

SVEUČILIŠTE U RIJECI
MEDICINSKI FAKULTET

Leo Gulan

MORFOMETRIJSKA ANALIZA FEMORALNOG HVATIŠTA
PREDNJEG KRIŽNOG LIGAMENTA

Doktorski rad

Rijeka, 2025.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
MEDICINSKI FAKULTET

Leo Gulan

MORFOMETRIJSKA ANALIZA FEMORALNOG HVATIŠTA
PREDNJEG KRIŽNOG LIGAMENTA

Doktorski rad

Mentor: prof. dr. sc. Miljenko Kovačević, dr. med.

Rijeka, 2025.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF MEDICINE

Leo Gulan

MORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE FEMORAL
INSERTION OF THE ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT

Doctoral Thesis

Mentor: Full Professor Miljenko Kovačević, MD, PhD

Rijeka, 2025

Mentor: prof. dr. sc. Miljenko Kovačević, dr. med.

Doktorski rad obranjen je dana _____ na Medicinskom fakultetu
Sveučilišta u Rijeci pred povjerenstvom u sastavu:

1. _____ (titula, ime i prezime)

2. _____ (titula, ime i prezime)

3. _____ (titula, ime i prezime)

Rad ima ____ listova.

UDK: _____

PREDGOVOR

Doktorski rad izrađen je na Medicinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, u sklopu Doktorske škole iz znanstvenog područja biomedicina i zdravstvo, Doktorski studij Klinička medicina.

Eksperimentalni dio istraživanja proveden je u više institucija: rendgenološka analiza izvedena je na Klinici za ortopediju Lovran, digitalno 3D skeniranje i računalna analiza obavljena je u Centru za napredno računanje i modeliranje Sveučilišta u Rijeci, dok su anatomske disekcije izvršene pri Zavodu za anatomiju Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci.

Zahvaljujem svim institucijama i stručnjacima koji su omogućili provedbu istraživanja, s osobitom zahvalnošću djelatnicima Zavoda za anatomiju Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, te Anti Sikirici, mag. ing. mech. iz Centra za napredno računanje i modeliranje Sveučilišta u Rijeci na stručnom doprinosu ovom radu.

Zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. sc. Miljenku Kovačeviću, dr. med., na stručnoj podršci, korisnim savjetima i vremenu koje je uložio u izradu ovog rada.

Veliko hvala mojoj obitelji, a posebno roditeljima i sestri, na stalnoj i neizmjerljivoj podršci, razumijevanju i strpljenju. Njihova prisutnost bila je važan oslonac kroz cijeli moj obrazovni put.

Zahvaljujem i prijateljima na razgovorima, podršci i svakodnevnici koja je činila ovaj proces lakšim i smislenijim, osobito onima čije su male geste značile više nego što su svjesni.

Ovaj rad rezultat je ne samo mog truda, već i prisutnosti dragih i voljenih osoba koje su mi, svatko na svoj način, dali snage da ustrajem na tom putu.

SAŽETAK

Ciljevi istraživanja: Proširiti znanje o femoralnom hvatištu prednjeg križnog ligamenta (ACL od engl. *anterior cruciate ligament*), s naglaskom na položaj lateralnog interkondilarnog grebena (LIR od engl. *lateral intercondylar ridge*). Ispitali smo hipotezu da se LIR i površina femoralnog hvatišta ACL-a (ACL-FIA od engl. *ACL femoral insertion area*) protežu i na krov interkondilarne udubine. Ostali ciljevi uključivali su analizu oblika i položaja LIR-a, njegov odnos prema Blumensaattovoj liniji (BL) i koštanim orijentirima, te potvrdu nalaza na svježim kadaveričnim preparatima.

Materijal i metode: Studija je provedena na dva tipa anatomske uzoraka: 45 maceriranih femura i 10 svježe smrznutih kadaveričnih koljena. Na maceriranim preparatima korištene su 3D optičke metode za rekonstrukciju interkondilarne udubine. Pomoću programskog alata mjereni su duljina LIR-a, površina ACL-FIA i drugi anatomske odnosi. Provedene su radiografske analize s označavanjem LIR-a metalnim žicama, radi preciznog odrađivanja kutova s BL i stražnjom kortikalnom kosti. Na nemaceriranim preparatima izvršena je anatomska disekcija uz očuvanje ACL-a i okolnih struktura uz vizualnu analizu.

Rezultati: U prosjeku, 30.86 % duljine LIR-a i 31.55 % površine ACL-FIA nalazilo se na krovu interkondilarne udubine. Radiološki je utvrđeno da u 75,6 % slučajeva BL nije ravna, već blago konveksna prema distalno. Prosječni kut između LIR-a i BL iznosio je 70,13°, dok je LIR sa stražnjom kortikalnom linijom zatvarao kut od 143,61°. LIR je dijelio BL u omjeru 1:6. Disekcije su potvrdile prostornu složenost i varijabilnost femoralnog hvatišta ACL-a.

Zaključci: Ovo istraživanje potvrđuje da se oko trećine femoralnog hvatišta ACL-a nalazi na krovu interkondilarne udubine, što treba uzeti u obzir pri planiranju rekonstrukcije. Radiološke karakteristike, poput neravne BL, kutova koje LIR zatvara s BL i stražnjom kortikalnom kosti, mogu pomoći u preciznijoj intraoperacijskoj orijentaciji. Rezultati podržavaju potrebu za prilagodbom tunelskih tehnika kako bi se uključila i „zaboravljena“ komponenta na krovu interkondilarne udubine.

Ključne riječi: Anatomija; Intrakondilarna udubina; Lateralni interkondilarni greben; Prednji križni ligament.

SUMMARY:

Objectives: To expand knowledge of the femoral insertion of the anterior cruciate ligament (ACL), with a focus on the position of the lateral intercondylar ridge (LIR). We examined the hypothesis that both the LIR and the femoral insertion area of the ACL (ACL-FIA) extend onto the roof of the intercondylar notch. Additional objectives included analyzing the shape and position of the LIR, its relationship to Blumensaat's line (BL) and bony landmarks, and validating findings on fresh cadaveric specimens.

Material and methods: The study was conducted on two types of anatomical specimens: 45 macerated femora and 10 fresh-frozen cadaveric knees. On the macerated samples, 3D optical methods were used to reconstruct the intercondylar notch. Using software tools, the length of the LIR, the surface area of the ACL-FIA and other anatomical relationships were measured. Radiographic analysis was also performed by marking the LIR with metal wires to accurately measure angles relative to Blumensaat's line and the posterior cortical bone. On non-macerated specimens, anatomical dissection was performed with preservation of the ACL and surrounding structures, followed by visual analysis.

Results: On average, 30.86% of the LIR length and 31.55% of the ACL-FIA area were located on the roof of the intercondylar notch. Radiographically, BL was not straight in 75,6 % of cases, but slightly convex distally. The mean angle between the LIR and Blumensaat's line was $70,13^{\circ}$, while the angle between LIR and the posterior cortical bone was $143,61^{\circ}$. The point of intersection between the LIR and BL divided the latter in a 1:6 ratio. Dissections confirmed the spatial complexity and variability of the ACL femoral insertion.

Conclusions: This study confirms that approximately one-third of the ACL femoral insertion lies on the roof of the intercondylar notch, which should be considered when planning ACL reconstruction. Radiological features, such as the irregularity of BL, and the relationships of LIR with the BL and posterior cortex, can aid in more precise intraoperative orientation. The findings support the need to adapt tunnel placement techniques to include this "forgotten" component on the intercondylar notch roof.

Keywords: Anatomy; Anterior cruciate ligament; Intercondylar notch; Lateral intercondylar ridge.

SADRŽAJ:

1. UVOD I PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA	1
1.1. Prednji križni ligament	1
1.1.1. Anatomija ACL-a	1
1.1.2. Histološka građa ACL-a	7
1.1.3. Biomehanička svojstva i funkcija ACL-a	8
1.1.4. Povijest kirurške rekonstrukcije ACL-a od 1900. do danas	10
1.1.5. Funkcionalni ishodi i povratak sportu nakon ACL rekonstrukcije	19
1.1.6. Rizik ponovne ruptуре i ponovne ozljede ACL-a nakon rekonstrukcije	19
1.1.7. Biomehanička ograničenja rekonstrukcije ACL-a	20
1.1.8. Posljedice neanatomskog postavljanja femoralnog tunela	22
1.2. Lateralni interkondilarni greben koljena ("resident's ridge") – povijest, anatomija i značaj za rekonstrukciju ACL-a	25
1.2.1. Povijesni razvoj i nomenklatura	25
1.2.2. Anatomija LIR-a	26
1.2.3. Značaj LIR-a u rekonstrukciji ACL-a	29
2. CILJ ISTRAŽIVANJA	32
3. MATERIJAL I METODE	33
3.1. Ispitanici	33
3.2. Plan istraživanja	34
3.3. Rendgenološka analiza Blumensaatove linije i lateralnog interkondilarnog grebena	36
3.3.1. Tehnika rendgenološkog snimanja	36
3.3.2. Određivanje rendgenološkog oblika Blumensaatove linije	39
3.3.3. Određivanje rendgenološke gustoće Blumensaatove linije	40
3.3.4. Određivanje položaja LIR-a u odnosu na Blumensaatovu liniju	41

3.3.5. Određivanje položaja LIR-a u odnosu na tangentu stražnje kortikalne stijenke distalnog femura	42
3.3.6. Statistička analiza	43
3.4. Digitalno skeniranje i trodimenzionalna (3D) analiza interkondilarne udubine	44
3.4.1. Tehnika 3D skeniranja distalnog femura.....	44
3.4.2. Statistička analiza	53
3.5. Anatomska sekcija nemaceriranih preparata koljena	54
4. REZULTATI.....	59
4.1. Rezultati rendgenološkog snimanja distalnog femura	59
4.2. Rezultati 3D analize distalnog femura.....	60
4.3. Rezultati makroskopske analize nemaceriranih preparata distalnog femura .	67
5. RASPRAVA.....	77
6. ZAKLJUČCI.....	87
7. LITERATURA.....	89
POPIS SLIKA	107
POPIS TABLICA	111
POPIS POKRATA (abecedno)	112
ŽIVOTOPIS	113

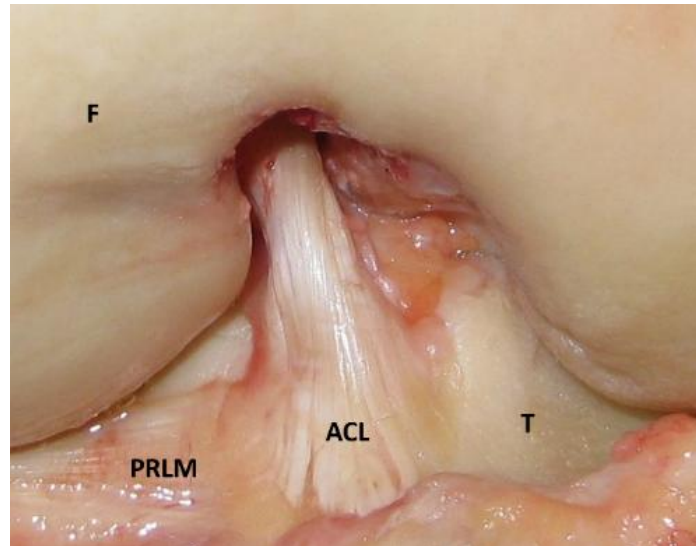
1. UVOD I PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

Ozljeda prednjeg križnog ligamenta (ACL, od engl. *anterior cruciate ligament*) jedna je od najčešćih ozljeda koja za posljedicu može imati razvoj nestabilnosti koljena kako pri sportskim aktivnostima, tako i u svakodnevnom životu. Nestabilnost koljena utječe na kvalitetu života pacijenata i značajno povećava rizik za razvoj degenerativnih promjena [1,2]. Stoga je i rekonstrukcija ACL-a jedna od najčešće izvođenih operacija na koljenu. Prema podacima iz literature u SAD-u godišnje se izvrši oko 400 000 operacijskih zahvata rekonstrukcije ACL-a [3]. Epidemiološke studije ukazuju na sve veći udio ozlijeđenih u populaciji do 20 godina, posebice sportski aktivne djece [4]. Unatoč napretku tehnologije, kirurških tehnika i rehabilitacijskih protokola, dugoročne studije pokazuju da gotovo 50 % pacijenata i nakon rekonstrukcije ACL-a razvije znakove osteoartritisa (OA) unutar 12 do 14 godina [1]. Uzevši u obzir dugotrajni oporavak pacijenta, izostanak s posla, nemogućnost vraćanja svim aktivnostima na razini prije ozljede, ovi rezultati ne predstavljaju samo zdravstveni, već i veliki socio-ekonomski problem [5].

1.1. Prednji križni ligament

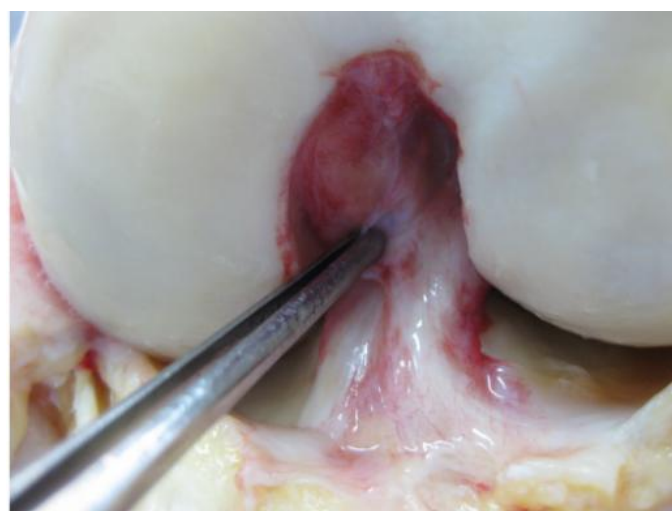
1.1.1. Anatomija ACL-a

ACL je ključni stabilizator koljena, a predstavlja najčešće ozljeđivan ligament ne samo u koljenu, već i u čitavom koštano-zglobnom sustavu [5]. ACL polazi s medijalne strane lateralnog kondila femura, a hvatište mu je (Slika 1) na prednjem dijelu interkondilarne površine tibije, u području između hvatišta prednjeg roga lateralnog meniska i interkondilarne izbočine (lat. *eminentia intercondylaris*) [6]



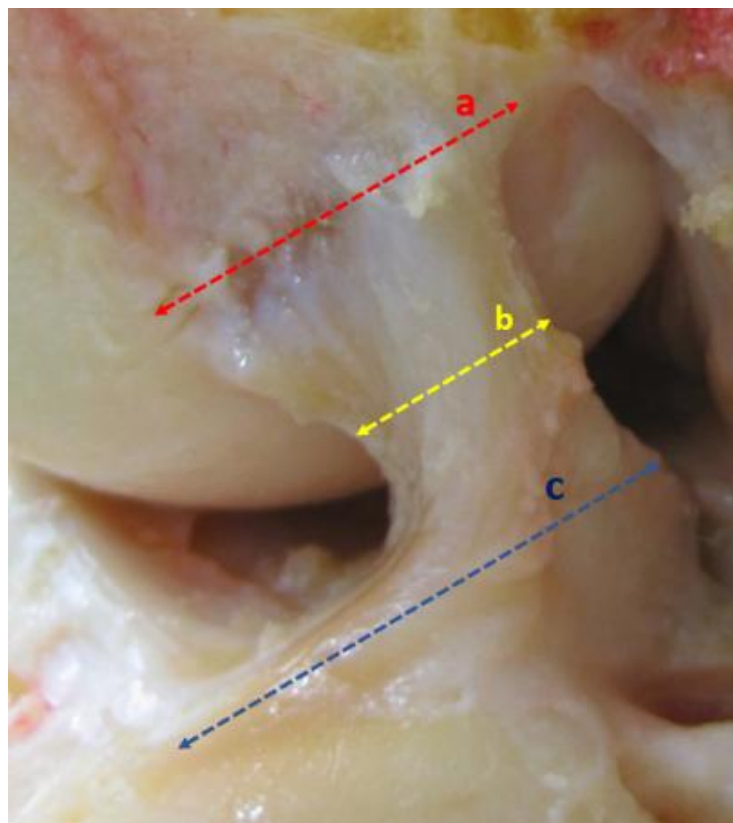
Slika 1. Odnos tibijalnog hvatišta prednjeg križnog ligamenta (ACL) i prednjeg roga lateralnog meniska (PRLM). F - femur; T - tibija.

Njegova uzdužna os naginje 26° naspram vertikalne osi prema naprijed, a kako se približava tibijalnom hvatištu, rotira se u lateralnu (vanjsku) spiralu od približno 90° [7–10]. U potpunosti je omotan sinovijalnom membranom, što ga čini intraartikularnom, ali ekstrasinovijalnom strukturom (Slika 2) [7,9].



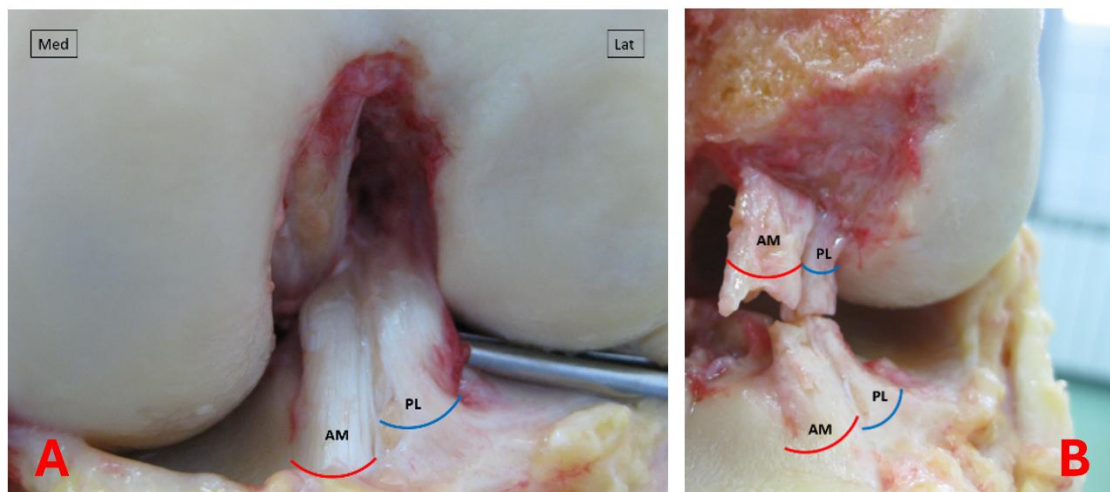
Slika 2. Prednji križni ligament omotan sinovijalnom membranom.

Najuži promjer ligamenta je u srednjem dijelu (engl. *midsubstance*) i varira između 7 i 12 mm. U tom dijelu ligament je ovalnog oblika (Slika 3), površine u prosjeku 36 mm² kod žena i 44 mm² kod muškaraca, što je približno 3,5 puta manje od površine njegovih hvatišta na femuru i tibiji [11–14]. Novija anatomska istraživanja dodatno su analizirala dimenzije ACL-a. Šmigielski i sur. (2015.) analizirali su 111 koljena i opisali da je srednji dio ACL-a uži i tanji nego se ranije smatralo, širine ~ 11–17 mm, debljine svega ~ 3 mm [15].



Slika 3. Odnos širine prednjeg križnog ligamenta na (a) femoralnom hvatištu, (b) u srednjem dijelu i (c) na tibijalnom hvatištu.

ACL se funkcionalno i anatomski sastoji od dva dobro razgraničena snopa (Slika 4): anteromedijalnog (AM) i posterolateralnog (PL) snopa [16]



Slika 4. Anteromedijalni (AM) i posterolateralni (PL) snop jasno se uočavaju kod (A) intaktnog prednjeg križnog ligamenta i (B) nakon disekcije.

Nazive su dobili po mjestu hvatišta na tibiji [13]. Međusobni odnos ova dva snopa mijenja se u ovisnosti o položaju koljena. Pri punoj ekstenziji koljena AM i PL snop položeni su paralelno, dok se pri fleksiji od 90° međusobno križaju. Također, u potpunoj ekstenziji koljena, PL snop je zategnut, a AM snop opušten; kako koljeno prelazi u fleksiju, PL snop se skraćuje, a AM produžuje. Pri 120° fleksije, AM snop dostiže maksimalnu duljinu i napetost, a istovremeno PL snop je pod minimalnim opterećenjem [13,17–20]. U frontalnoj ravnini, AM snop ima vertikalniji položaj (oko 70°), dok je PL snop više horizontalno orijentiran (oko 55°) [7,8].

Femoralno hvatište ACL-a zauzima relativno veliko područje. Obično je ovalnog, kružnog ili polumjesečastog oblika [7,8,11,12]. Hvatište je s gornje strane omeđeno interkondilarnom linijom, s donje i stražnje strane artikularnom hrskavicom, a s prednje strane koštanom uzvisinom nazvanom lateralni interkondilarni greben (LIR, od engl. *lateral intercondylar ridge*) (Slika 5). Laserskom digitalizacijom izmjereno je da je prosječna duljina femoralnog hvatišta 18 mm i širina 11 mm [11].

Bernard i sur. su u radiološkoj studiji odredili središte femoralnog hvatišta ACL-a koje je smješteno u superoposteriornom kvadrantu interkondilarne udubine, na 24,8 % udaljenosti duž Blumensaatove linije (BL, od engl. *Blumensaat's line*) i 28,5 % visine lateralnog kondila gledano na standardnoj lateralnoj radiografiji [21].

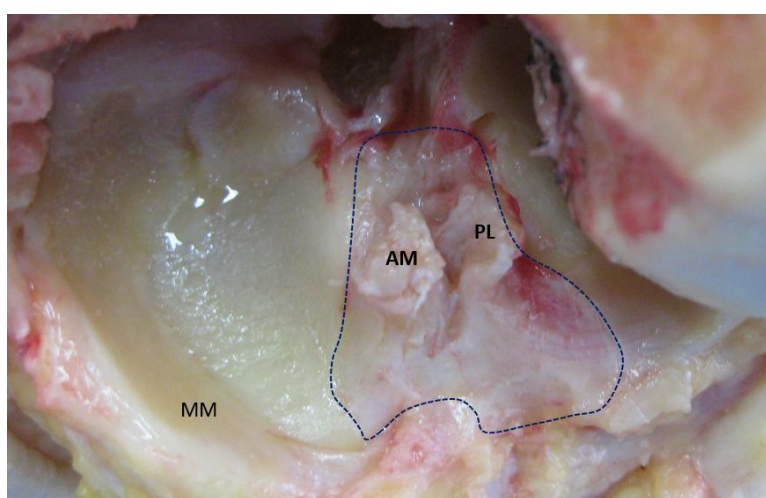


Slika 5. Artroskopski prikaz prednje i gornje granice femoralnog hvatišta. Crnim strelicama označen je lateralni interkondilarni greben.

Kod opisivanja AM i PL snopa na femoralnom hvatištu, bitno je uzeti u obzir položaj koljena. Pri punoj ekstenziji, hvatište AM snopa se nalazi proksimalno i anteriorno dok je PL snop više posteriorno i distalno. Taj odnos se mijenja tijekom fleksije koljena, što dolazi posebno do izražaja prilikom artroskopije koja se vrši u fleksiji koljena od 90°. Tada PL snop zauzme anteroinferiorni položaj u odnosu na AM snop. Centri hvatišta ova dva snopa međusobno su udaljena 8 - 10 mm [17]. Na femuru, ova dva snopa međusobno su razdvojena koštanim grebenom nazvanim lateralni bifurkacijski greben (lat. *lateral bifurcate ridge*) [22].

Tibijalno hvatište ACL-a zauzima veliku površinu na tibiji, lepezasto se širi i najčešće poprima ovalni, trokutasti ili oblik slova "C" (Slika 6). Dužina u sagitalnoj ravnini je između 15 – 19 mm, a u frontalnoj ravnini 10 – 13 mm. Površinom je tibijalno hvatište do 350 % veće od srednjeg dijela ligamenta i 120 % od femoralnog hvatišta [11]. Vlakna AM snopa inzeriraju na anteromedijalnom dijelu tibijalnog hvatišta te mogu biti u kontinuitetu s prednjim rogom lateralnog meniskusa i zauzimaju 52 % inzericijske površine na tibiji. PL snop zauzima 48 % inzericijske površine te se nalazi posterolateralno u odnosu na AM snop. Također, vlakna mu mogu biti u kontinuitetu sa stražnjim rogom lateralnog meniskusa [7,8,11].

ACL je relativno slabo vaskulariziran. Irigiran je putem *a. geniculate mediae*, grane poplitealne arterije koja u interkondilarnu udubinu dolazi probivši stražnju kapsulu koljena. Te žile tvore sinovijalni pleksus iz kojeg se odvajaju još manje žile koje se nalaze u dubini ligamenta, paralelno s kolagenim vlaknima ACL-a. Sekundarnu opskrbu dobiva iz krvnih žila koje potječu od Hoffinog masnog tkiva (ogranci inferiorne medijalne i lateralne genikulatne arterije). Opskrba krvlju iz samih koštanih hvatišta ligamenta je minimalna [23,24]. Slaba vaskularizacija ligamenta većim dijelom je odgovorna za ograničenu sposobnost cijeljenja nakon ruptura.



Slika 6. Oblik tibijalnog hvatišta prednjeg križnog ligamenta. MM - medijalni menisk; AM - anteromedijalni snop; PL-posterolateralni snop.

ACL inervira ogranak stražnjeg zglobnog živca (*n. articularis*), koji polazi iz tibijalnog živca (*n. tibialis*). Ovaj živac prolazi kroz stražnju zglobnu kapsulu i tvori poplitealni pleksus [24,25]. Vlakna živca prate krvne žile u sinovijalnoj ovojnici i u samoj strukturi ligamenta. Vlakna slična nociceptivnim nalaze se unutar fascikularnih prostora, dok su mehanoreceptori smješteni ponajviše uz hvatišta, posebno u području femoralnog hvatišta [26,27]. Njihova uloga je vjerojatno proprioceptivna – osiguravaju osjet povratne sprege koja regulira mišićni tonus i stabilnost koljena [28,29].

1.1.2. Histološka građa ACL-a

Histološki, ACL se sastoji od gustog vezivnog tkiva, s kolagenim vlaknima orijentiranim longitudinalno (promjera 20–170 μm), organiziranim u snopove (fascikule), okružene vezivnim tkivom [7,30–32]. Ligament čine fibroblasti unutar matriksa pretežito tipa I kolagena, dok okolno vezivno tkivo sadrži i kolagen tipa III. U blizini hvatišta (na femuru i tibiji), prisutne su i male količine kolagena tipa III i IV [26,33].

Histološki se femoralno hvatište ACL-a može podijeliti na dva tipa insercije: direktna i indirektna insercija [34,35]. Direktna insercija ima zonalnu arhitekturu, iz zone kolagenih vlakana prelazi u sloj nekalcificirane i kalcificirane fibrohrskavice, koja zatim prelazi u subhondralnu kost. Takva višeslojna struktura omogućuje postepeni prijenos sila i smanjenje lokalnog opterećenja na mjestu insercije [34]. Suprotno tome, indirektna insercija uključuje izravno usidravanje kolagenih vlakana u kost bez fibrohrskavičnog prijelaza, najčešće uz pomoć Sharpeyjevih vlakana. Ova regija je histološki jednostavnija i biomehanički manje otporna na opterećenja [35].

U histološkom presjeku femoralnog hvatišta ACL-a, direktna insercija zauzima prednji dio hvatišta, neposredno iza LIR-a, dok je indirektna insercija smještena posteriorno, bliže rubu zglobove hrskavice. Sasaki i sur. su opisali i dodatni greben, stražnji lateralni interkondilarni greben (eng. *lateral intercondylar posterior ridge*), koji označava stražnju granicu direktne insercije [35]. Širina direktne insercije prosječno iznosi oko 5,3 mm, dok ukupna duljina femoralnog hvatišta iznosi približno 17 - 18 mm [34,35].

Nadalje, direktna insercijska vlakna imaju konkavno ležište na lateralnoj stijenci interkondilarne udubine, čije se konture mogu jasno identificirati 3D volumetrijskom kompjuteriziranom tomografijom (CT) [34]. Ova regija se prostire između 7 do 10 mm od stražnje hrskavične granice lateralnog kondila femura, što je ključno za precizno postavljanje femoralnog tunela tijekom anatomske rekonstrukcije [34].

Imunohistološke analize dodatno potvrđuju da je ACL većinom građen od kolagena tipa I (~ 90 %), dok se u područjima indirektne insercije i sinovijalne ovojnice pronalaze elementi kolagena tipa III (~ 10 %), što sugerira složenost strukturne organizacije i vaskularizacije ovih regija [35].

Histološke razlike ova dva dijela femoralne insercije imaju i klinički značaj. Direktna insercija, zbog svoje biomehaničke važnosti, predstavlja ciljano područje za postavljanje femoralnog tunela kod rekonstrukcije ACL-a. Pogrešno pozicioniranje tunela unutar indirektno zone može imati za posljedicu smanjenu stabilnost transplantata i veći rizik od elongacije i popuštanja [34].

1.1.3. Biomehanička svojstva i funkcija ACL-a

Osnovna funkcija ACL-a jest ograničavanje prednje translacije tibije u odnosu na femur, ali odgovoran je i za rotacijsku stabilnost koljena [36]. AM snop napet je najviše pri savijenom koljenu i odgovoran je za oko 85 % stabilizacije tibije u sagitalnoj ravnini [37,38]. PL snop najviše je zategnut u položaju ekstenzije, te prvenstveno pridonosi rotacijskoj stabilnosti koljena [37,38]. Snopovi djeluju sinergijski, pri malim stupnjevima fleksije PL snop sprječava rotaciju tibije, dok pri većoj fleksiji AM snop preuzima glavnu ulogu stabilizacije tibije u sagitalnoj ravnini [36]. Ipak, valja napomenuti da je međuovisnost snopova složena. Kondo i sur. (2015.) izvijestili su da izolirana ruptura jednog snopa manje utječe na stabilnost nego što se ranije mislilo, što ukazuje da preostali snop djelomično kompenzira funkciju ozlijeđenog snopa [39].

Nativni ACL je jedan od najčvršćih ligamenata u tijelu – njegova maksimalna zatezna čvrstoća iznosi oko 2200 N (što je približno 2,2 kN) [40]. Elasticitet i krutost ovise o brzini opterećenja zbog viskoelastičnih svojstava ligamenta. Najveće opterećenje na ACL nastaje pri položaju blizu pune ekstenzije koljena [41]. U normalnim uvjetima, u ekstenziji koljena, prednja translacija tibije s održanim ACL-om iznosi do 2 mm. Translacija se nešto poveća prilikom fleksije koljena te bude 3 mm pri manjim i do 5,5 mm pri većim opterećenjima [36]. Kod eksperimentalno prerezanog ACL-a, prednja translacija tibije naglo poraste (za 10 – 15 mm pri 30° fleksije pod opterećenjem od 134 N), što ukazuje na važnu ulogu ACL-a u stabilizaciji koljena [36].

Stabilnost koljena ne osiguravaju samo ligamenti (tzv. pasivna stabilnost). Muskulatura natkoljenice može djelomično kompenzirati nedostatak ACL-a. Sile koje nastaju aktivacijom stražnje skupine mišića natkoljenice povlače tibiju straga i time

sprječavaju prednju translaciju tibije. Pri 90° fleksije koljena, stvara se vektor sile od 70° koji se direktno suprotstavlja prednjoj translaciji tibije [36]. Ova muskulatura posebno je važna u ACL-deficitarnom koljenu, te značajno doprinosi njegovoj stabilnosti. Pri fleksiji do 15°– 30° stabilizacijska uloga muskulature je najmanja. Pri tom stupnju fleksije ACL postaje primarni i gotovo jedini stabilizator koljena u sagitalnoj ravnini. Klinički testovi za prednju nestabilnost koljena upravo se izvode pri ovim stupnjevima fleksije kako bi se isključilo djelovanje kompenzacijskih struktura i mehanizama [36].

Osim za stabilnost koljena u sagitalnoj i horizontalnoj ravnini, ACL je odgovoran i za kombinacije ovih kretnji tj. za anterolateralnu stabilnost koljena [36]. Iako kod rupture ligamenta dolazi do povećanja opsega unutarnje rotacije tibije od svega 4° (djelomično jer okolne strukture poput ligamenata i muskulature i dalje stabiliziraju koljeno), dolazi do značajne biomehaničke promjene u koljenu zbog promjene rotacijske osi koljena. Os se sa svog centralnog položaja uz prednju interkondilarnu eminenciju (lat. *eminencia intercondylaris anterior*) pomiče medijalno, gotovo skroz prema trupu medijalnog meniskusa. Rezultat toga je značajno veća ekscurzija pokreta lateralnog kondila tibije te povećanje opterećenja na lateralne ligamente koljena i do 413 % [42].

Najčešće izvođeni klinički test za anterolateralnu nestabilnost koljena jest „pivot-shift test“ [43]. Tijekom izvođenja testa, u gotovo ispruženom koljenu ispitanika, ispitivač primjenjuje unutarnju rotaciju tibije i valgus silu na koljeno, čime u ACL-deficitarnom koljenu dolazi do anterolateralne subluksacije tibije. Kako se koljeno postupno savija, približno pri 30° fleksije, iliotibijalni traktus iz položaja ispred osovine oko koje se vrši rotacija tibije prelazi u položaj iza nje, te na taj način uzrokuje spontano vraćanje tibije u svoj anatomski položaj. Ova se repozicija klinički očituje kao karakterističan „preskok“ u koljenu [43].

Klinička istraživanja pokazuju da je perzistentna rotacijska nestabilnost koljena značajan prediktor slabijeg subjektivnog ishoda operacijskog liječenja [44,45]. U petogodišnjoj studiji praćenja, prijeoperacijski pozitivan pivot-shift test povezan je s nižim zadovoljstvom pacijenata nakon rekonstrukcije križnog ligamenta, osjećajem nesigurnosti i lošijim rezultatom popunjavanja Lysholm skora, skale za procjenu

funkcionalnosti koljena [46]. Zbog toga je kirurško liječenje usmjereno ne samo na kontrolu prednje translacije, već i na stabilizaciju koljena u horizontalnoj ravnini.

1.1.4. Povijest kirurške rekonstrukcije ACL-a od 1900. do danas

Povijest operacijskog liječenja rupture prednjeg križnog ligamenta istovremeno je i povijest stjecanja spoznaja o anatomiji i funkciji ligamenta, mehanizmima ozljeda i razvoju dijagnostičkih metoda kod ozljeda ACL-a.

Prvo spominjanje ligamenta nalazimo u zapisima Hipokrata koji je prvi ukazivao na mogućnost da bi nestabilnost koljena nakon ozljeda mogla biti posljedica oštećenja ligamenta koji se nalaze u koljenu [47]. Galen iz Pergamona nazvao je intraartikularne ligamente koljena „*ligamenta genua cruciata*“ zbog njihovog međusobnog položaja [48]. Braća Wilhelm i Eduard Weber prvi su dokazali da kao posljedica sekcije prednjeg križnog ligamenta nastaju patološki pomaci tibije u smjeru naprijed - nazad i prvi su opisali test prednje ladice pri nedostatku ACL-a [49].

1.1.4.1. Rani počeci kirurške rekonstrukcije ACL-a (od 1900-ih do 1950-ih)

Prvi pokušaji kirurškog liječenja rupture ACL-a zabilježeni su krajem 19. i početkom 20. stoljeća. Sir Arthur Mayo-Robson je 1895. godine izveo prvu operaciju rekonstrukcije ACL-a šivanjem i spajanjem odvojenih krajeva ligamenta [50]. Takvi zahvati uglavnom su se sastojali od primarne rekonstrukcije i postavljenja šavova, no rezultati nisu bili učinkoviti [51]. Zbog loših ishoda takvog načina liječenja, mnogi su kirurzi već u to doba kritizirali samu ideju šivanja ACL-a, pa se počelo razmišljati o rekonstrukciji ligamenta korištenjem tkivnih transplantata.

Dr Paul Wagner je 1913. godine napisao prvu disertaciju o izoliranoj rupturi prednjeg križnog ligamenta i predložio upotrebu fascije late kao presatka za njegovu rekonstrukciju u onim slučajevima kada je ligament toliko oštećen da ne postoji

mogućnost rekonstrukcije šavovima, ali nije opisao nikakva klinička iskustva u vezi s ovom preporukom [51].

Erich Hesse iz Sankt Petersburga 1914. godine opisao je rekonstrukciju ACL-a. Zahvat je izveo Ivan Grekov pri čemu je koristio slobodni presadak fascie late koji je provukao kroz tunel na femuru i zašio ga za bataljak ACL-a na tibiji. Prema Hessu, klinički rezultat je bio iznimno dobar bez ostatne nestabilnosti koljena [52]. To se danas smatra prvim pokušajem anatomske rekonstrukcije križnog ligamenta.

