



**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**Universitatea Națională de Știință și Tehnologie**  
**Politehnica București**  
**Școala Doctorală de**  
**Inginerie Industrială și Robotică**

**Mariana-Cristiana M. IACOB**

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**Imprimarea 3D prin extrudare de  
material a ortezelor pentru picior:  
Personalizare, materiale  
inovative și caracterizare  
mecanică**

## **REZUMAT**

***Conducător științific,***  
**Prof.univ.dr.ing. Diana POPESCU**

## Cuprins

Cuvânt înainte .....	3
<b>Capitolul 1. Introducere. Aspecte medicale. Analiza literaturii din domeniu .....</b>	<b>4</b>
Secțiunea 1. Fundamentarea studiului. Structura și obiectivele tezei de doctorat. ....	4
Secțiunea 2. Aspecte medicale. Anatomia piciorului și analiza mersului .....	5
Secțiunea 3. Orteze de picior.....	7
Concluzii și contribuții personale.....	9
<b>Capitolul 2. Design-ul personalizat al talonetelor.....</b>	<b>10</b>
Secțiunea 1. Scanarea 3D .....	10
Secțiunea 2. Design-ul talonetelor.....	11
Concluzii, contribuții personale și diseminare .....	13
<b>Capitolul 3. Proiectare și realizare echipament pentru testarea la oboseală a talonetelor.....</b>	<b>13</b>
Secțiunea 1. Studiul echipamentelor existente pentru testarea talonetelor .....	13
Secțiunea 2. Proiectarea unui dispozitiv dedicat testării la oboseală a talonetelor .....	14
Secțiunea 3. Realizarea fizică a dispozitivului dedicat testării la oboseală ale talonetelor.....	18
<b>Capitolul 4. Proiectarea și realizarea unui dispozitiv pentru măsurarea presiunii plantare.....</b>	<b>20</b>
Secțiunea 1. Confortul și metodele sale de evaluare .....	20
Secțiunea 2. Achiziția datelor de presiunea plantară.....	21
Concluzii și contribuții personale.....	23
<b>Capitolul 5. Investigații privind fabricarea talonetelor imprimate 3D din PCL .....</b>	<b>24</b>
Secțiunea 1. FA prin MEX cu PCL.....	24
Secțiunea 2. Fabricarea talonetelor din PCL .....	25
Concluzii și contribuții personale.....	26
<b>Capitolul 6. Investigații privind fabricarea prin imprimare 3D a talonetelor din TPU.....</b>	<b>27</b>
Secțiunea 1. FA prin MEX cu TPU.....	27
Secțiunea 2. Imprimabilitatea filamentelor de TPU cu duritate scăzută Shore A în contextul producției de talonete personalizate .....	30
Concluzii și contribuții personale.....	33
<b>Capitolul 7. Investigații privind fabricarea prin imprimare 3D a talonetelor din varioShore ...</b>	<b>34</b>
Secțiunea 1. FA prin MEX cu varioShore.....	34
Secțiunea 2. Studiul comparativ al comportamentului la oboseală al talonetelor din diferite materiale TPU .....	36
Secțiunea 3. Studiul talonetelor personalizate din varioShore .....	43
Concluzii și contribuții personale.....	53
<b>Capitolul 8. Rezultate, contribuții personale, concluzii și direcții de continuare a cercetărilor</b>	<b>54</b>
<b>Bibliografie.....</b>	<b>57</b>

## Cuvânt înainte

Prima mea întâlnire cu lumea imprimării 3D a avut loc în timpul studiilor de master. În această perioadă am acumulat cunoștințe valoroase referitoare la fabricația aditivă și la tipurile de materiale utilizate în diferite domenii, și am dezvoltat o adevărată pasiune pentru imprimarea 3D și pentru multitudinea de aplicații inovative care pot fi dezvoltate cu această tehnologie. Evoluția dinamică și oportunitățile extinse ale fabricației aditive prin extrudarea materialelor au continuat să-mi capteze interesul pe parcursul studiilor, conducându-mă în mod firesc către realizarea tezei de dizertație în acest domeniu.

Motivația mea de a utiliza imprimarea 3D în viața de zi cu zi pentru a simplifica și îmbunătăți existența oamenilor m-a îndrumat să explorez fabricația aditivă prin extrudare de material în domeniul medical. Am descoperit astfel cum această tehnologie poate juca un rol esențial în avansarea și dezvoltarea acestui domeniu în care personalizarea este esențială.

Programul de doctorat constă în pregătirea, prezentarea și susținerea examenelor și a rapoartelor științifice, aprofundarea studiului, propunerea și dezvoltarea ortezelor de picior personalizate obținute prin imprimare 3D cu extrudare de material, dezvoltarea unui sistem dedicat testării la oboseală a acestora și a unui sistem pentru citirea presiunilor plantare. De asemenea au fost publicate 7 articole științifice dintre care 4 în calitate de prim autor (3 în reviste indexate ISI: 1/38 în Q1, Q2 și Q4, 1 în revistă BDI), 2 articole indexate ISI în reviste Q1 și Q2, în calitate de co-autor 1 articol în Proceedings of ICMaS conference. Însă elaborarea și definitivarea acestei teze nu s-ar fi putut realiza fără sprijinul și suportul unor persoane cu calități excepționale.

În acest scop, aș dori să îmi exprim cu o deosebită emoție recunoștința profundă față de doamna profesor *Prof. Univ. Dr. Ing. Diana Popescu* pentru coordonarea, sprijinul și ajutorul constant pe care mi le-a oferit de-a lungul anilor, atât în cadrul studiilor, cât și în viața personală. Prin împărtășirea expertizei și experienței dumneaei, dar și a dragostei pentru domeniul fabricării aditive, care au avut un impact semnificativ în dezvoltarea mea profesională, academică și personală, m-au inspirat și motivat în a-mi urma pasiunile și curiozitățile.

Totodată, doresc să adresez mulțumiri sincere membrilor comisiei de îndrumare: *Conf. Univ. Dr. Ing. Florin Baci*, *Conf. Univ. Dr. Ing. Radu Parpală*, *S.I. Dr. Ing. Tudor George Alexandru* și *S.I. Dr. Ing. Constantin Stochioiu*, pentru sugestiile valoroase și sfaturile oferite de-a lungul studiilor doctorale, precum și pentru implicarea și contribuțiile lor esențiale în articolele științifice la care am avut onoarea să colaborez alături de domniile lor. De asemenea, mulțumiri deosebite datorez membrilor departamentului de Robotică și Sisteme de Producție și al departamentului de Rezistența Materialelor din cadrul Facultății de Inginerie Industrială și Robotică, pentru sprijinul constant, sfaturile utile și înțelegerea acordată pe parcursul anilor.

Pe această cale, doresc să mulțumesc domnului *Dr. Ing. Petcu Daniel*, specializat în podiatrie, și doamnei *Prof. Univ. Dr. Rodica Marinescu* de la UMF Carol Davila București, pentru implicarea și expertiza oferite. De asemenea, îmi exprim recunoștința și față de domnul *Conf. Univ. Dr. Ing. Cosmin Mihai Cotruș* pentru colaborarea în realizarea articolelor științifice.

În mod special, doresc să îmi exprim aprecierea profundă față de familie și prieteni pentru suportul continuu și încurajările constante pe care mi le-au oferit de-a lungul dezvoltării mele, susținându-mă încă de la primele etape ale acestui parcurs.

*Mariana-Cristiana Iacob*

# **Capitolul 1. Introducere. Aspecte medicale.**

## **Analiza literaturii din domeniu**

### **Secțiunea 1. Fundamentarea studiului. Structura și obiectivele tezei de doctorat.**

Conform Federației Internaționale a Podiatrilor și Asociației Podiatrilor [1,2], podiatria reprezintă ramura medicală specializată în cercetarea, prevenirea, diagnosticarea și tratarea deformărilor, patologiilor și leziunilor piciorului, precum și a structurilor adiacente. Aceasta are o conexiune directă cu sănătatea întregului corp, prin utilizarea încălțămintei ortopedice și a ortezelor de picior (cunoscute și sub numele de talonete).

Piața talonetelor se află într-o creștere semnificativă [3], determinată de factori precum creșterea gradului de conștientizare a importanței sănătății picioarelor și a impactului său direct asupra stării generale de bine. Prevalența crescută a afecțiunilor piciorului ca fasciita plantară, artrita, diabetul și tulburările musculoscheletale, contribuie semnificativ la această creștere. Cauzele acestor afecțiuni sunt, în principal, sedentarismul, îmbătrânirea populației și obezitatea. Ca exemplu, circa 422 de milioane de persoane la nivel global suferă de diabet, majoritatea provenind din țări cu resurse financiare reduse, această afecțiune fiind responsabilă direct pentru aproximativ 1,5 milioane de decese anual [4]. De asemenea, aproximativ 1,71 miliarde de oameni la nivel global trăiesc cu tulburări musculoscheletale, adesea din cauza condițiilor de muncă grele și a cerințelor de performanță. Conform rapoartelor recente, cererea globală pentru talonete ortopedice este estimată la 1,541.2 milioane de dolari în 2020, cu tendința de a atinge cca. 2.800 milioane de dolari până în 2026, cu o rată anuală de creștere compusă de 5,3% între 2021 și 2026.

De asemenea, creșterea investițiilor și intensificarea activităților de cercetare-dezvoltare contribuie la această expansiune. Investițiile din partea sectorului public și privat, alături de implicarea liderilor de piață, stimulează în mod special creșterea în America de Nord [5]. În Europa, activitățile de cercetare-dezvoltare și numărul tot mai mare de producători în domeniul fabricației de produse sprijină semnificativ dezvoltarea pieței [3]. Prin subiectul abordat în teza de doctorat și prin activitățile de diseminare a rezultatelor, s-a avut în vedere și includerea României printre contribuitorii din acest domeniu, prin focalizarea pe utilizarea imprimării 3D cu materiale inovatoare pentru personalizarea talonetelor. Cercetarea este esențială pentru a oferi soluții inovatoare și eficiente, adaptate nevoilor tot mai complexe și personalizate ale utilizatorilor.

Literatura științifică prezintă o varietate de studii de specialitate care evidențiază importanța talonetelor și efectul acestora asupra afecțiunilor picioarelor în activitățile zilnice [6], demonstrând eficiența acestora în reducerea durerilor, prevenirea rănilor din timpul mersului [7] și îmbunătățirea echilibrului la persoanele vârstnice [8]. Talonetele au fost studiate în contextul diferitelor afecțiuni ca neuropatia periferică diabetică [9], unde s-a arătat că pot reduce riscul ulcerului plantar [10]. Acestea oferă beneficii și pentru cei afectați de piciorul plat [11], și contribuie la dezvoltarea de sisteme pentru diagnosticarea și reabilitarea bolilor piciorului [12]. Talonetele au un rol important în menținerea sănătății picioarelor, prin susținerea și confortul pe care îl oferă. Astfel, au fost realizate studii pentru dezvoltarea talonetelor pentru persoanele care petrec perioade îndelungate de timp în picioare [13] sau pentru persoanele care desfășoară activități sportive [14,15].

Progresele în dezvoltarea materialelor, digitalizarea, dezvoltarea instrumentelor de proiectare asistată, perfecționarea procedeelor de fabricație existente, ca și apariția de noi tehnologii de fabricație au condus la producerea unor produse podiatrice mai eficiente și performante. Printre aceste tehnologii se numără și FA (denumită și imprimare 3D sau printare 3D), care contribuie la dezvoltarea acestei industrii prin posibilitățile suplimentare în ceea ce privește gama de materiale și opțiunile de personalizare [16,17]. Astfel, în literatura de specialitate din domeniu se subliniază multiplele avantaje ale utilizării acestei tehnologii, cel mai notabil și studiat fiind capacitatea imprimării 3D de a realiza „orteze personalizate până la ultimul detaliu” [18]. Personalizarea

talonetelor începe cu scanarea 3D a piciorului pacientului, datele fiind apoi prelucrate pentru a genera modelele digitale 3D necesare pentru imprimarea 3D. În plus, modelele digitale ale piciorului pot fi combinate cu informații despre hărțile de presiune plantară, unice fiecărui individ.

