

Sveučilište u Zagrebu

KINEZIOLOŠKI FAKULTET

Dalibor Francěski

MORFOLOŠKO VREDNOVANJE PROMJENA PLOČE RASTA PROKSIMALNOG DIJELA HUMERUSA U MLADIH ASIMPTOMATSKIH ODBOJKAŠICA METODOM MAGNETSKE REZONANCIJE

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2026.

Sveučilište u Zagrebu

KINEZIOLOŠKI FAKULTET

Dalibor Francěski

MORPHOLOGICAL EVALUATION OF CHANGES IN THE GROWTH PLATE OF THE PROXIMAL HUMERUS IN YOUNG ASYMPTOMATIC VOLLEYBALL PLAYERS BY THE MAGNETIC RESONANCE METHOD

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2026.

Sveučilište u Zagrebu

KINEZIOLOŠKI FAKULTET

Dalibor Francěski

MORFOLOŠKO VREDNOVANJE PROMJENA PLOČE RASTA PROKSIMALNOG DIJELA HUMERUSA U MLADIH ASIMPTOMATSKIH ODBOJKAŠICA METODOM MAGNETSKE REZONANCIJE

Mentori:

Prof. dr. sc. Branka Matković

Prof. dr. sc. Igor Borić

Zagreb, 2026.

Sveučilište u Zagrebu

KINEZIOLOŠKI FAKULTET

Dalibor Francěski

MORPHOLOGICAL EVALUATION OF CHANGES IN THE GROWTH PLATE OF THE PROXIMAL HUMERUS IN YOUNG ASYMPTOMATIC VOLLEYBALL PLAYERS BY THE MAGNETIC RESONANCE METHOD

Supervisors:

Prof. dr. sc. Branka Matković

Prof. dr. sc. Igor Borić

Zagreb, 2026.

Informacije o mentorima

BRANKA MATKOVIĆ, rod. Jeričević, rođena je 30. svibnja 1953. godine u Borovu. Hrvatica je i državljanka Republike Hrvatske. Osnovnu školu i gimnaziju završila je u Zagrebu s odličnim uspjehom. Godine 1971. upisala je Medicinski fakultet u Zagrebu na kojemu je diplomirala 1977. godine. Obvezni liječnički staž obavila je u Kliničkom bolničkom centru Sestre milosrdnice u Zagrebu. Stručni ispit položila je u travnju 1979. godine pri Republičkom komitetu za zdravstvenu i socijalnu zaštitu u Zagrebu. Na Medicinskom fakultetu u Zagrebu upisala je 1978. godine postdiplomski studij Sportske medicine na kojemu je diplomirala 1981. godine. U rujnu 1983. godine završila je izradu magistarskog rada pod naslovom Normativne vrijednosti aerobnog kapaciteta i respiracijskih funkcija učenika starih 15 godina i uspješno ga obranila u prosincu iste te godine. Doktorsku disertaciju pod naslovom Relacije aerobnog kapaciteta i morfoloških karakteristika u djece obranila je u prosincu 1990. godine. U srpnju 1979. godine zaposlila se na Fakultetu za fizičku kulturu Sveučilišta u Zagrebu kao pripravnica na Katedri za kineziološku fiziologiju i patologiju. Sudjeluje u izvođenju vježbi iz Kineziološke fiziologije, Sportske medicine i Biološke antropologije. U listopadu 1980. godine postaje asistentica iz Kineziološke fiziologije te vodi vježbe na redovnom studiju Fakulteta fizičke kulture i na postdiplomskim studijima Medicine rada i Sportske medicine Medicinskog fakulteta u Zagrebu te postdiplomskom studiju Šumarskog fakulteta u Zagrebu. Od 2000. godine nositeljica je predmeta Fiziologija sporta i vježbanja u okviru redovitih i izvanrednih studija. Godinu dana nakon postaje nositeljica predmeta Dijagnostika u sportu na doktorskom studiju Kineziološkog fakulteta, a od 2008. godine i izbornog predmeta Fiziologija sporta u ekstremnim uvjetima. Sudjeluje u nastavi u okviru izbornog predmeta Sportska medicina na Medicinskom fakultetu u Zagrebu te u nastavi poslijediplomskih specijalističkih studija istog fakulteta u okviru Fizikalne medicine i rehabilitacije te Medicine rada i sporta. Bila je mentorica većeg broja diplomskih radova studenata Kineziološkog fakulteta te 12 magistarskih radova i devet doktorskih disertacija. U studenome 1992. godine izabrana je u zvanje znanstvene suradnice za područje medicine. Godine 2003. promaknula se u zvanje više znanstvene suradnice, a 2009. godine postaje znanstvena savjetnica. U veljači 1997. godine izabrana je za docenticu na predmetu Kineziološka fiziologija. U svibnju 2003. godine postaje izvanredna profesorica na istom predmetu, a u listopadu 2009. godine na predmetu Fiziologija sporta i vježbanja postaje redovita profesorica. U trajno zvanje izabrana je 29. listopada 2015. godine. Od 1997. do 2001. godine obavljala je dužnost zamjenice predstojnika Zavoda za kineziološku

antropologiju, a od listopada 2001. godine u dva mandata bila je prodekanica za znanstveni rad Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Od listopada 2005. godine bila je predstojnica Zavoda za Kineziološku antropologiju i metodologiju Kineziološkog fakulteta u dva mandata. Predstojnica je Katedre za medicinu sporta i vježbanja od 2010. godine. Od 2013. do 2022. bila je savjetnica dekana za nastavu i studente. Bila je voditeljica projekata Alpsko skijanje (1996. - 2002.) i Primijenjena fiziologija tenisa (2002. - 2006.) na Kineziološkom fakultetu pod pokroviteljstvom Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske, ali i voditeljica projekta Znanje o prehrani i prehrambene navike sportaša koji je dio programa Zdravstveni aspekti tjelesne aktivnosti pod pokroviteljstvom Ministarstva znanosti, odgoja i sporta Republike Hrvatske (2007. - 2014.). Također je bila voditeljica projekta Oksidacijski stres uzrokovan nogometnom utakmicom (2015. - 2017.) te projekta Utjecaj različite izvedbe miofascijalnog samoopuštanja pjenastim valjkom na sindrom odgođene mišićne boli (2017. - 2019.). U okviru svojeg istraživačkog rada sudjelovala je kao članica ekipe u većem broju znanstvenih projekata, a trenutačno je istraživačica na projektu Genske predispozicije za sport i promjena biomarkera starenja organizma uslijed rekreativnog bavljenja sportom koji je financirao CEKOM MD. Od 1995. godine urednica je časopisa Hrvatski športskomedicinski vjesnik u izdanju Hrvatskog olimpijskog odbora. Časopis redovito izlazi od 1985. godine, a bavi se tematikom sportske medicine. Od 2001. godine glavna je urednica istog časopisa. Od 2017. godine članica je uredništva časopisa Teorìâ ta Metodika Fìzičnogo Vihovannâ. Aktivno sudjeluje u radu Društva za sportsku medicinu Hrvatskog liječničkog zbora. Bila je u dva mandata članica Upravnog vijeća Hrvatskog košarkaškog saveza i Vijeća Hrvatske olimpijske akademije. Također je članica Komisije za skrb o ženama u sportu Hrvatskog olimpijskog odbora.

IGOR BORIĆ, dr. med., primarijus, afirmirani je stručnjak u području muskuloskeletne radiologije s posebnim interesom za dijagnostiku sportskih ozljeda te dijagnostiku oštećenja i regeneracije zglobne hrskavice i prvi u Hrvatskoj uvodi njeno biokemijsko oslikavanje magnetskom rezonancijom.

Nakon diplome na Medicinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, specijalizira radiologiju u KBC Zagreb, magistrira, te doktorira 2011. godine s disertacijom „Procjena i klasifikacija početnog oštećenja hrskavice koljena magnetskom rezonancijom“.

Dr. sc. Igor Borić profesor je radiologije na Katedri za radiologiju Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, Splitu i Mostaru. Iskustvo kliničkog radiologa prof. dr. sc. Borić stječe kroz rad u Kliničkom zavodu za dijagnostičku i intervencijsku radiologiju Kliničkog bolničkog

centra Zagreb, u Zavodu za dječju radiologiju Klinike za dječje bolesti u Zagrebu kao vršitelj dužnosti pročelnika Zavoda te kao voditelj Kliničke jedinice za muskuloskeletnu radiologiju Kliničkog zavoda za dijagnostičku i intervencijsku radiologiju u Kliničkom bolničkom centru „Sestre milosrdnice“ u Zagrebu. Kao predavač sudjeluje u više poslijediplomskih studija pri Medicinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu i Rijeci: ortopedije, fizikalne medicine i rehabilitacije, zaštite majke i djeteta.

Kao predavač sudjelovao je na brojnim domaćim i međunarodnim kongresima i tečajevima, autor je više poglavlja u stručnim udžbenicima i knjigama te niza stručnih članaka u indeksiranim časopisima.

Član je zdravstvene komisije Hrvatskog olimpijskog odbora. Predsjednik je zdravstvene komisije Hrvatskog teniskog saveza te član zdravstvene komisije Hrvatskog skijaškog saveza, Hrvatskog nogometnog saveza te Hrvatskog rukometnog saveza. Kao voditelj zdravstvene službe i član hrvatske delegacije sudjeluje na ljetnim olimpijskim igrama u Pekingu 2008., Londonu 2012., te Tokiju 2021. godine, zimskim olimpijskim igrama u Vancouveru 2010. i ljetnim i zimskim olimpijskim igrama mladih u Singapuru 2011. i Innsbrucku 2012. godine.

Aktivan je član Hrvatskog liječničkog zbora, Hrvatskog društva radiologa, Europskog društva radiologije i Europskog društva muskuloskeletne radiologije u kojem je obnašao dužnost predsjednika Subkomiteta za sportsku medicinu.

Član je edukacijskog komiteta Europskog društva muskuloskeletne radiologije, a bio je član Znanstvenog odbora i Subkomiteta muskuloskeletne radiologije Europskog kongresa radiologa 2008-2011. godine.

25.9.2014. godine postao je ravnatelj Specijalne bolnice Sv. Katarina.

ZAHVALE

Na ovom mjestu želim izraziti iskrenu i duboku zahvalnost svima koji su svojim znanjem, vremenom, podrškom i dobrom voljom doprinijeli nastanku ove disertacije.

Prije svega, iskreno zahvaljujem svojim mentorima, prof. dr. sc. Branki Matković, i prof. dr. sc Igoru Boriću, na njihovoj neizmjernoj stručnosti, strpljenju i posvećenosti. Njihovi podrška, jasna usmjerenja i otvorenost za razgovor u svakom trenutku bili su od presudne važnosti

Posebnu zahvalnost upućujem gospođi Straži, trenerici ispitanica, čija je iznimna savjesnost, pedantnost i pouzdanost omogućila nesmetanu organizaciju i provedbu istraživanja. Njezino razumijevanje, logistička podrška i profesionalnost značajno su doprinijeli kvaliteti i vjerodostojnosti prikupljenih podataka.

Zahvaljujem gospodinu Antunoviću i dr. Miši, predstavnicima Odbojkaškog kluba Mladost, koji su od samoga početka pružali potporu projektu, sudjelovali u organizaciji i omogućili pristup sportašicama. Njihovo povjerenje i suradnja bili su ključni u realizaciji terenskog dijela istraživanja.

Veliku zahvalnost dugujem i gospođi Kamenarić, administratorici na Kineziološkom fakultetu, čija je susretljivost, spremnost na pomoć i strateško snalaženje u administrativnim postupcima učinili cijeli proces mnogo jednostavnijim i učinkovitijim.

Od srca zahvaljujem prof. dr. sc. Trošt-Bobić, članici povjerenstva, na njezinom angažmanu, konstruktivnim komentarima i istinskom trudu uloženom u unapređenje ovog istraživačkog projekta. Njezina stručna sugestija i savjetodavna podrška bile su iznimna dodana vrijednost.

Veliku zahvalnost upućujem inženjerkama radiologije, Moniki i Morani, čiji je stručan i predan rad na MRI snimanju omogućio da se ovaj projekt provede na visokoj tehničkoj i profesionalnoj razini. Njihova preciznost, organiziranost i predanost poslu ostavili su neizbrisiv trag u cjelokupnoj provedbi istraživanja.

Zahvaljujem dr. Marini Banović i Antei, učenici Gornjogradske gimnazije, na njihovoj pomoći u regrutiranju kontrolne skupine ispitanica. Njihov angažman i volja za suradnjom bili su iznimno važni za ostvarenje metodoloških zahtjeva istraživanja.

Zahvaljujem i dr. Ivi Čuli Dumiću te kolegi Milanu Miloševiću na strateškoj podršci tijekom pisanja rada. Njihovi savjeti, sugestije i motivacija bili su mi dragocjeni u svakom koraku procesa pisanja i uređivanja disertacije.

Na kraju, ali najvažnije, od srca zahvaljujem svojoj obitelji. Njihova podrška, razumijevanje, strpljenje i vjera u mene bili su temelj na kojem je nastao svaki dio ovog rada. Bez njihove stalne prisutnosti, ohrabrenja i ljubavi, ovaj put ne bi bio moguć.

Svima navedenima, kao i svima koji su na bilo koji način doprinijeli ostvarenju ovog istraživanja, upućujem najiskreniju i najdublju zahvalnost.

SAŽETAK

Uvod: Poremećaji koji se razvijaju u ramenu sportaša uključenih u bacačke i sportove s pokretima iznad glave nisu samo akutne ozljede, već često odraz kumulativnih mikrostresova na ploču rasta, koja je anatomski najosjetljivija struktura rastuće kosti. Adolescentni sportaši, osobito oni u fazi ubrzanog rasta (peak height velocity, PHV), pokazuju povećanu biomehaničku ranjivost regije ploče rasta zbog njezine histološke slabosti i dinamičnih hormonalnih promjena u pubertetu. Odbojka, kao sport koji uključuje velik broj ponavljajućih visokoenergetskih pokreta iznad glave (smeč, servis), posebno opterećuje proksimalni humerus, koji je u ovoj dobnoj skupini još uvijek skeletno nezreo.

Cilj i hipoteze: Cilj ovoga istraživanja bio je metodom magnetske rezonancije (MRI) morfološki istražiti i usporediti regiju ploče rasta proksimalnog dijela humerusa u mladih asimptomatskih odbojkašica. U ovom istraživanju postavljene su dvije hipoteze: (1) ponavljani pokreti s visokim opterećenjima u odbojci utječu na zonu rasta u mladih sportašica; (2) u sportašica uključenih u overhead sportove morfološke karakteristike zone rasta proksimalnog humerusa dominantnog ekstremiteta razlikuju se od nedominantne strane. Zbog opservacijskog dizajna obje se provjeravaju na razini statističke povezanosti.

Metodologija: Uzorak je uključivao 32 aktivne odbojkašice (dob 13–16 godina; prosječna dob 14,34 ± 0,97 godina) regrutirane iz Odbojkaškog kluba Mladost Zagreb, sve asimptomatske i bez dokumentirane ozljede ramena u posljednjih 6 mjeseci. MRI snimanja provedena su na početku (M1; n = 32) i na kraju natjecateljske sezone (M2; n = 20; 37,5 % manje) na uređajima Philips Ingenia i Siemens Magnetom Vida, dok je usporedba s kontrolnom skupinom (n = 13; prosječna dob 15,15 ± 1,34 godina) provedena na kraju sezone. Mjerene su kontinuirane varijable (dužina ploče rasta / dužina epifizne ploče (EP) i kraniokaudalno protezanje u četiri smjera) te ordinalne varijable (edem koštane srži, difuzijske promjene, fuzija ploče rasta). Statistička analiza uključivala je t-test za zavisne i nezavisne uzorke, Wilcoxonov test predznačenih rangova, Mann–Whitneyjev U-test, Fisherov egzaktni test te Cohenov d ($p < 0,05$).

Rezultati: Na početku sezone razlike u dužini ploče rasta između skupina nije bilo ($p = 0,746$), dok je razlika u kraniokaudalnoj visini epifize medijalno bila prisutna već tada ($p < 0,001$). Prilagodba za kronološku dob razlike među skupinama na kraju sezone nije umanjila, nego ih je neznatno povećala, budući da je kontrolna skupina bila prosječno starija. U usporedbi

dominantne i nedominantne ruke na početku sezone (M1; n = 32) nekorigiranu razinu značajnosti dosegnula je jedino varijabla kraniokaudala visina epifize anteriorno (dominantna 30,48 ± 2,54 mm naspram nedominantna 29,54 ± 2,45 mm; p = 0,045; d = 0,37; nakon Bonferronijeve korekcije p = 0,223), dok razlike u edemu (43,8 % naspram 31,3 %; p = 0,157) i difuzijskim promjenama (34,4 % naspram 37,5 %; p = 1,000) nisu bile značajne. Longitudinalnom analizom (n = 20) zabilježeno je statistički značajno povećanje dužine ploče rasta dominantne ruke ($\Delta\bar{X}$ = +2,65 mm; p < 0,001; d = 1,20) te značajna promjena distribucije edema, pri čemu se udio izraženog edema (stupanj 2) smanjio s 35,0 % na 10,0 % (p = 0,010). U odnosu na kontrolnu skupinu (n = 20 naspram n = 13) odbojkašice su na kraju sezone imale veće izmjerene vrijednosti dviju mjera koje ostaju značajne i nakon Bonferronijeve korekcije. Dužina EP (p = 0,003; d = 1,14), koja se odnosi na ploču rasta i EP KK medijalno (p < 0,001), koja opisuje kraniokaudalnu visinu epifize, dok je EP KK anteriorno (nekorigirano p = 0,012; korigirano p = 0,061; d = 0,95) predstavljala trend, bez statističke značajnosti. Difuzijske promjene bile su prisutne u gotovo svih ispitanica u objema skupinama te stoga nisu bile diskriminativne.

Zaključak: Rezultati upućuju na povezanost ponavljanih opterećenja kod pokreta iznad glave s mjerljivim morfološkim promjenama ploče rasta proksimalnog humerusa adolescentnih sportašica. MRI je detektirala subkliničke morfološke promjene u ispitanica bez simptoma, što upućuje na njezin potencijal kao metode ranog prepoznavanja promjena zone rasta uzrokovanih preopterećenjem. Valja pritom naglasiti da je metodološki najčišći test mehanizma — usporedba dominantne i nedominantne ruke, kontrolirana za dob, tjelesnu veličinu i mjerni uređaj — dao pretežno negativan rezultat, dok najjače razlike proizlaze iz usporedbe koja je najviše opterećena konfundiranjem. Prema dostupnoj literaturi, nisu pronađena ranija sustavna longitudinalna MRI istraživanja ploče rasta proksimalnog humerusa u mladih odbojkašica.

Ključne riječi: ploča rasta, proksimalni humerus, MRI, odbojka, ozljede uslijed prenaprezanja, adolescentne sportašice

ABSTRACT

Introduction: Disorders developed in the shoulder of athletes involved in throwing and overhead sports are not merely acute injuries, but often reflect cumulative microstresses acting on the epiphyseal growth plate, anatomically most vulnerable structure of the growing skeleton. Adolescent athletes, particularly those in the peak height velocity (PHV) phase, demonstrate increased biomechanical vulnerability of the growth plate region due to its histological weakness and dynamic hormonal changes of puberty. Volleyball, as a sport involving a high number of repetitive high-energy overhead movements (spike, serve), places particular demands on the proximal humerus, which remains skeletally immature in this age group.

Objectives and Hypotheses: The aim of this study was to utilize the magnetic resonance imaging (MRI) to morphologically investigate and compare the growth-plate region of the proximal humerus in young asymptomatic female volleyball players. Two hypotheses were proposed: (1) repetitive high-load movements in volleyball affect the growth plate in young athletes; (2) in athletes involved in overhead sports, the morphological characteristics of the proximal humeral growth plate of the dominant limb differ from those of the non-dominant limb. Owing to the observational design, both were evaluated at the level of statistical association rather than causation.

Methodology: The sample included 32 active female volleyball players (age 13–16 years; mean age 14.34 ± 0.97 years) recruited from Volleyball Club Mladost Zagreb, all asymptomatic and without a documented shoulder injury in the previous 6 months. MRI was performed at the beginning (M1; n = 32) and at the end of the competitive season (M2; n = 20; 37.5 % attrition) on Philips Ingenia and Siemens Magnetom Vida scanners, while comparison with a control group (n = 13; mean age 15.15 ± 1.34 years) was performed at the end of the season. Continuous variables (growth-plate length / EP length and craniocaudal extension in four directions) and ordinal variables (bone marrow edema, diffusion changes, growth-plate fusion) were assessed. Statistical analysis included paired- and independent-samples t-tests, the Wilcoxon signed-rank test, the Mann–Whitney U test, Fisher's exact test and Cohen's d ($p < 0.05$).

Results: At the start of the season there was no between-group difference in EP length ($p = 0.746$), whereas the difference in EP CC medial was already present ($p < 0.001$); adjustment for chronological age did not attenuate the between-group differences at the end of

the season but slightly strengthened them, as the control group was on average older. In the dominant vs. non-dominant comparison at the start of the season (M1; n = 32), only anterior craniocaudal extension reached the uncorrected significance level (EP CC anterior; dominant 30.48 ± 2.54 mm vs. non-dominant 29.54 ± 2.45 mm; p = 0.045; d = 0.37; Bonferroni-corrected p = 0.223), whereas differences in edema (43.8 % vs. 31.3 %; p = 0.157) and diffusion changes (34.4 % vs. 37.5 %; p = 1.000) were not significant. Longitudinal analysis (n = 20) showed a highly significant increase in growth-plate length of the dominant arm (Δmean = +2.65 mm; p < 0.001; d = 1.20) and a significant change in edema distribution, with the proportion of pronounced (grade 2) edema decreasing from 35.0 % to 10.0 % (p = 0.010). Compared with controls (n = 20 vs. n = 13), volleyball players had larger measured values for two variables that remained significant after Bonferroni correction. Growth-plate length (p = 0.003; d = 1.14), which refers to the physis itself, and medial epiphyseal height (p < 0.001), which describes the craniocaudal height of the epiphysis were statistically significant, while anterior craniocaudal extension (uncorrected p = 0.012; corrected p = 0.061; d = 0.95) represented a trend. Diffusion changes were present in nearly all participants in both groups and were therefore not discriminative.

Conclusion: The results suggest an association between repetitive overhead loading in volleyball and measurable morphological changes in the proximal humeral growth plate in adolescent female athletes. MRI detected subclinical growth plate changes in asymptomatic subjects, suggesting its potential as a method for early recognition of overuse-related physeal changes. It should be emphasised, however, that the methodologically cleanest test of the mechanism — the dominant versus non-dominant comparison, controlled for age, body size and scanner — yielded a largely negative result, whereas the strongest differences arise from the comparison most affected by confounding. To the best of the authors' knowledge, no prior systematic longitudinal MRI study of the proximal humeral growth plate in young female volleyball players has been published prior to this work.

Keywords: epiphyseal plate, proximal humerus, MRI, volleyball, overuse injuries, adolescent female athletes, growth plate

SADRŽAJ

ZAHVALE viii

SAŽETAK x

ABSTRACT xii

POPIS KRATICA xvi

POPIS OZNAKA xvii

1. UVOD 1

1.1 Uloga sporta u rastu i razvoju djece i adolescenata 1

1.2. Ozljede uzrokovane preopterećenjem kao razvojni i klinički problem adolescentnog sporta 2

1.3. Uvod u problem istraživanja 4

1.4 Odbojka kao model kompleksnog overhead opterećenja 6

1.5. Anatomija ramenog obruča i proksimalnog humerusa 7

1.6. Biomehanika ramenog obruča i proksimalnog humerusa 12

1.7. Dijagnostika ozljeda ramenog obruča 15

2. CILJEVI I HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA 19

3. METODE ISTRAŽIVANJA 20

3.1. Dizajn eksperimenta 20

3.2. Ispitanici 21

3.3. Mjerni instrumenti 24

3.3.1. Opis MRI sustava i protokola snimanja 24

4. REZULTATI 38

4.1. Opis uzorka 38

4.2. Usporedba dominantne i nedominantne ruke na početku sezone (n = 32) 40

4.3. Longitudinalna analiza promjena dominantne ruke kroz natjecateljsku sezonu (n = 20) 44

4.4. Usporedba odbojkašica i kontrolne skupine (n = 20 naspram n = 13) 48
5. RASPRAVA 54
5.1. Interpretacija nalaza prvog mjerenja – usporedba dominantne i nedominantne ruke 54
5.2. Longitudinalna perspektiva – dinamika promjena kroz natjecateljsku sezonu 57
5.3. Usporedba odbojkašica i kontrolne skupine – sport-specifične promjene nasuprot normalnom razvoju 61
5.4. Provjera postavljenih hipoteza 63
5.4.1. Hipoteza 1 – utjecaj ponavljanih overhead opterećenja na ploču rasta 63
5.4.2. Hipoteza 2 – morfološka asimetrija dominantne i nedominantne ruke 64
5.4.3. Nesklad među trima razinama usporedbe i granice uzročnog tumačenja 65
5.5. Kliničke implikacije nalaza 66
5.5.1. MRI kao alat ranog prepoznavanja preopterećenja 66
5.5.2. Periodizacija treninga i kontrola volumena overhead aktivnosti 67
5.5.3. Razlikovanje adaptacije od patologije 68
5.5.4. Suradnja kineziologije, sportske medicine i radiologije 70
5.6. Metodološka ograničenja istraživanja 70
5.7. Usporedba s dosadašnjim istraživanjima i originalnost doprinosa 76
5.8. Smjernice za buduća istraživanja 77
6. ZAKLJUČAK 80
LITERATURA 83
Prilog 1. Suglasnost za sudjelovanje ispitanika u istraživanju 90
ŽIVOTOPIS AUTORA 92
Popis objavljenih radova autora: 93

POPIS KRATICA

ADC — apparent diffusion coefficient (prividni koeficijent difuzije)

BME — bone marrow edema-like signal (signal nalik edemu koštane srži)

CI — confidence interval (interval pouzdanosti)

DICOM — Digital Imaging and Communications in Medicine

DWI — diffusion-weighted imaging (difuzijsko oslikavanje)

EP — epifizna ploča (ploča rasta)

EPI — echo planar imaging (eho-planarno oslikavanje)

FIVB — Fédération Internationale de Volleyball (Međunarodna odbojkaška federacija)

FOPE — focal periphyseal edema (fokalni perifizalni edem)

FOV — field of view (vidno polje)

FS — fat suppression (potiskivanje signala masti)

GIRD — glenohumeral internal rotation deficit (glenohumeralni deficit unutarnje rotacije)

HAGL — humeral avulsion of the glenohumeral ligament (humeralna avulzija glenohumeralnog ligamenta)

ICC — intraclass correlation coefficient (koeficijent unutarklasne korelacije)

IHE — Integrating the Healthcare Enterprise

IQR — interquartile range (interkvartilni raspon)

KB — Klinička bolnica

KBC — Klinički bolnički centar

KK — kraniokaudalno

LLS — Little League Shoulder

MRI — magnetic resonance imaging (magnetska rezonancija)

NSA — number of signal averages (broj prosjeka signala)

PACS — Picture Archiving and Communication System (sustav za arhiviranje i komunikaciju medicinskih slika)

PD — proton density (gustoća protona)

PHV — peak height velocity (faza ubrzanog rasta)

RED-S — relative energy deficiency in sport (relativna energetska insuficijencija u sportu)

SNR — signal-to-noise ratio (omjer signal-šum)

SPAIR — spectral attenuated inversion recovery (spektralna supresija masti)

TE — echo time (vrijeme jeke)

TR — repetition time (vrijeme ponavljanja)

TSE — turbo spin echo (turbo spin-eho)

POPIS OZNAKA

d — Cohenov d, veličina efekta za nezavisne uzorke

d_z — Cohenov d za zavisne (uparene) uzorke

M1 — prvo mjerenje (početak natjecateljske sezone)

M2 — drugo mjerenje (kraj natjecateljske sezone)

SD — standardna devijacija

T — statistika Wilcoxonova testa predznačenih rangova

T2 — MRI sekvenca mjerena u T2 vremenu

U — statistika Mann–Whitneyjeva testa

W — statistika Shapiro–Wilkova testa

$\bar{X}$ — aritmetička sredina

$\Delta\bar{X}$ — razlika aritmetičkih sredina

1. UVOD

1.1 Uloga sporta u rastu i razvoju djece i adolescenata

Sport i redovita tjelesna aktivnost predstavljaju jedan od ključnih modulatora fizičkog i psihičkog razvoja djece i adolescenata (9). Tijekom djetinjstva i adolescencije odvija se najintenzivniji segment tjelesnog rasta, formira se koštano-mišićni sustav, razvija se neurološka kontrola pokreta te se uspostavljaju funkcionalne sposobnosti koje imaju dugoročne implikacije za zdravlje u odrasloj dobi (47, 54). Redovita tjelesna aktivnost potiče povoljan razvoj tjelesne kompozicije, kardiovaskularne i metaboličke funkcije te motoričkih sposobnosti, dok istodobno pridonosi psihološkom blagostanju i socijalnoj integraciji (9, 34). Organizirani sport uvodi strukturu, rutinu i specifičnu socijalnu dinamiku te tako pridonosi razvoju emocionalne stabilnosti, discipline, samopouzdanja i socijalnih vještina (22). U tom kontekstu sport može imati ulogu zaštitnog čimbenika za brojne rizične obrasce ponašanja, ali i potencijalni izvor specifičnih opterećenja koja, ako nisu adekvatno dozirana, mogu dovesti do ozljeda i poremećaja u rastu (11, 18).

U literaturi opisani pozitivni učinci sustavne tjelesne aktivnosti u djece i mladih uključuju povećanje mineralne gustoće kostiju, razvoj mišićne mase, poboljšanje koordinacije i motoričke kontrole te povoljan kardiovaskularni i metabolički profil (20, 34). Djeca uključena u redovitu sportsku aktivnost imaju manji rizik od pretilosti, bolju koncentraciju i povoljnije psihosocijalne ishode u odnosu na vršnjake koji su tjelesno neaktivni (22, 34).

Sport nosi i određene rizike, među kojima su ozljede uzrokovane preopterećenjem (eng. overuse injuries), pretreniranost i kronični umor, nedovoljno vrijeme za oporavak i rana sportska specijalizacija (18, 36). Značajni su poremećaji energetskog statusa i hormonske homeostaze, opisani u okviru sindroma relativne energetske insuficijencije u sportu (RED-S), koji je osobito relevantan u sportašica (51, 55). Za predmet je ovoga rada bitno da niska energetska dostupnost, preko supresije hipotalamo-hipofizno-gonadalne osi i promjena u metabolizmu koštanog tkiva, mijenja i hormonsku regulaciju rasta kostiju, a time posredno i biološki odgovor fizalne hrskavice na mehaničko opterećenje. U uvjetima visokog volumena treninga, jakog natjecateljskog pritiska i nedostatne edukacije sportaša, roditelja i trenera o važnosti odmora, ovi rizici mogu neutralizirati dio pozitivnih učinaka sporta (18, 48).

1.2. Ozljede uzrokovane preopterećenjem kao razvojni i klinički problem adolescentnog sporta

Ozljede uzrokovane preopterećenjem predstavljaju jedno od najvažnijih područja interesa suvremene sportske medicine, osobito u kontekstu mladih sportaša koji prolaze kroz razdoblje intenzivnog rasta i razvoja. Za razliku od akutnih ozljeda, koje nastaju jednim traumatskim događajem, ozljede uzrokovane preopterećenjem nastaju dugotrajnim postupnim nakupljanjem oštećenja tkiva na mikro nivou koja se javljaju brže nego što organizam može provesti učinkovit odgovor prilagodbe i/ili sanacije tkiva (28). Inicijalno u odbojci ponavljajući pokreti iznad glave izazivaju biomehaničke prilagodbe ramenog pojasa usporedive s onima u bejzbolu i tenisu, ali uz specifičan profil učestalosti i maksimalnih sila, s time da smeč generira veće sile i momente u ramenu od servisa (59), zbog čega se smatra biomehanički najzahtjevnijom overhead kretnjom u odbojci (64). Dokazano je da su prilagodbe ramenog zgloba u odbojkašica obilježene povećanom vanjskom rotacijom dominantne ruke, smanjenom unutarnjom rotacijom i asimetrijama u mišićnoj snazi, što je u skladu s obrascem poznatim u elitnih igrača tenisa i bacača. (12).

S vremenom se reverzibilna oštećenja nadovezuju i dovode do morfoloških i funkcionalnih poremećaja (48). U djece i adolescenata ozljede uzrokovane preopterećenjem imaju specifične značajke koje se bitno razlikuju od onih u odrasloj populaciji. Dok kod odraslih prevladavaju tendinopatije, lezije ligamentarnog aparata i sindromi prenaprezanja mekih tkiva, u skeletno nezrelih sportaša najranjivije strukture jesu epifizne ploče i apofize – područja aktivne osteogeneze koja su mehanički slabija (11, 48). Riječ je o područjima aktivne osteogeneze koja su histološki i mehanički slabija od okolnog ligamentarno-tetivnog sklopa te stoga predstavljaju locus minoris resistentiae (11, 28). Tendinopatske promjene rotatorne manžete i ozljede ploče rasta pokazale su se kao najčešći patološki entiteti u adolescenata kao posljedica kroničnih preopterećenja u overhead sportovima (78).

Prevalencija ozljeda uzrokovanih preopterećenjem kontinuirano raste posljednjih desetljeća zbog porasta intenziteta treninga, rane sportske specijalizacije te sve većih natjecateljskih pritisaka (38, 62). Djeca često ne prepoznaju ili zanemaruju rane simptome, dok u trenažnom okruženju ponekad postoji percepcija da je bol „normalna“ posljedica treninga (56).

