



VILNIAUS UNIVERSITETAS

MEDICINOS FAKULTETAS

Medicinos studijos

Reumatologijos, ortopedijos traumatologijos ir rekonstrukcinės chirurgijos klinika

Klinikinės medicinos institutas

Julius Šumskis, VI kursas, 8 grupė

VIENTISŲJŲ STUDIJŲ MAGISTRO BAIGIAMASIS DARBAS

Apatinių galūnių ilgųjų vamzdinių kaulų lūžių potrauminės korekcijos metodų apžvalga

A Review of Methods of Post-Traumatic Correction of Lower Extremity Long Bone Fractures

Darbo vadovas

Doc. Dr. Jaunius Kurtinaitis

Katedros ar klinikos vadovas

prof. (HP) dr. Irena Butrimienė

Vilnius, 2025.

julius.sumskis@mf.stud.vu.lt

TURINYS

SANTRAUKA	4
SUMMARY	5
SANTRUMPOS	6
1. ĮVADAS	6
1.1 METODOLOGIJA	8
2. BIOMECHANIKA	9
2.1 Kortikalinio ir trabekulinio kaulo mechaninės savybės	9
2.2 Kaulo adaptacija veikiant mechaninėms jėgoms	10
2.3 Kaulo gijimas	10
2.4 Biomechaniniai veiksniai lūžių gydyme	11
3. POTRAUMINIŲ DEFORMACIJŲ TIPAI	12
4. DIAGNOSTIKA	15
5. POTRAUMINĖS KOREKCIJOS METODŲ APŽVALGA	16
5.1 Chirurginės technikos, naudojamos potrauminių lūžių korekciijoje	17
5.1.1 Osteotomija	17
5.1.2 Išorinė fiksacija	18
5.1.3 Galūnių ilgio skirtumų gydymas	20
5.1.4 Kaulo transplantacija ir kaulo defektų gydymas	21
5.1.5 Artroplastika	22
6. KOMPLIKACIJOS	22
6.1 Osteotomijos komplikacijos	22
6.2 Išorinės fiksacijos komplikacijos	23
6.3 Apatinės galūnės ilgio korekcijos komplikacijos	24
6.4 Kaulo transplantacijos ir kaulo defektų gydymo komplikacijos	25

6.5 Korekcijos artroplastika komplikacijos	26
7. DISKUSIJA	26
7.1 Chirurgo patirties ir individualių paciento veiksmų įtaka.....	29
8. IŠVADOS.....	30
LITERATŪROS ŠALTINIAI	31

SANTRAUKA

Tikslas:

Šio darbo tikslas – išanalizuoti esamus ilgųjų apatinių galūnių kaulų potrauminių deformacijų korekcijos metodus, įvertinti jų biomechaninį pagrindimą, klinikinį efektyvumą, pritaikymo indikacijas, privalumus, trūkumus bei galimas komplikacijas ir jų valdymo strategijas.

Tyrimo medžiaga ir metodai:

Tyrime taikyta sisteminė literatūros apžvalgos metodika. Duomenys rinkti iš „PubMed“, „Google Scholar“ ir „ScienceDirect“ duomenų bazių, pirmenybę teikiant naujausioms (2015–2024 m.) publikacijoms. Į analizę įtraukti klinikiniai tyrimai, atvejų analizės, retrospektyviniai ir prospektyviniai tyrimai, kurie aprašė potraumines deformacijas (netinkamą suaugimą, nesugijimą, galūnių ilgio skirtumą) ir jų korekcinis gydymo metodus (osteotomijos, vidinė ir išorinė fiksacija, ilginimo technologijos, kaulo transplantacija).

Rezultatai:

Apžvalgoje nustatyta, kad potrauminės deformacijos dažniausiai pasireiškia netinkamu lūžių suaugimu, galūnės ilgio skirtumu bei segmentiniais kaulo defektais. Gydymui dažniausiai taikomos šios strategijos: laipsniška korekcija naudojant Ilizarovo ar Taylor Spatial Frame sistemas, tiksli osteotomija, vidinė fiksacija motorizuotomis vinimis (PRECICE, FITBONE), bei rekonstrukcinės technikos, tokios kaip Masquelet metodas ar vaskuliarizuotos transplantacijos. Gydymo metodo pasirinkimas priklauso nuo deformacijos tipo, paciento amžiaus, minkštųjų audinių būklės bei sisteminių ligų. Visų metodų efektyvumas vertintas pagal korekcijos tikslumą, gijimo trukmę, komplikacijų dažnį ir funkcinį rezultatą.

Išvados:

Potrauminių deformacijų gydymas reikalauja individualizuoto, biomechanškai pagrįsto požiūrio. Nors laipsniška korekcija išoriniais fiksatoriais išlieka „aukso standartu“, vis plačiau taikomos tikslios vienpjūvės osteotomijos ir intramedulinės vinys leidžia pasiekti panašius rezultatus trumpesniu laikotarpiu ir su mažesniu diskomfortu pacientui. Svarbus ne tik mechaninis atstatymas, bet ir psichologinis palaikymas, kadangi šios deformacijos reikšmingai mažina pacientų gyvenimo kokybę.

Raktažodžiai:

potrauminė deformacija, malunion, nonunion, galūnės ilgio skirtumas, osteotomija, išorinė fiksacija, Ilizarovo metodas, PRECICE vinis, kaulo transplantacija

SUMMARY

Objective:

The aim of this study is to analyze existing correction methods for post-traumatic deformities of long bones in the lower limbs, evaluate their biomechanical basis, clinical effectiveness, indications for use, advantages, disadvantages, as well as potential complications and their management strategies.

Materials and Methods:

A systematic literature review methodology was applied. Data were collected from “PubMed”, “Google Scholar”, and “ScienceDirect” databases, prioritizing the most recent publications (2015–2024). The analysis included clinical studies, case reports, retrospective and prospective studies describing post-traumatic deformities (malunion, nonunion, limb length discrepancy) and their correctional treatment methods (osteotomies, internal and external fixation, limb lengthening technologies, and bone transplantation).

Results:

The review identified that post-traumatic deformities most commonly manifest as improper fracture healing, limb length discrepancies, and segmental bone defects. Treatment strategies include gradual correction using Ilizarov or Taylor Spatial Frame systems, precise osteotomies, internal fixation with motorized nails (PRECICE, FITBONE), and reconstructive techniques such as the Masquelet method or vascularized grafts. The choice of treatment method depends on the type of deformity, patient age, soft tissue condition, and systemic diseases. The effectiveness of each method was assessed based on correction accuracy, healing time, complication rates, and functional outcomes.

Conclusions:

The treatment of post-traumatic deformities requires an individualized and biomechanically grounded approach. Although gradual correction with external fixators remains the “gold standard”, increasingly popular single-cut osteotomies and intramedullary nails achieve similar outcomes in shorter timeframes and with reduced patient discomfort. Emphasis should be placed not only on mechanical correction but also on psychological support, as these deformities significantly impair patients’ quality of life.

Keywords:

post-traumatic deformity, malunion, nonunion, limb length discrepancy, osteotomy, external fixation, Ilizarov technique, PRECICE nail, bone transplantation

SANTRUMPOS

AP – anteroposteriorinė (projekcija)

CLAP – Contained Local Antibiotic Perfusion (tai vietinio antibiotikų tiekimo sistema, naudojama infekuotoms kaulų defektų vietoms gydyti)

FDA – Food and Drug Administration

FVFG – free vascularized fibular graft (laisva vaskuliarizuota šėvikaulio transplantacija)

IL – interleukinas (pvz., IL-1, IL-6)

IM – intramedulinė (pvz., IM vinis – intramedulinė vinis)

IMT – induced membrane technique (indukuotos membranos technika)

N. – nervus (pvz., N. peroneus profundus – gilusis šėvinis nervas)

TSF – Taylor Spatial Frame

TL-HEX – Truelok Hexapod System

TNF α – Tumor Necrosis Factor alpha

1. ĮVADAS

Ilgųjų apatinių galūnių kaulų lūžiai yra dažna ortopedinė problema, turinti reikšmingą poveikį tiek individualiam pacientų funkcionavimui, tiek sveikatos priežiūros sistemai. Didelio masto epidemiologinis tyrimas, nagrinėjantis kaulų lūžių našą 204 šalyse per beveik tris dešimtmečius, remiantis išsamiais Global Burden of Disease duomenimis parodo, kad patys dažniausi lūžiai 2019 m. buvo apatinės kojos dalies lūžiai, įskaitant girnelės, blauzdikaulio, šėvikaulio ir čiurnos. Šių lūžių standartizuotas pagal amžių atvejų rodiklis buvo 419,9 atvejai 100 000 gyventojų. Tuo tarpu šlaunikaulio (išskyrus šlaunikaulio kaklą) lūžių atvejų rodiklis - 187,2 atvejai 100 000 gyventojų. Standartizuoto pagal amžių lūžių rodiklis yra didesnis vyrų populiacijoje, tačiau amžiaus grupėse vyresnėse nei 64 metai šis rodiklis tapo didesnis moterų populiacijoje (1). Vokietijoje atliktas tyrimas rodo, kad bendras vyrų ir moterų apatinių galūnių lūžių skaičius nuo 2017 m. padidėjo 4,5 % lyginant su 2002 m. Tuo tarpu bendras apatinės kojos dalies lūžių skaičius sumažėjo 15,4 %, jaunesnėje populiacijoje sumažėjo visų blauzdikaulio segmentų ir čiurnos lūžių (2). Prancūzijoje atliktas tyrimas leidžia detaliau pasižiūrėti į specifinių lūžių dažnį atsižvelgiant į atliktas ortopedines procedūras. Šio tyrimo duomenimis per metus vidutiniškai atlikta 579 618 ortopedinių procedūrų. 79 549 iš jų dėl šlaunikaulio proksimalinio galo. Apatinės kojų dalies lūžiai sudarė 17 613 procedūrų per metus, 58 %

blauzdikaulio diafizės (10 091), 41 % blauzdikaulio proksimalinio galo (6 857) (3). Nėgama to dažnos ir šių kaulų gijimo komplikacijos, didžiausias nesuaugimo dažnis iš visų kaulų buvo riešo laivelio (15,5 %), tačiau iškart po to seka blauzdikaulio ir šėvikaulio lūžiai (14 %) ir šlaunikaulio lūžiai (13,9 %). Tyrimo duomenimis tai buvo vieninteliai kaulai kurių nesugijimo dažnis siekė daugiau nei 10% (4). Ilgųjų kaulų lūžių gijimo komplikacijos tokios kaip nesuaugimas sukelia ne tik didelę fizinę žalą pacientams bet sukelia ir reikšmingų psichologinių sunkumų (5,6).

Kaulo nesugijimas (angl. *nonunion*) – tai patologinė būklė, kai lūžęs kaulas per nustatytą laikotarpį nesugyja ir reikalinga papildoma medicininė intervencija. Ši komplikacija diagnozuojama remiantis laiko, radiologiniais ir klinikiniais kriterijais. Dažniausiai nesugijimas apibrėžiamas kaip lūžis, kuris per 9 mėnesius neužgyja, o per pastaruosius 3 mėnesius nėra jokių gijimo požymių (FDA apibrėžtis). Radiologiniai požymiai apima kaulinio tiltelio nebuvimą, lūžgalių atsiskyrimą ar kaulo nestabilumą, o klinikiniai simptomai – skausmą lūžio vietoje, skausmą apkraunant galūnę bei patologinį mobilumą. Kaulo nesugijimą lemia įvairūs veiksniai: sisteminės būklės (diabetas, rūkymas, nepakankama kraujotaka), medikamentai (pvz., bisfosfonatai gali sulėtinti gijimą), biomechaniniai aspektai (neadekvati fiksacija, per didelė apkrova) (7,8).

Nenustatyta reikšmingos koreliacijos tarp pacientų demografinių rodiklių ar lūžio ypatybių ir netinkamo kaulo suaugimo (angl. *malunion*) dažnio (9). Netinkamas kaulo suaugimas (angl. *malunion*) dažniau siejamas su naudojamais implantais bei chirurgo patirtimi, ypač sudėtingų ir komplikuočių lūžių atstatymo metu. Netinkamai suaugęs lūžis apibrėžiamas kaip kaulo sugijimas kliniškai nepriimtinoje padėtyje, dažnai sukeliantis deformaciją ar funkcijos sutrikimą. Apatinės galūnės ilgųjų kaulų netaisyklingas suaugimas gali turėti reikšmingą trumpalaikį ir ilgalaikį poveikį žmogaus biomechanikai, išvaizdai (kosmetiniam rezultatui) ir, galų gale, gyvenimo kokybei (10,11).

Potrauminis galūnės ilgio skirtumas ir segmentiniai kaulo defektai yra sudėtingos ortopedinės patologijos, kurios dažniausiai išsivysto po apatinių galūnių lūžių. Šios būklės kelia reikšmingus gydymo iššūkius dėl sudėtingos etiologijos, ilgo gydymo laikotarpio ir didelės komplikacijų rizikos (12–14). Po traumos galūnės ilgio skirtumas dažniausiai atsiranda dėl kaulo sužalojimų, tokių kaip netaisyklingas lūžio suaugimas (angl. *malunion*), kombinuotų lūžių ašinis kolapsas ar – vaikų atveju – priešlaikinis augimo zonos (fizės) užsidarymas. Šios priežastys lemia, kad viena koja tampa trumpesnė nei kita, o tai sutrikdo biomechaninę pusiausvyrą, eiseną ir gali sukelti antrines stuburo ar dubens patologijas. Segmentiniai kaulo defektai dažniausiai susiformuoja dėl reikšmingo kaulo netekimo pirminės traumos metu arba kaip chirurginio debridementa, atliekamo dėl infekcijos (pvz.,

osteomielito), pasekmė. Tokie defektai dažnai reikalauja sudėtingų rekonstrukcinių procedūrų, tokių kaip kaulo ilginimas ar transplantacija, kurios pasižymi ilgu gijimo laikotarpiu ir dideliu komplikacijų dažniu.

