

KONTROLA POKRETA U KOLJENOM ZGLOBU KOD OSOBA SA I BEZ OZLJEDE PREDNJE UKRIŽENE SVEZE. PREGLED DOSADAŠNJIH SPOZNAJA

Catinelli, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Kinesiology / Sveučilište u Zagrebu, Kineziološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:117:416309>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#) / [Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Kinesiology, University of Zagreb - KIFoREP](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

KINEZIOLOŠKI FAKULTET

(studij za stjecanje visoke stručne spreme
i stručnog naziva: magistar kineziologije)

Antonio Catinelli

**KONTROLA POKRETA U KOLJENOM
ZGLOBU KOD OSOBA SA I BEZ
OZLJEDE PREDNJE UKRIŽENE SVEZE –
PREGLED DOSADAŠNJIH SPOZNAJA**

(diplomski rad)

Mentor:

doc.dr.sc. Tatjana Trošt Bobić

Zagreb, siječanj 2020.

Ovim potpisima se potvrđuje da je ovo završna verzija diplomskog rada koja je obranjena pred Povjerenstvom, s unesenim korekcijama koje je Povjerenstvo zahtijevalo na obrani te da je ova tiskana verzija istovjetna elektroničkoj verziji predanoj u Knjižnici.

Mentor:

doc.dr.sc. Tatjana Trošt Bobić

Student:

Antonio Catinelli

KONTROLA POKRETA U KOLJENOM ZGLOBU KOD OSOBA SA I BEZ OZLJEDE PREDNJE UKRIŽENE SVEZE – PREGLED DOSADAŠNJIH SPOZNAJA

Sažetak

Temeljni cilj ovog diplomskog rada bio je sažeto prikazati pregled najvažnijih spoznaja sistematskim pregledom literature i objavljenih znanstvenih radova na temu kontrole pokreta u koljenom zglobu kod osoba s ozljedom prednje ukrižene sveze, ali i kod zdrave populacije. Analizirana istraživanja uključivala su tjelesno aktivnu i neaktivnu populaciju, a u pregled su uključena ukupno 24 rada. Sva istraživanja obuhvatila su ukupno 1002 ispitanika, od čega je 279 žena i 723 muškaraca. Glavne spoznaje ovog rada ukazuju na postojanje specifične promjene u kontroli pokreta koljenog zgloba kod osoba s oštećenjem prednje ukrižene sveze u odnosu na osobe bez navedene ozljede. Pregled literature je utvrdio da nedostatak ACL-a negativno utječe na proprioceptijski signal što dovodi do dinamičke nestabilnosti zgloba, narušene biomehanike pokreta, te u konačnici pogoršane motoričke kontrole u koljenom zglobu. Također, na temelju glavnih nalaza rada ponuđene su trenažne smjernice za ublažavanje najčešćih deficita u kontroli pokreta kod osoba s deficitom ACL-a. Nadalje, predložene su smjernice koje bi trebale biti osnovna hipoteza za daljnja istraživanja kako bi se još bolje utvrdio utjecaj raznih specifičnosti na kontrolu pokreta prilikom ozljede prednje ukrižene sveze.

Ključne riječi: prednja ukrižena sveza, motorička kontrola, ozljeda koljena, mišićna koaktivacija, kinestezija, propriocepcija, neuro-mišićna funkcija

MOVEMENT CONTROL IN PERSONS WITH AND WITHOUT ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT INJURY - OVERVIEW OF CURRENT KNOWLEDGE

Abstract:

The main goal of this graduate thesis was to summarize the most important findings by systematically reviewing the literature and published scientific papers on the topic of control of the knee joint movement in persons with ACL injury, as well as in a healthy population. Analyzed research included physically active and inactive population with a total of 24 papers examined throughout the review. All studies included a total of 1002 subjects, out of whom 279 were women and 723 men. The main findings of this paper indicate a specific change in the control of knee joint movement in persons with ACL impairments in relation to persons without the same injury. A literature review found out that ACL deficiency adversely affected the proprioception signal, leading to dynamic joint instability, disrupted biomechanics of movement and, ultimately, impaired motor control of the knee joint. Also, based on the main findings of the paper, training guidelines were offered to mitigate the most common movement control deficits in individuals with ACL deficiency. Furthermore, guidelines have been proposed that should be the basic hypothesis for further research in order to determine even better the impact of various specificities on movement control upon ACL injury.

Keywords: anterior cruciate ligament, motor control, knee injury, muscle coactivation, kinaesthesia, proprioception, neuromuscular function

Sadržaj

1. UVOD	5
2. METODE RADA.....	7
3. KOLJENI ZGLOB	8
3.1. Anatomija koljenog zgloba.....	8
3.2. Prednja ukrižena sveza (lat. <i>anterior cruciate ligament</i> , ACL)	11
3.3. Ozljeda ACL-a.....	12
3.3.1. Čimbenici rizika od ozljede	13
3.3.2. Mehanizmi nastanka ozljede.....	14
4. MOTORIČKA KONTROLA U KOLJENOM ZGLOBU.....	16
4.1. Uloga perifernih receptora.....	18
5. METODE ISPITIVANJA MOTORIČKE KONTROLE.....	20
5.1. Mehaničke analize	21
5.2. Elektromiografija.....	21
5.3. Elektroencefalografija	22
5.4. Magnetska encefalografija.....	23
5.5. Transkranijska magnetska stimulacija	23
5.6. Kompjuterizirana tomografija	23
5.7. Pozitronska emisijska tomografija.....	23
5.8. Magnetska rezonanca	24
5.9. Funkcijska magnetska rezonanca	24
6. REZULTATI.....	25
7. RASPRAVA	38
8. PRAKTIČNA PRIMJENA DOSADAŠNJIH SPOZNAJA.....	43
9. ZAKLJUČAK	48
10. LITERATURA.....	49

1. UVOD

Ozljeda prednje ukrižene sveze (lat. *anterior cruciate ligament*, ACL) jedna je od najtežih povreda kada je riječ o potrebnom vremenskom periodu za potpuni oporavak. Riječ je o ozljedi koja može direktno negativno utjecati na motoričku kontrolu pokreta u koljenom zglobu, uključujući aspekte funkcionalnosti pokreta, prepoznavanja položaja zgloba i koaktivaciju mišića stabilizatora koljenog zgloba.

Svaka funkcijska nestabilnost u koljenom zglobu uvjetuje kompenzaciju kojom dolazi do reprogramiranja lokomotornog procesa i promjena u motoričkoj kontroli. Kod osoba s nedostatkom ACL-a ti mehanizmi ostvaruju se neadekvatnom aktivacijom mišića prednje strane natkoljenice, te uranjenom i produljenom aktivacijom mišića stražnje strane natkoljenice. Navedeni mehanizmi osiguravaju različit stupanj dinamičke stabilnosti zgloba kod pojedinaca različitih razina tjelesne pripremljenosti i dobi (Schnurrer-Luke Vrbanić i Ravlić-Gulan, 2008). Optimalnom rehabilitacijom, unatoč nedostatku ACL-a, potrebno je ostvariti pravovremene i snažne kontrakcije mišića koljena koje postavljaju temelj dinamičke stabilizacije zgloba.

Motorička kontrola obuhvaća svjesne i nesvjesne osjete položaja i pokreta u zglobu. Ona u svojoj strukturi sadrži složene aferentne fiziološke mehanizme važne za stabilizaciju zglobova u uvjetima održavanja ravnoteže i suprotstavljanja djelovanju sile teže. Ozljedom ACL-a dolazi do narušavanja funkcije zgloba, odnosno do mehaničke nestabilnosti zbog oštećivanja mehanoreceptora koji čine oko 2% volumena ACL-a (Schnurrer-Luke Vrbanić i Ravlić-Gulan, 2008). Nedostatak ACL-a utječe na djelomični ili potpuni gubitak proprioceptijskog signala što dovodi do narušavanja dinamičke stabilnosti zgloba, a naposljetku i narušene motoričke kontrole u koljenom zglobu.

Poremećaji u kontroli pokreta mogu biti vidljivi i 20 godina nakon ozljede, a loša biomehanika u koljenom zglobu uslijed oštećenja ACL-a često dovodi do rane pojave degenerativnih promjena u zglobu ili osteoartritisa.

Opetovane subluksacije i nestabilnosti koljenog zgloba uzrokuju oštećenja drugih zglobnih struktura poput zglobnih hrskavica i meniska koja povećavaju mogućnost nastajanja preuranjenog posttraumatskog osteoartritisa (Suarez i sur. 2015). Problem se očituje u nedovoljno istraženom području poremećaja motoričke kontrole u koljenom zglobu. Jasno definiranje nedostataka u kontroli pokreta kod osoba s ozljedom ACL-a moglo bi doprinijeti konkretnijem i

preciznijem planiranju programa vježbanja s ciljem smanjenja mogućnosti pojave degenerativnih promjena unutar zgloba. U skladu s time, glavni cilj ovoga rada bio je opisati i ukazati na specifične promjene u kontroli pokreta koljenog zgloba kod osoba s deficitom/ozljedom ACL-a u odnosu na osobe bez navedene ozljede, te pregledom literature dati trenažne smjernice u procesu oporavka za ublažavanje najčešćih deficita motoričke kontrole.

2. METODE RADA

U ovom preglednom radu koristile su se primarne i sekundarne publikacije te znanstveni i stručni radovi iz područja medicine, rehabilitacije i kineziterapije publicirani na engleskom i hrvatskom jeziku, a povezani s temom ozljede ACL-a i motoričke kontrole. U ovome radu su uključene 24 studije koje su povezane s muškom i ženskom zdravom i ACL deficijentnom populacijom. Pretražena je znanstvena baza PubMed, a ključne riječi koje su bile upisane u tražilicu su: anterior cruciate ligament injury, knee/ACL injury, motor control and anterior cruciate ligament/knee injury, kinesthesia and knee/ACL injury, muscle activation and knee/ACL injury. Ukupno je pronađeno 38 radova, koji nisu bili stariji više od 10 godina, a od kojih je 24 zadovoljilo postavljene kriterije. Kriteriji isključivanja radova bili su: a) znanstveni i stručni radovi napisani na jeziku koji nije engleski; b) nedostupnost cjelovitog prikaza studije; c) istraživanja provedena na životinjama; d) istraživanja provedena bez kontrolnih skupina; e) studije starije od 5 godina. U skladu s navedenim kriterijima, iz rada su izbačene 2 studije koje su provedene na životinjama, 6 studija bez kontrolnih grupa, 4 rada starija od pet godina, te 2 meta analize. Ukupno je analizirano 1002 ispitanika, od čega 723 muškaraca i 279 žena. Svi analizirani radovi prikazani su u tablici, a temelj sistematizacije bili su ciljevi rada, korišteni testovi za utvrđivanje motoričke kontrole, vremenski period od nastanka ozljede i/ili od rekonstrukcije ACL-a te dobiveni rezultati.

Na temelju pregleda, dana je analiza i osvrt najvažnijih i najčešćih deficita kod ozljede ACL-a u odnosu na zdrave pojedince, te su ponuđene trenažne smjernice za njihovo ublažavanje. Za prikupljanje, obradu, usporedbu i prikaz podataka vezanih uz cilj rada korištene su metode klasifikacije, kompilacije te deskriptivne i komparativne metode.

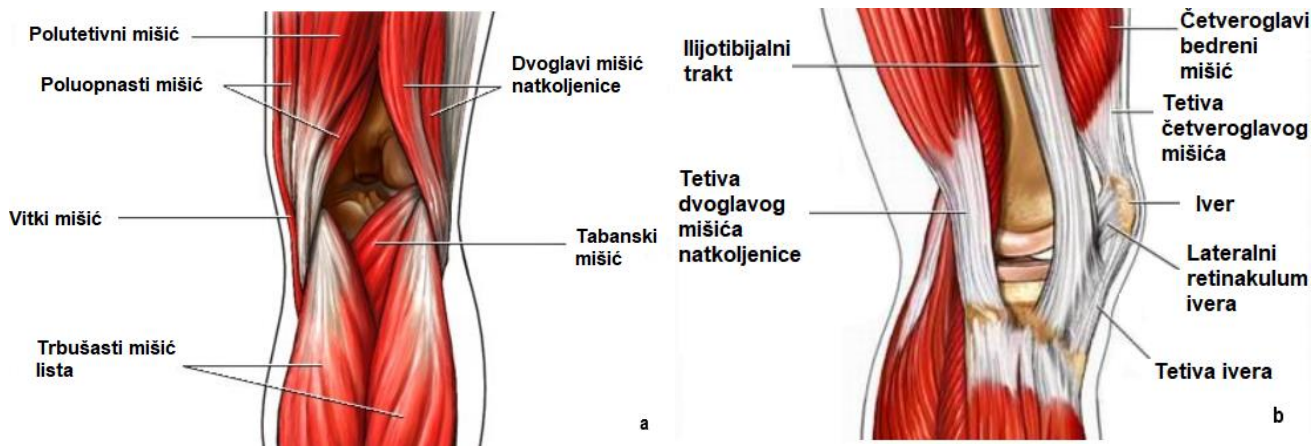
3. KOLJENI ZGLOB

3.1. Anatomija koljenog zgloba

Za koljeni zglob *art.genus* karakteristična je specifična građa zglobnih tijela, kao i posebna građa i raspodjela sveza što ga čini zglobom najsloženije građe u ljudskom tijelu. Zbog svoje anatomske građe, položaja i intenzivnog korištenja u svakodnevnim aktivnostima prilično je osjetljiv, a upravo ga općenita osjetljivost u vezi s određenim predispozicijama čini podložnim na brojne ozljede (Pećina, M. i sur., 2000). Zasiurno je jedan od najvećih, najsloženijih i najčešće korištenih zglobova u tijelu čovjeka.

U koljenu se uzglobljuje bedrena kost s goljениčnom kosti, te iver (patelarna kost) kao koštana struktura koja se nalazi s prednje strane i oslonjena je na prednju stranu kondila bedrene kosti. Koljeni zglob osigurava stabilnost svojom građom i funkcijom, a dodatno je potpomažu stabilizatori. Koljene stabilizatore možemo podijeliti na statičke i dinamičke, odnosno na pasivne i aktivne. Pasivne stabilizatore čine sveze, meniskusi, kosti i zglobna čahura, dok su dinamički stabilizatori mišići i tetive (Platzer, 2011).

Dinamički stabilizatori koljenog zgloba usko su povezani s motoričkom kontrolom pokreta i imaju neizostavnu funkciju u koordinaciji rada koljenog zgloba. Grupu mišića koji uvjetuju funkcionalnost koljena čine četveroglavi mišić natkoljenice (*m. quadriceps femoris*), polutetivni mišić (*m. semitendinosus*), poluopnasti mišić (*m. semimembranosus*), troglavi goljениčni mišić (*m. triceps surae*), zakoljeni mišić (*m. popliteus*) i krojački mišić (*m. sartorius*) (Slika 1a). Navedeni mišići izuzetno su bitni za koordinaciju rada i kontrolu pokreta u koljenom zglobu. Iz tog razloga važno je održavati ili postići adekvatnu jakost, fleksibilnost i živčano-mišićnu funkcionalnost kako bi se smanjila mogućnost od ozljede zglobnih struktura, ali i samih mišića. U dinamičke stabilizatore koljena ubrajamo i tetive (Slika 1b). One povezuju kosti i mišiće, a sačinjene su od kolagenskih vlakana koja su postavljena paralelno što omogućuje bolju elastičnost potrebnu za kretanje mišića, odnosno za istežanje i skraćivanje.



