

Važnost živčano-mišićne koordinacije nakon ozljede prednje ukrižene sveze koljenog zgloba

The importance of neuromuscular coordination of the knee joint after anterior cruciate ligament injuries

Tea Schnurrer-Luke-Vrbanić^{1*}, Jagoda Ravlić-Gulan²

Sažetak. Cilj: Istražiti jesu li nakon ozljede prednjeg križnog ligamenta koljena aktivni mehanizmi stabilizacije zgloba, potaknuti vježbama propriocepcije i ravnoteže tijekom programa rehabilitacije, dovoljni za uspostavljanje normalne funkcije zgloba, praćenjem živčano-mišićne kontrole na nestabilnoj podlozi u ranim razdobljima od ozljede, odnosno operacije rekonstrukcije prednjeg križnog ligamenta (od 1 mjesec do 1 godine). **Ispitanici i metode:** U kliničko istraživanje bilo je uključeno 53 ispitanika s ozljedom prednjeg križnog ligamenta (PKL) koljena, liječenih konzervativno/operacijski. Svi su nakon ozljede/operacije proveli rehabilitacijski program s naglaskom na vježbama na nestabilnoj podlozi za poticanje živčano-mišićne koordinacije i ravnoteže. Statičku i dinamičku stabilnost pratili smo i mjerili aparatom SportKAT 2000. Usporedbu rezultata vršili smo prema usporedbenoj skupini zdravih ispitanika i/ili prema zdravom ekstremitetu istog ispitanika. **Rezultati:** Koristeći se Sport KAT metodom, pronašli smo disfunkciju neuromišićne kontrole u održavanju statičke i dinamičke stabilnosti zgloba i ravnoteže u promatranim skupinama pacijenata određivanjem statičkih i dinamičkih ravnotežnih indeksa. Vježbe živčano-mišićne koordinacije, kao dio rehabilitacijskog protokola nakon ozljede PKL-a koljena, vrlo brzo dovode do poboljšanja obaju ravnotežnih indeksa ($p < 0,001$), u obje skupine pacijenata. No, ako se navedene vježbe svakodnevno ne izvode, dinamički ravnotežni indeks pogoršava se u neoperiranoj skupini, dok se nakon operacijske stabilizacije zgloba uspostavlja „normalizacija” ravnoteže ($p < 0,001$). **Zaključak:** S ciljem rehabilitacije neurosenzoričkih i proprioceptivskih oštećenja nastalih nakon ozljede PKL-a koljena liječenih konzervativno/operacijski, potrebno je koristiti vježbe koje stimuliraju dinamičke stabilizatore zgloba, preko mehanizama neuromišićne kontrakcije tijekom održavanja ravnoteže. Spomenuto predstavlja znanstveni doprinos ovog rada s naglašavanjem važnosti živčano-mišićne koordinacije u rehabilitaciji donjeg ekstremiteta pri održavanju stabilnosti zglobova.

Cljučne riječi: ozljeda koljena; prednji križni ligament; ravnoteža; rehabilitacija

Abstract. Aim: To evaluate if the restoration of neuromuscular coordination in knee ACL-injured patients could be estimated by the stimulation of neuromuscular control during the rehabilitation or if operative stabilisation should be performed previously. The study had to examine a short-term and long-term efficiency by monitoring the indicators of joint functionality in the early stages, from one month to one year after the injury/operation. **Patients and methods:** We analysed 53 ACL-injured patients treated operatively and non-operatively. All the patients underwent a functional rehabilitation programme with balance exercises. The measuring of static and dynamic balance on SportKAT 2000 device was performed, and the results were compared with the healthy subjects and the healthy limb of the same subject. **Results:** Measuring the static and dynamic balance indexes, a dysfunction of neuromuscular control was found in the maintenance of balance in the patient groups. Exercises that included stimulation of the neuromuscular coordination, as a part of the rehabilitation procedure following ACL injuries, soon lead to an improvement of both balance indexes ($p < 0,001$) in both groups, however, no long term impact was noted in non-operatively treated group. Namely, if the above exercises are not conducted on a regular daily basis, the balance indexes will deteriorate. Contrary, after the operative joint stabilization the balance indexes tend to improve to the 'normal' balance ($p < 0,001$).

¹ Zavod za fizikalnu medicinu i rehabilitaciju, KBC Rijeka, Rijeka

² Katedra za fiziologiju, imunologiju i patofiziologiju, Medicinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka

***Dopisni autor:**

Prof. dr. sc. Tea Schnurrer-Luke-Vrbanić, dr. med.

Zavod za fizikalnu medicinu i rehabilitaciju, KBC Rijeka, Krešimirova 42, 51000 Rijeka
E-mail: teaslv@uniri.medri.hr

<http://hrcak.srce.hr/medicina>

Conclusion: In order to restore dynamic stabilization of the joint in ACL injured patients, exercises stimulating the neuromuscular mechanisms are necessary. This suggests the importance of neuromuscular coordination in the rehabilitation of the lower extremity while maintaining joint stability, which represents the scientific contribution of this paper.

Key words: anterior cruciate ligament; balance; knee injury; rehabilitation

S ciljem rehabilitacije neurosenzoričkih i proprioceptivskih oštećenja nastalih nakon ozljede PKL-a koljena potrebno je koristiti vježbe koje stimuliraju statičke i dinamičke stabilizatore zgloba, preko mehanizama neuromišićne ko-kontrakcije tijekom održavanja ravnoteže pri izvođenju vježbi na nestabilnoj podlozi.

UVOD

U fiziološkim uvjetima stabilnost zgloba održava se preko neuromišićnog sustava i mehanizama povratne sprege između ligamenata, mišića te kontaktnih sila koje se javljaju između zglobnih površina s ciljem održavanja ravnoteže, uspravnog stava i stabilnog hoda. Sile koje se pritom javljaju najčešće su iznad kapaciteta istezanja vezivnih struktura ligamenata i zglobne čahure, što zahtijeva aktivaciju mišića kako bi se održala stabilnost zgloba. Kada je dinamička mišićna stabilnost nedostatna ili spora u aktivaciji, slijedi značajno istezanje ligamenata kao pasivnih stabilizatora zgloba, s mogućom ozljedom kao posljedicom¹⁻³. Poznato je, međutim, da se ozljedom kapsuloligamentarnih struktura ne gubi samo statička stabilnost zgloba, već, možda i bitnije, tzv. dinamička stabilnost zgloba uslijed slabljenja proprioceptivskih aferentnih signala iz mehanoreceptora smještenih u ligamentima i čahuri zgloba. Može se raditi o izravnom oštećenju mehanoreceptora kod puknuća ligamenta i oštećenja zglobne čahure ili njihovoj smanjenoj osjetljivosti na istezanje kod istegnuća ligamenta, jer je poznato da se oni stimuliraju napetošću što ga izaziva pokret. Nastali živčani signal prenosi se na višestruke razine u CNS-u i tamo se obrađuje, a potom se ostvaruje svjesna i podsvjesna neuromišićna kontrola muskulature oko zgloba i time čuva integritet ligamentarnog sustava. Smanjenje proprioceptiv-

skog signala ili tzv. „zglobna deaferencijacija” ima za posljedicu slabiji osjet položaja i pokreta u zglobu, koji se zatim prenosi u CNS i uzrokuje lošiju neuromišićnu kontrolu i funkcijsku nestabilnost zgloba te nesposobnost održavanja ravnoteže¹⁻³.

