

Biomehanika gležnja i stopala kod pozicija u baletu

Bišćan, Iva

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:463718>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Iva Bišćan

Zagreb, 2025. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Dr. sc. Tanja Jurčević Lulić, dipl. ing.

Student:

Iva Bišćan

Zagreb, 2025. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici Tanji Jurčević Lulić na korisnim savjetima i pruženoj podršci za vrijeme izrade ovog završnog rada. Hvala i kolegi Marku Čeredaru na pomoći pri mjerenju.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na ukazanoj podršci tijekom studiranja. Posebna zahvala Lei na pomoći pri mjerenju.

Iva Bišćan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 25 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Iva Bišćan JMBAG: 0035228837

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Biomehanika gležnja i stopala kod pozicija u baletu

Naslov rada na engleskom jeziku: Biomechanics of the ankle and foot in ballet positions

Opis zadatka:

Klasični balet je grana umjetnosti koja zahtijeva izvrsnu fleksibilnost, snagu, ravnotežu, koordinaciju, kondiciju i izdržljivost te snažnu posturu tijela uz istovremeno izvođenje vrlo zahtjevnih pokreta. Postura u klasičnom baletu treba zadovoljavati biomehaničke granice tijela. Plesači u treningu koriste bazične baletne vježbe kojima razvijaju vrlo visoku razinu neuromuskularne kontrole i svijest o položaju tijela i njegovih segmenata.

Najveći broj ozljeda javlja se u mišićima, slijede ozljede tetiva i ligamenata, a najugroženiji dijelovi tijela su gležanj, stopalo, koljeno, kralježnica i kuk. Studije su se većinom usredotočile na ozljede koljena i gornjeg dijela tijela, a uobičajena prenaprezanja se pojavljuju u stopalu i gležnju te nedostaju studije o stopalima i gležnjevima plesača koji su izloženi visokom riziku od ozljeda zbog intenzivnih fizičkih zahtjeva plesa. Iz nefiziološke upotrebe stopala mogu poteći razne patologije kao što su uganuće gležnja, prijelomi, deformacije i bol.

Cilj rada je utvrditi opterećenje gležnja kod nekoliko pozicija u baletu.

U radu je potrebno:

- opisati biomehaniku gležnja i stopala kod statičkih položaja, odnosno odabranih osnovnih pozicija u baletu
- za odabrane pozicije provesti na jednom ispitaniku mjerenje reakcijskih sila podloge pomoću Tekscan platforme te mjerenje položaja tijela
- odrediti opterećenje u gležnju
- opisati prednosti i nedostatke primijenjene metode te komentirati rezultate.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. - 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. - 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. - 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. ANATOMIJA STOPALA	3
2.1. Kostur stopala.....	3
2.2. Mišići i vezivna tkiva stopala.....	4
2.3. Opseg kretnji gležanjskog i ostalih zglobova stopala	4
3. BALETNE POZICIJE	6
3.1. I. pozicija.....	6
3.1. III. pozicija	6
3.1. IV. pozicija	7
3.1. VI. pozicija	8
3.1. Na prstima (en pointe).....	9
4. MJERENJE.....	10
4.1. Taktilno mjerenje	10
4.2. Oprema za mjerenje	10
4.2.1. Platforma za mjerenje.....	10
4.2.2. Software	11
4.3. Baletne papučice (špice).....	12
4.4. Pojednostavljeni model stopala	12
4.5. Provođenje mjerenja.....	15
4.5.1. I. pozicija.....	19
4.5.2. III. Pozicija	20
4.5.3. IV. Pozicija.....	21
4.5.4. VI. Pozicija bez baletnih špica	21
4.5.5. VI. Pozicija s baletnim špicama	22
4.5.6. En pointe s baletnim špicama	24
5. REZULTATI	25
5.1. Sila u zglobu gležnja	25
5.2. Asimetrija tijela	25
6. ZAKLJUČAK.....	29

POPIS SLIKA

Slika 1. Balet kroz povijest [1].....	1
Slika 2. Upala Ahilove tetive [4].....	2
Slika 3. Kostii stopala [5].....	3
Slika 4. <i>plié</i> [7].....	4
Slika 5. <i>relevé</i> [8].....	4
Slika 6. Dorzalna i plantarna fleksija [10].....	5
Slika 7. Opseg kretnji gležanjskog zgloba [10].....	5
Slika 8. Prikaz položaja stopala u I. baletnoj poziciji [11].....	6
Slika 9. Prikaz položaja stopala u III. baletnoj poziciji [11].....	7
Slika 10. Prikaz položaja stopala u IV. baletnoj poziciji [11].....	7
Slika 11. Prikaz položaja stopala u VI. baletnoj poziciji [11].....	8
Slika 12. Prikaz anatomije stopala u položaju na prstima [6].....	9
Slika 13. Prijenosna verzija Tekscan platforme FootMat Reearch [12].....	10
Slika 14. Prikaz spoja platforme na FootMat Research program [12].....	11
Slika 15. Sastav baletnih papučica [13].....	12
Slika 16. Pojednostavljeni biomehantički model stopala.....	13
Slika 17. Pojednostavljeni prikaz opterećenja stopala u sagitalnoj ravnini.....	14
Slika 18. Pojednostavljeni prikaz opterećenja stopala u poziciji na prstima u sagitalnoj ravnini.....	15
Slika 19. Prikaz grafičkog sučelja programa FootMat Research.....	16
Slika 20. Prikaz unosa podataka ispitanice.....	17
Slika 21. Mjerne jedinice.....	17
Slika 22. Prikaz kalibracije.....	18
Slika 23. Prikaz mjerenja I. pozicije.....	19
Slika 24. Prikaz mjerenja I. pozicije (sagitalna ravnina).....	19
Slika 25. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u I. poziciji.....	19
Slika 26. Prikaz mjerenja III. pozicije.....	20
Slika 27. Prikaz mjerenja III. pozicije (sagitalna ravnina).....	20
Slika 28. . Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u III. poziciji.....	20
Slika 29. Prikaz mjerenja IV. pozicije (sagitalna ravnina).....	21
Slika 30. Prikaz mjerenja IV. pozicije.....	21
Slika 31. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u IV. poziciji.....	21
Slika 32. Prikaz mjerenja VI. pozicije bez papučica (sagitalna ravnina).....	22
Slika 33. Prikaz mjerenja VI. pozicije bez papučica.....	22
Slika 34. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u VI. poziciji bez papučica.....	22
Slika 35. Prikaz mjerenja VI. pozicije s papučicama.....	23
Slika 36. Prikaz mjerenja VI. pozicije s papučicama (sagitalna ravnina).....	23
Slika 37. . Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u VI. poziciji s papučicama.....	23
Slika 38. Prikaz mjerenja, stoj na prstima (sagitalna ravnina).....	24
Slika 39. Prikaz mjerenja, stoj na prstima.....	24
Slika 40. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska kod stoja na prstima.....	24
Slika 41. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u I. poziciji.....	26
Slika 42. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u III. poziciji.....	26
Slika 43. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u IV. poziciji.....	27
Slika 44. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u VI. poziciji bez baletnih papučica.....	27
Slika 45. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u VI. poziciji s baletnim papučicama.....	27
Slika 46. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u poziciji na prstima i u baletnim papučicama.....	28

POPIS TABLICA

Tablica 1. Specifikacije platforme za mjerenje 11
Tablica 2. Prikaz rezultata mjerenja sile u zglobu 25

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F_{at}	N	sila u Ahilovoj tetivi
$F_{gr,t}$	N	rezultantna sila reakcije podloge u području prstiju stopala
$F_{gr,h}$	N	rezultantna sila reakcije podloge u području pete stopala
F_j	N	sila u zglobu gležnja
a	cm	krak sile $F_{gr,t}$ s obzirom na točku hvatišta sile Ahilove tetive
b	cm	krak sile F_j od točke hvatišta sile Ahilove tetive
c	cm	krak sile $F_{gr,h}$ od točke hvatišta sile Ahilove tetive
α	°	kut između vektora sile F_{ah} i koordinatne osi y

SAŽETAK

Plesači baleta su podvrgnuti nezamislivim fizičkim naporima dok simultano odišu izuzetnom elegancijom. Takav nivo atletizma ima mnogo rizika. Opterećenje na zglobove tijela je samo po sebi već dovoljno opasno kod pokreta u baletu, no ti pokreti moraju biti izvedeni sa značajnom brzinom i agilnošću. Iz tih razloga su jako česte ozljede donjih ekstremiteta kod spomenute vrste plesa. Postoje mnoga istraživanja koja su se bavila ozljedama koljena i kukova plesača, no nema ih toliko na temu opterećenja njihovih gležnjeva. Ovaj završni rad koristi podatke izmjerene platformom Tekscan za analizu utjecaja opterećenja koje nastaje u različitim baletnim pozama na gležanj u stopalu plesača. Također, opisano je na koji način se kreće težište tijela dok prelaze iz pozicije u poziciju.