În acest context, obiectivul principal al tezei de doctorat poate fi formulat ca referitor la investigarea ortezelor de picior personalizate imprimate 3D prin extrudare de material (MEX) din materiale inovative, din perspectiva confortului, durității, rezistenței mecanice și presiunii plantare. Acest obiectiv a necesitat integrarea mai multor competențe, incluzând proiectarea dedicată a ortezelor, optimizarea parametrilor MEX, utilizarea unor materiale de ultimă generație care nu au fost explorate anterior în domeniu, precum și evaluarea presiunilor plantare și corelarea acestora cu valorile parametrilor de proces. Îndeplinirea acestui obiectiv principal nu doar că răspunde nevoilor individuale de personalizare a talonetelor, dar contribuie și la eficientizarea procesului de producție prin reducerea timpului necesar fabricării și creșterea calității produsului final. În plus, abordările propuse în cadrul tezei oferă soluții noi și adaptabile pentru tratarea diverselor afecțiuni podiatrice, prin utilizarea unor materiale care pot fi configurate pentru a obține o duritate variabilă, optimizată în funcție de patologia specifică a fiecărui pacient.

În completarea acestui obiectiv general, au fost formulate și atinse obiective specifice:

- **OS1:** Studiul anatomiei piciorului și evaluarea presiunii plantare la piciorul sănătos versus cel patologic, pe baza datelor din literatură;
- **OS2:** Analiza sistematică a literaturii din domeniul utilizării FA în fabricarea talonetelor personalizate;
- **OS3:** Realizarea design-urilor personalizate ale talonetelor folosind scanarea 3D, și efectuarea unor analize comparative privind echipamente, software-uri și metode de post-procesare a datelor de scanare;
- **OS4:** Proiectarea talonetelor personalizate utilizând aplicații software specializate în modelare și simulare asistată de calculator;
- **OS5:** Crearea unui echipament pentru testarea rezistenței la oboseală prin încovoiere a talonetelor;
- **OS6:** Dezvoltarea unui echipament de măsurare a presiunii plantare;
- **OS7:** Studiul printabilității mai multor categorii de materiale (polimeri rigizi, elastomeri) pentru MEX, cu scopul de a evalua utilizarea acestora în fabricarea talonetelor personalizate;
- **OS8:** Analiza comportamentului materialelor de tip elastomer cu diferite grade de duritate Shore A pentru realizarea de talonete care să ofere confort și rezistență mecanică;
- **OS9:** Investigarea comportamentului materialelor elastomerice cu duritate Shore A variabilă pentru a optimiza proprietățile talonetelor;
- **OS10:** Producerea talonetelor imprimate 3D prin MEX, cu durități variabile, ajustând parametri de proces pentru a asigura personalizarea;
- **OS11:** Evaluarea confortului talonetelor imprimate 3D, realizate prin MEX, prin testări ergonomice și de utilizare.

## **Secțiunea 2. Aspecte medicale. Anatomia piciorului și analiza mersului**

### **1.1. Anatomia piciorului și analiza mersului**

Aparatul locomotor oferă posibilitatea de a desfășura activități și de a îndeplini sarcini prin intermediul mișcării, iar piciorul, ca parte a acestui sistem, reprezintă extremitatea membrilor inferioare, fiind responsabil pentru susținerea greutății corpului. Picioarele au o structură complexă alcătuită din oase, elemente de legătură (ligamente, articulații) și mușchi. Scheletul piciorului este împărțit în trei segmente principale: anterior, mijlociu și posterior. Segmentul anterior include 14 falange (oasele degetelor) și 5 oase metatarsiene. Biomecanica piciorului include mișcări precum flexie, extensie, abducție, adducție și rotație, care se combină pentru a forma mișcări complexe.

Se definește presiunea plantară ca forța exercitată de picior asupra suprafeței de sprijin pe unitatea de suprafață a tălpii în timpul mersului sau în poziție statică [19]. Acest parametru oferă informații valoroase despre distribuția greutății și funcționarea piciorului. Presiunea plantară poate varia în funcție de diferiți factori, inclusiv tipul de activitate fizică, tipul de încălțăminte purtată, forma și structura piciorului, precum și de prezența oricăror afecțiuni sau deformări ale piciorului. Studiul presiunii plantare (Fig.1.1) este util pentru diagnosticul și tratarea diferitelor afecțiuni ale piciorului, precum și în dezvoltarea talonetelor personalizate pentru a ameliora disconfortul pacientului și pentru a preveni rănille.

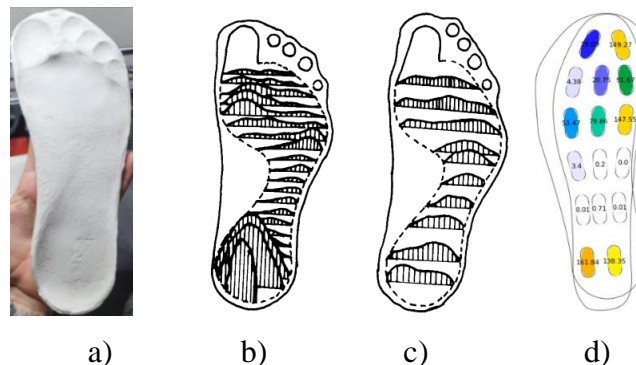


Fig.1.1. Presiunea plantară: a) amprenta [20]; b) cartogramă de presiune pe reazem [19]; c) cartogramă presiune pe suprafață preformată [19]; d) hartă de presiune plantară picior sănătos [21].

## 1.2. Afecțiuni ale picioarelor

Piciorul normal este definit ca un picior care, în timpul mișcării, nu prezintă tensiuni care să depășească valorile considerate normale în articulațiile sale proximale sau în structura anatomică [19]. În comparație, există afecțiuni ale piciorului care sunt modificări organice sau funcționale, generate de boli, traume sau de stilul de viață. Cele mai frecvente afecțiuni locale ale piciorului includ deformarea degetelor (degete ciocan), hallux valgus (monturi), verucile plantare (negii plantari), hiperkeratozele (bătăturile și calozitățile), fasciita plantară (călcâiul dureros), și nevralgia Morton. Diverse patologii ale piciorului necesită utilizarea talonetelor pentru îmbunătățirea activităților de zi cu zi, pentru atenuarea durerilor și reducerea tulburărilor funcționale din timpul mersului. Printre acestea se numără: piciorul plat flexibil [22] și rigid [23], piciorul cavus [24], piciorul diabetic, pintenul calcanear și fasciita plantară. Ulcerațiile neuropatice sunt printre cele mai frecvente complicații ale piciorului diabetic și apar în zonele cu presiune plantară mare, cu o zonă centrală de culoare roșie și pielea din jurul ulcerației îngroșată. Ulcerațiile ischemice [25] se pot dezvolta și pe partea dorsală a piciorului, pe degete și între acestea, sunt dureroase și au marginea de culoare roșie cu zona centrală îngălbenită sau necrozată. Ulcerațiile neuro-ischemice [19] sunt cauzate de afecțiuni vasculare și de instalarea neuropatiei, care pot duce la cangrenă și amputări.

## 1.3. Presiuni plantare asociate piciorului sănătos și patologic

Presiunea plantară, exercitată de picior pe suprafața de sprijin, atât în mișcare cât și în activitățile staționare, nu este uniform distribuită pe toată talpa [41,42]. Astfel, există anumite zone cum ar fi călcâiul și partea din față a piciorului în zona degetelor, care în mod normal experimentează cele mai ridicate valori de presiune datorită factorilor biomecanici și fiziologici care țin de distribuția greutății, mișcarea degetelor sau contractul inițial al călcâiului cu solul în timpul mersului, împingerea în timpul fazei de propulsie a mersului etc. [28].

În studiile existente, au fost identificate diferențe de presiune plantară între piciorul sănătos și cel afectat de diverse patologii, cum ar fi piciorul plat sau scobit. De exemplu, în [29] a fost realizat un studiu pe trei grupuri de participanți, cu greutate medii de 70 kg pentru cei cu picioare normale, 69 kg pentru cei cu picioare scobite și 72 kg pentru cei cu picioare plate. Presiunea plantară în zona călcâiului pentru piciorul scobit a fost între 400-411 kPa, fiind mai mare decât presiunea plantară

observată la piciorul normal. În cazul piciorului plat, presiunea plantară a variat între 336-349 kPa, fiind mai mică decât cea a piciorului normal, care înregistrează valori de 370-378 kPa. Alte diferențe semnificative au fost observate în zona halucelui, care prezintă un comportament similar cu cel descris anterior. Astfel, pentru piciorul scobit, valorile înregistrate au fost de aproximativ 280 kPa, pentru piciorul plat 523 kPa, iar pentru piciorul normal 378 kPa.

Cercetările din literatură includ și analize ale presiunii plantare pentru piciorul diabetic, afectat de bătăături [30] sau neuropatie diabetică [31]. Studiul [30] a fost realizat pe un eșantion de persoane cu greutatea cuprinsă între 60 și 80 kg. În toate grupurile, presiunea plantară a arătat variații semnificative.

## Secțiunea 3. Orteze de picior

### 1.4. Definiție și clasificarea ortezelor de picior

Ortezele sunt dispozitive medicale externe care susțin, aliniaza, corectează sau îmbunătățesc funcția biomecanică a unor părți ale corpului, în special articulații și membre.

În cazul ortezelor de picior (denumite și talonete, talonete ortetice, branturi, inserții pentru pantofi sau susținători plantari), acestea sunt inserate în interiorul pantofilor pentru corectarea posturii și alinierea piciorului, amortizarea șocurilor, distribuția uniformă a greutății, îmbunătățirea performanței sportive, alinierea coloanei vertebrale și tratamentul diverselor afecțiuni ale picioarelor, contribuind la corectarea unora dintre anomaliile piciorului prezentate anterior [32].

Fabricarea talonetelor oferă oportunități importante pentru a crea produse mai confortabile, accesibile și durabile. Eficiența lor terapeutică depinde de confort, adaptabilitate și rezistență. Noile tehnologii, precum imprimarea 3D cu materiale avansate, permit dezvoltarea talonetelor personalizate, care pot înlocui treptat metodele convenționale. Această tranziție reflectă o evoluție similară cu cea observată în domeniul ortezelor pentru membrele superioare [33], evidențiind potențialul utilizării FA în îmbunătățirea tratamentelor ortopedice.

Figura 1.2. prezintă o clasificare a talonetelor după mai multe criterii.

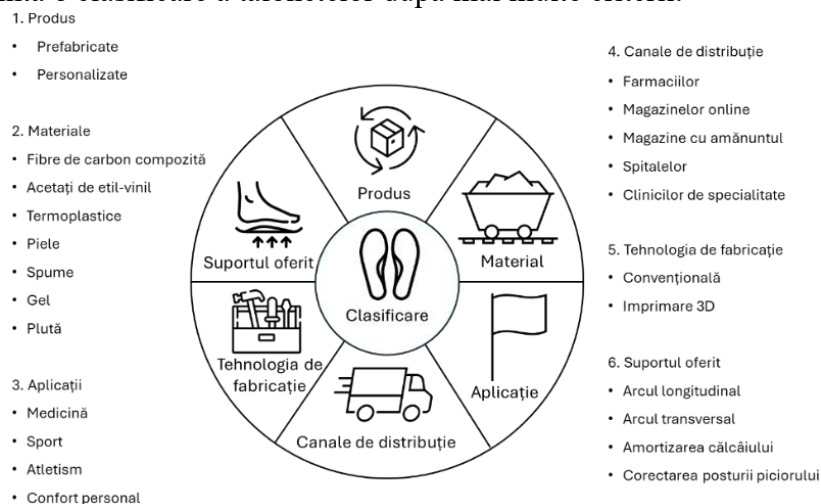


Fig.1.2. Clasificarea talonetelor

Pentru pacienții cu picior diabetic, unde stabilitatea piciorului este compromisă din cauza deteriorării articulațiilor și a arcului plantar [34], talonetele personalizate și încălțăminte adecvată sunt obligatorii pentru a asigura protecția acestor picioare insensibile [35], reducând riscul de complicații severe. În cazul picioarelor cavus, talonetele personalizate s-au dovedit eficiente în reducerea durerii prin redistribuirea presiunii plantare pe întreaga suprafață de sprijin [36].

