



ASIMETRIJA KINEMATIČKIH PARAMETARA ZAVOJA U ALPSKOM SKIJANJU KOD REKREATIVNIH SKIJAŠA

KINEMATIC ASYMMETRY OF ALPINE SKIING TURNS IN RECREATIONAL SKIERS

Ivan Bon

Sveučilište u Zagrebu Kineziološki fakultet, Zagreb, Hrvatska

Cite as: Bon I. Asimetrija kinematičkih parametara zavoja u alpskom skijanju kod rekreativnih skijaša.
Croat Sports Med J. 2026; 41(1):90-6.

Corresponding author: Ivan Bon, ivan.bon@kif.unizg.hr
DOI: 10.69589/hsv.41.1.10

SAŽETAK

U alpskom skijanju simetričnost izvedbe lijevog i desnog zavoja predstavlja važan preduvjet za učinkovitu tehniku, ravnotežu i smanjenje rizika od ozljeda. Rekreativni skijaši, za razliku od natjecatelja, često pokazuju izraženiju lateralnu dominaciju jedne noge, što može dovesti do biomehaničkih asimetrija u pokretu. Budući da se tijekom jednog spusta zavoji izvode učestalo, takve se asimetrije mogu kumulativno povećavati te uzrokovati jednostrana preopterećenja i smanjenu učinkovitost izvedbe zavoja.

Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi postoje li razlike u kinematičkim parametrima između lijevih i desnih zavoja kod rekreativnih skijaša te analizirati mogući utjecaj dominacije noge na te razlike.

Uzorak je činilo jedanaest rekreativnih skijaša (desna dominantna noga) koji su izvodili paralelne zavoje na umjerenom nagibu. Kutovi fleksije koljena, fleksije kuka i abdukcije kuka za vanjsku i unutarnju nogu izmjereni su pomoću Xsens MVN BIOMECH Link trodimenzionalnog inercijskog sustava za analizu pokreta. Analiza je provedena u trenutku kada su skije bile paralelne s padnom linijom. Za utvrđivanje razlika primijenjen je Hotellingov T^2 test te univarijatni test za svaku varijablu.

Rezultati su pokazali značajan multivarijatni učinak smjera zavoja na skup promatranih varijabli ($p < 0,01$). Univarijatni testovi potvrdili su statistički značajne razlike u fleksiji koljena ($p < 0,01$), fleksiji kuka ($p = 0,02$) i abdukciji kuka ($p = 0,01$) vanjske noge, dok u parametrima unutarnje noge nije bilo razlika. Veće vrijednosti ovih kinematičkih parametara zabilježene su u lijevom zavoju, u kojem dominantna desna noga preuzima ulogu vanjske noge.

ABSTRACT

In alpine skiing, the symmetry of left and right turns represents an essential prerequisite for effective technique, balance, and reduced injury risk. Recreational skiers, unlike competitive athletes, often exhibit a pronounced lateral dominance of one leg, which can lead to biomechanical asymmetries in movement execution. Since turns are repeated numerous times during a single descent, such asymmetries may accumulate over time, potentially causing unilateral overloads and reducing turn efficiency.

The aim of this study was to determine whether differences exist in kinematic parameters between left and right turns among recreational skiers and to analyze the potential influence of leg dominance on these differences.

The sample consisted of eleven recreational skiers (right-leg dominant) who performed parallel turns on a moderately inclined slope. Knee flexion, hip flexion, and hip abduction angles for the outside and inside leg were recorded using the Xsens MVN BIOMECH Link three-dimensional inertial motion capture system. The analysis focused on the moment when the skis were parallel to the fall line. Differences between turns were assessed using Hotelling's T^2 multivariate test and univariate analyses for each variable.

The results revealed a statistically significant multivariate effect of turn direction on the set of observed variables ($p < 0.01$). Univariate tests confirmed significant differences in knee flexion ($p < 0.01$), hip flexion ($p = 0.02$), and hip abduction ($p = 0.01$) of the outside leg, whereas no significant differences were found for the inside leg. Higher values of these kinematic parameters were recorded

Dobiveni nalazi ukazuju da kod rekreativnih skijaša postoji izražena biomehanička asimetrija između lijevih i desnih zavoja, što upućuje na utjecaj neuromišićne dominacije i nedovoljnu tehničku automatizaciju pokreta. Takve asimetrije mogu doprinijeti jednostranom umaranju i povećanom riziku od preopterećenja mišićno-zglobnih struktura. Stoga bi trenažni i edukacijski proces kod rekreativnih skijaša trebao uključivati vježbe usmjerene na razvoj tehnike, ravnoteže, jakosti i snage.

Ključne riječi: alpsko skijanje, kinematika, asimetrija, dominantna noga, prevencija ozljeda

in the left turn, where the dominant right leg acted as the outside leg.