Poznato je da ozljeda ligamenta kod različitih pacijenata dovodi do različitog stupnja nestabilnosti zgloba, tako da razjašnjavanje mehanizama stabilizacije zgloba u osoba kojima nije bila potrebna operacijska metoda terapije za postizanje zadovoljavajuće funkcije zgloba, pridonosi razjašnjavanju rehabilitacijskih strategija stabilizacije zgloba. Nadalje, današnje metode kliničkog ispitivanja ne pružaju objektivnu sliku funkcijskog poboljšanja u ozljedi ligamenta.

Cilj našeg istraživanja bio je istražiti jesu li aktivni mehanizmi stabilizacije zgloba koljena potaknuti vježbama živčano-mišićne koordinacije u održavanju ravnoteže tijekom programa rehabilitacije dovoljni za uspostavljanje normalne funkcije zgloba kod prednje nestabilnosti uzrokovane rupturom prednje ukrižene sveze. Pritom smo uspoređivali učinkovitost vježbama potaknutih aktivnih stabilizacijskih mehanizama u pacijenata koji su nakon ozljede prednjeg križnog ligamenta koljena bili podvrgnuti samo rehabilitacijskom programu ili im je prethodno učinjena i rekonstrukcija ligamenta operacijskim putem, te time i pasivna stabilizacija zgloba. Ispitali smo kratkoročnu i dugoročnu učinkovitost različitih terapijskih pristupa u ozljedi prednjeg križnog ligamenta koljena praćenjem pokazatelja živčano-mišićne kontrole u ranim razdobljima od ozljede (od 1,5 mjesec do 1 godine).

ISPITANICI I METODE

U kliničko istraživanje ukupno je bilo uključeno 53 ispitanika s ozljedom koljena pri kojoj je nastala ruptura prednjeg križnog ligamenta (PKL). Svi ispitanici su se rekreativno bavili sportom. U svih ispitanika druga noga je bila neozlijeđena. Kod svih je učinjena artroskopska operacija koljena. Ako je istovremeno bila učinjena i meniscektomija na zahvaćenom koljenu, ispitanik je bio uključen u studiju, za razliku od onih pacijenata koji su uz rupturu prednjeg križnog ligamenta zadobili i druge ligamentarne ozljede te nisu mogli sudjelovati u istraživanju.

Ispitanike s ozljedom koljena podijelili smo u 2 skupine.

Skupinu 1 (PKL-r) čini 34 ispitanika s rupturom PKL-a, nakon koje su proveli edukaciju i rehabilitacijski program u koji smo uključili vježbe živčano-mišićne koordinacije i ravnoteže na nestabilnoj statičkoj i dinamičkoj podlozi. Mjerenja živčano-mišićne koordinacije i ravnoteže vršili smo mjesec dana od ozljede, a potom nakon 1,5 mjesec, 3 mjeseca te 1 godinu od ozljede. Skupinu 2 (PKL-R) čini 19 ispitanika kod kojih je unutar 1 – 3 godine od ozljede učinjena rekonstrukcija PKL-a (autograftom *kost-patelarna tetiva-kost* koji je fiksiran interferentnim vijkom), nakon koje su proveli edukaciju i rehabilitacijski program u koji smo također uključili vježbe živčano-mišićne koordinacije i ravnoteže na nestabilnoj statičkoj i dinamičkoj podlozi, a mjerenja su izvršena nakon 1,5 mjesec, 3 mjeseca, te nakon godine dana od operacije.

Usporedbu rezultata vršili smo prema usporedbenoj skupini zdravih ispitanika ili prema zdravom ekstremitetu istog ispitanika.

Usporedbenu skupinu za obje skupine ispitanika s ozljedom koljena čini 46 zdravih, sportski aktivnih ispitanika bez ozljede koljena.

Svi ispitanici liječili su se u Klinici za ortopediju Lovran, u periodu od tri godine (od siječnja 2006. godine do prosinca 2008. godine), a praćeni su tijekom godine dana prema prije navedenoj shemi. Ispitivanje je provodio multidisciplinarni tim (fiziatar, ortoped, fizioterapeut). Ispitanici su potpisali pristanak o korištenju podataka u istraživačke svrhe. Ispitivanje je provedeno u skladu s etičkim standardima ustanove te ima odgovarajuće dopuštenje.

Ispitivanje živčano-mišićne koordinacije i ravnoteže na nestabilnoj statičkoj i dinamičkoj podlozi mjerili smo pomoću aparata za testiranje živčano-mišićne koordinacije i ravnoteže (Sport KAT 2000, Berg. Inc., San Marcos, CA, USA) koji se sastoji od kružne platforme koja ima različite stupnjeve stabilnosti. Nestabilnost platforme regulira se pomoću razine pritiska zraka u balonu na koji je platforma naslonjena. Sva ispitivanja izvršena su pri vrijednostima indeksa tlaka 6. Platforma također posjeduje elektronički senzor koji bilježi nakošenja platforme u koordinatnom sustavu (Accustar II, Lucas Sensing Systems, Phoenix, AZ,

USA), a koji je fiksiran na njenom prednjem dijelu. Protokol testiranja zahtijeva da ispitanik stoji bos na platformi s koljenima lagano savijenim (cca 20 stupnjeva), bez držanja za rukohvat, ruke prekrížene na prsima. Prvo se izvodi testiranje pri stajanju na obje noge, a potom na jednoj nozi. Svi ispitanici prije testiranja prošli su upoznavanje s aparatom u obliku izvođenja statičke i dinamičke ravnoteže u trajanju od jedne minute.

