

Vladimir Mrdaković

Fakultet sporta i fizičkog vaspitanja, Univerzitet u Beogradu

УДК 796.012.414:612.766(043.3)

NEUROMEHANIČKA KONTROLA IZVOĐENJA SUBMAKSIMALNIH SKOKOVA

Sažetak

Kako se većina skokova u trenažnim i takmičarskim uslovima izvodi intenzitetom koji je manji od maksimalnog (submaksimalni), neophodno je utvrditi koje su to neuromišićne i biomehaničke varijable koje učestvuju u kontroli izvođenja skokova submaksimalnim intenzitetom. Uže definisan cilj istraživanja predstavlja ispitivanje kako se na promenu intenziteta izvođenja i intenziteta opterećenja vertikalnih sunožnih skokova prilagođavaju unapred programirane i fidbek aktivnosti centralnog nervnog sistema, kao i određene biomehaničke varijable. U okviru eksperimenta praćene su elektromiografske i biomehaničke varijable. Eksperimentalna postavka je sprovedena sa petnaest ispitanika i odnosila se na ispitivanje kontrole izvođenja submaksimalnih vertikalnih sunožnih skokova nakon doskoka sa platforme određene visine (DJ skokovi). Ispitanici su izvodili DJ skokove sa različitih visina platforme (20, 40 i 60 cm) i na različite visine odskoka (65, 80 i 95% od maksimalnog). Najbitniji rezultati i zaključci ove studije ukazuju na sledeće: (1) mehanizmi unapred programirane aktivnosti nemaju značajan uticaj na doziranje visine odskoka; (2) povećanje visine odskoka značajno utiče na povećanje aktivacije većine mišića donjih ekstremiteta tek u fazi otiskivanja od podloge, što ukazuje da mehanizmi reprogramiranja i fidbek kontrole imaju značajan uticaj na doziranje visine odskoka; (3) povećanje visine platforme je dominantan faktor koji utiče na povećanje aktivacije većine mišića donjih ekstremiteta tokom svih praćenih faza, gde je za fazu preaktivacije i fazu u kojoj se javlja prvi mišićni odgovor nakon kontakta sa podlogom nevažno kojim se intenzitetom izvodi odskok, već je isključivo bitno sa koje visine platforme se izvodi doskok; (4) ekstenzioni momenat u zglobu kuka je najvažnija biomehanička varijabla koja doprinosi uvećanju visine odskoka kod DJ skoka.

Ključne reči: ELEKTROMIOGRAFIJA, PREAKTIVACIJA, FIDBEK KONTROLA, MOTORNI PROGRAM, KRUTOST SISTEMA, CENTAR MASE, MOMENTI U ZGLOBOVIMA, VISINA ODSKOKA, VISINA PLATFORME

NEUROMECHANICAL CONTROL OF SUBMAXIMAL JUMP PERFORMANCE

Summary

Since majority of jumps in trainings and competitions are performed at the lower intensity than the maximal one (submaximal intensity), it is necessary to determine what neuro-muscular and biomechanical variables are involved in the control of submaximal jumps. The purpose of this study is to investigate how preprogrammed and feedback activities, as well as certain biomechanical variables, adapt to the different jump performance and jump intensity. The electromyographical and biomechanical variables were followed in the experimental setups. The experiment was performed on fifteen subjects and it explored the control of submaximal drop jumps (DJ). During the experiment, the subjects performed drop jumps from the different drop heights (20, 40, 60cm) to different jump heights (65, 80 and 95% of maximal jump height). The most important results and conclusions of this study are the following: (1) The mechanisms of the preprogrammed activity do not significantly influence the jump height; (2) The increase in the jump height significantly affects increase in activation of the majority of lower extremity muscles, but not before the push of phase, which indicates that mechanisms of reprogramming and feedback control affect significantly the jump height; (3) The increase in the drop height is the dominant factor which increases EMG activity of majority of lower extremity muscles during all the phases that were followed; where the jump height have no effects on the phase of preactivation and the phase in which the first muscle response upon landing is detected, while the drop height is the only factor which affects the muscle activity during these phases; (4) Hip joint moment is the most important biomechanical variable that contributes to the increase in the jump height during DJ.

Key words: ELECTROMYOGRAPHY, PREAMPACTIVATION, FEEDBACK CONTROL, MOTOR PROGRAM, STIFFNESS, CENTER OF MASS, JOINT MOMENTS, JUMP HEIGHT, DROP HEIGHT.

UVOD

„Drop jump“ (DJ) skokovi predstavljaju kretni zadatak u okviru koga se nakon doskoka sa platforme određene visine realizuje brz vertikalni odskok. DJ predstavlja izuzetno važan kretni zadatak u okviru treninga koji ima za cilj da unapredi performanse snage donjih ekstremiteta, ali je i prisutan u velikom broju eksperimentalnih istraživanja koja se bave ispitivanjem specifičnog režima mišićnog rada u vidu ciklusa izduženje-skraćenje (*stretch-shortening cycle – SSC*). Neuro-mišićna kontrola kretanja koja u sebi sadrže SSC režim mišićnog rada može biti izrazito kompleksna, u kojoj mehanizmi unapred programirane aktivnosti (*feedforward*) i mehanizmi povratne sprege (*feedback*) moraju biti visoko adaptabilni kako bi obezbedili stabilnost sistema pri izvođenju kretanja. Kretanja kao što su DJ su adekvatni primeri kretanja pomoću kojih je moguće da se prikaže interakcija prediktivne i reaktivne motorne kontrole (Komi, 2003).

Kako bi se DJ kao jedna od pliometrijskih vežbi adekvatno primenjivao u treningu, neophodno je razlučivanje šta su determinante intenziteta ovih skokova. U teorijskom kontekstu intenzitet kretnog zadatka je sa jedne strane određen intenzitetom opterećenja koje mišićni aparat mora da savlada (spoljno opterećenje), dok je sa druge strane određen intenzitetom uloženog voljnog mišićnog naprzanja kojeg ispitanik ispoljava (stepen uloženog napora). U slučaju da kretni zadatak podrazumeva izvođenje DJ sa ciljem da se ostvari što kraći kontakt sa podlogom i ukoliko se izvodi bez dodatnog opterećenja koje pridodato na telesnu težinu, intenzitet opterećenja u DJ skokovima je najčešće definisan visinom platforme sa koje se izvodi DJ (Ishikawa & Komi, 2004; Makaruk & Sacewicz, 2011). Povećanjem visine platforme za DJ se može direktno uticati na povećanje brzine istezanja ekstenzora nogu, i time na ispoljavanje većih momenata i produkovane snaga u skočnom zglobu i zglobu kolena (Bobbert et al., 1987). Pomenuto uvećanje intenziteta DJ utiče na uvećanu aktivaciju mišića u fazama preaktivacije i ekscentrične kontrakcije kod m. soleus (Sol), m. vastus lateralis (VL), m. gastrocnemius caput mediale (GastM), dok uvećana aktivacija m. rectus femoris (RF) se pojavljuje samo u fazi ekscentrične kontrakcije (Ishikawa & Komi, 2004). Sa druge strane, povećanje visine platforme nije imalo uticaja na m. biceps femoris (BF) (Peng et al., 2011) koji ima ulogu dvozglavnog mišića: fleksora u zglobu kolena i ekstenzora u zglobu kuka. Pri izvođenju DJ jedna od bitnih determinanti koja utiče na unapređenje sposobnosti vertikalnog skoka je uvećan odgovor spinalnog refleksa na istezanje koji nastaje u fazi ekscentrične kontrakcije (Dietz et al., 1979; Gollhofer et al., 1992; Voigt et al., 1998; Komi, 2003). Refleksni odgovor kratke latence se povećava sa povećanjem visine platforme sa 20 cm na 40 cm, i sa 40 cm na 60 cm, dok dalje povećanje platforme na 80 cm umanjuje refleksni odgovor u cilju zaštitnog efekta koji umanjuje preveliko ekscentrično opterećenje mišićno-tetivnog sistema (Kyrolainen & Komi 1995, Komi & Gollhofer 1997). Pomenuti rezultati ukazuju da sistem poseduje mogućnost da kontroliše ispoljavanje mišićne aktivacije, bilo da je ona preprogramirana ili reaktivna, u zavisnosti od intenziteta mehaničkih uslova u kojima se izvode DJ skokovi. Sa druge strane, kada se u okviru DJ zadatka uključi još jedan faktor u vidu brzine zaleta koja

prethodi DJ nije pokazano da visina DJ utičena na promene u mišićnoj aktivaciji, gde je uočen dominantan uticaj dužine zaleta koji je prethodio DJ (Ruan & Li, 2010). Sagledavajući sve rezultate, nije do kraja utvrđen način na koji se mišićna aktivnost donjih ekstremiteta prilagođava na intenzitet DJ zadatka, ali se može pretpostaviti da i drugi kretni zadaci ili instrukcije koji se kombinuju sa visinom platforme, utiču na modulaciju mišićnog odgovora.

Najveći broj istraživanja ispituje kontrolu izvođenja DJ koji se izvode sa maksimalnim intenzitetom, ali svakodnevne trenažne i takmičarske aktivnosti često nalažu da se ovo kretanje izvodi na nivoima koji su manji od maksimalnih (tzv. submaksimalni nivoi) (Lee et al., 2004). To podrazumeva da se DJ skokovi često izvode u periodima treninga kada usled posledice zamora nije moguće izvesti maksimalni intenzitet odskoka, ili čest je slučaj da skokovi u određenim sportskim granama kao što su košarka i odbojka ne zahtevaju odskok na maksimalnu visinu već na neku ciljanu submaksimalnu (skok šut u košarci ili smeč u odbojci), ili pak usled cilja da se optimizuju trenažna sredstva treneri ne zahtevaju od sportista ulaganje maksimalne mišićne sile već submaksimalne (trčanje umerenom brzinom, preskoci određenih prepreka koje nisu maksimalne visine, itd.). U dosadašnjoj naučnoj literaturi postoje rezultati istraživanja koji opisuju modulaciju neuro-mehaničkih varijabli na progresivno povećanje uloženog voljnog napora kod vertikalnih sunožnih skokova iz čučnja (*squat jump – SJ*) i vertikalnih sunožnih skokova sa amortizacionom pripremom (*counter movement jump - CMJ*). Utvrđeno je da je progresivno povećanje visine odskoka kod CMJ zadatka povezano sa značajnom uvećanim angažmanom u zglobu kuka u vidu izvršenog rada i ispoljenog maksimalnog momenta (Lees et al., 2004) što može biti posledica težnje da se poveća inklinacija trupa prema napred u trenutku započinjanja otiskivanja što neposredno utiče na opterećuje ekstenzore u zglobu kuka. Povećanje rezultata maksimalne visine odskoka najčešće je praćeno uvećanim momentima u zglobu kolena ili u zglobu kuka, ali ne i momenta u skočnom zglobu (Ford et al., 2005). Iz aspekta mišićne aktivacije povećanje visine odskoka sa submaksimalnih na maksimalne visine su ispraćene sa uvećanom mišićnom aktivacijom biceps femorisa u ranim fazama otiskivanja, i redukovanje aktivacije quadricepsa u kasnijoj fazi otiskivanja (Lees et al., 2004; Salles et al., 2011). Takođe, istaknuta je uloga aktivnosti dvozglobnih mišića donjih ekstremiteta (RF, BF) za koje se pretpostavlja da imaju značajnu ulogu u kontroli izvođenja CMJ skokova na dozirane visine odskoka (van Zandwijk et al., 2000; Lees et al., 2004). Međutim, kako se prethodno opisani rezultati prevashodno odnose na izvođenje CMJ zadatka, u mehanici izvođenja DJ zadatka postoje bitne razlike u odnosu na CMJ i odnose se na postojanje faze preaktivacije koja u značajnoj meri definiše motorni izlaz (Horita et al., 2002). Takođe, u DJ zadatku postoji uvećanje ekscentričnog opterećenja ekstenzora (Moran & Wallace, 2007) gde se ovim zahtevom utiče i na razliku brzini SSC ciklusa gde CMJ predstavlja spori SSC ciklus, dok DJ predstavlja brzi SSC ciklus. Kako se smatra da je jedan značajan deo mišićne aktivacije u SSC kretanju preprogramiran od viših centara centralnog nervnog sistema i gde je stepen ispoljene preaktivacije zavistan od nivoa potrebnog motornog

izlaza za savladavanje određenog kretnog zadatka (Dyhre-Poulsen et al., 1991; Moritani et al., 1991) neophodno je da se kontrola izvođenja submaksimalnih skokova ispituje uz praćenje varijabli koje opisuju uticaj feedforward i feedback kontrole. To je jedino moguće ukoliko se različite faze mišićne aktivacije pre i tokom kontakta stopala prate prilikom promene uslova izvođenja DJ zadatka. U dosadašnjoj literaturi nema rezultata o tome koji su to neuro-mišićni i mehanički faktori dominantni pri progresivnom povećanju visine odskoka u DJ. Utvrđeno je da visina platforme (kao faktor koji opisuje intenzitet spoljnog opterećenja) i progresivno povećanje voljnog naprezanja (kao faktor intenziteta naprezanja) značajno utiču na modulaciju neuro-mehaničkih varijabli, ali u dosadašnjoj literaturi ovi faktori su uvek odvojeno tretirani.