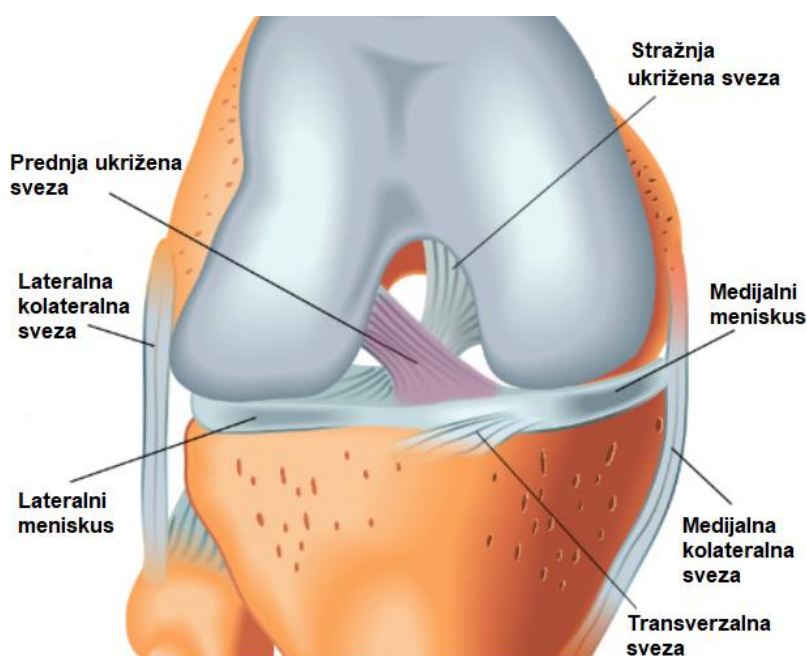
*Slika 1. Anatomski prikaz mišića i tetiva koljena – posteriorni (a) i lateralni prikaz (b)
(Preuzeto i prilagođeno prema Anon., 2019a)*

S druge strane, stabilnost koljenom zglobu daju i statički stabilizatori, odnosno ligamenti, kosti, meniskusi i zglobna čahura.

Zglobna čahura je široka i mlohava s prednje strane, dok je postranično tanka, a pojačavaju je sveze. Meniskusi (medijalni i lateralni) su vezivnohrskavična tkiva s kolagenim vlaknima koja se nalaze u koljenu, a možemo ih opisati kao polumjesečaste pločice. U svojem poprečnom presjeku spljošteni su prema unutra, a vanjska opna im je srasla sa sinovijalnom opnom zglobne čahure. Menisci su pomični prema podlozi koju čini goljenična kost, te su opskrbljeni krvlju. Primarna zadaća im je osiguranje skladnosti zglobnih tijela i povećanje dodirne površine čime se ravnomjerno raspoređuje pritisak koji se prenosi na goljeničnu kost preko bedrene kosti. Također, sudjeluju u zaštiti zglobne hrskavice amortizirajući udarce prilikom skokova ili tračanja, potpomažu u dodatnoj stabilizaciji koljena i omogućavaju ravnomjernu raspodjelu sinovijalne tekućine (Platzer, 2011).

Kosti koje su uzglobljene u koljenu su bedrena kost (femur), goljenična kost (tibia), lisna kost (fibula) i najveća sezamska kost, iver (patela). Bedrena kost najduža je i najveća kost u ljudskom tijelu, povezuje kuk i koljeni zglob u kojem je uzglobljena s gornjim dijelom goljenične kosti. Goljenična kost je potkoljena kost kojom se prenosi sila s bedrene kosti na stopalo. Uz goljeničnu kost stoji tanka lisna kost koja se uzglobljuje s goljeničnom kosti ispod lateralnog zaglavka (Platzer, 2011).

Nadalje, u koljenom zglobu ugrađene su četiri sveze, a to su dvije kolateralne sveze (medijalna i lateralna), te dvije ukrižene sveze (prednja i stražnja) (Slika 2). Njihova primarna zadaća je stabilizacija kostiju u zglobu što im omogućuje čvrstoća kolagenih vlakana od kojih su građene. Kolateralni ligamenti sudjeluju u stabilizaciji zgloba prilikom ekstenzije, a u tom položaju sprječavaju unutarnju i vanjsku rotaciju, hiperekstenziju, te odmicanje i primicanje koljenog zgloba, dok prednja i stražnja ukrižena sveza osiguravaju neprekidnu povezanost površina zgloba (Platzer, 2011).

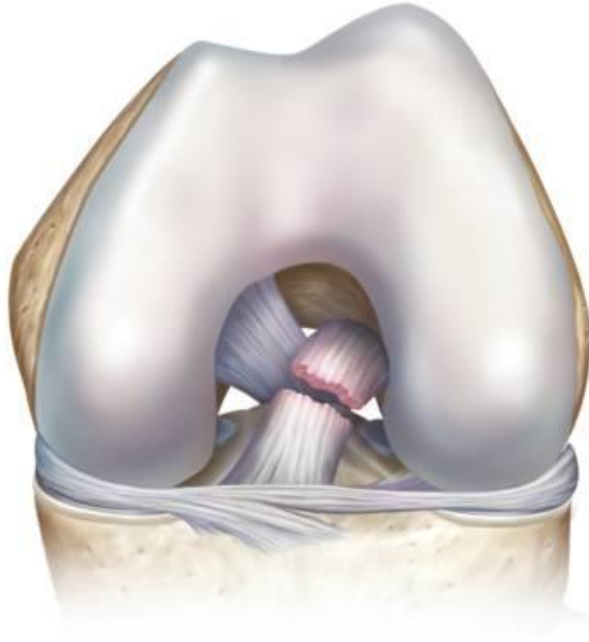


Slika 2. Anatomski prikaz sveza i meniskusa koljena – anteriorno (Preuzeto i prilagođeno prema Anon., 2019b)

3.2. Prednja ukrižena sveza (lat. *anterior cruciate ligament*, ACL)

ACL polazi iz stražnjeg medijalnog dijela međuzglavične jame bedrene kosti, a hvata se na prednjem lateralnom dijelu gornje plohe goljenične kosti. Dugačka je u prosjeku oko 38 milimetara, a debela oko 10 milimetara, te je spiralno zavijena oko svoje osi. ACL je jeda od važnijih stabilizatora u koljenom zglobu, a zadaća joj je sprječavanje prednje translacije goljenične kosti. Uz navedenu funkciju koja se smanjuje povećavanjem stupnja pregiba u koljenom zglobu, ACL ograničava unutarnju rotaciju potkoljenice, sprječava valgus i varus koljena, onemogućuje vanjsku rotaciju potkoljenice te kontrolira rotaciju goljenične kosti u odnosu na bedrenu kost (engl. "*screw-home*" mehanizam). Sastavljena je od anteromedijalnog i posterolateralnog vlakna koja su iznimno izdržljiva i mogu podnijeti velika opterećenja (Jozanović, 2007).

Unatoč velikoj izdržljivosti rupture ACL-a postale su jedan od najozbiljnijih i najučestalijih ozljeda, posebice u sportu (Slika 3). Rupture ACL-a uglavnom se liječe operativno, a cilj je njihova rekonstrukcija koja će omogućiti ponovnu uspostavu prijašnje stabilnosti koljena uz optimalnu pokretljivost i mišićnu funkciju. Potencijalne poteškoće motoričke kontrole javljaju se kod bolesnika, bez ACL-a ili nakon rekonstrukcije ACL-a, ukoliko se rehabilitacija ne provede na adekvatan način. Kao uzroci deficita motoričke kontrole nameću se gubitak određenih mehanoreceptora, smanjenje funkcije mehanoreceptora, smanjeni opseg pokreta u zglobu i pogrešno usvojen obrazac kretanja tijekom procesa oporavka.



Slika 3. Anatomski prikaz potpune rupture prednje ukrížene sveze (Anon., 2019c)

3.3. Ozljeda ACL-a

Najučestalije ozljede koljenog zgloba su one nastale u sportskim aktivnostima poput sindroma prenaprezanja ili kroničnih oštećenja tetiva (kumulirane mikrotraume), sluznih vrećica i hrskavica. S druge strane nalaze se akutne ozljede koje bez obzira na uzrok nastanka dijelimo na nagnječenja, puknuća ligamenata, meniska, artikularne promjene bedrene kosti, goljenične kosti ili patele, te traumatsko iščašenje koljena (Myer, Brent, Ford, Hewett, 2011). Zsigurno jedna od najučestalijih ozljeda koljena je upravo ozljeda ACL-a koja čini čak 40% svih ozljeda koljenog zgloba (Filipi, Gregov, Šalaj, 2013).

Ozljeda ACL-a može ozbiljno pogoršati zglobnu funkciju, a samim time ugroziti i razinu tjelesne aktivnosti kojom se ozlijeđeni pojedinac bavi. Negativni učinci ozljede poput mehaničke nestabilnosti zgloba, posebice u dinamičkom režimu rada, te potpuna ili djelomična promjena proprioceptijskog signala iz ligamenta i okolnih struktura koljena dovode do funkcijske nestabilnosti koljenog zgloba i mnogih negativnih kompenzacijskih obrazaca koji narušavaju funkcionalnost koljenog zgloba (Schnurrer-Luke Vrbanić, Ravlić-Gulan, 2008).

3.3.1. Čimbenici rizika od ozljede

Na ozljedu ACL-a utječe više čimbenika međusobnom interakcijom, stoga prirodu ozljede možemo karakterizirati kao multifaktorsku (Shultz, 2008). Čimbenike koji u međusobnoj interakciji ili zasebno utječu na pojavu ozljede ACL-a možemo podijeliti na intrinzične (neuromuskularne, anatomske, hormonalne, genetske, kognitivne) i ekstrinzične (Smith i sur., 2012).

Prema Myeru i sur. (2011) neuromuskularne čimbenike rizika od ozljede od ACL-a čine veliki abdukcijski moment sile, omjer jakosti između mišića prednje strane natkoljenice i stražnje strane natkoljenice, smanjeni moment sile i aktivacija mišića stražnje strane natkoljenice, veliki valgus kut u koljenu, kontralateralne razlike valgus kuta među koljenima, povećani kut adukcije u kuku, te varus kuka. Nadalje, anatomske čimbenike rizika od ozljede ACL-a povezuje sa geometrijom kostiju u koljenom zglobovima, a čine ih visina i duljina natkoljenice, smanjena veličina interkondilarnog čvora bedrene kosti, smanjena dubina konkaviteti medijalnog tibijalnog platoa, povećan nagib tibijalnih platoa i veličina ACL-a.

Heitz, Eisenman, Beck i Walker (1999) hormonalne čimbenike od ozljede ACL-a opisuju kao interakciju ženskih spolnih hormona (estrogena i progesterona) i labavosti ligamenata. Pojedina istraživanja ukazuju na povećanu labavost ACL-a u fazama visokih vrijednosti estrogena tijekom menstrualnog ciklusa (folikularna faza, 10 – 13. dan ciklusa) i u fazama visokih vrijednosti progesterona tijekom menstrualnog ciklusa (lutealna faza, 19. – 24. dan ciklusa).

Ne samo iz hormonalnih, već i iz anatomske razloga jedan od najutjecajnijih i najčešćih faktora ozljeđivanja je spol. Žene su čak šest do osam puta podložnije ozljeđivanju ACL-a od muškaraca.

Smith i sur. (2012) ukazuju na utjecaj genetskih predispozicija koje su povezane s ozljedama ACL-a u obitelji, te na kognitivno funkcioniranje pojedinca u situacijama prethodne ozljede ACL-a (operativne rekonstrukcije) jednog ili drugog ekstremiteta kao vrlo značajne čimbenike rizika od ozljede. Također, navode i važnost utjecaja ekstrinzičnih faktora kao što su podloga na kojoj se odvija aktivnost, vrsta i kvaliteta obuće i sportske opreme, te vremenskih uvjeta.

3.3.2. Mehanizmi nastanka ozljede

Pregledom literature izdvajaju se četiri najčešća mehanizma ozljeđivanja ACL-a, odnosno položaji trupa i ekstremiteta prilikom izvedbe kretnje kod kojih dolazi do mehaničke ozljede ACL-a. Položaje neuromuskularne neravnoteže karakteriziraju valgus pozicija koljenog zgloba prilikom doskoka, relativna opruženost koljenog zgloba (hiperekstenzija), lateralni otklon trupa, te prebacivanje cijele težine na jednu nogu u dinamičkim uvjetima (preopterećenost) (Hewett, Ford, Hoogenboom i Myer, 2010).

Hewett i suradnici (2010) navedene faktore neuromuskularne neravnoteže prisutne pri nastanku ozljede ACL-a opisuju kao:

a) Dominantnost ligamenata je faktor neuromuskularne neravnoteže kojeg karakterizira valgus položaj koljenog zgloba, odnosno “propadanje“ koljena prema unutra. Dominantnost ACL-a nastaje u situacijama kada mišići nemaju sposobnost apsorbiranja adekvatne sile reakcije podloge koja nastaje prilikom doskoka. U takvim trenutcima pasivni, anatomski stabilizatori (ACL) preuzimaju ulogu aktivnih stabilizatora (mišića) kod apsorpcije velikih sila u kratkom vremenu što potencijalno dovodi do ozljeđivanja ACL-a. Kako bi se izbjegla navedena neuromuskularna neravnoteža vrlo je bitno uspostaviti optimalnu motoričku kontrolu donjih ekstremiteta. Da bi se izbjegla dominacija ligamenata, potrebno je uspostaviti mišićnu kontrolu donjih ekstremiteta.

b) Dominantnost *m. quadriceps femoris* karakterizira primarna aktivacija mišića prednje strane natkoljenice prilikom stabilizacije koljenog zgloba što ukazuje na narušenu motoričku kontrolu. U tim situacijama, zbog relativno male fleksije u koljenu dolazi do pruženog prizemljenja, odnosno hiperekstenzije koljena. Prekomjernom aktivacijom mišića stražnje strane natkoljenice dolazi do povlačenja goljenične kosti prema naprijed u odnosu na bedrenu kost što uzrokuje velike poprečne sile koje utječu na ACL. Dominantnost mišića prednje strane natkoljenice usko je povezana s neuromuskularnim deficitom.

c) Dominacija noge je neuromuskularni deficit koji se očituje u međusobnoj asimetriji donjih ekstremiteta. Ukoliko postoje kvantitativne razlike u jakosti i aktivacijskim obrascima mišića kontralateralnih ekstremiteta, veća je mogućnost ozljede ACL-a.

d) Dominantnost trupa se definira kao nemogućnost precizne kontrole trupa u trodimenzionalnom prostoru. Narušena motorička kontrola trupa dovodi do većih pomaka i neekonomičnih kretnji koje u konačnici predstavljaju rizični faktor za ozljedu ACL-a (Gregov, Jukić, Milanović, 2014).