The findings indicate that recreational skiers exhibit a pronounced biomechanical asymmetry between left and right turns, reflecting the influence of neuromuscular dominance and insufficient technical automatization. Such asymmetries may contribute to unilateral fatigue and increase the risk of overloading musculoskeletal structures. Therefore, training and educational programs for recreational skiers should include exercises focused on the development of turn symmetry, technical precision, and balance between the left and right sides of the body.

Keywords: alpine skiing, kinematics, asymmetry, dominant leg, injury prevention

UVOD

Alpsko skijanje predstavlja kompleksnu motoričku aktivnost u kojoj uspješnost izvedbe ovisi o preciznoj koordinaciji pokreta, stabilnosti i prilagodbi tijela dinamičkim uvjetima podloge. Biomehanički gledano, skijaški zavoj uključuje sinkronizirano djelovanje više zglobova donjih ekstremiteta i trupa, a njegova pravilna izvedba zahtijeva visoku razinu tehnike. S obzirom da se tijekom savladavanja padine ciklično izmjenjuju lijevi i desni zavoji vrlo je važno da oni budu biomehanički što sličniji^{13,22}. Simetrična izvedba zavoja omogućuje optimalnu raspodjelu opterećenja, učinkovit prijenos sila i stabilnu kontrolu gibanja, dok izražene asimetrije mogu utjecati na učinkovitost izvedbe, povećati jednostrano mišićno opterećenje i dugoročno doprinijeti pojavi ozljeda⁹.

Tijekom izvedbe zavoja, skijaš prolazi kroz nekoliko faza koje se biomehanički razlikuju prema ulozi donjih ekstremiteta odnosno pokretima koji se izvode. U fazi inicijacije dolazi do prijenosa težine tijela i početnog usmjeravanja skija prema novom smjeru, zatim slijedi faza opterećivanja (dodavanja pritiska) skija u kojoj vanjska noga preuzima dominantnu funkciju stvaranja sile reakcije podloge. U fazi izlaska iz zavoja dolazi do postupnog smanjenja opterećenja na skijama i odmicanja skija sa rubnika te prijenosa težine na drugu nogu. Tijekom tih faza, kinematički parametri poput kuta fleksije koljena i kuka te kuta abdukcije kuka imaju ključnu ulogu u stabilnosti, prijenosu težine i prilagodbi nagibu skija – kutu rubljenja^{2,17}. Veća fleksija koljena i kuka povezuje se s aktivnijom ulogom vanjske noge u kontroli zavoja i smanjenju torzijskog opterećenja koljena, dok abdukcija kuka utječe na položaj tijela u odnosu na padnu liniju koji onda omogućuje opterećenje na vanjskoj nozi tijekom zavoja^{5,3}.

Istraživanja provedena na elitnim skijašima pokazala su postojanje biomehaničkih asimetrija između lijevog

i desnog zavoja, iako one nisu nužno vidljive golim okom^{22,1}. Supej i sur. (2020) istaknuli su da razlike u kutovima fleksije i abdukcije te vremenu opterećenja nogu tijekom zavoja proizlaze iz neuromuskularne dominacije i različite strategije upravljanja opterećenjem između nogu²². Alhammoud i sur. (2020) dodatno su pokazali da se asimetrije javljaju i ovisno o disciplini te o konfiguraciji terena, pri čemu je dominantna noga sklonija preuzimanju stabilizacijske uloge bez obzira na smjer zavoja¹. Iako su te razlike kod elitnih skijaša minimalne, njihovo razumijevanje od posebne je važnosti za analizu rekreativne populacije, kod koje se očekuje niža razina tehničke stabilnosti i veća varijabilnost pokreta^{13,6}.

Kod rekreativnih skijaša biomehanička simetrija često je narušena zbog manjeg stupnja automatizacije motoričkih obrazaca, niže razine proprioceptivne kontrole te izražene lateralne dominacije. Vaverka i Vodickova (2010) ukazali su na to da lateralnost donjih ekstremiteta, odnosno funkcionalna dominacija jedne noge, uzrokuje razlike u raspodjeli sila i kinematičkim parametrima između lijevog i desnog zavoja²³. Kod većine populacije dominantna je desna noga, koja u lijevom zavoju preuzima funkciju vanjske noge. Posljedično se javljaju veće vrijednosti fleksije koljena i kuka te abdukcije kuka u lijevom zavoju, dok u desnom zavoju, u kojem desna noga ima unutarnju ulogu, pokreti često ostaju ograničeniji². Ovakva biomehanička neujednačenost ne mora nužno predstavljati tehničku pogrešku, već može biti odraz neuromuskularne strategije i funkcionalne adaptacije.