Svrha ove studije predstavlja ispitivanje međusobnog uticaja mehaničkih uslova u kojima se izvodi DJ kretanje (tj. intenziteta opterećenja koje je predstavljeno u vidu visine platforme za DJ) i stepena ispoljenog voljnog naprezanja (tj. intenzitet ispoljene performanse/visine odskoka DJ) na neuro-mišićne, kinematičke i dinamičke varijable DJ, a sve u cilju da se utvrdi kako se na promenu intenziteta izvođenja i intenziteta opterećenja vertikalnih sunožnih skokova prilagođavaju unapred programirane i fidbek aktivnosti centralnog nervnog sistema, kao i određene biomehantičke varijable. Na osnovu teorijskih saznanja, predmeta, cilja i zadataka istraživanja postavljeno je pet hipoteza istraživanja. (1) Povećanje visine odskoka i visine platforme u doskok-odskoku će uticati na povećanje intenziteta preaktivacije, dok će vremenski interval pojave preaktivacije biti nesenzitivan na promenu visine odskoka i visine platforme. (2) Mišićna aktivacija koja nastaje nakon kontakta stopala sa podlogom i koja predstavlja fidbek kontrolne mehanizme nižih i viših centara CNS-a integralno će se povećavati sa povećanjem visine platforme, dok će povećanje visine odskoka imati uticaja na fidbek kontrolne mehanizme viših centara CNS-a koji su odgovorni za mišićnu aktivaciju koja nastaje u kasnijim fazama kontakta sa podlogom. (3) Povećanje visine odskoka će uticati na povećanje amortizacione faze, dok će povećanje visine platforme uticati na smanjenje amortizacione faze. (4) Povećanje visine odskoka će uticati na smanjenje vertikalne krutosti, dok će povećanje visine platforme uticati na povećanje vertikalne krutosti. (5) Promena visine odskoka će uticati na mehaniku zgloba kolena i zgloba kuka, koja je izražena preko ugaonih pomeraja i ispoljenih momenata, dok će mehanika skočnog zgloba biti nesenzitivna na promenu visine odskoka.

METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Uzorak ispitanika

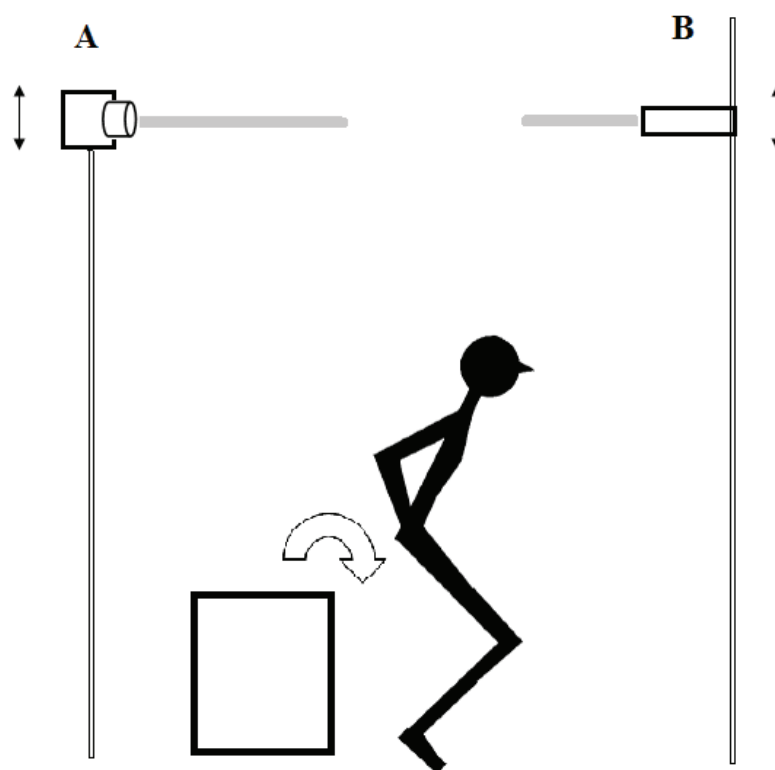
Ispitanici su bili 15 odbojkaša prve lige Republike Srbije, prosečnog broja godina ($21,1 \pm 1,6$ god), prosečne visine ($190,4 \pm 8,2$ cm) i mase ($81,5 \pm 6,9$ kg). Svi ispitanici su bili unapred upoznati sa protokolom testiranja, imali su minimum osam godina iskustva

u aktivnom bavljenju odbojkom. Ispitanici nisu imali povrede niti su imali teške povrede ili hirurške intervencije na lokomotornom sistemu u proteklih godinu dana. Svaki od ispitanika je potpisao formular za dobrovoljni pristanak da učestvuje u ovom eksperimentu. Uzorak odbojkaša seniora je selektiran za sprovođenje eksperimenata iz razloga što su oni izrazito familijarni sa izvođenjem vertikalnih skokova, koji su sastavni deo njihovih svakodnevnih trenažnih i takmičarskih aktivnosti.

Protokol eksperimenta

Kako bi se realizovali cilj i zadaci istraživanja ispitanici su realizovali DJ skokove sa različitim visinama platforme (20, 40 i 60 cm), dok su sa svake od visine platforme realizovali odskoke na tri različite visine odskoka koje su iznosile približno 65%, 80% i 95% od maksimalne visine odskoka. Treba napomenuti da su svi ispitanici imali iskustva u realizaciji DJ skokova, koje su primenjivali u okviru svojih trenažnih procesa. Eksperimentalni protokol se sastojao od dva dana, od kojih je prvi dan korišćen za familijarizaciju, dok je drugi predstavljao glavni dan za prikupljanje podataka. **Prvi dan** eksperimentalnog protokola koristio se da se ispitanici upoznaju sa kretnim zadatkom. Posle uvodnog zagrevanja koje se sastojalo od vožnje bicikla od 10 min, aktivnog istezanja, izvođenja poskoka u mestu i izvođenja vertikalnih skokova pristupilo se familijarizaciji sa kretnim zadacima. Tokom familijarizacije ispitanici su izvodili po tri uspešna skoka za svaki modalitet visine platforme i visine odskoka DJ skoka, gde bi instrukcije za kretne zadatke bile identične sa onim koje su zadavane u glavnom danu testiranja koje treba da usledi. Prvog dana ispitanici nisu realizovali više od 60 DJ skokova. Nakon tri dana pauze usledio je **drugi dan** eksperimentalnog protokola, u kojem je rađena akvizicija EMG, kinematičkih i dinamičkih varijabli tokom izvođenja kretnih zadataka. Nakon zagrevanja koje se sastojalo od istih elemenata kao prvog dana testiranja, usledilo je nameštanje elektroda za EMG analizu i markera za kinematičku analizu na onu nogu koja je predstavljala dominantnu nogu ispitanika za realizaciju skoka. U cilju skraćanja procedure pripreme ispitanika za testiranje, nameštanje markera je realizovano od strane dva eksperimentatora na markirane tačke koje su bile obeležene pre početka zagrevanja. Površinske elektrode su postavljane na površinu sedam mišića donjih ekstremiteta: *m.gluteus maximus* (GlutM), *m.rectus femoris* (RF), *m.biceps femoris* (BF), *m.vastus lateralis* (VL), *m.tibialis anterior* (TA), *m.gastrocnemius caput mediale* (GastM) i *m.soleus* (Sol). Elektrode su postavljane na telo mišića sa distancom između para elektroda tj. mišića ne manjom od 3 cm, kako bi nivo „cross-talk“ bio mali i neznačajan (Winter et al., 1990). Takođe, kako bi se pratile kinematičke varijable, postavljeno je osam retrofektivnih markera na dominantnu stranu ispitanika na pozicijama pete metatarzalne falange, pete, skočnog zgloba, zgloba kolena, zgloba kuka, zgloba ramena, zgloba lakta, zgloba ručja, sternoklavikularnog zgloba i glave. Prvi eksperimentalni zadatak glavnog dana testiranja je bio da se realizuje po tri maksimalna DJ skoka sa 20 cm, 40 cm i 60 cm. Instrukcija za DJ skokove je bila da ispitanik stane na ivicu platforme gde su ruke ispitanika postavljene na boku i fiksirane u toj poziciji tokom izvođenja skoka, zatim dominantnom nogom

prednoži a stajnom nogom samo sklizne niz platformu gde bi nakon faze leta usledio maksimalni odskok sa što kraćim kontaktom stopala sa podlogom. Maksimalni DJ skokovi sa 60 cm su se koristili za normalizaciju EMG signala i kako bi se u odnosu na njih odredile submaksimalne visine odskoka koje bi u daljoj proceduri bile korišćene kao ciljane visine na koje ispitanik treba da odskoči. Maksimalne visine odskoka su izmerene na osnovu maksimalnog vertikalnog pomeranja centra mase i kontrolnog markera koji je bio postavljen iznad gornje ivice slušne školjke i u ravni sa očnom dupljom. Maksimalno vertikalno pomeranje je realizovano u odnosu na uspravan stav ispitanika. Submaksimalne visine odskoka su određivane za svaku visinu platforme posebno i iznosile su 65%, 80% i 95% u odnosu na maksimalne visine odskoka. Nakon izvođenja maksimalnih skokova, kao drugi eksperimentalni kretni zadatak glavnog dana testiranja, usledilo je izvođenje submaksimalnih DJ skokova po nasumičnom redosledu. Markiranje visine na koju ispitanik treba da odskoči su odrađene na osnovu vizuelnog signala koji je bio u vidu kutije širine 20 cm, dužine 10 cm i visine 2 cm, koja je sa jedne uzdužne strane prema ispitaniku bila otvorena, dok su na unutrašnjoj strani koja se nalazila na suprotnoj strani od otvorene strane bile postavljene led sijalice. Kutija je bila prikačena na konstrukciju koja se sastojala od vertikalnog postavljenog metra po kojem je kutija preko klizajućeg mehanizma mogla biti postavljena na određenu visinu, i uvek je zauzimala pravilnu horizontalnu ravan u odnosu na podlogu. Instrukcija koju je ispitanik trebalo da ispoštuje pri izvođenju submaksimalnih DJ skokova je da ostvari ciljanu visinu odskoka sa što kraćim kontaktom sa podlogom, na način što visinom odskoka treba da dostigne horizontalnu ravan kutije i vizuelno uoči svetlosnu markaciju koja je postavljena na zadnjem zidu kutije. Pored toga, postojala je i eksterna vizuelna kontrola realizovanog zadatka od strane eksperimentatora, koja je podrazumevala puštanje linijskog lasera uz pomoć uređaja Bosh PCL20 koji se nalazio iza ispitanika (slika 9A). Uređaj je prostirao crveni linijski laser u horizontalnoj ravni koja je bila u visini ravni kutije koju je ispitanik koristio za potrebe vizuelne markacije (tj. na visini ciljane visine odskoka) (slika 9B). Tačnost uređaja je iznosila $\pm 0,5$ mm/m. Uspešno izveden zadatak u kontekstu vizuelne kontrole od strane eksperimentatora podrazumevao je da ispitanik preseče snop u visini gornje ivice slušne školjke, tj. markacije koja se nalazi u ravni očne duplje. Od ispitanika se zahtevalo da izvede pet uspešnih pokušaja za svaku visinu platforme i visinu odskoka DJ, gde bi u proseku ispitanici izvodili sedam pokušaja od kojih bi u post obradi dva skoka u kojima nije adekvatno pogođena visina odskoka bila odstranjena. Prosečna vrednost od pet skova je uzeta za dalju analizu. U proseku su ispitanici izvodili ukupno 63 submaksimalna DJ skoka, 9 maksimalnih DJ skoka. Pauza između skokova koji su se izvodili sa iste visine platforme i na iste visine odskoka bila je oko 30 sec. Pauza između skokova kada se na istoj visini platforme prelazilo na novu visinu odskoka je bila oko 60 sec. Pauza između skokova kada se prelazilo na novu visinu platforme je iznosila 120 sec.