Studiile recente, detaliate în secțiunea 1.6, au arătat că talonetele imprimate 3D pot oferi corecție biomecanică și reducerea durerii, concomitent cu o durabilitate ridicată [37], deschizând posibilitatea ca această tehnologie de fabricație să fie o alternativă fiabilă la cea convențională, chiar depășind-o prin personalizarea formei și a durității în diferite zone.

## 1.5. Fabricarea talonetelor

### 1.5.1. Metode convenționale de fabricare a talonetelor

Prima etapă a fabricării convenționale a talonetelor implică măsurarea detaliată a piciorului pentru a identifica nevoile specifice ale pacientului, incluzând lungimea, lățimea și posibilele probleme structurale sau de aliniere. În a doua etapă, pe baza acestor măsurători, se creează un model al talonetei fie sub formă de mulaj fizic, fie printr-un model digital obținut prin scanare 3D.

În cazul utilizării unui model fizic, se aplică benzi de ipsos umede pe picior pentru a contura forma acestuia. Persoana pentru care se realizează matrița trebuie să rămână nemișcată timp de 5-10 minute, până când benzile de ipsos se întăresc. După întărirea matriței, aceasta este îndepărtată de pe picior și lăsată să se usuce complet timp de 24 h, apoi este trimisă la un laborator pentru prelucrare și realizarea talonetelor. Prin comparație, utilizarea unui model digital prin scanare generează un fișier cu modelul 3D al piciorului. Această metodă permite stocarea digitală a modelelor 3D, facilitând producția repetată a talonetelor [38]. În plus, utilizarea unui program asistat pentru proiectarea talonetelor, bazat pe șabloane preprogramate, simplifică crearea modelelor personalizate de talonete [39].

### 1.5.2. Fabricarea talonetelor prin tehnologia FA

Studiul literaturii de specialitate a arătat că talonetele sunt fabricate prin imprimare 3D prin procedeele: MEX [40–44]; stereolitografie - SLA [45]; sinterizare laser selectivă - SLS [46–51]. Dintre acestea, MEX este cel mai des utilizat procedeu datorită costului redus al echipamentelor (imprimante 3D sau printare 3D) și al materiei prime. De asemenea, gama de materiale elastomerice disponibile este mai largă în cazul MEX decât pentru celelalte procedee. Totodată, variabilitatea durității în diferite zone ale talonetelor se poate obține mai ușor prin MEX. Din acest motiv, talonetele studiate în teza de doctorat au fost fabricate exclusiv prin MEX, iar criteriul materialelor a fost considerat definitiv în cercetările realizate. Pornind de la materialele tipice pentru MEX, în conformitate cu obiectivele OS7-OS10, au fost investigate și caracterizate mecanic mai multe tipuri de materiale pentru fabricarea talonetelor: PCL (policaprolactonă), poliuretan termoplastice (TPU) de diferite durități Shore A, elastomer termoplastice cu densitate variabilă (varioShore).

### 1.5.3. Analiză comparativă a procedeelelor de fabricație a talonetelor

Procedeele de fabricație a talonetelor descrise anterior pot fi comparate pe baza mai multor criterii, Tabelul 1.1 sintetizând datele din această analiză.

Tabelul 1.1. Comparație metode de fabricare a talonetelor, tradițional vs. MEX

Criterii	Metode convenționale	MEX
<b>Etape de producție</b>	Implică mai multe etape, inclusiv realizarea unui mulaj, turnare și finisare, toate cronofage [52]	Imprimare 3D strat cu strat, fără necesitatea mulajelor [53]
<b>Personalizare</b>	Necesită realizarea manuală a mulajelor personalizate, ceea ce poate duce la variații în calitate și precizie [52]	Personalizare detaliată prin modelare digitală, ajustabilă rapid [52]
<b>Durabilitate</b>	Proces mai puțin consistent din cauza posibilelor erori umane [52]	Consistentă, cu precizie ridicată datorită controlului automatizat [52]
<b>Timp de producție</b>	Producția este lentă, cu multe etape și finisare manuală, poate dura săptămâni [52,54]	Imprimarea 3D reduce timpul de producție semnificativ [52,54]
<b>Complexitate</b>	Complex și influențat de experiența tehnicianului [52,54]	Proces simplificat, controlat de software și tehnologia imprimantei [52,54]
<b>Precizie</b>	Precizia poate varia din cauza erorilor umane și turnării [52]	Oferă o precizie foarte mare datorită modelării digitale [52]
<b>Calitate</b>	Varietatea materialelor și proceselor poate duce la inconsistențe [52]	Uniformitate și calitate constantă datorită controlului automatizat [52]
<b>Materiale</b>	Materiale tradiționale precum EVA, poliuretan și spume [55]	Utilizează materiale avansate, inclusiv TPU și alte elastomeri [55]
<b>Flexibilitate</b>	Materialele sunt mai puțin adaptabile și necesită ajustări post-producție [55]	Flexibilitate ridicată în ajustarea materialelor în funcție de nevoile pacientului [55]



<b>Depozitare: Stabilitate și durabilitate</b>	Materiale stabile, dar susceptibile la deformare și îmbătrânire [55]	Materialele moderne, precum TPU, prezintă durabilitate ridicată [55]
<b>Depozitare: Sensibilitate la factori de mediu</b>	Sensibile la umiditate, temperaturi extreme și lumina UV, pot suferi modificări fizice [55]	Materialele utilizate în MEX pot fi sensibile la umiditate și temperaturi extreme [55]
<b>Depozitare: Spațiu</b>	Necesită spațiu mare de depozitare pentru talonete și matrițe [55]	Reducerea necesității de spațiu datorită producției directe pe baza modelului digital [55]
<b>Costuri</b>	Costuri ridicate din cauza echipamentelor și manoperei manuale [52,54]	Costurile inițiale pot fi mai mari, dar eficiența pe termen lung este sporită [52]
<b>Economie</b>	Costurile variază semnificativ în funcție de complexitate și volum de producție [52,54]	Economii realizate prin reducerea deșeurilor și automatizarea procesului [52]

## 1.6. Studiul sistematic al literaturii în domeniul talonetelor imprimate 3D

Studiul literaturii în domeniu s-a realizat în 2021, apoi a fost completat cu cele mai noi referințe de la nivelul anului 2024. S-au căutat sistematic articole științifice în limba engleză, în bazele de date electronice: Clarivate Web of Knowledge, PubMed și Scopus, prin utilizarea cuvintelor cheie. Din totalul de 192 lucrări identificate, după eliminarea redundanțelor și citirea abstractelor, au fost reținute 57 articole relevante. Au fost excluse studiile despre talonete inteligente cu senzori, dezvoltarea de noi materiale pentru talonete sau referitoare la pantofi imprimați 3D. Cele 57 de articole au fost analizate pentru a identifica patologiile frecvente, tipul de procedeu de fabricație, materialele, design-ul, metodele de colectare a datelor despre picior, prezența testelor clinice, numărul de talonete testate și evaluarea eficienței. Rezultatele sunt prezentate în extenso în teză.

Daryabor ș.a [56] au publicat în 2022 o recenzie sistematică și o meta-analiză privind talonetele imprimate 3D pentru picior plat, analizând zece lucrări cu 225 de pacienți, toți tratați cu talonete personalizate, rezultatele fiind favorabile în ceea ce privește confortul. Xu ș.a (2019) au comparat talonetele convenționale și cele imprimate 3D [57], pe 80 de subiecți cu platfus, concluzionând că talonetele imprimate 3D sunt mai eficiente în redistribuirea presiunii plantare și în îmbunătățirea confortului. Mo ș.a (2019) [58] au realizat un studiu comparativ pe alergători cu pronăție excesivă. Rezultatele nu au arătat diferențe biomecanice semnificative, dar au evidențiat preferința pentru talonetele 3D în termeni de confort. Walker ș.a (2023) au investigat confortul talonetelor imprimate 3D cu duritate variabilă, arătând un avantaj față de cele cu duritate uniformă [59]. Channasanon ș.a (2023) au evaluat ortezele din silicon imprimate 3D cu duritate variabilă, constatând că acestea reduc presiunea asupra călcâiului [60]. Articolele din domeniu studiază și influența modelului și densității de umplere asupra confortului, cum ar fi structurile gyroid [61], cubic centrat [62], suprafață triplu periodică [63–66], structuri optimizate topologic [67] și de tip pânză de păianjen pentru confort termic [68].

Metoda FEA, utilizată în patru studii [69–72], a simulat comportamentul talonetelor la compresiune, evaluând comparativ structuri interne adaptate presiunilor plantare. Această abordare numerică reduce numărul de teste fizice și scurtează dezvoltarea talonetelor personalizate.

Dezvoltarea talonetelor imprimate 3D reprezintă o provocare interdisciplinară, așa cum reiese din analiza afilierii autorilor. Colaborarea dintre ingineri, medici ortopezi, podiatri și experți în materiale este esențială pentru a asigura talonete funcționale, confortabile și conforme cu standardele medicale. O abordare integrată facilitează o înțelegere mai profundă a modului în care materialele și design-urile influențează sănătatea și bunăstarea pacienților.

## Concluzii și contribuții personale

### Contribuții personale:

- Analiza sistematică a literaturii despre talonetele imprimate 3D, identificarea tendințelor în patologiile piciorului studiate, studiul gamei de materiale și a testării mecanice a talonetelor, acestea fiind obiective specifice în cadrul tezei de doctorat.
- Sistematizarea datelor privind presiunea plantară maximă în diferite zone ale piciorului, în funcție de patologie.

- Identificarea nișelor de studiu legate de comportamentul mecanic, de utilizarea analizelor numerice și de gama de materiale pentru talonete.

### **Concluzii capitol 1:**

- Afecțiunile piciorului, precum degetele ciocan, monturile, negii plantari și călcâiul dureros, afectează calitatea vieții, iar patologii precum piciorul plat, cavus sau diabetic necesită talonete pentru ameliorare.

- Talonetele, realizate prin metode tradiționale sau prin imprimare 3D, susțin piciorul și redistribuie presiunea plantară. Imprimarea 3D permite fabricarea de forme complexe și duritate variabilă, eliminând etapele manuale și ajustările lente ale metodelor convenționale. Analiza literaturii a demonstrat că talonetele imprimate 3D sunt cel puțin la fel de eficiente ca cele tradiționale în redistribuirea presiunii și îmbunătățirea confortului.

- Literatura de specialitate evidențiază interesul pentru imprimarea 3D în fabricarea talonetelor, datorită flexibilității oferite de procedee ca MEX care permit utilizarea diverselor filamente elastomerice și ajustarea durității. Aceasta facilitează personalizarea talonetelor pentru patologii precum piciorul plat și diabetic, dar și pentru sportivi. Teza subliniază necesitatea cercetărilor suplimentare privind rezistența mecanică și propune explorarea unor noi materiale adaptate presiunilor plantare specifice.

## **Capitolul 2. Design-ul personalizat al talonetelor**

### **Secțiunea 1. Scanarea 3D**

#### **2.1. Scanarea 3D - Aspecte generale**

Scanarea 3D este un proces de înregistrare a formei și dimensiunilor unui obiect fizic, cu crearea unui model digital 3D ca replică a obiectului real.

Sistemele de scanare 3D diferă prin rezoluție și distanța dintre punctele înregistrate la o anumită distanță de scanare. Rezoluția unui scanner 3D este limitată de densitatea punctelor din norul de puncte, așa că elementele cu dimensiuni mai mici decât distanța dintre aceste puncte nu vor fi captate cu precizie.

Scanerile utilizabile pentru a capta forma corpului uman sunt cele fără contact, categorie din care fac parte scanerile cu laser, cu lumină structurată, cu lumină modulară, scanerile medicale [73]. În cazul echipamentelor CT sau RMN, de obicei sunt generate secțiuni 2D în format DICOM. Scanerile 3D cu laser sau lumină generează un nor de puncte precis, utilizabil pentru diferite analize, inspecția de caracteristici sau suprafețe, și prototipări rapide.