Epidemiološki podaci potvrđuju da ozljede uslijed prenaprezanja čine značajan udio svih sportskih ozljeda u djece i mladih, pri čemu u mnogim sportovima čine otprilike od trećine do približno polovice svih zabilježenih ozljeda (5, 66). U sportovima s visokim brojem ponavljajućih pokreta (gimnastika, plivanje, pojedini sportovi s reketom) udio ozljeda zbog

preopterećenja može doseći i više vrijednosti. Učestalost takvih ozljeda raste tijekom razvoja, osobito u razdoblju pubertetskog ubrzanog rasta, a djevojke u srednjoj adolescenciji pokazuju osobito visok rizik zbog kombinacije hormonalnih promjena, povećane labavosti ligamenata i specifičnih biomehaničkih čimbenika. Volumen treninga predstavlja jedan od najvažnijih prediktora razvoja ozljeda posljedično preopterećenju (5, 56). Sportaši koji tjedno treniraju više sati nego što imaju godina života imaju značajno veći rizik od ozbiljnih ozljeda preopterećenja (omjer izgleda ≈ 2,07) u odnosu na one s nižim trenažnim opterećenjem (36). Rizik dodatno raste u sportovima s visokim brojem ponavljanja specifičnih pokreta, poput servisa ili smeća (56).

Tijekom ubrzanog rasta u periodu puberteta dolazi do naglog produljenja kostiju, dok razvoj mišićne snage, neuromuskularne kontrole i fleksibilnosti relativno zaostaje. Ovaj privremeni nesrazmjer između dužine koštanih segmenata i sposobnosti muskulature i stabilizacijskih mehanizama da kontroliraju pokret dovodi do povećane biomehaničke ranjivosti (71). U tom razdoblju učestalo se bilježe promjene u obrascima pokreta, smanjena kvaliteta kontrole trupa i lopatice te veća neuromuskularna nekoordinacija, što dodatno povećava opterećenje na zone rasta. Posljedično se u fazi ubrzanog rasta bilježi veća incidencija ozljeda uslijed preopterećenja u odnosu na prepubertetsku i postpubertetsku dob.

Rano prepoznavanje subkliničkih promjena u zoni rasta ključno je za prevenciju trajnih posljedica na rast i funkciju zgloba. U ranim fazama preopterećenja simptomi su često minimalni ili nespecifični (blaga bol, nelagoda, umor), pa klinički pregled može biti malo osjetljiv za pravodobno otkrivanje problema. Magnetska rezonancija (MRI) omogućuje detekciju ranih promjena signala koštane srži i hrskavice, kao i strukturalnih promjena u epifiznoj ploči, koje nisu vidljive na standardnim radiogramima (37, 39). Zbog svoje visoke osjetljivosti i mogućnosti detaljne procjene hrskavice zone rasta, MRI se u ovom kontekstu smatra trenutačno najosjetljivijom i klinički najvažnijom metodom za dijagnostiku promjena posljedično preopterećenju ramena kod mladih sportaša (2, 33, 69).

Ozljede ploče rasta predstavljaju specifičnu skupinu ozljeda skeletno nezrelih sportaša i čine važan dio spektra patologije posljedično preopterećenju u dječjoj i adolescentnoj dobi. Caine i suradnici ističu da su upravo zone rasta (fize) najosjetljivija karika lokomotornog sustava mladih sportaša, jer su histološki i mehanički višestruko slabije od okolnog ligamentarno–tetivnog aparata te stoga često "popuštaju" prije ligamenata ili tetiva pri ponavljanom opterećenju (11, 28). Farnum i suradnici pokazuju da mehanička modulacija stresa na fizu dovodi do promjena proliferacije hondrocita i organizacije epifizne hrskavice, pri čemu i relativno kratkotrajne promjene opterećenja mogu izazvati mjerljive morfološke i

kinetičke adaptacije (24). Stokes dodatno naglašava da kronični mehanički stres u rastućem skeletu ne djeluje samo kao pasivno opterećenje, već kao aktivni morfogenetski signal koji može mijenjati smjer i brzinu rasta kosti (71). U širem kontekstu, Maffulli i sur. te Frush i Lindenfeld opisuju peri–epifizne i ozljede uslijed prenaprezanja u adolescentnih sportaša kao sve češći problem u eri rane sportske specijalizacije, povećanog volumena treninga i smanjenog vremena oporavka (28, 48). Ozljede uslijed prenaprezanja zone rasta opisuju se kao potencijalno preventabilne, ali još uvijek nedovoljno rano prepoznavane u svakodnevnoj kliničkoj praksi (5).

1.3. Uvod u problem istraživanja

Odbojka je jedan od najraširenijih ekipnih sportova i dio olimpijskog programa. U sportskoj traumatologiji vezanoj uz odbojku najveći se naglasak tradicionalno stavlja na ozljede donjih ekstremiteta, osobito prednjeg križnog ligamenta u mladih igračica. U regiji ramena predmet istraživanja uglavnom su akutne ozljede i dugotrajna simptomatska stanja kod odraslih, dok je problematika fizioloških, prilagodbenih i potencijalno patoloških zbivanja, posebno u regiji zone rasta proksimalnog humerusa, znatno manje proučavana. Smečerice i vanjske napadačice izložene su velikom broju snažnih servisa i smečeva tijekom ključnog razdoblja rasta, pri čemu biomehanička ispitivanja potvrđuju da sile i obrasci pokreta bitno ne zaostaju za onima u drugim overhead sportovima (15, 78). Unatoč tome, u literaturi nema sustavnih MR studija koje bi ispitale morfološke promjene zone rasta proksimalnog humerusa u mladih odbojkašica te ih usporedile s vršnjakinjama koje nisu uključene u sportove s pokretima iznad glave.

Magnetska rezonancija omogućuje detaljan prikaz hrskavice zone rasta, koštane srži i okolnih struktura bez izlaganja ionizacijskom zračenju te predstavlja metodu izbora za prepoznavanje ranih, suptilnih promjena koje nisu vidljive na klasičnim radiogramima (35, 54). Normativni MR podaci o razvoju proksimalnog humerusa u djece i adolescenata (39), kao i iskustvo iz studija u tenisu i bejzbolu, pokazuju da je moguće kvantitativno mjeriti dužinu i protezanje zone rasta, stupanj zatvaranja te intenzitet signala koštane srži i difuzijske parametre, što stvara preduvjet za objektivnu usporedbu između dominantne i nedominantne ruke te između različitih skupina ispitanica.

Unatoč navedenim spoznajama, još uvijek nedostaju podaci o tome u kojoj mjeri ponavljani, visokointenzivni pokreti iznad glave u odbojci utječu na morfologiju zone rasta proksimalnog humerusa u asimptomatskih odbojkašica adolescentne dobi, razlikuju li se

morfološke karakteristike između dominantnog i nedominantnog ekstremiteta te postoje li razlike u odnosu na vršnjakinje koje nisu uključene u overhead sportove. Nije razjašnjeno jesu li eventualno prisutne promjene normalna adaptacija na specifične zahtjeve sporta ili predstavljaju rani pokazatelj preopterećenja i potencijalni rizični čimbenik za buduće ozljede ramena.

Polazeći od gore navedenog, problem istraživanja ove disertacije jest nedostatak pouzdanih, MRI-baziranih podataka o morfološkim karakteristikama te mogućim adaptacijskim ili patološkim promjenama zone rasta proksimalnog humerusa dominantne ruke u mladih asimptomatskih odbojkašica u dobi od 13 do 16 godina, u usporedbi s nedominantnom rukom, te s kontrolnom skupinom vršnjakinja koje nisu uključene u sportove s pokretima iznad glave, a koji bi omogućili jasnije razlikovanje između fiziološke sportske adaptacije i ranog stadija preopterećenjske ozljede.

Iako su biomehanički i radiološki aspekti ozljeda zbog preopterećenja ramena intenzivno istraživani u bejzbolu, tenisu i plivanju, znanstvena literatura pokazuje izrazit nedostatak sustavnih istraživanja koja se bave promjenama zone rasta proksimalnog humerusa u mladih odbojkašica. Većina postojećih radova fokusira se na bacačke sportove, tenis ili plivanje, dok se odbojka, unatoč visokoj prevalenciji overhead pokreta, pojavljuje samo sporadično u epidemiološkim pregledima.

Smeč generira najveće torzijske i smične sile u ramenom zglobu, dok servis doprinosi kroničnom ponavljanom stresu. Istraživanja su pokazala da adolescentice imaju povećanu ligamentarnu labavost, slabiju ekscentričnu kontrolu i kasnije zatvaranje posterolateralnog dijela proksimalnog humerusa (39), što povećava osjetljivost ove regije na preopterećenje. Bez ciljanih MRI studija teško je razlikovati fiziološku adaptaciju od subkliničke patologije.

Velik doprinos razumijevanju subkliničkih promjena u proksimalnom humerusu pružila je studija Johansson i sur. (37) na asimptomatskim elitnim mladim tenisačima, populaciji u kojoj su prilagodbe ramenog obruča dobro dokumentirane (16, 45, 75). U usporedbi dominantne i nedominantne ruke, autori su MRI-jem pokazali: lateralno i ventralno produljenje epifize, širenje fizalne linije te pojačan T2 signal u području proksimalne humeralne fize dominantne ruke, unatoč izostanku simptoma (37).

MRI istraživanja u bejzbolu, tenisu i plivanju dokumentiraju visoku prevalenciju subkliničkih promjena - edema koštane srži, proširenja epifizne linije i kortikalne remodelacije - u znatnom udjelu asimptomatskih mladih sportaša (37, 57, 69, 48, 14). Unatoč biomehanički visokim zahtjevima odbojke, slične analize u adolescentnih odbojkašica ne postoje, što stvara znanstveni i klinički nedostatak. Trenutno ne postoji longitudinalna MRI analiza ramena mladih

odbojkašica. Ne poznaje se dinamika promjena tijekom sezone, razlika dominantne i nedominantne ruke niti usporedba s nesudjelovanjem u overhead sportovima. Ova praznina znatno ograničava mogućnost kreiranja preventivnih smjernica. Ovo je prvo sustavno istraživanje koje MRI metodom analizira promjene proksimalnog humerusa kod mladih asimptomatskih odbojkašica i uključuje usporedbu dominantne i nedominantne ruke, kontrolnu skupinu te longitudinalno praćenje tijekom sezone, čime popunjava važnu prazninu u literaturi i stvara temelj za prevencijske smjernice.

1.4 Odbojka kao model kompleksnog overhead opterećenja

Odbojka je jedan od najraširenijih ekipnih sportova adolescentica, te se prema podacima Međunarodne odbojkaške federacije (FIVB) nalazi među najraširenijim sportovima na svijetu (26), a procjenjuje se da odbojku barem jednom tjedno igra oko 800 milijuna ljudi (64). Uz sportove kao bejzbol, tenis i rukomet, odbojka je paradigmatski primjer sporta s visokim udjelom aktivnosti iznad glave (21). Odbojka je sport intermitentnog i kompleksnog karaktera gdje se izmjenjuju aktivnosti visokog intenziteta kratkog trajanja s periodima aktivnog odmaranja. Tijekom jednog treninga igračice izvode velik broj servisa i smečeva, pri čemu se rameni zglob izlaže ponavljanim torzijskim, distrakcijskim i kompresijskim silama (78). U prospektivnoj kohortnoj studiji na studentskoj populaciji odbojkašica Wolfe i sur. (79) su pokazali da igračice odrade prosječno 47,1 zamaha iznad glave po trenažnoj jedinici u pred-sezoni i 37,7 u natjecateljskoj sezoni, pri čemu se na treninzima ostvaruje približno dvostruko više zamaha nego tijekom utakmica. Navedeno upućuje da nakupljeno opterećenje proksimalnog humerusa u adolescentnoj dobi može biti znatno i neprekidno kroz cijelu sezonu. Pojam zamah ovdje označava jedan cjelovit overhead udarac kao brojivu jedinicu opterećenja; kada se odnosi na dio pokreta, u radu se dosljedno navodi kao faza zamaha.

Kod mladih odbojkašica osobito su biomehanički zahtjevni smeč i servis. U smeču, tijekom kasne faze zamaha (engl. late cocking), rame ulazi u visoku abdukciju i ekstremnu vanjsku rotaciju, što generira izrazite torzijske sile na proksimalni humerus. Epifizna ploča u adolescenciji je višestruko mehanički slabija od ligamentarno-tetivnog sustava, pa se ponavljana opterećenja dominantno odražavaju upravo na zonu rasta. Servis, iako biomehanički manje eksplozivan, zbog velikog broja ponavljanja predstavlja važan izvor kroničnog stresa. Razumijevanje interakcije između rasta, anatomije ramena i sport-specifične biomehanike odbojke nužno je za rano prepoznavanje rizičnih obrazaca i pravodobnu primjenu preventivnih strategija (15). Pregled najčešćih ozljeda posljedično preopterećenju u mladih sportaša po tjelesnim regijama donosi Tablica 1.

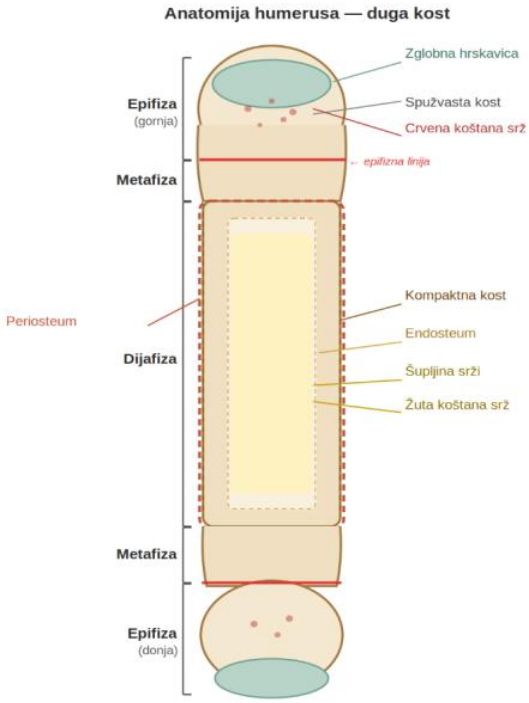
Tablica 1. Najčešće ozljede uslijed prenaprezanja kod mladih sportaša po regijama (18)

Regija	**Tipične ozljede**
Rame	Little League Shoulder, tendinopatije, labralne promjene
Koljeno	Osgood-Schlatter, Sinding-Larsen-Johansson
Potkoljenica	Stres frakture tibije
Stopalo	Apofizitis (Severova bolest)
Lumbalna kralježnica	Spondiloliza
Gležanj	Stres promjene u talusu i tibiji

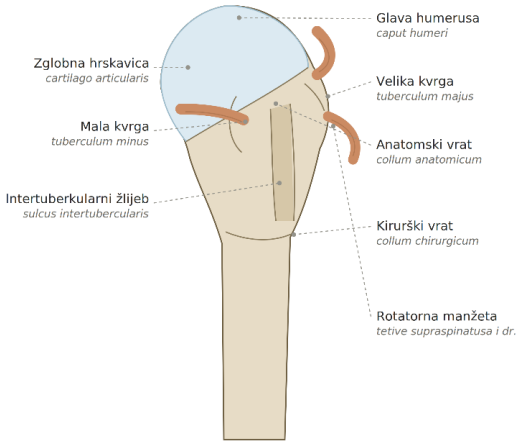
1.5. Anatomija ramenog obruča i proksimalnog humerusa

Rameni zglob najpokretljiviji je zglob u ljudskom tijelu, ali istodobno i jedan od biomehanički najranjivijih. U adolescentica uključenih u overhead sportove, osobito odbojku, otvorene epifizne ploče, nerazvijen neuromuskularni sustav i visoki trenažni zahtjevi stvaraju uvjete u kojima ponavljana opterećenja mogu dovesti do promjena u zoni rasta proksimalnog humerusa. Razumijevanje interakcije anatomije, biomehanike i fiziologije rasta ključno je za interpretaciju nalaza magnetske rezonancije i pravilnu procjenu rizika od ozljede.

Proksimalni humerus čine glava humerusa, anatomski i kirurški vrat, veliki i mali tuberkul te intertuberkularni sulkus (4, 25). Osnovni anatomski odnosi prikazani su na Slikama 1 i 2. Glava humerusa hemisferičnog je oblika i sudjeluje u stvaranju glenohumeralnog zgloba (25). Prekrivena je hijalinom hrskavicom i omogućuje širok opseg pokreta u svim ravninama (25, 77). Kirurški vrat predstavlja prijelaz prema dijafizi i klinički je važno područje, dok su veliki i mali tuberkul mjesta pripoja tetiva rotatorne manžete (4, 40). U overhead sportovima upravo je zona hvatišta tetiva rotatorne manžete izložena visokim trakcijskim i smičnim silama koje se prenose na epifizu i metafizu proksimalnog humerusa (4, 54).

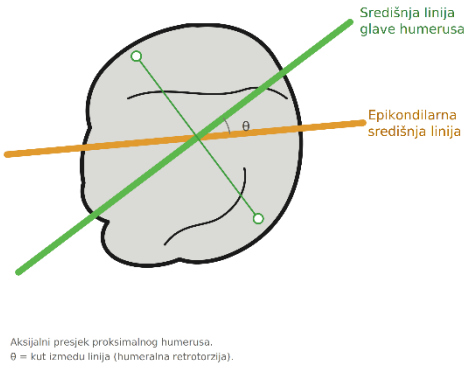


Slika 1. Anatomija duge kosti na primjeru humerusa s označenim regijama: epifiza, metafiza, dijafiza te linija rasta



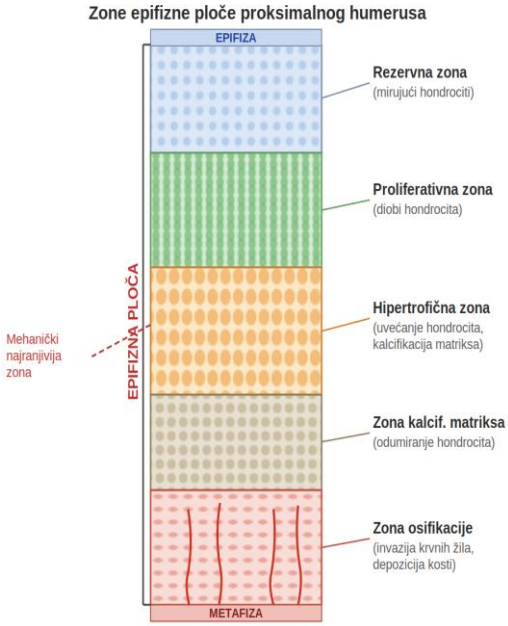
Slika 2. Proksimalni humerus

Humeralna retrotorzija označava zakretanje glave humerusa u odnosu na distalni dio kosti. Ona se mijenja tijekom rasta te se dodatno može adaptivno povećati kod sportaša koji su izloženi ponavljanim pokretima ekstremne vanjske rotacije. U adolescentnih overhead sportaša, uključujući odbojkašice, dominantna ruka često pokazuje veću retrotorziju u odnosu na nedominantnu, što omogućuje veći opseg vanjske rotacije, ali istodobno može povećati torzijsko opterećenje epifizne ploče (62, 73).



Slika 3. Humeralna retrotorzija

Epifizna ploča proksimalnog humerusa sastoji se od hijaline hrskavice organizirane u više funkcionalnih zona (6). Rezervna (mirujuća) zona sadrži relativno mirne hondrocite koji služe kao rezervoar za proliferativne stanice. Proliferativna zona obilježena je stupčastim rasporedom hondrocita koji se intenzivno dijele i time omogućuju rast u dužinu. U hipertrofičnoj zoni hondrociti se povećavaju, njihov se matriks mijenja i priprema za kalcifikaciju. Slijedi zona kalcifikacije matriksa i zona osifikacije u kojoj osteoblasti zamjenjuju hrskavicu primarnim koštanim tkivom. Najveća mehanička ranjivost postoji u hipertrofičnoj i kalcifikacijskoj zoni, gdje ponavljana opterećenja mogu poremetiti arhitekturu stupaca hondrocita i dovesti do mikropukotina i edema (6, 81). Raspored zona shematski je prikazan na Slici 4, a odgovarajući histološki nalaz na Slici 5.



Slika 4. Shematski prikaz zona ploče rasta: rezervna (Reserve), proliferativna (Proliferative), hipertrofična (Hypertrophy), zona kalcificiranog matriksa i zona okoštavanja.



Slika 5. Histološki preparat ploče rasta s endohondralnom osifikacijom; oznake zona: R = rezervna, P = proliferativna, H = hipertrofična, C = kalcificirana, O = osifikacijska.

Izvor: Braun M. Human Structure Virtual Microscopy: Cartilage, Bone and Joints — Intramembranous and Endochondral Ossification. Indianapolis: Indiana University School of Medicine, Medical Sciences Program; 2016. Dostupno na: https://vmicro.iusm.iu.edu/hs_vm/docs/lab2_8.htm.

Vaskularna opskrba proksimalnog humerusa u djece i adolescenata oslanja se na relativno fine završne arterijske ogranke koji ulaze u epifizu i metafizu. Takva organizacija čini regiju osjetljivom na promjene prokrvljenosti i mehanički stres. Poremećaji cirkulacije i ponavljane mikrotraume mogu rezultirati promjenama u koštanoj srži koje se na MRI-u očituju kao edematozne promjene. Inervacija periosta i okolnih mekih tkiva dodatno doprinosi percepciji boli, iako sama epifizna hrskavica nema živčane završetke za prijenos boli. (39, 53, 54).

Primarni centar osifikacije humerusa pojavljuje se intrauterino, dok se sekundarni centri u glavi humerusa i tuberkulima javljaju tijekom rane dječje dobi (4. do 10. mjesec starosti) (40). Epifizna ploča ostaje aktivna tijekom djetinjstva i adolescencije, a zatvaranje epifizne ploče započinje otprilike oko srednje adolescencije (oko 14. godine), a u većine adolescenata završava između približno 16. i 18. godine života (40). Posterolateralni dio epifizne ploče zatvara se posljednji, što je anatomski i biomehanički značajno jer upravo taj segment trpi najveće torzijske sile tijekom pokreta iznad glave. U razdoblju od 13 do 16 godina, kakvo je ujedno i razdoblje ispitanica u ovom istraživanju, epifizna ploča je još aktivna i potencijalno ranjiva (66).

Rast dugih kostiju, uključujući humerus, odvija se primarno endohondralnom osifikacijom. U tom procesu hrskavično tkivo epifizne ploče postupno se zamjenjuje koštanim matriksom. Hormon rasta i IGF-1 potiču proliferaciju i hipertrofiju hondrocita, dok spolni hormoni, osobito estrogen, ubrzavaju sazrijevanje i zatvaranje epifiznih ploča (55). Mehanička opterećenja djeluju kao stimulans za remodeliranje (71), ali kada su prekomjerna i ponavljana, mogu nadvladati prirodnu sposobnost tkiva za prilagodbu. U adolescentnih sportašica intenzivni treninzi i rani ulazak u visoko natjecateljsko okruženje povećavaju vjerojatnost da se epifizna ploča nađe u zoni patološkog, a ne adaptivnog opterećenja.

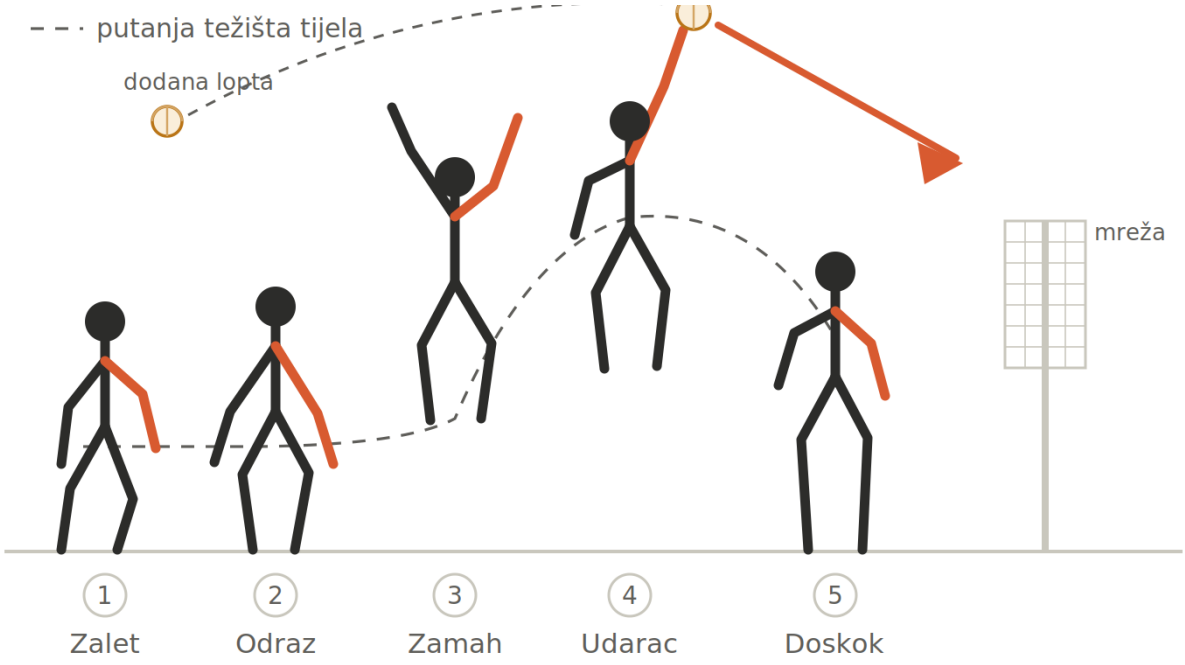
Prilagodbu koštanog tkiva na mehanička opterećenja opisuje tzv. Wolffov zakon (61), a kada se radi o hrskavici regije zone rasta isti dobiva novu dimenziju. Pri umjerenim opterećenjima mineralizirana kost postaje snažnija dok hrskavično tkivo u zoni rasta kod populacije s nezrelim skeletom ima limitirani kapacitet prilagodbe. To znači da do određenog

stupnja stresa hondrociti odgovaraju ubrzanim rastom, ali nakon prekoračenja biomehaničkog praga dolazi do poremećaja ciklusa stanica i destrukcije vanstaničnog matriksa. Pretpostavlja se da u pozadini većine ozljeda uzrokovanih preopterećenjem ploče rasta leži upravo ovaj dvofazni odgovor hrskavice na mehanički stres. Taj se temeljni biološki mehanizam očituje kroz prilagodbu tkiva pri nižim te njegovu dezorganizaciju pri višim razinama opterećenja. (61).

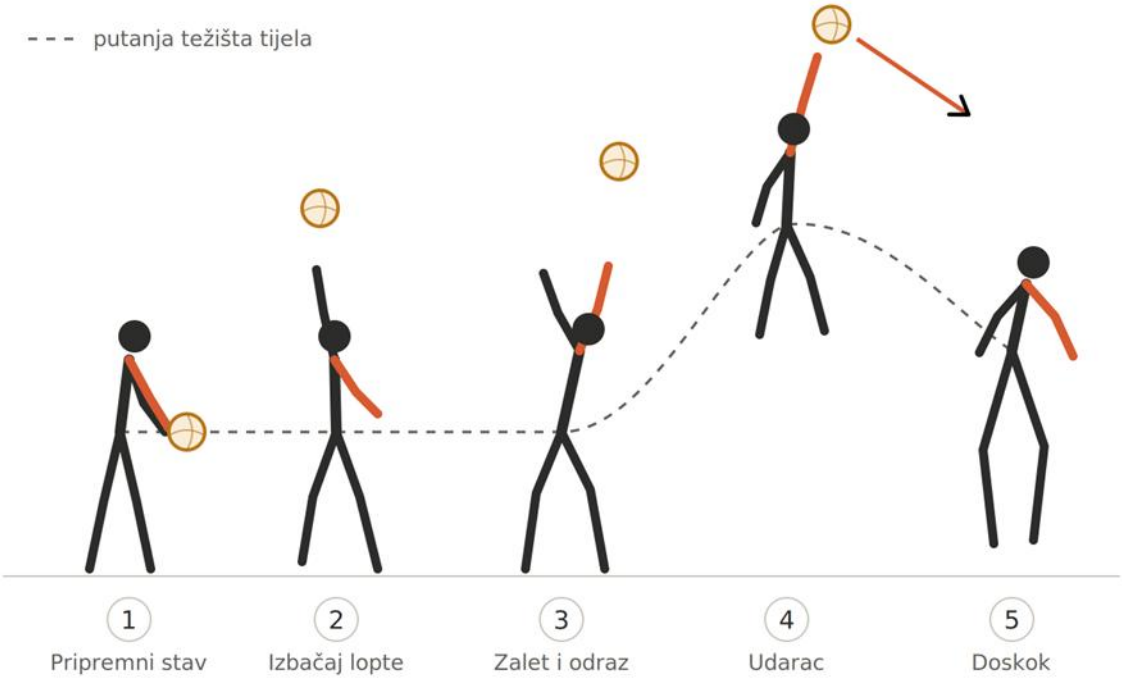
1.6. Biomehanika ramenog obruča i proksimalnog humerusa

Pokreti iznad glave prepoznati su kao najbrži pojedinačni atletski pokreti u sportu (19, 44). Smeč uključuje ekstremnu vanjsku rotaciju u fazi zamaha te najveće sile smicaja i torzijske sile u trenutku udarca, dok servis predstavlja ponavljaniju, ali biomehanički jednostavniju kretnju. Obje vrste opterećenja doprinose kumulativnom stresu i adaptivnim promjenama u dominantnoj ruci. Dodatno, odbojka, za razliku od bejzbola i rukometa, uključuje dinamički skok prije udarca, pri čemu gornji ekstremitet nije samo izložen torziji i smicanju nego i vertikalnom opterećenju zbog sile odraza i doskoka. Ova kompleksna biomehanička kombinacija karakteristična je za odbojku i dodatno opterećuje epifiznu ploču proksimalnog humerusa.

Overhead pokreti karakteristični za odbojku, poput smeča i servisa, zahtijevaju koordiniranu aktivaciju cijelog kinetičkog lanca, od donjih ekstremiteta i trupa do ramena i šake (21). Pokreti se mogu podijeliti na fazu pripreme (engl. wind-up), fazu zamaha (engl. cocking), fazu ubrzanja (engl. acceleration), fazu deceleracije (engl. deceleration) i fazu završetka pokreta (engl. follow-through). Najveći rizik s najizrazitijim biomehaničkim stresom na proksimalni humerus i epifiznu ploču predstavljaju trenuci prijelaza među fazama- u kasnoj fazi zamaha, kada su vanjska rotacija i abdukcija ramena izrazito naglašene, te u fazi deceleracije, kada rotatorna manžeta ekscentrično koči pokret ruke nakon udarca u loptu (5, 66). Rizik od patološkog unutarnjeg sraza (impingementa) i istezanja prednje kapsule nastaje u tim kritičnim fazama (10), a sile pri usporavanju i praćenju postupnim nakupljanjem dovode do ozljeda preopterećenja stražnje mišićne skupine ruke (8). Kinematičke faze smeča prikazane su na Slici 6, a faze skok-servisa na Slici 7.



Slika 6. Kinematičke faze smeča (napadačkog udarca): zalet, odraz, zamah, udarac i doskok.



Slika 7. Kinematičke faze skok-servisa: pripremni stav, izbačaj lopte, zalet i odraz, udarac i doskok.

Biomehaničkom analizom na elitnim igračima tenisa pokazano je da se kritičan stres na humerus zbiva pri maksimalnoj vanjskoj rotaciji i udarcu loptice (30, 41). Opisano odgovara fazi servisa kada se izazivaju sile koje potiču torzijsku rotaciju kosti a što objašnjava fenomen povećane retrotorzije humerusa dominantne ruke igrača (73).

Kvantificirane su biomehaničke sile koje imaju utjecaj na ruku adolescentnih bacača u bejzbolu te je pokazano da navedena populacija otkriva drugačije obrasce opterećenja naspram odraslih, konkretno s većim maksimalnim momentima tijekom završne faze zamaha (17).

Pokazano je da nepravilnosti u izvođenju pokreta izravno povećavaju torzijsko naprezanje proksimalne ploče rasta, što ima izravne posljedice za tumačenje mehanizama ozljeđivanja ploče rasta u overhead sportovima, među kojima je i odbojka (38).

Kinematički model svojstven svim overhead sportovima, uključujući i odbojku, pokazuje povezanost izloženosti ekstremnim silama s posljedičnim prilagodbenim mehanizmima i patološkim entitetima; kinematika bacanja, u kojoj se energija prenosi kinetičkim lancem od donjih ekstremiteta prema ramenu, pritom je najbolje opisana upravo u bejzbolskih bacača (19, 44, 77).

Klinička je posljedica takvih obrazaca opterećenja da kod sportaša u overhead disciplinama bol ramena tipično nastupa podmuklo i bez jasnog traumatskog povoda, što odgovara mehanizmu preopterećenja kakav prevladava i u odbojci. (65)

Skapula ima ključnu ulogu u stabilizaciji ramena. Optimalan skapulotorakalni ritam podrazumijeva sinkroniziranu elevaciju, rotaciju i posteriorni tilt lopatice. Kod adolescentica se često uočava slabost mišića serratus anteriora i donjih vlakana mišića trapeziusa, što dovodi do skapularne diskinezije, smanjenog subakromijalnog prostora i povećanog stresa na glenohumeralni zglob te na proksimalni humerus (78). Neadekvatna skapularna stabilizacija mijenja vektor djelovanja sila tijekom smeča i servisa, dodatno opterećujući epifizu. Ispravljanje skapularne kinematike ciljanim vježbama za gore navedenu muskulaturu prepoznato je kao jedna od najdjelotvornijih preventivnih mjera za smanjenje prijenosa mehaničkog stresa na fizalnu ploču u adolescentnih overhead sportaša (15).