Nakon toga počelo je testiranje najprije statičke pa dinamičke ravnoteže na obje noge, a potom još i testiranje statičke ravnoteže na svakoj nozi pojedinačno. Svako testiranje trajalo je 30 sekundi. Statički test ravnoteže izvodi se tako da ispitanik neuromišićnom kontrolom kinetičkog lanca donjeg ekstremiteta platformu što manje pokreće u odnosu na x/y os. Pokret se registrira pomicanjem kursora na kompjutorskom ekranu, a cilj je postignut što se kursor više održava u centru navedenog koordinatnog sustava. Položaj tijela odgovara položaju izvođenja vježbe zatvorenog kinetičkog lanca koja stimulira propriocepciju i neuromišićnu kontrolu, u kojoj pacijent održava ravnotežu na nestabilnoj podlozi.

Dinamički test ravnoteže izvodi se tako da se živčano-mišićnom kontrolom donjih ekstremiteta platforma pokreće kružno u smjeru kazaljke na satu i u obrnutom smjeru. Pokret se registrira pomicanjem kursora na kompjutorskom ekranu kružno u navedenim smjerovima. Što kursor pravilnije ocrta krug, to je brojači rezultat bolji. Položaj tijela također odgovara položaju izvođenja vježbe zatvorenog kinetičkog lanca koja stimulira propriocepciju i živčano-mišićnu kontrolu, u kojoj pacijent održava ravnotežu na nestabilnoj podlozi te kruži s platformom u smjeru kazaljke na satu i u obrnutom smjeru.

Nakon testiranja dobijemo brojači rezultat koji se zasniva na odnosu vremena i udaljenosti kursora koji pokreće ispitanik u usporedbi sa zadacima aparata. Na kraju se dobije detaljan ispis svih pokreta učinjenih u određenom vremenskom periodu u koordinatnom sustavu.

Rezultati statičkog i dinamičkog testa ravnoteže izražavaju se kao ravnotežni indeks (BIS, od engl. *Balance index score*). Za aktivne sportaše statički ravnotežni indeks iznad 500 smatra se lošim rezultatom, kao i vrijednost iznad 1500 za dinamički ravnotežni indeks.

Statistika

Statistička obrada prikupljenih podataka obavljena je pomoću osobnog računala. Baza podataka oblikovana je u MS Excel programu, a obrada i analiza izvršena korištenjem statističkog programskog paketa Dell Statistica (*data analysis software system*), ver 13.1. (2016).

Prikupljeni podaci opisani su i analizirani različitim statističkim metodama ovisno o tipu i raspodjeli varijabli prisutnih u analizi. Moguća povezanost nominalnih kategoričkih nezavisnih varijabli određivana je vrijednošću Pearsonova Hi-kvadrat testa. Normalnost raspodjele kontinuiranih numeričkih varijabli testirana je Kolmogorov-Smirnovljevim testom ($p > 0,20$ za prihvaćanje normalnosti raspodjele). Usporedbe vrijednosti kontinuiranih numeričkih varijabli prema skupinama rađene su odgovarajućim parametrijskim testovima (ANOVA) ili neparametrijskim inačicama (Kruskal Wallis ANOVA). Usporedbe zavisnih kontinuiranih numeričkih varijabli rađene su analizom parova vrijednosti (Wilcoxon test parova, Friedman ANOVA). Razlike su smatrane statistički značajnim ako je razina statističke značajnosti određena testom postigla vrijednost $p < 0,05$.

REZULTATI

Demografske karakteristike skupina ispitanika po dobi i spolu ujednačene su. Medijan dobi skupine 1 (PKL-r) je 28 godina (raspon 18 – 41), skupine 2

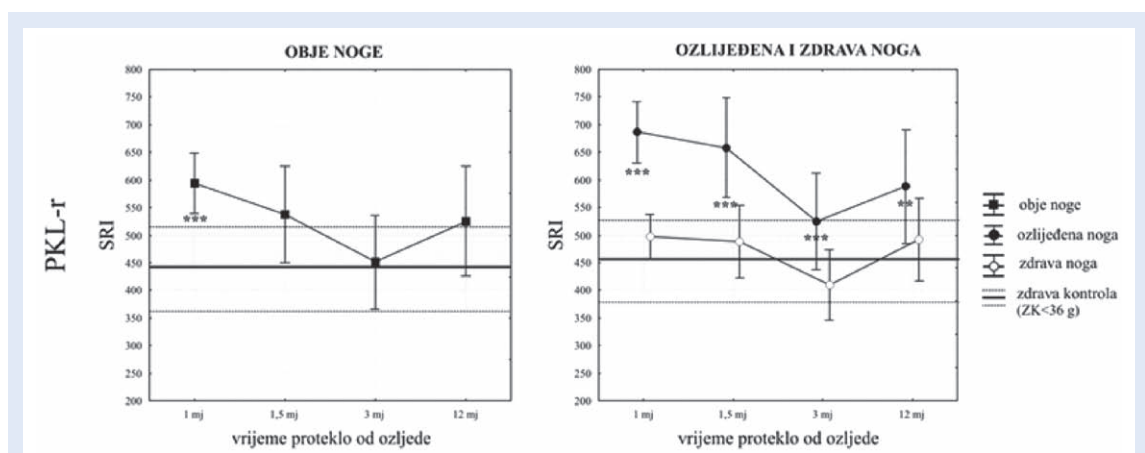
(PKL-R) je 23 godine (raspon 18 – 39), a zdrave usporedbene skupine je 22 godine (raspon 19 – 42), te razlika nije statistički značajna (K-W ANOVA, $p = 0,775$). Također, skupine ispitanika pokazuju dobru uravnoteženost prema spolu (Pearsonov hi² test, $p = 0,750$).

Prije ozljede svi su se ispitanici rekreativno bavili sportom. Najzastupljeniji sport bio je nogomet (skupina 1 – 53 %, skupina 2 – 37 %), uz rukomet i skijanje. Također smo uočili da su u svim skupinama ispitanika podjednako bile zastupljene ozljede lijevog i desnog koljena (Pearsonov χ^2 test, $\chi^2 = 3,44$, $p = 0,328$).

Rezultate živčano-mišićne koordinacije i ravnoteže dobili smo mjerenjima na nestabilnoj podlozi aparata (Sport KAT 2000, Berg. Inc., San Marcos, CA, USA) testiranjima statičkog i dinamičkog testa ravnoteže.