4. MOTORIČKA KONTROLA U KOLJENOM ZGLOBU

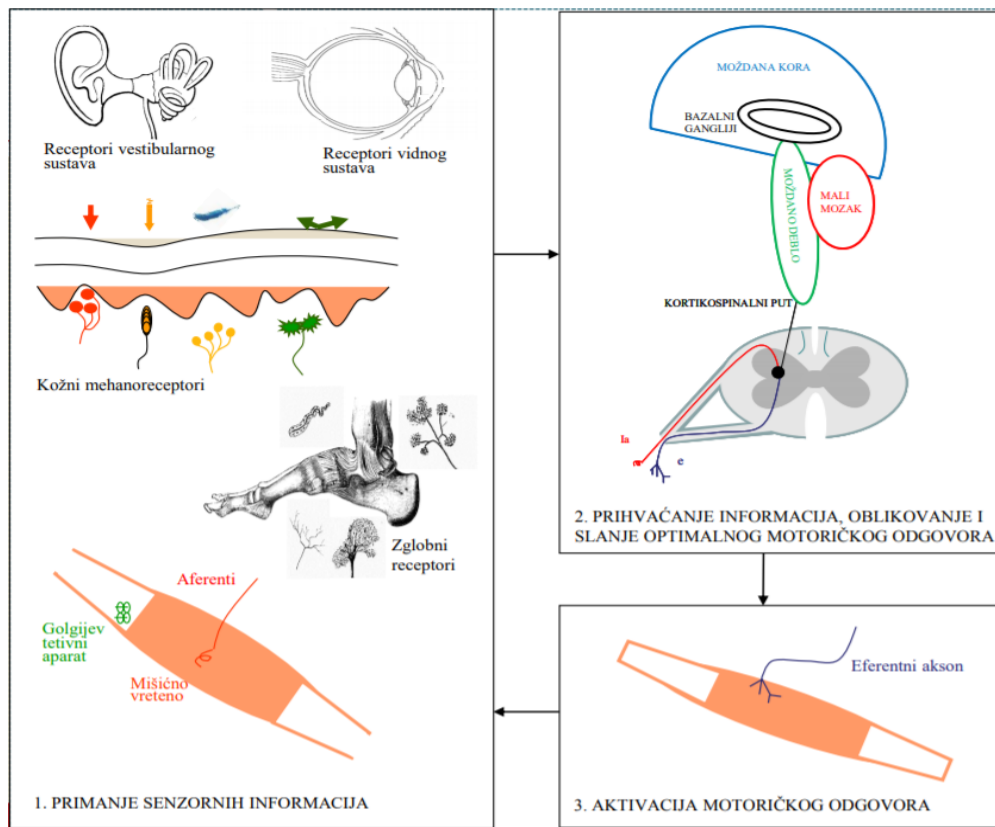
Čovjekov živčani sustav sastoji se od središnjeg živčanog sustava (SŽS) i perifernog živčanog sustava. Za nadzor i kontrolu cijelog tijela, a samim time i mišićnog sustava, zadužen je SŽS kojeg čine mozak i kralježnička moždina. Periferni živčani sustav odgovoran je za prenošenje osjetnih informacija od receptora do SŽS-a, te za prenošenje motoričkih odgovora od SŽS do mišića na periferiji. Periferni živčani sustav sastavljen je od aferentnih (osjetnih) puteva kojima živčani impulsi putuju do SŽS, te od eferentnih (motoričkih) puteva kojima SŽS šalje motoričke naredbe ekscitacijskog ili inhibicijskog djelovanja prema mišićima (Slika 4) (Mikulić, Marković, 2016).

Motorička kontrola čovjeka odvija se na razinama kralježničke moždine (spinalna razina), na razinama nižih dijelova mozga (subkortikalna razina) i na razini viših dijelova mozga (razina moždane kore, kortikalna razina). Razina kralježničke moždine primarno je odgovorna za nadzor refleksnih puteva (pokreti na nesvjesnoj razini), te za odrađivanje voljnih pokreta koji su nastali u višim centrima mozga. Subkortikalna razina mozga kontrolira većinu podsvjesnih aktivnosti, dok je kortikalna razina ključna u realizaciji voljnih pokreta. Razina viših dijelova mozga (kortikalna razina) nikada ne djeluje samostalno, već u interakciji s nižim razinama živčanog sustava (Mikulić, Marković, 2016).

Uz mehaničku ulogu, ACL se također prepoznaje kao glavna senzorska struktura koja bilježi relevantne aferentne informacije putem mehaničkih receptora i posreduje u sposobnosti prepoznavanja položaja koljena u prostoru (Mikulić, Marković, 2016). Zbog toga su tijekom proteklih 15 godina programi rehabilitacije nakon ozljeda ligamenata koljena usmjereni ne samo na oporavak mehaničke stabilnosti, već i na poboljšanje senzorne funkcije ligamenta i kapsula kako bi se održala zajednička funkcionalna stabilnost. Poznato je da mehanički receptori u ACL-u doprinose koordinaciji mišića i funkcionalnoj stabilnosti zglobova pomoću mehanizama povratne sprege (engl. *feedback control*), to jest pokretanja refleksnog luka koji dovodi do stabilizacije kontrakcija mišića. Također, receptori doprinose i mehanizmu naprežanja unaprijed (engl. *feedforward control*), to jest predprogramiranju napetosti mišića kontinuiranom refleksnom modulacijom gama motoričkih neurona. Značajne promjene u neuronskoj aktivaciji mišića koje djeluju na koljeno nakon rupture ACL-a mogu uključivati smanjeni poticaj na ekstenzore koljena, koji se naziva artrogena inhibicija mišića (AMI) i povećani poticaj na

fleksore koljena, kao antagonističku koaktivaciju. Takve promjene u koaktivaciji mišića koji okružuju koljeno mogu djelovati kao kompenzacijski mehanizam za zaštitu od prednjeg pomicanja tibije i osiguravanje stabilnosti tijekom funkcionalnih aktivnosti kod pacijenata s ozlijeđenim ACL-om (Suarez i sur., 2015).

Prilikom izvođenja određenog obrasca pokreta, određena područja u mozgu u interakciji sa sposobnošću motoričke kontrole, neprestano primaju nove informacije o pokretu iz proprioceptora na periferiji. Time se osigurava potrebna svrsishodnost i povezanost u radu mišića, kostiju i živaca koja omogućava izvođenje složenog procesa kao što je izvođenje pokreta. Ukoliko je potrebno u trenutku izvođenja pokreta, rade se nužne korekcije motoričkog programa (engrama). Motorički programi (engrami) definiraju se kao skupovi naredbi postavljeni prije početka izvedbe pokreta. Preinake u motoričkim programima temelje se na povratnim informacijama s periferije prema SŽS-u (Barać, 2015).



Slika 4. Prikaz aferentno-eferentnog puta
(Preuzeto s: Repozitorij: Repozitorij Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu)

4.1. Uloga perifernih receptora

Mehanoreceptori su osjetni receptori koji su uključeni u motoričku kontrolu aferentnim djelovanjem, a nalaze se u mišićima i tetivama (mišićno vreteno, Golgijev tetivni organ). Njihova glavna uloga je pretvaranje mehaničkih podražaja u živčane signale koji zatim aferentnim putevima odlaze do SŽS-a gdje se obrađuju i integriraju na različitim razinama poput kralježničke moždine (spinalni refleksi), moždanog debla, malog mozga i bazalnih ganglija (kontrola kontrakcije), te velikog mozga (kontrola i nadzor naredbenim signalima). Obradom signala u SŽŠ nastaje eferentni motorički odgovor u sklopu motoričke kontrole, te se ostvaruje voljna i nevoljna razina kontrole mišićne kontrakcije. U skladu s time, možemo reći kako su propiocepcija i neuromišićna kontrola dva osnovna dijela složenog senzoričko-motoričkog sustava (Schnurrer-Luke Vrbanić, Ravlić-Gulan, 2008).

Mišićno vreteno je mehanoreceptor koji je smješten u truhu skeletnog mišića. Ono može biti dugačko od 2 do 20 milimetara, te je obloženo vezivnim tkivom. Mišićno vreteno u svojoj strukturi sadrži manja intrafuzalna i veća ektrafuzalna mišićna vlakna zadužena za reprodukciju sile (Frost, 2002).

Vreteno predstavlja osnovni izvor osjetnih informacija koje dolaze iz skeletnih mišića, te daje informacije o veličini istezanja mišića i brzini promjene istegnutog mišića koje se zatim prenose sve do SŽS-a. U velikom broju nalazi se u skeletnim mišićima zaduženima za kontrolu pokreta, stoga ima bitnu ulogu u kontroliranju i nadziranju voljnih pokreta, ali i prilikom refleksne kontrole kontrakcije mišića (Mikulić i Marković, 2016).

Pri normalnoj funkciji mišićno vreteno kod zdravih pojedinaca kontinuirano šalje signale o dužini mišića i brzini promjene napetosti do SŽS. Dužina mišića je promjenjiva; s jedne strane uvjetuje smanjenje razine slanja signala α -eferentnog živca koji u konačnici rezultira smanjenom napetošću u ektrafuzalnim vlaknima odgovornim za jakost mišića ili s druge strane istezanje intrafuzalnih vlakana koja povećavaju napetost i omogućavaju postizanje jače aktivacije kontrakcije mišića (Mikulić i Marković, 2016). Pretpostavlja se da prilikom većih trauma poput ozljede ACL-a dolazi do poremećaja prijenosa signala uzrokovano istezanjem određenih mišićnih vretena (npr. obrambeni položaj fleksije koljena, od 10° do 15°) čime se stvara stalna napetost (hipertoničnost) mišića koja može utjecati na posturu pojedinca (Frost, 2002).

Golgijevi tetivni organ je mehanoreceptor smješten u tetivama (u distalnim dijelovima). Smješten je na površini mišićno-tetivnog tkiva, a zadužen za nadzor napetosti u tetivama na čiju promjenu reagiraju povećanjem ili smanjenjem napetosti tijekom mišićne kontrakcije ili relaksacije. Golgijevi tetivni organi šalju svoje signale prema kralježničkoj moždini putem aferentnih vlakana tipa Ib (Mikulić i Marković, 2016).

Funkcija Golgijevog tetivnog organa je dvojaka. Prva se odnosi na zaštitu, odnosno registraciju promjene napetosti u skeletnom mišiću. Prilikom povećane napetosti tetive, Golgijev tetivni organ reagira inhibicijom kontrahiranog mišića (Frost, 2002). Druga funkcija odnosi se na informacijsku komponentu kojom Golgijev tetivni organ osigurava informacije osjeta koje zatim šalje prema kralježničkoj moždini. Informacijska funkcija osigurava eferentni odgovor, to jest povratne informacije koje pomažu u motoričkoj kontroli pokreta i njegovom izvođenju (Mikulić i Marković, 2016).

Trauma na Golgijev tetivni organ djeluje tako da isti prilagođava razinu napetosti mišića. Prilikom snažnih kontrakcija mišića, dužina mišićnog vretena neprekidno se prilagođava, a sukladno tome ona uvijek ostaje „osjetljiva“ i time pripomaže u motoričkoj kontroli pokreta. Zbog povećane napetosti u skeletnom mišiću, posljedično se povećava i osjetljivost Golgijevog tetivnog organa.

Nadalje, receptori koji se nalaze u zglobovima imaju mnoge sličnosti s receptorima u drugim dijelovima tijela. Prema Mikuliću i Markoviću (2016) modificirana Ruffinijeva tjelešca i modificirana Pacinijeva tjelešca slična su receptorima koji se nalaze u zglobnim čahurama, dok se Golgijevi organi nalaze u ligamentima i vrlo su slični onima u tetivama.

Proprioceptori imaju veliko značenje na nastajanje i izvođenje pokreta. Induciraju promjene u aktivnostima mišića koji su van okvira svijesti (refleksni i automatski odgovori), daju do znanja gdje se nalaze naši ekstremiteti i koliko su teški ili lagani objekti kojima rukujemo, te pomažu stvoriti unutrašnji referentni sustav koji SŽS koristi za planiranje i izvedbu pokreta (Mikulić i Marković, 2016).

5. METODE ISPITIVANJA MOTORIČKE KONTROLE

Metode ispitivanja motoričke kontrole čine tri velike skupine metoda koje se usredotočuju na mehaničke, električne i metaboličke varijable. Obrasci mehaničkih varijabli očito su usko povezani s uspjehom pokreta i interakcijama između tijela i okoline. S druge strane, električne varijable odražavaju procese u tijelu, u mišićima - elektromiografija (EMG) i u mozgu - elektroencefalografija (EEG). Mnogi pokazatelji koji se koriste za snimanje mozga kao što su magnetska rezonanca (MRI) i pozitronska emisijska tomografija (PET) odraz su metaboličkih procesa za koje se očekuje da koreliraju sa sinaptičkom aktivnošću u odgovarajućim područjima (Latash, 2012).

Vrlo često se koriste metode iz dvije ili tri skupine istovremeno. U takvim slučajevima, treba imati na umu da se električni signali šire i bilježe instrumentima gotovo trenutačno, dok mehanički signali obično moraju doseći određeni prag da bi ih se moglo prepoznati.

Na primjer, ako se mjeri razina mišićne aktivacije i mehanička varijabla koju proizvodi mišić, očekuje se kašnjenje između uočenih promjena. Elektromehaničko kašnjenje nastaje upravo zato jer je potrebno vrijeme nastanka vidljivog signala koji registrira uređaj nakon stvarne aktivacije mišića što se u konačnici odražava na samu metodu mjerenja kao i preciznost. Različite metode mjerenja rezultiraju vrijednostima elektromehaničkog kašnjenja koje variraju od ispod 10 ms do preko 100 ms. Metabolički signali pokazuju promjene s još većim vremenskim kašnjenjem slijedeći neuronske procese koje odražavaju. Kao rezultat toga, vremenska razlučivost takvih metoda je prilično loša.

Istraživanja bioloških kretnji tipično uključuju promatranje kretnji sa ili bez poremećaja. Promatranje nesmetanog motoričkog ponašanja u različitim zadacima i pod raznim uputama omogućuju manje ili više prirodne obrasce varijabli koje promatramo i koje se mjere te kasnije interpretiraju (Latash, 2012).

5.1. Mehaničke analize

Studije o mehaničkim varijablama tijekom biološkog kretanja datiraju unazad nekoliko stotina godina, a u devetnaestom stoljeću razvijene su fotografske metode za analizu prirodnih pokreta. Te metode očito su mogle pružiti samo informacije o kinematici pokreta, dok su se kinetičke varijable (poput sile i momenta sile) morale izračunati na temelju kinematičkih varijabli i procijenjenih mehaničkih svojstava tjelesnih segmenata. Problem u povezivanju kinematike tijela s mišićnim silama i dalje je jedna od glavnih problematika. Uobičajeno, tijekom prirodnih pokreta samo se snaga interakcije s okolinom može manje ili više pouzdano zabilježiti, dok se sila i moment sile unutar tijela (posebice mišićna snaga) mora izračunati na temelju određenih pretpostavki i često nepreciznih procjena o bitnim mehaničkim parametrima tijela (Latash, 2012). Najčešće korištena kinematička metoda uključuje električni goniometar (uređaj koj proizvodi električne signale povezane s kutom zgloba), te platforme za mjerenje sile.

5.2. Elektromiografija

Elektromiografijom (EMG) se bilježe funkcije mišićne aktivnosti, a obično se provodi korištenjem dviju glavnih metoda. Jedna od metoda koristi iglu koja se stavlja u mišić kojeg ispituje (ili točnije u područje interesa tog mišića), te se električni potencijali zabilježeni vrškom igle prenose na udaljene elektrode i mjere. Druga metoda odvija se pomoću dviju elektroda koje se stavljaju na površinu mišića kojeg ispituje, te se bilježe razlike u potencijalima u samim elektrodama. Ove metode najčešće se nazivaju intramuskularna elektromiografija i površinska elektromiografija. U oba slučaja, mjerenja pokazuju električne potencijale unutar mišića bez elektromehaničkog kašnjenja (Latash, 2012).

