 1*,  $F$ - $V$  relacije su se pokazale kao linearne (nijedan korelacioni koeficijent ( $r$ ) polinomijalnih regresija nije bio statistički značajno iznad korelacionih koeficijenata dobijenih iz linearnih regresija) i visoko povezane ( $r$  od 0.92 do 0.99).  $P$ - $V$  relacije, dobijene na osnovu maksimalnih i prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ , su parabolične i takođe visoko povezane ( $r$  od 0.87 do 0.95) u uslovima sva 3 skoka ( $SJ$ ,  $CMJ$  i  $CMJa$ ). Parametri  $F$ - $V$  relacija su izrazito pouzdani (intraklas korelacion koeficijent ( $ICC$ ) od 0.85 do 0.98). Ipak,  $F_0$  i  $P_{max}$  su donekle pouzdaniji (posmatrajući  $ICC$ ) nego  $V_0$ . Kada se uporede različiti skokovi,  $CMJ$  i  $CMJa$  su nešto pouzdaniji od  $SJ$ , a osim toga  $P_{max}$  je veći u uslovima  $CMJ$  i  $CMJa$  nego u uslovima  $SJ$ . Upoređivanjem različitih varijabli, pokazalo se da je  $F_0$ , dobijen iz maksimalnih vrednosti  $F$  i  $V$ , tek nešto veći nego iz prosečnih, dok je  $V_0$  skoro duplo veći kada se računa iz maksimalnih vrednosti  $F$  i  $V$ , nego kada je dobijen iz prosečnih. Rezultat toga su veći  $a$  kada se koriste prosečne vrednosti  $F$  i  $V$ , a veći  $P_{max}$  kada se koriste maksimalne vrednosti  $F$  i  $V$ . Parametri  $F$ - $V$  relacija ( $F_0$  i  $P_{max}$ ) su pokazali umerenu do visoku konkurentnu validnost u odnosu na direktno merenu silu i snagu, sa delimično statistički značajnim korelacijama ( $r$  od 0.31 do 0.98). Rezultati *Eksperimenta 2* pokazuju da su testirane  $F$ - $V$  relacije linearne i veoma povezane ( $r$  od 0.92 do 1.00), bez obzira na tip skoka ( $SJ$  i  $CMJ$ ) i grupu ispitanika (*Bodibilderi*, *Aktivni* i *Neaktivni*). Slični

rezultati dobijeni su za varijable korišćene iz maksimalnih i prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ . Razlike između parametara  $F$ - $V$  relacija kod ispitanika različite fizičke pripremljenosti pokazuju da razlike u  $a$  i  $P_{max}$  između grupa potiču pre svega od razlika u  $F_0$ , a ne  $V_0$ .

Dobijeni nalazi ukazuju na to, da je primenom skokova uvis sa različitim opterećenjem moguće dobiti povezane, pouzdane, validne i osetljive linearne  $F$ - $V$  relacije bez obzira na tip skoka ili varijable koji se primenjuju. S tim u vezi, skokovi uvis sa različitim opterećenjem mogu biti integrisani u metod za rutinsko testiranje mehaničkih osobina mišića opružaća nogu za procenu sile, brzine i snage.

*Ključne reči: Relacija sila-brzina, skok uvis, sila, brzina, snaga, linearna regresija, pouzdanost, validnost, osetljivost.*

Naučna oblast: Sport i fizičko vaspitanje

Uža naučna oblast: Opšta motorika čoveka

UDK broj: 796.012.414:612.766 (043.3)

# Mechanical properties of leg muscles assessed through loaded vertical jumps

## Summary:

Mechanical properties of muscles have been in research focus due to their importance for understanding the design and function of human musculoskeletal system, as well as the effectiveness of various athletic training and rehabilitation interventions aimed to improve physical abilities in various populations. The studies have often been pointed towards the force-velocity relationship ( $F$ - $V$  relationship) especially regarding the ability of the muscular system to exert high external force ( $F$ ), at a high movement velocity ( $V$ ) and, consequently, to maximize the muscle power output ( $P$ ).  $F$ - $V$  relationship of maximum performance multi-joint movement (e.g., maximum vertical jumps, pedaling, simultaneous leg extensions, arm cranking or squats) has been recently shown to be linear, rather than hyperbolic. Nevertheless, use of linear  $F$ - $V$  relationship in order to assess the mechanical properties of leg muscles in multi-joint movements, has a number of unresolved problems. They often represent limiting factors for practical use of this relationship in sports, physical medicine and rehabilitation. Therefore, the main aim of this research is to establish and analyze mechanical properties of leg muscles, through both positive and negative loading on different vertical jump types, using a linear  $F$ - $V$  relationship.

Regarding the main aim of the study, 2 experiments were conducted. In both of them, 7 positive and negative loads were applied ranging from 0.7 body weight ( $BW$ ) to 1.3  $BW$  in order to acquire range of  $F$  and  $V$  for linear  $F$ - $V$  relationships. Specifically, we employed a pulley device that simulates either an increase or decrease in  $BW$ . Two long rubber bands were extensively stretched over a system of low-friction and low-inertia plastic wheels to provide constant the pulling force acting either vertically upward (negative load) or downward (positive load). Ten subjects were recruited for *Experiment 1*, in order to assess shape and strength of  $F$ - $V$  and  $P$ - $V$  (power-velocity) relationships, in



addition to the reliability of  $F$ - $V$  relationships. Differences in parameters of  $F$ - $V$  relationships (force-intercept,  $F_0$ ; velocity intercept,  $V_0$ ; regression slope,  $a$ ; maximum power output,  $P_{max}$ ) were obtained, as well as concurrent validity of  $F_0$  i  $P_{max}$ . For that purpose, 3 different vertical jump types (squat jump,  $SJ$ ; countermovement jump,  $CMJ$ ; countermovement jump with arm swing,  $CMJa$ ) were tested and both the maximum and averaged  $F$  and  $V$  variables were obtained. The aim of *Experiment 2* was to assess sensitivity of the linear  $F$ - $V$  relationships to detect the differences in strength and power between the subjects of different levels of physical fitness, as well as to compare  $F$ - $V$  parameters observed from both different jump types ( $SJ$ ,  $CMJ$ ) and variables (from maximum and averaged  $F$  and  $V$ ). In this experiment 30 subjects were recruited and they were allocated in three groups with 10 subjects, based on their levels of physical fitness (specifically, *Bodybuilders*, *Active*, and *Sedentary* individuals).

Concerning the results of the *Experiment 1*,  $F$ - $V$  relationships were found to be both linear (none of the correlation coefficients ( $r$ ) obtained from the polynomial regressions was significantly above the corresponding values obtained from the linear regression) and remarkably strong ( $r$  ranged from 0.87 to 0.95) across both the jump ( $SJ$ ,  $CMJ$  i  $CMJa$ ) and variable types (maximum and averaged  $F$  and  $V$ ). All  $F$ - $V$  parameters were exceptionally highly reliable (intraclass correlation coefficient ( $ICC$ ) ranged from 0.85 to 0.98), although parameters  $F_0$  and  $P_{max}$  could be somewhat more reliable (regarding  $ICC$ ) than the parameter  $V_0$ . Regarding the different jump types,  $CMJ$  and  $CMJa$  could be more reliable than  $SJ$ .  $P_{max}$  could also be more reliable in both  $CMJ$  and  $CMJa$  than in  $SJ$ . Concerning different variable types, maximum and averaged  $F$  and  $V$  shows similar values of  $F_0$ , but values of  $V_0$  in maximum  $F$  and  $V$  are almost twice as high as the values of  $V_0$  in averaged  $F$  and  $V$ . As a result, higher values of  $a$  were recorded when averaged  $F$  and  $V$  were used while higher values of  $P_{max}$  were recorded when maximum  $F$  and  $V$  were used. Data from this experiment also revealed moderate to high concurrent validity of  $F_0$  and  $P_{max}$  when compared to directly measured strength and power ( $r$  ranged from 0.31 to 0.98). Results of the *Experiment 2* shows that obtained  $F$ - $V$  relationships were fairly linear and strong ( $r$  ranged from 0.92 to 1.00), regarding jump type ( $SJ$  and  $CMJ$ ), tested subject group

(*Bodybuilders, Active, and Sedentary*) or variable type (maximum and averaged  $F$  and  $V$ ). Differences in  $F$ - $V$  parameters in subjects with different physical fitness, shows that differences in  $a$  and  $P_{max}$  mainly originates from differences in  $F_0$ , rather than  $V_0$ .

Finally, the obtained results suggest that the linear  $F$ - $V$  relationships assessed through loaded vertical jumps can be strong, reliable, valid and sensitive enough regarding the applied jump or variable types. In conclusion, the loaded vertical jumps could be integrated within the routine methods for testing the mechanical properties of leg muscles regarding their generation of the force, velocity and power output.

*Key words: F-V relationship, vertical jump, force, velocity, power, linear regression, reliability, validity, sensitivity.*

Scientific field: Sport and physical education

Narrow scientific field: Human general motor skills

UDC number: 796.012.414:612.766 (043.3)

# Sadržaj

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1 Mišići i njihova uloga u lokomociji .....	2
1.2. Mehaničke osobine skeletnih mišića .....	2
1.2.1. Tip mišićne kontrakcije.....	4
1.2.2. Relacija sila-dužina .....	5
1.2.3. Relacije sila-brzina i snaga-brzina .....	7
1.2.3.1. Osnovne karakteristike relacija sila-brzina i snaga-brzina .....	7
1.2.3.2. Značaj relacije sila brzina i snaga-brzina .....	9
<b>2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....</b>	<b>11</b>
2.1. Relacija sila-brzina složenih pokreta .....	11
2.2. Procena linearne F-V i parabolične P-V relacije i značaj parametara F-V relacije ...	16
2.2.1. Procena linearne F-V i parabolične P-V relacije na bicikl-ergometru .....	16
2.2.2. Procena linearne F-V i parabolične P-V relacije u uslovima opružanja nogu ....	18
2.2.3. Procena linearne F-V i parabolične P-V relacije mišića ruku.....	21
2.2.4. Procena linearne F-V i parabolične P-V relacije u uslovima polučučnja .....	22
2.2.5. Procena linearne F-V i parabolične P-V relacije u uslovima skokova.....	24
2.3. Procena linearne F-V i parabolične P-V relacije kod različitih populacija .....	27
2.4. Nedostaci dosadašnjih istraživanja .....	31
<b>3. PROBLEM, PREDMET, CILJ I ZADACI ISTRAŽIVANJA.....</b>	<b>34</b>
<b>4. HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA.....</b>	<b>36</b>
<b>5. PROCENA OBLIKA F-V I P-V RELACIJE OPRUŽAČA NOGU KOD RAZLIČITIH VRSTA SKOKOVA SA RAZLIČITIM OPTREĆENJEM - POUZDANOST I KONKURENTNA VALIDNOST (EKSPERIMENT 1).....</b>	<b>37</b>

5.1. Uvod.....	37
5.2. Metode .....	40
5.2.1. Uzorak ispitanika.....	40
5.2.2. Protokol eksperimenta.....	41
5.2.3. Eksperimentalne procedure .....	42
5.2.3.1 Procena morfološkog statusa .....	42
5.2.3.2. Testovi za procenu mišićne sile.....	43
5.2.3.3. Skokovi sa različitim opterećenjem i primena spoljašnjeg opterećenja ..	46
5.2.4. Obrada podataka.....	50
5.2.5. Statistička analiza podataka .....	50
5.3. Rezultati .....	52
5.4. Diskusija .....	63
<b>6. PROCENA OSETLJIVOSTI F-V RELACIJE ZA OCENU RAZLIKA U MIŠIĆNOJ SILI I SNAZI (EKSPERIMENT 2).....</b>	<b>68</b>
6.1. Uvod.....	68
6.2. Metode .....	71
6.2.1. Uzorak ispitanika.....	71
6.2.2. Protokol eksperimenta.....	73
6.2.3. Eksperimentalne procedure .....	73
6.2.5. Obrada podataka.....	73
6.2.6. Statistička analiza podataka .....	74
6.3. Rezultati .....	75
6.4. Diskusija .....	83
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>88</b>

7.1. Potencijalni značaj istraživanja.....	89
7.2. Smernice za buduća istraživanja.....	91
<b>LITERATURA.....</b>	<b>93</b>
<b>PRILOZI.....</b>	<b>103</b>
<b>BIOGRAFIJA AUTORA.....</b>	<b>112</b>
<b>POGOVOR.....</b>	<b>113</b>

# Skraćenice

*F-V* relacija – Relacija sila-brzina

*P-V* relacija – Relacija snaga-brzina

*F* – Sila

*F<sub>0</sub>* – Presek sile

*V* – Brzina

*V<sub>0</sub>* – Presek brzine

*P* – Snaga

*P<sub>max</sub>* – Maksimalna snaga

*a* – Nagib regresije

*SJ* – Skok uvis iz polučučnja

*CMJ* – Skok uvis bez zamaha rukama

*CMJa* – Skok uvis sa zamahom rukama

*MAX* – Maksimalni

*AVG* – Prosečni

*MVC* – Izometrijska sila pri maksimalnoj voljnoj kontrakciji mišića opružaća u zglobu kolena

*1PMĉ* – Jedno podizanje maksimalnog tereta iz polučučnja

*CV* – Koeficijent varijacije

*ICC* – Intraklas korelacioni koeficijent

*SEM* – Standardna greška merenja

*CI* – Interval pouzdanosti

*F* – F-test

*p* – Verovatnoća nulte hipoteze

$\eta^2$  – Eta kvadrat

*ANOVA* – Analiza varijanse

*r* – Koeficijent korelacije

$R^2$  – Koeficijent determinacije

*SV* – Srednja vrednost

*SD* – Standardna devijacija

*SE* – Standardna greška

*TT* – Telesna težina

*TM* – Telesna masa

*TV* – Telesna visina

*PM* – Procenat masti

*ITM* – Indeks telesne mase

*MM* – Mišićna masa

*DN* – Dužina nogu

*BLD* – Bilateralni deficit

*Hz* – Herc

*RFD* – Brzina razvoja sile

*rpm* – Broj obrtaja pedala u minuti

## 1. UVOD

Mišići nogu imaju važnu ulogu u održavanju uspravnog položaja i kretanja. Za razmatranje problema u ovoj disertaciji posebno treba istaći njihovu ulogu u vršenju brzih i eksplozivnih pokreta segmenata tela ili celog tela. Sport je oblast u kojoj se ispoljavaju takve vrste pokreta, a među njima su često zastupljeni tzv. balistički pokreti. Balistički pokreti se mogu definisati kao pokreti sa ciljem da ubrzaju masu tela ili njegovih segmenata što je brže moguće, odnosno da se dostigne najveća moguća brzina za najkraće vreme, tokom koncentrične faze pokreta (Samozino, 2012). U sportu, kao i u ostalim aktivnostima, sposobnost ostvarivanja velikih sila za što kraće vreme predstavlja značajan faktor u postizanju vrhunskih sportskih rezultata i u prevenciji povreda (Neeter i sar., 2006). Najčešći balistički pokreti su skakanja i bacanja.

Uspešnost u sportu u velikoj meri zavisi od poboljšanja različitih fizičkih sposobnosti tokom treninga, a pre svega od snage (Frost i sar., 2010; Cormie i sar., 2011b). Stoga je veliki broj istraživanja bio usmeren ka unapređivanju sposobnosti mišićnog sistema da ispolji visok nivo sile ( $F$ ) pri velikoj brzini pokreta ( $V$ ), a shodno tome i na maksimalnu snagu ( $P$ ). Ispoljavanje maksimalne  $P$  se kod većine autora smatra kao glavni preduslov za visok nivo izvođenja balističkih pokreta (Marković i Jarić 2007a; Yamauchi i Ishii, 2007; Cormie i sar., 2010a; Bobbert, 2014; Samozino i sar., 2014). Ono što, još uvek, na određen način predstavlja nepoznanicu je uloga  $F$  odnosno  $V$  u optimizaciji balističkih pokreta.

Nakon pregleda relevantne literature uočavaju se problemi koji se tiču izvođenja balističkih pokreta mišića nogu. Proučavanjem mehaničkih osobina mišića nogu, konkretno relacije sila-brzina (u daljem tekstu  $F$ - $V$  relacija), moguće je doprineti rešavanju tih problema i na taj način doprineti razvoju u oblasti sporta, fiziologije, fizikalne medicine i rehabilitacije.



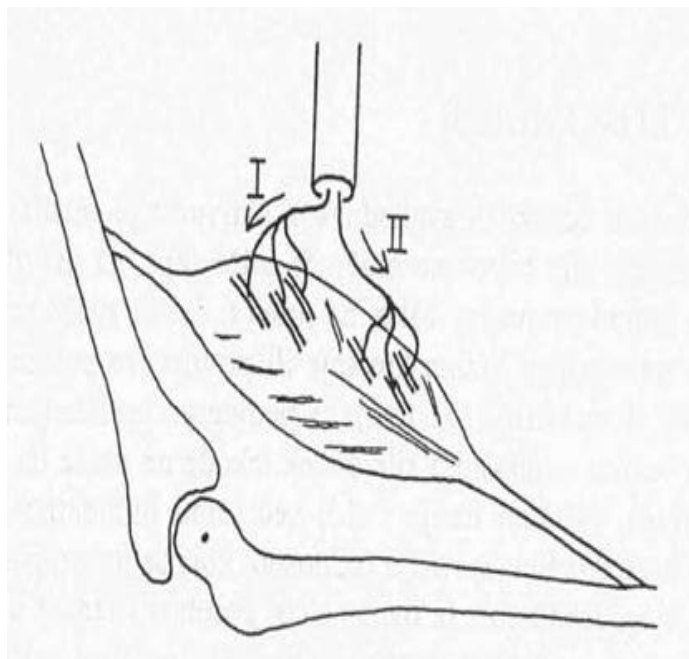
## 1.1 Mišići i njihova uloga u lokomociji

Svakodnevna aktivnost čoveka, u biomehaničkom smislu, je rezultat interakcije unutrašnjih i spoljašnjih sila. Na većinu unutrašnjih i spoljašnjih sila, čovek ne može direktno da utiče, već samo indirektno. Jedina sila kojom čovek može direktno da upravlja je mišićna sila. Zbog toga, uloga mišića u humanoj lokomociji ima posebnu važnost. S tim u vezi, za mehaničku analizu pokreta čoveka, potrebno je istražiti mehaničke osobine mišića i uslova razvijanja njihove sile u sistemu poluga tela.

## 1.2. Mehaničke osobine skeletnih mišića

U organizmu čoveka nalazi se više od 430 skeletnih mišića (Nikolić, 2003). Mehaničke osobine skeletnih mišića (u daljem tekstu mišići) definišu se kao one osobine mišića koje se mogu izmeriti mehaničkim veličinama, npr: silom, brzinom, radom i snagom (Zatsiorsky, 2000). Izvođenje velikog broja sportskih disciplina u velikoj meri zavisi od ovih veličina. Na primer, uspeh zavisi od snage koja se razvija tokom veslanja ili brzine koju dostiže ruka kod udarca u boksu itd.

Mehaničke osobine mišića su veoma složene i često su predmet istraživanja u različitim oblastima (npr. fiziologiji, biomehanici, fizikalnoj medicini i rehabilitaciji). To je pre svega zbog njihovog značaja za razumevanje građe i funkcije mišićno-skeletnog sistema, pa i mišića ponaosob. Osim toga, mehaničke osobine mišića u mnogome određuju mišićne sposobnosti (Zatsiorsky, 2000). One u velikoj meri zavise od stepena aktivacije koja je izazvana eferentnim nervnim impulsima. Na *Slici 1* možemo videti uprošćenu šemu mišićne aktivacije.



Slika 1. Šema mišićne aktivacije. Eferentni motorni nervi (I i II) inervišu veći broj mišićnih vlakana i zajedno sa njima sačinjavaju motorne jedinice (Jarić, 1997).

Nakon što nervni sistem pošalje impulse, gotovo sva mišićna vlakna u okviru njihovih motornih jedinica počnu da razvijaju silu, koja raste sa frekvencijom ovih impulsa. S obzirom da u mišiću postoji veliki broj motornih jedinica, mišićna sila zavisi od broja aktivnih motornih jedinica, kao i od frekvencije eferentnih impulsa svake od njih (Nikolić, 2003; Bartlett, 2005). Kada je mišić u izvesnoj meri aktiviran ovim impulsima, on se nalazi u aktivnom stanju. Mišić može biti i u pasivnom stanju i tada do njega ne dolaze nervni impulsi (osim malog broja impulsa, zaduženih za održavanje prirodnog tonusa mišića). U oblastima biomehanike i fiziologije, značajno je izučavati delovanje mišića u aktivnom stanju, odnosno kontrakciji. Stoga će u nastavku ovog poglavlja, biti detaljnije analizirani tipovi mišićne kontrakcije i druge važne mehaničke osobine mišićnog sistema koje su od značaja za ovo istraživanje.

### 1.2.1. Tip mišićne kontrakcije

Prema velikom broju autora (Jarić, 1997; Newton, 1997; Zatsiorsky, 2000; Željaskov, 2004), postoji nekoliko tipova mišićne kontrakcije:

1. *Koncentrična mišićna kontrakcija.* Ispoljava se pri skraćanju mišića, a sila dejstva je suprotna pravcu kretanja. Ispoljena sila je veća od spoljašnjeg otpora, što određuje savlađujući karakter kretanja – odskok, dizanje, bacanje, guranje.

2. *Ekscentrična mišićna kontrakcija.* Javlja se pri izduženju mišića. U ovom slučaju, sila deluje u istom pravcu u kom se vrši pokret, jer su spoljašnje sile (sopstvena težina, težina protivnika ili drugih sila interakcije sa okolinom) veće od unutrašnje sile nervno-mišićnog sistema. Uobičajen primer ekscentrične mišićne kontrakcije je doskok u čučanj ili polučučanj nakon saskoka sa visine.

3. *Izometrijska mišićna kontrakcija.* Usmerena je ka uspostavljanju ravnoteže spoljašnje i unutrašnje sile. Pri ovim kontrakcijama se skraćuju mišićni miofibrili, a u isto vreme i u istoj meri se rastežu elastični elementi mišića (tetine), što kao rezultat daje naprezanje, tj. proizvodi se sila, bez promene ukupne dužine mišića. Mada u mehaničkom smislu nije izvršen rad, energetska potrošnja pri izometrijskim kontrakcijama postoji.

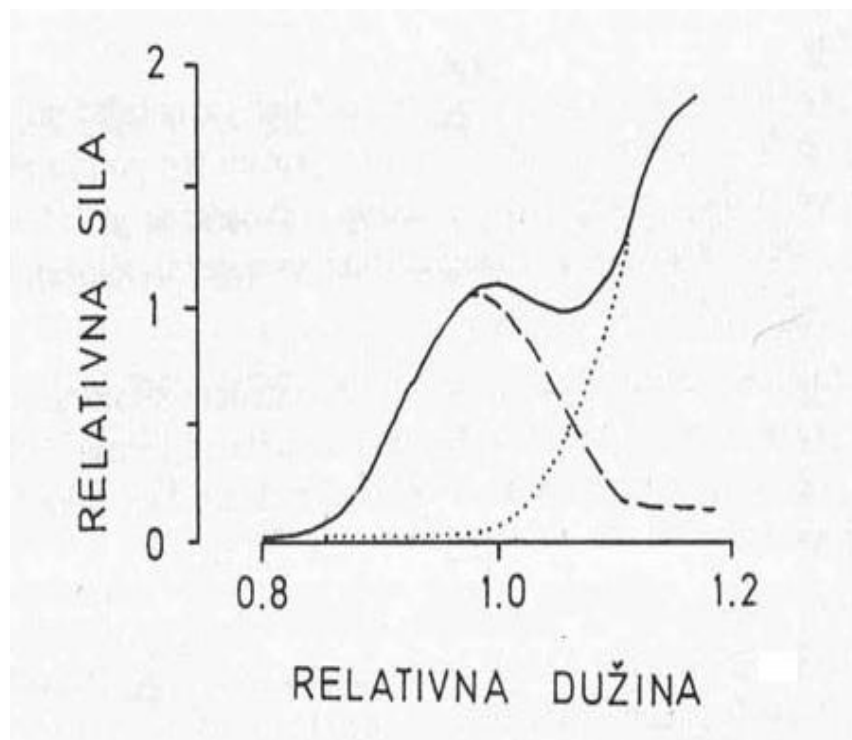
4. *Izokinetička mišićna kontrakcija.* Određena je spoljašnjim otporom koji zavisi od brzine pokreta, koja se pomoću specijalnih sprava (na primer izokinetički dinamometar) može održati na određenom nivou. Na takav način se stvaraju uslovi za maksimalno opterećenje mišića tokom celog pokreta, odnosno, u ovim uslovima otpor je proporcijalan primenjenoj sili u svim tačkama radnog opsega. Uprkos tome, sila koja se može realizovati u svakoj fazi pokreta, zavisi od uglova u odgovarajućim zglobovima i od trenutne brzine.

U svakodnevnim kretanjama, kao i u različitim sportskim aktivnostima, retki su pokreti u kojima se ove mišićne kontrakcije javljaju izolovano. Najčešći tipovi pokreta uključuju sukcesivnu kombinaciju ekscentrične (izduženje mišićnog vlakna) i koncentrične (skraćanje mišićnog vlakna) mišićne kontrakcije tj. ciklus izduženja-skraćanja. Ciklus

izduženja-skraćenja mišića naročito je zastupljen u aktivnostima kao što su bacanja, skokovi i sl. Sila i snaga, koje se ostvaruju prilikom koncentrične kontrakcije kojoj je prethodila ekscentrična, veće su nego pri izolovanoj koncentričnoj kontrakciji (Komi, 1992). Na primer, ostvarivanje veće mišićne sile kod skoka uvis bez zamaha rukama (*CMJ*) u odnosu na skok uvis iz polučučnja (*SJ*), najvećim delom se dešava zbog povećanja energije elastične deformacije koja se akumulira u tetivama (van Ingen Schenau, 1984; Huijing, 1992). Chapman (1985) navodi, da se pomenuto povećanje sile tokom koncentrične kontrakcije nakon izduženja javlja tako što se *F-V* relacija pomera ka većim silama pri istoj zadatoj brzini.

### 1.2.2. Relacija sila-dužina

Relacija sila-dužina je jedna od relacija kojom se opisuju mehaničke osobine mišića (*Slika 2*). Zavisnost sile od dužine mišića pokazuje slično ponašanje za različite mišiće, a sposobnost mišića da proizvodi silu direktno zavisi od dužine sarkomere (Gans i Bock, 1965; Newton, 1997; Cormie i sar., 2011a). Najveća mogućnost za ispoljavanje sile na poprečnim mostovima javlja se u situaciji kada dužina sarkomera obezbeđuje optimalno preklapanje između vlakana aktina i miozina. Pri optimalnoj dužini sarkomere, interakcija na poprečnim mostovima je najveća, što rezultuje ispoljavanjem najveće sile. Međutim, ispoljavanje sile je narušeno u slučajevima kada su sarkomere previše skraćene ili izdužene, jer u oba slučaja interakcija na poprečnim mostovima nije maksimalna (Cormie i sar., 2011a). Dakle, aktivna komponenta mišićne sile, pri istom stepenu aktivacije, razvija najveću silu pri srednjoj dužini mišića (Jarić, 1997; Nikolić, 2003; Cormie i sar., 2011a).



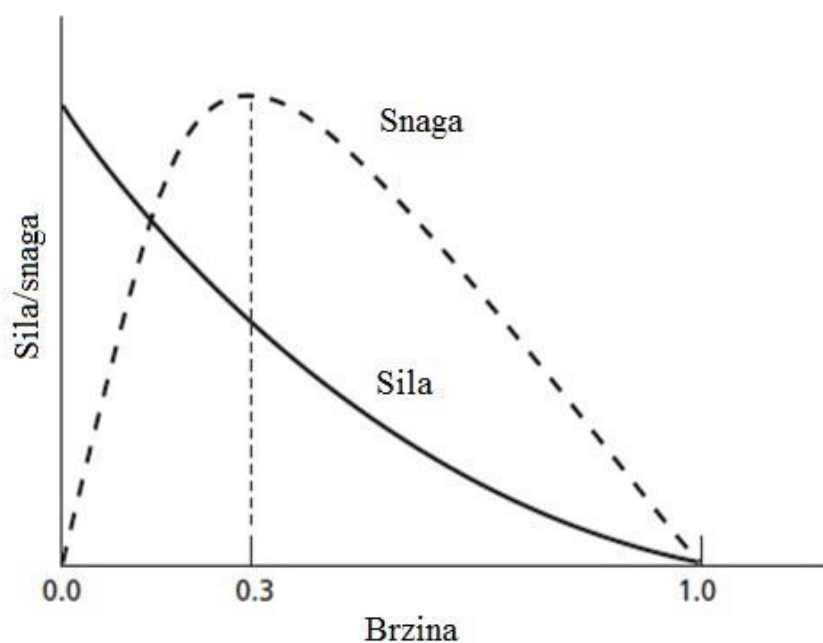
Slika 2. Zavisnost maksimalne sile mišića od njegove dužine, izmerena elektrostimulacijom na izolovanom mišiću mačke (*m. gastrocnemius lateralis*). Sila je prikazana u odnosu na silu pri srednjoj fiziološkoj dužini, a dužina u odnosu na srednju fiziološku silu. U dužinu mišića su uračunate i tetive (Jarić, 1997).

Na oblik zavisnosti sile od dužine pri većim dužinama mišića utiče i pasivna komponenta njegove sile (Jarić, 1997). Ona je pogotovu velika pri dužinama mišića bliskim maksimalnim. Na nju se dodaje i aktivna komponenta što omogućava da ukupna mišićna sila raste sa dužinom. Treba imati u vidu, da pošto mišići deluju sa obe strane svakog zgloba, pri pokretu se jedni skraćuju i time smanjuju silu, a drugi izdužuju i time povećavaju svoju silu (Jarić, 1997; Zatsiorsky, 2000; McGinnis, 2005). Dakle zavisnost sile mišića od dužine pokazuje da mišić može da deluje određenom silom samo u ograničenom intervalu sopstvene dužine, odnosno ako mu je dužina između minimalne i maksimalne.

### 1.2.3. Relacije sila-brzina i snaga-brzina

#### 1.2.3.1. Osnovne karakteristike relacija sila-brzina i snaga-brzina

Relacija sila-brzina ( $F$ - $V$  relacija) predstavlja karakteristično svojstvo mišića koje diktira njegove mogućnosti za ispoljavanje snage. Ova relacija je proučavana na različitim nivoima, kao što su molekularni, jednoćelijski, kao i na nivou jednog (Hill, 1938) i više mišića zajedno (Kaneko i sar., 1983; Cormie i sar., 2011a). Dosadašnji rezultati su pokazali karakterističnu hiperboličnu krivu (Slika 3), koja opisuje inverznu relaciju između sile i brzine tokom koncentrične faze mišićne kontrakcije (Hill, 1938).



Slika 3. Relacije sila-brzina ( $F$ - $V$ ) i snaga-brzina ( $P$ - $V$ ) kod koncentrične kontrakcije skeletnih mišića (Zatsiorsky, 2000).

Kako se povećava brzina mišićne kontrakcije, smanjuje se mogućnost za ispoljavanje sile tokom iste kontrakcije. Pretpostavlja se da je za ovaj fenomen odgovorna interakcija između poprečnih mostova vlakana aktina i miozina, a delom i viskozni otpor koji se pri tom razvija. Naime, pošto je potrebno određeno vreme da se poprečni mostovi

zakače i otkaae, ukupan broj zakačenih poprečnih mostova se smanjuje sa povećanjem brzine mišićnog skraćenja. S tim u vezi, mišićna sila zavisi od broja zakačenih poprečnih mostova, pa se sa njihovim manjim brojem (sa većom brzinom skraćenja) smanjuje i sposobnost za ispoljavanje sile (Nikolić, 2003; Hong i Bartlett, 2008; Cormie, 2010a, 2011a).

Zbog međusobne povezanosti sile i brzine skraćenja mišića, maksimalna snaga je u stvari posledica idealne kombinacije submaksimalne sile i pripadajuće brzine (McMahon, 1984; Cormie i sar., 2011a). Iako je  $F$ - $V$  relacija prvo definisana na izolovanom mišiću (m. sartorius) žabe (Hill 1938), ona je kao takva potvrđena i kod mišića čoveka (Bosco i Komi, 1979; Kaneko i sar., 1983; Cormie i sar., 2011a). Maksimalna snaga je stoga određena parametrima  $F$ - $V$  relacije: maksimalnom izometrijskom silom ( $F_0$ ), maksimalnom brzinom ( $V_0$ ) i zakrivljenošću krive ( $a/F_0$  ili  $b/V_0$ ; gde su  $a$  i  $b$  koeficijenti).

Uticao tipa mišićnih vlakana na odnos sile i brzine je pokazao da spora mišićna vlakna imaju mnogo veću zakrivljenost linije od brzih, a osim toga, mišići koji imaju veću zakrivljenost su efikasniji od onih čija je kriva bila bliža pravoj liniji (Hill, 1938).

Ako mišić treba da brzo savlada veće opterećenje, ne može podjednako da razvije i silu i brzinu. Najveću snagu mišić ostvaruje pri brzini koja iznosi 30-40% od maksimalne brzine pri sili koja je oko 30% od maksimalne (Hill, 1938; Nikolić, 2003; Zatsiorsky, 2009). U literaturi se mogu naći podaci da ona može da se kreće i do 50% od maksimalne sile (Yamauchi i Ishii 2007; Yamauchi, 2009).

### 1.2.3.2. Značaj relacije sila brzina i snaga-brzina

$F$ - $V$  relacija opisana Hilovom jednačinom znatno utiče na sportsku praksu iz nekoliko razloga (Zatsiorsky, 2009):

1. Sila i brzina koje se razvijaju u srednjem opsegu njihovog odnosa u mnogome zavise od maksimalne izometrijske sile. Drugim rečima, maksimalna sila ostvarena u uslovima promenljivog intenziteta motoričkog zadatka, određuje silu koja se može ispoljiti u dinamičkim uslovima. Uticaj sile i brzine na maksimalnu silu u dinamičkim uslovima, veći je u pokretima sa relativno velikim opterećenjem i malom brzinom.

2. Kod veoma brzih pokreta nemoguće je ispoljiti veliku silu. Ako sportista suviše brzo izvodi prvu fazu pokreta, mogućnost primene velike sile u drugoj fazi pokreta može biti smanjena. Na primer, ako sportista prebrzo počne sa podizanjem tega sa poda (kada izvodi nabačaj), može se dogoditi da on ne proizvede maksimalnu silu u najvažnijem položaju – kada mu je teg blizu kolena.

3. Maksimalna snaga se u najvećem broju slučajeva postiže u srednjem opsegu sile i brzine. S obzirom na to da su sila i brzina obrnuto proporcionalne, snaga je maksimalna kada su sila i brzina u opsegu srednjih vrednosti, tj. kada predstavljaju približno trećinu maksimalne brzine i polovinu maksimalne sile. Kao rezultat toga, maksimalna snaga približno je jednaka šestini vrednosti koja se može postići ako sportista u isto vreme izvrši i maksimalnu silu i postigne najveću brzinu.

Merenje  $F$ - $V$  relacije tokom pokreta “*in vivo*” je komplikovan zahvat zbog različitog sastava mišićnih vlakana, anatomskih karakteristika zglobova i nivoa neuralne aktivacije (Zatsiorsky, 2009). Bez obzira na ova ograničenja, istraživanja  $F$ - $V$  relacije tokom složenih pokreta, mogu da kvantifikuju sposobnosti neuromišićnog sistema dok funkcioniše pod različitim opterećenjima. Ova informacija je esencijalna za razumevanje maksimalnog ispoljavanja snage tokom pokreta.