Ključne riječi: balet, stopalo, reakcijske sile podloge, opterećenje gležnja

SUMMARY

Ballet dancers go to unimaginable lengths of their physical ability all the while maintaining otherworldly elegance and grace. Such athleticism has many risk factors. The load on the joints in the body is damaging enough on its own but the dancers also have to perform such challenging positions with great speed and agility. That's why injuries of the lower extremity of the body are very common in this dance style. There are many studies done on the hip and knee injuries of dancers but not so many on their ankles. This final paper uses the data measured by a Tekscan platform to analyze how different ballet poses affect the ankle joint in a dancers foot. Also how their center of gravity moves as they move through classical ballet poses.

Key words: ballet, foot, ground reaction forces, ankle joint loading,

1. UVOD

Cilj ovog rada je utvrditi opterećenje gležnja kod nekoliko osnovnih pozicija u baletu. Početak baleta može se pronaći u Italiji još u 16. stoljeću, a u klasičnom smislu je upriličen u Francuskoj. Jedna od glavnih karakteristika ovog sjedinjenja umjetnosti i sporta je otvorena pozicija stopala koja je omogućena rotacijom cijele noge iz kuka prema van za 90 stupnjeva. Do navedene pozicije se uznapredovalo kroz vrijeme sve do 19. stoljeća [2] kada je uvedeno i plesanje na prstima kao utjelovljenje sveprisutne težnje plesača da dočara izgled i prenese osjećaj prividnog lebdenja i lakoće, kao što se može vidjeti na Slici 1.



Slika 1. Balet kroz povijest [1]

Klasični balet izrazito je fizički zahtjevna forma umjetnosti čiji su plesači utjelovljenje snage, fleksibilnosti, discipline i istovremeno neupitne elegancije. Zbog intenzivne fizičke aktivnosti, kao i u svakome sportu, baletni plesači izloženi su visokom riziku od ozljeda. Većina baletnih ozljeda nastaje na temelju prenaprezanja. Najčešće ozljede javljaju se u mišićima, tetivama i ligamentima pri čemu su najugroženiji dijelovi tijela gležanj, stopalo, koljeno, kralježnica i kuk. Istraživanja su pokazala veći postotak ozljeda gležnja i stopala nego u ostatku zglobova donjih ekstremiteta. Jedan od razloga za spomenuto je vidljiv u činjenici da klasičan balet iziskuje kombinaciju kretanja zgloba iz maksimalne dorzifleksije (u *demi plié* poziciji) u maksimalnu plantarnu fleksiju (kada se plesač nalazi u *en pointe* poziciji tzv. ples na prstima). Frekventnost kojom se stopalo plesača kreće između ove dvije suprotne pozicije stvara neizbježnu predispoziciju za potencijalne muskuloskeletalne komplikacije u zglobu [3]. Upravo zbog učestalosti ozljeda na spomenutom području tijela potrebno je izvoditi vježbe za jačanje mišića kako bi oni mogli uzdržavati željeni položaj zahtjevnih baletnih pozicija. Nadalje, za plesanje tehnikom „en pointe” potrebne su, uz određenu starosnu dob, također godine pripreme i

postupnog razvijanja snage u mišićima upravo jer je tom tehnikom stopalo stavljeno u atraktivan, ali neprirodan položaj koji uz nepravilnu implementaciju tehnike može dovesti do fraktura i bolnih deformacija stopala.

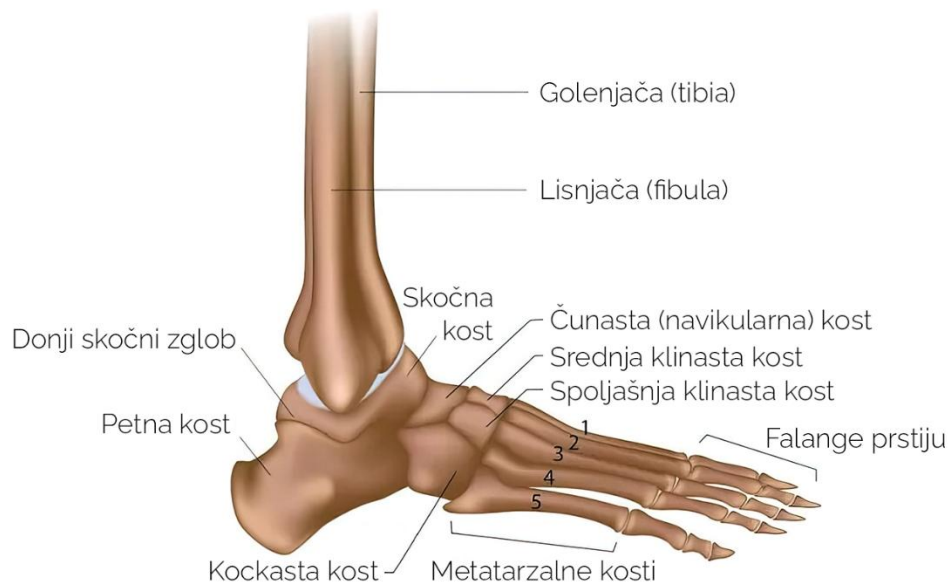
Neke od tegoba i ozljeda s kojima se plesači često susreću su uganuće gornjeg skočnog zgloba, plantarni fasciitis tj. upala plantarne fascije smještene ispod kože na tabanu i upala Ahilove tetive čiji se prikaz može vidjeti na Slici 2. Kod svih navedenih tegoba prevencija je najbolja metoda liječenja i upravo se sastoji od odmora, specifičnih vježbi za jačanje mišića i prikladne fizikalne terapije. Kako bi se naglasila važnost rehabilitacije i brige o plesačevom tijelu potrebno je osvijestiti zapravo koliko zahtjevan ples može biti za ljudski organizam.



Slika 2. Upala Ahilove tetive [4]

2. ANATOMIJA STOPALA

2.1. Kostur stopala



Slika 3. Kostu stopala [5]

Kostur stopala sastoji se od 26 kostiju koje su raspoređene na tarzalne kosti (*ossa tarsi*) koje čine stražnji dio stopala, metatarzalne kosti (*ossa metatarsi*) koje čini 5 dugačkih kosti u srednjem dijelu stopala i falange tj. kosti nožnih prstiju. Gležanjska kost (*talus*) većinski je odgovorna za prenošenje i raspodjelu pritiska koji stvara tjelesna masa na ostatak stopala, smještena je između bridače (*fibula*) i golenjače (*tibia*) koje čine kosti potkoljenice. Kostu stopala prikazane su na Slici 3.

Kada se izvodi *plié* unutrašnja strana petne kosti blago se pomiče prema unutra uz unutrašnju rotaciju skočne kosti. Upravo ovi mali pokreti omogućavaju opuštanje zglobova srednjeg dijela stopala i time se postiže fleksibilnost koja ublažava sile udarca pri prizemljenju i omogućava izvođenje mekšeg *pliéa* (Slika 4.). Suprotno navedenom se događa kada se izvodi *relevé*, (Slika 5.). Zglobovi srednjeg dijela stopala se mogu zategnuti jer se petna i skočna kost blago izdižu i time stvaraju napetost koja osigurava čvrst luk stopala potreban za uzdizanje [6].

Slika 4. *plié* [7]Slika 5. *relevé* [8]

2.2. Mišići i vezivna tkiva stopala

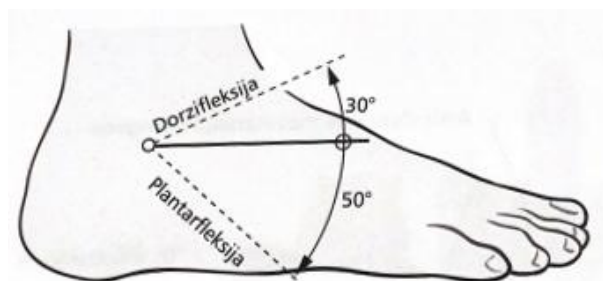
Kompleks unutarnjih (medijalnih) ligamenata (*deltoideum*) koji učvršćuje i gornji i donji gležanjski zglob građen je od četiri kraka. Ti krakovi spajaju se s jedne strane na unutarnju stranu gležnja, a s druge strane na čunastu, skočnu i petnu kost te time čine izrazito snažan snop ligamenata koji zglobu omogućava neophodnu stabilnost i uspostavljanje ravnoteže. Na lateralnoj strani su tri ligamenta (*lig. talofibulare anterius*, *lig. talofibulare posterius* i *lig. calcaneofibulare*) koji dodatno učvršćuju zglob [10]. Lateralna strana vezivnih tkiva stopala nije toliko snažna kao medijalna, te je stoga ona više podložna ozljedama poput inverzija stopala tj. uganuća gležnja. Dapače, istraživanja su pokazala da je najslabiji ligament unutar gležnja upravo jedan od spomenutih, *talofibulare anterius* [9].

Mišići tabana ne služe za fine pokrete već upravo podupiru plantarni luk kao aktivna mišićna cjelina. Njihovo jačanje od iznimne je važnosti za postizanje ravnoteže i stabilnosti. Upravo tetive i mišići zajedno čine napeti sustav koji nosi tjelesnu težinu [10].

