

Biomehanička analiza pri spuštanju niz stepenice

Martinić-Posavec, Karla

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:235:300142>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Karla Martinić-Posavec

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Aleksandar Sušić, dipl. ing.

Student:

Karla Martinić-Posavec

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Aleksandru Sušiću na savjetima i sugestijama prilikom izrade ovog završnog rada te na pruženoj mogućnosti za provođenje mjerenja na katedri za biomehaniku i ergonomiju. Hvala asistentu Marku Čeredaru, mag. ing. za pomoć pri izradi mjerenja.

Zahvaljujem se i svojim prijateljima i kolegama, koji su me kroz studiranje podržavali, motivirali i bili uz mene u trenucima kad je bilo najteže.

Najviše zahvaljujem svojim roditeljima, Milanu i Jasminki, koji su uvijek bili uz mene, čak i kada bih sumnjala u svoje znanje i sposobnosti. Njihova neizmjerena podrška i ljubav omogućili su mi da se u potpunosti posvetim studiranju, bez ikakvih drugih obaveza. Bez njihove nesebične pomoći i vjere u mene, ovaj put ne bi bio moguć.

Karla Martinić-Posavec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske 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 / 24 – 06 / 01	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Karla Martinić-Posavec** JMBAG: **0035233496**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Biomehanička analiza pri spuštanju niz stepenice**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Biomechanical analysis of descending the stairs**

Opis zadatka:

Silazak po stepenicama predstavlja kretnju koja je svojevrsna referenca za analizu opterećenja zgloba koljena i kuka, i općenito, poremećaja donjih ekstremiteta lokomotornog sustava čovjeka. Čak i prije nego nastupe teže patološke promjene, počinju se javljati bolovi u zglobovima, kao indikator prisutnih biomehaničkih poremećaja. Rano uočavanje postojanja nesklada u biomehanici kretanja pri silasku po stepenicama predstavlja preventivnu mjeru kojoj treba posvetiti dostatnu pažnju, što se može postići biomehaničkom analizom spuštanja niz stepenice. Također, za sve one kojima je već postavljena dijagnoza sa zahtjevom ugradnje nekog umjetnog zgloba, poželjno je radi ispravnog dimenzioniranja i izbora materijala takve konstrukcije utvrditi stvarna opterećenja zgloba, a tako i čitavog sustava kretanja čovjeka. Na ovaj se način očekuje utvrditi utjecaj dominantne strane na svojstva sustava kretanja čovjeka, te razliku spram druge strane tijela.

U radu je potrebno:

- Prikazati etiologiju i posljedice poremećaja biomehaničkih pokazatelja utvrđenih spuštanjem niz stepenice;
- Raspraviti razliku analize hoda (engl. gait analysis) spram analize spuštanja niz stepenice;
- Utvrditi metodu provedbe biomehaničke analize pri spuštanju niz stepenice, te navesti ograničenja i uvjete provedbe;
- Provesti biomehaničku analizu pri spuštanju niz stepenice;
- Raspraviti dobivene rezultate i ukazati na pokazatelje za koje se može utvrditi uzročno-posljedična veza s razlikama među stranama tijela čovjeka.

Opseg biomehaničke analize dogovoriti tijekom izrade rada. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2023.

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Aleksandar Sušić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. ETIOLOGIJA I POSLJEDICE BIOMEHANIČKIH POREMEĆAJA PRI SPUŠTANJU NIZ STEPENICE.....	2
2.1. Etiologija.....	2
2.2. Posljedice	2
3. ANALIZA HODA (ENGL. GAIT ANALYSIS) I ANALIZA SPUŠTANJA NIZ STEPENICE	4
3.1. Analiza hoda	4
3.2. Analiza hoda po stepenicama.....	5
3.3. Razlike između analize hoda i analize spuštanja niz stepenice.....	8
4. METODA PROVEDBE BIOMEHANIČKE ANALIZE PRI SPUŠTANJU NIZ STEPENICE	9
4.1. Analitičke metode i alati	9
4.2. Pedobarografska platforma	9
5. BIOMEHANIČKA ANALIZA	11
5.1. Ispitanici.....	11
5.2. Postupak mjerenja	11
5.3. Rezultati	12
5.3.1. Penjanje stepenicama – odraz	12
5.3.2. Prihvat na nogu tijekom spuštanja niz stepenice	18
5.3.3. Penjanje stepenicama – iskorak na stepenicu	24
5.3.4. Normalan hod.....	30
5.4. Rasprava.....	37
6. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA.....	43

POPIS SLIKA

Slika 1.	Ciklus hoda [6]	4
Slika 2.	A) Ciklus penjanja uz stepenice, B) ciklus spuštanja niz stepenice [8]	6
Slika 3.	Prikaz penjanja i spuštanja stepenicama [9]	7
Slika 4.	Platforma Mobile Mat [12]	10
Slika 5.	Prikaz postupka mjerenja	11
Slika 6.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (peta lijeve noge)	13
Slika 7.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (prsti lijeve noge)	13
Slika 8.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) pri odrazu kod penjanja uz stepenice (lijeva noga)	14
Slika 9.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (peta lijeve noge)	14
Slika 10.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (prsti lijeve noge)	15
Slika 11.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) pri odrazu kod penjanja uz stepenice	15
Slika 12.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (peta desno noge)	16
Slika 13.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (prsti desno noge)	16
Slika 14.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) pri odrazu kod penjanja uz stepenice (desna noga)	17
Slika 15.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (peta desne noge)	17
Slika 16.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (prsti desne noge)	18
Slika 17.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) pri odrazu kod penjanja uz stepenice	18
Slika 18.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (peta lijeve noge)	19
Slika 19.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (prsti lijeve noge)	19
Slika 20.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) kod prihvata na lijevu nogu tijekom spuštanja niz stepenice	20
Slika 21.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (peta lijeve noge)	20
Slika 22.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (prsti lijeve noge)	21
Slika 23.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) kod prihvata na nogu tijekom spuštanja niz stepenice	21
Slika 24.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (peta desno noge)	22
Slika 25.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (prsti desno noge)	22
Slika 26.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) kod prihvata na desnu nogu tijekom spuštanja niz stepenice	23

Slika 27.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (peta desne noge)	23
Slika 28.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (prsti desne noge).....	24
Slika 29.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) kod prihvata na nogu tijekom spuštanja niz stepenice	24
Slika 30.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (peta lijeve noge)	25
Slika 31.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (prsti lijeve noge).....	25
Slika 32.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) pri iskoraku kod penjanje uz stepenice (na lijevoj nozi)	26
Slika 33.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (peta lijeve noge)	26
Slika 34.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (prsti lijeve noge).....	27
Slika 35.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) kod iskoraka pri penjanju uz stepenice.....	27
Slika 36.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (peta desne noge)	28
Slika 37.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (prsti desne noge)	28
Slika 38.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) pri iskoraku kod penjanje uz stepenice (na desnoj nozi)	29
Slika 39.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (peta desne noge).....	29
Slika 40.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (prsti desne noge)	30
Slika 41.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) kod iskoraka pri penjanju uz stepenice.....	30
Slika 42.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (peta lijeve noge).....	31
Slika 43.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (prsti lijeve noge).....	31
Slika 44.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) kod normalnog hoda na lijevoj nozi	32
Slika 45.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (peta lijeve noge)	32
Slika 46.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (prsti lijeve noge)	33
Slika 47.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) kod normalnog hoda	33
Slika 48.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (peta desne noge).....	34
Slika 49.	Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (prsti desne noge).....	34
Slika 50.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) kod normalnog hoda na desnoj nozi.....	35
Slika 51.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (peta desne noge).....	35

Slika 52.	Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (prsti desne noge).....	36
Slika 53.	Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) kod normalnog hoda.....	36
Slika 54.	Dijagram usporedbe najvećih sila na petu lijeve i desne noge.....	37
Slika 55.	Usporedba najvećih sila na prstima lijeve i desne noge.....	38
Slika 56.	Usporedba najvećih pritisaka na petu.....	39
Slika 57.	Usporedba najvećih pritisaka na prste.....	39

POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled mišića [9]..... 7
Tablica 2. Karakteristike uređaja *Tekscan Mobile Mat*..... 10

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
b	mm	Širina <i>Mobile Mat</i> uređaja
b _s	mm	Širina senzorskog područja <i>Mobile Mat</i> uređaja
h	mm	Visina <i>Mobile Mat</i> uređaja
h _s	mm	Visina senzorskog područja <i>Mobile Mat</i> uređaja
l	mm	Duljina <i>Mobile Mat</i> uređaja
l _s	mm	Duljina senzorskog područja <i>Mobile Mat</i> uređaja

SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je istražiti biomehaničku analizu pri spuštanju niz stepenice s naglaskom na individualni pristup, kako bi se doprinijelo boljem razumijevanju poremećaja i asimetrija između lijeve i desne strane pojedinca te smanjenju rizika od ozljeda. Ovaj rad analizira etiologiju i posljedice poremećaja biomehaničkih pokazatelja pri spuštanju niz stepenice te uspoređuje analizu hoda s analizom spuštanja niz stepenice. Metodološki pristup uključuje mjerenje pedobarografskom platformom, osmišljeno kao individualni nalaz pojedinca, koji služi za usporedbu biomehaničkih parametara lijeve i desne strane u različitim načinima kretanja.

Poremećaji u hodu mogu uzrokovati ozbiljne posljedice poput padova, ozljeda i smanjenja pokretljivosti, što bitno narušava kvalitetu života. Biomehanički, spuštanju niz stepenice razlikuje se od hodanja po ravnoj površini, pri čemu spuštanje zahtijeva veći napor donjih ekstremiteta i nosi veći rizik od ozljeda. Ovi problemi zahtijevaju biomehaničku analizu kako bi se identificirale razlike između lijeve i desne strane kod različitih načina kretanja, uzimajući u obzir individualne karakteristike i ograničenja ispitanika.

Dobiveni rezultati ukazuju na značajne varijacije u silama i pritiscima između različitih faza pokreta, poput hoda, odraza, iskoraka i prihvata. Najveće sile i pritisci evidentirani su u fazama koje zahtijevaju nagle promjene brzine i smjera, kao što su odraz i priхват. Identificirane biomehaničke asimetrije, poput povećanih sila na lijevoj nozi u pojedinim fazama, mogu ukazivati na funkcionalne razlike u snazi, stabilnosti ili pokretljivosti između nogu te na moguće nedostatke mjerenja kao što je nejednaka brzina i tempo izvođenja kretnji.

Ovakav tip analize pruža vrijedan doprinos ne samo za optimizaciju dizajna medicinskih pomagala nego i za širi konstruktivni pristup u strojarstvu, gdje se biomehanika ljudskog tijela sve više koristi kao osnova za inovacije u dizajnu proizvoda koji su usmjereni na individualno poboljšanje kvalitete života pojedinca.

Ključne riječi: pedobarografska platforma, kretanje, tjelesna asimetrija, gait analysis

SUMMARY

This thesis aims to investigate the biomechanical analysis of descending stairs with a focus on an individualized approach to contribute to a better understanding of disorders and asymmetries between the left and right sides of an individual and to reduce the risk of injuries. This work analyzes the etiology and consequences of biomechanical disorders observed during stair descent and compares gait analysis with stair descent analysis. The methodological approach includes measurement using a pedobarographic platform, designed as an individual assessment, which serves to compare biomechanical parameters between the left and right sides in different movement scenarios.

Gait disorders can lead to serious consequences such as falls, injuries, and decreased mobility, significantly impairing quality of life. Biomechanically, descending stairs differs from walking on a flat surface, as descending requires greater effort from the lower extremities and carries a higher risk of injury. These issues necessitate a biomechanical analysis to identify differences between the left and right sides during various types of movement, considering the individual characteristics and limitations of the participant.

The results indicate significant variations in forces and pressures across different movement phases, such as walking, push-off, step, and landing. The highest forces and pressures were observed during phases requiring rapid changes in speed and direction, such as push-off and landing. Identified biomechanical asymmetries, such as increased forces on the left leg during certain phases, may point to functional differences in strength, stability, or mobility between the legs and possible measurement limitations, such as unequal speed and tempo of movement execution.

This type of analysis provides valuable contributions not only for optimizing the design of medical aids but also for a broader constructive approach in engineering, where human biomechanics is increasingly used as a basis for innovations in product design aimed at individually improving the quality of life.

Key words: pedobarographic platform, movement, body asymmetry, gait analysis

1. UVOD

Hodanje je proces aktivnog pomicanja tijela izmjeničnim pokretima nogu, što obično dovodi do premještanja tijela s jedne lokacije na drugu (lokomocija) [1]. Ciklus hoda opisuje ciklički obrazac kretanja koji se javlja tijekom hodanja. Jedan ciklus hoda počinje kada peta jedne noge dotakne tlo i završava kada ta ista peta ponovno dotakne tlo. Hodanje zahtijeva pravilno funkcioniranje nekoliko tjelesnih sustava, uključujući mišićno-koštani, živčani, kardiovaskularni i respiratorni sustav. Ovi sustavi omogućuju ravnotežu, pokretljivost i stabilnost, kao i napredne kognitivne sposobnosti i kontrolu. Poremećaji u funkciji hoda mogu uzrokovati padove, ozljede, smanjenje pokretljivosti i osobne slobode te značajno pogoršanje kvalitete života [2].

Kretanje pri uspinjanju i silasku, s mehaničkog stajališta, značajno se razlikuje od hodanja po ravnoj površini i zahtijeva veliki napor mišića nogu. To je zbog toga što se težište tijela pomiče gore i dolje. Osim toga, tijekom uspinjanja, moramo podići jednu nogu više od svake stepenice. Stoga se pretpostavlja da, budući da je vrijeme potpore duže tijekom uspinjanja i silaska niz stepenice nego tijekom hodanja po ravnoj površini, velika opterećenja padaju na nogu koja služi kao potpora i povećava se nestabilnost držanja [3].

U ovom završnom radu prikazati će se etiologija i posljedice biomehaničkih pokazatelja utvrđenih spuštanjem niz stepenice te će se raspraviti razlika analize hoda i analize spuštanja niz stepenice. Sukladno tome cilj ovog završnog rada je prikazati biomehaničku analizu pri spuštanju niz stepenice.

2. ETIOLOGIJA I POSLJEDICE BIOMEHANIČKIH POREMEĆAJA PRI SPUŠTANJU NIZ STEPENICE

2.1. Etiologija

Etiologija biomehaničkih poremećaja pri spuštanju niz stepenice odnosi se na uzroke i faktore koji dovode do nepravilnosti ili disfunkcija u biomehničkom obrascu kretanja tijekom ove aktivnosti. Ovi poremećaji mogu nastati iz različitih razloga. Mišićna slabost, osobito u kvadricepsima, gluteusima i mišićima potkoljenice, može otežati kontrolu spuštanja tijela niz stepenice, što može dovesti do nepravilnog kretanja i povećanog rizika od ozljeda. Oštećenja zglobova, kao što su artritis ili ozljede koljena i gležnjeva, mogu uzrokovati bol i smanjen opseg pokreta, što utječe na biomehničke parametre tijekom spuštanja niz stepenice. Neravnoteža, koja može biti uzrokovana neurološkim poremećajima ili vestibularnim disfunkcijama, može otežati kontrolu kretanja i stabilnost. Neuromuskularni poremećaji, poput multiple skleroze ili Parkinsonove bolesti, mogu ometati koordinaciju i kontrolu mišića, rezultirajući nepravilnim obrascima hodanja. Biomehnički nedostaci, kao što su različite dužine nogu, ravna stopala ili deformacije zglobova, također mogu utjecati na biomehaniku kretanja i uzrokovati poremećaje pri spuštanju niz stepenice. S godinama, smanjenje mišićne mase i snage, kao i pogoršanje ravnoteže i koordinacije, mogu dovesti do biomehničkih poremećaja pri ovoj aktivnosti. Razumijevanje etiologije ovih poremećaja važno je za dijagnostiku i liječenje, kao i za razvoj preventivnih mjera koje mogu poboljšati sigurnost i učinkovitost kretanja niz stepenice [4].

2.2. Posljedice

Poremećaji biomehničkih pokazatelja pri spuštanju niz stepenice mogu imati različite posljedice koje utječu na fizičko zdravlje i kvalitetu života pojedinca. Prvo, povećan je rizik od ozljeda, poput uganuća gležnja, kontuzija ili fraktura, zbog nespretnih pokreta i loše biomehanike koja uzrokuje nepredviđena opterećenja na zglobovima i kostima. Osim toga, poremećaji u kretanju mogu uzrokovati bol u donjim ekstremitetima, uključujući koljena, gležnjeve i kukove, a dugotrajna izloženost ovim bolovima može dovesti do kroničnih stanja poput artritisa ili sindroma patelofemoralne boli. Problemi u biomehanici također mogu negativno utjecati na sposobnost održavanja ravnoteže, što povećava rizik od padova, osobito kod starijih osoba, smanjujući njihovu sposobnost samostalnog kretanja i obavljanja svakodnevnih aktivnosti. Poremećaji pri spuštanju stepenicama mogu uzrokovati brži umor i smanjenje izdržljivosti zbog neučinkovitog korištenja mišića i povećanog opterećenja, što otežava aktivnosti koje uključuju penjanje ili spuštanje stepenica. Također, nepravilno kretanje

može dovesti do povećanog stresa na zglobove, pogoršavajući postojeće probleme poput osteoartritisa i ubrzavajući degenerativne promjene. Dugoročno, ovo može doprinijeti razvoju kroničnih stanja poput sindroma prenaprezanja mišića ili kroničnih bolova u leđima, značajno utječući na kvalitetu života i svakodnevnu funkcionalnost. Na kraju, poremećaji u biomehanici mogu pogoršati posturalnu kontrolu, što može dovesti do lošeg držanja tijela i povećanog rizika od povreda uzrokovanih nepravilnim držanjem. Razumijevanje ovih posljedica ključno je za razvoj učinkovitih preventivnih i rehabilitacijskih strategija koje mogu pomoći u smanjenju rizika i poboljšanju funkcionalnosti kod osoba koje se suočavaju s poremećajima u biomehanici pri spuštanju niz stepenice.