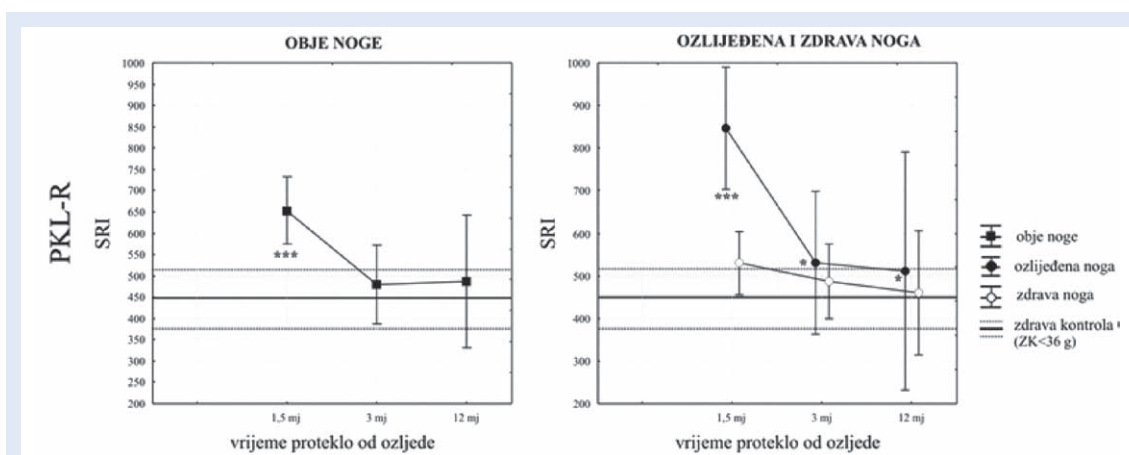
Statički ravnotežni indeks

Kako je opisano u poglavlju Ispitanici i metode, rezultate statičkog testa ravnoteže izvedenog na obje noge zajedno, te posebno na ozlijeđenoj i zdravoj nozi, izražavali smo kao statički ravnotežni indeks (SRI), a lošim rezultatom smatraju se vrijednosti iznad 500. Ravnotežne indekse dobivene u mjerenim vremenskim razdobljima od ozljede u pojedinoj skupini ispitanika uspoređivali smo s ravnotežnim indeksom u odgovarajućoj usporedbenoj skupini.



Slika 1. Statički ravnotežni indeks u Skupini 1 (PKL-r) – svježa ruptura PKL-a bez rekonstrukcije ligamenta (obje noge; ozlijeđena i zdrava noga) u usporedbi sa zdravom usporedbenom skupinom tijekom ispitivanih vremenskih razdoblja (P – snaga testiranja: $P = 0,79$; $P = 0,81$).

Legenda: Skupina 1 – svježa ruptura PKL bez rekonstrukcije ligamenta (PKL-r); Zdrava kontrola – zdrava usporedbena skupina



Slika 2. Statički ravnotežni indeks u Skupini 2 (PKL-R) – svježa ruptura PKL-a s rekonstrukcijom ligamenta (obje noge; ozlijeđena i zdrava noga) u usporedbi sa zdravom usporedbenom skupinom tijekom ispitivanih vremenskih razdoblja (P – snaga testiranja: $P = 0,89$; $P = 0,92$).

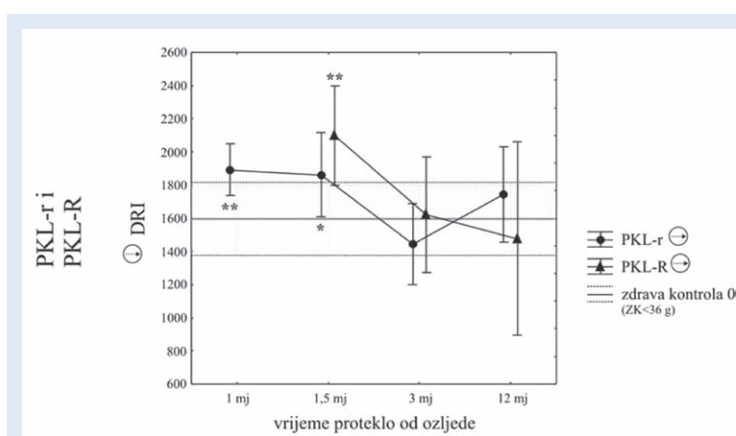
Legenda: Skupina 2 – svježa ruptura PKL s rekonstrukcijom ligamenta (PKL-R); Zdrava kontrola – zdrava usporedbena skupina

Usporedba statičkog ravnotežnog indeksa u skupini 1 (PKL-r) u određenom vremenskom razdoblju nakon ozljede s vrijednostima na zdravoj strani pokazala je statistički značajne razlike u svim ispitivanim razdobljima (1 mj., 1,5 mj., 3 mj., 1 god) nakon ozljede ($p < 0,001$ i $p < 0,001$), (slika 1). To je potvrđeno i usporedbom rezultata ozlijeđene noge sa zdravom usporedbenom skupinom, ali u razdoblju 3 mjeseca od ozljede uočene razlike nisu bile statistički značajne, što ukazuje na prolazno poboljšanje statičke neuromuskularne kontrole nakon provedene rehabilitacije (slika 1), (P – snaga testiranja obje noge zajedno $P = 0,79$; ozlijeđena i zdrava noga $P = 0,81$).

Usporedba vrijednosti statičkog ravnotežnog indeksa u skupini 2 (PKL-R) u različitim vremenskim razdobljima od operacije s vrijednostima mjerenja na zdravoj strani istih ispitanika, kao i s vrijednostima usporedbene zdrave skupine, pokazala je statistički najznačajnije razlike ($p < 0,001$) u razdoblju od 1,5 mjeseci od operacije, dok su se vrijednosti već 3. mjesec od operacije približile vrijednostima zdrave kontrole, što je ostalo vidljivo i nakon godinu dana (slika 2), (P – snaga testiranja obje noge zajedno $P = 0,89$; ozlijeđena i zdrava noga $P = 0,92$).

Dinamički ravnotežni indeks

Dinamički test ravnoteže izvodi se na istom aparatu kao i statički test, ali se pritom testira spo-



Slika 3. Dinamički ravnotežni indeks dobiven izvođenjem testa na obje noge u smjeru kazaljke na satu, u obje skupine ispitanika (skupina 1, PKL-r; skupina 2, PKL-R), u usporedbi sa zdravom usporedbenom skupinom tijekom ispitivanih vremenskih razdoblja (P – snaga testiranja: $P = 0,79$).