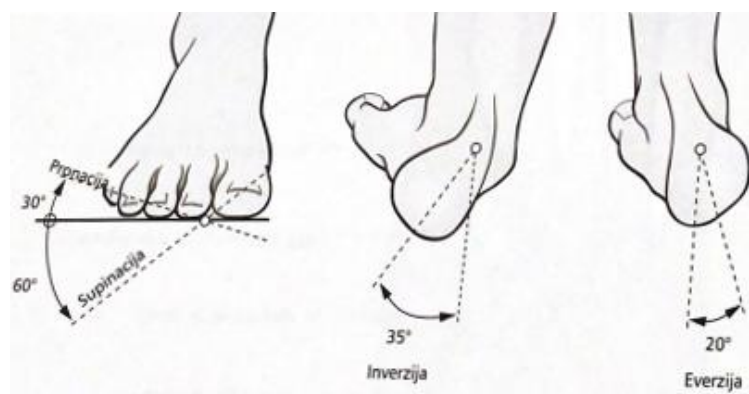
2.3. Opseg kretnji gležanjskog i ostalih zglobova stopala

Kretnje kostura stopala omogućuje sveukupno 34 zglobova. Gornji nožni zglob klasični je kutni zglob koji omogućuje dorzalnu fleksiju (ekstenziju) i plantarnu fleksiju stopala prikazanu na Slici 6. u opsegu od 30° do 50°. Donji nožni zglob atipični je okretajni zglob u kome je moguća inverzija (pokret tabana prema unutra tj. medijalno) i everzija (pokret tabana prema van tj.

lateralno) stopala, prikazane na Slici 7. Pokrete u stražnjem dijelu zglobova stopala poput supinacije i pronacije omogućuju zglobovi stopala zvani Chopartov i Lisfrancov zglob.



Slika 6. Dorzalna i plantarna fleksija [10]



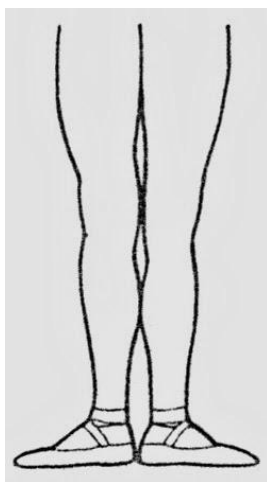
Slika 7. Opseg kretnji gležanjskog zgloba [10]

3. BALETNE POZICIJE

Kod svih napomenutih pozicija uspostavlja se uspravno držanje, jednolika raspodjela težine na oba stupala, aktiviran trup i spuštena ramena.

Ove pozicije su prikazane prema metodi Agripine Vaganove drugim nazivom zvana kao metoda ruskog baleta [11].

3.1. I. pozicija



Slika 8. Prikaz položaja stopala u I. baletnoj poziciji [11]

Na slici 8. može se vidjeti prikaz I. baletne pozicije. Noge su priljubljene jedna uz drugu, pete se dodiruju, a prsti gledaju na van. Unutarnje strane nogu bi trebale prijanjati jedna uz drugu ukoliko plesačeva anatomija to dozvoljava.

Noga je iz kuka zarotirana prema van za 90 stupnjeva što je i razlog zašto se ove pozicije nazivaju otvorene pozicije. Snop unutrašnjih ligamenata sprječava pretjeranu rotaciju zgloba prema van, tj. everziju stopala.

3.1. III. pozicija

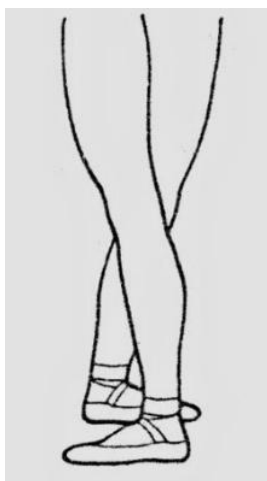


Slika 9. Prikaz položaja stopala u III. baletnoj poziciji [11]

Stražnje stopalo je postavljeno maksimalno otvoreno dok je drugo pozicionirano odmah ispred njega i to tako da prednje stopalo pokriva otprilike polovicu unutarnjeg ruba stražnjeg kao što se može vidjeti na slici 9. Prsti oba stopala su otvoreni prema van, a kut između stopala ovisi o fleksibilnosti plesača.

Kompleks unutarnjih ligamenata sprječava pretjeranu rotaciju zgloba prema unutra, tj. inverziju.

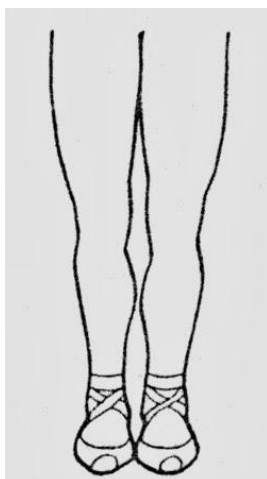
3.1. IV. pozicija



Slika 10. Prikaz položaja stopala u IV. baletnoj poziciji [11]

U četvrtu poziciju, prikazanu na slici 10., se uđe tako da se iz treće pozicije prednje stopalo pomakne prema naprijed za otprilike duljinu jednog stopala. U ovoj poziciji krucijalno je da se težina tijela jednoliko rasporedi na obje noge, te bi se stoga težište tijela trebalo nalaziti u sredini.

3.1. VI. pozicija



Slika 11. Prikaz položaja stopala u VI. baletnoj poziciji [11]

U VI. poziciji stopala se drže prirodno kao što se može vidjeti na Slici 11. Zatvorena su, priljubljena i drže se tako da prsti stoje uz prste, a pete uz pete. Šesta pozicija se jedino ponekad koristi kako bi se u njoj radile vježbe za istezanje, no osnovnim i najčešće korištenim baletnim pozicijama se smatraju od I. do V. pozicije.

3.1. Na prstima (*en pointe*)



Slika 12. Prikaz anatomije stopala u položaju na prstima [6]

Plesanje tehnikom na prstima zahtijeva uporabu baletnih papučica koje jednoliko raspoređuju opterećenja na stopalo i daju mu dodatnu čvrstinu. Kako bi stopalo bilo u mogućnosti postići navedenu poziciju, mora imati snažne lukove kojima potporu daje plantarna fascija, vezivno tkivo koje podržava svod stopala. Na slici 12. prikazana je anatomija stopala u položaju na prstima.

Iako ne postoje istraživanja koja su analizirala ligamente gležnja u krajnje opterećenoj poziciji upravo navedenoj, može se zaključiti da se naprezanje u prednjem talofibularnom ligamentu (*talofibulare anterius*) povećava s povećanjem plantarfleksije. Nadalje, povećanje naprezanja u spomenutom ligamentu naglašeno je za vrijeme tlačnog opterećenja do kojeg dolazi upravo u poziciji plesanja na prstima. Pošto je tada gležanj u maksimalnoj plantarnoj fleksiji, prednji talofibularni ligament je pozicioniran paralelno sa fibulom i služi kao primarni stabilizator lateralnog zgloba. Zaključno, u toj poziciji se upravo najslabiji ligament u gležnju nalazi pod najvećim opterećenjem i produljen je na njegovu najdulju funkcionalnu duljinu. Ovaj podatak samo još više ukazuje na važnost adekvatne dugogodišnje pripreme plesača za pravilno implementiranje tehnike plesanja na prstima. [3]

4. MJERENJE

4.1. Taktilno mjerenje

Primjenom Newtonovog zakona akcije i reakcije stajanjem u statičkom položaju na podlozi tijelo djeluje nekom silom na nju i u podlozi se javlja iznosom jednaka, ali smjerom suprotna sila. Pošto je u slučaju taktilnog mjerenja podloga na kojoj tijelo stoji zapravo mjerna platforma, ona će zabilježiti vertikalnu komponentu sile kojom je stajanje tijelo djelovalo na mjernu ploču.

4.2. Oprema za mjerenje

4.2.1. Platforma za mjerenje

Platforma za mjerenje tvrtke Tekscan omogućuje prikupljanje podataka iz statičkog i dinamičkog mjerenja pritiska za analizu funkcije stopala, ravnoteže i držanja tijela. Korištena platforma je prijenosna verzija što znači da je svojom veličinom prilagođena za mjerenja i na terenu i u laboratoriju. Na slici 13. prikazan je standardni model koji je korišten za mjerenje eksperimentalnog dijela ovog rada.



Slika 13. Prijenosna verzija Tekscan platforme FootMat Reaearch [12]

4.2.2. Software

Analizu i pristup vizualnim prikazima izmjerenih podataka omogućava program *FootMat Research STAM* koji se umreži s platformom kojom mjerimo podatke preko USB kabela. Prikaz na slici 14. pokazuje svu potrebnu opremu za funkcionalno mjerenje. U Tablici 1. Prikazane su značajke platforme za mjerenje tvrtke Tekscan.