Recentna istraživanja provedena uporabom inercijskih senzora i trodimenzionalnih sustava za analizu pokreta dodatno su unaprijedila razumijevanje biomehaničkih obrazaca u skijanju^{4,15,6}. Takvi sustavi omogućuju visoku razinu preciznosti u mjerenju kutova zglobova i dinamike pokreta u stvarnim uvjetima skijanja, čime se otvara mogućnost detaljne analize simetrije zavoja. Komissarov (2020) naglašava da analiza kinematičkih parametara

u različitim fazama zavoja omogućuje prepoznavanje tehničkih odstupanja i biomehaničkih prilagodbi koje se ne mogu detektirati vizualnim opažanjem¹¹. Nadalje, studije poput one Supeja i sur. (2023) ukazuju na to da geometrija skija i tehnički detalji izvedbe utječu na mehaniku zavoja te time posredno i na potencijalnu pojavu asimetrije²⁰.

Osim u kontekstu skijaške tehnike i izvedbe, asimetrije u zavojima imaju značajnu ulogu i kada se promatraju u kontekstu rizika od ozljeđivanja. Dugotrajno ponavljanje jednostranih obrazaca opterećenja može uzrokovati mišićno-koštane disbalanse, preopterećenja i mikrotraume, što povećava rizik od ozljeda koljena, kuka i lumbalne regije^{9,10}. Hébert-Losier i Holmberg (2013) ističu da neuravnoteženi obrasci gibanja kod rekreativnih skijaša predstavljaju jedan od glavnih rizičnih čimbenika za razvoj ozljeda prednjeg križnog ligamenta (ACL), tendinopatija i kroničnih bolova u donjim ekstremitetima⁹. Sustavno praćenje simetrija i ciljane korekcija slabije strane mogu stoga imati važnu ulogu u prevenciji ozljeda te u očuvanju funkcionalne ravnoteže skijaša.

Unatoč velikom broju studija usmjerenih na biomehaniku elitnih skijaša, podaci o rekreativnoj populaciji i dalje su ograničeni. S obzirom na to da se kod rekreativaca biomehanički obrasci tek formiraju i nisu u potpunosti automatizirani, očekuje se veći stupanj varijabilnosti i izraženija lateralna asimetrija². Razumijevanje tih razlika važno je ne samo za tehničku analizu izvedbe, već i za planiranje edukacijskih i trenažnih programa koji će pridonijeti uravnoteženom razvoju motoričkih sposobnosti i tehnike alpskog skijanja.

Slijedom navedenog, cilj ovog istraživanja bio je utvrditi postoje li razlike u kinematičkim parametrima – kutu fleksije koljena, fleksije kuka i abdukcije kuka – između lijevog i desnog zavoja kod rekreativnih skijaša. Autor pretpostavlja da će se razlike očitovati osobito kod vanjske noge, a da će one biti izraženije u zavoju u kojem dominantna noga preuzima ulogu vanjske noge u zavoju. Dobiveni rezultati mogli bi doprinijeti boljem razumijevanju biomehaničkih uzroka asimetrije u skijanju te poslužiti kao temelj za oblikovanje trenažnih i preventivnih programa usmjerenih na razvoj simetrične i učinkovite skijaške tehnike te smanjenja rizika od ozljeđivanja.

METODE

Uzorak ispitanika

U istraživanju je sudjelovalo 11 ispitanika ($M=9$, $\check{Z}=2$), rekreativnih skijaša sa završenom osnovnom školom skijanja koji skijaju barem tjedan dana godišnje 5 godina zaredom. Prosječna dob, visina i tjelesna masa iznosile su $23,5 \pm 2,4$ godina, $174,1 \pm 6,2$ cm i $81,6 \pm 7,8$ kg. Svi ispitanici naveli su desnu nogu kao dominantnu. Ispitanici dali su pisani pristanak za sudjelovanje u ovom istraživanju nakon što su bili detaljno upoznati s ciljevima i protokolom istraživanja. Etičko povjerenstvo Sveučilišta u Zagrebu Kineziološkog fakulteta (Hrvatska) odobrilo je protokol testiranja i studiju

koja je provedena u skladu s etičkim standardima Helsinške deklaracije (broj odobrenja - 107/2020).

Protokol istraživanja

Svi parametri mjerili su se prilikom izvedbe elementa paralelni zavoj od brijega u definiranom i omeđenom koridoru. Promatrala su se razlike u izvedbi navedenog elementa između lijevih i desnih zavoja kod rekreativnih skijaša. Ispitanici su izvodili ukupno 24 zavoja od kojih je analizirano njih 20 (10 u svaku stranu). Parametri su izmjereni u drugoj fazi zavoja (prolazak kroz padnu liniju) u trenutku kada su skije paralelne sa padnom linijom.