#### **2.2. Scanarea 3D a picioarelor utilizatorului talonetelor în scopul personalizării acestora**

În funcție de disponibilitatea echipamentelor și rezoluția necesară, în cercetările din teză au fost utilizate trei scanere portabile: Artec Eva Lite (Artec 3D, Luxemburg), Mini 1 și Range 2 (RevoPoint 3D Technologies, China), toate bazate pe tehnologia de scanare cu lumină structurată.

Figura 2.1 prezintă rezultatele scanării cu Artec Lite a ambelor picioare ale unui subiect sănătos, precum și etapele de prelucrare a datelor de scanare până la obținerea unui model 3D viabil. Durata scanării fiecărui picior cu Artec Lite a fost de 1-1½ h, timpul fiind proporțional cu numărul de capturi necesare pentru o rezoluție bună a modelului 3D final. Datele achiziționate au fost prelucrate în aplicația dedicată Artec Studio 17 Professional.

În comparație, cu RevoPoint Range 2 durata fiecărei scanări a fost mai mică decât pentru Artec Lite, cca. 15-20 minute pentru fiecare picior. S-a folosit software-ul dedicat Revo Scan 5 pentru a elimina elementele care nu erau necesare, pentru a umple golurile și a uniformiza suprafețele, fiind necesară și reducerea numărului de elemente (Fig. 2.2.).

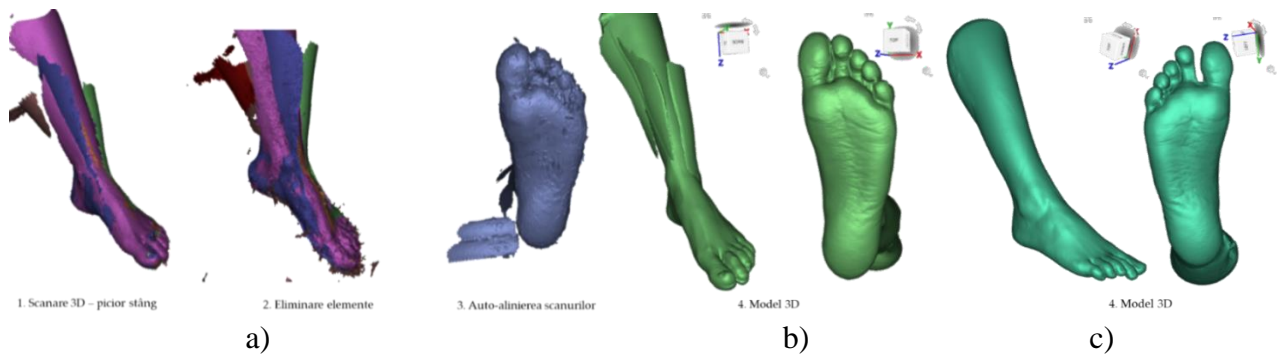


Fig.2.1. Scanare 3D cu Artec Lite: a) post-procesarea scanărilor; b) stângul; c) dreptul

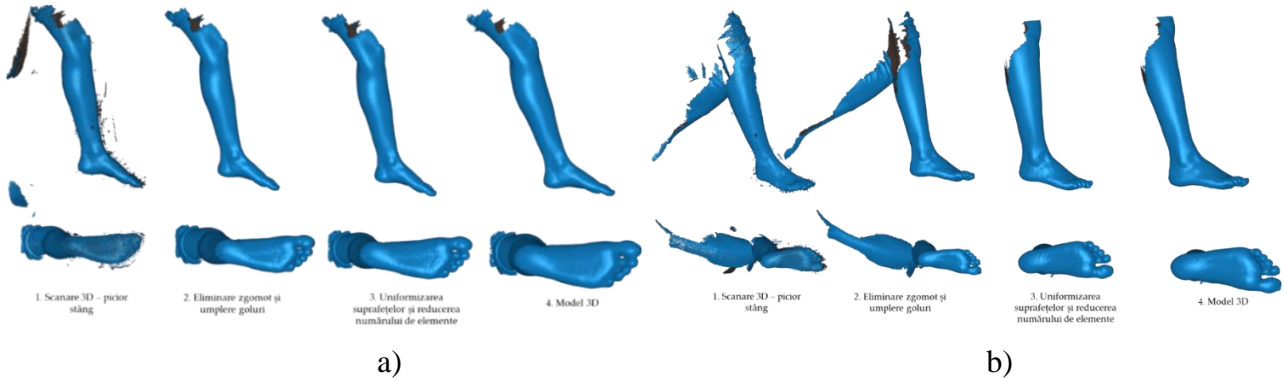


Fig.2.2. Scanare 3D cu scanner RevoPoint Mini 3D: a) stângul; b) dreptul

## Secțiunea 2. Design-ul talonetelor

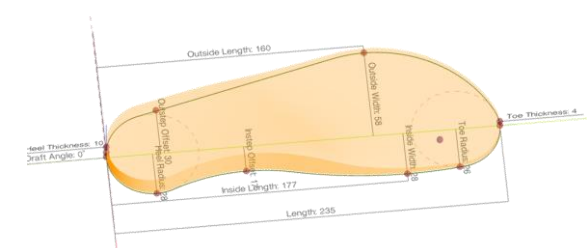
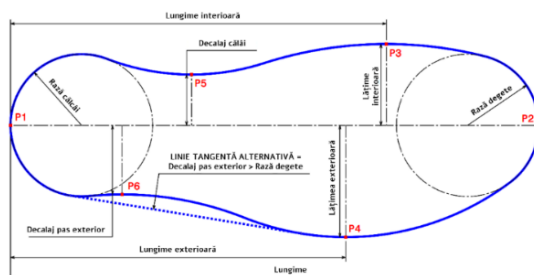
### 2.3. Proiectarea personalizată a talonetelor utilizând aplicații software dedicate și aplicații software 3D CAD

Alegerea tipului și formei talonetei depinde de factori precum prezența și tipul patologiei piciorului, anatomia individuală, tipul de încălțăminte și activitățile desfășurate. Cercetările s-au concentrat pe talonete de confort pentru cei care petrec timp în picioare. Aceste talonete vizează îmbunătățirea amortizării, susținerea arcului plantar și personalizarea durității pentru confort.

În Fig.2.3. se prezintă fluxul de lucru din Gensole prin care au fost produse modelele 3D ale talonetelor. Etapele fac parte din procesul de personalizare, asigurând nu doar potrivirea perfectă pe piciorul utilizatorului, ci și delimitarea precisă a zonelor de presiune. Ulterior, aceste zone de presiune au fost ajustate în slicer, utilizând densități și modele de umplere variabile pentru optimizarea confortului (prin ajustarea durității) și funcționalității talonetelor.

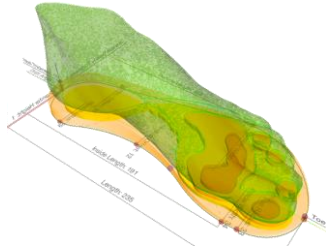
AceSole3D este un alt program dedicat design-ului personalizat de talonete imprimate 3D (Fig.2.4).

Ca program 3D CAD general, s-a testat capacitatea Autodesk Fusion 360 de a modela talonete personalizate (Fig.2.5).

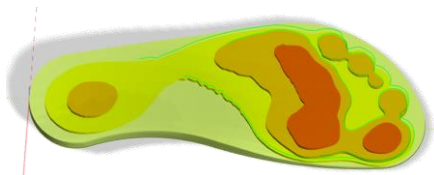


1. Profil parametrizat (traducere și adaptare după [74])

2. Personalizarea datelor de intrare



## 3. Alinierea scan-ului 3D cu taloneta generată



## 4. Afișarea punctelor de presiune

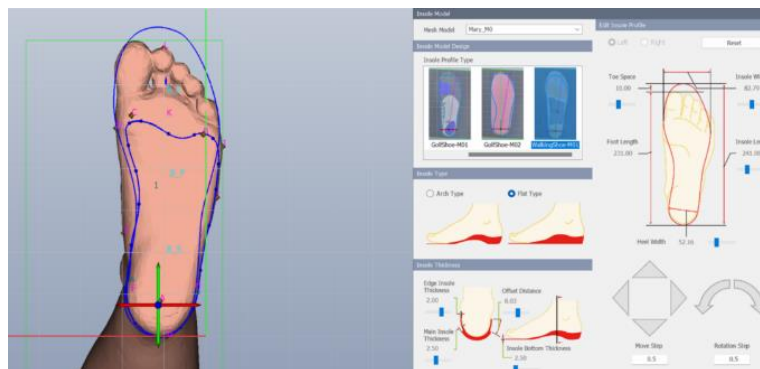


## 5. Reglarea înălțimii arcului piciorului

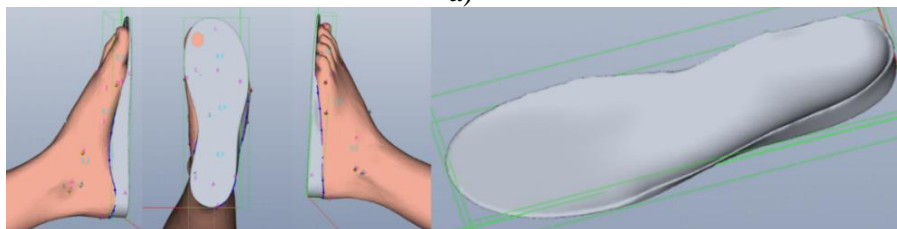


## 6. Modelul 3D final al talonetei

Fig.2.3. Flux de lucru în Gensole pentru design-ul unei talonete personalizate



a)



b)

Fig.2.4. Personalizare în AceSole 3D: a) alegerea parametrilor; b) generarea modelului 3D

Utilizând software-urile ca Gensole, AceSole 3D și Autodesk Fusion 360, au fost proiectate, fabricate și utilizate trei design-uri de talonete de confort (Fig.2.6.), după cum urmează:

- Design 1: înălțime de 7 mm și zonă plată de așezare a piciorului;
- Design 2: înălțime de 8 mm în zona metatarsofalangiană, a călcâiului și a arcului plantar al piciorului, fiind o talonetă de susținere;
- Design 3: înălțime de 6 mm și zonă plată de așezare a piciorului.

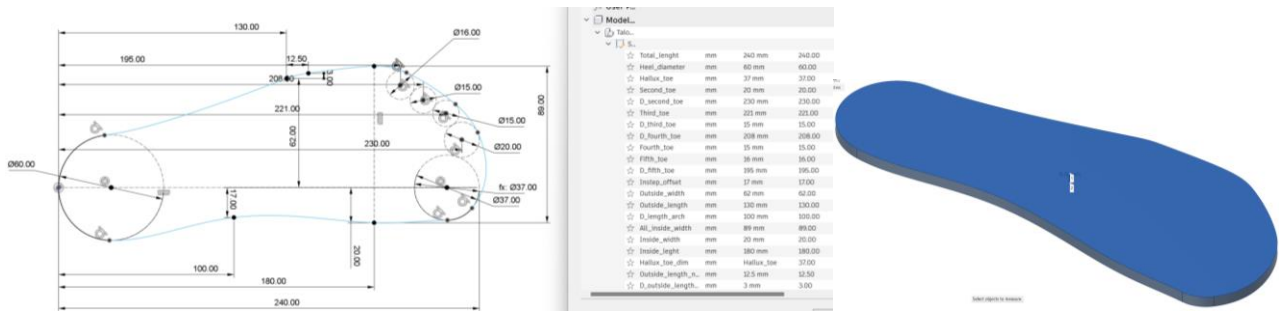


Fig.2.5. Generarea modelului 3D al talonetei plecând de la o schiță parametrizată în Fusion 360

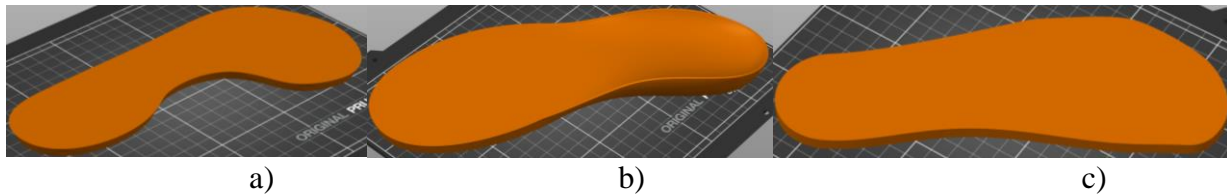


Fig.2.6. Design-uri de talonete de confort utilizate: a) Design 1; b) Design 2; c) Design 3.