Slika 1. Prikaz eksperimentalne postavke i dva načina na osnovu kojih je kontrolisano da li je ispitanik ostvario ciljanu visinu odskoka. Pomoću infracrvenog snopa koji se prostirao od strane uređaja A koji se nalazio iza ispitanika, eksperimentator je kontrolisao da li je kontrolna tačka koja je bila markirana na ispitaniku dostigla ciljanu visinu odskoka. Na osnovu svetlosne signalizacije koja se nalazila u kutiji B ispred ispitanika i sam ispitanik je imao povratnu informaciju da li je odskočio na ciljanu visinu odskoka.

Uzorak varijabli

Elektromiografske varijable

Elektromiografske (EMG) varijable su praćene za sedam mišića: Sol, GastM, VL, RE, BE, GlutM i TA. EMG varijable. U cilju da se analizira mišićna aktivacija tokom različitih faza izvođenja DJ skoka sa različitih visina platforme i na različite visine odskoka, korišćene su vrednosti *root mean square* (RMS) analize za svaki mišić posebno, i to u određenim vremenskim intervalima: faza preaktivacije (F1) u intervalu od -60 do 0 ms (vrednost 0 predstavlja trenutak kontakta sa podlogom), faza aktivacije u ekscentričnoj kontrakciji (F2) u intervalu od 0 do 60 ms, i faze aktivacije u ranoj koncentričnoj kontrakciji (F3) u intervalu od 60 do 120 ms, i kasnoj koncentričnoj kontrakciji (F4) u intervalu od 120 do 180 ms (Leukel et al., 2012). Prikaz sirovog EMG signala i podeljenih faza iz kojih se nakon filtriranja i obrade

izračunavala vrednost RMS prikazan je na slici 11 u okviru poglavlja Rezultati. Vrednosti RMS su normalizovani u odnosu na maksimalne vrednosti RMS ostvarene pri izvođenju maksimalnog DJ skoka i izražene su kao procentualna vrednost (%) gde nivo 1 označava 100%.

Kinematičke i dinamičke varijable

Za svaki kretni zadatak izračunavane su zavisne varijable koje su iz prostora kinematike i dinamike, ali i varijable koje su nastale kombinovanjem podataka dobijenih kinematičkom i dinamičkom analizom. Pored kinematičkih i dinamičkih varijabli koje su direktno izračunavane na osnovu dobijenih rezultata kinematičke, odnosno dinamičke analize, vertikalna krutost je izračunavana po modelu mase i opruge, kao količnik ostvarene maksimalne sile reakcije podloge i vertikalnog pomeraja centra mase u amortizacionoj fazi (Blickhan, 1989; Farley & Morgenroth, 1999). Krutost zgloba je izračunavana kao količnik maksimalnog momenta u zglobu i maksimalnog ugaonog pomeraja u tom zglobu (Farley & Morgenroth, 1999). Momenti u zglobovima su određeni na osnovu modela međusobno povezanih krutih segmenata, zatim antropomorfoloških karakteristika segmenata, i na osnovu principa inverzne dinamike (Winter, 1990). Kao i kod vertikalne krutosti, i krutost zglobova je izračunavana na osnovu pretpostavke da se maksimalni moment i maksimalni ugaoni pomeraj jednog zgloba pojavljuju u sredini faze kontakta stopala sa podlogom. Sve vrednosti dinamičkih varijabli su relativizovane prema ispitanikovo telesnoj masi. Praćene su sledeće kinematičko-dinamičke varijable:

- maksimalna vertikalna sila reakcije podloge – N/kg
- vertikalni pomeraj centra mase u amortizacionoj fazi – m
- vertikalna krutost – $kN/m/kg$
- krutost skočnog zgloba – $Nm/rad/kg$
- krutost zgloba kolena – $Nm/rad/kg$
- krutost zgloba kuka – $Nm/rad/kg$
- moment skočnog zgloba – Nm/kg
- moment zgloba kolena – Nm/kg
- moment zgloba kuka – Nm/kg
- vreme kontakta stopala sa podlogom – ms
- visina odskoka – m
- maksimalna mehanička snaga u pozitivnoj fazi – W/kg
- ugaoni pomeraj u skočnom zglobu – rad
- ugaoni pomeraj u zglobu kolena – rad
- ugaoni pomeraj u zglobu kuka – rad
- ugao u skočnom zglobu u trenutku doskoka – rad
- ugao u zglobu kolena u trenutku doskoka – rad
- ugao u zglobu kuka u trenutku doskoka – rad
- ukupan izvršen rad u pozitivnoj fazi – J/kg
- ukupan izvršen rad u negativnoj fazi – J/kg

Aparatura za akviziciju EMG, dinamičkih i kinematičkih podataka

Za EMG analizu korišćen je telemetrijski aparat firme Myomonitor IV (DelSys Inc. Boston, MA, USA) sa pojedinačnim diferencijalnim srebro-hlorid elektrodama (DE-2.1), sa senzornim kontaktom od 2 srebrne ploče dužine 10 mm i širine 1 mm, kontaktnom površinom od 10 mm; sa karakteristikama: *comode mode rejection ratio* (CMRR) – 92 dB, 84 dB. Frekvencija uzorkovanja signala je bila setovana na 2000 Hz. Sirovi EMG signal je nakon usnimavanja prvo filtriran *band-pass* filterom u opsegu od 10 do 750 Hz, i zatim formiran linearan prirast uz pomoć *low pass* filtera na 10 Hz.

Tenziometrijska platforma firme AMTI (60x120) korišćena je za usnimavanje sile reakcije podloge i momenata sile u ortogonalnim pravcima, na frekvenci snimanja od 2000 Hz sa pojačivačem od $\times 4000$ i *band-pass* filtriranjem 10–1050 Hz. Kinematičke varijable su praćene pomoću infracrvenih kamera firme Qualysis (ProReflex MCU 240) koje su usnimavale retrofleksivne markere dijametra 32 mm, uz frekvenciju uzorkovanja signala od 240 Hz. Početak snimanja EMG, kinematičkih i dinamičkih podataka je realizovan pomoću interne sinhronizacije ova tri sistema.

Statistička analiza

Rezultati deskriptivne analize (prosečne vrednosti i standardne devijacije) za sve praćene varijable su grafički predstavljeni, dok su rezultati analize varijanse sa ponovljenim merenjima (*df*, *F*, *p*, *post-hoc*) predstavljeni tabelarno, sa tekstualnim objašnjenjima u okviru poglavlja Rezultati.

Kako bi se odredio uticaj faktora visine platforme i uticaj visine odskoka, na elektromiografske, kinematičke i dinamičke varijable rezultati su analizirani dvostrukom analizom varijanse sa ponovljenim merenjima ANOVA).

U cilju utvrđivanja interakcije prediktivne i fidbek kontrole za potrebe kontrole izvođenja DJ skokova ispitivao se uticaj faze izvođenja DJ skoka, visine platforme i visine odskoka na elektromiografske vrednosti uz pomoć trostruke analize varijanse sa ponovljenim merenjima ANOVA).

Za svaku grupu varijabli prvo je utvrđivana pretpostavka sferičnosti rezultata pomoću *Mauchly's* testa. Ukoliko pretpostavka o sferičnosti nije bila zadovoljena, tj. ukoliko su vrednosti *Mauchly's* testa pokazale *p* vrednosti manje od 0,05 korišćena je *Greenhouse-Geisser* korekcija za *df* i *F* vrednosti.

Ukoliko je ANOVA statističkom analizom utvrđen značajan uticaj nekog od faktora i ukoliko taj faktor ima više od dva različita nivoa, usledile su *post-hoc* analize u cilju određivanja razlika između različitih nivoa unutar jednog faktora uz pomoć *Bonferroni post-hoc* analize ili T testa za zavisne uzorke sa *Holm-Bonferroni* korekcijom.

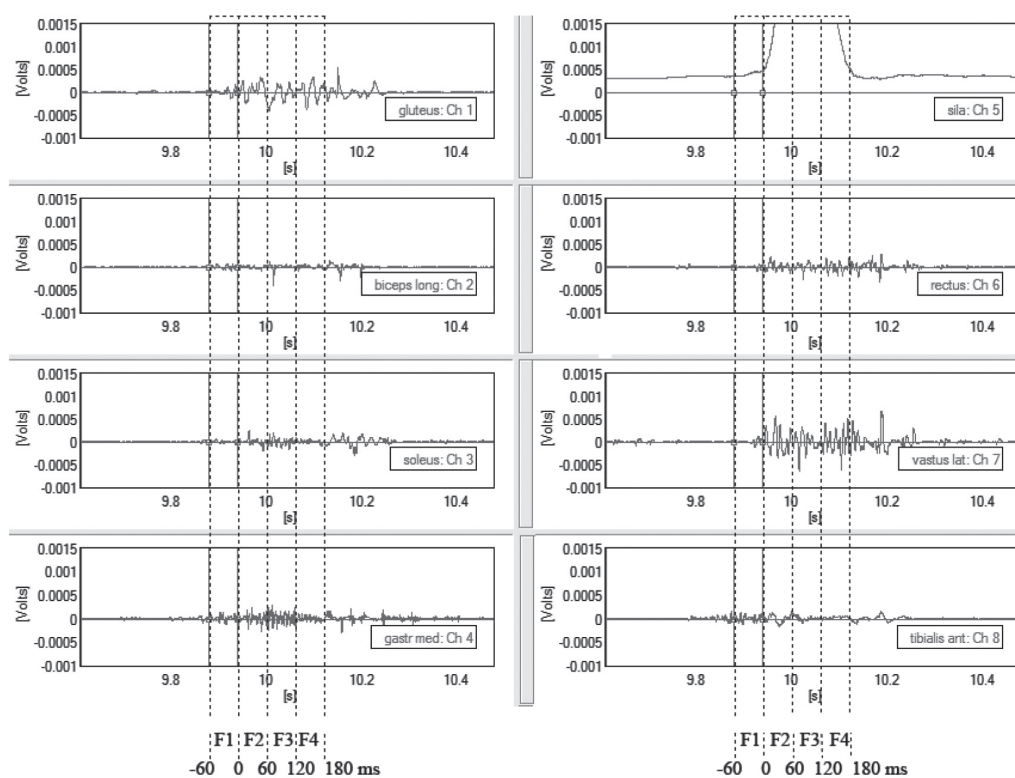
Ukoliko je ANOVA pokazala značajan uticaj interakcije dva faktora na neku od praćenih varijabli, pristupilo se analizi jednostavnih uticaja u okviru kojeg je analiziran uticaj visine odskoka, ali za svaki nivo visine platforme posebno.