Uprkos prihvaćenoj činjenici da mehaničke osobine mišića (naročito  $F-V$  relacija) u velikoj mjeri određuju i uspešnost u gotovo svim sportskim disciplinama, istraživanja na polju mišićne mehanike u sportu su i dalje dosta retka, a za to su odgovorni navedeni faktori (Zatsiorsky, 2000):

1. Većina mehaničkih osobina mišića nije linearnog karaktera, što njihov matematički prikaz čini veoma kompleksnim.

2. Skoro nemoguće je odrediti čak i najosnovnije mišićne osobine “*in vivo*” i neinvazivno.

3. Vremenski tok promene mehaničkih osobina mišića (na primer sa povećanjem zamora) je nedovoljno poznat.

Predviđena istraživanja će, između ostalog, imati i za cilj da prevaziđu neke od navedenih nedostataka, kako bi dobili što bolji uvid u određene mehaničke osobine mišića. Naredno poglavlje, koje se tiče pregleda dosadašnjih istraživanja, biće uglavnom usmereno na proučavanje onih osobina mišića i metoda njihovog procenjivanja, koje su od značaja za problematiku ovog rada, a samim tim i za predložena buduća istraživanja koja treba da proizađu iz njega.

## 2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

U prethodnom poglavlju objašnjena je uloga mišića u lokomociji, kao i mehaničke osobine mišića, koje su značajne za ovaj rad. Jedna od najvažnijih mehaničkih osobina mišića je već pominjana  $F$ - $V$  relacija, koju često srećemo u udžbenicima iz fiziologije, biomehanike, teorije sportskog treninga i sl.  $F$ - $V$  relacija kod složenih pokreta će biti detaljno analizirana u narednih nekoliko poglavlja, pre svega na osnovu novije naučne literature. Zatim će biti analizirane različite metode za procenu  $F$ - $V$  i  $P$ - $V$  relacije, značaj parametara  $F$ - $V$  relacije, kao i značaj procenjivanja  $F$ - $V$  relacije kod različitih populacija. Na kraju ovog poglavlja biće predstavljeni nedostaci dosadašnjih istraživanja iz kojih je proizašla potreba da se sprovedu novi eksperimenti koji bi razrešili određene probleme koji se tiču izučavanja mehaničkih osobina mišića nogu.

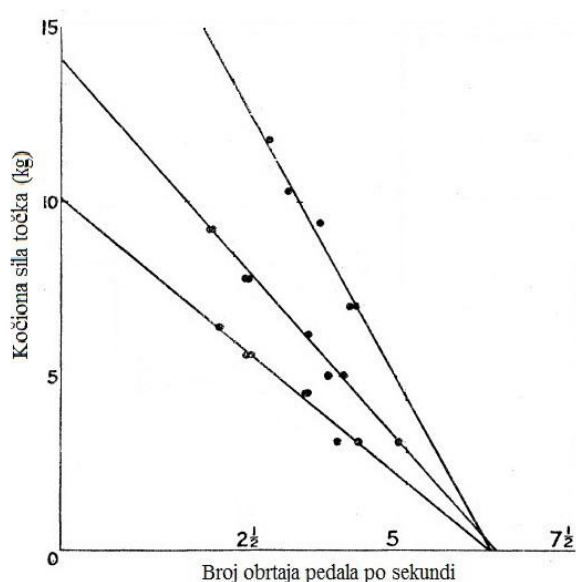
### 2.1. Relacija sila-brzina složenih pokreta

Mehanički rad je proizvod sile i puta, a snaga se, pored ostalog, može definisati i kao proizvod sile i brzine. Imajući to u vidu, mišićna  $F$ - $V$  relacija se može smatrati za jedan od ključnih faktora u određivanju fizičkih sposobnosti čoveka (Yamauchi i Ishi, 2007). Zbog toga je, za merenje mehaničkih osobina mišića “*in vivo*” veoma bitna pravilna evaluacija  $F$ - $V$  relacije.

Približno hiperbolična  $F$ - $V$  relacija (detaljno opisana u prethodnom poglavlju) kod “*in vitro*” i izolovanih mišićnih grupa se spominje još od prvih radova Fenn-a i Marsh-a (1935) i Hill-a (1938). Pripadajuća  $P$ - $V$  relacija takođe tipično otkriva kompleksni oblik, sa maksimalnom snagom ( $P$ ) kada mišić deluje protiv umerenog spoljašnjeg opterećenja ( $F$ ), pri srednjim brzinama skraćanja ( $V$ ). Kompleksnost  $F$ - $V$  i  $P$ - $V$  relacije u mnogome ograničava ne samo preciznost njihovih procena, preko različitih pokreta, već i njihovu primenljivost u osmišljavanju treninga, intervencija u rehabilitaciji i drugih vrsta modelovanja i optimizacija pokreta u sportu i rehabilitaciji.

Nasuprot tome, veliki broj studija je pokazao da je  $F$ - $V$  relacija, kod različitih složenih pokreta maksimalnog intenziteta, približno linearna, sa umerenim rasponima  $F$  (najčešće u vidu spoljašnjeg opterećenja) i pripadajućom  $V$ .

Prva studija u kojoj je predloženo da  $F$ - $V$  relacija bude linearna sprovedena je još davne 1928. Dickinson (1928) je posmatrala linearnu  $F$ - $V$  relaciju između kočione sile i brzine okretanja pedala na bicikl-ergometru (Slika 4).



Slika 4. Odnos između kočione sile točka i broja obrtaja pedale po sekundi pri maksimalnoj brzini za tri ispitanika (jedan muškarac i dve žene). Prema S. Dickinson, 1928.

Značajno je napomenuti, da je ovo istraživanje objavljeno pre nego što je Hill sproveo svoj eksperiment, sa izolovanim mišićem žabe i predložio hiberboličnu  $F$ - $V$  relaciju (Hill, 1938). Međutim, Dickinson nije obavila ovo istraživanje kako bi evaluirala test za procenu maksimalne snage kod ljudi, već kako bi potvrdila prethodno postavljenu Hilovu hipotezu: “prosečna spoljašnja sila, koja se ispoljava tokom pokreta maksimalnim angažovanjem, može se smatrati jednakom kao i konstantna teorijska sila koja je proporcionalno umanjena u odnosu na brzinu”.

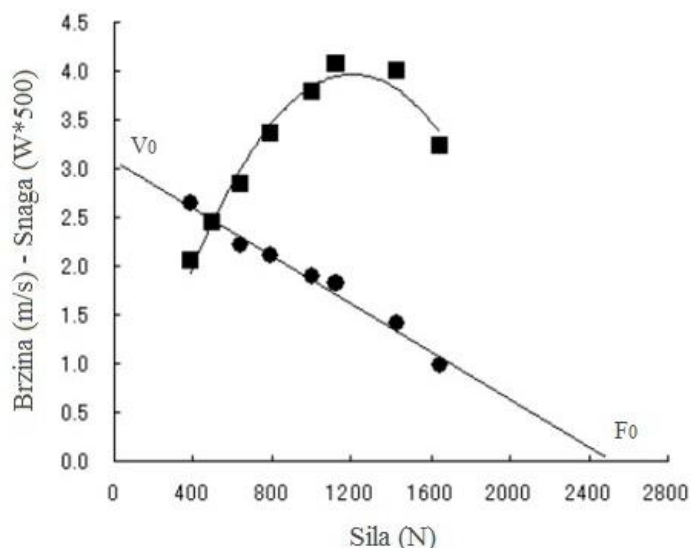
Dobijena  $F-V$  relacija, bila je uporediva sa novijim rezultatima. Ali deset godina nakon toga, Hill je predložio hiperboličnu  $F-V$  relaciju koja nije bila bazirana na otporu unutrašnjeg mišićnog trenja. Rezultati Dickinson-ove su zaboravljeni od strane tadašnjih fiziologa, a shodno tome i od strane ljudi zainteresovanih za istraživanja fizičkih sposobnosti čoveka.

Prošlo je mnogo godina dok naučnici nisu ponovo počeli da razmatraju korišćenje linearnog  $F-V$  modela kod testiranja mišićne funkcije složenih pokreta. Hiperbolična  $F-V$  relacija tokom maksimalnih voljnih kontrakcija, pri različitom nivou opterećenja, je prvo posmatrana kod osoba sa invaliditetom (Ralston i sar., 1949). Zatim je ista hiperbolična relacija posmatrana tokom pokreta u jednom zglobu (pregibanje lakta) uzimajući u obzir i ubrzanje i inerciju podlakta (Wilkie, 1950). Potom su počeli da se sve češće koriste izokinetički ergometri, kako bi se proučila relacija između sile i ugaone brzine, najčešće za mišiće opružače i pregibače zgloba kolena (Perrine i Edgerton, 1978).

Do sada je sproveden veliki broj istraživanja koja su pokazala da je  $F-V$  relacija linearna. U novijim istraživanjima, takvi rezultati su dobijeni na bicikl-ergometru (Driss i sar., 2002; Nikolaidis, 2012; Driss i Vandewalle, 2013), pri opružanjima nogu na raznim dinamometrima i kolicima sa otporom (Yamauchi i sar., 2009; Samozino i sar., 2012, 2014), kod pokreta rukama (Hintzy i sar., 2003; Nikolaidis, 2012), ili pri čučnjevima i skokovima uvis (Vandewalle i sar., 1987; Rahmani i sar., 2001; Sheppard i sar., 2008).

Navedena istraživanja podstiču pitanje koje glasi: zbog čega je kod složenih pokreta  $F-V$  relacija linearna, a ne hiperbolična? Za odgovor na ovo pitanje su posebno značajni rezultati istraživanja Yamauchi-a i saradnika (Yamauchi i sar., 2007, 2009, 2010). Oni su pokušali da oponašaju idealne izotonične uslove kao u prethodnim eksperimentima Hill-a (1938) i Fenn-a (1935) koji su rađeni na izolovanim mišićima životinja i nisu dobili hiperbolične već linearne relacije ( $r = 0.99$ , Slika 5). Pojedina novija istraživanja predlažu da približno linearna  $F-V$  relacija posmatrana kroz složene pokrete može poticati od dinamike segmenata tela (Bobbert, 2012), pre nego od raznih neuralnih mehanizama (Avela i sar., 1994; Yamauchi i Ishii 2007). Naime, prema Bobbert-u (2012), zbog dinamike

segmenata tela sve više i više se poništava mišićna sila, kako brzina postaje veća. Prema tome, nije potrebno posezati za neuralnim mehanizmima, kako bi se objasnila linearnost  $F$ - $V$  relacije, kao što je na primer međumišićna koordinacija (videti poglavlje 2.2.2. *Procena linearne  $F$ - $V$  i parabolične  $P$ - $V$  relacije u uslovima opružanja nogu*).



Slika 5.  $F$ - $V$  i  $P$ - $V$  relacija kod simultanog opružanja mišića kuka i kolena. Tačke = brzina; Pravugaonici = snaga; Linije = regresiona prava ( $r = -0.99$ ). Maksimalna izometrijska sila ( $F_0$ ) i maksimalna brzina bez opterećenja ( $V_0$ ) su dobijene ekstrapolacijom linearne regresije (Yamauchi i Ishii 2007).

Na osnovu prethodno navedenih istraživanja, kao i na osnovu rezultata drugih istraživanja koji će biti analizirani u nastavku,  $F$ - $V$  relacija se može dobiti pri izvođenju složenih pokreta maksimalnog intenziteta sa različitim opterećenjem koji će dati opseg  $F$  i  $V$ . Iz toga se može zaključiti da se podaci mogu modelovati linearnom regresijom:

$$F(V) = F_0 - aV \text{ (Jednačina 1)}$$

gde je  $F_0$  presek sile koji odgovara maksimalnoj izometrijskoj sili ( $F$ ), a  $a$  je nagib regresije koji odgovara  $F_0/V_0$  (gde je  $V_0$  presek brzine koji odgovara maksimalnoj brzini pri nultoj sili).

Kao rezultat,  $P$ - $V$  relacija izračunata iz *Jednačine 1* biće paraboličnog oblika:

$$P(V) = F(V) V = F_0 V - aV^2 \text{ (Jednačina 2)}$$

gde je maksimalna snaga:

$$P_{max} = (F_0 V_0)/4 \text{ (Jednačina 3)}.$$

Shodno prethodnim navodima,  $P_{max}$  će se dobiti na polovini maksimalne brzine ( $V_0/2$ ), koja se dobija pri polovini maksimalne sile ( $F_0/2$ ), koju mišići ispoljavaju u datom pokretu maksimalnog intenziteta (Vandewalle i sar., 1987; Samozino i sar., 2008, 2012). Jednostavnost  $F$ - $V$  relacije koja je prethodno opisana može biti od ključne važnosti za buduća istraživanja, kao i za praksu. Takva relacija se može koristiti za modelovanje i optimizaciju pokreta, kao na primer kod pronalaženja optimalne  $F$ - $V$  relacije, kako bi se obezbedilo izvođenje skokova maksimalnog intenziteta (Samozino i sar., 2012) ili za pronalaženje mehanizama odgovornih za bilateralni deficit (Samozino i sar., 2014). Skokovi uvis sa opterećenjem ili drugi složeni zadaci koji se izvode maksimalnim intenzitetom, mogu takođe obezbediti linearnu  $F$ - $V$  relaciju, koja će omogućiti sveobuhvatnu procenu mišićne sile, brzine i snage kod različitih populacija, kao i kod procena efekata različitih treninga i intervencija u rehabilitaciji (Yamauchi i sar., 2009; Cormie i sar., 2011b; Nikolaidis, 2012; Driss i Vandewalle., 2013).

Važno je napomenuti i razlike između različitih mehaničkih izlaza (spoljna sila, brzina pokreta, snaga, impuls, mehanički rad) i mehaničkih mogućnosti mišića nogu ( $F_0$ ,  $V_0$  i  $P_{max}$ ). Mehanički izlazi predstavljaju entitete koji se mogu meriti tokom pokreta i često se koriste da opišu dinamiku pokreta sa mehaničke tačke gledišta. Sa druge strane, mehaničke mogućnosti karakterišu mehanička ograničenja neuromišićne funkcije i odnose se na teorijske maksimalne vrednosti nekih mehaničkih izlaza, koje pojedinac može da dostigne (Samozino, 2012).

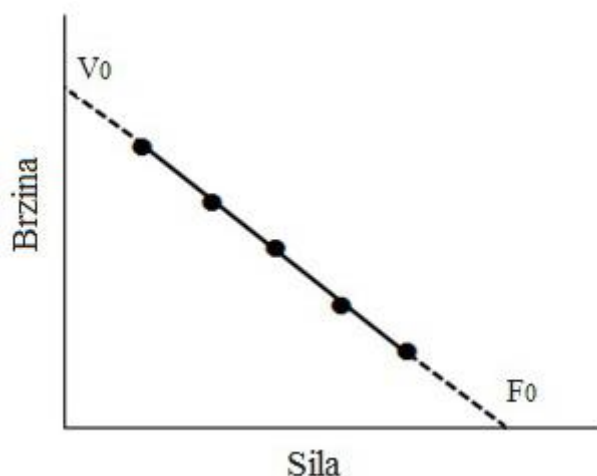
U nastavku će posebna pažnja biti posvećena mehaničkim mogućnostima mišića nogu, odnosno različitim metodama za procenu linearne  $F$ - $V$  relacije, parametrima linearne  $F$ - $V$  relacije ( $F_0$ ,  $V_0$ ,  $a$  i  $P_{max}$ ) i njihovom značaju za razumevanje mišićnih i neuralnih mehanizama kod opružača nogu u uslovima vršenja balističkih pokreta.

## **2.2. Procena linearne F-V i parabolichne P-V relacije i značaj parametara F-V relacije**

U prethodnom poglavlju objašnjeno je zašto je  $F$ - $V$  relaciju kod složenih pokreta bolje posmatrati kao linearnu nego kao hiperboličnu. Cilj ovog poglavlja je analiza istraživanja u kojima su se u različitim uslovima dobijale linearne  $F$ - $V$  relacije i parabolichne  $P$ - $V$  relacije (kod složenih pokreta) i uoče njihove prednosti i nedostaci. Poseban akcenat u analizi će biti i na parametrima  $F$ - $V$  relacije i njihovom značaju kroz testiranja u različitim uslovima.

### **2.2.1. Procena linearne F-V i parabolichne P-V relacije na bicikl-ergometru**

Sa pojavom sofisticiranih bicikl-ergometara, počela su da se vrše istraživanja sa ciljem da se dodatno prouči linearna  $F$ - $V$  relacija i svi njeni parametri. Iz toga je proizašao predlog testa na bicikl-ergometru za procenu mišićne funkcije, koji je nazvan  $F$ - $V$  test (Pernay i Crielard – po Driss-u, 2013).  $F$ - $V$  test počinje okretanjem predala sa opterećenjem od 1 kg. Nakon 5 minuta oporavka, otpor se povećava za 1 kg. Na isti način se povećavaju opterećenja, sve dok ispitanik više ne može da dostigne brzinu veću od 100 rpm. Prvo i drugo opterećenje se smatraju kao zagrevanje (1 i 2 kg) i uvežbavanje zadatka, a izvode se ponovo na kraju testa. Ispitanik ukupno vrši 8-10 kratkih, maksimalno brzih okretanja pedala (Nikolaidis (2012) sugeriše da je i 4 do 5 dovoljno). S obzirom da se posmatra linearna  $F$ - $V$  relacija između maksimalnih vrednosti  $F$  i  $V$ ,  $P$  odgovara pri 50%  $F_0$  i 50%  $V_0$  (Slika 6).



Slika 6. Obrnuta linearna relacija između kočione sile ( $F$ ) i pripadajuće brzine ( $V$ ) i njihovih teoretskih maksimalnih vrednosti ( $F_0$  i  $V_0$ ). Prema Nikolaidis-u (2012).

Na osnovu prethodnih studija i rezultata pomenutog eksperimenta, čini se da  $F$ - $V$  test na bicikl-ergometru daje uvid u mišićnu funkciju opružača kuka i kolena i u manjoj meri opružača skočnog zgloba (Dorel i sar., 2010).  $F$ - $V$  test u odnosu na druge testove ima prednost, jer obezbeđuje bitne informacije, ne samo za  $P_{max}$ , već i za parametre koji ga sačinjavaju, a to su  $F_0$  i  $V_0$  (Nikolaidis, 2012).

Driss i saradnici (2002) su među prvima pokušali da pokažu značaj parametara linearne  $F$ - $V$  relacije tj. konkurentnu validnost nekih od parametara te relacije. Konkretno, oni su hteli da dokažu da je ekstrapolisana vrednost sile (odnosno parametar presek sile,  $F_0$ ), pokazatelj sile i u dinamičkim uslovima. U prvom eksperimentu koji su sproveli, postojala je značajna korelacija između  $F_0$  dobijenog na bicikl-ergometru i maksimalne izometrijske sile mišića opružača kolena ( $MVC$ ) i brzine razvoja te sile ( $RFD$ ), tokom opružanja kolena na dinamometru ( $r = 0.66-0.81$ , odnosno  $r = 0.58-0.82$  kada se rezultat normalizuje u odnosu na masu mišića opružača kolena). U drugom eksperimentu dobijena je visoka korelacija  $F_0$  sa direktno merenom maksimalnom silom mišića opružača kolena, u izokinetičkim uslovima, pri različitim ugaonim brzinama ( $r = 0.49-0.83$ ) i kada se taj rezultat normalizuje u odnosu na masu mišića opružača kolena ( $r = 0.22-0.69$ ).



Osim validnosti, novija istraživanja bavila su se i testiranjima pouzdanosti pojedinih parametara  $F$ - $V$  relacije ( $F_0$ ,  $V_0$  i  $P_{max}$ ). U navedenom eksperimentu (Attiogbe; prema Drissu, 2013) ispitanici su bili studenti fakulteta fizičkog vaspitanja, čiji je zadatak bio da vrše okretanje pedala na bicikl-ergometru maksimalnim intenzitetom. Intraklas korelacioni koeficijent ( $ICC$ ) je bio veći od 0.9, a  $CV$  manji od 5% za  $F_0$  i  $P_{max}$  između dva merenja, što govori da su ovi parametri visoko pouzdani. Za parametar  $V_0$ ,  $ICC$  je bio niži zbog manje varijanse ovog parametara. Ipak  $CV$  od 2.4% za  $V_0$  govori da je i taj parametar pouzdan.

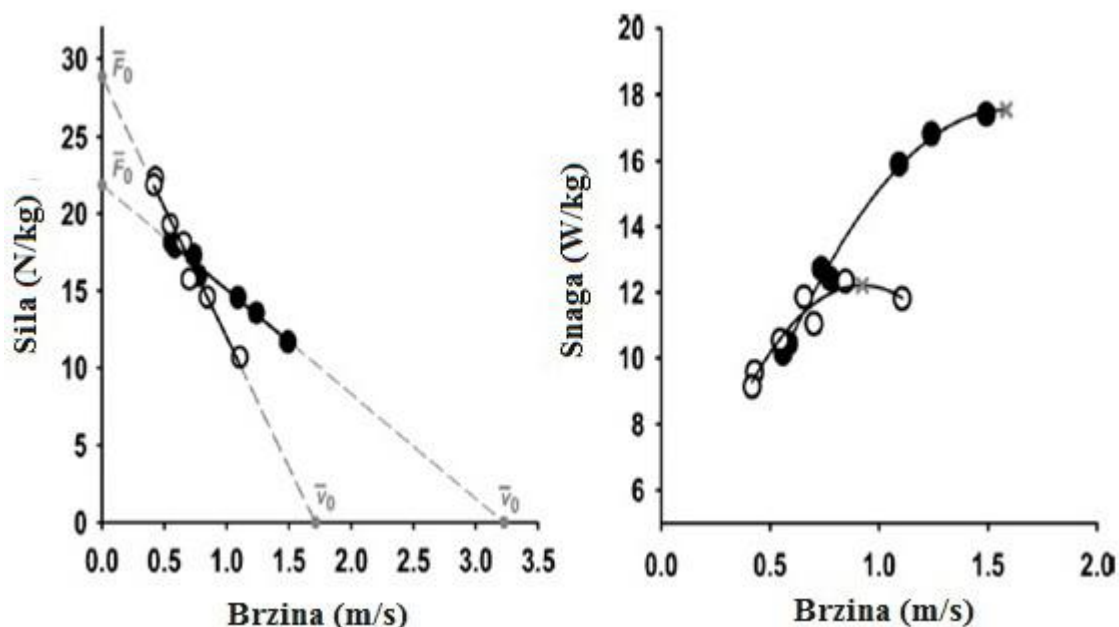
### 2.2.2. Procena linearne $F$ - $V$ i parabolične $P$ - $V$ relacije u uslovima opružanja nogu

Osim na bicikl-ergometru, linearna  $F$ - $V$  relacija je procenjivana i na različitim vrstama dinamometara gde je bilo zastupljeno simultano opružanje nogu u zglobovima kuka i kolena. U istraživanjima Yamauchi-a i saradnika (2007, 2009) korišćen je servo kontrolisani dinamometar. Ispitanici su vršili izotonična i izometrijska opružanja nogu u zglobovima kuka i kolena, kako bi se odredila linearna  $F$ - $V$  relacija (videti *Sliku 5*). Ekstrapolacijom linearne regresije su dobijene vrednosti  $F_0$  i  $V_0$  (videti *Jednačine 1, 2 i 3*). Autori sugerišu da su mehanizmi koji određuju linearnost  $F$ - $V$  relacije bar delimično pod uticajem međumišićne koordinacije. Naime, koordinacija između agonista i antagonista se mora uzet u obzir kod analize bilo kakavih složenih kretanja. U ovom radu, tokom opružanja mišića kolena i kuka, aktivacija mišića opružača kuka se smanjivala kako se smanjivalo opterećenje, dok se aktivacija mišića opružača kolena smanjivala kako se opterećenje povećavalo.

Yamauchi i sar. (2007) su pored određivanja linearosti  $F$ - $V$  relacije na izokinetičkom dinamometru u uslovima simultanog opružanja nogu, upoređivali i parametre te relacije sa rezultatima skoka uvis bez zamaha rukama ( $CMJ$ ). Parametri  $F_0$ ,  $V_0$  i  $P_{max}$  pozitivno koreliraju sa visinom skoka u uslovima  $CMJ$  ( $r = 0.48, 0.68, 0.76$  respektivno,  $p < 0.01$ ). Kada su normalizovali  $F_0$  sa telesnom masom ( $TM$ ),  $V_0$  sa dužinom nogu ( $DN$ ) i  $P_{max}$  sa  $TM$ , značajna korelacija nije pronađena kod poređenja  $F_0/TM$  sa  $CMJ$  ( $r = 0.24, p > 0.05$ ), već je pronađena kod poređenja  $V_0/DN$  sa  $CMJ$  ( $r = 0.56, p < 0.01$ ) i

$P_{max}/TM$  sa  $CMJ$  ( $r = 0.65, p < 0.01$ ). S obzirom da nisu dobijene značajne korelacije između  $F_0$  i  $F_0/TM$  ( $r = 0.12, p > 0.05$ ) i  $V_0$  i  $V_0/DN$  ( $r = 0.05, p > 0.05$ ) to ukazuje da bi  $F_0$  i  $V_0$  mogle biti relativno nezavisne varijable. Iz toga možemo da zaključimo da su  $F_0, V_0$  i  $P_{max}$  validni pokazatelji sposobnosti mišića opružača nogu, kada izvode složene pokrete. Iako ovi nalazi pokazuju da  $V$  kod netreniranih ispitanika ima veći uticaj na visinu skoka, poboljšanje rezultata  $F$  potencijalno može da poveća visinu skoka. Autori pretpostavljaju da i kod utreniranih ispitanika sa više brzih mišićnih vlakana  $F$  može imati važniju ulogu u određivanju performansi skoka nego  $V$ .

Sličnu aparaturu za testiranje  $F-V$  relacije kod složenih pokreta koristili su Samozino i saradnici (2012). Oni su prvo pokušali da simulacijom odrede uticaj  $P_{max}$  i  $F-V$  profila neuromišićnog sistema nogu na izvođenje balističkih pokreta. Tom prilikom su procenjivane individualne  $F-V$  relacije, kod opružanja nogu maksimalnog intenziteta, sa otporom od 0% do 240% od  $TT$  ispitanika (7 opterećenja). Istraživanje je pokazalo da je izvođenje balističkih pokreta pod uticajem ne samo  $P_{max}$ , nego i pod uticajem odnosa između  $F_0$  i  $V_0$ . Za svakog ispitanika postoji optimalna  $F-V$  relacija koja doprinosi maksimalnom učinku (Slika 7). Nagib  $F-V$  relacije ( $a$ ), tj. odnos između  $F_0$  i  $V_0$  su u direktnoj vezi sa optimalnom brzinom i maksimumom snage, a samim tim i sa optimalnim opterećenjem.



Slika 7.  $F$ - $V$  relacija (levo) i  $P$ - $V$  relacija (desno) kod dva ispitanika sa različitim  $F$ - $V$  profilima. Ispitanik 1 (prazni krugovi) ima “slabiji”  $P_{max}$  profil, a  $F$ - $V$  relaciju usmerenu ka sili. Ispitanik 2 (puni krugovi) ima “jači”  $P_{max}$  profil, a  $F$ - $V$  relaciju usmerenu ka brzini (Samozino i sar., 2012).

U narednom istraživanju Samozina i saradnika (2014), akcenat je bio na pokušaju da se izmeri uticaj karakteristika  $F$ - $V$  relacije na bilateralni deficit ( $BLD$ ), kod balističkog opuštanja mišića nogu. Pokazano je da su individualne linearne  $F$ - $V$  relacije bile visoko povezane ( $R^2 = 0.75$ – $0.99$ ,  $p = 0.012$ ), kao i polinomijalne  $P$ - $V$  relacije ( $R^2 = 0.70$ – $1.00$ ,  $p = 0.024$ ). Tokom vršenja balističkih pokreta mišića nogu (npr. skokvi udalj ili skokovi uvis, početna faza sprinta), neuralni faktori nisu razmatrani kao mogućnost koja prouzrokuje  $BLD$ . I kod sunožnog i kod jednonožnog odgurivanja, masa tela koja se odguruje je skoro identična. Stoga se kod sunožnog odgurivanja ostvaruju veće brzine pa samim tim i manje sile (u skladu sa zakonitostima  $F$ - $V$  relacije), što dovodi do bilateralnog deficita (u ovom radu  $36.7\% \pm 5.7\%$ ). Samim tim,  $F$ - $V$  relacije koje su okrenute više ka brzini (“brži” profil) imaće manje promene u silama, pa će sa dodatnim povećanjem brzine kod sunožnog odgurivanja manje gubiti na sili (manji  $BLD$ ). Ovo je samo još jedno u nizu istraživanja koji idu u prilog značaju daljeg istraživanja  $F$ - $V$  relacije i njenih parametara.

Još nekoliko istraživača je procenjivalo  $F$ - $V$  relacije na raznim vrstama dinamometara (Andersen i sar., 2005; Callahan i Kent Braun, 2011). Kada je u pitanju linearnost  $F$ - $V$  relacije, rezultati idu u prilog prethodnim nalazima Yamauchi-a i Samozina, a osim toga, parametri  $F$ - $V$  relacije se mogu koristiti u proceni mišićne funkcije kod simultanih opuštanja nogu sa različitim opterećenjem.

### 2.2.3. Procena linearne $F$ - $V$ i parabolične $P$ - $V$ relacije mišića ruku

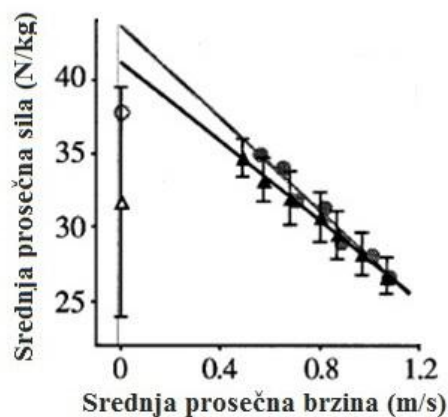
Linearna  $F$ - $V$  relacija kod složenih pokreta, u manjoj meri, posmatrana je i kod pokreta rukama. Od novijih istraživanja treba izdvojiti istraživanje Hintzy-ja i saradnika (2003), koji su određivali  $F$ - $V$  relaciju kod okretanja točkova rukama, sedeći u invalidskim kolicima. Sedamnaest žena je izvodilo 9 okretanja maksimalnim intenzitetom tokom 8 s sa opterećenjem od 0 do 4 Nm. Linearne  $F$ - $V$  relacije su se pokazale kao veoma povezane ( $r = 0.798$ – $0.983$ ,  $p < 0.01$ ). Dobijeni nalazi sugerišu da većina parametara  $F$ - $V$  relacije zavisi od tipa pokreta, ali da je  $F$ - $V$  relacija kod složenih pokreta slična kod okretanja točkova rukama sedeći u invalidskim kolicima i kod okretanja pedala rukama i nogama.

Nikolaidis (2012) je otišao korak dalje i uporedio odnos  $F$ - $V$  parametara kod ruku i nogu, kod devojčica i dečaka. Sedamnaest devojčica i 28 dečaka (plivači) su izvodili  $F$ - $V$  test (Driss i sar., 2013; videti poglavlje 2.2.1 *Procena linearne  $F$ - $V$  i parabolične  $P$ - $V$  relacije na bicikl-ergometru*). I kod ruku i kod nogu je pokazana visoko povezana linearna  $F$ - $V$  relacija. Ipak, uočene su bitne razlike u parametrima  $F$ - $V$  relacije (konkretno  $F_0$ ,  $V_0$ ,  $P_{max}$ ) između mišića ruku i nogu. Veće apsolutne vrednosti su zabeležene kod mišića nogu. Odnos  $V_0/F_0$  je nasuprot tome veći kod ruku. Tačnije ruke su imale “brži” profil (relativno visoku vrednost  $V_0$ ), a noge “snažni” profil (relativno visoku vrednost  $F_0$ ; Samozino, 2012). Razlike između linearne  $F$ - $V$  relacije ruku i nogu može biti objašnjena razlikom u mišićnoj masi i distribuciji mišićnih vlakana. Mišićne mogućnosti za razvijanje velikih sila su blisko povezane sa mišićnom masom (Lanza i sar., 2003; Metter i sar., 2004) i poprečnim presekom mišića (Maughan i sar., 1984). Takođe, na tu razliku mogu uticati i drugi faktori, kao što su sportska disciplina, način treniranja i povrede (Nikolaidis, 2012).

Na osnovu prethodnih istraživanja možemo da zaključimo da je  $F-V$  relacija kod mišića ruku i nogu veoma slična (po linearnosti), ali da se razlikuje u apsolutnim vrednostima njenih parametara. Ovi rezultati sugerišu, da je potrebno da odvojeno procenjujemo  $F-V$  relacije kod mišića ruku i nogu. Ipak, potrebno je još istraživanja kako bi se potvrdile sve pretpostavke vezane za proučavanje  $F-V$  relacija kod složenih pokreta mišića ruku.

#### **2.2.4. Procena linearne F-V i parabolične P-V relacije u uslovima polučučnja**

Prvi istraživači koji su proučavali linearanu  $F-V$  relaciju kod polučučnja su Rahmani i sar. (2001). Petnaest skijaša je izvodilo polučučanj i maksimalno izometrijsko naprezanje u poziciji polučučnja, na Smit mašini. Polučučanj je vršen sa opterećenjima od 60 do 180 kg, sa šipkom na ramenima. Proizvedena sila tokom polučučnja je bila linerana u odnosu na ostvarenu brzinu, kod svakog ispitanika pojedinačno ( $R^2 = 0.83-0.98$ ,  $p < 0.05$ ; Slika 8), dok je kriva  $P-V$  paraboličnog oblika kod svakog ispitanika pojedinačno ( $R^2 = 0.94-0.99$   $p < 0.01$ ). Ekstrapolisane vrednosti sile (tj. presek sile -  $F_0$ ) bile su za 23% veće od direktno merene izometrijske sile ( $p < 0.01$ ), a korelacija ove dve varijable nije statistički značajna. Autori to objašnjavaju činjenicom da je kod maksimalnog izometrijskog naprezanja u poziciji polučučnja, pozicija ispitanika takva da je ugao u zglobu kolena fiksiran na  $90^\circ$ , dok kod polučučnja ona varira od  $90^\circ$  do  $180^\circ$ . Ovo se kosi sa rezultatima Driss-a i saradnika (2002), gde je kod okretanja pedala na bicikl-ergometru postojala značajna korelacija između  $F_0$  i direktno merene  $F$ , u dinamičkim i izometrijskim uslovima.



Slika 8. Srednje vrednosti i standardne devijacije sile i brzine tokom maksimalnog polučučnja sa različitim opterećenjem (od 60-180 kg) za celu grupu (trouglovi) i za reprezentativnog ispitanika (tačke). Beli simboli predstavljaju direktno merenu izometrijsku silu (Rahmani i sar., 2001).

Rahmani i saradnici (2001) takođe sugerišu, da za unapređenje neke sposobnosti, sportisti moraju da sprovode trening sa specifičnim opterećenjima i brzinama pokreta koji najviše odgovaraju kretanju na takmičenju. Stoga je vrlo značajno da se ispitaju parametri  $F$ - $V$  relacije. Ekstrapolacija može izazvati ozbiljne greške i zato je bolje meriti izometrijsku silu, dok za merenje brzine treba da se izvodi polučučanj sa najlakišim opterećenjem, navode isti autori.

Iako je do sada analiziran veliki broj istraživanja koja pokazuju da je kod složenih pokreta,  $F$ - $V$  relacija linearna, Schilling i saradnici (2008) ne smatraju tako. Oni su ispitivali izvođenje polučučnja pri različitim brzinama (sporo i umereno) i različitim opterećenjima. Relacija koju su dobili je hiperbolična, ali oni ograničavaju njihove nalaze činjenicom, da  $F$ - $V$  relacija nije univerzalna (tj. stalno hiperbolična ili stalno linearna). Isti autori smatraju da je ona hiperbolična samo kada zadato ubrzanje nije maksimalno ili kada se koriste izokinetički uslovi testiranja.