Prvu potpunu rekonstrukciju ACL-a izveo je Ernest William Hey Groves 1917. godine. Bio je nezadovoljan rezultatima dotadašnjeg standardnog načina liječenja ozljeda ACL-a kada je napisao 1917. godine: „Iako učestalost i važnost ove ozljede postaju sve poznatije, nije došlo do odgovarajućeg napretka u metodama liječenja. Gipsani ili kožni kalup koji se nosi godinu dana, a zatim ortoza sa zglobnim mehanizmom predstavlja opće prihvaćenu metodu.” [53]. Hey Groves je koristio čitavu fasciju latu odvojenu od tibijalne insercije koju je proveo kroz izbušene kanale na femuru i tibiji. Tako postavljen transplantat sašio je za periost femura i tibije, a tetiva je u proksimalnom dijelu ostala spojena s mišićem kako bi se očuvala opskrba krvlju za presadak [53]. Grovesu je bilo jasno da se stabilnost koljena može postići samo ukoliko se presadak postavi točno u anatomske pozicije, tj. ako se rekonstruiraju polazišta ACL-a na femuru i tibiji [54]. Osim toga, Groves je uočio važnost položaja transplantata i zaključio da je postizanje stabilnosti proporcionalno s kosim položajem transplantata [54]. Ova opažanja ostala su zapostavljena gotovo cijelo stoljeće kada su Loch i suradnici dokazali da je horizontalniji položaj presadka poželjniji jer se na taj način, osim stabilnosti tibije u anteroposteriornom smjeru, postiže i bolja rotacijska stabilnost koljena [55]. Ovaj zahvat smatra se pravim početkom moderne rekonstrukcije ACL-a.

U periodu od 1920-ih do 1950-ih entuzijazam za kirurškim liječenjem ozljeda ACL-a je zamro, pa osim sporadičnih operacijskih zahvata, prevladavao je konzervativni pristup [56]. U tom razdoblju neki su ortopedi (poput Hughstona i Quigleyja) smatrali da se nestabilnost prednjeg dijela koljena može nadoknaditi s ostalim stabilizatorima koljena te da ACL nije uvijek nužno rekonstruirati [57,58]. Valja napomenuti da pouzdani klinički testovi nestabilnosti koljena (poput Lachmanovog testa i pivot-shift testa) još nisu bili u širokoj primjeni prije 1960-ih, što je otežavalo dijagnostiku izoliranih ozljeda ACL-a u ranijim desetljećima [51].

1.1.4.2. Razvoj operacijskih tehnika ACL rekonstrukcije tijekom 1960-ih i 1970-ih godina

Šezdesete i sedamdesete godine 20. stoljeća donijele su veliki zaokret u pristupu liječenja ozljeda ACL-a. Sportska medicina počela je prepoznavati važnost ACL-a za stabilnost koljena, ponajviše zbog čestih ozljeda sportaša. Isprva se još uvijek pokušavalo sa šivanjem ligamenta [59–61]. Međutim, praćenja pacijenata pokazala su da se primarnim šivanjem ligamenta ne postiže zadovoljavajuća i dugotrajna stabilnost koljena. Ubrzo se odustalo od ovakvog pristupa i načina liječenja. MacIntosh i sur. uveli su dodatne ekstraartikularne zahvate s ciljem poboljšanja stabilnosti koljena [51]. Niti ovi postupci nisu u potpunosti spriječili rezidualnu nestabilnost koljena tijekom rotacijskih pokreta [62]. Kroz ta iskustva postalo je jasno da je za stabilno koljeno nužna intraartikularna rekonstrukcija – dakle, nadomještanje oštećenog ili puknutog ACL-a zamjenskim ligamentom [62].

U to vrijeme obnovljena je ideja korištenja patelarne tetive kao presatka za rekonstrukciju ACL-a. Još je 1930-ih američki kirurg Campbell opisao tehniku uporabe srednje trećine autologne patelarne tetive s pripadajućim koštanim blokovima s patele i tibije [63]. Tu je metodu dalje razvio dr. Kenneth Jones, koji je 1963. objavio prve rezultate rekonstrukcije ACL-a upravo transplantatom srednje trećine ligamenta patele [64]. Ta tehnika, kasnije poznata kao BTB (BTB, od engl. *bone - patellar tendon - bone*), desetljećima je slovila kao "zlatni standard" za rekonstrukciju ACL-a zbog učinkovitog cijeljenja koštanog bloka u femoralnom i tibijalnom tunelu [51]. Ipak, s vremenom su uočeni i nedostaci te metode. Uzimanje dijela patelarne tetive ponekad je uzrokovalo komplikacije poput prijeloma patele, upale tetive, te bolova u prednjem dijelu koljena nakon operacije [51].

Paralelno su istraživani i alternativni izvori presatka. Još 1934. Galeazzi je opisao uporabu tetiva stražnje skupine mišića natkoljenice - m. semitendinosusa i m. gracilisa - za rekonstrukciju ACL-a [51,65]. U kasnim 1960-ima dr. Du Toit je proveo sličan zahvat provlačeći tetivu m. gracilisa kroz koljeno i učvršćujući je na tibiju (tzv. Lindemannova procedura) [66]. Rezultati su bili ohrabrujući. Studija iz 1978. je pokazala da je povratak sportskim aktivnostima bio prisutan u 7 od 8 slučajeva takve rekonstrukcije [67]. Ubrzo nakon toga započelo se i s korištenjem dijela tetive

kvadricepsa (QT, od engl. *quadriceps tendon*): Campbell ga je spominjao još 1936., ali tek 1979. godine Marshall i sur. objavili su seriju pacijenata kod kojih je korištena ova vrsta presatka u rekonstrukciji ACL-a [60].

Do kraja 1970-ih patelarni BTB presadak ostao je najpopularnija metoda, osobito za mlađe i aktivne pacijente [51].

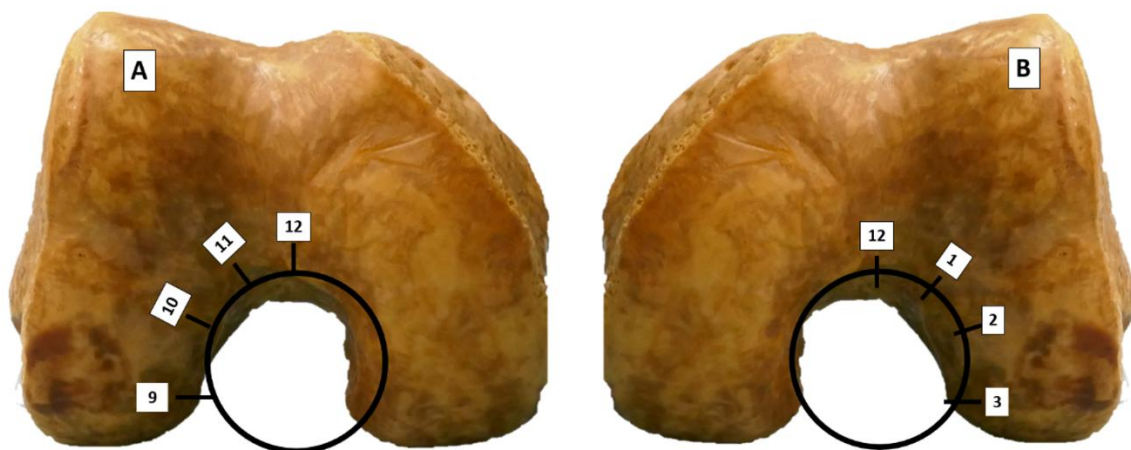
1.1.4.3. Artroskopska revolucija u ACL rekonstrukciji (1980-ih i 1990-ih)

Početak 1980-ih obiljeжан je razvojem endoskopske tehnologije i uvođenjem artroskopske kirurgije. Klasične otvorene tehnike zahtijevale su dvije incizije - jednu za tibijalni, drugu za femoralni tunel ili jednu veliku postavljenu po sredini koljena. No, 1980. godine britanski kirurg David Dandy izvodi prvu artroskopski asistiranu rekonstrukciju ACL-a. Kombinirao je intraartikularno postavljanje presatka od ugljičnih vlakana s dodatnom lateralnom tenodezom na koljenu [68]. Iako je Dandyjeva rekonstrukcija u početku dala dobre rezultate, sintetički presadak je ubrzo puknuo [68]. Unatoč ovom neuspjehu, njegov zahvat pokazao je da je artroskopski moguće rekonstruirati križni ligament. Tijekom 1980-ih artroskopske tehnike su se usavršavale, a do kraja desetljeća postalo je moguće cijelu rekonstrukciju izvesti artroskopski. Razvoj specijaliziranih instrumenata omogućio je bušenje femoralnog kanala kroz već izbušeni tibijalni tunel. Godine 1992. Hardin i sur. opisali su upravo takvu tehniku sa samo jednom incizijom koja je odmah stekla popularnost među ortopedima [69]. Ova tehnika postala je poznata pod nazivom transtibijalna tehnika i postaje zlatni standard u rekonstrukciji ACL-a [70].

60-ih godina prošlog stoljeća postavljen je koncept izometrične rekonstrukcije ACL-a. Koncept se bazirao na spoznaji Rudolfa Ficka iz 1911. godine [71]. Fick je proučavao napetost ACL-a tijekom fleksije koljena, te zaključio da je uvijek napet jedan dio ACL-a bez obzira o kojem stupnju fleksije se radi [71].

Izometrično postavljanje transplantata znači da ne dolazi do njegovog istezanja ili elongacije i plastične deformacije tijekom čitavog opsega pokreta u koljenu. Artman i Wirth su 1974. godine odredili izometrične točke na femoralnom i tibijalnom hvatištu

koje su pokazivale minimalnu promjenu u međusobnom odstojanju tijekom fleksije i ekstenzije koljena [72]. Na femuru se izometrična točka nalazila u posterosuperiornom dijelu anatomskeg polazišta ACL-a u području AM snopa, dok se određivanje izometričke točke na tibiji pokazalo manje bitnim. Na temelju ovih rezultata zaključeno je da je pri rekonstrukciji ACL-a važno rekonstruirati AM snop [12,73,74]. Gill i sur. zaključili su da tijekom kretanja od 0° – 90° pomak presatka mora biti manji od 2 mm [75]. Kako bi se postigla izometrična točka pri postavljanju femoralnog tunela korištena je orijentacijska tehnika tzv. metoda brojčanika sata (engl. *clock face*). Zamišljeni brojčanik se projicirao na ulaz u interkondilarnu udubinu (Slika 7), a femoralni tunel se postavljao na projiciranih 11 sati za desno i na 1 sat za lijevo koljeno [76].



Slika 7. Prikaz orijentacijske tehnike postavljanja femoralnog tunela metodom brojčanika sata projiciranog na ulazu u interkondilarnu udubinu. A - desno koljeno; B - lijevo koljeno.

Međutim, praćenjem rezultata, uočeni su i problemi vezani uz transtibijalnu tehniku i korištenje ove orijentacijske metode. Najčešće opisana komplikacija bila je previše okomito postavljen femoralni tunel (Slika 8), jer bušenje kroz prije postavljeni tibijalni tunel ograničavalo je pozicioniranje svrdla za femoralni kanal i često ga usmjeravalo izvan anatomskeg hvatišta ACL-a [70]. Kontrolne studije pokazale su da tako postavljen presadak dobro ograničava prednju translaciju tibije, ali rotacijska

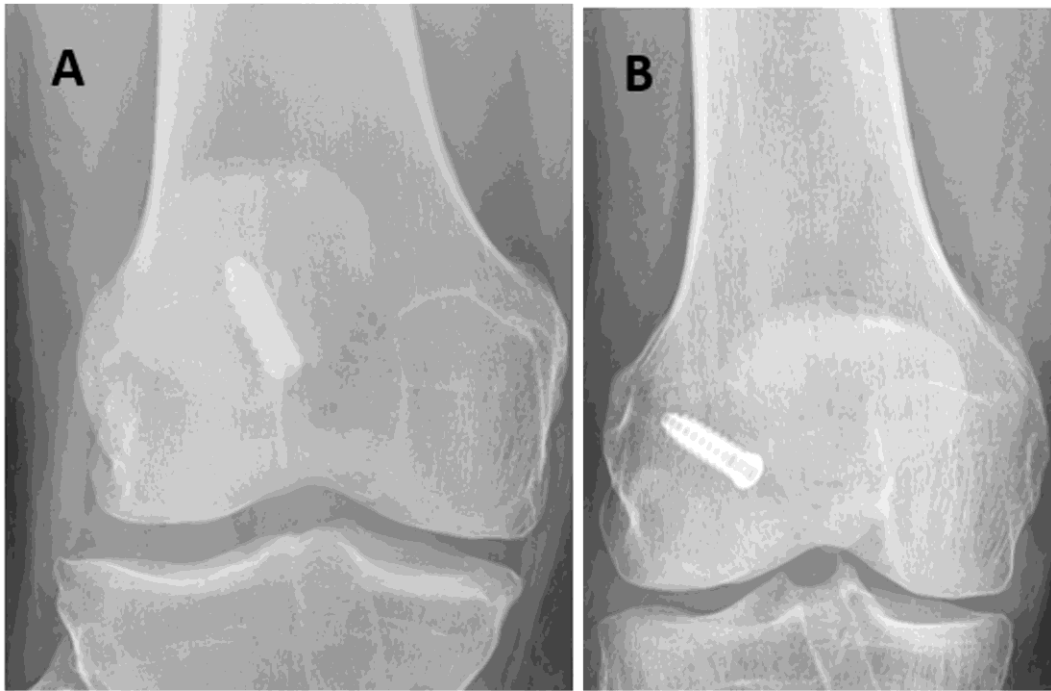
nestabilnost koljena i dalje je bila prisutna [77]. Ovom tehnikom nije se uspjelo uspješno stabilizirati koljeno u svim ravninama pa je dolazilo do povećanog opterećenja zglobove hrskavice i ubrzanog razvoja OA [77,78]. Ovi rezultati potaknuli su preispitivanje tadašnjih tehnika i otvorili put novim saznanjima i novim pristupima operacijskog liječenja.



Slika 8. Radiografska snimka desnog koljena i prikaz femoralnog vijka postavljenog transtibijalnom tehnikom izvan anatomske hvatišta. Femoralni vijak nalazi se na položaju 12 sati.

1.1.4.4. Prijelaz na anatomske ACL rekonstrukcije (2000-ih)

Suočeni s nedostacima transtibijalne tehnike, kirurzi su počeli tražiti načine da transplantat postave točno na anatomske hvatište ligamenta. Istraživanja su pokazala da pomicanje femoralnog tunela malo niže (npr. s “11 sati” na “10 sati”) (Slika 9) postavlja transplantat u horizontalni smjer i poboljšava kontrolu rotacije koljena [79].



Slika 9. Radiografska snimka koljena i prikaz femoralnog vijka postavljenog (A) na 11 sati i (B) na 10 sati.

Kako klasičnom transtibijalnom metodom nije bilo moguće doseći to anatomsko mjesto, razvijene su nove tehnike bušenja femoralnog tunela iz anteromedijalnog portala čime je omogućeno neovisno pozicioniranje tunela u bedrenoj kosti [80,81].

Veliki zagovornici anatomske rekonstrukcije bili su ortopedski kirurzi poput Freddieja Fua i kolega, koji su u ranim 2000.-ima popularizirali koncept rekonstruiranja oba snopa ACL-a zasebnim presadcima tzv. *double bundle* tehnika [82–84]. Ova rekonstrukcija imala je za cilj vjernije oponašati prirodnu anatomiju i funkciju ligamenta.

Prvi klinički radovi (Yasuda, Fu i sur.) pokazali su da tehnika rekonstrukcije oba snopa (tzv. *double bundle* tehnika) može pružiti bolju stabilnost u smislu smanjenog prednjeg pomaka i rotacije tibije [83,85]. Ipak, kasnije randomizirane studije nisu dokazale jasnu prednost *double bundle* rekonstrukcije u ishodima i subjektivnom osjećaju pacijenata [86,87]. Operacija je tehnički bila znatno zahtjevnija. Bušila su se četiri tunela umjesto dva, kompleksnija je revizija, češće intraoperacijske komplikacije, pa se većina kirurga odlučila vratiti jednostavnijoj rekonstrukciji ACL-a samo jednim

transplantatom (tzv. *single bundle* tehnika), ali uz primjenu načela anatomske rekonstrukcije pozicioniranja tunela.

Prema Fu i sur., kod anatomske rekonstrukcije jednim snopom (*single bundle* tehnika) transplantat se treba postaviti unutar anatomske femoralnog hvatišta ACL-a tako da obuhvati i AM i PL snop, s ciljem da što vjernije obnovi prirodnu anatomiju ligamenta [82].

1.1.4.5. Suvremene metode ACL rekonstrukcije (2010-ih do danas)

Tijekom 2010-ih anatomske pristup postao je zlatni standard u rekonstrukciji ACL-a. Artroskopske tehnike dodatno su usavršene. Što se tiče izbora transplantata, u posljednjih 15-ak godina došlo je do promjene trendova: dugi niz godina većina kirurga preferirala je BTB autotransplantat, no oko 2008. godine popularnost hamstrings autotransplantata (tetive semitendinozusa/ gracilisa) premašila je patelarni i danas su ta dva transplantata podjednako zastupljena [88,89]. U Sjedinjenim Američkim Državama mnogi vrhunski sportaši i dalje dobivaju BTB transplantat zbog njegove čvrstoće, dok je u drugim državama nešto češći transplantat od tetive gracilisa i semitendinosusa zbog manjeg morbiditeta donorskog mjesta [88,89]. Istraživanja su pokazala da obje tehnike daju slične kliničke rezultate stabilnosti [90,91].

U novije vrijeme sve više se koristi transplantat tetive kvadricepsa (QT, od engl. *quadriceps tendon*). Iako se korištenje tetive kvadricepsa spominje još 1930-ih, ovaj transplantat dugo nije bio u širokoj uporabi. Međutim, oko 2010-ih objavljeni su rezultati koji ukazuju da ACL rekonstrukcija tetivom kvadricepsa može postići jednake rezultate stabilnosti kao BTB ili hamstrings transplantat, uz manje poslijeoperacijske tegobe na mjestu uzimanja transplantata [92–94]. Neka novija istraživanja pokazala su i bolje subjektivne ocjene funkcije koljena kod QT transplantata u odnosu na hamstrings transplantat [95,96]. Stoga dio kirurga danas vidi tetivu kvadricepsa kao ravnopravnu alternativu tradicionalnim transplantatima.

Korištenje alotransplantata također je dio suvremene prakse, osobito kod revizijskih operacija ili kod pacijenata srednje i starije dobi. Alotransplantati su doživjeli

vrhunac popularnosti krajem 2000-ih. Primjerice, jedno istraživanje je pokazalo da je od 2006. do 2012. čak 40 % primarnih ACL rekonstrukcija u zajednici napravljeno alotransplantatom [97]. No, naknadno se ustanovilo da mlađi, aktivni pacijenti imaju znatno veći rizik puknuća transplantata ako je korišten alotransplantat: u populaciji sportaša do 25 godina zabilježene su višestruko češće ponovljene ruptуре u odnosu na autotransplantat, pa čak i do 15 puta veći rizik u nekim studijama [98]. Zbog toga se danas kod mladih sportaša preferiraju autologne tetive, dok se alotransplantati koriste za starije pacijente ili pri ponovnim operacijama.

Nadalje, kao rezultat daljnjih istraživanja i inovacija, niz novih tehnologija uvodilo se u rekonstrukciju ACL-a. Umjetni (sintetički) ligamenti za ACL isprobavaju se još od 1970-ih (npr. Dacron, Gore-Tex trake), ali rani pokušaji završili su neuspjehom – transplantati od umjetnih materijala često bi pucali ili uzrokovali upalu i taloženje čestica u okolnom tkivu [99]. Danas se ponovo ispituju poboljšani sintetički implantati, od kojih se ističe LARS ligament (LARS, od engl. *ligament advanced reinforcement system*). LARS je poliesterski umjetni ligament čija su kratkoročna iskustva povoljna: neka istraživanja bilježe visoke ocjene funkcije koljena i brži povratak aktivnostima kod pacijenata s LARS-om [100]. Jedna studija našla je čak i bolju stabilnost koljena jednu godinu nakon rekonstrukcije LARS-om u usporedbi s klasičnim BTB transplantatom, premda se nakon 2 godine razlike izjednačavaju [101]. Ipak, potrebno je duže praćenje i oprez, s obzirom na loša iskustva s prijašnjim sintetičkim ligamentima.

Zanimljiv suvremeni trend je i povratak konceptu primarnog cijeljenja ligamenta uz pomoć novih biotehnoloških metoda. BEAR postupak (BEAR, od engl. *bridge-enhanced ACL repair*), predstavljen 2016. godine, pokušava izbjeći klasični transplantat: umjesto toga, između pokidana dva kraja ACL-a postavlja se kolageni spužvasti implantat natopljen autolognom krvlju, koji služi kao “most” i poticaj za cijeljenje nativnog ligamenta [102]. Prvi rezultati BEAR tehnike su ohrabrujući. U pilot studiji, bolesnici liječeni BEAR-om imali su usporedivu stabilnost koljena s onima koji su prošli rekonstrukciju, a pokazali su i bolje očuvanje snage mišića stražnje lože tijekom oporavka [103]. Iako se BEAR tehnika još uvijek smatra eksperimentalnim liječenjem, daljnja poboljšanja tehnologije mogla bi proširiti indikacije za primarni popravak ACL-a u odabranim slučajevima.

1.1.5. Funkcionalni ishodi i povratak sportu nakon ACL rekonstrukcije

Premda je primarni cilj operacije stabilno koljeno, krajnji uspjeh mjeri se i povratkom pacijenta prijašnjim aktivnostima. Meta-analiza Ardern i sur. (2014.) obuhvatila je 69 studija s ukupno > 7500 pacijenata i pokazala sljedeće prosječne stope povratka nakon ACL rekonstrukcije: oko 81 % pacijenata vrati se bavljenju nekom sportskom aktivnošću, 65 % se vrati na prijašnju razinu sporta, ali samo 55 % uspijeva se vratiti na natjecateljsku razinu sportskog angažmana [104]. Gotovo polovica sportaša ne dosegne ponovno punu kompetitivnost nakon operacije. Funkcionalni testovi (npr. skok u dalj na jednoj nozi, Y-balans test) također su povezani s povratkom sportu. Ardern i sur. navode da simetrična izvedba skokova (ozlijeđena vs. neozlijeđena noga) pozitivno korelira s većom vjerojatnošću povratka na prijašnji nivo aktivnosti [104]. Prateći čimbenici su bitni: mlađa dob, muški spol i viši natjecateljski rang prije ozljede (tzv. „elitni sportaši“) povezani su s uspješnijim povratkom [104]. Ipak, čak i u profesionalnih sportaša pod optimalnim uvjetima, povratak vrhunskom sportu nije zajamčen. Primjerice, jedna analiza elitnih nogometaša pokazala je da ~ 83 % uspijeva ponovno igrati na prijašnjoj razini, dok ostali ne dosegnu puni povrat sportskim aktivnostima, često zbog kombinacije fizičkih i psiholoških razloga [105].

1.1.6. Rizik ponovne ruptуре i ponovne ozljede ACL-a nakon rekonstrukcije

Jedan od najozbiljnijih nedostataka ACL rekonstrukcije jest rizik od ponovne ozljede – bilo puknuća presatka ili ruptуре ACL-a suprotne noge. Višestruke studije pokazuju da su mlađa dob i povratak visokorizičnim sportovima glavni čimbenici rizika za nastanak nove ozljede. Wiggins i sur. proveli su meta-analizu 19 studija: ukupno gledano, nakon rekonstrukcije ACL-a prosječna incidencija druge ACL ozljede (bilo istog ili suprotnog koljena) iznosila je oko 15% [106]. Od toga, ~ 7 % je ponovno puknuće transplantata na operiranom koljenu, a ~ 8 % ruptura na suprotnom, zdravom koljenu [106]. Međutim, te brojke rastu u mladih sportaša: u populaciji mlađih od 25 godina koji su se vratili sportu, kumulativna stopa nove ACL ozljede iznosila je čak 23 %, što znači da gotovo svaki četvrti mladi sportaš doživi novu rupturu tijekom sportske

karijere [106]. Najčešće se to događa ubrzo nakon povratka u natjecanje (unutar ~ 2 godine). Mlađi od ~ 20 godina imaju višestruko veći rizik od starijih: jedna studija je pokazala da je stopa neuspjeha u adolescenata čak ~ 14 %, naspram < 1 % u rekonstruiranih pacijenata iznad 20 godina [107]. Također, povratak kontaktnim sportovima (npr. nogomet, rukomet) sam po sebi povećava rizik. Kombinacija čimbenika, npr. vrlo mlada dob uz povratak kompetitivnom sportu, najrizičniji je scenarij, s preko 20 - 25 % vjerojatnosti za ponovnu rupturu [108]. Ovi podaci potiču rasprave o kriterijima povratka sportu: danas se sve više zagovara produljena rehabilitacija (> 9 mj.) i uvođenje objektivnih "*return-to-sport*" testova kako bi se smanjila stopa ponovnih ozljeda [109]. Istraživanja sugeriraju da odgađanje povratka natjecanju do ≥ 9 mjeseci i postizanje simetrične jakosti/koordinacije smanjuju rizik ponovne rupture za preko 50 % [106].

Važno je istaknuti da ponovna ozljeda ne mora uvijek značiti tehničku grešku kirurga ili lošu kvalitetu transplantata – često je posljedica nastavka djelovanja inicijalnih rizičnih čimbenika (npr. intenzivane sportske aktivnosti s naglim promjenama smjera, biomehanika doskoka koja je i prvu ozljedu uzrokovala, genetska sklonost slabijem kolagenu i sl.). To ilustrira i značajan udio kontralateralnih ruptura (~ 50 % sekundarnih ozljeda), što upućuje na sustavnu predispoziciju nekih sportaša na ozljedu ACL-a općenito [106]. Prevenzijske strategije (treninzi propriocepcije, neuromuskularne kontrole i programi poput FIFA11+) stoga su ključne i nakon rekonstrukcije, kako bi se smanjilo opterećenje na novi ligament.

1.1.7. Biomehanička ograničenja rekonstrukcije ACL-a

Iako je cilj kirurške rekonstrukcije anatomske obnoviti ACL, rekonstruirani ligament u biomehaničkom smislu nije identičan izvornom prirodnom. Postoji više razloga i posljedičnih ograničenja.

1.1.7.1. Nemogućnost rekonstrukcije native anatomije ACL-a

Standardna tehnika zamjenjuje rupturirani ACL jednim transplantatom (najčešće jedan snop). Time se ne rekonstruira anatomska građa nativnog ligamenta. Čak i kod "anatomskih" rekonstrukcija gdje je transplantat optimalno postavljen, često je narušena kinematika koljena. Osobito je izazovno kod rekonstrukcije ACL-a vratiti potpunu rotacijsku stabilnost. Konvencionalna *single-bundle* tehnika dobro stabilizira koljeno u sagitalnoj ravnini čime se sprječava prednja translacija tibije, ali rotacijska nestabilnost ponekad zaostaje unatoč ispravnom položaju transplantata [36]. Drugim riječima, koljeno može biti stabilno u anteroposteriornom smjeru, ali i dalje nestabilno pri rotacijskim kretnjama. To je jedan od razloga zašto dio operiranih pacijenata osjeća nesigurnost pri naglim promjenama smjera unatoč urednoj stabilnosti na osnovnim testovima [36].

1.1.7.2. Ligamentizacija ACL presatka

Presadak tetive (npr. BTB ili hamstrings) prolazi kroz proces "ligamentizacije" unutar koljena, što predstavlja postupno preobražavanje tetivnog tkiva u ligamentno, uz revaskularizaciju. Tijekom prvih mjeseci nakon operacije transplantat prolazi fazu nekroze i remodeliranja, u kojoj je mehanička čvrstoća transplantata smanjena u odnosu na inicijalnu čvrstoću tetive [41]. Tek oko 6 – 12 mjeseci poslijeoperacijski, transplantat doseže zreliju fazu s poboljšanom strukturom kolagena. To je razlog zašto prerani povratak sportu (< 6 mjeseci) nosi visok rizik jer transplantat još nije stekao punu otpornost. Također, ni nakon kompletne ligamentizacije mehanička svojstva presatka nisu identična izvornom ACL-u. Npr. hamstrings transplantat obično ima manji promjer od nativnog ACL-a i može biti rastezljiviji, dok BTB transplantat može biti krući [41]. Sintetički transplantati su isprobavani ranijih desetljeća, ali su većinom povučeni iz primjene jer su dugoročno pokazali visoku stopu neuspjeha i komplikacija [99].

1.1.7.3. Ostala biomehanička odstupanja nakon rekonstrukcije ACL-a

Unatoč urednoj statičkoj stabilnosti, rekonstruirano koljeno može imati suptilne promjene u dinamici pokreta kao što je drugačija raspodjela opterećenja preko zglobne površine. Analiza hoda nakon ACL rekonstrukcije pokazala je da pacijenti imaju izmijenjenu kinematiku koljena (manji fleksijski kut u inicijalnoj fazi stajanja, izbjegavanje punog opterećenja ozlijeđene strane i sl.), što može doprinijeti dugoročnoj preopterećenosti drugih struktura [110]. Također, morfologija transplantata (npr. duljina i položaj tunela) može utjecati na opterećenja u području transplantata tijekom pokreta. Ako tuneli nisu anatomski pozicionirani, transplantat može biti previše labav u nekim stupnjevima fleksije koljena, a previše zategnut u drugima, što dovodi do narušene kinematike ili čak oštećenja ili pucanja transplantata [82].

1.1.8. Posljedice neanatomskog postavljanja femoralnog tunela

Pogrešno postavljanje femoralnog tunela (engl. *femoral tunnel malposition*) prepoznato je kao vodeći uzrok mehaničkog neuspjeha rekonstrukcije ACL-a. Statistički podaci iz velikih multicentričnih ispitivanja i revizijskih kohortnih studija ukazuju da je malpozicija femoralnog tunela najčešća tehnička pogreška. U sklopu Multicentričnog istraživanja revizija ACL-a (MARS, od engl. *Multicentric anterior cruciate ligament research society*), tehničke pogreške bile su odgovorne za ~ 60 % slučajeva revizije, a među njima je malpozicija femoralnog tunela identificirana u oko 80 % slučajeva neuspjeha transplantata [111].

Drugim riječima, nepravilno postavljen femoralni tunel najčešći je pojedinačni uzrok neuspjeha rekonstrukcije ACL-a. Obično se radi o tunelu koji je bušen previše anteriorno i/ili previše vertikalno (tj. previsoko u odnosu na anatomsko hvatište) [111]. Takav položaj transplantata uzrokuje sraz ligamenta s okolnim strukturama, zatim prekomjerno opterećenje i trošenje transplantata zbog nefiziološkog opterećenja, te rezidualnu labavost koljena zbog nemogućnosti transplantata da zategne koljeno u čitavom opsegu pokreta [112,113]. Posljedično se javljaju lošiji klinički ishodi (npr.

osjećaj nesigurnosti u koljenu, pozitivni testovi nestabilnosti) i povećana incidencija sekundarnih ozljeda intraartikularnih struktura. Lucidi i sur. ističu da malpozicija femoralnog tunela dovodi do veće učestalosti poslijeoperacijskih lezija meniska, loših kliničkih rezultata i potrebe za revizijom [114].

1.1.8.1. Dugoročne posljedice: OA koljena

Jedna od najvećih komplikacija nakon ozljede ACL-a je razvoj prijevremenih degenerativnih promjena u koljenu (Slika 10). Ozljeda ACL-a često je praćena oštećenjem meniskusa i hrskavice, što u kombinaciji s nestabilnim koljenom uzrokuje prijevremeni nastanak i ubrzani razvoj OA [1].



Slika 10. Radiografska snimka desnog koljena 20 godina nakon rekonstrukcije prednjeg križnog ligamenta koja prikazuje četvrti stupanj osteoartritisa.

Meta-analiza 6 istraživanja pokazala je da rekonstruirano koljeno i dalje ima oko 3,5 puta veći rizik od razvoja OA u usporedbi sa zdravim koljenom [115]. U istoj analizi, konzervativno liječena ACL ozljeda imala je ~ 5 puta veći rizik, što sugerira da operacija smanjuje rizik OA u odnosu na potpuno nestabilno koljeno, ali ga nikako ne eliminira [115]. Dapače, neke studije nalaze izrazito visok postotak OA i nakon operacije. Tako je retrospektivno praćenje 11 godina od ozljede pokazalo radiografski OA u 42 % pacijenata s ACL rekonstrukcijom naspram 25 % u onih liječenih konzervativnim metodama [116]. Slične rezultate bilježe i druge kohortne studije, tako 10 –15 godina nakon ozljede značajan dio (čak 30 – 50%) pacijenata ima znakove OA koljena, bez obzira jesu li bili operirani ili ne [117].

Glavni čimbenik koji doprinosi nastanku OA nakon rupture ACL-a je rezidualna zglobna nestabilnost ili neusklađenost opterećenja [118]. Studije su pokazale korelaciju između rotacijske nestabilnosti i ubranog nastanka OA– pacijenti s kronično pozitivnim *pivot-shift* testom češće razvijaju degenerativne promjene [118]. S druge strane, čak i u potpuno stabilnom koljenu, sama inicijalna trauma, pogotovo u kombinaciji s ozljedom meniskusa, pokreće kaskadu upalnih i biomehaničkih promjena koje vode u OA.

Trenutno ne postoji dokaz da ACL rekonstrukcija preventivno djeluje na dugoročno propadanje hrskavice. Cochrane-ovi sustavni pregledi zaključuju da stopa OA nije niža kod operiranih u odnosu na neoperirane pacijente [119]. Ipak, valja naglasiti da cilj rekonstrukcije nije samo sprječavanje OA, već omogućiti funkciju i spriječiti nestabilnost koljena koja bi vjerojatno dovela do još bržeg oštećenja zgloba [119]. Suvremena nastojanja za očuvanjem zgloba obuhvaćaju kombiniranje rekonstrukcije ligamenta s popravcima meniskusa i rekonstruktivnim zahvatima na hrskavici, agresivnu rehabilitaciju s korekcijom biomehanike pokreta, te praćenje pacijenata. Dugoročno, čak i uz optimalnu skrb, dio pacijenata s ACL ozljedom razvit će OA u srednjoj životnoj dobi. To ostaje jedno od otvorenih područja istraživanja.

Istraživanja sugeriraju da anatomski rekonstruiran ACL može usporiti ili smanjiti razvoj OA promjena u odnosu na ne-anatomski postavljen transplantat. Tako su Rothrauff i sur. utvrdili da su pacijenti s anatomskom rekonstrukcijom imali manje radiografski vidljivih degenerativnih promjena nakon više godina, u usporedbi s bolesnicima kod kojih je rekonstrukcija bila ne-anatomska [120].

Osim OA, neadekvatno stabilizirano koljeno sklonije je ponovnim ozljedama. U literaturi se navodi da su stope rupture transplantata i potrebe za revizijom znatno veće kod ne-anatomskih rekonstrukcija [114]. Dugoročno praćenje pacijenata također je pokazalo da položaj tunela utječe na stopu preživljenja transplantata: u jednoj studiji s prosječno 10 godina praćenja, pacijenti s femoralnim tunelom koji je bio smješten previše anteriorno imali su značajno višu stopu komplikacija u usporedbi s onima kod kojih je tunel bio bliže stražnjem rubu kondila [121]. Kritična granica bila je položaj unutar stražnje trećine kondila: čak 93,8 % svih kasnijih neuspjeha imalo je tunel smješten ispred (anteriorno) zamišljene granice od 35 % dužine kondila od stražnje strane [121]. Ovi nalazi jasno upućuju na zaključak da “malo promašiti” može imati velike posljedice u kontekstu rekonstrukcije ACL, pa čak i nekoliko milimetara odstupanja femoralnog tunela od idealnog položaja može utjecati na preživljavanje transplantata [114].

Upravo zbog tih saznanja, suvremene smjernice naglašavaju važnost preciznog intraoperacijskog identificiranja anatomskog hvatišta na femuru. Za lakše određivanje granica femoralnog hvatišta služimo se intraoperacijskim anatomskim orijentirima. Kao što smo u Uvodu naveli, jedna od najčešće korištenih anatomskih struktura jest LIR.