Adolescentne sportašice razlikuju se od muških vršnjaka i odraslih sportaša po većoj ligamentarnoj elastičnosti, koja se u djevojaka povećava nakon nastupa puberteta (58), po drugačijem obrascu aktivacije mišića (15, 30) te po ranijem zatvaranju epifiznih ploča (40). Slabija ekscentrična snaga, osobito rotatorne manžete i stabilizatora trupa, u kombinaciji s intenzivnim trenažnim opterećenjem, pojačava rizik od preopterećenja proksimalnog humerusa (15, 30, 78). Dodatno, hormonalni status igra važnu ulogu u modulaciji osjetljivosti fizalne

hrskavice, budući da spolni hormoni izravno djeluju na hondrocite ploče rasta (55). Navedene razlike treba uzeti u obzir pri planiranju treninga i interpretaciji kliničkih te radioloških nalaza.

Epifizna ploča, kao regija rasta kosti, predstavlja najslabiji segment skeleta adolescenta. Kombinacija torzijskih, distrakcijskih, trakcijskih i kompresijskih sila u sportovima s pokretima iznad glave stvara uvjete za razvoj 'growth plate fatigue' fenomena – akumulacije mikrotrauma koje mogu dovesti do širenja epifizne linije, edema i mikrostrukturne disrupcije hondrocita (20, 68). Tijekom kasne faze zamaha smeča, ekstremna vanjska rotacija stvara visoke torzijske sile koje djeluju na posterolateralni dio epifizne ploče. Taj segment je anatomski posljednji koji se zatvara u adolescenciji, što ga čini posebno ranjivim.

U fazi ubrzanja humerus doživljava distrakcijske sile koje se prenose putem tetiva rotatorne manžete i bicepsa, dok kompresijske sile nastaju tijekom kontakta s loptom. Kombinacija ovih sila može dovesti do razvoja edema i promjena u signalu koštane srži na snimkama magnetske rezonancije.

Biomehanička istraživanja overhead sportova (ponajprije vezano uz bejzbol bacanje i servis u tenisu) pružila su vrlo detaljan uvid u sile kojima je izložena proksimalna zona rasta humerusa. Davis i sur. (17) te Keeley i sur. (38) analizirali su mehaniku bacanja u mladih bacača i pokazali da faze kasnog zamaha i ranog ubrzanja generiraju ekstremne torzijske i distrakcijske sile na proksimalni humerus, često veće od onih koje može podnijeti nezrela fiza. Sabick i sur. u specifičnim biomehaničkim modelima pokazuju da rotacijski momenti u kasnoj fazi zamaha mogu višestruko nadmašiti otpornost fizalne hrskavice, što dovodi do mikrotrauma, širenja fizalne linije i razvoja epifiziolize (62). Slične torzijske i smične sile opisane su i u teniskom servisu (Abrams i sur.), gdje ekstremna vanjska rotacija i brza unutarnja rotacija ramena uzrokuju visoka naprezanja na posterolateralnu epifiznu zonu (1). Ovi radovi smatraju se temeljnim za razumijevanje entiteta “Little League Shoulder” (LLS) – preopterećenjem inducirane epifiziolize proksimalnog humerusa u mladih bacača u bejzbolu, ali i referentnim modelom za razumijevanje opterećenja proksimalnog humerusa u drugim overhead sportovima (tenis, odbojka, rukomet)(70).

1.7. Dijagnostika ozljeda ramenog obruča

Dijagnostika ozljeda ramena u adolescentnih sportašica predstavlja izazov zbog skeletne nezrelosti, visokog kumulativnog trenažnog opterećenja s izraženom ponavljajućom komponentom i česte odsutnosti simptoma. Klinički pregled ima nisku osjetljivost za rane promjene u skeletno nezrelih sportašica, jer se bol i ograničenja javljaju kasnije u tijeku

preopterećenja. Testovi poput Jobe, Hawkins ili O'Brien često su negativni unatoč morfološkim promjenama (21, 56). Radiografija može prikazati širenje fizalne linije ili sklerozu metafize, ali ne otkriva rane promjene kao što su edem koštane srži i mikropukotine u hrskavičnom matriksu (23). Ultrazvuk je koristan za procjenu statusa tetiva, ali ne prikazuje ploču rasta te nije prikladan za detekciju promjena posljedično preopterećenju u zoni rasta (23, 54).

Magnetska rezonancija (MRI) trenutačno je najosjetljivija dostupna metoda za otkrivanje ranih, subkliničkih promjena ploče rasta proksimalnog humerusa u sportaša čiji skelet nije sazrio (56). Normalan MRI nalaz epifizne ploče uključuje visoki signal u T2 mjerenom vremenu i jasno definirane granice epifizne linije. Tijekom adolescencije, epifizna linija postupno postaje tanja i segmentalno se zatvara. Adolescenti često pokazuju heterogeni signal koštane srži, djelomično nepravilne rubove epifizne ploče i asimetrično zatvaranje, što predstavlja normalan nalaz. Međutim, kombinacija ovih znakova s edemom ili širenjem epifizne linije može ukazivati na preopterećenje. Najvažniji radiološki pokazatelji stresa uključuju: hiperintenzitet epifizne linije u T2 mjerenom vremenu, zamućene konture, asimetrično proširenje, edem regije metafize te promjene u difuzijskim parametrima (37). Ovi znakovi predstavljaju rane indikatore mikrotraume i potencijalnog razvoja epifiziolize (57, 70). Kod adolescentnih odbojkašica redovito se bilježe morfološke razlike između dominantne i nedominantne ruke. Dominantna strana pokazuje: veću retrotorziju, širu epifiznu liniju, češći metafizni edem i jače izraženo kortikalno zadebljanje (35, 53, 63). Ove promjene odražavaju razliku u biomehaničkom opterećenju između dvije strane.

Anatomska, razvojna i biomehanička obilježja opisana u prethodnim potpoglavljima izravno određuju i tumačenje MRI nalaza, pa se mogu objediniti u integrirani model rizika. Taj model obuhvaća anatomske, razvojne, biomehaničke i radiološke čimbenike koji zajedno određuju sklonost ozljedama. Anatomski faktori uključuju retrotorziju proksimalnog humerusa i širinu epifizne ploče (4, 62), razvojni faktori odnose se na razinu sazrijevanja skeleta (40), biomehanički faktori na sile i kinematiku tijekom smeća i servisa (41, 59), dok radiološki faktori uključuju povišeni intenzitet signala u T2 mjerenom vremenu, edem i proširenje epifizne linije (4, 35). Kombinacija ovih elemenata određuje rizik od proksimalne humeralne epifiziolize ili drugih ozljeda povezanih s preopterećenjem (5, 32). Suvremena istraživanja koriste biomehaničke modele, tehnike bilježenja pokreta i MRI analize kako bi se identificirali rizični obrasci (1, 59). Prema literaturi, među najvažnije čimbenike povezane s povećanim rizikom ubrajaju se: opseg trenažnog opterećenja izražen kroz sate treninga (18, 36), broj snažnih zamaha (smečeva i servisa) po trenažnoj jedinici (79), razlika u retrotorziji između dominantne i nedominantne ruke (62, 73), pojava metafiznog edema (32, 70) te širenje fizalne linije na MRI-

u (35, 57). Pri tome treba naglasiti da prva tri navedena čimbenika, trenažni volumen u satima, broj zamaha po treningu te razlika u retrotorziji nisu mjereni u sklopu ovog istraživanja, već se kao rizični faktori navode isključivo na temelju podataka iz literature. Razumijevanje navedenih procesa omogućuje bolje planiranje treninga, ranije prepoznavanje patoloških promjena, individualizaciju programa prevencije i razlikovanje fizioloških od patoloških adaptacija. MRI postaje ključan alat u praćenju strukturalnih promjena u zoni rasta i u planiranju povratka sportu. Interpretacija MRI nalaza zahtijeva iskustvo u sportskoj medicini te poznavanje dobnih varijacija skeletnog razvoja. Prekomjerna osjetljivost MRI-a može dovesti do pogrešnih zaključaka ako se nalaz ne tumači u kliničkom kontekstu.

Little League Shoulder definira se kao ozljeda uslijed preopterećenja proksimalne humeralne fize (epifizioliza) u skeletno nezrelih bacača, najčešće bejzbol igrača u dobi 11–16 godina (70, 78). Radiološki se klasično opisuje na RTG-u kao: (11) širenje fizalne linije u odnosu na kontralateralnu stranu, (47) nepravilnosti metafize (osteopenija, skleroza, trabekularni prekidi) i (26) ponekad fragmentacija lateralnog dijela epifize (40, 70). Song i sur. su među prvima detaljno opisali MRI nalaze LLS-a: edem proksimalne metafize, hiperintenzitet u zoni rasta na slikama u T2 mjerenom vremenu, zamućene konture fizalne hrskavice i ponekad kortikalnu neregularnost (70). Kasnije serije potvrđuju da MRI može detektirati i vrlo rane promjene, prije jasnog RTG širenja fize (35). Pennock i sur. (57) u studiji asimptomatskih Little League igrača pokazuju da je visoka prevalencija MRI abnormalnosti ramena prisutna i u odsutnosti kliničkih simptoma te da se rizik patološkog nalaza značajno povećava u igrača koji treniraju bejzbol više od 8 mjeseci godišnje te u onih sa specijalizacijom za jedan sport (engl. single-sport specialization); srodni su nalazi opisani i u drugim serijama mladih bacača (4, 32). Ovi nalazi snažno podupiru koncept kontinuuma „adaptacija – preopterećenja – ozljede“ u proksimalnom humerusu mladih overhead sportaša. Frush i Lindenfeld (28) u svojoj preglednoj studiji navode LLS kao reprezentativni primjer peri–epifizne ozljede uslijed prenaprezanja, pri čemu rana dijagnostika i adekvatan odmor omogućuju potpun oporavak bez deformiteta, dok kasno prepoznavanje može dovesti do trajnih promjena rasta.

MRI je ključna metoda za evaluaciju koštane srži i fizalnih struktura u sportaša. Hoy i sur. (33) pokazali su da u elitnih tenisača s bolovima u ramenu fiziološke adaptacije (npr. blage promjene signala) mogu prijeći u patološka stanja, pri čemu MRI detektira koštani edem proksimalnog humerusa koji korelira s bolom i smanjenjem performansi; usporedive su stresne promjene humerusa u tenisača opisali i drugi autori (42, 74). Navas i Kassarjian, te Kornaat i sur. detaljno opisuju signal nalik edemu koštane srži (bone marrow edema-like signal- BME) u sportaša kao spektar nalaza od fiziološke reakcije na trening do manifestacije stres ozljeda (39,

53). Schweitzer i White postavljaju pitanje uzročnosti: je li edem primarno posljedica promijenjene biomehanike ili pak uzrok naknadne promjene obrazaca kretanja, pri čemu njihov zaključak ide u smjeru dinamičke dvosmjerne veze (63). U kontekstu rasta, FOPE (focal periphyseal oedema) lezije predstavljaju poseban entitet; radi se o edematoznim promjenama oko djelomično zatvarajuće fize (najčešće u koljenu), koje se smatraju fiziološkim prijelaznim fenomenom pubertetskog rasta, a ne nužno patološkim stanjem (81). Iako su FOPE lezije dominantno opisane u donjim ekstremitetima, koncept peri–fizalnog edema kao potencijalno fiziološke, ali i potencijalno simptomatske pojave važan je za interpretaciju MRI nalaza u proksimalnom humerusu. Kwong i sur. sustavno su opisali normalan MRI razvoj proksimalnog humerusa u djece i adolescenata te naglasili regionalne varijacije u obrascu osifikacije, osobito kasnije zatvaranje posterolateralnog segmenta fize (40). Ova činjenica posebno je važna jer se upravo taj segment pokazuje najopterećenijim u kretanjima iznad glave.

Murachovsky i sur. opisali su radiografske promjene zone rasta u mladih bejzbol bacača, uključujući i one bez izraženih simptoma, dok je više autora (Pennock, Jawetz, Frush) pokazalo da MRI često otkriva rane promjene i edem koštane srži prije pojave kliničkih tegoba (52). Ovi radovi zajednički sugeriraju da postoji širok kontinuum adaptacijskih i patoloških promjena u zoni rasta proksimalnog humerusa, pri čemu klinička simptomatologija predstavlja tek “vrh ledenog brijega”.

2. CILJEVI I HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

Cilj ovog istraživanja je morfološki ispitati i usporediti zone rasta regije proksimalnog humerusa dominantne ruke mladih odbojkašica i mladih sportašica iste dobi koje nisu involvirane u tzv. overhead vrstu sportova.

Iz postavljenog Cilja istraživanja proizašle su dvije hipoteze:

Hipoteza 1 – ponavljani pokreti s visokim opterećenjima u odbojci utječu na zonu rasta u mladih sportašica

Hipoteza 2 – u sportašica uključenih u overhead sportove, morfološke karakteristike zone rasta proksimalnog humerusa dominantnog ekstremiteta razlikuju se od nedominantne strane

3. METODE ISTRAŽIVANJA

3.1. Dizajn eksperimenta

Istraživanje je provedeno kao prospektivna longitudinalna opservacijska studija s ponovljenim mjerenjima tijekom jedne natjecateljske sezone. Primarni cilj bio je procijeniti morfološka obilježja ploče rasta proksimalnog humerusa u adolescentnih odbojkašica te analizirati njihove promjene tijekom definiranog razdoblja praćenja.

Mjerenja su provedena u dvije vremenske točke. Prvo mjerenje (M1) provedeno je u rujnu 2023. godine, na početku natjecateljske sezone 2023./2024., prije kumulativnog izlaganja sezonskom trenažnom i natjecateljskom opterećenju, dok je drugo mjerenje (M2) provedeno po završetku natjecateljske sezone. Takav dizajn omogućio je longitudinalnu procjenu promjena morfoloških obilježja ploče rasta dominantne ruke tijekom promatranog razdoblja. Drugo je mjerenje provedeno u rujnu 2024. godine. Razmak između dva mjerenja iznosio je približno dvanaest mjeseci i obuhvaća cjelovit godišnji natjecateljski ciklus. Rujan se pritom ne smatra razdobljem mirovanja jer u njemu klub održava pripremne, reprezentativne i druge utakmice, pa razdoblje između dvaju mjerenja ne sadrži pravu stanku u opterećenju.

Istraživanje je uključivalo tri razine usporedbe:

- Razina 1 — Intraindividualna usporedba: analizirane su razlike između dominantne i nedominantne ruke unutar iste ispitanice na početku sezone, čime je nedominantna ruka služila kao unutarnja kontrola.
- Razina 2 — Longitudinalna analiza: provedena je analiza promjena dominantne ruke od početka do kraja natjecateljske sezone.
- Razina 3 — Eksterna kontrola: nalazi odbojkašica uspoređeni su s kontrolnom skupinom djevojaka koje se nisu bavile overhead sportovima.

Sva MRI mjerenja provedena su prema unaprijed definiranom i standardiziranom protokolu, a iste anatomske regije procjenjivane su u svim vremenskim točkama kako bi se osigurala usporedivost mjerenja i smanjila metodološka varijabilnost.

3.2. Ispitanici

Uzorak studije uključivao je 32 odbojkašice koje su obrađene na Kliničkom zavodu za dijagnostičku i intervencijsku radiologiju KB Dubrava u Zagrebu. Sve ispitanice regrutirane su iz Odbojkaškog kluba Mladost Zagreb. Istraživanjem su obuhvaćene mlade sportašice, aktivne odbojkašice u dobi od 13 do 16 godina, različitih igračkih pozicija, uključujući primačice, blokerice, korektorice i libero. Neovisno o igračkoj poziciji, sve su ispitanice u klupskom trenažnom procesu prolazile isti program vježbi, koji je uključivao ponavljane smečeve i servise, pa su sve tijekom treninga bile izložene overhead opterećenju koje je predmet ovoga istraživanja. Razlike među pozicijama izraženije su u natjecateljskim uvjetima nego na treningu. Budući da broj zamaha po pojedinoj sportašici nije bilježen izloženost se ovdje opisuje kvalitativno, na temelju strukture trenažnog programa, a ne mjerenja. Kod odbojkašica ove dobi očekuje se aktivan rast, a time i veća podložnost ploča rasta mikrotraumatskim promjenama. Snimanja odbojkašica provedena su u rujnu 2023. (M1) i rujnu 2024. godine (M2), dok su snimanja kontrolne skupine provedena u razdoblju od rujna 2023. do prosinca 2025. godine.

Sve su ispitanice bile asimptomatske, bez dokumentirane aktivne ozljede ramena, što je bio nužan uvjet uključivanja u studiju. Svaka odbojkašica uključena u istraživanje bila je podvrgnuta standardiziranom MR snimanju ramena u dvije vremenske točke: na početku i na kraju natjecateljske sezone. Od ispitanica ih je 30 bilo dešnjakinja, a dvije ljevakinje. U svim analizama koje uspoređuju dominantnu s nedominantnom rukom dominantnost je određena individualno za svaku ispitanicu, neovisno o anatomskoj strani; u dviju ljevorukinja kao dominantna je uzeta lijeva ruka.

Kriteriji za ulazak u istraživanje bili su:

- životna dob od 13 do 16 godina
- aktivno bavljenje odbojkom u klupskom programu koji je obuhvaćao do dva treninga dnevno tijekom pet dana u tjednu
- zdrave bez dokumentirane ozljede ramena u zadnjih 6 mjeseci te odmora od treninga ili natjecanja od minimalno 3 tjedna
- klinički uredan neurovaskularni status i stabilnost ramena.

Kriteriji isključivanja obuhvaćali su:

- akutnu ozljedu ramena, lakta ili vratne kralježnice tijekom šest mjeseci prije uključivanja u istraživanje;
- prethodne kirurške zahvate na ramenom obruču ili vratnoj kralježnici;
- sustavne bolesti koje mogu zahvatiti muskuloskeletni sustav;
- endokrinološke poremećaje koji mogu utjecati na rast i mineralizaciju kostiju;
- primjenu kortikosteroidne ili imunosupresivne terapije;
- apsolutne kontraindikacije za MRI pretragu;
- odbijanje sudjelovanja ili nemogućnost dovršetka planiranih MRI pregleda.

Biološka zrelost ispitanica nije formalno procijenjena u sklopu ovog istraživanja. Stupanj pubertetskog razvoja (Tannerova ljestvica) niti faza ubrzanog rasta (PHV, engl. peak height velocity) nisu determinirani. Sve su ispitanice regrutirane unutar kronološkog raspona od 13 do 16 godina, koji u ženskoj populaciji obuhvaća širok spektar biološke zrelosti — od kasnog puberteta do postpubertetske faze. Ova heterogenost u biološkoj dobi nije kontrolirana u statističkoj analizi te predstavlja ograničenje koje je detaljnije razmotreno u poglavlju 5.6.

Korištena je dvostruka kontrola. Prva je nedominantna ruka ispitanica. Raspodjela ispitanica po dominantnoj strani u objema skupinama (odbojkašice n = 32; kontrolna skupina n = 13) prikazana je u Tablici 3. Drugi oblik kontrole bila je skupina od 13 djevojaka iste dobi koje se nisu bavile overhead sportovima niti organiziranim sportom intenzitetom ≥3 sata tjedno.

Tablica 3. Raspodjela ispitanica po dominantnoj strani **u objema skupinama (odbojkašice n = 32; kontrolna skupina n = 13)**

Dominantna ruka	Odbojkašice (n = 32)	Kontrolna skupina (n = 13)
Desna	30 (93,8 %)	13 (100,0 %)

Dominantna ruka	Odbojkašice (n = 32)	Kontrolna skupina (n = 13)
Lijeva	2 (6,3 %)	0 (0,0 %)
Ukupno	**32 (100,0 %)**	**13 (100,0 %)**

Ispitanice i pripadnice kontrolne skupine informirane su i upoznate s hipotezama i ciljem istraživanja. Potpisane su suglasnosti roditelja i maloljetnih ispitanica. Istraživanje je odobrilo nadležno etičko povjerenstvo Kliničke bolnice Dubrava u Zagrebu (odobrenje broj 2026/0626-10, od 26. lipnja 2026.godine), a provedeno je u skladu s načelima Helsinške deklaracije (80). Istraživanje je pokrenuto 2019. godine, kada je u rujnu provedeno prvo snimanje početne skupine ispitanica. Zbog izvanrednih okolnosti povezanih s pandemijom bolesti COVID-19, uključujući prenamjenu i zatvaranje Kliničke bolnice Dubrava za redovnu djelatnost, praćenje te skupine nije bilo moguće dovršiti, pa njezini podaci nisu uključeni u analize prikazane u ovom radu. Nakon normalizacije rada ustanove istraživanje je ponovno pokrenuto s novom generacijom ispitanica istoga kluba, čije je prvo mjerenje provedeno u rujnu 2023. godine. Time je ukupna dinamika provedbe studije bila znatno produljena, a formalna etička suglasnost zatražena je i pribavljena naknadno. Svi su postupci provedeni uz prethodni pristanak ispitanica i njihovih roditelja/skrbnika te uz poštivanje etičkih načela zaštite sudionika tijekom cijelog razdoblja istraživanja. Upitnik je priložen u dodatku rada.

Potrebno je izrijekom navesti da u razdoblju prikupljanja podataka formalno etičko odobrenje još nije bilo izdano. Pisana suglasnost roditelja odnosno skrbnika i samih ispitanica pribavljena je prije svakoga snimanja, a istraživanje je u cijelosti provedeno u skladu s načelima Helsinške deklaracije (80); nadležno je etičko povjerenstvo naknadno razmotrilo i odobrilo cjelokupni protokol, uključujući postupke već provedene prije izdavanja odobrenja. Retrospektivni karakter odobrenja predstavlja ograničenje koje je razmotreno i u poglavlju 5.6.

Magnetna rezonancija zdravih maloljetnih ispitanica provedena je bez ionizirajućeg zračenja, kontrasta, sedacije ili anestezije. Time je opterećenje za ispitanice smanjeno isključivo na vrijeme provedeno u uređaju i moguću nelagodu zbog mirovanja. Sve su ispitanice i njihovi roditelji unaprijed obaviješteni o mogućnosti incidentalnih nalaza. Svaki je pregled očitao specijalist muskuloskeletne radiologije, a nalazi koji nisu bili predmet istraživanja, ali su imali moguću kliničku važnost, priopćeni su roditeljima odnosno skrbnicima uz preporuku daljnje obrade. Tijekom procesa nije zabilježeno značajnog patološkog supstrata.

Svi su podaci prikupljeni i pohranjeni u pseudonimiziranom obliku. Osobni identifikatori zamijenjeni su brojčanim šiframa, a ključ za povezivanje čuva se odvojeno od

istraživačke baze i dostupan je isključivo voditelju istraživanja. Snimke su prije analize anonimizirane uklanjanjem svih grafičkih podataka o ispitanicama. Podaci se čuvaju na CD diskovima (kod voditelja) te na PACS sustavu K.B. Dubrava (idućih 5 godina) te se neće upotrebljavati u druge svrhe bez novoga etičkog odobrenja.

Izjava o sukobu interesa: autor izjavljuje da je jedna od ispitanica iz kontrolne skupine rodbinski povezana s autorom (kćer), u ovoj studiji ne postoji financijski interes. Istraživanje nije financirano od strane proizvođača opreme niti drugih subjekata s komercijalnim interesom u ishodu.

3.3. Mjerni instrumenti

3.3.1. Opis MRI sustava i protokola snimanja

MRI snimanja obavljena su na dva MR uređaja iste ustanove: Philips Ingenia 1,5 T (Best, Nizozemska) i Siemens Magnetom Vida 3 T (Erlangen, Njemačka). Prvo je mjerenje odbojkašica u cijelosti provedeno na uređaju od 1,5 T, a drugo u cijelosti na uređaju od 3 T. Snimanja kontrolne skupine, koja su se protegnula na znatno dulje razdoblje, provedena su na objema platformama 5 ispitanica na uređaju od 1,5 T i 8 na uređaju od 3 T, ovisno o tome je li ispitanica snimljena prije ili nakon prestanka rada prvoga uređaja. Posljedice ove mjerne heterogenosti razmotrene su u poglavlju 5.6. Za sva su snimanja primijenjeni usklađeni protokoli snimanja (iste sekvence i anatomske ravnine, uz parametre harmonizirane u mjeri u kojoj to obje platforme dopuštaju). Oba uređaja redovito se održavaju prema standardima kvalitete ustanove sukladno smjernicama American College of Radiology (3). Formalna unakrsna kalibracija između uređaja u sklopu ovog istraživanja nije bila provedena; mogući učinak sustavne razlike između platformi na longitudinalne nalaze razmotren je u poglavlju 5.6. Ovo predstavlja metodološko ograničenje koje treba uzeti u obzir pri interpretaciji apsolutnih vrijednosti longitudinalnih nalaza, posebno za varijablu Dužina EP. Za snimanja korištena je specifična zavojnica za rameni zglob. Pregled je proveden nativno, bez primjene kontrastnog sredstva te bez sedacije ili anestezije.

Korišten je sljedeći standardizirani protokol sekvenci: parametri za uređaj od 1,5 T navedeni su u Tablici 5, a za uređaj od 3 T u Tablici 6.

Tablica 5. Parametri MRI sekvenci protokola ramena — Philips Ingenia 1,5 T

Sekvenca i ravnina	TR (ms)	TE (ms)	FOV (mm)	Matrica	NSA	Sloj+razm. (mm)	Flip (°)
T2W TSE SPAIR — koso koronalno (COR T2W TSE SPAIR)	2 500–3 500	60–80	140–160	288×224 – 320×256	1–2	3,0 + 0,3–0,5	90°/180°
T2W TSE — koso sagitalno (SAG T2W TSE)	3 000–4 000	80–100	140–160	320×256	1–2	3,0 + 0,3–0,5	90°/180°
PDW TSE SPAIR — koso sagitalno (SAG PDW TSE SPAIR)	2 000–2 800	25–35	140–160	320×256	1–2	3,0 + 0,3	90°/180°
PDW TSE SPAIR — transverzalno (TRA PDW TSE SPAIR)	2 000–2 800	25–35	150–170	256×200	1–2	3,0 + 0,3	90°/180°
DWI SE-EPI — koronalno (COR DWI)	3 000–5 000	60–80	200–240	128×128	3–6	3,0 + 0,5	90°

Napomena: SPAIR = spektralna supresija masti. Flip angle: ekscitacijski/refokusacijski puls TSE. DWI b-vrijednosti: 0 i 750–800 s/mm².

Nazivi sekvenci navedeni su prema Philipsovoj nomenklaturi (SPAIR = spectral attenuated inversion recovery). Prikazane vrijednosti predstavljaju nominalne raspone protokola, a ne parametre očitane iz zaglavlja pojedinačnih pregleda; unutar navedenih raspona parametri su mogli neznatno varirati među ispitanicima.

NSA = broj prosjeka signala.

Tablica 6. Parametri MRI sekvenci protokola ramena — Siemens Magnetom Vida 3 T

Sekvenca i ravnina	TR (ms)	TE (ms)	FOV (mm)	Matrica	NSA	Sloj+razm. (mm)	Flip (°)
T2 TSE FS — koro. (t2_tse_cor_fs_320)	3 000	66	170	320	1	3,0 + 30 %	—
T2 TSE — sag. (t2_tse_sag_320)	4 000	72	160	320	1	3,0 + 40 %	—
PD TSE FS — sag. (PD_tse_fs_sag_320)	3 000	34	160	320	1	3,0 + 10 %	—
PD TSE FS — aks. (pd_tse_tra_320 FS)	4 270	32	160	320	1	3,0 + 10 %	—
DWI ZOOMit EPI — koro. (ep2d_diff_zoomit)	4 400	94	200	—	—	3,0 + 20 %	90°

Napomena: Flip angle za TSE sekvence nije prikazan (nalazi se pod tabom Contrast). Distance Factor = relativni međuslojni razmak (% debljine sloja). DWI ZOOMit: b = 50 i 800 s/mm². Concatenations: broj segmenata akvizicije.

- Kosa koronalna T2 mjerena slika s potiskivanjem signala masti (fat suppression, FS) — debljina sloja 3 mm
- Kosa sagitalna PD mjerena slika s potiskivanjem signala masti — debljina sloja 3 mm
- Kosa sagitalna T2 mjerena slika bez potiskivanja signala masti — debljina sloja 3 mm
- Transverzalna PD mjerena slika s potiskivanjem signala masti — debljina sloja 3 mm
- Difuzijska sekvenca (DWI) —koronalna ravnina, za procjenu difuzijskih promjena u ploči rasta

Snimanje je u svim slučajevima provedeno uz ispitanicu u ležećem položaju na leđima (*supinacijski položaj*), s ispruženim gornjim ekstremitetima uz tijelo i dlanovima okrenutim prema gore. Radi standardizacije protokola i minimiziranja interindividualne varijabilnosti položaja, dominantna ruka snimana je uvijek prva. Prethodno ispitivanje trajanja pregleda i suradljivosti ispitanica pokazalo je da ovaj redoslijed osigurava optimalne uvjete akvizicije. Naime, ispitanica je u prvom dijelu pregleda odmornija, što smanjuje rizik od artefakata uzrokovanih nevoljnim pokretima. Za imobilizaciju ramena i optimizaciju položaja zavojnice primijenjen je posebno oblikovani jastuk za fiksaciju ramenog zgloba, koji je osiguravao dosljedan anatomski položaj i minimizirao translacijske i rotacijske pokrete humerusa tijekom snimanja. Snimanje je provedeno uz primjenu namjenske (*dedicated*) višekanalne zavojnice za rameni zglob (*dedicated shoulder coil*), koja u regiji ramenog obruča daje viši omjer signala i šuma nego zavojnice opće namjene (*signal-to-noise ratio*, SNR), čime je postignuta prostorna razlučivost i tkivni kontrast potreban za morfološku analizu ploče rasta. Ukupno trajanje pregleda po jednoj ruci iznosilo je između 15 i 20 minuta, što je uključivalo pozicioniranje, lokalizacijska snimanja (*scout/localizer*) i akviziciju svih planiranih sekvenci. Nakon završetka snimanja dominantne ruke, ispitanica je repozicionirana bez napuštanja uređaja te je nastavljen identični protokol za nedominantnu ruku. Ukupno trajanje jednog pregleda (obje ruke) iznosilo je između 30 i 40 minuta.

3.4. Mjerene varijable

U ovom se radu nazivi ploča rasta, epifizna ploča i fiza (lat. physis) rabe kao istoznačnice i označavaju hrskavičnu zonu rasta smještenu između epifize i metafize

duge kosti. Radi terminološke ujednačenosti u tekstu se dosljedno rabi naziv ploča rasta, dok se u nazivima varijabli, tablicama i opisima slika rabi kratica EP (epifizna ploča). Naziv zona rasta upotrebljava se isključivo u općem, opisnom smislu, a ne kao oznaka mjerene strukture.

MR evaluacija uključivala je kontinuirane i kategorijske varijable. Kontinuirane su mjere obuhvaćale dvije različite anatomske strukture, što je pri tumačenju rezultata nužno razlikovati. Prva je mjera dužina ploče rasta (Dužina EP, mm), definirana kao udaljenost između medijalnoga i lateralnog kraja fizalne linije na kosoj koronalnoj ravnini, tj. od točke u kojoj fizalna ploča mijenja smjer prema kranijalno do točke u kojoj mijenja smjer prema kaudalno (v. Sliku 11). Druge četiri mjere ne opisuju ploču rasta, nego epifizu: riječ je o kraniokaudalnoj (KK) visini epifize, izmjerenoj kao okomita udaljenost između vodoravnice položene kroz vrh humeralne glave i epifize, i to na četirima položajima, medijalnom i lateralnom na kosoj koronalnoj te anteriornom (ventralnom) i dorzalnom na kosoj sagitalnoj ravnini (v. Slike 9 i 10; sve u mm). Radi usklađenosti s prethodno objavljenim tablicama zadržana je oznaka EP KK, no ona označava kraniokaudalnu visinu epifize na navedenom položaju, a ne dimenziju hrskavične ploče rasta. Ta je razlika bitna jer visina epifize skalira s veličinom kosti i tijela, pa se razlike u tim četirima mjerama ne mogu tumačiti kao izravan pokazatelj promjena ploče rasta. Sva su mjerenja provedena na sloju na kojem je fizalna linija bila najjasnije prikazana u punoj duljini, elektroničkim kaliperom, s očitanjem na jednu decimalu. Način mjerenja prikazan je na Slikama 9 i 10 za kraniokaudalnu visinu epifize te na Slici 11 za dužinu ploče rasta. Kategorijske i ordinalne varijable uključivale su: fuziju ploče rasta (0 = otvorena, 1 = zatvorena), stupanj edema koštane srži (0 = bez edema, 1 = blagi edem, 2 = izraženi edem) te lokalizaciju difuzijskih promjena (0 = bez promjena, 1 = ploča rasta, 2 = ploča i metafiza).

Edem koštane srži analiziran je na T2 slikama s potiskivanjem signala masti prema klasifikacijskoj shemi preuzetoj iz studije Johansson i sur. (37): stupanj 0 = bez edema; stupanj 1 = blagi edem (difuzno pojačanje signala ograničeno na fizalnu hrskavicu); stupanj 2 = izraženi edem (pojačanje signala koje se širi na subhondralnu kost metafize). Navedena trostupanjska ljestvica primijenjena je u izvornoj studiji Johansson i sur. (37) na uzorku elitnih asimptomatskih tenisača te je konzistentno korištena u metodološki srodnim MRI studijama fizalnih promjena u adolescentnih sportaša (35, 57), čime je njezina primjenjivost u sličnim populacijama dokumentirana u literaturi. Valja napomenuti da su Johansson i sur. (37) u izvornoj studiji izvijestili o

pouzdanosti među ocjenjivačima; relativna je pouzdanost radiologa bila izvrsna (ICC 0,78–0,96). U ovom istraživanju takva analiza nije provedena jer su sve ocjene od početka donesene konsenzusom dvaju radiologa, bez bilježenja pojedinačnih ocjena. To predstavlja metodološko ograničenje u odnosu na izvornu studiju i treba ga uzeti u obzir pri interpretaciji nalaza temeljenih na ordinalnim varijablama.