### 2.2.5. Procena linearne F-V i parabolične P-V relacije u uslovima skokova

Do sada je sprovedeno vrlo malo istraživanja, u vezi sa  $F$ - $V$  relacijom, kod različitih vrsta skokova uvis. Istraživači uglavnom izbegavaju da se bave ovom problematikom jer smatraju da je teško dobiti pouzdane i validne rezultate, zato što postoji više stepeni slobode (tj. segmenata tela koji učestvuju u kretanju), nego recimo kod testiranja na dinamometrima ili bicikl-ergometrima (Sargeant i sar., 1984; Vandewalle i sar., 1985, 1987; Seck i sar., 1995). Ipak, skokovi uvis mogu da budu idealan model za testiranje neuromišićne funkcije nogu (Wilson i sar., 1993; McBride i sar., 1999; Baker i sar., 2001; Driss i sar., 2002; Cormie i sar., 2007; Harris i sar., 2007; Markovic i Jaric, 2007b). Naime, skokovi uvis se često svrstavaju u “najeksplozivnije” testove, pre svega zbog svog veoma kratkog trajanja i visokog intenziteta. Osim toga, široko su primenjivi i jednostavni za testiranje (Vandewalle i sar., 1987, Lara i sar., 2006; Samozino, 2008), a osim toga, visoko koreliraju sa izvođenjem drugih brzih i eksplozivnih pokreta maksimalnog intenziteta (npr. trčanje, promene pravca, šutiranje, bacanje (Kukulj i sar., 1999)). Zbog toga je važno da se istraži linearna  $F$ - $V$  relacija i kod različitih vrsta skokova uvis.

Samozino i sar. (2013) su pokušali da eksperimentalno dokažu uticaj  $F$ - $V$  mehaničkog profila na izvođenje skokova, nezavisno od efekta maksimalne snage ( $P_{max}$ ). Četrdeset osam vrhunskih sportista je izvodilo  $SJ$ , sa dodatnim opterećenjem od 0 do 100%  $TT$ . Istraživači su izračunavali srednje vrednosti  $F$  i  $V$  kako bi dobili individualne linearne  $F$ - $V$  relacije i vrednosti  $P_{max}$ . Zatim su izračunate aktuelne i optimalne  $F$ - $V$  relacije kako bi se odredio mehanički  $F$ - $V$  pomeraj. Pokazalo se, da uticaj  $F$ - $V$  relacije na uspešnost u skokovima, može da se odredi sa visokom preciznošću. To i eksperimentalno dokazuje, da je za uspeh u izvođenju balističkih pokreta, pored  $P_{max}$ , veoma bitan i mehanički  $F$ - $V$  profil mišića nogu. Prepostavlja se, da će ispitanici koji treniraju „horizontalno“ (sprinteri, fudbaleri), imati pomeraj ka  $V$  i ostvarivati  $P_{max}$  sa negativnim opterećenjem, dok će oni koji su trenirali sa velikim opterećenjem (ragbisti, bodibilderi), imati pomeraj ka  $F$  i ostvarivati  $P_{max}$  sa pozitivnim opterećenjem. Na ovaj način je moguće korigovati trening,

tako da bude u skladu sa optimalnim  $F$ - $V$  profilom sportiste, sa ciljem da se poveća njegova maksimalna snaga.

Cormie i sar. (2010a) su pratili promene neuralnih faktora, mehanike skokova, mišićne građe i  $F$ - $V$  relacije (ali ne i parametara te relacije  $F_0$ ,  $V_0$ ,  $a$  i  $P_{max}$ ) tokom 10 nedelja balističkog treninga, kod jedne grupe ispitanika i treninga snage kod druge.  $F$ - $V$  relacija je izračunata u uslovima  $SJ$  (sa šipkom na ramenima od 0-80%  $TT$ , sa 5 opterećenja, čiji je redosled izabran slučajnim odabirom). Trening snage je mnogo više uticao na povećanje  $F$ , nego na povećanje  $V$ , kod svih ispitanika. Ispitanici su mogli da proizvedu veće sile pri istim, pa čak i većim brzinama skraćanja. Balistički trening je manje uticao na promenu sile, ali nije bilo značajnih razlika između grupa. Međutim, ne postoji uvid u vrednosti  $F_0$  i  $V_0$  pre i posle treninga kao ni nagib  $F$ - $V$  prave, jer autori nisu primenili linearnu regresiju.

Sheppard i sar. (2008) su pokušali da pokažu pouzdanost  $F$ - $V$  relacije, kod skokova sa različitim opterećenjem. Dvadeset šest ispitanika je izvodilo  $CMJ$  bez opterećenja, sa 25% i sa 50% od  $IPM\check{c}$  sa šipkom na ramenima. Rezultati tog istraživanja su prikazani u *Tabeli 1*.



Tabela 1. Pouzdanost direktno merenih varijabli  $F$ - $V$  relacije u uslovima tri različita opterećenja (Sheppard i sar., 2008).

Opterećenje	Varijable	Razlike u SV (%)	CV (%)	ICC
Bez opterećenja	Maksimalna visina skoka (m)	1.7	7.2	0.77
	Maksimalna sila (N)	1.8	3.5	0.96
	Maksimalna brzina (m/s)	4.1	7.3	0.25
	Maksimalna snaga (W)	5.0	9.5	0.80
	Srednja snaga (W)	0.2	7.1	0.89
Telesna masa + 25% 1PM $\check{c}$	Maksimalna visina skoka (m)	3.8	8.3	0.71
	Maksimalna sila (N)	4.0	4.0	0.95
	Maksimalna brzina (m/s)	0.5	3.3	0.83
	Maksimalna snaga (W)	4.5	4.0	0.95
	Srednja snaga (W)	0.7	3.0	0.98
Telesna masa + 50% 1PM $\check{c}$	Maksimalna visina skoka (m)	-1.0	3.0	0.95
	Maksimalna sila (N)	3.6	3.1	0.97
	Maksimalna brzina (m/s)	-0.7	6.4	0.71
	Maksimalna snaga (W)	2.4	5.9	0.90
	Srednja snaga (W)	1.3	7.9	0.86

SV – srednja vrednost; CV – koeficijent varijacije; ICC – intraklas korelacioni koeficijent.

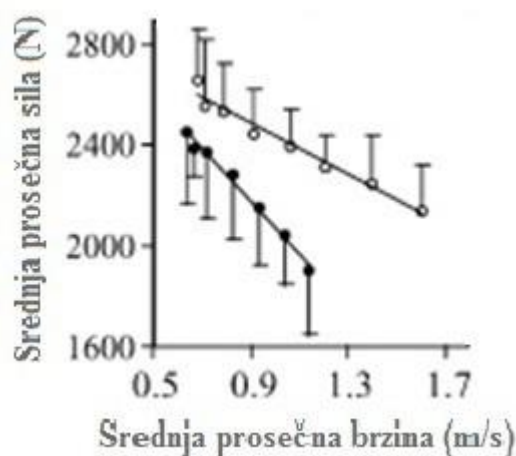
Glavni nalaz ove studije ukazuje da postoji visoka pouzdanost direktno merenih varijabli  $F$ - $V$  relacije ( $F$ ,  $V$  i  $P$ ), ali ne i njenih parametara dobijenih ekstrapolacijom ( $F_0$  i  $V_0$ ). Ova studija je koristila metodologiju Dugan-a i sar. (2004) koja predlaže direktno merenje  $F$ ,  $V$  i  $P$ .

Analizom prethodnih istraživanja možemo zaključiti da, iako postoji dosta problema koji se tiču procenjivanja  $F$ - $V$  relacije u uslovima skokova, moguće je unaprediti dosada korišćenu metodologiju, sa ciljem da se dodatno prouče mehaničke osobine mišića nogu, tokom izvođenja balističkih pokreta (naročito u uslovima skokova).

### 2.3. Procena linearne F-V i parabolične P-V relacije kod različitih populacija

Pregledom literature uočeno je, da su pojedini autori ispitivali osetljivost  $F-V$  relacije, tako što su testirali različite populacije ispitanika i da postoji potencijalni značaj u daljem istraživanju te oblasti. Pregled sledećih istraživanja ima za cilj da ukaže na važnosti, kao i na nedostatke testiranja  $F-V$  relacije kod različitih populacija.

$F-V$  relacije kod ispitanika istog nivoa snage mogu biti veoma različite. Osim građe mišića, tipa mišićnih vlakana, bitnu ulogu u ispoljavanju maksimalne snage imaju i dužina i masa nogu. Naime, Rahmani i sar. (2004) su proučavali linearnu  $F-V$  relaciju (individualne vrednosti  $R^2 = 0.77-0.99$ ,  $p < 0.01$ ), kod italijanskih i senegalskih sprintera, sa sličnim rezultatima na 100 m, istih godina, visine i težine. Ispitanici su izvodili polučučanj maksimalnim intenzitetom na Smit mašini. Opterećenja su se kretala u opsegu od 20 do 140 kg i postepeno su se povećavala po 20 kg. Na Slici 9 možemo videti  $F-V$  relacije italijanskih i senegalskih sprintera.



Slika 9. Srednje vrednosti i standardne devijacije sile i brzine tokom polučučnja sa različitim opterećenjem kod senegalskih (crne tačke) i italijanskih (bele tačke) sprintera (Rahmani i sar., 2004).

I Italijani i Senegalci imaju slične sposobnosti, kada se izvode spori pokreti sa maksimalnim opterećenjem. Ipak, Senegalci imaju slabije mišićne sposobnosti tokom brzih kontrakcija, što sugerise da oni imaju manji procenat brzih mišićnih vlakana. To se verovatno kompenzuje manjim mišićnim radom, zbog dužih i lakših nogu. Dužina nogu je još jedan od faktora koji, izgleda da ima bitnu ulogu u ispoljavanju snage (Samozino, 2008, 2013).  $F$ - $V$  relacije kod Senegalaca su više pomerene kad sili, dok je kod Italijana taj pomeraj više ka brzini.

Nasuprot prethodno analiziranom istraživanju, većina istraživanja koja su se bavila proučavanjem mišićnih osobina kod različitih populacija, vršena su na grupama koje su se pre svega razlikovale u snazi ispitanika. Već pominjano istraživanje Nikolaidis-a (2012) imalo je za cilj, pored ostalog, da uoči eventualne razlike parametara  $F$ - $V$  relacije između dečaka i devojčica istog uzrasta (14 godina). Ispitanici su izvodili  $F$ - $V$  test (Driss i sar., 2013; videti poglavlje 2.2.1 *Procena linearne  $F$ - $V$  i parabolične  $P$ - $V$  relacije na bicikl-ergometru*) na bicikl-ergometru i ergometru za okretanje pedala rukama. U Tabeli 2, su prikazani rezultati tog istraživanja. Dečaci i devojčice se razlikuju skoro u svim parametrima  $F$ - $V$  relacije. Izuzetak su odnosi  $F_0$ ,  $V_0$  i  $P_{max}$  između ruku i nogu i parametar  $F_0$ .

Tabela 2. Razlike u parametarima F-V relacije mišića ruku i nogu i njihovog odnosa, kod dečaka i devojčica istog uzrasta, pri okretanju pedala maksimalnim intenzitetom (Nikolaidis, 2012).

Aktivna muskulatura	F-V parametri	Dečaci (SV ± SD)	Devojčice (SV ± SD)
Noge	$F_0$ (N)	148 ± 40*	136 ± 37
	$V_0$ (rpm)	191 ± 21*	166 ± 14
	$V_0/F_0$ (rpm/N)	1.37 ± 0.36	1.31 ± 0.38
	$P_{max}$ (W)	709 ± 210*	565 ± 162
Ruke	$F_0$ (N)	72 ± 22	59 ± 20
	$V_0$ (rpm)	153 ± 32*	125 ± 18
	$V_0/F_0$ (rpm/N)	2.36 ± 0.97	2.31 ± 0.78
	$P_{max}$ (W)	272 ± 90*	188 ± 76
Odnos između ruku i nogu	$F_0$ (N)	0.50 ± 0.15	0.45 ± 0.14
	$V_0$ (rpm)	0.80 ± 0.13	0.76 ± 0.09
	$P_{max}$ (W)	0.40 ± 0.11	0.34 ± 0.09

SV – srednja vrednost; SD – standardna devijacija; \*Nivo statističke značajnosti  $p < 0.05$ .

Pretpostavlja se da veća razlika u snazi ( $P_{max}$ ) kod dečaka u odnosu na devojčice, potiče prevashodno od veće brzine ( $V_0$ ). Slične rezultate su dobili i Callahan i Kent-Braun (2011). U njihovom istraživanju, stari i mladi muškarci su u stanju zamora vršili opružanje nogu na izoinercionom dinamometru. Snažniji ispitanici, u ovom slučaju mlađi muškarci, imali su statistički značajno veće vrednosti  $V_0$  u odnosu na starije, dok vrednosti  $F_0$  nisu bile značajno različite. Treba istaći da je to suprotno nalazima koje su dobili Yamauchi i saradnici (2009). Između mlađih i starijih žena, koje su vršile opružanje nogu na izoinercionom dinamometru (sunožno i jednonožno), nisu dobijene statistički značajne razlike u odnosu na parametar  $V_0$ , dok mlađe žene imaju 20-30% veće vrednosti  $F_0$  i  $P_{max}$ . To može da znači da u ispoljavanju maksimalne snage ipak veću ulogu ima  $F$ .

U istraživanjima Cormie-a i sar. (2010a) i Sheppard-a i sar. (2008), su takođe ispitivane razlike između jakih i slabih ispitanika, u uslovima različitih skokova (*SJ* i *CMJ*), ali nisu korišćene ekstrapolisane vrednosti  $F$  i  $V$ , pa rezultati nisu direktno uporedivi sa sličnim istraživanjima (Rahmani i sar., 2004; Yamauchi i sar., 2009; Callahan i Kent-Braun, 2011; Nikolaidis, 2012).

Glavne razlike kod navedenih istraživanja su, pre svega, u snazi između grupa ispitanika (u jednoj grupi su bili jači, a u drugoj slabiji ispitanici). Rezultati su prilično nekonzistentni (ne zna se da li na  $P_{max}$  više utiče  $F_0$  ili  $V_0$ ). Osim toga, u nekim istraživanjima su se koristile ekstrapolisane vrednosti  $F$  i  $V$  (Rahmani i sar., 2004; Yamauchi i sar., 2009; Callahan i Kent-Braun, 2011; Nikolaidis, 2012), a u nekim su  $F$  i  $V$  direktno merene (Sheppard-a i sar., 2008; Cormie-a i sar., 2010a). Stoga, u narednim istraživanjima treba obuhvatiti ispitanike koji se razlikuju u snazi (npr. bodibilderi i netrenirani ili umereno fizički aktivni ispitanici) i validirati ekstrapolisane vrednosti  $F$  i  $V$  kako bi se one koristile umesto direktno merenih varijabli.

## 2.4. Nedostaci dosadašnjih istraživanja

Bez obzira na potencijalni značaj linearnog modela  $F$ - $V$  relacije na razne složene pokrete i dalje postoji veliki broj nedostataka koji trebaju da se otklone, pre nego što on počne rutinski da se koristi u testiranjima:

1. Još uvek ne znamo pouzdanost i validnost parametara  $F$ - $V$  relacije u uslovima skokova uvis.

2. Testirani pokreti kao što su skokovi uvis, ne dozvoljavaju širok raspon opterećenja, kao npr. izokinetički testirano simultano opružanje u zglobovima kuka i kolena (Yamauchi i sar., 2010) ili polučučanj (Rahmani, 2001, 2004). Kao posledica toga, posmatrani parametri  $F$ - $V$  relacije,  $F_0$ ,  $V_0$ ,  $a$  i  $P_{max}$  (videti *Jednačine 1, 2 i 3*), bivaju rezultat udaljene ekstrapolacije podataka iz relativno uskog raspona  $F$  i  $V$ . Samim tim, validnost tih parametara, za procenu funkcionalnih osobina testiranih mišićnih grupa još uvek ostaje nepoznanica. Stoga, treba biti dodatno ispitana i pretpostavka da  $F$ - $V$  relacija kod opružača nogu može biti precizno utvrđena i korišćena optimalnim računanjem odnosa između  $F_0$  i  $V_0$  (Samozino i sar., 2012).

3. Kod izvođenja različitih skokova uvis, veliki problem istraživača bilo je pitanje opterećenja. U tim istraživanjima je korišćeno više metoda za primenu spoljašnjih opterećenja, čija primena na različite načine može da deluju na kinematičke i kinetičke varijable skokova. Neki autori su koristili šipku na ramenima (Sheppard 2008; Nuzzo, 2010), različite prsluke (Pažin i sar., 2011 i 2013; Marković i sar., 2013), mehanička kolica sa motorom (Samozino i sar., 2012, 2013 i 2014) ili gume rastegnute na velikoj dužini (Pažin i sar., 2011 i 2013; Leontijević i sar., 2012 i 2013). Takođe, svaki od tih metoda različito utiče na šeme mišićne aktivacije i kinetičke šeme pokreta. U tom cilju, potrebno je utvrditi koja vrsta opterećenja može biti rutinski primenjivana u testiranjima mišića opružača nogu.

4. U određenom broju istraživanja, u kojima je primenjivalo više nivoa opterećenja, autori su zanemarivali uticaj redosleda opterećenja. U tim istraživanjima opterećenje se postepeno povećavalo (Rahmani i sar., 2001 i 2004; Andersen i sar., 2005; Schilling i sar., 2008; Sheppard i sar., 2008; Callahan i Kent Braun, 2011; Nikolaidis, 2012), odnosno podatak o redosledu primenjenih opterećenja uopšte nije naveden (Driss i sar., 2002; Toji i Kaneko, 2004). Određeni autori ipak su u svojim istraživanjima koristili metod slučajnog odabira opterećenja (Hintzy i sar., 2003; Lanza i sar., 2003; Yamauchi i sar., 2009; Dorel i sar., 2010; Nuzzo i sar., 2010; Leontijević i sar., 2012; Pazin i sar., 2012; Samozino i sar., 2012; Vuk i sar., 2012; Markovic i sar., 2013). U istraživanjima ovog tipa, zamor je bitan faktor koji može nepovoljno da utiče na dobijene rezultate kod određenih opterećenja i na taj način da “zavara” prave nalaze istraživanja. Kod metoda postepenog povećavanja opterećenja, veća opterećenja dolaze na kraju, kada su ispitanici već izveli veliki broj pokušaja, pa se postavlja pitanje da li su i koliko oni bili sposobni da izvedu zadati pokret maksimalnim intenzitetom. Stoga je, u svim narednim istraživanjima, potrebno koristiti metod slučajnog odabira opterećenja, kako bi se poništio efekat eventualnog (bilo lokalnog ili opšteg) zamora.

5. Iz prethodne analize možemo videti, da je u velikom broju studija, koje su se bavile istraživanjem  $F$ - $V$  relacija, u obzir uzimano samo tri parametra te relacije -  $F_0$ ,  $V_0$  i  $P_{max}$ . Samo neznatan broj studija u analizu je uključio i parametar nagiba  $F$ - $V$  regresije ( $a$ ), a upravo to može biti važan faktor u dostizanju maksimalnih mogućnosti u izvođenju pokreta (Samozino i sar., 2012, 2014).

6. U vezi sa prethodnim nedostacima, nije dovoljno ispitivana ni osetljivost svih parametara  $F$ - $V$  relacije. Tačnije, postoje kontradiktornosti u tome koji parametri više utiču na ispoljavanje snage kod mišića opružača nogu. Istraživanja Nikolaidis-a (2012) i Callahan i Kent-Braun-a (2011) idu u prilog tome da  $V_0$  utiče više na ispoljavanje snage mišića opružača nogu, dok je kod Yamauchi-a i sar. (2009) to  $F_0$ . U pojedinim istraživanjima koja su obuhvatala ispitivanje osetljivosti  $F$ - $V$  relacije, čak nisu ni korišćene ekstrapolisane vrednosti  $F$  i  $V$  (Sheppard, 2008; Cormie i sar. 2010a).

7. Još jedan nerazrešen problem u vezi sa  $F$ - $V$  relacijom tiče se mogućeg usvajanja testa za rutinsku procenu  $F$ - $V$  osobina mišića, baziranog na skokovima uvis sa spoljašnjim opterećenjem. Jedan od problema je odabir vrste skokova i tipa  $F$  i  $V$  varijabli koji će se koristiti. Naime, *CMJ* (Sheppard i sar., 2008; Limonta i sar., 2010), kao i *SJ* (Cormie i sar., 2010a; Samozino i sar., 2014) primenjivani su u cilju procenjivanja efekata opterećenja na kinematiku i kinetiku skokova. Treba obratiti pažnju i da zamah rukama kod skoka uvis menja kinetičke i kinematičke varijable skoka, kao na primer maksimalnu snagu (Walsh i sar., 2007; Suzovic i sar., 2013). Slično tome, varijable koje su se koristile u proceni  $F$ - $V$  relacija poticale su ili od maksimalnih (Vanderwalle i sar., 1987; Sheppard i sar., 2008; Yamauchi i sar., 2009; Cormie i sar., 2010a) ili od prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$  (Rahmani i sar., 2001; Samozino i sar., 2012, 2014).

Bez obzira na razna ograničenja, ispitivanje  $F$ - $V$  relacije u složenim pokretima, pokazuje sposobnost celokupnog neuromišićnog sistema da funkcioniše pri različitim spoljašnjim opterećenjima, a to je esencijalna informacija za razumevanje mišićne funkcije tokom dinamičkih složenih pokreta (Cormie, 2010a). Navedeni nedostaci su verovatno samo neki, koji se mogu izdvojiti iz različitih istraživanja ove oblasti. Imajući u vidu nedostatke u dosadašnjim istraživanjima, može se pretpostaviti osnovanost istraživanja u cilju njihovog otklanjanja.



### 3. PROBLEM, PREDMET, CILJ I ZADACI ISTRAŽIVANJA

#### Problem istraživanja

*Problem* istraživanja je nedovoljno saznanje o mehaničkim osobinama mišićnog sistema nogu, posebno kada ti mišići deluju u “ekološki validnim” uslovima simultane ekstenzije nogu, uobičajene za veliki broj prirodnih kretanja čoveka. Jedan od važnijih uzroka tome je nedostatak evaluirane metode za takve procene, odnosno za takva merenja.

#### Predmet istraživanja

*Predmet* ovog istraživanja je ispitivanje mehaničkih osobina mišića nogu kod složenih balističkih pokreta primenom nove metode i njena evaluacija.

#### Ciljevi istraživanja

Glavni *cilj* ovog istraživanja je da se utvrde i analiziraju mehaničke osobine mišića nogu preko linearne  $F-V$  relacije primenom pozitivnog i negativnog spoljašnjeg opterećenja, u uslovima različitih skokova uvis.

Pojedinačni *ciljevi* istraživanja će biti realizovani u 2 eksperimenta.

**Eksperiment 1 - Procena oblika  $F-V$  i  $P-V$  relacije opružača nogu kod različitih vrsta skokova sa različitim opterećenjem - pouzdanost i konkurentna validnost:**

1. Da se ispita oblik i povezanost  $F-V$  i  $P-V$  relacija.
2. Da se ispita pouzdanost  $F-V$  relacija.
3. Da se ispitaju razlike između parametara  $F-V$  relacija.
4. Da se ispita konkurentna validnost parametara  $F-V$  relacija.

**Eksperiment 2 - Procena osetljivosti  $F$ - $V$  relacije za uočavanje razlika u mišićnoj sili i snazi:**

1. Da se ispita osetljivost  $F$ - $V$  relacija na ispitanicima različite fizičke pripremljenosti.
2. Da se uporede parametri  $F$ - $V$  relacija dobijenih iz različitih skokova i različitih tipova  $F$  i  $V$  varijabli na ispitanicima različite fizičke pripremljenosti.

**Zadaci istraživanja**

*Zadaci* koje treba realizovati kako bi se ostvarili postavljeni ciljevi istraživanja:

1. Formirati grupe ispitanika na osnovu definisanih kriterijuma.
2. Izvršiti procenu morfološkog statusa ispitanika.
3. Izmeriti  $MVC$  mišića opružaća kolena dominantne noge.
4. Izmeriti  $IPM\check{c}$ .
5. Registrovati sile reakcije podloge tokom skokova sa različitim opterećenjima posebno za *Eksperiment 1* i *Eksperiment 2*.
6. Izračunati maksimalne i srednje vrednosti sile, brzine i snage.
7. Izvršiti obradu podataka.
8. Proceniti oblik  $F$ - $V$  i  $P$ - $V$  relacije linearnim i polinomijalnim regresionim modelom.
9. Izvršiti statističku analizu dobijenih podataka.
10. Prikazati i interpretirati nalaze.

## 4. HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

Na osnovu detaljne analize relevantnih istraživanja, postavljene su hipoteze, koje će biti ispitane u 2 eksperimenta.

U vezi sa *Eksperimentom 1 - Procena oblika  $F-V$  i  $P-V$  relacije opružaća nogu kod različitih vrsta skokova sa različitim opterećenjem - pouzdanost i konkurentna validnost*, postavljene su sledeće hipoteze:

*Hipoteza 1.*  $F-V$  relacije su linearne, a  $P-V$  relacije parabolične.

*Hipoteza 2.*  $F-V$  i  $P-V$  relacije su visoko povezane.

*Hipoteza 3.* Parametri  $F-V$  relacija su pouzdani.

*Hipoteza 4.* Parametri  $F-V$  relacija su validni u odnosu na direktno merenu mišićnu silu i snagu.

U vezu sa *Eksperimentom 2 - Procena osetljivosti  $F-V$  relacije za uočavanje razlika u mišićnoj sili i snazi*, postavljena je sledeća hipoteza:

*Hipoteza 1.* Parametri  $F-V$  relacija su osetljivi za ocenu razlika između ispitanika različite fizičke pripremljenosti.

## 5. PROCENA OBLIKA F-V I P-V RELACIJE OPRUŽAČA NOGU KOD RAZLIČITIH VRSTA SKOKOVA SA RAZLIČITIM OPTREĆENJEM - POUZDANOST I KONKURENTNA VALIDNOST (EKSPERIMENT 1)

U sklopu realizovanja istraživanja, *Eksperiment 1* je uključivao merenja koja su bila sprovedena u četiri odvojena dana. Sva merenja bila su sprovedena u Metodičko-istraživačkoj laboratoriji (MIL) Fakulteta sporta i fizičkog vaspitanja u Beogradu, u toku 30 dana.

Poglavlje 5 napisano je na osnovu publikovanog rada u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21) – *European Journal of Applied Physiology* pod nazivom: “*Force-velocity relationship of leg extensors obtained from loaded and unloaded vertical jumps*”.

### 5.1. Uvod

Mehaničke osobine mišića i mišićog sistema uopšte, su često predmet istraživanja. To je pre svega zbog njihovog značaja za razumevanje građe i funkcije mišićno-skeletnog sistema kod čoveka, kao i zbog traženja novih mogućnosti za poboljšanje efikasnosti različitih sportskih treninga i intervencija u rehabilitaciji kod različitih populacija (Frost i sar., 2010; Cormie i sar., 2011a). Istraživanja na ovu temu su naročito bila usmerena na sposobnosti mišićnog sistema da ispolji veliku silu ( $F$ ), pri velikoj brzini pokreta ( $V$ ), a shodno tome i maksimalnu snagu ( $P$ ).

Približno hiperbolična  $F$ - $V$  relacija kod “*in vitro*” i izolovanih mišićnih grupa se spominje još od radova Fena i Marša (Fenn i Marsh, 1935) i Hila (Hill, 1938). Pripadajuća  $P$ - $V$  relacija, takođe otkriva kompleksni oblik sa maksimalnom  $P$  kada mišić deluje protiv umerenog spoljašnjeg opterećenja, pri srednjim brzinama skraćanja. Kompleksnost  $F$ - $V$  i  $P$ - $V$  relacije u mnogome ograničava, ne samo preciznost njihovih procena preko različitih funkcionalnih pokreta, već i njihovu primenu u sportskim treninzima, intervencijama u rehabilitaciji i fizikalnoj medicini. Međutim, veliki broj studija je pokazao da je  $F$ - $V$

relacija kod različitih složenih pokreta maksimalnog intenziteta, približno linearna, sa umerenim rasponima  $F$  (tipično manipulirano sa spoljnim opterećenjem) i pripadajućom  $V$ . Takvi rezultati su dobijeni na bicikl-ergometru (Driss i sar., 2002; Nikolaidis, 2012; Driss i Vandewalle, 2013), pri sunožnim opružanjima nogu na raznim vrstama dinamometra (Yamauchi i sar., 2009; Samozino i sar., 2012, 2014), kod pokreta koji se izvode rukama (Hintzy i sar., 2003; Nikolaidis, 2012), pri čučnjevima maksimalnim intenzitetom (Rahmani i sar., 2001) i skokovima uvis (Vandewalle i sar., 1987; Sheppard i sar., 2008; Samozino i sar., 2013). Rezultati u istraživanju Bobberta (2012) sugerišu, da približno linearna  $F$ - $V$  relacija posmatrana kroz složene pokrete, može poticati od dinamike segmenata tela, pre nego od raznih neuralnih mehanizama (Avela i sar., 1994; Yamauchi i Ishii 2007). Prema tome,  $F$ - $V$  relacija se može dobiti izvođenjem složenih pokreta maksimalnog intenziteta, primenom pozitivnog i negativnog opterećenja, sa različitim opsegom  $F$  i  $V$ . Iz toga možemo zaključiti da se takvi podaci mogu modelovati linearnom regresijom:

$$F(V) = F_0 - aV \text{ (Jednačina 1)}$$

gde je  $F_0$  presek sile koji odgovara maksimalnoj izometrijskoj sili ( $F$ ), a  $a$  je nagib regresije koji odgovara  $F_0/V_0$  (gde je  $V_0$  presek brzine, koji odgovara maksimalnoj brzini pri nultoj sili). Kao rezultat,  $P$ - $V$  relacija izračunata iz *Jednačine 1* biće paraboličnog oblika:

$$P(V) = F(V) V = F_0 V - aV^2 \text{ (Jednačina 2)}$$

gde je maksimalna snaga:

$$P_{max} = (F_0 V_0)/4 \text{ (Jednačina 3).}$$

Shodno tome,  $P_{max}$  će biti na polovini maksimalne brzine ( $V_0/2$ ), koja se dobija pri polovini maksimalne sile ( $F_0/2$ ), koju mišići ispoljavaju u datom pokretu maksimalnog intenziteta (Vandewalle i sar., 1987; Samozino i sar., 2008, 2012). Jednostavnost  $F$ - $V$  relacije, koja je prethodno opisana, može biti od ključne važnosti za buduća istraživanja, kao i za praksu. Takva relacija se može koristiti za modelovanje i optimizaciju pokreta, kao

na primer, kod pronalaženja optimalne  $F$ - $V$  relacije kako bi se obezbedilo izvođenje skokova maksimalnog intenziteta (Samozino i sar., 2012) ili za pronalaženje mehanizama odgovornih za bilateralni deficit (Samozino i sar., 2014). Skokovi uvis sa opterećenjem ili drugi složeni zadaci koji se izvode maksimalnim intenzitetom, mogu takođe obezbediti linearnu  $F$ - $V$  relaciju koja će omogućiti sveobuhvatnu procenu mišićne sile, brzine i snage kod različitih populacija, kao i kod procena efekata različitih treninga i intervencija u rehabilitaciji (Yamauchi i sar., 2009; Cormie i sar., 2011b; Nikolaidis, 2012; Driss i Vandewalle., 2013).

Bez obzira na potencijalni značaj linearne  $F$ - $V$  relacije kod raznih složenih pokreta i dalje postoje problemi koje treba razrešiti. Prvo, još uvek nije poznata pouzdanost parametara  $F$ - $V$  relacije. Drugo, testirani pokreti kao što su skokovi uvis, ne dozvoljavaju primenu širokog raspona opterećenja, kao na primer kod izokinetičkog dinamometra (Yamauchi i sar., 2010) ili kod čučnja (Limonta i Sacchi, 2010). Kao posledica toga, posmatrani parametri  $F$ - $V$  relacije,  $F_0$ ,  $V_0$ ,  $a$  i  $P_{max}$  (videti *Jednačine 1, 2 i 3*) bivaju produkt udaljene ekstrapolacije podataka iz relativno uskog raspona  $F$  i  $V$ . Samim tim, validnost tih parametara, za procenu funkcionalnih osobina testiranih mišićnih grupa, može biti narušena. S tim u vezi, treba biti dodatno ispitana pretpostavka da  $F$ - $V$  relacija kod mišića opružača nogu (koji deluju u uslovima skokova uvis) može biti precizno utvrđena i korišćena u optimalnom računanju odnosa između  $F_0$  i  $V_0$  (Samozino i sar., 2012). Većina studija koje su se bavile ispitivanjem  $F$ - $V$  relacija kod skokova uvis sa opterećenjem, uključivale su različite tipove skokova uvis, koji obuhvataju i one sa ciklusom izduženja i skraćanja (Sheppard i sar., 2008; Limonta i Sacchi, 2010) i one bez (Cormie i sar., 2010a; Samozino i sar., 2012). Treba obratiti pažnju da i zamah rukama, kod skoka uvis, menja kinetičke i kinematičke varijable skoka, kao na primer maksimalnu snagu (Walsh i sar., 2007; Suzovic i sar., 2013). Pored toga, još uvek nije poznato koji tipovi skokova uvis i drugih zadataka (koji uključuju opružanja mišića nogu), mogu obezbediti pouzdanu i validnu linearnu  $F$ - $V$  relaciju. Isto se odnosi i na tip varijabli koje su se koristile u istraživanjima ovog tima. Do sada su korišćene i maksimalne (Vandewalle i sar., 1987; Nuzzo i sar., 2008; Sheppard i sar., 2008; Yamauchi i sar., 2009; Cormie i sar., 2010a) i

prosečne (Rahmani i sar., 2001; Samozino i sar., 2012) vrednosti  $F$  i  $V$  za izračunavanje linearne  $F$ - $V$  relacije.

Iz svega navedenog proističu i ciljevi *Eksperimenta 1*. Prvi cilj tiče se ispitivanja oblika i povezanosti  $F$ - $V$  i  $P$ - $V$  relacije. Drugim ciljem treba ispitati pouzdanost parametara  $F$ - $V$  relacije, a u sklopu trećeg cilja biće ispitane razlike između parametara  $F$ - $V$  relacije. Četvrti cilj se odnosi na ispitivanje konkurentne validnosti parametara  $F$ - $V$  relacije. Kako bi proširili opseg  $F$ - $V$  relacije, kao vid spoljašnjeg opterećenja, koristiće se skokovi uvis sa pozitivnim i negativnim opterećenjem. Osim toga, koristiće se i različite vrste skokova uvis i snimati maksimalne i prosečne vrednosti  $F$  i  $V$ . Od nalaza se očekuje da doprinesu boljem razumevanju mehaničkih osobina i funkcije mišića opružaća nogu, kao i da omoguće budući razvoj metoda za rutinsko testiranje mišićne sile, brzine i snage.

## 5.2. Metode

Za realizaciju postavljenih ciljeva istraživanja primenjene su eksperimentalne metode prikupljanja podataka. Osim toga, izvršena je transversalna analiza morfološkog statusa i mehaničkih osobina mišića nogu. Kao osnovni primenjen je empirijski metod, a kao pomoćni statistički metod.