Slika 14. Prikaz spoja platforme na FootMat Research program [12]

Tablica 1. Specifikacije platforme za mjerenje [12]

Rezolucija senzora	1 senzor / cm ²
Dimenzije platforme	63,6 x 55,9 x 4,2 cm
Polje senzora	52x44
Veličina senzora	0,8382 cm ²
Aktiva dodirna površina	48,7 x 44,7 cm
Masa	3,5 kg
Gornje granične vrijednosti pritiska na površinu	345-862 kPa
Radna temperatura	0-35°

4.3. Baletne papučice (špice)

Baletne papučice ili špice su strukturirane na način da pružaju potporu luku stopala u iznimno zahtjevnom položaju. Prve baletne papučice bile su rađene od satena, kože, papira i ljepila. Princip rada tadašnjih papučica bio je nalik suvremenom u smislu da se stavlja dodatni potporni materijal u same cipele, no on nije bio čvrst i izdržljiv kao ovaj kojeg znamo danas.

Svrha baletnih kutija ili kapica građenih od polimera, tkanina i ljepila je upravo preraspodjela napreznja u prstima. Moderan pristup implementira inovacije poput gumenih jastučića i fleksibilnih polimerom ojačanih uložaka. Osim baletne kutije tu se nalazi i uložak za špice koji je odgovoran za davanje potpore luku stopala. Postoje i nove *Gaynor Minden* špice koje koriste elastomere i plastomere, te su stoga izdržljivije, dulje traju, a ujedno imaju manje robustan učinak na stopala plesača. Slika 17. prikazuje sastavne dijelove baletnih papučica.



Slika 15. Sastav baletnih papučica [13]

Istraživanja [14] su pokazala usku korelaciju između iznošenosti plesnih cipela i učestalosti ozljeda u stopalu i gležnju i to primarno zbog smanjenja krutosti cipele što rezultira manjom omogućenom potporom stopalu i posljedično većem njihanju težišta tijela, profesionalne balerine znaju istrošiti više pari papučica samo tokom jednog izvođenja predstave.

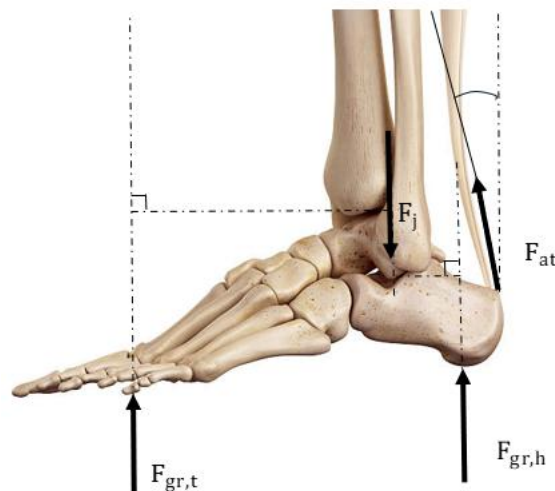
4.4. Pojednostavljeni model stopala

Kako bi se odredila tražena sila u zglobu gležnja najprije je potrebno odrediti model po kojem će se računati sile. Pojednostavljen biomehanički model stopala i gležnja omogućava realnu, ali generaliziranu procjenu veličina sila koje djeluju na gležnanski zglob i njihov utjecaj na

isti. Na slici 16. prikazan je model stopala u sagitalnoj ravnini kakav je i promatran u svim mjeranim baletnim pozicijama.

Na stopalo djeluju reakcijske sile podloge $F_{gr,t}$ i $F_{gr,h}$, sila u Ahilovoj tetivi F_{at} te sile u zglobu gležnja.

Za potrebe ovog završnog rada korišten je dovoljno precizan, međutim adekvatno pojednostavljen biomehanički model prikazan na slici 16. U nastavku slijedi prikaz jednadžbi korištenih za obradu izmjerenih podataka.



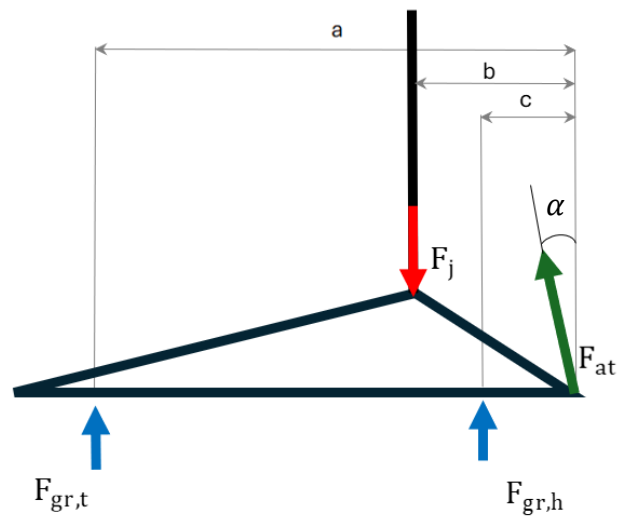
Slika 16. Pojednostavljeni biomehanički model stopala

Na slici 17. nalazi se pojednostavljeni model analize sila u stopalu I., III., IV., V. i VI. baletne pozicije.

U otvorenim baletnim pozicijama (I., III., IV., V. pozicija) plesači teže iznosu kuta od 180° između oba stopala. Iz tog specifičnog razloga i radi općeg pojednostavljenja, u navedenim pozicijama pretpostavit će se analiza u sagitalnoj ravnini čiji je prikaz omogućen spomenutim otvaranjem stopala.

Također, u VI. zatvorenoj poziciji se pretpostavlja analiza u sagitalnoj ravnini gdje ne postoji vanjska rotacija gležanjanskog zgloba.

S obzirom na težnju jednolikoj raspodjeli tjelesne težine između oba stopala u svim promatranim baletnim pozicijama, proračun sile u zglobu će se raditi na desnom stopalu.



Slika 17. Pojednostavljeni prikaz opterećenja stopala u sagitalnoj ravnini

Sila $F_{gr,t}$ jest zapravo rezultatna sila kojom podloga djeluje na stopalo u prednjem dijelu tj. na području prstiju, a sila $F_{gr,h}$ je rezultatna sila kojom podloga djeluje na stopalo u području pete. Udaljenost a predstavlja krak sile $F_{gr,t}$, udaljenost b predstavlja krak $F_{gr,h}$, a udaljenost c predstavlja krak sile F_j s obzirom na točku hvatišta sile u Ahilovoj tetivi. Sila F_j je sila u zglobu gležnja. Masa stopala ispitanice nije uzeta u obzir zbog zanemarive veličine u odnosu na ostale sile.

Iz pojednostavljenog prikaza djelovanja sila u stopalu u sagitalnoj ravnini može se postaviti sljedeća momentna jednadžba oko hvatišta sile u Ahilovoj tetivi:

$$F_j \cdot b = F_{gr,t} \cdot a + F_{gr,h} \cdot c \quad (1)$$

Pri čemu je:

$F_{gr,h}$ rezultatna sila reakcije podloge u području pete

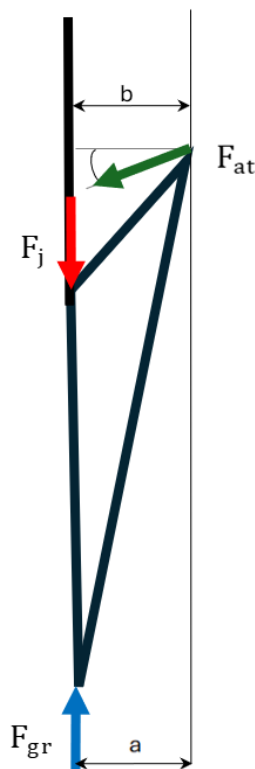
$F_{gr,t}$ rezultatna sila reakcije podloge u području prstiju

F_j sila u zglobu gležnja

a krak sile $F_{gr,t}$ od točke hvatišta sile Ahilove tetive

- b krak sile F_j od točke hvatišta sile Ahilove tetive
- c krak sile $F_{gr,h}$ od točke hvatišta sile Ahilove tetive
- α kut između vektora sile F_{ah} i koordinatne osi y

Tehnikom plesanja na prstima u baletnim papučicama teži se metaforičkom postizanju ravne linije koja prolazi koljenom, zglobovima i nožnim palcem. Iz tog razloga i zbog općeg pojednostavljenja, pretpostavit ćemo da je sila u zglobu u potpunosti okomita na podlogu za vrijeme stajanja na vršcima prstiju. Na slici 18. prikazan je pojednostavljeni slučaj navedenog opterećenja zgloba.