Sve statističke analize su odrađene u programu za obradu rezultata SPSS verzije br.17. Vrednosti $p < 0.05$ su odabrane za utvrđivanje nivoa statističke značajnosti 7.

REZULTATI

Elektromiografske varijable

Rezultati dvostruke ANOVA analize sa ponovljenim merenjima za elektromiografske varijable prikazane su u tabeli 1. Rezultati deskriptivne statistike za elektromiografske varijable prikazane su na grafikonima 1 i 2. Na slici 2 se može uočiti prikaz sirovog elektromiografskog signala za sedam praćenih mišićnih grupa, sa prikazom četiri faze koje su podeljene u odnosu na trenutak kontakta stopala sa podlogom.

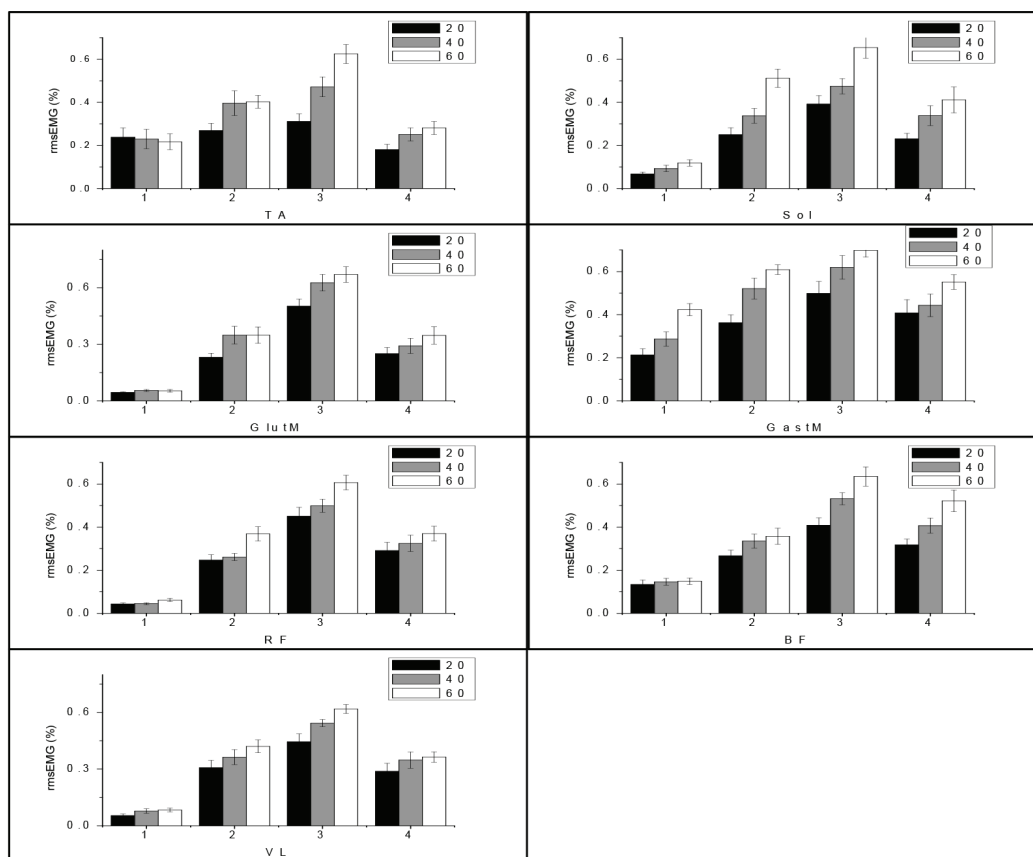


Slika 2. Prikaz sirovog EMG signala za sedam praćenih mišića, sa kanalom koji je registrovao kontakt stopala sa podlogom (prozor u gornjem desnom uglu). Signal je izdvojen u četiri faze u odnosu na trenutak kontakta stopala sa podlogom: F1 (faza preaktivacije: -60–0 ms, gde je 0 vrednost predstavlja trenutak kontakta sa podlogom), F2 (faza amortizacije nakon kontakta sa podlogom: 0–60 ms), F3 (faza ranog otiskivanja od podloge: 60–120 ms) i F4 (faza kasnog otiskivanja o: 120–180 ms).

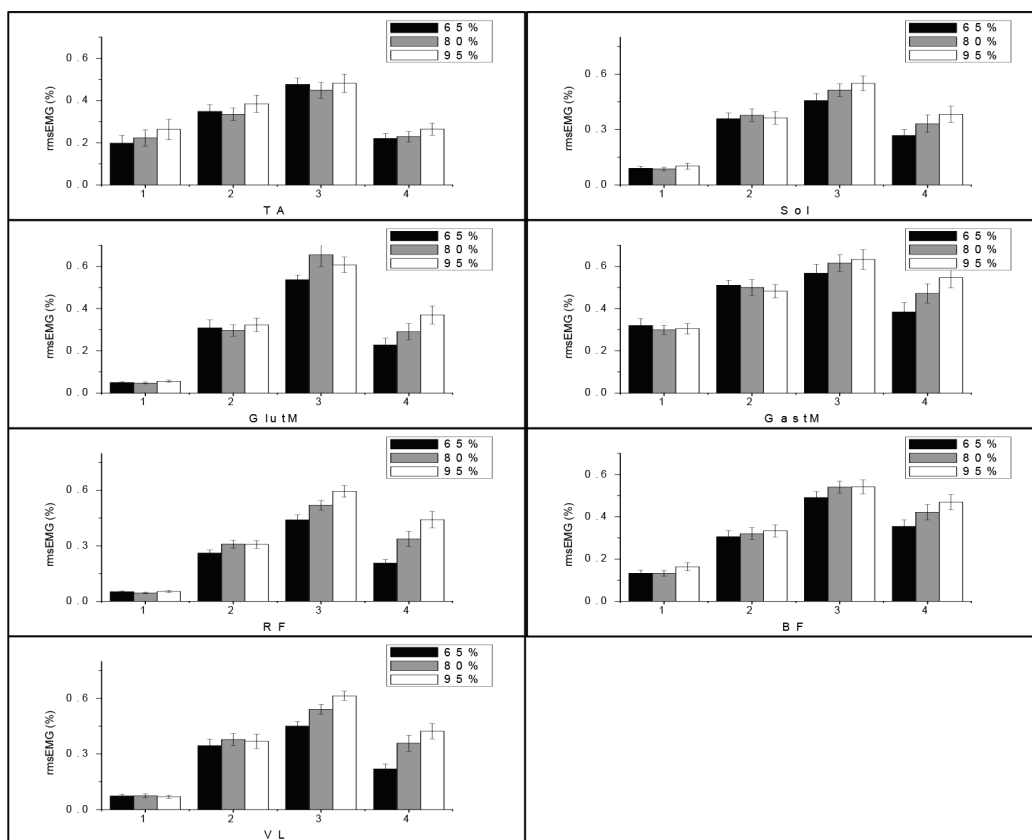
Tabela 1. Rezultati dvostruke ANOVA analize sa ponovljenim merenjima (visina platforme i visina odskoka) za rmsEMG varijable u svakoj od fazi izvođenja skoka (F1, F2, F3 i F4), sa Bonferroni post-hoc obradom. ($p \leq 0.05$).

Post-hoc (Bonferroni): (*) značajna razlika između 20 i 40 cm; (#) značajna razlika između 20 i 60 cm; (&) značajna razlika između 20 i 60 cm; (a) značajna razlika između 65% i 80%; (b) značajna razlika između 80% i 95%; (c) značajna razlika između 65% i 95%; simboli (↑)(↓) označavaju da se vrednost povećava (↑) ili smanjuje (↓) na većim visinama platforme, odnosno odskoka.

		Visina platforme				Visina odskoka				Interakcija			
		F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
VL	df,error	2; 28	2; 28	1.35; 18.91	2; 28	2; 28	2; 28	2; 28	2; 28	4; 56	4; 56	4; 56	4; 56
	F	5.27	10.29	12.10	4.98	0.31	2.33	27.83	37.35	2.76	3.65	4.94	1.25
	p	0.011	0.000	0.001	0.014	0.736	0.116	0.000	0.000	0.037	0.010	0.002	0.299
	Post-hoc	*↑,&↑	#↑,&↑	*↑,#↑,&↑	*↑					a↑,b↑,c↑	a↑,b↑,c↑	a↑,b↑,c↑	a↑,b↑,c↑
RF	df,error	1.35; 18.93	1.46; 20.41	1.37; 19.21	2; 28	2; 28	2; 28	2; 28	2; 28	2.24; 31.34	2.79; 38.74	4; 56	4; 56
	F	6.73	10.09	7.63	4.98	2.09	11.19	33.32	39.06	4.86	4.42	6.07	1.87
	p	0.012	0.002	0.007	0.014	0.143	0.000	0.000	0.000	0.012	0.011	0.000	0.129
	Post-hoc	#↑	#↑,&↑	#↑,&↑						a↑,c↑	a↑,b↑,c↑	a↑,b↑,c↑	a↑,b↑,c↑
BF	df,error	1.13; 15.85	1.28; 17.97	1.23; 17.28	1.22; 17.07	1.41; 19.75	2; 28	2; 28	2; 28	2.25; 31.50	4; 56	2.31; 32.34	4; 56
	F	0.59	4.8	15.23	15.81	6.89	1.31	5.30	15.42	2.60	1.08	5.05	0.32
	p	0.475	0.033	0.001	0.001	0.010	0.286	0.011	0.000	0.084	0.374	0.010	0.865
	Post-hoc			*↑,#↑,&↑	*↑,#↑,&↑	b↑		a↑	a↑,c↑				
Sol	df,error	2; 28	1.40; 19.65	1.44; 20.18	1.46; 20.41	1.39; 19.53	2; 28	2; 28	1.95; 27.36	2.74; 38.3	1.99; 27.83	4; 56	2.23; 31.14
	F	11.40	40.74	28.10	11.98	1.18	0.66	14.54	19.54	1.48	3.81	1.73	2.02
	p	0.000	0.000	0.000	0.001	0.310	0.527	0.000	0.000	0.236	0.035	0.158	0.145
	Post-hoc	*↑,&↑	*↑,#↑,&↑	*↑,#↑,&↑	*↑,&↑					a↑,c↑	a↑,b↑,c↑	a↑,b↑,c↑	a↑,b↑,c↑
GastM	df,error	1.32; 18.49	2; 28	1.34; 18.72	1.21; 16.96	2; 28	2; 28	2; 28	2; 28	2.48; 34.76	4; 56	4; 56	2.67; 36.76
	F	29.63	20.18	11.34	6.28	1.06	1.20	5.86	30.61	0.32	2.66	0.92	1.23
	p	0.000	0.000	0.002	0.018	0.360	0.316	0.008	0.000	0.773	0.042	0.458	0.311
	Post-hoc	*↑,#↑,&↑	*↑,&↑	*↑,&↑	#↑					a↑	a↑,b↑,c↑	a↑,b↑,c↑	a↑,b↑,c↑
GlutM	df,error	2; 28	2; 28	2; 28	2; 28	2; 28	1.44; 20.19	1.41; 19.71	2; 28	4; 56	4; 56	4; 56	2.47; 34.57
	F	2.55	5.47	8.92	5.48	4.26	0.70	4.07	22.57	4.46	3.25	0.71	1.78
	p	0.096	0.010	0.001	0.010	0.024	0.46	0.045	0.000	0.003	0.018	0.587	0.176
	Post-hoc		*↑	*↑,&↑	&↑	b↑		c↑	a↑,b↑,c↑				
TA	df,error	2; 28	2; 28	2; 28	2; 28	1.241; 17.37	2; 28	2; 28	1.45; 20.27	2.43; 34.00	2.24; 31.42	4; 56	4; 56
	F	0.41	5.38	29.26	8.34	5.67	2.54	1.18	4.01	1.09	2.85	1.41	0.31
	p	0.669	0.016	0.000	0.001	0.024	0.097	0.322	0.046	0.356	0.067	0.242	0.867
	Post-hoc		*↑,&↑	*↑,#↑,&↑	*↑,&↑					c↑			



Grafikon 1. Promene rmsEMG (prosečna vrednost \pm standardna greška) u svakoj fazi posebno (F1, F2, F3 i F4, tj. 1, 2, 3, i 4, respektivno) sa promenom visine platforme, izdvojeno za svaki mišić.