3. ANALIZA HODA (ENGL. GAIT ANALYSIS) I ANALIZA SPUŠTANJA NIZ STEPENICE

Usporedba i analiza hodanja i spuštanja niz stepenice ključna je zbog različitih biomehaničkih izazova koje ove aktivnosti predstavljaju. Hodanje je obično stabilnije i manje zahtjevno, jer se tijelo kreće na ravnim površinama, što omogućuje procjenu opće funkcionalne sposobnosti i napretka u rehabilitaciji. S druge strane, spuštanje niz stepenice postavlja dodatne biomehaničke izazove zbog promjene nagiba i dinamike, što može povećati rizik od ozljeda i zahtijeva specifične strategije kontrole i ravnoteže.

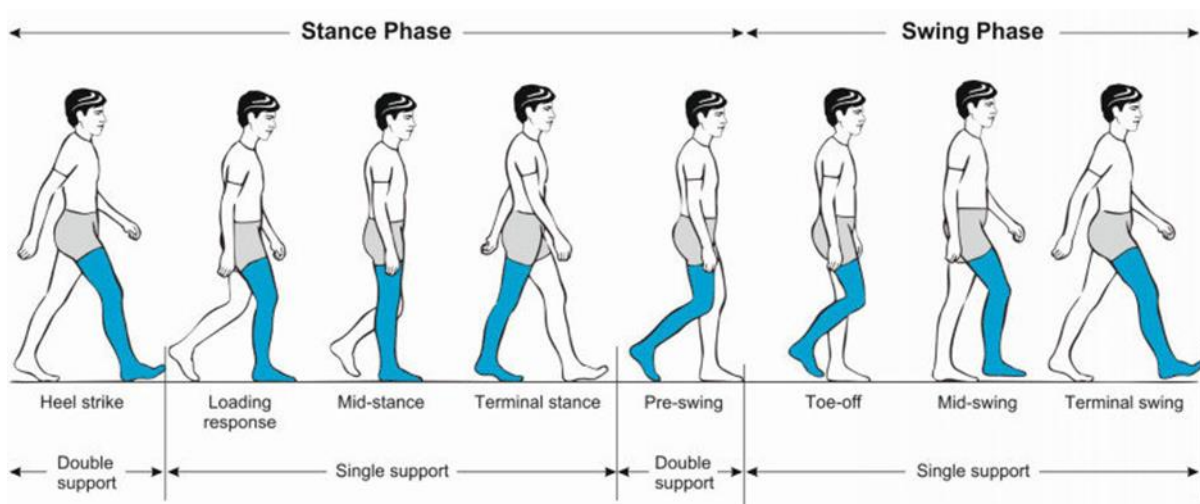
U daljnjem djelu teksta biti će prikazana analiza hoda i spuštanja niz stepenice kroz cikluse kao i razlika između navedenih analiza.

3.1. Analiza hoda

Pojam „analiza hoda“ odnosi se na znanstveno istraživanje kretanja životinja, osobito ljudskog kretanja. Utvrđivanje funkcionalnosti hodanja, nepravilnosti i klasifikacija glavni su ciljevi analize hodanja kako bi se omogućilo bolje liječenje za nepokretne pacijente te pružanje poboljšanja hodanja za vojne ili hitne situacije [5].

Jedan ciklus hoda započinje kada peta jedne noge udari o tlo i završava kada ta ista peta ponovno dotakne tlo. Ciklus hodanja dijeli se na dvije faze koje su dalje podijeljene na pod-faze, Slika 1.:

- 1) period oslonca objema nogama (engl. stance phase),
- 2) period oslonca jednom nogom (engl. swing phase).



Slika 1. Ciklus hoda [6]

Period oslonca objema nogama je razdoblje u ciklusu hoda kada je stopalo na tlu i nosi težinu tijela. Točnije, može se opisati kao razdoblje između trenutka kada peta stopala dodirne tlo (udaranje pete) i trenutka kada se prsti podignu s tla (odvajanje prstiju). Faza stajanja sastoji se od pet podfaza. Prva podfaza je udaranje pete (početni odgovor, kontaktni odgovor ili prihvaćanje težine), kada peta stopala prvi put dodiruje tlo i zahtijeva da težinu tijela prihvati noga koja dodiruje tlo. Druga podfaza je oslonac cijelog stopala (odgovor na opterećenje), kada se stopalo kotrlja naprijed dok cijela plantarna površina ne bude u kontaktu s tlom. Srednja faza stajanja počinje kada se težina tijela gura naprijed, izravno iznad donjeg ekstremiteta, tako da je veliki trohanter bedrene kosti izravno iznad sredine stopala, pri čemu se cijela težina tijela balansira na jednoj nozi. Sljedeća podfaza je podizanje pete, kada se peta podiže s tla i počinjemo prebacivati težinu tijela na suprotnu nogu. Zadnja podfaza je oslonac prstiju, kada prsti pritišću tlo dok se gležanj plantarno savija, stvarajući potisak prema naprijed.

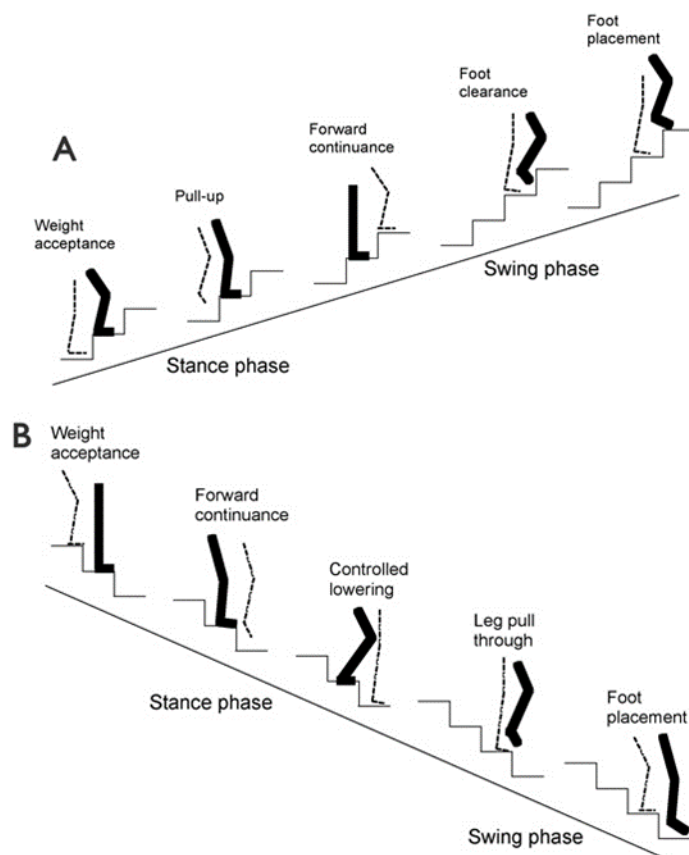
Period zamaha druga je faza hoda kada je stopalo slobodno za kretanje naprijed. Opisuje se kao razdoblje između oslonca prstiju i udara pete. Postoje tri podfaze faze zamaha. Rana faza zamaha (faza ubrzanja) prva je podfaza tijekom koje se stopalo podiže s tla. Gležanj se dorzalno savija, a koljeno savija tako da se stopalo i prsti mogu odvojiti od tla. Kuk se savija kako bi nogu pomaknuo naprijed, postavljajući je izravno ispod tijela. Srednja faza zamaha druga je podfaza kada noga koja ne nosi težinu prolazi izravno ispod tijela i pored noge koja nosi težinu. Istodobno, trup se pomiče naprijed tako da je težina tijela izravno iznad noge koja nosi težinu. Kasna faza zamaha (faza usporavanja) posljednja je podfaza. Stopalo se pomiče u položaj ispred tijela, koljeno se izravnava i zamah usporava. Donji ud sada je spreman za udar pete i priprema se za prihvaćanje prijenosa težine tijela, za početak sljedeće faze stajanja.

Kako se noge kreću, tako se kreće i ostatak tijela. Zdjelica se rotira naprijed zajedno s nogom u zamahu, dok se toraks i kralježnica rotiraju u suprotnom smjeru kako bi održali ravnotežu. Kontralateralna ruka pomaže u održavanju ravnoteže i potiskivanju, ljuljajući se naprijed u isto vrijeme kada i suprotna noga [2].

3.2. Analiza hoda po stepenicama

Kretanje po stepenicama može se odvijati kroz penjanje uz stepenice i spuštanje niz stepenice, Slika 2. Oba kretanja uključuju fazu zamaha i fazu stajanja u kojima se napredovanje tijela postiže naizmjeničnim pokretima donjih ekstremiteta. Donji ekstremiteti moraju balansirati i nositi glavu, ruke i trup, slično kao kod hoda po ravnom terenu. Moment ekstenzora koljena pri penjanju i spuštanju niz stepenice gotovo je tri puta veći nego kod hodanja po ravnom terenu,

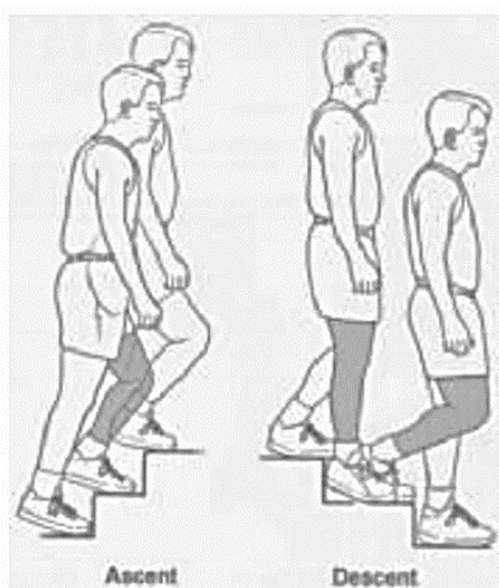
a moment gležnja gotovo je isti u oba hoda. Pri penjanju po stepenicama koljeno ima generativnu ulogu, dok pri hodanju po ravnom terenu ima apsorptivnu. Snage su uglavnom generativne pri penjanju po stepenicama i apsorptivne pri spuštanju za sve zglobove [7].



Slika 2. A) Ciklus penjanja uz stepenice, B) ciklus spuštanja niz stepenice [8]

Ciklus penjanja ili spuštanja počinje s oba stopala na stepenici, a započinje kada se jedno stopalo podigne ili povuče s površine stepenice. U penjanju stepenicama, početna faza, nazvana podizanje noge, završava kada je stopalo sigurno postavljeno na sljedeću stepenicu. U tom trenutku ciklusa započinje podizanje. Ova faza uključuje snažno istežanje noge na sljedećoj stepenici kako bi se tijelo podiglo s prvotne stepenice. Faza završava kada stopalo noge na prvotnoj stepenici dodirne sljedeću stepenicu. Kod spuštanja stepenicama, događaji su slično imenovani, iako su akcije drugačije što se vidi na Slici 3. Penjanje i spuštanje stepenicama imaju slične obrasce kao hodanje i trčanje. Međutim, mišići kuka obično pridonose manje nego mišići koji djeluju na zglobove koljena i gležnja. Pregled mišića koji pridonose penjanju i spuštanju prikazan je u Tablici 1. Spuštanje stepenicama zahtijeva minimalnu aktivnost mišića kuka. Tijekom faze povlačenja noge, aktivni su fleksori kuka, dok se u fazi dodirivanja stopala s površinom stepenice aktiviraju stražnji mišići bedra. Kada noga dođe u kontakt s sljedećom

stepenicom i preuzima težinu tijela, kuk je minimalno angažiran, jer većinu težine ekscentrično apsorbiraju zglobovi koljena i gležnja. Mišići koji djeluju na zglob koljena odgovorni su za generiranje sile tijekom faze guranja naprijed. U završnoj fazi podrške, pri kontroliranom spuštanju, tijelo se spušta na stepenicu prvenstveno zahvaljujući ekscentričnoj aktivnosti mišića oko zgloba koljena, dok je aktivnost ekstenzora kuka minimalna. S druge strane, kod penjanja stepenicama, noga na višoj stepenici obavlja najveći napor kako pri usponu, tako i pri spuštanju. Zglob koljena je aktivniji tijekom penjanja nego pri spuštanju, dok je aktivnost zgloba kuka mala u oba slučaja, gotovo zanemariva pri spuštanju [9].



Slika 3. Prikaz penjanja i spuštanja stepenicama [9]

Tablica 1. Pregled mišića [9]

Hodanje stepenicama		
Mišić	Penjanje	Spuštanje
<i>musculus dorsum pedis</i>	*	
<i>musculus gluteus medius</i>		**
<i>Hamstrings</i> (<i>m. semitendinosus</i> , <i>m. semimembranosus</i> , <i>m. biceps femoris</i>)	*	
<i>musculus iliopsoas</i>	**	
<i>musculus flexor plantares</i>	**	
<i>musculus quadriceps femoris</i>	**	
* Niska aktivnost		
** Umjerena aktivnost		
*** Visoka aktivnost		

3.3. Razlike između analize hoda i analize spuštanja niz stepenice

Kada govorimo o biomehaničkim razlikama između analize hoda i analize pri spuštanju niz stepenice, moramo uzeti u obzir različite aspekte kretanja, opterećenja i prilagodbi tijela koje su specifične za svaku aktivnost.

Kod hodanja, pokreti su relativno fluidni i simetrični, pri čemu obje noge slijede isti obrazac kretanja [2]. S druge strane, spuštanje niz stepenice uključuje nesimetrične i često promjenjive pokrete, pri čemu se posebna pažnja posvećuje kontroli pritiska i ravnoteže dok se noge spuštaju s visine [9]. Kada se prelazi ista udaljenost, spuštanje stepenicama ima više faza koje pomiču središte gravitacije tijela više vertikalno nego tijekom ravnog hodanja. Stoga se može jednostavno smatrati da su parametri vremena hoda duži tijekom spuštanja stepenicama nego tijekom ravnog hodanja zbog ovog dodatnog vertikalnog kretanja [3]. Osim toga, povećanje vremena dvostruke potpore služi za održavanje stabilnosti hodanja. Također, Demura i suradnici [3] ističu kako je vrijeme dvostruke potpore bilo duže tijekom spuštanja stepenicama nego tijekom ravnog hodanja. S obzirom na to da je opterećenje koje tijelo podnosi veće tijekom spuštanja stepenicama nego tijekom ravnog hodanja, spuštanje stepenicama se smatra destabilizirajućim za kretanje [3].

Zaključno, analiza hoda i analiza spuštanja niz stepenice predstavljaju dvije specifične metode biomehaničke analize, svaka sa svojim jedinstvenim fokusom na razumijevanje različitih aspekata kretanja. Iako obje metode koriste slične pristupe za procjenu kretanja, ključne razlike leže u njihovim specifičnostima. Analiza hoda usmjerena je na ravnu površinu i obuhvaća osnovne parametre hodanja, dok analiza spuštanja niz stepenice istražuje specifične prilagodbe tijela prilikom kretanja uz nagib i visinske promjene. Ove razlike se odražavaju u biomehaničkim zahtjevima, prilagodbi na različite površine, rizicima povezanim s različitim tipovima kretanja te u analitičkim metodama koje se primjenjuju.

4. METODA PROVEDBE BIOMEHANIČKE ANALIZE PRI SPUŠTANJU NIZ STEPENICE

4.1. Analitičke metode i alati

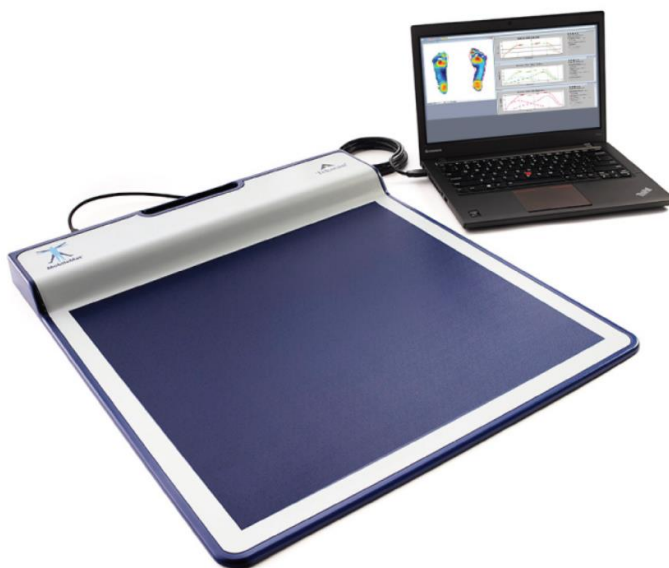
Analiza hoda i spuštanja niz stepenice oslanja se na različite analitičke metode i alate koji omogućuju precizno mjerenje i procjenu tih složenih pokreta. Ove tehnike imaju široku primjenu u područjima kao što su biomehanika, sport, rehabilitacija, ortopedija i neuroznanost. Različite metode analize hoda mogu se široko klasificirati u dvije kategorije: kvalitativne metode i kvantitativne metode.

U kategoriju kvalitativnih metoda spadaju vizualna promatranja, analiza hoda pomoću video zapisa te skale i upitnici, a kvantitativne metode analize hodanja uključuju objektivna mjerenja hodanja uz pomoć različitih alata. Vrste analiza koje spadaju u ovo kategoriju su: kinematička, kinetička i EMG analiza.