Kinematički parametri mjereni su sustavom inercijskog odijela Xsens MVN Link. Sustav se sastoji od 17 trodimenzionalnih senzora koji sadrže akcelerometar, žiroskop, magnetometar, bateriju i tvrdi disk. Odijelo je tanko i usko kako bi prijanjalo uz tijelo ispitanika te su žice i senzori prekriveni tkaninom i ne ometaju ispitanika prilikom izvedbe. Brzina uzorkovanja postavljena je na 240 Hz. Prije početka mjerenja provedena je kalibracija čiji je protokol određen od strane proizvođača (Xsens technologies B.V., Netherlands). Podaci su obrađeni u programu MVN BIOMECH (Xsens, MVN Studio). Pouzdanost i valjanost kinematičkog inercijskog odijela Xsens za analizu kinematičkih parametara u aktivnostima istim ili srodnima alpskom skijanju je potvrđena u provedenim istraživanjima^{4,12,17,19}.

Kinematičke varijable koje su promatrane u istraživanju su sljedeće:

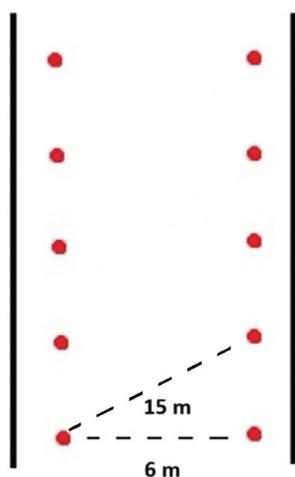
- kut fleksije u zglobu koljena vanjske noge u lijevom i desnom zavoju (V_K_L, V_K_D),
- kut fleksije u zglobu koljena unutarnje noge u lijevom i desnom zavoju (U_K_L, U_K_D),
- kut fleksije u zglobu kuka vanjske noge u lijevom i desnom zavoju (V_F_KUK_L, V_F_KUK_D),
- kut fleksije u zglobu kuka unutarnje noge u lijevom i desnom zavoju (U_F_KUK_L, U_F_KUK_D),
- kut abdukcije u zglobu kuka vanjske noge u lijevom i desnom zavoju (V_A_KUK_L, V_A_KUK_D),
- kut abdukcije u zglobu kuka unutarnje noge u lijevom i desnom zavoju (U_A_KUK_L, U_A_KUK_D).

Izmjerene varijable lijevog i desnog zavoja za svakog ispitanika svedene su na aritmetičke sredine te je statistička analiza provedena na tim podacima.

Varijable su izražene u stupnjevima (°).

Istraživanje je provedeno u skijaškom centru Sappada u Italiji u trajanju od 5 dana. Za potrebe testiranja odabrana je crvena staza srednje strmine. Na skijaškoj stazi postavljen je koridor širine 6 metara i razmaka između vratiju 15 metara koji je bio omeđen vidljivim oznakama (slika 1). Mjerenja su provedena na uređenoj, tvrdoj snježnoj podlozi uz suhe vremenske uvjete i konstantan nagib staze, što je omogućilo standardizirane uvjete za izvođenje protokola mjerenja. Ispitanik je obukao kinematičko odijelo, skijaško odijelo i ostalu skijašku opremu. Svi ispitanici izvodili su testiranje

na jednakim skijama duljine 165 cm i 12 m radijusa. Po dolasku na stazu ispitanik je dobio jasne i detaljne upute o načinu izvođenja zadanog elementa u omeđenom koridoru oko oznake (kratki metodski kolac). Paralelni zavoj izvodio se na standardan način kako se izvodi u školi alpskog skijanja. Nakon dobivenih uputa ispitanici su izvodili jednu probnu vožnju u omeđenom koridoru. Nakon probne vožnje uslijedio je spust tijekom kojeg su se mjerili kinematički parametri. Svi ispitanici izvodili su 24 zavoja u prethodno opisanom elementu, a u završnu analizu i obradu uzeto je u obzir 20 zavoja. Prva dva i posljednja dva zavoja nisu bili analizirani zbog izvođenja zavoja u ujednačenom ritmu i optimalnom brzinom. Brzina kretanja kontrolirana je pomoću Xsens sustava, odnosno preko vremena potrebnog za prolazak kroz omeđeni koridor. U analizu su uključene samo spustevi čije vrijeme prolaska nije odstupalo više od 10% od individualnog prosjeka, dok su vožnje s većim odstupanjem isključene iz obrade.



Slika 1. Prikaz koridora u kojem su ispitanici izvodili paralelni zavoj.

Figure 1. Skiing corridor used for performing the parallel turn.