Legenda: Skupina 1 – svježa ruptura PKL bez rekonstrukcije ligamenta (PKL-r); Skupina 2 – svježa ruptura PKL s rekonstrukcijom ligamenta (PKL-R); Zdrava kontrola – zdrava usporedbena skupina

sobnost dinamičke kontrole zadanih kružnih mišićnih pokreta na pokretnoj nestabilnoj platformi, kako je opisano u poglavlju Ispitanici i metode. Rezultate dinamičkog testa ravnoteže izražavali smo kao dinamički ravnotežni indeks (DRI), a lošim rezultatom smatraju se vrijednosti iznad 1500, mjereno u aktivnih sportaša. Ravnotežne indekse dobivene u pojedinoj skupini ispitanika uspoređivali smo s ravnotežnim indeksima usporedbene skupine. Vrijednosti dinamičkog ravnotežnog indeksa dobivene izvođenjem testa

u smjeru ili suprotno od smjera kazaljke na satu u svim skupinama ispitanika nisu se pokazale statistički značajne niti u jednoj ispitivanoj skupini.

Usporedba vrijednosti dinamičkog ravnotežnog indeksa unutar skupine 1 (PKL-r), dobivenih u različitim vremenskim razdobljima od nastanka ozljede, pokazuju da postoji statistički značajno smanjenje dinamičkog ravnotežnog indeksa obje noge dobivenog mjerenjem u smjeru kazaljke na satu u razdoblju 3 mjeseca nakon ozljede u odnosu na vrijednosti ovog indeksa izmjenjenog nakon 1 ili 1,5 mjesec od ozljede (slika 3).

U usporedbi sa zdravom kontrolom, značajna razlika DRI-ja postoji u prva dva vremenska razdoblja koja smo pratili, a do „normalizacije“ DRI-ja dolazi nakon 3 mjeseca. Iako se nakon godine dana uočava ponovno povišenje DRI-ja, ono nije bilo statistički značajno različito od zdrave kontrole.

Rezultati su pokazali da se vrijednosti dinamičkog ravnotežnog indeksa u skupini 2 (PKL-R) značajno mijenjaju tijekom svih ispitivanih razdoblja nakon ozljede, a usporedbom s rezultatima u zdravih osoba može se uočiti normalizacija vrijednosti DRI-ja 3 mjeseca nakon operacije, koja se održava i nakon godinu dana (slika 3), ($P - snaga$ testiranja, $P = 0,79$).

RASPRAVA

Kad govorimo o incidenciji ozljeda koljena, zna se da u općoj populaciji ozljeda PKL-a nije jako česta. Godišnja incidencija u SAD-u je jedna ozljeda na 3500 ljudi⁴, ali ta problematika izaziva velik interes jer se najčešće javlja u adolescentnoj dobi ili u mlađih odraslih i vrlo često je vezana uz sportsku aktivnost. U studiji Daniela i sur. navodi se da 70 % ozljeda nastaje tijekom bavljenja sportom, i to u osoba srednje dobi od 26 godina⁵. Majewski i sur. navode da se u skupini od 17 397 pacijenata sa sportskim ozljedama ozljeda koljena javlja u 39,8 % slučajeva, od čega se u 20,3 % slučajeva radi o ozljedi PKL-a⁶. U našem istraživanju srednja dob ispitanika slaže se s navodima iz literature.

Nadalje, dokazano je da se ozljede češće javljaju u osoba muškog (68,1 %), a rjeđe u osoba ženskog spola (31,9 %)⁴. U našem radu ispitivane skupine pacijenata dobro su uravnotežene i pre-

ma spolu. Većina ispitanika je muškog spola, što se slaže s rezultatima Majewskog i sur.⁶, ali ne i s autorima koji opisuju veću incidenciju ozljeda PKL-a u žena⁷⁻⁹. Kako Arendt i Dick i Zillmer i sur. navode da 2/3 ozljeda PKL-a u žena nastaje tijekom igranja nogometa i košarke⁷⁻⁹, naša opažanja o distribuciji ozljeda po spolu mogla bi se objasniti činjenicom da našim istraživanjem nisu obuhvaćene one pacijentice koje se bave tim sportovima. Nadalje, u radu Ferrarrija i sur. navodi se da nisu pronađeni objektivni kriteriji koji bi pokazali razliku u uspješnosti poslijeoperacijske rehabilitacije po spolu¹⁰.

Usporedba učestalosti ozljeđivanja pojedine strane (desna/lijeva) pokazuje da nema statistički značajne razlike među skupinama. Ulogu dominantne noge kao mogućeg čimbenika predispozicije za rupturu PKL-a u našem radu nismo mogli potvrditi, što odgovara i rezultatima objavljenim u studiji Matave i sur.¹¹.

Po 10-godišnjem istraživanju Majewskog i sur. najčešće sportske aktivnosti koje dovode do ozljede koljena su nogomet i skijanje, a ozljeda PKL-a vrlo je česta i u rukometu i odbojci⁶. U skijanju se najčešće ozlijedi koljeno, a pritom je ozljeda PKL-a najčešća¹². U našem istraživanju skupine se razlikuju i po zastupljenosti pojedine vrste sporta kojima se ispitanici bave, pri čemu je nogomet najzastupljeniji u obje skupine. U skupini 1 (PKL-r), na drugom mjestu je skijanje, a potom rukomet, dok je u skupini 2 (PKL-R) ozljeda u rukometu druga po učestalosti.

Čovjek održava uspravan stav i ravnotežu pri hodu preko složenog procesa koji uključuje osjet pokreta tijela, integraciju osjetno-motoričke informacije unutar CNS-a, nakon čega slijedi odgovarajući odgovor mišićno-koštanog sustava^{3,13-15}. Većina pokreta na donjim ekstremitetima odvija se preko zatvorenog kinetičkog lanca. Pritom se razvijaju sile akcije-reakcije stopala i podloge. Lančanom aktivacijom mišića i zglobova započinje pokret koji je kontroliran po ko-kontrakcijskom mehanizmu agonista i antagonista (simultana aktivacija dva ili više mišića različitih mišićnih skupina), uključujući proksimalne i distalne sinergizme uz istodobno stimuliranje položajno-specifičnog proprioceptijskog mehanizma povratne sprege^{1,3,15,16}. Preko navedenog mehanizma očituje se statička i dinamička kontrola

zglobova. Kod osoba kojima je ozlijeđen PKL javljaju se mehanizmi reprogramiranja lokomotornog procesa i adaptacije hoda, koji u različitim osoba pružaju različit stupanj dinamičke stabilnosti zgloba, koji, naravno, ovisi i o dobi, prisutnosti udruženih ozljeda zgloba te nivou tjelesnih aktivnosti kojima se takve osobe bave. Naime, unatoč nedostatku ligamenta, u nekih pacijenata osigurane su pravovremene i snažne kontrakcije mišića kao temelj dinamičke stabilizacije zgloba. Upravo razumijevanje obrazaca regrutiranja motoričkih jedinica u takvih osoba, neophodno je za razumijevanje principa rehabilitacijskog programa koji bi bio potreban svim pacijentima s ozljedom PKL-a. Naime, na simuliranju uvjeta u kojima funkcionira osoba bez PKL-a, ali s jako dobrim stupnjem dinamičke stabilnosti zgloba, zasnivaju se brojne vježbe otvorenog i zatvorenog kinetičkog lanca. Takvim vježbama nastoji se stimulirati proprioceptijski osjet i tako poboljšati neuromišićna kontrola^{3,15,16}.