Be anatominių ir biomechaninių aspektų, potrauminio galūnės ilgio skirtumo ir kaulo defektų valdymą apsunkina buvusių operacijų pasekmės – randiniai audiniai, palikti implantai ar pakitusi minkštųjų audinių būklė. Visa tai riboja chirurginių sprendimų pasirinkimą ir apsunkina gijimo eigą. Šios potrauminės deformacijos turi didelę reikšmę paciento gyvenimo kokybei – jos gali lemti nuolatinį skausmą, mobilumo sumažėjimą ir psichologines problemas (13–15). Tyrimo duomenys atskleidžia, kad pacientų su kaulo nesuaugimu, gyvenimo kokybė yra reikšmingai prastesnė nei daugumos kitų sunkių ligų atvejais, įskaitant lėtinę obstrukcinę plaučių ligą, miokardo infarktą ar onkologines ligas. Gyvenimo kokybės sumažėjimas jaučiamas nuo pat diagnozės momento ir didėja priklausomai nuo nesuaugimo trukmės. Psichologinis poveikis, nors ne visada aiškiai išreikštas, gali būti reikšmingas, ypač tam tikrais atvejais, kaip blauzdikaulio nesuaugimas, todėl turėtų būti įtrauktas į klinikinį vertinimą. Tyrimo rezultatai patvirtina, kad kaulo nesuaugimas daro reikšmingą, ilgalaikį poveikį pacientų gyvenimo kokybei, o tai reikalauja visapusiško ir individualizuoto gydymo bei psichologinės pagalbos įtraukimo į gydymo planą (6,16).

Šio darbo tikslas – išanalizuoti esamus ilgųjų apatinių galūnių kaulų potrauminių deformacijų korekcijos metodus, įvertinti jų biomechaninį pagrindimą, klinikinį efektyvumą, pritaikymo indikacijas, privalumus, trūkumus bei galimas komplikacijas ir jų valdymo strategijas.

1.1 METODOLOGIJA

Šiame darbe taikyta sisteminė literatūros apžvalgos metodika, siekiant išanalizuoti potrauminių ilgųjų apatinių galūnių kaulų deformacijų korekcijos metodus, jų biomechaninį pagrindimą bei klinikinį efektyvumą. Darbo tikslas – išnagrinėti esamus korekcijos metodus, įvertinti jų pritaikymo indikacijas, privalumus ir trūkumus, bei aptarti galimas komplikacijas ir jų valdymą.

Duomenys buvo renkami iš mokslinių straipsnių, recenzuotų žurnalų, tarptautinių rekomendacijų. paieška atlikta naudojantis tokiais duomenų bazėmis kaip „PubMed“, „Google Scholar“, „ScienceDirect“. Buvo ieškoma publikacijų, paskelbtų nuo 2000 metų, pirmenybę teikiant naujausioms (2015–2024 m.) sisteminėms apžvalgoms ir klinikiniams tyrimams. Įtraukti šaltiniai apėmė tiek eksperimentinius, tiek retrospektyvinius, prospektyvinius bei atvejų tyrimus.

Naudotos paieškos frazės: “lower limb long bone fractures”; “post-traumatic deformities of long bones”; “malunion and nonunion of femur/tibia”; “long bone fracture complications”; “post-traumatic limb length discrepancy”; “osteotomy for post-traumatic deformity correction”; “Ilizarov technique post-traumatic deformity”; “Taylor Spatial Frame deformity correction”; “PRECICE intramedullary nail limb lengthening”; “Masquelet technique bone defect”; “external fixation in bone deformity correction”; “single-cut osteotomy for complex deformities”; “biomechanics of lower limb deformity”; “functional outcomes after limb deformity correction”; “bone healing after osteotomy”; “mechanical axis deviation lower limb”; “gait analysis after deformity correction”.

Įtraukimo kriterijai: Darbai, kuriuose aprašomi potrauminiai deformacijų tipai (malunion, nonunion, galūnių ilgio skirtumai).

Tyrimai, kuriuose nagrinėjami korekciniai metodai (osteotomijos, išorinė fiksacija, vidinė fiksacija, galūnių ilginimo technologijos, kaulo transplantacija).

Publikacijos, pateikiančios biomechaninį gydymo metodų pagrindimą ir ilgalaikius klinikinius rezultatus.

Analizuojant surinktą informaciją, buvo vertinamas: gydymo metodo taikymo kontekstas (deformacijos pobūdis, paciento būklė, amžius), korekcijos tikslumas, gydymo trukmė, komplikacijų dažnis, ilgalaikis funkcinis rezultatas, gydymo metodų biomechaninis pagrindimas.

2. BIOMECHANIKA

2.1 Kortikalinio ir trabekulinio kaulo mechaninės savybės

Kaulinis audinys gali būti skirstomas į du tipus atsižvelgiant į jų porėtumą. Kortikalinis kaulas (žievinis, tankusis kaulas) pasižymintis 5-15% porėtumu ir trabekulinis kaulas pasižymintis porėtumu tarp 40% ir 95%. Kortikalinis kaulas sudaro ilgųjų kaulų diafizes ir ploną sluoksnį aplink trabekulinį kaulą.

Kortikalinis kaulas veikiamas skersinės apkrovos yra trapesnis nei veikiamas išilginės apkrovos.

Tyrimai daryti su šlaunikauliu rodo, kad jis atspariausias spaudimo jėgai, o neatspariausias tempimo per išilginę ašį. (17) Lyginant su trabekuliniu kaulu, kortikalinis kaulas yra standesnis ir geba atlaikyti didesnes apkrovas, tačiau tuo pat metu yra trapesnis. *In vitro* tyrimuose kortikalinis kaulas neatlaiko 2% deformacijos, tuo tarpu trabekulinis kaulas atlaiko deformacijas iki 30%. (18)

2.2 Kaulo adaptacija veikiant mechaninėms jėgoms

Kaulinis audinys keičia savo struktūrą dėl dviejų procesų: modeliavimo ir remodeliavimo. Augant vyksta intensyvus modeliavimas, kai nuoseklios kaulų formavimosi ir rezorbcijos fazės keičia kaulo dydį ir formą, kontroliuojamos genetinių ir mechaninių veiksnių. Remodeliavimas yra procesas, kurio metu kaulinis audinys pakeičiamas nauju kaulu ir yra griežtai kontroliuojamas, koordinuotas procesas, kuriame dalyvauja osteocitai, osteoblastai ir osteoklastai. Kaulo modeliavimo ir remodeliavimo derinys leidžia kaului prisitaikyti prie sužalojimų ir mechaninių jėgų. Wolffo dėsnis teigia, kad kaulas prisitaiko prie mechaninių apkrovų, stiprėdamas esant didesnei apkrovai ir silpnėdamas, kai ji mažėja. Nors jo matematinis pagrindas buvo paneigtas, ši koncepcija tapo pagrindu tolimesniems tyrimams, tokiems kaip Frosto mechanostato modelis. Šis modelis teigia, kad kaulo adaptacija priklauso nuo raumenų generuojamos jėgos bei minimalaus efektyvaus krūvio slenksčio, virš kurio vyksta kaulo stiprėjimas, o žemiau – kaulo irimas. Be to, kaulai prisitaiko prie kryptinės apkrovos. Kaulo reakcija į krūvį taip pat priklauso nuo amžiaus – jaunystėje kaulai labiau reaguoja į mechaninį stresą, o senstant ši reakcija silpnėja. Osteocitai, ilgą laiką laikyti neaktyviais, atlieka pagrindinį vaidmenį mechanotransdukcijoje – jie reaguoja į mechanines apkrovas reguliuodami osteoblastų ir osteoklastų aktyvumą. Jie gamina signalines molekules, kurios kontroliuoja kaulo formavimąsi ir irimą (19).

2.3 Kaulo gijimas

Kaulų gijimas skirstomas į pirminį ir antrinį. Pirminis gijimas vyksta tada, kai atliekama ideali kaulų galų redukcija ir jie yra stabiliai fiksuojami. Tinkamai sulgyjavus lūžio galus, osteoklastai rezorbuoja kaulą abiejose lūžio linijos pusėse, po to vyksta kaulo formavimasis, kol galiausiai kortikalinis osteonas susiformuoja iš naujo. Dauguma lūžių klinikoje gyja antriniu būdu, kuris turi tris pagrindines fazes: 1. Uždegiminė fazė - jos metu per pirmas 24 valandas po lūžio suaktyvėja uždegiminė reakcija. Neutrofilai ir makrofagai išskiria citokinus (IL-1, IL-6 ir TNF α), kurie inicijuoja gijimo procesą, skatindami mezenchiminių kamieninių ląstelių pritraukimą į lūžių vietą. Pradedama formuotis granuliacinis audinys. 2. Kaliuso susidarymas (reparacinė fazė) - mezenchiminės kamieninės ląstelės diferencijuojasi į chondrocitus ir osteoblastus, formuodamos kremzlinį ir kaulinį audinį. Iš pradžių formuojasi kremzlinis kaliusas, kuris per 14 dienų palaipsniui pakeičiamas pintiniu kaulu, o iki 35 dienos kaulinio audinio kiekis padidėja iki 83%, tai vadinama - endochondrinė osifikacija. 3. Remodeliacija - šis procesas prasideda praėjus 3–4 savaitėms po lūžio ir gali tęstis mėnesius ar net metus. Remodeliacijos metu osteoklastai rezorbuoja pintinį kaulą, o osteoblastai formuoja lamelinį kaulą. Šiam procesui svarbūs IL-1 ir TNF α , kurie didina osteoklastinę kaulo rezorbciją. Kartais, šie

procesai išskaidomi į keturis etapus, atskiriant mezenchiminių kamieninių ląstelių ekspansiją ir angiogenezę kaip atskirą fazę nuo kaulo formavimosi. Tačiau daugelyje šaltinių vis dar naudojama trijų fazių schema (19,20).

2.4 Biomechaniniai veiksniai lūžių gydyme

Norint pasiekti optimalius gijimo rezultatus, fiksavimo konstrukcija turi išlaikyti balansą tarp absoliutaus stabilumo ir mikrojudesių. Skirtingos lūžio geometrijos reikalauja skirtingų fiksacijos metodų. Pvz., paprasti skersiniai lūžiai geriausiai gyja esant absoliučiam stabilumui, o įstrižiniai ar daugiafragmentiniai – esant santykiniam stabilumui su minimaliais mikrojudėsiu. Sveikas kaulas gali atlaikyti didesnę mechaninę apkrovą, todėl gali būti taikomi agresyvesni fiksacijos metodai. Osteoporozinis kaulas reikalauja mažesnės apkrovos ir dažnai papildomų atramų. Sraigtų skaičius naudojamas fiksacijai plokštelėmis taip pat svarbus. Maženis sraigtų skaičius gali leisti tam tikrą mikrojudesį, tuo tarpu didesnis skaičius suteikia absoliutą stabilumą. Jeigu intrafragmentinė deformacija yra lygi 0% (konstrukcija yra visiškai stabili), gijimas vyksta pirminiu būdu. Jei deformacija yra tarp 2% ir 10%, susidaro kalusas ir lūžis gyja antriniu būdu. Deformacijai viršijus 15% vystosi hipertrofinis arba atrofinis nesugijimas. Seniau buvo manoma, kad konstrukcija turi būti kuo standesnė, tačiau šiais laikais tampa aišku, kad mikrojudesiai gali pagerinti gijimo procesą, o biomechaniniai sprendimai turi būti pritaikyti pagal lūžio tipą. Siekiant gerinti gydymo rezultatus buvo pradėta taikyti dinamizacija kapima perėjimą nuo standžios fiksacijos prie lankstesnės, tačiau naujausi tyrimai rodo, kad efektyvesnis gali būti atvirkštinis procesas. Atvirkštinės dinamizacijos metu pradinis lankstus fiksavimas leidžia tam tikrus mikrojudesius, skatinančius kaluso formavimąsi per pirmas 2–6 savaites. Vėlesnis stabilizavimas sumažina mikrojudesius, užtikrindamas greitesnį kaluso mineralizavimą ir kaulo perėjimą į remodeliavimo fazę (21).

Apatinės galūnės biomechanika grindžiama anatominėmis ir mechaninėmis ašimis, kurios yra esminės vertinant deformacijas, bei planuojant chirurginį gydymą. Teisingas šių ašių supratimas leidžia tiksliai nustatyti ašies nukrypimus ir jų įtaką sąnario apkrovoms, taip pat parinkti tinkamą korekcinę intervenciją. Apatinėje galūnėje diferencijuojamos dvi pagrindinės ašys – anatominė ir mechaninė. Anatominė ašis yra linija, einanti per kaulo diafizę: šlaunikaulio atveju – nuo kaulo vidurio 10 cm virš kelio iki 10 cm žemiau, tuo tarpu blauzdos – per jos centrinę ilgį einančią liniją. Šios ašys sudaro vadinamąjį anatominį šlaunikaulio ir blauzdikaulio kampą, kuris fiziologiškai yra 173–175°, t. y. šiek tiek valgus. Mechaninė ašis – linija jungianti šlaunikaulio galvos centrą ir čiurnos sąnario centrą. Ši linija turi praeiti per kelio sąnario centrą – jeigu taip nėra, tai rodo varus (nukrypimas į vidų) arba

valgus (nukrypimas į išorę) deformacijas. Mechaninė šlaunikaulio ašis formuoja $\sim 6^\circ$ kampą su anatominė ašimi, o blauzdos atveju šios dvi ašys praktiškai sutampa (22). Ašies nukrypimai keičia sąnario apkrovos paskirstymą. Pvz., varus deformacija, kai mechaninė ašis kerta kelio sąnarį medialiai nuo centro, sukelia padidintą apkrovą medialiniam sąnario paviršiui. Tai padidina sąnarinės kremzlės, meniskų ir kitų intraartikuliarinių struktūrų degeneracijos riziką. Tyrimai rodo, kad varus deformacija koreliuoja su padidėjusiu medialiniu kontaktiniu spaudimu į sąnarinį paviršių bei menisko ekstrūzija (23).

Potrauminės deformacijos dažnai atsiranda po netaisyklingai sugijusių lūžių. Jos gali būti vienos plokštumos (koronalinės, sagitalinės) arba kombinuotos su rotacija ar transliacija (24). Jei netaisyklingo gijimo metu mechaninė ašis nukrypsta, tai sukelia netolygią apkrovą sąnariui bei gali lemti antrinio osteoartrito vystymąsi. Tiksliausias būdas įvertinti galūnės ašį yra viso ilgio stovima rentgeno nuotrauka anteroposterior projekte. Ši metodika leidžia tiksliai įvertinti tiek mechaninę, tiek anatominę ašį, taip pat apskaičiuoti mechaninį femurotibialinį kampą ir mechaninės ašies nuokrypį (22).

3. POTRAUMINIŲ DEFORMACIJŲ TIPAI

Neteisingas kaulo sugijimas (angl. *malunion*) yra patologinė būklė, kai po lūžio kaulas sugyja anatomiškai netinkamoje padėtyje. Atsižvelgiant į deformacijos kryptį, skiriami rotaciniai, kampiniai bei tranziciniai neteisingo sugijimo tipai. Tokie sugijimai gali turėti reikšmingą įtaką žmogaus biomechaninei, judėjimo funkcijai, gyvenimo kokybei, bei gali lemti vėlesnes sąnarinės patologijas. Nedidelio kampo rotacinį neteisingą sugijimą yra sudėtinga nustatyti, nes ši deformacija dažnai nesukelia akivaizdžių simptomų ir nėra vizualiai stebima. Dažniausiai ji nustatoma po šlaunikaulio ir blauzdikaulio lūžių. Suaugusiesiems rotacinis nuokrypis, viršijantis 15° vidinės rotacijos ar 20° išorinės rotacijos laikomas kliniškai reikšmingu (11). Remiantis retrospektyviniais tyrimais, šlaunikaulio diafizės rotaciniai netaisyklingi sugijimai po lūžių gali siekti nuo 24° iki net 52° rotacinės deformacijos kampo, ypač jei pradinė lūžio padėtis buvo netinkamai atstatyta (25).