### 5.2.1. Uzorak ispitanika

Testiranje prethodno postavljenih hipoteza zahtevalo je odabir određenog broja ispitanika. Određivanje veličine uzorka bazirano je na podacima  $F$  i  $V$  iz prethodnih studija (Markovic i Jaric 2007b; Ugrinowitsch i sar., 2007; Pazin i sar., 2013) i izračunato primenom softvera G\*Power 3.1. Po Cohen-u (1988), za alfa nivo 0.05 i statističku snagu od 0.8, uzorak od 3-12 ispitanika je dovoljan da pokaže razlike u vrednostima  $F$  i  $V$ , u uslovima skokova uvis, sa spoljašnjim opterećenjem između 0.7 i 1.3  $TT$ . Na osnovu tih rezultata, angažovano je 10 odraslih, zdravih i fizički aktivnih muškaraca (godine  $23.4 \pm 3.0$ ;  $TM$   $77.3 \pm 8.0$  kg;  $TV$   $182.6 \pm 4.2$  cm; podaci su prikazani kao  $SV$  i  $SD$ ). Njihov  $ITM$  je  $23.1 \pm 2.5$  cm/kg<sup>2</sup>, a  $PM$   $9.7 \pm 2.5$  % . Ispitanici nisu bolovali od hroničnih bolesti i u

poslednjih 6 meseci nisu pretrpeli povrede koje bi mogle da utiču na rezultate testiranja. Njihov dnevni nivo fizičke aktivnosti je procenjivan standardnim IPAQ upitnikom (Taylor-Piliae i sar., 2006; videti poglavlje *Prilozi – prilog 7*). Pet ispitanika je prijavilo umeren nivo fizičke aktivnosti, a isto toliko prijavilo je visok nivo fizičke aktivnosti. Pre početka eksperimenta izrađen je pisani protokol eksperimenta koji sadrži sve potrebne informacije o istraživanju. Svi ispitanici su pročitali protokol i upoznali se sa tokom i ciljevima istraživanja, kao i sa mogućim rizicima koje nosi istraživanje. Nakon toga potpisali su pismenu saglasnost za učestvovanje u eksperimentu (videti poglavlje *Prilozi – prilog 6*), koja je u skladu sa Helsinškom deklaracijom i odobrena od strane Etičke komisije Fakulteta sporta i fizičkog vaspitanja u Beogradu.

### **5.2.2. Protokol eksperimenta**

Svaki ispitanik učestvovao je u 4 testiranja u razmaku od 5-7 dana između svakog. Pre testiranja, ispitanici su vršili standardnu proceduru zagrevanja (5 minuta okretanja pedala na bicikl-ergometru i 5 minuta vežbi oblikovanja i dinamičkog rastezanja). Svakom testu prethodilo je detaljno objašnjenje i odgovarajuća demonstracija. Testiranje su vršila po dva iskusna merioca.

Prvog dana testiranja, sprovedena je procena morfološkog statusa ispitanika, posle kojih je usledilo merenje *MVC* mišića opružača dominantne noge i uvežbavanje skokova sa opterećenjem.

Drugog dana, testiran je *IPM<sub>č</sub>*, posle kojeg su ispitanici nastavili sa uvežbavanjem skokova sa opterećenjem.

Trećeg i četvrtog dana, ispitanici su izvodili 42 skoka po testiranju (7 opterećenja × 3 skoka × 2 merenja), a njihov redosled je bio određen metodom slučajnog odabira, po tipu skoka i po opterećenju. Rezultati drugog merenja u trećem i četvrtom danu testiranja korišćeni su za izračunavanje pouzdanosti, a rezultati drugog merenja u četvrtom danu testiranja za sve ostale analize.



### 5.2.3. Eksperimentalne procedure

#### 5.2.3.1 Procena morfološkog statusa

Procena morfološkog statusa ispitanika vršena je na osnovu podataka prikupljenih merenjem visine tela (*TV*), mase tela (*TM*), izračunavanjem indeksa telesne mase (*ITM*) i procenta masti (*PM*). Tokom merenja ispitanici su bili minimalno obučeni (bosi i samo u šortsu), a merenja je obavio isti merilac.

##### Visina tela

Merenje *TV* vršeno je korišćenjem antropometra po Martinu, sa tačnošću merenja od 0.1 *cm*. Tokom merenja ispitanik se nalazio u standardnom stojećem položaju na vodoravnoj, čvrstoj podlozi sa položajem glave u kom je Frankfurtska ravan paralelna sa podlogom (Norton i sar., 2000). Stopala su bila sastavljena, a pete, sedalna regija i gornji deo leđa su dodirivali antropometar.

##### Masa tela

Merenje *TM* vršeno je na bioelektričnoj impedanci prema specifikacijama proizvođača (In Body 720, USA; *Slika 10*).

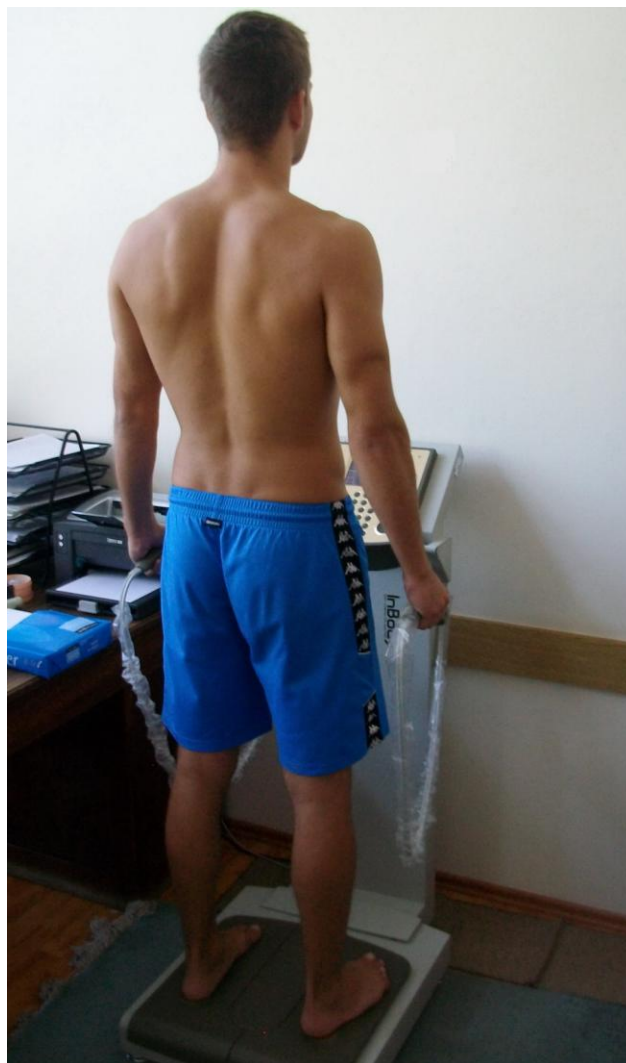
##### Procenat masti

Procenat masti (*PM*) je procenjivan metodom bioelektrične impedance prema specifikacijama proizvođača (*Slika 10*).

##### Indeks telesne mase

*ITM* računat je primenom standardne formule:

$$ITM = MT (kg) / TV (m)^2.$$



Slika 10. Procena morfološkog statusa metodom bioelektrične impedance.

### 5.2.3.2. Testovi za procenu mišićne sile

Procena mišićne sile u sprovedenom istraživanju korišćena je u cilju upoređivanja direktno merenih vrednosti sile, sa teoretskim (ekstrapolisanim) vrednostima. Sila opružaća nogu procenjena je testovima maksimalne voljne kontrakcije mišića opružaća nogu (*MVC*) i jednog podizanja maksimalnog tereta iz polučučnja (*IPM<sub>č</sub>*) na Smit mašini.

### Maksimalna voljna kontrakcija mišića opružaća nogu

MVC je testirana u izometrijskom režimu na izokinetičkom dinamometru Kin-Com 125AP, prema preporukama proizvođača (Chatex Corporation, Chattanooga, TN). Tokom testa ispitanik je sedeo u stolici, a natkolenica, trup i ramena su bili čvrsto fiksirani pomoću kaiševa. Distalni deo potkolenice (neposredno iznad malleolus lateralis-a) je preko manžetne fiksiran za polugu dinamometra, a osa rotacije poluge bila je poravnata sa centrom zgloba kolena (*Slika 11*). Zadatak ispitanika je bio da, izometrijskom kontrakcijom mišića, što brže i jače “pokušaju da opruže nogu” i zadrže maksimalnu kontrakciju oko dve sekunde. Testirana je samo dominantna noga (noga kojom ispitanik šutira loptu). Nakon jednog probnog pokušaja, sledila su po dva eksperimentalna pokušaja, koji su snimani za dalju analizu. Za dalju analizu uzet je bolji pokušaj. Pauza između ponavljanja bila je dva minuta.



*Slika 11. Testiranje maksimalne voljne kontrakcije mišića opružaća nogu.*

### Jedno podizanje maksimalnog tereta iz polučučnja

Testiranje  $IPM_{\check{c}}$  je sprovedeno prema do sada uspostavljenoj proceduri (McBride i sar., 1999; Markovic i Jaric, 2007b). Testiranje  $IPM_{\check{c}}$  izvršeno je uz pomoć Smit mašine na kojoj su bili postavljeni podupirači, kako bi se precizno odredila visina na kojoj se nalazila klizna šipka na ramenima ispitanika, u uslovima kada je ugao u zglobovima kolena bio  $90^{\circ}$ . Ispitanici su zauzimali položaj gde je kičmeni stub bio opružen, a položaj segmenata nogu takav, da vertikalna projekcija klizne šipke prolazi sredinom natkolenica, sredinom potkolenica i prednjim delom stopala. Instrukcija ispitanicima je podrazumevala, da opružanjem nogu iz polučučnja, pokušaju da savladaju maksimalno opterećenje, tj. da se podignu u uspravni položaj (Slika 12). Testiranje  $IPM_{\check{c}}$  podrazumeva serije podizanja tereta iz polučučnja, sa postepenim povećavanjem opterećenja. Stoga su sprovedene 4 serije, u svojstvu specifičnog zagrevanja sa: 30% (8 ponavljanja), 50% (5-6 ponavljanja), 75% (3 ponavljanja) i 90% (1 ponavljanje) od pretpostavljenog  $IPM_{\check{c}}$ . Za pretpostavljeni  $IPM_{\check{c}}$  uzeta je vrednost koja je odgovarala opterećenju koje je za 1.5 put veće od telesne mase ispitanika. Nakon specifičnog zagrevanja pristupilo se testiranju  $IPM_{\check{c}}$ . Ispitanici su imali maksimalno 3 pokušaja za procenu  $IPM_{\check{c}}$ . Pauza između pokušaja (uključujući i zagrevanje) trajala je od 3 do 5 minuta. Na kraju, treba pomenuti da se kod podizanja tereta iz polučučnja pored šipke sa tegovima podiže i telo, osim potkolenica i stopala (približno 88%  $TM$  prema standarnom Dempsterovom modelu). Stoga su rezultati  $IPM_{\check{c}}$  prikazani kao zbir podignutog tereta i 88%  $TM$  ispitanika ( $IPM_{\check{c}} + 88\% TM$ ).



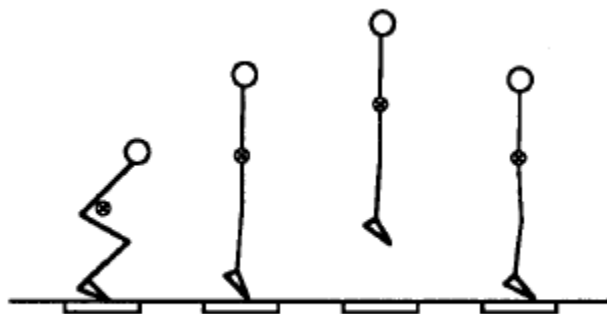
Slika 12. Testiranje jednog podizanja maksimalnog tereta iz polučučnja

### 5.2.3.3. Skokovi sa različitim opterećenjem i primena spoljašnjeg opterećenja

Glavni deo testiranja obuhvatao je 3 različita skoka. Vršeni su skok uvis iz polučučnja (*SJ*), skok uvis bez zamaha rukama (*CMJ*) i skok uvis sa zamahom rukama (*CMJa*).

#### Skok uvis iz polučučnja

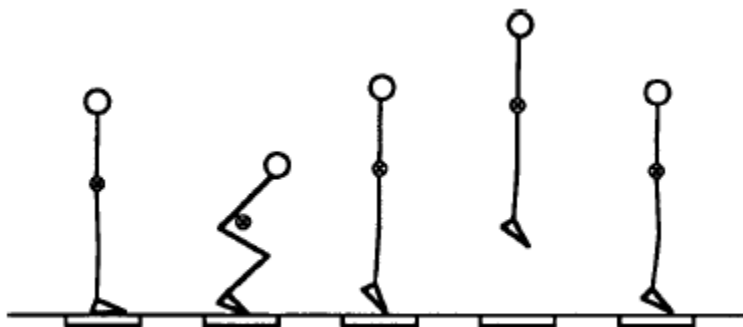
*SJ* se izvodio iz statičnog početnog položaja. Ugao u zglobu kolena je bio  $90^\circ$ , a ruke postavljene na bokove (*Slika 13*). Vizuelni pregled zapisa signala sile korišćen je da se detektuje eventualno spuštanje pre odskoka. U slučajevima kada se to detektovalo, ispitanici su ponavljali pokušaj.



Slika 13. Skica ispitanika prilikom izvođenja SJ. Centar mase (na slici označen kao ⊗) kreće se isključivo u vertikalnom pravcu. Skica pokazuje ispitanika u ključnim fazama skoka (Linthorne, 2001).

### Skok uvis bez zamaha rukama

Što se tiče CMJ, ispitanicima je data instrukcija, da iz uspravnog stava skoče što više (koristeći počučanj), držeći ruke na bokovima (Slika 14).



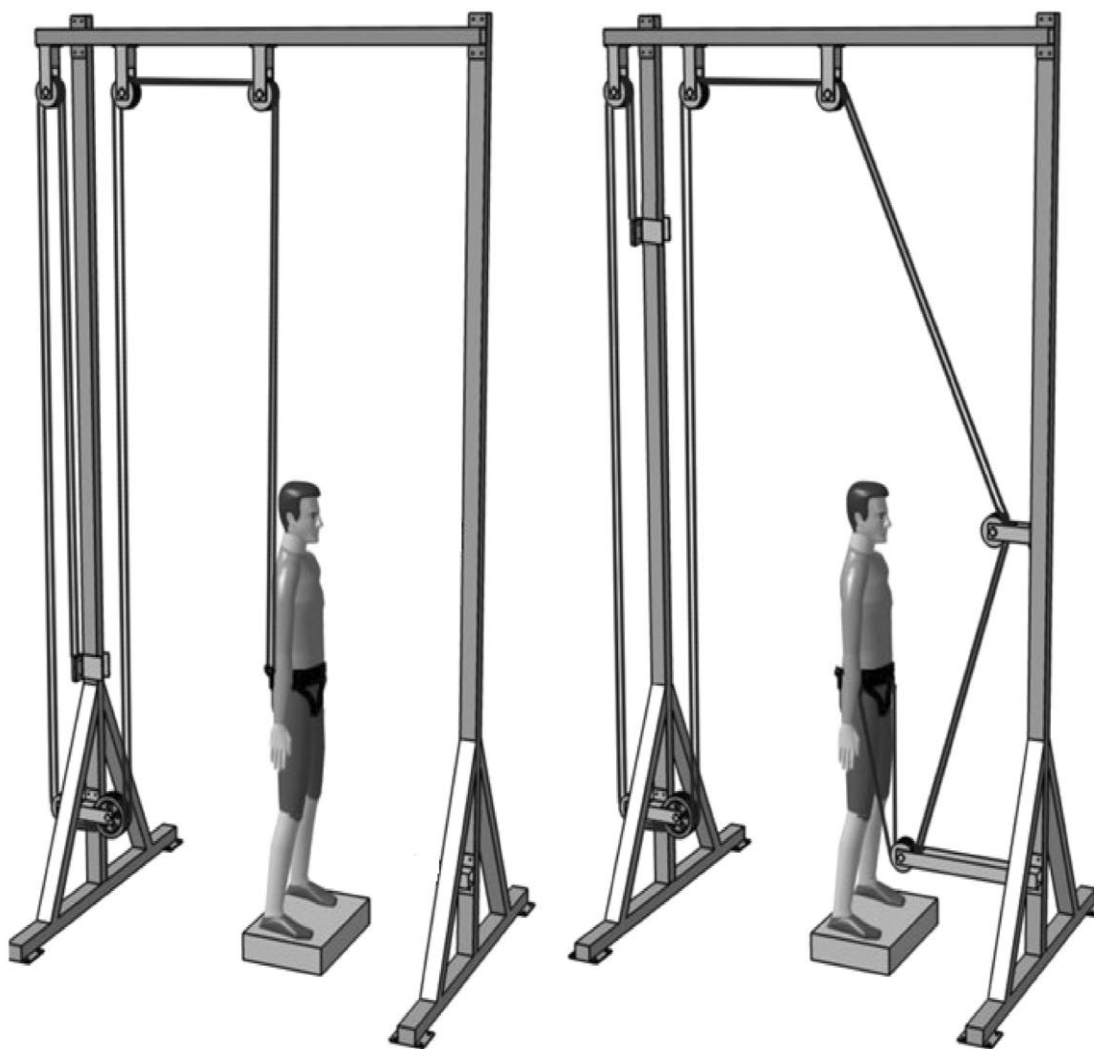
Slika 14. Skica ispitanika prilikom izvođenja CMJ. Centar mase (na slici označen kao ⊗) kreće se isključivo u vertikalnom pravcu. Skica pokazuje ispitanika u ključnim fazama skoka (Linthorne, 2001).

### Skok uvis sa zamahom rukama

Kod CMJa instrukcije su bile kao i za CMJ, ali su ispitanici koristili zamah rukama pri izvođenju skoka.

Period odmora između dva uzastopna skoka bio je 20 sekundi, a između različitih skokova i opterećenja približno 2 minuta. U skladu sa prehodnim studijama koje su sprovedene po sličnoj proceduri (Markovic i Jaric 2007b; Leontijevic i sar., 2012; Pazin i sar., 2013), zamor ispitanika nije se dovodio u pitanje. Ispitanicima je data instrukcija da izbegavaju naporne i neuobičajene aktivnosti 7 dana pre eksperimenta i tokom trajanja eksperimenta.

Za primenu spoljašnjeg opterećenja napravljena je konstrukcija koja simulira povećanje ili smanjenje telesne težine (*Slika 15*). Simulaciju dodatnog gravitacionog opterećenja moguće je izvršiti delovanjem konstantne spoljne sile u vertikalnom pravcu (Galantis i Woledge, 2003; Gosseye i sar., 2010; Griffin i sar., 1999). S tim u vezi, primenjeno elastično opterećenje (gume) mora biti dovoljno dugačko i dovoljno elastično kako bi obezbedilo relativno konstantnu silu tokom pokreta. Stoga su dve dugačke gumene trake (dužina 13.5 m, koeficijent elastičnosti 21 N/m) rastegnute preko sistema plastičnih koturova sa niskim nivoom inercije i trenja, kako bi se dobila sila koja deluje na gore (negativno opterećenje) ili na dole (pozitivno opterećenje) do 30% *TT* ispitanika. Zarad obezbeđivanja što stabilnijih uslova za izvođenje skokova, gume su bile zakačene na boku, u visini struka, uz pomoć alpinističkog pojasa (Calidris, Patzl, France). Na taj način su mogli da se izvode skokovi uvis bez prepreka, uz relativnu promenu dužine rastegnutih guma (do 4%). Ovi uslovi obezbeđivali su približno konstantno opterećenje tokom testiranja (Pazin i sar., 2011; Leontijevic i sar., 2012).



Slika 15. Shematski prikaz sprave za primenu pozitivnog (slika desno) i negativnog (slika levo) opterećenja. Prema Pazinu i sar., 2011.

Ispitanici su izvodili skokove na platformi sile (AMTI, BP600400; USA) dok je sistem sa gumama obezbeđivao ili pozitivno ili negativno opterećenje koje odgovara 10%, 20% i 30% njihove  $TT$ . S obzirom da je primenjeno opterećenje simuliralo promenu težine tela ( $TT$ ), onda se obeležavalo kao  $0.7 TT$ ,  $0.8 TT$ ,  $0.9 TT$ ,  $1.0 TT$ ,  $1.1 TT$ ,  $1.2 TT$ , i  $1.3 TT$  ( $1.0 TT$  je skok bez opterećenja). Precizno podešavanje opterećenja je vršeno preko platforme sile na kojoj su stajali ispitanici.



#### 5.2.4. Obrada podataka

Platforma sile dimanzija  $0.4 \times 0.6 \text{ m}$  (AMTI, Inc., Newton MA, USA; frekvencija snimanja  $1,000 \text{ Hz}$ ) kalibrisana je prema specifikaciji proizvođača. U softveru LabVIEW (National Instruments, Version 10.0, Austin, TX) napisan je program koji je korišćen za snimanje i obradu signala vertikalne komponente sile reakcije podloge ( $F$ ). Signal je zatim propušten kroz niskopropusni rekurzivni filter drugog reda ("Butterworth", frekvencija sečenja  $10 \text{ Hz}$ ), a brzina i pozicija centra mase su bile izračunate kroz postepenu integraciju ubrzanja dobijenog iz signala sile (Vanrenterghem i sar., 2001). Filtirani signal je nakon toga korišćen za izračunavanje maksimalnih i prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$  iz koncentrične faze skoka. Eksperimentalno zabeležena maksimalna snaga ( $P$ ) je procenjivana iz istih podataka i to kao maksimalni proizvod  $F$  i  $V$ .  $F$ - $V$  relacija je dobijena od varijabli  $F$  i  $V$  (odvojeno za maksimalne i prosečne vrednosti) za svih 7 opterećenja. Zatim su računane linearna i polinomijalna regresija (polinom drugog reda), za svaki komplet podataka, zajedno sa pripadajućim koeficijentima korelacije ( $r$ ) i njihovim intervalom pouzdanosti od 95%  $CI$ . Linearne regresije su nakon toga ekstrapolisane, kako bi se dobili preseči  $F$  ( $F_0$ ;  $F$  pri nultoj  $V$ ) i  $V$  ( $V_0$ ;  $V$  pri nultoj  $F$ ), nagib regresije ( $a = F_0/V_0$ ) i maksimalna snaga iz parametara linearne regresije ( $P_{max} = (F_0V_0)/4$ ).

#### 5.2.5. Statistička analiza podataka

Za sve varijable, pre primene glavnih statističkih procedura izračunate su srednja vrednost ( $SV$ ), standardna devijacija ( $SD$ ) i standardna greška ( $SE$ ). Pored toga, testirana je i normalnost distribucije varijabli korišćenjem Kolmogorov-Smirnov testa, kao i homogenost varijansi između uzrokovanih grupa korišćenjem Levenov testa. Sve varijable su pokazale odstupanje od normalnosti distribucije ispod praga značajnosti.

Za potvrdu *Hipoteze 1* i *Hipoteze 2*, korišćen je model linearne i polinomijalne regresije drugog reda (za  $F$ - $V$  relaciju) i polinomijalne regresije drugog reda za  $P$ - $V$  relaciju (sa pripadajućim pokazateljima povezanosti). Intervali pouzdanosti određivani su na nivou 95%  $CI$  korelacionog koeficijenta ( $r$ ) za  $F$ - $V$  relaciju, kako bi se potvrdila ili opovrgla

linearnost regresije (ukoliko  $r$  polinomijalne regresije ulazi u 95%  $CI$  intervala  $r$  linearne regresije, onda su se regresije smatrale linearnim).

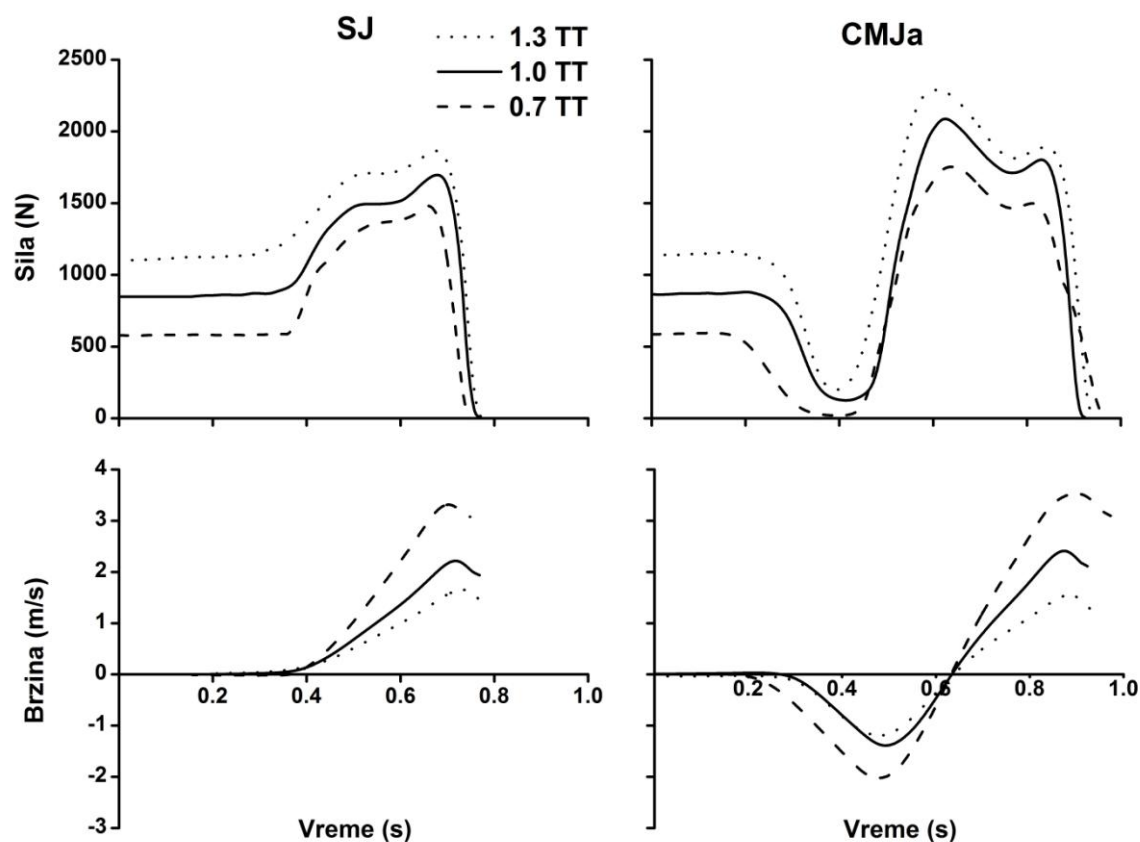
Za procenu pouzdanosti linearne regresije (koja se vezuje za *Hipotezu 3*), izračunate su standardna greška merenja ( $SEE$ ), koeficijent varijacije ( $CV\%$ ), intraklasni korelacioni koeficijent ( $ICC$ ; Hopkins, 2000) i razlike (T-test za zavisne uzorke) za  $F_0$ ,  $V_0$ ,  $a$  i  $P_{max}$ .

Dvo-faktorska  $ANOVA$  sa ponovljenim merenjem primenjivana je na parametre  $F$ - $V$  relacije ( $F_0$ ,  $V_0$ ,  $a$  i  $P_{max}$ ) kako bi se uočile razlike između 3 različita skoka ( $SJ$ ,  $CMJ$ ,  $CMJa$  – faktor *skok*) i 2 tipa varijabli (maksimalne i prosečne vrednosti  $F$  i  $V$  – faktor *varijabla*). Ista  $ANOVA$  sa Bonferoni post hoc testom je primenjena i na  $Z$ -transformisane  $r$  vrednosti (transformacija je vršena zarad dobijanja normalnosti raspodele). U slučaju značajnosti glavnog efekta bez interakcije, primenjivan je T-test za nezavisne uzorke (faktor *varijabla*) kako bi se uporedile zavisne varijable dobijene iz maksimalnih i prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ . Pored toga, jedno-faktorska  $ANOVA$  (faktor *skok*) je primenjivan kako bi se uporedile zavisne varijable dobijene u uslovima skokova  $SJ$ ,  $CMJ$  i  $CMJa$ . Bonferoni post hoc test je primenjivan u slučaju značajnih interakcija između faktora. Eta kvadrat ( $\eta^2$ ) je računat za sve  $ANOVE$ , gde su vrednosti veličine efekta od 0.01, 0.06 i preko 0.14 smatrane za male, srednje i velike (Cohen, 1988). Nivo statističke značajnosti bio je postavljen na  $p < 0.05$ . Sve statističke operacije su izvršene korišćenjem programa SPSS 19.0 (IBM, Armonk, NY) i Microsoft Office Excel 2007 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA).

Za potvrdu *Hipoteze 4* koja se tiče konkurentne validnosti, vrednosti  $F_0$  bile su korelirane sa vrednostima direktno merene sile mišića opružaća nogu ( $MVC$  i  $IPM_C$ ), a vrednosti  $P_{max}$  bile su korelirane sa direktno merenom  $P$ . Pirsonov koeficijent korelacije ( $r$ ) (Hopkins, 2000) je računat u svim slučajevima. Korelacije od 0.10 do 0.29 su se smatrale niskim, od 0.30 do 0.49 umerenim, a preko 0.50 visokim (Cohen, 1988).

### 5.3. Rezultati

Slika 16 prikazuje silu reakcije podloge ( $F$ ) i brzinu centra mase ( $V$ ), kod najlakšeg opterećenja od  $0.7 TT$ , bez opterećenja ( $1 TT$ ) i najtežeg opterećenja ( $1.3 TT$ ) u uslovima  $SJ$  i  $CMJa$  kod reprezentativnog ispitanika. Sa povećanjem spoljašnjeg opterećenja smanjenjuje se maksimalna brzina skoka, dok se sila reakcije podloge i trajanje skoka povećavaju.  $CMJ$  nije prikazan jer uobičajeno ima sličan profil sile i brzine kao  $CMJa$ .

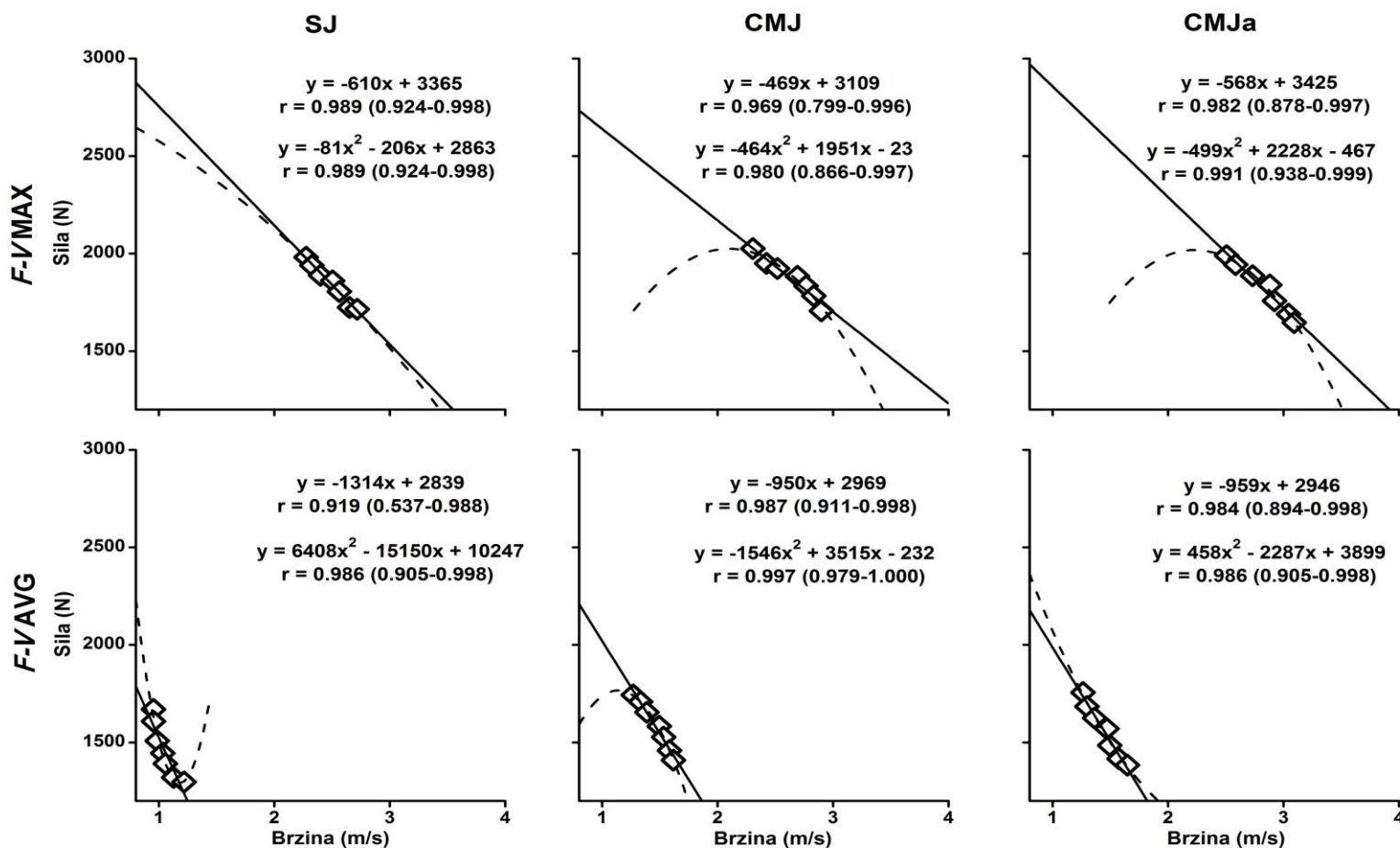


Slika 16. Sila reakcije podloge (gore) i brzina centra mase (dole) za reprezentativnog ispitanika pri u uslovima tri različita opterećenja i dva skoka. Vremenski zapisi su poravnati u odnosu na početak skoka (kod  $SJ$ ) ili u odnosu na trenutak prelaska iz ekscentrične u koncentričnu fazu skoka ( $CMJa$ ).

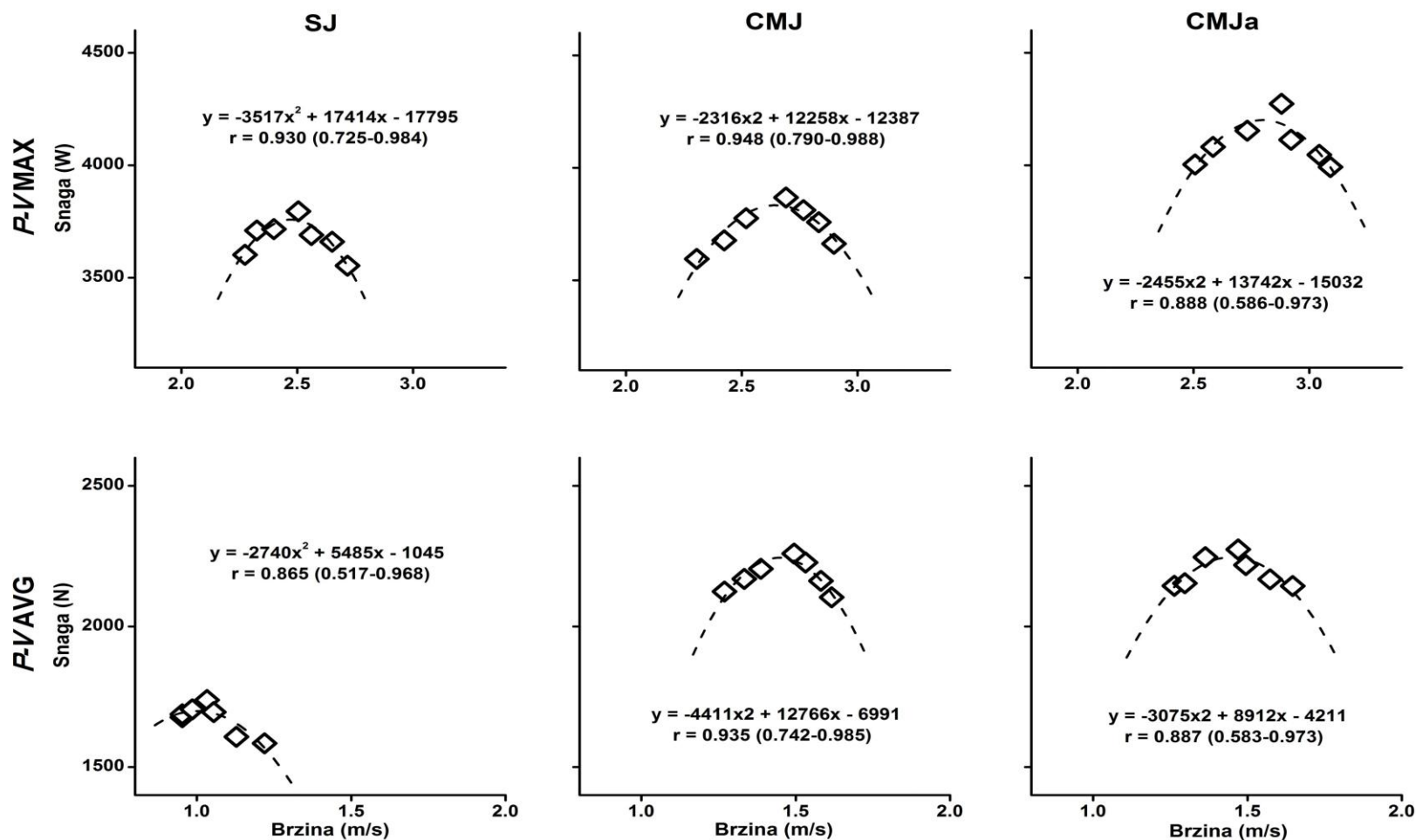
**Oblik i povezanost  $F$ - $V$  i  $P$ - $V$  relacije i pouzdanost parametara  $F$ - $V$  relacije**

*Slika 17* prikazuje silu reakcije podloge ( $F$ ) i brzinu centra mase ( $V$ ) kod *SJ*, *CMJ* i *CMJa* u uslovima 7 opterećenja. Linearna regresija (puna linija) i polinomijalna regresija drugog reda (isprekidana linija) su prikazane za sva tri skoka i oba tipa varijabli. Korelacioni koeficijenti za obe regresije su veoma visoki i u rasponu od 0.919 do 0.997 ( $p < 0.01$ ). Četiri polinomijalne regresije su konkavne, a dve konveksne. Važno je istaći da nijedan korelacioni koeficijent polinomijalnih regresija nije iznad nivoa 95 % *CI* linearnih regresija, što znači da nema statistički značajnih razlika između njih.