Grafikon 2. Promene rmsEMG (prosečna vrednost \pm standardna greška) u svakoj fazi posebno (F1, F2, F3 i F4, tj. 1, 2, 3, i 4, respektivno) sa promenom visine odskoka, izdvojeno za svaki mišić.

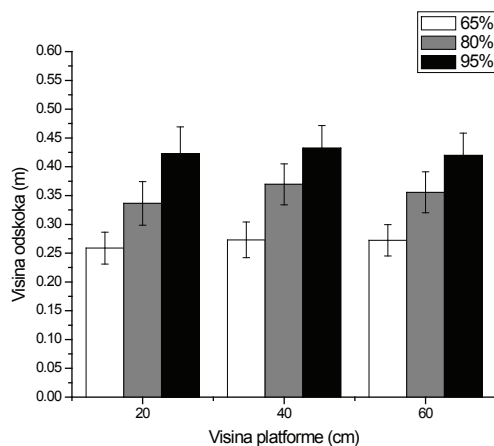
Kinematičke i dinamičke varijable

Rezultati dvostruke ANOVA analize sa ponovljenim merenjima za kinematičke i dinamičke varijable su prikazani u tabeli 2. Rezultati deskriptivne statistike za kinematičke i dinamičke varijable prikazane su na grafikonima od 3 do 11.

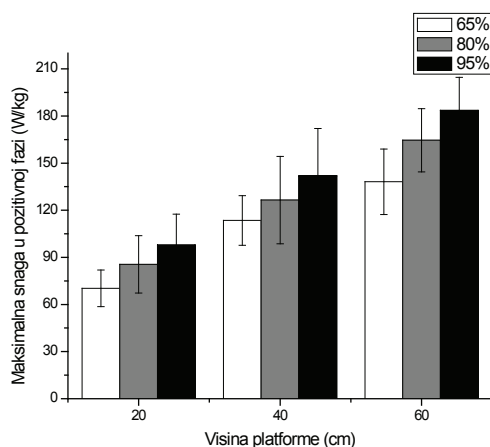
Tabela 2. Rezultati dvostruke ANOVA analize sa ponovljenim merenjima (visina platforme i visina odskoka) za kinematičke i dinamičke varijable, sa *Bonferroni post-hoc* obradom. ($p \leq 0.05$).

Post-hoc (Bonferroni): (*) značajna razlika između 20 i 40 cm; (#) značajna razlika između 40 i 60 cm; (&) značajna razlika između 20 i 60 cm; (a) značajna razlika između 65% i 80%; (b) značajna razlika između 80% i 95%; (c) značajna razlika između 65% i 95%; simboli (↑)(↓) označavaju da se vrednost povećava (↑) ili smanjuje (↓) na većim visinama platforme, odnosno odskoka.

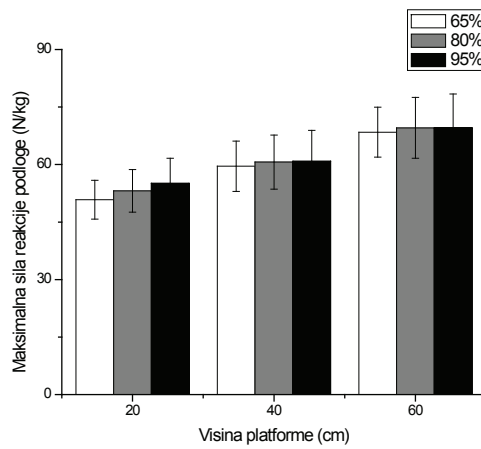
		Visina platforme	Visina odskoka	Interakcija
Maksimalna sila reakcije podloge	F (df,error); p Post-hoc	65.449 (1.468;23.492); p=.000 *↑,#↑,&↑	2.871 (2;32); p=.071	2.308 (2.339;37.417); p=.106
Trajanje kontakta	F (df,error); p Post-hoc	1.361 (1.286; 20.584); p=.267	0.732 (1.353; 21.651); p=.442	0.722 (2.419; 38.701); p=.517
Vertikalni pomeraj CM u amort. fazi	F (df,error); p Post-hoc	15.204 (2;32); p=.000 *↓,&↓	36.871 (2;32); p=.000 a↑,b↑,c↑	6.593 (4;64); p=.000
Visina odskoka	F (df,error); p Post-hoc	6.666 (1.485;23.759); p=.009 *↑	357.037 (2;32); p=.000 a↑,b↑,c↑	0.732 (4; 64); p=.574
Max snaga pri pozitivnoj fazi	F (df,error); p Post-hoc	141.274 (2;32); p=.000 *↑,#↑,&↑	77.362 (2;32); p=.000 a↑,b↑,c↑	5.003 (4;64); p=.001
Ugao u skočnom zglobu u trenutku kontakta	F (df,error); p Post-hoc	53.939 (1.230;19.688); p=.000 *↑,#↑,&↑	42.289 (2;32); p=.000 a↓,b↓,c↓	3.575 (1.868;29.882); p=.043
Ugao u zglobu kolena u trenutku kontakta	F (df,error); p Post-hoc	36.304 (1.309;20.943); p=.000 *↑,#↑,&↑	40.633 (1.395;22.318); p=.000 a↓,b↓,c↓	8.926 (1.869;29.896); p=.001
Ugao u zglobu kuka u trenutku kontakta	F (df,error); p Post-hoc	39.899 (1.422;22.753); p=.000 *↑,#↑,&↑	57.996 (2;32); p=.000 a↓,b↓,c↓	11.187 (4;64); p=.000
Ugao u skočnom zglobu u trenutku odskoka	F (df,error); p Post-hoc	2.339 (2;32); p=.113	0.699 (2;32); p=.504	1.989 (4;64); p=.107
Ugao u zglobu kolena u trenutku odskoka	F (df,error); p Post-hoc	2.330 (2;32); p=.114	1.806 (2;32); p=.181	0.800 (4;64); p=.530
Ugao u zglobu kuka u trenutku odskoka	F (df,error); p Post-hoc	2.143 (2;30); p=.135	0.740 (2;30); p=.486	0.862 (4;60); p=.492
Ugaoni pomeraj u skočnom zglobu	F (df,error); p Post-hoc	93.931 (1.313;21.009); p=.000 *↑,#↑,&↑	2.083 (1.430;22.880); p=.157	5.844 (2.496;39.937); p=.003
Ugaoni pomeraj u zglobu kolena	F (df,error); p Post-hoc	21.012 (2;32); p=.000 #↑,&↑	13.501 (1.235;19.765); p=.001 a↑,b↑,c↑	3.626 (2.899;46.383); p=.021
Ugaoni pomeraj u zglobu kuka	F (df,error); p Post-hoc	6.522 (2;32); p=.004 #↑	60.615 (1.281;20.497); p=.000 a↑,b↑,c↑	5.147 (1.962;31.388); p=.012
Vertikalna krutost	F (df,error); p Post-hoc	10.726 (2;32); p=.000 *↑,&↑	6.476 (2;32); p=.004 a↓	3.086 (4;64); p=.022
Krutost u skočnom zglobu	F (df,error); p Post-hoc	5.780 (2;26); p=.008 *↑,&↑	4.910 (2;26); p=.016 a↓,c↓	0.525 (4;52); p=.718
Krutost u zglobu kolena	F (df,error); p Post-hoc	32.893 (2;28); p=.000 *↑,#↑,&↑	19.449 (2;28); p=.000 a↓,c↓	5.060 (2.751;38.512); p=.006
Krutost u zglobu kuka	F (df,error); p Post-hoc	38.174 (1.282;17.946); p=.000 *↑,#↑,&↑	35.516 (2;28); p=.000 a↓,b↓,c↓	0.311 (4;56); p=.869
Moment u skočnom zglobu	F (df,error); p Post-hoc	38.128 (1.339;20.083); p=.000 *↑,#↑,&↑	3.343 (2;30); p=.049 c↑	1.066 (2.182;32.723); p=.361
Moment u zglobu kolena	F (df,error); p Post-hoc	50.118 (1.492;20.892); p=.000 *↑,#↑,&↑	9.517 (2;28); p=.001 a↓,c↓	1.867 (4;56); p=.129
Moment u zglobu kuka	F (df,error); p Post-hoc	14.794 (1.427;19.978); p=.000 #↑,&↑	8.596 (2;28); p=.001 a↑,b↑,c↑	0.767 (4;56); p=.551



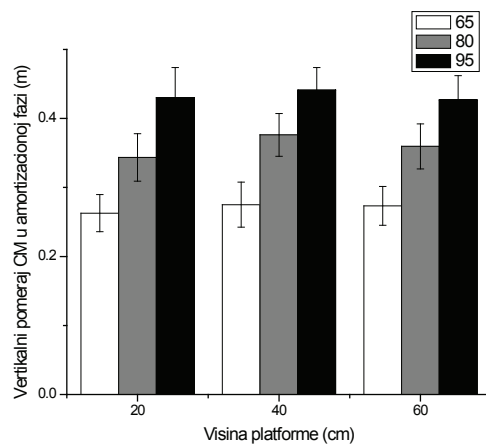
Grafikon 3. Prosečna vrednost \pm SD za ostvarenu visinu odskoka pri izvođenju doskok-odskoka sa različitim visina platforme (20, 40 i 60 cm) i na različite visine odskoka (65, 80 i 95%).



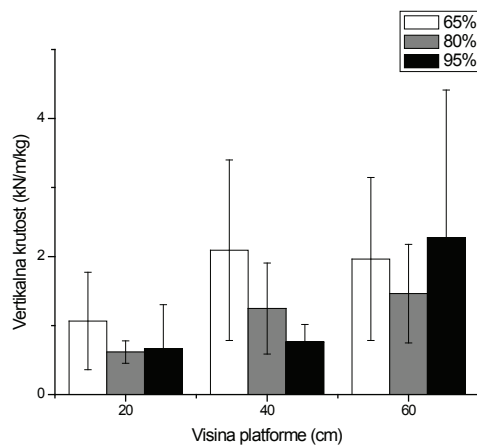
Grafikon 4. Prosečna vrednost \pm SD za maksimalnu snagu u pozitivnoj fazi pri izvođenju doskok-odskoka sa različitim visina platforme (20, 40 i 60 cm) i na različite visine odskoka (65, 80 i 95%).