Kao metoda provedbe biomehaničke analize pri spuštanju niz stepenice u ovom završnom radu koristit će se kinetička analiza. Primarni cilj navedene metode temelji se na razumijevanju sila uključenih u pokretima zapešća. Tu spadaju ploče za mjerenje sila i sustavi za mjerenje pritiska na stopalu, sustavi za mjerenje plantarnih pritisaka u obući te inercijski mjerni uređaji (IMU) [10]. U sljedećem poglavlju biti će prikazana pedobarografska platforma koja će se koristiti u ovom završnom radu.

4.2. Pedobarografska platforma

Za mjerenje je korištena pedobarografska platforma tvrtke *Tekscan*. Model *Mobile Mat* je lagan, izdržljiv i prijenosan uređaj namijenjen za statičke i dinamičke pedobarografske analize. Ovaj uređaj omogućuje precizno otkrivanje asimetrije u raspodjeli težine po stopalima, dijagnosticiranje i praćenje bolesti poput čira na stopalu ili trna u peti, te praćenje napretka u stabilnosti i ravnoteži. Također, koristi se za detaljnu analizu specifičnih dijelova stopala i u edukativne svrhe kako bi se olakšalo izvođenje terapijskih vježbi za donje ekstremitete. Uređaja se lako i jednostavno povezuje na računalo preko USB-a, što omogućuje lako praćenje rezultata mjerenja. Dimenzije uređaja ($l \times b \times h$) su 636x559x42 milimetra, dok senzorsko područje ($l_s \times b_s \times h_s$) obuhvaća 487x447x7,6 milimetra. *Mobile Mat* platforma ima težinu od 3,5 kilograma što omogućuje ovom uređaju da bude iznimno prenosiv i praktičan za korištenje u različitim okruženjima. Prema preporukama proizvođača, uređaj pruža točne rezultate pri temperaturama zraka između 0 i 35 °C [11]. Slika 4. prikazuje platformu *Mobile Mat*, a Tablica 2. prikazuje karakteristike *Tekscan Mobile Mat* modela korištenog za mjerenje.



Slika 4. Platforma Mobile Mat [12]

Tablica 2. Karakteristike uređaja *Tekscan Mobile Mat*

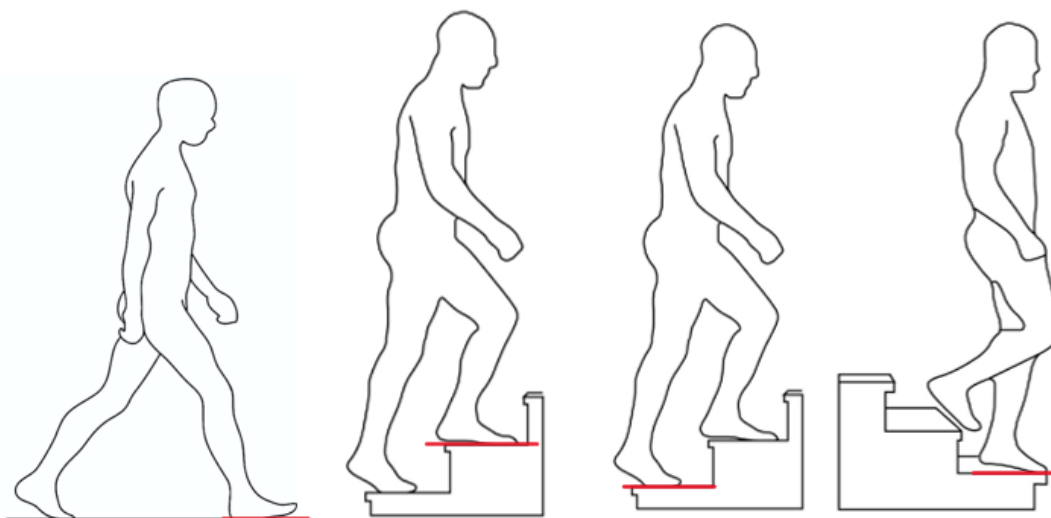
Model	Mjerni raspon [kPa]	Frekvencija skeniranja [Hz]	Broj senzora [cm^2]
Standardni model	345-862	100	1

Prateći softverski paket korišten za mjerenja zove se "FootMat Research" i služi za analizu pritiska, sila i kontaktnih površina. Prije početka mjerenja potrebno je odrediti težinu ispitanika kako bi se definirali ulazni parametri.

5. BIOMEHANIČKA ANALIZA

Eksperimentalni dio ovog završnog rada izvršen je na katedri za biomehaniku i ergonomiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanja su rađena na stepenicama poslovnog centra Petrius pomoću pedobarografske platforme o kojoj je napisano u poglavlju 4.2.

Mjerenja su rađena za različite situacije koje su dio svakodnevnog života pojedinca te obuhvaćaju redom (Slika 5.) normalan hod, iskorak na stepenicu, odraz sa stepenice te prihvat na nogu tijekom spuštanja niz stepenice.



Slika 5. Prikaz postupka mjerenja

5.1. Ispitanici

U mjerenju je ciljano sudjelovao jedan ispitanik (ž – spol, težine $G = 559$ N, visine $h_v = 158$ cm) kako bi se utvrdili specifični individualni pokazatelji, budući da je cilj bio usporedba različitih kretanja tog pojedinca. Kriterij za pristup mjerenju je mogućnost samostalnog hoda po stepenicama bez pomagala. Kriteriji isključenja su upotreba pomagala za hod i prethodne ozljede koje onemogućuju normalan hod.

5.2. Postupak mjerenja

Mjerenje je provedeno u četiri različite situacije, pri čemu su sve situacije prvo odrađene s lijevom nogom, a zatim s desnom nogom. Svaka situacija simulirala je prirodne uvjete kretanja po stepenicama i hodanja po ravnoj površini. Ispitanica je postavljena ispred stepenica, uz platformu za mjerenje. Prije početka svakog mjerenja, ispitanica je bila usmjerena na održavanje prirodnog tempa i pokreta tijekom svih faza. Ispitanica je započela mjerenje tako da je najprije napravila jedan korak nogom suprotno od one koju mjerimo. Nakon tog

inicijalnog koraka, zakoračila je na platformu postavljenu uz prvu stepenicu, tako da je sljedeći pokret tom nogom odraz od platforme za mjerenje i nastavak penjanja uz stepenice kako bi održala prirodni ritam kretanja.

Platforma je bila postavljena kako bi bilježila kontakt stopala, pritisak i sile koje se javljaju pri kontaktu s površinom.

U drugoj situaciji mjerile su se slike i pritisak kod prihvata na nogu tijekom spuštanja niz stepenice. Ispitanica je započela mjerenje s dvije stepenice više kako bi se postigli realniji i prirodniji rezultati. Nakon silaska s tih stepenica, s posljednje stepenice zakoračila je lijevom nogom na mjernu platformu te nastavila hodati još dva koraka po ravnoj površini kako bi se održao prirodan tijek kretanja.

Treća situacija bila je usmjerena na iskorak prilikom penjanja na stepenicu. Ispitanica je započela s dvije stepenice niže te, dolaskom do posljednje stepenice na kojoj je bila postavljena mjernu platformu, napravila iskorak na nju. Nakon toga nastavila je hodati po ravnoj površini kako bi se zadržao što prirodniji ritam kretanja.

Konačno, četvrta situacija odnosila se na hodanje po ravnoj površini. Zbog ograničenog prostora na stubištu, ispitanica je započela kretanje dvije stepenice niže. Kada je stigla do vrha stubišta, napravila je jedan korak te potom zadanom nogom zakoračila na platformu, nakon čega je nastavila hodati po ravnoj površini. Ova situacija je slična trećoj, s tom razlikom što platforma nije bila postavljena na posljednjoj stepenici, već je bila dovoljno udaljena kako bi ispitanica mogla napraviti prirodan korak prije nego što stane na platformu.

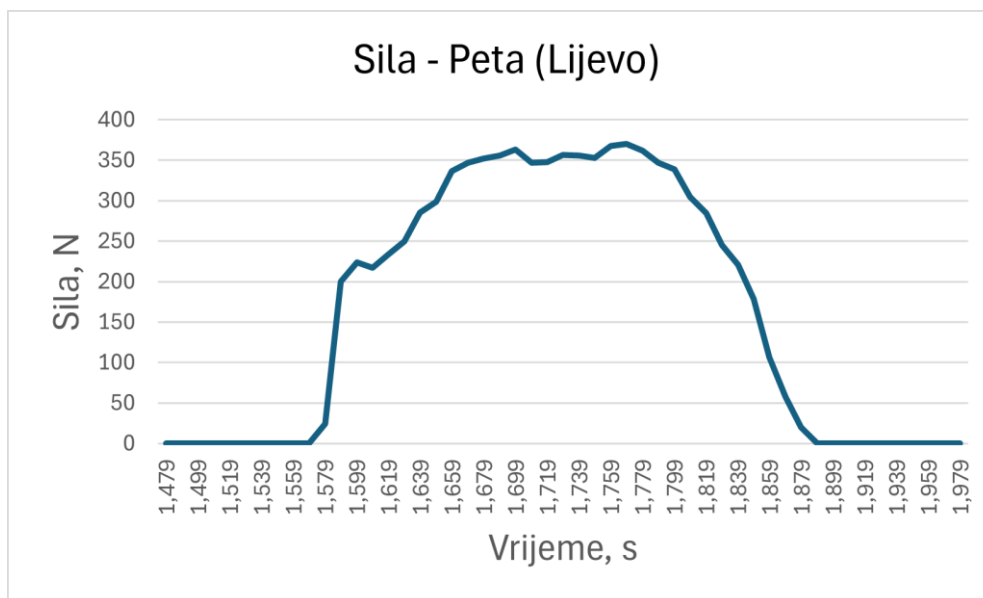
5.3. Rezultati

U sljedećim poglavljima biti će prikazani dijagrami sila i vršnih pritisaka u ovisnosti o vremenu u dvije zone (peta i prsti) te slike s 2D prikazom kontaktnih površina s označenim zonama najvećih vrijednosti u njihovim odgovarajućim *frame*-ovima za te dvije zone.

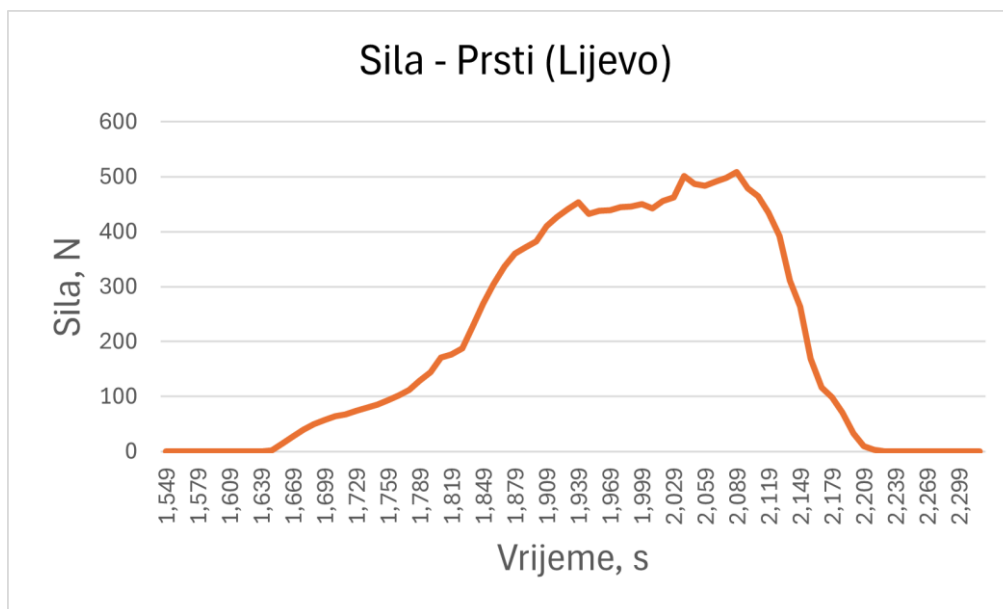
5.3.1. Penjanje stepenicama – odraz

U nastavku su prikazani dijagrami i slike povezane s mjerenjima prilikom odraza, prvo lijevom, a potom desnom nogom. Slika 6. prikazuje dijagram sile na peti u odnosu na vrijeme pri odrazu lijevom nogom, dok slika 7. prikazuje dijagram sile na prstima za isti pokret. Na slici 8. prikazan je 2D prikaz kontaktnih površina s označenim zonama najveće sile na peti i prstima u odgovarajućim *frame*-ovima tijekom odraza pri penjanju uz stepenice.

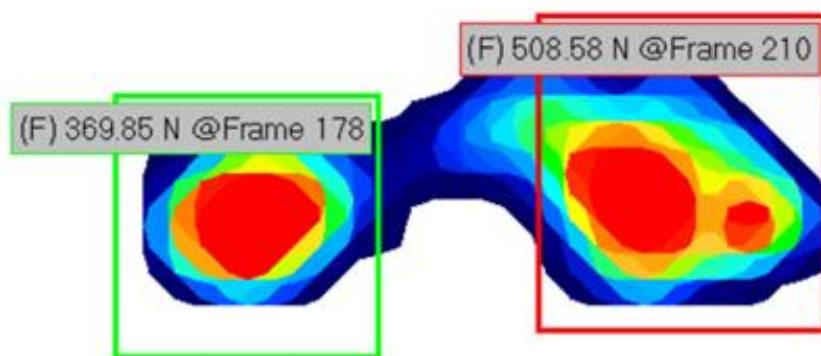
Slike 9. i 10. prikazuju dijagrame pritiska u odnosu na vrijeme pri odrazu lijevom nogom tijekom penjanja uz stepenice, dok slika 11. prikazuje kontaktne površine s označenim zonama najvećeg pritiska na petu i prste u odgovarajućim frame-ovima pri odrazu.



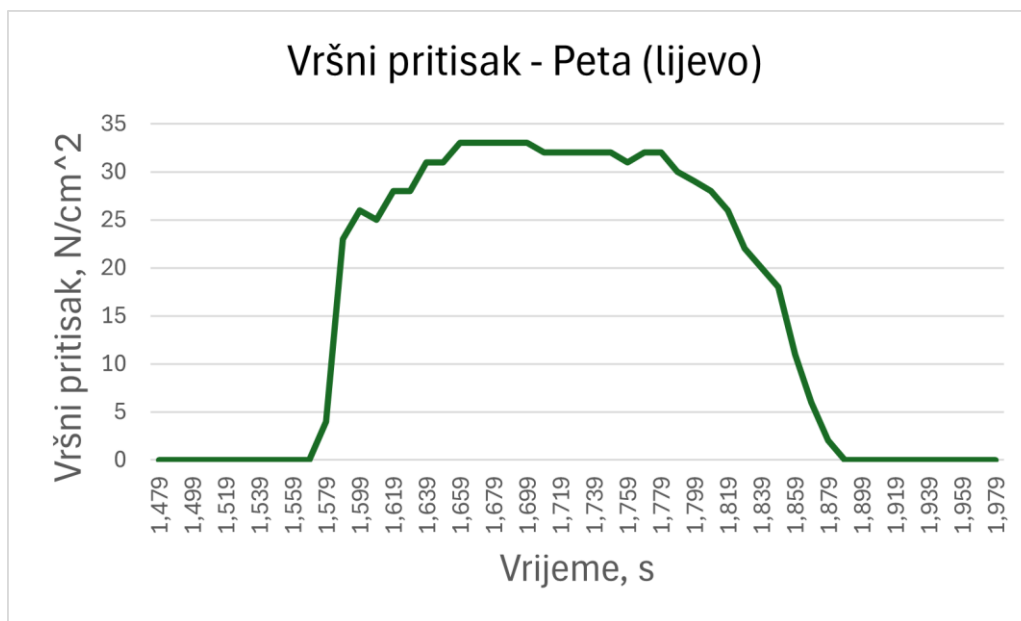
Slika 6. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (peta lijeve noge)



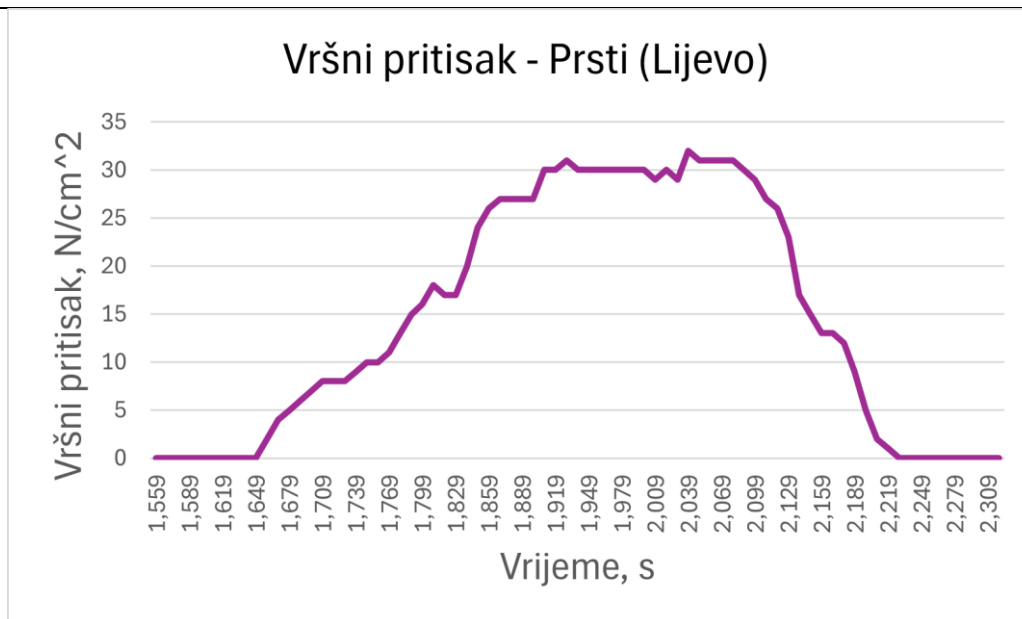
Slika 7. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (prsti lijeve noge)