Kampinis netaisyklingas sugijimas pasireiškia kaulo ašies nukrypimu į vienoje arba keliose plokštumose – dažniausiai tai varus, valgus, antekurvacija arba recurvatum deformacijos.

Blauzdikaulio deformacijos laikomos kliniškai reikšmingomis, kai kampas AP (anteroposteriorinėje) plokštumoje viršija 10° , o varus/valgus kryptimis – 5° (11,26). Didžiausias kampinių deformacijų paplitimas pastebimas distalinėje blauzdikaulio dalyje – viename tyrime net 59,8 % lūžių buvo

lokalizuoti distaliai, o dažniausiai pasitaikantis lūžio tipas buvo spiralinis (34,4 %), kuris, kaip rodo statistinė analizė, yra reikšmingai susijęs su padidėjusia malunion rizika ($p < 0,001$) (26). Šeivikaulio distalinėje dalyje netinkamai sugiję lūžiai taip pat dažnai sukelia kampines deformacijas, dėl kurių išsivysto čiurnos sąnario kongruencijos praradimas. Tokiais atvejais net 1 mm lateralinis pasislinkimas gali padidinti sąnario apkrovą 42 % (27). Taip pat pažymėtina, kad šlaunikaulio kampinės deformacijos po lūžio gali sąlygoti iki 3 cm ilgio sutrumpėjimą bei sąnario judrumo sutrikimus (28).

Tranzicinė deformacija pasižymi ašies pasikeitimu tarp proksimalinio ir distalinio fragmentų, kai deformacija lokalizuota ribotoje diafizės zonoje. Tokia deformacija dažniausiai aptinkama blauzdikaukyje ir šlaunikaukyje. Analizuojant deformacijų pobūdį, tranziciniai nukrypimai gali būti tiek vienos plokštumos, tiek kombinuoti – daugiaašiai, kai deformacija vyksta daugiau nei vienoje erdvinėje kryptyje. Svarbu pažymėti, kad diafizės lygmens deformacijos paprastai mažiau toleruojamos nei metafizės – tai susiję su mažesniu remodeliacinio potencialo rezervu bei žemesne kraujotaka tose kaulo srityse (29). Tranzicinės deformacijos sukelia staigų kaulo mechaninės ašies poslinkį, kuris ilgainiui gali lemti sąnario artrozę (11).

Ilgųjų apatinių galūnių kaulų lūžių nesugijimas (angl. *malunion*) yra viena iš reikšmingiausių ortopedinės traumos komplikacijų. Nepaisant šiuolaikinių fiksacijos metodų pažangos, literatūra nurodo, kad ilgųjų kaulų nesugijimo dažnis svyruoja nuo 5 iki 10 %, o kai kurioms rizikos grupėms šis rodiklis gali siekti net iki 42,7 % (30). Hipertrofinis nesugijimas yra viena dažniausių nesugijimo formų, pasireiškianti pakankamu biologiniu aktyvumu – gera kraujotaka ir ryškia kaliuso formacija lūžio srityje. Ši forma dažniausiai siejama su nepakankamu mechaniniu stabilumu lūžio vietoje, kai yra daug mikrojudesių lūžio vietoje (31). Kituose tyrimuose nurodoma, kad dažniausios priežastys yra per mažas implanto standumas, prasta osteosintezės konstrukcija ir fragmentų mikrojudesiai, kurie lemia nepilnavertę konsolidaciją net esant pakankamai kraujotakai (32,33). Tuo tarpu atrofinis nesugijimas dažniausiai siejamas su prasta kraujotaka, mažu osteogeniniu potencialu ir praktiškai nepastebimu kaliusu vaizdiniuose tyrimuose (30). Atrofiniam nesugijimui būdinga kaulų galų sklerozė. Vieno tyrimo duomenimis, net 100 % pacientų su diagnozuota aseptine atrofine šlaunikaulio diafizės nesugijimo forma rentgenogramose nebuvo matoma kaulinės regeneracijos požymių (34). Kito tyrimo duomenimis, iš 502 pacientų su šlaunikaulio nesugijimu, 200 atvejų (39,8 %) buvo atrofinių pseudartrozių lyginant su 123 hipertrofinėmis pseudoartrozėmis ir 179 nepatikslinto tipo, taigi dauguma (35).

Svarbu paminėti ir oligotrofinę nesugijimo formą, kuri dažnai vertinama kaip tarpinė tarp hipertrofinės ir atrofines. Oligotrofinėje pseudartrozėje pastebimas nedidelis ar nepakankamas kalusias, tačiau tai nebūtinai reiškia nepakankamą kraujotaką – biologinis aktyvumas gali būti išlikęs, bet jis nėra pakankamas konsolidacijai. Klinikinėje-histologinėje studijoje 2 iš 15 atvejų buvo klasifikuoti kaip oligotrofiniai, tačiau jų kraujagyslių tankumas statistiškai reikšmingai nesiskyrė nuo atrofinių atvejų, kas dar kartą patvirtina, kad radiologinis klasifikavimas ne visada koreliuoja su faktine biologine būseną (36).

Potrauminis galūnės ilgio skirtumas – tai viena dažniausių ilgalaikių komplikacijų po apatinių galūnių kaulų lūžių, atsirandanti dėl kaulo defekto, augimo zonos pažeidimo, netaisyklingos kaulo konsolidacijos arba kaulo trumpėjimo dėl fragmentų susiglaudimo (angl. *bayonet apposition*). Ilgio skirtumas dažniausiai susiformuoja po šlaunikaulio ir blauzdikaulio lūžių, tačiau gali būti susijęs ir su šėvikaulio trauma, ypač kai ji pasireiškia kartu su blauzdikaulio pažeidimu. Ilgio skirtumo dydis ir pasireiškimo dažnis priklauso nuo traumos pobūdžio, amžiaus, gydymo metodų bei gijimo proceso. Sutrumpėjimas dažniausiai atsiranda dėl kaulo fragmentų pasislinkimo ar neviseškai anatominio jų atstatymo, o kai kuriais atvejais – dėl kaulo segmento deficito. Ilgis gali trumpėti net ir po sėkmingo kaulo sugijimo, ypač jei pradinis lūžis buvo fragmentuotas. Be to, net iki 43 % atvejų po šlaunikaulio osteosintezės intramedulinėmis vinimis pasitaiko liekamasis galūnės ilgio skirtumas, o tai rodo didelį šios komplikacijos paplitimą net ir taikant modernius gydymo būdus (37). Blauzdikaulio lūžiai taip pat dažnai sukelia potrauminį ilgio skirtumą. Viename tyrime, kuriame buvo analizuoti 36 pacientai su po traumos susidariusiu blauzdikaulio deficitu, nustatyta, kad vidutinis ilgis, kurį reikėjo atstatyti, siekė $10,1 \pm 4,0$ cm (intervalas: 5–21 cm). Ilgio skirtumas po blauzdikaulio lūžių gali būti susijęs ne tik su kaulo deficitu, bet ir su augimo zonos pažeidimu (ypač vaikams ir paaugliams), o taip pat ir su ilgalaikėmis komplikacijomis – osteomielitu, daugkartinėmis operacijomis ar kraujotakos sutrikimais gijimo metu, kurie, kaip įrodyta, statistiškai reikšmingai koreliuoja su nepalankia baigtimi ($p < 0,05$) (38). Remiantis retrospektyviniu tyrimu, 18 iš 22 pacientų, kuriems buvo taikyta korekcija dėl ilgio skirtumo, vaikystėje patyrė epifizijų traumas, kurios vėliau lėmė augimo asimetriją ir ilgio skirtumo progresavimą iki suaugusiųjų amžiaus. Tokie atvejai dažniausiai diagnozuojami ne iš karto po traumos, o praėjus keleriems metams – vidutinis laikotarpis tarp traumos ir korekcijos siekė net 8,2 metų (39).

Dažna komplikacija po šlaunikaulio, blauzdikaulio ar šėvikaulio lūžių yra potrauminis sąnarių judesių amplitudės sumažėjimas, kurio pagrindinė priežastis yra sąnarinio aparato ir aplinkinių minkštųjų audinių fibrozė bei kontraktūros. Sąnarių artrofibrozė pasireiškia kaip ryškus judesių apribojimas,

dažniausiai kelio ir čiurnos sąnariuose, ir dažnai atsiranda po ilgalaikės sąnarių imobilizacijos, chirurginių intervencijų bei uždegiminių reakcijų, sukiamų traumos metu (40). Šlaunikaulio lūžiai, ypač apimantys šlaunikaulio distalinę dalį ir aplink kelio sąnarį, lemia kelio sąnario judesių amplitudės sumažėjimą. Klinikiniai duomenys rodo, kad po tokių lūžių pacientams dažnai išsivysto kelio sąnario lenkimo apribojimai, kurie gali siekti vos 10–50° prieš intervencinį gydymą (41). Ne mažiau svarbus potrauminio amplitudės sumažėjimo aspektas yra blauzdikaulio ir šėivikaulio lūžių pasekmės. Šie lūžiai, ypač netinkamai sugiję ar kartu su reikšmingu aplinkinių minkštųjų audinių pažeidimu, sukelia čiurnos sąnario sustingimą ir deformacijas (42). Potrauminė sąnarių kontraktūra apima tiek intraartikulinius, tiek ekstraartikulinius veiksnius. Nustatyta, kad intraartikuliniai suketėjimai susiformuoja dėl sinovijos uždegimo, sąnarinės kapsulės retrakcijos bei adhezijų, o ekstraartikuliniai – dėl raumenų, sausgyslių, fascijų ar net odos kontraktūrų. Šie du komponentai gali egzistuoti kartu ir stiprinti sąnario sustingimą. Tais atvejais, kai traumos metu lūžta šlaunikaulis ar blauzdikaulis, didelė dalis sąnario apribojimų išsivysto būtent dėl kapsulės ir aplinkinių audinių reakcijos į imobilizaciją, o ne tik dėl kaulinio audinio deformacijos. Šiuo aspektu svarbu atkreipti dėmesį, jog potrauminio sąnario sustingimo vystymasis prasideda greitai, tačiau uždelstas gydymas ar judesių nepradėjimas laiku gali sąlygoti ilgalaikę ir sunkiai koreguojamą judesių amplitudės praradimo formą (43).

4. DIAGNOSTIKA

Pagrindiniu diagnostiniu metodu vertinant galūnių ašį laikoma visos kojos rentgenograma stovint, atlikta anteroposteriorine (AP) projekcija. Ji leidžia nustatyti mechaninę bei anatomines šlaunikaulio ir blauzdikaulio ašis. Tai laikoma „aukso standartu“ vertinant potrauminių deformacijų pobūdį ir apimtį. Šio metodo tikslumą lemia tinkama paciento pozicija – pėdos turi būti pasuktos 8–10° į išorę, o girnelė – orientuota į priekį. Esant įtariamoms rotacinėms deformacijoms, aukso standartu laikomas kompiuterinės tomografijos (KT) tyrimas, nes jis tiksliai atvaizduoja kaulą trimatėje erdvėje ir leidžia įvertinti šlaunikaulio ar blauzdikaulio sukimą apie išilginę ašį (22). Atliekant potrauminių deformacijų analizę, ypatingą dėmesį reikia skirti mechaninės ašies nuokrypiui. Kaip rodo tyrimai, gydant vaikų kojų ilgio skirtumus epifiziodezės metodu, mechaninės ašies nuokrypis reikšmingai kinta, priklausomai nuo gydymo trukmės bei metodo. Tai leidžia prognozuoti antrinių ašies deformacijų riziką (44). Be statinės rentgenologinės analizės, šiuolaikinėje diagnostikoje vis plačiau taikoma funkcinė eisenos analizė.

Tyrimai parodė, kad net esant vienpusėms deformacijoms, biomechaniniai pakitimai aptinkami abiejose galūnėse – tiek pagal apkrovimo jėgas, tiek pagal raumenų koaktyvaciją. Eisenos analizė

atliekama naudojant trimačių judesių fiksavimo kameras, jėgos matavimo plokšteles ir elektromiografiją, o duomenys analizuojami taikant „Cardiff Classifier“ sistemą, kuri leidžia objektyviai įvertinti funkcinę eisenos būklę (45). Kaulų sugijimo po korekcinių osteotomijų vertinimas taip pat svarbus potrauminių deformacijų kontekste. Vis dėlto, šiuo metu literatūroje nėra universalus radiologinio kriterijaus kaulų suaugimui apibrėžti. Tyrimai atskleidė, kad skirtingi autoriai taiko įvairius kriterijus: žievės vientisumo matomumą ≥ 3 kaulo pusėse, rentgeninį plyšio nebuvimą ar įvairias klasifikacijas, tačiau nei viena jų nėra visapusiškai pritaikoma visiems atvejams (46). Vertinant rotacinių deformacijų korekciją, itin svarbus osteotomijos plokštumos kampas. Simuliaciniai tyrimai parodė, kad atliekant šlaunikaulio osteotomiją net ir nedideli osteotomijos plokštumos nukrypimai (pvz., 10° frontaliniam plokštumoje) gali sukelti reikšmingus sagitalinės ašies pokyčius (iki 11°), ypač atliekant suprakondilines korekcijas. Tai pabrėžia būtinybę tiksliai planuoti korekcijas, nes net maži nukrypimai gali turėti ilgalaikių biomechaninių pasekmių (47). Vaikystėje atsiradusios deformacijos taip pat reikalauja specifinio biomechaninio įvertinimo. Tokiais atvejais vertinamas tibiofemoralinis kampas, interkondiliarinis ir intermaliorinis atstumas. Esant nuolatinei varus ar valgus deformacijai, į pagalbą pasitelkiami ortopediniai įtvarai su lenkimo išankstiniu įtempimu, kurie pagal Hütter-Volkmanno dėsnį lemia skirtingą augimo plokštelės apkrovą bei skatina norimą kaulo remodeliaciją (48).