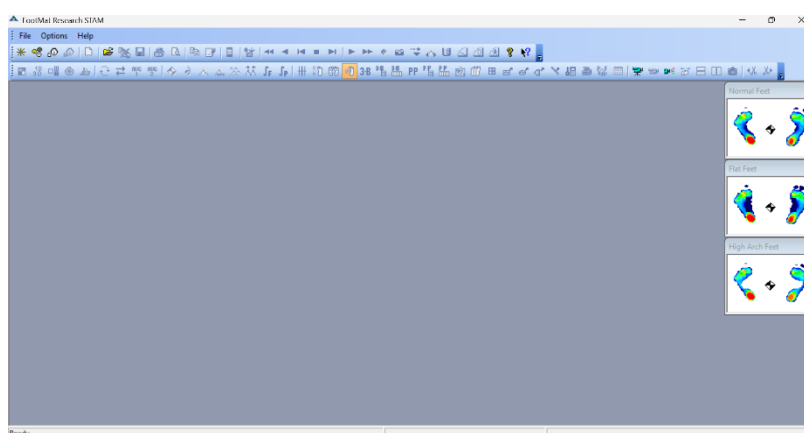
Slika 18. Pojednostavljeni prikaz opterećenja stopala u poziciji na prstima u sagitalnoj ravnini

4. 5. Provođenje mjerenja

Mjerenja ovog završnog rada odrađena su na Katedri za biomehaniku i ergonomiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanja su se izvodila na prijenosnoj pedobarografskoj platformi koju proizvodi TekscanTM. Mjerenje je provedeno na jednoj ispitanici – balerini starosti 22 godine visine 175 cm, mase 62 kg i stopala veličine obuće 38.

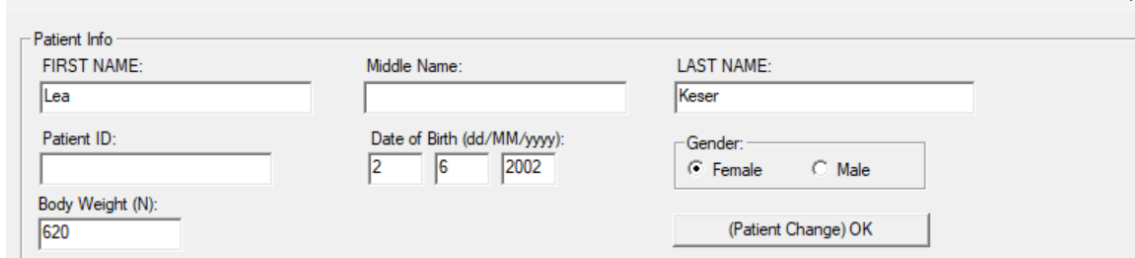
Pomoću programa „FootMat Research STAM“ omogućen je vizualni 2D i 3D prikaz izmjerenih podataka. Također, može se odabrati samo određeno područje za koje je potrebno očitati traženu silu i time se dobiva i najveća sila koja opterećuje odabrano područje. Vizualnim ili analitičkim prikazom može se uočiti i asimetrija između izmjerenih podataka. Omogućen je prikaz snimanog mjerenja, dakle video pokreta i samim time analiza promjene težišta tijela za vrijeme trajanja navedenih kretnji.

Mjerenje za svaku poziciju je trajalo 10 sekundi i rezultiralo s 30 frame-ova. Slijedi prikaz grafičkog sučelja programa na slici 19.



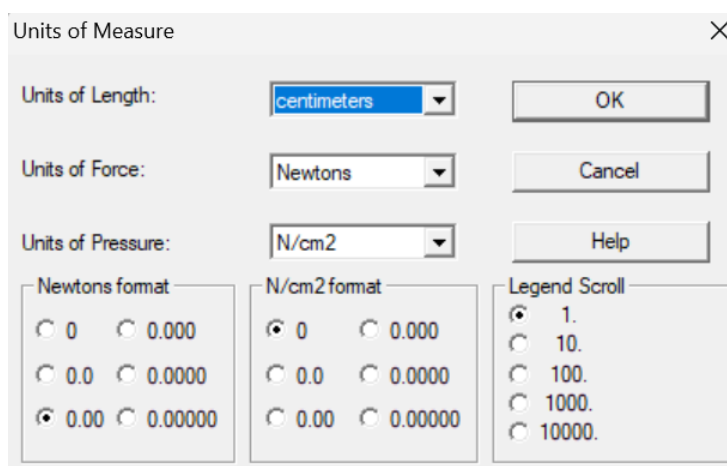
Slika 19. Prikaz grafičkog sučelja programa FootMat Research

Prije početka mjerenja upisani su podaci ispitanice kako bi se odradila kalibracija. Određene su mjerne jedinice u kojima se prikazuju izmjereni podaci. Kao što je vidljivo na slikama 20. i 21. odabran je prikaz sila u Njutnima, površina u cm^2 i kontaktni pritisak u N/cm^2 .



The screenshot shows a 'Patient Record' window for 'Lea Keser'. It contains several input fields: 'FIRST NAME' with 'Lea', 'Middle Name' (empty), 'LAST NAME' with 'Keser', 'Patient ID' (empty), 'Date of Birth (dd/MM/yyyy)' with '2/6/2002', 'Gender' with 'Female' selected, and 'Body Weight (N)' with '620'. A '(Patient Change) OK' button is at the bottom right.

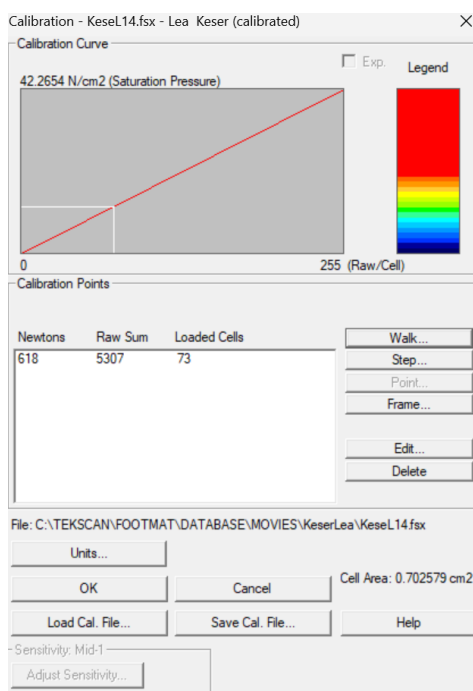
Slika 20. Prikaz unosa podataka ispitanice



The 'Units of Measure' dialog box has three dropdown menus: 'Units of Length' set to 'centimeters', 'Units of Force' set to 'Newtons', and 'Units of Pressure' set to 'N/cm2'. Below these are three groups of radio buttons for formatting: 'Newtons format' (0, 0.0, 0.00, 0.000, 0.0000, 0.00000), 'N/cm2 format' (0, 0.0, 0.00, 0.000, 0.0000, 0.00000), and 'Legend Scroll' (1., 10., 100., 1000., 10000.). 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons are on the right.

Slika 21. Mjerne jedinice

Kako bi se izmjereni podaci prilagodili težini ispitanice, potrebno je provesti proces kalibracije koji je prikazan na slici 22.



Slika 22. Prikaz kalibracije

Jedan od ciljeva bio je odrediti naprezanja u gležnju u određenim baletnim pozicijama. Kako bismo to učinili bilo je potrebno statički izmjeriti položaje odabranih baletnih pozicija i očitati izmjerene podatke.

Statička mjerenja su se izvodila na način da je ispitanica u svakoj određenoj baletnoj poziciji stajala mirno na mjestu 10 sekundi dok mjerenje nije završilo. Prikaz mjerenja možemo vidjeti na Slikama 24. do 40.

Provedeno je i dinamičko mjerenje u kom je ispitanica prolazila kroz neke od izmjerenih pozicija, točnije I., III., IV. i VI. te je time omogućena analiza promjene položaja težišta tijela. U spomenutom dinamičkom mjerenju lijevo je stopalo ostajalo statično i u istom položaju od početka mjerenja sve do VI. pozicije gdje je ono zarotirano prema unutra, međutim to je učinjeno na način da je peta stopala ostala na istom mjestu na mjernoj platformi. Ishodište koordinatnog sustava se nalazi u gornjem lijevom kutu platforme. X os je horizontalna os usmjerena prema desno, a os y je vertikalna os usmjerena prema dolje. Rezultantne sile kojima podloga djeluje na stopalo učitavaju se pomoću Footmat Research STAM programa.

4.5.1. I. pozicija

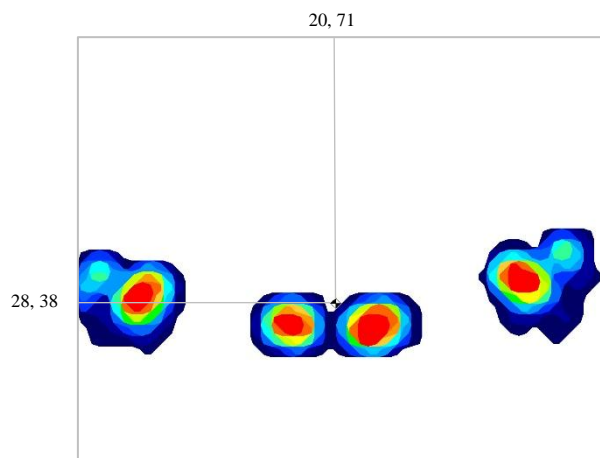
Prikazano je mjerenje I. baletne pozicije u dvije ravnine i izračun sila u toj poziciji.