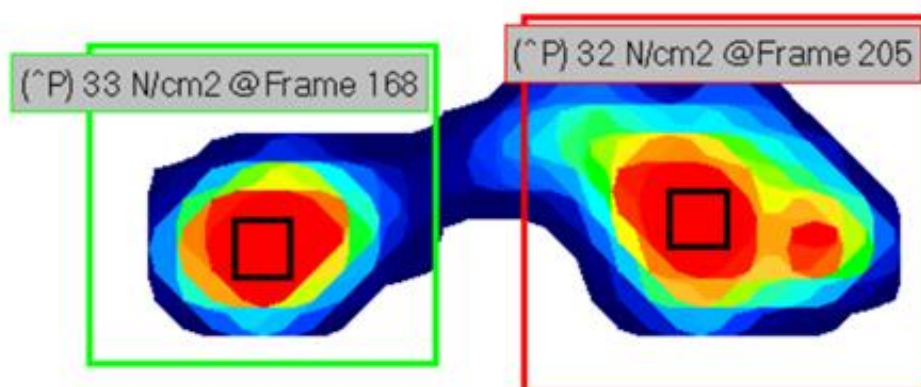
Slika 8. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) pri odrazu kod penjanja uz stepenice (lijeva noga)



Slika 9. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (peta lijeve noge)

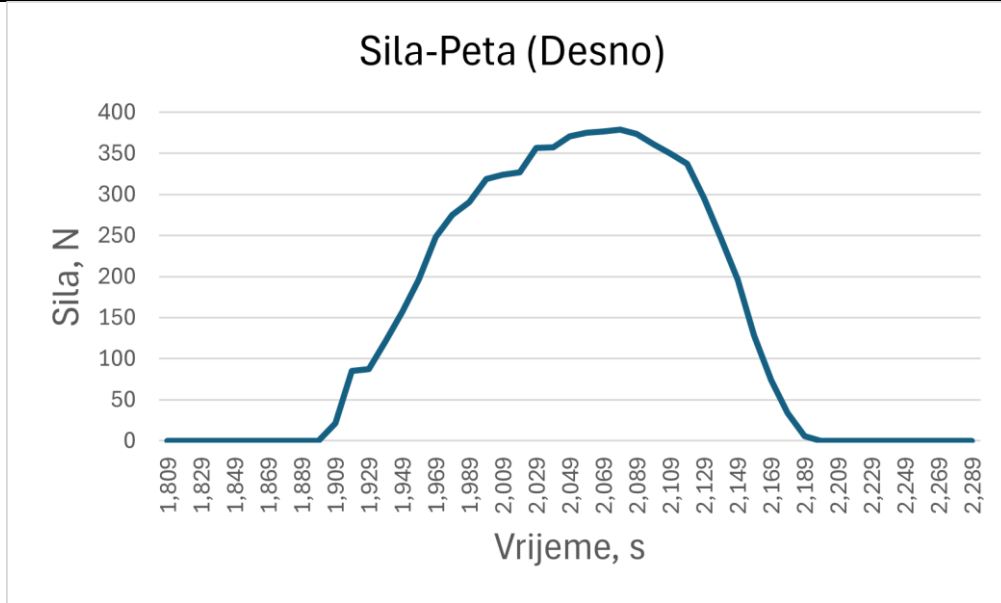


Slika 10. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (prsti lijeve noge)

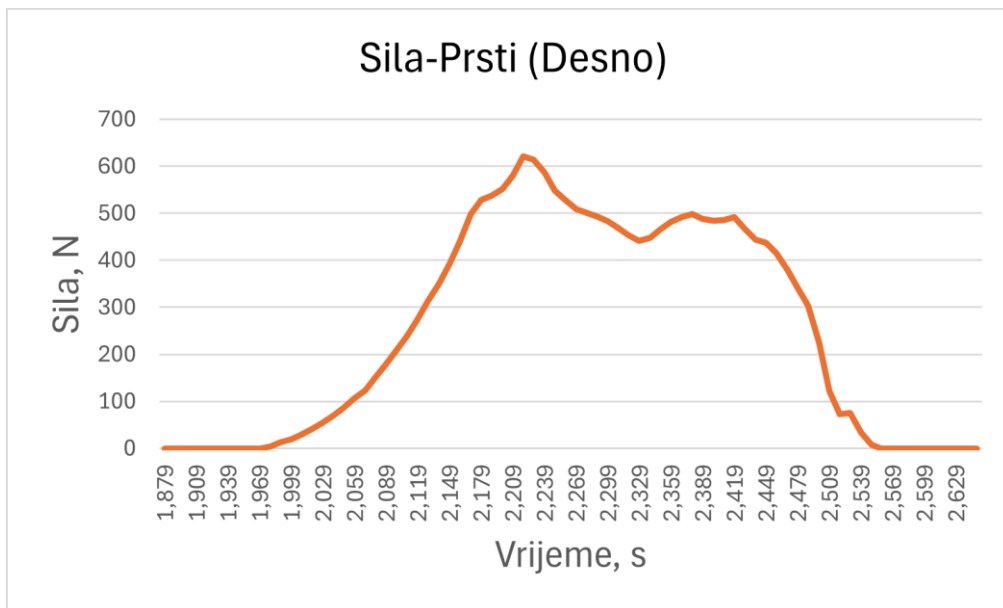


Slika 11. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) pri odrazu kod penjanja uz stepenice

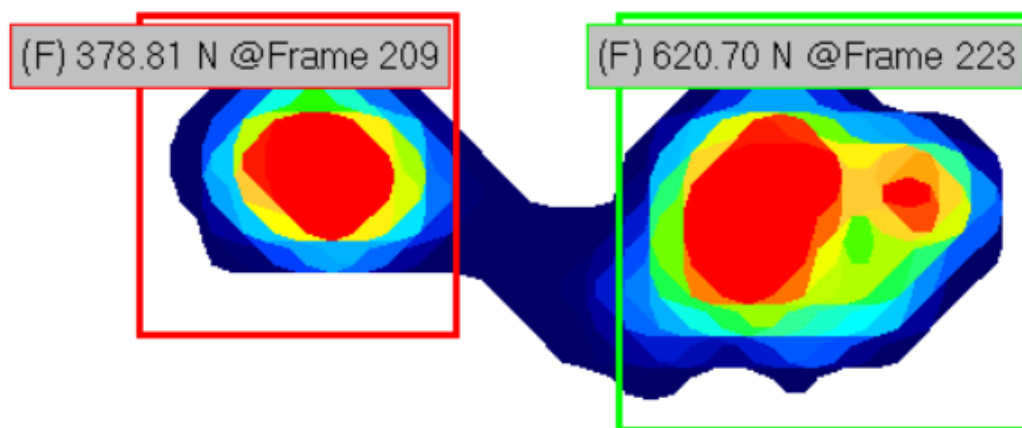
Slika 12. i slika 13. prikazuju dijagrame sila u ovisnosti o vremenu pri odrazu desnom nogom tijekom penjanja uz stepenice, dok slika 14. donosi 2D prikaz kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila na peti i prstima u toj fazi pokreta. Na slikama 15. i 16. prikazani su dijagrami pritiska na petu i prste desne noge u odnosu na vrijeme tijekom odraza pri penjanju uz stepenice. Slika 17. prikazuje 2D prikaz kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska na petu i prste desne noge tijekom odraza.



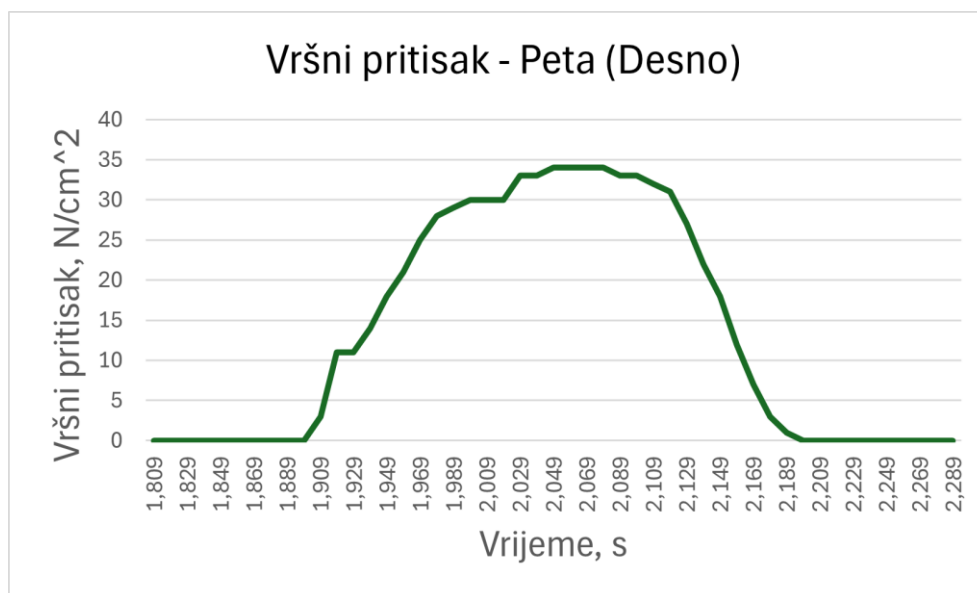
Slika 12. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (peta desno noge)



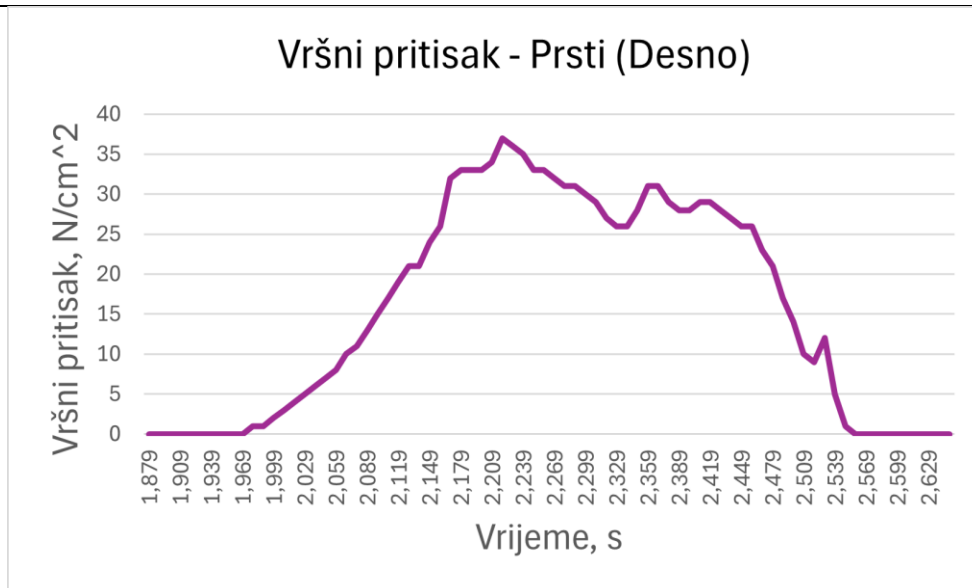
Slika 13. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (prsti desno noge)



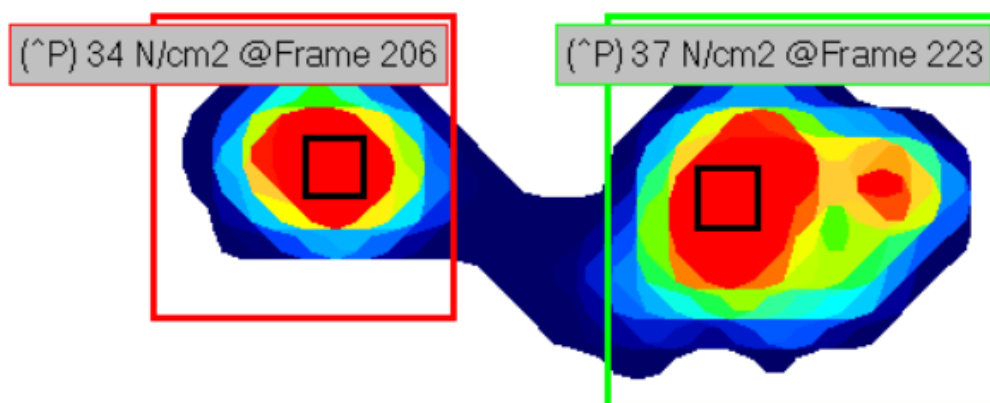
Slika 14. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) pri odrazu kod penjanja uz stepenice (desna noga)



Slika 15. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (peta desne noge)



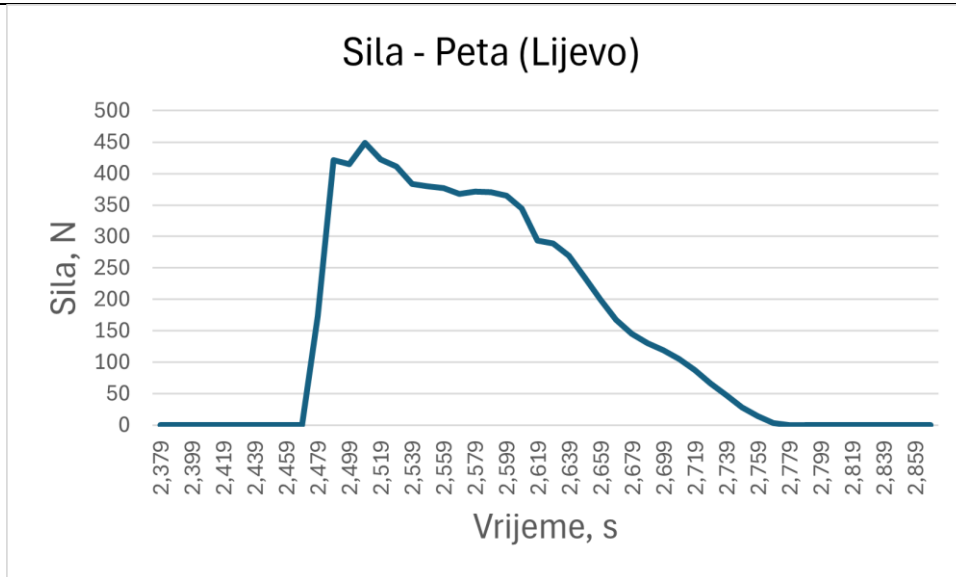
Slika 16. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri odrazu kod penjanja uz stepenice (prsti desne noge)



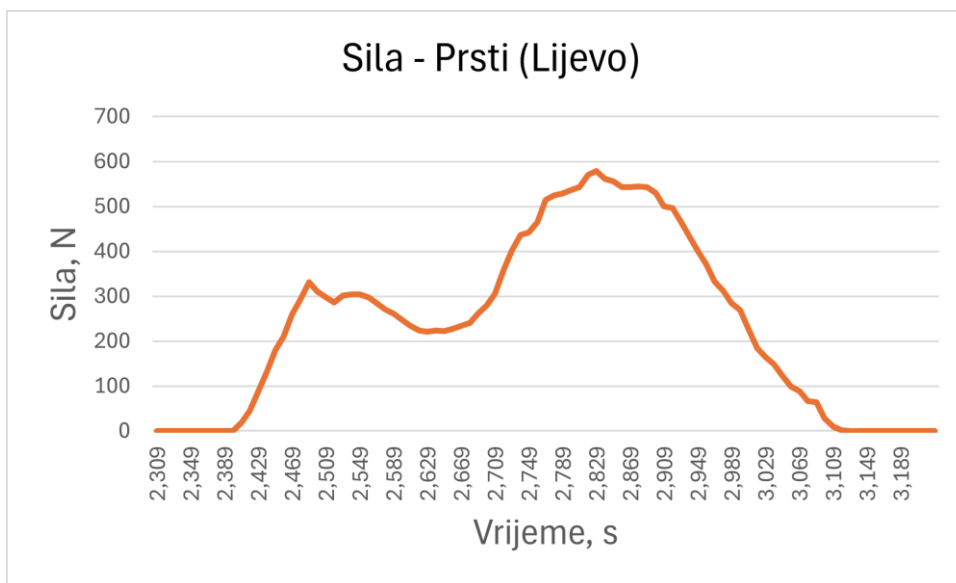
Slika 17. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) pri odrazu kod penjanja uz stepenice

5.3.2. Prihvat na nogu tijekom spuštanja niz stepenice

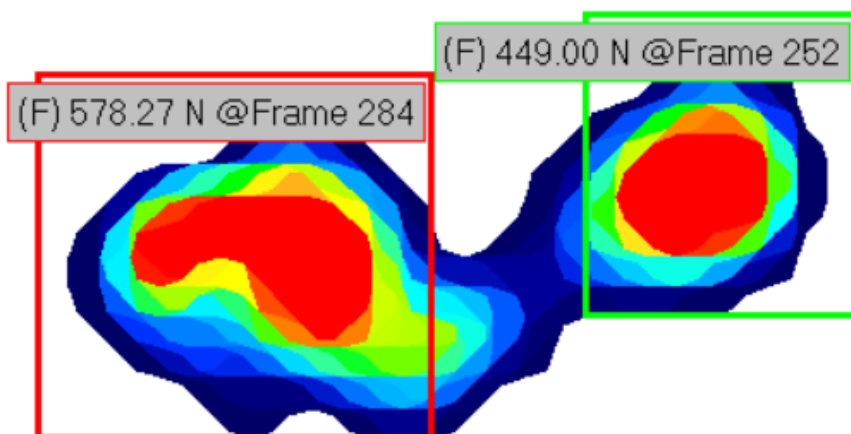
Slike 18. i 19. prikazuju dijagrame sile u odnosu na vrijeme pri prihvatu lijevom nogom tijekom spuštanja niz stepenice, dok slika 20. donosi 2D prikaz kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila na peti i prstima. Slike 21. i 22. prikazuju dijagrame pritiska u odnosu na vrijeme pri prihvatu, a na slici 23. prikazan je 2D prikaz kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska prilikom spuštanja niz stepenice lijevom nogom.