Difuzijska magnetska rezonancija može pomoći u prepoznavanju ranih znakova degeneracije hrskavice, što je posebno korisno u adolescentnih sportaša. U ovom istraživanju difuzija je kodirana kao: 0 = bez promjena, 1 = promjene ograničene na ploču rasta, 2 = promjene zahvaćaju ploču rasta i metafizu.

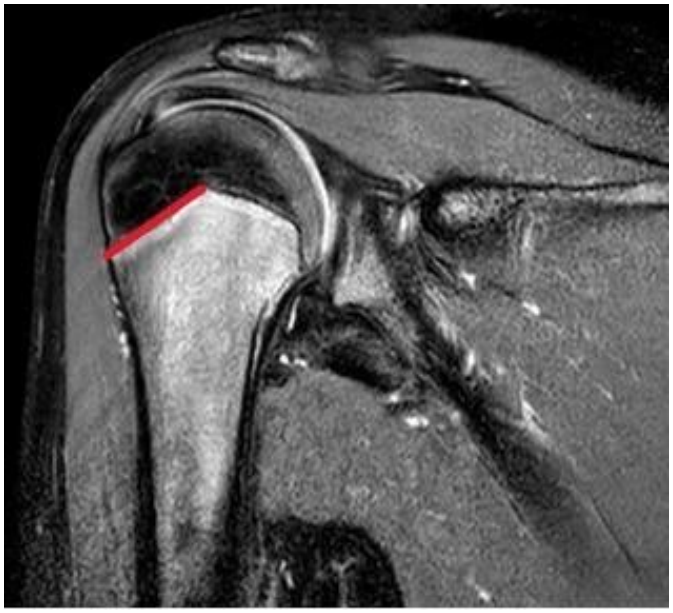
Slike 8–13 prikazuju primjere MRI snimaka s označenim mjerenjima ploče rasta na koronalnim kosim T2 sekvencama, sagitalnim T2 sekvencama bez i s potiskivanjem signala masti, kao i primjer difuzijskog MRI nalaza. Snimke su anonimizirane te su ih konsenzusom analizirala dvojica iskusnih muskuloskeletnih radiologa.



Slika 8. Koronalna kosa T2 mjerena slika ramena s potiskivanjem signala masti. Kraniokaudalna visina epifize (EP KK) izmjerena medijalno i lateralno, povlačenjem okomice od epifize ortogonalno na vodoravnu liniju od vrha humerusa.



Slika 9. Sagitalna kosa T2 mjerena slika ramena s potiskivanjem signala masti. Kraniokaudalna visina epifize (EP KK) izmjerena ventralno (anteriorno) i dorzalno, povlačenjem okomice od epifize ortogonalno na vodoravnicu položenu kroz vrh humeralne glave.



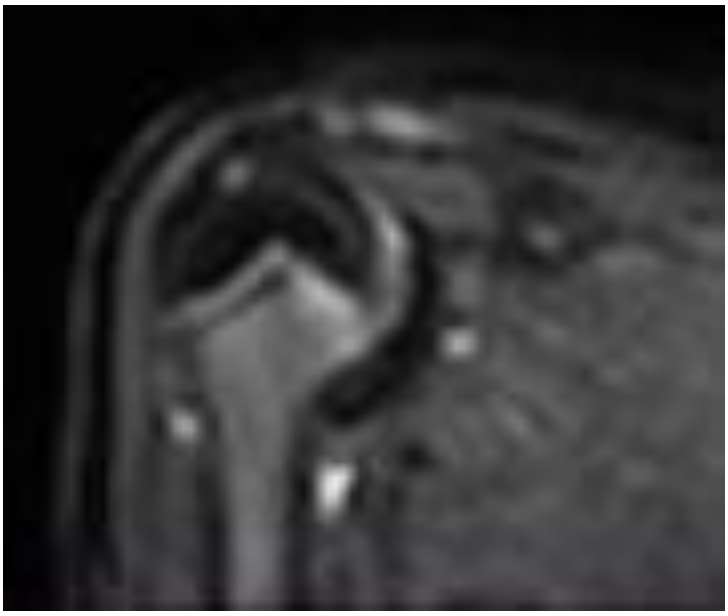
Slika 10. Koronalna kosa T2 mjerena slika ramena s potiskivanjem signala masti. Dužina ploče rasta (Dužina EP) mjerena je kao horizontalna udaljenost između medijalnog i lateralnog kraja fizalne linije — od točke gdje fizalna ploča mijenja smjer prema kranijalno do točke gdje mijenja smjer prema kaudalno.



Slika 11. Sagitalna T2 mjerena slika ramena bez potiskivanja signala masti. Procjena fuzije ploče rasta



Slika 12. Koronalna kosa T2 mjerena slika ramena s potiskivanjem signala masti. Subjektivno ocjenjivan intenzitet signala koštane srži uz ploču rasta (stupnjevanje edema prema Johansson i sur. (37)).



Slika 13. Difuzijska MRI sekvenca (DWI) u koronalnoj ravnini. Prikaz difuzijskih promjena u ploči rasta i metafizi proksimalnog humerusa.

3.5. Analiza snimaka

Sve MRI snimke pohranjene su i analizirane putem sustava za arhiviranje i komunikaciju medicinskih slika INFINITT PACS (INFINITT Healthcare, Seoul, Republika Koreja), koji je bio instaliran na Kliničkom zavodu za dijagnostičku i intervencijsku radiologiju KB Dubrava. Sustav podržava DICOM usklađenost i IHE (Integrating the Healthcare Enterprise) standarde interoperabilnosti, što je omogućilo prikaz snimaka s obaju MRI uređaja korištenih u istraživanju unutar jedinstvenog sučelja. Mjerenja morfoloških parametara ploče rasta provedena su izravno na dijagnostičkoj radnoj stanici INFINITT PACS-a primjenom kalibriranih elektroničkih mjernih alata (elektronički kaliper), bez naknadne obrade ili konverzije podataka, čime je osiguran integritet originalnih DICOM podataka tijekom cijelog analitičkog procesa.

Sa snimki su uklonjene sve grafičke informacije o pacijentu. Preglede su zajednički analizirala dvojica iskusnih muskuloskeletnih radiologa, bez uvida u podatke o ispitanicama. Sve su ocjene od početka donošene konsenzusom dvaju ocjenjivača, u zajedničkom očitanju i bez zasebnog bilježenja pojedinačnih ocjena.

Kvantitativna analiza suglasnosti između ocjenjivača (ICC za kontinuirane varijable, weighted kappa za ordinalne) nije provedena kao formalni dio protokola studije jer su radiolozi od početka radili konsenzusom, bez bilježenja individualnih ocjena. Metodološka implikacija ovog pristupa jest da nije moguće kvantificirati razinu intersubjektivne varijabilnosti pri ocjeni ordinalnih varijabli (edem koštane srži, difuzijske promjene). Posljedično, zaključci koji se temelje na tim varijablama, osobito distribucijske razlike između dominantne i nedominantne ruke te sezonska promjena edema trebaju se interpretirati s povećanim oprezom u usporedbi s kontinuiranim mjerama za koje je stupanj mjerne pogreške bolje poznat. Za buduća istraživanja preporučuje se naknadno slijepo ponovno mjerenje reprezentativnog podskupa snimaka od strane dvaju neovisnih ocjenjivača radi izračuna barem orijentacijskoga koeficijenta intraklasne korelacije (ICC) za kontinuirane te ponderiranoga kappa-koeficijenta za ordinalne varijable, čime bi se pouzdanost mjerenja mogla i formalno kvantificirati.

3.6. Statistička obrada

Veličina uzorka procijenjena je a priori analizom statističke snage za primarni ishod, promjenu dužine ploče rasta dominantne ruke kroz sezonu. Temeljem podataka iz usporedive studije (Johansson i sur. (37); $d \approx 0,80$), uz željenu razinu snage $1-\beta = 0,80$ i

razinu pogreške α = 0,05, procijenjeni minimalni uzorak za zavisni (upareni) t-test iznosi n = 15 ispitanica (G*Power 3.1). S obzirom na predviđeni gubitak ispitanica od 20–25 % unutar sezone, regrutirane su 32 ispitanice; stvarni je osip iznosio 37,5 %, pa je longitudinalna analiza provedena na 20 ispitanica, što nadmašuje a priori procijenjeni prag i pri d = 0,80 odgovara statističkoj snazi od približno 0,92. Radi usporedbe se napominje da bi uz iste parametre (d = 0,80; 1−β = 0,80; α = 0,05) procijenjeni uzorak za nezavisni t-test s dvjema skupinama iznosio 26 ispitanica po skupini; ta vrijednost nije, međutim, mjerodavna za primarni, longitudinalni ishod, koji se provjerava uparenim testom. Opažena veličina efekta za primarni ishod bila je velika (d = 1,20 za Dužinu EP). Vrijednost d ≈ 0,80 preuzeta je, međutim, iz presječne usporedbe dominantne i nedominantne ruke (Johansson i sur. (37)), pa njezin prijenos na longitudinalnu promjenu istoga ekstremiteta predstavlja pretpostavku koju treba uzeti u obzir pri tumačenju. Pri interpretaciji se naglasak stavlja na veličine efekta i intervale pouzdanosti, a ne na post-hoc snagu, koja - izračunata iz opažene veličine efekta - nije valjan pokazatelj adekvatnosti uzorka. Za sekundarne ishode (kategorijske i ordinalne varijable) statistička je snaga bila ograničena, što je uzeto u obzir pri interpretaciji rezultata. Radi potpunosti navodi se postignuta snaga i za preostale dvije razine usporedbe, izračunata iz veličine uzorka i pretpostavljene veličine efekta (α = 0,05, dvosmjerno): za longitudinalnu analizu (n = 20, upareni t-test, d = 0,80) iznosi 0,92; za usporedbu odbojkašica i kontrolne skupine (n = 20 naspram n = 13) 0,59 pri d = 0,80 odnosno 0,28 pri d = 0,50; a za usporedbu dominantne i nedominantne ruke (n = 32, upareni t-test, d = 0,37) 0,53. Iz toga slijedi da usporedba s kontrolnom skupinom nije bila u stanju pouzdano otkriti ni velike efekte, a usporedba ruku ni srednje, zbog čega izostanak statističke značajnosti u tim analizama — osobito za edem i difuzijske promjene — nije dokaz odsutnosti razlike. To vrijedi i pri interpretaciji rezultata.

Statistička analiza obavljena je pomoću t-testa za zavisne uzorke (dominantna naspram nedominantna ruka; longitudinalna usporedba početak–kraj sezone) i t-testa za nezavisne uzorke (odbojkašice naspram kontrolna skupina) za kontinuirane varijable s normalnom distribucijom. Normalnost distribucije provjerena je Shapiro–Wilkovim testom. Rezultati testa za sve analizirane skupove podataka prikazani su u Tablici 7. Za distribucije koje su zadovoljile kriterij normalnosti (p > 0,05) primijenjen je parametrijski pristup (t-test); za one koje ga nisu zadovoljile (Δ Dužina EP dom−ned: W = 0,931, p = 0,042; v. Tablicu 7) primijenjen je neparametrijski

ekvivalent (Wilcoxon test predznačenih rangova). Razlike u ordinalnim i kategorijskim varijablama analizirane su Fisherovim egzaktnim testom (kategorijske varijable, npr. difuzijske promjene) te Mann–Whitneyjevim U-testom i Wilcoxonovim testom predznačenih rangova (ordinalne varijable, npr. stupanj edema u nezavisnim odnosno zavisnim/sezonskim usporedbama). Bonferronijeva se korekcija u ovom radu primjenjuje unutar svake razine usporedbe zasebno, i to na obitelj od pet kontinuiranih mjera (Tablice 8, 11 i 13); ona se ne primjenjuje na skup svih testova provedenih u radu niti na ordinalne analize, što pri tumačenju treba imati na umu. Nadalje, za zavisne je uzorke veličina efekta definirana kao omjer prosječne razlike i standardne devijacije razlika, što odgovara Cohenovu d_z, dok je za nezavisne uzorke upotrijebljen klasični Cohenov d s objedinjenom standardnom devijacijom; iste oznake stoga ne označavaju istovjetnu veličinu i nisu izravno usporedive. Analiza je provedena po načelu dostupnih slučajeva: nedostajući podaci nisu nadomještani nikakvim postupkom imputacije. Jedini je izvor nedostajućih podataka osip između dvaju mjerenja (37,5 %), čije su moguće posljedice za selekcijsku pristranost zasebno ispitane u poglavlju 4.1. Razina statističke značajnosti postavljena je na $p < 0,05$. Radi izbjegavanja dvoznačnosti, oznaka W u ovom se radu odnosi isključivo na statistiku Shapiro–Wilkova testa, dok se statistika Wilcoxonova testa predznačenih rangova (zbroj rangova pozitivnih razlika) označava slovom T. S obzirom na eksploratoran karakter istraživanja, mali uzorak i ograničenu statističku snagu za sekundarne ishode, Bonferronijeva korekcija za višestruko testiranje nije korištena kao primarni kriterij statističkog odlučivanja, no korigirane su vrijednosti radi transparentnosti prikazane uz nekorigirane (v. Tablice 11 i 13); dobivene p-vrijednosti za sekundarne analize interpretiraju se s odgovarajućim oprezom i u kontekstu veličine efekta. Odluka da se Bonferronijeva korekcija ne koristi kao primarni kriterij odlučivanja temelji se na trima razlozima: (11) istraživanje je eksploratorno, a ne konfirmatorno - primarni cilj nije testiranje unaprijed specificiranih hipoteza uz strogu kontrolu pogreške tipa I, već generiranje hipoteza za buduća istraživanja na većim uzorcima; (47) pri veličini uzorka od $n = 20$ za sekundarne ishode, Bonferronijeva korekcija dodatno bi reducirala statističku snagu do razine koja bi onemogućila detekciju čak i velikih efekata, povećavajući rizik pogreške tipa II; (26) u metodološki srodnim eksploratornim MRI studijama na malim uzorcima (Johansson i sur. (37); Pennock i sur. (57)) korekcija za multipla testiranja standardno nije primjenjivana, što ovaj pristup čini konzistentnim s usporedivom literaturom.

Za sve kontinuirane varijable izračunate su mjere centralne tendencije i raspršenja (aritmetička sredina ± standardna devijacija). Veličina efekta za zavisne uzorke izražena je Cohenovim d koeficijentom ($d = \Delta\bar{X} / SD$ razlike), a za nezavisne uzorke na temelju združene standardne devijacije. Interpretacija veličine efekta provedena je prema konvencionalnim (Cohenovim) pragovima: zanemariv efekt $d < 0,2$; mali efekt $0,2 \leq d < 0,5$; srednji efekt $0,5 \leq d < 0,8$; veliki efekt $d \geq 0,8$. Statistička obrada podataka provedena je u programu JASP verzija 0.19.3. Analiza statističke snage provedena je u programu G*Power verzija 3.1.9.7 (Universität Düsseldorf, Njemačka).

Uz MRI mjerenja, za 22 od 32 odbojkašice prikupljeni su i dopunski antropometrijski podaci (visina, tjelesna masa, leđa, raspon ruku te dominantnost ruke) kao deskriptivni profil uzorka, s ciljem moguće primjene u budućim analizama. Kontrolna skupina nije obuhvaćena ovim mjerenjem (Tablica 2).

Tablica 7. Rezultati Shapiro–Wilkovog testa normalnosti distribucije za analizirane kontinuirane varijable

Varijabla	Analiza	N	W	p	Primijenjen test
A) Dominantna naspram nedominantna ruka, M1 (početak sezone) — razlike (n = 32)					
Dužina EP (dom − ned)	Razlika	32	0,931	0,042*	Wilcoxon
EP KK anteriorno (dom − ned)	Razlika	32	0,944	0,097	t-test zavisni
EP KK dorzalno (dom − ned)	Razlika	32	0,980	0,788	t-test zavisni
EP KK medijalno (dom − ned)	Razlika	32	0,984	0,906	t-test zavisni
EP KK lateralno (dom − ned)	Razlika	32	0,985	0,932	t-test zavisni
B) Longitudinalna analiza — razlike M2−M1 (kraj − početak sezone), dominantna ruka (n = 20)					
Δ Dužina EP (M2−M1)	Razlika	20	0,924	0,116	t-test zavisni
Δ EP KK anteriorno (M2−M1)	Razlika	20	0,965	0,653	t-test zavisni
Δ EP KK dorzalno (M2−M1)	Razlika	20	0,983	0,968	t-test zavisni
Δ EP KK medijalno (M2−M1)	Razlika	20	0,969	0,743	t-test zavisni
Δ EP KK lateralno (M2−M1)	Razlika	20	0,962	0,574	t-test zavisni
C) Odbojkašice (M2, kraj sezone, n = 20) i kontrolna skupina (n = 13)					
Dužina EP — odbojkašice M2 (kraj sezone)	Aps.	20	0,932	0,168	t-test nez.
Dužina EP — kontrolna skupina	Aps.	13	0,961	0,761	t-test nez.

*Napomena: * $p < 0,05$ — ne zadovoljava kriterij normalnosti; primijenjen neparametrijski test. Aps. = apsolutne vrijednosti; Razlika = razlika dom−ned, odnosno*

M2−M1 (M2 = kraj sezone, M1 = početak sezone). Kratice: EP = epifizna ploča; KK = kraniokaudalno.

4. REZULTATI

U ovome poglavlju prikazani su rezultati morfološke analize ploče rasta proksimalnog humerusa dobiveni magnetskom rezonancijom (MRI). Statistička obrada provedena je u tri analitička koraka: (1) usporedba morfoloških karakteristika dominantne i nedominantne ruke u skupini od 32 odbojkašice na početku natjecateljske sezone, (2) longitudinalna analiza promjena morfoloških parametara dominantne ruke u podskupini od 20 odbojkašica koje su ostale aktivne do završetka sezone, te (3) usporedba morfoloških nalaza odbojkašica na kraju sezone s kontrolnom skupinom od 13 djevojaka iste dobi koje nisu uključene u overhead sportove.

4.1. Opis uzorka

Istraživanjem je inicijalno obuhvaćeno 32 aktivne odbojkašice (prosječna dob 14,34 ± 0,97 godina), koje su u dobi od 13 do 16 godina redovito sudjelovale u treninzima i natjecanjima. Sve su ispitanice bile bez kliničkih simptoma u trenutku prvog mjerenja, bez dokumentirane anamneze akutne ozljede ramena u posljednjih šest mjeseci. Od 32 odbojkašice, 30 (93,8 %) je bilo dešnjakinja, a dvije (6,3 %) s dominantnom lijevom rukom; u analizi je dominantna ruka određena individualno za svaku ispitanicu.

Na kraju sezone ponovnom MRI snimanju pristupilo je 20 odbojkašica (62,5 %) koje su nastavile s aktivnim sportskim sudjelovanjem. Preostalih 12 ispitanica (37,5 %) prestalo je trenirati u klubu tijekom sezone i nije bilo dostupno za završno mjerenje. Pojedinačni razlozi prestanka nisu bilježeni; nijedna od njih nije prijavila ozljedu ramena zbog koje bi bila upućena na daljnju obradu. Kako bi se procijenio rizik selekcijske pristranosti, uspoređene su polazne (M1) vrijednosti između 20 ispitanica koje su dovršile studiju i 12 koje nisu. Skupine se nisu statistički značajno razlikovale u polaznoj dužini ploče rasta (dovršile: 25,10 ± 2,87 mm; nisu dovršile: 24,33 ± 2,68 mm; t-test za nezavisne uzorke, $t(81) = 0,75$; $p = 0,462$), što upućuje na to da je podskupina koja je dovršila mjerenje bila reprezentativna za primarni ishod. Izraženi edem (stupanj 2) na početku sezone ipak je bio numerički češći u ispitanica koje kasnije nisu dovršile studiju (58 % naspram 35 %; Mann–Whitneyjev U-test, $p = 0,304$), pa se ne može posve isključiti da je opaženo sezonsko smanjenje edema djelomično posljedica selektivnog osipa; ta razlika nije dosegla statističku značajnost, vjerojatno zbog malog uzorka. Difuzijske promjene nisu se razlikovale među skupinama ($p = 1,000$). Kontrolnu skupinu činilo je 13 djevojaka (prosječna dob 15,15 ± 1,34 godina) koje nisu bile uključene u overhead vrstu sportske aktivnosti; dvije su od njih u trenutku snimanja imale 17 godina, dakle nešto više od

deklariranoga raspona od 13 do 16 godina, pa je zbog toga provedena i analiza osjetljivosti bez ispitanica starijih od 16 godina. Napominje se da je kontrolna skupina bila prosječno nešto starija od odbojkašica (15,15 ± 1,34 naspram 14,34 ± 0,97 godina; Δ = 0,81 god.; Welchov t-test $t(15) = 1,98$; $p = 0,061$; $d = 0,75$), što predstavlja potencijalnu konfundirajuću varijablu u usporedbi morfoloških mjera ploče rasta; ovaj čimbenik detaljnije je razmotren u poglavlju 5.6.

Tijek uključivanja ispitanica prikazan je u Tablici 7a, oblikovanoj prema preporukama smjernica STROBE za opservacijska istraživanja.

Tablica 7a. Tijek ispitanica kroz istraživanje.

Faza	N	Napomena
Regrutirano — odbojkašice	32	OK Mladost Zagreb; dob 13–16 g.
Isključeno prije M1	0	sve regrutirane zadovoljile kriterije
Prvo mjerenje (M1)	32	obje ruke; Philips Ingenia 1,5 T
Osip tijekom sezone	12 (37,5 %)	prestanak treniranja u klubu; pojedinačni razlozi nisu bilježeni
Drugo mjerenje (M2)	20 (62,5 %)	samo dominantna ruka; Siemens Magnetom Vida 3 T
Kontrolna skupina — regrutirano	13	jednokratno snimanje; Siemens Magnetom Vida 3 T
Uključeno u analizu Razine 1	32	dominantna naspram nedominantne ruke (M1)
Uključeno u analizu Razine 2	20	longitudinalna analiza M1→M2
Uključeno u analizu Razine 3	20 + 13	odbojkašice (M2) naspram kontrolne skupine

Napomena: Razlozi prekida sudjelovanja nisu bilježeni pojedinačno, što je razmotreno kao ograničenje u poglavlju 5.6.

Mjerene varijable uključivale su kontinuirane mjere dimenzija ploče rasta: Dužina EP (mm), kraniokaudalno protezanje epifize u četiri smjera — medijalno, lateralno, anteriorno i dorzalno (mm). Kategorijske i ordinalne varijable uključivale su fuziju ploče rasta (0 = otvorena / nije zatvorena, 1 = zatvorena / fuzionirana), stupanj edema koštane srži u ploči rasta (0 = bez edema, 1 = blagi, 2 = izraženi) te lokalizaciju difuzijskih promjena (0 = bez promjena, 1 = izolirano u ploči, 2 = ploča i metafiza). Primjeri ocjenjivanja prikazani su na Slici 12 (fuzija ploče rasta), Slici 13 (stupanj edema) i Slici 14 (difuzijske promjene).

4.2. Usporedba dominantne i nedominantne ruke na početku sezone (n = 32)

Usporedba morfoloških varijabli dominantne i nedominantne ruke provedena je na uzorku od 32 odbojkašice na početku natjecateljske sezone. Rezultati su prikazani u Tablici 8. Raspodjela vrijednosti po varijablama prikazana je na Slici 14.

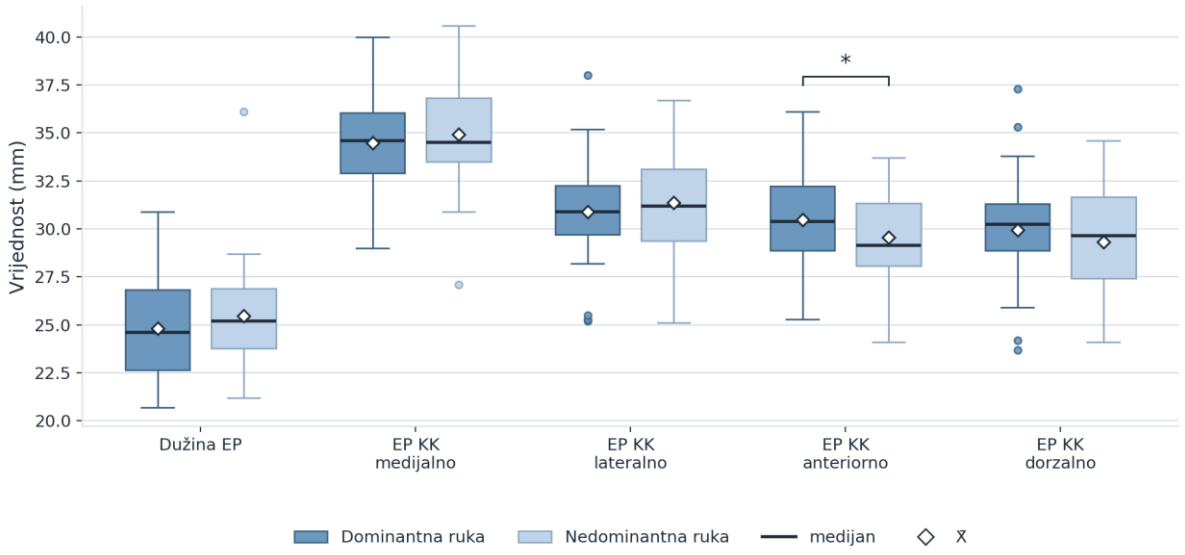
Tablica 8. Usporedba morfoloških mjera dominantne i nedominantne ruke na početku sezone (n = 32)

Varijabla	Dominantna ($\bar{X} \pm SD$) [95 % CI]	Nedominantna ($\bar{X} \pm SD$) [95 % CI]	Razlika ($\bar{X}$)	Statistički test	p (nekorig. / Bonf.)	Cohenov d_z
Dužina EP (mm)	24,81± 2,78 [23,81–25,81]	25,48± 2,71 [24,50–26,46]	−0,67	Wilcoxon (T = 216)	0,369 / 1,000	−0,20
EP KK medijalno (mm)	34,49 ± 2,64 [33,54–35,44]	34,93 ± 2,82 [33,92–35,95]	−0,44	t-test zavisni (t(31) = −1,13)	0,265 / 1,000	−0,20

Varijabla	Dominantna ($\bar{X}$ ± SD) [95 % CI]	Nedominantna ($\bar{X}$ ± SD) [95 % CI]	Razlika ($\bar{X}$)	Statistički test	p (nekorig. / Bonf.)	Cohenov d_z
EP KK lateralno (mm)	30,89 ± 2,82 [29,87–31,90]	31,37 ± 2,99 [30,29–32,44]	−0,48	t-test zavisni (t(31) = −0,79)	0,433 / 1,000	−0,14
EP KK anteriorno (mm)	**30,48 ± 2,54** [29,57–31,40]	**29,54 ± 2,45** [28,66–30,43]	**+0,94**	t-test zavisni (t(31) = 2,09)	**0,045 / 0,223**	+0,37
EP KK dorzalno (mm)	29,95 ± 2,97 [28,88–31,02]	29,33 ± 2,98 [28,25–30,40]	+0,62	t-test zavisni (t(31) = 1,31)	0,201 / 1,000	+0,23

** p < 0,05 (statistički značajno). Nekorigiranu razinu značajnosti dosegnula je jedino varijabla EP KK anteriorno (p = 0,045), no ona ne opstaje nakon Bonferronijeve korekcije za pet usporedbi (Bonferroni-korigirana p = 0,223) ni u neparametrijskoj provjeri (Wilcoxonov test predznačenih rangova, p = 0,121), pa je treba tumačiti kao trend. Dominantnost je u svim usporedbama određena individualno za svaku ispitanicu, neovisno o anatomskoj strani.*

*Kratice: EP = epifizna ploča (engl. epiphyseal plate); KK = kraniokaudalno; dom. = dominantna ruka; ned. = nedominantna ruka; $\bar{X}$ = aritmetička sredina; SD = standardna devijacija; 95 % CI = 95 %-tni interval pouzdanosti; p = razina statističke značajnosti; * p < 0,05 (jedina razina značajnosti prisutna u ovoj tablici).*



*Slika 14. Raspodjela morfoloških mjera ploče rasta dominantne i nedominantne ruke na početku sezone (n = 32). Prikazani su medijan, interkvartilni raspon (IQR), stršeće vrijednosti i aritmetička sredina (bijeli romb). Za Dužinu EP primijenjen je Wilcoxonov test predznačenih rangova, a za preostale četiri mjere t-test za zavisne uzorke. * p < 0,05 (nekorigirano); nijedna razlika ne opstaje nakon Bonferronijeve korekcije.*

Analiza kontinuiranih morfoloških mjera pokazala je da u prvom mjerenju nije postojala statistički značajna razlika između dominantne i nedominantne ruke za četiri od pet analiziranih varijabli (Dužina EP, KK medijalno, KK lateralno i KK dorzalno; p > 0,05). Nekorigiranu razinu statističke značajnosti dosegnula je jedino varijabla EP KK anteriorno (dominantna: 30,48 ± 2,54 mm; nedominantna: 29,54 ± 2,45 mm; t-test za zavisne uzorke; p = 0,045; d = 0,37, mali efekt), pri čemu je dominantna ruka pokazivala nešto veće vrijednosti. Ta razlika, međutim, ne opstaje nakon Bonferronijeve korekcije za pet usporedbi (Bonferroni-korigirana p = 0,223), a ni Wilcoxonov test predznačenih rangova nije dosegnuo razinu značajnosti (p = 0,121), pa je primjereno tumačiti je kao trend. Za preostale četiri varijable efektne su veličine bile zanemarive do male (|d| = 0,14–0,23), sukladno odsutnosti statističke značajnosti.

Provjerena je i osjetljivost nalaza na odstupajuće vrijednosti. U jedne je ispitanice razlika u Dužini EP između ruku iznosila 11,7 mm, što znatno nadmašuje raspon ostatka uzorka. Nakon njezina isključenja (n = 31) zaključci se nisu promijenili: razlika u Dužini EP ostaje neznačajna (24,82 naspram 25,14 mm; p = 0,517), a razlika u EP KK anteriorno zadržava istu, granično nekorigiranu razinu značajnosti (30,42 naspram 29,45 mm; p = 0,045). Ta je vrijednost stoga zadržana u analizi.

Fuzija ploče rasta prikazana je kao deskriptivna značajka uzorka, bez formalne statističke usporedbe, jer varijabilnost praktički nije postojala: otvorenu je ploču rasta imala 31 od 32 ispitanice (96,9 %), na objema rukama. Takva raspodjela odgovara očekivanoj razini skeletne nezrelosti ove dobne skupine i ujedno potvrđuje da je uzorak zahvaćen u razdoblju u kojem je ploča rasta još biološki aktivna.

Tablica 9. Distribucija stupnjeva edema koštane srži u ploči rasta na početku sezone prema strani (n = 32). Napomena: Wilcoxonov test predznačenih rangova, T = 9,0; z = −1,414; p = 0,157

Stupanj edema	Dominantna ruka (n)	Nedominantna ruka (n)	Operacijska definicija
0 – bez edema	2 (6,3 %)	2 (6,3 %)	Bez signalnih promjena
1 – blagi edem	16 (50,0 %)	20 (62,5 %)	Pojačanje signala ograničeno na fizalnu hrskavicu
2 – izraženi edem	**14 (43,8 %)**	**10 (31,3 %)**	Pojačanje signala s širenjem na subhondralnu kost metafize

Kratice: n = broj ispitanica; % = postotak; Stupanj 0 = bez edema; Stupanj 1 = blagi edem; Stupanj 2 = izraženi edem. Statistička usporedba distribucije (Wilcoxonov test predznačenih rangova za uparene uzorke): p = 0,157 — nije statistički značajno (ns). Razlika u distribuciji edema između dominantne i nedominantne ruke nije dosegla razinu statističke značajnosti.

Distribucija edema koštane srži (Tablica 9) ukazuje na visoku prevalenciju MRI promjena u obje ruke. Potpuno uredan nalaz (stupanj 0) zabilježen je u samo 2 od 32 ispitanice za dominantnu te u identičnog broja ispitanica za nedominantnu ruku (6,3 %). Blagi edem (stupanj 1) bio je najzastupljeniji u nedominantnoj ruci (62,5 %), dok je izraženi edem (stupanj 2) bio češći na dominantnoj strani (43,8 % naspram 31,3 %), premda razlika nije dosegla razinu statističke značajnosti (Wilcoxonov test predznačenih rangova za uparene uzorke, p = 0,157).

Tablica 10. Lokalizacija difuzijskih promjena proksimalne humeralne fize na početku sezone prema strani (n = 32). Napomena: Wilcoxonov test predznačenih rangova, T = 39,0; z = 0,000; p = 1,000

Lokalizacija difuzijskih promjena	Dominantna (n)	Nedominantna (n)	Deskriptivna napomena
Bez promjena (0)	0 (0 %)	1 (3,1 %)	Bez difuzijskih promjena

Lokalizacija difuzijskih promjena	Dominantna (n)	Nedominantna (n)	Deskriptivna napomena
Ploča rasta (1)	21 (65,6 %)	19 (59,4 %)	Difuzijske promjene ograničene na ploču rasta
Ploča + metafiza (2)	**11 (34,4 %)**	**12 (37,5 %)**	Difuzijske promjene proksimalne ploče rasta i metafize

Kratice: n = broj ispitanica; % = postotak; Lokalizacija difuzije: 0 = bez promjena; 1 = ograničeno na ploču rasta; 2 = ploča rasta i metafiza. Statistička usporedba distribucije (Wilcoxonov test predznačenih rangova za uparene uzorke): p = 1,000 — nije statistički značajno (ns).

Razlika u lokalizaciji difuzijskih promjena između dominantne i nedominantne ruke nije dosegla razinu statističke značajnosti.