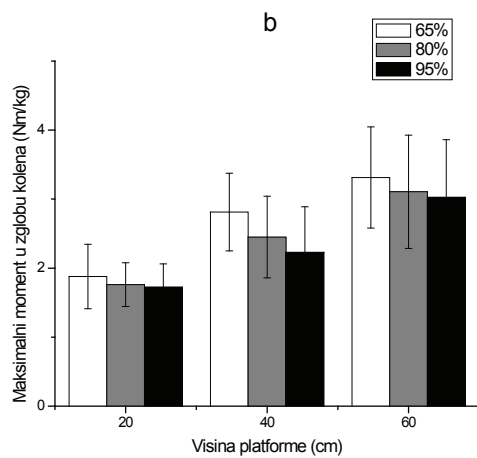
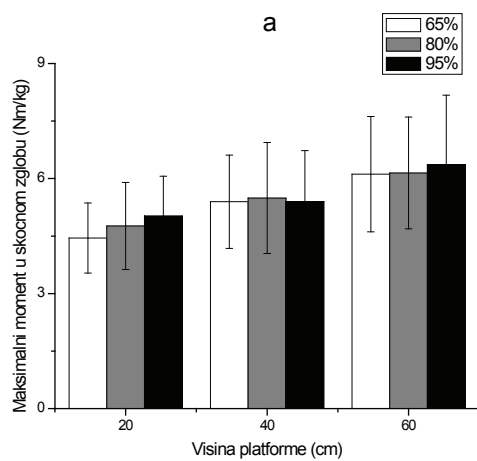
Grafikon 5. Prosečna vrednost \pm SD maksimalne sile reakcije podloge pri izvođenju doskok-odskoka sa različitim visina platforme (20, 40 i 60 cm) i na različite visine odskoka (65, 80 i 95%).

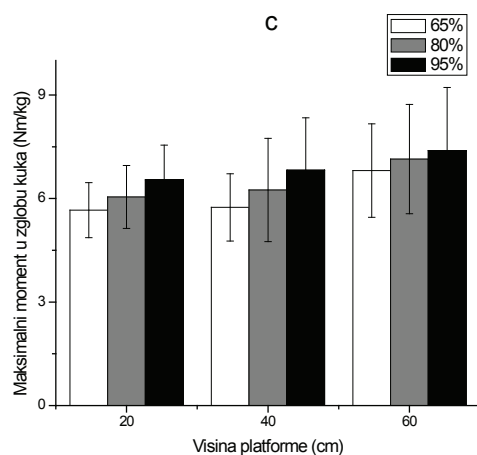


Grafikon 6. Prosečna vrednost \pm SD vertikalnog pomeraja centra mase u amortizacionoj fazi pri izvođenju doskok-odskoka sa različitim visina platforme (20, 40 i 60 cm) i na različite visine odskoka (65, 80 i 95%).

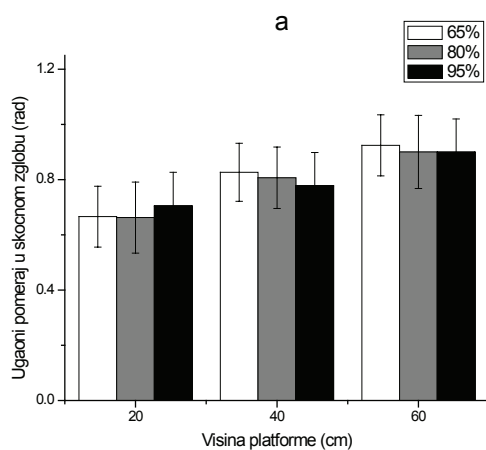


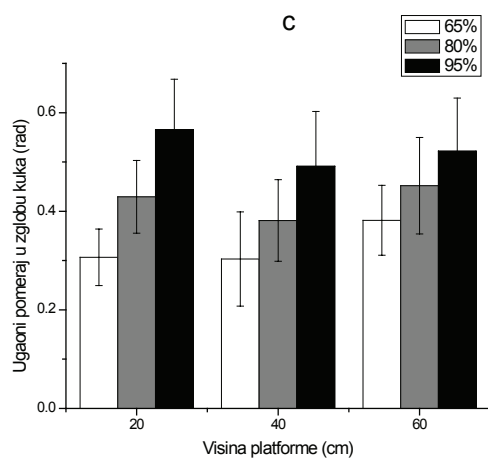
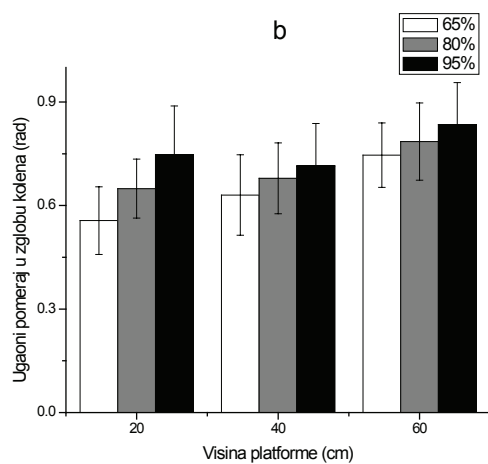
Grafikon 7. Prosečna vrednost \pm SD za vertikalnu krutost pri izvođenju doskok-odskoka sa različitim visina platforme (20, 40 i 60 cm) i na različite visine odskoka (65, 80 i 95%).



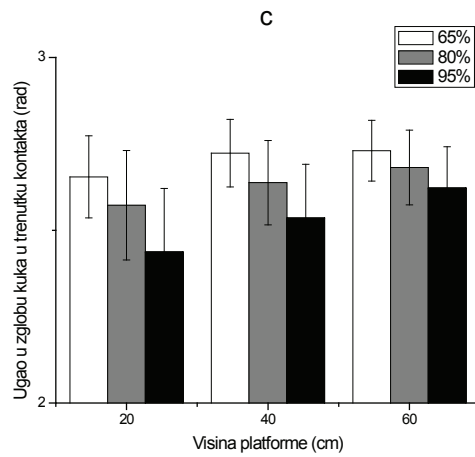
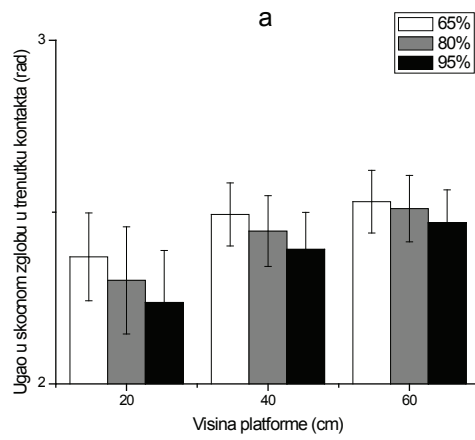


Grafikon 8. (a) Prosečna vrednost \pm SD maksimalnog momenta u skočnom zglobu pri izvođenju doskok-odskoka sa različitim visina platforme (20, 40 i 60 cm) i na različite visine odskoka (65, 80 i 95 %). (b) Prosečna vrednost \pm SD maksimalnog momenta u zglobu kolena. (c) Prosečna vrednost \pm SD maksimalnog momenta u zglobu kuka.

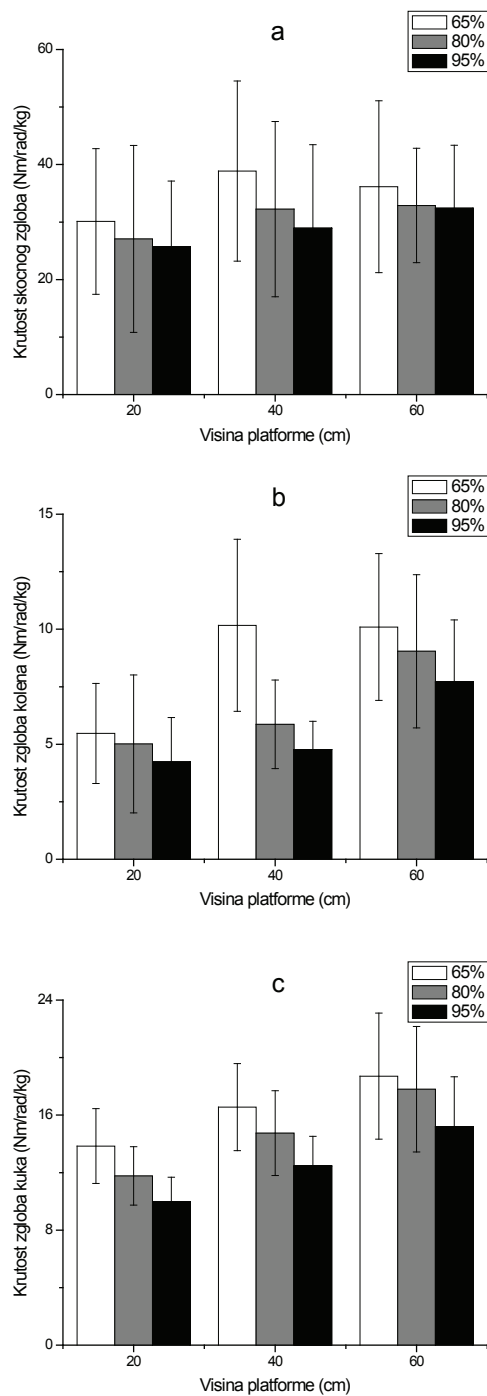




Grafikon 9. (a) Prosečna vrednost \pm SD ugaonog pomeraja u skočnom zglobu pri izvođenju doskok-odskoka sa različitim visina platforme (20, 40 i 60 cm) i na različite visine odskoka (65, 80 i 95%). (b) Prosečna vrednost \pm SD ugaonog pomeraja u zglobu kolena. (c) Prosečna vrednost \pm SD ugaonog pomeraja u zglobu kuka.



Grafikon 10. (a) Prosečna vrednost \pm SD ugla u skočnom zglobu u trenutku kontakta sa podlogom pri izvođenju doskok-odskoka sa različitim visina platforme (20, 40 i 60 cm) i na različite visine odskoka (65, 80 i 95%). (b) Prosečna vrednost \pm SD ugla u zglobu kolena u trenutku kontakta sa podlogom. (c) Prosečna vrednost \pm SD ugla u zglobu kuka u trenutku kontakta stopala sa podlogom.



Grafikon 11. (a) Prosečna vrednost \pm SD za krutost u skočnom zglobu pri izvođenju doskok-odskoka sa različitim visina platforme (20, 40 i 60 cm) i na različite visine odskoka (65, 80 i 95%). (b) Prosečna vrednost \pm SD za krutost u zglobu kolena. (c) Prosečna vrednost \pm SD za krutost u zglobu kuka.