5.3. Elektroencefalografija

Elektroencefalografija (EEG) je neinvazivna metoda snimanja aktivnosti velike skupine neurona. Ima određene sličnosti s površinskom elektromiografijom. Obje metode koriste elektrode postavljene na površinu tijela, odnosno anatomske regije tijela koja se ispituje. Površinska elektromiografija bilježi razliku u potencijalima između parova elektroda smještenih jednih blizu drugih preko trbuha mišića. Površinski EMG signali su obično od nekoliko stotina mikrovolta. Tipični EEG signali su manji, oko 1mV. EEG snimanja se obično provode u specijaliziranim prostorijama izoliranim od vanjskih elektromagnetskih polja. Moderna pojačala i signalni uređaji mogu identificirati i automatski odbaciti vanjsku buku, što omogućava snimanje EEG u različitoj okolini (Latash, 2012).

5.4. Magnetska encefalografija

Relativno je nova metoda koja kombinira visoku vremensku rezoluciju EEG-a s mnogo većom prostornom rezolucijom. Magnetska encefalografija (MEG) se temelji na činjenici da električnu struju prati magnetsko polje. Dakle, električne struje u kortikalnim neuronima stvaraju magnetska polja koja se mogu snimiti neinvazivno. Veliki problem je taj što su ta magnetska polja izrazito slaba (0.01-1pT, pikotesla), 8-10 reda veličine manja od Zemljinog magnetskog polja i nekoliko reda veličina manja od magnetskog polja proizvedenog opremom u tipičnom laboratoriju. MEG se snima u posebnim komorama pomoću visoko osjetljivih senzora zvanih SQUID (superprovodljivi magnetometar) koji pretvaraju magnetsko polje u napon. Šum okoline mjeri se posebno namjenskim sensorima i pored toga se oduzimaju signali kako bi se producirali signali povezani s moždanom aktivnošću (Latash, 2012).

5.5. Transkranijalna magnetska stimulacija

Ideja transkranijalne magnetske stimulacije (TMS) zasniva se na fenomenu elektromagnetske indukcije. Električna struja proizvodi magnetsko polje koje može prodrijeti u ljudska tkiva pritom ne oštećujući organizam čovjeka. Promjenama magnetskih polja proizvode se tzv. vrtložne struje (engl. *eddy currents*) u strukturama vodiča. S obzirom da su biološka tkiva dobri vodiči električne struje, u njima se stvaraju značajno jake vrtložne struje koje značajno brzo mijenjaju magnetska polja (Latash, 2012).

5.6. Kompjuterizirana tomografija

Kompjuterizirana tomografija (CT) je metoda koja kombinira radiografiju s računalnom obradom i koja omogućava stvaranje trodimenzionalnih slika na temelju niza dvodimenzionalnih rendgenskih slika. Riječ je o metodi koja pretpostavlja veliku količinu zračenja.

5.7. Pozitronska emisijska tomografija

Pozitronska emisijska tomografija (PET) je tehnika snimanja koja stvara trodimenzionalnu sliku dijela tijela odražavajući funkcijske procese područja koje nas zanima.

5.8. Magnetska rezonanca

Magnetska rezonanca (MR) je slikovna tehnika koja je posebno učinkovita u pružanju razlike između mekih tkiva. Zbog toga se često koristi u prikazu moždanog tkiva i mišića (uključujući i srce). MR uređaji koriste snažno magnetsko polje za poravnavanje jezgara određenih elemenata, posebno protona vodikovih atoma koji se rotiraju oko osi (Latash, 2012).

5.9. Funkcijska magnetska rezonanca

Funkcijska MR (fMR) široko se koristi u istraživanjima moždanih procesa povezanih s različitim motornim i kognitivnim radnjama kako kod zdravih osoba tako i u bolesnika s različitim poremećajima.

6. REZULTATI

Temeljem pregleda literature, pronađena su ukupno 24 rada koja su u barem jednoj ili više varijabli ispitala motoričku kontrolu u koljenom zglobovima kod ACL deficijernih i/ili zdravih pojedinaca te su prikazani u Tablici 1.

Tablica 1. Analiza preglednih radova

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRIJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
Suarez i suradnici (2016)	Usporedba u osjetu položaja zgloba i koaktivacija mišića između ACL ¹ deficijernih i zdravih pojedinaca	Presječno istraživanje	Istražiti obrasce koaktivacije mišića tijekom zadataka repozicioniranja osjeta položaja zgloba kod ACL deficijernih i zdravih pojedinaca	N ² =18 8 muškaraca u ACL grupi (25+/- 8 godina) i 10 muškaraca u K ³ grupi (30+/-4 godine)	30 – 60 dana od ozljede ACL-a	- Osjet položaja zgloba pomoću elektrogoniometra pod kutem od 40° - Mjerenje <i>m.vastus lateralis</i> i <i>m.biceps femoris</i> pomoću elektromiograma	- Značajno smanjenje srednje kvadratne vrijednosti kod <i>m.vastus lateralis</i> i značajno povećanje kod <i>m.biceps femoris</i> tijekom repozicioniranja kod ACL grupe u odnosu na K ³ grupu
Zarzycki, R., Morton, S. M., Charalambous, C., Marmon, A., & Snyder-Mackler, L. (2018)	Razlike kortikalne i intrakortikalne podražljivosti između sportaša ubrzo nakon rekonstrukcije ACL-a i usklađene K grupe	Presječno istraživanje	Istražiti integritet neuromotorne funkcije <i>m.vastus medialis</i> kod ispitanika nakon 2 tjedna od rekonstrukcije ACL-a i K grupe	N= 36 18 ispitanika u ACL grupi (10 žena i 8 muškaraca) i 18 ispitanika u K grupi (10 žena i 8 muškaraca). Starost: 18-30 godina	14+/-3 dana od rekonstrukcije ACL-a	- Ispitivanje kortikalne i intrakortikalne podražljivosti pomoću TMS ⁴ , te podražljivost spinalnog refleksa koristeći perifernu stimulaciju <i>m.vastus medialis</i>	- ACL grupa pokazala je značajno veći RMT (engl. <i>resting motor threshold</i>) i značajno veću amplitudu MEP ₁₂₀ , te veću asimetričnu fascilitaciju u odnosu na K grupu

¹ ACL grupa – ispitanici s povijesti ozljede/rekonstrukcije prednje ukrížene sveze

² N – ukupan broj ispitanika

³ K grupa – kontrolna grupa, ispitanici bez povijesti ozljede prednje ukrížene sveze

⁴ TMS – transkranijalna magnetska stimulacija

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRIJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
Ward, S. H., Pearce, A., Bennell, K. L., Peitrosimone, B., & Bryant, A. L. (2016)	Kortikalne adaptacije <i>m. quadriceps femoris</i> kod pojedinaca s ozljedom ACL-a	Presječno istraživanje	Istražiti podražljivost <i>m.rectus femoris</i> , intrakortikalnu inhibiciju i motornu reprezentaciju kod pojedinaca sa i bez ozljede ACL-a	N=36 18 ispitanika od 29+/-8 godina u ACL grupi (12 muškaraca i 6 žena) i 18 ispitanika od 29+/-6 godina u K grupi (12 muškaraca i 6 žena)	8+ mjeseci od ozljede ACL-a	- TMS za utvrđivanje kortikomotorne podražljivosti, motorne reprezentacije i intrakortikalne inhibicije <i>m.rectus femoris</i>	- Značajno duži CSp (engl. <i>cortical silent period</i>) kod ozljeđene noge u odnosu na neozljeđenu nogu - Bez značajnih razlika između ACL i K grupe
Maeda i suradnici (2017)	Simetrični tenziomiografski neuromišićni odgovor nakon rekonstrukcije ACL-a	Kliničko ispitivanje	Procjena aktivacije motoričkih jedinica i istraživanje utjecaja na mehaničke i kontraktilne karakteristike <i>m. quadriceps femoris</i> i stražnje lože nakon rekonstrukcije ACL-a	N=20 10 ispitanika od 23+/-4 godina u ACL grupi (7 žena i 3 muškarca) i 10 ispitanika od 21+/-3 godina u K grupi (7 žena i 3 muškarca)	24 mjeseca od rekonstrukcije ACL-a	- Bilateralna tenziometrijska procjena natkoljeničnih mišića; maksimalni pomak, vrijeme odgode, brza kontrakcije, vrijeme zadržavanja i polurelaksacije (<i>m. vastus medialis</i> , <i>m. vastus lateralis</i> , <i>m. rectus femoris</i> , <i>m. semitendinosus</i> , <i>m. biceps femoris</i>)	- Značajno veći maksimalni radijalni pomak <i>m. vastus medialis</i> ozljeđene noge u ACL grupi u odnosu na zdravu nogu ACL grupe i K grupu - Značajno dulje vrijeme polurelaksacije <i>m. vastus medialis</i> i <i>m. biceps femoris</i> u ACL grupi (obje noge) u usporedbi s K grupom

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRIJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
San Martín-Mohr i suradnici (2018)	Senzomotna kontrola koljena nakon rekonstrukcije ACL-a: usporedba rekonstrukcijskih tehnika	Presječno istraživanje	Komparativna procjena utjecaja različitih rekonstrukcijskih tehnika pomoću transplantanta iz tetive stražnje lože i iz patelarne tetive na senzomotornu kontrolu koljena poslije 6-12 mjeseci nakon operacije	N=83 27 muških ispitanika u K grupi (14+/-3 godine), 30 ispitanika u ACL1 (patelarna tetiva) grupi (25+/-4 godina) te 26 ispitanika u ACL2 (tetiva stražnje lože) grupi (26+/-5 godina)	6 – 12 mjeseci nakon rekonstrukcije ACL-a	- Osjet položaja zgloba pomoću elektrogoniometra pri 90-60°, 60-30° i 30-0° fleksije, te aktivacija mišića, izmetrična izdržljivost (<i>m. vastus medialis</i> , <i>m. vastus lateralis</i> , <i>m. semitendinosus</i> , <i>m. biceps femoris</i>)	- Značajna pogreška u pozicioniranju pri 30-0° kod ACL grupe u odnosu na K grupu - Nema značajne razlike u aktivaciji i izometričnoj izdržljivosti mišića između ACL1 i ACL2 grupe
Ward, S. H., Perraton, L., Bennell, K., Pietrosimone, B., Bryant, A. L. (2019)	Nedostaci u kontroli sile kvadriicepsa nakon ozljede ACL-a: potencijalni središnji mehanizmi	Presječno istraživanje	Ispitati kontrolu sile <i>m. quadriceps femoris</i> kod pojedinaca koji su nedavno pretrpjeli ozljedu ACL-a i utvrditi povezanost između kortikalne podražljivosti i kontrole submaksimalne sile <i>m. quadriceps femoris</i>	N=36 18 ispitanika od 29+/-8 godina u ACL grupi (12 muškaraca i 6 žena) i 18 ispitanika od 29+/-6 godina u K grupi (12 muškaraca i 6 žena)	Manje od 8 mjeseci od ozljede ACL-a	- Kontrola sile <i>m. quadriceps femoris</i> kvantificirana je kao korijen srednje kvadratne pogreške između sile <i>m. quadriceps femoris</i> i ciljne sile tijekom cikličkog zadatka podudaranja sile - Kortikalna podražljivost mjerena je kao aktivni motorički prag i kortikalni tihi period pomoću "force transducer" – Sensotronics)	- Značajno veća ukupna pogreška podudaranja sile u ozlijeđenom i neozlijeđenom ud u ACL grupe u odnosu na K grupu

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRIJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
Armitano, C. N., Morrison, S., Russell, D. M. (2018)	Smanjena koordinacijska stabilnost između nogu nakon rekonstrukcije ACL-a	Presječno istraživanje	Proučavanje koordinacijskih razlika u hodu između pojedinaca s rekonstruiranim ACL-om i zdravih pojedinaca	N=34 17 muških ispitanika dobi 23+/-2 godine u ACL grupi i 17 muških ispitanika dobi 25+/-2 godine u K grupi	Nepoznato	- Mjerenje sagitalnog kutnog pomaka u koljenu pomoću elektrogoniometra prilikom hoda u pet brzina	- ACL grupa pokazala je značajno smanjenu koordinacijsku stabilnost u odnosu na K grupu kroz zadatke u 5 brzina - Značajno sporija brzina hoda zabilježena je u ACL grupi u odnosu na K grupu prilikom hodanja samovoljnom brzinom
Busch, A., Blasimann, A., Henle, P., Baur, H. (2019)	Neuromuskularna aktivnost tijekom spuštanja niz stepenice kod pacijenata s rekonstruiranim ACL-om	Pilot istraživanje	Istražiti neuromuskularnu aktivnost tijekom spuštanja niz stepenice kod pacijenata nakon godine dana od rekonstrukcije ACL-a	N=20 10 muških ispitanika dobi 26+/-10 godina u ACL grupi i 10 muških ispitanika dobi 31+/-7 godina u K grupi	Godina dana od rekonstrukcije ACL-a	- Neuromuskularna aktivnost <i>m. vastus medialis</i> , <i>m. vastus lateralis</i> , <i>m. biceps femoris</i> i <i>m. semitendinosus</i> pomoću EMG ⁵	- Značajno povećana aktivnost u <i>m. semitendinosus</i> u fazi prihvatanja težine u ACL grupi u odnosu na K - U fazi odguravanja značajno je povećana aktivnost <i>m. vastus lateralis</i> kod ACL grupe - Značajno smanjena aktivnost <i>m. vastus medialis</i> u ACL grupi u odnosu na kontralateralnu nogu

⁵ EMG - elektromiografije

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRIJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
Grooms i suradnici (2017)	Neuroplastičnost povezana s rekonstrukcijom ACL-a	Kontrolirano laboratorijsko istraživanje	Istražiti razlike u aktivaciji mozga tijekom fleksije i ekstenzije koljena kod osoba koje su imale rekonstrukciju ACL-a i kod zdravih osoba	N=30 15 ispitanika u ACL grupi i 15 ispitanika u K grupi	38+/-27 mjeseci od rekonstrukcije ACL-a	- Procjena moždane funkcije pomoću fMRI ⁶ prilikom izvođenja unilateralnih motoričkih zadataka fleksije i ekstenzije koljena	- ACL grupa pokazala značajno veću aktivaciju u kontralateralnom motoričkom korteksu, govornoj vijuzi i ipsilateralnom somatosenzornom području, te značajno smanjenu aktivaciju u ipsilateralnom motoričkom korteksu i malom mozgu u odnosu na zdrave ispitanike
Pamukoff, D. N., Pietrosimone, B. G., Ryan, E. D., Lee, D. R., Blackburn, J. T. (2017)	Funkcija kvadricepsa i koaktivacija stražnje lože nakon rekonstrukcije ACL-a	Presječno istraživanje	Usporedba funkcije <i>m. quadriceps femoris</i> i koaktivacije lože kod pojedinaca s rekonstruiranim ACL-om i kod nezlijeđenih sudionika u kontrolnoj grupi	N=40 20 ispitanika u dobi od 21+/-1 godina u ACL grupi (14 žena i 6 muškaraca) i 20 ispitanika u dobi od 21+/-1 godina u K grupi (14 žena i 6 muškaraca)	50+/-21 mjesec od rekonstrukcije ACL-a	- Maksimalna voljna ekstenzija koljena na izokinetičkom dinamometru (vršni moment sile, stopa razvoja momenta, električna amplituda, središnji omjer aktivacije), te EMG stražnje lože	- ACL grupa pokazala značajno manji vršni moment sile <i>m. quadriceps femoris</i> , manju stopu razvoja momenta, amplitudu i središnji omjer aktivacije u odnosu na K grupu - ACL grupa imala je značajno veću koaktivaciju stražnje lože u odnosu na K grupu