Obrada podataka

Podaci su analizirani u programu Statistica 14.0.1.25 (TIBCO software, Inc., Palo Alto, CA, USA). Za sve varijable izračunati su osnovni deskriptivni statistički pokazatelji (aritmetička sredina, standardna devijacija). Za usporedbu kinematičkih parametara donjih ekstremiteta između lijevog i desnog zavoja korišten je Hotellingov T^2 test te univarijatna analiza varijance za svaku pojedinačnu varijablu. Statistička značajnost postavljena je na $p < 0.05$.

REZULTATI

Prikazat će se rezultati deskriptivne statistike i testiranja razlika između lijevih i desnih zavoja prilikom izvedbe elementa paralelnog zavoja. Rezultati su usmjereni na definiranje asimetrija kinematičkih parametara donjih ekstremiteta između zavoja kod rekreativnih skijaša.

Tablica 1. Deskriptivni statistički parametri za lijeve i desne zavoje, za svaku promatrano varijablu.

Table 1. Table 1. Descriptive statistical parameters for left and right turns for each analyzed variable.

Varijabla	LIJEVI ZAVOJ	DESNI ZAVOJ
	AS±SD	AS±SD
V_K	155,91±2,43	160,82±4,01
U_K	141,63±3,84	140,53±3,52
V_F_KUK	137,86±5,60	144,03±6,30
U_F_KUK	125,40±9,41	126,85±9,92
V_A_KUK	174,37±1,49	176,39±1,60
U_A_KUK	182,18±1,29	182,22±1,26

Legenda: V_K- Kut fleksije u zglobu koljena vanjske noge; U_K- Kut fleksije u zglobu koljena unutarnje noge; V_F_KUK- Kut fleksije u zglobu kuka vanjske noge; U_F_KUK- Kut fleksije u zglobu kuka unutarnje noge; V_A_KUK- Kut abdukcije u zglobu kuka vanjske noge; U_A_KUK- Kut abdukcije u zglobu kuka unutarnje noge.

Tablica 1. prikazuje osnovne deskriptivne statističke parametre svih promatranih varijabli. Uočen je trend viših vrijednosti kuta fleksije koljena i kuka vanjske noge te nešto više i kuta abdukcije kuka vanjske noge u desnom zavoju u odnosu na lijevi. S druge strane, razlike u fleksiji i abdukciji kuka unutarnje noge bile su minimalne, što ukazuje na to da se asimetrije uglavnom odnose na vanjsku nogu, koja ima dominantnu ulogu u kontroli smjera kretanja, doziranju opterećenja i održavanju stabilnosti tijekom zavoja.

Tablica 2. Hotellingov T-kvadrat test za utvrđivanje razlika između lijevih i desnih zavoja.

Table 2. Table 2. Hotelling's T-squared test for determining differences between left and right turns.

Efekt	Test	Vrijednost	F	p
Grupa	Hotelling	3,1	7,70	<0,01*

*p=razina statističke značajnosti

Tablica 2. prikazuje rezultate Hotellingovog T^2 testa korištenog za utvrđivanje ukupnih razlika između lijevog i desnog zavoja. Multivarijatna analiza pokazala je statistički značajnu razliku između zavoja ($F = 7,70$; $p < 0,001$), što potvrđuje postojanje ukupne asimetrije u promatranom skupu kinematičkih varijabli.

Detaljniji prikaz pojedinačnih razlika prikazan je u Tablici 3. Rezultati univarijatnih testova pokazali su da su statistički značajne razlike između lijevog i desnog zavoja prisutne u kutu fleksije koljena vanjske noge ($p < 0,01$), fleksije kuka vanjske noge ($p = 0,02$) i abdukcije kuka vanjske noge ($p = 0,01$). U varijablama koje se odnose na unutarnju nogu nisu utvrđene značajne razlike. Ovakav obrazac rezultata sugerira da razlike između lijevog i

Tablica 3. Prikaz rezultata univarijatnog testa za svaku pojedinačnu varijablu između lijevih i desnih zavoja.

Table 3. Results of the univariate test for each individual variable between left and right turns.

Varijabla	F	p
V_K	12,05	<0,01*
U_K	0,49	0,49
V_F_KUK	5,87	0,02*
U_F_KUK	0,12	0,73
V_A_KUK	9,38	0,01*
U_A_KUK	0,01	0,94

Legenda: V_K- Kut fleksije u zglobu koljena vanjske noge; U_K- Kut fleksije u zglobu koljena unutarnje noge; V_F_KUK- Kut fleksije u zglobu kuka vanjske noge; U_F_KUK- Kut fleksije u zglobu kuka unutarnje noge; V_A_KUK- Kut abdukcije u zglobu kuka vanjske noge; U_A_KUK- Kut abdukcije u zglobu kuka unutarnje noge; *= p<0,05.

desnog zavoja proizlaze primarno iz pokreta vanjske noge, koja u svakoj fazi zavoja preuzima većinu opterećenja i dominantno je odgovorna za izvedbu zavoja. Rezultati potvrđuju da kod rekreativnih skijaša postoji izražena asimetrija u izvedbi zavoja promatrajući kinematičke parametre donjih ekstremiteta.