Rehabilitacijski programi koji se temelje na vježbama zatvorenog kinetičkog lanca svoju primjenu našli su u „ubrzanjoj“ rehabilitaciji koljenog zgloba nakon ozljede PKL-a te nakon njegove rekonstrukcije^{14,15-21}. U našem istraživanju koristili smo vježbe na nestabilnoj podlozi, kada ispitanik pokušava održavati centar ravnoteže, odnosno centar djelovanja sile teže na tijelo unutar baze podloge koja je nestabilna. Što manje je odstupanje od danog zadatka, rezultat je bolji. Njihova prednost je u tome što u ranoj fazi rehabilitacije dozvoljavaju opterećenje ekstremiteta tjelesnom težinom do granice bola, proizvode manje translacijske, rotacijske i distrakcijske sile zbog kompresijske prirode primijenjenog opterećenja, uz veću kontrolu pokreta zbog aktivacije više skupina mišića istovremeno, a opisuje se i njihova zaštitna uloga na procese cijeljenja^{16,21-26}.

Koristeći se Sport KAT dijagnostičkom metodom, opisanom u poglavlju Ispitanici i metode, dijagnosticirali smo kritičnu disfunkciju ravnoteže u promatranim skupinama te pratili poboljšanje rezultata pod utjecajem primijenjene rehabilitacije. Naime, pokret u zglobu i osjet položaja zgloba imaju važnu ulogu u održavanju ravnoteže. Pri smanjenom osjetu položaja zgloba i osjetu pokreta u zglobu dolazi do smanjene sposobnosti održavanja ravnoteže na nestabilnoj podlozi^{1,2,23,27-31},

što smo mi dokazali u svom radu. Živčano-mišićna koordinacija, odnosno sposobnost održavanja ravnoteže, bila je smanjena u skupini 1 (PKL-r) odmah nakon rupture PKL-a i provedene rehabilitacije, odnosno nakon operacijske rekonstrukcije u skupini 2 (PKL-R). U literaturi su također opisana istraživanja koja potvrđuju gubitak proprioceptijskog osjeta tabana na podlogu, u pokušaju registriranja opterećenja tjelesnom težinom, što se događa nakon ozljede PKL-a, pogotovo ako pacijent šteti ozlijeđenu nogu^{27,30-34}.

Vježbe živčano-mišićne koordinacije, kao dio rehabilitacijskog protokola nakon ozljede PKL-a koljena, vrlo brzo dovode do poboljšanja statičkih i dinamičkih ravnotežnih indeksa, mjereno SportKAT metodom i služe u oporavku disfunkcije neuromišićne kontrole u održavanju statičke i dinamičke stabilnosti zgloba i ravnoteže. Za dugoročno održavanje navedenog učinka potrebno je vježbe izvoditi redovito.

Također se opisuje poboljšanje proprioceptije nakon operacijske stabilizacije^{21,23,28,29,32,35-37}, ali u svim navedenim slučajevima koristila se druga metodologija praćenja funkcije zgloba.

U ranim razdobljima ispitivanja ravnoteže/proprioceptije pomoću zatvorenog kinetičkog lanca na nestabilnoj podlozi uočili smo da su statički i dinamički ravnotežni indeksi za ozlijeđenu nogu značajno lošiji u usporedbi sa zdravom kontrolom. Međutim, razlike uočene u tim ranim razdobljima gube se 3. mjesec poslije ozljede/operacije, te se ravnotežni indeksi „normaliziraju“ uslijed provedene rehabilitacije, bez obzira izvrši li se ili ne izvrši rekonstrukcija ligamenta. No, godinu dana od provedene rehabilitacije, vrijednosti ravnotežnih indeksa se u skupini 1 (PKL-r) pogoršavaju, iz čega se može zaključiti da je ravnotežni indeks promjenljiva vrijednost i ako se svakodnevno ne izvode vježbe neuromišićne kontrole, ravnotežni indeks se pogoršava. Nasuprot tome, kod pasivno stabiliziranih koljena u pacijenata s rekonstruiranim ligamentom u skupini 2 (PKL-R), vrijednosti statičkih i dinamičkih ravnotežnih indeksa se kontinuirano poboljšavaju kroz cijelo ispitivano razdoblje do godine dana. Dakle, naši rezultati posredno potvrđuju pozitivno djelo-

vanje vježbi održavanja ravnoteže na nestabilnoj podlozi na neuromišićnu kontrolu. Također, osim „normalizacije“ ravnotežnog indeksa u ozlijeđenoj nozi, opazili smo i „poboljšanje“ ovih indeksa u kontralateralnoj zdravoj nozi ispitanika s ozljedom PKL-a u odnosu na zdravu usporednu skupinu. Takav rezultat mogli bismo objasniti tako da u slučaju gubitka proprioceptijskih informacija s ozlijeđene strane dolazi do reprogramiranja senzomotoričkih putova te slična informacija kompenzacijskim putovima ipak stiže u CNS^{3,15,27,30,38,39}. Upravo ovakva mogućnost reprogramiranja senzomotoričke informacije dobiva na važnosti u kontekstu rezultata koje su opisali Pope i sur.⁴⁰ Oni su dokazali da ozljeda ligamenta i nastaje jer postoji latencija u odgovoru mišićnih stabilizatora koljena. Tako se opisuje nastanak oštećenja ligamenta otprilike 79 ms nakon opterećenja, dok mišićna kontrakcija nastupa 213 ms nakon opterećenja, što rezultira ozljedom ligamenta prije nego tijelo uspije reagirati aktivnom stabilizacijom zgloba. Ova mogućnost reprogramiranja neuromišićnog puta^{3,15,27,29,30,31,41} imala bi za cilj ubrzanje mišićne reakcije, naravno, unutar fizioloških granica.