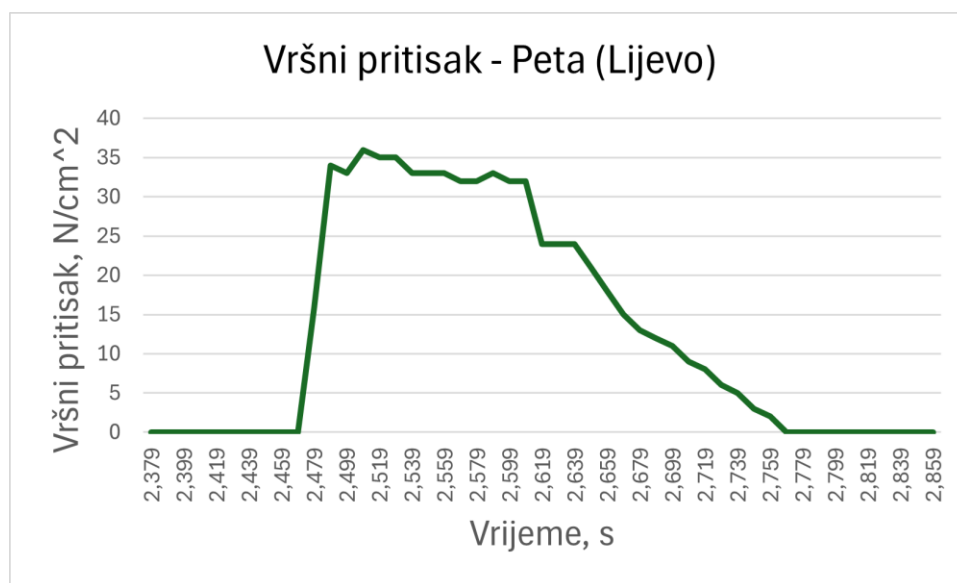
Slika 18. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (peta lijeve noge)



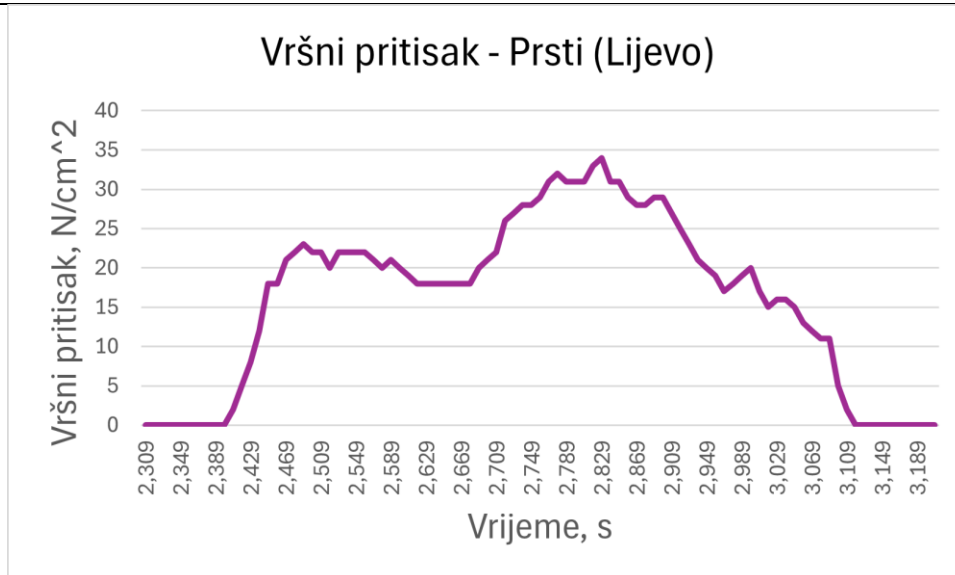
Slika 19. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (prsti lijeve noge)



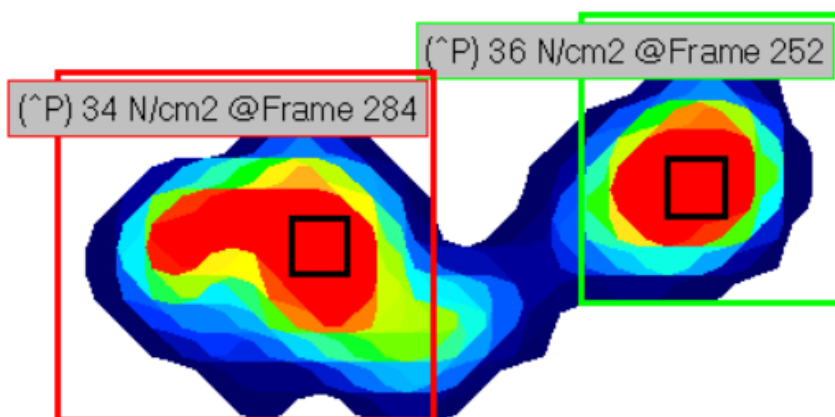
Slika 20. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) kod prihvata na lijevu nogu tijekom spuštanja niz stepenice



Slika 21. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (peta lijeve noge)

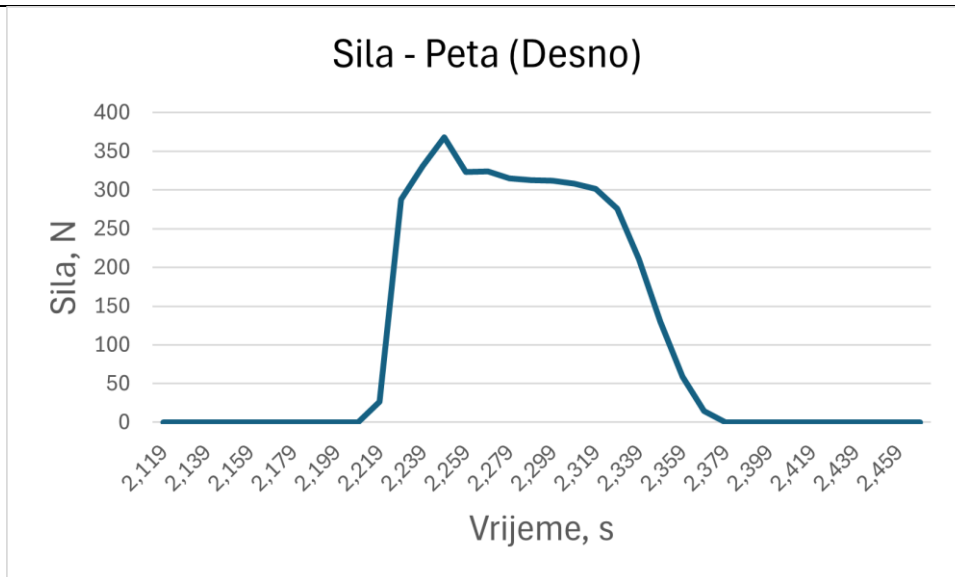


Slika 22. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (prsti lijeve noge)

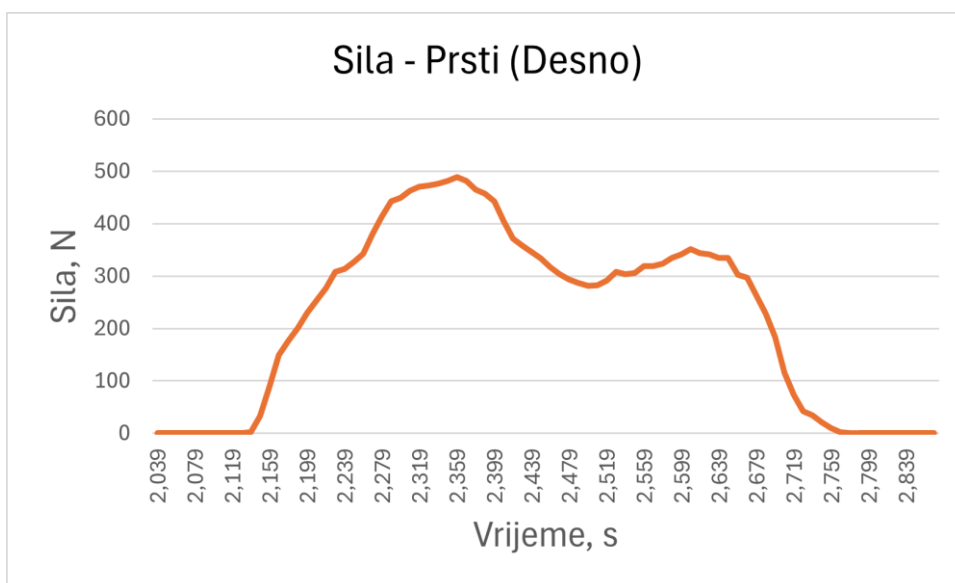


Slika 23. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) kod prihvata na nogu tijekom spuštanja niz stepenice

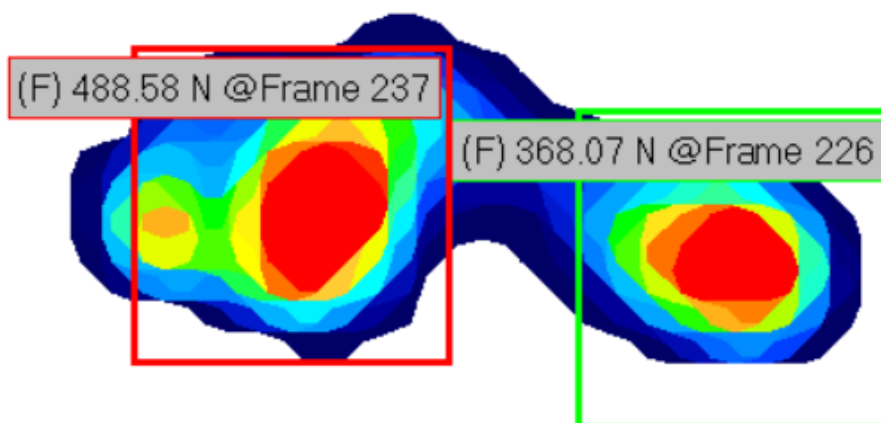
Slike 24. i 25. prikazuju dijagrame sile u odnosu na vrijeme pri prihvatu desnom nogom, dok slika 26. donosi 2D prikaz kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila. Slike 27. i 28. prikazuju dijagrame pritiska u odnosu na vrijeme tijekom prihvata desnom nogom, a slika 29. prikazuje 2D prikaz kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska na desnu nogu prilikom prihvata.



Slika 24. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (peta desno noge)



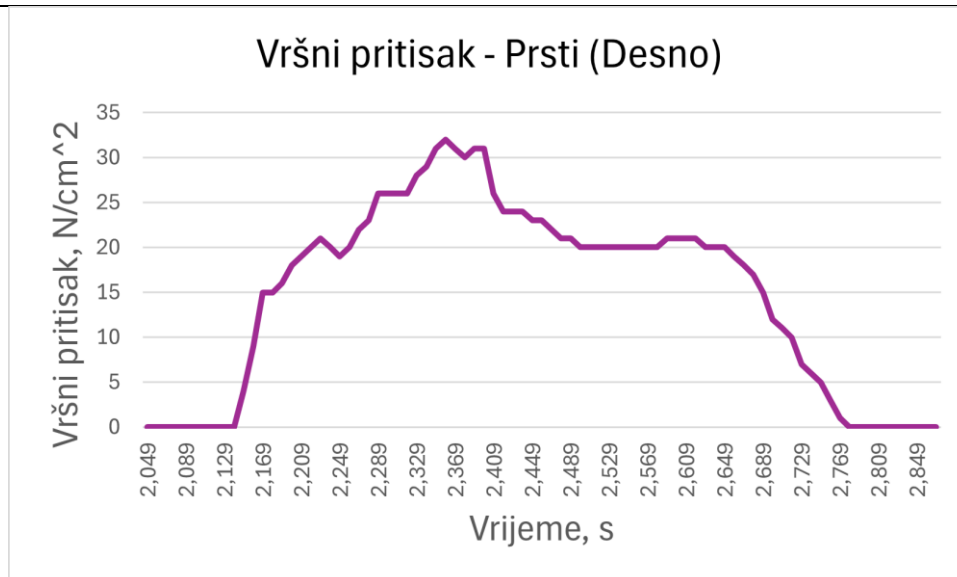
Slika 25. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (prsti desno noge)



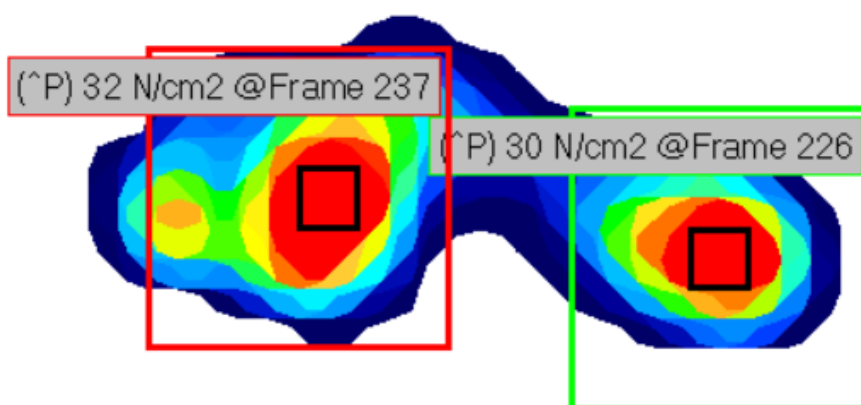
Slika 26. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) kod prihvata na desnu nogu tijekom spuštanja niz stepenice



Slika 27. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri prijehu na nogu kod spuštanja niz stepenice (peta desne noge)



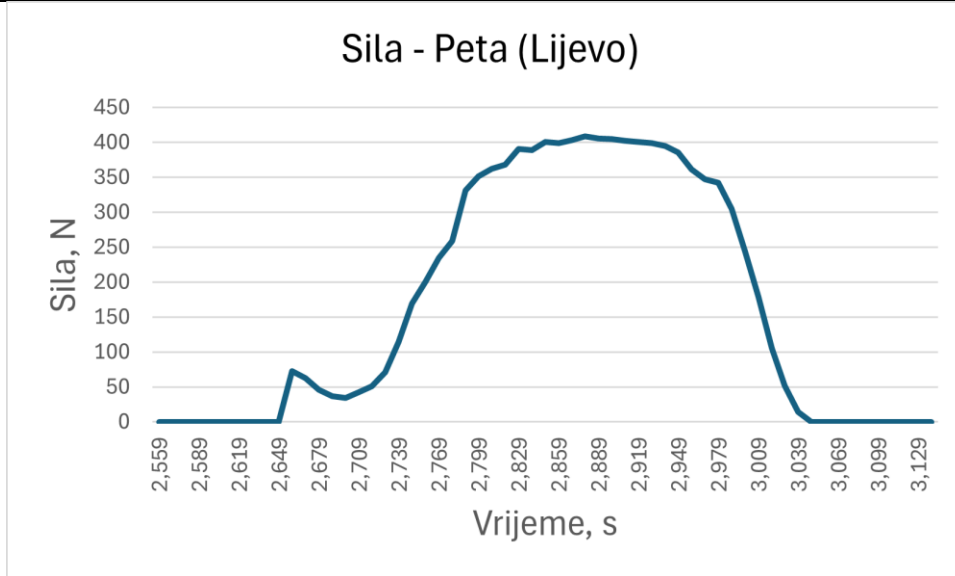
Slika 28. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri prihvatu na nogu kod spuštanja niz stepenice (prsti desne noge)



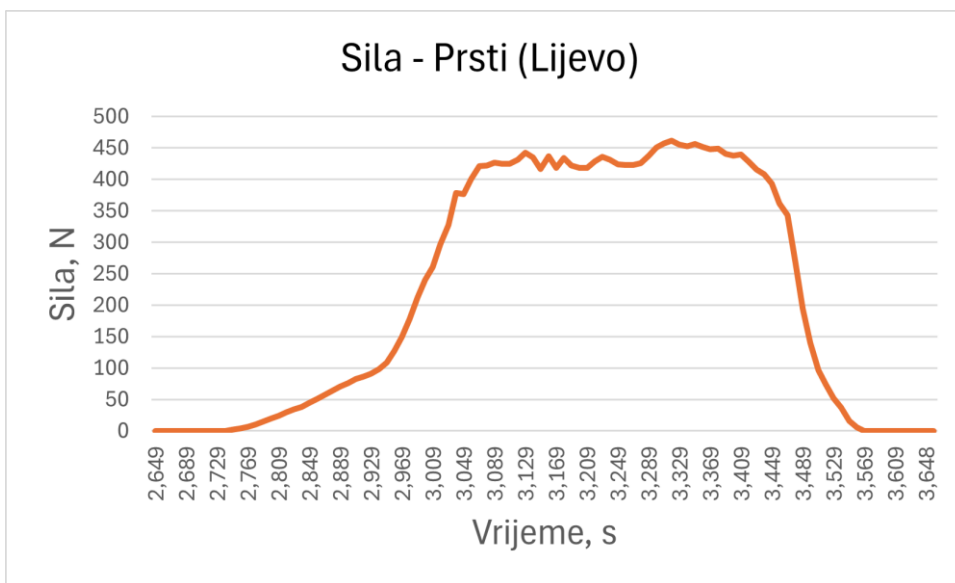
Slika 29. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) kod prihvata na nogu tijekom spuštanja niz stepenice

5.3.3. Penjanje stepenicama – iskorak na stepenicu

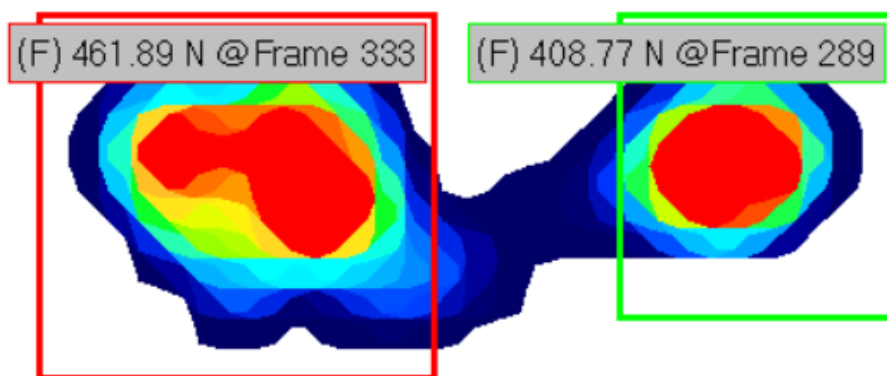
Slike 30. i 31. prikazuju dijagrame sila u odnosu na vrijeme prilikom iskoraka na stepenicu, dok slika 32. donosi 2D prikaz s označenim zonama najvećih sila na peti i prstima lijeve noge tijekom iskoraka. Slike 33. i 34. prikazuju dijagrame pritisaka pri iskoraku lijevom nogom, a slika 35. prikazuje 2D prikaz najvećih pritisaka na petu i prste u tom pokretu..