⁶ fMRI – funkcijska magnetska rezonancija

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRIJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
Palmieri-Smith, R. M., Strickland, M., Lepley, L.K. (2019)	Mišićna aktivnost stražnje lože nakon primarne rekonstrukcije ACL-a - zaštitni mehanizam kod pojedinaca koji ne zadrže sekundarnu ozljedu? Preliminarna studija.	Presječno istraživanje	Usporediti elektromiogramе <i>m. quadriceps femoris</i> , stražnje lože i <i>m. gastrocnemius</i> tijekom izvođenja dinamičkog skok zadatka kod pojedinaca s jednom ozljedom ACL-a (ACL1), kod pojedinaca sa sekundarnom ipsilateralnom ozljedom (ACL2) i kod zdravih pojedinaca	N=21 14 ispitanika u ACL grupi i 7 ispitanika u K grupi. Dob ispitanika 14-30 godina	Nepoznato	- EMG <i>m. vastus lateralis</i> , <i>m. biceps femoris</i> , <i>m. gastrocnemius</i> prilikom jednonožnog skoka kroz dvije faze (predaktivnost – 100ms prije kontakta s tlo i reaktivnost – 250ms nakon kontakta s tlo)	- U predaktivnosti ACL1 grupa pokazala je značajno veću aktivnost stražnje lože od ACL2 grupe, ali ne i od K grupe - U reaktivnoj fazi utvrđena je značajno manja aktivnost <i>m. quadriceps femoris</i> u obje ACL grupe u odnosu na K grupu - ACL1 i ACL2 grupe pokazale su značajno manju jakost <i>m. quadriceps femoris</i> od K grupe
Nagai, T., Bates, N. A., Hewett, T. E., Schilaty, N. D. (2018)	Učinci lokalizirane vibracije na osjet položaja koljenog zgloba kod osoba s rekonstrukcijom ACL-a	Randomizirano kontrolirano istraživanje	Procijeniti položaj koljenog zgloba sa i bez vibracija te usporediti s kontralateralnim udovima i kontrolnom grupom	N=28 14 ispitanika u ACL grupi (8 muškaraca i 6 žena) i 14 ispitanika u K grupi (8 muškaraca i 6 žena). Dob: 14 - 50 godina	U prosjeku 298 dana od rekonstrukcije ACL-a	- Osjet položaja zgloba pomoću izokinetičkog dinamometra s lokaliziranom vibracijom na tetivu <i>m. quadriceps femoris</i> pod kutem od 15°, 45° i 75°, te EMG	- Nisu pronađene značajne razlike između ACL i K grupe sa ili bez vibracija

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRIJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
Flaxman i suradnici (2018)	Razlike u trenutnim EMG odnosima između osoba s ozlijeđenim i neozlijeđenim ACL-om tijekom višesmjernog zadatka za kontrolu sile tijekom vježbe s utezima	Istraživanje parova	Kvantificirati razlike u trenutnim odnosima elektromiografije između ACL i K grupe. Ustanoviti razlike u odnosu pojedinih mišićnih aktivnosti i unutarzglobnih momenata između ACL i K grupe	N=48 24 ispitanika u ACL grupi (14 muškaraca i 10 žena) i 24 ispitanika u K grupi (14 muškaraca i 10 žena)	Nepoznato	- EMG izometrijske sile reakcije podloge, te površinski EMG <i>m. rectus femoris</i> , <i>m. vastus medialis</i> , <i>m. vastus lateralis</i> , <i>m. semitendinosus</i> , <i>m. biceps femoris</i> , <i>m. gastrocnemius</i> , <i>m. tensor fasciae latae</i> , <i>m. gluteus medius</i> i <i>m. adductori</i>	- ACL grupa pokazala je značajno veće sudjelovanje <i>m. rectus femoris</i> pri ekstenziji koljena te značajno veće sudjelovanje <i>m. semitendinosus</i> i <i>m. gastrocnemius</i> pri fleksiji koljena u odnosu na K grupu - Značajno manja razina aktivacije <i>m. biceps femoris</i> kod fleksije i medijalne glave <i>m. gastrocnemius</i> pri unutarnjoj rotaciji u ACL grupi
Grooms, D. R., Chaudhari, A., Page, S. J., Nichols-Larsen, D. S., Onate, J. A. (2018)	Vizualno-motorička kontrola doskoka nakon rekonstrukcije ACL-a	Kohortno istraživanje	Istražiti efekte vizualnih remetećih faktora uz pomoć stroboskopskih naočala na mehanički vertikalni drop-doskok te odrediti utjecaj nedostatka ACL-a na efekt	N=30 15 ispitanika u dobi od 21+/-2 godine u ACL grupi (8 žena i 7 muškaraca) i 15 ispitanika u dobi od 23+/-3 godine u K grupi (8 žena i 7 muškaraca)	6 mjeseci do 5 godina od rekonstrukcije ACL-a	- Vertikalni drop-doskok u normalnim uvjetima i pod uvjetima stroboskopskih naočala - Mjerenje vršnog momenta sile, sile reakcije podloge te kinematika	- Značajno promijenjena kinematika doskoka u sagitalnoj i frontalnoj ravnini pod utjecajem stroboskopskih naočala kod ACL grupe u odnosu na K grupu, ali ne i vršni moment sile

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRIJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
Goetschius, J., i Hart, J. M. (2016)	Varijabilnost sile ekstenzije koljena i subjektivna funkcija koljena kod pacijenata s povijesti rekonstrukcije ACL-a	Opisno laboratorijsko istraživanje	Utvrđiti razlike u varijabilnosti kontrole maksimalne izometrične sile pri ekstenziji koljena između ACL deficijentnih koljena i zdravih koljena te utvrditi povezanost između varijabilnosti sile i subjektivne procjene funkcije	N=103 53 ispitanika u dobi od 23+/-4 godine u ACL grupi (27 muškaraca i 26 žena) i 50 ispitanika u dobi od 23+/-4 godine u K grupi (28 muškaraca i 22 žene)	6+ mjeseci od rekonstrukcije ACL-a	- Okretni moment sile, jakost i centralni aktivacijski omjer prilikom maksimalne ekstenzije koljena (90°) u trajanju od 3 sekunde pomoću dinamometra ("Byodex System") te upitnik subjektivne procjene funkcije koljena ("IKDC" – engl. <i>International Knee Documentation Committee</i>)	- Značajno veća varijabilnost momenta sile, značajno manji središnji aktivacijski omjer i jakost u odnosu na K grupu - Značajno manji IKDC rezultat u ACL grupi
Dingenen, B., Janssens, L., Claes, S., Bellemans, J., & Staes, F. F. (2016)	Mišićna aktivacija donjih ekstremiteta prilikom prelaska iz sunožnog stava u jednonožni stav kod ispitanika s rekonstruiranim ACL-om	Presječno istraživanje	Istražiti vremenski mišićnu aktivaciju donjih ekstremiteta prilikom prelaska iz sunožnog stava u jednonožni stav kod ispitanika s rekonstruiranim ACL-om	N=40 20 ispitanika u ACL grupi i 20 ispitanika u K grupi u dobi od 15 do 55 godina	9+ mjeseci od rekonstrukcije ACL-a	- EMG i sila reakcije podloge tijekom prijelaza iz sunožnog stajanja u jednonožno stajanje u uvjetima otvorenih i zatvorenih očiju	- Značajno odgođena mišićna aktivacija u ACL grupi u odnosu na K grupu za <i>m. gluteus maximus</i> , <i>m. vastus medialis</i> , <i>m. obliquus</i> , <i>m. hamstrings</i> , <i>m. gastrocnemius</i>

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
Norte, G. E., Hertel, J., Saliba, S. A., Diduch, D. R., Hart, J. M. (2018)	Neuromišićna funkcija <i>m. quadriceps femoris</i> kod pacijenata s rekonstruiranim ACL-om sa ili bez osteoartritisa koljena: presječno istraživanje	Presječno istraživanje	Usporedba neuromišićne funkcije <i>m. quadriceps femoris</i> manje od 2 godine (rano) i više od 2 godine (kasno) nakon rekonstrukcije ACL-a, uključujući i bolesnike koji su imali posttraumatski osteoartritis koljena	N=102 72 ispitanika u ACL grupama (34 ispitanika u ranoj fazi (ACL1), 30 ispitanika u kasnoj fazi (ACL2) i 8 ispitanika s osteoartritisom (ACL3)) i 30 ispitanika u K grupi. Dob: 15 - 65 godina	ACL1 → 9+/-4 mjeseci od rekonstrukcije ACL-a. ACL2 → 70+/-41 mjeseci od rekonstrukcije ACL-a. ACL3 → 115+/-110 mjeseci od rekonstrukcije ACL-a	- Mjerenje funkcije <i>m. quadriceps femoris</i> obostrano i jednokratno da bi se utvrdio normalizirani Hoffmanov refleks, maksimalni okretni moment voljne izometrične kontrakcije ekstenzije koljena, središnji omjer aktivacije i prag motoričke aktivacije pomoću EMG-a	- Značajno niža maksimalna voljna izometrična kontrakcija ozlijeđenog uda u svim ACL grupama u odnosu na K grupu - Središnji omjer aktivacije i indeks umora značajno su niži među ispitanicima u ACL1 grupi u odnosu na sve ostale grupe - Prag motoričke aktivacije značajno je niži među svim ACL grupama u odnosu na K grupu
Lepley, A. S., Ericksen, H. M., Sohn, D. H., Pietrosimone, B. G. (2014)	Promjene u neurološkoj podražljivosti i jakosti kvadricepsa pri voljnoj aktivaciji nakon rekonstrukcije ACL-a	Presječno istraživanje	Procijeniti mogućnost predikcije spinalno-refleksne podražljivosti, kortikospinalne podražljivosti i voljne aktivacije na jakost <i>m. quadriceps femoris</i> kod K i ACL grupe	N=58 29 ispitanika u ACL grupi i 29 ispitanika u K grupi	Nepoznato	- Mjerenje maksimalne izometrične kontrakcije pomoću dinamometra (BIODEX), mjerenje aktivnog motoričkog praga pomoću TMS-a te središnjeg aktivacijskog omjera te aktivnog motoričkog praga i Hoffmanovog refleksa pomoću elektromiografije	- U ACL grupi središnji aktivacijski omjer i Hoffmanov refleks značajno su predviđali odstupanje u maksimalnoj voljnoj izometričnoj kontrakciji - Središnji aktivacijski omjer jedini je značajni prediktor u K grupi

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRIJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
Grooms, D. R., Page, S. J., Onate, J. A. (2015)	Aktivacija mozga pri pokretima koljena mjerena danima prije sekundarne ozljede ACL-a	Opis slučaja	Utvrditi osnovne funkcionalne i strukturne promjene mozga za predikciju neuromišićnih kontrolnih adaptacija povezanih s ozljedom ACL-a pomoću funkcionalne magnetske rezonance	1 ispitanik s ozljedom ACL-a (25 godina) i 1 zdravi ispitanik (26 godina)	10 mjeseci od rekonstrukcije ACL-a	- fMRI mozga zdravog ispitanika i ispitanika s rekonstruiranim ACL-om prilikom izvođenja aktivne fleksije i ekstenzije koljena	- ACL ispitanik pokazao je značajno veću aktivaciju motoričkog planiranja, senzoričke obrade i područja vizualno-motoričke kontrole u odnosu na zdravog ispitanika - Slični aktivacijski obrazac zabilježen je u kontralateralnoj nozi ACL ispitanika
Kuenze i suradnici (2015)	Stalne neuromišićne i kortikomotorne asimetrije kvadricepsa nakon rekonstrukcije ACL-a	Opisno laboratorijsko istraživanje	Usporediti simetričnost neuromišićne funkcije <i>m. quadriceps femoris</i> između udova kod pojedinaca nakon rekonstrukcije ACL-a i zdravih pojedinaca	N=46 22 ispitanika u ACL grupi (12 muškaraca i 10 žena) i 24 ispitanika u K grupi (12 muškaraca i 12 žena). Starost: 18 - 40 godina	6+ mjeseci od rekonstrukcije ACL-a	- Mjerenje jakosti maksimalne voljne izometrične kontrakcije ekstenzije koljena i središnjeg aktivacijskog omjera <i>m. quadriceps femoris</i> pomoću dinamometra (BIODEX), mjerenje motorno-neuronske podražljivosti <i>m. quadriceps femoris</i> pomoću EMG-a, te aktivnog motoričkog praga pomoću TMS-a	- ACL grupa pokazala je značajno veću asimetriju u jakosti maksimalne voljne izometrične kontrakcije, središnjeg aktivacijskog omjera i aktivnog motoričkog praga u odnosu na K grupu - Značajne razlike u motorno-neuronskoj podražljivosti <i>m. quadriceps femoris</i> nisu zabilježene

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRIJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
Zult i suradnici (2016)	Ozljeda ACL-a ne utječe na neuromišićnu funkciju kontralateralne noge osim u aspektima dinamičke ravnoteže i voljne kontrakcije <i>m. quadriceps femoris</i>	Presječno istraživanje	Utvrđiti funkciju kontralateralne (neozlijeđene) noge kod pojedinaca s ozljedom ACL-a u svrhu utvrđivanja relevantnosti dobivenih podataka o riziku nastanka sekundarne ozlijede	N=72 32 ispitanika u ACL grupi (16 muškaraca i 16 žena) i 40 ispitanika u K grupi (20 muškaraca i 20 žena). Starost: 18 - 30 godina	208 +/- 145 dana od ozljede ACL-a	- Mjerenje središnjeg aktivacijskog omjera i maksimalne voljne izometrične i dinamičke kontrakcije <i>m. quadriceps femoris</i> i stražnje lože pomoću dinamometra (BIODEX), te procjena propriocepcije, statičke i dinamičke ravnoteže i jednonožnog skok testa	- ACL grupa pokazala je značajna bilateralna oštećenja u testovima ravnoteže i središnjem aktivacijskom omjeru u odnosu na K grupu - Utvrđene su značajne razlike između nogu u maksimalnoj jakosti <i>m. quadriceps femoris</i> i stražnje lože, voljnoj aktivaciji <i>m. quadriceps femoris</i> , testovima ravnoteže i testu jednonožnog skoka - Značajne razlike u jakosnoj preciznosti, propriocepciji i statičkoj ravnoteži nisu utvrđene
Serrancolí, G., Monllau, J. C., Font-Llagunes, J. M. (2016)	Analiza mišićne sinergije i aktivacijsko-devijacijskih obrazaca kod ACL deficijernih ispitanika tijekom hoda	Presječno istraživanje	Identificirati razlike u obrascima između ACL deficijernih i zdravih ispitanika tijekom hoda	N=28 18 ispitanika u ACL grupi (dobi 32 +/- 10 godina) i 10 ispitanika u K grupi (dobi 31 +/- 12 godina)	Nekoliko dana prije rekonstrukcije ACL-a	- EMG testiranje 16 mišića tijekom hoda - Mjerenje voljne aktivacije mišića, sile reakcije podloge i trajektorije gibanja	- Značajno veća kontrakcija prikazana je u ACL grupi u odnosu na K grupu - Bez značajnih razlika u mišićnoj aktivaciji tijekom hoda u ACL i K grupi