RASPRAVA

Rezultati ovog istraživanja pokazali su postojanje statistički značajnih razlika u kinematičkim parametrima između lijevih i desnih zavoja kod rekreativnih skijaša, što potvrđuje hipotezu o prisutnosti asimetrije u izvođenju skijaškog zavoja. Multivarijatna analiza (Hotelling's T² test) ukazala je na značajan ukupni učinak smjera zavoja na skup promatranih varijabli, dok su univarijatni testovi potvrdili da se značajne razlike javljaju u kutu fleksije koljena, fleksije kuka i abdukcije kuka vanjske noge. Kod rekreativnih skijaša s dominantnom desnom nogom veće vrijednosti fleksije i abdukcije uočene su u lijevom zavoju, u kojem desna noga preuzima ulogu vanjske noge.

Ovi rezultati u skladu su s ranijim istraživanjima koja su ukazala na biomehaničku i funkcionalnu asimetriju između lijevih i desnih zavoja, osobito kod manje iskusnih i rekreativnih skijaša^{23,22}. Vaverka i Vodickova (2010) navode da lateralna dominacija, tj. prevladavajuća upotreba jedne noge, utječe na raspodjelu opterećenja i promjenu mehanike pokreta između zavoja, što rezultira različitim kinematičkim i kinetičkim profilima²³. Supej i sur. (2020) dodatno ističu da čak i kod elitnih skijaša postoji mjerljiva, iako manja, asimetrija između lijevog i desnog zavoja, što potvrđuje da potpuna simetrija u izvedbi skijaškog zavoja u praksi gotovo ne postoji²².

Veće vrijednosti fleksije koljena i kuka vanjske noge u lijevom zavoju upućuju na to da rekreativni skijaši koriste

dominantnu nogu za bolju kontrolu zavoja i održavanje ravnoteže, dok je u desnom zavoju, kada je dominantna noga unutarnja, kontrola i stabilnost smanjena. Ovakav obrazac ukazuje na neuromišićnu asimetriju koja proizlazi iz dominacije jedne strane tijela, što je ranije potvrđeno i u biomehaničkim analizama drugih motoričkih aktivnosti^{8,24}. Uloga vanjske noge u zavoju je ključna — ona preuzima većinu opterećenja, generira silu za promjenu smjera i omogućuje regulaciju radijusa zavoja^{13,3}. Zbog toga je razumljivo da razlike u aktivaciji i položaju vanjske noge značajno doprinose ukupnoj asimetriji pokreta. Na ovu biomehaničku razliku može dodatno ukazivati i asimetrija sila pritiska ispod stopala. Ranija istraživanja također pokazuju da se u situacijama kada dominantna noga preuzima ulogu vanjske noge bilježe veće vrijednosti sile reakcije podloge, odnosno veći plantarni pritisak u fazi maksimalnog opterećenja^{7,14}. Takvo veće opterećenje može se povezati s većim kutovima fleksije u koljenu i kuku te s većom abdukcijom kuka, što je u skladu i s rezultatima ovog istraživanja.

Biomehanički gledano, povećana fleksija kuka i koljena vanjske noge povezana je s potrebom za većom stabilnošću i kontrolom sila koje djeluju na skijaša tijekom zavoja. Navedeno se posebno odnosi na trenutak kada su skije paralelne s padnom linijom pa sve do kraja zavoja. U tom trenutku vanjska noga amortizira najveći dio vertikalnih i lateralnih sila^{7,18}. Kod rekreativnih skijaša ta faza pokreta često je manje sinkronizirana između lijevog i desnog zavoja, što može biti posljedica neujednačenog mišićnog tonusa, slabije proprioceptivne kontrole ili jednostrano razvijene motoričke automatizacije lijeve i desne noge^{4,6}.

Razlike u abdukciji kuka također su važne jer ukazuju na promjene u lateralnoj stabilizaciji trupa. Veća abdukcija u zavoju s vanjskom dominantnom nogom sugerira snažniju aktivaciju mišića abduktora kuka, što doprinosi boljoj stabilnosti trupa i kontroli nagiba tijela^{1,3}. Ako se pritom ostvaruje i veći nagib tijela, takav nalaz može se povezati i s kvalitetnijom tehnikom zavoja, odnosno boljom koordinacijom položaja tijela, ali i s većom jakosti mišića koji sudjeluju u stabilizaciji zdjelice i trupa. Suprotno tome, u zavoju u kojem je dominantna noga unutarnja, manja abdukcija može rezultirati smanjenom lateralnom stabilnošću zbog nemogućnosti primjene sile na vanjsku nogu. Prema tome, asimetrija u ovom parametru vjerojatno je posljedica tehničkih i neuromišićnih čimbenika zajedno. Također, navedeno potencijalno može rezultirati i većim rizikom od neželjenih rotacijskih kompenzacija u području koljena.