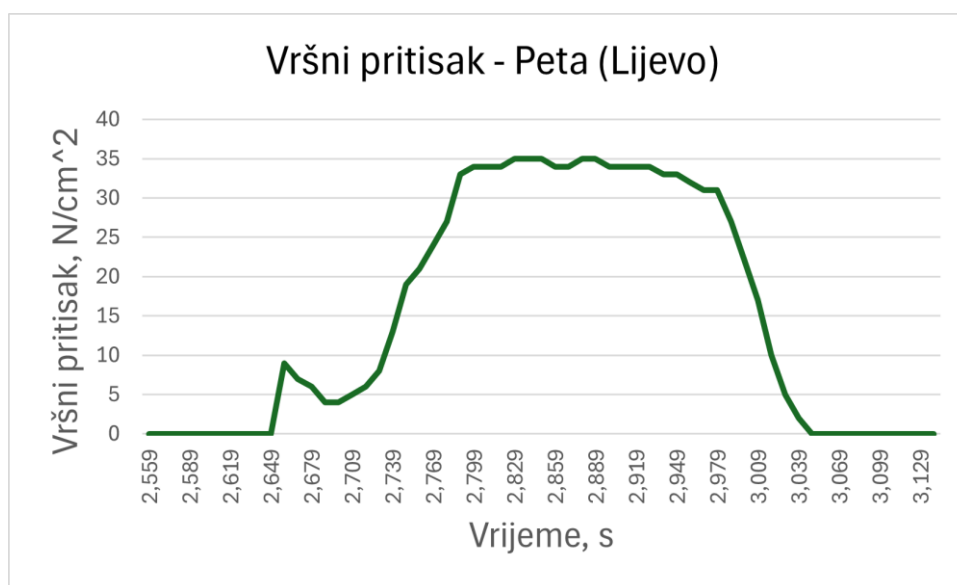
Slika 30. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (peta lijeve noge)



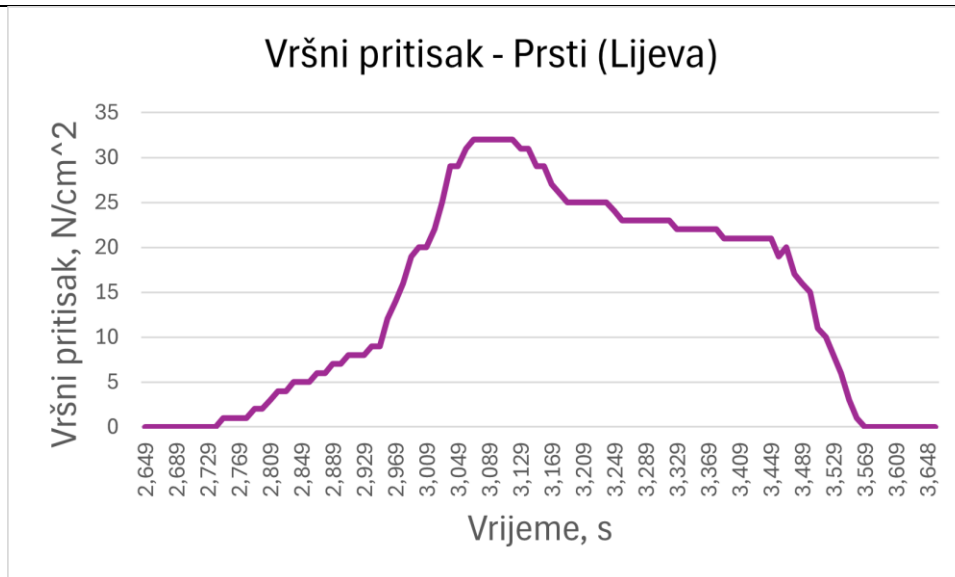
Slika 31. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (prsti lijeve noge)



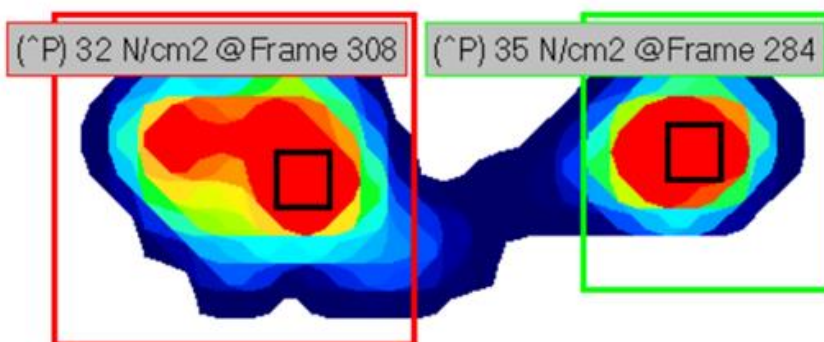
Slika 32. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) pri iskoraku kod penjanje uz stepenice (na lijevoj nozi)



Slika 33. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (peta lijeve noge)

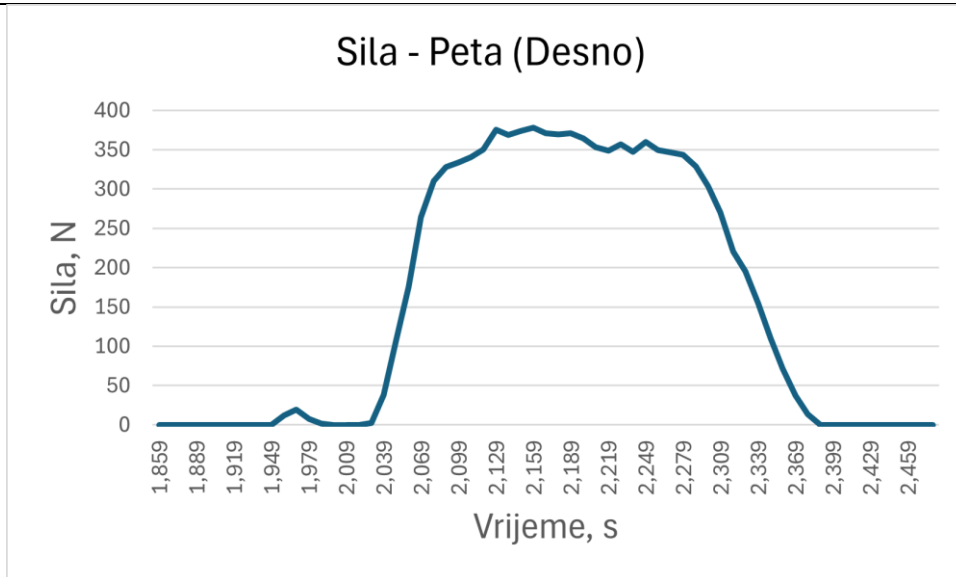


Slika 34. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (prsti lijeve noge)

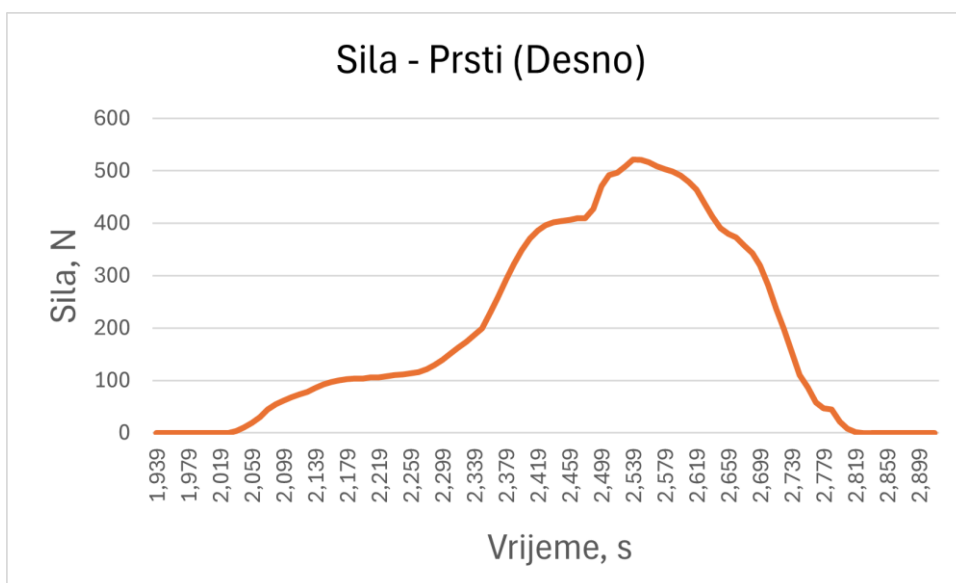


Slika 35. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) kod iskoraka pri penjanju uz stepenice

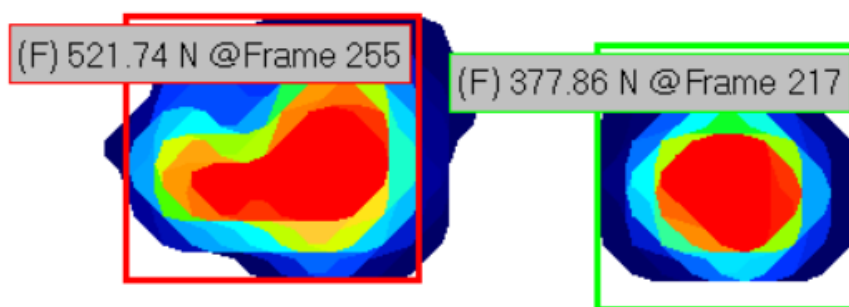
Slika 36. i 37. prikazuju dijagrame sila u ovisnosti o vremenu tijekom iskoraka, dok Slika 38. prikazuje 2D prikaz s označenim najvećim silama koje se javljaju na peti i prstima tijekom iskoraka desnom nogom. Slika 39. i 40. prikazuju dijagrame pritiska u ovisnosti o vremenu tijekom iskoraka, dok Slika 41. prikazuje 2D prikaz s najvećim pritiskom na peti i prstima pri iskoraku desnom nogom.



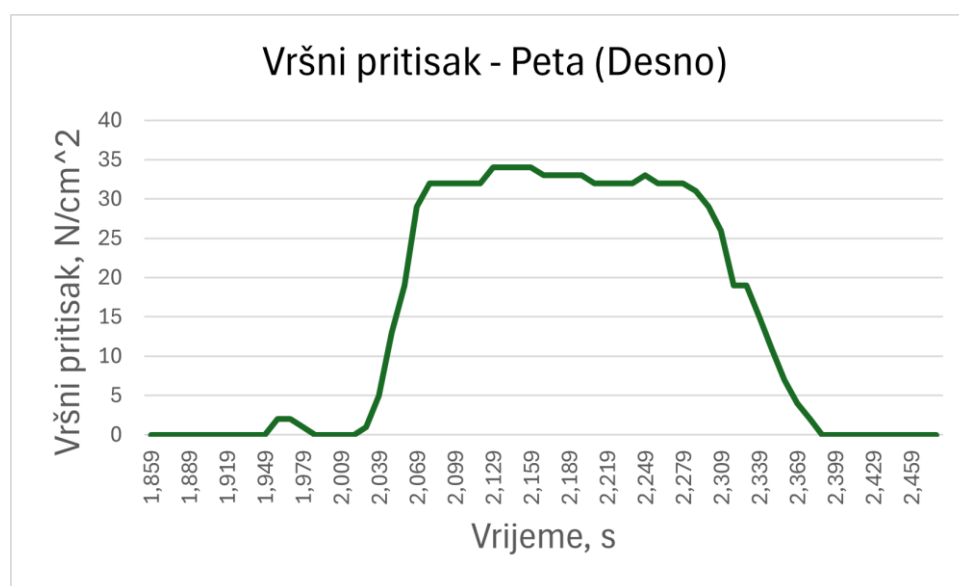
Slika 36. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (peta desne noge)



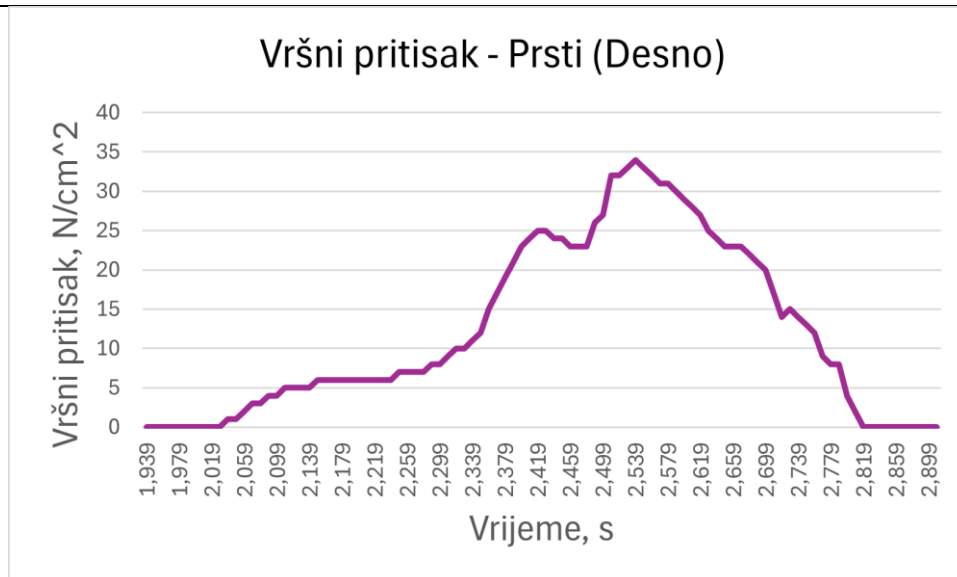
Slika 37. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (prsti desne noge)



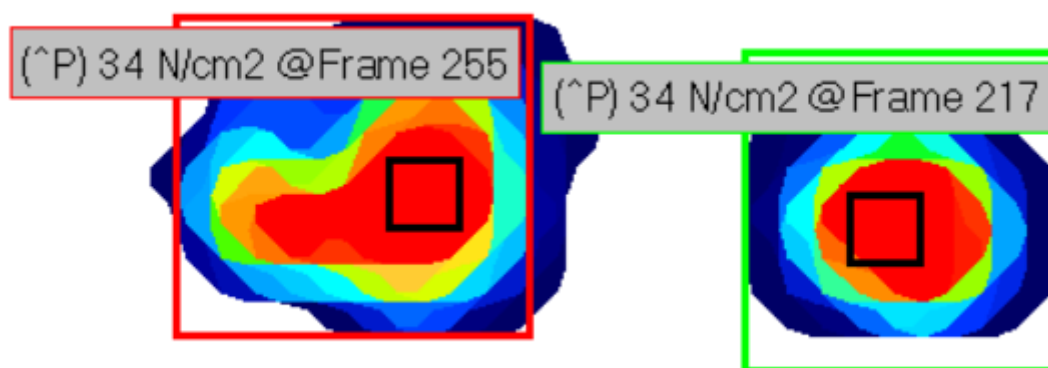
Slika 38. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) pri iskoraku kod penjanje uz stepenice (na desnoj nozi)



Slika 39. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (peta desne noge)



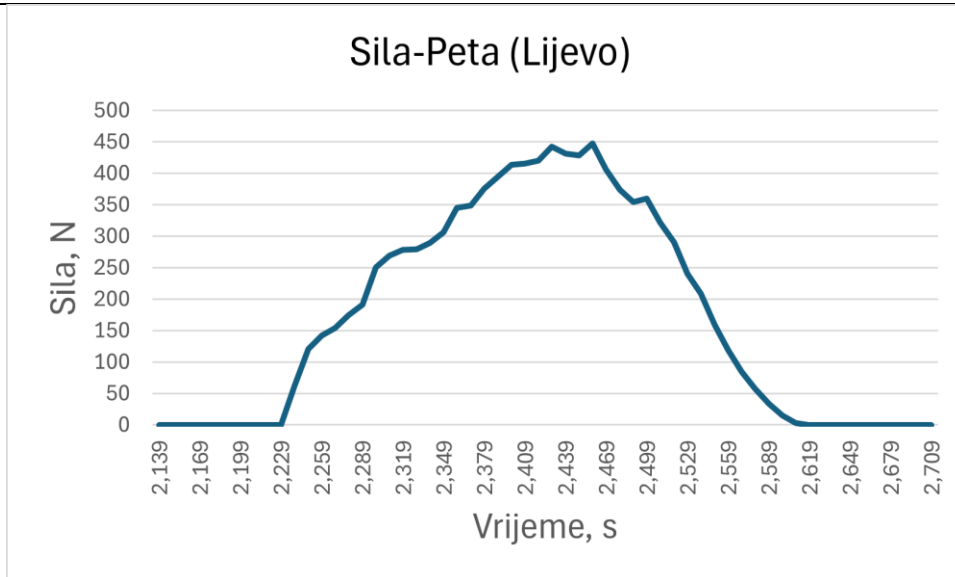
Slika 40. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu pri iskoraku kod penjanja uz stepenice (prsti desne noge)