1.2. Lateralni interkondilarni greben koljena (“resident’s ridge”) – povijest, anatomija i značaj za rekonstrukciju ACL-a

1.2.1. Povijesni razvoj i nomenklatura

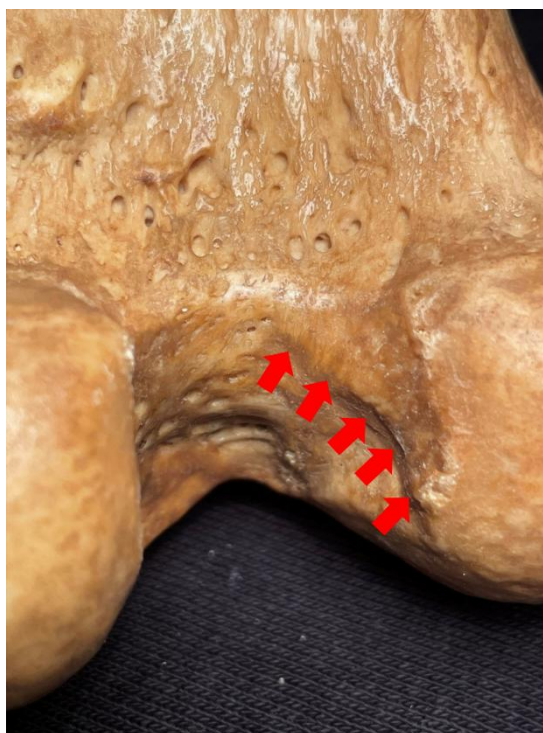
Greben na lateralnoj strani interkondilarne udubine prvi je opisao William G. Clancy krajem 20. stoljeća. Opisao ga je kao promjenu nagiba lateralnog zida i krova interkondilarne udubine, a nazvao ga je “*resident’s ridge*”. Naziv u prijevodu znači “greben specijalizanata”, a nastao je anegdotalno. Clancy je primijetio da mladi kirurzi često zamijene taj greben za stražnju granicu interkondilarne udubine. Tada ga je definirao kao relativnu izbočinu ili promjenu u nagibu koja je prisutna u posteriornoj četvrtini lateralnog zida i krova interkondilarne udubine te se lako može zamijeniti sa

završetkom interkondilarne udubine [122,123]. Takva pogreška imala je za posljedicu postavljanje femoralnog tunela suviše plitko (previše anteriorno) i ne-anatomske pozicioniranje presatka ACL-a [70]. Clancyjevo opažanje dugo je ostalo neformalnim sve do novijeg doba kada je, s porastom interesa za anatomske rekonstrukcije ACL-a, ova koštana struktura ponovno zaokupila pažnju. Farrow i sur. su u opsežnoj studiji na 200 femura potvrdili prisutnost ovog grebena u 98 % slučajeva (196 od 200 uzoraka) te predložili naziv lateralni interkondilarni greben (LIR, od engl. *lateral intercondylar ridge*) kao primjereniji i jasniji [22]. U literaturi se stoga ustalio naziv lateralni interkondilarni greben kao termin koji precizno opisuje položaj grebena na bočnoj (lateralnoj) stijenci interkondilarnog prostora femura [22].

Od sredine 2000-ih nadalje, zahvaljujući radovima Freedia Fua i sur., LIR postaje prepoznat kao ključni orijentir u “anatomskim” rekonstruktivnim tehnikama, nasuprot ranijem oslanjanju isključivo na “satne pozicije” u koljenu [124]. Danas je prepoznavanje grebena sastavni dio edukacije i pripreme za rekonstrukciju ACL-a jer predstavlja najvažniju orijentacijsku strukturu tijekom operacijskih rekonstruktivnih zahvata ACL-a.

1.2.2. Anatomija LIR-a

LIR je izraženi koštani rub koji se proteže duž medijalne površine lateralnog femoralnog kondila. U kirurškom položaju koljena savijenog $\sim 90^\circ$, ovaj greben se pruža otprilike od gornjeg prednjeg dijela interkondilarnog krova koso prema dolje i straga (supraanteriorno prema inferoposteriornu) duž lateralne stijenke interkondilarne udubine [125] (Slika 11).



Slika 11. Stražnji ulaz u interkondilarnu udubinu. Strelicama je označen lateralni interkondilarni greben.

U anatomske studiji Shino i sur. odredili su položaj grebena i zaključili da se nalazi oko 7 – 10 mm ispred stražnjeg ruba zglobne hrskavice lateralnog kondila [126], te da se sva vlakna ACL-a nalaze distalno od LIR-a. Drugim riječima, LIR čini prednji rub hvatišta femoralnog dijela ACL-a [127]. Iza i ispod grebena nalaze se vlakna ACL-a, a ispred njega je slobodan prednji dio interkondilarnog prostora. Morfološki, ovaj greben nije zasebno izdignuće kosti, već odražava prijelaz u nagibu kosti na spoju krova udubine i bočne stijenke kondila.

Hutchinson i Ash su 2003. godine detaljno analizirali strukturu “resident’s ridge” i pokazali da se u 90 % slučajeva jasno uočava zasebna izbočina na mjestu gdje se mijenja nagib prednjeg dijela krova interkondilarne udubine [123]. Mikroskopska mjerenja debljine kosti femura u toj regiji otkrila su da je kost na mjestu hvatišta ACL-a značajno deblja (prosječno ~ 1,6 mm) nego na samom grebenu ili ispred njega (~ 0,9–0,96 mm) [123]. Ova razlika u debljini i kutu površine stvara dojam “grebena” tijekom artroskopije, premda sam greben nema dodatnu koštanu masu, radi se dakle o optičko-palpacijskoj pojavi uslijed morfologije kondila [123].

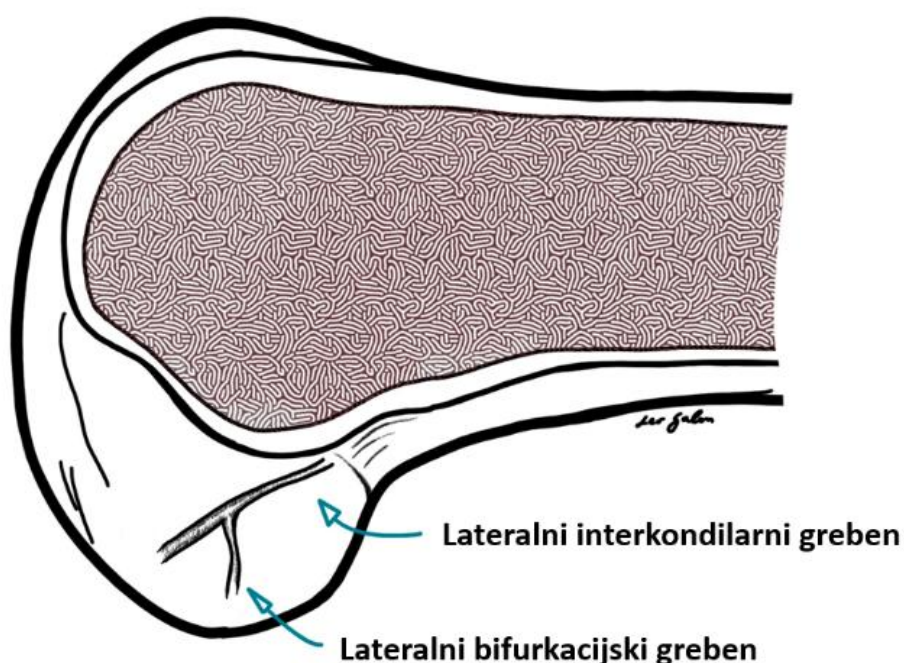
Na histološkim presjecima uočava se upravo nagla promjena nagiba kosti ("stepenica") neposredno ispred hvatišta ACL-a, što potvrđuje da LIR odgovara liniji prijeloma nagiba kosti na prednjoj granici hvatišta ligamenta [123]. Kao što je već spomenuto, prisutnost LIR-a vrlo je konstantna u populaciji. Studije na kadaverima bilježe vidljiv greben u velikoj većini slučajeva – pa tako u još jednoj studiji LIR je bio prisutan u 94 % od 318 ispitanih femura [22,128]. U manjem broju slučajeva mogu postojati varijacije oblika i položaja: distalni (donji) dio grebena ponekad je slabije izražen ili se gubi u 15–20 % uzoraka [128], a rijetko greben može biti postavljen nešto više anteriorno ili posteriorno nego uobičajeno (u oko 8–9 % slučajeva ekstremno naprijed ili natrag) [128].

Važno je istaknuti da se prednji rub stvarnog hvatišta ACL-a često pruža malo ispred samog koštanog grebena u srednjem i donjem dijelu insercije (prosječno ~ 4 mm anteriornije) [128]. Drugim riječima, najanteriornija vlakna ligamenta mogu dosezati tik ispred grebena, što kirurgu ukazuje da tunnel treba postaviti odmah iza grebena kako bi obuhvatio cjelokupno hvatište. Unatoč tim varijacijama, LIR pouzdano označava prednju granicu hvatišta ACL-a.

Osim LIR-a, na femuru postoji još jedan važan koštani orijentir povezan s ACL-om, a to je lateralni bifurkacijski greben (engl. *lateral bifurcate ridge*). Ovaj greben prvi je opisao Ferretti 2007. godine kao koštani greben koji se pruža okomito na interkondilarni greben, dijeleći područja hvatišta anteromedijalnog i posterolateralnog snopa ACL-a [129]. Lateralni bifurkacijski greben nastaje duž granice među snopovima te spaja interkondilarni greben s posteriornim dijelom kondila, tvoreći s LIR-om oblik slova "T". Ovaj greben nije uvijek jasno vidljiv artroskopski. Prisutan je tek u oko polovice slučajeva [130]. Također je opisan još jedan koštani greben u području femoralnog hvatišta ACL-a i naziva se lateralni interkondilarni stražnji greben (engl. *lateral intercondylar posterior ridge*). Nalazi se na stražnjem rubu insercije direktnih vlakana ACL-a. Nazočnost ovog grebana opisana je samo u histološkim preparatima [35].

Svi ovi koštani grebeni upotpunjuju anatomsku sliku hvatišta ACL-a: LIR čini prednju granicu, lateralni bifurkacijski greben dijeli hvatište za prednji i stražnji snop, a stražnji rub hvatišta omeđen je hrskavično-koštanim prijelazom na dnu interkondilarne udubine. Ta trodimenzionalna kompleksnost hvatišta ACL-a ključna je

kako bi bolje razumjeli i što vjernije rekonstruirali anatomske značajke ACL-a [122] (Slika 12).



Slika 12. Shematski prikaz medijalnog zida lateralnog kondila femura na kojem se vidi položaj lateralnog interkondilarnog grebena i lateralnog bifurkacijskog grebena.

1.2.3. Značaj LIR-a u rekonstrukciji ACL-a

LIR ima važnu ulogu kao orijentir tijekom kirurške rekonstrukcije ACL-a. U suvremenim “anatomskim” tehnikama rekonstrukcije ACL-a cilj je postaviti femoralni tunel točno unutar područja izvornog hvatišta ligamenta, kako bi postavljeni transplantat biomehanički oponašao prirodni ligament. Glavni vodič pri tome su upravo koštane orijentacije: LIR pouzdano označava prednju granicu hvatišta ACL-a [127,129], stoga se femoralni tunel postavlja odmah posteriorno (iza) od ovog grebena, unutar hvatišta. Ukoliko bi se tunel izbušio ispred grebena transplantat bi bio

smješten previše anteriorno i plitko, što dovodi do neadekvatne funkcije i rizika od sraza (engl. *impingement*) o prednji rub krova interkondilarne udubine. Nasuprot tome, previše posteriorno (duboko) postavljen tunel približio bi transplantat stražnjoj hrskavici kondila, što također nije biomehanički povoljno. Greben tako djeluje kao “prirodna granica” preko koje se ne prelazi, a služi kirurgu da tijekom bušenja orijentira smjer i položaj tako da ostane odmah iza grebena unutar anatomskog prostora ligamenta [82,127,129] (Slika 13).



Slika 13. Artroskopska snimka koljena. Prikazana je medijalna strana lateralnog kondila femura. Crvenim strelicama označen je lateralni interkondilarni greben (LIR, od engl. *lateral intercondylar ridge*).

Purnell i sur. 2008. su volumetrijskom CT analizom pokazali da LIR jasno omeđuje prednju granicu hvatišta ACL-a i preporučili su da se tijekom rekonstrukcije na artroskopskom prikazu tunel uvijek pozicionira odmah iza uočljivog grebena, obuhvaćajući tako cijelo hvatište [127].

Važnost grebena dolazi do izražaja osobito u kroničnim rupturama ACL-a, gdje su mekotkivne orijentacijske strukture (ostaci ligamenta) umanjene ili ih više nema. U

akutnih ozljeda kirurg često vidi preostala vlakna i krvarenje na hvatištu pa lakše odredi položaj tunela. Međutim, kod starih kroničnih ozljeda oslanja se na koštana omeđenja. Istraživanje je pokazalo da LIR ostaje vidljiv i u kronično nestabilnim koljenima te zadržava svoj značajni orijentacijski status bez obzira na protek vremena od ozljede [130].

U usporednoj studiji, artroskopski je procijenjena prisutnost grebena u bolesnika s subakutnim (< 6 mj) i kroničnim (> 12 mj) lezijama ACL-a. Greben je identificiran u 88 % slučajeva u obje skupine, bez značajne razlike [130]. To je suprotno ranijim tvrdnjama da bi greben, sukladno Wolffovom zakonu, mogao nestati zbog remodeliranja kosti nakon gubitka ligamenta i nestanka vlačnih sila [130]. U većini pacijenata on je bio nazočan unatoč kronicitetu ozljede ACL-a, te predstavlja koštani orijentir i godinama nakon puknuća ACL-a [130]. Stoga se preporučuje greben aktivno tražiti i prepoznati tijekom rekonstrukcije čak i kod kroničnih ozljeda, kako bi se tunel ispravno smjestio unutar izvornog hvatišta [130].

Dodatno, LIR je našao primjenu i u radiološkom planiranju te provjeri položaja tunela. Na profilnim radiogramima koljena, projekcija grebena može se odrediti u odnosu na Blumensaatovu liniju koja predstavlja radiološku projekciju krova interkondilarne udubine. Farrow i sur. su utvrdili da točka u kojoj greben siječe BL odgovara otprilike 79 % duljine BL [131].

Ovaj podatak upućuje da se na profilnim radiološkim snimkama distalnog femura anatomske postavljene femoralni tunel treba nalaziti iza LIR-a. Ovaj podatak je iznimno koristan pri izvođenju revizijskih operacija prednjeg križnog ligamenta kada je anatomija značajno narušena [122]. Mogućnost određivanja radiografske lokalizacije grebena predstavlja još jedan dokaz o upotrebljivosti ove anatomske strukture i njegove primjenjivosti ne samo tijekom operacijskog zahvata, već u planiranju operacija i radiološkoj kontroli postavljenja femoralnog tunela.

2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Polazimo od hipoteze da se LIR te femoralno hvatište ACL-a ne nalaze isključivo na medijalnom zidu lateralnog femoralnog kondila, već da se njihova struktura i anatomski raspored djelomično protežu i na krov interkondilarne udubine. Takva prostorna raspodjela mogla bi imati značajne kliničke implikacije u kontekstu anatomske preciznije rekonstrukcije ACL-a, posebice u smislu pozicioniranja femoralnog tunela.

Glavni cilj:

Kvantificirati površinu i oblik femoralne inzercije ACL-a u odnosu na koštane granice interkondilarne udubine uz trodimenzionalnu analizu raspodjele njezinih komponenti na medijalni zid lateralnog kondila i krov interkondilarne udubine.

Specifični ciljevi:

1. Detaljno analizirati morfologiju, duljinu i prostorni raspored LIR-a u odnosu na lateralni zid i krov interkondilarne udubine koristeći makroskopske analize na maceriranim preparatima.
2. Odrediti odnos LIR-a prema stražnjem kortikalnom zidu distalnog femura kao dodatnom intraoperacijskom orijentiru.
3. Odrediti morfološke odnose LIR-a i Blumensaatove linije (BL) pomoću radiološke analize, uključujući kutne odnose i točke presjeka.
4. Izmjeriti kut između LIR-a i tangente na stražnju kortikalnu stijenku distalnog femura radi razumijevanja prostornog odnosa između ključnih koštanih orijentira.
5. Analizirati anatomske karakteristike hvatišta ACL-a na svježim smrznutim kadaveričnim (nemaceriranim) preparatima i odrediti površinu i oblik femoralne inzercije ACL-a i usporediti s rezultatima dobivenim na maceriranim preparatima.

3. MATERIJAL I METODE

3.1. Ispitanici

Istraživanje je provedeno na anatomskim preparatima Zavoda za anatomiju Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci namijenjenih nastavi i provođenju edukacijskih programa studenata i liječnika. Jedan dio istraživanja proveden je na maceriranim preparatima distalnog femura, dok se drugi dio istraživanja temeljio na anatomskoj sekciji nemaceriranih preparata.

U sklopu ovog istraživanja analizirano je ukupno 45 maceriranih i 10 svježe smrznutih kadaveričnih preparata distalnog femura. Dob i spol donora nisu bili poznati. Iz analize su isključeni svi preparati koji su pokazivali znakove uznapredovalih osteoartritičnih promjena ili su imali vidljiva mehanička oštećenja lateralnog kondila femura i interkondilarne udubine. S obzirom na prirodu istraživanja, koje se temeljilo na morfološkoj analizi normalnih anatomskih varijacija, uključivanje kontrolne skupine nije bilo metodološki opravdano niti izvedivo.

Istraživanje je provedeno uz poštivanje, te u skladu sa svim bioetičkim standardima i svim temeljnim bioetičkim principima, sukladno načelima Nürnberškog kodeksa, te najnovijom revizijom Helsinške deklaracije i ostalim relevantnim međunarodnim smjernicama.

Istraživanje je odobreno od strane Etičkog povjerenstva za biomedicinska istraživanja Medicinskog fakulteta u Rijeci (broj protokola: 003–08/21–01/27; datum odobrenja: 27. travnja 2021.). Istraživanje je provedeno bez financijske potpore vanjskih izvora.

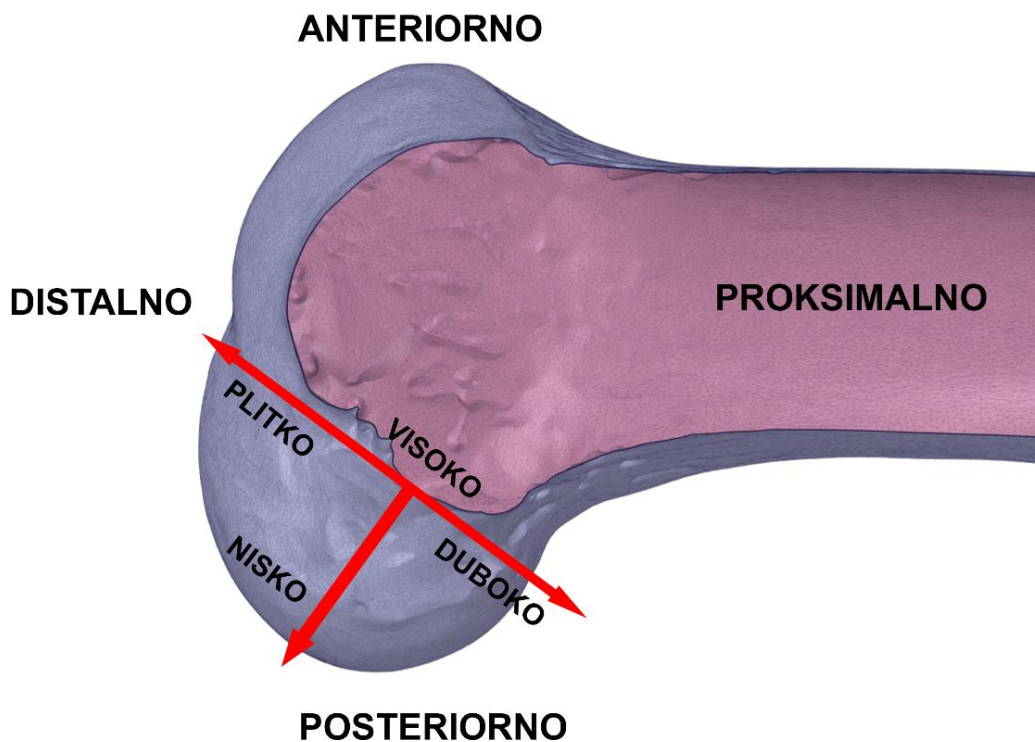
3.2. Plan istraživanja

1. Prvi dio istraživanja sastojao se od rendgenološke analize anatomskih struktura i njihovih međusobnih odnosa bitnih za anatomsku rekonstrukciju ACL-a. Rendgenološka obrada anatomskih uzoraka izvršena je u Klinici za ortopediju Lovran.

2. U drugom dijelu istraživanja distalne okrajke femura digitalno smo obrađivali 3D skeniranjem. Na 3D modelima analizirano je područje femoralne interkondilarne udubine s posebnim osvrtom na anatomske strukture koje se koriste kao orijentacijske točke pri postavljanju femoralnog tunela u anatomskoj rekonstrukciji ACL-a. Navedeni dio istraživanja izvršen je u Centru za napredno računanje i modeliranje Sveučilišta u Rijeci.

3. U trećem dijelu istraživanja vršili smo anatomske sekcije nemaceriranih preparata. Analizirano je područje femoralnog hvatišta ACL-a s naglaskom na odnos LIR-a i vlakana femoralnog hvatišta ACL-a. Navedeni dio istraživanja izvršen je na Zavodu za anatomiju Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci.

Tijekom svih dijelova istraživanja korištena je nomenklatura pri položaju koljena u kojem se vrše artroskopske operacije, a to je pri 90° fleksije, što je prikazano na slici 14.

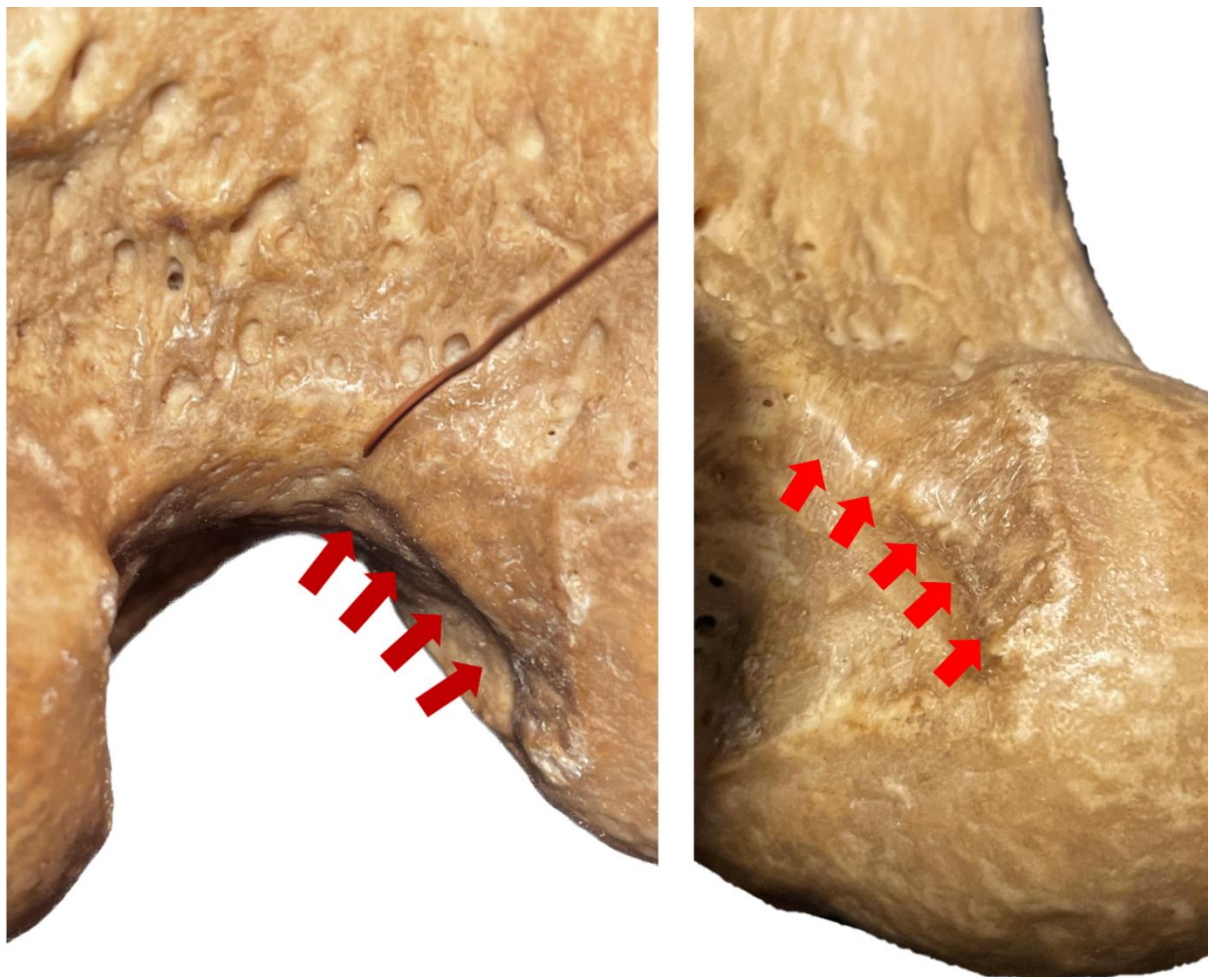


Slika 14. Položaj distalnog femura i korištena nomenklatura u istraživanju. Prikaz distalnog femura u sagitalnoj ravnini, presječen po sredini krova kako bi se prikazao medijalni zid lateralnog femoralnog kondila. Femur se nalazi u fleksiji od 90°, što odgovara položaju koljena tijekom artroskopije. Interkondilarna udubina se opisuje od plićeg segmenta prema dubljem, u anatomskom smjeru - od distalnog dijela prema proksimalnom, dok je visina interkondilarne udubine orijentirana od niže točke prema višoj što bi odgovaralo anatomskom smjeru posteriorno – anteriorno.

3.3. Rendgenološka analiza Blumensaatove linije i lateralnog interkondilarnog grebena

3.3.1. Tehnika rendgenološkog snimanja

U ovom dijelu istraživanja koristili smo 45 maceriranih preparata femura sa Zavoda za anatomiju Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Korišteni su samo uzorci na kojima je bio prisutan lateralni interkondilarni greben (Slika 15).



Slika 15. Prikaz lateralnog interkondilarnog grebena (LIR, od engl. lateral intercondylar ridge) na maceriranim preparatima femura.

LIR smo na svakom preparatu prekrili metalnom žicom debljine 1 mm. Žicu smo fiksirali transparentnim ljepilom. Osim LIR-a, na navedeni način označeni su i posterolateralni rub interkondilarne udubine (PLR, od engl. *posterolateral rim*) koji predstavlja anatomski završetak interkondilarne udubine i prijelaz u poplitealnu jamu. Tako pripremljene preparate fiksirali smo u posebno konstruiranom držaču za ovu namjenu kako bi mogli snimiti tzv. „pravi“ postranični rendgenografski snimak distalnog femura [132,133]. Prije snimanja, stražnje i distalne dijelove kondila poravnali smo upotrebom kutnika kako bi osigurali pravilan položaj u horizontalnoj i frontalnoj ravnini. Centralna zraka bila je usmjerena na distalni kondil femura (Slika 16 i Slika 17). Za rendgenološko snimanje korišten je digitalni RTG uređaj Shimadzu RADspeed Pro, Style Edition (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan). Sva rendgenografska mjerenja vršili smo upotrebom Image J programa (Image J version 1.53i, National Institutes of Health, Bethesda, Md).



Slika 16. Položaj i način fiksacije femura tijekom rendgenološkog snimanja.

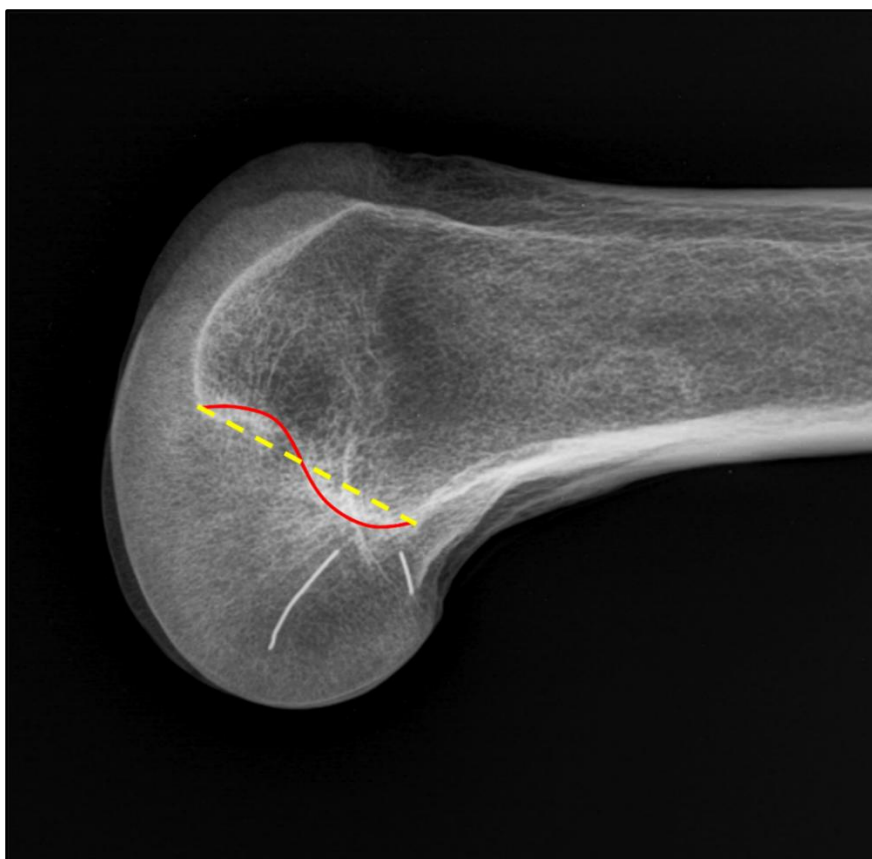


Slika 17. Rendgenološka postranična snimka distalnog femura. Žicom su označeni (a) lateralni interkondilarni greben (LIR, od engl. lateral intercondylar ridge) i (b) stražnji rub kondila femura.

3.3.2. Određivanje rendgenološkog oblika Blumensaatove linije

Analizu dobivenih radiograma započeli smo određivanjem oblika Blumensaatove linije (BL), koja na postraničnoj rendgenološkoj projekciji predstavlja sjenu krova interkondilarne udubine femura [134]. Kako bi lakše definirali oblik BL, prethodno smo na radiogramu konstruirali tzv. idealnu BL (iBL). iBL smo dobili spajanjem prednje i stražnje granice krova interkondilarne udubine.

Na temelju usporedbe stvarnog oblika BL s iBL, klasificirali smo odstupanja duž cijele njezine duljine. Odmicanje pojedinih dijelova native BL dobivene na ispitivanim preparatima od iBL-a prema proksimalno označili smo kao minus varijantu (-BL), odmicanja prema distalno kao plus varijantu (+BL). Poklapanje s iBL-om označili smo kao nula (0BL) varijantu (Slika 18).



Slika 18. *Određivanje oblika native Blumensaatove linije (BL) u odnosu na idealnu Blumensaatovu liniju (iBL). Žuta iscrtkana linija predstavlja iBL, dok crvena linija odgovara nativnoj BL.*

3.3.3. Određivanje rendgenološke gustoće Blumensaatove linije

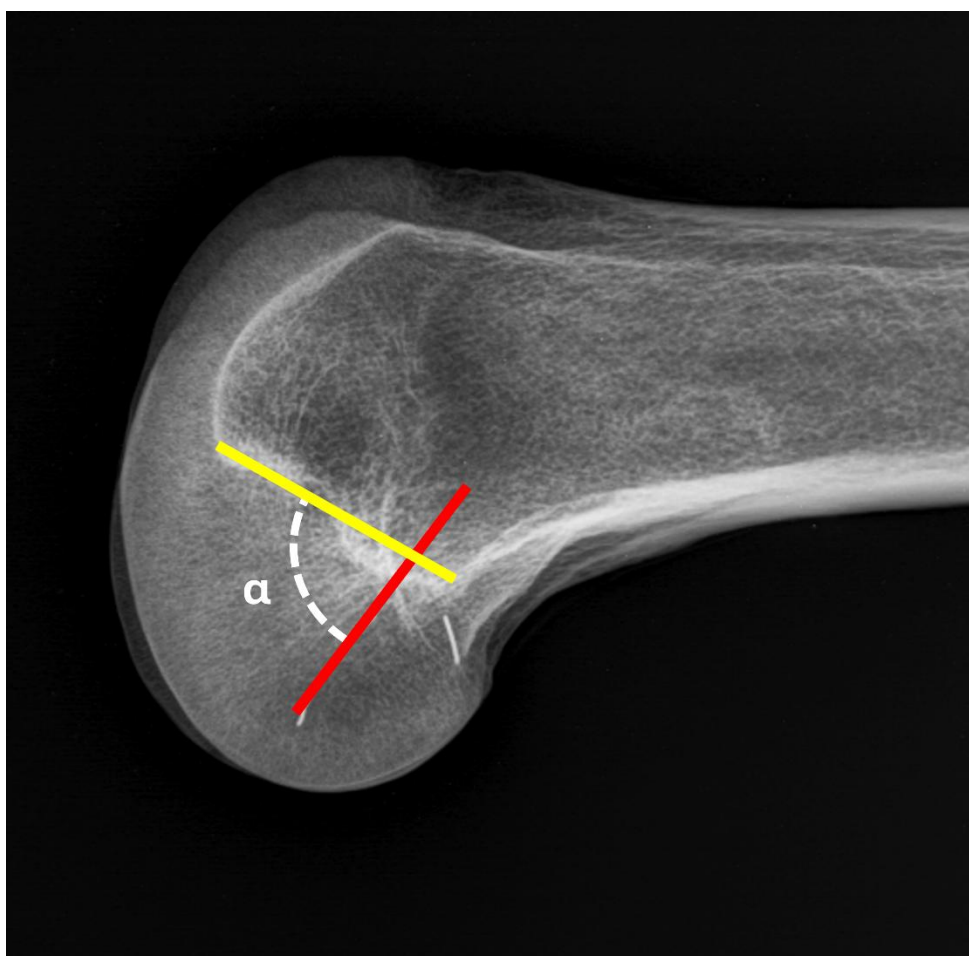
Deskriptivnom metodom analizirali smo rendgenološku gustoću BL. Kao referentne vrijednosti za interpretaciju gustoće koristili smo dvije jasno definirane referentne razine intenziteta: intenzitet kortikalne kosti i intenzitet spongiozne kosti, koji su poslužili kao orijentir za kvalitativnu i kvantitativnu procjenu gustoće BL na rendgenološkim snimkama (Slika 19).



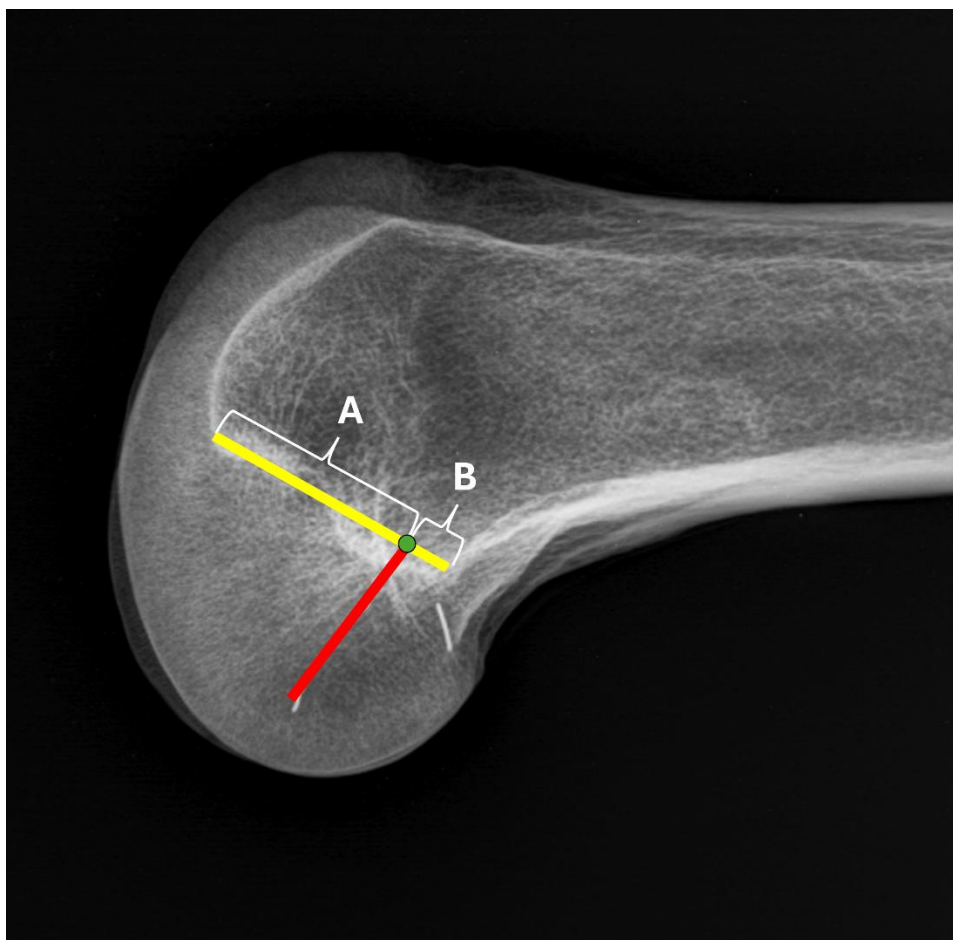
Slika 19. *Određivanje rendgenološke gustoće Blumensaatove linije. gA i gC - segmenti s većom rendgenološkom gustoćom (granice označene crvenim linijama); gB – segment s manjom rendgenološkom gustoćom (granice označene žutim linijama).*

3.3.4. Određivanje položaja LIR-a u odnosu na Blumensaatovu liniju

Nakon provedene analize morfologije BL-a, pristupili smo određivanju prostornog odnosa LIR-a prema BL. Taj smo odnos kvantificirali mjerenjem kuta koji zatvaraju LIR i iBL, kao i određivanjem omjera BL ispred i iza točke u kojoj se LIR spaja s BL. Time smo dobili uvid u prostornu povezanost ovih dviju važnih anatomskih struktura na bočnoj rendgenografskoj projekciji (Slika 20 i Slika 21).