5. POTRAUMINĖS KOREKCIJOS METODŲ APŽVALGA

Nechirurginis gydymas taikomas esant nedideliame apatinės galūnės ilgio skirtumui (<2 cm), kai simptomai yra minimalūs. Dažniausiai skiriami ortopediniai vidpadžiai ar speciali ortopedinė pakelta avalynė, siekiant koreguoti eiseną ir sumažinti biomechaninę sanarinių paviršių apkrovą. Tačiau didesnėms deformacijoms, ypač po traumų, tokie metodai nėra efektyvūs (49).

Laipsniška korekcija laikoma „aukso standartu“ kompleksinių deformacijų gydyme. Ilizarovo metodas ir jo modifikacijos (Taylor Spatial Frame – TSF, TrueLok HEX – TL-HEX) leidžia koreguoti kaulo ilgį ir ašinę deformaciją tuo pačiu metu (50). Taylor Spatial Frame yra sėkmingai naudojamas koreguoti varus, valgus bei genu recurvatum deformacijas. Naudojant šį korekcijos metodą Genu recurvatum atvejais tyrimo kuriamie vidutinis pacientų amžiaus buvo 13,36 metų, o korekcija užtruko vidutiniškai 225 dienas duomenimis, po korekcijos kampas sumažėjo nuo vidutiniškai $26,4^\circ$ iki 5° (51). Staigi korekcija dažniausiai taikoma ašinių deformacijų atvejais, pavyzdžiui, varus ar valgus kelio deformacijose. Tokios korekcijos gali būti atliekamos šlaunikaulio ar blauzdikaulio osteotomijų metu. Retrospektyvinis tyrimas parodė, kad net esant II–III laipsnio potrauminei kelio sąnario artrozei,

osteotomijos be endoprotezavimo suteikė ilgalaikį skausmo palengvėjimą, ypač esant ekstraartikulinei deformacijai. Vidutinė korekcijos apimtis buvo 9° valgus ar 10° varus. Tačiau staigios korekcijos metu didėja komplikacijų rizika: pseudartrozė, sąnarių judesių amplitudės sumažėjimas, skausmas (52). Intramedulinės motorizuotos vinys, leidžia koreguoti galūnės ilgį vidiniu būdu. Tyrime su 34 pacientais naudotas FITBONE vinis sumažino vidutinį kojų ilgių neatitikimą nuo 44 mm iki <10 mm 74% pacientų. Vidutinė pilno svorio apkrovos be pagalbinių priemonių atsistatymo trukmė buvo 226 ± 133 dienos (49). Kito tyrimo metu 25 šlaunikaulių korekcijos metu pasiektas vidutinis ilgėjimas buvo 5,8 cm, o akivaizdi kampinė korekcija siekė vidutiniškai 9° . Tačiau net 2 atvejais pastebėtas „run back“ fenomenas, t. y. dalinis ilgėjimo praradimas, rodantis šių sistemų ribotumą esant sudėtingoms ar ilgo ilginimo situacijoms (53).

Metodų parinkimas priklauso nuo šių veiksnių: Deformacijos pobūdžio: vienaplanė ar daugiaplanė; kampinė, rotacinė deformacija, ar galūnės igio pakitimo. Pacientų amžiaus: jaunesni pacientai dažniau gydomi laipsniškai koreguojant. Minkštųjų audinių būklės: randai, infekcija ar silpnas audinių trofiškumas riboja kai kurias technikas (49,54). Bendros paciento būklės: sisteminės ligos (pvz., diabetas), priklausomybės (rūkymas, alkoholis) padidina riziką ir lemia pasirinkimą – dažnai pasirenkamas Ilizarovo metodas dėl jo efektyvumo esant rizikos veiksniams (54).

5.1 Chirurginės technikos, naudojamos potrauminių lūžių korekciroje

5.1.1 Osteotomija

Vienas iš pažangiausių osteotomijos metodų – matematiškai apskaičiuota vienpjūvė osteotomija (angl. *Mathematically Directed Single-Cut Osteotomy, MDO*). Ši technika leidžia vienu pjūviu koreguoti tiek kampinę, tiek rotacinę deformaciją be kaulo segmentų pašalinimo. Korekcija pasiekama pasukant distalinį kaulo galą specialiai apskaičiuotoje pjūvio plokštumoje. Tokia metodika ne tik leidžia išlaikyti kaulo vientisumą, bet ir skatina greitesnį gijimą bei sumažina nesuaugimo riziką. Ji ypač naudinga esant kombinuotoms ašinėms ir rotacinėms deformacijoms (55). Kitas reikšmingas žingsnis korekcijų srityje – kompiuterizuotas 3D planavimas bei pacientui pritaikytų pjūvimo šablonų gamyba naudojant 3D spausdinimą. Šios technologijos leidžia atlikti korekciją submilimetriniu tikslumu. Planavimas dažniausiai atliekamas naudojant veidrodinį sveikos galūnės modelį – tai leidžia atkurti tikslią deformuoto kaulo geometriją, ilgį ir rotaciją. Remiantis vienu tyrimu, korekcijos tikslumas su 3D spausdintais instrumentais geresnis nei atliekant osteotomiją tradiciniais būdais, o chirurginio laiko trukmė vidutiniškai sumažėja 25–30 % (56). Blauzdikaulio deformacijų korekcijai dažnai naudojama

aukšta blauzdikaulio osteotomija (*angl. High Tibial Osteotomy, HTO*). Ypač efektyvi – dviejų plokštumų medialinė atverianti osteotomija, kuri vienu metu leidžia koreguoti tiek varuso, tiek recurvatum deformacijas. Pvz., viename tyrime 13° užpakalinio šlaito kampas buvo sėkmingai sumažintas iki 8° , o 4° varuso kampas – iki neutralios ašies (57). Distalinės šlaunikaulio osteotomijos (*angl. Distal Femoral Osteotomies, DFO*) taikomos dažniau esant šlaunikaulio kilmės varus ar valgus deformacijoms. Lateralinė uždaranti pleištinė distalinė šlaunikaulio osteotomija, atliekama esant dominuojančiai šlaunikaulyje varus deformacijai, parodė gerus rezultatus: vieno tyrimo metu net 96 % pacientų grįžo prie sportinės veiklos po vidutiniškai 5,3 mėn., o 96 % – prie darbo po 11,4 savaitės (58).

Osteotomijos metodų pranašumai apima: tikslumą – 3D modeliavimas leidžia iš anksto nustatyti optimalų pjūvio kampą, vietą bei korekcijos laipsnį (56); sąnario išsaugojimą – atliekama korekcija padeda atitolinti arba išvengti sąnario endoprotezavimo net esant ankstyvam osteoartritui (23); vieno pjūvio korekciją – matematiškai apskaičiuota vienpjūvė osteotomija leidžia koreguoti sudėtingas deformacijas be papildomų pjūvių ar kaulo šalinimo (55). Geras funkcinis atsistatymas – dauguma pacientų pasiekia klinikinį pagerėjimą vertinant IKDC, WOMAC ir Lysholm skalėmis (58). Tačiau, osteotomijos turi ir trūkumų: Kompleksiškumas – planavimas reikalauja aukšto lygio žinių, o atlikimas – techninio tikslumo (59). Komplikacijos – viena iš jų – vyrių lūžiai (*angl. hinge fractures*), dažni atlikus lateralinę distalinę šlaunikaulio osteotomiją. Tyrimas parodė, kad net 48 % pacientų turėjo medialinio vyrių lūžių, o 14 % jų patyrė neteisingą kaulo suaugimą (*angl. malunion*) (60). Reabilitacija – dažnai ilga ir reikalaujanti specialaus ortopedinio režimo, pvz., dalinio ar visiško neapkrovimo 6–8 savaites (61).

5.1.2 Išorinė fiksacija

Sudėtingos potrauminės deformacijos, susijusios su ašies nuokrypiais, ilginių skirtumų ar rotaciniais defektais, gali būti koreguojamos naudojant išorinę fiksaciją, ypač žiedinius rėmus, tokius kaip Ilizarovo aparatas ar Taylor Spatial Frame sistema (39,62). Operacija atliekama atlikus osteotomiją deformacijos vietoje (dažniausiai minimaliai invazyvia technika), o fiksatorius pritvirtinamas prie kaulo Kiršnerio vielomis ir nepilno sriegio sraigtais. Vėliau, vadovaujantis iš anksto parengta programine korekcijos schema, palaipsniui keičiami fiksatoriaus strypų ilgiai, leidžiantys koreguoti deformaciją trimatėje erdvėje – tiek kampiškai, tiek translaciškai, tiek rotaciškai. Pavyzdžiui, naudojant Taylor Spatial Frame sistemą, kiekvienam pacientui parengiama individuali korekcijos programa kompiuterinėje platformoje, o pati korekcija gali prasidėti 5–7 dienomis po operacijos (39). Taylor

Spatial Frame sistema pasižymi išskirtiniu korekcijos tikslumu. Tyrime, kuriame lyginti Taylor Spatial Frame ir klasikinis Ilizarovo fiksatorius, 90,7 % pacientų Taylor Spatial Frame grupėje pasiekė pilną deformacijos korekciją, lyginant su 55,7 % Ilizarovo grupėje. Ypač ryškus skirtumas buvo pastebėtas koreguojant 3 ar 4 matmenų deformacijas: 91,1 % Taylor Spatial Frame (TSF) atvejų pasiekta puiki korekcija, palyginti su tik 28,6 % Ilizarovo atvejų (62).

Taip pat biomechaniniame tyrime, lyginant tris sistemas – TSF, TL-HEX ir Orthex, visos pasiekė mažesnę nei 5° likutinę kampinę deformaciją po korekcijos. Tiksliausia buvo Orthex sistema (1°), tačiau skirtumai tarp jų nebuvo kliniškai reikšmingi ($p=0.549$) (63). Ilgalaikiai funkciniai rezultatai rodo, kad pacientai po potrauminės deformacijos korekcijos su Ilizarovo metodu ar TSF pasiekia gerą gyvenimo kokybę. Viename tyrime po 9 metų stebėsenos pacientai turėjo SF-36 fizinio funkcionalumo balą tik 2 taškais mažesnį nei vidutinė populiacija, o skausmo skalėje – tik 1 taško skirtumą. Tai rodo beveik pilną gyvenimo kokybės atsistatymą (13). Be to, tyrime, kuriame analizuotas vienu metu atliktas multifokalinių deformacijų koregavimas vaikams su TSF, 23 galūnių korekcijos sumažino vidutinį mechaninės ašies nuokrypį nuo 30 mm iki 13,5 mm ir galūnių ilgio skirtumą nuo 33,2 mm iki 6,9 mm. Komplikacijų dažnis nesiskyrė nuo klasikinių etapinių korekcijų (64).

Privalumai: Trimatė korekcija vienu etapu – TSF leidžia vienu metu koreguoti kelias deformacijas be fiksatoriaus perstatymo (39). Aukštas tikslumas – iki 91 % tikslumas koreguojant trimates deformacijas (62). Funkcinis pagerėjimas – gyvenimo kokybė ir fizinis aktyvumas dažnai atsistato iki normos lygio (13). Galimybė gydyti sudėtingus atvejus – įskaitant pseudartrozę, infekcines ar kombinuotas deformacijas (65,66). Išvengiama kaulo transplantacijos – kaulo defektai koreguojami kaulo transportavimo metodu (distraction osteogenesis) (66).

Trūkumai: Ilgas gydymo laikotarpis – gydymo trukmė dažnai siekia 9–12 mėnesių ar ilgiau, ypač jei koreguojamas ir ilgio skirtumas. Pavyzdžiui, gijimo indeksas (*angl. healing index*) buvo 54,1 d/cm vaikams ir 63,7 d/cm suaugusiems (24). Komplikacijos – dažniausiai pasitaiko infekcijos strypų įvedimo vietose, regeneracijos deformacijos, sąnarių kontraktūros (iki 56,5 % atvejų) (64,65).

Diskomfortas pacientui – nepatogus fiksatorius, ribotas mobilumas, sunkumai kasdienėje veikloje (13). Psichosocialinė našta – ypač vaikams ir jaunuoliams ilgas gydymas sukelia stresą, trukdo socialiniam gyvenimui (67). Išskirtinis sprendimas sudėtingoms pseudartrozėms ar dideliems defektams – Ilizarovo metodo kombinacija su Masquelet technika. Pirmame etape į defekto vietą įstatomas tarpinė, sukeliantis biologiškai aktyvios membranos susidarymą. Antrame – atliekamas segmentinis kaulo transportas per šią membraną. Tokiu būdu sumažinamas infekcijų pavojus, o regeneracija tampa

efektyvesnė. Vieno tyrimo duomenimis, visi pacientai su potrauminiais defektais pasiekė kaulo suaugimą, be papildomų kaulo transplantatų (66).

5.1.3 Galūnių ilgio skirtumų gydymas

Potrauminiai galūnių ilgių skirtumai didesni nei 2 cm dažnai reikalauja chirurginio įsikišimo (15). Šias deformacijas galima koreguoti pasitelkus įvairias chirurgines technikas. Vienas iš jų yra korekcija IM vinimis. Šiuolaikinės galūnių ilginimui skirtos IM vinys, tokios kaip PRECICE ar FITBONE, leidžia atlikti tikslų, valdomą ir palaipsninį kaulo ilginimą. PRECICE sistema naudoja magnetinį mechanizmą, o FITBONE – vidinį elektrinį motorą. Abu valdomi išoriniu nuotoliniu pulteliu. Vienoje retrospektyvinėje studijoje, kurioje dalyvavo 34 suaugusieji pacientai kuriems buvo taikyta korekcija PRECICE IM vinimis, vidutinis priešoperacinis galūnių ilgio skirtumas siekė 31 mm (nuo 20 iki 71 mm). Ilginimas buvo atliktas šlaunikaukyje (28 atvejai) ir blauzdikaukyje (6 atvejai). Po 2 metų stebėsenos visi pacientai galėjo pilnai apkrauti operuotą galūnę, o visi ilginimo segmentai buvo pilnai suaugę. Nepaisant gerų rezultatų, 11 pacientų (32 %) patyrė su gydymu susijusių įvykių (68). Šių sistemų privalumai apima: Mažesnę infekcijų riziką ir geresnę pacientų komforto patirtį nei išorinės fiksacijos atvejais (14,68). Galimybę tiksliai kontroliuoti ilginimo tempą nuotoliniu valdikliu. Greitesnę reabilitaciją: vidutinė ilginimo trukmė – 43,9 dienos, o konsolidacijos indeksas – 32 dienos/cm (69). Kaip trūkumus verta paminėti, jog IM sistemų negalima taikyti esant aktyviai infekcijai ir esant siauram kaulo kanalui (69). Koreguoti apatinės galūnės sutrumpėjimus galima ir kai pacientui jau yra įdėta intrameduliarinė vinis (po ankstesnės traumos gydymo), tuo atveju galima naudoti išorinę fiksaciją, taip ilginant kaulą virš esamos vinies. Šis metodas leidžia sutrumpinti gydymo trukmę ir išvengti vinies šalinimo. Tyrime su 5 pacientais buvo pasiektas vidutinis ilginimas 3,8 cm, o vidutinis fiksatoriaus nešiojimo laikas – 57,6 dienos. Gydymo trukmės indeksas buvo 44,9 dienos/cm, be jokių rimtų komplikacijų, išskyrus vieną paviršinę infekciją (37). Išoriniai fiksatoriai, ypač TSF, leidžia vienu metu koreguoti ne tik ašines ar rotacines bet ir ilgio deformacijas. Viena tyrimo, kuriame gydyti 22 pacientai su 25 potrauminėmis ilgio deformacijomis, TSF leido tiksliai atstatyti ašį ir ilgio skirtumą. Ilginimas vidutiniškai siekė 3,5–4,2 cm, o tik 3 atvejai iš 21 liko su minimalia ašies deformacija (39). Taikant Monotube korekcijos aparatą blauzdikaulio ilginimui (vid. 10,1 cm), buvo pasiektas 83 % sėkmės lygis. konsolidacijos indeksas – 15,6 dienos/cm. Vis dėlto buvo nustatyta, kad kaulo defektas >10 cm, anemija ar infekcija žymiai blogina prognozę (38). Išorinės fiksacijos privalumai: Leidžia koreguoti ypač didelius ilgio skirtumus (>5 cm). Tinka pacientams su

sudėtingomis, infekuotomis ar kombinuotomis deformacijomis (38,39). Prie trūkumų verta paminėti: ilgą gijimo laikotarpį (gali viršyti 9–12 mėn.). Diskomfortas, infekcijos, sąnarių kontraktūros (38).