## Concluzii, contribuții personale și diseminare

### Contribuții personale:

- Compararea a trei echipamente de scanare 3D din perspective care țin de accesibilitate, greutate și ușurința în utilizare, precizie, software dedicat, post-procesare și cerințe.
- Optimizarea procesului de scanare și post-procesare pentru modele 3D de picioare.
- Implementarea și evaluarea diferitelor programe pentru design-ul talonetelor personalizate.
- Dezvoltarea unui flux de lucru personalizat pentru proiectarea talonetelor.
- Generarea a trei design-uri distincte de talonete.

### Concluzii capitol 2:

- Cercetările au demonstrat eficiența utilizării tehnologiei de scanare 3D și a proiectării asistate în crearea talonetelor personalizate, obținând modele precise ale picioarelor utilizatorilor.
- Scanarea 3D fără contact a permis captarea precisă a formelor picioarelor, esențială pentru personalizare. Scanerele portabile au oferit rezoluție și precizie superioare, fiind ușor de utilizat.
- Aplicațiile software Gensole, AceSole3D și Fusion 360 au oferit opțiunile pentru dezvoltarea talonetelor personalizate, optimizate pentru nevoile utilizatorilor.
- Design-urile create au avut ca obiectiv confortul sporit, susținerea arcului plantar și distribuirea presiunii plantare pentru utilizatorii care petrec mult timp în picioare.
- Utilizarea scannerelor cu rezoluție mare și software-urile avansate au generat un volum mare de date, complicând etapa de post-procesare.

## Capitolul 3. Proiectare și realizare echipament pentru testarea la oboseală a talonetelor Secțiunea 1. Studiul echipamentelor existente pentru testarea talonetelor

Nu au fost identificate echipamente specifice dedicate testării la oboseală prin încovoieră a talonetelor, ci doar a tălpilor și pantofilor. Analiza a vizat înțelegerea soluțiilor existente și identificarea modalităților optime de proiectare și realizare a unui echipament dedicat talonetelor, luând în considerare atât funcționalitatea, cât și eficiența din punct de vedere al costurilor și timpului de execuție internă (*in-house*). Documentarea unei game variate de sisteme de testare la

oboseală a furnizat un fundamentul pentru dezvoltarea unui echipament similar. În acest context, a fost propus un design eficient, detaliat prin desenele componentelor prezentate în cadrul tezei de doctorat, pentru a putea fi reprodus.

### 3.1. Analiza echipamentelor existente

În continuare sunt prezentate două dintre cele mai relevante exemple de echipamente de testare, utilizate ca model în realizarea dispozitivului din teză. Detalii sunt prezentate în Anexa 1 a tezei.

1. SATRA Performance Footwear Testing [75] – este un echipament profesional, conceput pentru a evalua performanța și durabilitatea încălțămintei. Dispozitivul este compus din elemente care simulează mișcările și forțele exercitate asupra încălțămintei în timpul purtării (Fig.3.1).



Fig.3.1. Echipament SATRA de testare a durabilității pantofilor [75]

2. Whole Shoes Flexing Tester GT-KA01-2B [76] – este un echipament complex utilizat pentru testarea durabilității încălțămintei prin simularea mersului (Fig.3.2.).



Fig.3.2. Mașina de verificare a durabilității pantofilor GT-KA01-2B [76]

## Secțiunea 2. Proiectarea unui dispozitiv dedicat testării la oboseală a talonetelor

### 3.2. Proiectarea asistată a dispozitivului

Pentru proiectarea dispozitivului s-au avut în vedere două aspecte esențiale: analiza detaliată a mersului, descrisă în Capitolul 1, și cerințele specificate în standardul ISO 17707:2005 [77]. Acest standard definește metodele de testare a rezistenței la încovoiere a talonetelor, indicând că suprafața de așezare a talonetei trebuie să fie înclinată la un unghi maxim de 45° față de planul de așezare. Astfel, proiectarea acestuia a avut în vedere această cerință, precum și asigurarea următoarelor funcții esențiale: Solicitarea talonetelor la oboseală – echipamentul trebuie să imite condițiile reale de utilizare, aplicând stres repetitiv asupra talonetelor pentru a evalua durabilitatea acestora; Numărarea ciclurilor de încărcare-descărcare – echipamentul trebuie să măsoare numărul de cicluri la care sunt supuse talonetele, determinând performanța pe termen lung și rezistența la oboseală; Pe baza acestora au fost elaborate specificații mai detaliate de proiectare; Să permită cicluri repetate de mișcări de flexiune de-a lungul liniei naturale de flexare corespunzătoare zonei metatarsofalangiene; Să fie compatibil cu o gamă largă de dimensiuni ale talonetelor, de la cele potrivite pentru copii până la cele pentru bărbați adulți; Să permită aplicarea unei presiuni setate în zona metatarsofalangiană pentru a simula presiunea exercitată de masa corpului uman asupra talonetelor; Să fie rentabil din punct de vedere al costurilor (lemn, piese imprimate 3D, componente

mecanice standard); Să includă un contor pentru ciclurile de flexare; Să implementeze un program de control care combină faze de mers și de odihnă.

Pentru a asigura eficiența sistemului, s-a realizat un studiu detaliat al metodelor de fixare a talonetelor, luând în considerare specificațiile aplicației și presiunile plantare din zona degetelor și a calcaneului, identificate în Capitolul 1. Dimensiunile variabile ale talonetelor au impus dezvoltarea unui sistem de prindere personalizat care să asigure o fixare stabilă și precisă, esențială pentru obținerea unor rezultate de testare corecte și reproductibile. Astfel, componentele principale ale sistemului de prindere al talonetelor (Fig.3.3.) pentru standul de încercare sunt: partea de sprijin din față-zona corespunzătoare degetelor (1), sistemul de fixare a părții din față (2), balamaua (3) care face legătura între suprafața de așezare (4) și sistemul de prindere, și sistemul de fixare ale talonetelor în spate-zona călcâiului (5). Acest stand de încercare a fost proiectat cu două puncte de lucru, având scopul de a reduce timpul necesar pentru teste și de a crește capacitatea de verificare a talonetelor. Totuși, din rațiuni financiare, prototipul fizic a inclus un singur punct de lucru.

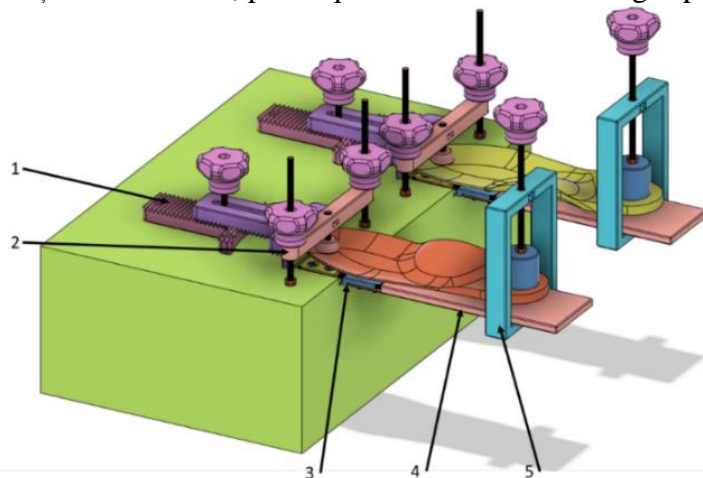


Fig.3.3. Sistem de prindere ale talonetelor în dispozitiv

Sistemul de mișcare a standului de încercare (Fig.3.4.) a utilizat principiul bielă-manivelă identificat ca soluție și în alte echipamente prezentate în secțiunea 1, pentru a transforma mișcarea de rotație în mișcare de translație. Mișcarea este generată de un motor de curent continuu (1), care este echipat cu un disc (2) montat pe arborele său de ieșire, fixat cu o piuliță pătrată (3) și un șurub (4). Această mișcare de rotație este transferată către biela ansamblului (5), care este atașată de discul (2) prin intermediul unui șurub (6), piuliță (7) și șaibă (8), formând astfel un maneton.

Pentru realizarea fizică a pieselor componente ale standului au fost generate mai multe desene de execuție cu ajutorul programului de proiectare asistată pe calculator Autodesk Fusion 360 pornind de la modelul virtual 3D al standului (Fig.3.5).

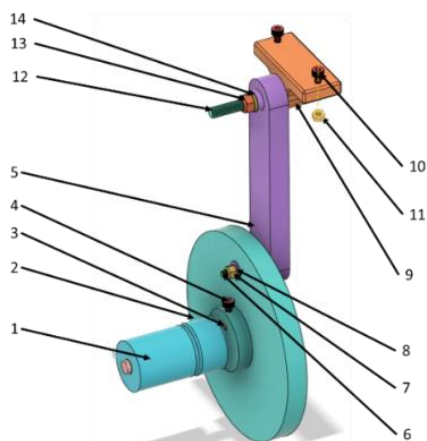


Fig.3.4. Sistem de mișcare al standului de încercare

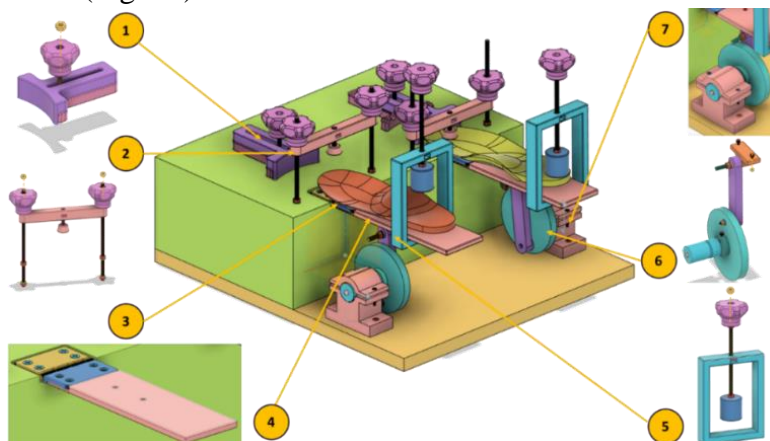


Fig.3.5. Stand de încercare – prototip digital

### 3.3. Precizia dimensională la fabricarea obiectelor prin MEX

Multe dintre componente ale standului de testare au fost proiectate pentru imprimare 3D pentru a reduce costurile. Standul a fost proiectat pentru asamblări demontabile prin șuruburi, menținând integritatea pieselor după demontări repetate. Precizia dimensională a găurilor pentru fixarea șuruburilor, influențată de parametri de imprimare 3D, este esențială. Literatura oferă informații limitate despre influența parametrilor precum grosimea stratului, viteza de imprimare și numărul de perimetre [78]. De asemenea, se detaliază impactul altor factori, cum ar fi temperatura de extrudare, temperatura patului și debitul de material [79–82], precum și efectul radiațiilor ultraviolete (UV) asupra comportamentului materialelor plastice, cum ar fi PLA și PET-G [83–85]. Pentru acest studiu, s-a proiectat o piesă de test cu 14 găuri de trecere de diametre variabile ( $\text{Ø}6$  mm,  $\text{Ø}8$  mm,  $\text{Ø}10$  mm) pentru a investiga influența parametrilor de proces asupra preciziei dimensionale [78].