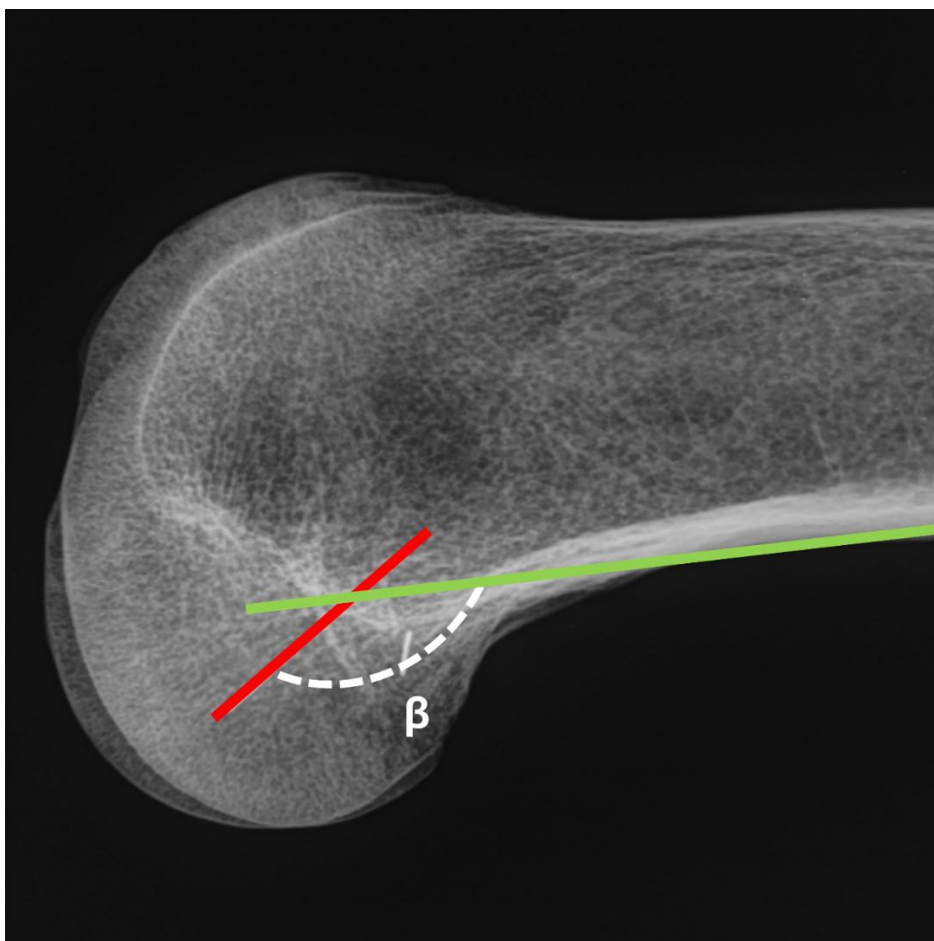
Slika 20. Određivanje kuta LIR - iBL. Crvena linija predstavlja LIR, žuta linija predstavlja iBL, α je kut koji LIR i iBL međusobno zatvaraju. LIR – lateralni interkondilarni greben; iBL - idealna Blumensaatova linija.



Slika 21. *Određivanje segmenata idealne Blumensaatove linije (iBL) ispred i iza sjecišta s lateralnim interkondilarnim grebenom (LIR). Žutom bojom označena je iBL, crvenom bojom označen je LIR, zelena točka predstavlja mjesto u kojem LIR siječe iBL. Duljina A predstavlja dio iBL-a ispred (anteriorno) od spojnice sjecišta LIR - iBL; duljina B predstavlja dio iza (posteriorno) od sjecišta LIR – iBL.*

3.3.5. Određivanje položaja LIR-a u odnosu na tangentu stražnje kortikalne stijenke distalnog femura

U sljedećem koraku analizirali smo prostorni odnos LIR-a prema stražnjoj kortikalnoj stijenci distalnog dijela femura. Odredili smo kut koji LIR zatvara s tangentom postavljenom uz stražnju kortikalnu konturu femura (PCT, od engl. *posterior femoral cortex tangent*), kao i točan položaj LIR-a u odnosu na tu tangentu (Slika 22).



Slika 22. *Određivanje položaja lateralnog interkondilarnog grebena (LIR) u odnosu na tangentu stražnje kortikalne kosti distalnog femura (PCT). Crvena linija označava LIR, zelena linija označava PCT, kut β označava kut koji zatvaraju ove dvije linije.*

3.3.6. Statistička analiza

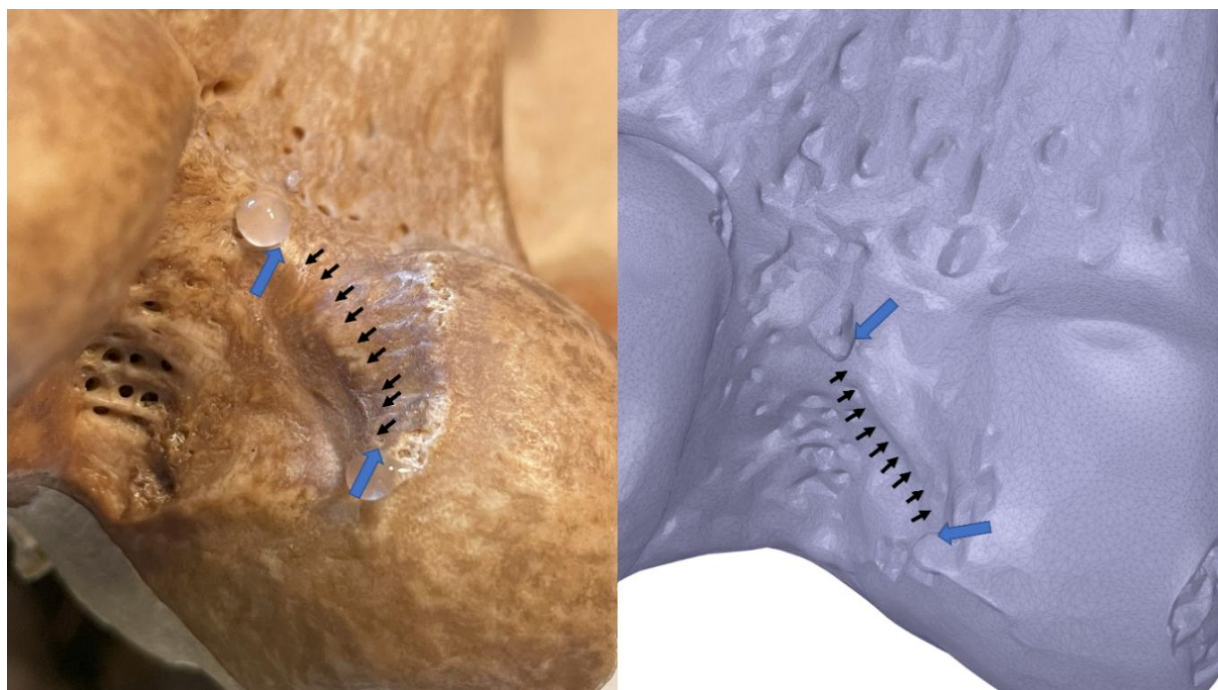
Analiza podataka za ovaj dio istraživanja provedena je korištenjem programskog alata Statistica, verzija 13.5.0.17 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, SAD). Korištena je deskriptivna statistika kojom su obuhvaćeni izračuni aritmetičke sredine (*mean*), standardne devijacije ($\pm$ SD), medijana te raspona (*range*).

3.4. Digitalno skeniranje i trodimenzionalna (3D) analiza interkondilarne udubine

3.4.1. Tehnika 3D skeniranja distalnog femura

U ovom dijelu analize korišteni su istih 45 preparata femura sa Zavoda za anatomiju Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Vrijede isti isključni kriteriji koje smo primjenjivali pri rendgenološkoj obradi preparata, tako da su se koristili samo preparati na kojima je prisutan LIR.

Prije skeniranja, dva iskusna ortopeda analizirala su sve femure uključene u istraživanje te su na svakom preparatu označili početnu i završnu točku LIR-a sa silikonskim ljepilom. Te su oznake poslužile kao referentne točke za naknadno mjerenje duljine LIR-a pomoću programskog alata. Važno je naglasiti da same oznake nisu bile uključene u izračun duljine LIR-a (Slika 23).



Slika 23. LIR na maceriranim preparatima i na 3D digitalnom prikazu. Prikaz interkondilarne udubine sa stražnje strane izlaza. Početak i kraj LIR-a označeni su plavim strelicama, dok su crnim strelicama označene njegove granice, kako bi tijekom 3D analize bile jasno uočljive. Lijevo je prikazan macerirani preparat femura, a desno njegova 3D rekonstrukcija. LIR – lateralni interkondilarni greben.

Nakon označavanja, svi su preparati bili podvrgnuti trodimenzionalnom (3D) skeniranju pomoću ATOS II i ATOS III sustava s trostrukom kamerom. Ovaj optički uređaj za trodimenzionalno mjerenje temelji se na principu triangulacije: projicira uzorak paralelnih linija na površinu objekta, a potom dvije digitalne kamere snimaju reflektirane linije. Na temelju podataka o svakom pojedinom pikselu, uređaj s visokim stupnjem preciznosti izračunava trodimenzionalne koordinate odgovarajućih točaka na površini skeniranog objekta. Na taj se način generira poligonalna mreža (3D model) koja vjerno opisuje oblik digitaliziranog objekta.

Skeniranje se vršilo na način da se femur fiksira u držaču, koji je posebno izrađen za ovu namjenu. Tijekom skeniranja platforma se rotira brzinom od 200 okretaja u minuti uz istovremeno snimanje kamerama brzinom snimanja od 10 slika u sekundi (Slika 24).



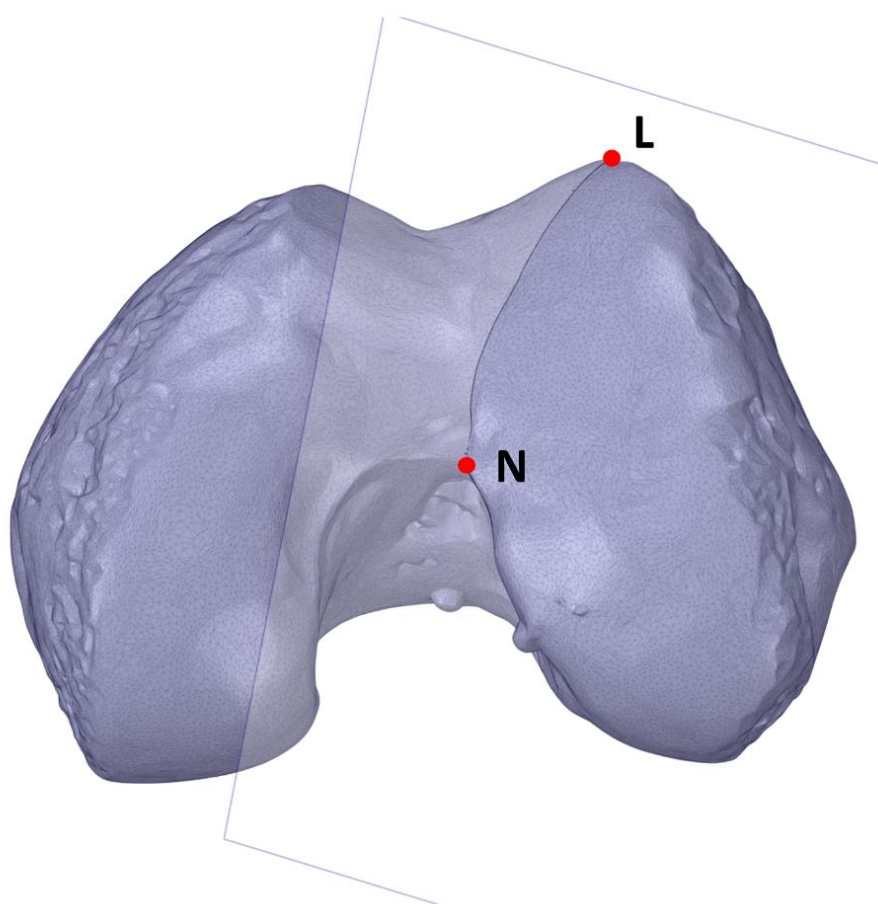
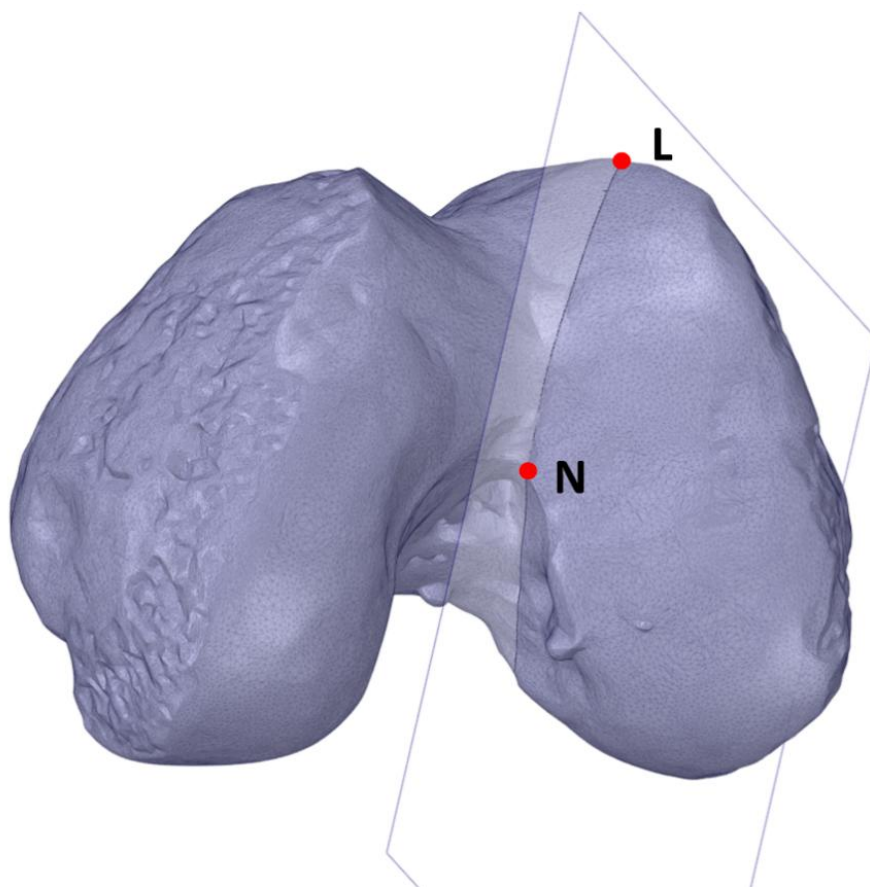
Slika 24. Trodimenzionalno (3D) skeniranje femura pomoću ATOS II i ATOS III sustava s trostrukom kamerom. Slika prikazuje položaj femura na podlozi koja se tijekom skeniranja rotira.

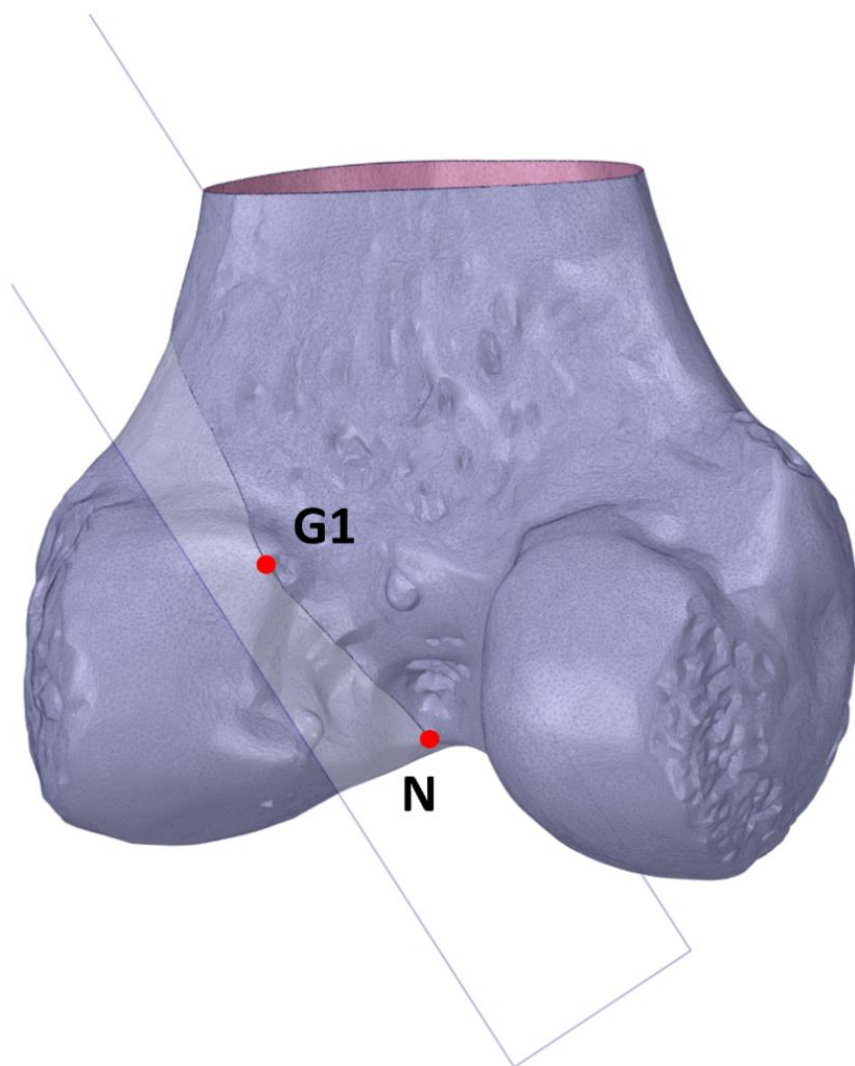
Skenirane slike pohranjene su u formatu Standard Triangle Language (.stl), a daljnja analiza provedena je uz pomoć programskog alata Analysis SpaceClaim (verzija 2020, SpaceClaim Corporation, Concord, Massachusetts, SAD), koji je specijaliziran za obradu i modeliranje 3D objekata. Ova se metoda u više navrata pokazala kao preciznija i manje podložna pogreškama u usporedbi s korištenjem mikroskriba [135].

Za potrebe jasnoće anatomske segmentacije, definirana je referentna ravnina koja je odvajala krov od lateralnog zida interkondilarne udubine. Ta je ravnina definirana pomoću triju referentnih točaka:

- Točka N: najdistalnija, visoka/ plitka točka na rubu hrskavice lateralnog kondila, smještena u prednjem izlazu iz interkondilarne udubine;
- Točka G1: najproksimalnija, visoka/ duboka točka hrskavičnog ruba lateralnog kondila. Na 3D modelu prepoznaje se kao mjesto gdje se stražnja interkondilarna linija spaja s hrskavicom lateralnog kondila;
- Točka L: određena u koronarnoj (frontalnoj) ravnini pri 90° fleksije, predstavlja najistaknutiju i najvišu točku lateralnog ruba femoralne trohlee lateralnog kondila.

Spajanjem ovih triju točaka (G1, N i L) definirana je ravnina koja je poslužila kao rezna ravnina u trodimenzionalnoj analizi. Ta je ravnina prolazila kroz mjesto najmanjeg radijusa zakrivljenosti interkondilarne udubine, te je time jasno razdvajala krov od zida interkondilarne udubine (Slika 25).

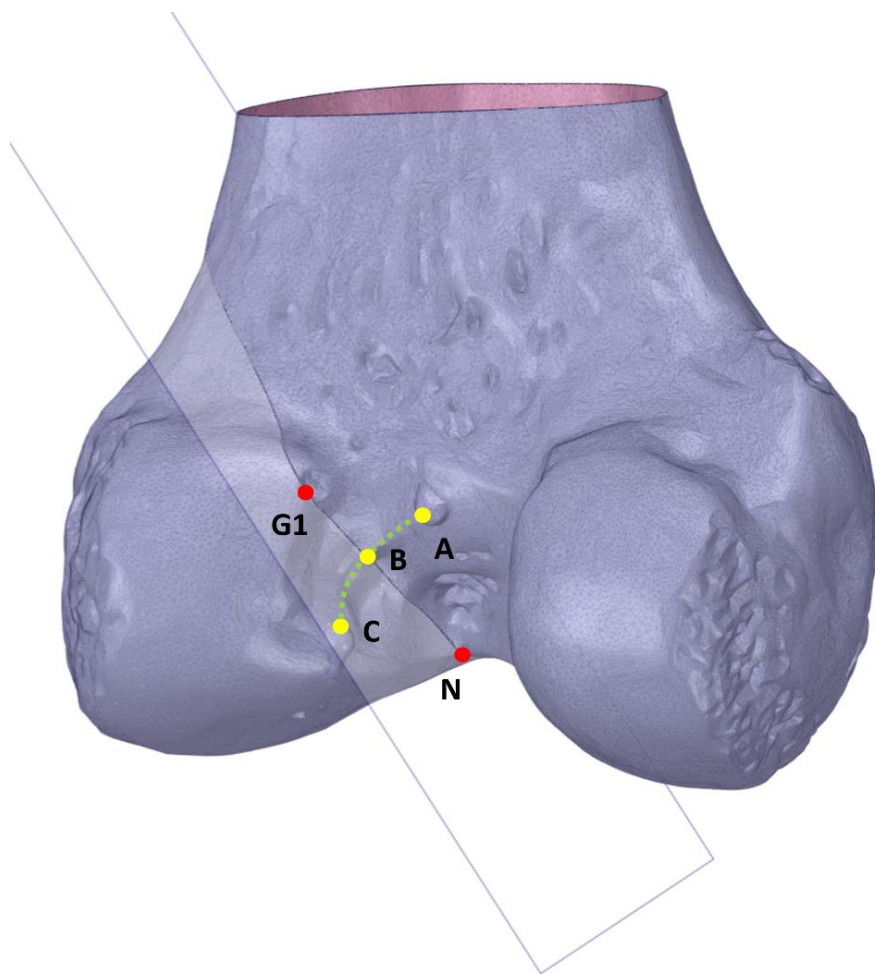
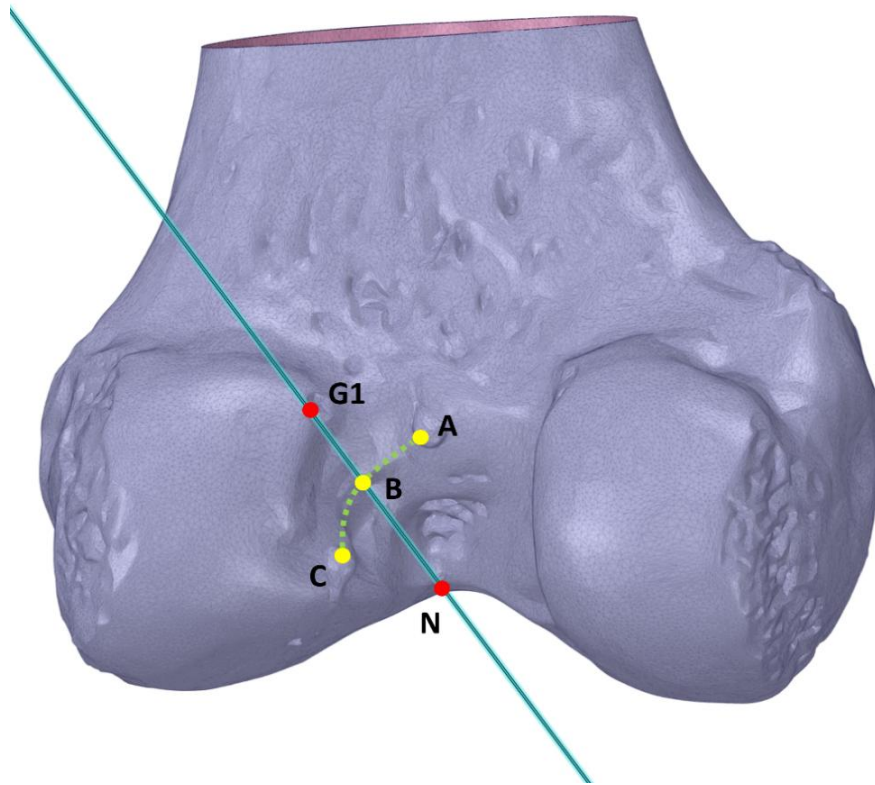




Slika 25. Formiranje ravnine koja odvaja krov od lateralnog zida interkondilarne udubine. Trodimenzionalni prikaz distalnog femura s označenim točkama u tri različita kuta gledanja istog modela. N označava najdistalniju, visoku/plitku točku na prednjem izlazu iz interkondilarne udubine. L je najistaknutija i najviša točka lateralnog ruba femoralne trohleje lateralnog kondila. G1 označava najproksimalniju, visoku/ duboku točku na granici hrskavice lateralnog femoralnog kondila.

Kroz točke G1, L i N prolazi ravnina koja razdvaja krov i lateralni zid interkondilarne udubine. Ova metoda razgraničenja krova i zida interkondilarne udubine predstavlja modifikaciju pristupa koji su prethodno opisali Luites i suradnici [136]. Dok su oni koristili dvije točke (N i G1) za definiranje ravnine, u ovom istraživanju je, radi veće preciznosti i bolje ponovljivosti mjerenja, uvedena dodatna točka – L. Uključivanjem treće točke omogućeno je preciznije definiranje referentne ravnine koja s većom točnošću razgraničava krov i zid interkondilarne udubine u prostoru.

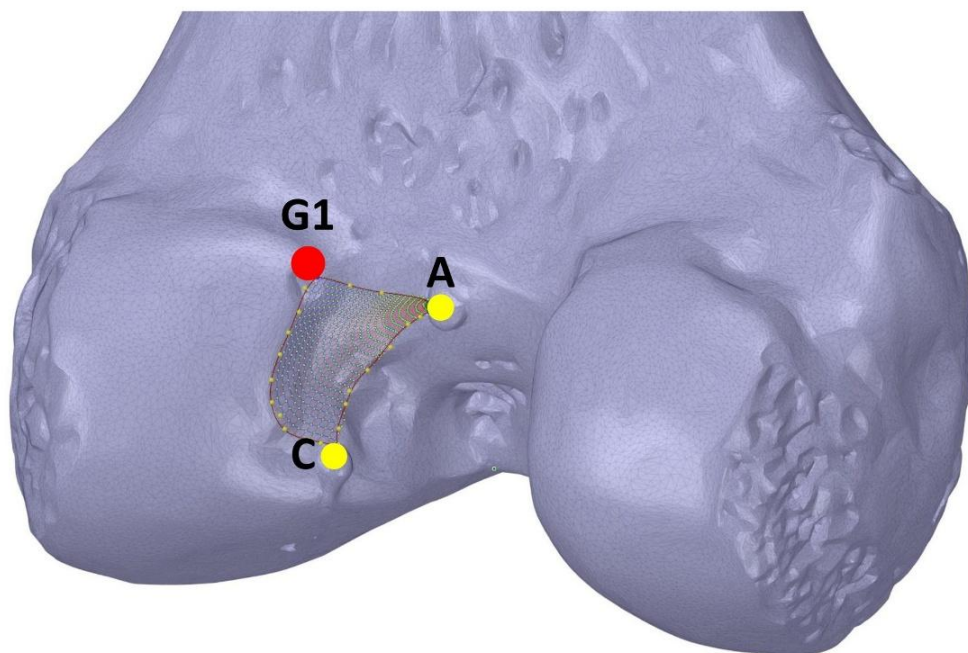
Na svakom 3D modelu LIR je označen trima točkama: A – početak grebena, C – završetak grebena, i B – točka u kojoj ravnina koja dijeli krov i zid presijeca LIR (Slika 26). Točke A i C bile su lako prepoznatljive zahvaljujući prethodno postavljenim oznakama prije skeniranja.



Slika 26. Položaj lateralnog interkondilarnog grebena (LIR-a) u području lateralnog zida i krova interkondilarne udubine. Pogled u stražnji dio distalnog femura (3D modela) iz dva različita kuta. Plavom bojom je prikazana ravnina koja prolazi kroz prethodno određene točke te razdvaja gornju (krovnu) površinu od bočne (lateralne) stijenke interkondilarne udubine. Točka A označava početak LIR-a, točka B označava mjesto gdje ta ravnina presijeca LIR, dok je točka C kraj grebena. G1 predstavlja najproksimalniju, duboku i visoku točku na rubu hrskavice lateralnog kondila femura, a N označava najdistalnu, plitku i visoku točku na rubu hrskavice lateralnog kondila, a smještenu na prednjem izlazu iz interkondilarne udubine.

Površina femoralnog hvatišta ACL-a (ACL-FIA od engl. *anterior cruciate ligament femoral insertion area*) definirana je anatomskim strukturama koje su opisane kao njegova omeđenja. Ova površina određena je pomoću tri linije: Prvu liniju predstavlja LIR, od početne točke A do završne točke C, drugu liniju predstavlja rub zglobove hrskavice lateralnog kondila, između točaka C i G1, dok treća linija povezuje točku A s točkom G1. Točka G1 označava najviše smještenu i najdublju točku na rubu hrskavice lateralnog kondila femura.

Površina ACL-FIA precizno je rekonstruirana korištenjem programskog alata "skinsurface", koji omogućuje označavanje, odvajanje i mjerenje bilo koje površine na 3D modelima. Time je omogućeno detaljno mjerenje površine, oblika i granica rekonstruirane zone femoralne inzercije ACL-a (Slika 27).



Slika 27. Prikaz koštanog područja insercije vlakana prednjeg križnog ligamenta (ACL-a). Definiranje površine femoralnog hvatišta ACL-a (ACL-FIA) pomoću funkcije “skinsurface” u programskom alatu: Točka A - početak lateralnog interkondilarnog grebena (LIR-a); Točka C - završetak LIR-a; Točka G1 - najlateralnija točka stražnje interkondilarne linije. Spojnica A-C odgovara LIR-u i čini prednju granicu ACL-FIA; spojnica G1-C odgovara hrskavičnom rubu lateralnog kondila femura i čini donju granicu ACL-FIA; spojnica A-G1 predstavlja stražnju granicu ACL-FIA.

Na temelju prethodno definiranih točaka, ravnina i površina, provedena su sljedeća morfometrijska mjerenja: duljina LIR-a na krovu (A–B), duljina LIR-a na zidu (B–C), ukupna duljina LIR-a (A–C), te duljina proksimalne granice ACL-FIA (A–G1). Nadalje, izračunata je ukupna površina ACL-FIA te njezina distribucija na krovu i na zidu interkondilarne udubine. Konačno, izmjerena je i najkraća udaljenost između najproksimalnijeg dijela LIR-a (točka A) i stražnje interkondilarne linije (PICL, od engl. *posterior intercondylar line*), čime je dodatno definiran prostorni raspored ključnih anatomskih orijentira u distalnom femuru.

3.4.2. Statistička analiza

Analiza podataka za potrebe ovog dijela istraživanja provedena je korištenjem programskog alata Statistica, verzija 13.5.0.17 (TIBCO Software Inc.). Za prikaz osnovnih deskriptivnih podataka korišteni su aritmetička sredina (*mean*), standardna devijacija ($\pm$ SD), medijan te raspon vrijednosti (*range*). Normalnost distribucije podataka ispitana je primjenom Kolmogorov-Smirnovljeva testa.

Za procjenu povezanosti između postotnog udjela lateralnog interkondilarnog grebena (LIR%) koji se nalazi na krovu interkondilarne jame te širine same jame (označene kao udaljenost između točaka G1 i G2), korišten je Pearsonov koeficijent korelacije. Statistički značajna povezanost potvrđena je za *p* vrijednosti manje od 0,005.

Također je provedena *a priori* analiza snage testa s ciljem određivanja potrebne veličine uzorka za postizanje statističke značajnosti rezultata. Korištenjem programskog alata GPower*, verzija 3.1.9.7 (Faul i sur., 2007), i uz postavljenu snagu testa (*power*) od 0,80, razinu značajnosti od 0,05 te veličinu učinka (*effect size*) procijenjenu na temelju podataka iz prethodnih istraživanja, izračunato je da je za otkrivanje statistički značajnog učinka potrebna minimalna veličina uzorka od 29 ispitanih preparata.

Dva iskusna ortopeda neovisno su identificirala anatomske orijentire i određivala sve potrebne točke na 3D prikazu femura, potrebne za konstrukciju ravnina i izvođenje mjerenja. Svaki od njih radio je zasebno i nije imao uvida u pozicioniranje i identifikaciju točaka koje je prethodno odredio drugi promatrač. Postupak označavanja i mjerenja ponovljen je nakon dva mjeseca, pri čemu je redoslijed analiziranih 3D prikaza bio nasumično izmiješan.

Pouzdanost unutar i između promatrača (*intraobserver i interobserver reliability*) ocijenjena je primjenom intraklasnog koeficijenta korelacije (ICC, od engl. Intraclass Correlation Coefficient). Dobivene ICC vrijednosti interpretirane su prema standardnim klasifikacijama: slaba pouzdanost ($ICC \leq 0,40$), umjerena do dobra pouzdanost ($0,40 < ICC < 0,75$) te izvrsna pouzdanost ($ICC \geq 0,75$). Statistička analiza ICC vrijednosti provedena je uz pomoć programskog alata SPSS, verzija 16.0.1 (SPSS Inc., Illinois, SAD).