*Na Slici 18* prikazane su direktno merena snaga ( $P$ ) i brzina centra mase ( $V$ ) kod *SJ*, *CMJ* i *CMJa* u uslovima 7 opterećenja. Za sva tri skoka i oba tipa varijabli prikazana je polinomijalna regresija drugog reda (isprekidana linija). Korelacioni koeficijenti polinomijalne regresije su visoki i u rasponu od 0.865 do 0.948 ( $p < 0.01$ ). Sve polinomijalne regresije su konkavnog oblika.



Slika 17. Prosečne vrednosti sile reakcije podloge ( $F$ ) i brzine centra mase ( $V$ ) za svih 7 opterećenja kod svih ispitanika, korišćene za formiranje  $F$ - $V$  relacija. Podaci su dobijeni iz koncentričnih faza sva tri skoka ponaosob: SJ (levo), CMJ (sredina) i CMJa (desno). Prikazani su i podaci dobijeni iz maksimalnih vrednosti  $F$  i  $V$  (MAX; gore) i prosečnih (AVG; dole). Na slici su prikazani i linearni regresioni modeli (puna linija), kao i polinomijalni regresioni modeli drugog reda (isprekidana linija), zajedno sa jednačinama regresija i koeficijentom korelacija tih regresija.



Slika 18. Prosečne vrednosti direktno merene snage ( $P$ ) i brzine centra mase ( $V$ ) za svih 7 opterećenja kod svih ispitanika, korišćene za formiranje  $P$ - $V$  relacija. Podaci su dobijeni iz koncentričnih faza sva tri skoka ponaosob: SJ (levo), CMJ (sredina) i CMJa (desno). Prikazani su i podaci dobijeni iz maksimalnih vrednosti  $P$  i  $V$  (MAX; gore) i prosečnih (AVG; dole). Na slici je prikazan i polinomijalni regresioni model drugog reda (isprekidana linija), zajedno sa jednačinama regresija i korelacionim koeficijentom tih regresija.

*Tabela 3* prikazuje prosečne vrednosti parametara individualnih  $F$ - $V$  relacija, merene u dva različita testiranja. Osim razlika u apsolutnim vrednostima parametara  $F$ - $V$  relacija kod različitih skokova i tipova varijabli (za više detalja videti nastavak teksta), od velike važnosti su rezultati pouzdanosti navedenih parametara. Pouzdanost direktno merenih parametara linearne regresije ( $F = F_0 - aV$  (dakle:  $F_0$  i  $a$ )) kao i izvedenih parametara ( $V_0 (F_0/a)$  i  $P_{max} (F_0 V_0/4)$ ) je veoma visoka ( $ICC$  preko 0.80), sa relativno malim procentom  $CV$  i niskim vrednostima  $SEM$ . Ipak, parametri  $F_0$  i  $P_{max}$  pokazuju veću pouzdanost (posmatrajući  $ICC$ ), nego  $V_0$ .

Tabela 3. Parametri dobijeni iz pojedinačnih linearnih regresija u uslovima sva tri skoka (SJ, CMJ i CMJa) i za 2 tipa varijabli (MAX i AVG), zajedno sa pripadajućim pokazateljima pouzdanosti.

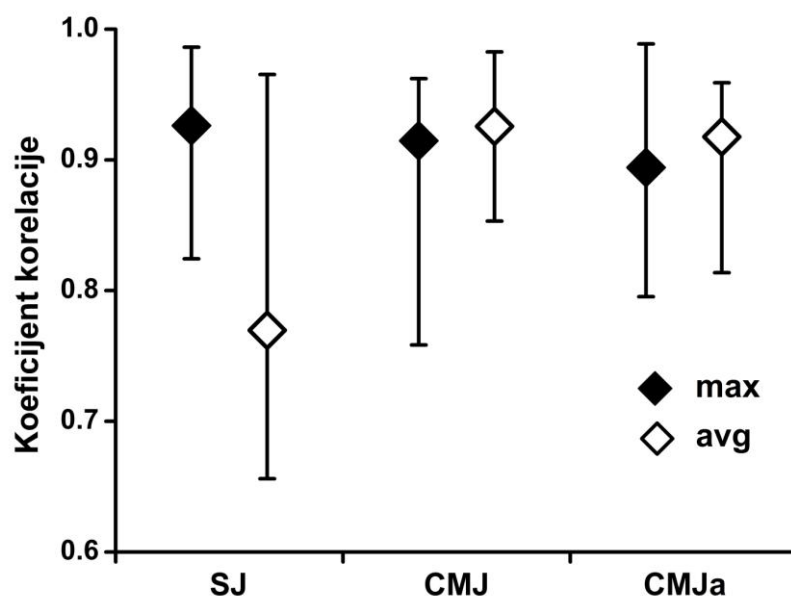
Tip skoka	Tip varijable	Parametri	Prvo merenje	Drugo merenje	CV %	SEM	ICC	t
SJ	MAX	$F_0$	3293 ± 496	3210 ± 450	3.6	121	0.94 (0.83, 0.97)	1.52
		$V_0$	5.92 ± 1.52	5.90 ± 1.17	6.5	0.42	0.91 (0.75, 0.96)	0.12
		$a$	582 ± 149	562 ± 126	9.7	53	0.86 (0.63, 0.94)	0.85
		$P_{max}$	4847 ± 1322	4717 ± 1096	4.4	254	0.96 (0.89, 0.98)	1.15
	AVG	$F_0$	2613 ± 539	2519 ± 516	5.1	127	0.95 (0.85, 0.98)	1.65
		$V_0$	2.51 ± 0.51	2.60 ± 0.52	6.0	0.14	0.93 (0.80, 0.97)	-1.51
		$a$	1096 ± 371	1019 ± 362	9.8	82	0.96 (0.87, 0.98)	2.12
		$P_{max}$	1610 ± 321	1610 ± 309	5.4	86	0.93 (0.81, 0.97)	-0.01
CMJ	MAX	$F_0$	3116 ± 602	3094 ± 617	3.5	103	0.97 (0.93, 0.99)	0.48
		$V_0$	7.04 ± 1.48	7.05 ± 1.18	7.5	0.55	0.85 (0.59, 0.93)	-0.06
		$a$	475 ± 187	464 ± 185	11.0	43	0.95 (0.86, 0.98)	0.56
		$P_{max}$	5340 ± 909	5344 ± 881	4.4	229	0.94 (0.83, 0.97)	-0.04
	AVG	$F_0$	2962 ± 584	2930 ± 621	2.7	80	0.98 (0.95, 0.99)	0.91
		$V_0$	3.27 ± 0.52	3.34 ± 0.58	3.3	0.11	0.96 (0.89, 0.98)	-1.31
		$a$	949 ± 339	926 ± 344	5.7	52	0.98 (0.94, 0.99)	1.01
		$P_{max}$	2381 ± 435	2395 ± 465	2.4	59	0.98 (0.96, 0.99)	-0.53
CMJa	MAX	$F_0$	3407 ± 883	3412 ± 891	3.7	149	0.97 (0.93, 0.99)	-0.07
		$V_0$	6.77 ± 1.95	6.74 ± 1.76	7.5	0.59	0.91 (0.74, 0.96)	0.09
		$a$	560 ± 258	554 ± 234	10.6	57	0.95 (0.86, 0.98)	0.24
		$P_{max}$	5500 ± 1092	5501 ± 1020	5.5	300	0.93 (0.80, 0.97)	-0.01
	AVG	$F_0$	2859 ± 563	2857 ± 671	3.0	84	0.98 (0.95, 0.99)	0.04
		$V_0$	3.27 ± 0.57	3.26 ± 0.40	5.6	0.2	0.85 (0.59, 0.93)	0.08
		$a$	906 ± 273	903 ± 299	7.3	52	0.97 (0.91, 0.99)	0.09
		$P_{max}$	2319 ± 530	2296 ± 467	5.4	132	0.94 (0.82, 0.97)	0.38

CV – koeficijent varijacije; SEM – standardna greška merenja; ICC – intraklas korelacioni koeficijent; t – T-test



### Razlike između skokova i tipa varijabli

Slika 19 pokazuje koeficijente korelacije (vrednost medijane  $\pm$  opseg) linearnih  $F$ - $V$  relacija. Dvo-faktorska ANOVA sa ponovljenim merenjem primenjena na  $Z$ -transformisane  $r$  vrednosti nije pokazala statistički značajne efekte za faktore *skok* ( $F_{(2,8)} = 1.6$ ,  $\eta^2 = 0.06$ ,  $p = 0.27$ ) i *varijabla* ( $F_{(1,9)} = 1.31$ ,  $\eta^2 = 0.03$ ,  $p = 0.47$ ). Međutim, njihova interakcija *skok*  $\times$  *varijabla* ( $F_{(2,8)} = 10.3$ ,  $\eta^2 = 0.17$ ,  $p < 0.01$ ) je bila značajna pre svega zbog statistički značajnih razlika korelacionih koeficijenata dobijenih iz maksimalnih i prosečnih varijabli u uslovima *SJ*, ali ne i *CMJ* i *CMJa*.



Slika 19. Koeficijenti korelacije (vrednost medijane  $\pm$  opseg) linearnih  $F$ - $V$  relacija u uslovima tri različita skoka (*SJ*, *CMJ*, *CMJa*) i dva tipa varijabli (*MAX* i *AVG*)

Slika 20 pokazuje prosečne vrednosti parametara  $F$ - $V$  relacije, dobijenih iz individualnih linearnih regresija. Dvo-faktorska ANOVA sa ponovljenim merenjima je primenjena kako bi se ispitali glavni efekti faktora *skok* i *varijabla*, kao i njihova interakcija (*skok*  $\times$  *varijabla*).

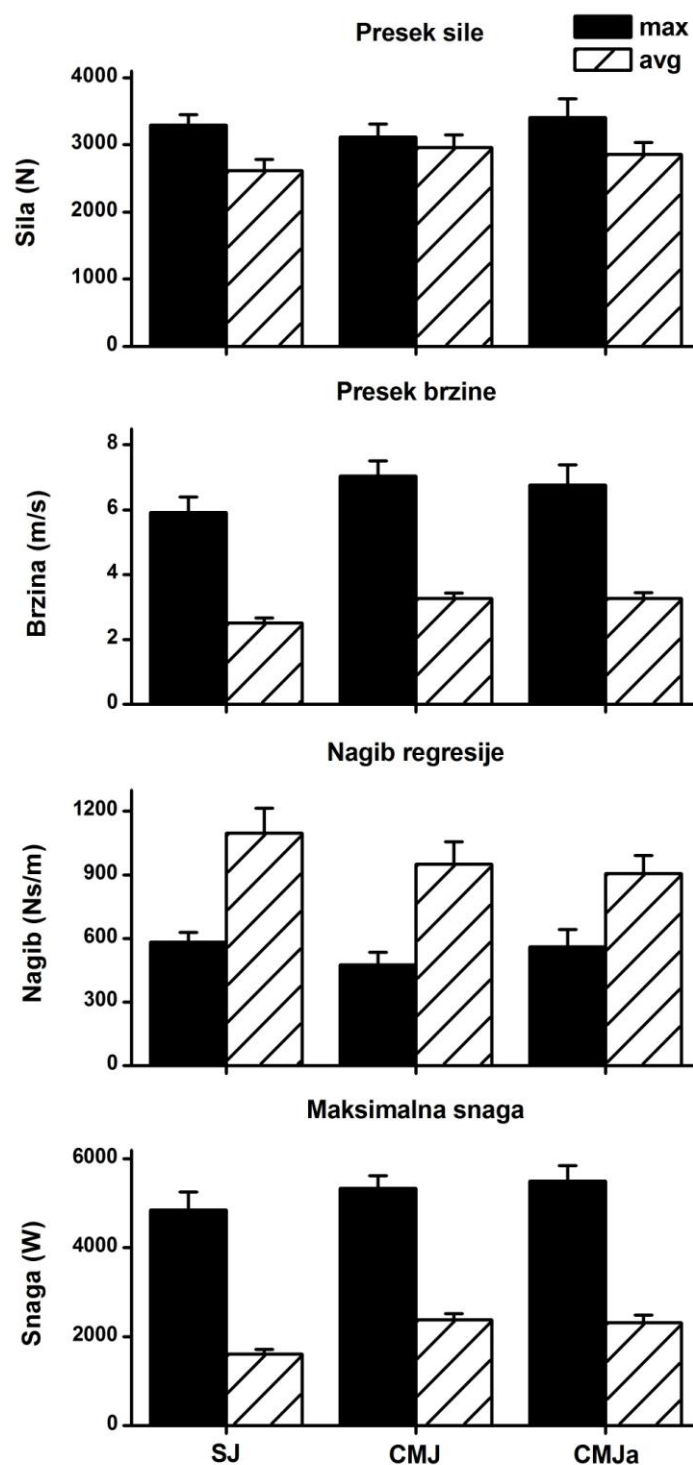
Parametar *preseka sile* ( $F_0$ ; Slika 20a) nije pokazao statistički značajne efekte za faktor *skok* ( $F_{(2,8)} = 0.63$ ;  $\eta^2 = 0.03$ ,  $p = 0.53$ ), dok su faktor *varijabla* ( $F_{(1,9)} = 64.9$ ;  $\eta^2 = 0.33$ ,  $p < 0.01$ ) i njihova interakcija *skok*  $\times$  *varijabla* ( $F_{(2,8)} = 6.8$ ;  $\eta^2 = 0.08$ ,  $p = 0.019$ ) bili značajni. Konkretno, razlike između varijabli su bile značajne u uslovima *SJ* i *CMJa* ali ne i u uslovima *CMJ*.

Kod *preseka brzine* ( $V_0$ ; Slika 20b) pokazani su statistički značajni efekti za faktore *skok* ( $F_{(2,8)} = 4.6$ ,  $\eta^2 = 0.04$ ,  $p = 0.046$ ) i *varijabla* ( $F_{(1,9)} = 121.9$ ,  $\eta^2 = 0.76$ ,  $p < 0.01$ ), ali ne i za njihovu interakciju *skok*  $\times$  *varijabla* ( $F_{(2,8)} = 0.44$ ;  $\eta^2 = 0.01$ ,  $p = 0.66$ ). Parametar  $V_0$  bio je veći u uslovima *CMJ* i *CMJa* nego u uslovima *SJ*.

Kada je u pitanju *nagib regresije* ( $a$ ; Slika 20c), podaci pokazuju statistički značajan efekat za faktor *varijabla* ( $F_{(1,9)} = 109.9$ ,  $\eta^2 = 0.59$ ,  $p < 0.01$ ), ali ne i za faktor *skok* ( $F_{(2,8)} = 0.82$ ,  $\eta^2 = 0.04$ ,  $p = 0.48$ ) i interakciju ova dva faktora *skok*  $\times$  *varijabla* ( $F_{(2,8)} = 2.6$ ;  $\eta^2 = 0.02$ ,  $p = 0.13$ ).

Konačno, parametar *maksimalne snage* ( $P_{max}$ ; Slika 20d) pokazao je statistički značajne efekte za faktore *skok* ( $F_{(2,8)} = 16.9$ ,  $\eta^2 = 0.04$ ,  $p < 0.01$ ) i *varijabla* ( $F_{(1,9)} = 202.8$ ,  $\eta^2 = 0.89$ ,  $p < 0.01$ ), ali ne i za njihovu interakciju *skok*  $\times$  *varijabla* ( $F_{(2,8)} = 2.16$ ;  $\eta^2 = 0.01$ ,  $p = 0.18$ ).  $P_{max}$  bio je veći u uslovima *CMJ* i *CMJa* u odnosu na *SJ*.

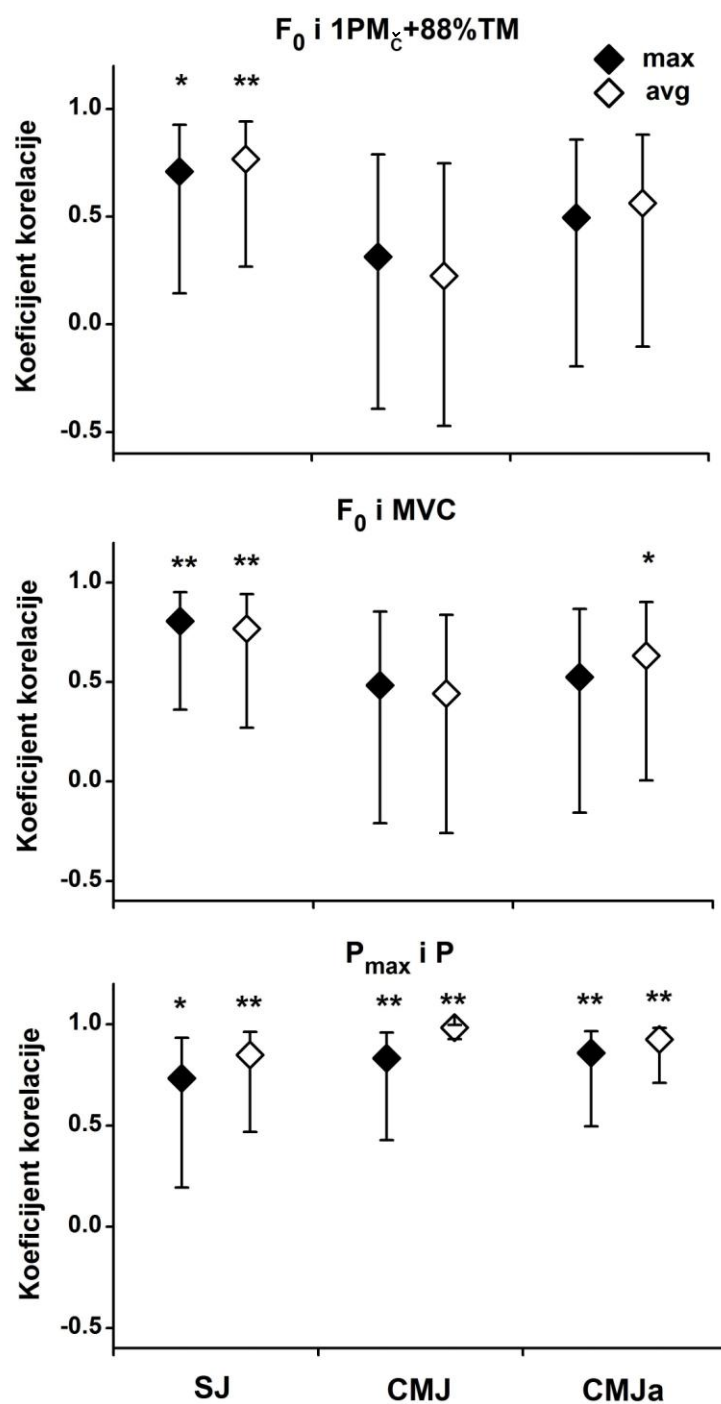
Treba imati u vidu, da su vrednosti parametara  $F_0$ ,  $V_0$  i  $P_{max}$  dobijenih iz regresija maksimalnih varijabli  $F$  i  $V$  veće, u odnosu na vrednosti parametara iz prosečnih varijabli  $F$  i  $V$ . Jedina razlika je parametar  $a$  gde su veće vrednosti dobijene iz prosečnih varijabli  $F$  i  $V$ . Takođe, posmatrajući parametar  $V_0$  možemo videti više nego duplu razliku kod podataka dobijenih iz maksimalnih u odnosu na prosečne varijabli  $F$  i  $V$ , dok je kod  $F_0$  ta razlika mala, gotovo zanemarljiva. S tim u vezi, važne razlike koje se uočavaju kod  $a$  i kod  $P_{max}$ , dobijene iz regresija maksimalnih i prosečnih varijabli  $F$  i  $V$ , u velikoj meri potiču od razlika u  $V_0$ , a ne od  $F_0$ .



Slika 20. Rezultati prosečnih vrednosti preseka sile ( $F_0$ ; Slika 20a), preseka brzine ( $V_0$ ; Slika 20b), nagiba regresije ( $a$ ; Slika 20c) i maksimalne snage ( $P_{max}$ ; Slika 20d) dobijenih iz individualnih linearnih regresija za tri skoka (SJ, CMJ i CMJa) i dva tipa varijabli (MAX i AVG; rezultati su prikazani kao SV i SE).

### Konkurentna validnost

Kada su u pitanju direktno merena sila i snaga, rezultati *MVC* bili su  $821 \pm 110$  N, a rezultati  $IPM_{\check{c}} + 88\%$  TM  $192.2 \pm 38.6$  kg, a maksimalna direktno merena snaga  $3,922 \pm 790$ ,  $3,839 \pm 677$ , i  $4,429 \pm 1,009$  W u uslovima *SJ*, *CMJ* i *CMJa*, respektivno. Slika 21 prikazuje konkurentnu validnost parametara  $F_0$  i  $P_{max}$  dobijenih iz linearnih *F-V* regresija u odnosu na direktno merenu silu i snagu. U proseku, parametar  $F_0$  umereno do visoko korelira sa *MVC* i  $IPM_{\check{c}}$ . Korelacije su statistički značajne za *SJ* i samo za još jedan slučaj (*CMJa* iz prosečnih vrednosti *F* i *V*). Što se tiče razlika između skokova i tipa varijabli, samo korelacija između  $F_0$  (kod prosečnih varijabli) i  $IPM_{\check{c}}$  u uslovima *SJ* je bila iznad 95% *CI* korelacionog koeficijenta dobijenog u uslovima *CMJ*. Međutim, sve korelacije između  $P_{max}$  i direktno merene maksimalne *P*, su izuzetno visoke i statistički značajne. Njihovim upoređivanjem je pokazano, da je samo rezultat dobijen iz prosečnih vrednosti *F* i *V* u uslovima *CMJ* iznad 95% *CI* ostalih pet korelacionih koeficijenata.



Slika 21. Konkurentna validnost parametara  $F_0$  i  $P_{max}$  dobijenih iz individualnih lineranih regresija procenjena Pirsonovim koeficijentom korelacije sa direktno merenom silom ( $1PM_{\dot{c}} + 88\% TM$  i MVC) i snagom (P). Koeficijenti korelacije (sa pripadajućim 95% CI) su prikazani za tri skoka (SJ, CMJ i CMJa) i dva tipa varijabli (MAX i AVG). \* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$ ;  $n = 10$ .

## 5.4. Diskusija

U okviru *Eksperimenta 1*, primenjeno je pozitivno i negativno opterećenje, kako bi se dobile  $F$ - $V$  relacije mišića nogu, u uslovima različitih skokova uvis. U skladu sa prvim ciljem, pokazano je da su  $F$ - $V$  relacije visoko povezane i linearne, a  $P$ - $V$  relacije parabolične i takođe visoko povezane. Što se tiče drugog cilja istraživanja, pokazatelji pouzdanosti su bili izuzetno visoki. Ispitivanjem razlika između parametara  $F$ - $V$  relacija, što je u skladu sa trećim ciljem istraživanja, dobijene su niže vrednosti  $P_{max}$  u uslovima  $SJ$  u odnosu na  $CMJ$  i  $CMJa$ , prevashodno zbog nižih vrednosti  $V_0$ , a ne  $F_0$ . Osim toga,  $F_0$  dobijen iz maksimalnih vrednosti  $F$  i  $V$ , tek je nešto veći nego kada računa iz prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ , dok je u istom slučaju  $V_0$  skoro duplo veći. Rezultat toga su veći  $a$  kada se koriste prosečne vrednosti  $F$  i  $V$ , a veći  $P_{max}$  kada se koriste maksimalne vrednosti  $F$  i  $V$ . Kada je u pitanju četvrti cilj istraživanja, dobijeni rezultati pokazuju visoku konkurentnu validnost parametra  $P_{max}$ , dok je ista validnost za  $F_0$  u proseku drastično niža i samo delimično statistički značajna.

### **Oblik i povezanost $F$ - $V$ i $P$ - $V$ relacije i pouzdanost parametara $F$ - $V$ relacije**

Dobijeni rezultati otkrivaju veoma povezane i linearne  $F$ - $V$  relacije za sve tipove skokova i varijabli. Isto se može reći i za povezanost paraboličnih  $P$ - $V$  relacija. Što se tiče  $F$ - $V$  relacija, nijedan korelacioni koeficijent polinomijalnih regresija nije iznad nivoa 95 %  $CI$  linearnih regresija, što znači da nema statistički značajnih razlika između njih. Ti rezultati su u skladu sa prethodnim nalazima, dobijenim u uslovima različitih zadataka baziranim na opružanjima nogu, bez ciklusa izduženja-skraćenja mišića, kada je primenjivano samo pozitivno opterećenje (Yamauchi i sar., 2009; Samozino i sar., 2012). Šta više, rezultati ekstrapolisanih vrednosti sile i brzine ( $F_0$ , i  $V_0$ ), dobijeni u prethodno pomenutim istraživanjima (u uslovima  $SJ$ ), slični su rezultatima dobijenim u ovom istraživanju. S tim u vezi, možemo zaključiti da negativno opterećenje ne menja značajno oblik i povezanost  $F$ - $V$  relacija dobijenih primenom isključivo pozitivnog opterećenja. Izrazito nov nalaz ove studije je visoka pouzdanost parametara  $F$ - $V$  relacije. Svi prethodno diskutovani nalazi mogu da podstaknu buduća istraživanja u pravcu stvaranja testa za

rutinsku proveru funkcije mišića opružača nogu, baziranog na linearnoj  $F$ - $V$  relaciji dobijenog u uslovima skokova uvis (Samozino i sar., 2008, 2013).

### **Razlike između skokova i tipa varijabli**

Kada se uporede različiti skokovi, dobijeni rezultati idu u prilog tome da korišćenje  $CMJ$  i  $CMJa$  može doprineti većoj pouzdanosti  $F$ - $V$  relacija u odnosu na  $SJ$ , posebno kada se rezultati računaju iz prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ . Iako je pouzdanost parametara  $F$ - $V$  relacije dosta visoka, kod svih vrsta skokova i varijabli, pouzdanost parametara  $F_0$  i  $P_{max}$  je veća od  $V_0$ . Takođe,  $P_{max}$  je bio veći u uslovima  $CMJ$  i  $CMJa$  nego u uslovima  $SJ$  što je u skladu sa prethodnim istraživanjima (Pažin i sar., 2013; Suzović i sar., 2013).

Što se tiče razlika između  $F$ - $V$  relacija dobijenih iz maksimalnih i prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ , treba imati u vidu da se vremena maksimalne  $F$  i  $V$  ne podudaraju (videti *Sliku 16*), a pored toga, njihove vrednosti su veoma osetljive na tehniku izvođenja skoka (Samozino i sar., 2008, 2012; Marković i sar., 2013, 2014). Bez obzira na to, povezanost tih  $F$ - $V$  relacija, kao i pouzdanost njihovih parametara, uporediva je sa  $F$ - $V$  relacijama dobijenih iz prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ . Takođe, kada se uporede sa prosečnim, maksimalne vrednosti  $F$  i  $V$  daju tek nešto veće vrednosti  $F_0$ , ali skoro duplo veće vrednosti  $V_0$ . Kao posledica toga pojavljuju se veće vrednosti  $a$  (kod prosečnih  $F$  i  $V$ ) i  $P_{max}$  (kod maksimalnih  $F$  i  $V$ ). U načelu, ovi nalazi sugerišu da buduća istraživanja  $F$ - $V$  relacija mišića opružača nogu, treba da uključuju skokove uvis koji su prirodniji za izvođenje (tj. sa ciklusom izduženja-skraćenja; videti poglavlje 1.2.1. *Tipovi mišićne kontrakcije*), kao što su  $CMJ$  i  $CMJa$ , pre nego  $SJ$ . Takođe, bi trebalo da se koriste i maksimalne i prosečne  $F$  i  $V$  varijable za dobijanje  $F$ - $V$  relacija, dok se njihovi parametri mogu koristiti za procenu osobina mišićne sile, snage i brzine. Na kraju, treba pomenuti da na varijable sile, brzine i snage kod skokova uvis utiče zamah rukama (Walsh i sar., 2007 i Suzović i sar., 2013). U rezultatima ovog istraživanja se ipak ne uočava značajna razlika kod parametara  $F$ - $V$  relacija, posmatranih u uslovima  $CMJ$ , u odnosu na  $CMJa$ .

### Konkurentna validnost

Kada su u pitanju rezultati konkurentne validnosti parametara linearne  $F$ - $V$  relacije,  $P_{max}$  izrazito visoko korelira sa direktno merenim izlazom  $P$ . Za razliku od njega,  $F_0$  u proseku umereno do visoko korelira sa direktno merenom silom. Međutim treba imati u vidu da je  $F_0$  produkt udaljene ekstrapolacije direktno merenih  $F$  i  $V$ , kao i da je korelacija vršena sa  $IPM_{\dot{c}}$  koji se vrši koncentričnom kontrakcijom (spori pokret). Pored toga, parametar  $F_0$  odgovara maksimalnoj izometrijskoj sili mišića koja inače umereno ili nisko korelira sa izvođenjem pokreta maksimalnog intenziteta (Jaric i sar., 1989; Jaric, 2002; Nuzzo i sar., 2008). Sa druge strane,  $MVC$  predstavlja izometrijsku silu isključivo mišića kvadriceps femorisa, dok su kod skokova uvis (preko kojih je računat parametar  $F_0$ ), uključeni i drugi mišići opružači nogu. Zbog svega navedenog, teško je očekivati da se dobije visoka konkurentna validnost za  $F_0$  jer se u literaturi gotovo isključivo pominju  $IPM_{\dot{c}}$  i  $MVC$  kao testovi za procenu mišićne sile. Suprotno tome,  $P_{max}$  je parametar dobijen iz  $F$ - $V$  relacije, koja je dosta bliska sa direktno merenim vrednostima  $F$  i  $V$  pa je i to jedan od razloga visoke konkurentne validnosti za ovaj parametar. Još jedan od razloga visoke konkurentne validnosti parametara  $P_{max}$ , je i činjenica, da maksimalni mišićni izlaz snage, kada je normalizovan u odnosu na telesne dimenzije (pri skokovima uvis sa negativnim opterećenjem), visoko korelira sa sposobnostima koje su dominantne u uslovima izvođenja skokova uvis maksimalnog intenziteta (Markovic i Jaric 2007a; Markovic i sar., 2014).

### Ograničenja studije u okviru Eksperimenta 1 i smernice za buduća istraživanja

Postoji nekoliko ograničenja studije u okviru *Eksperimenta 1* koja treba napomenuti i uzeti u obzir pri planiranju budućih istraživanja:

1. Iako je u ovom istraživanju primenjeno i pozitivno i negativno opterećenje kako bi se povećao ukupan opseg opterećenja, taj opseg je i dalje prilično ograničen kada su u pitanju vrednosti preseka sile i brzine ( $F_0$  i  $V_0$ ) dobijenih iz linearnih regresija. Sagledano iz te perspektive, opružanja nogu na dinamometrima (Yamauchi i sar., 2009; Samozino i sar.,



2012) i izbačaji ležeći na klupi (Leontijević i sar., 2013), mogu imati prednost u odnosu na skokove uvis, iako su skokovi “ekološki validniji” za testiranje.

2. Kako bi procedura testiranja bila kraća i time se izbegao mogući zamor kod ispitanika, oni su izvodili samo dva ponavljanja po tipu skoka i opterećenju, pri čemu je uvek drugi pokušaj korišćen za dalju analizu. S tim u vezi, postoji mogućnost da korigovani protokol, sa većim brojem ponavljanja i odabirom najboljeg pokušaja, može obezbediti još veću pouzdanost i konkurentnu validnost, nego što je to bio slučaj u ovom eksperimentu.

3. Za potrebe korišćenja pozitivnog i negativnog opterećenja primenjeno je opterećenje koje simulira samo promenu težine, bez inercije. To može imati različite efekte na kinematičke i kinetičke parametre ispoljavanja sile i snage, u uslovima skokova uvis i izbačaja ležeći na klupi (Leontijević i sar., 2012, 2013).

4. U ovom istraživanju nije kontrolisan mogući efekat spuštanja u uslovima skoka uvis sa i bez zamaha rukama (*CMJ* i *CMJa*), koji može uticati na ispoljavanje sile i snage kod skokova uvis sa opterećenjem (Samozino i sar., 2012; Marković i sar., 2013). U ovom slučaju, možemo da pretpostavimo da su razlike u spuštanju u uslovima *CMJ* i *CMJa* mogle da utiču na razlike između  $F_0$  i  $P_{max}$  kod tih skokova.

Kada je u pitanju primena dobijenih rezultata u budućim studijama ovog tipa, one mogu biti usmerene ka stvaranju metoda koji se može rutinski primenjivati u testiranju sile, brzine i snage mišića opružača nogu. Takav test bi bio baziran na kratkim serijama skokova (na primer *CMJ*), koji bi se izvodili na platformi sile, sa jednostavnim opterećenjem (npr. prsluk sa teretom, šipka, Smit mašina). Deo tog metoda, za *SJ*, već je evaluirao Samozino sa saradnicima (2008, 2013). Takođe, u budućim istraživanjima je potrebno obratiti pažnju i na nekoliko metodoloških detalja, kao što su tehnika izvođenja skokova uvis, vršenje drugih složenih pokreta pri posmatranju  $F$ - $V$  relacija, kao i opseg i tip opterećenja koje se primenjuje. Na kraju, buduća istraživanja treba da ispituju osetljivost parametara linearne  $F$ - $V$  relacije (kod mišića opružača nogu), u uočavanju efekata treninga i intervencija u rehabilitaciji, kod različitih populacija.

### Zaključci Eksperimenta 1

Rezultati ovog istraživanja pokazuju, da su  $F$ - $V$  relacije mišića opružača nogu, dobijene u uslovima skokova uvis, sa pozitivnim i negativnim opterećenjem, povezane i linearne, a  $P$ - $V$  relacije parabolične i takođe visoko povezane.  $F$ - $V$  relacije su i visoko pouzdane, sa umerenom do visokom konkurentnom validnošću. Ovi nalazi su generalno konzistentni za različite vrste skokova uvis, kao i kada se primenjuju prosečne i maksimalne  $F$  i  $V$ . Ipak, rezultati idu u prilog tome da su parametri  $F_0$  i  $P_{max}$  pouzdaniji od  $V_0$ , dok bi za procenjivanje  $F$ - $V$  relacija kod skokova uvis bilo bolje koristiti prirodni tip skoka ( $CMJ$ ), u odnosu na  $SJ$ . Generalni zaključak je da skokovi uvis sa različim opterećenjem, mogu da budu integrisani u metod za rutinsko testiranje sile, brzine i snage mišića opružača nogu.