DISKUSIJA

Najveći broj mišićnih grupa koje su praćene u ovoj studiji su za potrebe povećanja visine odskoka povećavale intenzitet aktivacije u fazama kada nastupi otiskivanje od podloge (faze F3 i F4). Ovakav trend promene aktivacije objašnjava da za potrebe povećanja intenziteta izvođenja vertikalnog skoka ne dolazi do proporcionalnog povećanja ispoljenog intenziteta mišićne aktivacije, što nije u skladu sa teorijom generalnog motornog programa koja predviđa da povećanje intenziteta utiče na proporcionalno povećanje mišićne sile tokom svih faza izvođenja nekog pokreta (Schmidt & Lee, 2005). Poslednja faza (F4) bila je najsenzitivnija na doziranje visine odskoka, gde je *post-hoc* analizom uočeno značajno povećanje aktivacije između svake susedne visine odskoka (65, 80 i 95%), i to za skoro sve praćene mišiće. U skladu sa tim može se predvideti da je kontinuirana kontrola dominantna u izvođenju ovakvih kretanja koja predviđa da se ispoljavanje mišićne aktivacije prepodešava i reprogramira od strane viših nivoa centralnog nervnog sistema (CNS) tokom samog izvođenja kretanja u cilju doziranja visine odskoka koja je definisana kretnim zadatkom. Nasuprot ovoj pretpostavci stoji impulsna teorija kojom se predviđa da je celo kretanje definisano setom kontrolisanih komandi koje su unapred zadate za potrebe ostvarivanja cilja kretnog zadatka (Schmidt & Lee, 2005), i mogu se ispoljiti u vidu pojedinačnog mišićnog pražnjenja na početku kontakta sa podlogom gde se taj intenzitet pražnjenja može pojačati ili smanjiti u zavisnosti od intenziteta izvođenja skoka (Bobbert & Casius, 2011). Sa druge strane, intenzitet opterećenja definisan visinom platforme je kod skoro svih mišića proporcionalno povećavao intenzitet mišićne aktivacije tokom većine faza izvođenja DJ skoka, što po kriterijumu sveukupnog parametra sile odgovara postavkama teorije generalizovanog motornog programa (Schmidt & Lee, 2005). Na osnovu pomenutih rezultata, pretpostavlja se da su intenzitet izvođenja i intenzitet opterećenja potpuno različite vrste opterećenja, koje na različit način moduliraju mišićni odgovor, što predviđa i eventualne različite adaptacije mišićnog sistema na kontinuirano upražnjavanje ovih metoda u trenažne svrhe. Kako su vrednosti intenziteta preaktivacije i prvog mišićnog odgovora u aktivaciji koji je nastao nakon kontakta stopala sa podlogom nepromenjene sa povećanjem visine odskoka za većinu mišićnih grupa, može se smatrati da se maksimalne vrednosti aktivacije u pomenutim fazama postižu i pri izvođenju skokova sa submaksimalnim odskocima. Sa druge strane, visina platforme se može označiti kao ključni faktor koji određuje intenzitet odgovora u mišićnoj aktivaciji, gde za fazu preaktivacije i prvog mišićnog odgovora nakon kontakta sa podlogom, nije značajno da li će odskoci biti submaksimalne ili maksimalne visine ukoliko postoji adekvatna visina platforme sa koje se realizuje doskok-odskok.

Rezultati uvećane mišićne aktivacije Sol i GastM sa povećanjem visine platforme sa koje se realizuje DJ skok su u skladu sa dobijenim rezultatima u ranijim istraživanjima (Komi & Gollhofer, 1997; Sousa et al., 2007). Može se smatrati da se aktivacija ova dva plantarna fleksora slično adaptira na promenu visine platforme. Jedina razlika je u tome što je za GastM u fazi preaktivacije (F1) *post-hoc* analizom

utvrđena razlika između svakog nivoa visine platforme, dok je takva promena uočena kod Sol ali u fazama kad nastane prvi mišićni odgovor kao posledica istežanja mišića ekstenzora neposredno po uspostavljanju kontakta stopala sa podlogom (F2 i F3), gde je i u prethodnom istraživanju uočeno da postoji neka različita modulacija intenziteta preaktivacije Sol i GastM na promenu visine platforme (Mrdakovic et al., 2008). U ranijim istraživanjima je ukazano na to da uvećanje intenziteta ekscentričnog opterećenja ovog mišića, postignuto povećanjem visine platforme za DJ skok, i samim tim povećane brzine izduženja mišića, utiče na pojačanu aktivnost aferentnih neurona kao posledica aktiviranih refleksnih reakcija nižih, srednjih i viših nivoa CNS-a (Komi & Gollhofer, 1997; Leukel et al., 2012). Kako je ukazano na to da Sol poseduje tri puta više mišićnih vretena u odnosu na GastM (Kokkorogiannis, 2004), i da se kod Sol konzistentno pojavljuje refleksni odgovor kratke latence, što nije slučaj za GastM (Voigt et al., 1998), može se suditi o drugačijoj aferentnoj aktivnosti ovih mišića koja može uticati na nešto senzitivniji odgovor aktivacije Sol na promenu visine platforme u poređenju sa GastM. Sa tim u vezi, GastM mora da obezbedi dovoljni stepen aktivacije u periodu pre kontakta stopala sa podlogom kako bi obezbedio visok stepen mišićne krutosti, dok Sol usled izražene aferentne aktivnosti ima sposobnost da obezbedi visok stepen mišićne sile i po stvaranju kontakta stopala sa podlogom. Međutim, u radu autora Sousa et al. (2007) pokazano je da nema razlika u trendu promena električne aktivacije mišića između Sol i GastM sa promenom visine platforme sa koje se izvodi DJ skok, već se različito ponašanje ova dva mišića pronalazi u mehaničkim svojstvima fascije mišića. Sa druge strane, mehaničko svojstvo jednogglobnog mišića utiče na to da su Sol i VL kao jednogglobni mišići morali da adaptiraju svoju aktivaciju na promenu intenziteta uslova u kojima se izvodi kretanje s obzirom da su u lokomotornoj funkciji zaduženi za generisanje adekvatne sile za potrebe obezbeđivanja uslova za izvođenje kretanja, dok su dvozglubni mišići odgovorni za finu regulaciju ispoljavanja momenata u susednim zglobovima (Ingen Schenau et al., 1987).

Rezultati studije ukazuju da sa progresivnim povećanjem visine platforme na svim zglobovima postoji progresivno uvećanje opterećenja izraženo preko ispoljenih momenata. Međutim, kada je u pitanju povećanje visine odskoka između svakog nivoa ovog faktora, neophodno je opisati modulaciju momenata za svaki zglob posebno. *Post-hoc* analiza uticaja visine odskoka na momenat u skočnom zglobu ukazuje da ovaj zglob nije značajno senzitivniji na promene visine odskoka, gde su uočene razlike samo između odskoka na visine od 65 i 95%. Ovakav rezultat može biti objašnjen limitiranom funkcijom mišića plantarnih fleksora koja je prethodno opisana u radu. Sa druge strane, zglob kuka je jedini zglob čije su se vrednosti momenata povećavale između svakog nivoa visine odskoka, ukazujući na taj način da su ispoljeni mišićni momenti ekstenzora u zglobu kuka najznačajniji za fino doziranje visine odskoka, ali i ostvarivanje maksimalne visine odskoka, što je u skladu sa ranijim istraživanjima koja su dobijena pri ispitivanju drugih vrsta vertikalnih skokova (npr. CMJ skokovi) (Lees et al., 2004). Uvećano opterećenje na nivou zgloba kuka može biti u vezi sa proksimalno-ditalnom strategijom koju ispitanici koriste u cilju povećanja visine odskoka, a odnosi se na tendenciju da se sa povećanjem visine odskoka uveća inklinacija trupa prema

napred u težnji da se uveća rotacija proksimalnog segmenta što direktno utiče na neophodno uvećanje ispoljenog momenta ekstenzora zgloba kuka. Takođe, rezultati prethodne studije u kojoj je progresivno povećavana visina odskoka pri izvođenju CMJ skoka, nisu uticali na proporcionalno povećano angažovanje u skočnom zglobu i zglobu kolena, dok su se ispoljen moment, snaga i rad u zglobu kuka sistematski povećavali sa povećanjem visine odskoka (Lees et al., 2004). Međutim, aktuelni rezultati ove studije koja ispituje problematiku povećanja visine odskoka u DJ skoku ukazuju da se vrednosti momenta u zglobu kolena smanjuju sa povećanjem visine odskoka. Ostvareni moment u zglobu kolena je pod uticajem aktivnosti mišića ekstenzora u zglobu kolena VL i VM, kao i dvozglavnog RF. Nasuprot ovom dejstvu ekstenzora u zglobu kolena, deluje sila dvozglavnog mišića natkolenica BF, čija anatomska konfiguracija omogućava transfer ispoljene snage sa nivoa zgloba kuka na ispoljenu snagu na nivo zgloba kolena. Naime, u rezultatima ove studije je primećen značajan prirast u aktivaciji BF i to u fazama otiskivanja od podloge (faze F3 i F4). Kao posledica povećanja inklinacije trupa prema napred sa povećanjem visine odskoka događa se uvećana aktivacija dvozglavnih mišića zadnje lože natkolenice. S obzirom da BF ima funkciju ekstenzora u zglobu kuka ali i fleksora u zglobu kolena, njegova uvećana aktivacija može uticati na povećanje momenta fleksora u zglobu kolena i tim uticati na umanjenje ispoljenog ekstenzionog momenta u zglobu kolena. Ovi rezultati su u saglasnosti sa rezultatima Lees et al. (2004), gde su uočeni veći uglovi u zglobu kolena tokom amortizacione faze što prouzrokuje veću inklinaciju trupa prema napred i za posledicu ima uvećanje ispoljenog momenta i realizovane snage u zglobu kuka. Takođe, smanjivanje momenta u zglobu kolena sa povećanjem visine odskoka može biti rezultat povećanja momenta dvozglavnih fleksora u skočnom zglobu koji deluje sa dorzalne strane zgloba kolena, što takođe uvećava fleksioni momenat u zglobu kolena (Lees et al., 2004) i time smanjuje moment ekstenzora u zglobu kolena.

ZAKLJUČAK

Najbitniji rezultati ove studije ukazuju na sledeće: (1) mehanizmi prediktivne kontrole nemaju značajan uticaj na doziranje visine odskoka; (2) povećanje visine odskoka značajno utiče na povećanje aktivacije većine mišića donjih ekstremiteta u ranoj i kasnoj fazi otiskivanja od podloge (faze od 60 do 120 i od 120 do 180 ms od početka kontakta sa podlogom), što ukazuje da mehanizmi reprogramiranja i fdbek kontrole najviše utiču na doziranje visine odskoka; (3) povećanje visine platforme je dominantan faktor koji utiče na povećanu aktivaciju većine mišića donjih ekstremiteta tokom svih praćenih faza, gde je za fazu preaktivacije i fazu prvog mišićnog odgovora nakon kontakta sa podlogom nevažno kojim se intenzitetom izvodi doskok već je isključivo bitno sa koje visine platforme se izvodi doskok; (4) ekstenzioni moment u zglobu kuka je najvažnija mehanička varijabla koja doprinosi uvećanju visine odskoka kod DJ skoka.

Povećanje intenziteta opterećenja pri izvođenju DJ skoka je značajno uticalo na povećanje intenziteta preaktivacije Sol, ali ne i na vremenski interval pojave preaktivacije, dok promena intenziteta izvođenja DJ skoka nije imala uticaja ni na jednu od varijabli preaktivacije Sol. Ovim je delimično potvrđena prva hipoteza s obzirom da je uočeno da prediktivna kontrola ima značajan uticaj na prilagođavanje mišićne aktivacije na promenu intenziteta opterećenja, što je očekivan rezultat, gde je takođe očekivano da prediktivna kontrola ima značajnog udela u pripremi intenziteta preaktivacije za potrebe doziranja visine odskoka na zadate visine koje su unapred bile zadate. Na ovaj način moguće je raščlaniti ulogu prediktivnih upravljačkih mehanizama koji su pre svega usmereni za potrebe pripreme mišićnog sistema za očekivani intenzitet opterećenja koji lokomotorni sistem treba da savlada, dok sa druge strane ne postoji veliki uticaj preaktivacije na intenzitet ispoljene performanse što ukazuje da prediktivni upravljački mehanizmi nemaju udela u doziranju ispoljavanja performanse, ili obrnuto, da nivo ispoljene preaktivacije ne može biti posledica aktivnosti prediktivnih upravljačkih mehanizama. Oba eksperimentalna faktora nisu imala uticaj na vreme pojave preaktivacije, što jeste u skladu sa prethodnim istraživanjima, koja ukazuju da je vremenski interval pojave preaktivacije vremenski zaključan, a da se preaktivacija prilagođava nekim promenjenim uslovima izvođenja kretanja time što se povećava ili smanjuje prirast u mišićnoj aktivaciji.