5.1.4 Kaulo transplantacija ir kaulo defektų gydymas

Potrauminės ilgųjų apatinių galūnių kaulų lūžių korekcija, kai yra reikšmingas kaulo defektas, dažnai reikalauja kaulo persodinimo – vieno iš svarbiausių ir klasikinių metodų norint užtikrinti kaulo vientisumą ir funkciją. Ilgųjų kaulų segmentinių defektų rekonstrukcinės galimybės yra įvairios, tačiau tebėra diskutuotinos. Dažniausiai taikomi metodai apima laisvojo trabekulinio kaulo transplantaciją, indukuotos membranos (Masquelet) techniką, Ilizarovo kaulo transportą, nevaskuliarizuotą arba laisvą vaskuliarizuotą šėivikaulio autotransplantaciją, posterolateralinę kaulo transplantaciją, tibiofibulinę sinostozę bei vidinės fiksacijos asistuojamą kaulo transportą (70). Viename retrospektyviniame tyrime buvo nagrinėtas aseptinės blauzdikaulio pseudartrozės gydymas naudojant fiksciją plokšte ir autogeninį kaulo transplantatą, paimtą iš klubakaulio. Tyrime dalyvavo 40 pacientų, o kaulo suaugimas pasiektas 92,5 % atvejų per vidutiniškai 4,3 mėnesio (nuo 3 iki 7 mėn.). Kaulo rezultatai pagal ASAMI skalę buvo vertinami kaip puikūs – 65 %, geri – 20 %, o funkcionalūs rezultatai buvo geri arba puikūs 65 % atvejų (71). Kitas būdas – rakinamas plokštelės su autologiniu kaulu, nepašalinant IM vinies – buvo taikytas 39 pacientams su neinfekuotu nesugijusiu lūžiu. Visi pacientai pasiekė kaulo suaugimą per 6–11 mėnesių, o 95 % turėjo gerą ar puikų funkcinį rezultatą pagal Harris arba HSS skalę (72). Jau anksčiau minėta Masquelet indukuotos membranos technika (IMT) yra dviejų etapų procedūra. Pirmiausia į defekto vietą įdedamas PMMA cementas, kuris suformuoja krauju aprūpintą biologinę membraną. Po 6–8 savaičių cementas pašalinamas, o vieta užpildoma autologiniu transplantatu. Tyrime su 103 pacientais, gydytais arba IMT, arba vieno etapo autotransplantacija, kaulo suaugimo rodikliai buvo panašūs (92,7 % vs. 91,9 %), tačiau kaulo gijimo kokybė (Lane–Sandhu balas) buvo geresnė IMT grupėje (8,68 vs. 7,81; $p = 0.002$). Tačiau IMT grupėje stebėtas ilgesnis hospitalizacijos laikas (14 vs. 8 dienos) ir didesnės gydymo išlaidos (30). Palyginus laisvą vaskuliarizuotą šėivikaulio transplantaciją (FVFG) su Ilizarovo kaulo transportu, nustatyta, kad FVFG turėjo trumpesnį kaulo suaugimo laiką – vidutiniškai 9,3 mėn. greičiau nei Ilizarovo metodas. Taip pat FVFG pacientai turėjo 68 % mažiau komplikacijų ir 5,3 mėn. trumpesnį išorinio fiksatoriaus nešiojimo laiką. Tačiau funkciniai rezultatai abiejose grupėse nesiskyrė reikšmingai (70). Vienas iš naujesnių gydymo metodų, taikomas esant infekuotai pseudartrozei gydyti, – sintetinis kaulo pakaitalas (β -trikalčio fosfatas) derinamas su vietine antibiotikų perfuzija (CLAP sistema) (73). Tačiau Ilizarovo kaulo transporto metodas išlieka aktualus, ypač esant infekcijai, dideliame defekte (>6 cm). Jis leidžia spręsti visas problemas vienu metu – kaulo,

minkštųjų audinių, ilgio ir ašies korekciją. Sėkmingas gydymas pasiekiamas 77–100 % atvejų. Trūkumai – ilgas gydymo laikas ir galimos sąnarių kontraktūros (74,75).

5.1.5 Artroplastika

Potrauminės ilgųjų apatinių galūnių kaulų deformacijos, lydimos osteoartrito, reikalauja ypač sudėtingo gydymo. Tokiais atvejais viena iš galimų korekcijos technikų yra totalinė kelio artroplastika (TKA), kuri gali būti derinama su deformacijos korekcija. TKA gali būti atliekama keliais būdais, priklausomai nuo deformacijos sunkumo: TKA su intraartikuline korekcija - jei deformacija yra $<20^\circ$ šlaunikaulyje arba $<30^\circ$ blauzdikaulyje, dažniausiai galima ją koreguoti intraartikuliariai, t.y. kaulo rezekcijomis sąnario viduje ir minkštųjų audinių balansavimu. Tyrime, apimančiame 29 atvejus su deformacija $>10^\circ$, vidutinis mechaninės ašies nukrypimas sumažėjo nuo $11,8^\circ$ iki $0,9^\circ$, o funkcinis rezultatas remiantis Knee Society Score pagerėjo nuo 24,3 iki 86 balų (76). Vieno etapo TKA su ekstraartikuline osteotomija taikoma esant didesnėms arba daugiaašėms deformacijoms. Viena tyrimo, kuriame buvo atliktos 9 TKA su kartu osteotomija ar intraartikuliniu koregavimu, tik vienam pacientui pasireiškė osteotomijos gijimo uždelsimas, o visiems kitiems mechaninė ašis buvo sėkmingai atstatyta (vidutiniškai nuo $11,8^\circ$ iki 1°) (77).

Personalizuota artroplastika - naudojant hibridinius metodus, galima koreguoti dalį ekstraartikulinės deformacijos intraartikuliariai, išvengiant osteotomijos. Tai leidžia išlaikyti dalį fiziologinės anatominės ašies ir sumažina poreikį minkštųjų audinių atpalaidavimui (78). Šiais laikais vis didesnę populiarumą įgauna robotinės technikos. Jos leidžia tiksliau atlikti kaulo rezekcijas, sumažina minkštųjų audinių pažeidimus ir pagerina mechaninės ašies korekcijos tikslumą. Tyrime, kuriame pacientams buvo atlikta robotiniu būdu asistuojama TKA su vidutine deformacija $14,8^\circ$, pooperacinis ašies nukrypimas sumažėjo iki $0,7^\circ$ ($-1.1 - 2.7^\circ$), o nė vienam pacientui neprireikė papildomos osteotomijos ar implantų (79). Kitame tyrime, kuriame nagrinėtos 82 sunkios genu varus deformacijos (vid. HKA kampas – $12,85^\circ$), robotiniu būdu asistuojama TKA sumažino pacientų jaučiamą skausmą pagal VAS skausmo skalę nuo 7,87 iki 1,96 (80).

6. KOMPLIKACIJOS

6.1 Osteotomijos komplikacijos

Medialiniai kortikaliniai vyrio tipo lūžiai (angl. *hinge fractures*) po lateralinės uždaro pleišto distalinės šlaunikaulio osteotomijos yra dažnas radinys, pasitaikantis iki 48% atvejų. Morfologiškai dažniausiai

nustatomi ekstenziniai (68%), rečiau – proksimaliniai (21%) ir distaliniai (11%) lūžiai. Nustatyta, kad didesnis osteotomijos ilgis (57.7 ± 9.6 mm vs. 53.1 ± 10.9 mm; $p = 0.049$) ir didesnis pašalinto pleišto aukštis (7.9 ± 3 mm vs. 6.5 ± 1.9 mm; $p = 0.040$) lateralinės uždaro pleišto distalinės šlaunikaulio osteotomijos metu reikšmingai predisponuoja medialinio kortikalinio vyrio tipo lūžio atsiradimą (60). Lateraliniai kortikaliniai lūžiai yra žinoma komplikacija po medialinės atviro pleišto aukštos blauzdikaulio osteotomijos (23,57,60). Po medialinio vyrio tipo lūžio po lateralinės uždaro pleišto distalinės šlaunikaulio osteotomijos, kaulo poslinkis > 2 mm buvo reikšmingai susijęs su padidėjusia nesugijimo rizika (14%) ($p < 0.05$). Nestabilios vyrio tipo lūžio linijos po aukštos blauzdikaulio osteotomijos gali lemti korekcijos praradimą (60). Esant osteomielitui arba aktyviai lokaliai infekcijai, kriauklės osteotomija (angl. *clamshell osteotomy*) yra kontraindikuotina. Po kriauklės osteotomijos gali išsivystyti infekcija, kuriai gali prireikti chirurginio žaizdos išvalymo ir implanto pašalinimo po osteotomijos suaugimo, taip pat lokalaus ir sisteminio gydymo antibiotikais. Po kriauklės osteotomijos taip pat aprašyti implanto lūžimo (rakinamųjų sraigčių) atvejai, ypač atliekant ūminę korekciją (81). Biomechaniniai tyrimai rodo, kad blauzdikaulio krumplinėje valgus osteotomijoje diverguojanti varžtų padėtis su tiesia plokšte užtikrina didesnę stabilumą kompresinėms ir sukimo apkrovoms, mažindama implanto lūžimo riziką, tačiau didindama užpakarinio kortekso penetracijos ir neurovaskulinių pažeidimų riziką (82).

6.2 Išorinės fiksacijos komplikacijos

Viena iš dažniausiai pasitaikančių komplikacijų naudojant išorinę fiksaciją yra infekcijos strypų įvedimo vietose. Pavyzdžiui, viename tyrime, kuriame buvo analizuojami 25 potrauminės deformacijos korekcijos atvejai naudojant Taylor Spatial Frame, infekcijos strypų įvedimo vietose pasireiškė 32 atvejais. Šios infekcijos dažnai būdavo sėkmingai gydomos peroraliniais antibiotikais, tačiau šešiais atvejais reikėjo pašalinti kaiščius, o vienu atveju naujas kaištis buvo įstatytas iš naujo (39). Kitas tyrimas parodė, kad kombinuotas Ilizarovo metodo ir intramedulinės vinies naudojimas buvo susijęs su mažesniu infekcijų strypų įvedimo vietose dažniu (RR = 0.17, 95% CI: 0.07 ~ 0.46), nors šis rezultatas pasižymėjo dideliu statistiniu heterogeniškumu (65). Taip pat dažnai pasitaiko kaulų gijimo problemų, tokių kaip uždelsta kaulų konsolidacija. Viename iš šaltinių nurodoma, kad uždelsta osifikacija buvo pastebėta šešiais atvejais, iš kurių keturi buvo distalinėje blauzdikaulio dalyje. Visais šiais atvejais sugijimas buvo pasiektas be papildomo įsikišimo. Kitos reikšmingos komplikacijos apima judesio amplitudės sumažėjimą sąnariuose, esančiuose proksimaliai ir distaliai nuo ilginamo kaulo segmento. Viename tyrime trys pacientai, kurių prieš operaciją sąnarių judesio amplitudė buvo normali, po

gydymo patyrė kelio (ROM 0-0-120) arba kulkšnies (ROM 5-0-40, ROM 0-0-40) sąnarių judesio apribojimus paskutinio stebėjimo metu. Be to, gali pasireikšti ašinės deviacijos. Aprašytas vėlyvasis kaulo išlinkimas (late bowing) po išorinės fiksacijos aparato pašalinimo. Viena atveju tai lėmė medialinio proksimalinio blauzdikaulio kampo pokytį nuo 88 iki 85 laipsnių. Rečiau, tačiau rimtesnės komplikacijos gali būti neurovaskulinės sistemos pažeidimai. Viena tyrime intraoperaciniai giliojo peronealio nervo (lot. *N. peroneus profundus*) pažeidimai įvyko trimis atvejais. Nors visais atvejais nervų funkcija visiškai atsistatė po fizioterapijos ir elektrostimuliacijos be chirurginio įsikišimo, jie buvo klasifikuojami kaip tikrosios komplikacijos (39). Nurodoma, kad nėra reikšmingo skirtumo tarp Taylor Spatial Frame (TSF), Truelok Hexapod System (TL-HEX) ir Orthex fiksatorių tikslumo koreguojant deformacijas ir kituose šaltiniuose taip pat pabrėžiamos panašios komplikacijos (63). Metaanalizė, nagrinėjanti Ilizarovo metodą ir jo kombinuotus metodus, parodė, kad bendras kaulų sugijimo dažnis esant blauzdikaulio ir šlaunikaulio defektams buvo atitinkamai 99.29% ir 98.81%. Tačiau blauzdikaulio grupėje buvo mažesnis kaiščių atlaisvėjimo, kaiščių infekcijų, netaisyklingo išsidėstymo ($> 5^\circ$) ir sąnarių judesių amplitudės sumažėjimo dažnis, lyginant su šlaunikaulio grupe. Taip pat nustatyta, kad naudojant vienpusius išorinius fiksatorius blauzdikaulio defektams koreguoti, palyginti su žiediniais fiksatoriais, buvo stebėtas mažesnis suaugimo dažnis ir didesnis skausmo bei neteisingo išsidėstymo dažnis. Kombinuojant Ilizarovo metodą su intramedulinėmis vinimis, buvo pastebėtas mažesnis infekcijų strypų įvedimo vietose dažnis, tačiau didesnis pasikartojančių infekcijų ir amputacijų dažnis (65). Remiantis vienu retrospektyviu tyrimu, kuriame dalyvavo 53 pacientai, gydyti Ilizarovo metodu dėl įvairių apatinės galūnės deformacijų, dažniausi sunkumai buvo kaiščių vietos problemos (100%), stiprus skausmas (78%), laikinas sąnarių sustingimas (34%), ašinė deviacija (17%), sąnarių kontraktūros (26%), neuopraksija (13%), kelio sąnario subluksacija (8%) ir pakartotiniai lūžiai (4%). Tyrime nustatyta, kad komplikacijos buvo reikšmingai dažnesnės vaikų amžiaus grupėje, ypač kalbant apie tikrąsias komplikacijas (24).