Ispitivanjem neuromišićne kontrole na nestabilnoj podlozi nismo mogli identificirati pacijente koji unatoč zadobivenoj rupturi PKL-a imaju rezultate kao zdrava kontrola, te bi ih tada mogli svrstati u skupinu osoba čija funkcija koljena nije ovisna o PKL-u. Kako je poznato da takvih osoba ima, možemo zaključiti da Sport Kat dijagnostička metoda nije dovoljno senzibilna u mjerenju funkcijskog statusa osobe s rupturom ligamenta, odnosno ne može se kao jedina izolirana metoda koristiti u svrhu prognoze funkcionalnosti koljena. Testiranje i stimuliranje neuromišićne kontrole zgloba samo je jedan čimbenik u cjelokupnom sagledavanju i rehabilitaciji ispitanika.

Svi naši rezultati, kao i oni objavljeni u znanstvenoj literaturi, pokazuju da je dinamička stabilizacija jedan od važnijih načina stabilizacije zgloba, a koja uključuje mehanizme poticanja senzoričkih signala iz ozlijeđenog zgloba putem vježbi živčano-mišićne kontrole kojima se kompenzira gubitak proprioceptijskog osjeta iz kapsuloligamentarnih struktura uzrokovan ozljedom. Vjeruje se da se takvim vježbama može potaknuti voljni osjet položaja i

pokreta zgloba, sposobnost održavanja ravnoteže od svjesne do podsvjesne razine, senzitivnost preostalih zglobnih mehanoreceptora, a sve to dovodi do reprogramiranja lokomotornog procesa i utječe na bolju neuromišićnu kontrolu preko jačanja mišićne snage i izdržljivosti, kao i načina regrutiranja motoričkih jedinica. Sve to zajedno sigurno pridonosi pravovremenoj, snažnoj i koordiniranoj kontrakciji mišića agonističko-antagonističkog para koja osigurava pravilan pokret i dinamičku stabilizaciju zgloba.

Također je bitno naglasiti važnost postepene dinamike uvođenja pojedinih vježbi koje potiču proprioceptiju i time iniciraju proprioceptijom uvjetovane reflekse. Tako se vježbe zasnivaju na vremenskoj sumaciji motoričkih jedinica (poticanje snage mišića na osnovi sve veće frekvencije stimulusa) i prostornoj sumaciji motoričkih jedinica (povećanje snage mišića na osnovi regrutiranja sve više motoričkih jedinica). Prvo se vježbe izvode unutar sigurnog raspona pokreta u zglobu u kojem nema epizoda nestabilnosti, a kako osoba dobiva sve veću kontrolu pokreta, aktivnosti se postepeno pomiču prema „vulnerabilnim“ pokretima. Pritom je važno naglasiti da se postepenim vježbama nastoji voljnu kontrolu motorike dovesti na onu razinu koja ne zahtijeva voljni napor. Nužnost postepenog uvođenja pojedinih vježbi ima razloge u adaptaciji organizma na stres koji takve vježbe nose, a pravilan izbor vježbi zasniva se na simuliranju onih funkcionalnih aktivnosti u kojima takva osoba participira, odnosno, o očekivanoj tjelesnoj aktivnosti nakon rehabilitacije. S obzirom na to da je aktivacija mišićne kontrakcije prespora kao odgovor na brzi stimulus, s vremenom se u takvih osoba događaju i takve adaptacijske promjene koje anticipiraju nestabilnost zgloba i tako izbjegavaju luksaciju i time štite druge pasivne stabilizatore koljena. Upravo se ponavljanjem vježbi tijekom rehabilitacijskog programa pokušava ojačati i „feed forward“ kontrola kontrakcije mišićnih skupina koje stabiliziraju zglob. Također, svako provođenje vježbi koje stimuliraju neuromišićnu kontrolu mora biti pažljivo monitorirano, kako na prisutnost neželjenih simptoma (bol, otekline ili nestabilnost), tako i na prisutnost poremećenog obrasca pokreta koji mogu još više destabilizirati zglob.

ZAKLJUČAK

Znanstveni doprinos našeg istraživanja je dokazivanje važnosti živčano-mišićne koordinacije i održavanja ravnoteže u dinamičkoj stabilizaciji koljena nakon ozljede prednjeg križnog ligamenta, a putem mehanizma aktivacije mišića donjeg ekstremiteta preko zatvorenog kinetičkog lanca. Na taj se način potvrđuje učinkovitost i nužnost navedenog načina vježbanja u rehabilitacijskim algoritmima ozljede donjeg ekstremiteta.

Izjava o sukobu interesa: Autorice izjavljuju da ne postoji sukob interesa.