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRIJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
Diekfuss i suradnici (2019)	Promjene u senzomotornoj povezanosti koljena i mozga doprinose ozljedi ACL-a kod srednjoškolaca nogometaša američkog nogometa: prospektivna analiza	Prospektivna analiza	Iskoristiti prospektivni skup podataka kako bi se ispitale razlike u funkcionalnoj moždanoj povezanosti kod srednjoškolskih sportaša koji su pretrpjeli ozljedu ACL-a u usporedbi s neozlijeđenim pojedincima	N=15 3 muška ispitanika u ACL grupi i 12 muških ispitanika u K grupi	Prospektivno testiranje prije i nakon ozljede ACL-a	- fMRI mozga u mirovanju	- Značajno manja povezanost između lijevog sekundarnog somatosenzornog korteksa i lijevog dodatnog motoričkog područja, desnog premotoričkog korteksa, desnog dodatnog motoričkog područja, lijevog primarnog somatosenzornog korteksa i lijevog primarnog motoričkog korteksa kod ACL ispitanika u odnosu na K grupu

AUTORI (GODINA)	NASLOV RADA	VRSTA RADA	CILJ RADA	ISPITANICI	VRIJEME ISPITIVANJA OD OPERACIJE /OZLJEDE ACL-a	TESTOVI MOTORIČKE KONTROLE	POSTIGNUTI REZULTATI
Pietrosimone i suradnici (2015)	Promjene u neurološkoj podražljivosti nakon rekonstrukcije ACL-a	Istraživanje parova	Utvrditi podražljivost spinalnog refleksa i kortikomotornu podražljivost između ozlijeđenih i neozlijeđenih udova kod pacijenata s unilateralnom rekonstrukcijom ACL-a, te između udova neozlijeđenih ispitanika	N=57 28 ispitanika u ACL grupi u dobi od 21 +/- 3 godine (19 žena i 9 muškaraca) i 29 ispitanika u K grupi u dobi od 21 +/- 2 godine (20 žena i 9 muškaraca)	48 +/- 36 mjeseci od rekonstrukcije ACL-a	- Mjerenje AMT-a ⁷ m. <i>vastus medialis</i> pomoću TMS-a, Hoffmanovog refleksa i CAR-a ⁸ m. <i>vastus medialis</i> pomoću elektromiografije, te voljne mišićne aktivacije pomoću dinamometra (BIODEX)	- Značajno veći aktivni motorni prag u ozlijeđenoj nozi u odnosu na zdravu nogu u ACL grupi - Značajno veći Hoffmanov refleks bilateralno u ACL grupi u odnosu na K grupu - Značajno manji bilateralni središnji aktivacijski omjer u ACL grupi u odnosu na K grupu

⁷ AMT - aktivni motorni prag

⁸ CAR - središnji aktivacijski omjer

7. RASPRAVA

Kroz 24 studije prikazane u Tablici 1, provodila su se istraživanja različitih aspekata motoričke kontrole. U mjerenjima je najčešće korištena elektromiografija, u čak 12 radova, te dinamometar u njih 7. Uz navedene metode ispitivanja korišteni su i elektrogoniometar (4 studije), TMS (6 studija), funkcionalna MRI (3 studije), tenziomigrafija (2 studije), sila reakcije podloge (2 studije), te kinematika (1 studija). Mjerenja su najčešće provedena na mišićima *m. biceps femoris* i *m. vastus medialis*. Kontrolni uzorak u 8 analiziranih radova bili su zdravi ispitanici, odnosno isključivo ekstremiteti zdravih pojedinaca, dok je u 16 studija kao kontrola korištena neozlijeđena noga ACL ispitanika te ekstremiteti zdravih ispitanika. Od 24 studije, u njih 23, najmanje je u jednoj mjerenoj varijabli utvrđena statistički značajna razlika, dok je u samo jednom istraživanju utvrđen izostanak statistički značajnih razlika u mjerenim varijablama. Riječ je o istraživanju Nagai, Bates, Hewett i Schilaty (2018) u kojemu su se ispitali učinci lokalizirane vibracije na osjet položaja koljenog zgloba kod osoba s rekonstrukcijom ACL-a. Tim je istraživanjem utvrđeno da razina procjene osjeta položaja zgloba sa i bez vibracija na tetivu *m. quadriceps femoris* u ozlijeđenom, kontralateralnom i kontrolnom ekstremitetu nije značajna, odnosno da apliciranje vibracija na tetivu *m. quadriceps femoris* pod kutem od 15°, 45° i 75° ne utječe na osjet položaja koljenog zgloba. Nadalje, istraživanja su provedena u različitim vremenskim intervalima od ozljede ili rekonstrukcije ACL-a što zbog heterogenosti populacije ispitanika (spol, dob, aktivna i neaktivna populacija) nije moguće detaljnije analizirati, te ponuditi trenažne smjernice u skladu s vremenom od ozljede.

Iz ovog preglednog rada proizlazi zaključak o utvrđenoj nižoj proprioceptiji koljena kod pojedinaca s rupturom ACL-a u usporedbi s neozlijeđenim koljenom. Spomenuto smanjenje proprioceptije zabilježeno je i u zglobnom pokretu i u zglobnom položaju. Međutim, ustanovljeno je da je ta veličina smanjenja proprioceptivne funkcije relativno mala. Mali gubitci u proprioceptiji nisu iznenađujući s obzirom da samo 1% ukupne površine ACL-a čine proprioceptivni mehanoreceptori, te sukladno tome možemo zaključiti kako gubitak tih mehanoreceptora uslijed ozljede ACL-a ne utječe uvelike na promijenjenu motoričku kontrolu. Nasuprot tome, preostali mehanoreceptori u mišićima oko koljenog zgloba i/ili u zglobnoj kapsuli mogu igrati važnu ulogu u pružanju aferentnih informacija prema senzomotornom sustavu koji kontrolira proprioceptiju. Rezultati studija uključenih u ovaj pregled također upućuju da je

prosječna razlika između ozlijeđenog i neozlijeđenog koljena bila manja u testovima detekcije praga pasivnog pokreta u usporedbi s testovima za osjet položaja zgloba što ukazuje na uključivanje različitih receptora i različitih elemenata propriocepcije. Kinestezija, odnosno propriocepcija pokreta dinamična je faza propriocepcije koju reguliraju brzo prilagodljivi receptori poput Pacinijevih tjelešca, dok je položaj zgloba statička faza propriocepcije koji mjere sporije reakcije Ruffinijevih receptora i Golgijev tetivni organ (Kim, Lee, Lee, 2017). Prema Suarez i sur. (2015), tijekom aktivnih zadataka repozicije, pokazalo se da je točnost reprodukcije unaprijed uspostavljenih zglobovskih položaja veća nego kod pasivnih repozicioniranja to jest kod oslanjanja isključivo na pasivne strukture zglobova kod zdravih i ACL deficijentnih pojedinaca. To je pripisano dodatnom doprinosu mišićnih vretena tijekom aktivnog u odnosu na pasivno repozicioniranje zadataka. Stoga se može pretpostaviti da se uzorci koaktiviranja mišića koji okružuju zglob koljena prilagođavaju kako bi nadoknadili poremećeni osjet položaja zgloba i osigurali precizno repozicioniranje kod osoba s nedostatkom ACL-a. Na sposobnost prilagodbe preostalih osjetilnih struktura moguće je utjecati vježbanjem.

Nadalje, rezultati ovog preglednog rada upućuju da pojedinci s ozljedom ACL-a konzistentno doživljavaju slabosti i aktivacijske deficite *m. quadriceps femoris* u ozlijeđenom koljenu u usporedbi sa zdravim pojedincima. Slabost *m. quadriceps femoris* je prisutna u ozlijeđenoj nozi više nego u kontralateralnoj nozi. Iako nije homogeno među svim uključenim studijama, kontralateralni ekstremiteti od ACL deficijentnih ispitanika pokazali su manji omjer aktivacije nego zdravi ispitanici u kontrolnim grupama. Također, ozlijeđeni pojedinci vrlo često ne postižu zadovoljavajuću razinu jakosti *m. quadriceps femoris* (3.0 Nm/kg) bez obzira na vrijeme od ozljede/operacije (Lisee, Lepley, Birchmeier, O'Hagan, Kuenze, 2019). Pretpostavlja se da promijenjene aferentne informacije iz periartikularnih receptora u ozlijeđenom koljenu mogu utjecati na funkcioniranje mišićnog vretena u kontralateralnom ekstremitetu i da se na taj način također mijenja osjećaj stabilnosti u kontralateralnoj (neozlijeđenoj) nozi. Prilikom usporedbe dobivenih rezultata pojedinih studija uključenih u pregledni rad između ACL deficijentnih pojedinaca i zdravih pojedinca, vidljiva je niža maksimalna izometrična kontrakcija prilikom ekstenzije u ozlijeđenom koljenu. Svi navedeni deficiti povezani su s promijenjenim obrascem kretanja godinama nakon ozljede, odnosno operacije ACL-a što povećava rizik od razvoja osteoartritisa (Lisee, Lepley, Birchmeier, O'Hagan, Kuenze, 2019).

Lepley i suradnici (2015) u svom longitudinalnom istraživanju ispitivali su kortikalnu podražljivost *m. vastus medialis* u različitim vremenskim točkama, što je uključivalo mjerenje prije operacije ACL-a, 2 tjedna nakon rekonstrukcije ACL-a i 6 mjeseci nakon rekonstrukcije ACL-a. Rezultati istraživanja pokazali su da ACL deficijentni pojedinci imaju manju kortikalnu podražljivost *m. vastus medialis* u 6. mjesecu od operacije u usporedbi s neozlijeđenim ispitanicima, dok razlike između grupa nije bilo prije i 2 tjedna nakon operacije. Ovi rezultati sugeriraju da se neuroplastične promjene u funkciji kortikospinalnog sustava pojavljuju unutar 2 tjedna do 6 mjeseci nakon rekonstrukcije ACL-a.

Neuroplastičnost nakon ozljede ACL-a rezultat je kombinacije izmijenjene senzoričke povratne informacije uslijed ozljede kao i kompenzatornih obrazaca motoričke kontrole (Grooms i sur., 2017). Izgubljeni mehanoreceptori iz ligamenata, povezane fiziološke posljedice upale i zglobovi izljevi mogu promijeniti ulaznu informaciju u SŽS-u. Istovremeno, iskustveno-ovisni čimbenici, uključujući promjene u ponašanju zbog boli uzrokovane ozlijedom, nestabilnosti, kompenzatornih obrazaca pokreta te fizikalne rehabilitacije i terapije, također mogu uzrokovati jedinstvene i međusobno povezane neuroplastične promjene zajedno s aferentnim poremećajem.

Grooms i suradnici (2017) sugeriraju da izmijenjeni aferentni ulaz u SŽS zbog izgubljenih mehanoreceptora ACL-a smanjuje inervaciju u primarni motorički korteks. Ta pojava može dovesti do odsutnosti somatosenzornog evociranog potencijala u primarni motorički korteks. Također, mijenja se i eferentni izlaz zbog poremećaja gama-motornih neurona, zakašnjelih refleksa te promijenjene podražljivosti kralježnice i korteksa. Poremećaj ulaznih informacija i ograničenje eferentnog signala u kombinaciji doprinose artrogenoj inhibiciji mišića i promjenama u motoričkoj kontroli što dovodi do kompenzacije senzoričko-motoričkog sustava.

Pregledom rezultata uključenih studija, vidljivo je kako primarni motorički korteks pokazuje povećanu aktivaciju prilikom ekstenzije i fleksije koljena ozlijeđenog ekstremiteta što ukazuje da se podražljivost motoričkog korteksa smanjuje nakon rekonstrukcije ACL-a (Diekfuss i sur., 2019). Ona sugerira da je potrebna veća aktivacija motoričkog korteksa kako bi se postigao motorički pogon. Nakon ozljede dolazi do razvoja izmijenjenih strategija motoričke kontrole koja kompenzira pripadajuće biomehaničke nedostatke (snagu, amplitudu pokreta), a zahtjevi za obradu motoričkog korteksa mogu se povećati kako bi se održao čak i jednostavniji integritet motoričke kontrole.

Također, smanjena ipsilateralna aktivacija motoričkog korteksa tijekom pokreta u koljenom zglobovima može biti posljedica opsežne unilateralne rehabilitacije koja se pruža nakon kirurškog zahvata. Motorička kontrola donjeg ekstremiteta sklona je obostranom angažmanu, pri čemu se ipsilateralni motorički korteks aktivira kako bi spriječio kontralateralnu, ali i bilateranu kontrakciju tijekom pojedinog pokreta. Optimalnom rehabilitacijom moguće je da ipsilateralna motorička područja postanu učinkovitija pa zahtijevaju manju neurološku aktivaciju da izvrše unilateralni pokret (Grooms i sur., 2017).

Nadalje, promatrajući rezultate studija u varijablama mišićne aktivacije i koaktivacije, a kako ističu Flaxman i suradnici (2018.), vidljiva je veća povezanost mišićne aktivacije kod ACL deficijernih pojedinaca s unutarnjom rotacijom, abdukcijom i ekstenzijom koljena, što se može smatrati potencijalnom strategijom za smanjenje nestabilnosti koljena. S druge strane mišićne aktivacije koje imaju veću povezanost s adukcijom i fleksijom koljena smatraju se strategijama koje povećavaju stabilnost koljenog zgloba. Specifičnije, rezultati su pokazali da ACL deficijentni pojedinci imaju snažnije veze između *m. rectus femoris* i ekstenzije koljena, *m. semitendinosus*, *m. gastrocnemius*, i trenutka fleksije koljena, te slabije veze između *m. biceps femoris* i fleksije koljena, *m. gastrocnemius* i vanjske rotacije koljena, te mišića kuka i abdukcije kuka. Budući da mišići stražnje lože pružaju otpor tibijalnom pomaku, niža vrijednost odnosa *m. biceps femoris* i fleksije koljena primjećena je kod osoba s ozljedom ACL-a te može pridonijeti smanjenoj stabilnosti. Bolja povezanost *m. semitendinosus* i fleksije koljena smatra se strategijom za povećanje stabilnosti koljena što je značajno s obzirom da se tetiva *m. semitendinosus* najčešće uzima kao transplantant prilikom rekonstrukcije ACL-a (Flaxman i sur., 2018). Njegova odsutnost može se odraziti na visoke stope disfunkcije koljena nakon operacije.

Procjenom učinaka spola i vrste presatka na maksimalnu jakost ekstenzije *m. quadriceps femoris* i centralni aktivacijski omjer nakon rekonstrukcije ACL-a, kod žena je utvrđena smanjena subjektivna funkcija koljena u fizičkim aktivnostima u odnosu na muškarce. Diekfus i suradnici (2019) su u svom istraživanju potvrdili razlike između spolova u anatomskoj (količina bijele tvari), strukturalnoj (trakografija bijele tvari) i funkcionalnoj povezanosti koristeći fMRI i PET u mirovanju. Te razlike u neuronskoj komunikaciji mogu održavati kognitivne i bihevioralne razlike koje bi mogle pojasniti oprečne rezultate muškaraca i žena.

Za razliku od spola, tip presatka je faktor koji se pokazao da ima učinak na funkcionalnu izvedbu kod pacijenata s rekonstruiranim ACL-om. No, San Martin-Mohr i suradnici (2018) su u

svom istraživanju ipak dokazali da nema statistički značajne razlike u aktivaciji i izometričnoj izdržljivosti u natkoljениčnim mišićima kod pacijenata s transplantatom iz tetive stražnje lože u usporedbi s pacijentima s transplantatima iz patelarne tetive. Međutim, potrebna su daljnja istraživanja kojima bi se utvrdile razlike pod utjecajem spola ili vrste presatka na maksimalnu voljnu izometričnu kontrakciju i centralni aktivacijski omjer mišića oko koljenog zgloba.