Slika 24. Prikaz mjerenja I. pozicije (sagitalna ravnina)



Slika 23. Prikaz mjerenja I. pozicije



Slika 25. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u I. poziciji

Iznos rezultantne sile u peti iznosi 258,17 N dok iznos kraka te sile c iznosi 4 cm. Rezultantna sila u području prstiju iznosi 276,075 N i djeluje na kraku a iznosa 16 cm. Krak na kojem djeluje sila u zglobu je iznosa 6 cm, te stoga sila u zglobu u I. baletnoj poziciji iznosi 908,315 N.

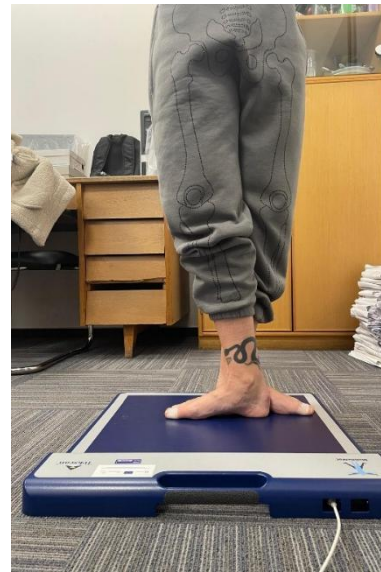
Udaljenost težišta tijela po x osi iznosi 20,71 cm, a udaljenost težišta po y osi iznosi 28,38 cm.

4.5.2. III. Pozicija

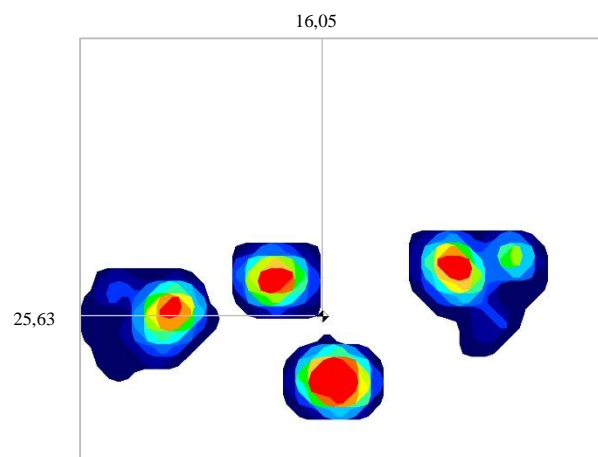
Prikazano je mjerenje III. baletne pozicije u dvije ravnine i izračun sila u toj poziciji.



Slika 27. Prikaz mjerenja III. pozicije (sagitalna ravnina)



Slika 26. Prikaz mjerenja III. pozicije



Slika 28. . Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u III. poziciji

Iznos rezultantne sile u peti iznosi 175.725 N dok iznos kraka te sile c iznosi 4 cm. Rezultantna sila u području prstiju iznosi 240,615 N i djeluje na kraku a iznosa 16 cm. Krak na kojem djeluje sila u zglobu je iznosa 6 cm, te stoga sila u zglobu u I. baletnoj poziciji iznosi 761,456 N.

Udaljenost težišta tijela po x osi iznosi 16,05 cm, a udaljenost težišta po y osi iznosi 25,63cm stoga se može zamijetiti pomak težišta tijela prema naprijed uslijed povlačenja desnog stopala pod ispitanicu pri prijelazu iz I. u III. poziciju.

4.5.3. IV. Pozicija

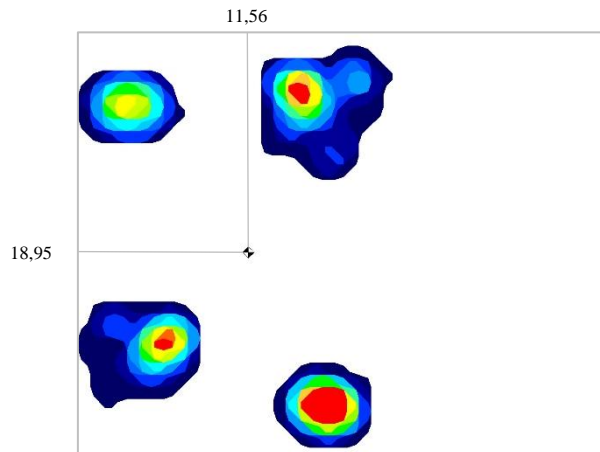
Prikazano je mjerenje IV. baletne pozicije u dvije ravnine i izračun sila u toj poziciji.



Slika 29. Prikaz mjerenja IV. pozicije (sagitalna ravnina)



Slika 30. Prikaz mjerenja IV. pozicije



Slika 31. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u IV. poziciji

Iznos rezultantne sile u peti iznosi 143,49 N dok iznos kraka te sile c iznosi 4 cm. Rezultantna sila u području prstiju iznosi 207,77 N i djeluje na kraku a iznosa 16 cm. Krak na kojem djeluje sila u zglobu je iznosa 6 cm, te stoga sila u zglobu u I. baletnoj poziciji iznosi 649,71 N.

Udaljenost težišta tijela po x osi iznosi 11,56 cm, a udaljenost težišta po y osi iznosi 18,95 cm.

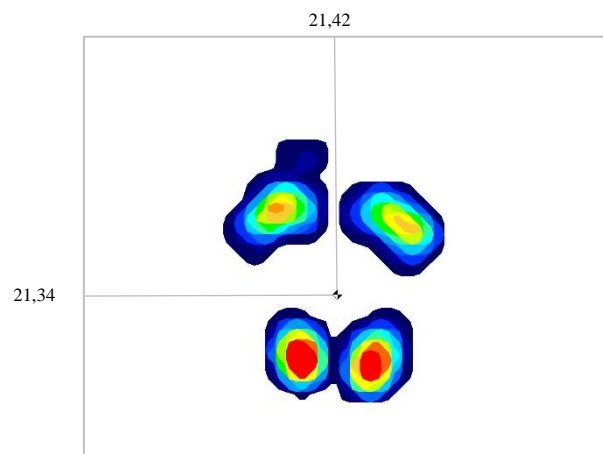
4.5.4. VI. Pozicija bez baletnih špica



Slika 32. Prikaz mjerenja VI. pozicije bez papučica (sagitalna ravnina)



Slika 33. Prikaz mjerenja VI. pozicije bez papučica



Slika 34. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u VI. poziciji bez papučica

Iznos rezultantne sile u peti iznosi 245,33 N dok iznos kraka te sile c iznosi 4 cm. Rezultantna sila u području prstiju iznosi 200,88 N i djeluje na kraku a iznosa 16 cm. Krak na kojem djeluje sila u zglobu je iznosa 6 cm, te stoga sila u zglobu u I. baletnoj poziciji iznosi 699,23 N. Udaljenost težišta tijela po x osi iznosi 21,42 cm, a udaljenost težišta po y osi iznosi 21,34 cm.

4.5.5. VI. Pozicija s baletnim špicama

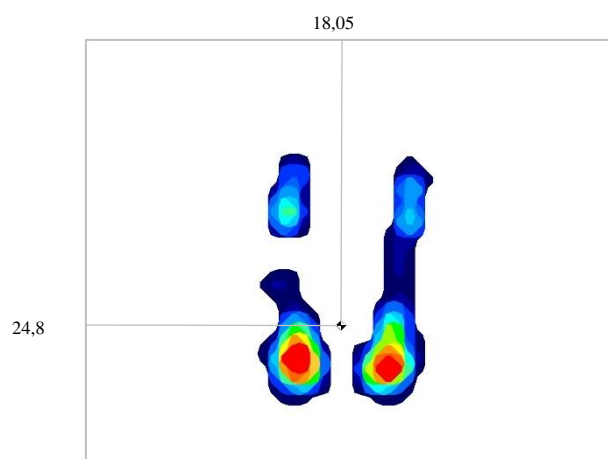
Prikazano je mjerenje VI. baletne pozicije u dvije ravnine i izračun sila u toj poziciji.



Slika 36. Prikaz mjerenja VI. pozicije s papučicama (sagitalna ravnina)



Slika 35. Prikaz mjerenja VI. pozicije s papučicama



Slika 37. . Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u VI. poziciji s papučicama

Iznos rezultantne sile u težištu pete iznosi 230,13 N dok iznos kraka te sile c iznosi 4 cm. Rezultantna sila u području prstiju iznosi 52,66 N i djeluje na kraku a iznosa 16 cm. Krak na kojem djeluje sila u zglobu je iznosa 6 cm, te stoga sila u zglobu u I. baletnoj poziciji iznosi 293,84 N.

Može se zamijetiti da je gips unutar plesne špice uzrokovao više jednoliku raspodjelu opterećenja na području prstiju u odnosu na mjerenje VI. pozicije bez plesnih papučica.

Udaljenost težišta tijela od ishodišta po x osi iznosi 18,05 cm, a udaljenost težišta tijela od ishodišta po y osi iznosi 24,8cm.