Difuzijske promjene bile su gotovo univerzalno prisutne u obje ruke (Tablica 10). Na dominantnoj ruci sve 32 ispitanice (100 %) imale su detektabilne difuzijske promjene, a na nedominantnoj 31 od 32 (96,9 %). Zahvaćenost i ploče rasta i metafize (difuzijski stupanj 2) bila je podjednako zastupljena na dominantnoj (34,4 %) i nedominantnoj strani (37,5 %).

4.3. Longitudinalna analiza promjena dominantne ruke kroz natjecateljsku sezonu (n = 20)

Longitudinalna analiza morfoloških promjena dominantne ruke provedena je na podskupini od 20 odbojkašica koje su sudjelovale u oba mjerenja. Zbog toga se bazne (M1) vrijednosti u ovoj podskupini neznatno razlikuju od vrijednosti cijelog uzorka na početku sezone (npr. Dužina EP 25,10 mm u podskupini od 20 naspram 24,81 mm u cijelom uzorku od 32 ispitanice); razlike su male i posljedica su isključivo sastava poduzorka onih koje su dovršile obje pretrage, a ne mjernoga postupka. Rezultati su prikazani u Tablicama 11 i 12.

Tablica 11. Promjene kontinuiranih morfoloških mjera dominantne ruke od početka do kraja natjecateljske sezone (n = 20). *** p < 0,001; Cohenov d s kategorijom efekta:

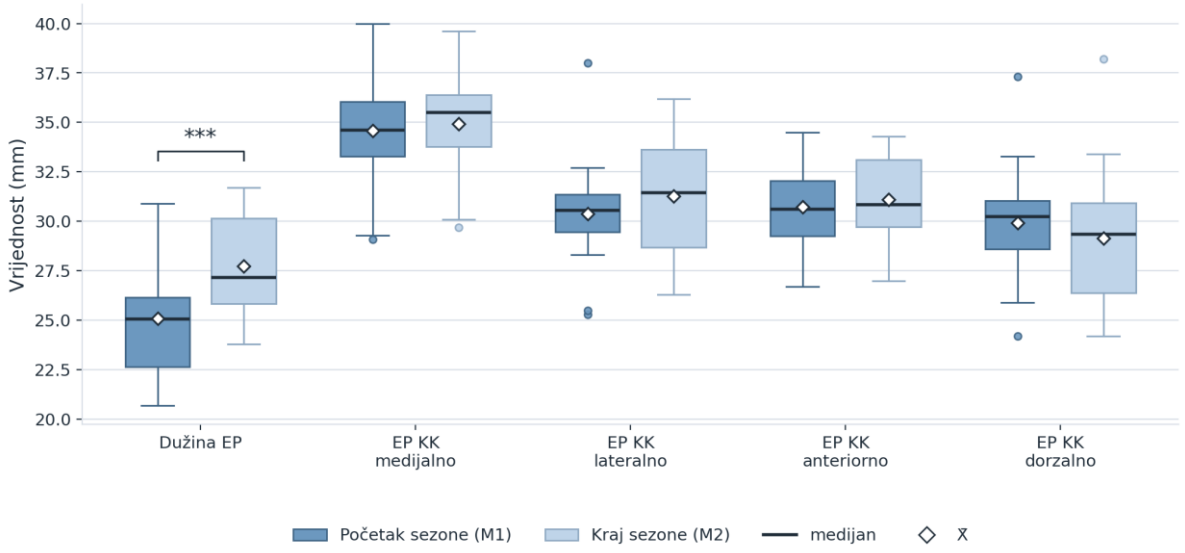
zanemariv < 0,2; mali 0,2–0,5; srednji 0,5–0,8; veliki ≥ 0,8 (prema pragovima definiranima u poglavlju 3.6)

Varijabla	Početak sezone ($\bar{X}$ ± SD) [95 % CI]	Kraj sezone ($\bar{X}$ ± SD) [95 % CI]	Razlika ($\Delta\bar{X}$) [95 % CI razlike]	t (df = 19); p	p (Bonf.)	Cohenov d
Dužina EP (mm)	**25,10 ± 2,87 [23,75–26,44]**	**27,75 ± 2,38 [26,63–28,86]**	**+2,65 [1,61–3,69]**	**t(19) = 5,34; <0,001*** **	**< 0,001**	**1,20**
EP KK medijalno (mm)	34,58 ± 2,85 [33,25–35,91]	34,93 ± 2,52 [33,76–36,11]	+0,35 [−0,87–1,58]	t(19) = 0,61; 0,552	1,000	0,14
EP KK lateralno (mm)	30,38 ± 2,67 [29,13–31,62]	31,29 ± 2,83 [29,96–32,61]	+0,91 [−0,34–2,16]	t(19) = 1,52; 0,145	0,727	0,33
EP KK anteriorno (mm)	30,73 ± 2,14 [29,73–31,73]	31,11 ± 2,33 [30,01–32,20]	+0,38 [−0,32–1,19]	t(19) = 0,96; 0,350	1,000	0,21
EP KK dorzalno (mm)	29,91 ± 2,98 [28,52–31,30]	29,13 ± 3,35 [27,57–30,70]	−0,78 [−3,05–1,50]	t(19) = −0,71; 0,485	1,000	−0,16

*Kratice: EP = epifizna ploča; KK = kraniokaudalno; $\bar{X}$ = aritmetička sredina; SD = standardna devijacija; 95 % CI = 95 %-tni interval pouzdanosti; $\Delta\bar{X}$ = razlika aritmetičkih sredina (M2−M1, kraj − početak sezone); d = Cohenov d (veličina efekta); *** p < 0,001; ostale p > 0,05. Stupac „p (Bonf.)" prikazuje Bonferroni-korigiranu vrijednost (× 5 usporedbi); Dužina EP ostaje visoko značajna i nakon korekcije (p < 0,001).*

Najizraženija i statistički visoko značajna promjena u longitudinalnoj analizi utvrđena je za varijablu dužine ploče rasta (Dužina EP). Na kraju sezone vrijednost je iznosila 27,75 ± 2,38 mm, što je statistički značajno više u usporedbi s početnim mjerenjem (25,10 ± 2,87 mm; t-test za zavisne uzorke; $p < 0,001$; $\Delta\bar{X}$ = +2,65 mm; Cohenov d = 1,20, veliki efekt). Budući

da je prvo mjerenje provedeno na uređaju od 1,5 T, a drugo na uređaju od 3 T bez formalne unakrsne kalibracije, ovaj apsolutni sezonski porast treba tumačiti kao nalaz potencijalno konfundiran promjenom mjerne platforme. Preostale kraniokaudalne mjere (medijalno, lateralno, anteriorno i dorzalno) nisu pokazale statistički značajne promjene kroz sezonu ($p > 0,05$; $d = 0,14–0,33$, zanemarivi do mali efekti). Longitudinalne promjene svih mjera prikazane su na Slici 15.



*Slika 15. Longitudinalne promjene morfoloških mjera dominantne ruke od početka do kraja natjecateljske sezone (n = 20). Prikazani su medijan, IQR, stršeće vrijednosti i aritmetička sredina (bijeli romb). *** $p < 0,001$ (t-test za zavisne uzorke).*

Tablica 12. Promjene u distribuciji stupnjeva edema koštane srži dominantne ruke od početka do kraja sezone (n = 20). Napomena: Wilcoxonov test predznačenih rangova, T = 5,5; z = −2,530; p = 0,010 (statistički značajno). Vrijednost p izračunata je normalnom aproksimacijom uz korekciju za vezane rangove; egzaktni test na deset ispitanica s promjenom daje p = 0,027, pa nalaz ostaje značajan, ali s manjom rezervom

Stupanj edema	Početak sezone (n)	Kraj sezone (n)	Smjer promjene
0 – bez edema	1 (5,0 %)	**4 (20,0 %)**	porast udjela

Stupanj edema	Početak sezone (n)	Kraj sezone (n)	Smjer promjene
1 – blagi edem	12 (60,0 %)	14 (70,0 %)	bez bitne promjene
2 – izraženi edem	**7 (35,0 %)**	**2 (10,0 %)**	pad udjela

Kratice: n = broj ispitanica; % = postotak; M1 = početak sezone; M2 = kraj sezone; Stupanj 0 = bez edema; Stupanj 1 = blagi edem; Stupanj 2 = izraženi edem; p = Wilcoxon test predznačenih rangova, p = 0,010 (statistički značajno).*

Analiza distribucije edema (Tablica 12) pokazuje statistički značajnu promjenu kroz sezonu (Wilcoxon test predznačenih rangova, p = 0,010). Izraženi edem (stupanj 2) na kraju sezone zabilježen je u samo 2 od 20 ispitanica (10,0 %), u usporedbi sa 7 (35,0 %) na početku sezone, dok se udio ispitanica bez edema (stupanj 0) povećao s 5,0 % na 20,0 %. Biološke mehanizme ovog obrasca razmatra Rasprava (poglavlje 5.2). Kako su ordinalne varijable (uključujući stupanj edema) ocijenjene konsenzusom dvaju radiologa bez bilježenja individualnih ocjena, formalna suglasnost ocjenjivača nije kvantificirana, pa ovaj nalaz treba interpretirati s dodatnim oprezom.

Radi cjelovitosti prikaza, u Tablici 12a prikazana je i sezonska promjena lokalizacije difuzijskih promjena dominantne ruke.

Tablica 12a. Promjena lokalizacije difuzijskih promjena dominantne ruke od početka do kraja natjecateljske sezone (n = 20). Napomena: Wilcoxonov test predznačenih rangova, T = 8,0; z = −1,134; p = 0,257.

Lokalizacija difuzijskih promjena	Početak sezone (n)	Kraj sezone (n)	Smjer promjene
Bez promjena (0)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	nepromijenjeno
Ploča rasta (1)	14 (70,0 %)	17 (85,0 %)	porast udjela
Ploča rasta i metafiza (2)	6 (30,0 %)	3 (15,0 %)	pad udjela

Napomena: Wilcoxonov test predznačenih rangova, p = 0,257 — nije statistički značajno. Zbog različitih b-vrijednosti difuzijskih sekvenci u dvama mjerenjima (0 i 750–800 naspram 50 i 800 s/mm²) ova se usporedba iznosi isključivo deskriptivno.

Udio ispitanica u kojih su difuzijske promjene zahvaćale i metafizu smanjio se tijekom sezone s 30,0 % na 15,0 %, no ta promjena nije dosegnula statističku značajnost (Wilcoxonov test predznačenih rangova, p = 0,257). Difuzijske su promjene u nekom obliku bile prisutne u svih 20 ispitanica u objema vremenskim točkama.

4.4. Usporedba odbojkašica i kontrolne skupine (n = 20 naspram n = 13)

Usporedba morfoloških nalaza dominantne ruke odbojkašica na kraju sezone s kontrolnom skupinom iste dobi provedena je t-testom za nezavisne uzorke i neparametrijskim ekvivalentima za ordinalne varijable. Rezultati su prikazani u Tablici 13.

Tablica 13. Usporedba morfoloških mjera dominantne ruke odbojkašica (kraj sezone, n = 20) s kontrolnom skupinom (n = 13). * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001. Cohenov d (veličina efekta) prikazan je u posljednjem stupcu.

Napomena uz Tablicu 13: budući da homogenost varijanci nije formalno testirana, sve su usporedbe ponovljene i Welchovom inačicom t-testa, koja ne pretpostavlja jednakost varijanci. Dobivene su vrijednosti bile podudarne: Dužina EP t(11, 46) = 3,263, p = 0,003; EP KK medijalno t(69, 71) = 4,393, p < 0,001; EP KK anteriorno t(11, 69) = 2,610, p = 0,015; EP KK lateralno t(37, 78) = 1,058, p = 0,302; EP KK dorzalno p = 0,412. Odabir inačice testa stoga ne mijenja zaključke.

Varijabla	Odbojkašice kraj ($\bar{X}$ ± SD; n=20) [95 % CI]	Kontrolna skupina ($\bar{X}$ ± SD; n=13) [95 % CI]	Δ$\bar{X}$ (mm)	Test	p	p (Bonf.)	Cohenov d
Dužina EP (mm)	**27,75 ± 2,38** [26,63–28,86]	25,09 ± 2,22 [23,75–26,43]	**+2,66**	t-test nez. (t(31) = 3,21)	**0,003****	**0,015**	1,14
EP KK medijalno (mm)	**34,93 ± 2,52** [33,76–36,11]	30,84 ± 2,68 [29,22–32,46]	**+4,09**	t-test nez. (t(31) = 4,45)	**<0,001*** **	**< 0,001**	1,59

Varijabla	Odbojkašice kraj ($\bar{X}$ ± SD; n=20) [95 % CI]	Kontrolna skupina ($\bar{X}$ ± SD; n=13) [95 % CI]	Δ$\bar{X}$ (mm)	Test	p	p (Bonf.)	Cohenov d
EP KK lateralno (mm)	31,29 ± 2,83 [29,96–32,61]	30,06 ± 3,49 [27,95–32,17]	+1,23	t-test nez. (t(31) = 1,11)	0,277	1,000	0,40
EP KK anteriorno (mm)	**31,11 ± 2,33** [30,01–32,20]	28,81 ± 2,56 [27,26–30,35]	**+2,30**	t-test nez. (t(31) = 2,66)	**0,012***	**0,061**	0,95
EP KK dorzalno (mm)	29,13 ± 3,35 [27,57–30,70]	28,18 ± 3,10 [26,31–30,06]	+0,95	t-test nez. (t(31) = 0,82)	0,419	1,000	0,29

*Kratice: EP = epifizna ploča; KK = kraniokaudalno; $\bar{X}$ = aritmetička sredina; SD = standardna devijacija; 95 % CI = 95 %-tni interval pouzdanosti; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.*

Usporedba morfoloških mjera između odbojkašica i kontrolne skupine otkrila je statistički značajne razlike za tri od pet analiziranih varijabli (Tablica 13). Raspodjela vrijednosti po skupinama prikazana je na Slici 16. Pritom treba imati na umu da se samo Dužina EP odnosi na samu ploču rasta, dok četiri mjere EP KK opisuju kraniokaudalnu visinu epifize. Dužina EP bila je statistički značajno veća u odbojkašica (27,75 ± 2,38 mm) u usporedbi s kontrolnom skupinom (25,09 ± 2,22 mm; p = 0,003). EP kraniokaudalno medijalno pokazala je najizraženiju razliku (34,93 ± 2,52 mm naspram 30,84 ± 2,68 mm; p < 0,001). EP kraniokaudalno anteriorno bila je statistički značajno veća u odbojkašica (31,11 ± 2,33 mm naspram 28,81 ± 2,56 mm; p = 0,012). Varijable EP kraniokaudalno lateralno i EP kraniokaudalno dorzalno nisu pokazale statistički značajnu razliku između skupina (p > 0,05). Nakon Bonferronijeve korekcije za pet usporedbi statistički značajnima ostaju Dužina EP (korigirana p = 0,015) i EP KK medijalno (korigirana p < 0,001), dok EP KK anteriorno gubi statističku značajnost (korigirana p = 0,061) te ga treba interpretirati kao trend.

Budući da je drugo mjerenje odbojkašica, kao i snimanje kontrolne skupine, provedeno na uređaju od 3 T, dok je prvo mjerenje u cijelosti obavljeno na uređaju od 1,5 T, dodatno je provedena usporedba kontrolne skupine s prvim mjerenjem odbojkašica. Svrha je te analize bila razlučiti razlike koje postoje neovisno o mjernoj platformi od onih koje se pojavljuju tek nakon njezine promjene. Rezultati su prikazani u Tablici 13a.

Tablica 13a. Usporedba morfoloških mjera dominantne ruke odbojkašica na početku sezone (M1; n = 32) s kontrolnom skupinom (n = 13), t-test za nezavisne uzorke. Napomena: ova usporedba nije drugi test iste hipoteze, nego kontrolna analiza polazišnog stanja — provjerava je li razlika prema kontrolnoj skupini postojala već prije izlaganja sezonskom opterećenju. Kako je prvo mjerenje obuhvatilo 32 ispitanice, a drugo njih 20, usporedba je ponovljena i na podskupini od 20 ispitanica koje su dovršile obje mjerne točke, kako bi se isključio utjecaj osipa: na početku sezone dužina ploče rasta tih je ispitanica praktički istovjetna kontrolnoj skupini (25,10 naspram 25,09 mm; p = 0,998), dok je na kraju sezone razlika izražena (27,75 naspram 25,09 mm; p = 0,003). Pojava razlike u dužini ploče rasta stoga se ne može pripisati osipu ispitanica.

Varijabla	Odbojkašice M1, 1,5 T ($\bar{X}$ ± SD; n = 32)	Kontrolna skupina, 3 T ($\bar{X}$ ± SD; n = 13)	Δ$\bar{X}$ (mm)	p	Cohenov d
Dužina EP (mm)	24,81 ± 2,78	25,09 ± 2,22	−0,28	0,746	−0,11
EP KK medijalno (mm)	34,49 ± 2,64	30,84 ± 2,68	+3,65	< 0,001	1,38
EP KK lateralno (mm)	30,89 ± 2,82	30,06 ± 3,49	+0,83	0,410	0,27
EP KK anteriorno (mm)	30,48 ± 2,54	28,81 ± 2,56	+1,68	0,051	0,66
EP KK dorzalno (mm)	29,95 ± 2,97	28,18 ± 3,10	+1,77	0,081	0,59

Napomena: Prvo mjerenje odbojkašica provedeno je na uređaju Philips Ingenia 1,5 T, dok je kontrolna skupina snimana na objema platformama. Kratice: EP = epifizna ploča; KK = kraniokaudalno; $\bar{X}$ = aritmetička sredina; SD = standardna devijacija.

Na početku sezone odbojkašice i kontrolna skupina nisu se razlikovale u dužini ploče rasta (24,81 naspram 25,09 mm; $p = 0,746$; $d = −0,11$), dok je razlika u EP KK medijalno već tada bila izražena i statistički vrlo značajna (34,49 naspram 30,84 mm; $p < 0,001$; $d = 1,38$). Razlika u Dužini EP prema kontrolnoj skupini javlja se, dakle, tek na kraju sezone i po veličini je gotovo istovjetna sezonskom porastu iste varijable (+2,66 naspram +2,65 mm). Dokazna vrijednost tih dviju razlika razmatra se u poglavlju 5.3.

Radi provjere doprinosa razlike u dobi između skupina provedena je i analiza u kojoj je kronološka dob uvrštena kao kovarijata (Tablica 13b).

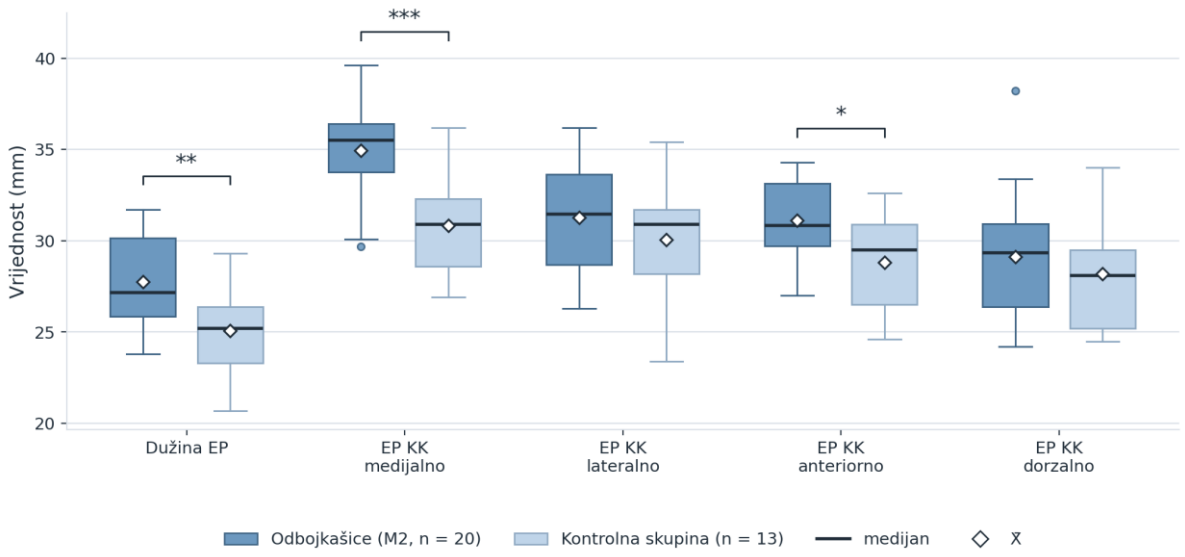
Tablica 13b. Razlika između odbojkašica (kraj sezone; n = 20) i kontrolne skupine (n = 13) nakon prilagodbe za kronološku dob. Napomena: analiza kovarijance s dobi kao kovarijatom; procijenjeni učinak skupine s 95 % intervalom pouzdanosti, F-vrijednosti i udjelom objašnjene varijance — Dužina EP +3,19 mm [+1,44; +4,95], $F(11, 81) = 13,82$, $p < 0,001$, $R^2 = 0,318$; EP KK medijalno +4,31 mm [+2,27; +6,34], $F(11, 81) = 18,61$, $p < 0,001$, $R^2 = 0,397$; EP KK anteriorno +2,39 mm [+0,47; +4,31], $F(11, 81) = 6,48$, $p = 0,016$, $R^2 = 0,188$; EP KK dorzalno +1,27 mm [−1,29; +3,83], $F(11, 81) = 1,02$, $p = 0,320$, $R^2 = 0,037$; EP KK lateralno +0,90 mm [−1,54; +3,34], $F(11, 81) = 0,57$, $p = 0,456$, $R^2 = 0,055$. Pretpostavka o homogenosti regresijskih nagiba provjerena je uvođenjem interakcije skupine i dobi te nije narušena ni za jednu mjeru ($p = 0,294$–$0,945$).

Varijabla	Učinak skupine (mm)	p (skupina)	p (dob)
Dužina EP	+3,19	0,001	0,094
EP KK medijalno	+4,31	< 0,001	0,567
EP KK lateralno	+0,90	0,456	0,465
EP KK anteriorno	+2,39	0,016	0,781
EP KK dorzalno	+1,27	0,320	0,490

Napomena: Prikazan je procijenjeni učinak skupine uz dob kao kovarijatu. Pozitivne vrijednosti označavaju veće mjere u odbojkašica.

Prilagodba za kronološku dob nije umanjila razlike među skupinama, nego ih je blago pojačala. Razlog je taj što je kontrolna skupina prosječno starija, a istodobno ima manje

izmjerene dimenzije, pa dob djeluje u smjeru suprotnom od pretpostavljenoga. Isti je obrazac potvrdila i analiza osjetljivosti u kojoj su iz kontrolne skupine isključene dvije ispitanice starije od 16 godina (n = 11; prosječna dob 14,8 godina): Dužina EP p = 0,006; EP KK medijalno p < 0,001. Razlika u dobi stoga vjerojatno nije glavni konfundirajući čimbenik u usporedbi s kontrolnom skupinom. Preostaje, međutim, razlika u tjelesnoj veličini, koja u kontrolnoj skupini nije bila izmjerena.



*Slika 16. Usporedba morfoloških mjera dominantne ruke odbojkašica (kraj sezone, n = 20) i kontrolne skupine (n = 13). Prikazani su medijan, IQR, stršeće vrijednosti i aritmetička sredina (bijeli romb). * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001 (t-test za nezavisne uzorke). Ordinalne varijable, uspoređene Mann–Whitneyjevim U-testom, nisu prikazane na ovoj slici nego u tekstu poglavlja 4.4 i u Tablici 13c.*

Analiza kategorijskih i ordinalnih varijabli dodatno je produbila razumijevanje skupinskih razlika. Edem koštane srži bio je brojčano nešto izraženiji u odbojkašica, premda razlika u ordinalnoj distribuciji nije dosegla prag statističke značajnosti (Mann–Whitney U, p = 0,167). Difuzijske promjene bile su prisutne u svih 20 odbojkašica (100 %) na kraju sezone, dok su u kontrolnoj skupini zabilježene u 11 od 13 ispitanica (84,6 %), pri čemu razlika nije bila statistički značajna Fisherovim egzaktnim testom (p = 0,148). Radi provjere robusnosti nalaza, s obzirom na deklarirani sukob interesa, analiza je ponovljena i bez ispitanice koja je u rodbinskoj vezi s autorom (n = 12). Rezultati ostaju stabilni: Dužina EP p = 0,007, EP KK medijalno p < 0,001, EP KK anteriorno p = 0,029.

Raspodjela ordinalnih i kategorijskih nalaza u kontrolnoj skupini prikazana je u Tablici 13c.

Tablica 13c. Raspodjela fuzije ploče rasta, stupnja edema koštane srži i lokalizacije difuzijskih promjena u kontrolnoj skupini (n = 13). Napomena: usporedba s odbojkašicama na kraju sezone (Mann–Whitneyjev U-test): stupanj edema U = 163,0; z = +1,404; p = 0,167; lokalizacija difuzijskih promjena U = 136,5; z = +0,320; p = 0,768.

Varijabla i kategorija	Broj ispitanica (n)	Udio (%)
Fuzija — otvorena ploča rasta	12	92,3
Fuzija — zatvorena ploča rasta	1	7,7
Edem — stupanj 0 (bez edema)	6	46,2
Edem — stupanj 1 (blagi)	6	46,2
Edem — stupanj 2 (izraženi)	1	7,7
Difuzija — bez promjena (0)	2	15,4
Difuzija — ploča rasta (1)	8	61,5
Difuzija — ploča i metafiza (2)	3	23,1

Napomena: Jedna kontrolna ispitanica u dobi od 17 godina imala je zatvorenu ploču rasta. Usporedba stupnja edema između skupina: Mann–Whitneyjev U-test, p = 0,167; usporedba prisutnosti difuzijskih promjena: Fisherov egzaktni test, p = 0,148.

5. RASPRAVA

Ovo je istraživanje magnetskom rezonancijom (MRI) morfološki analiziralo ploču rasta proksimalnog humerusa dominantne ruke mladih asimptomatskih odbojkašica. Nalazi su uspoređeni dvostruko: s nedominantnom rukom i s kontrolnom skupinom vršnjakinja koje se ne bave overhead sportovima. Mjerenja su provedena na početku i na kraju natjecateljske sezone. Longitudinalni je dizajn tako omogućio procjenu mogućeg kumulativnog učinka sportskog opterećenja na koštano nezreli proksimalni dio humerusa. Dobiveni rezultati razmatraju se u svjetlu suvremenih spoznaja o mehanizmima ozljeda nastalih uslijed preopterećenja u adolescentnoj dobi, biomehaničkih posebnosti odbojke te radioloških obilježja ploče rasta tijekom razvoja. U tom je kontekstu važno promatrati mladog sportaša kao dinamičan biološki sustav u kojem kronično, opetovano mehaničko opterećenje, biološko sazrijevanje, regeneracijski potencijal i individualne anatomske značajke djeluju istodobno i međusobno se isprepliću.

5.1. Interpretacija nalaza prvog mjerenja – usporedba dominantne i nedominantne ruke

Rezultati prvog mjerenja, provedenog na početku natjecateljske sezone u skupini od 32 odbojkašice, pokazali su da su morfološke razlike između dominantne i nedominantne ruke u ovoj fazi uglavnom diskretne. Nekorigiranu razinu statističke značajnosti dosegnula je jedino varijabla kraniokaudalne visine epifize anteriorno ($p = 0,045$; $d = 0,37$, mali efekt), pri čemu je izmjerena vrijednost bila nešto veća na dominantnoj strani. Ta razlika ne opstaje nakon korekcije za višestruko testiranje ni u neparametrijskoj provjeri, zbog čega je treba tumačiti kao trend, a ne kao potvrđen nalaz. Zbog navedenog njezino je moguće biomehaničko značenje izneseno isključivo kao pretpostavka. Objašnjenje se nudi u anatomskim i biomehaničkim okolnostima. Naime, anteriorni dio kraniokaudalnog protezanja epifize odgovara području koje je tijekom faze ubrzanja smeća izloženo izrazitim trakcijskim i torzijskim silama, dok glava humerusa prolazi kroz krajnju vanjsku rotaciju i nagli prijelaz prema unutarnjoj rotaciji (62).

Istodobno, valja naglasiti da promjene ploče rasta nisu bile ograničene isključivo na dominantnu ruku. One su zabilježene i na nedominantnoj strani, premda nešto manjeg intenziteta. Posrijedi je vjerojatno činjenica da i nedominantna ruka aktivno sudjeluje u karakterističnim odbojkaškim pokretima. Ruka koja nije dominantna angažirana je osobito kroz blok i pasiranje, pri čemu zglob ramena trpi drugačiji, ali nipošto zanemariv oblik mehaničkog

opterećenja. Ne može se isključiti ni mogućnost da pojedine sportašice imaju konstitucionalnu sklonost razvoju obostranih morfoloških promjena ploče rasta, neovisno o dominantnoj strani. Sličan obrazac bilateralne pojavnosti MRI promjena opisali su Pennock i sur. (57), koji su pokazali da su abnormalnosti ramena često prisutne obostrano, iako su kliničke tegobe bile dominantno jednostrane.

Inicijalna analiza ukazala je na visoku učestalost edema koštane srži, pri čemu su magnetskom rezonancijom (MRI) zabilježene promjene kod gotovo svih ispitanika na početku sezone. Potpuno uredan nalaz na dominantnoj ruci zabilježen je kod svega 6,3 % ispitanica. Već sama ta činjenica govori u prilog tome da je riječ o populaciji koja je već prije uključivanja u istraživanje bila izložena znatnom kumulativnom mehaničkom opterećenju, nastalom tijekom prethodnih godina treniranjem odbojke. Na dominantnoj strani uočen je trend prema većoj zastupljenosti edema stupnja 2 (43,8 % naspram 31,3 % na nedominantnoj strani), što odgovara pretpostavci da je upravo dominantna ruka, kao glavni izvor opterećenja pokretima iznad glave, podložnija ponavljanim mikroozljedama ploče rasta. Slične nalaze bilježe Johansson i sur. (37), koji su u asimptomatskih mladih tenisača uočili adaptacijske promjene lokalizirane na lateralnom i ventralnom dijelu dominantnog proksimalnog humerusa.

Posebnu pozornost zaslužuje činjenica da je ovako visoka prevalencija MRI promjena zabilježena već na samom početku natjecateljske sezone. Podatak da samo 6,3 % odbojkašica u dobi između 13 i 16 godina ima potpuno uredan nalaz dominantnog ramena govori u prilog tome da većina sportašica u sezonu ulazi s nakupljenim učinkom prethodnih trenažnih ciklusa. Fredericson i sur. (27) u skupini asimptomatskih elitnih sportašica, među kojima su bile odbojkašice, plivačice i gimnastičarke, pokazali su da su sve ispitanice imale barem blage MRI promjene ramena, dok su umjerene promjene labruma i rotatorne manžete bile prisutne u 50 % odbojkašica na dominantnoj strani. Slične manifestacije dokumentirane su i izvan ramenoga obruča; visoka prevalencija edema koštane srži u predjelu pubične simfize utvrđena je kod sportaša bez kliničkih simptoma. Stoga, sam radiološki nalaz edema u tom segmentu nema patognomonično značenje za razvoj kliničke slike (46, 76). Takva podudarnost s rezultatima ovog istraživanja dodatno podupire stajalište da visoka prevalencija MRI promjena predstavlja obilježje adolescentnih sportašica uključenih u overhead tip sporta, a ne posljedicu metodoloških posebnosti pojedine studije.

Lin i sur. (44) u preglednom radu o ozljedama ramena u overhead sportaša ističu kako parcijalne rupture tetive mišića supraspinatusa, pronađene u bacača bez kliničkih simptoma,

mogu predstavljati prilagodbu, a ne nužno patološke promjene. Usporedive nalaze u bejzbolu donose Lesniak i sur. Gotovo univerzalna prisutnost MRI promjena u asimptomatskih odbojkašica u ovom istraživanju otvara pitanje kumulativnog učinka dugogodišnjeg sportskog opterećenja tijekom razvoja mlade sportašice. Upravo na to pitanje presječne studije ne mogu dati pouzdan odgovor. Longitudinalni pristup primijenjen u ovom istraživanju, iako ograničen na jednu natjecateljsku sezonu, predstavlja važan metodološki iskorak te pruža dobru osnovu za buduća višegodišnja praćenja iste populacije.

Difuzijske promjene, analizirane prema njihovoj lokalizaciji unutar ploče rasta ili uz istodobno zahvaćanje ploče rasta i metafize, bile su gotovo univerzalno prisutne. Na dominantnoj ruci zabilježene su u svih ispitanica (100 %), dok su na nedominantnoj strani pronađene u 96,9 % slučajeva. Iako je ukupna učestalost bila gotovo jednaka, klinički je zanimljivija raspodjela težih promjena. Zahvaćenost i ploče rasta i metafize zabilježena je u 34,4 % dominantnih te u 37,5 % nedominantnih ruku. Navas i Kassarjian (53) navode kako segmenti ploče rasta izloženi trakcijskim silama razvijaju karakteristične morfološke promjene, prvenstveno u obliku elongacije i pojačanog signala u T2 mjerenom vremenu. Za razliku od toga, područja dominantno opterećena kompresijom češće pokazuju sklerotične promjene i suženje zone rasta.