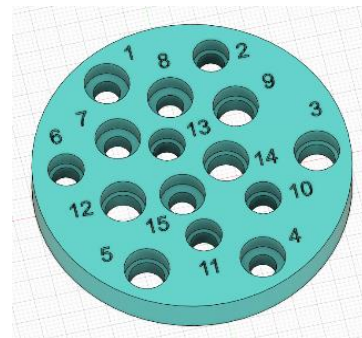


Fig.3.6. Piesa test

Tabelul 3.2. prezintă valorile medii ale diametrelor găurilor, precum și informații privind timpul de imprimare pentru fiecare specimen (furnizate de Prusa slicer). Diametrul mediu pentru fiecare grup de diametre a fost calculat pe baza măsurătorilor cu șublerul pentru fiecare dintre cele douăsprezece piese de testare.

Tabel 3.1. Parametri de proces constanți și variabili [77]

Parametri de proces constanți		Item	Parametri de proces variabili		
			Număr de perimetre	Înălțime strat (mm)	Viteză de imprimare (mm/s)
Diametru duză	0.4 mm	1	2	0.2	30
Debit material	100%	2	2	0.2	50
Viteză răcire	100%	3	2	0.2	65
Temperatură de extrudare	215°C	4	3	0.2	30
Temperatură pat	60°C	5	3	0.2	50
Densitate de umplere	15%	6	3	0.2	65
Model de umplere	Gyroid	7	2	0.32	30
Lățime strat	0.45 mm	8	2	0.32	50
Strat sus/jos	2	9	2	0.32	65
		10	3	0.32	30
		11	3	0.32	50
		12	3	0.32	65

Tabel 3.2. Rezultate măsurători diametre găuri specimene [77]

Specimen	10 mm– Valori medii diametre	8 mm– Valori medii diametre	6 mm– Valori medii diametre	Timp fabricație	Eroare (mm)
1	9.866	7.873	5.876	2h 44 min	0.134
2	9.864	7.868	5.844	2h 26 min	0.136
3	9.837	7.840	5.824	2h 25 min	0.163
4	9.800	7.803	5.816	3h 7 min	0.200
5	9.812	7.809	5.785	2h 42 min	0.188
6	9.826	7.778	5.762	2h 36 min	0.174
7	9.784	7.750	5.753	2h	0.216
8	9.774	7.727	5.734	1h 51 min	0.226
9	9.758	7.728	5.688	1h 48 min	0.242
10	9.734	7.698	5.681	2h 12 min	0.266
11	9.718	7.683	5.639	1h 58 min	0.282
12	9.708	7.667	5.630	1h 54 min	0.292



Pentru investigarea semnificației statistice a efectelor parametrilor de proces asupra fiecărui diametru analizat, s-a efectuat o analiză de tip ANOVA (DF: grade de libertate; SS: suma pătratelor; MS: eroarea pătrată medie). Rezultatele prezentate în Tabelul 3.3. au arătat că pentru fiecare diametru, cel mai important factor de influență este grosimea stratului, urmat de numărul de perimetre și viteza de imprimare. În cazul acestui ultim parametru, *p-value* pentru cel mai mare diametru a indicat că viteza de imprimare nu influențează semnificativ precizia găurilor de 10 mm. Totuși, viteza de imprimare influențează precizia găurilor cu diametrul de 8 mm și 6 mm, deși este mai puțin relevantă decât grosimea stratului și numărul de perimetre.

Dintre cei trei parametri variabili aleși pentru studiu, s-a observat că înălțimea de strat este cel mai influent parametru, urmat de numărul perimetrelor și de viteza de printare. Viteza de imprimare nu are o influență semnificativă în produsul final, dar are influență în ceea ce privește timpul de imprimare. Astfel, se alege cel mai bun raport calitate/timp (Fig.3.7.).

Experimentul a confirmat concluziile lui Hernandez et al. [86], care au observat că o grosime mai mare a conturului (0.4 mm și 1.6 mm) și o viteză mai mare de imprimare cresc deviația dimensională a găurilor, similar cu concluziile studiului actual pentru trei diametre diferite. De asemenea, tendințele privind corelarea înălțimii stratului cu precizia dimensională au fost în concordanță cu rezultatele lui Herath et al. [87] și Zhu et al. [88].

Tabel 3.3. Rezultatele ANOVA pentru speciunile măsurate, pe fiecare categorie de diametre [77]

Sursă	DF	SS	MS	F-value	p-value
<b>Analiza varianței pentru găurile cu diametrul 10 mm</b>					
Perimetru	1	0.006769	0.006769	39.1	0
Grosime strat	1	0.02332	0.02332	134.7	0
Viteză	2	0.0004	0.0002	1.16	0.368
Eroare	7	0.001212	0.000173		
Total	11	0.031701			
R2: 96.18%	R2 ajustat: 93.99%				
<b>Analiza varianței pentru găurile cu diametrul 8 mm</b>					
Perimetru	1	0.010092	0.010092	143.83	0
Grosime strat	1	0.04296	0.04296	612.26	0
Viteză	2	0.001597	0.000799	11.38	0.006
Eroare	7	0.000491	0.00007		
Total	11	0.055141			
R2: 99.11%	R2 ajustat: 98.60%				
<b>Analiza varianței pentru găurile cu diametrul 6 mm</b>					
Perimetru	1	0.013736	0.013736	180.29	0
Grosime strat	1	0.05096	0.05096	668.85	0
Viteză	2	0.006189	0.003094	40.61	0
Eroare	7	0.000533	0.000076		
Total	11	0.071419			
R2: 99.25%	R2 ajustat: 98.83%				

Rezultatele au arătat că viteza de imprimare este cel mai puțin influent factor, ceea ce este relevant, deoarece aceasta afectează direct timpul și costul imprimării. De asemenea:

- Specimenul 1 a avut cea mai bună calitate, cu cele mai precise găuri.
- Specimenul 2 a oferit cel mai bun raport între calitate și timp, imprimarea durând cu 18 minute mai puțin față de Specimenul 1, fără a compromite semnificativ calitatea.

Cercetările din acest capitol au fost diseminate în lucrarea [77].

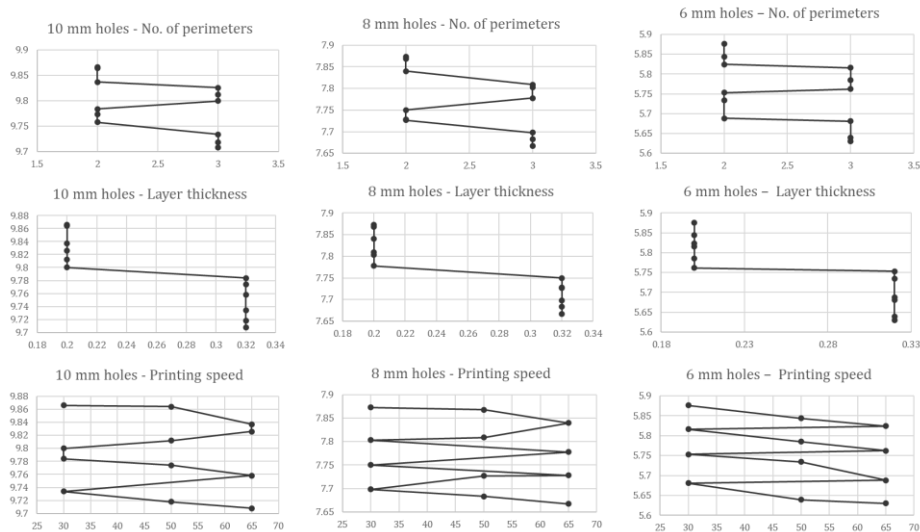


Fig.3.7. Influența parametrilor de proces

### Secțiunea 3. Realizarea fizică a dispozitivului dedicat testării la oboseală ale talonetelor

#### 3.4. Realizarea părții hardware

Pentru realizarea fizică a standului de încercare, metodologia aplicată, plecând de la modelul 3D CAD prezentat în Capitolul 3.2, a inclus următorii pași:

1. Alegerea materialelor și stabilirea necesităților:
2. Achiziția și/sau prelucrarea materialelor:
3. Asamblarea pieselor.

Asamblarea componentelor împreună cu materialele utilizate și prelucrarea lor, sunt prezentate pe scurt în continuare:

1. Cadru stand de încercare – fabricat din plăci de lemn
2. Mecanism de susținere a talonetei la partea din față, fabricat din PLA prin MEX (Fig.3.8.)
3. Mecanism de fixare a talonetei în zona degetelor, fabricat din PLA prin MEX și fixat de cadru (Fig.3.9.).



Fig.3.8. Asamblarea mecanismului de sprijinire – față



Fig.3.9. Asamblarea platbandei, mânerelor și a calapodului

4. Balama, fabricată inițial din PLA, după care a fost aleasă o variantă comercială pentru a asigura durabilitatea și fiabilitatea pe termen lung a standului de încercare.

5. Suprafața de așezare a talonetei, imprimată 3D din PLA
6. Mecanism de fixare a talonetei – spate, fabricat din PLA și PETG

7. Mecanism de acționare a standului de încercare, realizate din componente printate 3D și asamblate cu șuruburi. Discul care interconectează motorul cu biela reprezintă o componentă esențială ce necesită o precizie dimensională ridicată pentru găurile de trecere. În elaborarea acestei

pieșe, s-au utilizat datele obținute din studiul privind precizia dimensională a găurilor imprimate 3D [78]. Acest disc face legătura dintre motor și biela sistemului.

8. Sistem de prindere-fixare al motorului, fabricat prin imprimare 3D din PLA, asigurând o integrare precisă și stabilă a motorului în structura standului (Fig.3.10.), fiind montat ulterior pe cadrul de lemn al standului de încercare cu ajutorul șuruburilor pentru lemn.

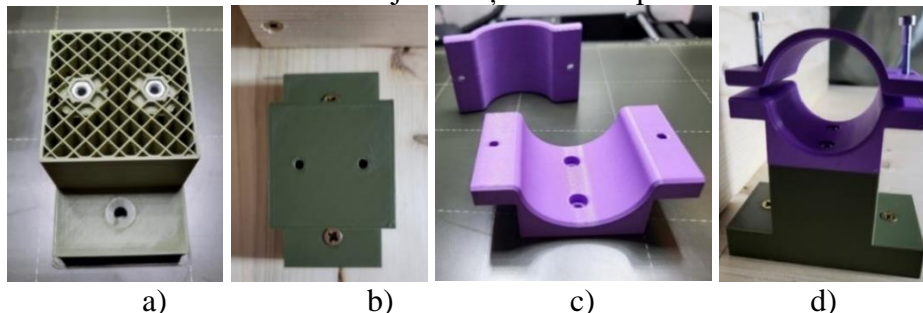


Fig.3.10. Suport motor V2: a) Piulițe imprimate în piesa fixă; b) Montare piesă fixă; c) Parte mobilă; d) Ansamblul sistemului de prindere-fixare a motorului standului.

### 3.5. Realizarea părții de comandă și control

1. *Realizarea programului de bază:* Standul de încercare a fost inițial testat folosind motorul pentru a evalua impactul funcționării acestuia asupra componentelor prototipului. Motorul a fost conectat la o sursă de 12V, atât cu piesa de probă montată, cât și fără. În urma testului, s-au identificat zone pe suportul motorului (părțile mobile) care necesitau rigidizare suplimentară. Acestea au fost reproiectate și consolidate conform noilor dimensiuni ale motorului și în raport cu partea fixă a suportului (Fig.3.11.). Motorul execută un ciclu complet de încărcare-descărcare la fiecare rotație, ridicând suprafața talonetelor la 45° (încărcare) și revenind la 0° (descărcare). Deși inițial era necesar un cod pentru controlul înclinării, funcționalitatea a fost integrată în proiectare. Biela permite atingerea unghiului maxim de 45° față de planul de așezare (Fig.3.12.).