6.3 Apatinės galūnės ilgio korekcijos komplikacijos

Tyrimas, kuriame buvo analizuojami 34 pacientų, kuriems buvo atlikta potrauminių apatinės galūnės ilgio korekcija naudojant PRECISE intramedulines vėnis, rezultatai, parodė, kad 14 nepageidaujamų įvykių pasireiškė 11 iš 34 pacientų. Šie įvykiai buvo suskirstyti į problemas ($n=5$), kliūtis ($n=3$) ir komplikacijas ($n=6$). Problemos ($n=5$) apėmė uždelstą konsolidaciją, kuri visais atvejais buvo gydoma neoperaciniu būdu. Vienam pacientui su uždelsta konsolidacija taip pat pasitaikė kliūtis – proksimalinio fiksacinio sraigto migracija, dėl kurios jo vieta tapo skausminga ir sraigtas turėjo būti

pašalintas. Kitas pacientas patyrė distalinio retrogradinės šlaunikaulio vinies fiksacinio sraigto atsilaisvinimą ir migraciją, kuris buvo stabilizuotas pridėjus mažą plokštelę. Taip pat, vienam pacientui prieš šalinant vinį teko pašalinti skausmingą transmaliolinį sraigtą. Komplikacijos (n=6) pasireiškė 4 iš 34 pacientų. Tyrime nustatyta, kad uždelstas gijimas pasireiškė 6 iš 34 pacientų, vienam iš kurių prireikė kaulo transplantacijos, kad būtų pasiekta konsolidacija. Uždelstas gijimas dažniausiai buvo susijęs su trumpais, 2–3 cm, ilginimo atstumais. Rizikos veiksniai, tokie kaip rūkymas, ankstesnės komplikacijos ar smulkūs lūžiai, taip pat galėjo prisidėti prie uždelsto gijimo (68). Tyrimas apie distrakciją Monotube fiksatoriumi siekiant pailginti galūnę parodė, kad infekcija strypų įvedimo vietose buvo dažna komplikacija, pasireiškusi 32 iš 36 pacientų (88,9%). Kitos pooperacinės komplikacijos apėmė equinus deformaciją (52,8%), kelio sąnario judesių amplitudės praradimą (33,3%), raumenų atrofiją (83,7%) ir netaisyklingą sugijimą (27,8%). Osteomielitas pasireiškė 5 pacientams (13,9%) (38). Tyrimas, vertinęs potrauminių šlaunikaulio segmentų ilginimą PRECISE magnetinėmis intramedulinėmis ilginančiomis vinimis, pranešė apie tris dideles komplikacijas iš 15 segmentų, tačiau nė viena iš jų nebuvo susijusi su implantu. Viena komplikacija buvo šlaunikaulio priešlaikinė konsolidacija, kita – blauzdinio nervo (lot. *N. tibialis*) kompresija, kuri nebuvo susijusi su šlaunikaulio ilginimu, o trečia – pakartotinis lūžis po implanto pašalinimo (14).

6.4 Kaulo transplantacijos ir kaulo defektų gydymo komplikacijos

Dažniausiai pasitaikančios komplikacijos apima nesugijimą arba nepavykusį transplantato prigijimą (70). Kitos dažnos komplikacijos yra susijusios su vieta, iš kurios buvo paimtas kaulo autograftas. Tai gali apimti skausmą toje vietoje, hematomas ir infekcijas. Vienas tyrimas, nagrinėjęs aseptinį blauzdikaulio nesujungimą, gydytą plokšte ir kaulo autograftu, pranešė apie galimas komplikacijas autografto paėmimo vietoje, literatūroje nurodomą iki 30%. Infekcijos taip pat pasitaiko ir recipiento vietoje. Viename atvejo aprašyme, kuriame aseptinis blauzdikaulio nesugijimas buvo gydytas plokšte ir kaulo autograftu, 10% pacientų, anksčiau gydytų išorine fiksacija, patyrė paviršinę infekciją, kuri buvo suvaldyta vietine priežiūra ir tinkama antibiotikų terapija (71). Naudojant transplantatus, ypač alograftus, gali pasireikšti nekrozė ir atmetimas. Be to, gali įvykti patologiniai lūžiai persodintame kaule, o pats transplantatas gali rezorbuotis (74). Galiausiai, net ir atlikus kaulo transplantaciją, gali išlikti lokalus nestabilumas lūžio vietoje, o tai gali lemti didelį gydymo nesėkmės dažnį. Pažymėtina, kad vien tik kaulo transplantacija, gydant nesugijimą po intramedulinės fiksacijos, nerekomenduojama, nes ji iš esmės neišsprendžia vietinio lūžusių galų nestabilumo problemų (72).

6.5 Korekcijos artroplastika komplikacijos

Nurodoma, kad hibridinė technika (dalinė ekstrasąnarinė deformacijos kompensacija intraartikulinėmis korekcijomis) gali sukelti intraartikulinius disbalansus, kuriems gali prireikti minkštųjų audinių atlaisvinimo ir (arba) riboto judrumo implantų.

7. DISKUSIJA

Apatinės galūnės deformacijų korekcija apima įvairius chirurginius metodus, kurių kiekvienas pasižymi savitais principais, indikacijomis, privalumais ir trūkumais. Išsami priešoperacinė planavimo procedūra, dažnai grindžiama rentgenografiniais tyrimais bei, esant reikalui, pažangiu vaizdinimu ir specializuota programine įranga, yra esminė nustatant tikslias erdvines deformacijas ir optimalias osteotomijos plokštumas. Šių intervencijų tikslas – atkurti taisyklingą galūnės ašį, pagerinti funkciją ir spręsti tokias problemas kaip galūnių ilgio skirtumas.

Osteotomijos – tai chirurginės procedūros, kurių metu kaulas perpjaunamas ir performuojamas siekiant koreguoti kampines, rotacines ar translacines deformacijas (29,56). Pleištinės osteotomijos (atidaromosios ir uždaromosios) – tai metodai, kurių metu koreguojant kampines deformacijas pašalinamas kaulo pleištas arba sukuriamas tarpas. Uždaroji pleštinė osteotomija lemia galūnės sutrumpėjimą, tuo tarpu atidaroji gali reikalauti kaulo transplantato (29). Aukšta blauzdikaulio osteotomija (angl. *high tibial osteotomy*), taikoma esant kelio sąnario varuso deformacijai, dažnai atliekama taikant atidaromosios pleištinės osteotomijos metodiką su šoniniu vyriu (23). Židininė skliautinė osteotomija (angl. *focal dome osteotomy*) – tai metodas, kuriuo atliekama lenkta osteotomija aplink rotacijos centrą, siekiant koreguoti kampines deformacijas. Ši technika leidžia intraoperaciniu metu reguliuoti kampą ir užtikrina natūralų stabilumą, ypač diafizės srityje. Nors metodas leidžia kompensuoti translaciją, jis nėra tinkamas rotacinėms deformacijoms koreguoti. Šiai procedūrai būtina kruopšti deformacijos analizė ir tikslus technikos atlikimas (64). Tikroji skliautinė osteotomija (angl. *true dome osteotomy*) – tai metodas, panašus į židininę skliautinę osteotomiją, tačiau atliekamas su platesne chirurgine ekspozicija. Toks metodas gali leisti koreguoti ne tik kampines, bet ir rotacines deformacijas. Vis dėlto, jam reikalingas itin preciziškas atlikimas, siekiant išvengti terminių pažeidimų ir kaulo suaugimo sutrikimų. Šiai technikai palengvinti gali būti naudojami specialūs įgaubti ir išgaubti frezavimo įrankiai (29). „Clamshell“ osteotomija – tai metodas, kai atliekamas išilginis pjūvis su skersiniais pjūviais jo galuose, leidžiantis koreguoti kampines bei lenktas deformacijas, taip pat – esant poreikiui – trumpinti galūnę. Ši technika gali būti palankesnė, išlenktas deformacijas ir nereikalauja

tiksliai nustatyti rotacijos centro (29). Vis dėlto, išilginį pjūvį sudėtinga atlikti be tiesioginės kaulo ekspozicijos, o pati technika nėra pirmo pasirinkimo galūnių ilgio atkūrimui (81). Rotacinė osteotomija (vienu pjūviu) – tai metodas, skirtas ašinių (rotacinių) deformacijų korekcijai atliekant vieną pjūvį. Procedūra dažnai remiasi išsamia priešoperacine planavimo eiga ir individualiai pacientui pritaikytais pjovimo šablonais. Tikslus deformacijos pobūdžio ir korekcijos kampų nustatymas yra itin svarbus sėkmingam rezultatui (59). Individualizuoti šablonai gali padidinti korekcijos tikslumą, tačiau taip pat gali padidinti intervencijos kainą ir reikalauti platesnio chirurginio pasiruošimo (55). Dviejų plokštumų osteotomija – tai metodas, leidžiantis vienu metu koreguoti deformacijas tiek koronarinėse, tiek sagitalinėse plokštumose. Pavyzdžiui, aukštos blauzdikaulio osteotomijos metu galima koreguoti tiek varuso deformaciją, tiek užpakalinio blauzdikaulio nuolydžio pakitimus (57).

Išorinė fiksacija – tai metodas, kai stabilizavimo įtaisai tvirtinami išorėje, siekiant užtikrinti kaulo stabilumą ir sudaryti sąlygas laipsniškai koreguoti deformacijas arba atlikti kaulo transportavimą (62,64,67,67). Ilizarovo metodas – tai žiedinės išorinės fiksacijos sistema, leidžianti laipsniškai koreguoti sudėtingas deformacijas, ilginti galūnes (distrakcinė osteogenezė) bei gydyti nesuaugusius lūžius ir kaulo defektus (24,62,74). Šis metodas gali būti taikomas kartu su kaulo defektų, minkštųjų audinių deficito ir infekcijos gydymu. Naudojami įvairūs protokolai, apimantys fragmentų suspaudimą ir distrakciją arba kaulo segmento transportavimą. Ilizarovo metodas pasižymi universalumu – tinkamas tiek infekuotiems, tiek neinfekuotiems atvejams (74). Sukurtos šio metodo modifikacijos ir deriniai su kitais gydymo būdais, pavyzdžiui, Masquelet technika (indukuotos membranos metodas) (65,66). Nepaisant didelio efektyvumo, gydymas dažnai trunka ilgai ir gali būti lydimas komplikacijų, tokių kaip infekcijos strypų įvedimo vietose, skausmas, pakartotiniai lūžiai ar sąnarių rigidiškumas (24). Heksapodinės sistemos (pvz. *Taylor Spatial Frame* (TSF), *Truelok Hexapod System* (TL-HEX), *Orthex*) – tai taip pat žiedinės išorinės fiksacijos sistemos, kuriose deformacijų korekcija daugiaplanėje erdvėje atliekama reguliuojant strypus pagal kompiuterinės programinės įrangos parengtą planą (62,63). Tyrimai rodo, kad TSF pasižymi itin dideliu tikslumu koreguojant sudėtingas, daugiamates deformacijas, ypač lyginant su tradiciniais vienakryptės korekcijos įtaisais, tokiais kaip Ilizarovo žiedinis fiksatorius (62). Biomechaniniai tyrimai, lyginantys skirtingas heksapodines sistemas (TSF, TL-HEX, Orthex), rodo panašų efektyvumą, nors gali pasitaikyti skirtumų programinės įrangos naudojimo patogumo ar distalinio orientavimo galimybėse (63). Heksapodiniai fiksatoriai leidžia vienu metu atlikti kelių segmentų ir kelių židinių korekcijas, kas gali sutrumpinti gydymo trukmę, tačiau dėl techninio sudėtingumo reikalauja didelės chirurgo patirties (64). Monotube fiksatoriai – tai vienpusiai išoriniai fiksavimo įtaisai, kurie gali būti naudojami galūnių ilginiui taikant distrakcijos metodą. Jų

konstrukcija yra paprastesnė, lyginant su žiediniais fiksatoriais, tačiau šie prietaisai siejami su didesniu skausmo, netaisyklingos ašies korekcijos ir komplikacijų dažniu (38,65).

Vidinė fiksacija. Intramedulinės vinys – tai į kaulo kanalą įvedami stabilizavimo įtaisai, naudojami po osteotomijų arba galūnių ilginimui, ypač motorizuotomis ar magnetu valdomomis sistemomis (29,69,71,84). Motorizuotos IM vinys leidžia tiksliai ir laipsniškai ilginant galūnę tuo pačiu metu koreguoti ir galūnės ilgio skirtumą, ir kampines deformacijas (69,84). Tačiau šie įtaisai turėti nesugijimo riziką, todėl itin svarbu tiksliai nustatyti vinies eigą bei atlikti tinkamą kaulo kanalo išplėtimą (84). Plokštelės ir sraigčiai – tai kaulo paviršiuje tvirtinami vidinės fiksacijos įtaisai, užtikrinantys stabilią fiksaciją po osteotomijos. Osteosintezė plokštelėmis atverti intramedulinį kanalą ir stabiliai fiksuoti kaulą koreguojant netaisyklingas padėtis. Esant infekuotiems nesugijimams, ši technika taip pat suteikia galimybę paaimti mikrobiologinius mėginius (29,71).

Kaulo persodinimas – tai procedūra, kurios metu transplantuojamas kaulinis audinys siekiant pagerinti gijimą, ypač esant nesugijusiems lūžiams arba susidarius tarpui atliekant atidariają pleštinę osteotomiją. Kortikospongiozinis autotransplantatas (paaimtas iš paties paciento) laikomas aukso standartu aseptiniam blauzdikaulio nesuaugimui gydyti dėl savo osteogeninių savybių. Kaulo persodinimas taip pat gali būti taikomas kaulo transportavimo procedūrų „prijungimo“ (angl. *docking*) vietoje, siekiant paskatinti kaulo sugijimą (71,74).