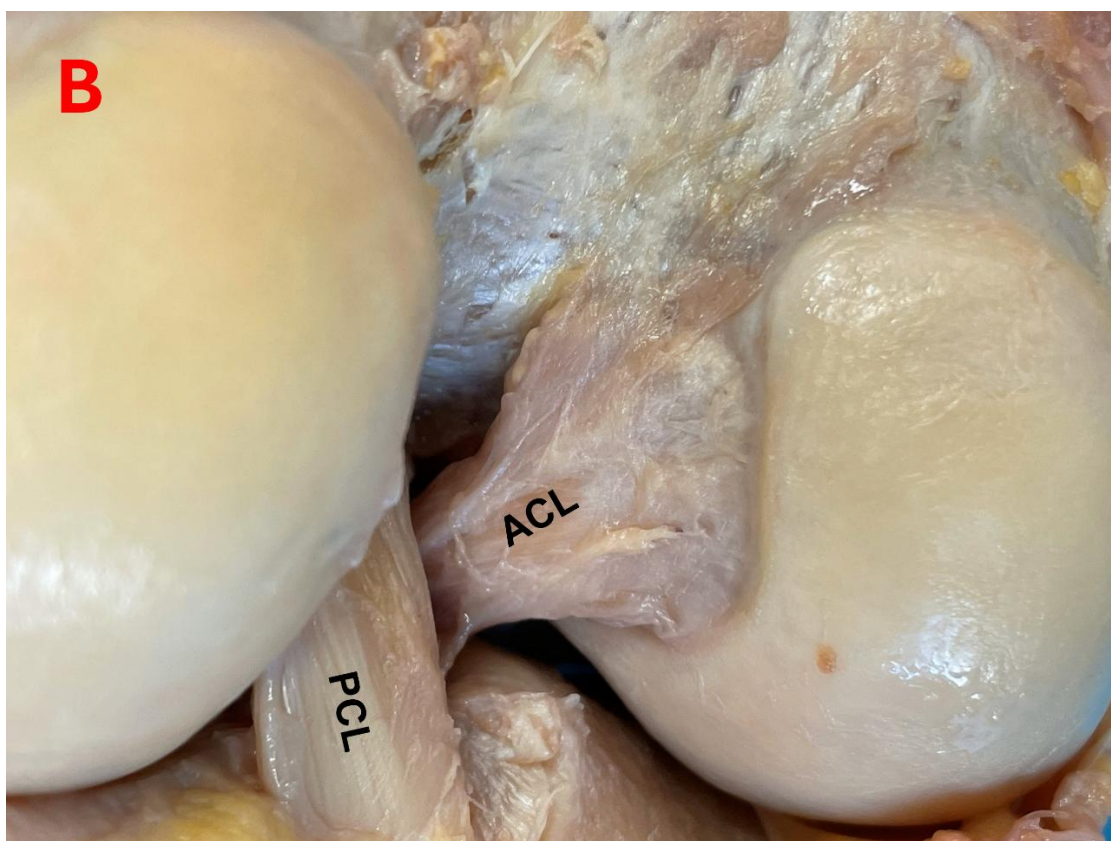
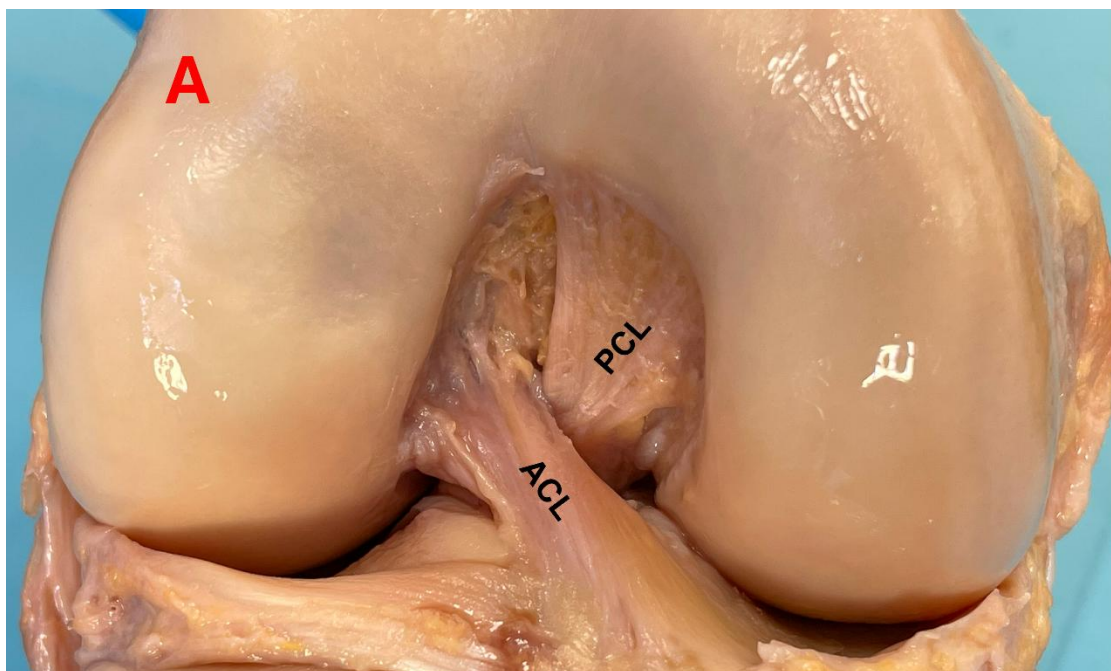
3.5. Anatomska sekcija nemaceriranih preparata koljena

U trećem dijelu istraživanja provedene su detaljne anatomske disekcije na deset svježe smrznutih ljudskih koljena kadaverskog porijekla. Preparati su također pribavljeni sa Zavoda za anatomiju Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Svi uzorci s izraženim degenerativnim i upalnim promjenama, deformitetima, prethodnim operacijskim zahvatima ili uzorci koji su prethodno imali ozljedu ACL-a bili su isključeni iz analize.

Preparati su najprije postepeno odmrznuti na sobnoj temperaturi kroz period od najmanje 24 sata, kako bi se izbjegla denaturacija mekih tkiva naglim temperaturnim promjenama. Nakon potpune rehidracije i povratka tkiva u gotovo fiziološko stanje, pristupilo se kirurškoj obradi i pripremi uzoraka.

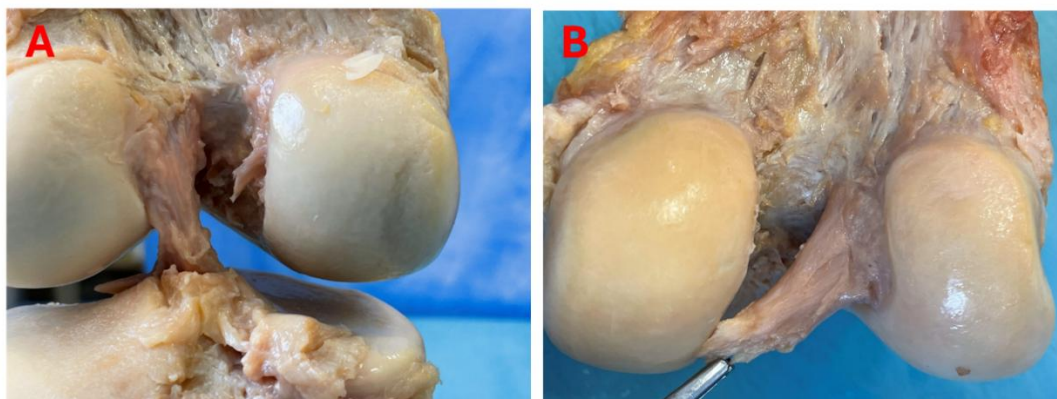
Sva ekstraartikularna tkiva, uključujući kožu, potkožno masno tkivo, mišiće tetive kvadricepsa, pažljivo su odstranjena uz pomoć standardnih kirurških instrumenata (nož br. 10, 11, pean, retraktori, pincete). Uklanjanje periartikularne muskulature omogućilo je potpuni pristup zglobojnoj kapsuli i izvođenje sljedećih koraka u optimalnim anatomskim uvjetima.

Zglobna kapsula i sinovijalna membrana u cijelosti su odstranjene, čime je postignuta potpuna izloženost intraartikularnih struktura: femoralnih kondila, tibijalnog platoa, meniskusa, te ACL-a i stražnjeg križnog ligamenta (PCL od engl. *posterior cruciate ligament*). Anatomska disekcija se provodila s naglaskom na očuvanju integriteta ACL-a tijekom svih faza manipulacije (Slika 28).



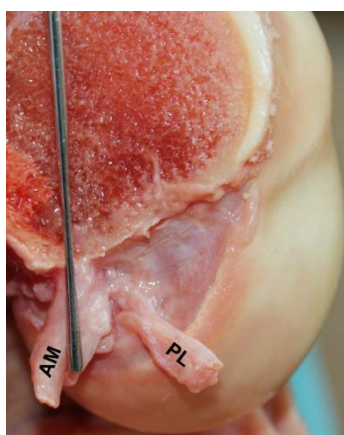
Slika 28. Prikaz prednjeg križnog ligamenta (ACL) i stražnjeg križnog ligamenta (PCL) nakon disekcije. (A) Prednji dio i (B) stražnji dio koljena nakon odstranjenja periartikularnog tkiva i sinovijalne ovojnice oko križnih ligamenata.

Nakon početnog dokumentiranja nativnog izgleda oba križna ligamenta, PCL je uklonjen u cijelosti, kako bi se omogućio nesmetan prikaz i obrada ACL-a bez biomehaničkih smetnji. Zatim je, upotrebom preciznih rezova i minimalno invazivnog odvajanja tkiva, tibija odvojena od femura, čime je dobiven uzorak koji se sastojao isključivo od femura i cjelovitog ACL-a (Slika 29).



Slika 29. Disekcija koljena. (A) preparat nakon uklanjanja stražnjeg križnog ligamenta; (B) preparat nakon uklanjanja tibije.

U ovoj fazi istraživanja pristupilo se makroskopskoj identifikaciji pojedinačnih snopova ACL-a. Snopovi su definirani prema njihovom anatomskom položaju: AM snop i PL snop. Snopovi su identificirani vizualno i palpacijom pomoću anatomske sonde, a broj i međusobni odnosi dokumentirani su fotografijama visoke rezolucije (Slika 30).



Slika 30. Identifikacija snopova prednjeg križnog ligamenta (ACL-a). Sonda je u kontaktu s anteromedijalnim (AM) snopom, dok je posterolateralni (PL) snop slobodan.

Nakon toga, izvedena je osteotomija femura oscilirajućom kirurškom pilom (Stryker®, brzina 6.000 okretaja u minuti). Osteotomija je učinjena u sagitalnoj ravnini koja prolazi medijalno od vrha krova interkondilarne udubine. Cilj osteotomije je bio ukloniti medijalni kondil femura. Na taj način omogućena je detaljna analiza hvatišta ACL-a u njegovoj trodimenzionalnoj konfiguraciji te odnos prema krovu i lateralnom zidu interkondilarne udubine (Slika 31).



Slika 31. *Preparat distalnog femura nakon uklanjanja medijalnog kondila.*

U sljedećem koraku, postupno je odstranjen PL snop ACL-a, kako bi se omogućila izolirana analiza AM snopa i njegov odnos spram LIR-a i krova interkondilarne udubine (Slika 32). Ovime je dodatno omogućen uvid u diferencijalnu distribuciju snopova u odnosu na topografiju interkondilarne udubine. Posebna pažnja pridavala se analizi distribucije vlakana u odnosu na LIR.



Slika 32. *Seciranje hvatišta prednjeg križnog ligamenta (ACL-a). Plavom tintom je označeno područje nakon uklanjanja vlakana ACL-a koja su se nalazila na lateralnom zidu interkondilarne udubine. Preostali dio vlakana ACL-a polazio je s krova interkondilarne udubine.*

Svi uzorci su fotografirani sa Sony α 7CII kamerom i objektivom Tamron Di III VXD G2 28-75 mm F/2.8 radi dokumentacije. Svi uzorci analizirani su pod uvjetima laboratorijskog svjetla, na temperaturi od 22–24 °C i relativnoj vlažnosti od približno 50 %.

Budući se radilo o deskriptivnoj kadaveričnoj anatomske studiji, svi podaci analizirani su kvalitativno i kvantitativno pomoću jednostavne deskriptivne statistike (frekvencije i postoci). Glavni fokus bio je na vizualnoj identifikaciji anatomske strukture i njihovoj distribuciji među uzorcima.

4. REZULTATI

4.1. Rezultati rendgenološkog snimanja distalnog femura

Analizom rendgenološke gustoće Blumensaatoeve linije jasno su se mogla razaznati tri segmenta. Kako bi se okarakterizirali navedeni segmenti, provedena je i subjektivna procjena njihove radiološke gustoće, koju su neovisno izvršila dva liječnika. Uočen je prepoznatljiv obrazac: prednji segment (gA) i stražnji segment (gC) pokazivali su gustoću tipičnu za kortikalnu kost, dok je središnji segment (gB) pokazivao nižu rendgenološku gustoću, usporedivu sa spongioznom strukturom (Slika 19). Nadalje, analiza proporcionalnih duljina pokazala je da je segment gC (stražnji) bio najduži, s medijanom od 60 % duljine iBL-a (raspon 11,87 %). Duljina prednjeg segmenta gA imala je medijan od 21,11 %, dok je segment gB (srednji segment) bio najkraći, s medijanom od 18,89 % i rasponom od 4,92 % (Slika 19).

Nakon što smo odredili gustoću BL po segmentima, izvršena je analiza oblika BL na svim postraničnim snimkama preparata femura u odnosu na idealnu BL. iBL je ravna crta koja najkraćim putem spaja prednju i stražnju granicu krova interkondilarne udubine. Naši rezultati su pokazali da je 11 preparata (24,4 %) imalo BL tip 0BL, što znači da je BL bila ravna i da se u cijelosti poklapala s iBL. U preostalih 34 uzoraka (75,6 %) stražnji dio bio je izbočen distalno u odnosu na iBL, što je odgovaralo +BL tipu.

Kako bi rendgenološki odredili položaj LIR-a, na maceriranim preparatima isti smo prekrili žicom debljine 1 mm kako bi jasno bio vidljiv na radiogramima. Prvo smo odredili kut α koji zatvaraju iBL i LIR. Rezultati su pokazali da je prosječna vrijednost kuta između ovih dviju struktura iznosila $70,13^\circ$ (SD $12,69^\circ$), s medijanom od $69,80^\circ$, dok je raspon vrijednosti iznosio $55,22^\circ$ (Slika 20).

Nadalje, kako bi preciznije odredili položaj LIR-a u odnosu na iBL, osim kuta LIR – iBL, odredili smo i točku u kojoj se LIR spaja s iBL. Na temelju te točke definirana su dva segmenta: prednji dio BL-a, smješten ispred sjecišta, označen je kao segment A, dok je stražnji dio iza sjecišta označen kao segment B. Duljine ovih segmenata izražene su u postocima ukupne duljine iBL-a, jer bi upotreba apsolutnih vrijednosti, s obzirom na moguće varijacije u radiološkom povećanju, smanjila komparabilnost

rezultata. Stražnji segment (B), koji se nalazi distalno od sjecišta, u prosjeku je iznosio 14,66 % duljine iBL-a (SD 6,76 %), dok je prednji segment (A) obuhvaćao 85,35 % duljine (SD 6,67 %). Iz tih mjerenja proizlazi omjer od 1:5,82 (približno 1:6), što znači da je prednji segment bio otprilike šest puta dulji od stražnjeg. Na temelju kuta LIR - iBL i mjesta sjecišta navedenih linija, omogućeno nam je da na postraničnim rendgenološkim snimkama odredimo položaj LIR-a (Slika 21).

Nakon prethodno provedene analize, a u svrhu preciznijeg određivanja položaja LIR-a na rendgenološkim snimkama, dodatno je analiziran njegov prostorni odnos prema tangenti stražnje kortikalne kosti distalnog femura (PCT linija). Ova anatomska referentna linija dosljedno je jasno uočljiva na lateralnim radiografskim prikazima. Rezultati ove analize pokazali su da prosječni kut koji zatvaraju LIR i PCT iznosi $143,61^{\circ}$ (SD $7,91^{\circ}$), dok je medijan iznosio $145,44^{\circ}$, uz ukupni raspon vrijednosti od $28,89^{\circ}$ (Slika 22).

4.2. Rezultati 3D analize distalnog femura

Nakon što smo rendgenološki odredili položaj LIR-a, pristupili smo trodimenzionalnoj analizi distalnog femura korištenjem 3D kamere. Ova vrsta analize omogućuje nam točno određivanje morfometrijskih osobina LIR-a i koštanog područja femoralne insercije ACL-a u odnosu na lateralni zid i krov interkondilarne udubine. Za razliku od rendgenološke analize, u ovom smo dijelu istraživanja, osim postotnih vrijednosti i omjera, primjenjivali i apsolutne mjere, budući da takva metoda omogućuje dobivanje podataka koji su usporedivi s anatomske vrijednostima *in vivo*. Nakon što je položaj LIR-a definiran prethodno opisanom metodom i snimljen 3D kamerom, pristupili smo njegovoj analizi. Najprije je mjerena ukupna duljina LIR-a. Rezultati su pokazali da je prosječna duljina LIR-a iznosila 16,18 mm (SD 1,44 mm), s medijanom od 16,17 mm.

ACL-FIA površinu, čija omeđenja čine: LIR s prednje strane, hrskavica lateralnog kondila femura u distalnom dijelu, te spojnica ove dvije anatomske strukture sa stražnje strane, određivali smo korištenjem programskog alata "*skinsurface*".

Površina ACL-FIA u prosjeku je iznosila 134,19 mm² (SD 34,17 mm²), s medijanom od 135,25 mm².

Kako bi odredili dio LIR-a i ACL-FIA koji se nalaze na krovu, odnosno na lateralnom zidu interkondilarne udubine modificirali smo metodu Luitesa i sur. [136]. Za razliku od prethodnih autora, čija se metoda temeljila na određivanju pravca pomoću dviju točaka, naša modificirana tehnika koristi tri prostorno definirane točke kako bi se formirala precizna ravnina razdvajanja zida i krova interkondilarne udubine, čime je prilagođena za trodimenzionalnu analizu i mjerenje kompleksnih anatomskih struktura poput LIR-a i ACL-FIA.

Rezultati su pokazali da prosječna duljina LIR-a smještenog na krovu interkondilarne udubine iznosila je 5,02 mm (SD 1,19 mm), dok je dio smješten na zidu iznosio 11,16 mm (SD 1,21 mm) (Tablica 1). Izraženo u postotnim vrijednostima, prosječan postotak LIR-a smještenog na krovu iznosio je 30,86 % (SD 6,21 %), s medijanom od 30,76 % (Tablica 2). Površina ACL-FIA smještena na krovu iznosila je prosječno 42,58 mm² (SD 14,39 mm²), dok je površina na zidu iznosila 91,61 mm² (SD 25,35 mm²). Ovo odgovara udjelu od 31,55 % (SD 7,51 %) površine smještene na krovu, s medijanom od 31,23 % (Slika 33).

Tablica 1. Prosječne vrijednosti i standardne devijacije (SD) mjerenih parametara.

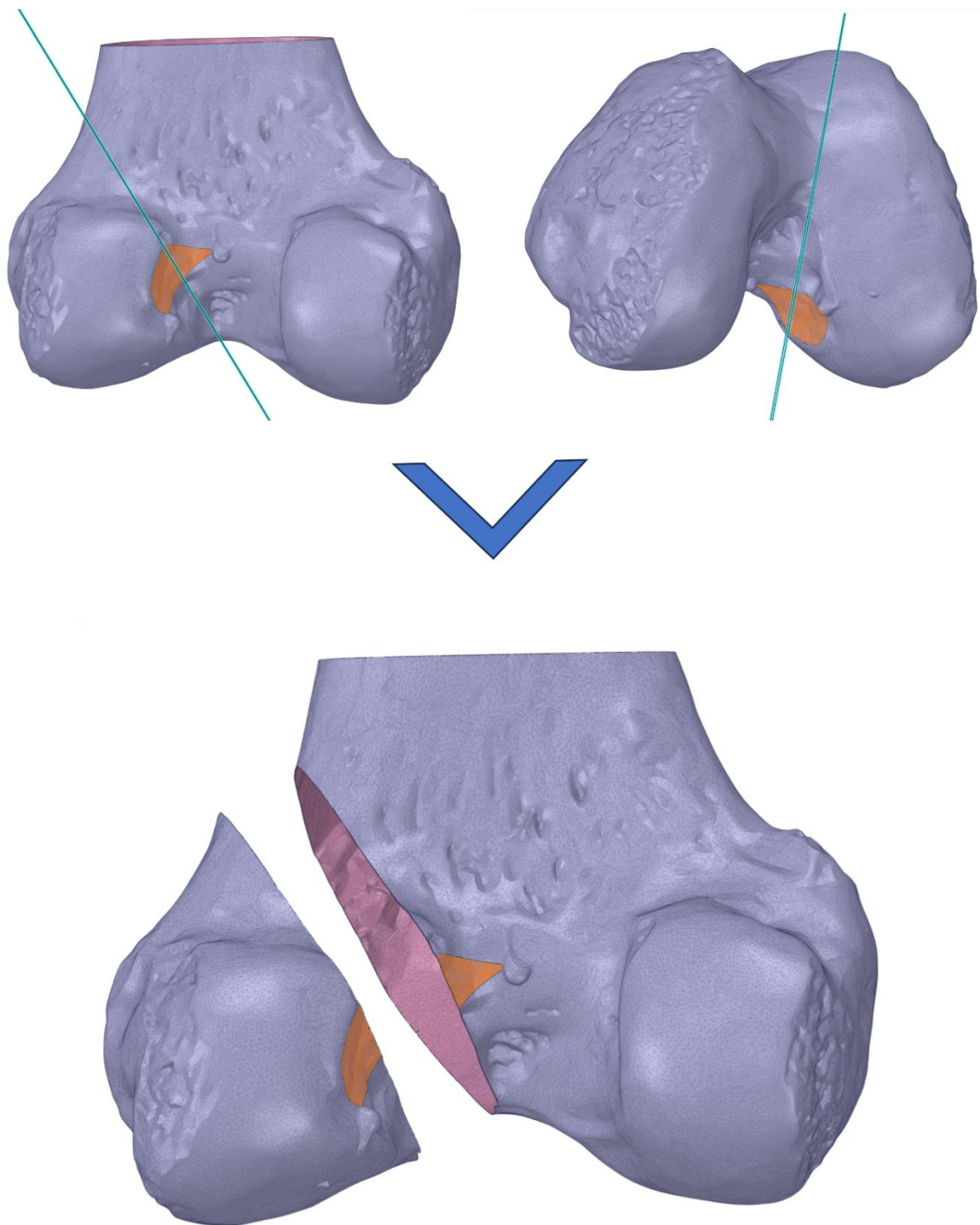
Mjereni parametri*	Prosječne vrijednosti	SD
LIR (ukupna duljina)	16,18 mm	1,44 mm
LIR (duljina na krovu)	5,02 mm	1,19 mm
LIR (duljina na zidu)	11,16 mm	1,21 mm
ACL-FIA (ukupna površina)	134,19 mm ²	34,17 mm ²
ACL-FIA (površina na krovu)	42,58 mm ²	14,39 mm ²
ACL-FIA (površina na zidu)	91,61 mm ²	25,35 mm ²
G1–G2 (duljina)	24,34 mm	2,83 mm
A–G1 (duljina)	12,46 mm	2,38 mm
A–PICL (duljina)	4,87 mm	1,48 mm

*LIR – lateralni interkondilarni greben; ACL-FIA - površina femoralnog hvatišta prednjeg križnog ligamenta; Točka A - početak LIR-a; Točka G1 - najproksimalnija, visoka/ duboka točka hrskavičnog ruba lateralnog kondila. Točka G2 - najproksimalnija, visoka/ duboka točka hrskavičnog ruba medijalnog kondila.; PICL – stražnja interkondilarna linija.

Tablica 2. Postotni udio LIR-a i ACL-FIA na krovu interkondilarne udubine. Rezultati su prikazani kao postotak $\pm$ SD.

Mjereni parametri*	Postotak	SD
LIR (postotni udio na krovu)	30,86 %	6,21 %
ACL-FIA (postotni udio na krovu)	31,55 %	7,51 %

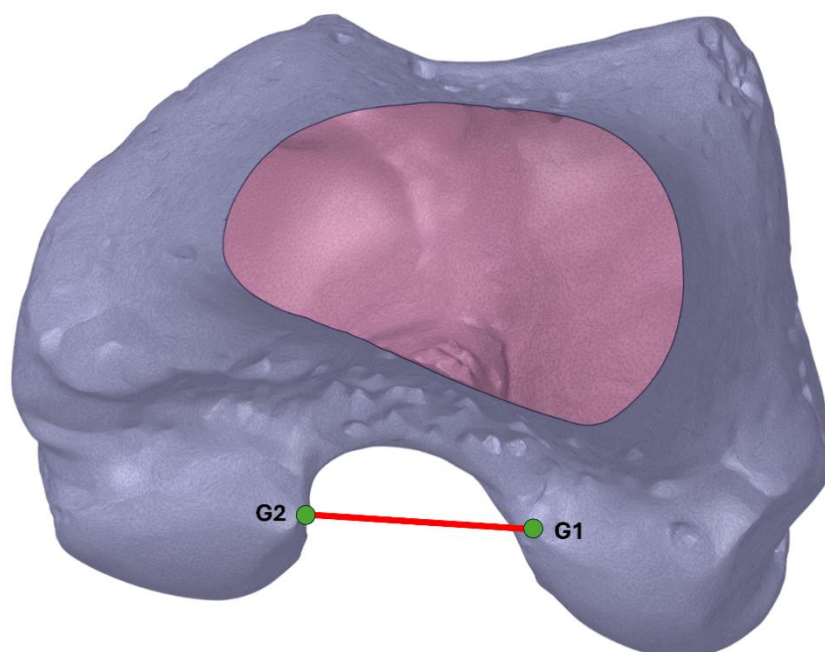
*LIR – lateralni interkondilarni greben; ACL-FIA - površina femoralnog hvatišta prednjeg križnog ligamenta.



Slika 33. Odvajanje krova od zida interkondilarne udubine pomoću programskog alata. Prikaz površine femoralnog hvatišta prednjeg križnog ligamenta (ACL-FIA - narančasto) i lateralnog interkondilarnog grebena LIR-a (prednja granica ACL-FIA) koji ostaju na krovu interkondilarne udubine nakon presjeka lateralnog kondila definiranom ravninom.

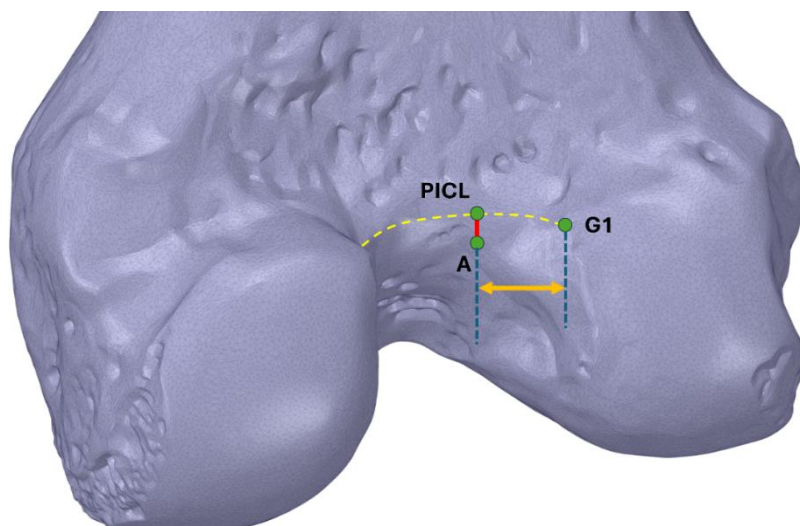
S obzirom na to da se LIR nalazi na krovu stražnjeg dijela interkondilarne udubine, analizom morfoloških karakteristika, uključujući oblik i širinu njezina izlaza, željeli smo ispitati postoji li korelacija između tih parametara i prostorne raspodjele LIR-a i ACL-FIA unutar interkondilarnog prostora.

Stražnji izlaz interkondilarne udubine na svim analiziranim preparatima imao je oblik obrnutog slova "U". Prosječna širina stražnjeg izlaza (G1–G2 – krajnje točke stražnje interkondilarne linije) iznosila je 24,34 mm (SD 2,83 mm), s medijanom od 24,11 mm (Slika 34).



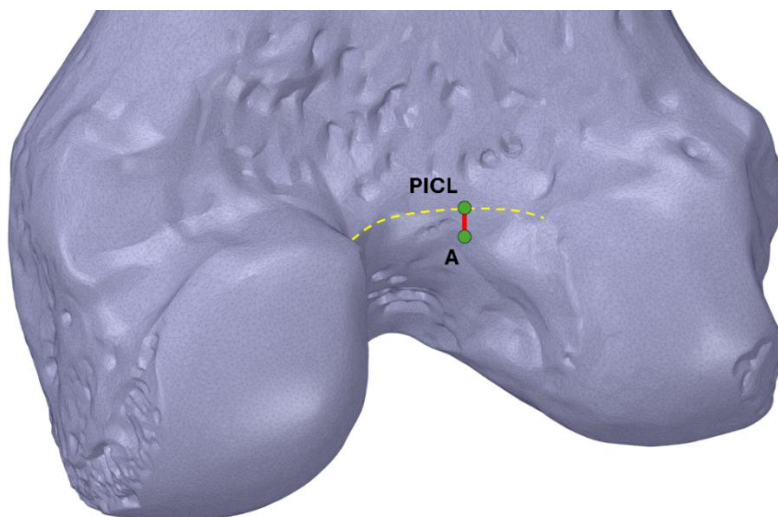
Slika 34. *Određivanje širine posteriornog izlaza interkondilarne udubine. Točka G1 - najproksimalnija, visoka/ duboka točka hrskavičnog ruba lateralnog kondila. Točka G2 - najproksimalnija, visoka/ duboka točka hrskavičnog ruba medijalnog kondila.*

Prosječna duljina linije A–G1, koja predstavlja udaljenost najproksimalnije točke LIR-a (točka A) do najdublje točke hrskavične granice lateralnog femoralnog kondila (točka G1), iznosila je 12,46 mm (SD 2,38 mm), s medijanom od 12,65 mm (Slika 35).



Slika 35. Udaljenost krajnje točke LIR-a (točka A) od najdublje točke hrskavične granice lateralnog femoralnog kondila (točka G1).

Udaljenost između najproksimalnijeg dijela LIR-a (točka A) i stražnje interkondilarne linije (PICL) iznosila je prosječno 4,87 mm (SD 1,48 mm), s medijanom od 4,85 mm. (Slika 36).



Slika 36. Udaljenost krajnje točke LIR-a (točka A) od stražnje interkondilarne linije (PICL).

Uočena je statistički značajna umjerena pozitivna korelacija ($r = 0,51$; $p = 0,0041$) između postotka LIR-a smještenog na krovu interkondilarne udubine i širine stražnjeg izlaza (G1–G2).

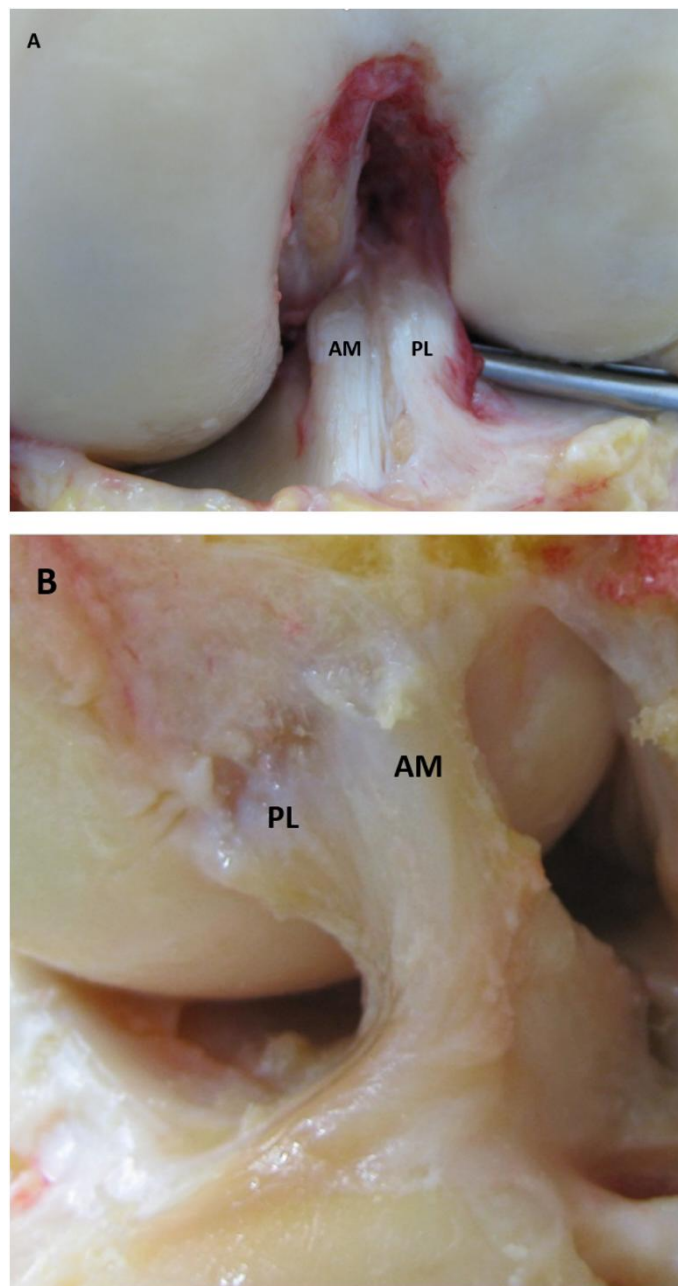
Analiza ICC pokazala je izvrsnu među-promatračku i unutar-promatračku pouzdanost u identifikaciji i mjerenju orijentira LIR-a i ACL-FIA.

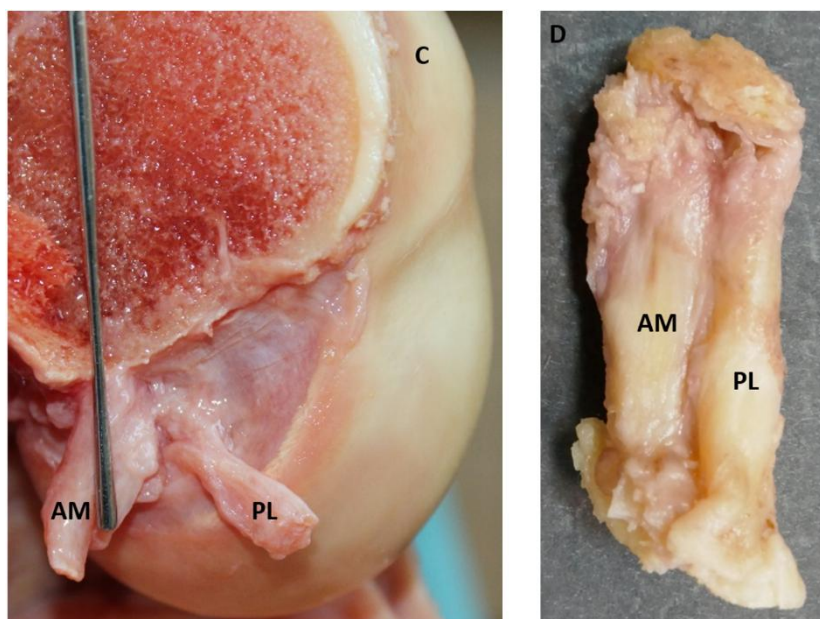
Za među-promatračku pouzdanost, ICC vrijednosti bile su izvrsne za sve mjere: duljina LIR-a (0,923); duljina LIR-a na krovu (0,821); površina ACL-FIA (0,796); ACL-FIA na krovu (0,872); duljina linije G1–G2 (0,898); duljina linije A–G1 (0,864); duljina A–PICL (0,767).

Za unutar-promatračku pouzdanost, ICC vrijednosti bile su izvrsne za: duljinu LIR-a (0,834); duljinu LIR-a na krovu (0,785); ACL-FIA na krovu (0,802); duljinu linije G1–G2 (0,898); duljinu linije A–G1 (0,867); duljinu A–PICL (0,775). Jedina mjera s dobrom, ali ne izvrsnom, među-promatračkom pouzdanošću bila je ukupna površina ACL-FIA (0,736).

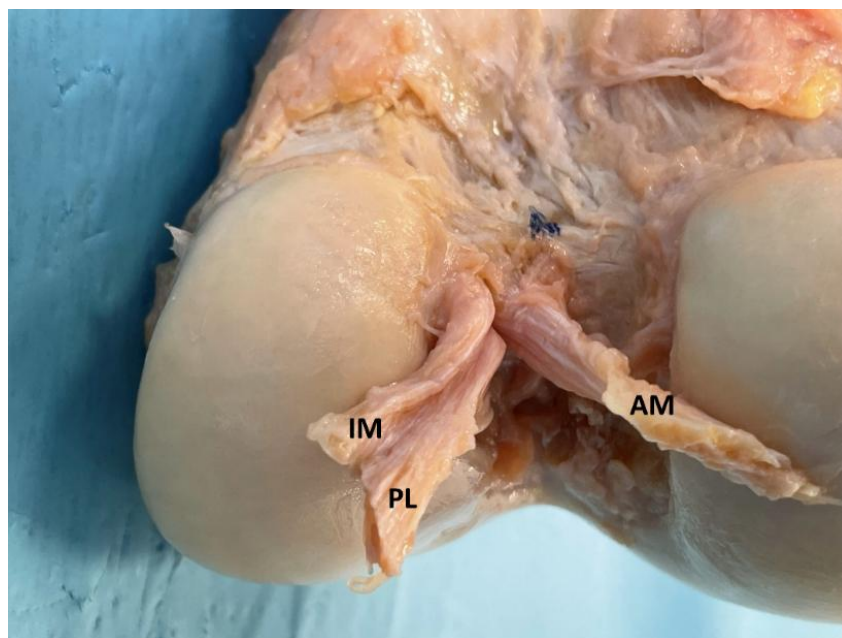
4.3. Rezultati makroskopske analize nemaceriranih preparata distalnog femura

U svih deset ($n = 10$) analiziranih preparata nakon prikazivanja ACL-a mogli su se dobro razaznati posterolateralni i anteromedijalni snop (Slika 37 i Slika 38). AM snop bio je u svim slučajevima voluminozniji i šire baze insercije, dok je PL snop bio tanji i uži. U sedam uzoraka jasno su uočena prijelazna vlakna između snopova, dok su u dva uzorka snopovi bili izrazito razdvojeni. U jednom preparatu, uz AM i PL snop jasno je bio vidljiv i intermedijalni snop (Slika 38).