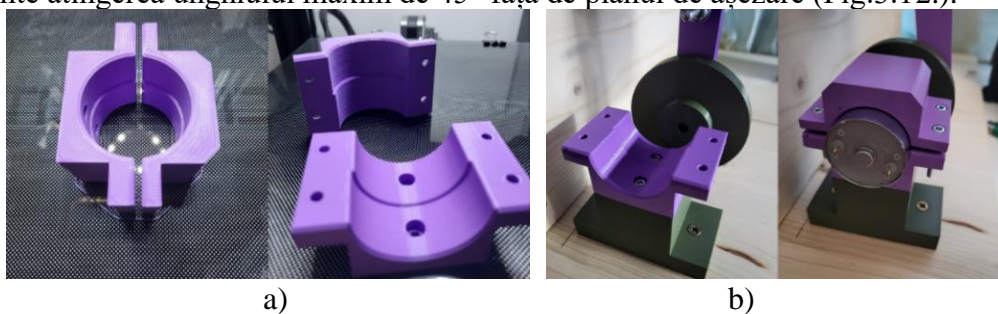


Fig.3.11. Suport motor: a) imprimarea noilor părți mobile – V3; b) Asamblarea părților mobile V3.



Fig.3.12. Suprafața de așezare la 0° și la 45° față de planul de așezare

2. *Realizarea funcțiilor generale ale standului:* Antrenarea standului de încercare s-a realizat printr-un circuit electric format inițial din următoarele componente: 1 x placă Arduino Uno; 1 x sursă de alimentare de 12V; 1 x motor de curent continuu - Moto-reductor Polulu 19:1; 1 x buton de pornire/oprire.

Programul pentru standul de încercare a fost dezvoltat în Arduino IDE și testat pe placa Creality V1.1.3.

## Concluzii și contribuții personale

### Contribuții personale:

- Analiza constructiv-funcțională a echipamentelor existente pentru testarea rezistenței la oboseală a pantofilor și tălpilor de pantofi;
- Determinarea influenței parametrilor de proces asupra preciziei dimensionale a găurilor obținute direct prin MEX;
- Proiectarea și realizarea unui stand de încercare la oboseală prin flexiune a talonetelor în zona metatarsofalangiană;
- Integrarea tehnologiei de imprimare 3D pentru fabricarea componentelor echipamentului;
- Dezvoltarea unui program de control pentru standul de încercare.

### Concluzii capitol 3:

- Standul de testare a talonetelor a fost eficient și conform standardului ISO 17707:2005, realizând solicitări repetate asupra talonetelor la un unghi de 45°. Echipamentul a oferit rezultate de testare precise și reproductibile, permițând evaluarea rezistenței la oboseală în condiții reale de utilizare;
- Imprimarea 3D a oferit flexibilitate și eficiență în fabricarea pieselor personalizate. Cercetările au arătat că precizia dimensională a găurilor pentru fixare depinde majoritar de grosimea stratului, în timp ce numărul de perimetre și viteza de imprimare au un efect mai redus. Rezultatele optime au fost obținute utilizând o înălțime a stratului de 0.2 mm și două perimetre;
- Imprimarea 3D a permis producerea unor componente durabile și precise, cum ar fi găurile destinate fixării șuruburilor, care și-au păstrat dimensiunile exacte în condiții de testare prelungite, demonstrând stabilitate în timp. De asemenea, tratamentul cu radiații UV a avut un efect limitat asupra preciziei acestor găuri, demonstrând că materialele și parametri aleși au oferit performanțe solide pe termen lung;
- Programul de control dezvoltat a permis automatizarea și monitorizarea eficientă a testelor. Sistemul a putut număra cu precizie ciclurile de încărcare-descărcare și a confirmat respectarea codului și a comenzilor motorului;
- Declanșatorul personalizat și fabricat prin imprimare 3D s-a dovedit eficient în numărarea ciclurilor de flexare, asigurând monitorizarea corectă a procesului de testare și reducerea erorilor în numărarea ciclurilor.

## Capitolul 4. Proiectarea și realizarea unui dispozitiv pentru măsurarea presiunii plantare

### Secțiunea 1. Confortul și metodele sale de evaluare

#### 4.1. Analiza studiilor existente

Confortul talonetelor poate fi definit ca starea de bine resimțită de utilizatori la nivelul picioarelor, manifestându-se atât ca o senzație fizică, cât și ca o stare psihologică, deseori combinând ambele aspecte simultan [89]. Această definiție implică, în principal, aspecte subiective care complică evaluarea precisă și consistentă a confortului, însă există și metode obiective de măsurare a confortului. În timp ce evaluarea subiectivă se bazează pe feedback-ul utilizatorului privind experiența și senzațiile percepute, evaluarea obiectivă utilizează instrumente și tehnici care măsoară caracteristici precum presiunea, distribuția presiunii și duritatea materialului.

S-au utilizat două metode de evaluare a confortului talonetelor: subiectivă și obiectivă.

*Evaluarea subiectivă* s-a bazat pe un chestionar personalizat în care utilizatorii au evaluat diverse aspecte ale confortului talonetelor (duritate, flexibilitate, rugozitate, susținere) pe o scară de la 1 la 5, unde 1 indică cel mai mic nivel de confort și 5 cel mai ridicat. Acest chestionar a fost

conceput pentru a identifica problemele de confort și a optimiza parametrii procesului de fabricație prin MEX.

*Evaluarea obiectivă* s-a concentrat pe măsurarea presiunii plantare, oferind datele despre distribuția forțelor exercitate asupra piciorului. Pentru măsurarea presiunii plantare, există o varietate de dispozitive și tehnici, inclusiv senzorii rezistivi, microcapsule, dispozitive de proiecție, traductori capacitivi și podoscoape. Aceste tehnici pot fi împărțite în două categorii principale:

- *Evaluarea calitativă* oferă imagini vizuale ale distribuției presiunilor pe suprafața plantară în timpul sprijinului bipodal sau unipodal. Aceasta metodă permite observarea directă a zonei de contact și a distribuției presiunii, facilitând identificarea zonelor cu presiuni excesive. În această categorie se încadrează: amprentarea plantară, podoscopul, pedobarograful, scanerile 2D și 3D.

- Tehnicile de *evaluare cantitativă* a presiunii plantare sunt utilizate pentru obținerea de date precise despre distribuția forțelor exercitate pe suprafața piciorului. Aceste tehnici utilizează dispozitive cu senzori pentru măsurarea precisă a presiunii plantare.

Soluțiile constructive pentru măsurarea presiunii plantare se împart în mai multe categorii: dispozitive pentru măsurarea presiunii piciorului gol sau *barefoot pressure measuring device*, dispozitive din interiorul încălțăminte (*in-shoe*), dispozitive dintre suprafața de sprijin și încălțăminte (*sole-shoe*), dispozitive pentru măsurarea forțelor de forfecare și/sau forțelor verticale.

În teza de doctorat, s-a optat pentru utilizarea dispozitivelor de tip *in-shoe*, care sunt integrate în talonete comerciale subțiri și flexibile. Aceste dispozitive măsoară exclusiv forțele verticale, oferind informații despre impactul diferitelor intervenții asupra confortului talonetelor. Datele astfel colectate sunt asociate cu valorile structurii de umplere (*infill*) a talonetei. Astfel, pentru evaluarea presiunii plantare, au fost utilizate două tipuri de dispozitive:

- Un sistem profesional *in-shoe* Pedar (Novel, Germania): care măsoară distribuția presiunii pentru monitorizarea sarcinilor locale dintre picior și pantof. Este echipat cu talonete dotate cu senzori capacitivi care captează variațiile de presiune exercitate pe suprafața plantară;

- Un sistemul dezvoltat *in-house*, conceput pentru a oferi o soluție economică, dar păstrând funcționalitatea esențială pentru analiza presiunii.

## Secțiunea 2. Achiziția datelor de presiunea plantară

### 4.2. Realizarea echipamentului de achiziție a datelor

Măsurarea presiunii plantare maxime s-a realizat cu ajutorul unei talonete care include 16 senzori acoperiți de un strat transparent de silicon (Fig.4.1. a), similară cu cea din [90]. Conform specificațiilor producătorului, senzorii de presiune au capacitatea de a măsura masele cuprinse între 500g și 10kg [91]. Această talonetă este partea hardware principală a sistemului de măsurare a presiunii plantare maxime în diferite zone ale piciorului. Pe lângă talonetă, sistemul include o placă Arduino Mega echipată cu un microcontroler ATmega 2560 și 16 intrări analogice pentru a conecta toți senzorii de presiune (Fig.4.2 b). De asemenea, în componența sa se regăsesc un circuit imprimat flexibil cu 20 de pini și pas de 1.0 mm, fire, o placă de proiect și rezistori de 470 k $\Omega$  (Fig.4.2.c.-d).

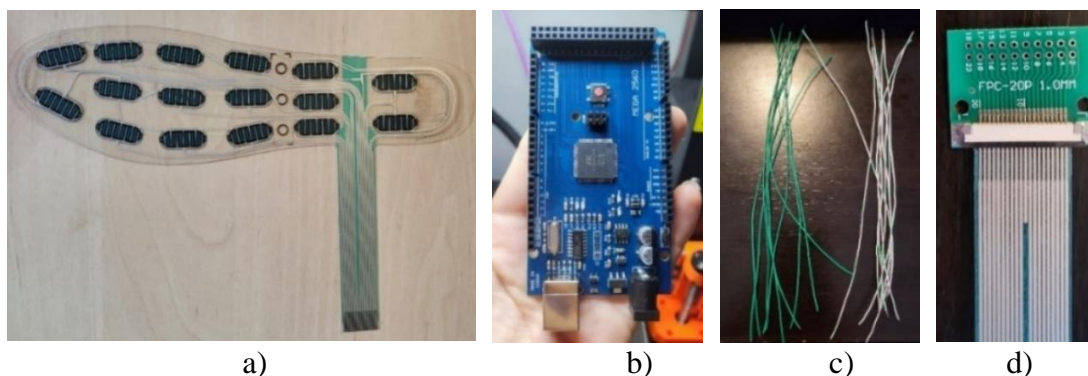


Fig.4.1. Componente: a) susținător plantar cu senzori; b) Arduino Mega; c) fire; d) FPC.

Prima etapă a implicat conectarea talonetei cu senzori la circuitul imprimat flexibil. Fiecare dintre cei 16 senzori a fost asociat cu o trasă specifică și un pin corespunzător pe circuit, iar taloneta a fost configurată cu 16 intrări analogice. Firele și rezistorii au fost conectați la fiecare linie, numerotând firele în funcție de senzorul corespunzător (Fig.4.2. a). Firele au fost apoi introduse într-o placă de proiect (Fig.4.2. b), iar rezistorii au fost așezați și conectați la 0V/masă și sursa de 12V. Ulterior, firele de conexiune cu placa Arduino au fost adăugate (Fig.4.2. c), un exemplu fiind ilustrat în Fig.4.2. d. Arduino a fost conectat la calculator și alimentat, pregătind sistemul pentru colectarea datelor de la senzori (Fig.4.2. e).

Pentru a asigura stabilitate și o poziție fixă a talonetei cu senzori a fost necesară proiectarea și imprimarea 3D a unui cadru din PETG. Șablonul care acoperă cadrul nu este în contact direct cu taloneta electronică, ci la o distanță de 0.2 mm de aceasta, pentru a evita orice influență nedorită asupra măsurătorilor. Pentru a asigura o presiune uniformă asupra senzorilor, s-a folosit un pad imprimat 3D din TPU Filaflex 70A, cu o densitate de umplere de 100% (Fig.4.2. f.).