Praktična važnost ovih rezultata ogleda se u kontekstu prevencije ozljeda. Pojedina istraživanja pokazuju da je upravo asimetrično opterećenje donjih ekstremiteta povezano s većim rizikom od kroničnih preopterećenja, mišićnih disbalansa i ozljeda koljena, osobito prednjeg križnog ligamenta^{16,9}. U rekreativnom skijanju, gdje automatizacija pokreta nije na razini natjecatelja, takve asimetrije mogu s vremenom dovesti do kumulativnog

umora jedne strane tijela te promjena u uzorcima aktivacije mišića, što povećava rizik od akutnih i kroničnih ozljeda. S obzirom na to, cilj trenažnog procesa i edukacije rekreativnih skijaša trebao bi biti smanjenje razlika u izvedbi između lijevog i desnog zavoja, posebice kroz vježbe ravnoteže, bilateralne kontrole i propriocepcije te kroz razvoj pravilne tehnike samog zavoja^{9,5}.

Ograničenja ovog istraživanja odnose se prije svega na veličinu uzorka i razinu skijaškog znanja ispitanika, koja je mogla utjecati na varijabilnost rezultata. Uzorak od 11 ispitanika relativno je malen, što smanjuje mogućnost generalizacije rezultata na širu rekreativnu populaciju. Također, mjerenja su provedena u jednoj točki zavoja — trenutku kada su skije paralelne s padnom linijom — što ne obuhvaća cijeli dinamički slijed promjene smjera. Buduća istraživanja trebala bi uključiti analizu cjelokupnog zavoja, kao i dodatne kinetičke varijable. Mjerenjem sila na pojedinim regijama stopala omogućilo bi se dublje razumijevanje uzroka asimetrije.

Nadalje, bilo bi korisno usporediti rekreativne i natjecateljske skijaše kako bi se utvrdilo u kojoj mjeri iskustvo i automatizacija pokreta smanjuju funkcionalne asimetrije. Integracija sustava inercijskih senzora s mjerenjima kinetičkih varijabli^{8,15} omogućila bi precizniju i ekološki valjaniju analizu razlika u realnim uvjetima skijanja.

Rezultati ovog istraživanja potvrđuju postojanje biomehaničkih asimetrija između lijevih i desnih zavoja kod rekreativnih skijaša, osobito u parametrima fleksije i abdukcije vanjske noge. Takve razlike odražavaju neuromišićnu dominaciju i nedovoljnu tehničku usklađenost između zavoja. Iako ove asimetrije ne moraju nužno uzrokovati ozljedu, njihovo dugotrajno ponavljanje može

povećati jednostrano opterećenje mišićno-zglobnih struktura, smanjiti učinkovitost pokreta i povećati rizik od ozljeda. Stoga se preporučuje usmjeravanje pažnje instruktora i trenera na razvoj tehnike oba zavoja podjednako kroz ciljane metodičke vježbe.

ZAKLJUČAK

Provedenim istraživanjem utvrđene su statistički značajne razlike u kinematičkim parametrima između lijevih i desnih zavoja kod rekreativnih skijaša, čime je potvrđena hipoteza o prisutnosti asimetrije u izvedbi skijaškog zavoja. Najveće razlike zabilježene su u fleksiji koljena, fleksiji kuka i abdukciji kuka vanjske noge, dok kod unutarnje noge nije utvrđena značajna razlika između zavoja. Dobiveni nalazi upućuju na to da neuromišićna dominacija i manja tehnička automatiziranost pokreta uzrokuju izraženiju asimetriju kod rekreativnih skijaša, osobito u fazi zavoja kada dominantna noga preuzima ulogu vanjske noge.

Praktična važnost ovih rezultata ogleda se u potrebi za razvojem što simetričnije tehnike zavoja, čime se može smanjiti jednostrano opterećenje donjih ekstremiteta i rizik od preopterećenja ili ozljeda, osobito koljena. U edukaciji i trenažnom procesu rekreativnih skijaša preporučuje se sustavno praćenje i korekcija biomehaničkih asimetrija kroz ciljane vježbe ravnoteže, propriocepcije, jakosti, snage i bilateralne kontrole pokreta.

Buduća istraživanja trebala bi uključiti veći uzorak ispitanika, analizu cjelovitog zavoja te prošireni set kinematičkih i kinetičkih varijabli, kako bi se detaljnije razumjeli mehanizmi koji uzrokuju funkcionalne asimetrije i njihov utjecaj na učinkovitost izvedbe i prevenciju ozljeda.