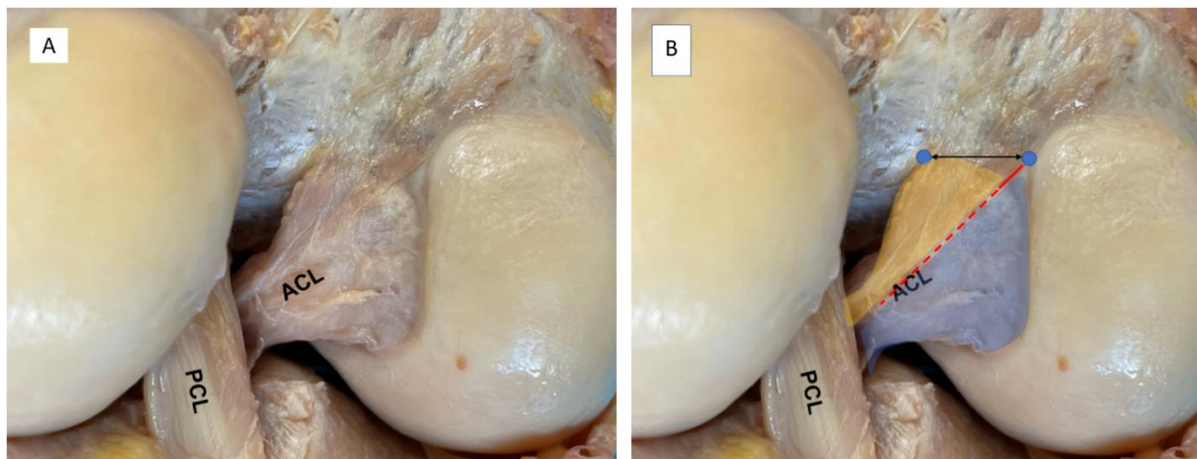


Slika 37. Prikaz snopova prednjeg križnog ligamenta (ACL). Jasno su vidljivi anteromedijalni (AM) i posterolateralni (PL) snop: A – u intaktnom koljenu; B – nakon uklanjanja medijalnog kondila femura; C – nakon uklanjanja tibije; D – nakon odstranjivanja ACL-a in toto.



Slika 38. Prikaz tri snopa prednjeg križnog ligamenta: posterolateralni (PL), intermedijalni (IM) i anteromedijalni (AM) snop.

U svih deset uzoraka nemaceriranih preparata distalnog femura femoralno hvatište ACL-a zahvaćalo je i krov interkondilarne udubine (Slika 39).



Slika 39. Pogled u zakoljenu jamu s prikazom prednjeg križnog ligamenta (ACL) i stražnjeg križnog ligamenta (PCL). A – nativni preparat ACL-a; B – prikaz ACL-a nakon povlačenja granice (crvena linija) između krova i lateralnog zida interkondilarne udubine. Žutom bojom označen je dio ligamenta koji polazi s krova, a plavom bojom dio koji polazi s lateralnog zida interkondilarne udubine.

Nakon određivanja granice između lateralnog zida i krova interkondilarne udubine, kirurškim skalpelom odstranili smo vlakna koja se nalaze na zidu interkondilarne udubine, te analizirali nazočnost preostalih vlakana na krovu interkondilarne udubine (Slika 40).



Slika 40. Dio prednjeg križnog ligamenta (ACL) nakon odstranjivanja vlakana s lateralnog zida interkondilarne udubine. A – plavom tintom označeno područje zida s kojeg su uklonjena vlakna ACL-a; B – dio ACL-a koji polazi s lateralnog dijela krova interkondilarne udubine.

Nakon što smo oscilirajućom pilom izrezali lateralni dio krova, dokazali smo da s tog dijela polazi i prednji križni ligament (Slika 41).



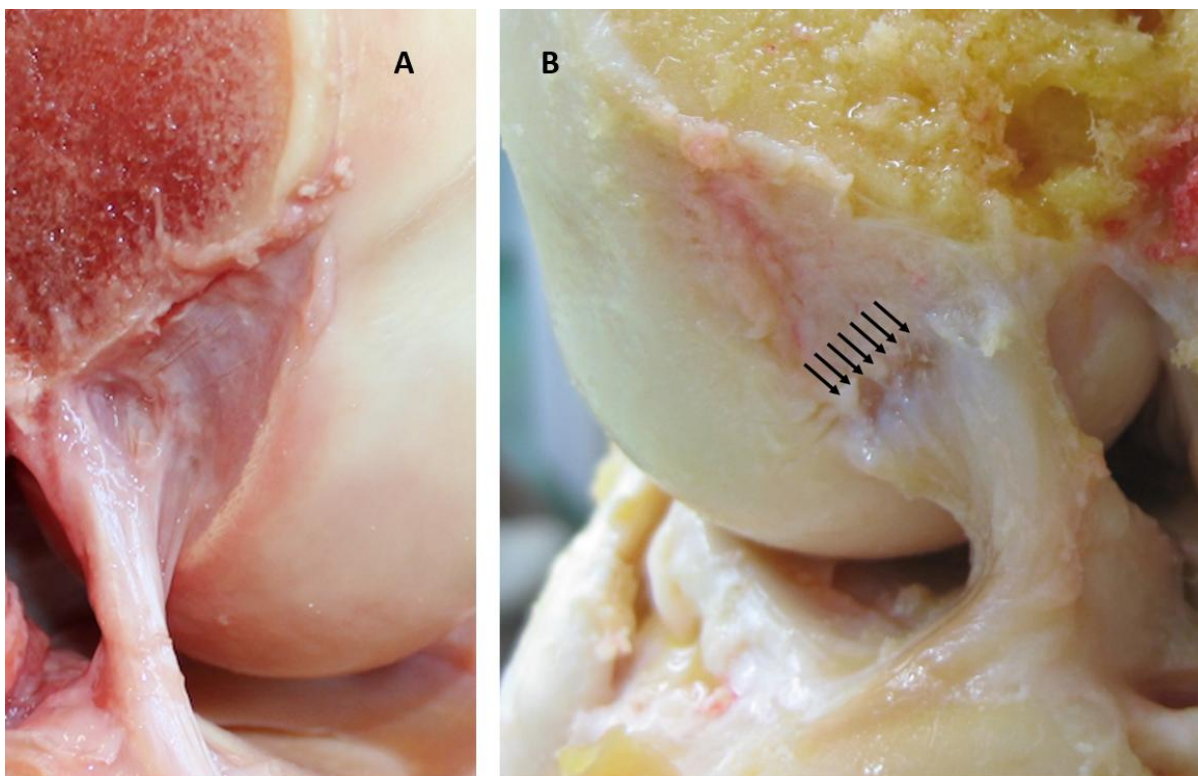
Slika 41. Lateralni dio krova interkondilarne udubine izrezan oscilirajućom pilom s kojeg polazi prednji križni ligament.

Nakon odstranjivanja svih vlakana ACL-a analizirali smo oblik i položaj lateralnog interkondilarnog grebena, te dokazali da LIR s lateralnog zida interkondilarne udubine lučno prelazi na lateralni dio krova interkondilarne udubine (Slika 42).



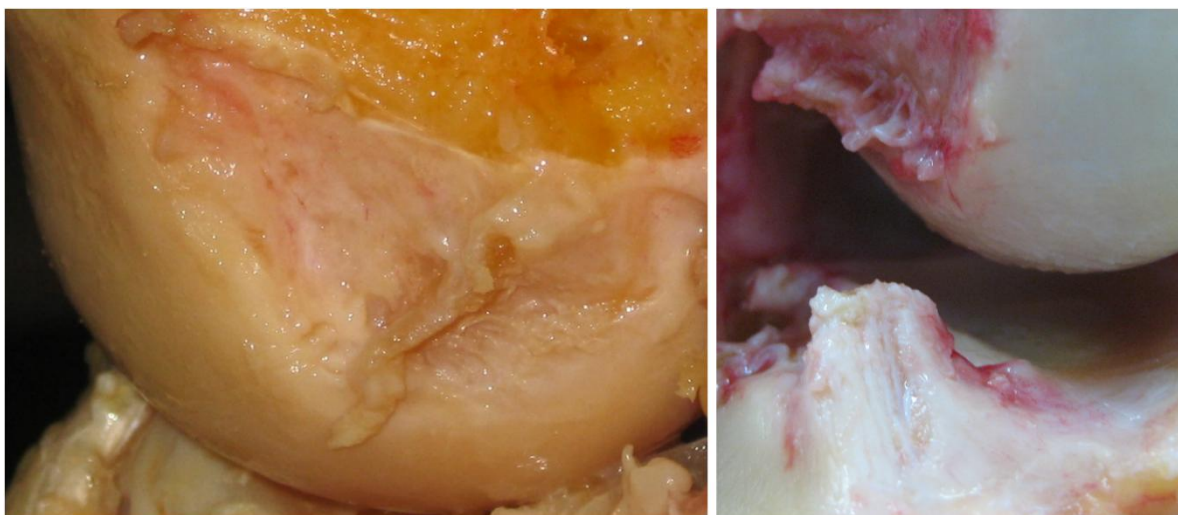
Slika 42. Položaj i oblik lateralnog interkondilarnog grebena (LIR). Plavim koncem obilježen je lateralni interkondilarni greben.

Analizirajući nazočnost LIR-a vizualnim pregledom i palpacijom, a nakon odstranjenja sinovijalne ovojnice ACL-a, preparate smo podijelili u dvije grupe. Prvu grupu sačinjavalo je 8 preparata (80%) kod kojih nismo mogli vidjeti LIR kod intaktnog ACL-a (Slika 43A). Drugu grupu sačinjavala su 2 preparata (20%) kod kojih je LIR bio vidljiv iznad vlakana ACL-a, ali samo u prednjem dijelu koji odgovara hvatištu PL snopa (Slika 43B).



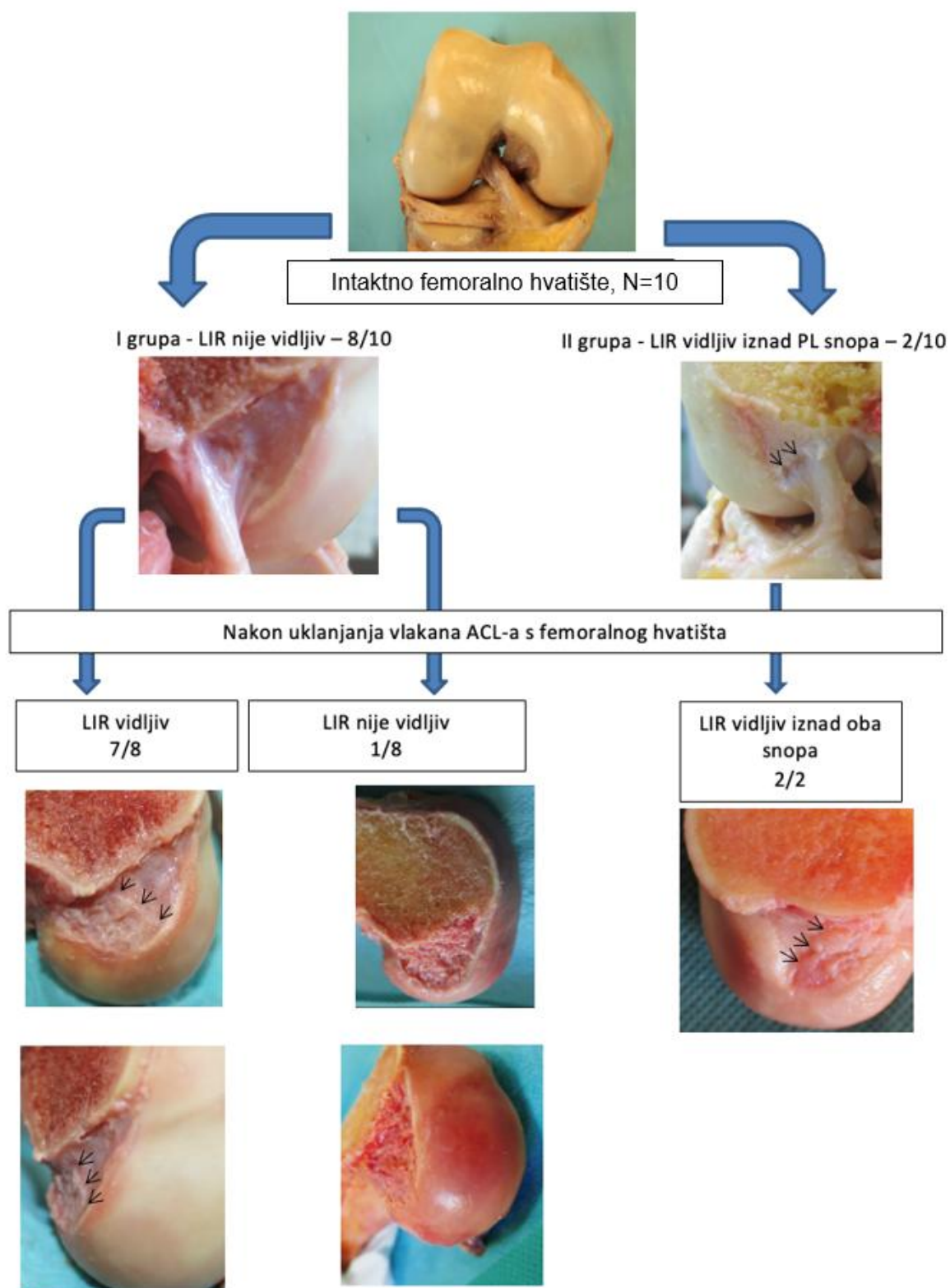
Slika 43. Analiza nazočnosti prednjeg križnog ligamenta (ACL) pri intaktnom femoralnom hvatištu ACL-a. (A) kod intaktnog ACL-a LIR nije vidljiv; (B) kod intaktnog ACL-a LIR je vidljiv iznad hvatišta posterolateralnog snopa (crne strelice).

Potom smo kod svih preparata uklonili vlakna ACL-a kirurškim nožem br. 11, ostavljajući 2-3 mm velik bataljak uz hvatište ACL-a. Uočili smo da je kod svih preparata ostatni dio vlakana formirao valovitu liniju duž cijelog femoralnog hvatišta (Slika 44).



Slika 44. *Prikaz ostatnog bataljka koji poprima oblik valovite trake na femoralnom hvatištu nakon uklanjanja prednjeg križnog ligamenta (ACL).*

Nakon toga, kod svih preparata uklonili smo preostala vlakna bataljka ACL-a. U prvoj grupi, kod koje nismo uspjeli vidjeti LIR uz intaktni ACL, nakon pažljivog odstranjivanja svih vlakana ACL-a, LIR smo prikazali u 7 od 8 preparata. U jednom preparatu iz prve grupe LIR nije bio vidljiv nakon disekcije svih vlakana ACL-a. Isti postupak proveden je i u drugoj grupi u kojoj se LIR dobro prikazao kod svih preparata nakon uklanjanja svih vlakana ACL-a (Slika 45). Analizom oblika LIR-a na našim uzorcima uočili smo da nema pravilnosti u ponavljanju oblika i veličine grebena. Oblik se kretao od ravnoga (30 %), preko zaobljenog s konveksitetom usmjerenim prema proksimalno (40 %), pa do stepeničastog oblika (30 %) (Tablica 3).



Slika 45. Prikaz lateralnog kondila femura kod (A) intaktnog prednjeg križnog ligamenta (ACL), te (B) nakon uklanjanja vlakana ACL-a s femoralnog hvatišta.

Nakon što smo uklonili vlakna ACL-a s femoralnog hvatišta kod svih uzoraka plavom tintom označili smo granice hvatišta (Slika 46). Kod svih uzoraka femoralno polazište bilo je trokutastog oblika sa zaobljenom bazom koji neodoljivo podsjeća na pizza-cut oblik.



Slika 46. Oblik femoralnog hvatišta nakon uklanjanja prednjeg križnog ligamenta.

Tablica 3. Tablični prikaz analiziranih morfoloških karakteristika prednjeg križnog ligamenta i lateralnog interkondilarnog grebena.

Anatomske karakteristike	Rezultati
Dobra vidljivost snopova ACL-a	100 %
Prisutna dva snopa ACL-a	90 %
Prisutna tri snopa ACL-a	10 %
Vidljiv LIR iznad hvatišta PL snopa	20 %
Vidljiv LIR iznad hvatišta AM snopa	0 %
Trakasti/valoviti oblik bataljka	100 %
Nazočnost LIR-a nakon odstranjivanja svih vlakana ACL-a	90 %
Nazočnost vlakana ACL-a na krovu interkondilarne udubine	100 %
Oblik LIR-a	ravan (30 %) konveksan (40 %) stepeničast (30 %)
Oblik femoralnog polazišta	trokut sa zaobljenom bazom

ACL – prednji križni ligament, AM – anteromedijalni snop, PL – posterolateralni snop, LIR – lateralni interkondilarni greben

5. RASPRAVA

Cilj operacijskog liječenja ozljede ACL-a jest obnova fiziološke kinematike koljena, uspostavljanje funkcionalne stabilnosti, omogućavanje povratka na razinu tjelesne aktivnosti prije ozljede, te prevencija razvoja prijevremenog OA [1,137,138].

Anatomija ACL-a iznimno je složena, kako u morfološkom, tako i u funkcionalnom smislu. Posebno je značajna činjenica da su hvatišta ligamenta na tibiji i femuru površinom i do četiri puta veća od površine poprečnog presjeka srednjeg dijela ligamenta, što dodatno otežava rekonstrukciju [11,14,139]. Takva anatomija ukazuje da zamjena nativnog ligamenta tubularnim transplantatom, neovisno o njegovu podrijetlu, ne može u potpunosti replicirati originalnu anatomsku građu.

Ozljeda ACL-a spada u najčešće ozljede koljena. Najčešće zahvaća sportsku populaciju u dobi od 19 do 25 godina, uz sve izraženiji trend porasta u posljednjim godinama [4]. Prema epidemiološkim podatcima, u SAD-u se godišnje izvrši oko 400 000 operacijskih zahvata rekonstrukcije ACL-a, što ovu operaciju čini jednom od najizvođenijih u području koljena [3]. Mladi sportaši koji se natječu na visokoj razini izloženi su povećanom riziku od ozljeda ACL-a. Više od 50 % svih ozljeda koljena čine upravo ozljede ACL-a, a u populaciji srednjoškolskih sportašica rizik je povećan 2,1 do 3,4 puta u usporedbi s muškim vršnjacima [4,5]. U profesionalnom sportu ovakva ozljeda može imati ozbiljne posljedice na karijeru sportaša – podaci pokazuju da 30,2 % profesionalnih nogometaša s ozljedom ACL-a ne uspijeva ponovno zaigrati na natjecateljskoj razini, a prosječno vrijeme povratka u sport iznosi 10,4 mjeseci [140–142].

Etiologija ACL ozljeda uključuje više različitih čimbenika, među kojima su individualne karakteristike sportaša (npr. ženski spol i opća zglobna rastezljivost), morfološke osobitosti kostiju (kao što su nagib platoa tibije ili uska interkondilarna udubina), razina i vrsta sportske aktivnosti (npr. natjecateljski sportovi i oni s čestim rotacijama), te okolišni čimbenici poput vremenskih uvjeta i vrste podloge [143–145]. Većina navedenih čimbenika rizika nije podložna promjenama [146,147]. Iako se značajan broj sportaša podvrgava operacijskom liječenju, podaci pokazuju da se samo 50 do 70 % njih uspije vratiti na istu razinu fizičke aktivnosti kao prije ozljede [104,148]. Kasne posljedice, posebice razvoj degenerativnih promjena, ostaju i dalje klinički

izazov. Radiografski znakovi OA koljena javljaju se u 40 % do 50 % operiranih bolesnika unutar 10 do 15 godina nakon rekonstrukcije [12,120,149]. Rizik od razvoja OA dodatno raste kod osoba koje nastavljaju s visoko intenzivnim sportskim aktivnostima koje uključuju trčanje, skakanje i nagle promjene smjera, pri čemu učestalost može dosežati i do 60 % u razdoblju od 10 do 20 godina nakon zahvata [150,151].

ACL je jedna od najčešće istraživanih struktura koštano-zglobnog sustava, osobito u kontekstu sportske medicine i operacijskog liječenja. Unatoč napretku u razumijevanju njegove makroskopske i histološke građe, te usavršavanju kirurških tehnika, klinički ishodi nakon rekonstrukcije ACL-a i dalje nisu u potpunosti zadovoljavajući. Jedan od čimbenika nepovoljnih poslijeoperacijskih ishoda jesu tehničke pogreške tijekom operacijskog zahvata [152]. Prema većini autora odgovorne su za 20 % do 30 % loših rezultata nakon rekonstrukcije ACL-a [153–157]. Isto tako podatak da se 10 % do 25 % slučajeva ruptur transplantata nakon rekonstrukcije ACL-a može izravno povezati s neadekvatnom tehnikom ukazuje na važnost kirurške tehnike [111,158].

Među tehničkim pogreškama, postavljanje femoralnog tunela navodi se kao najčešća pogreška. Tijekom revizijskih rekonstruktivnih zahvata ACL-a utvrđeno je da je loše pozicioniranje femoralnog kanala bilo uzrokom u 80 % revizija [152,159]. Najčešće greške bile su previše naprijed postavljen tunel (33 %), previše vertikalni tunel (33 %) i kombinacija navedenih pogrešaka (33 %) slučajeva [111,114,152]. Loše postavljen tunel može uzrokovati niz biomehaničkih poremećaja, uključujući prekomjernu napetost ili pretjeranu labavost transplantata, smanjeni opseg pokreta koljena, funkcionalnu nestabilnost, te sraz presatka s lateralnim rubom ulaza u interkondilarnu udubinu, sraz s krovom udubine ili preveliko napinjanje transplantata preko stražnjeg križnog ligamenta [114,160,161]. Dodatno, moguće su komplikacije poput stvaranja prekratkog tunela s posljedičnim otežanim cijeljenjem transplantata, frakture stražnje kortikalne stijenke, što može kompromitirati stabilnost fiksacije, kao i niz drugih intraoperacijskih problema. Sve navedeno može dovesti do loših kliničkih ishoda i potrebe za revizijskim zahvatima [114,160,161]. Zbog toga, postavljanje femoralnog tunela predstavlja najslabiju kariku u lancu rekonstrukcije prednjeg križnog ligamenta.

Danas, zlatni standard u rekonstrukciji ACL-a predstavlja anatomska rekonstrukcija. Anatomska rekonstrukcija ACL-a kirurška je tehnika koja ima za cilj funkcionalnu rekonstrukciju ACL-a. To uključuje rekonstrukciju nativnih dimenzija ACL-a, orijentacije vlakana, te veličine, oblika i položaja hvatišta nativnog ligamenta [162]. Glavni preduvjet za anatomsku rekonstrukciju jest dobro poznavanje i makroskopske i mikroskopske građe ACL-a, njegove biomehanike, ali i dobro poznavanje i razumijevanje anatomije i kinematike cijelog koljenog zgloba.

Femoralno hvatište ACL-a najčešće se opisuje kao eliptična, ovalna ili polumjesečasta površina koja se nalazi na medijalnoj strani lateralnog kondila femura. Njegove anatomske granice određene su LIR-om s prednje strane, dok su donji i stražnji rubovi omeđeni hrskavičnim prijelazom lateralnog kondila femura [11,12,163]. Brojna istraživanja ukazuju na postojanje anatomske varijacije u obliku i veličini femoralnog hvatišta, što dodatno naglašava važnost individualiziranog pristupa pri intraoperacijskoj orijentaciji [164,165].

Pri artroskopskoj anatomske rekonstrukciji ACL-a, većina ortopeda koristi LIR kao glavnu orijentacijsku strukturu za određivanje položaja femoralnog tunela. LIR je prisutan u gotovo 98 % populacije, lako se može prepoznati, prisutan je i u kroničnim ozljedama i u svim dobnim skupinama. LIR predstavlja i prednje omeđenje femoralnog hvatišta ACL-a. Sve ove karakteristike čine ga idealnom strukturom pomoću koje se možemo orijentirati tijekom operacije.

U prvim opisima (Clancy, Hutchinson i Ash) LIR je definiran kao zadebljanje na lateralnom zidu i krovu interkondilarne udubine [123,127]. Nakon toga su Farrow i sur., analizirajući morfologiju i anatomske strukture u 200 maceriranih preparata distalnog femura, također prikazali i opisali LIR kao koštani greben lokaliziran na lateralnom zidu i krovu interkondilarne udubine. Određivanjem kuta koji LIR zatvara sa stražnjom interkondilarnom linijom prikazali su dio LIR-a na krovu udubine, ali nisu analizirali njegovu veličinu po segmentima.

Nakon toga Tsukada i sur. potvrđuju prije spomenute navode da je LIR lokaliziran na krovu i zidu udubine, no nisu definirali prijelaz između zida i krova, što je ključno za točnu analizu njegova položaja po segmentima [128].

Luites i sur. [136] naveli su da je LIR bio prisutan na krovu u 31 od 35 analiziranih uzoraka, no nisu analizirali njegov točan položaj. Iako su svi ovi navedeni

autori opisivali pružanje LIR-a i na krov, prema našim spoznajama, dosadašnje publikacije nisu sustavno kvantificirale njegovu raspodjelu između zida i krova, niti su analizirale prisutnost dijela femoralnog hvatišta na krovu interkondilarne udubine. Uobičajene i danas opće prihvaćene definicije o položaju LIR-a i femoralnog hvatišta ACL-a su ograničene samo na lateralni zid, što je rezultiralo fokusom istraživanja isključivo na postavljanje femoralnog tunela na tom dijelu.

Tijekom kliničkog rada i operacijskih zahvata uočili smo da se dio LIR-a i femoralno hvatište ACL-a nalazi na lateralnom dijelu krova interkondilarne udubine, kao što su navodili autori u ranijim radovima. Kako nismo u literaturi mogli pronaći točne podatke o veličini LIR-a i površini hvatišta ACL-a na krovu odlučili smo ispitati i objektivizirati naša zapažanja. Za precizno određivanje udjela LIR-a i ACL-FIA na krovu modificirali smo metodu koju su opisali Luites i sur. Našom metodom s tri referentne točke dobili smo ravninu koja razdvaja krov od zida na najzakrivljenijem dijelu lateralne strane interkondilarne udubine. Tehnika određivanja ravnine je jednostavna i reproducibilna, pa se može standardno primjenjivati pri analizi 3D modela distalnog femura. Formiranje ravnine omogućilo nam je odvojeno mjerenje duljine LIR-a i površine ACL-FIA na oba segmenta. Najprije smo izmjerili ukupnu dužinu LIR-a, te analizirali oblik i površinu ACL-FIA. Dužina LIR-a u našem istraživanju je iznosila 16,18 mm. Dobivene vrijednosti podudaraju se s mjerenjima ostalih autora [128,129,166]. Površina femoralne insercije ACL-a naših ispitivanih uzoraka iznosila je 134,19 mm². Ovaj rezultat gotovo u potpunosti odgovara rezultatima Morales-Alvosa i sur. [165]. Njihove izmjerene vrijednosti površine femoralne insercije iznosile su 127 – 145 mm². Mjerenja ostalih autora također su se podudarala s vrijednostima dobivenim u našim ispitivanjima [34,129,136,167–169]. Manja odstupanja u dobivenim rezultatima duljine LIR-a i površine ACL insercije mogu se objasniti kao posljedica načina mjerenja, vrste uzoraka, broja ispitivanih uzoraka ili etničke pripadnosti. Nakon što smo odvojili krov od lateralnog zida, te izvršili mjerenja ispitivanih parametara, rezultati su pokazali da se oko jedne trećine duljine LIR-a (30,86%), te oko jedne trećine površine koštane insercije (31,55%) nalaze na krovu interkondilarne udubine.

Do sada je opisano više morfoloških oblika interkondilarne udubine koji se prema obliku ulaza mogu podijeliti na interkondilarne udubine A - tipa, obrnutog U - tipa i W - tipa [170]. Smatra se da interkondilarna udubina tipa A spada u uske udubine,

te predstavlja čimbenik rizika pri nastanku ozljeda prednjeg križnog ligamenta, ali i pri njegovoj rekonstrukciji [170]. Kako dio LIR-a i ACL-FIA-e koji se nalaze na krovu, pripadaju stražnjem dijelu interkondilarne udubine, a u dostupnoj literaturi nismo uspjeli pronaći analize morfoloških osobina tog dijela, željeli smo ispitati da li se po analogiji s morfologijom ulaza u interkondilarnu udubinu, iste mogu podijeliti i po morfološkim osobinama izlaza. Naše analize su pokazale da su izlazi interkondilarnih udubina kod svih uzoraka nalikovali obrnutom slovu "U". Širina izlaza (mjerena kao duljina G1 - G2) prosječno je iznosila 24,34 mm (SD 2,83). Obzirom da je širina varirala, određivanjem korelacije duljine LIR-a i površine ACL-FIA-e na krovu sa širinom izlaza željeli smo utvrditi što se dešava s ispitivanim strukturama kada se širina izlaza povećava. Naši rezultati pokazali su pozitivnu korelaciju između ispitivanih parametara, te smo zaključili da, bez obzira na širinu krova u području stražnjeg dijela interkondilarne udubine, uvijek se približno 30% LIR-a i ACL-FIA-e nalaze na krovu.

Iako se smatra da se LIR podudara s hvatištem prednjeg dijela ACL-a i na taj način predstavlja njegovu prednju granicu, Tsukada i sur. [128] su pokazali da u prednjem dijelu LIR-a i hvatišta vlakana ACL-a postoje neka odstupanja, dok se u stražnjem dijelu u cijelosti LIR i vlakna podudaraju. Svojim istraživanjem nije definirao duljinu stražnjeg dijela, ali je zaključio je da je stražnji dio LIR-a pouzdaniji orijentir za postavljanje tunela od prednjeg dijela. Naši rezultati dobiveni disekcijom nemaceriranih preparata pokazali su da se ACL u 100% analiziranih preparata u potpunosti podudara sa stražnjim dijelom LIR-a, što se u cijelosti podudara sa zaključkom Tsukade i sur. [128]. Nakon što smo uspjeli odrediti granicu i odvojiti krov od zida, zaključili smo da se baš taj dio LIR-a, orijentaciji važniji dio, nalazi na krovu. Prema nama dostupnim podacima prvi put je određena njegova duljina u tom dijelu, odnosno po segmentima. Navedena zapažanja mogla bi imati veliku kliničku važnost pri određivanju položaja femoralnog tunela u anatomskej rekonstrukciji, bez obzira da li se koristi „*single bundle*“ ili „*double bundle*“ tehnika.

Intraoperacijski, prednji dio LIR-a lako je dostupan i dobro vidljiv, ali njegov stražnji dio ponekad može biti teže vidljiv, čak i iskusnim ortopedima. To je naročito izraženo u slučajevima kada je ulaz u interkondilarnu udubinu uzak ili kada se radi o ponovnim rekonstrukcijama, pa je anatomija značajnije narušena. Kako bi se kirurzi lakše i brže orijentirali o položaju stražnjeg dijela LIR-a odredili smo njegov položaj u odnosu na artroskopski dobro vidljive i lako palpabilne anatomske strukture, a to su

najlateralnija točka stražnje interkondilarne linije ili tzv. „*over-the-top*“ pozicija i stražnja interkondilarna linija. Analize su pokazale da LIR nikada nije dosezao i spajao se sa stražnjom interkondilarnom linijom. Prosječna izmjerena udaljenost krajnje točke LIR-a (A točka) od stražnje interkondilarne linije iznosila je oko 5 mm (4,87 mm) (Slika 36). Istovremeno, udaljenost ove točke LIR-a od „*over-the-top*“ pozicije iznosila je 12,46 mm u smjeru prema medijalno (Slika 35).

Poznavajući činjenicu da je duljina vrha, odnosno zakrivljenog dijela artroskopske kukice, koji je standardni instrument na svim artroskopskim operacijskim zahvatima, 5 mm, može se zaključiti da se najproksimalnija točka LIR-a nalazi oko dvije duljine kukice medijalno od G1 točke i jednu duljinu kukice ventralno od stražnje interkondilarne linije. Ovi rezultati mogli bi imati veliku važnost u kliničkoj primjeni, posebno u slučajevima kada LIR nije jasno vidljiv, bilo zbog anatomske varijacije ili manjka iskustva operatera ili u revizijskim operacijama.

Radovi koji definiraju položaj femoralnog hvatišta ACL-a samo na zidu prikazuju i opisuju hvatište ovalnog oblika ili oblika polumjeseca [11,12,163]. Digitalna 3D analiza koštane insercije ACL-a na femuru omogućila nam je prikazivanje ACL-FIA-e iz različitih kuteva. Našim mjerenjima na 3D prikazima distalnog femura zaključili smo da su LIR, koji predstavlja prednju granicu hvatišta ACL-a i spojnica A-G1, koja predstavlja stražnju granicu ACL insercije, sličnih duljina dok je donja stranica insercije koja odgovara hrskavičnom rubu lateralnog kondila zaobljenija. Ovakav geometrijski lik sličan je jednakokračnom trokutu sa zaobljenom bazom koji neodoljivo podsjeća na tzv. „pizza cut“ oblik. Kada smo naše 3D digitalne prikaze s označenim hvatištem ligamenta, iz kose projekcije postavili u sagitalnu ravninu, naš „pizza cut“ oblik insercije poprimio je ovalan ili polumjesečasti oblik. Ovaj nalaz mogao bi predstavljati indirektni dokaz da se i u radovima koji opisuju ovakve oblike ACL femoralne insercije ustvari radilo o dvodimenzionalnom prikazivanju geometrijskog lika koji se prostire u tri ravnine.

Nove studije, poput one od Parrillija i sur. [171], također ističu trodimenzionalnu kompleksnost ACL hvatišta, te ukazuju na važnost napuštanja dvodimenzionalnog pristupa pri određivanju položaja femoralnog tunela, što govori u prilog našim rezultatima.

Naši rezultati ukazuju na potrebu daljnjeg proučavanja anatomije i biomehanike, posebice dijela ACL-a koji polazi s krova interkondilarne udubine, a kasnije možda i redefiniranja pristupa pozicioniranju femoralnog tunela kod anatomske rekonstrukcije ACL-a. Nove spoznaje mogle bi utjecati na redefiniranje postavljanja femoralnog tunela, na bolju rekonstrukciju ACL-a, uz približavanje definiciji anatomske rekonstrukcije s boljom biomehaničkom funkcijom, manjom stopom neuspjeha presatka i smanjenim rizikom od OA, te konačno, većim zadovoljstvom pacijenata.

Prema razvojnoj anatomiji i embriologiji, koštani grebeni predstavljaju mjesta stabilnog i snažnog sidrenja vlakana ligamenata i tetiva. Sila koja se preko ligamenta prenosi na skelet prvo nailazi na koštano izbočenje koje ju apsorbira, djelomično neutralizira i raspoređuje na okolnu kost. Na taj način smanjuje se rizik od nastanka avulzijskih fraktura [172,173].

Da je LIR koštani greben koji anatomsom strukturom odgovara gore navedenoj definiciji pokazali su Norman i sur. koji su analizirali kost u području LIR-a i zaključili da je koštano područje koje odgovara LIR-u deblje i do 3 puta u odnosu na koštani dio preostalog dijela femoralnog hvatišta ACL-a [174].

Ukoliko se Wollfov zakon, koji kaže da su koštani grebeni područja najvećih vlačnih sila, može primijeniti i na LIR, onda bi LIR kao najopterećeniji dio prirodnog ACL-a morao biti i sastavni dio femoralnog tunela. Zbog navedenog cilj nam je bio utvrditi položaj prednjih vlakana ACL-a i LIR-a.