4.5.6. En pointe s baletnim špicama

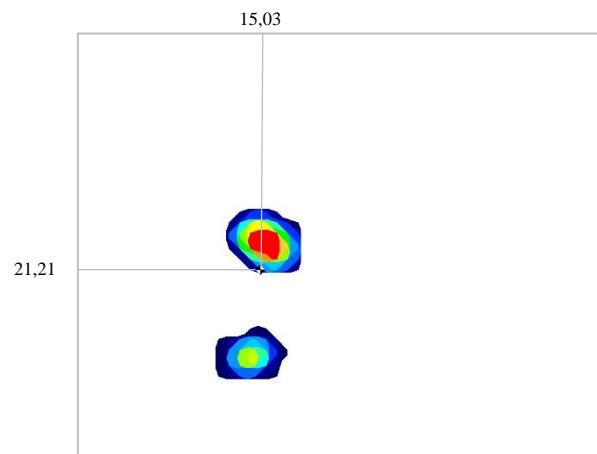
Prikazano je mjerenje pozicije na prstima u dvije ravnine i izračun sila te pozicije.



Slika 38. Prikaz mjerenja, stoj na prstima (sagitalna ravnina)



Slika 39. Prikaz mjerenja, stoj na prstima



Slika 40. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska kod stoja na prstima

Sila podloge i sila u zglobu će dijeliti jednaki iznos, pošto u ovom modelu pojednostavljenog elementa postoji jednaki krak sile podloge i sile u zglobu u odnosu na hvatište sile Ahilove tetive.

Sila u zglobu iznosi 199,83 N.

5. REZULTATI

5.1. Sila u zglobu gležnja

Rezultati mjerenja, odnosno izračunatih sila u gležnju, prikazani su u Tablici 2.

Tablica 2. Prikaz rezultata mjerenja sile u zglobu

	Sila u gležnju F_j	$\frac{F_j}{G}$
I. pozicija	908,315 N	1,47
III. pozicija	761,456 N	1,23
IV. pozicija	649,71 N	1,05
VI. pozicija (bez papučica)	699,23 N	1,13
VI. pozicija (s papučicama)	293,84 N	0,47
Na prstima	199,83 N	0,32

U tablici 2. nalaze se vrijednosti sila u gležnju kroz 5 osnovnih baletnih pozicija i stoj na prstima. Iznos sile u gležnju je najveći u prvoj poziciji, a daleko najmanji u stoju na prstima. Pošto je težina ispitanice 620 N za normalizirani prikaz sile u gležnju dobiveni iznos podijeli se sa težinom ispitanice.

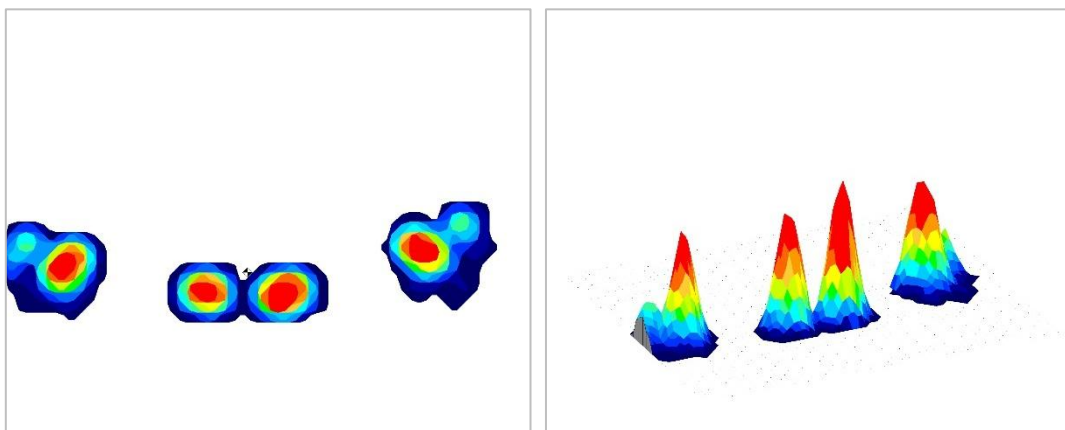
Prema rezultatima gležanj je najmanje opterećen u stoju na prstima što nije očekivani rezultat pogotovo s obzirom na kut pod kojim se gležanj nalazi u toj poziciji. Najveća opterećenja se nalaze u trećoj i prvoj poziciji što i je u skladu s očekivanjima s obzirom da je rotacija zgloba veća u tim pozicijama nego u IV.

S obzirom da je u VI poziciji zglob u neutralnom položaju očekivano je da rezultat sile zgloba te pozicije neće biti među najvećima.

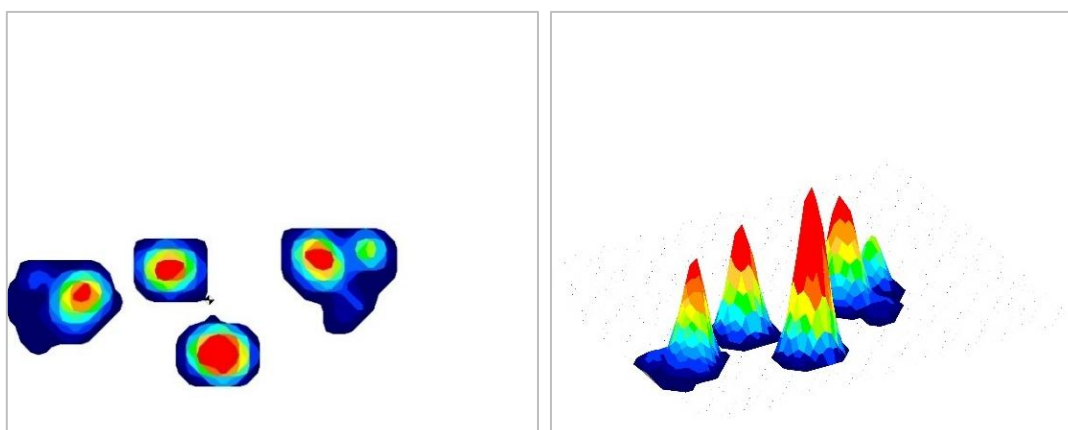
5.2. Asimetrija tijela

Asimetrija je odstupanje od simetrije i očekivana je u provođenju mjerenja sa živim bićima. Kvalitativni prikaz razlike u raspodjeli pritiska između lijevog i desnog stopala kroz sve

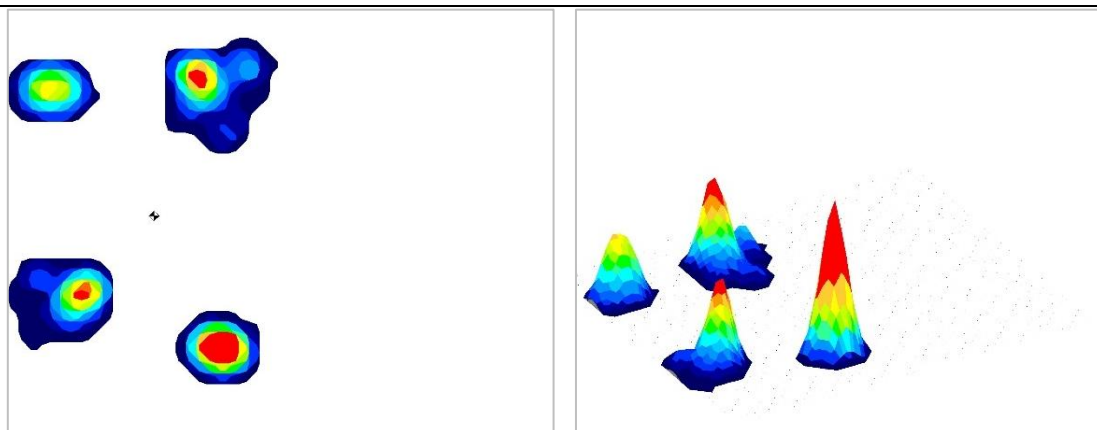
mjerene pozicije prikazan je slikama 41., 42., 43., 44., 45., 46. Može se vidjeti na koje se stopalo u određenom mjerenju ispitanica više oslanjala.