Metodo pasirinkimą gali lemti turimi ištekliai, kurie gali reikšmingai skirtis tarp išsivysčiusių ir besivystančių šalių. Išsivysčiusiose šalyse dažnai prieinamos pažangios technologijos, tokios kaip kompiuterizuotas planavimas, individualizuoti pjovimo šablonai, sudėtingos išorinės fiksacijos sistemos (heksapodinės), motorizuotos intramedulinės vinys ir pažangus vaizdinimas (55,59). Dėl to šiose šalyse dažniau pasirenkami metodai, užtikrinantys didesnę tikslumą, minimaliai invazyvų gydymą (kai tai tinka) ir trumpesnę gydymo laiką (59,69,84). Tokios technikos kaip viengubos pjūvio rotacinės osteotomijos su individualiais šablonais, korekcija motorizuotomis IM vinimis ar tikslios deformacijų korekcijos heksapodiniais fiksatoriais gali būti taikomos dažniau. Besivystančiose šalyse gali būti ribotas priėjimas prie pažangių ir brangių technologijų. Tokiuose kontekstuose dažnai teikiama pirmenybė Ilizarovo žiedinės fiksacijos metodui, kuris yra universalus ir leidžia spręsti sudėtingas problemas, nereikalaujant pažangių technologijų. Autologinio kaulo persodinimas taip pat yra ištekliaus tausojantis būdas skatinti kaulo suaugimą. Šiose šalyse didesnis dėmesys gali būti skiriamas funkcinų rezultatų pasiekimui, remiantis turimais ištekliais, net jei gydymo trukmė yra ilgesnė (71,74).

7.1 Chirurgo patirties ir individualių paciento veiksmų įtaka

Chirurgo patirtis: Bet kurios deformacijos korekcijos metodikos pasirinkimas ir sėkmingas įgyvendinimas labai priklauso nuo chirurgo žinių, patirties bei pažinties su konkrečiu metodu. Chirurgai, turintys didelę patirtį išorinės fiksacijos srityje, dažnai renkasi Ilizarovo arba heksapodines sistemas sudėtingoms deformacijoms gydyti, tuo tarpu kiti gali jaustis labiau užtikrinti taikydami vidinės fiksacijos ar osteotomijos metodus. Patirtis taip pat turi įtakos gebėjimui veiksmingai valdyti galimas komplikacijas. Tyrimai rodo, kad komplikacijų dažnis taikant Ilizarovo metodą mažėja didėjant chirurgo patirčiai (24,74).

Individualūs paciento veiksniai: Renkantis deformacijos korekcijos metodą būtina atsižvelgti į daugelį paciento ypatybių: Amžius ir augimo potencialas: Skeletiškai nesubrendusiems pacientams galūnių ilgio skirtumo korekcijai galima taikyti augimo kreipimo metodikas, tokias kaip laikinoji epifiziodėzė su tempimo juostos plokšte (15,85). Ilizarovo metodas taikomas tiek vaikams, tiek suaugusiems, tačiau tyrimai rodo, kad jaunesniame amžiuje gali būti daugiau komplikacijų ir ilgesnė gydymo trukmė (24). Deformacijos tipas ir sudėtingumas: Paprastos kampinės deformacijos gali būti koreguojamos taikant pleištinės ar skliautinės osteotomijas su vidine fiksacija, tuo tarpu sudėtingoms daugiaplanių deformacijų formoms ar esant dideliame galūnės ilgio skirtumui gali reikėti išorinės fiksacijos (Ilizarovo ar heksapodinės sistemos) arba etapinių procedūrų (62,64). Rotacinės deformacijas geriausia koreguoti specifinėmis rotacinėmis osteotomijomis arba metodais, leidžiančiais reguliuoti rotaciją (29,59). Kaulo defekto dydis ir lokalizacija: Segmentiniams kaulo defektams gydyti gali būti taikomas Ilizarovo kaulo transportas, laisvoji vaskuliarizuoto šėvikaudio transplantacija arba Masquelet technika (70,74). Tyrimai rodo, kad laisvoji vaskuliarizuoto šėvikaudio transplantacija gali užtikrinti greitesnį suaugimą ir mažesnį komplikacijų dažnį, funkcijos rezultatai dažnai būna panašūs (70). Esant aseptiniam nesuaugimui, gali būti taikoma plokštelių ir sraigčių fiksacija su kaulo persodinimu arba Masquelet technika (30,71). Minkštųjų audinių būklė: Aplink deformaciją esančių minkštųjų audinių kokybė yra itin svarbi. Operacijos, reikalaujančios didelės chirurginės ekspozicijos (pvz., skliautinės ar „clamshell“ osteotomijos), gali būti netinkamos esant pažeistiems minkštiesiems audiniams (29,81). Tokiais atvejais tinkamesnės gali būti laipsniškos korekcijos išorinės fiksacijos ar perkutaninėmis technikomis. Apsaugotinos struktūros (pvz., nervai, kraujagyslės) taip pat turi būti įvertintos atliekant staigias korekcijas (29). Infekcijos buvimas: Ilizarovo metodas ypač naudingas gydant infekuotus nesuaugimus ir kaulo defektus, nes leidžia užtikrinti stabilumą, atlikti debridementą ir skatinti kraujotaką turinčio kaulo regeneraciją (74). Dažnas pasirinkimas – Ilizarovo metodas kartu su antibiotikų tarpinėmis (65).

Paciento bendradarbiavimas: Išorinės fiksacijos sistemomis atliekamos laipsniškos korekcijos reikalauja aktyvaus paciento dalyvavimo – rėmo reguliavimo ir kaiščių priežiūros. Mažiau bendradarbiaujantys pacientai gali būti geriau gydomi taikant staigias korekcijas su vidine fiksacija ar motorizuotomis IM vinimis (29). Gretutinės ligos: Tokios būklės kaip kraujagyslių ligos, cukrinis diabetas, rūkymas ar tam tikrų vaistų vartojimas gali daryti įtaką chirurginės technikos pasirinkimui ir komplikacijų rizikai (29).

8. IŠVADOS

Apatinių galūnių ilgųjų kaulų potrauminių deformacijų korekcija yra sudėtingas procesas, reikalaujantis individualaus požiūrio ir kruopštaus priešoperacinio planavimo. Korekcijai naudojami tiek išorinės, tiek vidinės fiksacijos metodai, o jų pasirinkimas priklauso nuo deformacijos pobūdžio, kaulo būklės ir paciento individualių savybių.

Iizarovo žiedinės fiksacijos ir kiti žiediniai fiksatoriai (pvz., Taylor Spatial Frame) yra efektyvūs koreguojant sudėtingas, daugiamates deformacijas. Jie leidžia tiksliai reguliuoti ašies, rotacinius ir ilgio pakitimus, tačiau pasižymi ilga gydymo trukme, diskomfortu pacientui ir didele komplikacijų, tokių kaip kaiščių infekcijos, sąnarių kontraktūros ar neurovaskuliniai pažeidimai, rizika.

Magnetinės ar motorizuotos valdomos intramedulinės vinys (PRECICE, FITBONE) yra pažangus metodas, užtikrinantis tikslią deformacijos korekciją bei trumpesnę reabilitacijos trukmę. Jos pasižymi mažesniu infekcijų dažniu ir didesniu pacientų komfortu, tačiau jų taikymas ribotas esant aktyviai infekcijai ar siauram kaulo kanalui.

Kaulo defektų gydymui taikoma Masquelet technika, kuri, derinama su kaulo transportavimu, leidžia vienu metu spręsti defekto regeneracijos ir infekcijos kontrolės klausimus. Taip pat veiksmingi ir vaskuliarizuoti šėivikaulio transplantatai ar sintetiniai kaulo pakaitalai, tačiau jie reikalauja didesnės chirurgo patirties ir išteklių.

Komplikacijos – dažnas reiškinys tiek naudojant išorinius, tiek vidinius fiksatorius. Dažniausiai pasitaiko kaiščių infekcijos, uždelsta kaulų konsolidacija, sąnarių kontraktūros, ašinė deviacija ar neuropraksija. Komplikacijų dažnis didesnis vaikų amžiaus grupėje.

Ilgalaikiai rezultatai rodo, kad net po ilgalaikio gydymo pacientų gyvenimo kokybė gali beveik visiškai atsistatyti. Tinkamai parinktas metodas ir kruopštus gydymo plano laikymasis leidžia pasiekti gerus anatominius ir funkcinius rezultatus.

LITERATŪROS ŠALTINIAI

1. Wu AM, Bisignano C, James SL, Abady GG, Abedi A, Abu-Gharbieh E, et al. Global, regional, and national burden of bone fractures in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis from the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet Healthy Longev.* 2021 Sep 1;2(9):e580–92.
2. Hemmann P, Friederich M, Körner D, Klopfer T, Bahrs C. Changing epidemiology of lower extremity fractures in adults over a 15-year period – a National Hospital Discharge Registry study. *BMC Musculoskelet Disord.* 2021 May 19;22:456.
3. Erivan R, Carrie N, Descamps S, Caputo T, Boisgard S, Villatte G. Epidemiology of limb trauma interventions in France: Current state and future projections. *Orthop Traumatol Surg Res OTSR.* 2024 Apr;110(2):103793.
4. Zura R, Xiong Z, Einhorn T, Watson JT, Ostrum RF, Prayson MJ, et al. Epidemiology of Fracture Nonunion in 18 Human Bones. *JAMA Surg.* 2016 Nov 16;151(11):e162775.
5. Johnson L, Igoe E, Kleftouris G, Papachristos IV, Papakostidis C, Giannoudis PV. Physical Health and Psychological Outcomes in Adult Patients with Long-Bone Fracture Non-Unions: Evidence Today. *J Clin Med.* 2019 Nov;8(11):1998.
6. Vincken L, Broeck L van der, Geurts J, Shao SSQ, Poeze M, Blokhuis TJ. The effect of post-traumatic long bone non-unions on health-related quality of life. *Injury [Internet].* 2023 Oct 1 [cited 2025 Apr 6];54. Available from: [https://www.injuryjournal.com/article/S0020-1383\(23\)00615-0/fulltext](https://www.injuryjournal.com/article/S0020-1383(23)00615-0/fulltext)
7. Thomas JD, Kehoe JL. Bone Nonunion. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 [cited 2025 Apr 1]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554385/>
8. Wittauer M, Burch MA, McNally M, Vandendriessche T, Clauss M, Rocca GJD, et al. Definition of long-bone nonunion: A scoping review of prospective clinical trials to evaluate current practice. *Injury.* 2021 Nov 1;52(11):3200–5.
9. Daas S, Jlidi M, Baghdadi N, Bouaicha W, Mallek K, Lamouchi M, et al. Risk factors for

- malunion of distal tibia fractures treated by intramedullary nailing. *J Orthop Surg*. 2024 Jan 3;19:5.
10. Rollo G, Pichierri P, Grubor P, Marsilio A, Bisaccia M, Grubor M, et al. The challenge of nonunion and malunion in distal femur surgical revision. *Med Glas Off Publ Med Assoc Zenica-Doboj Cant Bosnia Herzeg*. 2019 Aug 1;16(2).
 11. Patel I, Young J, Washington A, Vaidya R. Malunion of the Tibia: A Systematic Review. *Medicina (Mex)*. 2022 Mar 5;58(3):389.
 12. Lu V, Zhang J, Zhou A, Krkovic M. Management of post-traumatic femoral defects with a monorail external fixator over an intramedullary nail. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2022;32(6):1119–26.
 13. Schep NWL, van Lieshout EMM, Patka P, Vogels LMM. Long-term functional and quality of live assessment following post-traumatic distraction osteogenesis of the lower limb. *Strateg Trauma Limb Reconstr*. 2009 Dec;4(3):107–12.
 14. Hammouda AI, Jauregui JJ, Gesheff MG, Standard SC, Conway JD, Herzenberg JE. Treatment of Post-Traumatic Femoral Discrepancy With PRECICE Magnetic-Powered Intramedullary Lengthening Nails. *J Orthop Trauma*. 2017 Jul;31(7):369–74.
 15. Vogt B, Gosheger G, Wirth T, Horn J, Rödl R. Leg Length Discrepancy—Treatment Indications and Strategies. *Dtsch Ärztebl Int*. 2020 Jun;117(24):405–11.
 16. Mundi R, Bhandari M. Devastating Impact of Fracture Nonunions: The Need for Timely Identification and Intervention for High-Risk Patients. *J Bone Joint Surg Am*. 2015 Sep 2;97(17):e62.
 17. Morgan EF, Unnikrisnan GU, Hussein AI. Bone Mechanical Properties in Healthy and Diseased States. *Annu Rev Biomed Eng*. 2018 Jun 4;20:119–43.
 18. Osterhoff G, Morgan EF, Shefelbine SJ, Karim L, McNamara LM, Augat P. Bone mechanical properties and changes with osteoporosis. *Injury*. 2016 Jun;47(Suppl 2):S11–20.
 19. Dittmer KE, Firth EC. Mechanisms of bone response to injury. *J Vet Diagn Invest*. 2017 Jul 1;29(4):385–95.

20. Bahney CS, Zondervan RL, Allison P, Theologis A, Ashley JW, Ahn J, et al. Cellular Biology of Fracture Healing. *J Orthop Res Off Publ Orthop Res Soc.* 2019 Jan;37(1):35–50.
21. Hast M, Glatt V, Archdeacon M, Ledet E, Lewis G, Ahn J, et al. Biomechanics of fracture healing: how best to optimize your construct in the OR. *OTA Int.* 2024 Mar 14;7(2 Suppl):e304.
22. Marques Luís N, Varatojo R. Radiological assessment of lower limb alignment. *EFORT Open Rev.* 2021 Jun 28;6(6):487–94.
23. Murray R, Winkler PW, Shaikh HS, Musahl V. High Tibial Osteotomy for Varus Deformity of the Knee. *JAAOS Glob Res Rev.* 2021 Jul 9;5(7):e21.00141.
24. Armagan R, Kucukkaya M, Ozdemir HM. The Use of Ilizarov Method at the Lower Extremity Deformity Management. *Med Bull Sisli Etfal Hosp.* 2023 Jun 20;57(2):263–71.
25. Gérard R, Stindel E, Moineau G, Le Nen D, Lefèvre C. Rotational femoral osteotomies using an endomedullary saw. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2009 Oct 1;95(6):414–9.
26. Alam MA, Shirazi AF, Alaradi H. Association of Fracture Location and Pattern With Nonunion or Malunion in Tibia Fractures Managed With Intramedullary Nailing: A Retrospective Study. *Cureus.* 15(11):e49156.
27. Chang G, Buckley PS, Krieg JC. Treatment of Distal Fibular Malunion with Corrective Osteotomy: Yablon Revisited. *Iowa Orthop J.* 2019;39(1):167–72.
28. Tall M, Ouedraogo I, Nd Kasse A, Tekpa BJD, Bonkounou G, Belem S, et al. Femur malunion treated with open osteotomy and intramedullary nailing in developing countries. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2012 Nov 1;98(7):784–7.
29. Neiman R. Focal Dome Osteotomy for the Treatment of Diaphyseal Malunion of the Lower Extremity. *Medicina (Mex).* 2022 Feb 17;58(2):308.
30. Zhang H, Fu J, Jie S, Wang X, Wang S, Wu H, et al. Induced membrane technique versus one-stage autografting in management of atrophic nonunion of long bone in the lower limb: clinical and health burden outcomes. *J Orthop Surg.* 2023 Nov 9;18:853.
31. El-Rosasy MA, El-Sallakh SA. Distal tibial hypertrophic nonunion with deformity: treatment

by fixator-assisted acute deformity correction and LCP fixation. *Strateg Trauma Limb Reconstr.* 2013 Apr;8(1):31–5.