U 7 od 10 analiziranih preparata jasno je bila vidljiva granica između vlakana ACL-a i kosti čitavom duljinom femoralnog hvatišta, i nismo uspjeli zamijetiti LIR niti u jednom dijelu. U 2 preparata, na kojima je jasno bila vidljiva granica između PL i AM snopa, LIR se mogao vidjeti neposredno iznad vlakana, ali samo iznad PL snopa. Niti u jednom preparatu LIR nije bio vidljiv čitavom duljinom izvan hvatišta ACL-a. Nakon što smo skalpelom uklonili sva vlakna ligamenta, LIR je bio vidljiv u 9 od 10 preparata. Pojavnost grebena u našim rezultatima podudara se s rezultatima iz literature koji pokazuju prisutnost LIR-a do 97 %. Nadalje, naši rezultati pokazuju da je LIR u velikom postotku sastavni dio hvatišta ligamenta, a ne rubno omeđenje izvan njega [22,128] Prema našem istraživanju u 20 % slučajeva LIR se nije podudarao s prednjim vlaknima ACL-a. U ovom dijelu vlakna ACL-a započinjala su ispod LIR-a, te je u tom

dijelu LIR bio dobro vidljiv uz intaktan prednji križni ligament. Ovaj dio s vidljivim LIR-om odgovarao je hvatištu PL snopa (Slika 38). U svih 9 uzoraka u kojima smo pronašli LIR vlakna AM snopa polazila su sa LIR-a, tako da on nije bio vidljiv pri intaktnom ACL-u. Ovi rezultati podudaraju se s rezultatima Tsukade i suradnika koji su također uočili veću podudarnost LIR-a i vlakana ACL-a u stražnjem dijelu. Navedeno bi ukazivalo na veću važnost stražnjeg dijela LIR-a kao intraoperacijskog orijentira pri postavljanju femoralnog tunela, a kako smo dokazali prethodnim eksperimentima navedeni dio nalazi se krovu interkondilarne udubine, što dodatno ukazuje na važnost lateralnog dijela krova udubine pri rekonstrukciji ACL-a.

U akutnim slučajevima rekonstrukcije ACL-a, anatomske femoralno hvatište može se intraoperacijski relativno lako identificirati zahvaljujući očuvanoj ključnoj orijentaciji kao što su: LIR, bataljak femoralnog dijela ACL-a, te posterolateralni segment lateralnog kondila femura i dr. Nasuprot tome, u kroničnim i revizijskim slučajevima artroskopske rekonstrukcije, očuvanost intraartikularne anatomije često je značajno narušena. Odsutnost ostataka ligamenta, prisutnost osteofita na ulazu u interkondilarnu udubinu ili postojanje prethodno bušenog femoralnog tunela mogu znatno otežati određivanje točne anatomske pozicije za postavljanje novog femoralnog tunela, pa čak i iskusnim kirurzima.

Danas postoji nekoliko preporučenih radioloških metoda koje pomažu kirurgu u određivanju središnje točke femoralnog tunela ACL-a. Jedna od najčešće korištenih metoda je ona koju su 1997. godine razvili Bernard i Hertel [21]. Njihova metoda koristi mrežu koja je okomita na Blumensaatovu liniju (BL), a tunel se pozicionira u odnosu na dubinu (naprijed - nazad) i visinu (gore - dolje). No, autori su mrežu definirali pod pretpostavkom da je BL ravna linija. Yahagi i suradnici analizirali su krov femoralne udubine u sagitalnoj ravnini te su zaključili da stražnja strana krova u 65 % slučajeva ima uzvisinu distalno, dok je samo u 35 % slučajeva potpuno ravna [175]. Ovo otkriće može imati implikacije na primjenjivost metode Bernarda i Hertela [175,176].

Naša analiza profilnih rendgenoloških snimki također je pokazala da je stražnji dio BL izbočen prema distalno, ali incidencija ove pojave je nešto veća u našim rezultatima (75 %) u usporedbi s rezultatima Irushishime i sur (65 %). Ova nepodudarnost u rezultatima mogla bi se objasniti razlikom u metodologiji prikazivanja krova interkondilarne udubine. Irushishima i sur. analizirali su krov u sagitalnoj ravnini

prepiljenog femura na kadaverskim preparatima, dok smo mi u ovom istraživanju analizirali prikaz krova na rendgenološkim snimkama. Naime, na rendgenskim slikama BL predstavlja projekciju krova koja nastaje kao suma svih sagitalnih presjeka kroz cijelu širinu krova interkondilarne udubine koji je zaobljen. Nasuprot tome, analiza kadaveričnih uzoraka temelji se na pojedinačnom presjeku, najčešće vođenom kroz najvišu točku ulaza u interkondilarnu udubinu. Ova razlika u pristupu može znatno utjecati na interpretaciju oblika krova.

Kako bi se izbjegla metodološka i terminološka neusklađenost prilikom interpretacije nalaza iz različitih izvora, predlažemo jasno razlikovanje pojmova: naziv "Blumensaatova linija" treba se koristiti isključivo u kontekstu rendgenološke analize, dok se za anatomske preparate preporučuje korištenje izraza "vrh krova interkondilarne udubine".

Kao što je prije istaknuto, LIR se smatra najvažnijom intraoperacijskom orijentacijskom strukturom pri određivanju anatomske pozicije femoralnog tunela tijekom rekonstrukcije ACL-a [82,122,124,129]. Iako je položaj LIR-a bio predmet brojnih anatomskih istraživanja, prema trenutno dostupnim podacima postoji tek jedno istraživanje koje se bavilo analizom položaja ovog grebena na radiološkim snimkama [131]. U toj studiji, Farrow i sur. izračunali su da kut koji zatvaraju LIR i BL iznosi 75,5°.

U okviru našeg istraživanja, izmjereni prosječni kut između LIR-a i BL-a iznosi 70,13° (SD 12,69°). Razlika u rezultatima može se objasniti razlikom u morfologiji BL-a unutar analiziranih uzoraka. Naime, u našem istraživanju korištena je iBL, dok Farrow i sur. nisu naveli koje tipove BL linije su koristili pri analizi, niti kako su određivali BL u uzorcima s +BL tipom, koji je i najčešći u općoj populaciji [131]. U našem ispitivanju u 75 % slučajeva nađena je +BL varijanta.

Za preciznije određivanje položaja LIR-a na radiogramu, osim kuta koji zatvara LIR s iBL-om, potrebno je odrediti i točku sjecišta tih dviju linija. Kadaverska studija Smiglieswskog i sur. pokazala je da se LIR susreće s BL-om na njezinu krajnjem distalnom kraju, sugerirajući da su LIR i prednji dio ACL-a u liniji sa stražnjim korteksom distalnog femura. U našem istraživanju takva podudarnost je zabilježena u samo tri femura (8,6%), dok je u preostalim slučajevima LIR presijecao BL u njezinom u omjeru 1:6. Ključna razlika između ove dvije studije, najvjerojatnije leži u korištenoj metodi: radiološka analiza u odnosu na kadaversku studiju. Autori potonje nisu

definirali orijentaciju i položaj femura, što je veoma važna stavka jer smo našom analizom 3D modela dokazali da projekcija prikazivanja LIR-a i femoralnog hvatišta ACL-a značajno utječe na njihov položaj i oblik.

Uz pomoć dvaju mjerenja – kuta LIR-BL i točke presjeka LIR-BL – može se vrlo precizno lokalizirati LIR na radiogramu. No, mjerenje koje nismo pronašli u nama dostupnoj literaturi jest kut između LIR-a i PCT. Prosječna vrijednost ovog kuta iznosila je $143,61^{\circ}$. Ovo mjerenje, za razliku od kuta LIR-BL, pokazalo je veću konzistentnost i manju standardnu devijaciju, što sugerira da bi ovaj kut mogao biti pouzdanija alternativa prilikom definiranja položaja LIR-a, osobito kada se koristi u kombinaciji s točkom gdje se LIR susreće s BL.

6. ZAKLJUČCI

Na temelju provedenog istraživanja mogu se donijeti sljedeći zaključci:

1. Oko jedne trećine duljine lateralnog interkondilarnog grebena (LIR) te približno jednaki udio površine femoralnog hvatišta prednjeg križnog ligamenta (ACL-FIA) nalaze se na krovu interkondilarne udubine, što predstavlja značajan anatomske nalaz s potencijalno važnim kliničkim implikacijama.
2. Dosadašnja definicija femoralnog hvatišta ACL-a kao isključivo lateralnozidne strukture je nepotpuna. Istraživanje je pokazalo da se njegov važan dio – osobito onaj povezan s anteromedijalnim (AM) snopom – nalazi na krovu, što zahtijeva reviziju postojećih anatomske-kirurških koncepata.
3. Stražnji segment LIR-a dosljedno se poklapa s vlaknima ACL-a i anatomske se nalazi na krovu. Budući da je taj stražnji dio pouzdaniji intraoperacijski orijentir, treba mu se pridati veća pažnja u kirurškom planiranju, osobito u slučajevima ograničene vidljivosti ili revizijskih operacija.
4. Radiološke analize pokazale su da u 75 % slučajeva Blumensaatova linija nije ravna, već blago konveksna prema distalno. Utvrđeni kutovi i omjeri presjeka s LIR-om omogućuju točniju procjenu njegovog položaja na lateralnim radiogramima, čime se otvaraju nove mogućnosti za prijeoperacijsko planiranje i poslijeoperacijsku provjeru položaja femoralnog tunela.
5. Izmjerena udaljenost LIR-a od jasno vidljivih koštanih orijentira, poput stražnje interkondilarne linije i G1 točke („over-the-top“ pozicija), može se koristiti za intraoperacijsko lociranje LIR-a čak i u slučajevima kad je on slabije izražen ili anatomske modificiran.
6. Trodimenzionalna analiza femoralnog hvatišta ACL-a pokazala je da oblik njegovog koštanog hvatišta nije jednostavno ovalan, već ima karakterističan „pizza cut“ oblik, što dodatno naglašava potrebu za prostornim razumijevanjem prilikom rekonstrukcije.
7. Disekcijom svježih kadaverskih koljena potvrđeno je da se vlakna ACL-a u svih preparata hvataju i za krov udubine. Time se jasno dokazuje prisutnost funkcionalno važnog segmenta koji nije obuhvaćen tradicionalnim tunelima postavljenim samo u lateralni zid.

8. Rezultati potvrđuju da se LIR nalazi unutar hvatišta ligamenta, a ne izvan njega. To znači da bi femoralni tunel trebao uključiti barem stražnji dio LIR-a, kako bi se obuhvatio anatomijom određeni smjer i opseg vlakana AM snopa.

9. Statistički značajna pozitivna korelacija između širine stražnjeg izlaza interkondilarne udubine i udjela LIR-a na krovu dodatno potvrđuje da se taj odnos ponavlja neovisno o morfologiji udubine, čime se povećava njegova pouzdanost.

10. Dobiveni rezultati ukazuju na potrebu redefiniranja kirurških tehnika rekonstrukcije ACL-a. Uključivanje "zaboravljene" komponente na krovu omogućilo bi precizniju anatomsku rekonstrukciju, veću stabilnost presatka i smanjenje rizika od biomehaničkih odstupanja, što bi moglo poboljšati dugoročne kliničke ishode i smanjiti učestalost osteoartritisa.

7. LITERATURA

- [1] Paschos NK. Anterior cruciate ligament reconstruction and knee osteoarthritis. *World J Orthop* 2017;8:212–7.
- [2] Barenius B, Ponzer S, Shalabi A, Bujak R, Norlén L, Eriksson K. Increased Risk of Osteoarthritis After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med* 2014;42:1049–57.
- [3] Murray MM. Optimizing outcomes of ACL surgery-Is autograft reconstruction the only reasonable option? *J Orthop Res* 2021;39:1843–50.
- [4] Herzog MM, Marshall SW, Lund JL, Pate V, Mack CD, Spang JT. Incidence of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Among Adolescent Females in the United States, 2002 Through 2014. *JAMA Pediatr* 2017;171:808.
- [5] Kaeding CC, Léger-St-Jean B, Magnussen RA. Epidemiology and Diagnosis of Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Clin Sports Med* 2017;36:1–8.
- [6] Duthon VB, Barea C, Abrassart S, Fasel JH, Fritschy D, Ménétrey J. Anatomy of the anterior cruciate ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;14:204–13.
- [7] Petersen W, Tillmann B. Anatomie und Funktion des vorderen Kreuzbandes. *Orthopade* 2002;31:710–8.
- [8] Zantop T, Petersen W, Sekiya JK, Musahl V, Fu FH. Anterior cruciate ligament anatomy and function relating to anatomical reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;14:982–92.
- [9] Arnoczky S P. Anatomy of the anterior cruciate ligament. *Clin Orthop Relat Res* 1983;172:19–25.
- [10] Girgis FG, Marshall JL, Monajem A. The Cruciate Ligaments of the Knee Joint. Anatomical, functional and experimental analysis. *Clin Orthop Relat Res* 1975;106:216–31.
- [11] Harner CD, Baek GH, Vogrin TM, Carlin GJ, Kashiwaguchi S, Woo SLY. Quantitative Analysis of Human Cruciate Ligament Insertions. *Arthroscopy* 1999;15:741–9.

- [12] Odensten M, Gillquist J. Functional anatomy of the anterior cruciate ligament and a rationale for reconstruction. *J Bone Joint Surg Am* 1985;67:257–62.
- [13] Amis A, Dawkins G. Functional anatomy of the anterior cruciate ligament. Fibre bundle actions related to ligament replacements and injuries. *J Bone Joint Surg Br* 1991;73-B:260–7.
- [14] Andersen HN, Dyhre-Poulsen P. The anterior cruciate ligament does play a role in controlling axial rotation in the knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1997;5:145–9.
- [15] Śmigielski R, Zdanowicz U, Drwięga M, Ciszek B, Ciszewska-Łysoń B, Siebold R. Ribbon like appearance of the midsubstance fibres of the anterior cruciate ligament close to its femoral insertion site: a cadaveric study including 111 knees. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2015;23:3143–50.
- [16] Ferretti M, Levicoff EA, Macpherson TA, Moreland MS, Cohen M, Fu FH. The Fetal Anterior Cruciate Ligament: An Anatomic and Histologic Study. *Arthroscopy* 2007;23:278–83.
- [17] Zantop T, Herbort M, Raschke MJ, Fu FH, Petersen W. The Role of the Anteromedial and Posterolateral Bundles of the Anterior Cruciate Ligament in Anterior Tibial Translation and Internal Rotation. *Am J Sports Med* 2007;35:223–7.
- [18] Edwards TB, Guanche CA, Petrie SG, Thomas KA. In Vitro Comparison of Elongation of the Anterior Cruciate Ligament and Single- and Dual-Tunnel Anterior Cruciate Ligament Reconstructions. *Orthopedics* 1999;22:577–84.
- [19] Hollis JM, Takai S, Adams DJ i sur. The Effects of Knee Motion and External Loading on the Length of the Anterior Cruciate Ligament (ACL): A Kinematic Study. *J Biomech Eng* 1991;113:208–14.
- [20] Takai S, Woo SL, Livesay GA, Adams DJ, Fu FH. Determination of the in situ loads on the human anterior cruciate ligament. *J Orthop Res* 1993;11:686–95.
- [21] Bernard M, Hertel P, Hornung H, Cierpinski T. Femoral insertion of the ACL. Radiographic quadrant method. *Am J Knee Surg* 1997;10:14–21.

- [22] Farrow LD, Chen MR, Cooperman DR, Victoroff BN, Goodfellow DB. Morphology of the Femoral Intercondylar Notch. *J Bone Joint Surg* 2007;89:2150–5.
- [23] Arnoczky SP, Rubin RM, Marshall JL. Microvasculature of the cruciate ligaments and its response to injury. *J Bone Joint Surg Am* 1979;61:1221–9.
- [24] Arnoczky SP. Blood supply to the anterior cruciate ligament and supporting structures. *Orthop Clin North Am* 1985;16:15–28.
- [25] Kennedy JC, Weinberg HW, Wilson AS. The Anatomy and Function of the Anterior Cruciate Ligament. *J Bone Joint Surg* 1974;56:223–35.
- [26] Gottlob CA, Baker CL, Pellissier JM, Colvin L. Cost effectiveness of anterior cruciate ligament reconstruction in young adults. *Clin Orthop Relat Res* 1999;272–82.
- [27] Schutte MJ, Dabezies EJ, Zimny ML, Happel LT. Neural anatomy of the human anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Am* 1987;69:243–7.
- [28] Lephart SM, Pincivero DM, Rozzi SL. Proprioception of the Ankle and Knee. *Sports Med* 1998;25:149–55.
- [29] Roberts D, Fridén T, Zätterström R, Lindstrand A, Moritz U. Proprioception in People With Anterior Cruciate Ligament-Deficient Knees: Comparison of Symptomatic and Asymptomatic Patients. *J Orthop Sports Phys Ther* 1999;29:587–94.
- [30] Petersen W, Tillmann B. Structure and vascularization of the cruciate ligaments of the human knee joint. *Anat Embryol (Berl)* 1999;200:325–34.
- [31] Baek GH, Carlin GJ, Vogrin TM, Woo SLY, Harner CD. Quantitative Analysis of Collagen Fibrils of Human Cruciate and Meniscomfemoral Ligaments. *Clin Orthop Relat Res* 1998;357:205–11.
- [32] Strocchi R, de Pasquale V, Gubellini P i sur. The human anterior cruciate ligament: histological and ultrastructural observations. *J Anat* 1992;180:515–9.
- [33] Amiel D, Frank C, Harwood F, Fronek J, Akeson W. Tendons and ligaments: a morphological and biochemical comparison. *J Orthop Res* 1984;1:257–65.

- [34] Iwahashi T, Shino K, Nakata K i sur. Direct anterior cruciate ligament insertion to the femur assessed by histology and 3-dimensional volume-rendered computed tomography. *Arthroscopy* 2010;26(9):S13–S20.
- [35] Sasaki N, Ishibashi Y, Tsuda E i sur. The femoral insertion of the anterior cruciate ligament: Discrepancy between macroscopic and histological observations. *Arthroscopy* 2012;28:1135–46.
- [36] Domnick C, Raschke MJ, Herbolt M. Biomechanics of the anterior cruciate ligament: Physiology, rupture and reconstruction techniques. *World J Orthop* 2016;7:82–93.
- [37] Gupta R, Malhotra A, Sood M, Masih GD. Is anterior cruciate ligament graft rupture (after successful anterior cruciate ligament reconstruction and return to sports) actually a graft failure or a re-injury? *J Orthop Surg (Hong Kong)* 2019;27(1): 2309499019829625.
- [38] Hoogeslag RAG, Brouwer RW, Boer BC, de Vries AJ, Huis in 't Veld R. Acute Anterior Cruciate Ligament Rupture: Repair or Reconstruction? Two-Year Results of a Randomized Controlled Clinical Trial. *Am J Sports Med* 2019;47:567–77.
- [39] Kondo E, Merican AM, Yasuda K, Amis AA. Biomechanical Analysis of Knee Laxity With Isolated Anteromedial or Posterolateral Bundle–Deficient Anterior Cruciate Ligament. *Arthroscopy* 2014;30:335–43.
- [40] Siegel L, Vandenakker-Albanese C, Siegel D. Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Clin J Sport Med* 2012;22:349–55.
- [41] Marieswaran M, Jain I, Garg B, Sharma V, Kalyanasundaram D. A Review on Biomechanics of Anterior Cruciate Ligament and Materials for Reconstruction. *Appl Bionics Biomech* 2018;2018:1–14.
- [42] Kanamori A, Sakane M, Zeminski J, Rudy TW, Woo SLY. In-situ force in the medial and lateral structures of intact and ACL-deficient knees. *J Orthop Sci* 2000;5:567-71.
- [43] Galway HR, MacIntosh DL. The lateral pivot shift: a symptom and sign of anterior cruciate ligament insufficiency. *Clin Orthop Relat Res* 1980:45–50.

- [44] Ayeni OR, Chahal M, Tran MN, Sprague S. Pivot shift as an outcome measure for ACL reconstruction: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012;20:767–77.
- [45] Jonsson H, Riklund-Åhlström K, Lind J. Positive pivot shift after ACL reconstruction predicts later osteoarthritis 63 patients followed 5–9 years after surgery. *Acta Orthop Scand* 2004;75:594–9.
- [46] Kocher MS, Steadman JR, Briggs KK, Sterett WJ, Hawkins RJ. Relationships between Objective Assessment of Ligament Stability and Subjective Assessment of Symptoms and Function after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med* 2004;32:629–34.
- [47] Zantop T, Petersen W, Fu FH. Anatomy of the anterior cruciate ligament. *Oper Tech Orthop* 2005;15:20–8.
- [48] Snook GA. A short history of the anterior cruciate ligament and the treatment of tears. *Clin Orthop Relat Res* 1983;172:11–3.
- [49] Davarinos N, O'Neill BJ, Curtin W. A Brief History of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Advances in Orthopedic Surgery* 2014;2014:1–6.
- [50] Robson AW. VI. Ruptured Crucial Ligaments and their Repair by Operation. *Ann Surg* 1903;37:716–8.
- [51] Lind DRG, Patil RS, Amunategui MA, De Phillipino NN. Evolution of anterior cruciate ligament reconstruction & graft choice: A review. *Ann Jt* 2023;8:19.
- [52] Hesse E. Über den Ersatz der Kreuzbänder des Kniegelenks durch freie Fascientransplantation. *Verh Dtsch Ges Chir* 1914;43:188–9.
- [53] Groves EWH. Operation for the repair of the crucial ligaments. *The Lancet* 1917;190:674–6.
- [54] Groves EWH. The crucial ligaments of the knee-joint: Their function, rupture, and the operative treatment of the same. *Journal of British Surgery* 1919;7:505–15.
- [55] Loh JC, Fukuda Y, Tsuda E, Steadman RJ, Fu FH, Woo SLY. Knee stability and graft function following anterior cruciate ligament reconstruction: Comparison

- between 11 o'clock and 10 o'clock femoral tunnel placement. *Arthroscopy* 2003;19:297–304.
- [56] Schindler OS. Surgery for anterior cruciate ligament deficiency: a historical perspective. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012;20:5–47.
 - [57] Hughston JC, Eilers AF. The role of the posterior oblique ligament in repairs of acute medial (collateral) ligament tears of the knee. *J Bone Joint Surg Am* 1973;55:923–40.
 - [58] Quigley TB. The treatment of avulsion of the collateral ligaments of the knee. *Am J Surg* 1949;78:574–81.
 - [59] Feagin JA, Curl WW. Isolated tear of the anterior cruciate ligament: 5-year follow-up study. *Am J Sports Med* 1976;4:95–100.
 - [60] Marshall JL, Warren RF, Wickiewicz TL, Reider B. The anterior cruciate ligament: a technique of repair and reconstruction. *Clin Orthop Relat Res* 1979:97–106.
 - [61] Marshall JL, Warren RF, Wickiewicz TL. Primary surgical treatment of anterior cruciate ligament lesions. *Am J Sports Med* 1982;10:103–7.
 - [62] Chambat P, Guier C, Sonnerly-Cottet B, Fayard JM, Thaumat M. The evolution of ACL reconstruction over the last fifty years. *Int Orthop* 2013;37:181–6.
 - [63] Brückner H. A new method for plastic surgery of cruciate ligaments. *Chirurg* 1966;37:413–4.
 - [64] Jones KG. Reconstruction of the anterior cruciate ligament. A technique using the central one third of the patellar ligament. *J Bone Joint Surg Am* 1963;45:925–32.
 - [65] Sciarretta FV. History of anterior cruciate ligament surgery. *Journal of Arthroscopic Surgery and Sports Medicine* 2020;1:90.
 - [66] Du Toit GT. Knee joint cruciate ligament substitution. The Lindemann (Heidelberg) operation. *S Afr J Surg* 1967;5:25–30.

- [67] Thompson SK, Calver R, Monk CJ. Anterior cruciate ligament repair for rotatory instability: the Lindemann dynamic muscle-transfer procedure. *J Bone Joint Surg Am* 1978;60:917–20.
- [68] Dandy DJ, Flanagan JP, Steenmeyer V. Arthroscopy and the management of the ruptured anterior cruciate ligament. *Clin Orthop Relat Res* 1982;167:43–9.
- [69] Hardin GT, Bach BR, Bush-Joseph CA, Farr J. Endoscopic single-incision anterior cruciate ligament reconstruction using patellar tendon autograft: surgical technique. 1992 [classical article]. *J Knee Surg* 2003;16:135–4.
- [70] Getgood A, Spalding T. The evolution of anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. *Open Orthop J* 2012;6:287–94.
- [71] van der List JP, Nawabi DH, Pearle AD. Functional Analysis of ACL Insertion Site. *Controversies in the Technical Aspects of ACL Reconstruction*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2017, p. 181–92.
- [72] Artmann M, Wirth CJ. Investigation of the appropriate functional replacement of the anterior cruciate ligament (author's transl). *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 1974;112:160–5.
- [73] Melhorn JM, Henning CE. The relationship of the femoral attachment site to the isometric tracking of the anterior cruciate ligament graft. *Am J Sports Med* 1987;15:539–42.
- [74] Penner DA, Daniel DM, Wood P, Mishra D. An in vitro study of anterior cruciate ligament graft placement and isometry. *Am J Sports Med* 1988;16:238–43.
- [75] Gill TJ, Steadman JR. Anterior cruciate ligament reconstruction. *Orthopedic Clinics of North America* 2002;33:727–35.
- [76] Sapega AA, Moyer RA, Schneck C, Komalahiranya N. Testing for isometry during reconstruction of the anterior cruciate ligament. Anatomical and biomechanical considerations. *J Bone Joint Surg Am* 1990;72:259–67.
- [77] Ristanis S, Giakas G, Papageorgiou CD i sur. The effects of anterior cruciate ligament reconstruction on tibial rotation during pivoting after descending stairs. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy* 2003;11:360–5.

- [78] Lohmander LS, Englund PM, Dahl LL, Roos EM. The Long-term Consequence of Anterior Cruciate Ligament and Meniscus Injuries. *Am J Sports Med* 2007;35:1756–69.
- [79] Loh JC, Fukuda Y, Tsuda E, Steadman RJ, Fu FH, Woo SLY. Knee stability and graft function following anterior cruciate ligament reconstruction: Comparison between 11 o'clock and 10 o'clock femoral tunnel placement. *Arthroscopy* 2003;19:297–304.
- [80] Kopf S, Forsythe B, Wong AK, Tashman S, Irrgang JJ, Fu FH. Transtibial ACL reconstruction technique fails to position drill tunnels anatomically in vivo 3D CT study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012;20:2200–7.
- [81] Strauss EJ, Barker JU, McGill K, Cole BJ, Bach BR, Verma NN. Can Anatomic Femoral Tunnel Placement Be Achieved Using a Transtibial Technique for Hamstring Anterior Cruciate Ligament Reconstruction? *Am J Sports Med* 2011;39:1263–9.
- [82] Fu FH, Karlsson J. A long journey to be anatomic. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2010;18:1151–3.
- [83] Zelle BA, Brucker PU, Feng MT, Fu FH. Anatomical Double-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Sports Med* 2006;36:99–108.
- [84] Fu FH, Ranawat A. Tensioning in Double-Bundle ACL Reconstruction. *Arthroscopy* 2007;23:1027.
- [85] Yasuda K, Kondo E, Ichiyama H i sur. Anatomic reconstruction of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament using hamstring tendon grafts. *Arthroscopy* 2004;20:1015–25.
- [86] Kondo E, Yasuda K, Azuma H, Tanabe Y, Yagi T. Prospective Clinical Comparisons of Anatomic Double-Bundle versus Single-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Procedures in 328 Consecutive Patients. *Am J Sports Med* 2008;36:1675–87.
- [87] Muneta T, Koga H, Mochizuki T i sur. A Prospective Randomized Study of 4-Strand Semitendinosus Tendon Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

- Comparing Single-Bundle and Double-Bundle Techniques. *Arthroscopy* 2007;23:618–28.
- [88] Erickson BJ, Harris JD, Fillingham YA i sur. Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Practice Patterns by NFL and NCAA Football Team Physicians. *Arthroscopy* 2014;30:731–8.
- [89] Farber J, Harris JD, Kolstad K, McCulloch PC. Treatment of Anterior Cruciate Ligament Injuries by Major League Soccer Team Physicians. *Orthop J Sports Med* 2014;2:2325967114559892.
- [90] Björnsson H, Samuelsson K, Sundemo D i sur. A Randomized Controlled Trial With Mean 16-Year Follow-up Comparing Hamstring and Patellar Tendon Autografts in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med* 2016;44:2304–13.
- [91] Chee MYK, Chen Y, Pearce CJ i sur. Outcome of Patellar Tendon Versus 4-Strand Hamstring Tendon Autografts for Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis of Prospective Randomized Trials. *Arthroscopy* 2017;33:450–63.
- [92] Cavaignac E, Coulin B, Tscholl P, Nik Mohd Fatmy N, Duthon V, Menetrey J. Is Quadriceps Tendon Autograft a Better Choice Than Hamstring Autograft for Anterior Cruciate Ligament Reconstruction? A Comparative Study With a Mean Follow-up of 3.6 Years. *Am J Sports Med* 2017;45:1326–32.
- [93] Runer A, Wierer G, Herbst E i sur. There is no difference between quadriceps- and hamstring tendon autografts in primary anterior cruciate ligament reconstruction: a 2-year patient-reported outcome study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018;26:605–14.
- [94] Slone HS, Romine SE, Premkumar A, Xerogeanes JW. Quadriceps Tendon Autograft for Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Comprehensive Review of Current Literature and Systematic Review of Clinical Results. *Arthroscopy* 2015;31:541–54.
- [95] Mouarbes D, Menetrey J, Marot V, Courtot L, Berard E, Cavaignac E. Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis of

- Outcomes for Quadriceps Tendon Autograft Versus Bone–Patellar Tendon–Bone and Hamstring-Tendon Autografts. *Am J Sports Med* 2019;47:3531–40.
- [96] Horteur C, Rubens Duval B, Merlin A, Cognault J, Ollivier M, Pailhe R. Comparison of knee extensor strength after anterior cruciate ligament reconstruction using either quadriceps tendon or hamstring tendon autografts. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 2022;32:857–65.
- [97] Maletis GB, Inacio MCS, Funahashi TT. Analysis of 16,192 Anterior Cruciate Ligament Reconstructions From a Community-Based Registry. *Am J Sports Med* 2013;41:2090–8.
- [98] Ellis HB, Matheny LM, Briggs KK, Pennock AT, Steadman JR. Outcomes and Revision Rate After Bone–Patellar Tendon–Bone Allograft Versus Autograft Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Patients Aged 18 Years or Younger With Closed Physes. *Arthroscopy* 2012;28:1819–25.
- [99] Legnani C, Ventura A, Terzaghi C, Borgo E, Albisetti W. Anterior cruciate ligament reconstruction with synthetic grafts. A review of literature. *Int Orthop* 2010;34:465–71.
- [100] Lavoie P, Fletcher J, Duval N. Patient satisfaction needs as related to knee stability and objective findings after ACL reconstruction using the LARS artificial ligament. *Knee* 2000;7:157–63.
- [101] Nau T, Lavoie P, Duval N. A new generation of artificial ligaments in reconstruction of the anterior cruciate ligament: Two-year follow-up of a randomised trial. *J Bone Joint Surg* 2002;84:356–60.
- [102] Murray MM, Flutie BM, Kalish LA i sur. The Bridge-Enhanced Anterior Cruciate Ligament Repair (BEAR) Procedure: An Early Feasibility Cohort Study. *Orthop J Sports Med* 2016;4: 2325967116672176.
- [103] Murray MM, Kalish LA, Fleming BC i sur. Bridge-Enhanced Anterior Cruciate Ligament Repair: Two-Year Results of a First-in-Human Study. *Orthop J Sports Med* 2019;7: 2325967118824356.
- [104] Ardern CL, Taylor NF, Feller JA, Webster KE. Fifty-five per cent return to competitive sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: an

- updated systematic review and meta-analysis including aspects of physical functioning and contextual factors. *Br J Sports Med* 2014;48:1543–52.
- [105] Herzog D, Vach W, Schwamborn T, Saxer F. How Athletic Swiss Patients Experience Their Return to Sports After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Results from a Retrospective Self-Assessment. *Open Access J Sports Med* 2024;15:141–58.
- [106] Wiggins AJ, Grandhi RK, Schneider DK, Stanfield D, Webster KE, Myer GD. Risk of Secondary Injury in Younger Athletes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med* 2016;44:1861–76.
- [107] Magnussen RA, Lawrence JTR, West RL, Toth AP, Taylor DC, Garrett WE. Graft Size and Patient Age Are Predictors of Early Revision After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With Hamstring Autograft. *Arthroscopy* 2012;28:526–31.
- [108] Bourke HE, Salmon LJ, Waller A, Patterson V, Pinczewski LA. Survival of the Anterior Cruciate Ligament Graft and the Contralateral ACL at a Minimum of 15 Years. *Am J Sports Med* 2012;40:1985–92.
- [109] O'Dowd DP, Stanley J, Rosenfeldt MP i sur. Reduction in re-rupture rates following implementation of return-to-sport testing after anterior cruciate ligament reconstruction in 313 patients with a mean follow-up of 50 months. *J ISAKOS* 2024;9:264–71.
- [110] Somthavil S. Altered kinematics after anterior cruciate ligament reconstruction, and their role in the prevention of osteoarthritis. *Int J Ther Rehabil* 2018;25:529–37.
- [111] Wright RW, Huston LJ, Spindler KP i sur. Descriptive Epidemiology of the Multicenter ACL Revision Study (MARS) Cohort. *Am J Sports Med* 2010;38:1979–86.
- [112] Achtnich A, Ranuccio F, Willinger L i sur. High incidence of partially anatomic tunnel placement in primary single-bundle ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018;26:462–7.

- [113] Iriuchishima T, Horaguchi T, Kubomura T, Morimoto Y, Fu FH. Evaluation of the intercondylar roof impingement after anatomical double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction using 3D-CT. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2011;19:674–9.
- [114] Lucidi GA, Roberti di Sarsina T, Zaffagnini S. Editorial Commentary: The Number One Cause of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Graft Failure Is a Misplaced Femoral Tunnel: Over-the-Top Technique Plus Lateral Extra-Articular Tenodesis Is Recommended. *Arthroscopy* 2024;40:435–7.
- [115] Ajuied A, Wong F, Smith C i sur. Anterior Cruciate Ligament Injury and Radiologic Progression of Knee Osteoarthritis. *Am J Sports Med* 2014;42:2242–52.
- [116] Kessler MA, Behrend H, Henz S, Stutz G, Rukavina A, Kuster MS. Function, osteoarthritis and activity after ACL-rupture: 11 years follow-up results of conservative versus reconstructive treatment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2008;16:442–8.
- [117] Daniel DM, Stone M Lou, Dobson BE, Fithian DC, Rossman DJ, Kaufman KR. Fate of the ACL-injured Patient. *Am J Sports Med* 1994;22:632–44.
- [118] Zantop T, Schumacher T, Schanz S, Raschke MJ, Petersen W. Double-bundle reconstruction cannot restore intact knee kinematics in the ACL/LCL-deficient knee. *Arch Orthop Trauma Surg* 2010;130:1019–26.
- [119] Monk AP, Davies LJ, Hopewell S, Harris K, Beard DJ, Price AJ. Surgical versus conservative interventions for treating anterior cruciate ligament injuries. *Cochrane Database Syst Rev* 2016;4:CD011166.
- [120] Rothrauff BB, Jorge A, de Sa D, Kay J, Fu FH, Musahl V. Anatomic ACL reconstruction reduces risk of post-traumatic osteoarthritis: a systematic review with minimum 10-year follow-up. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2020;28:1072–84.
- [121] de Mees TTCR, Reijman M, Waarsing JH, Meuffels DE. Posteriorly positioned femoral grafts decrease long-term failure in anterior cruciate ligament

- reconstruction, femoral and tibial graft positions did not affect long-term reported outcome. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2022;30:2003–13.
- [122] Soares R, Vega J, Farrow L. Current Concepts Review: The Key to Anatomic Reconstruction of the Anterior Cruciate Ligament: The Resident's Ridge, Lateral Intercondylar Ridge – Fu's Ridge. [Internet]. *J Orthop Res Ther*. 2025 [cited 2025 Jul 31];10:1377. Available from: <https://doi.org/10.29011/2575-8241.001377>.
- [123] Hutchinson MR, Ash SA. Resident's ridge: assessing the cortical thickness of the lateral wall and roof of the intercondylar notch. *Arthroscopy* 2003;19:931–5.
- [124] Fu FH, Jordan SS. The Lateral Intercondylar Ridge—A Key to Anatomic Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *J Bone Joint Surg* 2007;89:2103–4.
- [125] Sutter EG, Anderson JA, Garrett WE. Direct Visualization of Existing Footprint and Outside-In Drilling of the Femoral Tunnel in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in the Knee. *Arthrosc Tech* 2015;4:e107–13.
- [126] Shino K, Suzuki T, Iwahashi T i sur. The resident's ridge as an arthroscopic landmark for anatomical femoral tunnel drilling in ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2010;18:1164–8.
- [127] Purnell ML, Larson AI, Clancy W. Anterior Cruciate Ligament Insertions on the Tibia and Femur and Their Relationships to Critical Bony Landmarks Using High-Resolution Volume-Rendering Computed Tomography. *Am J Sports Med* 2008;36:2083–90.
- [128] Tsukada S, Fujishiro H, Watanabe K i sur. Anatomic Variations of the Lateral Intercondylar Ridge. *Am J Sports Med* 2014;42:1110–7.
- [129] Ferretti M, Ekdahl M, Shen W, Fu FH. Osseous Landmarks of the Femoral Attachment of the Anterior Cruciate Ligament: An Anatomic Study. *Arthroscopy* 2007;23:1218–25.
- [130] van Eck CF, Morse KR, Lesniak BP i sur. Does the lateral intercondylar ridge disappear in ACL deficient patients? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2010;18:1184–8.