## 6. PROCENA OSETLJIVOSTI F-V RELACIJE ZA OCENU RAZLIKA U MIŠIĆNOJ SILI I SNAZI (EKSPERIMENT 2)

U sklopu realizovanja istraživanja, *Eksperiment 2* je uključivao merenja koja su bila sprovedena u tri odvojena dana. Sva merenja su bila sprovedena u Metodičko-istraživačkoj laboratoriji (MIL) Fakulteta sporta i fizičkog vaspitanja u Beogradu, tokom 3 meseca.

Poglavlje 6 napisano je na osnovu poslatog rada u vrhunski međunarodni časopis (M21) pod nazivom: „*Force-velocity patterns of leg muscles in individuals of different level of physical fitness*”.

### 6.1. Uvod

Balistički pokreti kod ljudi se najčešće izvode mišićima nogu, koji moraju da ispolje maksimalnu moguću silu ( $F$ ), pri relativno velikim brzinama centra mase tela ( $V$ ). Proizvod  $F$  i  $V$  se definiše ili kao brzina promene efektivne energije (Bobbert, 2014) ili češće kao mišićni izlaz snage ( $P$ ; Fenn i Marsh, 1935; Kaneko i sar., 1983; Samozino i sar., 2008; Jaric i Markovic, 2009). Iako se značaj maksimalnog povećanja  $F$  u odnosu na  $V$  može menjati u zavisnosti od pokreta do pokreta (Minetti i sar., 2002), maksimalno povećanje  $P$  se kod većine autora smatra kao glavni preduslov za visok nivo izvođenja balističkih pokreta (Marković i Jarić, 2007a; Yamauchi i Ishii, 2007; Cormie i sar., 2010a; Bobbert, 2014; Samozino i sar., 2014).

Decenijama je poznato da je  $F$ - $V$  relacija kod pojedinačnih mišića i mišićnih grupa hiberboličnog oblika (Hill, 1938; Kaneko i sar., 1983). Takva relacija dozvoljava direktno računanje  $P$ - $V$  relacije, koja uobičajeno pokazuje maksimum u trenutku kada maksimalno aktivirani mišići deluju nasuprot umerenog spoljašnjeg opterećenja. Međutim, veći broj skorašnjih studija predlaže da  $F$ - $V$  relacija kod izvođenja složenih pokreta maksimalnog intenziteta, može biti i linearna. Približno linearna  $F$ - $V$  relacija je dobijena kod okretanja pedala na bicikl-ergometru (Driss, 2013; Nikolaidis, 2012), zatim kod različitih vrsta skokova uvis (Vandewalle i sar., 1987; Rahmani, 2001; Sheppard i sar., 2008; Ćuk i sar.,

2014; Samozino i sar., 2014), kod simultanih opružanja nogu gde mišići nogu deluju u zatvorenom kinetičkom lancu (Yamauchi i sar., 2009; Samozino i sar., 2012, 2014), kod pokreta ruku i gornjeg dela tela (Hintzy i sar., 2003; Nikolaidis, 2012). Rezultati su uglavnom dobijani primenom spoljašnjeg opterećenja koje obezbeđuje opseg između  $F$  i  $V$ , tako da je moguće koristiti model linearne regresije. Iako linearna svojstva  $F$ - $V$  relacije, kod složenih pokreta, najverovatnije potiču od dinamike segmenata tela (Bobbert, 2012), na njih mogu uticati i različiti neuralni mehanizmi (Avela i sar., 1994; Yamauchi i Ishii, 2007).

Približno linearna  $F$ - $V$  relacija kod složenih pokreta može imati i praktični i teorijski značaj. Na primer, model linearne regresije primenjen na  $F$  i  $V$ , dobijene pri izvođenju zadataka maksimalnog intenziteta, sa različitom spoljašnjim opterećenjem daje:

$$F(V) = F_0 - aV \text{ (Jednačina 1)}$$

gde je  $F_0$  presek sile koji odgovara maksimalnoj izometrijskoj  $F$ , a  $a$  je nagib regresije koji odgovara  $F_0/V_0$  (gde je  $V_0$  presek brzine koji odgovara maksimalnoj brzini pri nultoj sili). Kao rezultat,  $P$ - $V$  relacija izračunata iz *Jednačine 1* biće paraboličnog oblika:

$$P(V) = F(V) V = F_0 V - aV^2 \text{ (Jednačina 2)}$$

gde je maksimalna snaga:

$$P_{max} = (F_0 V_0)/4 \text{ (Jednačina 3).}$$

S tim u vezi, sa praktičnog aspekta, pokreti maksimalnog intenziteta mogu poslužiti za razvoj relativno jednostavnih testova za rutinsku procenu mehaničkih mogućnosti testiranih mišićnih grupa, preko linearne  $F$ - $V$  relacije (Driss i sar., 1998; Samozino i sar., 2008; Ćuk i sar., 2014). Rezultati takvih testova bi mogli da ukažu na potencijalnu neuravnoteženost između mogućnosti za razvoj  $F$  i  $V$ , preko nagiba  $F$ - $V$  relacije (Samozino i sar., 2012, 2014). Osim toga, na osnovu njih bi mogao da se proceni i nivo adaptacije testiranih mišićnih grupa na razne sportske treninge i intervencije u rehabilitaciji (Cormie i sar., 2010a), kao i da se dodatno prouči bilateralni deficit (Samozino i sar., 2014). Sa teorijske tačke gledišta, mehaničke osobine mišića procenjene preko linearne  $F$ - $V$  relacije

mogu obezbediti uvid u građu i funkciju mišićnog sistema, kao što je, na primer, moguća adaptacija na maksimalni dinamički izlaz kada se deluje protiv težine tela (Jaric i Markovic, 2009, 2013; Suzovic i sar., 2013).

Imajući u vidu potencijalni teorijski i praktični značaj, nekoliko studija se bavilo procenom  $F$ - $V$  relacije kod različitih složenih pokreta, kao i svojstvima njihovih parametara. Osim što je  $F$ - $V$  relacija prilično linearna (videti tekst iznad), parametri  $F$ - $V$  relacije ( $F_0$ ,  $V_0$ ,  $a$  i  $P_{max}$ ) su visoko pouzdani (Cuk i sar., 2014), dok je konkurentna validnosti tih parametara umerena do visoka (Yamauchi i Ishii, 2007; Cuk i sar., 2014). I pored toga, mali broj studija se bavio pitanjem osetljivosti parametara  $F$ - $V$  relacije u cilju pronalaženja razlika između različitih populacija. Osim što ih je bilo vrlo malo, dobijeni rezultati bili su i nekonzistentni. Na primer, kada su poređene osobe različitog uzrasta, veći  $P_{max}$  kod mlađih osoba poticao je od većeg  $V_0$  (Callahan i Kent-Braun, 2011), odnosno od većeg  $F_0$  (Yamauchi i sar., 2009; Yamauchi i sar., 2010). Slični nalazi dobijeni su i prilikom proučavanja razlika u  $F$ - $V$  parametrima, kod različitih mišićnih grupa, kod dečaka i devojčica uzrasta 14 godina (Nikolaidis, 2012). Još jedan primer neslaganja nalaza u vezi sa  $F$ - $V$  relacijom kod različitih populacija predstavlja istraživanje Rahmanija i saradnika (2004), gde se javlja velika razlika između  $V_0$  i  $P_{max}$  kod italijanskih i senegalskih sprintera sličnih telesnih karakteristika i sportskih rezultata. Ove razlike se pre mogu javiti zbog nekih nekontrolisanih ometajućih faktora, nego zbog stvarnih razlika između testiranih populacija. Bez obzira na to, ni jedna od navedenih studija nije procenjivala osetljivost nagiba  $F$ - $V$  relacije ( $a$ ), a upravo to može biti važan faktor u dostizanju maksimalnih mogućnosti u izvođenju pokreta (Samozino i sar., 2012, 2014), niti je koristila skokove uvis sa opterećenjem kao eksperimentalni model.

Još jedan nerazrešen problem u vezi sa usvajanjem testa za rutinsku procenu  $F$ - $V$  osobina mišića, baziranog na skokovima uvis sa spoljašnjim opterećenjem, tiče se odabira vrste skokova i tipa  $F$  i  $V$  varijabli koji će se koristiti. Naime,  $CMJ$  (Sheppard i sar., 2008; Limonta i sar., 2010), kao i  $SJ$  (Cormie i sar., 2010a; Samozino i sar., 2014) i oba skoka (Cuk i sar., 2014), su se primenjivali u cilju procenjivanja efekata opterećenja na kinematiku i kinetiku skokova. Rezultati su nekonzistentni u pogledu razlika u pouzdanosti

i konkurentne validnost između *SJ* i *CMJ* sa i bez zamaha rukama (Cuk i sar., 2014). Slično tome, varijable koje su se koristile u proceni *F-V* relacija poticale su ili od maksimalnih (Vanderwalle i sar., 1987; Sheppard i sar., 2008; Yamauchi i sar., 2009; Cormie i sar., 2010a), ili od prosečnih rezultata *F* i *V* (Rahmani i sar., 2001; Samozino i sar., 2012, 2014). Iako je u novijem istraživanju (Cuk i sar., 2014) pokazano da se korišćenjem maksimalnih ili prosečnih *F* i *V* vrednosti dobijaju i različitosti u parametarima *F-V* relacija, još uvek nije poznato koji tip varijabli bi bilo bolje primenjivati u rutinskom testiranju *F-V* relacije kod složenih pokreta.

Kako bi se razrešili navedeni nedostaci, osmišljena je studija gde je glavni cilj procena *F-V* relacije mišića nogu, u uslovima skokova uvis sa spoljašnjim opterećenjem, kod grupa ispitanika različite fizičke pripremljenosti. Hipoteza ove studije je da će parametri *F-V* relacije ( $F_0$ ,  $V_0$ ,  $a$  i  $P_{max}$ ) pokazati razlike između grupa. Drugi cilj studije je da se uporede osobine *F-V* relacija dobijenih iz različitih skokova i različitih tipova *F* i *V* varijabli. Od nalaza se očekuje da doprinesu razumevanju mehaničkih osobina mišića, kao i da obezbede dodatne rezultate potrebne da se razvije test za rutinsku procenu mogućnosti mišića da razviju silu, brzinu i snagu, baziran na skokovima uvis sa spoljašnjim opterećenjem.

## 6.2. Metode

Za realizaciju postavljenih ciljeva istraživanja primenjene su eksperimentalne metode prikupljanja podataka. Osim toga, izvršena je transverzalna analiza morfološkog statusa i mehaničkih osobina mišića nogu. Kao osnovni primenjen je empirijski metod, a kao pomoćni statistički metod.

### 6.2.1. Uzorak ispitanika

Određivanje veličine uzorka bazirano je na rezultatima *F*, *V* i *P* dobijenim u prethodnim studijama (Markovic i Jaric, 2007b; Cuk i sar., 2014) i izračunato primenom softvera G\*Power 3.1. Po Cohen-u (1988), za alfa nivo 0.05 i statističku snagu od 0.8,

uzorak od približno 10 ispitanika po grupi je bio dovoljan da pokaže razlike u vrednostima  $F$  i  $V$  u uslovima skokova uvis sa spoljašnjim opterećenjem između 0.7 i 1.3  $TT$ . Na osnovu tih rezultata, angažovane su 3 grupe od po 10 zdravih, odraslih ispitanika muškog pola, koji se razlikuju u fizičkoj pripremljenosti. Morfološke karakteristike i rezultati procenjene snage ispitanika prikazani su u *Tabeli 4*. Prva grupa sastojala se od ispitanika koji su upražnjavali trening snage (*Bodibilderi*; godine  $24.4 \pm 1.9$ ; podaci su prikazani kao  $SV$  i  $SD$ ). Iako se niko od ispitanika nije takmičio u godini kada se sprovodio *Eksperiment 2*, oni su imali minimum 3 godine iskustva u bodibildingu, sa izvođenjem minimum 3 treninga snage nedeljno. Pored toga, tri ispitanika su i studenti Fakulteta sporta i fizičkog vaspitanja, te stoga imaju i dodatne aktivnosti (videti dalji deo teksta). Drugu grupu činilo je 10 fizički aktivnih ispitanika (*Aktivni*; godine  $23.4 \pm 3.2$ ), studenata Fakulteta sporta i fizičkog vaspitanja, koji su bili aktivni samo u sklopu nastavnog plana na fakultetu. To uključuje 6-8 nastavnih jedinica nedeljno, koje se sastoje od kombinacije vežbi visokog i niskog intenziteta, ali ne sadrže ni jedan vid treninga sa otporom. Više od pola tih aktivnosti je direktno vezano za sportske igre (košarka, fudbal, odbojka, rukomet) i druge vrste brzih i složenih kretanja. Poslednja grupa sastojala se od neaktivnih ispitanika (*Neaktivni*; godine  $25.4 \pm 1.3$ ). Dnevni nivo njihove fizičke aktivnosti procenjivan je standardnim IPAQ upitnikom (Taylor-Piliae i sar., 2006; videti poglavlje *Prilozi – prilog 7*). Tri ispitanika su prijavila umeren nivo fizičke aktivnosti, a ostalih 7 nizak nivo. Ni jedan od ispitanika nije bio uključen u redovne rekreativne fizičke aktivnosti. Ispitanici nisu bolovali od hroničnih bolesti i u poslednjih 6 meseci nisu pretrpeli povrede koje bi mogle da utiču na rezultate testiranja. Pre početka testiranja izrađen je pisani protokol eksperimenta, koji podrazumeva sve potrebne informacije o istraživanju. Svi ispitanici su pročitali protokol i upoznali se sa tokom i ciljevima istraživanja, kao i sa mogućim rizicima od povreda. Zatim su potpisali pismenu saglasnost za učestvovanje u eksperimentu (videti poglavlje *Prilozi – prilog 6*), koja je u skladu sa Helsinškom deklaracijom i odobrena od strane Etičke komisije Fakulteta sporta i fizičkog vaspitanja u Beogradu.

### 6.2.2. Protokol eksperimenta

Svaki ispitanik učestvovao je u 3 testiranja u razmaku od 5 do 7 dana između svakog. Pre testiranja, ispitanici su vršili standardnu proceduru zagrevanja (5 minuta okretanja pedala na bicikl ergometru i 5 minuta vežbi oblikovanja i dinamičkog rastezanja). Svakom testu prethodilo je detaljno objašnjenje i odgovarajuća demonstracija. Testiranje su vršila po dva iskusna merioca.

Prvog dana testiranja, sprovedena je procena morfološkog statusa ispitanika, posle kojih je usledilo merenje *MVC* mišića opružaća dominantne noge i uvežbavanje skokova sa opterećenjem.

Drugog dana testiran je *IPM<sub>C</sub>*, posle kojeg su ispitanici nastavili sa uvežbavanjem skokova sa opterećenjem.

Trećeg dana, ispitanici su izvodili 28 skokova po testiranju (7 opterećenja  $\times$  2 skoka  $\times$  2 merenja), a njihov redosled je bio izabran metodom slučajnog odabira, po tipu skoka i po opterećenju. Rezultati drugog merenja korišćeni su za dalje analize.

### 6.2.3. Eksperimentalne procedure

Eksperimentalne procedure sprovodile su se gotovo u potpunosti kao u *Eksperimentu 1*. Jedna od razlika bila je u primeni skokova uvis. Naime, u *Eksperimentu 2* su se primenjivali samo *SJ* i *CMJ*. Osim toga, u *Eksperimentu 2* se procenjivala i mišićna masa ispitanika (*MM*), metodom bioelektrične impedance, prema specifikacijama proizvođača (In Body 720, USA; *Slika 10*).

### 6.2.5. Obrada podataka

Platforma sile dimanzija 0.4 x 0.6 m (AMTI, Inc., Newton MA, USA; frekvencija snimanja 1,000 Hz) kalibrisana je prema specifikaciji proizvođača. U softveru LabVIEW (National Instruments, Version 10.0, Austin, TX) napisan je program, koji je korišćen za



snimanje i obradu signala vertikalne komponente sile reakcije podloge ( $F$ ). Signal je zatim propušten kroz niskopropusni rekurzivni filter drugog reda ("Butterworth", gornja frekvencija sečenja  $10\text{ Hz}$ ), a brzina i pozicija centra mase su bile izračunate kroz postepenu integraciju ubrzanja dobijenog iz signala sile (Vanrenterghem i sar., 2001). Filtirani signal je nakon toga korišćen za izračunavanje maksimalnih i prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$  iz koncentrične faze skoka.  $F$ - $V$  relacija je dobijena iz  $F$  i  $V$  varijabli (odvojeno za maksimalne i prosečne rezultate) za svih 7 opterećenja odvojeno za  $SJ$  i  $CMJ$ . Linearna regresija (videti *Jednačinu 1*) računata je za svaki komplet podataka, zajedno sa pripadajućim koeficijentima korelacije ( $r$ ). Linearne regresije su nakon toga ekstrapolisane, kako bi se dobili preseči  $F$  ( $F_0$ ;  $F$  pri nultoj  $V$ ) i  $V$  ( $V_0$ ;  $V$  pri nultoj  $F$ ), nagib regresije ( $a = F_0/V_0$ ) i maksimalna snaga iz parametara linearne regresije ( $P_{max} = (F_0V_0)/4$ ).

### 6.2.6. Statistička analiza podataka

Pre primene glavnih statističkih procedura, za sve varijable izračunate su srednja vrednost ( $SV$ ), standardna devijacija ( $SD$ ) i standardna greška ( $SE$ ). Pored toga, testirana je i normalnost distribucije varijabli korišćenjem Kolmogorov-Smirnov testa, kao i homogenost varijansi između grupa korišćenjem Levenov testa. Sve varijable su pokazale odstupanje od normalnosti distribucije ispod praga značajnosti.

Za testiranje razlika između grupa u godinama, morfološkim karakteristikama i snazi, primenjivana je jedno-faktorska *ANOVA*.

Testiranje *Hipoteze 1*, vršeno je kombinovanom ("within-between") dvo-faktorskom analizom varijanse (*ANOVA*). Ona je primenjivana na parametre  $F$ - $V$  relacije ( $F_0$ ,  $V_0$ ,  $a$  i  $P_{max}$ ) dobijene odvojeno za maksimalne i prosečne vrednosti  $F$  i  $V$ , kako bi se uočile razlike između 3 grupe ispitanika (*Bodibilderi*, *Aktivni* i *Neaktivni* – faktor *grupa*) i 2 skoka ( $SJ$  i  $CMJ$  – faktor *skok*). Ista *ANOVA* sa Bonferoni post hoc testom je primenjena i na  $Z$ -transformisane  $r$  vrednosti (transformacija je vršena zarad dobijanja normalnosti raspodele). U slučaju značajnosti glavnog efekta bez interakcije, primenjivan je T-test za nezavisne uzorke (faktor *skok*), kako bi se uporedile zavisne varijable dobijene u uslovima

*SJ* i *CMJ*. Pored toga, jedno-faktorska *ANOVA* (faktor *grupa*) je primenjivana kako bi se uporedile zavisne varijable dobijene za grupe *Bodibilderi*, *Aktivni* i *Neaktivni*. Bonferoni post hoc test je primenjivan u slučaju značajnih interakcija između faktora. Eta kvadrat ( $\eta^2$ ) je računat za sve *ANOVE*, gde su vrednosti veličine efekta od 0.01, 0.06 i preko 0.14 smatrane za male, srednje i velike (Cohen, 1988). Nivo statističke značajnosti bio je postavljen na  $p < 0.05$ . Svi statistički testovi bili su izvršeni korišćenjem programa SPSS 19.0 (IBM, Armonk, NY) i Microsoft Office Excel 2007 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA).

### 6.3. Rezultati

Morfološke karakteristike i procenjena snaga ispitanika prikazani su u *Tabeli 4*. U vrednostima *TV*, *TM* i *ITM* nema razlika između grupa, ali ispitanici u grupama *Bodibilderi* i *Aktivni* imaju statistički značajno veću *MM* i manje *PM* od ispitanika iz grupe *Neaktivni*. Kada je u pitanju snaga, ispitanici iz grupe *Bodibilderi* imaju statistički značano bolje rezultate u *IPM<sub>č</sub>* i *MVC* od ispitanika iz grupa *Aktivni* i *Neaktivni*. Osim toga, ispitanici iz grupe *Aktivni* imaju statistički značajno bolje rezultate u *IPM<sub>č</sub>* i *MVC* od ispitanika iz grupe *Neaktivni*.

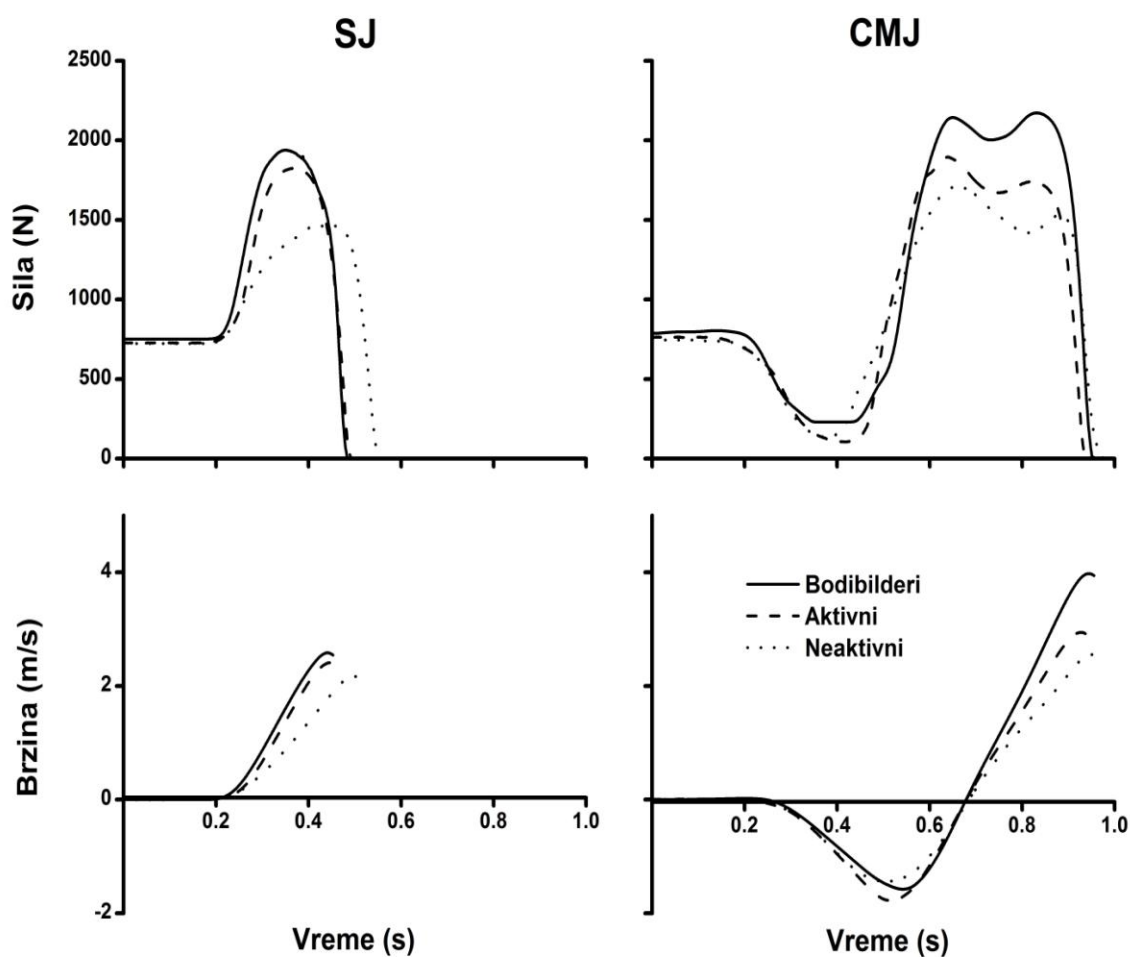
*Tabela 4. Morfološke karakteristike i snaga ispitanika (rezultati su prikazani kao SV ± SD).*

<b>Varijable</b>	<b>Bodibilderi</b>	<b>Aktivni</b>	<b>Neaktivni</b>
Telesna visina (m)	182.8 ± 7.6	183.2 ± 6.0	181.2 ± 6.0
Telesna masa (kg)	83.9 ± 6.4	79.6 ± 7.3	77.0 ± 6.2
ITM (kg/m <sup>2</sup> )	25.3 ± 1.5	23.7 ± 1.9	23.4 ± 2.3
Mišićna masa (kg)	44.8 ± 3.2	41.2 ± 4.2	36.1 ± 3.2 <sup>a,b</sup>
Masno tkivo (%)	7.3 ± 2.8	10.3 ± 3.1	17.1 ± 5.5 <sup>a,b</sup>
1PM <sub>č</sub> (kg)	192.0 ± 15.5	129.3 ± 29.5 <sup>a</sup>	97.4 ± 15.1 <sup>a,b</sup>
MVC (N)	1068 ± 105	858 ± 103 <sup>a</sup>	726 ± 96 <sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Statistički značajna razlika u odnosu na grupu *Bodibilderi*,  $p < 0.05$

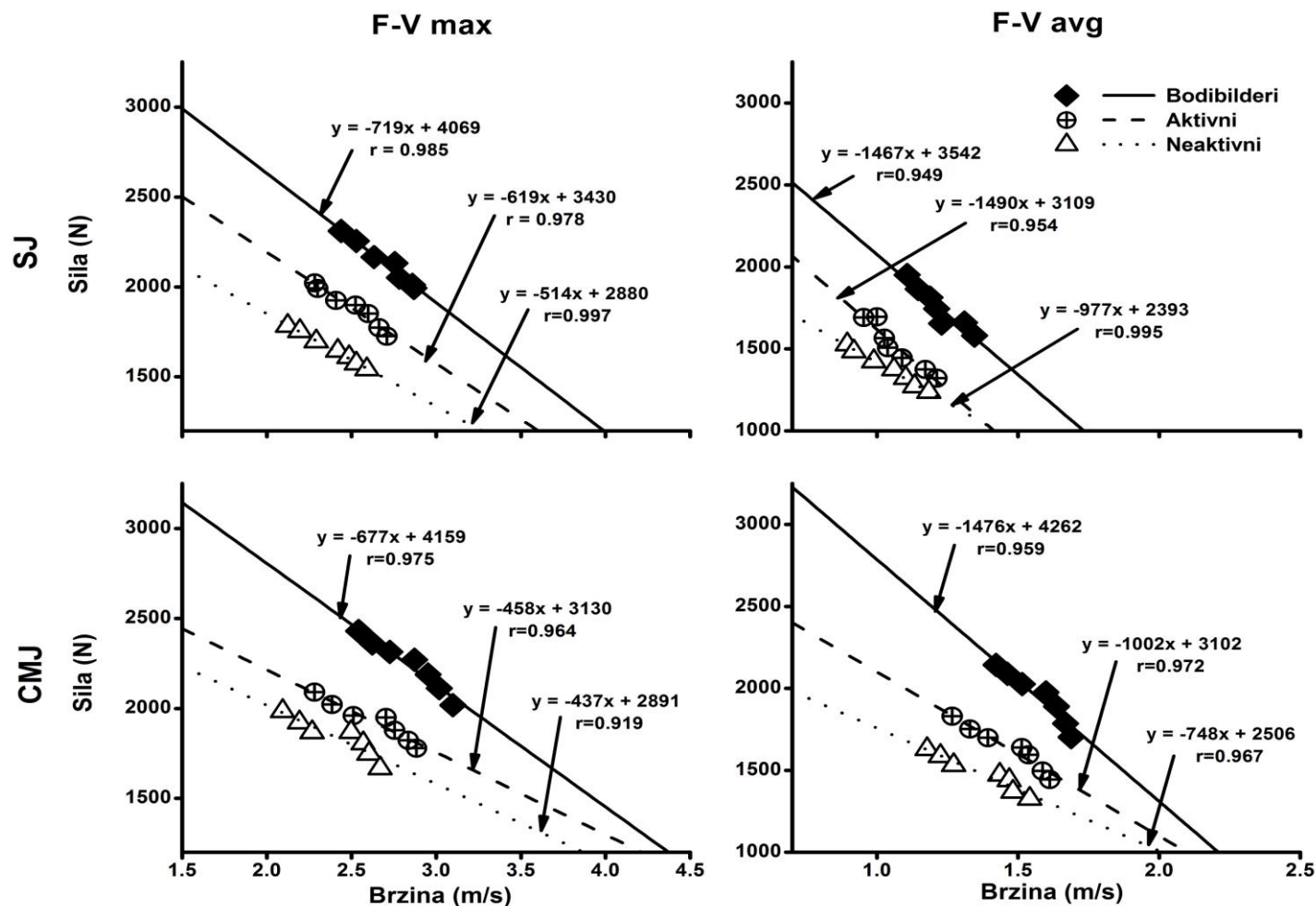
<sup>b</sup> Statistički značajna razlika u odnosu na grupu *Aktivni*,  $p < 0.05$

Slika 22 prikazuje uobičajene zapise sile i brzine kod tri reprezentativna ispitanika iz svake grupe. Iako su približne telesne mase, ispitanik iz grupe *Bodibilderi* imao je najveće vrednosti sile reakcije podloge i brzine centra mase tela, dok su iste vrednosti za ispitanika iz grupe *Neaktivni* bile najniže.



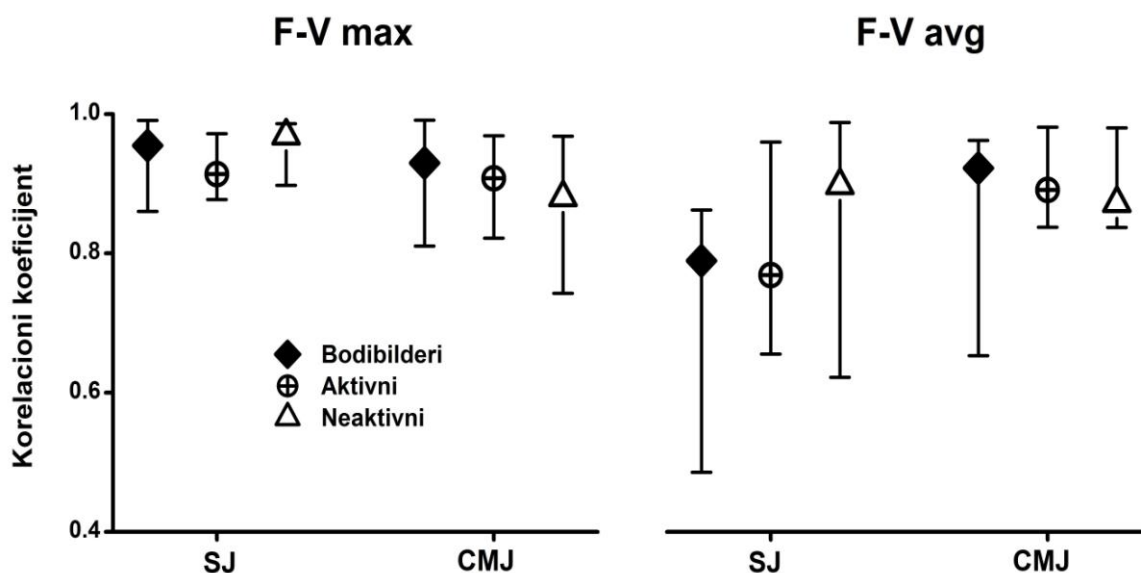
Slika 22. Prikazane su sile reakcije podloge ( $F$ ; gore) i brzine centra mase tela ( $V$ ; dole) dobijene kod tri reprezentativna ispitanika iz svake grupe pri 1.0 TT kod SJ i CMJ. Vremenski zapisi su poravnati u odnosu na početak skoka (kod SJ) ili u odnosu na trenutak prelaska iz ekscentrične u koncentričnu fazu skoka (CMJa).

Na *Slici 23* prikazane su linearne regresije koje predstavljaju  $F$ - $V$  relacije za sve tri grupe ispitanika. Rezultati su prikazani kao prosečne vrednosti za sve ispitanike iz pojedinačnih grupa i odvojeno za maksimalne (*Slika 23*; levo) i prosečne vrednosti  $F$  i  $V$  (*Slika 23*; desno). Svi korelacioni koeficijenti su veoma visoki ( $r$  je u opsegu od 0.919 do 0.997) i statistički značajni ( $p < 0.01$ ).



Slika 23. Prikazane su prosečne vrednosti sile reakcije podloge ( $F$ ) i brzine centra mase ( $V$ ) za svih 7 opterećenja kod svih ispitanika, korišćene za formiranje  $F$ - $V$  relacija. Podaci su dobijeni iz koncentričnih faza u uslovima oba skoka: SJ (gore), CMJ (dole). Na levoj strani su prikazani podaci dobijeni iz maksimalnih vrednosti  $F$  i  $V$  (MAX), a na desnoj iz prosečnih (AVG). Na slici su prikazani i linearni regresioni modeli zajedno sa jednačinama regresija i koeficijentom korelacije tih regresija.

Slika 24 prikazuje korelacione koeficijente (vrednosti medijane i njihove opsege) dobijene iz linearnih regresija iz pojedinačnih rezultata. Koeficijenti su opsega od 0.77 do 0.97 u zavisnosti od grupe, tipa skoka ili od varijable.



Slika 24. Koeficijenti korelacija (vrednost medijane  $\pm$  opseg) linearnih F-V relacija u uslovima dva različita skoka (SJ, CMJ) kod tri grupe ispitanika (Bodibilderi, Aktivni i Neaktivni) dobijeni odvojeno za maksimalne (MAX; levo) i prosečne vrednosti F i V (AVG; desno).

Kombinovana dvo-faktorska ANOVA, primenjena na Z-transformisane vrednosti korelacionih koeficijenata dobijenih iz maksimalnih vrednosti F i V, pokazala je značajan efekat za faktor *skok* ( $F_{(1,28)} = 10.9$ ,  $\eta^2 = 0.10$ ,  $p < 0.01$ ), ali ne i za faktor *grupa* ( $F_{(2,27)} = 1.64$ ,  $\eta^2 = 0.07$ ,  $p = 0.21$ ) i njihovu interakciju *skok*  $\times$  *grupa* ( $F_{(2,27)} = 2.08$ ,  $\eta^2 = 0.04$ ,  $p = 0.14$ ). Ista kombinovana dvo-faktorska ANOVA, primenjena na Z-transformisane vrednosti korelacionih koeficijenata prosečnih vrednosti F i V, takođe je pokazala značajan efekat za faktor *skok* ( $F_{(1,28)} = 5.71$ ,  $\eta^2 = 0.09$ ,  $p = 0.024$ ), ali ne za faktor *grupa* ( $F_{(2,27)} = 2.26$ ,  $\eta^2 = 0.06$ ,  $p = 0.12$ ) niti za njihovu interakciju *skok*  $\times$  *grupa* ( $F_{(2,27)} = 2.62$ ,  $\eta^2 = 0.08$ ,  $p = 0.091$ ). Pored toga, korelacije dobijene iz maksimalnih vrednosti F i V su bile veće u uslovima SJ nego CMJ, dok je kod korelacija dobijenih iz prosečnih vrednosti F i V bilo suprotno.

Parametri  $F$ - $V$  relacija ( $F_0$ ,  $V_0$ ,  $a$  and  $P_{max}$ ), dobijeni iz individualnih regresija, iz maksimalnih i prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ , posmatrani u uslovima  $SJ$  i  $CMJ$ , prikazani su na *Slici 25*. Kombinovana dvo-faktorska  $ANOVA$  primenjena je kako bi se procenili glavni efekti faktora *grupa* i *skok* kao i njihova interakcija (*skok*  $\times$  *grupa*), odvojeno za maksimalne i za prosečne vrednosti  $F$  i  $V$ .