Zbog metodološke heterogenosti studija, teško je procijeniti i analizirati ulogu kirurških čimbenika, uključujući vrijeme od operacije, bol za vrijeme testiranja, ishode meniskusa koji pridonose promjenama u funkciji koljenog zgloba. Mnoge studije uključene u rad nisu uključile i navele navedene kirurške faktore, stoga te činjenice ne mogu biti uključene u analizu. Za daljnje unaprjeđenje i razumijevanje utjecaja faktora na motoričku kontrolu nakon ozljede ACL-a trebalo bi uzeti u obzir sve navedene faktore.

8. PRAKTIČNA PRIMJENA DOSADAŠNJIH SPOZNAJA

Temeljem pregleda literature te analizom prikupljenih radova ističu se određene trenažne smjernice u procesima predoperativne, postoperativne rehabilitacije i preventivnog treninga, pomoću kojih je moguće ublažiti najčešće deficite u kontroli ACL deficijentnog koljenog zgloba.

Neuromuskularne pogreške javljaju se prilikom nedovoljno usvojenog motoričkog zadatka ili kod oštećenja jednog ili više dijelova unutar neuro-motoričkog sustava, što dovodi do neodgovarajuće neuromišićne koordinacije (Barać, 2015). Nastale neuromuskularne pogreške koje utječu na dinamičku nestabilnost zgloba, narušenu biomehaniku pokreta, te u konačnici poremećenu motoričku kontrolu moguće je korigirati kontroliranim i sustavnim senzomotornim treningom, odnosno vježbama. Senzomotorni trening usmjeren je na korekciju motoričke kontrole koristeći maksimizaciju ulaznih informacija ("*inputa*") iz različitih segmenata čovjekova tijela s ciljem poboljšanja ravnoteže i cjelokupne funkcijske sposobnosti pojedinca. Takvim kineziterapijskim pristupom mogu se aktivirati alternativni aferentni putevi, te se time poboljšati funkcija i propriocepcija zgloba. Tijekom izvođenja senzomotrnih vježbi progresija se ostvaruje stalnim izmjenama položaja tijela u kojima različito djeluje gravitacijska sila, a prema tome svaka vježba zahtjeva refleksnu stabilizaciju mišića kako bi se održala motorička kontrola u varijabilnim uvjetima (Nemčić, 2014). Sukladno tomu, narušenu neuromuskularnu kontrolu moguće je dovesti do adekvatne razine, no problem nastaje kad automatizirani i prethodno usvojeni obrasci otežavaju usvajanje novih znanja na živčano-mišićnoj razini. Kod osoba s deficitom ACL-a zbog nedostatka i disfunkcije pojedinih proprioceptora važnih za percipiranje i analiziranje povratnih informacija dolazi do pogrešaka u izvedbi pokreta. Kontinuirano i sustavno izvođenje vježbi motoričke kontrole može potaknuti promjene u SŽS-u.

Međutim, vrlo često u današnje vrijeme pristup rehabilitaciji nakon rekonstrukcije ACL-a zasnovan je na konzervativnim principima. Pažnja je u takvim slučajevima dominantno stavljena na deficite lokomocije pacijenta s vrlo malim, a često i gotovo nikakvim razmatranjima i postupcima za korekciju nastalih neuroplastičnih promjena što u mnogim situacijama dovodi do nepotpunog oporavka. Stoga, izrazito je važno da stručnjaci, voditelji rehabilitacije, veliku pažnju posvete na utjecaj kortikalne disfunkcije, te da prepoznaju neuroplastičnost kao sastavni dio uspostave adekvatne motoričke kontrole.

Mentalno oslikavanje (eng. *mental imagery*) jedan je od glavnih pristupa za unaprjeđenje motoričke izvedbe pomoću neuroplastičnosti prilikom čega se određeni pokret zamijenjuje ili poboljšava mentalnim opetovanim izvođenjem motoričkog zadatka (Barać, 2015). U praksi se vrlo često koristi i trening usmjeren na specifične zadatke kojima je primarni cilj razvoj snage i motoričke izvedbe, a koji je popraćen promjenama u pojedinim regijama mozga zaduženim za izvođenje specifičnog zadatka (Guillot i Collet, 2010). Također, uvođenje funkcionalnih (kompleksnih) pokreta u ranijim fazama rehabilitacije može dovesti do veće pokretljivosti i ranijeg kortikalnog oporavka pacijenta, prilikom čega su potrebne stotine ponavljanja određenog specifičnog pokreta kako bi se inicirale kortikalne promjene. Mnoga prethodna istraživanja i izvješća o neuromišićnoj kontroli nakon rekonstrukcije ACL-a, naznačuju da postoje akutni učinci ozljeda kao i spomenute kronične neuroplastične promjene povezane s rehabilitacijom i motoričkom prilagodbom. Prema Grooms i suradnicima (2017) kako bi se utjecalo na senzorno-vizualnu moždanu aktivaciju, preporuča se da se u proces rehabilitacije uključe različite vizualne distrakcije poput poveza na očima, vanjskih meta, stroboskopskih naočala ili dvostrukog obavljanja zadataka. Takvo usmjeravanje pažnje na vanjsko okruženje s uputama ili povratnim informacijama nasuprot tipičnoj usredotočenosti na položaj koljena ili kontrakcije *m. quadriceps femoris* može pomoći u pobuđivanju adaptivnog neuroplastičnog odgovora i poboljšanju funkcionalnosti. Izravan pristup smanjenju vizualnih povratnih informacija tijekom izvođenja vježbi može biti koristan za poticanje veće uporabe senzornog podražaja. Prema tome, trening povratne sprege trebao bi biti optimiziran kako bi se povećao senzorno-prostorni povratni sadržaj za vrijeme treninga motoričkih sposobnosti, primjerice pomicanje pacijentova fokusa dalje od vlastita tijela može povećati senzomotornu funkcionalnu povezanost, korištenje vibracije ili nekog drugog taktilnog alata može povećati osjetilnu aktivnost, stroboskopski trening može oslabiti motoričke strategije s ciljem pojačane senzomotorne analize.

Isto tako, prilikom izvođenja rehabilitacijskih vježbi svoju ulogu imaju i fokusiranost i usmjerenost pažnje koja također ima utjecaj na motoričku izvedbu (Nemčić, 2014). Kod pacijenata s neurološkim disfunkcijama, pažnja se primarno usmjerava na strategije izvođenja pokreta s glavnim fokusom na utjecaj pokreta na okolinu, dok se kod mišićno-koštanih rehabilitacija pažnja usmjerava na strategije izvođenja s fokusom na pokrete dijelova tijela ili cijelog tijela (Guillot i Collet, 2010).

Sam napredak u motoričkoj kontroli kroz proces rehabilitacije može se sagledati kao proces ponovnog motoričkog učenja u kojemu se izgubljeni motorički obrasci obnavljaju ili se usvajaju novi kompenzatorni obrasci s ciljem uspostave potupne motoričke sposobnosti. U procesu rehabilitacije nikako se ne smije zanemariti česta pojava motoričkih pogrešaka koju je izrazito važno na vrijeme prepoznati kako bi se odredile adekvatne metode ispravljanja.

Nadalje, kao jedna od glavnih disfunkcija prema Lisee, Lepley, Birchmeier, O'Hagan i Kuenze (2019) označava se disfunkcija *m. quadriceps femoris* kojem je glavna uloga stabilnost koljena povezana s funkcionalnom izvedbom. Dosadašnje preporuke upućivale su na unilateralnu i bilateralnu simetriju kao vodilju rehabilitacijskog procesa. Međutim, simetrija može precijeniti jakost *m. quadriceps femoris*, to jest ukoliko se u procjenu ne uzmu utjecaji na neuromišićnu kontrolu to može rezultirati bilateralnom slabosti. Isto tako, u obzir treba uzeti i odraznu nogu koja je u velikom broju slučajeva prije samog ozljeđivanja jača od kontralateralne noge. U tom slučaju valja težiti povratku veće snage odrazne noge u odnosu na neodraznu nogu. Homogenizirani rezultati studija ukazuju na potrebu za fokusom u poboljšanju jakosti ekstenzije koljena nakon rekonstrukcije ACL-a. Unilateralna jakost snažan je prediktor samoprocjene funkcije koljena, a pojedinci koji postižu jakost od 3.0 Nm/kg u ekstenziji također pokazuju i bolju funkcijsku povezanost s koljenom. Isto tako, središnji aktivacijski omjer (engl. *central activation ratio*) također je promijenjen kod pojedinaca s poviješću rekonstrukcije ACL-a. Dobiveni rezultati pokazuju umjerenu razliku u središnjem aktivacijskom omjeru između ozljeđene i kontralateralne noge. Nastali bilateralni deficiti u aktivaciji *m. quadriceps femoris* nakon operacije su česti i preporuča se njihovo rješavanje tijekom rehabilitacije provedbom učinkovitog liječenja usmjerenog na središnje aktivacijske deficite (Lisee, Lepley, Birchmeier, O'Hagan, Kuenze, 2019). Ciljanim neurološkim mehanizmima kroz različite terapijske modele i vježbe može se utjecati na podizanje jakosti kod pacijenata sa smanjenim središnjim aktivacijskim omjerom nakon ozljede ACL-a.

Ward, Perraton, Bennell, Pietrosimone i Bryant (2019) ukazuju na potrebu uključivanja vježbi motoričke kontrole submaksimalne sile u postoperativnu, ali i predoperativnu rehabilitaciju jer su deficiti prisutni i prije same operacije. Sposobnost kontrole submaksimalne sile važna je odrednica funkcije koljena nakon ozljede ACL-a, a upravo su Ward i suradnici (2019) u svojem istraživanju dokazali da se aktivni motorni prag, AMT (eng. *active motor threshold*) *m. rectus femoris* i mjere intrakortikalne inhibicije ne razlikuju kod ACL deficijernih

i zdravih pojedinaca. Međutim, trajanje kortikalnog tihog perioda, cSP (eng. *cortical silent period*) smanjeno je kod ekstremiteta s deficitom ACL-a, što ukazuje na disfunkciju inhibicijskog, a ne ekscitacijskog sustava nakon ozljede.

Procjena osjeta položaja zgloba nakon ozljede ACL-a provedena je tijekom posljednjih nekoliko desetljeća mjerenjem sposobnosti da se pasivno ili aktivno reproducira unaprijed određeni položaj koljena. Pokazalo se da tijekom aktivnih zadataka repozicije, točnost reprodukcije položaja bude veća nego kod zadataka pasivne reprodukcije, odnosno kod oslanjanja isključivo na pasivne strukture koljenog zgloba (Suarez i sur., 2016). Ta pojavnost pripisuje se dodatnom doprinosu mišićnih vretena tijekom aktivnog u odnosu na pasivno repozicioniranje. Također, usporedbom koaktivacije ekstenzora i fleksora koljena tijekom zadataka repozicioniranja položaja, utvrđeno je kako mišići ekstenzori koljena imaju smanjenu aktivaciju, dok se povećava aktivacija fleksora koljena kao ishod kompenzacijskog mehanizma kod pacijenata s deficitom ACL-a. Smanjenje aktivacije mišića ekstenzora povezuje se s neuspjehom voljne kontrakcije mišića za koju se smatra da je posljedica promijenjenog aferentnog puta uslijed ozljede koja potječe od mehaničkog receptora u koljenu, boli i disfunkcije nakon ozljede. S druge strane, povećanje aktivacije antagonističkih mišića promatrano u okviru dinamičkih funkcionalnih aktivnosti poput hodanja i trčanja te je povezano s djelovanjem sprječavanja anteriornog pomaka tibije i s osiguravanjem stabilnosti koljenog zgloba. Isto tako, iako su anatomske strukture netaknute u neozlijeđenom ekstremitetu, pretpostavlja se da poremećaji aferentnih informacija uzrokovani ozljedama osjetnih receptora oštećenog zgloba utječu na funkcioniranje mišićnih vretena u neozlijeđenim ekstremitetima, što pokazuju rezultati oštećenog osjeta položaja zgloba u oba ekstremiteta kod ACL deficijentnih pojedinaca (Suarez, 2016). Dakle, najraniji ciljevi nakon ozljede/rekonstrukcije ACL-a trebali bi biti usmjereni na uzorke koaktiviranja ekstenzora i fleksora koljena tijekom aktivnih zadaća pozicioniranja i repozicioniranja zgloba pa sve do napretka i pasivnih zadataka u kasnijim fazama rehabilitacije. Sukladno tome, vrlo je važno uključiti vježbe pozicioniranja i repozicioniranja u aktivnom obliku oba ekstremiteta tijekom rehabilitacije s ciljem približavanja mišićnim koaktivacijama kao i u zdravih pojedinaca.

Flaxman i suradnici (2018) stajališta su da se deficiti nastali ozljedom ACL-a mogu kompenzirati optimiziranjem aktivacije mišića koji kontroliraju stabilnost u sagitalnoj ravnini, dok je njihova sposobnost stabilizacije koljena naspram abdukcije i rotacijske komponente

upitna. Neuromišićna stabilnost u sagitalnoj ravnini povećava se nakon ozljede ACL-a, dok se stabilnost koljena tijekom abdukcije i vanjske rotacije koljena smanjuje. Uobičajene funkcijske mjere za procjenu koljenog zgloba i ACL-a dominiraju opterećenjima u sagitalnoj ravnini. Međutim, opterećenja u frontalnoj i transverzalnoj ravnini također su bitni čimbenici u definiranju mehanizama ozljeda ACL-a. Rezultati studije ukazuju da bi se u kliničkim procjenama i rehabilitaciji/prevenciji naglasak trebao staviti na uspostavljanje funkcionalne ravnoteže mišića stražnje lože, abduktora kuka i potkoljenice za vrijeme trenažnih opterećenja u frontalnoj i transverzalnoj ravnini.

Mnoga istraživanja pokazala su da nošenje ortoze u postoperativnoj fazi nema značajnih prednosti. Walker, D'Auria, Cui, Van Eck i Fu (2015) navode kako novija istraživanja ne pokazuju poboljšanje opsega pokreta, napredak u snazi, smanjenje boli, stabilnost presatka ili smanjenje u postotku ponovnog ozljeđivanja kod pacijenata koji nose funkcionalnu ortozu nakon rekonstrukcije ACL-a. Kao izuzetak navodi se slučaj u kojem je ozljeda ACL-a udružena s ozljedom meniskusa.

Neuroplastičnost i motoričko učenje tijekom rehabilitacije konstantno se isprepleću. U situacijama poput deficita ACL-a, gdje postoje određena senzorička oštećenja, neuroplastičnost može potaknuti novo motoričko učenje i samim time utjecati na unaprijeđenje u procesiranju i prijenosu informacija. Bolesti mišićno-koštanog sustava zahtjevaju kompletan pristup rehabilitaciji u smislu posvećenosti potencijalu neuroplastičnosti čitavoga SŽS-a uz fokusiranje na poteškoće lokomotornog sustava.

9. ZAKLJUČAK

Ozljeda ACL-a česta je i vrlo kompleksna ozljeda koja zahtjeva od pacijenta potpunu posvećenost u procesu oporavka te visoku razinu kvalitete složenog rehabilitacijskog procesa o kojemu ovisi uspješnost oporavka i spremnost povratka na teren ukoliko je riječ o sportašima. ACL ozljeda sa sobom nosi mnoge negativne učinke na funkciju koljenog zgloba, a samim time i na motoričku kontrolu pokreta što u konačnici nakon određenog perioda često dovodi do opetovane ozljede iste ili kontralateralne noge i/ili posttraumatskog osteoartritisisa.