Promatraju li se difuzijske promjene kao mogući rani pokazatelj preopterećenja, njihova raspodjela zaslužuje dodatnu pozornost. Činjenica da je već na početku natjecateljske sezone u 34,4 % odbojkašica dominantne ruke prisutno širenje promjena na metafizu (stupanj 2) otvara pitanje bi li difuzijska sekvenca mogla biti osjetljivija od standardnih T2 sekvenci u otkrivanju ranih promjena ploče rasta. Takva pretpostavka odgovara temeljnim biofizikalnim načelima difuzijskog snimanja, no ovo je istraživanje ne može provjeriti jer nije raspolagalo referentnim standardom. Dodatni faktor je da su difuzijske promjene zabilježene u gotovo svih ispitanica obiju skupina, pa ta varijabla u ovom uzorku nije bila diskriminativna. Mikrostrukturna oštećenja ekstracelularnog matriksa fizalne hrskavice ograničavaju slobodno gibanje molekula vode, što se očituje smanjenjem vrijednosti ADC-a (apparent diffusion coefficient) odnosno porastom DWI signala još prije razvoja jasno vidljivog T2 hiperintenziteta. Valja eksplicitno naglasiti da u ovom istraživanju vrijednosti ADC-a nisu mjerene. Difuzijske su sekvence snimljene, ali kvaliteta dobivenih karata prividnog koeficijenta difuzije nije bila dostatna za pouzdano kvantitativno očitanje, pa su difuzijski nalazi ocjenjivani kvalitativno i razvrstani u tri kategorije. Gornje objašnjenje stoga predstavlja teorijsku pretpostavku, a ne nalaz ovoga rada. Uz tu ogradu, može se pretpostaviti da uključivanje DWI sekvenci u standardni MRI

protokol za procjenu fizalnih promjena kod adolescentnih sportaša ima opravdanje, iako će konačne preporuke zahtijevati potvrdu na većim i metodološki raznovrsnijim uzorcima.

5.2. Longitudinalna perspektiva – dinamika promjena kroz natjecateljsku sezonu

Praćenjem 20 odbojkašica koje su u potpunosti završile natjecateljsku sezonu, longitudinalnom je analizom dobiven uvid u kronološku dinamiku morfoloških prilagodbi epifizne ploče pod utjecajem kumulativnog overhead opterećenja. Jedan nalaz odskače od ostalih. Riječ je o statistički visoko značajnom povećanju dužine ploče rasta ($\Delta\bar{X}$ = +2,65 mm; $p < 0,001$; $d = 1,20$, veliki efekt). Kako kontrolna skupina nije praćena longitudinalno, sezonski se porast ne može izravno usporediti s očekivanim fiziološkim rastom; riječ je stoga o statističkoj povezanosti, a ne o dokazu učinka sportskog opterećenja.

Produljenje ploče rasta najprihvatljivije se objašnjava biomehaničkim modelom zamora ploče rasta (engl. growth plate fatigue), dok je tehnička ograda vezana uz promjenu mjerne platforme razmotrena u poglavlju 5.6. Prema tom modelu (24, 28), ponavljana torzijska i distrakcijska opterećenja proksimalnog humerusa dovode do mikrostrukturnih promjena hipertrofične i kalcifikacijske zone fizalne hrskavice. Radiološka posljedica tih procesa očituje se kao proširenje fizalne linije i elongacija cijelog kompleksa ploče rasta. Farnum i sur. (24) pokazali su da mehanički podražaji reguliraju proliferacijsku aktivnost hondrocita te mogu poremetiti njihov normalni ciklus, što se makroskopski manifestira upravo produljenjem i proširenjem fizalne linije. Slične zaključke donosi i Stokes (71), koji je eksperimentalno pokazao da kronično mehaničko opterećenje tijekom rasta djeluje kao aktivan morfogenetski signal sposoban mijenjati smjer i brzinu longitudinalnog razvoja kostura. Nekoliko obilježja ovoga nalaza zaslužuje posebnu pozornost. Prvo, promjena je bila iznimno dosljedna: porast dužine ploče rasta zabilježen je u 19 od 20 ispitanica (95 %), uz medijan promjene od +2,10 mm i raspon od −0,60 do +8,40 mm. Riječ je, dakle, o obrascu prisutnom gotovo u cijeloj skupini, a ne o učinku koji stvara nekolicina izrazito odstupajućih vrijednosti. Drugo, promjena je i razmjerno velika, naime prosječnih +2,65 mm odgovara porastu od 10,6 % polazne vrijednosti tijekom jedne sezone. Treće, ona je izrazito specifična za tu mjeru: prosječna promjena četiriju kraniokaudalnih mjera iznosi svega +0,22 mm, pa je porast dužine ploče rasta oko dvanaest puta veći. Naposljetku, valja imati na umu i smjer u kojem se ploča rasta u ovoj dobi inače kreće. Tijekom adolescencije fizalna hrskavica postupno se stanjuje i segmentalno zatvara prema završetku skeletnog sazrijevanja (40), pa produljenje mjerene ploče rasta ne odgovara očekivanom smjeru sazrijevanja. Upravo taj nesklad između očekivanoga razvojnog

trenda i opaženog nalaza čini ga zanimljivim, premda ga zbog izostanka longitudinalno praćene kontrolne skupine nije moguće u cijelosti razlučiti od normalnog rasta.

Zanimljiv nalaz predstavlja i statistički značajna promjena raspodjele edema (Wilcoxon, $p = 0{,}010$), čiji je smjer bio suprotan očekivanome. Pri planiranju istraživanja pretpostavljalo se da će se udio izraženog edema kroz sezonu povećati, kao odraz kumulativnog opterećenja. Umjesto toga, udio ispitanica s izraženim edemom smanjio se s 35,0 % na početku na 10,0 % na kraju natjecateljske sezone. Objašnjenje treba tražiti u procesu biološke prilagodbe i sezonskog remodeliranja ploče rasta. Početni edem vjerojatno odražava odgovor na intenzivno presezonsko opterećenje, dok tijekom sezone postupno dolazi do adaptacije tkiva i normalizacije MRI signala. Kornaat i sur. (39) naglašavaju da signal poput edema koštane srži (*bone marrow edema-like signal*) nije statična ni nužno progresivna pojava, nego može varirati ovisno o fazama treninga, razdobljima odmora i procesu adaptacije. Schweitzer i White (63) također ističu da između edema i biomehaničke neravnoteže postoji dinamičan, dvosmjeran odnos, a ne jednostavna uzročno-posljedična povezanost.

Uz biološku prilagodbu, sezonsku promjenu edema treba razmotriti i s tehničke strane. Oba su protokola bila podešena za pouzdan prikaz edema koštane srži i edem je bio jasno raspoznatljiv na svim pregledima u objema vremenskim točkama, pa nije riječ o tome da nalaz na jednom uređaju ne bi bio vidljiv. Pitanje je uže: tehnika supresije masti, broj prosjeka signala i jakost polja utječu na stupanj uočljivosti, a time posredno i na razvrstavanje pojedinoga nalaza u stupanj 1 ili 2. Prvo je mjerenje provedeno uz spektralnu supresiju masti (SPAIR) i jedan do dva prosjeka signala (NSA 1–2) na uređaju od 1,5 T, a drugo uz generičku supresiju masti i jedan prosjek signala (NSA = 1) na uređaju od 3 T. Ti čimbenici, međutim, djeluju u suprotnim smjerovima: veća jakost polja pri drugom mjerenju povećava omjer signala i šuma i sama bi po sebi vodila prema većoj, a ne manjoj uočljivosti edema, dok spektralna supresija masti i veći broj prosjeka signala pri prvom mjerenju djeluju obrnuto. Budući da se ti učinci barem djelomično poništavaju, tehnički razlozi ne pružaju uvjerljivo objašnjenje opaženog smanjenja udjela edema stupnja 2, premda se bez formalne unakrsne kalibracije ne mogu ni posve isključiti. Zasebno treba naglasiti da su difuzijske sekvence u dvama mjerenjima snimane uz različite b-vrijednosti (0 i 750–800 s/mm² pri prvom te 50 i 800 s/mm² pri drugom mjerenju), zbog čega longitudinalna usporedba difuzijskih nalaza nije metodološki u potpunosti utemeljena i navodi se isključivo deskriptivno.

Treće se objašnjenje sezonske promjene edema odnosi na sastav uzorka. Smanjenje udjela izraženog edema s 35,0 % na 10,0 % tijekom natjecateljske sezone moguće je djelomično pripisati selekcijskom učinku. Nije isključeno da su sportašice s trajno izraženim edemom češće prekinule sudjelovanje u istraživanju zbog razvoja simptoma ili ozljeda koje nisu bile u potpunosti evidentirane tijekom praćenja. Kako nisu prikupljeni detaljni podaci o razlozima odustajanja svake pojedine ispitanice, ovu mogućnost nije moguće pouzdano potvrditi niti odbaciti. Buduća longitudinalna istraživanja stoga bi trebala sustavno bilježiti razloge prekida sudjelovanja te jasno razlikovati odustajanja uvjetovana sportskim okolnostima od onih uzrokovanih zdravstvenim problemima. Dodatno bi uključivanje biokemijskih biljega koštanog remodeliranja, poput koštane specifične alkalne fosfataze ili C-terminalnih telopeptida kolagena tipa II, moglo pružiti vrijedne informacije o biološkim procesima koji prate uočene radiološke promjene.

Sama sezonska promjena lokalizacije difuzijskih promjena nije bila statistički značajna ($p = 0,257$), premda se udio ispitanica sa zahvaćanjem metafize prepolovio. Smjer te promjene podudara se sa smjerom promjene edema. Navedeno je u skladu s tumačenjem o smirivanju signalnih promjena prema kraju sezone. Ipak, zbog izostanka statističke značajnosti, nemogućnosti kvantitativnog mjerenja difuzijskih koeficijenata i razlika u b-vrijednostima među mjerenjima, taj se nalaz ne može uzeti kao potkrepa, već isključivo kao opažanje koje zahtijeva provjeru u budućim istraživanjima s ujednačenim protokolom.

Shanley i sur. (67) u longitudinalnom su istraživanju profesionalnih bacača u bejzbolu pratili pasivni opseg pokreta ramena tijekom pretsezonskih priprema u dvjema uzastopnim godinama te pritom utvrdili statistički značajne sezonske promjene. Posebno je zabilježena progresija GIRD-a (*glenohumeral internal rotation deficit*), koja je bila povezana s postupnim nakupljanjem trenažnog opterećenja. GIRD označava smanjenje unutarnje rotacije dominantnog glenohumeralnog zgloba u odnosu na nedominantnu stranu. Iako glenohumeralni zglob zbog svoje izrazite pokretljivosti omogućuje izvođenje snažnih pokreta iznad glave, upravo ga ta biomehanička obilježja čine podložnim postupnim prilagodbama i razvoju ozljeda. Kod sportaša koji kontinuirano izvode pokrete iznad glave ponavljana ekstremna vanjska rotacija tijekom faze zamaha postupno dovodi do skraćenja i zadebljanja stražnje zglobne kapsule te stražnjih struktura rotatorne manžete. Istodobno nastaju i koštane prilagodbe u obliku povećane humeralne retrotorzije, odnosno trajnog zakretanja glave humerusa (v. Sliku 3.). Unatoč tome, ukupni opseg rotacije najčešće ostaje očuvan jer se smanjenje unutarnje rotacije kompenzira povećanjem vanjske rotacije. Umjereni GIRD smatra se očekivanom adaptacijom

kod overhead sportaša, dok izraženiji i asimetričan deficit predstavlja poznati čimbenik rizika za razvoj ozljeda ramena, uključujući unutarnji sraz (impingement) i lezije labruma.

Za potrebe ove disertacije navedeni su rezultati posebno važni. Pokazuju da prilagodbe bacačkog ramena nisu jednokratne niti statične, nego se razvijaju postupno tijekom natjecateljske sezone i dodatno kumuliraju tijekom višegodišnjeg izlaganja overhead opterećenju. Takva vremenska dinamika biomehaničkih prilagodbi mekih tkiva i koštanih struktura usporediva je sa sezonskim promjenama morfologije ploče rasta uočenima u ovom istraživanju. Sve to jača interpretaciju prema kojoj kontinuirano overhead opterećenje tijekom jedne sezone može dovesti do postupnog remodeliranja koštano-hrskavičnih struktura proksimalnog humerusa.

Preostale kraniokaudalne mjere (medijalno, lateralno, anteriorno i dorzalno) nisu pokazale statistički značajne promjene tijekom natjecateljske sezone ($p > 0,05$). Iz toga slijedi da biomehaničko djelovanje karakteristično za odbojku prvenstveno utječe na longitudinalnu elongaciju ploče rasta. Prostorno širenje u ostalim smjerovima ostaje uglavnom nepromijenjeno. Jedno od mogućih objašnjenja jest da dominantne torzijske i trakcijske sile djeluju ponajprije duž uzdužne osi humerusa, dok se kompresijska i smična opterećenja raspoređuju ravnomjernije kroz koronarne i sagitalne projekcije. Slične biomehaničke zakonitosti opisali su Abrams i sur. (1), koji su u analizi teniskog servisa pokazali da upravo longitudinalne distrakcijske sile imaju ključnu ulogu u generiranju overhead pokreta.

Povećanje dužine ploče rasta za prosječno 2,65 mm tijekom jedne natjecateljske sezone predstavlja nalaz koji se može smatrati klinički relevantnim. U radiografskim istraživanjima sindroma *Little League Shoulder* proširenje fizalne linije veće od 2 mm uobičajeno se smatra jednim od dijagnostičkih kriterija simptomatske fizalne ozljede (57, 70). Ipak, izravna usporedba s rezultatima ovog istraživanja zahtijeva oprez. Radiografski prag odnosi se na razliku u širini ploče rasta između dviju strana u jednoj vremenskoj točki, dok se u ovom istraživanju analizirala promjena nastala tijekom jedne sezone, uz ograničenja opisana u poglavlju 5.6. Podatak da su i asimptomatske odbojkašice pokazale promjene usporedive veličine sugerira da je granica između fiziološke adaptacije i razvoja patologije u ovoj populaciji vjerojatno osjetljivija nego što se dosad pretpostavljalo. Otvara se tako mogućnost da konvencionalni radiografski pragovi, razvijeni za akutnije oblike fizalnih ozljeda, nisu u potpunosti primjenjivi na kronične, sporo razvijajuće promjene povezane sa specifičnim opterećenjima u odbojci.

5.3. Usporedba odbojkašica i kontrolne skupine – sport-specifične promjene nasuprot normalnom razvoju

Usporedba morfoloških nalaza dominantne ruke odbojkašica na kraju natjecateljske sezone s kontrolnom skupinom vršnjakinja omogućila je procjenu mogućeg doprinosa sportskog opterećenja u odnosu na fiziološke razvojne promjene. Pri tumačenju treba imati na umu razlike među skupinama u dobi i tjelesnoj veličini. Utvrđene statistički značajne razlike pokazuju da morfološke karakteristike ploče rasta proksimalnog humerusa u odbojkašica nadilaze razvojne varijacije kontrolne populacije.

Najizraženija razlika zabilježena je za varijablu kraniokaudalna visina epifize medijalno (odbojkašice: 34,93 ± 2,52 mm naspram kontrola: 30,84 ± 2,68 mm; $\Delta\bar{X} \approx 4{,}1$ mm; $p < 0{,}001$), koja je bila statistički vrlo značajna i dovoljno velika da bude uočljiva pri pregledu snimke. Moguće je pretpostaviti da medijalni dio kraniokaudalnog protezanja epifize anatomski odgovara segmentu na koji djeluju trakcijske sile unutarnjeg dijela rotatorne manžete, ponajprije tetive mišića subskapularisa i prednjih vlakana tetive mišića supraspinatusa. Te su strukture osobito aktivne tijekom faze deceleracije smeća i servisa. Isti obrazac za trakcijski opterećene segmente ploče rasta opisuju Navas i Kassarjian (14; v. poglavlje 5.1). Hvatišta tetiva rotatorne manžete u ovom istraživanju nisu zasebno vrednovana, pa je riječ o hipotezi, a ne o utvrđenom mehanizmu.

Protiv tog objašnjenja govori jedan nalaz iz istoga uzorka. Unutar skupine odbojkašica nije utvrđena statistički značajna razlika između dominantne i nedominantne ruke za ovu varijablu ($p = 0{,}265$; v. Tablicu 8). Dio razlike prema kontrolnoj skupini stoga vjerojatno proizlazi iz razlika u tjelesnoj građi, a ne isključivo iz učinka lokalnog mehaničkog opterećenja.

Usporedba s prvim mjerenjem odbojkašica (Tablica 13a) pokazuje, međutim, da te dvije mjere nemaju jednaku dokaznu vrijednost: razlika u kraniokaudalnoj visini epifize medijalno postoji već na početku sezone, kada su odbojkašice snimane na uređaju od 1,5 T, a kontrolna skupina na uređaju od 3 T ($p < 0{,}001$), dok razlike u dužini ploče rasta tada nema ($p = 0{,}746$). Valja pritom naglasiti da nijedna od dviju usporedbi s kontrolnom skupinom nije platformski homogena: kontrolna je skupina snimana na objema platformama, pa i Tablica 13 i Tablica 13a sadrže mjernu heterogenost koju treba uzeti u obzir. Nalaz za kraniokaudalnu visinu epifize medijalno ipak je otporniji jer opstaje na objema razinama usporedbe i u uvjetima u kojima su odbojkašice snimane na slabijem polju, dakle ondje gdje bi eventualna platformska pristranost djelovala protiv njega. Nakon primjene Bonferronijeve korekcije statističku značajnost zadržale

su dužina ploče rasta i kraniokaudalna visina epifize medijalno, dok je razlika za kraniokaudalnu visinu epifize anteriorno izgubila formalnu statističku značajnost (korigirana p = 0,061) te ju je primjerenije interpretirati kao trend.

Rezultati za dužinu ploče rasta ($\Delta\bar{X} \approx 2,7$ mm; p = 0,003; d = 1,14) te kraniokaudalna visina epifize anteriorno ($\Delta\bar{X} \approx 2,3$ mm; p = 0,012; d = 0,95) govore u prilog tome da se morfometrijski profil proksimalnog humerusa u odbojkašica razlikuje od onoga u kontrolnoj populaciji. Valja pritom razlikovati dvije razine nalaza: dužina ploče rasta opisuje samu hrskavičnu ploču rasta, dok kraniokaudalna visina epifize anteriorno opisuje kraniokaudalnu visinu epifize, koja skalira s veličinom kosti. Razlika u potonjoj mjeri stoga je osjetljivija na neizmjerene razlike u tjelesnoj građi između skupina. U oba slučaja vrijednosti Cohenova d odgovaraju velikom efektu, čime je i veličina razlike među skupinama izražena. Kwong i sur. (40), koji su sustavno opisali normalan MRI razvoj zone rasta proksimalnog humerusa tijekom djetinjstva i adolescencije, razlikuju obilježja fiziološkog sazrijevanja od promjena koje upućuju na patološke procese. U skladu s njihovim opisima, povećanje dužine ploče rasta i veće kraniokaudalne visine epifize u odbojkašica mogu se tumačiti kao pokazatelji povećane biomehaničke aktivnosti, a ne samo kao odraz normalnog razvoja.

Za razliku od prethodno navedenih mjera, kraniokaudalna visina epifize lateralno i dorzalno nisu pokazali statistički značajne razlike između odbojkašica i kontrolne skupine. Objašnjenje je vjerojatno u biomehaničkoj raspodjeli sila koje djeluju na proksimalni humerus. Lateralna i dorzalna područja pretežno su izložena kompresijskim opterećenjima koja se raspodjeljuju na veću površinu te stoga manje selektivno utječu na longitudinalnu elongaciju ploče rasta.

Iako je izražen edem bio brojčano češći i intenzivniji u odbojkašica nego u kontrolnoj skupini, razlika nije dosegla statističku značajnost (p = 0,167). Time se ne umanjuje potencijalna klinička važnost edema kao individualnog pokazatelja preopterećenja; izostanak značajnosti prije svega odražava izraženu interindividualnu varijabilnost njegove pojavnosti. Upravo je ta varijabilnost vjerojatno smanjila statističku snagu analize i otežala dokazivanje skupinske razlike.

Sličan obrazac uočen je i kod difuzijskih promjena. Bile su prisutne u svih odbojkašica (100 %), a u kontrolnoj skupini u 84,6 % ispitanica (Fisherov egzaktni test, p = 0,148). Kako su kontrolnu skupinu činile djevojke koje se nisu bavile overhead sportovima niti organiziranom sportskom aktivnošću intenziteta ≥ 3 sata tjedno, ta visoka učestalost

najvjerojatnije odražava fiziološke procese koštanog sazrijevanja, a ne posljedicu specifičnog sportskog opterećenja. Sama prisutnost difuzijskih promjena stoga ne može biti dostatan dijagnostički kriterij. Značenje difuzijskog nalaza trebalo bi procjenjivati zajedno s kvantitativnim mjerenjima prividnog koeficijenta difuzije (ADC) i normativnim vrijednostima prilagođenima dobi i razini tjelesne aktivnosti, kakve za ovu regiju još ne postoje.

Dobiveni se nalazi dobro uklapaju u dosadašnje spoznaje iz drugih overhead sportova. Lesniak i sur. (43) pokazali su da patološki MRI nalazi u asimptomatskih profesionalnih bacača u bejzbolu ne predviđaju njihov kratkoročni ulazak na popis ozlijeđenih sportaša. Pennock i sur. (57) također su utvrdili vrlo visoku prevalenciju MRI abnormalnosti, uključujući fizalne promjene, u potpuno asimptomatskih igrača Little League bejzbola. Takvi su nalazi konceptualno usporedivi s promjenama ploče rasta zabilježenima u ovom istraživanju. Nadalje, Taljanovic i sur. (72) opisali su humeralnu avulziju donjeg glenohumeralnog ligamenta (HAGL) u skupini studentskih odbojkašica, pri čemu je mehanizam nastanka ozljede povezan s ponavljanim mikrotraumama prednjeg dijela ramena. Njihov nalaz pokazuje da se i u odbojci razvijaju ozljede mehanizmom sličnim onome opisanom u bacača. Chang i Polster (13), analizirajući MRI patomehaniku ramena bacača, upozoravaju kako je važno razlikovati subkliničke adaptacijske promjene ploče rasta od jasno patoloških promjena poput unutarnjeg sraza (internal impingement), za koji je karakterističan nalaz remodeliranja stražnjeg dijela glave humerusa, kako su prethodno opisali Giaroli i sur. (29).

5.4. Provjera postavljenih hipoteza

Rezultati provedenog istraživanja omogućuju provjeru dviju prijavljenih hipoteza. Kako je dizajn opservacijski, obje se provjeravaju na razini statističke povezanosti, a ne uzročnosti. Nalazi koji proizlaze iz usporedbe s kontrolnom skupinom razmatraju se zasebno jer za tu usporedbu nije bila postavljena zasebna hipoteza, nego proizlazi izravno iz prijavljenoga cilja.

5.4.1. Hipoteza 1 – utjecaj ponavljanih overhead opterećenja na ploču rasta

Prva je hipoteza, pretpostavljala da ponavljani pokreti s visokim opterećenjima u odbojci utječu na zonu rasta u mladih sportašica. Zbog opservacijskog dizajna istraživanja, ova se hipoteza može provjeriti samo na razini statističke povezanosti. Stoga se izraz „utječu" u nastavku teksta tumači kao pretpostavka o povezanosti, a ne kao dokaz o uzročnosti. Na temelju ukupnih rezultata može se zaključiti da su dobiveni nalazi u skladu s tom hipotezom na razini statističke povezanosti, uz ograde iznesene u poglavlju 5.4.3. Longitudinalna analiza pokazala je statistički visoko značajno povećanje dužine ploče rasta tijekom jedne natjecateljske sezone, uz istodobno

statistički značajnu promjenu raspodjele edema. Usporedba s kontrolnom skupinom dodatno je pokazala da odbojkašice imaju statistički značajno veće izmjerene vrijednosti za dvije od ukupno pet analiziranih mjera, od kojih se jedna (dužina ploče rasta) odnosi na ploču rasta, a druga (kranokaudalna visina epifize medijalno) na visinu epifize, koje su ostale značajne i nakon korekcije za višestruko testiranje (dužina ploče rasta, $p = 0,003$; kranokaudalna visina epifize medijalno, $p < 0,001$), dok je za kranokaudalna visina epifize anteriorno utvrđen statistički trend ($p = 0,012$; korigirano $p = 0,061$).

Važno je pritom istaknuti da su sve ispitanice u ovom istraživanju bile asimptomatske, budući da je odsutnost simptoma bila uvjet uključivanja u istraživanje. Opisane razlike stoga ne proizlaze iz usporedbe sa sportašicama koje imaju tegobe, nego su u cijelosti zabilježene u skupini u kojoj kliničkih tegoba nije bilo. Iz toga proizlazi da se morfološke promjene mogu razvijati prije pojave simptoma, odnosno da predstavljaju dio subkliničkog odgovora rastuće ploče rasta na dugotrajno biomehaničko opterećenje. Dobiveni rezultati u skladu su s nalazima istraživanja provedenih u drugim overhead sportovima. Murachovsky i sur. (52) opisali su radiografske promjene fizalnog kompleksa u asimptomatskih mladih bejzbol bacača, dok su Pennock i sur. (57) dokumentirali visoku prevalenciju MRI abnormalnosti u potpuno asimptomatskih igrača Little League bejzbola. Međutim, dizajn istraživanja je opservacijski te uključuje moguće konfundirajuće čimbenike. To su očekivani fiziološki rast, promjena MRI platforme između mjerenja te razlike u dobi i tjelesnoj veličini kontrolne skupine. Zbog toga dobiveni rezultati podupiru model kumulativnog overhead opterećenja, ali sami po sebi ne dokazuju uzročno-posljedičnu povezanost.

5.4.2. Hipoteza 2 – morfološka asimetrija dominantne i nedominantne ruke

Drugom hipotezom pretpostavljeno je da će morfološke karakteristike ploče rasta dominantnog proksimalnog humerusa biti različite u odnosu na nedominantnu stranu kod adolescentnih overhead sportašica. Nekorigiranu razinu statističke značajnosti dosegnula je varijabla kranokaudalna visina epifize anteriorno ($p = 0,045$; $d = 0,37$), no ona ne opstaje nakon Bonferronijeve korekcije (Bonferroni-korigirana $p = 0,223$), a ni Wilcoxonov test predznačenih rangova nije dosegnuo značajnost ($p = 0,121$). Tomu treba pridodati i nalaz analize osjetljivosti nakon isključenja jedine ispitanice sa zatvorenom pločom rasta na prvom mjerenju. Budući da je riječ o biološki neusporedivom nalazu, njezinim isključenjem i ta jedina nekorigirano značajna razlika gubi statističku značajnost ($n = 31$; $p = 0,054$). Istovremeno, razlika u dužini plče rasta ostaje neznačajna ($p = 0,382$). Zaključak da druga hipoteza nije potvrđena time se dodatno učvršćuje. Uz to je zabilježen i klinički zanimljiv, ali statistički neznačajan trend prema

većem stupnju edema na dominantnoj strani. Edem koštane srži stupnja 2 bio je prisutan u 43,8 % dominantnih u odnosu na 31,3 % nedominantnih ruku, no ta razlika nije dosegnula statističku značajnost (Wilcoxon, p = 0,157).

Za razliku od edema, difuzijske promjene koje su zahvaćale i metafizu nisu pokazale obrazac lateralizacije u korist dominantne ruke. Njihova je učestalost bila gotovo jednaka, uz neznatno veću zastupljenost na nedominantnoj strani. Stoga rezultati za ovu varijablu ne podupiru postojanje izražene morfološke asimetrije. U cjelini gledano, druga se hipoteza ne može smatrati potvrđenom. Nijedna od pet kontinuiranih morfometrijskih mjera nije zadržala statističku značajnost nakon korekcije za višestruko testiranje, pri čemu razlika u kranokaudalnoj visini epifize anteriorno ostaje na razini trenda. Statistička značajnost nije postignuta ni za kategorijske pokazatelje, odnosno edem i difuzijske promjene. Ograničena veličina uzorka i izražena interindividualna varijabilnost karakteristična za ovu dobnu skupinu vjerojatno su pridonijele nemogućnosti dokazivanja šire statističke značajnosti u analiziranim varijablama.

5.4.3. Nesklad među trima razinama usporedbe i granice uzročnog tumačenja

Pri integriranju triju razina analize valja otvoreno istaknuti unutarnju diskrepanciju među njima. Usporedba dominantne i nedominantne ruke metodološki je najčišći test hipoteze o lateraliziranom učinku overhead opterećenja jer je u potpunosti kontrolirana za dob, tjelesnu veličinu, genetsku podlogu, sustavne čimbenike i MR uređaj (isti ispitanik, isto mjerenje, isti aparat). Upravo je taj najspecifičniji test dao pretežno negativan rezultat — statistička značajnost utvrđena je za jednu od pet kontinuiranih mjera, dok razlike u edemu i difuziji nisu dosegle značajnost. Istodobno, najizraženije razlike proizlaze iz usporedbe s kontrolnom skupinom, koja je ujedno i metodološki najosjetljivija. Ova je usporedba opterećena konfundirajućim varijablama dobi, tjelesne veličine i selekcije sportašica, budući da su kontrolne ispitanice u prosjeku bile starije (bliže zatvaranju ploče rasta) te fizički veće i probrane. Uz to, ovdje je riječ o općenitom kontrastu između sportašica i nesportašica, a ne o usporedbi specifičnoj za overhead opterećenje. Činjenica da je najspecifičniji test mehanizma najslabiji, a najkonfundiraniji najjači, sama po sebi nalaže oprez pri kauzalnom i lateralizacijskom tumačenju nalaza.

Ovaj je nesklad između analiza moguće dijelom pomiriti bez napuštanja hipoteze o opterećenju. Za razliku od izrazito unilateralnih pokreta poput bacanja u bejzbolu, opterećenja u odbojci znatnim su dijelom bilateralna. Primjerice, blok se izvodi objema rukama, dok zamah,

odraz i doskok generiraju obostrane sile na tijelo. Zbog toga bi stvaran učinak treninga na ploču rasta mogao biti pretežno simetričan, što objašnjava malu razliku između dominantne i nedominantne ruke unatoč postojanju realnog opterećenja. S obzirom na navedeno, izostanak izražene asimetrije zapravo je očekivan i ne proturječi hipotezi o opterećenju. Ipak, to ujedno znači da rezultati ne podupiru lateralizirani mehanizam vezan isključivo uz dominantnu ruku. Konvergentne nalaze longitudinalnog porasta i većih dimenzija u odnosu na kontrolu logičnije je tumačiti kao odraz kumulativnog bilateralnog opterećenja, a ne kao dokaz uzročnog lateraliziranog učinka. Zbog toga se i kategorijske razlike granične značajnosti interpretiraju tek kao numerički trendovi. Konačna potvrda zahtijevala bi veći uzorak, longitudinalno praćenje kontrolne skupine te obostrano mjerenje u objema vremenskim točkama.

5.5. Kliničke implikacije nalaza

Nalazi ovog istraživanja imaju praktičnu vrijednost u sportskoj medicini, radiologiji i prevenciji ozljeda mladih sportaša. Morfološke promjene ploče rasta utvrđene su u asimptomatskih odbojkašica, što ukazuje na to da odsutnost subjektivnih tegoba ne isključuje postojanje mjerljivih strukturnih prilagodbi proksimalnog humerusa. Ipak, ni sama prisutnost tih MRI nalaza ne označava nužno patološki proces koji bi zahtijevao liječenje ili prekid sportske aktivnosti. To je osobito važno u svakodnevnoj radiološkoj praksi, gdje se MRI nalaz često interpretira izvan šireg kliničkog konteksta. U adolescentnih overhead sportaša povećana dužina ploče rasta, blagi edem koštane srži ili difuzijske promjene mogu predstavljati očekivanu posljedicu kronične funkcionalne prilagodbe, a ne rani stadij ozljede. Stoga svaki nalaz treba povezati s kliničkom slikom, prisutnošću ili odsutnošću simptoma, podacima o trenažnom opterećenju te stadijem skeletnog razvoja. Na taj se način smanjuje mogućnost prekomjerne dijagnostike i nepotrebnog ograničavanja sportske aktivnosti u djece i adolescenata.

Budući da se subkliničke promjene mogu razvijati kroz dulje razdoblje bez popratnih tegoba, primjena MRI-ja omogućuje rano prepoznavanje sportašica kod kojih adaptacija prelazi granicu fiziološke prilagodbe. Takva je pravovremena detekcija osobito važna u razdoblju intenzivnog rasta jer omogućuje modifikaciju trenažnog procesa prije razvoja klinički manifestne ozljede.

5.5.1. MRI kao alat ranog prepoznavanja preopterećenja

Jedna od najvažnijih kliničkih poruka ovog istraživanja jest da su morfološke promjene ploče rasta proksimalnog humerusa prisutne u velikom udjelu potpuno asimptomatskih odbojkašica. To upućuje na zaključak da su promjene uzrokovane preopterećenjem zapravo dio postupnog biološkog procesa koji započinje znatno prije same pojave boli. U tom kontekstu,

nalaz magnetske rezonancije funkcionira kao najraniji slikovni indikator prilagodbe mladog koštanog tkiva na povećane biomehaničke zahtjeve. Dovodi se tako u pitanje klasični dijagnostički pristup u kojem se bol smatra primarnim pokazateljem ozljede. U adolescentnih sportašica klinički pregled ima ograničenu osjetljivost, a standardna radiografija često otkriva tek uznapredovale stadije fizalnih promjena. MRI se stoga nameće kao metoda izbora za rano prepoznavanje i praćenje rizičnih skupina, jer omogućuje detekciju edema, difuzijskih promjena i morfoloških alteracija ploče rasta u fazi kada su promjene potencijalno reverzibilne (25, 60). Jawetz i sur. (35) izričito preporučuju MRI metodu kao alat za stratifikaciju rizika u visokorizičnim populacijama mladih sportaša, a rezultati ovog istraživanja pružaju empirijsku potporu takvom pristupu u populaciji adolescentnih odbojkašica.