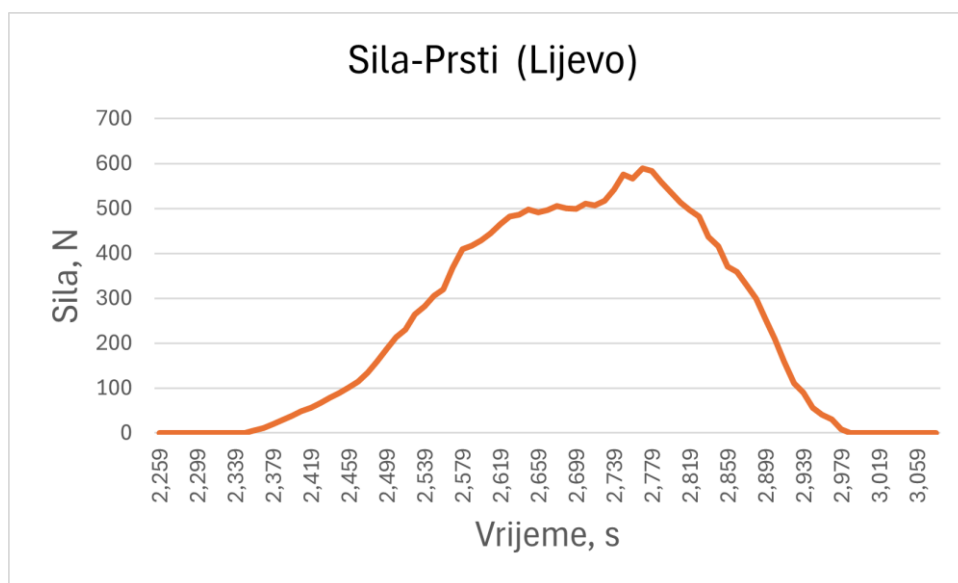
Slika 41. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) kod iskoraka pri penjanju uz stepenice

5.3.4. Normalan hod

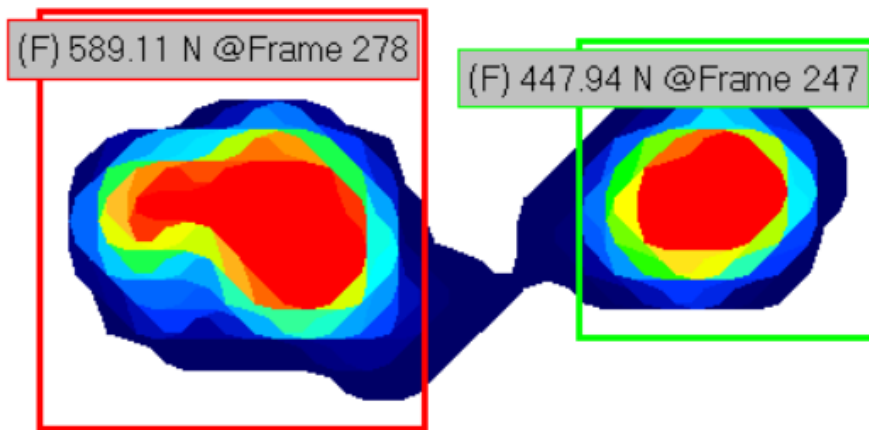
Slika 42. i Slika 43. prikazuju dijagrame sila na stopalo lijeve noge u odnosu na vrijeme tijekom normalnog hoda, dok Slika 44. prikazuje 2D prikaz s označenim najvećim silama koje se javljaju na peti i prstima. Slike 45. i 46. prikazuju dijagrame pritiska u funkciji vremena, dok Slika 47. prikazuje najveće vrijednosti pritiska na peti i prstima lijeve noge tijekom normalnog hoda.



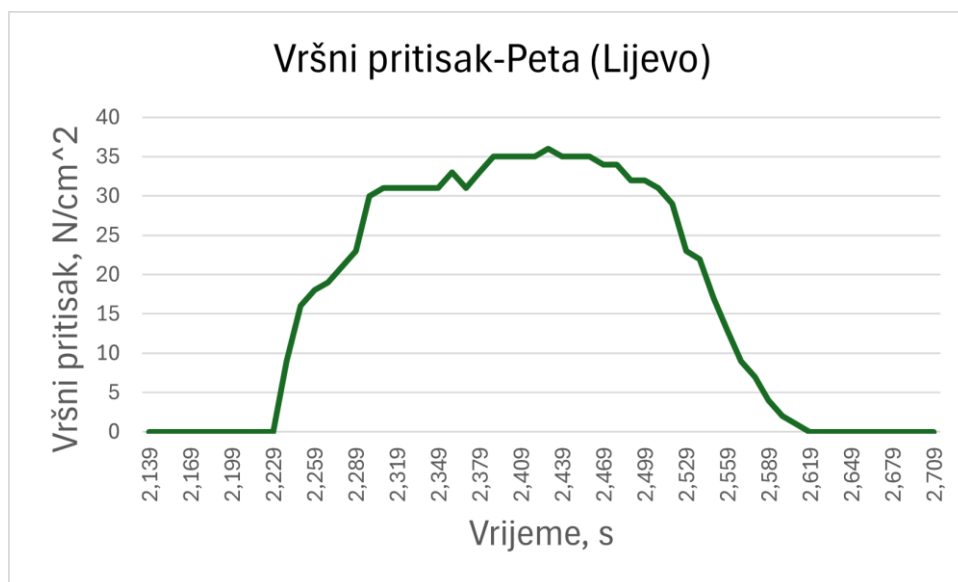
Slika 42. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (peta lijeve noge)



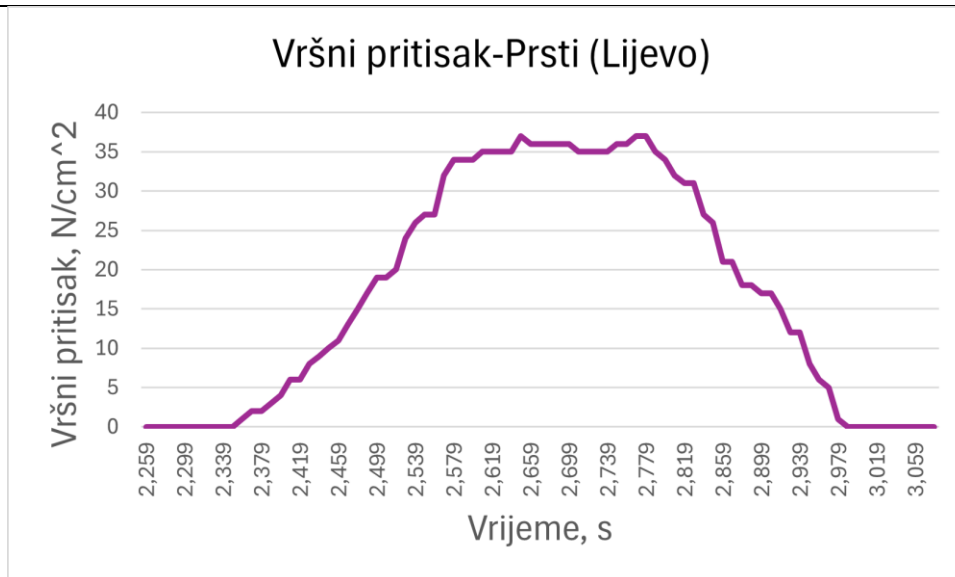
Slika 43. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (prsti lijeve noge)



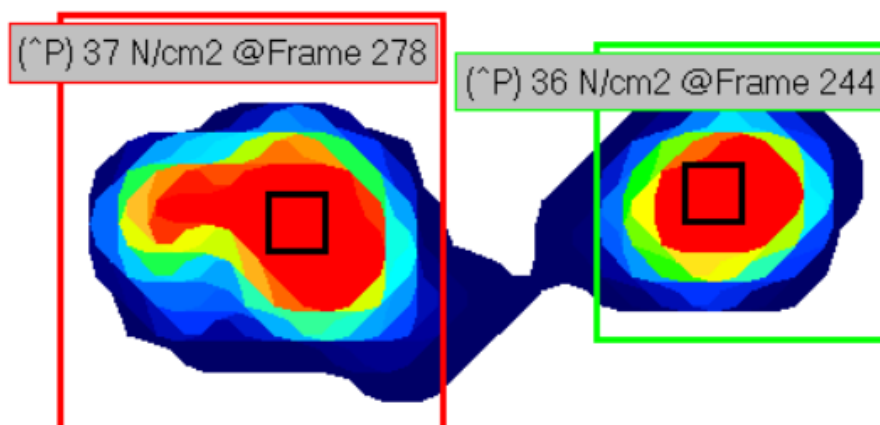
Slika 44. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) kod normalnog hoda na lijevoj nozi



Slika 45. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (peta lijeve noge)

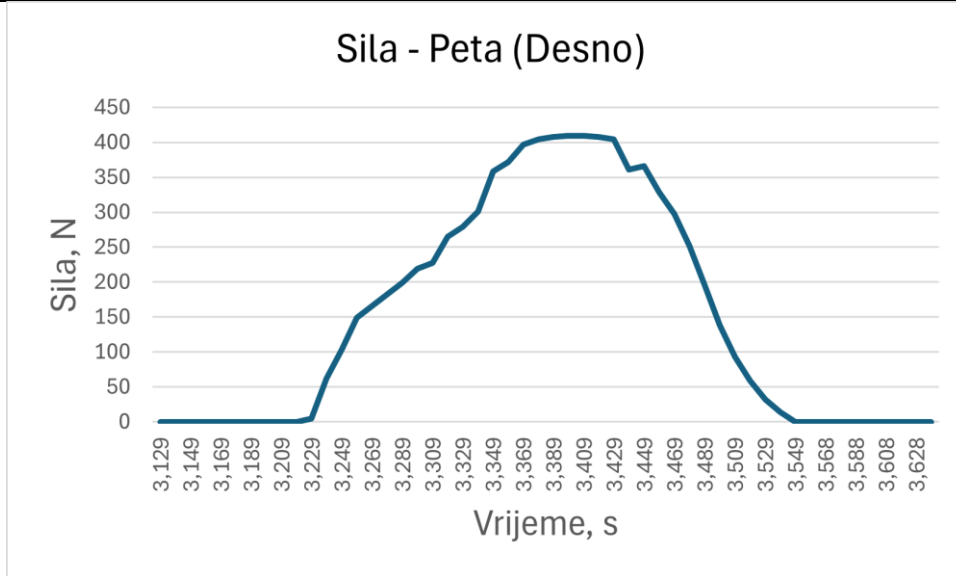


Slika 46. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (prsti lijeve noge)

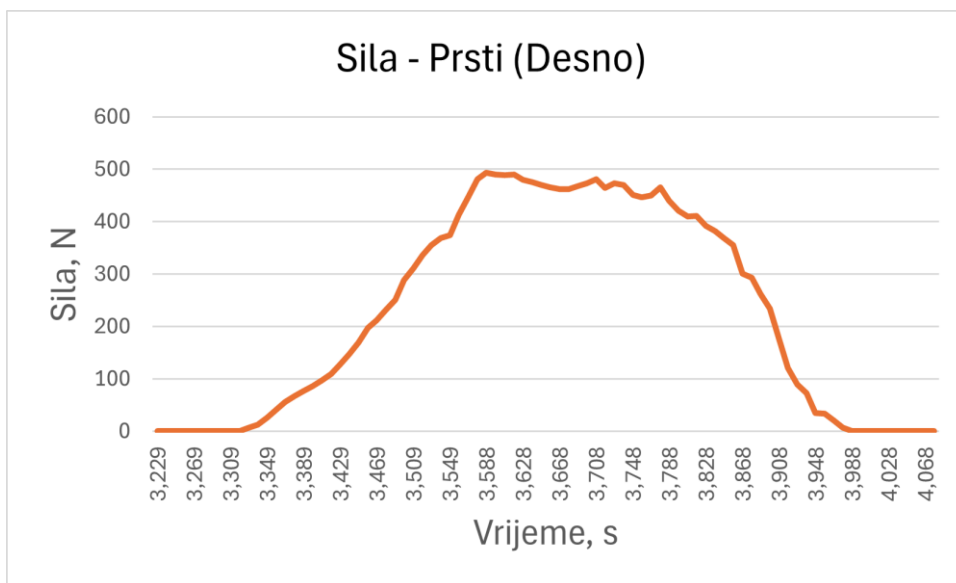


Slika 47. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) kod normalnog hoda

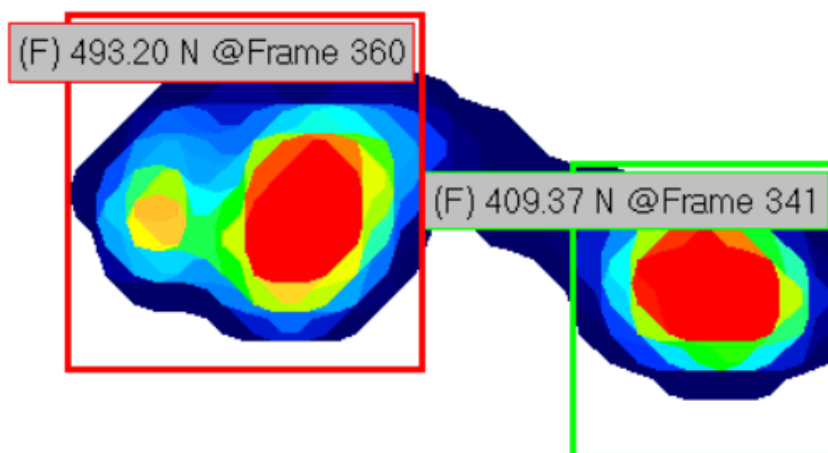
Slike 48. i 49. prikazuju dijagrame sila u ovisnosti o vremenu, a slika 50. prikazuje 2D prikaz kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila na peti i prstima desne noge kod normalnog hoda. Slika 51. i slika 52. prikazuju dijagrame pritiska na petu i prste desne noge prilikom hodanja, dok slika 53. prikazuje najveće vrijednosti pritiska na petu i prste desne noge.



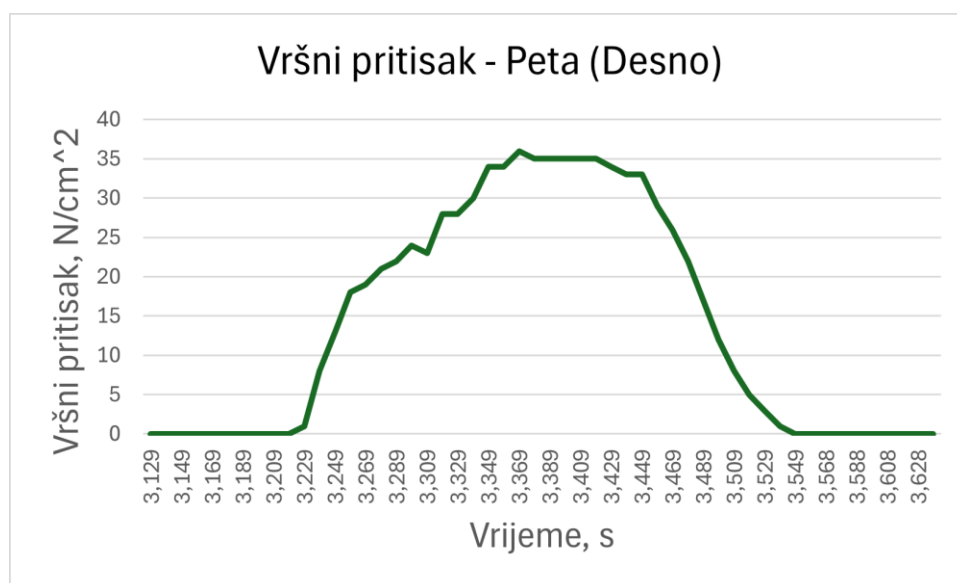
Slika 48. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (peta desne noge)



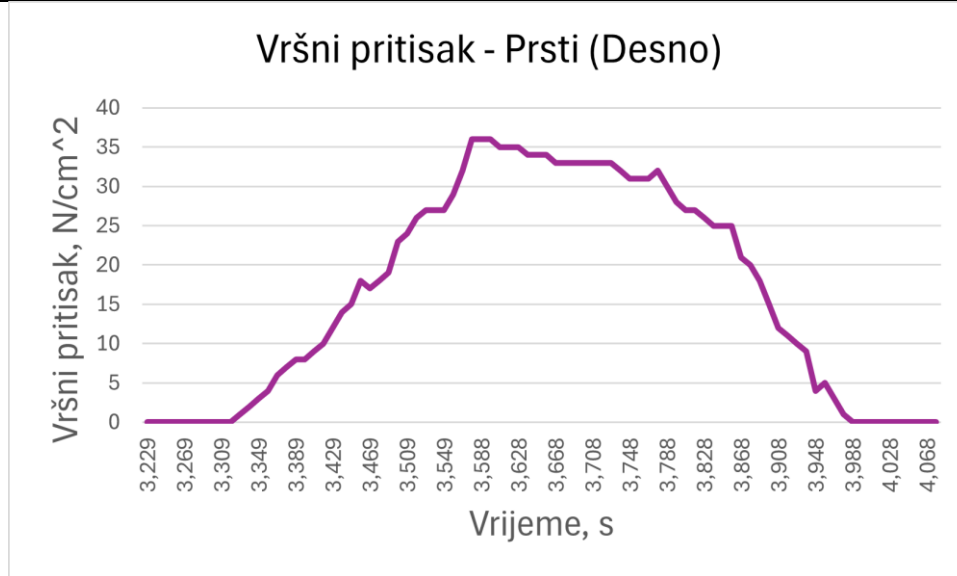
Slika 49. Dijagram vrijednosti sila u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (prsti desne noge)