Da bi se predoperativni i postoperativni rehabilitacijski proces proveo na optimalan način, za voditelja rehabilitacije izuzetno je važno razumijevanje i poznavanje svih neuroloških i lokomotornih promjena koje se zbivaju nakon ozljede, odnosno nakon operativnog zahvata rekonstrukcije ligamenta. Te promjene, kao što je i ovim preglednim radom utvrđeno, su brojne: oštećivanjem mehanoreceptora u ligamentu te posljedičnim poremećajem okolnih proprioceptora koljenog zgloba narušava se kinestezija, odnosno propriocepcija, dolazi do adaptacijskih promjena u području motoričke kore, mijenjaju se obrasci aktivacije i koaktivacije mišića, narušava se biomehanika kretanja, smanjuju se jakost i aktivnost mišića prednje strane natkoljenice, te se mijenja aktivnost mišića stražnje strane natkoljenice.

Također, vrlo je bitno da cjelokupan rehabilitacijski proces bude adekvatno koncipiran, odnosno da se u pravoj mjeri koriste alati za korekciju lokomotornih deficita, ali i neuroplastičnih promjena kako bi se postigao potpuni oporavak. Potrebno je princip neuroplastičnosti, odnosno prilagodbe živčanog sustava iskoristiti kako bi se izazvale pozitivne neuroplastične adaptacije, primjerice preuzimanje funkcije stradalih receptora od strane preostalih. Vrijeme od ozljede/rekonstrukcije ACL-a i maksimalna jakost natkoljeničnih mišića nikako ne bi smjeli biti jedini indikatori potpunog oporavka pacijenta. U valorizaciji i procjeni razine oporavka svoju ulogu trebali bi dobiti i testovi za procjenu motoričke kontrole poput testova ravnoteže, elektromiografije, transkranijalne magnetske stimulacije i drugih.

Međutim, potrebno je provesti daljnja istraživanja kojima bi se još bolje razumijeli i specificirali pojedini učinci na motoričku kontrolu pokreta u koljenom zglobu nastali kao posljedica ozljeđivanja ACL-a. U skladu s time, potrebno je istražiti učinke različitih tipova transplantata na motoričku kontrolu, konkretnije utvrditi razlike pod utjecajem spola, te utjecaj pojave boli kao i vremenskog odmaka od operacije na funkcionalnost koljenog zgloba.

10. LITERATURA

Anonimous (2019) Prikaz aferentno-eferentnog puta, <https://kif.unizg.hr_downloadrepositoryPOSTURA_1_2016%5B3%5D.pdf>.

Pristupljeno 01. listopada 2019.

Anonimous (2019a) Anatomski prikaz mišića i tetiva koljena, <<https://ohiodance.org/dance-education/dance-wellness/knee-anatomy/>>. Pristupljeno 25. rujna 2019.

Anonimous (2019b) Anatomski prikaz sveza i meniskusa koljena – anteriorno, <<https://fixknee.com/acl-anatomy>>. Pristupljeno 25. rujna 2019.

Anonimous (2019c) Anatomski prikaz potpune rupture prednje ukrižene sveze, <<https://orthoinfo.aaos.org/en/diseases--conditions/anterior-cruciate-ligament-acl-injuries/>>. Pristupljeno 27. rujna 2019.

Armitano, C.N., Morrison, S., Russell, D.M. (2018). Coordination stability between the legs is reduced after anterior cruciate ligament reconstruction. *Clinical Biomechanics*, 58, 28–33. doi:10.1016/j.clinbiomech.2018.07.003

Barać, J. (2015). *Neuroplastičnost i motoričko učenje u fizioterapiji* (diplomski rad). Zdravstveno Veleučilište, Zagreb.

Busch, A., Blasimann, A., Henle, P., Baur, H. (2019). Neuromuscular activity during stair descent in ACL reconstructed patients: A pilot study. *The Knee*, 26(2), 310-316. doi: 10.1016/j.knee.2018.12.011

Diekfuss, J.A., Grooms, D.R., Nissen, K.S., Schneider, D.K., Foss, K.D.B., Thomas, S., Myer, G.D. (2019). Alterations in knee sensorimotor brain functional connectivity contributes to ACL injury in male high-school football players: a prospective neuroimaging analysis. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, article in press. doi: 10.1016/j.bjpt.2019.07.004

- Dingenen, B., Janssens, L., Claes, S., Bellemans, J., Staes, F.F. (2016). Lower extremity muscle activation onset times during the transition from double-leg stance to single-leg stance in anterior cruciate ligament reconstructed subjects. *Clinical Biomechanics*, 35, 116–123. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2016.04.014
- Filipi M., Gregov C., Šalaj S. Primjeri uvodno-pripremnih programa treninga za prevenciju ozljeda prednje ukrižene sveze u košarci. U: Jukić I, Gregov C, Šalaj S. (ur.), Kondicijska priprema sportaša, Zbornik radova 11. godišnje međunarodne konferencije, Zagreb, 22.-23.02.2013:292-302.
- Flaxman, T.E., Alkjaer, T., Smale, K.B., Simonsen, E.B., Krogsgaard, M.R., Benoit, D.L. (2018). Differences in EMG-moment Relationships between ACL-Injured and Uninjured Adults during a Weight-bearing Multidirectional Force Control Task. *Journal of Orthopaedic Research®*, 37(1):113-123. doi:10.1002/jor.24145
- Frost, R. (2002). *Applied Kinesiology - A training Manual and Reference Book of Basic Principles and Practices*. California: North Atlantic Books Berkeley.
- Goetschius, J., Hart, J.M. (2016). Knee-Extension Torque Variability and Subjective Knee Function in Patients With a History of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Journal of Athletic Training*, 51(1), 22–27. doi: 10.4085/1062-6050-51.1.12
- Gregov C., Jukić, I., Milanović, L. (2014). Kondicijska priprema u funkciji prevencije ozljeda prednje ukrižene sveze. U I. Jukić i sur (ur.), *Zbornik radova 12. međunarodne konferencije Kondicijska priprema sportaša* (str. 30-39). Zagreb: Kineziološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

- Grooms, D.R., Chaudhari, A., Page, S.J., Nichols-Larsen, D.S., Onate, J.A. (2018). Visual-Motor Control of Drop Landing After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Journal of Athletic Training*, 53(5), 486–496. doi: 10.4085/1062-6050-178-16
- Grooms, D.R., Page, S.J., Nichols-Larsen, D.S., Chaudhari, A.M.W., White, S.E., Onate, J.A. (2017). Neuroplasticity Associated With Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 47(3), 180–189. doi: 10.2519/jospt.2017.7003
- Grooms, D.R., Page, S.J., Onate, J.A. (2015). Brain Activation for Knee Movement Measured Days Before Second Anterior Cruciate Ligament Injury: Neuroimaging in Musculoskeletal Medicine. *Journal of Athletic Training*, 50(10), 1005–1010. doi: 10.4085/1062-6050-50.10.02
- Guillot A, Collet C. (2010). *The neurophysiological foundations of mental and motor imagery*. Oxford: Oxford University Press
- Heitz, N.A., Eisenman, P.A., Beck, C.L., Walker, J.A. (1999). Hormonal Changes Throughout the Menstrual Cycle and Increased Anterior Cruciate Ligament Laxity in Females. *Journal of Athletic Training*, 34 (2), 144 – 149. Dostupno na <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1322903/pdf/jathtrain00006-0072.pdf>
- Hewett, T.E., Ford, K.R., Hoogenboom, B.J., Myer, G.D. (2010). Understanding and Preventing ACL Injuries: Current Biomechanical and Epidemiologic Considerations – Update 2010. *North American Journal of Sports Physical Therapy*, 5 (4), 234 – 251. Dostupno na <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3096145/>
- Jozanović, V. (2007). *Mogućnosti kinematike u dijagnostici ozljeda prednje ukrižene sveze*. (diplomski rad). Kineziološki fakultet, Zagreb.

- Kim, H.-J., Lee, J.-H., Lee, D.-H. (2017). Proprioception in Patients With Anterior Cruciate Ligament Tears: A Meta-analysis Comparing Injured and Uninjured Limbs. *The American Journal of Sports Medicine*, 45(12), 2916–2922. doi:10.1177/0363546516682231
- Kuenze, C.M., Hertel, J., Weltman, A., Diduch, D., Saliba, S.A., Hart, J.M. (2015). Persistent Neuromuscular and Corticomotor Quadriceps Asymmetry After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Journal of Athletic Training*, 50(3), 303–312. doi: 10.4085/1062-6050-49.5.06
- Latash, M. L. (2012). *Fundamentals of Motor Control*. New York: Academic Press
- Lepley, A.S., Ericksen, H.M., Sohn, D.H., Pietrosimone, B.G. (2014). Contributions of neural excitability and voluntary activation to quadriceps muscle strength following anterior cruciate ligament reconstruction. *The Knee*, 21(3), 736–742. doi: 10.1016/j.knee.2014.02.008
- Lepley, A.S., Gribble, P.A., Thomas, A.C., Tevald, M.A., Sohn, D.H., Pietrosimone, B.G. (2015). Quadriceps neural alterations in anterior cruciate ligament reconstructed patients: A 6-month longitudinal investigation. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25(6), 828–839. doi: 10.1111/sms.12435
- Lisee, C., Lepley, A.S., Birchmeier, T., O'Hagan, K., Kuenze, C. (2019). Quadriceps Strength and Volitional Activation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, 11(2):163-179. doi: 10.1177/1941738118822739
- Maeda, N., Urabe, Y., Tsutsumi, S., Fujishita, H., Numano, S., Takeuchi, T., Kimura, H. (2017). Symmetry tensiomyographic neuromuscular response after chronic anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 26(2), 411–417. doi:10.1007/s00167-017-4460-7

- Mikulić, P. i Marković, G. (2016). *Odabrana poglavlja iz motoričke kontrole*. Zagreb: Kineziološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Myer, G.D., Brent, J.L., Ford, K.R., Hewett, T.E. (2011). Real-Time Assessment and Neuromuscular Training Feedback Techniques to Prevent Anterior Cruciate Ligament Injury in Female Athletes. *Strength and Conditioning Journal*, 33(3), 21–35. doi:10.1519/ssc.0b013e318213afa8
- Nagai, T., Bates, N.A., Hewett, T.E., Schilaty, N.D. (2018). Effects of localized vibration on knee joint position sense in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction. *Clinical Biomechanics*, 55, 40–44. doi:10.1016/j.clinbiomech.2018.04.011
- Nemčić, T. (2014). *Usporedba učinkovitosti kineziterapije i kombinacije kineziterapije i elektromagnetoterapije na bol i funkcijsku sposobnost bolesnika s osteoartritisom koljena* (Disertacija). Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:117:450784>
- Norte, G.E., Hertel, J., Saliba, S.A., Diduch, D.R., Hart, J.M. (2018). Quadriceps Neuromuscular Function in Patients With Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With or Without Knee Osteoarthritis: A Cross-Sectional Study. *Journal of Athletic Training*, 53(5), 475–485. doi: 10.4085/1062-6050-102-17
- Palmieri-Smith, R.M., Strickland, M., Lepley, L.K. (2019). Hamstring Muscle Activity After Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction—A Protective Mechanism in Those Who Do Not Sustain a Secondary Injury? A Preliminary Study. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, 11, 316 - 323. doi:10.1177/1941738119852630
- Pamukoff, D.N., Pietrosimone, B.G., Ryan, E.D., Lee, D.R., Blackburn, J. T. (2017). Quadriceps Function and Hamstrings Co-Activation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Journal of Athletic Training*, 52(5), 422–428. doi: 10.4085/1062-6050-52.3.05

- Pećina, M. i sur. (2000). *Ortopedija*. Zagreb: Naklada Ljevak.
- Pietrosimone, B.G., Lepley, A.S., Ericksen, H.M., Clements, A., Sohn, D.H., Gribble, P.A. (2015). Neural Excitability Alterations After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Journal of Athletic Training*, 50(6), 665–674.7 doi: 10.4085/1062-6050-50.1.11
- Platzer, W. (2011). *Priručni anatomski atlas, Sustav organa za pokretanje*. Zagreb: Medicinska naklada
- San Martín-Mohr, C., Cristi-Sánchez, I., Pincheira, P.A., Reyes, A., Berral, F.J., Oyarzo, C. (2018). Knee sensorimotor control following anterior cruciate ligament reconstruction: A comparison between reconstruction techniques. *PLOS ONE*, 13(11), e0205658. doi:10.1371/journal.pone.0205658
- Schnurrer-Luke Vrbanić, T. i Ravlić-Gulan, J. (2008). Zglobna deaferencijacija proprioceptijskog osjeta nakon ozljede prednjeg križnog ligamenta koljena. *Medicina Fluminensis*, 44 (1), 38-43. Dostupno na <https://hrcak.srce.hr/25948>
- Serrancolí, G., Monllau, J.C., Font-Llagunes, J.M. (2016). Analysis of muscle synergies and activation–deactivation patterns in subjects with anterior cruciate ligament deficiency during walking. *Clinical Biomechanics*, 31, 65–73. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2015.09.019
- Shultz, S.J. (2008). Editorial. ACL Injury in the Female Athlete: A Multifactorial Problem That Remains Poorly Understood. *Journal of Athletic Training*, 43(5), 455–455. doi:10.4085/1062-6050-43.5.455
- Smith, H.C., Vacek, P., Johnson, R.J., Slauterbeck, J.R., Hashemi, J., Shultz, S., Beynnon, B.D. (2011). Risk Factors for Anterior Cruciate Ligament Injury. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, 4(2), 155–161. doi:10.1177/1941738111428282

- Suarez, T., Laudani, L., Giombini, A., Saraceni, V.M., Mariani, P.P., Pigozzi, F., Macaluso, A. (2016). Comparison in Joint-Position Sense and Muscle Coactivation between Anterior Cruciate Ligament–Deficient and Healthy Individuals. *Journal of Sport Rehabilitation*, 25(1), 64–69. doi:10.1123/jsr.2014-0267
- Zarzycki, R., Morton, S.M., Charalambous, C.C., Marmon, A., Snyder-Mackler, L. (2018). Corticospinal and intracortical excitability differ between athletes early after ACLR and matched controls. *Journal of Orthopaedic Research®*, 36(11):2941-2948. doi:10.1002/jor.24062
- Zult, T., Gokeler, A., van Raay, J.J.A.M., Brouwer, R.W., Zijdewind, I., Hortobágyi, T. (2016). An anterior cruciate ligament injury does not affect the neuromuscular function of the non-injured leg except for dynamic balance and voluntary quadriceps activation. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 25(1), 172–183. doi: 10.1007/s00167-016-4335-3
- Walker, G.N., D’Auria, J., Cui, L.R., Van Eck, C.F. i Fu, F.H. (2015). *Anatomic anterior cruciate ligament reconstruction*. *Medicina Fluminensis*, 51 (1), 27-40. Dostupno na <https://hrcak.srce.hr/135675>
- Ward, S.H., Pearce, A., Bennell, K.L., Pietrosimone, B., Bryant, A.L. (2016). Corrigendum to “Quadriceps cortical adaptations in individuals with an anterior cruciate ligament injury”. *The Knee*, 23(6), 582–587. 1172. doi:10.1016/j.knee.2016.08.003
- Ward, S.H., Perraton, L., Bennell, K., Pietrosimone, B., Bryant, A.L. (2019). Deficits in Quadriceps Force Control After Anterior Cruciate Ligament Injury: Potential Central Mechanisms. *Journal of Athletic Training*, 54(5):505-512. doi:10.4085/1062-6050-414-17