Parametar presek sile ( $F_0$ ; *Slika 25a*), dobijen iz maksimalnih vrednosti  $F$  i  $V$ , pokazao je značajan efekat faktora *grupa* ( $F_{(2,27)} = 13.0$ ,  $\eta^2 = 0.37$ ,  $p < 0.01$ ), ali ne i faktora *skok* ( $F_{(1,28)} = 0.076$ ,  $\eta^2 < 0.01$ ,  $p = 0.78$ ), kao ni za njihovu interakciju *skok*  $\times$  *grupa* ( $F_{(2,27)} = 0.63$ ,  $\eta^2 = 0.01$ ,  $p = 0.54$ ). Kod grupe *Bodibilderi*, parametar  $F_0$  je bio veći nego kod grupe *Aktivni* i *Neaktivni*, u uslovima  $CMJ$ . Kada su u pitanju prosečne vrednosti  $F$  i  $V$ , efekti i za faktor *grupa* ( $F_{(2,27)} = 10.7$ ,  $\eta^2 = 0.25$ ,  $p < 0.01$ ) i *skok* ( $F_{(1,28)} = 8.62$ ,  $\eta^2 = 0.10$ ,  $p < 0.01$ ) su se pokazali kao značajni, ali ne i njihova interakcija *skok*  $\times$  *grupa* ( $F_{(2,27)} = 1.53$ ,  $\eta^2 = 0.03$ ,  $p = 0.23$ ). Parametar  $F_0$  je bio veći kod grupe *Bodibilderi*, u odnosu na grupe *Aktivni* i *Neaktivni* u uslovima  $SJ$  i  $CMJ$ .

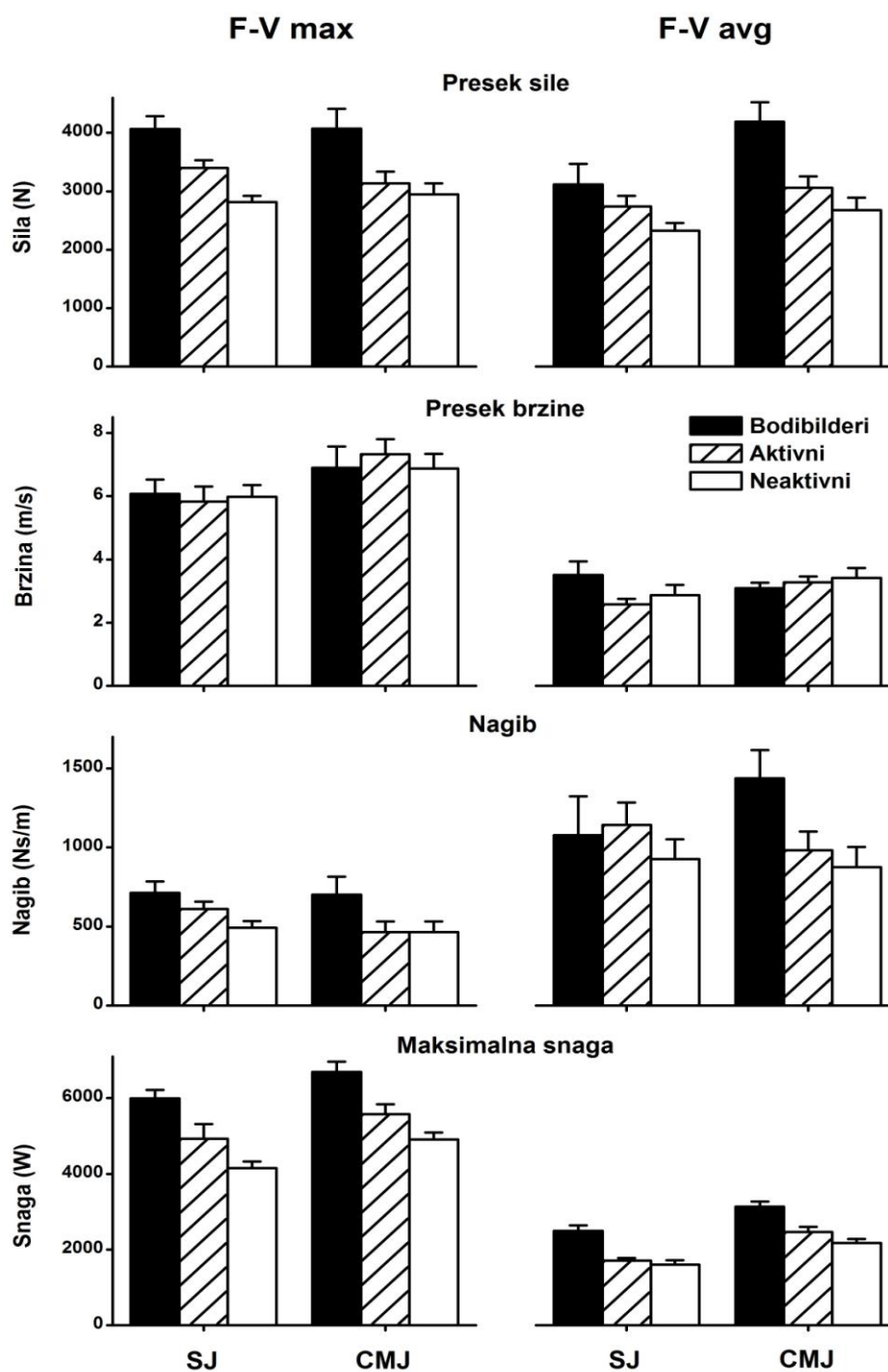
Presek brzine ( $V_0$ ; *Slika 25b*), dobijen iz maksimalnih vrednosti  $F$  i  $V$ , pokazao je značajan efekat za faktor *skok* ( $F_{(1,28)} = 7.70$ ,  $\eta^2 = 0.12$ ,  $p < 0.01$ ), ali ne i za faktor *grupa* ( $F_{(2,27)} = 0.042$ ,  $\eta^2 < 0.01$ ,  $p = 0.96$ ) i za njihovu interakciju *skok*  $\times$  *grupa* ( $F_{(2,27)} = 0.31$ ,  $\eta^2 = 0.01$ ,  $p = 0.74$ ). Parametar  $V_0$  je bio veću u uslovima  $CMJ$ , nego  $SJ$ . Isti parametar dobijen iz prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ , nije pokazao značajan efekat za faktore *skok* ( $F_{(1,28)} = 1.78$ ,  $\eta^2 = 0.02$ ,  $p = 0.19$ ), *grupa* ( $F_{(2,27)} = 0.73$ ,  $\eta^2 = 0.03$ ,  $p = 0.49$ ) niti za njihovu interakciju *skok*  $\times$  *grupa* ( $F_{(2,27)} = 2.79$ ,  $\eta^2 = 0.07$ ,  $p = 0.079$ ).

Parametar nagib regresije ( $a$ ; *Slika 25c*), dobijen iz maksimalnih vrednosti  $F$  i  $V$ , pokazao je značajan efekat za faktor *grupa* ( $F_{(2,27)} = 4.93$ ,  $\eta^2 = 0.16$ ,  $p = 0.01$ ), ali ne za faktor *skok* ( $F_{(1,28)} = 1.24$ ,  $\eta^2 = 0.02$ ,  $p = 0.27$ ), niti za njihovu interakciju *skok*  $\times$  *grupa* ( $F_{(2,27)} = 0.61$ ,  $\eta^2 = 0.02$ ,  $p = 0.55$ ). Kod grupe *Bodibilderi*, parametar  $a$  je bio veći nego kod grupe *Neaktivni*, u uslovima  $SJ$ . Nagib regresije, dobijen iz prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ , nije pokazao značajan efekat za faktore *skok* ( $F_{(1,28)} = 0.13$ ,  $\eta^2 < 0.01$ ,  $p = 0.72$ ) i *grupa* ( $F_{(2,27)} =$

2.48,  $\eta^2 = 0.08$ ,  $p = 0.10$ ), niti za njihovu interakciju *skok*  $\times$  *grupa* ( $F_{(2,27)} = 1.39$ ,  $\eta^2 = 0.05$ ,  $p = 0.27$ ).

Na kraju, parametar maksimalna snaga ( $P_{max}$ ; Slika 25d), dobijen iz maksimalnih vrednosti  $F$  i  $V$ , pokazao je značajan efekat za faktore *grupa* ( $F_{(2,27)} = 16.3$ ,  $\eta^2 = 0.43$ ,  $p < 0.01$ ) i *skok* ( $F_{(1,28)} = 21.7$ ,  $\eta^2 = 0.10$ ,  $p < 0.01$ ), ali ne i za njihovu interakciju *skok*  $\times$  *grupa* ( $F_{(2,27)} = 0.042$ ,  $\eta^2 < 0.01$ ,  $p = 0.96$ ).  $P_{max}$  je bio najveći kod grupe *Bodibilderi*, a najniži kod grupe *Neaktivni*, u uslovima oba skoka. Pored toga,  $P_{max}$  je bio veći u uslovima *CMJ*, nego *SJ*.  $P_{max}$  dobijen iz prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ , takođe je pokazao značajan efekat za faktore *grupa* ( $F_{(2,27)} = 25.0$ ,  $\eta^2 = 0.40$ ,  $p < 0.01$ ) i *skok* ( $F_{(1,28)} = 67.7$ ,  $\eta^2 = 0.27$ ,  $p < 0.01$ ), ali ne i za njihovu interakciju *skok*  $\times$  *grupa* ( $F_{(2,27)} = 0.47$ ,  $\eta^2 < 0.01$ ,  $p = 0.63$ ). Parametar  $P_{max}$  je bio veći kod grupe *Bodibilderi* u odnosu na grupe *Aktivni* i *Neaktivni*. Isti parametar je bio veći u uslovima *CMJ*, nego u uslovima *SJ*.





Slika 25. Rezultati prosečnih vrednosti preseka sile ( $F_0$ ; Slika 25a), preseka brzine ( $V_0$ ; Slika 25b), nagiba regresije ( $a$ ; Slika 25c) i maksimalne snage ( $P_{max}$ ; Slika 25d) dobijenih iz individualnih linearnih regresija za dva skoka (SJ, CMJ) i tri grupe ispitanika (Bodibilderi, Aktivni i Neaktivni; rezultati su prikazani kao SV i SE). Levo su prikazani podaci dobijeni iz maksimalnih (MAX), a desno iz prosečnih vrednosti F i V (AVG).

## 6.4. Diskusija

Glavni cilj *Eksperimenta 2* bio je procena  $F$ - $V$  relacije mišića nogu, u uslovima skokova uvis sa spoljašnjim opterećenjem, kod grupa ispitanika različite fizičke pripremljenosti. S tim u vezi, primenjen je model linearne regresije na silu reakcije podloge ( $F$ ) i brzinu centra mase tela ( $V$ ), dobijenih u uslovima skokova uvis sa 7 opterećenja, u okviru 3 grupe ispitanika različite fizičke pripremljenosti. Iako se vrednosti većine regresionih parametara razlikuju, dobijene  $F$ - $V$  relacije su se pokazale kao linearne i veoma povezane bez obzira na tip skoka ( $SJ$  i  $CMJ$ ) i grupu ispitanika (*Bodibilderi*, *Aktivni* i *Neaktivni*) kao i kod varijabli dobijenih iz maksimalnih i prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ . Međutim, glavni nalaz ovog eksperimenta je taj, da su dobijene  $F$ - $V$  relacije i njihovi parametri dovoljno osetljivi da detektuju razlike između ispitanika različite fizičke pripremljenosti.

### Glavni nalazi

Metodološki pristup *Eksperimentu 2* bio je sličan onom u *Eksperimentu 1*, gde su takođe primenjene različite vrste skokova uvis kao i  $F$  i  $V$  varijable. Pri tom je pokazano da su dobijeni parametri  $F$ - $V$  relacija visoko pouzdani, sa umerenom do visokom konkurentnom validnošću u odnosu na direktno merene  $F$  i  $P$  (Ćuk i sar., 2014). Takođe, rezultati  $F$ - $V$  parametara dobijeni u *Eksperimentu 2*, veoma su slični parametrima dobijenim testiranjem funkcije mišića nogu u sličnim studijama. Na primer, raspon rezultata parametra  $F_0$  odgovara vrednostima dobijenim u uslovima  $SJ$ , kao i kod opružanja nogu maksimalnog intenziteta kod netreniranih (Yamauchi i Ishii, 2007; Samozino i sar., 2014) i treniranih (Rahmani i sar., 2001; Cormie i sar., 2010a) ispitanika muškog pola. U istim studijama rezultati parametra  $V_0$ , slični su onima koji su dobijeni u *Eksperimentu 2* prilikom izvođenja  $SJ$ . Stoga, može se zaključiti da primena pozitivnog i negativnog opterećenja, koje je korišćeno u ovom eksperimentu tokom skokova uvis maksimalnim intenzitetom, nije u velikoj meri uticalo na rezultate u odnosu na studije gde se primenjivalo samo pozitivno opterećenje, u uslovima  $SJ$ . Šta više, rezultati kod sunožnog odgurivanja nogama sa opterećenjem, koji uobičajeno zahtevaju strogo kontrolisane

laboratorijske uslove, imaju rezultate slične onima iz ovog eksperimenta (Yamauchi i sar., 2009; Samozino i sar., 2012).

### Razlike između grupa

Jedan od važnijih nalaza ove studije su i razlike u  $F$ - $V$  parametrima između grupa ispitanika različite fizičke pripremljenosti. Uopšteno posmatrano, rezultati potvrđuju *Hipotezu 1*, da će parametri  $F$ - $V$  relacije ( $F_0$ ,  $V_0$ ,  $a$  i  $P_{max}$ ) pokazati razlike između testiranih grupa ispitanika. Razlike u  $P_{max}$  slažu se sa gotovo svim studijama koje su procenjivale snagu mišića nogu, kod ispitanika različite fizičke pripremljenosti (Cormie i sar., 2010b; Nuzzo i sar., 2010; Pazin i sar., 2013). Međutim, ono što se razlikuje u odnosu na te studije, je to što razlike u  $P_{max}$  potiču gotovo isključivo od razlika u  $F_0$ , dok su razlike u  $V_0$  zanemarljive ( $P_{max}$  predstavlja proizvod  $F_0$  i  $V_0$ ; videti *Jednačinu 3*). S tim u vezi, dobijeni podaci sugerišu da snažniji ispitanici imaju strmiji nagib  $F$ - $V$  relacije ( $a$ ), koji prevashodno potiče od razlika u  $F$ , a ne  $V$ . Iako je ovaj nalaz u skladu sa razlikama koje su dobili Yamauchi i saradnici (2009, 2010) testirajući mlađe i starije ispitanike, on se ipak ne slaže sa nekim novijim teorijskim modelima. Na primer, makroskopski model opružaća nogu Samozina i saradnika predlaže, da je optimalni  $F$ - $V$  nagib za izvođenje skoka uvis maksimalnim intenzitetom kod snažnijih ispitanika manje strm (relativno veća vrednost parametra  $V_0$  nego  $F_0$ ; Samozino i sar., 2012). Osim toga, isti nalazi ne idu u prilog jednom od mogućih mehanizama odgovornih za hipotezu maksimalnog dinamičkog izlaza (Jaric i Markovic, 2009). Prema toj hipotezi, mišići nogu ostvaruju maksimalni dinamički izlaz (kao što su snaga i impuls sile), tokom brzih pokreta sa težinom sopstvenog tela. Ovo svojstvo mišića “nezavisno od mišićne jačine” (kada telesna masa obezbeđuje optimalno opterećenje bez obzira na jačinu mišića; Jaric i Markovic, 2013; Suzovic i sar., 2013), očigledno zahteva adaptaciju  $F$ - $V$  relacije prema mišićnim kapacitetima u sili ( $F_0$ ) ili brzini ( $V_0$ ), u zavisnosti od mišićne snage. Pored toga, već decenijama je poznato da je treningom moguće “pomeriti” nagib  $F$ - $V$  relacije ili ka  $F_0$  ili ka  $V_0$  (Kaneko i sar., 1983). S tim u vezi, moguće je zaključiti da nedostatak razlika u  $V_0$  između 3 grupe, može poticati od visokog nivoa treniranosti koji potstiče povećanje  $F_0$  (ali ne i  $V_0$ ), kod ispitanika iz grupe *Bodibilderi*, dok razlike u snazi između grupa *Aktivni* i *Neaktivni* nije bila dovoljno velika

kako bi se dobile razlike u  $V_0$ . Nasuprot tome, moguće je i tvrditi da se od grupe *Aktivni* (koja se sastojala od ispitanika koji su u velikoj meri upražnjavali pokrete velike brzine), očekivalo da imaju veće vrednosti  $V_0$  u odnosu na  $F_0$ . Na kraju dobijeni nalazi mogu biti objašnjeni i smerom izvođenja testiranih pokreta. Naime, mišićna sila može biti najdominantniji faktor kada se pokret izvodi nasuprot gravitaciji, u odnosu na horizontalne kretanje ili kretanje pod blagim nagibom (Minetti, 2002; Samozino i sar., 2012). U skladu sa tim, buduće studije bi trebalo direktno da uporede  $F$ - $V$  relacije mišića nogu, kod ispitanika koji upražnjavaju samo trening snage, odnosno trening brzine i to pri izvođenju pokreta (sličnih skokovima) i u horizontalnom i vertikalnom smeru. Time bi se otkrilo da li posmatrane razlike u snazi, koje potiču od  $F_0$  (a ne  $V_0$ ), predstavljaju prirodnu osobinu mišića nogu kod čoveka ili ipak predstavljaju posledicu odabira grupe ispitanika ili odabira smera kretanja prilikom pokreta.

### **Mogućnost primene testa za rutinsku procenu funkcije mišića nogu**

Kada je u pitanju drugi cilj ovog eksperimenta, dobijene razlike u parametrima  $F$ - $V$  relacija, u uslovima različitih skokova i varijabli, su u skladu sa rezultatima *Eksperimenta 1* (Ćuk i sar., 2014). Osim toga, slične su i povezanosti  $F$ - $V$  relacija, posmatrane u uslovima  $SJ$  i  $CMJ$ , kao i kada se koriste maksimalne i prosečne vrednosti  $F$  i  $V$ . S tim u vezi, u budućim testiranjima mehaničkih osobina mišića nogu, moguće je primenjivati oba tipa skoka uvis, kao i oba tipa varijabli. Ipak, treba imati u vidu da se apsolutne vrednosti različitih parametara veoma razlikuju. Očekivano, parametar  $P_{max}$  je bio veći u uslovima  $CMJ$  nego  $SJ$ , pre svega zbog većeg  $F_0$ , a ne  $V_0$ . Međutim, kada se porede rezultati kod različitih varijabli,  $F$ - $V$  parametri dobijeni iz maksimalnih vrednosti  $F$  i  $V$  imaju značajno veći  $P_{max}$ , a niži  $a$ , nego oni dobijeni iz prosečnih vrednosti  $F$  i  $V$ . Ta razlika potiče u najvećoj meri od većeg  $V_0$  nego  $F_0$ . Dakle, iako dobijeni rezultati sugerišu da je moguće koristiti različite vrste skokova i varijabli za procenu  $F$ - $V$  relacija kod mišića nogu (Ćuk i sar., 2014), buduće studije striktno treba da uzmu u obzir i različite vrste skokova i varijabli, bilo da je cilj evaluacija testa ili poređenje nalaza iz različitih studija.

### Ograničenja studije

Postoji nekoliko ograničenja ove studije koje treba uzeti u obzir pri planiranju budućih istraživanja:

1. Studija nije uključila grupu ispitanika koji su trenirani “po tipu brzine”. Time bi se dodatno objasnile razlike u parametrima  $F_0$  i  $V_0$ , između ispitanika različite fizičke pripremljenosti.

2. Posebno treba naglasiti da, iako su primenjena i pozitivna i negativna opterećenja kako bi se povećao ukupan raspon opterećenja, posmatrani paramteri  $F-V$  relacije,  $F_0$  i  $V_0$ , su i dalje produkti udaljene ekstrapolacije.

3. Opterećenje koje je primenjivano u ovom eksperimentu je konstantno, tj. menja samo težinu tela, ali ne i inerciju, što može imati uticaja na posmatrane kinematičke i kinetičke varijable skoka (Leontijevic i sar., 2012, 2013).

4. Osim navedenih ograničenja, treba imati u vidu, da i rezultati drugih istraživanja (Mandic i sar., poslato; Markovic i sar., 2014), kao i postojeći modeli skokova uvis (Samozino i sar., 2008; Bobbert i sar., 2014), sugerišu da sopstveni izbor spuštanja u uslovima *CMJ* značajno menja kinetičke i dinamičke varijable skoka uvis. I pored toga, pouzdanost i faktorska validnost pokazuju slične rezultate u *CMJ* i *SJ* (Markovic i sar., 2004), dok je efekat spuštanja na maksimalno izvođenje skoka relativno mali (Bobbert i sar., 2008; Mandic i sar., poslato). S tim u vezi, pretpostavlja se da je adaptacija na spuštanje prirodno svojstvo *CMJ* (Mandic i sar., poslato; Markovic i sar., 2014), pre nego ograničavajući faktor za procenu mehaničkih osobina mišića nogu (Bobbert, 2014).

## Zaključci Eksperimenta 2

U ovom eksperimentu pokazane su veoma povezane i linearne  $F$ - $V$  relacije kod mišića nogu u uslovima izvođenja skokova i kod različitog tipa  $F$  i  $V$  varijabli, kao i između grupa ispitanika različite fizičke pripremljenosti. Od naročitog značaja je nalaz da su parametri  $F$ - $V$  relacije dovoljno osetljivi da detektuju razlike između ispitanika različite fizičke pripremljenosti. Posmatrane razlike u  $P_{max}$ , prevashodno potiču od razlika u  $F_0$ , a ne od razlika u  $V_0$ . Uzimajući u obzir nalaze dobijene u *Eksperimentu 1* (Ćuk i sar., 2014), dobijeni rezultati iz *Eksperimenta 2* idu u prilog tome, da je do sada korišćenu metodologiju, moguće primenjivati u rutinskom testiranju sposobnosti mišića nogu (ali i drugih mišićnih grupa) da ispolje maksimalnu silu, brzinu i snagu.

## 7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog istraživanja bio je da se utvrde i analiziraju mehaničke osobine mišića nogu, primenom linearne  $F$ - $V$  relacije. Mehaničke osobine mišića istraživane su primenom pozitivnog i negativnog spoljašnjeg opterećenja, u uslovima različitih skokova uvis. Na osnovu rezultata dobijenih u eksperimentima, u skladu sa postavljenim ciljevima može se zaključiti:

1. Nalazi u oba eksperimenta su generalno konzistentni u odnosu na različite vrste skokova uvis i u odnosu na način obrade rezultata (primena prosečnih i maksimalnih vrednosti  $F$  i  $V$ ). Takođe, rezultati oba eksperimenta pokazuju da su  $F$ - $V$  relacije mišića opružača nogu, dobijene u uslovima skokova uvis sa pozitivnim i negativnim opterećenjem, visoko povezane i linearne, a  $P$ - $V$  relacije parabolične i takođe visoko povezane.

2. Uopšteno gledano, svi parametri  $F$ - $V$  relacija su visoko pouzdani. Ipak, rezultati idu u prilog tome da su parametri  $F_0$  i  $P_{max}$  donekle pouzdaniji od parametra  $V_0$ .

3. Na osnovu razlika između parametara  $F$ - $V$  relacija, zaključeno je da bi za njihovu procenu, u uslovima skokova uvis, bilo bolje koristiti prirodni tip skoka ( $CMJ$ ) u odnosu na  $SJ$ . Takođe, mogu se koristiti i maksimalne i prosečne vrednosti  $F$  i  $V$  za dobijanje  $F$ - $V$  relacija, a njihovi parametri mogu biti korišćeni za procenu sposobnosti razvijanja mišićne sile, snage i brzine kod mišića opružača nogu.

4. Testirani parametri  $F$ - $V$  relacija imaju umerenu do visoku konkurentnu validnost. Izrazito visoku konkurentnu validnost ima parametar  $P_{max}$ , dok je konkurentna validnosti parametra  $F_0$  u proseku niža i delimično statistički značajna.

5. Parametri  $F$ - $V$  relacija su dovoljno osetljivi da pokažu razlike između ispitanika različite fizičke pripremljenosti.

6. Posmatrane razlike u maksimalnoj snazi kod različitih grupa ispitanika ( $P_{max}$ ), prevashodno potiču od razlika u  $F_0$ , a manje od razlika  $V_0$ .

7. Sa metodološkog aspekta, kao i sa aspekta primene u praksi, posebno je značajan nalaz da skokovi uvis sa različim opterećenjem mogu biti integrisani u metod za rutinsko testiranje mehaničkih osobina mišića opružaća nogu u smislu ispoljavanja sile, brzine i snage.

## 7.1. Potencijalni značaj istraživanja

O mehaničkim osobinama mišića se još uvek relativno malo zna, a njihova uloga, pre svega u sportu, fiziologiji, fizikalnoj medicini i rehabilitaciji je veoma bitna. Potencijalno glavni značaj ovog istraživanja, je mogućnost dobijanja novih saznanja o ulozi mehaničkih osobina u višezglobnim mišićnim sistemima, kao i pojednostavljanje testiranja mišićne mehanike u različitim sportskim aktivnostima. Korišćenje jednostavnog linearnog modela, umesto složenog hiperboličnog, omogućava lakše modeliranje balističkih pokreta opružaća nogu, kao i njegovu direktnu primenu u sportskim treninzima i intervencijama u rehabilitaciji. Kako se pokazalo da su parametri linearne  $F$ - $V$  relacije pouzdani, validni i osetljivi, ovaj značaj je time još veći.

Ovim istraživanjem je pokazano da skokovi sa različitim opterećenjem mogu poslužiti za razvoj relativno jednostavnih testova za rutinsku procenu mehaničkih mogućnosti mišića nogu, preko linearne  $F$ - $V$  relacije (Driss i sar., 1998; Samozino i sar., 2008; Ćuk i sar., 2014). Takvi testovi bi bili bazirani na kratkim serijama maksimalnih skokova ( $CMJ$ ), koji bi se izvodili na platformi sile, sa jednostavnim opterećenjem (npr. prsluk ili šipka sa teretom, Smit mašina). Rezultati tih testova bi mogli da ukažu na potencijalnu neuravnoteženost između sposobnosti za razvoj  $F$  i  $V$ , preko nagiba  $F$ - $V$  relacije (Samozino i sar., 2012, 2014). Osim toga, na osnovu njih bi mogao da se proceni nivo adaptacije testiranih mišićnih grupa na razne sportske treninge i intervencije u rehabilitaciji (Cormie i sar., 2010a) ili da se dodatno prouči bilateralni deficit (Samozino i sar., 2014).

Pored navedenog, postoji i mogućnost primene ovakve ili sličnih metoda u različitim testiranjima nervno-mišićnog sistema, treningu i rehabilitaciji. Na primer,



procenjivanje  $F$ - $V$  relacije opružaća nogu primenom spoljašnjeg opterećenja, može obezbediti naučnicima i trenerima uvid u trenažne potrebe sportista. Ako sa povećanjem opterećenja sportisti brzina značajno opada, onda trener treba da osmisli trening usmeren ka jačanju (velika opterećenja). Ako se sa povećanjem opterećenja izuzetno malo smanjuje brzina, onda trener treba da primeni pliometrijski trening ili trening skokova sa negativnim opterećenjem.

U skladu sa rezultatima ovog istraživanja, možemo zaključiti da se kod višezglobnih pokreta maksimalni dinamički izlaz snage ispoljava na oko 50% maksimalne izometrijske sile (Yamauchi i sar., 2007, 2010) umesto pri 30-35% kako je to kod Hilove hiperbolične relacije (Hill, 1938; Kaneko i sar., 1983). Dakle, optimalni izlaz snage kod složenih pokreta mišića nogu može da se razlikuje od onog na izolovanim mišićima ili zglobovima. Prema tome, kako bi unapredili maksimalni dinamički izlaz snage kod višezglobnih pokreta nogu (što je od velikog značaj ne samo za sportski uspeh, već i za neka kretanja u svakodnevnom životu), složene vežbe bi trebalo da se izvode pri opterećenju koje je oko 50% od maksimalne izometrijske sile, maksimalnom brzinom.

Još jedan od potencijalnih značaja studije ogleđa se u mogućnosti da se ovakva ili slična metodologija koristiti za procenu mišićne funkcije, uz relativno nizak nivo fizičkog stresa, npr. bez potrebe da se ispolji velika sila za ubrzavanje mase tela (Yamauchi i Ishii, 2007) ili bez velikog povećanja krvnog pritiska (Yamauchi i sar, 2009). Na primer, ako se izvedu pokreti sa samo nekoliko (lakših) opterećenja, ekstrapolacijom bi se dobili teoretski maksimumi  $F$  i  $V$  bez potrebe da se izvode pokreti sa većim opterećenjem. To pre svega može da se primeni u testiranju dece, rekonvalescenata ili starijih osoba (Yamauchi i Ishii, 2007).

## 7.2. Smernice za buduća istraživanja

Jedan od glavnih ciljeva budućih istraživanja bi trebalo da bude evaluacija testa za rutinsku procenu mehaničkih mogućnosti sile, brzine i snage kod mišića opružaća nogu. Iako bi takav test trebalo da bude relativno jednostavan i lako primenjiv (npr. jedna vrsta skoka i varijabli), za njegovu evaluaciju može da se koristi i više vrsta skokova (*SJ*, *CMJ*, *CMJa*) i više vrsta varijabli (npr. maksimalne i prosečne vrednosti  $F$  i  $V$ ).

Buduće studije bi trebalo da direktno uporede  $F$ - $V$  relacije mišića nogu kod ispitanika koji nisu aktivni, zatim kod onih koji su umereno aktivni i kod onih koji upražnjavaju trening snage (bodibilderi, dizači tegova, bacači...). Takođe, trebalo bi uporediti  $F$ - $V$  relacije mišića nogu i kod ispitanika koji upražnjavaju trening brzine (sprinteri, odbojkaši, teniseri...). Relacije treba istražiti u uslovima vršenja skokova (tj. maksimalnog opružanja nogu) i u horizontalnom i vertikalnom pravcu. Time bi se pokazalo da li posmatrane razlike u snazi koje potiču od  $F_0$  (a ne  $V_0$ ), predstavljaju prirodnu osobinu mišića nogu kod čoveka ili ipak predstavljaju posledicu odabira grupe ispitanika ili odabira pravca kretanja prilikom pokreta.

Jedan od ciljeva budućih istraživanja bi mogao da bude i proširivanje opsega mernih vrednosti  $F$  i  $V$ . Naime u ovom istraživanju primenjen je relativno uzak interval opterećenja, što dovodi to toga da parametri  $F$ - $V$  relacije bivaju produkt udaljene ekstrapolacije, a time se stvara i veća mogućnost za pojavu greške. Interval od  $0.7 TT$  do  $1.3 TT$  korišćen je pre svega zbog nemogućnosti slabijih ispitanika da skoče sa opterećenjem većim od  $1.3 TT$ , kao i zbog toga što bi snažniji ispitanici pri opterećenjima manjim od  $0.7 TT$  skakali daleko preko visine od  $1 m$ . Time se u velikoj meri narušava tehnika izvođenja skoka, a i rizik od povređivanja pri doskoku se povećava. Buduća istraživanja bi to mogla da reše primenom drugačijeg sistema za primenu pozitivnog i negativnog opterećenja, kao i primenom skokova ili simultanog opružanja nogu pod nagibom.

Zbog kraće procedure testiranja, zarad izbegavanja mogućeg zamora ispitanika, u ovom istraživanju su se izvodila samo dva ponavljanja po tipu skoka i opterećenju, a rezultati drugog pokušaja korišćeni su za dalju analizu. S tim u vezi, postoji mogućnost da se određenim izmenama u protokolu (na primer dodavanje još jednog ponavljanja i biranjem najboljeg pokušaja), može obezbediti još veća pouzdanost i konkurentna validnost nekih parametara, nego što je to bio slučaj u ovom istraživanju.

Opterećenje primenjeno u ovom istraživanju je konstantno, tj. menja samo težinu tela, ali ne i inerciju, što može imati uticaja na posmatrane kinematičke i kinetičke varijable kod skoka (Leontijević i sar., 2012, 2013). Buduća istraživanja bi trebala da obuhvate nekoliko vrsta opterećenja (gravitaciono, inerciono i gravitaciono+inerciono), kako bi ustanovili koje od njih daje najpouzdanije rezultate.

U ovom istraživanju nije kontrolisan mogući efekat spuštanja u uslovima *CMJ* i *CMJa*, koji može uticati na ispoljavanje sile i snage kod skokova uvis sa opterećenjem (Samozino i sar., 2012; Marković i sar., 2013). To je učinjeno zbog pretpostavke da je adaptacija na spuštanje prirodno svojstvo *CMJ* (Mandić i sar., poslato; Marković i sar., 2014), pre nego ograničavajući faktor za procenu mehaničkih osobina mišića nogu (Bobbert, 2014). S tim u vezi, buduća istraživanja ne treba da uvode kontrolu spuštanja pri izvođenju *CMJ* i *CMJa*, jer time neće mnogo uticati na poboljšanje izvođenja skoka, dok dodatni faktor (u vidu kontrole spuštanja) može dodatno usložiti izvođenje skokova uvis, pa samim tim i buduća istraživanja gde se oni primenjuju.

Na kraju treba dodati, da je pored skokova uvis ovakav vid istraživanja potrebno primeniti i na druge složene pokrete. To bi značajno doprinelo boljem razumevanju uloge mehaničkih osobina mišića nogu u izvođenju složenih balističkih pokreta, kao i u svakodnevnom kretanju čoveka.

## LITERATURA

1. Andersen LL, Andersen JL, Magnusson SP, Suetta C, Madsen JL, Christensen LR, Aagaard P. Changes in the human muscle force-velocity relationship in response to resistance training and subsequent detraining. *J Appl Physiol*, 2005;99(1):87-94.
2. Avela J, Santos PM, Kyrolainen H, Komi PV. Effects of different simulated gravity conditions on neuromuscular control in drop jump exercises. *Avi Space Env Med*, 1994;65(4):301-308.
3. Baker D, Nance S, Moore M. The load that maximizes the average mechanical power output during jump squats in power-trained athletes. *J Strength Cond Res*, 2001;15(1):92-97.
4. Bartlett R. *Sports biomechanics – reducing injuries and improving performance*. E & FN Spon, 2005.
5. Bobbert MF, Casius LJ, Sijpkens IW, Jaspers RT. Humans adjust control to initial squat depth in vertical squat jumping. *J Appl Physiol*, 2008;105(5):1428-1440.
6. Bobbert MF. Why is the force–velocity relationship in leg press tasks quasi-linear rather than hyperbolic? *J Appl Physiol*, 2012;112(12):1975–1983.
7. Bobbert MF. Effect of unloading and loading on power in simulated countermovement and squat jumps. *Med Sci Sports Exerc*, 2014;46(6):1176-1184.
8. Bosco C, Komi PV. Potentiation of the mechanical behavior of the human skeletal muscle through prestretching. *Acta Physiol Scand*, 1979;106(4):467-472.
9. Callahan DM, Kent-Braun JA. Effect of old age on human skeletal muscle force-velocity and fatigue properties. *J Appl Physiol*, 2011;111(5):1345-1352.
10. Chapman, A.E. *The mechanical properties of human muscle, in exercise and sport sciences reviews—Volume 13*, MacMillan, New York, USA, 1985.
11. Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, 2nd edn. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, 1988.

12. Cormie P, McCaulley GO, Triplett NT, McBride JM. Optimal loading for maximal power output during lower-body resistance exercises. *Med Sci Sports Exerc*, 2007;39(2):340-349.
13. Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Adaptations in athletic performance after ballistic power versus strength training. *Med Sci Sports Exerc*, 2010a;42(8):1582-1598.
14. Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Changes in the eccentric phase contribute to improved stretch-shorten cycle performance after training. *Med Sci Sports Exerc*, 2010b;42:1731-1744.
15. Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Developing maximal neuromuscular power: Part 1 - biological basis of maximal power production. *Sports Med* 2011a;41(1):17-38.
16. Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Developing maximal neuromuscular power: Part 2—training considerations for improving maximal power production. *Sports Med* 2011b;41(2):125–146.
17. Ćuk I, Markovic M, Nedeljkovic A, Ugarkovic D, Kukolj M, Jaric S. Force-velocity relationship of leg extensors obtained from loaded and unloaded vertical jumps. *Eur J Appl Physiol*. Epub, 2014.
18. Dickinson S. The Dynamics of Bicycle Pedaling. *Proc R Soc Lond B*, 1928.
19. Dorel S, Couturier A, Lacour JR, Vandewalle H, Hautier C, Hug F. Force-velocity relationship in cycling revisited: benefit of two-dimensional pedal forces analysis. *Med Sci Sports Exerc*, 2010;42(6):1174-83.
20. Driss T, Vandewalle H, Monod H. Maximal power and force-velocity relationships during cycling and cranking exercises in volleyball players. Correlation with the vertical jump test. *J Sports Med Phys Fit*, 1998;38:286-293.
21. Driss T, Vandewalle H, Le Chevalier JM, Monod H. Force–velocity relationship on a cycle ergometer and knee-extensor strength indices. *Can J Appl Physiol*, 2002;27(3):250–262.