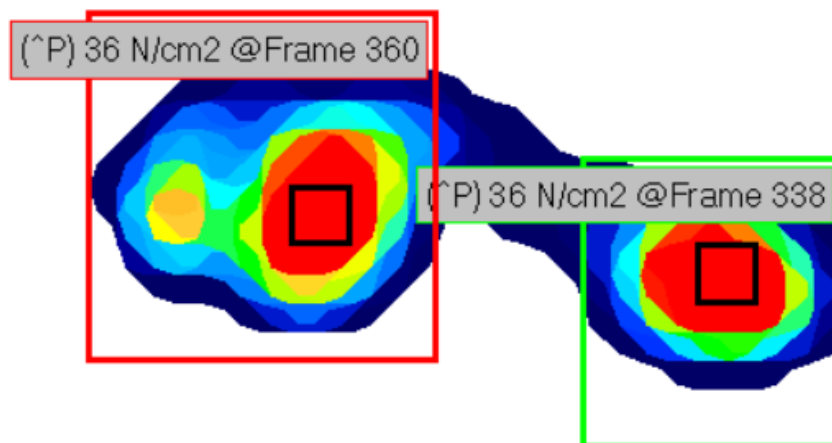
Slika 50. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećih sila (peta i prsti) kod normalnog hoda na desnoj nozi



Slika 51. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (peta desne noge)



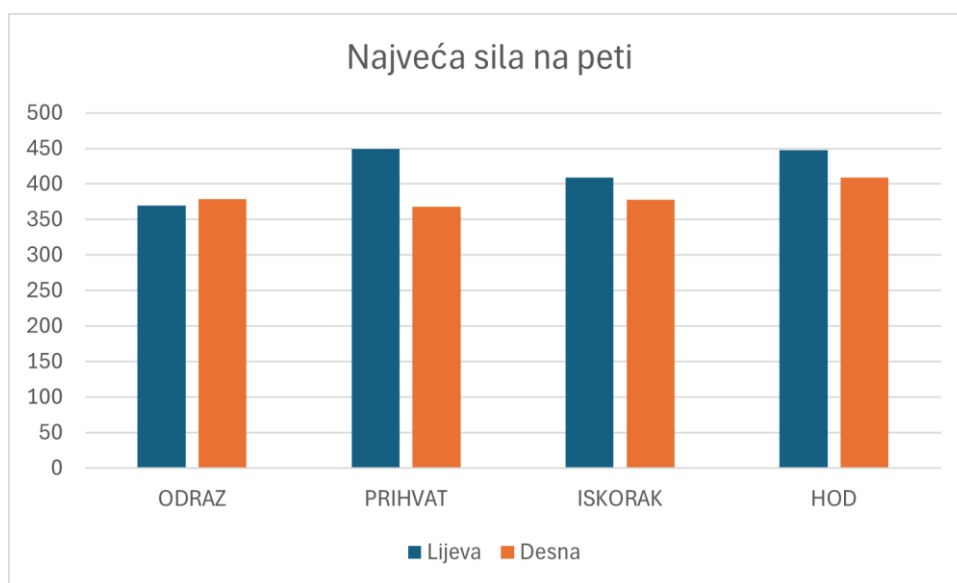
Slika 52. Dijagram vrijednosti pritiska u ovisnosti o vremenu kod normalnog hoda (prsti desne noge)



Slika 53. Prikaz 2D kontaktnih površina s označenim zonama najvećeg pritiska (peta i prsti) kod normalnog hoda

5.4. Rasprava

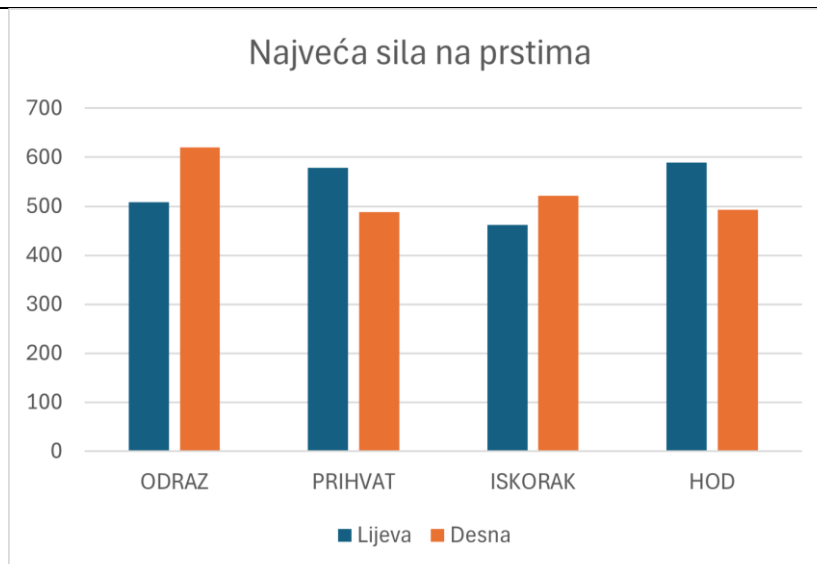
Slika 54. prikazuje odnos najvećih sila na petu lijeve i desne noge u četiri različite akcije.



Slika 54. Dijagram usporedbe najvećih sila na petu lijeve i desne noge

Najveće sile na peti kod odraza pri penjanju uz stepenice su relativno slične na lijevoj i desnoj nozi, što ukazuje na simetričnu raspodjelu sile pri odrazu. Kod prihvata pri spuštanju niz stepenice se može uočiti zanimljiv obrazac, sila na lijevoj nozi je značajno veća ($\approx 20\%$) nego na desnoj. Ovo može ukazivati na različit način raspodjele težine i moguću biomehaničku razliku između nogu pri kontaktu sa stepenicama. Kod iskoraka i normalnog hoda sile su ujednačene, s malim razlikama između lijeve i desne noge, što pokazuje da su ovi pokreti stabilniji u usporedbi s prihvatom.

Na slici 55. prikazana je usporedba sila na prstima za lijevu i desnu nogu kroz četiri situacije koje su mjerene.

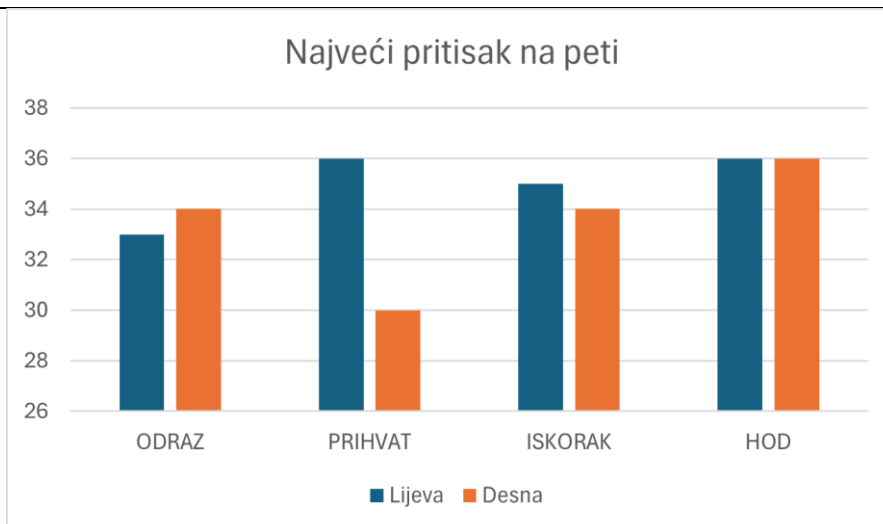


Slika 55. Usporedba najvećih sila na prstima lijeve i desne noge

Kod odraza, desna noga pokazuje znatno višu maksimalnu silu ($\approx 20\%$) na prstima u odnosu na lijevu, što može sugerirati da postoji veća oslonjenost na prste desne noge pri generiranju sile tijekom odraza. Lijeva noga kod prihvata pri spuštanju niz stepenice pokazuje veću silu na prstima u odnosu na desnu, što može biti povezano s većom silom na peti, kako je ranije navedeno. Ovo također može upućivati na dominantniju lijevu nogu ili drugačiji stil korištenja nogu pri spuštanju niz stepenice. Kod iskoraka desna noga opet pokazuje veću silu na prstima naspram lijeve, dok je u hodu lijeva noga dominantnija u odnosu na desnu.

Najveće sile na prstima najviše variraju u iznosima lijeve i desne noge za pojedine situacije.

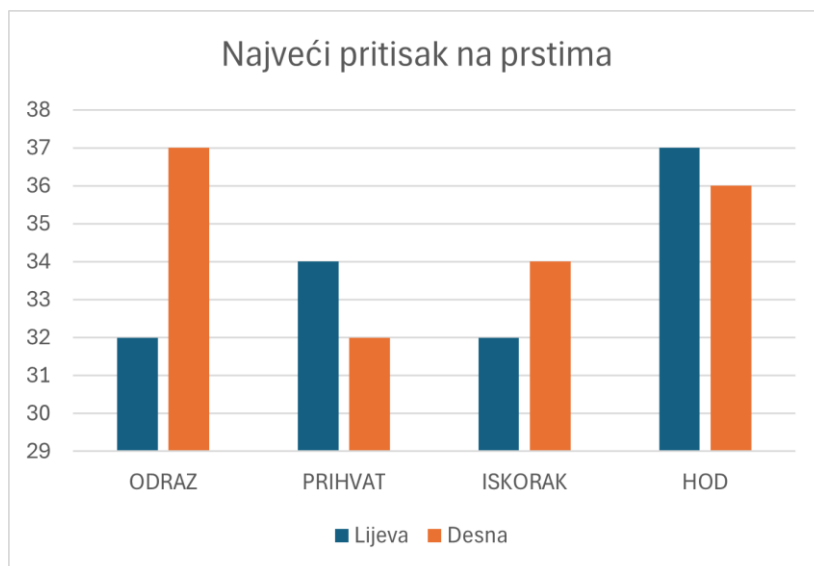
Slika 56. prikazuje dijagram sa podacima o najvećim pritiscima na petu za lijevu i desnu nogu u različitim situacijama.



Slika 56. Usporedba najvećih pritisaka na petu

U slučaju odraza pritisak na petu je sličan na obje noge, što ukazuje na relativnu simetričnu distribuciju pritiska. Kod prihvata vidimo veću razliku, lijeva noga prikazuje veći pritisak na petu u odnosu na desnu, što je konzistentno s ranije uočenom razlikom kod najvećih sila na petu tijekom prihvata. Kod iskoraka i normalnog hoda najveći pritisci na pete su opet ujednačeniji, bez značajnih razlika, što ponovno upućuje na to da su ovi pokreti stabilniji.

Slika 57. prikazuje odnose najvećih pritisaka na prste lijeve i desne noge tijekom različitih akcija.



Slika 57. Usporedba najvećih pritisaka na prste

Kod odraza i iskoraka desna noga pokazuje nešto veći pritisak na prste, dok je lijeva noga u malom zaostatku. Slično kao i kod pritiska na peti, lijeva noga ima veći pritisak na prstima tijekom prihvata i normalnog hoda, što može sugerirati dominantniju ulogu u apsorpciji sile i održavanju ravnoteže.

Rezultati mjerenja pokazuju određenu asimetriju između lijeve i desne noge, posebno tijekom prihvata i odraza. Ove razlike mogu biti posljedica biomehaničkih razlika između nogu, kao što su razlike u snazi, stabilnosti ili tehnici kretanja.

Lijeva noga pokazuje znatno veće sile i pritiske pri prihvatu, što sugerira da više preuzima teret prilikom kontakta sa stepenicom, dok desna noga pokazuje značajno veće sile na prstima tijekom odraza, što upućuje na to da je oslonac na tu nogu kako bi se generirala potrebna sila za odraz ili podizanje.

Pri analizi rezultata, osim intenziteta sila, važno je uzeti u obzir i smjer djelovanja tih sila u odnosu na zglobove, posebice koljeno. Naime, smična sila na koljenu može imati različite učinke u usporedbi s tlačnom silom, što je ključno za razumijevanje biomehaničkog opterećenja u različitim situacijama. U ovom radu analizirale su se četiri specifične situacije: odraz, prihvata, iskorak i normalan hod. Svaka od tih situacija donosi različite vrste sila i smjerove djelovanja, što utječe na biomehaničko opterećenje zglobova.

6. ZAKLJUČAK

Ovim radom prikazani su uzroci i posljedice poremećaja biomehaničkih pokazatelja utvrđenih spuštanjem niz stepenice, te biomehaničke razlike kod različitih kretanja prisutnih u svakodnevnom životu pojedinca. Biomehanička analiza spuštanja niz stepenice doprinosi boljem razumijevanju opterećenja zgloba koljena i kuka što može pozitivno utjecati na dimenzioniranje i izbor materijala za konstrukcije kao što su umjetni zglobovi.

Na temelju provedene biomehaničke analize spuštanja niz stepenice, rezultati ukazuju na značajne varijacije u silama i pritiscima između različitih faza pokreta, poput hoda, odraza, iskoraka i prihvata. Najveće sile i pritisci evidentirani su u fazama koje zahtijevaju nagle promjene brzine i smjera, kao što su odraz i prihvat. Posebno je istaknuto kako su sile na prstima najveće tijekom odraza, kada zglobovi gležnja i koljena prolaze kroz snažnu ekstenziju kako bi generirali potrebnu pogonsku silu. S druge strane, kod prihvata dolazi do apsorpcije velikih sila na prstima i peti, budući da tijelo mora amortizirati udarac prilikom spuštanja, osobito u fazi kontakta s podlogom.

Prema literaturi najpovoljnije i najsigurnije kretanje je hodanje po ravnoj površini, iako ne prikazuje najmanje iznose pritiska i sila na petu i prste.

Identificirane biomehaničke asimetrije, poput povećanih sila na lijevoj nozi u pojedinim fazama, mogu ukazivati na funkcionalne razlike u snazi, stabilnosti ili pokretljivosti između nogu. Također ove se asimetrije mogu pojaviti kod mjerenja zbog raznih nedostataka kao što je nejednaka brzina i tempo izvođenja različitih kretanja.

Ove informacije su ključne u kontekstu konstrukcija, posebno u dizajnu medicinskih uređaja i pomagala, kao što su ortopedski implantati, proteze ili ortoze. Razumijevanje raspodjele opterećenja na zglobovima može pomoći pri optimizaciji materijala, strukture i funkcionalnosti ovih uređaja kako bi se smanjila mogućnost ozljeda te omogućila što veća biomehanička usklađenost i efikasnost tijekom pokreta.

Konstruktori medicinskih uređaja trebali bi uzeti u obzir rezultate ovakvih analiza pri razvoju sustava koji podupiru stabilnost zglobova te učinkovito prenose sile, osobito u fazama visokog opterećenja, kao što su odraz i prihvat. Nadalje, biomehanička analiza može pružiti ključne i individualne informacije pri dizajniranju nosivih sustava za pojedinca, koji bi pomogli u sprečavanju asimetričnih opterećenja ili prenaprezanja mišićno-koštanog sustava, osobito kod rehabilitacije i prevencije ozljeda.

Ovakav tip analize pruža vrijedan doprinos ne samo za optimizaciju dizajna medicinskih pomagala nego i za širi konstruktivni pristup u strojarstvu, gdje se biomehanika ljudskog tijela sve više koristi kao osnova za inovacije u dizajnu proizvoda koji su usmjereni na individualno poboljšanje kvalitete života pojedinca.

LITERATURA

- [1] Hod. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/hod> (Pristupljeno 31.7.2024.)
- [2] Grujičić G. Gait cycle [Internet]. Kenhub. 2023. Dostupno na: <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/gait-cycle> (Pristupljeno 31.7.2024.)
- [3] Demura T, Demura S, Shin S. Comparison of gait properties during level walking and stair ascent and descent with varying loads. *Health*. 2010; 2.12: 1372.
- [4] Hood V. A biomechanical analysis of stair ascent and descent in older adults. [Disertacija]. Glasgow: Bioengineering Unit, University of Strathclyde (2012).
- [5] Akhtaruzzaman MD, Shafie AA, Khan MR. Gait analysis: Systems, technologies, and importance. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*. 2016; 16.07: 1630003.
- [6] Pirker W, Katzenschlager R. Gait disorders in adults and the elderly: A clinical guide. *Wiener klinische Wochenschrift*. 2016.
- [7] Physiopedia contributors. Stair Gait [Internet]. Physiopedia. 2022. Dostupno na: https://www.physio-pedia.com/index.php?title=Stair_Gait&oldid=296443. (Pristupljeno 4.8.2024.)
- [8] Choudhary T. Gait Analysis and Control Design for Stair Ambulation with Lower-limb Powered Prostheses. [Internet]. Tanay Choudhary. 2015. Dostupno na: <https://tanay-choudhary.github.io/project/stair-ambulation>. (Pristupljeno: 8.8.2024.)
- [9] Jafer Abbass S. Biomechanical analysis of human stair climbing (ascending and descending). *Engineering and Technology Journal*. 2012; 30(5):755-774.
- [10] Suresh G. An Introduction to Gait Analysis. [Internet] Auptimo. 2022. Dostupno na: <https://auptimo.com/an-introduction-to-gait-analysis/>. (Pristupljeno: 14.8.2024.)
- [11] Cetl, N., Analiza mogućnosti korištenja opreme za biomehaničku analizu sila reakcije podloge, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.
- [12] <https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/mobilemat>. (Pristupljeno: 29.8.2024.)