- [131] Farrow LD, Gillespie RJ, Victoroff BN i sur. Radiographic Location of the Lateral Intercondylar Ridge. *Am J Sports Med* 2008;36:2002–6.
- [132] Berg EE, Mason SL, Lucas MJ. Patellar Height Ratios. *Am J Sports Med* 1996;24:218–21.
- [133] Seil R, Müller B, Georg T, Kohn D, Rupp S. Reliability and interobserver variability in radiological patellar height ratios. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2000;8:231–6.
- [134] Blumensaat C. Die Lageabweichungen und Verrenkungen der Kniescheibe. *Ergeb Chir Orthop*, Berlin, Heidelberg: Springer; 1938, str. 149–223.
- [135] Waltenberger L, Rebay-Salisbury K, Mitteroecker P. Three-dimensional surface scanning methods in osteology: A topographical and geometric morphometric comparison. *Am J Phys Anthropol* 2021;174:846–58.
- [136] Luites JWH, Wymenga AB, Blankevoort L, Kooloos JGM. Description of the attachment geometry of the anteromedial and posterolateral bundles of the ACL from arthroscopic perspective for anatomical tunnel placement. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2007;15:1422–31.
- [137] Filbay SR, Grindem H. Evidence-based recommendations for the management of anterior cruciate ligament (ACL) rupture. *Best Pract Res Clin Rheumatol* 2019;33:33–47.
- [138] Wang LJ, Zeng N, Yan ZP, Li JT, Ni GX. Post-traumatic osteoarthritis following ACL injury. *Arthritis Res Ther* 2020;22:57.
- [139] Fujimaki Y, Thorhauer E, Sasaki Y, Smolinski P, Tashman S, Fu FH. Quantitative In Situ Analysis of the Anterior Cruciate Ligament. *Am J Sports Med* 2016;44:118–25.
- [140] Longstaffe R, Leiter J, Gurney-Dunlop T, McCormack R, MacDonald P. Return to Play and Career Length After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Among Canadian Professional Football Players. *Am J Sports Med* 2020;48:1682–8.

- [141] Bizzini M, Hancock D, Impellizzeri F. Suggestions From the Field for Return to Sports Participation Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Soccer. *J Orthop Sports Phys Ther* 2012;42:304–12.
- [142] Battaglia M, Arner JW, Midtgaard KS i sur. Early versus standard return to play following ACL reconstruction: impact on volume of play and career longevity in 180 professional European soccer players: a retrospective cohort study. *J Orthop Traumatol* 2025;26:29.
- [143] Postma W. Anterior Cruciate Ligament Injury: Current Understanding of Risk Factors. *Orthopedics and Rheumatology* [Internet]. *Ortho Rheum Open Access J.* 2015 [cited 2025 Jul 31];1(3):555565. Available from: <https://doi.org/10.19080/OROAJ.2015.01.555565>
- [144] Smith HC, Vacek P, Johnson RJ i sur. Risk Factors for Anterior Cruciate Ligament Injury. *Sports Health* 2012;4:69–78.
- [145] Pfeifer CE, Beattie PF, Sacko RS, Hand A. Risk factors associated with non-contact anterior cruciate ligament injury: a systematic review. *Int J Sports Phys Ther* 2018;13:575–87
- [146] Price MJ, Tuca M, Cordasco FA, Green DW. Nonmodifiable risk factors for anterior cruciate ligament injury. *Curr Opin Pediatr* 2017;29:55–64.
- [147] Dauty M, Crenn V, Louguet B, Grondin J, Menu P, Fouasson-Chailloux A. Anatomical and Neuromuscular Factors Associated to Non-Contact Anterior Cruciate Ligament Injury. *J Clin Med* 2022;11:1402.
- [148] Park YL, Wackerle AM, Collins B i sur. Return to sport and patient reported outcomes in athletes participating in martial arts after anterior cruciate ligament reconstruction at mean follow-up of 12 years. *J Exp Orthop* 2025;12(2):e70272.
- [149] Chen T, Wang S, Li Y, Ai C, Jiang F, Chen S. Radiographic Osteoarthritis Prevalence Over Ten Years After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Int J Sports Med* 2019;40:683–95.
- [150] Zadehmohammad A, Grillari J, Stevanovic V, Brandl G, Ernstbrunner L, Hoffelner T. Osteoarthritis Progression after ACL Reconstruction Was

- Significantly Higher Than That of the Healthy Contralateral Knees: Long-Term Follow Up Study of Mean 16.4 Years. *J Clin Med* 2022;11:775.
- [151] Webster KE, Feller JA. A research update on the state of play for return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Traumatol* 2019;20:10.
 - [152] Morgan JA, Dahm D, Levy B, Stuart MJ; MARS Study Group. Femoral Tunnel Malposition in ACL Revision Reconstruction. *J Knee Surg* 2012;25:361–8.
 - [153] Carson E, Anisko E, Restrepo C, Panariello R, O'Brien S, Warren R. Revision Anterior Cruciate Ligament Reconstruction – Etiology of Failures and Clinical Results. *J Knee Surg* 2004;17:127–32.
 - [154] Diamantopoulos AP, Lorbach O, Paessler HH. Anterior Cruciate Ligament Revision Reconstruction. *Am J Sports Med* 2008;36:851–60.
 - [155] Jaureguito JW, Paulos LE. Why Grafts Fail. *Clin Orthop Relat Res* 1996;325:25–41.
 - [156] Johnson DL, Swenson TM, Irrgang JJ, Fu FH, Harner CD. Revision Anterior Cruciate Ligament Surgery: Experience From Pittsburgh. *Clin Orthop Relat Res* 1996;325:100–9.
 - [157] Uribe JW, Hechtman KS, Zvijac JE, Tjin-A-Tsoi EW. Revision Anterior Cruciate Ligament Surgery: Experience From Miami. *Clin Orthop Relat Res* 1996;325:91–9.
 - [158] Samitier G, Marcano AI, Alentorn-Geli E, Cugat R, Farmer KW, Moser MW. Failure of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Arch Bone Jt Surg* 2015;3:220–40.
 - [159] Jaecker V, Zapf T, Naendrup JH, Kanakamedala AC, Pfeiffer T, Shafizadeh S. Differences between traumatic and non-traumatic causes of ACL revision surgery. *Arch Orthop Trauma Surg* 2018;138:1265–72.
 - [160] Bayer S, Meredith SJ, Wilson KW i sur. Knee Morphological Risk Factors for Anterior Cruciate Ligament Injury. *J Bone Joint Surg Am* 2020;102:703–18.
 - [161] Shi WL, Gao YT, Zhang KY i sur. Femoral Tunnel Malposition, Increased Lateral Tibial Slope, and Decreased Notch Width Index Are Risk Factors for Non-

- Traumatic Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Failure. *Arthroscopy* 2024;40:424-434.e3.
- [162] van Eck CF, Lesniak BP, Schreiber VM, Fu FH. Anatomic Single- and Double-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Flowchart. *Arthroscopy* 2010;26:258–68.
- [163] Kopf S, Pombo MW, Szczodry M, Irrgang JJ, Fu FH. Size Variability of the Human Anterior Cruciate Ligament Insertion Sites. *Am J Sports Med* 2011;39:108–13.
- [164] Musahl V, Nazzari EM, Lucidi GA i sur. Current trends in the anterior cruciate ligament part 1: biology and biomechanics. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2022;30:20–33.
- [165] Morales-Avalos R, Perelli S, Vilchez-Cavazos F i sur. The morphology of the femoral footprint of the anterior cruciate ligament changes with aging from a large semicircular shape to a small flat ribbon-like shape. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2022;30:3402–13.
- [166] Suchilin IA, Malanin DA, Krayushkin AI. Use of the reference anatomical structures of the femoral intercondylar space in anterior cruciate ligament reconstruction. *Traumatology and Orthopedics of Russia* 2012;18:67–72.
- [167] Iwama G, Iriuchishima T, Horaguchi T, Aizawa S. Measurement of the Whole and Midsubstance Femoral Insertion of the Anterior Cruciate Ligament: The Comparison with the Elliptically Calculated Femoral Anterior Cruciate Ligament Footprint Area. *Indian J Orthop* 2019;53:727–31.
- [168] Pujol N, Queinnec S, Boisrenoult P, Maqdes A, Beaufile P. Anatomy of the anterior cruciate ligament related to hamstring tendon grafts. A cadaveric study. *Knee* 2013;20:511–4.
- [169] Otsubo H, Shino K, Suzuki D i sur. The arrangement and the attachment areas of three ACL bundles. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012;20:127–34.
- [170] van Eck CF, Martins CAQ, Vyas SM, Celentano U, van Dijk CN, Fu FH. Femoral intercondylar notch shape and dimensions in ACL-injured patients. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2010;18:1257–62.

- [171] Parrilli A, Grassi A, Orellana F i sur. 3D visualization of the human anterior cruciate ligament combining micro-CT and histological analysis. *Surg Radiol Anat* 2024;46:249–58.
- [172] Biewener AA, Fazzalari NL, Konieczynski DD, Baudinette RV. Adaptive changes in trabecular architecture in relation to functional strain patterns and disuse. *Bone* 1996;19:1–8.
- [173] Benjamin M, Kumai T, Milz S, Boszczyk BM, Boszczyk AA, Ralphs JR. The skeletal attachment of tendons—tendon ‘entheses.’ *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 2002;133:931–45.
- [174] Norman D, Metcalfe AJ, Barlow T i sur. Cortical Bony Thickening of the Lateral Intercondylar Wall: The Functional Attachment of the Anterior Cruciate Ligament. *Am J Sports Med* 2017;45:394–402.
- [175] Yahagi Y, Iriuchishima T, Horaguchi T, Suruga M, Tokuhashi Y, Aizawa S. The importance of Blumensaat’s line morphology for accurate femoral ACL footprint evaluation using the quadrant method. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018;26:455–61.
- [176] Iriuchishima T, Ryu K, Aizawa S, Fu FH. Blumensaat’s line is not always straight: morphological variations of the lateral wall of the femoral intercondylar notch. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2016;24:2752–7.

POPIS SLIKA

Slika 1. Odnos tibijalnog hvatišta prednjeg križnog ligamenta (ACL) i prednjeg roga lateralnog meniska (PRLM). F - femur; T - tibija.	2
Slika 2. Prednji križni ligament omotan sinovijalnom membranom.	2
Slika 3. Odnos širine prednjeg križnog ligamenta na (a) femoralnom hvatištu, (b) u srednjem dijelu i (c) na tibijalnom hvatištu.	3
Slika 4. Anteromedijalni (AM) i posterolateralni (PL) snop jasno se uočavaju kod (A) intaktnog prednjeg križnog ligamenta i (B) nakon disekcije.	4
Slika 5. Artroskopski prikaz prednje i gornje granice femoralnog hvatišta. Crnim strelicama označen je lateralni interkondilarni greben.	5
Slika 6. Oblik tibijalnog hvatišta prednjeg križnog ligamenta. MM - medijalni menisk; AM - anteromedijalni snop; PL-posterolateralni snop.	6
Slika 7. Prikaz orijentacijske tehnike postavljanja femoralnog tunela metodom bročanika sata projiciranog na ulazu u interkondilarnu udubinu. A - desno koljeno; B - lijevo koljeno. .	14
Slika 8. Radiografska snimka desnog koljena i prikaz femoralnog vijka postavljenog transtibijalnom tehnikom izvan anatomske hvatišta. Femoralni vijak nalazi se na položaju 12 sati.	15
Slika 9. Radiografska snimka koljena i prikaz femoralnog vijka postavljenog (A) na 11 sati i (B) na 10 sati.	16
Slika 10. Radiografska snimka desnog koljena 20 godina nakon rekonstrukcije prednjeg križnog ligamenta koja prikazuje četvrti stupanj osteoartritisa.	23
Slika 11. Stražnji ulaz u interkondilarnu udubinu. Strelicama je označen lateralni interkondilarni greben.	27
Slika 12. <i>Shematski prikaz medijalnog zida lateralnog kondila femura na kojem se vidi položaj lateralnog interkondilarnog grebena i lateralnog bifurkacijskog grebena.</i>	29
Slika 13. Artroskopska snimka koljena. Prikazana je medijalna strana lateralnog kondila femura. Crvenim strelicama označen je lateralni interkondilarni greben (LIR, od engl. lateral intercondylar ridge).	30
Slika 14. Položaj distalnog femura i korištena nomenklatura u istraživanju. Prikaz distalnog femura u sagitalnoj ravnini, presječen po sredini krova kako bi se prikazao medijalni zid lateralnog femoralnog kondila. Femur se nalazi u fleksiji od 90°, što odgovara položaju koljena tijekom artroskopije. Interkondilarna udubina se opisuje od plićeg segmenta prema dubljem, u anatomske smjeru - od distalnog dijela prema proksimalnom, dok je visina interkondilarne udubine orijentirana od niže točke prema višoj što bi odgovaralo anatomske smjeru posteriorno – anteriorno.	35

Slika 15. Prikaz lateralnog interkondilarnog grebena (LIR, od engl. lateral intercondylar ridge) na maceriranim preparatima femura.	36
Slika 16. Položaj i način fiksacije femura tijekom rendgenološkog snimanja.	37
Slika 17. Rendgenološka postranična snimka distalnog femura. Žicom su označeni (a) lateralni interkondilarni greben (LIR, od engl. lateral intercondylar ridge) i (b) stražnji rub kondila femura.	38
Slika 18. <i>Određivanje oblika native Blumensaatove linije (BL) u odnosu na idealnu Blumensaatovu liniju (iBL). Žuta iscrtkana linija predstavlja iBL, dok crvena linija odgovara nativej BL.</i>	39
Slika 19. <i>Određivanje rendgenološke gustoće Blumensaatove linije. gA i gC - segmenti s većom rendgenološkom gustoćom (granice označene crvenim linijama); gB – segment s manjom rendgenološkom gustoćom (granice označene žutim linijama)</i>	40
Slika 20. <i>Određivanje kuta LIR - iBL. Crvena linija predstavlja LIR, žuta linija predstavlja iBL, α je kut koji LIR i iBL međusobno zatvaraju. LIR – lateralni interkondilarni greben; iBL - idealna Blumensaatova linija.</i>	41
Slika 21. <i>Određivanje segmenata idealne Blumensaatove linije (iBL) ispred i iza sjecišta s lateralnim interkondilarnim grebenom (LIR). Žutom bojom označena je iBL, crvenom bojom označen je LIR, zelena točka predstavlja mjesto u kojem LIR siječe iBL. Duljina A predstavlja dio iBL-a ispred (anteriorno) od spojnice sjecišta LIR - iBL; duljina B predstavlja dio iza (posteriorno) od sjecišta LIR – iBL.</i>	42
Slika 22. <i>Određivanje položaja lateralnog interkondilarnog grebena (LIR) u odnosu na tangentu stražnje kortikalne kosti distalnog femura (PCT). Crvena linija označava LIR, zelena linija označava PCT, kut β označava kut koji zatvaraju ove dvije linije.</i>	43
Slika 23. <i>LIR na maceriranim preparatima i na 3D digitalnom prikazu. Prikaz interkondilarne udubine sa stražnje strane izlaza. Početak i kraj LIR-a označeni su plavim strelicama, dok su crnim strelicama označene njegove granice, kako bi tijekom 3D analize bile jasno uočljive. Lijevo je prikazan macerirani preparat femura, a desno njegova 3D rekonstrukcija. LIR – lateralni interkondilarni greben.</i>	44
Slika 24. <i>Trodimenzijsko (3D) skeniranje femura pomoću ATOS II i ATOS III sustava s trostrukom kamerom. Slika prikazuje položaj femura na podlozi koja se tijekom skeniranja rotira.</i>	45
Slika 25. <i>Formiranje ravnine koja odvaja krov od lateralnog zida interkondilarne udubine. Trodimenzijski prikaz distalnog femura s označenim točkama u tri različita kuta gledanja istog modela. N označava najdistalniju, visoku/ plitku točku na prednjem izlazu iz interkondilarne udubine. L je najistaknutija i najviša točka lateralnog ruba femoralne trohleje</i>	

lateralnog kondila. G1 označava najproksimalniju, visoku/ duboku točku na granici hrskavice lateralnog femoralnog kondila. 48

Slika 26. Položaj lateralnog interkondilarnog grebena (LIR-a) u području lateralnog zida i krova interkondilarne udubine. Pogled u stražnji dio distalnog femura (3D modela) iz dva različita kuta. Plavom bojom je prikazana ravnina koja prolazi kroz prethodno određene točke te razdvaja gornju (krovnu) površinu od bočne (lateralne) stijenke interkondilarne udubine. Točka A označava početak LIR-a, točka B označava mjesto gdje ta ravnina presijeca LIR, dok je točka C kraj grebena. G1 predstavlja najproksimalniju, duboku i visoku točku na rubu hrskavice lateralnog kondila femura, a N označava najdistalniju, plitku i visoku točku na rubu hrskavice lateralnog kondila, a smještenu na prednjem izlazu iz interkondilarne udubine. 51

Slika 27. *Prikaz koštanog područja insercije vlakana prednjeg križnog ligamenta (ACL-a). Definiranje površine femoralnog hvatišta ACL-a (ACL-FIA) pomoću funkcije "skinsurface" u softveru: Točka A - početak lateralnog interkondilarnog grebena (LIR-a); Točka C - završetak LIR-a; Točka G1 - najlateralnija točka stražnje interkondilarne linije. Spojnica A-C odgovara LIR-u i čini prednju granicu ACL-FIA; spojnica G1-C odgovara hrskavičnom rubu lateralnog kondila femura i čini donju granicu ACL-FIA; spojnica A-G1 predstavlja stražnju granicu ACL-FIA.* 52

Slika 28. Prikaz prednjeg križnog ligamenta (ACL) i stražnjeg križnog ligamenta (PCL) nakon disekcije. (A) Prednji dio i (B) stražnji dio koljena nakon odstranjenja periartikularnog tkiva i sinovijalne ovojnice oko križnih ligamenata. 55

Slika 29. Disekcija koljena. (A) preparat nakon uklanjanja stražnjeg križnog ligamenta; (B) preparat nakon uklanjanja tibije. 56

Slika 30. Identifikacija snopova prednjeg križnog ligamenta (ACL-a). Sonda je u kontaktu s anteromedijalnim (AM) snopom, dok je posterolateralni (PL) snop slobodan. 56

Slika 31. Preparat distalnog femura nakon uklanjanja medijalnog kondila. 57

Slika 32. Seciranje hvatišta prednjeg križnog ligamenta (ACL-a). Plavom tintom je označeno područje nakon uklanjanja vlakana ACL-a koja su se nalazila na lateralnom zidu interkondilarne udubine. Preostali dio vlakana ACL-a polazio je s krova interkondilarne udubine. 58

Slika 33. *Odvajanje krova od zida interkondilarne udubine pomoću programskog alata. Prikaz površine femoralnog hvatišta prednjeg križnog ligamenta (ACL-FIA - narančasto) i lateralnog interkondilarnog grebena LIR-a (prednja granica ACL-FIA) koji ostaju na krovu interkondilarne udubine nakon presjeka lateralnog kondila definiranom ravninom.* 63

Slika 34. Određivanje širine posteriornog izlaza interkondilarne udubine. Točka G1 - najproksimalnija, visoka/ duboka točka hrskavičnog ruba lateralnog kondila. Točka G2 - najproksimalnija, visoka/ duboka točka hrskavičnog ruba medijalnog kondila.	64
Slika 35. Udaljenost krajnje točke LIR-a (točka A) od najdublje točke hrskavične granice lateralnog femoralnog kondila (točka G1).....	65
Slika 36. Udaljenost krajnje točke LIR-a (točka A) od stražnje interkondilarne linije (PICL). 65	
Slika 37. Prikaz snopova prednjeg križnog ligamenta (ACL). Jasno su vidljivi anteromedijalni (AM) i posterolateralni (PL) snop: A – u intaktnom koljenu; B – nakon uklanjanja medijalnog kondila femura; C – nakon uklanjanja tibije; D – nakon odstranjivanja ACL-a in toto.....	68
Slika 38. Prikaz tri snopa prednjeg križnog ligamenta: posterolateralni (PL), intermedijalni (IM) i anteromedijalni (AM) snop.	68
Slika 39. Pogled u zakoljenu jamu s prikazom prednjeg križnog ligamenta (ACL) i stražnjeg križnog ligamenta (PCL). A – nativni preparat ACL-a; B – prikaz ACL-a nakon povlačenja granice (crvena linija) između krova i lateralnog zida interkondilarne udubine. Žutom bojom označen je dio ligamenta koji polazi s krova, a plavom bojom dio koji polazi s lateralnog zida interkondilarne udubine.....	69
Slika 40. Dio prednjeg križnog ligamenta (ACL) nakon odstranjivanja vlakana s lateralnog zida interkondilarne udubine. A – plavom tintom označeno područje zida s kojeg su uklonjena vlakna ACL-a; B – dio ACL-a koji polazi s lateralnog dijela krova interkondilarne udubine.	70
Slika 41. Lateralni dio krova interkondilarne udubine izrezan oscilirajućom pilom s kojeg polazi prednji križni ligament.	70
Slika 42. Položaj i oblik lateralnog interkondilarnog grebena (LIR). Plavim koncem obilježen je lateralni interkondilarni greben.....	71
Slika 43. Analiza nazočnosti prednjeg križnog ligamenta (ACL) pri intaktnom femoralnom hvatištu ACL-a. (A) kod intaktnog ACL-a LIR nije vidljiv; (B) kod intaktnog ACL-a LIR je vidljiv iznad hvatišta posterolateralnog snopa (crne strelice).....	72
Slika 44. Prikaz ostatnog bataljka koji poprima oblik valovite trake na femoralnom hvatištu nakon uklanjanja prednjeg križnog ligamenta (ACL).....	73
Slika 45. Prikaz lateralnog kondila femura kod (A) intaktnog prednjeg križnog ligamenta (ACL), te (B) nakon uklanjanja vlakana ACL-a s femoralnog hvatišta.....	74
Slika 46. Oblik femoralnog hvatišta nakon uklanjanja prednjeg križnog ligamenta.	75

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prosječne vrijednosti i standardne devijacije (SD) mjerenih parametara.	62
Tablica 2. Postotni udio LIR-a i ACL-FIA na krovu interkondilarne udubine. Rezultati su prikazani kao postotak $\pm$ SD.....	62
Tablica 3. Tablični prikaz analiziranih morfoloških karakteristika prednjeg križnog ligamenta i lateralnog interkondilarnog grebena.....	76

POPIS POKRATA (abecedno)

ACL– prednji križni ligament (od engl. *anterior cruciate ligament*)

ACL-FIA – površina femoralnog hvatišta ACL-a (od engl. *anterior cruciate ligament femoral insertion area*)

AM – anteromedijalni snop

BEAR – postupak cijeljenja prednjeg križnog ligamenta (od engl. *bridge - enhanced ACL repair*)

BL – Blumensaatova linija (od engl. *Blumensaat's line*)

BTB – transplantat srednjeg dijela ligamenta patele (od engl. *bone – patellar tendon – bone*)

CT – kompjuterizirana tomografija

iBL – idealna Blumensaatova linija

LARS – sintetički implantat (od engl. *ligament advanced reinforcement*)

LIR – lateralni interkondilarni greben (od engl. *lateral intercondylar ridge*)

MARS – multicentrična grupa za istraživanje ACL-a (od engl. *Multicentric anterior cruciate ligament research society*)

OA – osteoartritis

PCL – stražnji križni ligament (od engl. *posterior cruciate ligament*)

PCT – tangenta stražnje kortikalne kosti distalnog femura (od engl. *posterior femoral cortex tangent*)

PICL – stražnja interkondilarna linija (od engl. *posterior intercondylar line*)

PL – posterolateralni snop

PLR - posterolateralni rub interkondilarne udubine (od engl. *posterolateral rim*)

QT – tetiva kvadricepsa (od engl. *quadriceps tendon*)

ŽIVOTOPIS

OSOBNİ PODATCI

Ime i prezime **Leo Gulan**
Titula dr. med.
Adresa Kvaternikova 70A, 51000 Rijeka, Hrvatska
Telefon +385 91 7515301
E-adresa leo.gulan@gmail.com
Osobna mrežna stranica -
Državljanstvo hrvatsko
Nacionalnost Hrvat
Datum i mjesto rođenja 20. lipnja 1993. Rijeka, Hrvatska

RADNO ISKUSTVO

Datum Od 11.1.2021. do danas
Ustanova zaposlenja Klinika za ortopediju Lovran
Naziv radnog mjesta Liječnik na specijalizaciji iz ortopedije i traumatologije (Dekret o specijalizaciji izdan 05.06.2020.)
Područje rada Biomedicina i zdravstvo, ortopedija i traumatologija

Datum Od 1.8.2019. do 11.1.2021.
Ustanova zaposlenja Klinički bolnički centar Rijeka, Klinika za kirurgiju
Naziv radnog mjesta Liječnik na specijalizaciji iz ortopedije i traumatologije (Dekret o specijalizaciji izdan 05.06.2020.)
Područje rada Biomedicina i zdravstvo, ortopedija i traumatologija

Datum Od 15.3.2019. do 11.1.2021.
Ustanova zaposlenja Medicinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Zavod za anatomiju
Naziv radnog mjesta Suradnik u suradničkom zvanju i na radnom mjestu asistent
Područje rada Kao asistent sudjelujem u svim oblicima nastave iz predmeta Anatomija te sudjelujem u znanstveno istraživačkom radu

Datum Od 15.10.2018. do 14.3.2019.
Ustanova zaposlenja Klinički bolnički centar Rijeka
Naziv radnog mjesta Doktor medicine – pripravnik
Područje rada Stažiranje na odjelima KBC Rijeka prema Pravilniku o pripravničkom stažu zdravstvenih djelatnika (u trajanju od 5 mjeseci)

Datum Od 2013. do 2018.
Ustanova zaposlenja Medicinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

Naziv radnog mjesta	Demonstrator na Zavodu za anatomiju (za Integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij Medicina, Integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij Dentalna medicina, Stručni studij Fizioterapija, Stručni studij Radiološka tehnologija)
Područje rada	Kao student-demonstrator sudjelovao sam u odvijanju praktičnih oblika nastave iz predmeta Anatomija

ŠKOLOVANJE

Datum	11.05.2020. - danas
Mjesto	Rijeka, Hrvatska
Ustanova	Medicinski fakultet Sveučilišta u Rijeci - Poslijediplomski sveučilišni (doktorski) studij Klinička medicina (Doktorska škola iz znanstvenog područja biomedicina i zdravstvo)
Zvanje	-
Datum	Od 2012./2013. do 2017./2018.
Mjesto	Rijeka, Hrvatska
Ustanova	Medicinski fakultet Sveučilišta u Rijeci (Integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij Medicina)
Zvanje	Doktor medicine (dr. med.)
Datum	Od 2008. do 2012.
Mjesto	Rijeka, Hrvatska
Ustanova	Gimnazija „Andrija Mohorovičić“ Rijeka
Zvanje	-
Datum	Od 2000. do 2008.
Mjesto	Rijeka, Hrvatska
Ustanova	Osnovna škola „Fran Franković“ Rijeka
Zvanje	-

JEZICI

MATERINSKI JEZIK Hrvatski

DRUGI STRANI JEZICI

Jezik **Engleski (C1 razina)**
Jezik **Talijanski jezik**

- Nagrada za učenika generacije 2008.
- Nagrada za najbolju poster prezentaciju:
Hrboka M, Gorjan L, Gulan L, Gregorović A. The development of renal insufficiency after tumor nephrectomy in KBC Rijeka. 3rd internacional students congress Sarajevo (SaMed). Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, February 1-5, 2017. Abstract book p93.

ORGANIZACIJSKE VJEŠTINE I KOMPETENCIJE

- Član Sportskog odbora svih studenata (SOSS) (2012.-2018.)
- Član Nadzornog odbora i predsjednik radnog predsjedništva udruge SOSS-a u ak.god. 2017/2018.
- Sudjelovanje u programu Student-mentor (mentoriranje studenata nižih godina)
- Član organizacijskog odbora „Arthrori“ - Arthroscopy Course, 16 – 17.10.2015. Rijeka
- Tehnička podrška kod organizacije AOTrauma tečajeva koji su održani od 3-6. travnja 2019. u Rijeci (Zavod za anatomiju) i Opatiji

ČLANSTVA U ZNANSTVENIM ORGANIZACIJAMA I TIJELIMA

- Hrvatski liječnički zbor (HLZ)
- Hrvatska liječnička komora (HLK)
- Hrvatsko društvo za sportsku traumatologiju i artroskopiju (HDSTA)

RADovi

Radovi objavljeni u časopisima indeksiranim u relevantnim bazama podataka (Current Contents, Scopus, Medline, EMBASE itd.)

1. **Gulan L**, Kovačević M, Žauhar G, Jurdana H, Gulan G. The forgotten third: understanding the ACL femoral insertion and lateral intercondylar ridge extension onto the notch roof. *Surg Radiol Anat.* 2025 Apr 7. doi:10.1007/s00276-025-03628-6.
2. **Gulan L**, Hari J, Franić M, Gulan G. Radiographic analysis of the relationship of the lateral intercondylar ridge, Blumensaat's line, and posterior margin of the lateral femoral condyle. *Acta Clin Croat.* 2023;62(Suppl 3):S33–S38. doi:10.20471/acc.2023.62.s3.5.
3. Mokrović H, Komen S, **Gulan L**, Gulan G. Radiographic analysis of the proximal femoral anatomy in the Croatian population. *Int Orthop.* 2021;45:2261–2267. doi:10.1007/s00264-021-04942-5.
4. **Gulan L**, Štiglic D, Majić D, et al. Ankle syndesmosis: Anatomy, mechanisms of injuries, diagnosis and treatment. *Med Flum.* 2020;56(3):263–268. doi:10.21860/medflum2020_241511.
5. Gordan G, Gržalja N, Lalić Š, **Gulan L**. Lateral retinaculum: Past and present. *Med Flum.* 2020;56(3):256–262. doi:10.21860/medflum2020_241509.
6. **Gulan L**, Balenović A, Jurdana H, Gulan G. Radiographic analysis of the Blumensaat's line and the location of the lateral intercondylar ridge as contribution to the anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. *Med Flum.* 2020;56(3):240–245. doi:10.21860/medflum2020_241503.

7. **Gulan L**, Šoić-Vranić T, Marić I, Jerković R, Gulan G. Relationship between the lateral intercondylar ridge and intact femoral insertion of the anterior cruciate ligament – cadaveric study. *Med Flum*. 2020;56(3):250–255. doi:10.21860/medflum2020_241508.
8. Jurdana H, Šantić V, Legović D, Šestan B, Jotanović Z, **Gulan L**. Tibial tubercle avulsion fracture with concomitant reversible foot paresis in adolescent. *Med Flum*. 2020;56(3):269–272. doi:10.21860/medflum2020_241513.
9. Gulan G, Šumanovac A, Jurdana H, **Gulan L**. Y sign: new landmark for anteromedial portal placement in knee arthroscopy. *Surg Radiol Anat*. 2019;41(11):1265–1270. doi:10.1007/s00276-019-02281-0.
10. **Gulan L**, Zec A, Mokrović H, Vrgoč G, Jurdana H. Correction of adult posttraumatic rigid severe pes equinovarus with tibiototalcalcanal retrograde nailing. *Med Flum*. 2017;53(3):302–306. doi:10.21860/medflum2017_179750.
11. **Gulan L**, Đorđević M, Legović D, Šantić V, Jurdana H. History of hip arthroplasty: From John R. Barton to John Charnley. *Med Flum*. 2017;53(1):28–32. doi:10.21860/medflum2017_173379.

Aktivno sudjelovanje na međunarodnim skupovima:

1. **Gulan L**, Gorjan L, Hrboka M, Gregorović A. Gender difference of posterior condylar offset ratio among Croatian population. 3rd internacional students congress Sarajevo. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, February 1-5, 2017. Abstract book p113.
2. Hrboka M, Gorjan L, **Gulan L**, Gregorović A. The development of renal insufficiency after tumor nephrectomy in KBC Rijeka. 3rd internacional students congress Sarajevo (SaMed). Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, February 1-5, 2017. Abstract book p93.
3. Gregorović A, **Gulan L**, Jerković A. Ruptured abdominal aortic aneurysm: Case report. 2. Kongres hitne medicine s međunarodnim sudjelovanjem. Rijeka, Croatia, March 31 – April 2, 2017. Abstract book, poster section no.4.
4. **Gulan L**, Balenović A, Gregorović A, Jurdana H, Mikačević M. New minimally invasive treatment for mallet finger. International Biomedical student congress Rijeka (BRIK). Rijeka, Croatia, November 2-4, 2017. Abstract book p28.
5. **Gulan L**, Balenović A, Durut-Čupev I. Surgical techniques in treating obstructive sleep apnea. 7th Croatian Congress of Obesity – Student Symposium. Opatia, Croatia, April 26-29, 2018. Abstract book p60.
6. **Gulan L**, Jurdana H, Lopac D, Gulan G. Relationship of the lateral intercondylar ridge with the intact femoral insertion of the anterior cruciate ligament. 18th European Society of Sports Traumatology, Knee Surgery & Arthroscopy (ESSKA) Congress. Glasgow, United Kingdom, May 9-12, 2018. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018;26(Suppl 1):S198. **(apstrakt u CC časopisu)**
7. **Gulan L**, Veljković Vujaklija D, Jurdana H, Zec A, Gulan G. Blumensaat's line is most often in the S shape form. 18th European Society of Sports Traumatology, Knee Surgery & Arthroscopy (ESSKA) Congress. Glasgow, United Kingdom, May 9-12, 2018. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018;26(Suppl 1):S307. **(apstrakt u CC časopisu)**
8. **Gulan L**, Veljković Vujaklija D, Jurdana H, Gulan G. Comparison of two methods for determining Blumensaat's line. 18th European Society of Sports Traumatology, Knee Surgery & Arthroscopy (ESSKA) Congress. Glasgow, United Kingdom, May 9-12, 2018. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018;26(Suppl 1):S308. **(apstrakt u CC časopisu)**
9. Gulan G, Šumanovac A, Jurdana H, **Gulan L**, Mikačević M. Watermark sign – new landmark for anteromedial portal placement in knee arthroscopy. 18th European Society of Sports Traumatology, Knee Surgery & Arthroscopy (ESSKA) Congress. Glasgow, United Kingdom, May 9-12, 2018. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018;26(Suppl 1):S349. **(apstrakt u CC časopisu)**

Poglavlje u knjizi – autorstvo

1. Vježbe iz Fiziologije i patofiziologije II, prvo izdanje, sveučilišni udžbenik za Integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij Medicina i Integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij Dentalna medicina, 2018. (ISBN 978-953-7957-69-8).
2. Practicals of Physiology and Pathophysiology II, first edition, sveučilišni udžbenik za Integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij Medicina i Dentalna medicina na engleskom jeziku, 2018. (ISBN 978-953-7957-72-8)
3. Gulan G, Jurdana H, **Gulan L**. Personalized Total Knee Arthroplasty: Better fit for Better Function. In: Bodiroga-Vukobrat et al. (eds). Personalized Medicine in Healthcare System. Springer. 2019;307-314.

POZNAVANJE RADA NA RAČUNALU

Dobro poznavanje rada na računalu: statistički programi za obradu podataka, većina Microsoft kompjutorskih programa za pisanje, obradu i prikazivanje rezultata. Kompjutorski programi za obradu slika i video filmova.

OSTALE VAŽNE VJEŠTINE I KOMPETENCIJE

- Škola stranih jezika „Oxford“ i „Lingue“
- Igrač Vaterpolo kluba „Jadran Kostrena“,
- Veteran Plivačkog kluba „Primorje“, Rijeka
- Veteran Vaterpolo kluba „Primorje“, Rijeka
- Vozačka dozvola B kategorije