22. Driss T, Vandewalle H. The measurement of maximal (anaerobic) power output on a cycle ergometer: a critical review. *Biomed Res Int. Epub*, 2013.
23. Dugan EL, Doyle TLA, Humphries B, Hasson CJ, Newton RU. Determining the optimal load for jump squats: a review of methods and calculations. *J Strength Cond Res*, 2004;18(8):668–674.
24. Galantis A, Woledge RC. The theoretical limits to the power output of a muscletendon complex with inertial and gravitational loads. *Proc Biol Sci*, 2003;270(7):1493-1498.
25. Gans C, i Bock WJ. The functional significance of muscle architecture: a theoretical analysis. *Adv Anat Embry Cell Biology*, 1965;38:115–142.
26. Gosseye TP, Willems PA, Heglund NC. Biomechanical analysis of running in weightlessness on a treadmill equipped with a subject loading system. *Eur J Appl Physiol*, 2010;110(4):709-728.
27. Griffin TM, Tolani NA, Kram R. Walking in simulated reduced gravity: mechanical energy fluctuations and exchange. *J Appl Physiol*, 1999;86(1):383-390.
28. Fenn WO, Marsh BS. Muscular force at different speeds of shortening. *J Physiol*, 1935;85:277–297.
29. Frost DM, Cronin J, Newton RU. A biomechanical evaluation of resistance: fundamental concepts for training and sports performance. *Sports Med*, 2010;40(4):303–326.
30. Harris NK, Cronin JB, Hopkins WG. Power outputs of a machine squat-jump across a spectrum of loads. *J Strength Cond Res*, 2007;21(4):1260-1264.
31. Hill AV. The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proc R Soc Med (Lond)*, 1938;126:136–195.
32. Hintzy F, Tordi N, Predine E, Rouillon JD, Belli A. Force–velocity characteristics of upper limb extension during maximal wheelchair sprinting performed by healthy able-bodied females. *J Sports Sci*, 2003;21(11):921–926.

33. Hong Y i Bartlett RM. Handbook of biomechanics and human movement. Routledge, 2008.
34. Hopkins WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med*, 2000;30(1):1-15.
35. Huijing, P.A. Elastic potential of muscle, in strength and power in sport, Blackwell Scientific, Oxford, England, 1992.
36. Jaric S, Ristanovic D, Corcos DM. The relationship between muscle kinetic parameters and kinematic variables in a complex movement. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1989;59(5):370-376.
37. Jarić S. Biomehanika humane lokomocije sa biomehanikom sporta. Fakultet sporta i fizičkog vaspitanja, 1997.
38. Jaric S. Muscle strength testing: use of normalisation for body size. *Sports Med*, 2002;32(10):615-631.
39. Jaric S, Markovic G. Leg muscles design: the maximum dynamic output hypothesis. *Med Sci Sports Exerc*, 2009;41(4):780-787.
40. Jaric S, Markovic G. Body mass maximizes power output in human jumping: a strength-independent optimum loading behavior. *Eur J Appl Physiol*, 2013;113(12):2913-2923.
41. Kaneko M, Fuchimoto T, Toji H, Sueti K. Training effect of different loads on the force-velocity relationship and mechanical power output in human muscle. *Scand J Sports Sci*, 1983;5(2):55-60.
42. Komi PV. Strech-shortening cycle. *Strength and power in sport*. Blackwell, 1992.
43. Kukulj M, Ropret R, Ugarkovic D, Jaric S. Anthropometric, strength, and power predictors of sprinting performance. *J Sports Med Phys Fitness*, 1999;39(2):120–2.
44. Lara AJ, Alegre LM, Abian J, Jimenez L, Urena A, Aguado X. The selection of a method for estimating power output from jump performance. *J Hum Mov Stud*, 2006;50:399–410.

45. Lanza IR, Towse TF, Caldwell GE, Wigmore DM, Kent-Braun JA. Effects of age on human muscle torque, velocity, and power in two muscle groups. *J Appl Physiol*, 2003;95(6):2361-2369.
46. Leontijevic B, Pazin N, Bozic PR, Kukulj M, Ugarkovic D, Jaric S. Effects of loading on maximum vertical jumps: selective effects of weight and inertia. *J Electromyogr Kines*, 2012;22(2):286–293.
47. Leontijevic B, Pazin N, Kukulj M, Ugarkovic D, Jaric S. Selective effects of weight and inertia on maximum lifting. *Int J Sports Med*, 2013;34(3):232–238.
48. Limonta E, Sacchi M. Morphological analysis of force/velocity relationship in dynamic exercise at varying loads. *J Strength Cond Res*, 2010;24(8):2065–2072.
49. Linthorne NP. Analysis of standing vertical jumps using a force platform. *Americ J Phys*, 2001;69(11):1198-1204.
50. Maughan RJ, Watson JS, Weir J. Muscle strength and cross-sectional area in man: a comparison of strength-trained and untrained subjects. *Br J Sports Med*, 1984;18(7):149-157.
51. Mandic R, Pazin N, Jakovljevic S, Jaric S. Effects of countermovement depth on kinematic and kinetic patterns of maximum vertical jumps (submitted).
52. Markovic G, Dizdar D, Jukic I, Cardinale M. Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *J Strength Cond Res*, 2004;18(8):551-555.
53. Markovic G, Jaric S. Is vertical jump height a body size-independent measure of muscle power? *J Sport Sci*, 2007a;25:355-1363.
54. Markovic G, Jaric S. Positive and negative loading and mechanical output in maximum vertical jumping. *Med Sci Sports Exerc*, 2007b;39(10):1757–1764.
55. Markovic S, Mirkov DM, Knezevic OM, Jaric S. Jump training with different loads: effects on jumping performance and power output. *Eur J Appl Physiol*, 2013;113(10):2511–2521.



56. Markovic S, Mirkov, DM, Nedeljkovic A, Jaric S. Body size and countermovement depth confound relationship between muscle power output and jumping performance. *Hum Mov Sci*, 2014;33:203-210.
57. McBride JM, Triplett-McBride T, Davie A, Newton RU. A comparison of strength and power characteristics between power lifter, olympic lifters, and sprinters. *J Strength Cond Res*, 1999;13(1):58-66.
58. McGinnis PM. Biomechanic of sport and exercise – second edition. Human Kinetics, 2005.
59. McMahon TA. Muscles, reflexes, and locomotion. Princeton University Press, 1984.
60. Metter EJ, Talbot LA, Schrage M, Conwit RA. Arm-cranking muscle power and arm isometric muscle strength are independent predictors of all-cause mortality in men. *J Appl Physiol*, 2004;96(2):814-821.
61. Minetti AE. On the mechanical power of joint extensions as affected by the change in muscle force (or cross-sectional area), ceteris paribus. *Eur J Appl Physiol*, 2002;86(2):363-369.
62. Minetti AE, Moia C, Roi GS, Susta D, Ferretti G. Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. *J Appl Physiol*, 2002;93(9):1039-1046.
63. Neeter C, Gustavsson A, Thomee P, Augustsson J, Thomee R, Karlsson J. Development of a strength test battery for evaluating leg muscle power after anterior cruciate ligament injury and reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2006;14(6):571-580.
64. Newton RU. Expression and development maximal muscular power. Queensland, University of Queensland, 1997.
65. Nikolaidis PT. Age- and sex-related differences in force–velocity characteristics of upper and lower limbs of competitive adolescent swimmers. *J Hum Kinet*, 2012;32(5):87–95.
66. Nikolić Z. Fiziologija fizičke aktivnosti. Fakultet sporta i fizičkog vaspitanja, 2003.

67. Nuzzo JL, McBride JM, Cormie P, McCaulley GO. Relationship between countermovement jump performance and multijoint isometric and dynamic tests of strength. *J Strength Cond Res*, 2008;22(3):699–707.
68. Nuzzo JL, McBride JM, Dayne AM, Israetel MA, Dumke CL, Triplett NT. Testing of the maximal dynamic output hypothesis in trained and untrained subjects. *J Strength Cond Res*, 2010;24(5):1269-1276.
69. Norton K, Marfell-Jones M, Whittingham N, Kerr D, Carter L, Saddington K, Gore C. *Anthropometric Assessment Protocols. Physiological Tests for Elite Athletes.* Human Kinetics, 2000.
70. Pazin N, Bozic P, Bobana B, Nedeljkovic A, Jaric S. Optimum loading for maximizing muscle power output: the effect of training history. *Eur J Appl Physiol*, 2011;111(9):2123–2130.
71. Pazin N, Berjan B, Nedeljkovic A, Markovic G, Jaric S. Power output in vertical jumps: does optimum loading depend on activity profiles? *Eur J Appl Physiol*, 2013;113(3):577–589.
72. Perrine JJ, Edgerton VR. Muscle force-velocity and power-velocity relationships under isokinetic loading. *Med sci sports*, 1978;10(3):159-166.
73. Rahmani A, Viale F, Dalleau G, Lacour JR. Force/velocity and power/velocity relationships in squat exercise. *Eur J Appl Physiol*, 2001;84(3):227–232.
74. Rahmani A, Locatelli E, Lacour JR. Differences in morphology and force/velocity relationship between Senegalese and Italian sprinters. *Eur J Appl Physiol*, 2004;91(4):399–405.
75. Ralston HJ, Polissar MJ, Inman VT, Close JR, Feinstein B. Dynamic features of human isolated voluntary muscle in isometric and free contractions. *J Appl Physiol*, 1949;1(7):526-533.
76. Samozino P, Morin JB, Hintzy F, Belli A. A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump. *J Biomech*, 2008;41(14):2940–2945.

77. Samozino P, Rejc E, Di Prampero PE, Belli A, Morin JB. Optimal force-velocity profile in ballistic movements—*Altius: Citius or Fortius?* *Med Sci Sports Exerc* 2012;44(2):313-322.
78. Samozino P, Edouard P, Sangnier S, Brughelli M, Gimenez P, Morin JB. Force-velocity profile: imbalance determination and effect on lower limb ballistic performance. *Int J Sports Med*. Epub, 2013.
79. Samozino P, Rejc E, di Prampero PE, Belli A, Morin JB. Force-velocity properties' contribution to bilateral deficit during ballistic push-off. *Med Sci Sports Exerc*, 2014;46(1):107-114.
80. Sargeant AJ, Dolan P, Young A. Optimal velocity for maximum short-term (anaerobic) power output in cycling. *Int J Sports Med*, 1984;5:124-125.
81. Schilling BK, Falvo MJ, Chiu ZFL. Force-velocity, impulse-momentum relationships: Implications for efficacy of purposefully slow resistance training. *J Sports Sci Med*, 2008;7(2):299-304.
82. Seck D, Vandewalle H, Decrops N, Monod H. Maximal power and torque-velocity relationship on a cycle ergometer during the acceleration phase of a single all-out exercise. *Eur J Appl Physiol*, 1995;70:161-168.
83. Sheppard JM, Cormack S, Taylor KL, McGuigan MR, Newton RU. Assessing the force-velocity characteristics of the leg extensors in well-trained athletes: the incremental load power profile. *J Strength Cond Res*, 2008;22(4):1320-1326.
84. Suzovic D, Markovic G, Pasic M, Jaric S. Optimum load in various vertical jumps support the maximum dynamic output hypothesis. *Int J Sports Med*, 2013;34(11):1007-1014.
85. Taylor-Piliae RE, Norton LC, Haskell WL, Mahbouda MH, Fair JM, Iribarren C, Hlatky MA, Go AS, Fortmann SP. Validation of a new brief physical activity survey among men and women aged 60-69 years. *Am J Epidemiol*, 2006;164(6):598-606.
86. Toji H, Kaneko M. Effect of multiple-load training on the force-velocity relationship. *J Strength Cond Res*, 2004;18(4):792-795.

87. Ugrinowitsch C, Tricoli V, Rodacki AL, Batista M, Ricard MD. Influence of training background on jumping height. *J Strength Cond Res*, 2007;21(3):848-52.
88. van Ingen Schenau J.G. An alternative view of the concept of utilisation of elastic in human movement. *Hum Mov Sci*, 1984;3:301–336.
89. Vandewalle H, Peres G, Heller J, Monod H. All out anaerobic capacity tests on cycle ergometers. *Eur J Appl Physiol*, 1985;54:222-229.
90. Vandewalle H, Peres G, Heller J, Panel J, Monod H. Force–velocity relationship and maximal power on a cycle ergometer. Correlation with the height of a vertical jump. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1987;56(6):650–656.
91. Vanrenterghem J, De Clercq D, Van Cleven P. Necessary precautions in measuring correct vertical jumping height by means of force plate measurements. *Ergonomics* 2001;44(8):814-818.
92. Vuk S, Markovic G, Jaric S. External loading and maximum dynamic output in vertical jumping: the role of training history. *Hum Mov Sci*, 2012;31(1):139-151.
93. Walsh MS, Bohm H, Butterfield MM, Santhosam J. Gender bias in the effects of arms and countermovement on jumping performance. *J Strength Cond Res*, 2007;21(2):362–366.
94. Wilkie DR. The relation between force and velocity in human muscle. *J Physiol*, 1950;110:249-280.
95. Wilson GJ, Newton RU, Murphy AJ, Humphries BJ. The optimal training load for the development of dynamic athletic performance. *Med Sci Sports Exerc*, 1993;25(11):1279-1287.
96. Yamauchi J, Mishima C, Nakayama S, Ishii N. The force velocity relation of human multi-joint movement determined with force clamp analysis. *J Biomech*, 2004;87(7):1433-1442.
97. Yamauchi J, Ishii N. Relations between force–velocity characteristics of the knee-hip extension movement and vertical jump performance. *J Strength Cond Res*, 2007;21(3):703–709.

98. Yamauchi J, Mishima C, Nakayama S, Ishii N. Force–velocity, force–power relationships of bilateral and unilateral leg multi-joint movements in young and elderly women. *J Biomech*, 2009;42(13):2151–2157.
99. Yamauchi J, Mishima C, Nakayama S, Ishii N. Aging-related differences in maximum force, unloaded velocity and power of human leg multi-joint movement. *Gerontology*, 2010;56(2):167–174.
100. Zatsiorsky VM. *Nauka i praksa u treningu snage*. Human Kinetics, 2009.
101. Zatsiorsky VM. *Biomechanics in sports – performance enhancement and injury prevention*. Blackwell Science Ltd, 2000.
102. Željaskov C. *Kondicioni trening vrhunskih sportista*. Sportska Akademija Beograd, 2004.

**PRILOZI****Prilog 1: Kopija izjave o autorstvu.**

Прилог 1.

**Изјава о ауторству**

Потписани-а \_\_\_\_\_ Иван Д Ћук \_\_\_\_\_  
број индекса \_\_\_\_\_ 1-ДС/2011 \_\_\_\_\_

**Изјављујем**

да је докторска дисертација под насловом  
„Механичке особине мишића ногу процењене у условима скокова са различитим  
оптерећењем“

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

**Потпис докторанда**

У Београду, \_\_\_\_\_ 22.09.2014 \_\_\_\_\_

Ivan Ćuk

## Prilog 2: Kopija izjave o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada.

Прилог 2.

### Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Иван Д Ћук

Број индекса 1-ДС/2011

Студијски програм Експерименталне методе истраживања хумане локомоције

Наслов рада "Механичке особине мишића ногу процењене у условима скокова са различитим оптерећењем"

Ментор Редовни професор др Слободан Јарић

Потписани/а Иван Д Ћук

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 22.09.2014

Ivan Ćuk

## Prilog 3: Kopija izjave o korišćenju.

Прилог 3.

### Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

“Механичке особине мишића ногу процењене у условима скокова са

различитим оптерећењем”

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

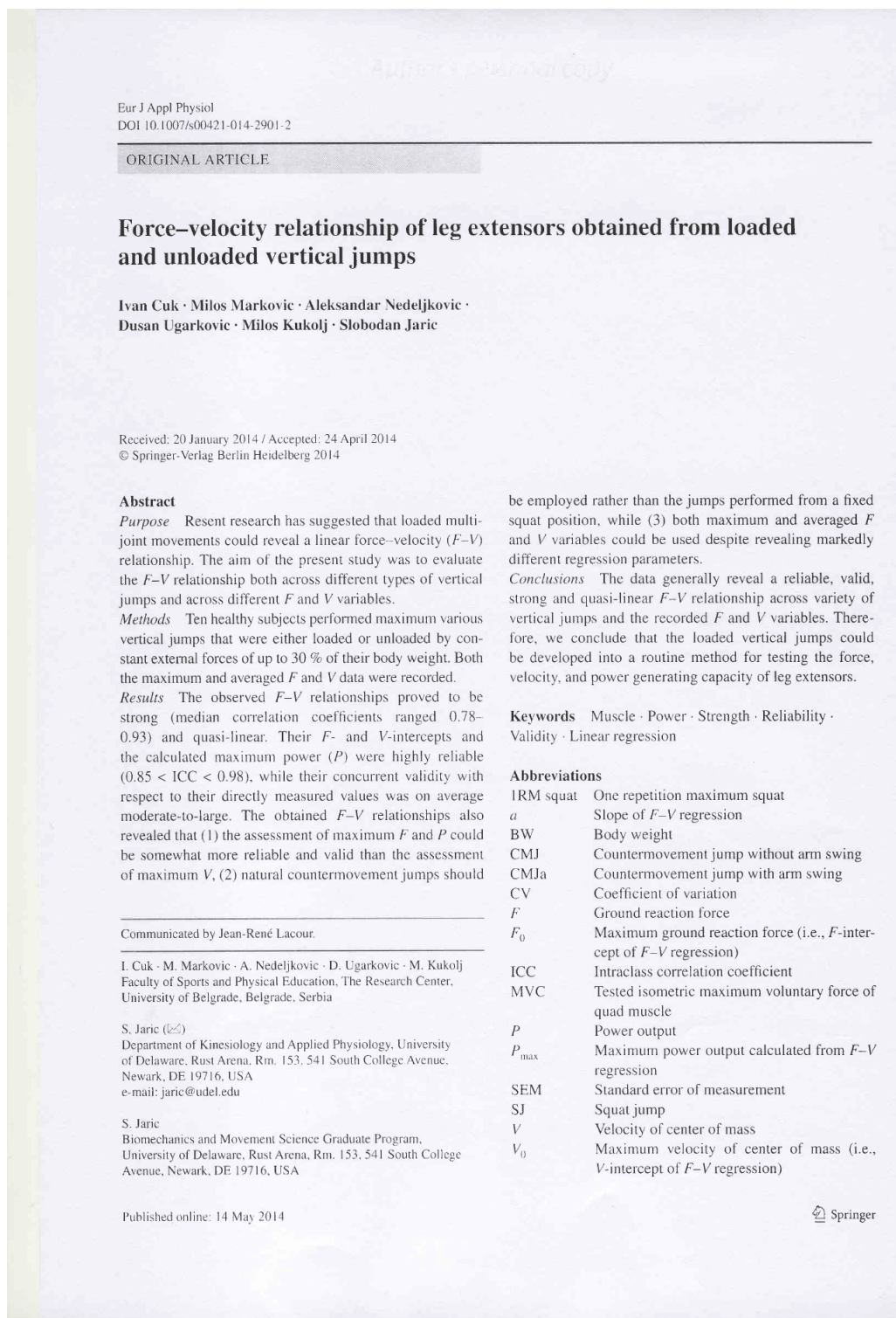
Потпис докторанда

У Београду, 22.09.2014

Ivan Ćuk



## Prilog 4: Kopija naslovne strane objavljenog rada.



## Prilog 5: Kopija odobrenja Etičke komisije Fakulteta sporta i fizičkog vaspitanja za realizaciju predloženih eksperimenata.

UNIVERZITET U BEOGRADU  
FAKULTET SPORTA I FIZIČKOG VASPITANJA  
ETIČKA KOMISIJA

Република Србија  
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ФАКУЛТЕТ СПОРТА И ФИЗИЧКОГ ВАСПИТАЊА  
Бр. 365-2  
18.02 2014 год  
БЕОГРАД, Благоеја Паровића 156

Predmet-Na zahtev zaveden pod brojem 02/365-1 od 18.2.2014. godine koji je podneo doktorant Ivan Ćuk ,Etička komisija Fakulteta sporta i fizičkog vaspitanja Univerziteta u Beogradu daje

**S A G L A S N O S T**

Za realizaciju eksperimenata u okviru projekta MIŠIĆNI I NEURALNI FAKTORI HUMANE LOKOMICIJE I NJIHOVE ADAPTIVNE PROMENE meriti mehaničke osobine mišića nogu procenjene u uslovima skokova sa različitim opterećenjem

*O b r a z l o ž e n j e*

Na osnovu uvida u plan projekta navedenog eksperimenta čiji je rukovodilac van.prof.dr Aleksandar Nedeljković ,Etička komisija Fakulteta iznosi mišljenje da se ,kako u konceptu tako i u planiranju realizacije istraživanja i primene dobijenih rezultata,polazilo od principa koji su u skladu sa etičkim standardima čime se obezbeđuje zaštita ispitanika od mogućih povreda njihove psiho-socijalne i fizičke dobrobiti.

U skladu sa iznetim mišljenjem Etička komisija Fakulteta daje saglasnost za realizaciju istraživanja planiranih gore navedenim projektom.


U Beogradu \_\_\_\_\_

Za Etičku komisiju

Članovi

1. prof dr Dušanka Lazarević  


2. prof dr Dušan Ugarković  


3. prof dr Vladimir Koprivica  




## Prilog 6: Kopija formulara za saglasnost ispitanika za učešće u eksperimentu u saglasnosti sa Helsinškom deklaracijom.

**FORMULAR ZA SAGLASNOST SA EKSPERIMENTALNOM PROCEDUROM**  
Istraživački projekt: Mišićni i neuralni faktori humane lokomocije

Istraživači: Red. prof. dr Slobodan Jarić  
Red. prof. dr Miloš Kukolj  
Van. prof. dr Aleksandar Nedeljković  
Ass. Miloš Marković  
Ivan Ćuk

IME I PREZIME ISPITANIKA: \_\_\_\_\_

**1. NAMENA I OPIS ISTRAŽIVANJA**

Od vas je zatraženo da učestvujete u istraživačkom projektu čiji je cilj utvrđivanje mišićnih i neuralnih faktora humane lokomocije. Važan deo tog projekta tiče se ispitivanje mehaničkih osobina mišića nogu u uslovima skokova uvis sa pozitivnim i negativnim opterećenjem i upravo to će biti glavni premet ovog istraživanja.

Vi ćete biti jedan od 40 zdravih učesnika starih između 21-30 godina. U eksperimentu će biti testirani skokovi uvis sa različitim pozitivnim i negativnim opterećenjem do 30% od vaše telesne mase sa ciljem da se na taj način analiziraju mehaničke osobine mišića nogu. Spoljašnje opterećenje će se menjati korišćenjem elastičnih gumenih traka rastegnutih preko koturova sa niskim trenjem i inercijom. Pre toga će se uz pomoć izokinetičkog dinamometra procenjivati jačina mišića opružaća u zglobo kolena (dominantne noge) u izometrijskom režimu. Takođe će se procenjivati i snaga nogu kroz test jednog maksimalnog podizanja tega iz polučučnja, a prikupićemo i podatke koji se odnose na vašu visinu, težinu, telesni sastav i obučiti vas da bezbedno izvedete sve zadate skokove.

Vaše učešće u ovom projektu obuhvata više odvojenih sesija od po 60 minuta:

1. Prva sesija: Procenjuje se telesni sastav, jačina mišića opružaća u zglobo kolena. Pored toga vas i obučavamo da izvodite skokove sa različitim spoljašnjim opterećenjem.
2. Druga sesija: Procenjuje se snaga mišića opružaća nogu i ponavlja se obuka skokova iz prethodne sesije.
3. Treća sesija: Na tenziometrijskoj platformi se izvode 2 ponavljanja za 3 skoka sa 7 različitih opterećenja (ukupno 42 skoka) sa adekvatnim pauzama kako ne bi došlo do zamora. Pojedini ispitanici će imati i četvrtu sesiju koja će biti identična trećoj.

Pauze između sesija će biti minimum 5 dana.

*Univerzitet u Beogradu, Fakultet sporta i fizičkog vaspitanja  
Doktorske studije- Eksperimentalne metode istaživanja humane lokomocije*

**FORMULAR ZA SAGLASNOST SA EKSPERIMENTALNOM PROCEDUROM**  
Istraživački projekt: Mišićni i neuralni faktori humane lokomocije

**2. USLOVI UČEŠĆA U EKSPERIMENTU**

Svi dobijeni rezultati i informacije ove studije biće tretirani kao poverljivi. Vi lično nećete moći da budete identifikovani kao učesnik, izuzev po vašem broju/šifri koja će biti poznata samo istraživačima. U slučaju povrede primićete prvu pomoć. Ako vam bude potrebna dodatna medicinska pomoć, vi ćete biti za nju odgovorni. Imaćete pravo da prekinete vaše učešće u eksperimentu bilo u kom trenutku.

**3. KRITERIJUMI ZA UČEŠĆE U STUDIJI**

Nećete moći da učestvujete kao ispitanik u studiji ukoliko patite od bilo kakvih kardiovaskularnih ili neuroloških oboljenja, ili bilo kakvih povreda koje mogu da utiču na rezultat eksperimenta ili mogu da budu pogoršane vašim učešćem.

**4. RIZIK**

Kao kod bilo kakvog vežbanja, postoji rizik mišićnog zamora i upale. Međutim, oba faktora su prolazna i bez posledica.

**5. KONTAKTI**

U slučaju da imate bilo kakvo pitanje u vezi sa studijom, pozovite profesora Nedeljковиć Aleksandra ili Ćuk Ivana, Fakultet sporta i fizičkog vaspitanja, Univerziteta u Beogradu (011-3555466). Pitanja u vezi vaših prava kao učesnika eksperimenta mozete postaviti šefu Etičke komisije Fakulteta sporta i fizičkog vaspitanja, Univerziteta u Beogradu (011-3531100).

**6. POTVRDA ISPITANIKA**

Pročitao sam ovaj dokument i priroda svog učešća, i zahtevi, rizici i beneficije su mi objašnjeni. Svestan sam rizika i razumem da mogu da povučem svoj pristanak za učešće u eksperimentu u svakom trenutku i bez ikakvih konsekvenci i gubitka beneficija. Kopija ovog dokumenta mi je data.

**7. POTPISI**

Potpis ispitanika : \_\_\_\_\_

Ime i prezime ispitanika (štampanim slovima): \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

## Prilog 7: Kopija upitnika za procenu nivoa fizičke aktivnosti kod ispitanika.

Univerzitet u Beogradu, Fakultet sporta i fizičkog vaspitanja  
Doktorske studije - Eksperimentalne metode istaživanja humane lokomocije

IPAQ

### INTERNACIONALNI UPITNIK O FIZIČKOJ AKTIVNOSTI - IPAQ -

Ovim kratkim upitnikom želimo da ispitamo koji oblik fizičke aktivnosti najčešće upražnjavate kao deo Vaših svakodnevnih aktivnosti. Pitanja se odnose na fizičke aktivnosti koje ste upražnjavali u poslednjih 7 dana. Molimo Vas da na svako pitanje odgovorite iskreno. Razmislite o svim fizičkim aktivnostima koje upražnjavate u toku dana na radnom mestu (fakultet), kod kuće, na putu od kuće do posla, u slobodno vreme, rekreativne aktivnosti, trening.

➤ Razmislite o svim **INTENZIVNIM FIZIČKIM AKTIVNOSTIMA** koje ste obavljali u poslednjih 7 dana. **INTENZIVNE FIZIČKE AKTIVNOSTI** su sve aktivnosti koje zahtevaju teži fizički napor i koje ubrzavaju Vaše disanje i rad srca znatno iznad normalnih vrednosti. Uzmite u obzir samo one aktivnosti koje su trajale najmanje 10 minuta.

1. U poslednjih 7 dana, koliko dana ste upražnjavali **INTENZIVNE FIZIČKE AKTIVNOSTI** kao što je, aerobik, brza vožnja bicikla, mali fudbal, basket, dizanje tegova, teži fizički rad u dvorištu?

\_\_\_\_\_ dana u nedelji

Nisam imao ovu vrstu aktivnosti → Pređite na pitanje br. 3

2. Koliko vremena ste proveli baveći se **INTENZIVNIM FIZIČKIM AKTIVNOSTIMA** u tim danima?

\_\_\_\_\_ sati na dan

\_\_\_\_\_ minuta na dan  Ne znam/nisam siguran

➤ Razmislite o svim **UMERENIM FIZIČKIM AKTIVNOSTIMA** koje ste obavljali u poslednjih 7 dana. **UMERENE FIZIČKE AKTIVNOSTI** su sve aktivnosti koje zahtevaju umeren fizički napor i koje ubrzavaju Vaše disanje i rad srca iznad normalnih vrednosti. Uzmite u obzir samo one aktivnosti koje su trajale najmanje 10 minuta.

3. U poslednjih 7 dana, koliko dana ste upražnjavali **UMERENE FIZIČKE AKTIVNOSTI** kao što je lagana vožnja bicikla, tenis, vožnja rolera, brzo hodanje, lakši fizički rad u dvorištu,? Hodanje ne spada u ovu vrstu aktivnosti.

\_\_\_\_\_ dana u nedelji

Nisam imao ovu vrstu aktivnosti → Pređite na pitanje br. 5

4. Koliko vremena ste proveli baveći se **UMERENIM FIZIČKIM AKTIVNOSTIMA** u tim danima?

\_\_\_\_\_ sati na dan

\_\_\_\_\_ minuta na dan  e znam/nisam siguran

1

Univerzitet u Beogradu, Fakultet sporta i fizičkog vaspitanja  
Doktorske studije - Eksperimentalne metode istraživanja humane lokomocije

IPAQ

- Razmislite koliko vremena ste proveli **HODAJUĆI** u poslednjih 7 dana. Odnosi se na hodanje na radnom mestu (fakultet), kod kuće, na putu od kuće do posla i nazad, u slobodno vreme, hodanje kao rekreativna aktivnost, kao deo treninga,.....

5. U poslednjih 7 dana, koliko dana ste hodali najmanje 10 minuta u kontinuitetu?

\_\_\_\_\_ dana u nedelji

Nisam hodao duže od 10 minuta



Pređite na pitanje br. 7

6. Koliko vremena ste proveli **HODAJUĆI** u tim danima?

\_\_\_\_\_ sati na dan

\_\_\_\_\_ minuta na dan

Ne znam/nisam siguran

- Poslednje pitanje se odnosi na količinu vremena koje ste proveli sedeći u poslednjih 7 dana. Odnosi se na vreme koje ste sedeli na radnom mestu (fakultetu), kod kuće, sedenje za stolom, u poseti kod prijatelja, čitanje, gledanje Tv-a,.....

7. U poslednjih 7 dana, koliko vremena ste proveli **SEDEĆI** u toku jednog dana?

\_\_\_\_\_ sati na dan

\_\_\_\_\_ minuta na dan

Ne znam/nisam siguran

✓ *Za testiranje je potrebno da budete u sportskoj opremi (šorc, majica, patike)*

Saglasan sam da učestvujem u testiranju

Vaš potpis \_\_\_\_\_

Telefon \_\_\_\_\_

e-mail adresa \_\_\_\_\_

## BIOGRAFIJA AUTORA

Ivan Ćuk je rođen 17.11.1984. godine u Beogradu, država Srbija. Osnovnu školu i srednju školu završio je takođe u Beogradu. Fakultet sporta i fizičkog vaspitanja Univerziteta u Beogradu upisao je školske 2003/2004. godine, odsek sport – smer kondicija. Diplomirao je na istom fakultetu 2009. godine položivši sve ispite predviđene planom i programom studija sa prosečnom ocenom 9,06. Diplomski rad na temu „Kondiciona priprema orijentiraca u takmičarskom periodu“ ocenjen je sa najvišom ocenom 10. Tokom studija bio je višegodišnji stipendista ministarstva prosvete i sporta (2004-2007) i student godine Fakulteta sporta i fizičkog vaspitanja za školsku 2005/2006. Godinu, sa položenim svim predviđenim ispitima i prosečnom ocenom 9,20. Tokom studija je radio na projektu „Karakterom protiv nasilja“ pod pokroviteljstvom Olimpijskog komiteta Srbije. Osim toga, tokom završnih godina osnovnih studija je volontirao u okviru istraživačkog projekta pod nazivom "Evaluacija metoda za procenu uloge mišićnih i neuralnih faktora i njihovih adaptivnih promena u humanoj lokomociji" (#145082).

Doktorske akademske studije na Fakultetu sporta i fizičkog vaspitanja upisao je 2011. godine – studijski program „Eksperimentalne metode istraživanja humane lokomocije“ pod mentorstvom prof. dr Slobodana Jarića. Predviđenim planom i programom doktorskih studija, položio je sve ispite sa prosečnom ocenom 9,75. Od 2012. godine zaposlen je na Fakultetu sporta i fizičkog vaspitanja kao istraživač saradnik na projektu finansiranom od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije pod nazivom „Mišićni i neuralni faktori humane lokomocije i njihove adaptivne promene“ (#175037).

Radio je kao personalni i kondicioni trener za više renomiranih fitness centara u Beogradu. Osim toga, radio je i na prekookeanskom turističkom brodu kao personalni trener i nutricionista. Od 2008. godine je urednik fitness sekcije srpskog izdanja časopisa „Men's Health“. Trenutno se bavi se analitikom i dijagnostikom sportista, a kao aktivni sportista bavio se atletikom i orijentiringom od 2001-2010. godine.

## POGOVOR

Doktorska disertacija urađena je u okviru projekta pod nazivom: „*Mišićni i neuralni faktori humane lokomocije i njihove adaptivne promene*“ (evidencioni broj 175037; rukovodilac projekta prof dr. Aleksandar Nedeljković), finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, Republike Srbije.

Materijal izložen u ovoj doktorskoj disertaciji većim delom je zasnovan na rezultatima koji su objavljeni ili dostavljeni vrhunskim međunarodnim časopisima i prezentovani na međunarodnim naučnim skupovima.

### **Radovi objavljeni u celini u vrhunskim međunarodnim časopisima:**

1. **Ćuk I**, Markovic M, Nedeljkovic A, Ugarkovic D, Kukolj M, Jaric S. Force-velocity relationship of leg extensors obtained from loaded and unloaded vertical jumps. *Eur J Appl Physiol*, 2014;114(8):1703-1714.

### **Radovi dostavljeni vrhunskim međunarodnim časopisima:**

1. **Ćuk I**, Mirkov DM, Nedeljkovic A, Ugarkovic D, Kukolj M, Jaric S. Force-velocity patterns of leg muscles in individuals of different level of physical fitness, 2014.

### **Radovi prezentovani na međunarodnim skupovima:**

1. Nedeljkovic A, **Ćuk I**, Markovic M, Ugarkovic D, Kukolj M, Jaric S. Force-velocity relationship of leg extensors obtained from loaded and unloaded vertical jumps. 19<sup>th</sup> annual Congress of the European College of Sport Science, Amsterdam, Netherlands, 2014.

2. Jaric S, **Ćuk I**, Markovic M, Nedeljkovic A, Mirkov D, Kukolj M,. Sensitivity of the force-velocity relationship of leg extensors obtained from loaded and unloaded vertical jumps. 19<sup>th</sup> annual Congress of the European College of Sport Science, Amsterdam, Netherlands, 2014.