Literatura

- Alhammoud M, Hansen C, Meyer F, Hautier C, Morel B. On-field ski kinematic according to leg and discipline in elite alpine skiers. *Front Sports Act Living*. 2020;2:56.
- Bon I. Razlike u kinematičkim i kinetičkim pokazateljima zavoja između skijaša različite razine skijaškoga znanja [disertacija]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Kineziološki fakultet; 2025.
- Bon I, Očić M, Cigrovski V, Rupčić T, Knjaz D. What are kinematic and kinetic differences between short and parallel turn in alpine skiing. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(6):3029.
- Brodie M, Walmsley A, Page W. Fusion motion capture: A prototype system using inertial measurement units and GPS for the biomechanical analysis of ski racing. *Sports Technol*. 2008;1(1):17–28.
- Cigrovski V, Očić M, Bon I, Matković B, Šagát P. Inline skating as an additional activity for alpine skiing: The role of the outside leg in short turn performance. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(3):1747.
- Debertin D, Wachholz F, Mikut R, Federolf P. Quantitative downhill skiing technique analysis according to ski instruction curricula: a proof-of-concept study applying principal component analysis on wearable sensor data. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022;10:1003619.
- Falda-Buscaiot T, Hintzy F, Rougier P, Lacouture P, Coulmy N. Influence of slope steepness, foot position and turn phase on plantar pressure distribution during giant slalom alpine ski racing. *PLoS One*. 2017;12(5):e0176975.
- Federolf PA. Quantifying instantaneous performance in alpine ski racing. *J Sports Sci*. 2012;30(10):1063–8.
- Hébert-Losier K, Holmberg HC. What are the exercise-based injury prevention recommendations for recreational alpine skiing and snowboarding? A systematic review. *Sports Med*. 2013;43(5):355–66.
- Heinrich D, van den Bogert AJ, Mössner M, i sur. Model-based estimation of muscle and ACL forces during turning maneuvers in alpine skiing. *Sci Rep*. 2023;13:9026.
- Komissarov SS. Balanced carving turns in alpine skiing. *Sports Biomech*. 2020;22(9):1209–42.
- Krüger A, Edelmann-Nusser J. Application of a full body inertial measurement system in alpine skiing: a comparison with an optical video based system. *J Appl Biomech*. 2010;26(4):516–21.
- Müller E, Schwameder H. Biomechanical aspects of new techniques in alpine skiing and ski-jumping. *J Sports Sci*. 2003;21:679–92.
- Nakazato K, Scheiber P, Müller E. A comparison of ground reaction forces determined by portable force-plate and pressure-insole systems in alpine skiing. *J Sports Sci Med*. 2011;10(4):754–62.
- Neuwirth C, Snyder C, Kremser W, Brunauer R, Holzer H, Stöggl T. Classification of alpine skiing styles using GNSS and inertial measurement units. *Sensors (Basel)*. 2020;20(15):4232.
- Spörri J, Müller E, Kröll J. “When you’re down, stay down”: a lesson for all competitive alpine skiers supported by an ACL rupture measured in vivo. *J Sport Health Sci*. 2022;11(1):14–20.
- Supej M. 3D measurements of alpine skiing with an inertial sensor motion capture suit and GNSS RTK system. *J Sports Sci*. 2010;28:759–69.
- Supej M, Hébert-Losier K, Holmberg HC. Impact of the steepness of the slope on the biomechanics of World Cup slalom skiers. *Int J Sports Physiol Perform*. 2015;10(3):361–8.
- Supej M, Holmberg HC. A new time measurement method using a high-end global navigation satellite system to analyze alpine skiing. *Res Q Exerc Sport*. 2011;82(3):400–11.
- Supej M, Kalén A, Verdel N, Ogrin J, Holmberg HC. The contribution of ski poles to aerodynamic drag in alpine skiing. *Appl Sci*. 2023;13(14):8152.
- Supej M, Kipp R, Holmberg HC. Mechanical parameters as predictors of performance in alpine World Cup slalom racing. *Scand J Med Sci Sports*. 2011;21(6):e72–e81.
- Supej M, Ogrin J, Šarabon N, Holmberg HC. Asymmetries in the technique and ground reaction forces of elite alpine skiers influence their slalom performance. *Appl Sci*. 2020;10:7288.
- Vaverka F, Vodickova S. Laterality of the lower limbs and carving turn. *Biol Sport*. 2010;27:129–34.
- Zorko M, Nemeč B, Babič J, Lešnik B, Supej M. The waist width of skis influences the kinematics of the knee joint in alpine skiing. *J Sports Sci Med*. 2015;14(3):606–19.