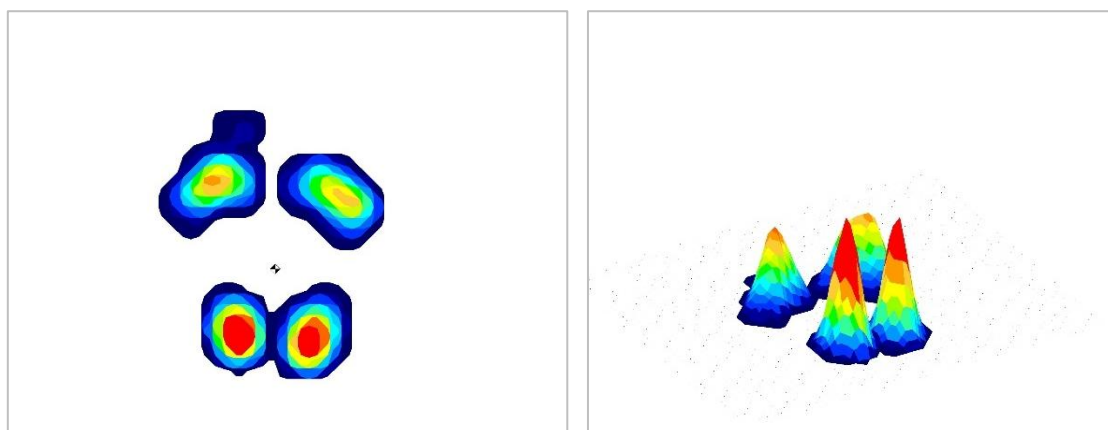
Slika 41. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u I. poziciji



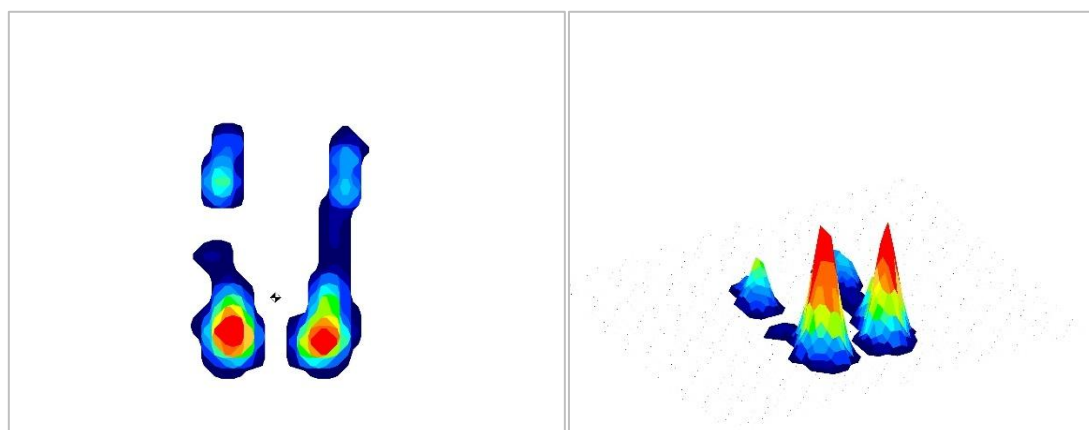
Slika 42. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u III. poziciji



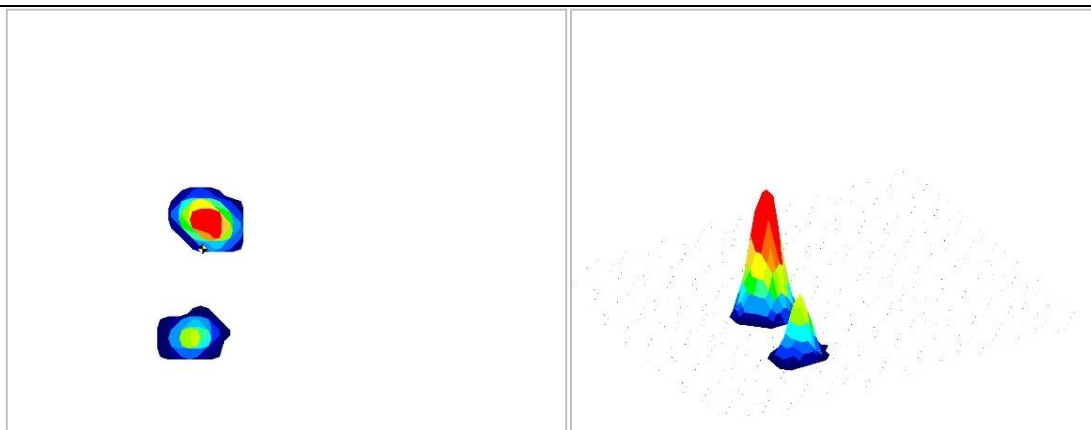
Slika 43. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u IV. poziciji



Slika 44. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u VI. poziciji bez baletnih papučica



Slika 45. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u VI. poziciji s baletnim papučicama



Slika 46. Kvalitativni prikaz raspodjele pritiska u poziciji na prstima i u baletnim papučicama

Može se primijetiti da je ispitanica u I. poziciji i na prstima imala veće opterećenje na desnoj nozi, a u svakoj drugoj poziciji je veći dio tjelesne težine preuzimala lijeva noga.

Ovakvi rezultati su očekivani pošto je ispitanici dominantna lijeva noga. Ova pojava nam ukazuje na jedan od nedostataka mjerenja ovom metodom, a to je utjecaj ispitanika kojim smo primorani uzeti u obzir faktor ljudske pogreške.

6. ZAKLJUČAK

Sudeći po zabilježenoj promjeni putanje prijelazom iz I. u III. ili VI. pozicija težište tijela se pomakne malo prema unaprijed što je u skladu s pretpostavkama.

Iz rezultata se može vidjeti da je utjecaj kojim ispitanica djeluje na podlogu znatno veći u onim baletnim pozicijama koje su otvorenije, što je i očekivano. Kako bi zadržala ravnotežu u za zglob neprirodnom položaju, potrebno je da se snažnije odguruje od podloge. Time podloga principom akcije i reakcije odgovara većom silom i plesačica se osjeća stabilnije.

Nadalje, može se primijetiti da je raspodjela opterećenja u području prstiju znatno ujednačenija kada ispitanica nosi špice u odnosu na istu poziciju bez njih. Što smo i očekivali jer je na prednjem dijelu špica čvrsta struktura od ljepila i tkanine.

Može se primijetiti da je sila kojom je opterećen zglob to veća što je u određenoj poziciji veća sila u području prstiju. Zato i jest jedna od najmanjih sila u zglobu ona u VI. poziciji sa špicama. Iz rezultata učinjenog mjerenjem se ne može precizno procijeniti učinak plesanja na vršcima prstiju na gležanjski zglob.

Sudeći po rezultatima, najnepovoljnija pozicija za opterećenje zgloba gležnja je I. baletna pozicija.

Nedostaci provedenog istraživanja su to što je mjerenje provedeno samo na jednoj ispitanici. Osim toga, vrijednosti reakcijskih sila podloge čine se prevelikim, što može biti posljedica loše kalibracije platforme. Također, model stopala je vrlo pojednostavljen, te nisu uzete u obzir unutarnje strukture u zglobu gležnja. Realniji model stopala trebao bi uključiti mišićno-koštane strukture te tetive i ligamente što je moguće napraviti u programskom paketu za biomehaničko modeliranje (npr. BOB – Biomechanics of Bodies)

LITERATURA

- [1] Povijesni prikaz baleta: <https://theheatretimes.com/the-magic-begins-with-the-clock-striking-midnight-the-history-of-the-nutcracker-ballet-in-egypt/> Pristupljeno: 2.12.2024.
- [2] Povijest baleta: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Balet> Pristupljeno: 2.12.2024.
- [3] Li F, Adrien N, He Y. Biomechanical Risks Associated with Foot and Ankle Injuries in Ballet Dancers: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2022 Apr 18;19(8):4916. doi: 10.3390/ijerph19084916. PMID: 35457783; PMCID: PMC9029463.
- [4] Prikaz upale Ahilove tetive: <https://lumbalis.net/2020/03/27/upala-ahilove-tetive/> Pristupljeno: 2.12.2024.
- [5] Prikaz kosti stopala: <https://www.orthoexpert.rs/stopalo> Pristupljeno: 6.1.2025.
- [6] J. G. Haas, Ples Anatomija
- [7] Prikaz *plié*: <https://www.anchorageballet.org/post/oh-plies> Pristupljeno: 6.1.2025.
- [8] Prikaz *relevé*: <https://citydance.org/what-is-a-ballet-releve-how-to-do-a-releve-in-ballet/> Pristupljeno: 6.1.2025.
- [9] Russell JA, McEwan IM, Koutedakis Y, Wyon MA. Clinical anatomy and biomechanics of the ankle in dance. *J Dance Med Sci*. 2008;12(3):75-82. PMID: 19618582.
- [10] Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.
- [11] Pozicije nogu, Šimunec, K., <https://www.balet.com.hr/pozicije-nogu-to-je-sad-to/>, 16.1.2021.
- [12] Prikaz slojeva baletne papučice: <https://thepointeshoe.weebly.com/about-the-shoe.html> Pristupljeno: 6.1.2025.
- [13] Tekscan platforma: <https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/mobilemat> Pristupljeno: 11.11.2024.
- [14] Aquino J, Amasay T, Shapiro S, Kuo YT, Ambegaonkar JP. Lower extremity biomechanics and muscle activity differ between 'new' and 'dead' pointe shoes in professional ballet dancers. *Sports Biomech*. 2021 Jun;20(4):469-480. doi: 10.1080/14763141.2018.1561931. Epub 2019 Jan 31. PMID: 30702388.