32. Rouse BJ, Sheridan GA, Page BJ, Fragomen AT, Rozbruch SR. Hypertrophic nonunion management with distraction osteogenesis: a scoping review of the literature. *OTA Int.* 2024 Sep 18;7(4):e342.

33. Gatti A, Gasparini M, Cateni M, Piccirilli E, Greggi C, Tarantino U, et al. Locking screw augmentation in hypertrophic nonunion of tibia: a novel surgical technique. *Acta Bio Medica Atenei Parm.* 2021;92(Suppl 1):e2021434.

34. Lu Y, Sun L, Wang Q, Ren C, Xu Y, Ye H, et al. Osteoperiosteal decortication and bone grafting combined with wave plating for femoral shaft aseptic atrophic nonunion after intramedullary nailing. *J Int Med Res.* 2022 Nov 29;50(11):03000605221139667.

35. Perisano C, Cianni L, Polichetti C, Cannella A, Mosca M, Caravelli S, et al. Plate Augmentation in Aseptic Femoral Shaft Nonunion after Intramedullary Nailing: A Literature Review. *Bioengineering.* 2022 Oct 16;9(10):560.

36. Chaudhari SK, Dhingra M, Joshi P. Is Atrophic Nonunion a Misnomer – A Hospital-based Prospective Cross-Sectional Study. *Rev Bras Ortop.* 2022 Jul 6;57(6):1045–50.

37. Boutsiadis A, Iosifidou E, Nikolaos X, Hatzokos I. Lengthening Over an Existing Intramedullary Nail In Cases of Post-traumatic Femoral Shortening. Technical Note. Case Series Study. *Open Orthop J.* 2016 Mar 17;10:12–8.

38. Adegbehingbe OO, Ojo OD, Abiola PO, Ariyibi AL, Oginni LM, Obateru JA. Distraction by a monotube fixator to achieve limb lengthening: predictive factors for tibia trauma. *J Trauma Manag Outcomes.* 2013 May 14;7:3.

39. Ganger R, Radler C, Speigner B, Grill F. Correction of post-traumatic lower limb deformities using the Taylor spatial frame. *Int Orthop.* 2010 Jun;34(5):723–30.

40. Efird W, Kellam P, Yeazell S, Weinhold P, Dahners LE. An evaluation of prophylactic treatments to prevent post traumatic joint stiffness. *J Orthop Res.* 2014;32(11):1520–4.

41. Luo Y, Li H, Mei L, Mao X. Effects of Judet Quadricepsplasty in the Treatment of Post-

traumatic Extension Contracture of the Knee. *Orthop Surg*. 2021 May 6;13(4):1284–9.

42. Zhang J, Li Y, Liu L, Chen L, Liu Z, Duan Q, et al. Post-traumatic severe ankle valgus and forefoot supination deformities treated by staged surgery using ilizarov technique and limited osteotomy. *Medicine (Baltimore)*. 2021 Dec 23;100(51):e28385.

43. Pujol N, Boisrenoult P, Beaufils P. Post-traumatic knee stiffness: Surgical techniques. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2015 Feb 1;101(1, Supplement):S179–86.

44. Starobrat G, Danielewicz A, Szponder T, Wójciak M, Sowa I, Różańska-Boczula M, et al. Limb Axis Disorder During Leg Length Discrepancy Treatment with Temporary Epiphysiodesis Using Eight-Plate Implants. *J Clin Med*. 2025 Jan 4;14(1):258.

45. Metcalfe AJ, Stewart CJ, Postans NJ, Biggs PR, Whatling GM, Holt CA, et al. Abnormal loading and functional deficits are present in both limbs before and after unilateral knee arthroplasty. *Gait Posture*. 2017 Jun;55:109–15.

46. Bax EA, Harlianto NI, Custers RJH, van Egmond N, Foppen W, Kruijt MC. Radiographic Assessment of Bone Union in Proximal Tibia and Distal Femur Osteotomies. *JBJS Open Access*. 2024 Nov 5;9(4):e24.00101.

47. Jud L, Andronic O, Vlachopoulos L, Fucentese SF, Zingg PO. Mal-angulation of femoral rotational osteotomies causes more postoperative sagittal mechanical leg axis deviation in supracondylar than in subtrochanteric procedures. *J Exp Orthop*. 2020 Jul 1;7:46.

48. Culik J, Marik I, Cerny EP. Biomechanics of leg deformity treatment. *J Musculoskelet Neuronal Interact*. 2008;8(1):58–63.

49. Teulières M, Langlais T, de Gauzy JS, Rölfing JD, Accadbled F. Bone Lengthening with a Motorized Intramedullary Nail in 34 Patients with Posttraumatic Limb Length Discrepancies. *J Clin Med*. 2021 May 28;10(11):2393.

50. Fadel M, Hosny G. The Taylor spatial frame for deformity correction in the lower limbs. *Int Orthop*. 2005 Apr;29(2):125–9.

51. Johnson L, McCammon J, Cooper A. Correction of Genu Recurvatum Deformity Using a Hexapod Frame: A Case Series and Review of the Literature. *Strateg Trauma Limb Reconstr*.

2021;16(2):116–9.

52. Lustig S, Khiami F, Boyer P, Catonne Y, Deschamps G, Massin P. Post-traumatic knee osteoarthritis treated by osteotomy only. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2010 Dec 1;96(8):856–60.
53. Küçükkaya M, Karakoyun Ö, Sökücü S, Soydan R. Femoral lengthening and deformity correction using the Fitbone motorized lengthening nail. *J Orthop Sci.* 2015;20(1):149–54.
54. Szelerski Ł, Żarek S, Górski R, Mochocki K, Górski R, Morasiewicz P, et al. Surgical treatment outcomes of the Ilizarov and internal osteosynthesis methods in posttraumatic pseudarthrosis of the tibia—a retrospective comparative analysis. *J Orthop Surg.* 2020 May 19;15:179.
55. Wallace SJ, Patterson JT, Nork SE. Mathematically Directed Single-Cut Osteotomy. *Medicina (Mex).* 2022 Jul 21;58(7):971.
56. D’Amelio A, Lieshout EMMV, Wakker AM, Verhofstad MHJ, Vledder MGV. 3D-printed patient specific instruments for corrective osteotomies of the lower extremity. *Injury.* 2022 Nov 1;53:S53–8.
57. Müller S, Frosch KH, Frings J, Berninger M, Krause M. Biplanar high tibial osteotomy for the combined correction of varus and posterior tibial slope malalignment. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2023 Jun 1;109(4):103339.
58. Rupp MC, Themessl A, Merkle M, Insam D, Hinz M, Breulmann FL, et al. Favorable rates of return to activity and work following lateral closing wedge distal femoral osteotomy for femoral-based symptomatic varus malalignment: an analysis at a mean 6-year follow-up. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2023;31(8):3151–9.
59. Dobbe JGG, du Pré KJ, Kloen P, Blankevoort L, Streekstra GJ. Computer-assisted and patient-specific 3-D planning and evaluation of a single-cut rotational osteotomy for complex long-bone deformities. *Med Biol Eng Comput.* 2011;49(12):1363–70.
60. Rupp MC, Winkler PW, Lutz PM, Irger M, Forkel P, Imhoff AB, et al. Dislocated hinge fractures are associated with malunion after lateral closing wedge distal femoral osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2022;30(3):982–92.
61. Tonogai I, Sairyo K. One-stage tibial deformity correction and ankle arthrodesis for ankle

- osteoarthritis and tibial malalignment after low tibial osteotomy. *Int J Surg Case Rep*. 2021 Nov 25;89:106624.
62. Manner HM, Huebl M, Radler C, Ganger R, Petje G, Grill F. Accuracy of complex lower-limb deformity correction with external fixation: a comparison of the Taylor Spatial Frame with the Ilizarov ring fixator. *J Child Orthop*. 2007 Mar;1(1):55–61.
63. Basha K, Alawadhi A, Alyammahi M, Sukeik M, Abdulhadi HS, Dsouza AP, et al. Comparison of Three Circular Frames in Lower Limb Deformity Correction: A Biomechanical Study. *Cureus*. 14(5):e25271.
64. Ray V, Popkov D, Lascombes P, Barbier D, Journeau P. Simultaneous multisegmental and multifocal corrections of complex lower limb deformities with a hexapod external fixator. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2023 May 1;109(3):103042.
65. Xie L, Huang Y, Zhang L, Si S, Yu Y. Ilizarov method and its combined methods in the treatment of long bone defects of the lower extremity: systematic review and meta-analysis. *BMC Musculoskelet Disord*. 2023 Nov 16;24:891.
66. Borzunov DY, Kolchin SN, Mokhovikov DS, Malkova TA. Ilizarov bone transport combined with the Masquelet technique for bone defects of various etiologies (preliminary results). *World J Orthop*. 2022 Mar 18;13(3):278–88.
67. Zang J, Wei F, Shi L, Qin S. The Principle of Limb Reconstruction—“One Walking, Two Lines, and Three Balances”: A Retrospective Analysis of Post-Traumatic Lower Limb Deformity Correction. *Orthop Surg*. 2024 Sep 7;16(9):2252–63.
68. RADLER C, MINDLER GT, STAUFFER A, WEIß C, GANGER R. Correction of post-traumatic lower-limb discrepancy with Precice intramedullary lengthening nails: a review of 34 adults with an average follow-up of 2 years. *Acta Orthop*. 2022 Sep 2;93:696–702.
69. AL-Sayyad MJ, Alshoaibi FA, Alshuaibi AA, Almohammadi AF, Almaghrabi HA, Alsaady AM, et al. Results of Lower Limb Bone Lengthening by Using Motorized and Magnet-Driven Intramedullary Nails to Treat Limb Length Discrepancy. *Cureus*. 17(1):e77212.
70. Paul S, Vathulya M, Kandwal P, Jagtap M, Behl R. Comparative analysis of free vascularized

fibula grafting and Ilizarov bone transport in management of segmental long bone defect of the lower limb: A systematic review and meta-analysis. *J Orthop*. 2023 Dec 7;50:84–91.

71. Chmali K, ElIdrissi M, Abid H, ElIbrahimi A, Berraho M, ELMrini A. Aseptic nonunion of the tibia treated by plating and bone grafting: retrospective study about 40 cases. *J Orthop Surg*. 2022 Jun 21;17:321.

72. Zhang HJ, Wang S, Dong YH, Zheng WD, Sun Z, Zheng J. Successful management of lower limb nonunion using locking plates and bone graft with retention of intramedullary nail. *Medicine (Baltimore)*. 2019 Mar 15;98(13):e14949.

73. Sawauchi K, Fukui T, Oe K, Kuroda R, Niikura T, Muratsu H, et al. Management of Infected Tibial Nonunion: Combining Synthetic Bone Grafting with Continuous Local Antibiotic Perfusion (CLAP). *Am J Case Rep*. 2024 Sep 13;25:e945023-1-e945023-9.

74. Borzunov DY, Kolchin SN, Malkova TA. Role of the Ilizarov non-free bone plasty in the management of long bone defects and nonunion: Problems solved and unsolved. *World J Orthop*. 2020 Jun 18;11(6):304–18.

75. Miraj F, Nugroho A, Dalitan IM, Setyarani M. The efficacy of ilizarov method for management of long tibial bone and soft tissue defect. *Ann Med Surg*. 2021 Jul 31;68:102645.

76. Vedoya SP, Sel H del. Total knee arthroplasty and extra-articular deformity: Deformity correction with intra-articular bone resections. 10 years follow up. *J Orthop*. 2021 Jan 30;23:219–24.

77. Xiao-Gang Z, Shahzad K, Li C. One-stage total knee arthroplasty for patients with osteoarthritis of the knee and extra-articular deformity. *Int Orthop*. 2012 Dec;36(12):2457–63.

78. Beckers G, Kiss MO, Massé V, Malavolta M, Vendittoli PA. Personalized total knee arthroplasty in patients with extra-articular deformities. *EFORT Open Rev*. 2024 Jul 1;9(7):646–57.

79. Baek JH, Lee SC, Ryu S, Ahn HS, Nam CH. Coronal Correction for Post-Traumatic Malalignment Using Robot-Assisted Total Knee Arthroplasty: A Case Series. *Orthop Res Rev*. 2022 Nov 22;14:445–51.

80. Chamundaiah JP, Gupta NR, Mahalingam S, Edwin J. Functional Outcomes of Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty in Severe Varus Deformities of the Knee in the Indian Population.

Cureus. 16(10):e72398.

81. Purcell KF, Russell GV, Graves ML. The Clamshell Osteotomy for Diaphyseal Malunion in Deformity Correction and Fracture Surgery. *Medicina (Mex)*. 2021 Sep 10;57(9):951.
82. Capella M, Risitano S, Sabatini L, Faccenda C, Barberis L, Camazzola D, et al. Tibial condylar valgus osteotomy for the treatment of intra-articular varus deformity of the knee. *Ann Jt*. 2022 Oct 15;7:37.
83. Amin SJ, Lands V, Mashru RP, Graf KW. Acute Correction of Leg Length Discrepancy and Severe Femoral Malalignment: A Case Report. *J Orthop Case Rep*. 2022;12(5):54–7.
84. VOGT B, BIERMANN C, GOSHEGER G, LAUFER A, RACHBAUER A, ANTFANG C, et al. Simultaneous correction of leg length discrepancy and angular deformity of the distal femur with retrograde Precice nails: a retrospective analysis of 45 patients. *Acta Orthop*. 2024 Jul 15;95:365–72.
85. Tolk JJ, Merchant R, Calder PR, Hashemi-Nejad A, Eastwood DM. Tension-band Plating for Leg-length Discrepancy Correction. *Strateg Trauma Limb Reconstr*. 2022;17(1):19–25.