Praktična primjena MRI probira u adolescentnih sportaša, međutim, suočena je s brojnim ograničenjima. Troškovi pretrage, ograničeni kapaciteti radioloških ustanova te potreba za subspecijalističkom muskuloskeletno-radiološkom interpretacijom smanjuju dostupnost širokog probirnog programa. Zbog toga se kao realističniji pristup nameće model ciljane indikacije. MRI evaluacija ploče rasta može se razmotriti u odbojkašica u dobi od 13 do 16 godina — rasponu koji odgovara uzorku ovoga istraživanja — a osobito u onih koje su u posljednjih šest mjeseci prijavljivale bol ili nelagodu u ramenu te u onih u kojih treneri zamjećuju pad sportske izvedbe ili promjenu biomehanike smeča i servisa. Budući da trenažno opterećenje nije mjereno pojedinačno za svaku sportašicu, na temelju ovih podataka nije moguće odrediti egzaktnu granicu trenažnog volumena. Dok se ona ne utvrdi u prospektivnim istraživanjima, primjerenije je oslanjati se na kliničke i trenerske pokazatelje, a ne na fiksni broj sati. Model procjene rizika koji kombinira kliničke i trenažne pokazatelje omogućio bi ranu identifikaciju sportašica s najvećom vjerojatnošću razvoja patoloških nalaza. Takav bi pristup ujedno osigurao racionalno i učinkovito korištenje raspoloživih zdravstvenih resursa.

5.5.2. Periodizacija treninga i kontrola volumena overhead aktivnosti

Longitudinalni nalaz o sezonskom povećanju dužine ploče rasta, uz istodobnu promjenu raspodjele edema, pokazuje da ploča rasta dinamično odgovara na promjene trenažnog opterećenja tijekom natjecateljske sezone. Edem nije pokazivao progresiju prema višim stupnjevima u cijeloj skupini, no dužina ploče rasta ostala je statistički značajno povećana na kraju sezone. Riječ je o kumulativnoj promjeni. Njezina je reverzibilnost bez dugotrajnog longitudinalnog praćenja nepoznata (24, 28). Arnold i sur. (5) naglašavaju da su ukupni volumen overhead aktivnosti i nedostatna periodizacija treninga među ključnim prediktorima razvoja promjena hrskavice zone rasta posljedično preopterećenju. Na temelju rezultata ovog

istraživanja može se preporučiti sustavno praćenje broja servisa i smečeva po trenažnoj jedinici te planiranje faza smanjenog opterećenja unutar natjecateljske sezone, uz posebnu pozornost na biološku zrelost sportašica. Cools i sur. (15) dodatno ističu da preventivni programi usmjereni na stabilizaciju lopatice, ekscentričnu snagu rotatorne manžete i propriocepciju zgloba ramena mogu smanjiti mehanički stres koji se prenosi na ploču rasta.

Konkretne preporuke za periodizaciju treninga adolescentnih odbojkašica, utemeljene na nalazima ovog istraživanja i usklađene s podacima o volumenima overhead opterećenja u odbojci (79), uključuju nekoliko praktičnih mjera. Kako trenažni volumen u ovom istraživanju nije bilježen, preporuke se ne mogu izvesti izravno iz dobivenih podataka, nego iz dostupne literature. Prvo, ukupni volumen snažnih zamaha trebalo bi sustavno bilježiti i držati unutar raspona koji je u literaturi opisan kao uobičajen. Wolfe i sur. (79) u studentskih odbojkašica bilježe prosječno 47,1 zamah po trenažnoj jedinici u pretsezoni i 37,7 u natjecateljskoj sezoni. U dobnoj skupini od 13 do 16 godina te vrijednosti treba shvatiti kao gornji orijentir, a ne kao polazište za daljnje povećanje. Drugo, povećanje volumena treninga preporučuje se stupnjevati postupno te ga vezati uz napredovanje skeletne zrelosti i individualnu podnošljivost opterećenja. Takav se pristup ne bi trebao oslanjati na unaprijed određen trenutak poput potvrđene fuzije ploče rasta, budući da ona u ovoj dobi nastupa prekasno da bi služila kao praktičan kriterij. Treće, uvođenje faza smanjenog opterećenja unutar sezone dodatno podupire nalaz istih autora o većem udjelu ozljeda u pretsezoni nego tijekom natjecateljske sezone. Ovakve preporuke proizlaze iz analogije s dobro etabliranim smjernicama za bacače u bejzbolu (pitch count smjernice), prilagođenima biomehaničkim posebnostima odbojke. Važno je naglasiti da navedene mjere predstavljaju stručne preporuke autora utemeljene na dostupnoj literaturi, a ne empirijski potvrđene kliničke smjernice. Njihova konačna validacija zahtijevat će buduće prospektivne intervencijske studije. Predloženi raspon volumena smečeva izveden je ekstrapolacijom podataka o bejzbolskim bacačima i studentskoj odbojci (79) te ne predstavlja normativ razvijen izravno za adolescentne odbojkašice.

5.5.3. Razlikovanje adaptacije od patologije

Jedan od ključnih metodoloških, ali i kliničkih izazova ovog istraživanja odnosi se na jasno razlikovanje fizioloških adaptacijskih promjena od ranih stadija patoloških procesa. Podjela na fiziološko i patološko ovdje ne pomaže. Reakcija rastuće proksimalne humeralne ploče rasta na dugotrajno overhead opterećenje vjerojatnije je kontinuum bioloških odgovora, u kojem se početne promjene prilagođavanja postupno razvijaju pod utjecajem trajanja, intenziteta i učestalosti mehaničkog opterećenja. Tek kada biomehanički zahtjevi premaše

kapacitet obnove rastućeg tkiva, odgovor prilagodbe može prijeći u klinički jasnu ozljedu nastalu preopterećenjem.

Upravo zato dobivene rezultate nije opravdano tumačiti isključivo kroz prizmu prisutnosti ili odsutnosti MRI promjena. Nalaz edema i difuzijskih promjena u značajnom udjelu kontrolnih ispitanica pokazuje da određena razina morfoloških promjena može predstavljati dio uobičajenog procesa skeletnog sazrijevanja u adolescentnoj dobi. Drugim riječima, sama prisutnost MRI abnormalnosti ne znači nužno postojanje bolesti niti zahtijeva automatsko ograničavanje sportske aktivnosti. U skladu s time, Kornaat i sur. (39) naglašavaju kako se signal sličan edemu koštane srži (*bone marrow edema-like signal*) u sportaša ne smije rutinski interpretirati kao patološki nalaz. Pri procjeni njegova kliničkog značenja presudni su lokalizacija promjene, njezin opseg te dinamika tijekom longitudinalnog praćenja, jer upravo kombinacija tih obilježja omogućuje pouzdaniju diferencijalnu dijagnozu.

Dobiveni nalazi podupiru takvo stajalište: veće izmjerene vrijednosti u odnosu na kontrolnu skupinu i kumulativni sezonski porast dužine ploče rasta u skladu su s pretpostavkom da dugotrajno sportsko opterećenje pridonosi morfološkim prilagodbama proksimalnog humerusa. Zbog ograničenja opisanih u poglavlju 5.6 riječ je, međutim, o modelu koji nalazi podupiru, a ne o dokazu uzročne povezanosti.

Na temelju rezultata ovog istraživanja moguće je predložiti određene operativne kriterije koji bi u budućnosti mogli pomoći u razlikovanju fiziološke adaptacije od razvoja patološkog procesa. Važno je pritom naglasiti da se oni predlažu isključivo kao radni, hipotetski kriteriji koje je potrebno potvrditi u budućim prospektivnim istraživanjima te ih se ne smije promatrati kao potvrđene dijagnostičke granice. Budući da normativne vrijednosti dužine ploče rasta za ovu dob i spol još ne postoje, brojčani se prag na temelju ovih podataka ne može odgovorno predložiti. Svaka vrijednost izvedena iz aritmetičke sredine ovog uzorka obuhvatila bi znatan dio same promatrane kohorte, a k tome je izmjerena na uređaju od 3 T čija usporedivost s uređajima slabijeg polja nije utvrđena. Prvi korak prema operativnim kriterijima morala bi stoga biti izrada normativnih vrijednosti na većem, dobno raslojenom uzorku. Do tada se kao radni, hipotetski pokazatelji mogu razmotriti: (1) edem stupnja 2 koji perzistira na ponovljenom MRI pregledu unutar iste natjecateljske sezone; te (2) difuzijske promjene koje zahvaćaju metafizu (stupanj 2) u kombinaciji s bilo kojim simptomom ramena. Nijedan od navedenih pokazatelja pojedinačno nema dostatnu dijagnostičku vrijednost, ali njihova

istodobna prisutnost, interpretirana u odgovarajućem kliničkom kontekstu, može opravdati konzervativno smanjenje trenažnog opterećenja i intenzivnije praćenje sportašice.

5.5.4. Suradnja kineziologije, sportske medicine i radiologije

Provedeno istraživanje naglašava važnost interdisciplinarnog pristupa u praćenju adolescentnih sportašica koje sudjeluju u sportovima s ponavljanim overhead opterećenjima. Budući da su morfološke promjene ploče rasta utvrđene i u posve asimptomatskih ispitanica, njihovo tumačenje zahtijeva istodobno raspolaganje kliničkim, radiološkim i kineziološkim podacima. Svaka struka pritom vidi drugi dio slike. Treneri i kineziolozi prepoznaju promjene u opterećenju, tehnici izvedbe i funkcionalnom statusu sportašice. Liječnik sportske medicine povezuje klinički nalaz s podacima o opterećenju i funkcionalnom pregledu. Muskuloskeletni radiolog nalaz tumači unutar okvira dobno uvjetovanih razvojnih varijacija, čime se smanjuje rizik i od prekomjerne dijagnostike i od podcjenjivanja klinički važnih promjena. Odluke o prilagodbi trenažnog procesa ili o povratku punom opterećenju trebale bi stoga biti rezultat zajedničke procjene stručnog tima, a ne pojedinačnoga dijagnostičkog postupka.

5.6. Metodološka ograničenja istraživanja

Unatoč izvornosti i kliničkoj važnosti dobivenih nalaza, ovo istraživanje ima niz ograničenja koja bitno određuju doseg izvedenih zaključaka. Ta ograničenja nisu zanemariva, zbog čega svaku iznesenu tvrdnju treba tumačiti unutar njihovih granica.

Prvo se ograničenje odnosi na veličinu uzorka. Iako je ona planirana unaprijed, na temelju a priori analize statističke snage za primarni ishod, stvarni gubitak ispitanica tijekom sezone (37,5 %) nadmašio je predviđeni. Za primarni je ishod longitudinalni uzorak od 20 sportašica ipak ostao iznad praga potrebnog za upareni t-test ($n = 15$ pri $d = 0,80$), pa snaga za tu analizu nije bila kritično ograničena. Za primarnu kontinuiranu mjeru, dužinu ploče rasta, opažena je velika veličina efekta ($d = 1,20$). Zbog toga se primjerenost uzorka procjenjuje veličinama efekta i intervalima pouzdanosti, a ne naknadno izračunatom statističkom snagom koja u takvim okolnostima nije valjan pokazatelj. Za sekundarne je ishode, osobito za kategorijske varijable poput edema i difuzijskih promjena, snaga ipak ostala ograničena. Valja to imati na umu pri tumačenju izostanka statističke značajnosti, jer u ovim okolnostima nedostatak dokaza o razlici nije isto što i dokaz o njezinoj odsutnosti.

S osipom uzorka povezano je i pitanje selekcijske pristranosti. Dvanaest ispitanica koje nisu pristupile drugom mjerenju prestalo je trenirati u klubu. Razlozi njihova odlaska nisu bilježeni, pa se ne može isključiti mogućnost da je dio njih odustao zbog tegoba koje nisu

evidentirane tijekom praćenja. Nijedna ispitanica, međutim, nije prijavila ozljedu ramena. Usporedba početnih vrijednosti pokazala je da se skupina koja je završila istraživanje nije statistički značajno razlikovala od one koja je odustala, ni u duljini ploče rasta ($p = 0,462$) ni u difuzijskim promjenama ($p = 1,000$). Ipak, izraženi edem na početku sezone bio je brojčano češći kod ispitanica koje nisu dovršile praćenje (58 % naspram 35 %; $p = 0,304$). Zato se ne može posve isključiti da je sezonsko smanjenje edema barem dijelom posljedica selektivnog osipa, a ne isključivo biološke prilagodbe.

Sljedeće se ograničenje odnosi na izostanak procjene biološke zrelosti. Ni Tannerov stupanj spolnog sazrijevanja ni faza ubrzanog rasta nisu određeni, a kontrolna je skupina uz to bila prosječno nešto starija od odbojkašica ($15,15 \pm 1,34$ naspram $14,34 \pm 0,97$ godina; $\Delta = 0,81$ god.; $p = 0,061$; $d = 0,75$). U dobnoj skupini od 13 do 16 godina razlika od gotovo jedne kronološke godine može odražavati i razliku u biološkoj zrelosti, a kontrolne su ispitanice time bile bliže zatvaranju ploče rasta. Uvođenje dobi kao kovarijate (Tablica 13b) pokazalo je da ta prilagodba ne smanjuje razlike među skupinama, nego ih dapače blago pojačava. Razlog tome je što su ispitanice u kontrolnoj skupini starije, a istovremeno imaju manje dimenzije. Isti rezultat dobiva se i kada se iz analize isključe dvije kontrolne ispitanice starije od 16 godina. Kronološka dob stoga vjerojatno nije glavni konfundirajući čimbenik. Međutim, ostaje razlika u tjelesnoj veličini, koja u kontrolnoj skupini nije izmjerena pa ju nije bilo moguće statistički kontrolirati. Budući da odbojkašice u ovom uzorku imaju prosječnu visinu od 178,3 cm u dobi od samo 14,3 godine, jasno je da se radi o izrazitom selekcijskom profilu. Upravo zato tu konfundirajuću varijablu treba smatrati glavnim ograničenjem pri usporedbi s kontrolnom skupinom. Bez kontrole tog čimbenika nemoguće je razlučiti koliki dio uočene varijabilnosti odražava stupanj sazrijevanja, a koliki sportsko opterećenje. Buduća bi istraživanja stoga trebala ujednačiti skupine po kronološkoj i biološkoj dobi te uključiti procjenu po Tanneru ili koštanu dob kao kovarijate.

Trenažno opterećenje nije bilo kvantificirano na razini pojedine sportašice. Nedostaju precizni podaci o broju servisa i smečeva po treningu, tjednom volumenu te udjelu natjecateljskog opterećenja. Zbog toga nije bilo moguće ispitati odnos doze i odgovora, odnosno povezati specifične trenažne varijable s izmjerenim morfološkim promjenama. Ostaje stoga otvoreno pitanje koje razine opterećenja doista prate uočene promjene ploče rasta.

Određeni stupanj subjektivnosti neizbježan je i pri interpretaciji samih MRI nalaza, osobito pri ocjeni stupnja edema i difuzijskih promjena. Snimke su zajednički pregledala dva

iskusna muskuloskeletna radiologa prema unaprijed dogovorenim kriterijima. Sve su varijable ocjenjivane konsenzusom, bez bilježenja pojedinačnih ocjena. Suglasnost ocjenjivača zbog toga nije bilo moguće kvantificirati koeficijentom unutarklasne korelacije ni ponderiranim kappa-koeficijentom. Zaključci koji se oslanjaju na te varijable — prije svega razlike u raspodjeli edema između ruku i njegova sezonska promjena — stoga zahtijevaju dodatan oprez u odnosu na kontinuirane mjere, za koje je razina mjerne pogreške bolje poznata. Standardizacija kriterija i kalibracija ocjenjivača analizom međusobne pouzdanosti trebale bi biti sastavni dio protokola budućih studija. Orijentacijska procjena mogla bi se dobiti i naknadnim, slijepim ponovnim očitanjem reprezentativnog podskupa snimaka.

Istraživanje je provedeno u jednome klubu, što ograničava vanjsku valjanost nalaza i ne dopušta stratifikaciju prema razini natjecanja ni prema trenažnom volumenu. Uz to su nalazi specifični za žensku adolescentnu populaciju odbojkašica u dobi od 13 do 16 godina te se bez daljnjih istraživanja ne mogu prenositi na muške sportaše, na druge dobne skupine niti na ostale overhead sportove.

Posebnu pozornost zaslužuje činjenica da su mjerenja provedena na dvama uređajima različite jakosti polja. Prvo je mjerenje u cijelosti obavljeno na uređaju Philips Ingenia 1,5 T, a drugo u cijelosti na uređaju Siemens Magnetom Vida 3 T. Kontrolna je skupina, zbog znatno duljega razdoblja prikupljanja, snimana na objema platformama. Promjena platforme nije bila metodološki predviđena, nego je proizašla iz objektivnih okolnosti: produljenja vremenskog okvira istraživanja uslijed pandemije bolesti COVID-19 te prestanka rada prvoga uređaja unutar razdoblja praćenja. Uređaj Philips Ingenia bio je u uporabi od 2016. godine, a u razdoblju provedbe istraživanja bilježio je česte kvarove koje više nije bilo moguće u cijelosti sanirati; nakon uvođenja novijih uređaja u ustanovi nije obnavljan, pa je snimanje nastavljeno na uređaju od 3 T. Parametri sekvenci pomno su usklađeni kako bi se očuvala usporedivost prikaza, a uređaj od 3 T pruža jednak ili viši omjer signala i šuma te pouzdan difuzijski prikaz, zbog čega promjena platforme ne umanjuje kvalitetu morfometrijskih mjerenja. Ipak, formalna unakrsna kalibracija nije provedena i nijedna ispitanica nije snimljena na oba uređaja u istoj vremenskoj točki, pa se sustavni doprinos platforme ne može u potpunosti odvojiti od bioloških i trenažnih čimbenika. Sezonski porast dužine ploče rasta zato treba tumačiti kao nalaz potencijalno konfundiran promjenom mjerne platforme. Dobiveni podaci ipak nude argument protiv opće platformske magnifikacije kao jedinog objašnjenja. Naime, kada bi prelazak s uređaja od 1,5 T na uređaj od 3 T sustavno uvećavao izmjerene vrijednosti, taj bi se učinak morao odraziti na sve mjere u ravnini slike. Sezonske promjene četiriju kraniokaudalnih mjera iznose, međutim,

u prosjeku svega +0,21 mm (raspon od −0,78 do +0,91 mm), dok dužina ploče rasta raste za +2,65 mm. Budući da mjere nisu porasle razmjerno, sustavno uvećanje kao jedino objašnjenje sezonskoga porasta dužine ploče rasta malo je vjerojatno. Radi cjelovitosti valja navesti i protuargument: dužina ploče rasta mjeri se duž druge osi od kraniokaudalnih visina, pa se razlike u međuslojnom razmaku i u izboru sloja mogu na te dvije vrste mjera odraziti nesimetrično. Uz jakost polja razlikovale su se i tri pojedinosti protokola koje mogu djelovati u istom smjeru: tehnika supresije masti (SPAIR pri prvom, generička supresija pri drugom mjerenju), broj prosjeka signala (NSA 1–2 naspram NSA 1) te međuslojni razmak (0,3–0,5 mm naspram 10–40 % debljine sloja). Prve dvije mijenjaju uočljivost edema koštane srži i stoga predstavljaju alternativno objašnjenje sezonskoga smanjenja udjela edema stupnja 2, dok treća utječe na izbor sloja i time izravno na izmjerene vrijednosti kraniokaudalnog protezanja. Različite b-vrijednosti difuzijskih sekvenci (0 i 750–800 naspram 50 i 800 s/mm²) dodatno ograničavaju longitudinalnu usporedivost difuzijskih nalaza. Važno je pritom naglasiti da ovo ograničenje ne zahvaća usporedbu dominantne i nedominantne ruke (Tablica 8), koja je u cijelosti provedena unutar istoga mjerenja i na istome uređaju te stoga ostaje metodološki najčišći test u ovom nacrtu. Usporedbe s kontrolnom skupinom (Tablice 13 i 13a) platformski su, međutim, mješovite: dio je kontrolnih ispitanica snimljen na uređaju od 1,5 T, a dio na uređaju od 3 T. Ta heterogenost unosi dodatnu mjernu varijabilnost u kontrolnu skupinu i ne može se isključiti kao djelomično objašnjenje uočenih razlika među skupinama. Istodobno, upravo ta okolnost omogućuje unutarnju provjeru koju ovaj nacrt inače ne bi dopuštao. Usporedbom kontrolnih ispitanica snimljenih na dvjema platformama moguće je procijeniti veličinu i smjer eventualne sustavne razlike među uređajima. Time se neizravno ocjenjuje koliko promjena platforme doista utječe na izmjerene morfološke vrijednosti.

Dva se ograničenja odnose na sam raspored mjerenja. Nedominantna ruka nije snimljena na kraju sezone, pa nije bilo moguće longitudinalno pratiti dinamiku asimetrije, iako bi upravo takav podatak najizravnije govorio o lateraliziranom učinku opterećenja. Kontrolna skupina pak nije praćena longitudinalno, nego je snimljena jednokratno, zbog čega se sezonski porast morfoloških mjera ne može razlučiti od očekivanoga normalnog skeletnog rasta u ovoj dobnoj skupini. Tomu treba pridodati i nalaz iz Tablice 13a: na početku sezone odbojkašice se u dužini ploče rasta nisu razlikovale od kontrolne skupine, pa cjelokupna razlika u toj varijabli nastaje unutar razdoblja u kojem je istodobno promijenjena i mjerna platforma. Nalaz o sezonskom porastu dužine ploče rasta zbog toga zahtijeva potvrdu u istraživanju provedenom na jedinstvenoj platformi. Za pouzdano pripisivanje uočenih promjena sportskom opterećenju

bila bi nužna longitudinalno praćena kontrolna skupina. Naposljetku, dizajn je istraživanja opservacijski, što načelno ne dopušta uzročno-posljedično zaključivanje — sva se tumačenja iznesena u ovom radu odnose na statističku povezanost, a ne na uzročnost.

Uz sastav kontrolne skupine vezano je i jedno pojedinačno ograničenje. Jedna kontrolna ispitanica u dobi od 17 godina imala je zatvorenu ploču rasta (Tablica 13c). Zbog toga njezine izmjerene vrijednosti ne opisuju aktivnu hrskavičnu ploču, nego stanje nakon fuzije. Budući da je riječ o jednoj od trinaest ispitanica, njezino je zadržavanje u analizi moglo blago sniziti prosječne vrijednosti kontrolne skupine. Time bi razlike prema odbojkašicama bile prije precijenjene nego podcijenjene. Smjer tog utjecaja stoga ne dovodi u pitanje postojanje razlika, ali traži oprez pri tumačenju njihove veličine. U budućim bi istraživanjima kriterij otvorene ploče rasta trebalo uvrstiti među uvjete za uključivanje u kontrolnu skupinu.

Navedena ograničenja istodobno oblikuju i smjer u kojem bi se buduća istraživanja trebala razvijati. Multicentrični dizajn s ispitanicama iz više klubova povećao bi vanjsku valjanost i omogućio stratifikaciju prema razini natjecanja i trenažnom volumenu. Instrumentalizirano mjerenje biomehaničkih parametara smeča i servisa, primjerice akcelerometrijom ili trodimenzionalnom kinematičkom analizom, omogućilo bi izravno povezivanje opterećenja s MRI nalazima na razini pojedine sportašice. Višegodišnje praćenje iste skupine pružilo bi odgovor na pitanje koje ovo istraživanje nužno ostavlja otvorenim. Ono bi pokazalo jesu li uočena povećanja duljine ploče rasta prolazna i reverzibilna po završetku intenzivnih sezona. Alternativno, ona se mogu postupno nakupljati i s vremenom prijeći u strukturnu fizalnu patologiju vidljivu i na radiografiji.

Naposljetku, radi potpune transparentnosti navode se odstupanja provedenoga istraživanja od protokola prijavljenoga u prijavi teme. Dobni je raspon proširen s prijavljenih 15–16 na 13–16 godina, čime je obuhvaćeno razdoblje u kojem je ploča rasta aktivnija, ali je povećana i biološka heterogenost uzorka. Umjesto isključivo smečerica, u istraživanje su uključene igračice svih pozicija, uključujući i libero. Sve su one prolazile isti program vježbi smeča i servisa, pa je izloženost overhead opterećenju na treningu bila zajednička svim ispitanicama. Razlike među pozicijama izraženije su u natjecateljskim uvjetima. Međutim, kako broj zamaha po sportašici nije bilježen, njihov se doprinos ne može kvantificirati. Najznatnije se odstupanje odnosi na sastav kontrolne skupine. Prijavom je bilo predviđeno da je čine sportašice koje se ne bave overhead sportovima, konkretno nogometašice, i to u broju jednakom skupini odbojkašica. Tijekom četiriju godina takve su ispitanice sustavno tražene uz

posredovanje mentora i članova povjerenstva, no potreban broj ipak nije bilo moguće prikupiti. Upravo je ta nemogućnost regrutacije bila glavni razlog produljenja samog istraživanja. Kontrolnu su skupinu naposljetku činile 13 djevojaka odgovarajuće dobi koje se ne bave overhead sportovima niti organiziranim sportom intenziteta ≥ 3 sata tjedno. To odstupanje ima izravnu interpretacijsku posljedicu: usporedba je time postala kontrast sportašica i nesportašica, a ne kontrast overhead i ne-overhead opterećenja, zbog čega razlike prema kontrolnoj skupini mogu odražavati i opću sportsku selekciju te razlike u tjelesnoj građi. Buduća bi istraživanja tu usporedbu trebala provesti prema izvorno zamišljenom nacrtu, s kontrolnom skupinom sportašica iz ne-overhead sportova.

Preostala odstupanja odnose se na samu tehničku provedbu istraživanja. Prvotnim je planom snimanje bilo predviđeno isključivo na uređaju Philips Ingenia 1,5 T. Međutim, drugo mjerenje, kao i dio snimanja kontrolne skupine, obavljeno je na uređaju Siemens Magnetom Vida 3 T, a razlozi i posljedice te promjene detaljno su obrazloženi ranije u ovom poglavlju. Nadalje, stupnjevanje intenziteta signala koštane srži uz ploču rasta, odnosno procjena edema inicijalno je planirano na ljestvici od I do IV. U praksi je ipak primijenjena trostupanjska ljestvica prema Johanssonu i suradnicima (37), čime je postignuta usklađenost s metodološki srodnim MRI studijama fizalnih promjena. Iako je trostupanjska podjela nešto grublja od prvotno predložene, odabrana je radi izravne usporedivosti s izvornom studijom. Na koncu, predviđeno mjerenje u središnjem dijelu kosti nije zasebno prikazano, dok je kriterij prethodnoga mirovanja skraćen s mjesec dana na tri tjedna.

Zasebno obrazloženje traži odstupanje koje se odnosi na difuzijsko oslikavanje. Prijavom je bilo predviđeno mjerenje pripadajućih difuzijskih koeficijenata. Sekvence su snimljene, no dobivene karte prividnog koeficijenta difuzije nisu bile dostatne kvalitete za pouzdano kvantitativno očitanje. Razlog su izraženi artefakti magnetske osjetljivosti i geometrijska distorzija eho-planarnog oslikavanja u području proksimalnog humerusa, uz malo vidno polje i blizinu granice kosti i zraka. Vrijednosti ADC-a stoga nisu izmjerene, a difuzijski su nalazi ocijenjeni kvalitativno i razvrstani u tri kategorije.

To ima dvije posljedice. Prva je da se integracija difuzijske sekvence ne može navoditi kao element originalnosti nacrta, tim više što se difuzijska varijabla u ovom uzorku pokazala nediskriminativnom (100 % naspram 84,6 %). Druga je da sam taj podatak predstavlja zaseban metodološki doprinos: kvantitativna difuzijska analiza ploče rasta proksimalnog humerusa pri korištenim parametrima nije se pokazala izvedivom. U budućim bi je istraživanjima trebalo

planirati uz prilagođen protokol — sekvence otpornije na geometrijsku distorziju, veći broj prosjeka signala ili tehnike smanjenoga vidnog polja.

Sva navedena odstupanja proizašla su iz organizacijskih i tehničkih okolnosti tijekom provedbe, a njihove su posljedice za tumačenje nalaza razmotrene na odgovarajućim mjestima u ovom poglavlju.

5.7. Usporedba s dosadašnjim istraživanjima i originalnost doprinosa

Dosadašnja istraživanja ploče rasta proksimalnog humerusa u adolescentnih sportaša pretežno su se fokusirala na bacačke sportove i tenis. Song i sur. (70) te Pennock i sur. (57) detaljno su opisali MRI nalaze u Little League Shoulder, entitetu koji je paradigmatski primjer epifiziolize prilikom preopterećenja u mladih bacača. Johansson i sur. (37) proveli su sustavnu MRI studiju asimptomatskih elitnih tenisača. Dokumentirali su lateralne i ventralne promjene fize dominantne ruke. Također, Hoy i sur. (33) izvijestili su o koštanom edemu proksimalnog humerusa u elitnih tenisača s bolovima u ramenu, a Murachovsky i sur. (52) opisali su radiografske promjene u asimptomatskih mladih bacača u bejzbolu.

Nasuprot tome, ovo istraživanje, koliko je autoru poznato, predstavlja prvu sustavnu MRI studiju morfologije ploče rasta proksimalnog humerusa u populaciji adolescentnih odbojkašica. Ispunjava se tako važna praznina u literaturi, koja je prepoznata i u uvodnim poglavljima ovog rada. Originalnost doprinosa leži u četiri ključna elementa: (1) specifičnosti populacije (odbojkašice), (2) longitudinalnom dizajnu s dva mjerenja unutar jedne natjecateljske sezone, (3) primjeni kontrolne skupine za procjenu doprinosa sportskog opterećenja u odnosu na fiziološke razvojne promjene, te (4) integraciji difuzijske MRI sekvence kao potencijalnog ranog markera preopterećenja ploče rasta.

Tvrdnje o prvenstvu iznesene u ovom poglavlju temelje se na pretraživanju literature provedenom u bazama MEDLINE/PubMed, Scopus, i Web of Science za razdoblje od 1995. do 2026. godine, uz ključne riječi epiphyseal plate, proximal humerus, MRI, volleyball, overuse injuries, adolescent female athletes, growth. Pretraživanje nije provedeno prema protokolu sustavnoga preglednog rada, pa se tvrdnja o prvenstvu iznosi s odgovarajućom ogradom.

Usporedba s nalazima Johanssonove studije (37) pokazuje konzistentnost u ključnim aspektima: i u tenisača i u odbojkašica dominantna ruka pokazuje izražene morfološke promjene zone rasta kosti u sportaša bez kliničkih simptoma, što potvrđuje opći model kumulativnog overhead stresa u adolescentnom ramenu. Specifičnost odbojke uključuje

torzijska i trakcijska opterećenja, ali i vertikalnu komponentu sile odraza i doskoka. Taj utjecaj u ovom istraživanju nije zasebno kvantificiran, no njegov potencijalni doprinos ukupnom morfološkom obrascu promjena ostaje važan predmet budućih studija.

Arnold i sur. (5) su u preglednom radu o ozljedama fize posljedično preopterećenju u mladih sportaša jasno artikulirali potrebu za prospektivnim longitudinalnim studijama u sportovima s pokretima iznad glave različitim od bejzbola. Ovo istraživanje odgovara upravo na taj poziv, nudeći prvu empirijsku bazu podataka za odbojku kao specifičan sport s visokim overhead volumenom.

Dugoročna klinička relevantnost subkliničkih promjena ploče rasta u adolescenciji ostaje nedovoljno istražena. Maquirriain i sur. (49) su u kontroliranoj studiji bivših elitnih tenisača pokazali da su degenerativne promjene ramenog zgloba značajno prevalentnije nego u kontrolnoj skupini, sugerirajući da sportske adaptacije ramena iz adolescencije mogu biti predisponirajući čimbenik za kasniju degenerativnu patologiju. Ovi nalazi naglašavaju važnost ranog prepoznavanja i praćenja morfoloških promjena ploče rasta, čime longitudinalne studije poput ove dobivaju i preventivnu javnozdravstvenu dimenziju. Originalnost doprinosa ogleda se i u metodološkom pristupu: trorazinska komparativna struktura (dominantna naspram nedominantna ruka, longitudinalna analiza, usporedba s kontrolnom skupinom) nije primijenjena u prethodnim srodnim studijama koje su se uglavnom oslanjale na jednorazinsku usporedbu simptomatskih i asimptomatskih sportaša ili na presječne populacijske studije bez kontrolne skupine. Takav dizajn na tri razine omogućuje razdvajanje triju komponenti ukupnog morfološkog obrasca. To su asimetrija opterećenja, kumulativni sezonski učinak te sport-specifični učinak u odnosu na normalnu razvojnu varijabilnost. Razdvajanje tih elemenata neophodan je preduvjet za smislenu kliničku interpretaciju nalaza. Sva tri elementa zajedno govore u prilog tome da su promjene ploče rasta u odbojkašica vjerojatno dijelom povezane sa sportskim opterećenjem, premda se zbog konfundirajućih varijabli (dob i tjelesna veličina kontrolne skupine) i izostanka longitudinalno praćene kontrole ne mogu u potpunosti razlučiti od normalne razvojne varijabilnosti.

5.8. Smjernice za buduća istraživanja

Rezultati ovog istraživanja otvaraju brojna znanstveno-istraživačka pitanja koja nadilaze okvire dobivenih nalaza te predstavljaju polazišnu točku za daljnji razvoj spoznaja o adaptacijskim i patološkim promjenama ploče rasta u mladih overhead sportaša. S obzirom na to da je primijenjeni longitudinalni dizajn pružio uvid u morfološke promjene unutar samo

jedne natjecateljske sezone, za cjelovito razumijevanje problematike nužno je provesti višegodišnja prospektivna istraživanja. Takve bi studije trebale pratiti kohortu sportaša od same inicijacije intenzivnijeg sportskog treninga pa sve do kompletnog sazrijevanja skeleta. Jedino bi se na taj način mogli dugoročno razlučiti prolazni, fiziološki odgovori tkivne prilagodbe od trajnih, patoanatomskih promjena proksimalne humeralne fize, uz preciznije definiranje kritičnog trenutka u kojem tkivna adaptacija prelazi u klinički manifestnu ozljedu prenaprezanja.