LITERATURA

- Swanik CB, Lephart SM, Giannantonio FP, Fu FH. Reestablishing proprioception and neuromuscular control in the ACL-injured athlete. *Journal of Sport Rehabilitation* 1997;6:182-206.
- Schnurrer-Luke Vrbanić T, Ravlić-Gulan J, Gulan G, Matovinović D. Balance index score as a predictive factor for lower sports results or anterior cruciate ligament knee injuries in Croatian female athletes- preliminary study. *Coll Antropol* 2007;31:253-8.
- Kakavas G, Malliaropoulos N, Pruna R, Traster D, Bikos G, Maffulli N. Neuroplasticity and Anterior Cruciate Ligament Injury. *Indian J Orthop* 2020;54:275-280.
- Garrick JG, Requa RK. Anterior cruciate injuries in men and women: how common are they? U: Griffin LY,ur. Prevention of noncontact ACL injuries. Hunt valley: American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2001;1-9.
- Daniel DM, Stone ML, Sachs R, Malcom L. Instrumented measurement of anterior knee laxity in patients with acute anterior cruciate ligament disruption. *Am J Sports Med* 1985;13:401-7.
- Majewski M, Susanne H, Klaus S. Epidemiology of athletic knee injuries: A 10-year study. *Knee* 2006;13:184-8.
- Arendt E, Dick R. Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer. NCAA data and review of literature. *Am J Sports Med* 1995;23:694-701.
- Zillmer DA, PowellJW, Albright JP. Gender-specificinjury patterns in high school varsity basketball. *J Women's Health* 1992;1:69-76.
- Agel J, Rockwood T, Klossner D. Collegiate ACL Injury Rates Across 15 Sports: National Collegiate Athletic Association Injury Surveillance System Data Update (2004-2005 Through 2012-2013). *Clin J Sport Med* 2016;26:518-523.
- Ferrari JD, Bach BR, Bush-Joseph CA, Wang T, Bojchuk J. Anterior cruciate ligament reconstruction in men and women: An outcome analysis comparing gender. *Arthroscopy* 2001;17:588-96.
- Matava MJ, Freehill AK, Grutzner S, Shannon W. Limb dominance as a potential etiologic factor in noncontact anterior cruciate ligament tears. *J Knee Surg* 2002;15:11-6.
- Pressman A, Johnson DH. A review of ski injuries resulting in combined injury to the anterior cruciate ligament and medial collateral ligaments. *Arthroscopy* 2003;19:194-202.
- Nashner L. Sensory, neuromuscular and biomechanical contributions to human balance. U: Duncan P,ur. Balance: Proceedings of the APTA Forum 1989;5-12.
- Kwon OY, Choi HS, Yi CH, Kwon HC. The effect of knee and ankle muscles surrounding the knee and ankle joints on one leg static standing balance. *J Phys Ther Sci* 1998;10:7-12.
- Diekfuss JA, Grooms DR, Bonnette S, DiCesare CA, Thomas S, MacPherson RP et al. Real-time biofeedback integrated into neuromuscular training reduces high-risk knee biomechanics and increases functional brain connectivity: A preliminary longitudinal investigation. *Psychophysiology* 2020;57:135-45.
- Kibler WB, Levingston B. Closed-chain rehabilitation for upper and lower extremities. *J Am Acad Ortho Surg* 2001;6:412-20.
- Putnam CA. Sequential motions of body segments in striking and throwing skills: Description and explanations. *J Biomech* 1993;26:125-35.
- Steindler A. Kinesiology of the human body under normal and pathological conditions. Springfield Ill 1995;63-7.
- Nichols TR. A biomechanical perspective on spinal mechanisms of coordinated muscular action: An architecture principle. *Acta Anat (Basel)* 1994;151:1-13.
- Brotzman SB, Head P. The knee. U: Brotzman SB (ed.) *Handbook of orthopaedic rehabilitation*. St. Louis: Mosby, 1996;193-226.
- Yosmaoglu HB, Baltaci G, Kaya D, Ozer HJ Tracking ability, motor coordination, and functional determinants after anterior cruciate ligament reconstruction. *Sport Rehabil* 2011;20:207-18.
- Campbell CJ, Carson JD, Diaconescu ED, Celebrini R, Rizzardo MR, Godbout V et al. Canadian Academy of Sport and Exercise Medicine position statement: Neuromuscular training programs can decrease anterior cruciate ligament injuries in youth soccer players, Canadian Academy of Sport and Exercise Medicine. *Clin J Sport Med* 2014;24:263-7.
- Cordeiro N, Cortes N, Fernandes O, Diniz A, Pezarat-Correira P. Dynamic knee stability and ballistic knee movement after ACL reconstruction: an application on instep soccer kick. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2015;23:1100-6.
- Beard DJ, Dodd CA, Simpson HA. Sensorimotor changes after anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin Orthop* 2000;372:205-16.
- Iwasa J, Ochi M, Adachi N, Tobita M, Katsube K, Uchio Y. Proprioceptive improvement in knees with anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin Orthop* 2000;381:168-76.
- Keays SL, Bullock-Saxton J, Keays AC. Strength and function before and after anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin Orthop* 2000;373:174-83.
- Hartigan E, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Perturbation training prior to ACL reconstruction improves gait asymmetries in non-copers. *J Orthop Res* 2009;27:724-9.
- Cochrane Central Register of Controlled Trials [Internet]. Is targeted physiotherapy effective in improving outcomes, quality of life and return to activity in patients that are at risk of deteriorating symptoms and early os-

- teoarthritis following anterior cruciate ligament reconstruction, 2016; available from: <http://www.who.int/trialsearch/Trial2.aspx?TrialID=ACTRN12616000564459>.
29. Cochrane Central Register of Controlled Trials [Internet]. Exercise-therapy following anterior cruciate ligament reconstruction: a pilot randomised clinical trial, 2018; available from: <http://www.who.int/trialsearch/Trial2.aspx?TrialID=ACTRN12618000493246>.
 30. Cochrane Central Register of Controlled Trials [Internet]. Effects of Hamstring Training in Different Modes on Stabilizing Knee Joints With Anterior Drawer Laxity, 2010; available from: <https://clinicaltrials.gov/show/NCT011705446>.
 31. Filbay SR, Roos EM, Froebel RB, Ranstam J, Lohmander LS. Delaying ACL reconstruction and treating with exercise therapy alone may alter prognostic factors for 5-year outcome: an exploratory analysis of the KANON trial. *Br J Sports Med* 2017;51:1622-1629.
 32. Paulos LE, Walther CE, Walker JA. Rehabilitation of the surgically reconstructed and nonsurgical anterior cruciate ligament. U: Insall JN, Scott WN (eds) *Surgery of the knee* (Vol. 1). New York Edinburgh London Philadelphia San Francisco:Churchill Livingstone, 2001;789-99.
 33. Ageberg E, Zatterstrom R, Moritz U, Friden T. Influence of supervised and unsupervised training on postural control after an acute anterior cruciate ligament rupture: a three-year longitudinal prospective study. *J Orthop Sports Phys Ther* 2001;31:632-44.
 34. Heroux ME, Tremblay F. Weight discrimination after ACL injury: a pilot study. *Arch Phys Med Rehabil* 2005;86:1362-8.
 35. Oeffinger DJ, Shapiro R, Nyland J, Pienkowski D, Caorn DN. Delayed gastrocnemius muscle response to sudden perturbation i rehabilitated patients with anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2001;9:19-27.
 36. Podesta L, Magnusson J, Gillette T. Anterior cruciate ligament reconstruction. U:Maxley L, Magnusson J, ur. *Rehabilitation for the postsurgical orthopaedic patient*. St Louis London Philadelphia Sydney Toronto: Mosby, 2001;206-26.
 37. Risberg MA, Mork M, Krogstad M, Jenssen H, Holm I. Design and implementation of a neuromuscular training program following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 2001;31:620-31.
 38. Lephart SM, Riemann BL, Fu FH. Introduction to the sensorimotor system. U: Lephart SM, Fu FH, ur. *Proprioception and neuromuscular control in joint stability*. Human Kinetics, 2000; 17-23.
 39. Johansson H, Pedersen J, Bergenheim M, Djupsjobacka M. Peripheral afferents of the knee: Their effects on central mechanisms regulating muscle stiffness, joint stability, proprioception and coordination. U: Lephart SM, Fu FH, ur. *Proprioception and neuromuscular control in joint stability*. Human Kinetics, 2000;5-16.40. Pope MH, Jonhson RJ, Brown DW, Tighe C. The role of the musculature in injuries to the medial collateral ligament. *J Bone Joint Surg* 1979;61:398-402.
 41. Garrett WE, Kirkendall DT. Motor learning, motor control and knee injuries. U: Lephart SM, Fu FH, ur. *Proprioception and neuromuscular control in joint stability*. Human Kinetics, 2000; 53-7.