Mišićna aktivacija nastala u fazama kada se pojavljuje mišićni odgovor na refleks kratke latence nije senzitiva na promenu intenziteta izvođenja, dok je mišićni odgovor nastao u poslednje dve faze otiskivanja od podloge (60–120 i 120–180 ms od trenutka kontakta stopala sa podlogom) najvažniji za podešavanje mišićne aktivacije za potrebe doziranja visine odskoka. Sa druge strane, intenzitet spoljnog opterećenja je značajno uticao na pojačavanje mišićne aktivacije u svim fazama kontakta stopala sa podlogom. Ovime je u potpunosti potvrđena druga hipoteza kojom je pretpostavljeno da refleksni odgovor kratke latence nema značaj u kontrolisanju visine odskoka s obzirom da predstavlja spinalni odgovor na istezanje mišića bez udela viših centara CNS-a, ali da sa druge strane ima funkciju prilagođavanja aktivacije na promenu visine platforme, što obezbeđuje mišićnom sistemu određen stepen krutosti koja je neophodna za savladavanje spoljnog opterećenja i realizaciju kretanja sa povratnim režimom mišićnog rada.

Koordinaciona strategija koju ispitanici koriste za potrebe uvećanja visine odskoka pri izvođenju DJ skoka podrazumeva doskakanje sa većom fleksijom u svim zglobovima, realizovanje većeg ugaonog pomeraja u zglobu kolena i kuka, što rezultira povećanjem vertikalnog pomeraja centra mase tokom amortizacione faze. Kako su vrednosti maksimalne sile reakcije podloge ostale nepromenjene sa povećanjem intenziteta izvođenja vertikalnog skoka, povećanje vertikalnog pomeraja tokom amortizacione faze je uticalo na ukupno smanjenje vertikalne krutosti. Kako krutost sistema predstavlja globalnu varijablu koja integriše ispoljavanje svih pojedinačnih elemenata inače vrlo složenog lokomotornog sistema, smatra se da je mehanizam za kontrolu ukupne krutosti identifikovan na nekom globalnom nivou koji podrazumeva da se simultanom koordinacijom svih zglobova donjih ekstremiteta omogućava stabilna

i kontrolisana kinematika centra mase. Za razliku od visine odskoka, povećanje visine platforme je uticalo da se pri uspostavljanju kontakta stopala sa podlogom povećava ekstenzija u svim zglobovima, kao i ugaoni pomeraj u svim zglobovima, gde je skočni zglob bio najsenzitivniji na promene nivoa visine platforme, zatim nešto manje zglob kolena i najmanje zglob kuka. Vertikalni pomeraj centar mase u amortizacionoj fazi se značajno smanjuje sa uvećanjem intenziteta opterećenja DJ skoka što je sa simultanim uvećanjem vrednosti maksimalne sile reakcije podloge rezultiralo povećavanjem ispoljene krutosti. Ovakav rezultat ukazuje da ispitanici sa povećanjem intenziteta spoljnog opterećenja teže da realizuju „tvrđi“ doskok radi obezbeđivanja benefita koji proizlaze iz povratnog režima rada mišića i korišćenja energije elastične informacije, ali i radi stvaranja dovoljno krutog sistema koji bi imao kapacitet da se odupre povećanoj količini kinetičke energije koja je nastala kao posledica povećane visine platforme sa koje ispitanik doskače. Suptilna kontrola kinematike centra mase i ispoljene krutosti sistema na različite intenzitete opterećenja i intenzitete izvođenja doskok-odskoka u potpunosti potvrđuju treću i četvrtu hipotezu.

Mehanika zgloba kuka i kolena u vidu ispoljenih ugaonih pomeraja i momenata se značajno menja pod uticajem intenziteta izvođenja vertikalnog skoka, što implicira da maksimalna performansa u vertikalnom skoku mora biti praćena značajnim angažovanjem i moduliranjem biomehaničkih parametara u okviru zgloba kuka i zgloba kolena. Rezultati ove studije bliže pojašnjavaju ulogu različitih mišića i zglobova pri izvođenju DJ skoka različitim intenzitetima. U zaključku se može napomenuti da se mehanika skočnog zgloba prilagođava na promenu intenziteta mehaničkih uslova u kojima se izvodi kretanje (visina platforme), ali ne i na promenu intenziteta izvođenja čime se ukazuje na činjenicu da mehanika skočnog zgloba ne utiče na doziranje ispoljene performanse u vidu odskoka na određene submaksimalne visine, čime je jednim delom opravdana peta hipoteza. Mehanika skočnog zgloba je izopštena iz funkcije koje imaju zglob kolena i kuka, najverovatnije iz razloga anatomskih ograničenja koje se odnose na mehaniku skočnog zgloba, ali i mišića koji ostvaruju svoju funkciju u skočnom zglobu. Neophodno je napomenuti da je moment ekstenzora u zglobu kuka najznačajnija varijabla koja utiče na povećanje visine odskoka kod vertikalnog skoka, nezavisno od toga da li je u pitanju DJ. Sa druge strane, ugaoni pomeraj u zglobu kolena bio je povećan za potrebe povećanja visine odskoka, dok su vrednosti momenata u zglobu kolena izvođenju DJ skoka smanjeni sa povećanjem visine odskoka. Ovim se još više ističe značaj ispoljenog momenta ekstenzora u zglobu kuka za potrebe povećanja visine vertikalnog odskoka, s obzirom da značajno uvećanje ispoljenog ekstenzionog momenta u zglobu kuka neutrališe efekte ekstenzionog momenta u zglobu kolena time što dvozglobni mišići ekstenzori zgloba kuka imaju i funkciju fleksora u zglobu kolena koja utiče na povećanje fleksionog momenta u zglobu kolena. Na taj način, može se izvesti zaključak da je povećanje ugaonog pomeraja u zglobu kolena sa povećanjem visine odskoka u vezi sa potrebom da sistem obezbedi adekvatnu kinematiku centra mase koja podrazumeva uvećanje vertikalnog pomeraja u amortizacionoj fazi, gde bi zglob kolena trebalo da ima funkciju prenosioca značajno uvećane kinetičke energije segmenta trupa koja je nastala kao efekat značajno većih ispoljenih momenata ekstenzora u zglobu kuka.

ZAHVALA

Izrada ovog rada je podržana od strane projekata Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije: Primena biomedicinskog inženjeringa u pretkliničkoj i kliničkoj praksi. Evid. br. 41007 (2011–2015); Efekti primenjene fizičke aktivnosti na lokomotorni, metabolički, psihosocijalni i vaspitni status populacije R. Srbije. Evid. br. 47015 (2011–2015).

LITERATURA

1. Blickhan R. The spring-mass model for running and hopping. *J Biomech* 1989; 22:1217–27.
2. Bobbert MF, Huijing PA, van Ingen Schenau GJ. Drop jumping II. The influence of dropping height on the biomechanics of drop jumping. *Med Sci Sports Exerc* 1987; 19:339–46.
3. Bobbert MF, Richard Casius LJ. Spring-like leg behaviour, musculoskeletal mechanics and control in maximum and submaximum height human hopping. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 2011; 366:1516–29.
4. Dietz V, Schmidtbleicher D, Noth J. Neuronal mechanisms of human locomotion. *J Neurophysiol* 1979; 42:1212–22.
5. Dyhre-Poulsen P, Simonsen EB, Voigt M. Dynamic control of muscle stiffness and H reflex modulation during hopping and jumping in man. *J Physiol* 1991; 437:287–304.
6. Farley CT, Morgenroth DC. Leg stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. *J Biomech* 1999; 32:267–73.
7. Ford KR, Myer GD, Smith RL, Byrnes RN, Dopirak SE, Hewett TE. Use of an overhead goal alters vertical jump performance and biomechanics. *J Strength Cond Res* 2005; 19:394–9.
8. Gollhofer A, Rapp W. Recovery of stretch reflex responses following mechanical stimulation. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1993; 66:415–20.
9. Horita T, Komi PV, Nicol C, Kyröläinen H. Interaction between pre-landing activities and stiffness regulation of the knee joint musculoskeletal system in the drop jump: implications to performance. *Eur J Appl Physiol* 2002; 88:76–84.
10. Ishikawa M, Komi PV. Effects of different dropping intensities on fascicle and tendinous tissue behavior during stretch-shortening cycle exercise. *J Appl Physiol* 2004; 96:848–52.
11. Kokkoroogiannis T. Somatic and intramuscular distribution of muscle spindles and their relation to muscular angiotypes. *J Theor Biol* 2004; 229:263–80.
12. Komi PV. Stretch-shortening cycle. In: Komi PV, ed. *Strength and Power in Sport*. Oxford UK: Blackwell Science 2003; 184–202.
13. Komi PV, Gollhofer A. Stretch reflex can have an important role in force enhancement during SSC-exercise. *J Appl Biomech* 1997; 13:451–60.

14. Kyrolainen H, Komi PV. The function of neuromuscular system in maximal stretch-shortening cycle exercises: comparison between power- and endurance-trained athletes. *J Electromyogr Kinesiol* 1995; 5:15–25.
15. Lees A, Vanrenterghem J, De Clercq D. The maximal and submaximal vertical jump: implications for strength and conditioning. *J Strength Cond Res* 2004; 18:787–91.
16. Leukel C, Taube W, Lorch M, Gollhofer A. Changes in predictive motor control in drop-jumps based on uncertainties in task execution. *Hum Mov Sci* 2012; 31:152–60.
17. Makaruk H, Sacewicz T. The effect of drop height and body mass on drop jump intensity. *Biol Sport* 2011; 28:63–7.
18. Moran KA, Wallace ES. Eccentric loading and range of knee joint motion effects on performance enhancement in vertical jumping. *Hum Mov Sci* 2007; 26:824–40.
19. Moritani T, Oddsson L, Thorstensson A. Phase-dependent preferential activation of the soleus and gastrocnemius muscles during hopping in humans. *J Electromyogr Kinesiol* 1991; 1:34–40.
20. Mrdakovic V, Ilic DB, Jankovic N, Rajkovic Z, Stefanovic D. Pre-activity modulation of lower extremity muscles within different types and heights of deep jump. *J Sports Sci Med* 2008; 7:269–78.
21. Peng HT, Kernozek TW, Song CY. Quadriceps and hamstring activation during drop jumps with changes in drop height. *Phys Ther Sport* 2011; 12:127–32.
22. Ruan M, Li L. Approach run increases preactivation and eccentric phases muscle activity during drop jumps from different drop heights. *J Electromyogr Kinesiol* 2010; 20:932–8.
23. Salles A, Baltzopoulos V, Rittweger J. Differential effects of countermovement magnitude and volitional effort on vertical jumping. *Eur J Appl* 2011; 111:441–8.
24. Schmidt A, Lee TD. *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis*. Champaign, Ill: Human Kinetics 2005;
25. Sousa F, Ishikawa M, Vilas-Boas JP, Komi PV. Intensity- and muscle-specific fascicle behaviour during human drop jumps. *J Appl Physiol* 2007; 102:382–9.
26. van Ingen Schenau GJ, Bobbert MF, Rozendal RH. The unique action of bi-articular muscles in complex movements. *J Anat* 1987; 155:1–5.
27. van Zandwijk JP, Bobbert MF, Munneke M, Pas P. Control of maximal and submaximal vertical jumps. *Med Sci Sport Exerc* 2000; 32:477–85.
28. Voigt M, Dyhre-Poulsen P, Simonsen EB. Modulation of short latency stretch reflexes during human hopping. *Acta Physiol Scand* 1998; 163:181–94.
29. Winter DA. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement* (2nd ed.). New York: Wiley-Interscience, 1990