Posebno važan smjer budućih istraživanja odnosi se na izradu normativnih baza podataka s dobno i spolno specifičnim referentnim vrijednostima MRI parametara za pojedine razvojne faze. U trenutačnoj znanstvenoj literaturi ne postoje općeprihvaćeni standardi za dimenzije proksimalne humeralne ploče rasta, intenzitet perifizalnog edema niti difuzijska obilježja u različitim razdobljima adolescentnog razvoja. Nedostatak takvih normativnih kriterija značajno otežava objektivnu diferencijaciju očekivanih fizioloških promjena u rastu od suptilnih patoloških nalaza induciranih prekomjernim biomehaničkim opterećenjem. Uspostava standardiziranih referentnih vrijednosti stoga bi predstavljala izniman doprinos kliničkoj primjeni magnetske rezonancije u ranoj dijagnostici i evaluaciji mladih sportaša.

Jednako tako, buduće studije moraju integrirati metode objektivnog i kontinuiranog praćenja stvarnog trenažnog opterećenja. Kvantifikacija specifičnih kretnji, poput točnog broja servisa i smečeva, kumulativnog trajanja trenažnog procesa te intenziteta natjecateljskog napora, omogućila bi preciznu korelacijsku analizu između vanjskog opterećenja i morfoloških alteracija zone rasta. U tom smislu, primjena suvremenih kinezioloških tehnologija – uključujući digitalne dnevnike treninga, nosive mikrosenzorske sustave te validirane pokazatelje unutarnjeg i vanjskog opterećenja – ključna je za objektivno mjerenje repetitivnog stresa. Dodatno, s obzirom na to da kronološka dob ne odražava uvijek stvarni stupanj maturacije, u istraživačke protokole nužno je uvrstiti pokazatelje biološkog sazrijevanja, poput procjene koštane dobi ili Tannerovih stupnjeva spolnog razvoja, kako bi se izolirao utjecaj kroničnog sportskog napora od prirodnih procesa rasta.

Značajan napredak u razumijevanju mehanizama ozljeđivanja donijelo bi i multidisciplinarno povezivanje slikovnih nalaza s trodimenzionalnom (3D) biomehaničkom analizom pokreta. Analiza kinematike ramenog obruča i kinetičkog lanca tijekom izvođenja specifičnih odbojkaških elemenata omogućila bi identifikaciju rizičnih tehničkih obrazaca koji izravno koreliraju s promjenama vidljivim na magnetskoj rezonanciji, što bi poslužilo kao

osnova za ciljane preventivne intervencije. Paralelno s time, metodologiju je potrebno nadograditi naprednim kvantitativnim MRI tehnikama, poput T2 i T1ρ mapiranja hrskavice, koje posjeduju visoku osjetljivost za detekciju ranih mikrostrukturnih i biokemijskih promjena u tkivu prije pojave makroskopski vidljivih lezija. Sinergijom svih navedenih parametara otvorio bi se prostor za razvoj multivarijatnih prediktivnih modela i algoritama umjetne inteligencije za individualnu procjenu rizika od fizalnih ozljeda. Naposljetku, proširenje istraživanja na druge overhead sportove, poput rukometa, tenisa, vaterpola i bejzbola, omogućilo bi komparativnu analizu i utvrđivanje općih te sport-specifičnih obrazaca prilagodbe proksimalnog humerusa, pridonoseći tako izradi sveobuhvatnih preventivnih preporuka za rastući lokomotorni sustav.

6. ZAKLJUČAK

Longitudinalni dizajn s mjerenjima na početku i na kraju natjecateljske sezone omogućio je precizno praćenje morfoloških i strukturnih promjena pod utjecajem kumulativnog sportskog opterećenja. Dobiveni nalazi pokazuju da se tijekom jedne natjecateljske sezone u populaciji adolescentnih odbojkašica razvija mjerljiva promjena ploče rasta proksimalnog humerusa. Pri tome je utvrđeno da se statistički značajno mijenjala dužina ploče rasta te raspodjela stupnjeva edema koštane srži, dok četiri mjere kraniokaudalne visine epifize nisu pokazale signifikantnu promjenu. Takav selektivan morfološki obrazac upućuje na to da je odgovor rastućega skeleta na specifično trenažno opterećenje u odbojci usmjeren prvenstveno uzduž longitudinalne osi kosti, a ne na ravnomjerno povećanje svih dimenzija. Posebno je važno naglasiti da su opisane alteracije zabilježene u klinički asimptomatskih sportašica, čime se potvrđuje da mjerljivi biološki odgovor fizalne hrskavice redovito prethodi pojavi subjektivnih tegoba i kliničkih simptoma.

Longitudinalna analiza utvrdila je visoko značajno povećanje duljine ploče rasta dominantne ruke kroz sezonu, uz istodobno signifikantnu promjenu u raspodjeli edema koštane srži. S druge strane, usporedba s kontrolnom skupinom pokazala je veće vrijednosti za duljinu ploče rasta i medijalnu visinu epifize, dok je treća mjera ostala na razini statističkog trenda. Metodološka analiza indicira da ova dva nalaza nemaju jednaku dokaznu vrijednost. Razlika u medijalnoj visini epifize bila je jasno vidljiva već na samom početku sezone. Kako su odbojkašice u toj polaznoj točki snimane na uređaju slabije jakosti polja u odnosu na kontrolnu skupinu, ta se inicijalna razlika ne može pripisati promjeni mjerne platforme. S duljinom ploče rasta situacija je drukčija: na početku sezone razlika između skupina nije postojala, nego se korelacija javlja tek na kraju natjecateljskog ciklusa, pri čemu po veličini učinka gotovo u potpunosti odgovara zabilježenom sezonskom porastu te varijable.

Unatoč tome, važno je istaknuti da je kontrolna skupina snimana na oba dostupna MR uređaja. Zbog te mjerne nehomogenosti, ovaj rezultat, kao i sam longitudinalni porast, zahtijeva verifikaciju u budućim istraživanjima na jedinstvenoj platformi. Dodatno ograničenje predstavlja podatak da kontrolna skupina nije praćena longitudinalno te je bila prosječno kronološki starija, iako statistička prilagodba za dob ne mijenja smjer dobivenih rezultata. Budući da je završno mjerenje odbojkašica provedeno na drugom MRI uređaju, uočeni sezonski napredak ne može se u potpunosti izolirati od normalnog fiziološkog rasta. Zbog navedenih

konfundirajućih čimbenika, dobivene nalaze u ovom trenutku treba interpretirati na razini statističke povezanosti s kumulativnim opterećenjem, a ne kao izravan i definitivan dokaz uzročnosti.

Rezultati ovog istraživanja potvrdili su prvu hipotezu na razini statističke povezanosti, dokazujući da ponavljani pokreti iznad glave u odbojci utječu na zonu rasta proksimalnog humerusa u mladih sportašica. Longitudinalno praćenje tijekom jedne natjecateljske sezone otkrilo je statistički visoko značajno povećanje dužine ploče rasta, uz istodobne promjene u prostornoj raspodjeli edema uz zonu rasta. U odnosu na kontrolnu skupinu, odbojkašice su na kraju sezone imale značajno veće vrijednosti dužine ploče rasta i kranokaudalne visine medijalnog dijela epifize, što je ostalo statistički značajno i nakon primjene stroge Bonferronijeve korekcije za višestruko testiranje. Dobiveni nalazi čvrsto podupiru model mikrotraumatizacije uslijed kumulativnog opterećenja ramenog obruča te su u potpunosti konzistentni sa srodnim kineziološkim i radiološkim istraživanjima u drugim overhead sportovima.

Druga hipoteza, koja je pretpostavljala morfološku asimetriju i razliku između dominantne i nedominantne ruke, nije potvrđena. Zanimljivo je da se sam smjer asimetrije razlikovao ovisno o promatranoj morfometrijskoj mjeri. Dominantna ruka imala je više srednje vrijednosti za anteriorno i dorzalno kraniokaudalno protezanje, dok su za duljinu EP-a te za medijalno i lateralno protezanje vrijednosti bile neznatno više na nedominantnoj strani. Jedina razlika koja je dosegnula nekorigiranu razinu značajnosti utvrđena je za anteriorno kraniokaudalno protezanje epifize, no ona nije opstala nakon Bonferronijeve korekcije niti u neparametrijskoj provjeri. Razlike u izraženom edemu i difuzijskim promjenama također nisu bile statistički značajne. Ovako ograničena i nejednosmjerna lateralizacija u skladu je s biomehaničkim osobitostima odbojke. Za razliku od izrazito jednostranih kretnji, poput bejzbolskog bacanja, opterećenje u odbojci velikim je dijelom bilateralno zbog učestalog izvođenja elemenata bloka, obostranog zamaha, specifičnog odraza i doskoka. Iz toga proizlazi da učinak na ploču rasta ne ovisi isključivo o uporabi dominantne ruke, već o složenim biomehaničkim zahtjevima kojima je izložen cijeli rameni obruč.

Longitudinalni nalazi upućuju na to da promjene ploče rasta tijekom sezone ne idu linearno prema progresiji oštećenja tkiva. One zapravo odražavaju dinamičan i reverzibilan odnos između adaptacije i remodelacije tkiva, što potvrđuje podatak da je usporedno sa smanjenjem izraženog edema zabilježen porast udjela ispitanica bez ikakvih edematoznih

promjena. Takav se obrazac ne uklapa u pojednostavljeni model progresivne destrukcije, već podupire suvremeno kineziološko shvaćanje da mehanički stres na mladi kostur može istodobno imati i adaptacijsku i štetnu ulogu, ovisno o intenzitetu, trajanju i kronološkom trenutku razvoja. Odgovor proksimalne humeralne ploče rasta stoga je najprimjerenije promatrati kao kontinuum bioloških promjena, a ne kroz crno-bijelu podjelu na fiziološko i patološko stanje.

U konačnici, magnetska rezonancija pokazala se izuzetno osjetljivom slikovnom metodom za otkrivanje subkliničkih promjena ploče rasta kod asimptomatskih sportašica. Ipak, njezin radiološki nalaz dobiva pravu dijagnostičku i prognostičku vrijednost tek kada se interpretira integrirano — u korelaciji s kliničkim pregledom, funkcionalnom procjenom, preciznim podacima o trenažnom volumenu i stupnjem bioločke zrelosti. Koliko je autoru poznato, ovo je prvo sustavno longitudinalno MR istraživanje ploče rasta proksimalnog humerusa u mladih odbojkašica, čime se popunjava kritična praznina u dosadašnjoj literaturi i postavlja čvrst znanstveni temelj za buduće prospektivne studije.

LITERATURA

1. Abrams GD, Harris AHS, Andriacchi TP, Safran MR. Biomechanical analysis of three tennis serve types using a markerless system. Br J Sports Med. 2014;48(4):339-342. doi: 10.1136/bjsports-2012-091371
2. Alyas F, Turner M, Connell D. MRI findings in the lumbar spines of asymptomatic, adolescent, elite tennis players. Br J Sports Med. 2007;41(11):836-841. doi: 10.1136/bjsm.2007.037747
3. American College of Radiology, American Association of Physicists in Medicine. ACR-AAPM Technical Standard for Diagnostic Medical Physics Performance Monitoring of Magnetic Resonance (MR) Imaging Equipment. Reston (VA): American College of Radiology; 2024.
4. Aoyama JT, Maier P, Servaes S, Serai SD, Ganley TJ, Potter HG, et al. MR imaging of the shoulder in youth baseball players: anatomy, pathophysiology, and treatment. Clin Imaging. 2019;57:99-109. doi: 10.1016/j.clinimag.2019.05.005
5. Arnold A, Thigpen CA, Beattie PF, Kissenberth MJ, Shanley E. Overuse physeal injuries in youth athletes. Sports Health. 2017;9(2):139-147. doi: 10.1177/1941738117690847
6. Ballock RT, O'Keefe RJ. The biology of the growth plate. J Bone Joint Surg Am. 2003;85(4):715-726. doi: 10.2106/00004623-200304000-00021
7. Bere T, Kruczynski J, Veintimilla N, Hamu Y, Bahr R. Injury risk is low among world-class volleyball players: 4-year data from the FIVB Injury Surveillance System. Br J Sports Med. 2015;49(17):1132-1137. doi: 10.1136/bjsports-2015-094959
8. Braun S, Kokmeyer D, Millett PJ. Shoulder injuries in the throwing athlete. J Bone Joint Surg Am. 2009;91(4):966-978. doi: 10.2106/JBJS.H.01344
9. Bull FC, Al-Ansari SS, Biddle S, Borodulin K, Buman MP, Cardon G, et al. World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour. Br J Sports Med. 2020;54(24):1451-1462. doi: 10.1136/bjsports-2020-102955
10. Burkhart SS, Morgan CD, Kibler WB. The disabled throwing shoulder: spectrum of pathology Part I: pathoanatomy and biomechanics. Arthroscopy. 2003;19(4):404-420. doi: 10.1053/jars.2003.50128
11. Caine D, DiFiori J, Maffulli N. Physeal injuries in children's and youth sports: reasons for concern? Br J Sports Med. 2006;40(9):749-760. doi: 10.1136/bjsm.2005.017822

12. Challoumas D, Stavrou A, Dimitrakakis G. The volleyball athlete's shoulder: biomechanical adaptations and injury associations. Sports Biomech. 2017;16(2):220-237. doi: 10.1080/14763141.2016.1222629

13. Chang IY, Polster JM. Pathomechanics and magnetic resonance imaging of the thrower's shoulder. Radiol Clin North Am. 2016;54(5):801-815. doi: 10.1016/j.rcl.2016.04.004

14. Connor PM, Banks DM, Tyson AB, Coumas JS, D'Alessandro DF. Magnetic resonance imaging of the asymptomatic shoulder of overhead athletes: a 5-year follow-up study. Am J Sports Med. 2003;31(5):724-727. doi: 10.1177/03635465030310051501

15. Cools AM, Johansson FR, Borms D, Maenhout A. Prevention of shoulder i-njuries in overhead athletes: a science-based approach. Braz J Phys Ther. 2015;19(5):331-339. doi: 10.1590/bjpt-rbf.2014.0109

16. Cools AM, Palmans T, Johansson FR. Age-related, sport-specific adaptions of the shoulder girdle in elite adolescent tennis players. J Athl Train. 2014;49(5):647-653. doi: 10.4085/1062-6050-49.3.02

17. Davis JT, Limpisvasti O, Fluhme D, Mohr KJ, Yocum LA, ElAttrache NS, et al. The effect of pitching biomechanics on the upper extremity in youth and a-dolescent baseball pitchers. Am J Sports Med. 2009;37(8):1484-1491. doi: 10.1177/0363546509340226

18. DiFiori JP, Benjamin HJ, Brenner JS, Gregory A, Jayanthi N, Landry GL, et al. Overuse injuries and burnout in youth sports: a position statement from the A-merican Medical Society for Sports Medicine. Clin J Sport Med. 2014;24(1):3-20. doi: 10.1097/JSM.0000000000000060

19. Dillman CJ, Fleisig GS, Andrews JR. Biomechanics of pitching with emphasis upon shoulder kinematics. J Orthop Sports Phys Ther. 1993;18(2):402-408. doi: 10.2519/jospt.1993.18.2.402

20. Ducher G, Daly RM, Bass SL. Effects of repetitive loading on bone mass and geometry in young male tennis players: a quantitative study using MRI. J Bone Miner Res. 2009;24(10):1686-1692. doi: 10.1359/jbmr.090415

21. Edmonds EW, Dengerink DD. Common conditions in the overhead athlete. Am Fam Physician. 2014;89(7):537-541. PMID: 24695599

22. Eime RM, Young JA, Harvey JT, Charity MJ, Payne WR. A systematic review of the psychological and social benefits of participation in sport for children and adolescents: informing development of a conceptual model of health through sport. Int J Behav Nutr Phys Act. 2013;10:98. doi: 10.1186/1479-5868-10-98

23. Emery KH. Imaging of sports injuries of the upper extremity in children. Clin Sports Med. 2006;25(3):543-568. doi: 10.1016/j.csm.2006.02.003

24. Farnum CE, Nixon AJ, Lee AO, Kwan DT, Belanger L, Wilsman NJ. Quantitative three-dimensional analysis of chondrocytic kinetic responses to short-term stapling of the rat proximal tibial growth plate. Cells Tissues Organs. 2000;167(4):247-258. doi: 10.1159/000016787

25. Farshad-Amacker NA, Palrecha SJ, Farshad M. The primer for sports medicine professionals on imaging: the shoulder. Sports Health. 2013;5(1):50-77. doi: 10.1177/1941738112468265

26. Fédération Internationale de Volleyball (FIVB). Volleyball [Internet]. Lausanne: FIVB; 2025. Dostupno na: https://www.fivb.com

27. Fredericson M, Ho C, Waite B, Jennings F, Peterson J, Williams C, et al. Magnetic resonance imaging abnormalities in the shoulder and wrist joints of asymptomatic elite athletes. PM R. 2009;1(2):107-116. doi: 10.1016/j.pmrj.2008.09.004

28. Frush TJ, Lindenfeld TN. Peri-epiphyseal and overuse injuries in adolescent athletes. Sports Health. 2009;1(3):201-211. doi: 10.1177/1941738109334214

29. Giaroli EL, Major NM, Higgins LD. MRI of internal impingement of the shoulder. AJR Am J Roentgenol. 2005;185(4):925-929. doi: 10.2214/AJR.04.0971

30. Gillet B, Begon M, Sevrez V, Berger-Vachon C, Rogowski I. Adaptive alterations in shoulder range of motion and strength in young tennis players. J Athl Train. 2017;52(2):137-144. doi: 10.4085/1062-6050.52.1.10

31. Gould G, Macindoe C, Wong J, Matthews W. The use of diagnostic ultrasound for the assessment of rotator cuff tendinopathy: a systematic review. Ultrasound Med Biol. 2026;52(3):485-495. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2025.10.241

32. Heyworth BE, Kramer DE, Martin DJ, Micheli LJ, Kocher MS, Bae DS. Trends in the presentation, management, and outcomes of Little League Shoulder. Am J Sports Med. 2016;44(6):1431-1438. doi: 10.1177/0363546516632744

33. Hoy G, Wood T, Phillips N, Connell D, Hughes DC. When physiology becomes pathology: the role of magnetic resonance imaging in evaluating bone marrow oedema in the humerus in elite tennis players with an upper limb pain syndrome. Br J Sports Med. 2006;40(8):710-713. doi: 10.1136/bjsm.2005.021386

34. Janssen I, LeBlanc AG. Systematic review of the health benefits of physical activity and fitness in school-aged children and youth. Int J Behav Nutr Phys Act. 2010;7:40. doi: 10.1186/1479-5868-7-40

35. Jawetz ST, Shah PH, Potter HG. Imaging of physeal injury: overuse. Sports Health. 2015;7(2):142-153. doi: 10.1177/1941738114559380

36. Jayanthi NA, LaBella CR, Fischer D, Pasulka J, Dugas LR. Sports-specialized intensive training and the risk of injury in young athletes: a clinical case-control study. Am J Sports Med. 2015;43(4):794-801. doi: 10.1177/0363546514567298

37. Johansson FR, Skillgate E, Adolfsson A, et al. Asymptomatic elite young tennis players show lateral and ventral growth plate alterations of the proximal humerus on MRI. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2017;25(10):3251-3259. doi: 10.1007/s00167-016-4024-2

38. Keeley DW, Hackett T, Keirns M, Sabick MB, Torry MR. A biomechanical analysis of youth pitching mechanics. J Pediatr Orthop. 2008;28(4):452-459. doi: 10.1097/BPO.0b013e31816d7258

39. Kornaat PR, de Jonge MC, Maas M. Bone marrow edema-like signal in the athlete. Eur J Radiol. 2008;67(1):49-53. doi: 10.1016/j.ejrad.2008.01.057

40. Kwong S, Kothary S, Poncinelli LL. Skeletal development of the proximal humerus in the pediatric population: MRI features. AJR Am J Roentgenol. 2014;202(2):418-425. doi: 10.2214/AJR.13.10711

41. Lädermann A, Chagué S, Kolo FC, Charbonnier C. Kinematics of the shoulder joint in tennis players. J Sci Med Sport. 2016;19(1):56-63. doi: 10.1016/j.jsams.2014.11.009

42. Lee JC, Malara FA, Wood T, Hoy G, Saifuddin A, Connell DA. MRI of stress reaction of the distal humerus in elite tennis players. AJR Am J Roentgenol. 2006;187(4):901-904. doi: 10.2214/AJR.05.1058

43. Lesniak BP, Baraga MG, Jose J, Smith MK, Cunningham S, Kaplan LD. Glenohumeral findings on magnetic resonance imaging correlate with innings pitched in asymptomatic pitchers. Am J Sports Med. 2013;41(9):2022-2027. doi: 10.1177/0363546513491093

44. Lin DJ, Wong TT, Kazam JK. Shoulder injuries in the overhead-throwing athlete: epidemiology, mechanisms of injury, and imaging findings. Radiology. 2018;286(2):370-387. doi: 10.1148/radiol.2017170481

45. Lintner D, Noonan TJ, Kibler WB. Injury patterns and biomechanics of the athlete's shoulder. Clin Sports Med. 2008;27(4):527-551. doi: 10.1016/j.csm.2008.07.007

46. Lovell G, Galloway H, Hopkins W, Harvey A. Osteitis pubis and assessment of bone marrow edema at the pubic symphysis with MRI in an elite junior male soccer squad. Clin J Sport Med. 2006;16(2):117-122. doi: 10.1097/00042752-200603000-00006

47. Lubans DR, Morgan PJ, Cliff DP, Barnett LM, Okely AD. Fundamental movement skills in children and adolescents: review of associated health benefits.

Sports Med. 2010;40(12):1019-1035. doi: 10.2165/11536850-000000000-00000

48. Maffulli N, Longo UG, Gougoulias N, Loppini M, Denaro V. Long-term health outcomes of youth sports injuries. Br J Sports Med. 2010;44(1):21-25. doi: 10.1136/bjsm.2009.069526

49. Maquirriain J, Ghisi JP, Amato S. Is tennis a predisposing factor for degenerative shoulder disease? A controlled study in former elite players. Br J Sports Med. 2006;40(5):447-450. doi: 10.1136/bjsm.2005.023382

50. Migliorini F, Asparago G, Cuozzo F, Oliva F, Hildebrand F, Maffulli N. Patient outcomes and return to play after arthroscopic rotator cuff repair in overhead athletes: a systematic review. J Orthop Traumatol. 2023;24(1):3. doi: 10.1186/s10195-023-00683-w

51. Mountjoy M, Ackerman KE, Bailey DM, Burke LM, Constantini N, Hackney AC, et al. 2023 International Olympic Committee's (IOC) consensus statement on Relative Energy Deficiency in Sport (REDs). Br J Sports Med. 2023;57(17):1073-1097. doi: 10.1136/bjsports-2023-106994

52. Murachovsky J, Ikemoto RY, Nascimento LG, Serpone Bueno R, Strose E, Almeida LH. Does the presence of proximal humerus growth plate changes in young baseball pitchers happen only in symptomatic athletes? An x ray evaluation of 21 young baseball pitchers. Br J Sports Med. 2010;44(2):90-94. doi: 10.1136/bjsm.2007.044503

53. Navas A, Kassarjian A. Bone marrow changes in stress injuries. Semin Musculoskelet Radiol. 2011;15(3):183-197. doi: 10.1055/s-0031-1278419

54. Nguyen JC, Sheehan SE, Davis KW, Gill KG. Sports and the growing musculoskeletal system: Sports Imaging Series. Radiology. 2017;284(1):25-42. doi: 10.1148/radiol.2017161175

55. Nilsson O, Marino R, De Luca F, Phillip M, Baron J. Endocrine regulation of the growth plate. Horm Res. 2005;64(4):157-165. doi: 10.1159/000088791

56. Patel DR, Breisach S. Evaluation and management of shoulder pain in skeletally immature athletes. Transl Pediatr. 2017;6(3):181-189. doi: 10.21037/tp.2017.04.06

57. Pennock AT, Dwek J, Levy E, et al. Shoulder MRI abnormalities in asymptomatic Little League baseball players. Orthop J Sports Med. 2018;6(2):2325967118756825. doi: 10.1177/2325967118756825

58. Quatman CE, Ford KR, Myer GD, Paterno MV, Hewett TE. The effects of gender and pubertal status on generalized joint laxity in young athletes. J Sci Med Sport. 2008;11(3):257-263. doi: 10.1016/j.jsams.2007.05.005

59. Reeser JC, Fleisig GS, Bolt B, Ruan M. Upper limb biomechanics during the volleyball serve and spike. Sports Health. 2010;2(5):368-374. doi: 10.1177/1941738110374624

60. Rothfeld A, Jacobs MB, Papp D, Fritz J. A systematic approach to shoulder and knee MRI for the sports medicine physician. Current Orthopaedic Practice. 2019 Jan 1;30(1):8-10. doi: 10.1097/BCO.0000000000000710

61. Ruff C, Holt B, Trinkaus E. Who's afraid of the big bad Wolff?: "Wolff's law" and bone functional adaptation. Am J Phys Anthropol. 2006;129(4):484-498. doi: 10.1002/ajpa.20371

62. Sabick MB, Kim YK, Torry MR, Keirns MA, Hawkins RJ. Biomechanics of the shoulder in youth baseball pitchers: implications for the development of proximal humeral epiphysiolysis and humeral retrotorsion. Am J Sports Med. 2005;33(11):1716-1722. doi: 10.1177/0363546505275347

63. Schweitzer ME, White LM. Does altered biomechanics cause marrow edema? Radiology. 1996;198(3):851-853. doi: 10.1148/radiology.198.3.8628882

64. Seminati E, Minetti AE. Overuse in volleyball training/practice: a review on shoulder and spine-related injuries. Eur J Sport Sci. 2013;13(6):732-743. doi: 10.1080/17461391.2013.773090

65. Seroyer ST, Nho SJ, Bach BR Jr, Bush-Joseph CA, Nicholson GP, Romeo AA. Shoulder pain in the overhead throwing athlete. Sports Health. 2009;1(2):108-120. doi: 10.1177/1941738108331199

66. Shanley E, Thigpen C. Throwing injuries in the adolescent athlete. Int J Sports Phys Ther. 2013;8(5):630-640. PMID: 24175142

67. Shanley E, Thigpen CA, Clark JC, et al. Changes in passive range of motion and development of glenohumeral internal rotation deficit (GIRD) in the professional pitching shoulder between spring training in two consecutive years. J Shoulder Elbow Surg. 2012;21(11):1605-1612. doi: 10.1016/j.jse.2011.11.035

68. Siebenrock KA, Behning A, Mamisch TC, Schwab JM. Growth plate alteration precedes cam-type deformity in elite basketball players. Clin Orthop Relat Res. 2013;471(4):1084-1091. doi: 10.1007/s11999-012-2740-6

69. Soder RB, Mizerkowski MD, Petkowicz R, Baldisserotto M. MRI of the knee in asymptomatic adolescent swimmers: a controlled study. Br J Sports Med. 2012;46(4):268-272. doi: 10.1136/bjsm.2010.083345

70. Song JC, Lazarus ML, Song AP. MRI findings in Little Leaguer's shoulder. Skeletal Radiol. 2006;35(2):107-109. doi: 10.1007/s00256-005-0029-5

71. Stokes IA. Mechanical effects on skeletal growth. J Musculoskelet Neuronal Interact. 2002;2(3):277-280. PMID: 15758453

72. Taljanovic MS, Nisbet JK, Hunter TB, Cohen RP, Rogers LF. Humeral avulsion of the inferior glenohumeral ligament in college female volleyball players caused by repetitive microtrauma. Am J Sports Med. 2011;39(5):1067-1076. doi: 10.1177/0363546510391155

73. Taylor RE, Zheng C, Jackson RP, Doll JC, Chen JC, Holzbaur KRS, et al. The phenomenon of twisted growth: humeral torsion in dominant arms of high-performance tennis players. Comput Methods Biomech Biomed Engin. 2009;12(1):83-93. doi: 10.1080/10255840802178046

74. Teixeira Silva R, Hartmann LG, Laurino CFS. Stress reaction of the humerus in tennis players. Br J Sports Med. 2007;41(11):824-826. doi: 10.1136/bjsm.2006.034942

75. van der Hoeven H, Kibler WB. Shoulder injuries in tennis players. Br J Sports Med. 2006;40(5):435-440. doi: 10.1136/bjsm.2005.023218

76. Verrall GM, Slavotinek JP, Fon GT. Incidence of pubic bone marrow oedema in Australian rules football players: relation to groin pain. Br J Sports Med. 2001;35(1):28-33. doi: 10.1136/bjsm.35.1.28

77. Weber AE, Kontaxis A, O'Brien SJ, Bedi A. The biomechanics of throwing: simplified and cogent. Sports Med Arthrosc Rev. 2014;22(2):72-79. doi: 10.1097/JSA.0000000000000019

78. Wilk KE, Obma P, Simpson CD, Cain EL, Dugas J, Andrews JR. Shoulder injuries in the overhead athlete. J Orthop Sports Phys Ther. 2009;39(2):38-54. doi: 10.2519/jospt.2009.2929

79. Wolfe H, Poole K, Villasante Tezanos AG, English R, Uhl TL. Volleyball overhead swing volume and injury frequency over the course of a season. Int J Sports Phys Ther. 2019;14(1):88-96. doi: 10.26603/ijspt20190088

80. World Medical Association. Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects. JAMA. 2013;310(20):2191-2194. doi: 10.1001/jama.2013.281053

81. Zbojniewicz AM, Laor T. Focal periphyseal edema (FOPE) zone on MRI of the adolescent knee: a potentially painful manifestation of physiologic physeal fusion? AJR Am J Roentgenol. 2011;197(4):998-1004. doi: 10.2214/AJR.10.6243

Prilog 1. Suglasnost za sudjelovanje ispitanika u istraživanju

"Suglasnost za sudjelovanje ispitanika u istraživanju "Morfološko vrednovanje promjena ploče rasta proksimalnog dijela humerusa u mladih asimptomatskih odbojkašica metodom magnetske rezonancije"

1. Potvrđujem da sam dana _____ (upisati dan/mjesec/godinu) u Zagrebu pročitao/pročitala Obavijest za ispitanika za gore navedeno istraživanje te sam imao/imala priliku postaviti pitanja
2. Razumijem da je moje sudjelovanje dragovoljno i da se iz sudjelovanja u istraživanju mogu povući u bilo koje vrijeme, bez navođenja razloga i bez ikakvih posljedica za moje zdravstveno stanje ili pravni status
3. Razumijem da mojoj medicinskoj dokumentaciji imaju pristup samo odgovorne osobe, to jest voditelj istraživanja i njegovi suradnici te članovi Etičkog povjerenstva ustanove u kojoj se istraživanje obavlja i Etičkog povjerenstva koje je odobrilo ovo znanstveno istraživanje. Tim osobama dajem dopuštenje za pristup mojoj medicinskoj dokumentaciji.
4. Želim i pristajem sudjelovati u navedenom znanstvenom istraživanju

Ime i prezime ispitanika/staratelja: _____(upisati štampanim slovima)

Vlastoručni potpis:_____(potpisati)

Mjesto i datum:_____(upisati)

Ime i prezime osobe koja je vodila postupak Obavijesti za ispitanika i Suglasnosti za sudjelovanje:_____(upisati štampanim slovima)

Ime i prezime voditelja projekta:_____(upisati štampanim slovima)

Vlastoručni potpis:_____(potpisati)

Mjesto i datum:_____(upisati)”

ŽIVOTOPIS AUTORA

Dalibor Franćeski rođen je u Zagrebu 17. kolovoza 1978. godine, gdje je pohađao i završio osnovnu školu te maturirao u XV. gimnaziji 1996. godine. Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu upisao je 1996. godine te diplomirao u listopadu 2002. godine. Specijalizaciju iz radiologije obavio je u Kliničkom zavodu za dijagnostičku i intervencijsku radiologiju Kliničke bolnice Dubrava Zagreb, a u travnju 2008. godine položio je specijalistički ispit.

Od 2004. do 2020. godine radio je u Kliničkom zavodu za dijagnostičku i intervencijsku radiologiju Kliničke bolnice Dubrava Zagreb, a od 2020. godine zaposlen je u Specijalnoj ortopedskoj bolnici „Akromion“ u Zagrebu.

Član je Hrvatskog liječničkog zbora, Hrvatskog društva radiologa te Europskog društva radiologije i Hrvatskog društva muskuloskeletne radiologije.

Uže područje rada su mu muskuloskeletna radiologija, neuroradiologija te radiologija regije glave i vrata. Sudjelovao je s radovima i kao pozvani predavač na više domaćih i međunarodnih kongresa i tečajeva.

Popis objavljenih radova autora:

1. Dediol E, Manojlović S, Biočić J, Franćeski D, Ivanac G. Facial artery pseudoaneurysm without evidence of trauma. International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. 2011;40(9):988–90.

2. Brajdić D, Virag M, Manojlović S, Lukšić I, Franćeski D, Biočić J, Bošan-Kilibarda I, Zajc I, Macan D. Mucoepidermoid Carcinoma Misdiagnosed as Palatal Odontogenic Infection: An Overview on the Differential Diagnosis of Palatal Lesions. Collegium Antropologicum. 2010;34(4):1473–9.

3. Hrkac Pustahija A, Vukelić-Marković M, Ivanac G, Franćeski D, Brkljačić B. An unusual case of bronchial rupture—pneumomediastinum appearing 7 days after blunt chest trauma. Emergency Radiology. 2008;16(2):163–5.

4. Vukelić-Marković M, Brkljačić B, Aljinović Ratković N, Vilendečić M, Franćeski D, Ćurić J. Posttraumatic Cerebrospinal Fluid Cyst of the Orbit. Journal of Craniofacial Surgery. 2006;17(1):189–91.