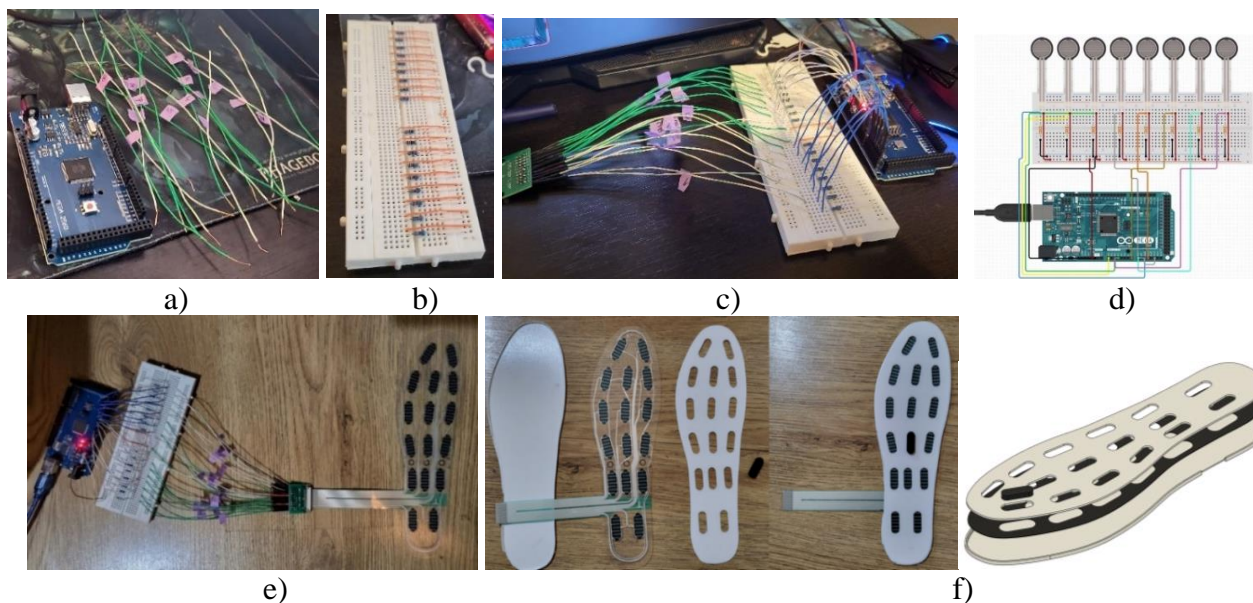


Fig.4.2. Conectarea componentelor: a) crearea și numerotarea firelor; b) placa de proiect; c) asamblarea componentelor; d) modul de conectare a elementelor; e) sistemul complet de măsurare a presiunilor plantare maxime; f) cadrul împreună cu șablonul și pad-ul pentru citirea datelor.

Programarea sistemului a implicat utilizarea a două platforme: Visual Studio Code pentru dezvoltarea interfeței vizuale și Python ca limbaj de programare, respectiv Arduino IDE pentru citirea și transformarea datelor provenite de la senzori.

În prima etapă de testare, a fost creat un cod în Arduino IDE, destinat să verifice fiecare senzor. Următoarea etapă a implicat crearea unui program pentru transformarea datelor colectate de la senzori în valori de presiune plantară. Pentru că senzorii nu prezintă o creștere liniară a valorilor, a fost necesară calibrarea acestora folosind mase de 500g, 1500g, 3000g și 4500g.

De asemenea, s-a inițiat dezvoltarea codului pentru interfața cu utilizatorul, care a inclus stabilirea conexiunii dintre interfață și datele transmise de Arduino. Pentru a facilita identificarea senzorilor, în interfață a fost creată o reprezentare grafică ce reflectă pozițiile corespunzătoare ale senzorilor de pe taloneta. Această reprezentare vizuală permite monitorizarea în timp real presiunea plantară pentru fiecare zonă specifică a piciorului, asigurând o evaluare detaliată și intuitivă a datelor.

Primele teste, realizate pentru doi utilizatori cu mase diferite și dimensiuni diferite ale piciorului (Fig.4.3.), au facilitat afișarea datelor într-un format accesibil și intuitiv, contribuind astfel la o mai bună interpretare a informațiilor colectate de la senzori. În timpul acestor teste, au fost identificate și anumite secțiuni din codul programului care necesitau dezvoltări suplimentare.

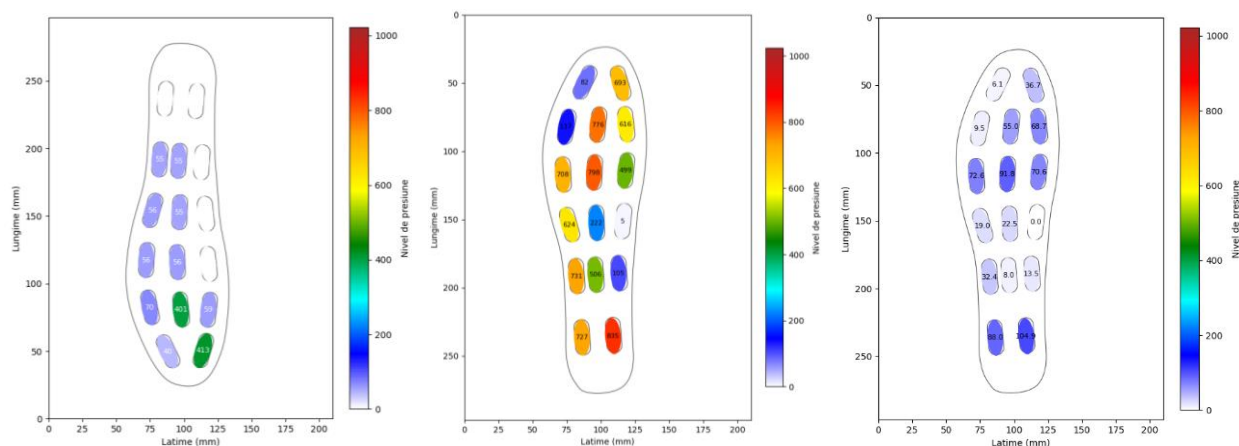


Fig.4.3. Testele de interfață pentru taloneta cu senzori

În urma testelor, s-a observat o diferență semnificativă între lățimea talonetei cu senzori și cea a talonetelor personalizate, ceea ce a necesitat introducerea conturului talonetei personalizate în interfața utilizatorului pentru o vizualizare corectă. Valorile măsurate au fost calibrate prin funcții matematice și transformate în valori de presiune plantară în codul Arduino. După testarea mai multor metode de calibrare, s-a optat pentru calibrarea individuală a fiecărui senzor folosind funcții exponențiale, care au oferit rezultate mai precise.

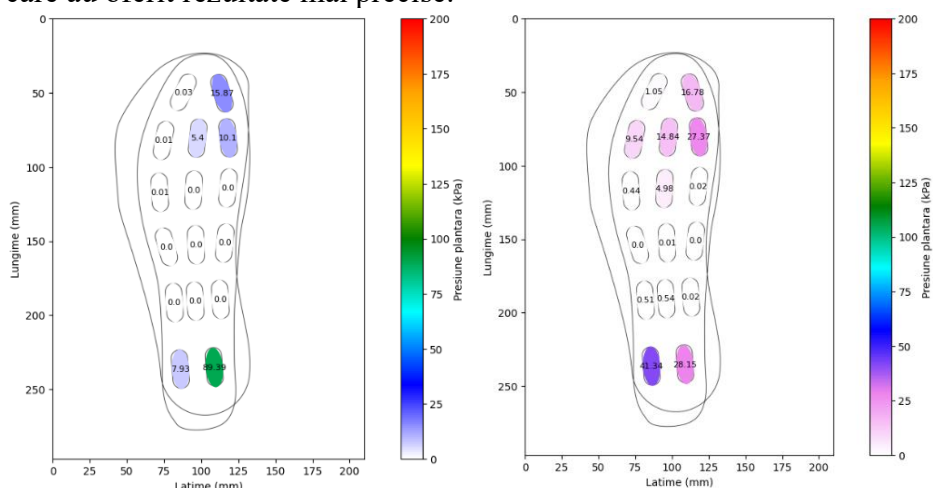


Fig.4.4. Interfața după calibrarea cu curba de calibrare

Funcția de calibrare exponențială acoperă un interval larg de valori, permițând interpretarea datelor. Această funcție acoperă un interval considerabil, valorile înregistrate pentru 500g fiind în jurul valorii de ~80 (citirea brută de la placa Arduino) și pentru 4500g în jurul valorii de ~112.5. Valorile obținute au fost integrate într-o interfață de utilizator dezvoltată în Python, contribuind la ajustarea densității și modelului de umplere al talonetelor, pentru redistribuirea presiunii și îmbunătățirea confortului (Fig.4.4).

O limitare a studiului a fost că sistemul dezvoltat pentru măsurarea presiunii plantare maxime, deși rentabil și accesibil comparativ cu echipamentele specializate precum sistemul profesional Pedar [16], nu poate actualmente evalua presiunea plantară în activități dinamice, precum mersul sau alergarea. Sistemul a colectat doar date despre presiunea statică, fiind util pentru proiectarea talonetelor destinate persoanelor care stau mult timp în picioare.

## Concluzii și contribuții personale

### Contribuții personale:

- Dezvoltarea unui sistem *in-house* pentru măsurarea presiunii plantare – talonetă cu senzori;
- Calibrarea individuală a senzorilor cu funcții matematice avansate;

- Dezvoltarea unei interfețe vizuale personalizate pentru monitorizarea presiunii plantare.

#### Concluzii capitol 4:

Pentru sistemul dezvoltat au fost formulate următoarele concluzii:

- Rentabilitate și accesibilitate - sistemul utilizează o talonetă cu 16 senzori de presiune, integrată cu o placă Arduino Mega, oferind o soluție financiar accesibilă și funcțională, potrivită pentru aplicații cu bugete limitate, fără a compromite calitatea datelor.
- Calibrare și precizie - prin trecerea la funcții exponențiale în loc de polinomiale, s-au obținut rezultate mai precise și mai consistente, reducând erorile sistemice și îmbunătățind măsurarea presiunii plantare.
- Integrarea și vizualizarea datelor - sistemul este integrat într-o interfață vizuală dezvoltată în Python, facilitând monitorizarea în timp real și optimizarea confortului talonetelor prin ajustarea densității și modelului de umplere.
- Limitări și aplicații - sistemul este eficient pentru măsurarea presiunii statice, dar nu poate evalua presiunea plantară în activități dinamice, fiind mai potrivit pentru utilizatorii care stau în picioare perioade lungi.
- Perspective de îmbunătățire - extinderea funcționalității prin integrarea de senzori avansați și calibrarea dinamică ar crește aplicabilitatea sistemului și precizia măsurărilor.

## Capitolul 5. Investigații privind fabricarea talonetelor imprimate 3D din PCL

### Secțiunea 1. FA prin MEX cu PCL

#### 5.1. Policaprolactona: proprietăți, utilizare, fabricație prin MEX

Analiza literaturii din Capitolul 1 a evidențiat mai multe materiale utilizabile în fabricarea talonetelor prin MEX, incluzând atât materiale moi pentru confort, cât și materiale rigide pentru susținere. Poli( $\epsilon$ -caprolactona) (PCL) a fost identificat ca un candidat promițător datorită biocompatibilității și biodegradabilității sale, fiind unul dintre puținii polimeri sintetici complet biodegradabili [92,93]. PCL este utilizat frecvent în aplicații medicale și are avantajul de a fi termoformabil la temperaturi scăzute, permițând personalizarea prin amprentare la cald a talonetelor.

Imprimanta utilizată pentru calibrarea și optimizarea profilului PCL a fost Creality Ender 3 cu incintă închisă, extrudor E3D Revo și pat din sticlă borosilicată. Înainte de fabricarea probelor, software-ul imprimantei a fost actualizat pentru a permite extrudorului să funcționeze la temperaturi sub 170°C, având în vedere că PCL necesită temperaturi mai scăzute pentru imprimare. Apoi, parametrii au fost ajustați (Tabelul 5.1.), iar rezultatele modificărilor au fost analizate vizual. Au fost realizate mai multe piese de probă cu diferite configurații ale acestor parametrii (Fig.5.1).



Fig.5.1. Teste de calibrare

În urma analizei probelor, s-a constatat că cele mai bune rezultate au fost obținute la următorii parametri: temperatura de imprimare variabilă (80°C pentru primul strat și 75°C pentru straturile ulterioare), temperatura patului de 45°C pentru primul strat și 50°C pentru restul straturilor, un debit



de material de 1 mm<sup>3</sup>/s și o viteză de imprimare de 10 mm/s. Între vitezele de 10 mm/s și 20 mm/s, nu s-au observat diferențe semnificative în dimensiunile pieselor, acestea având dimensiuni foarte apropiate. De asemenea, s-au imprimat și probe cu grosimi mai mari, dar temperatura optimă a patului, identificată în testele cu liniile C, nu s-a dovedit a fi adecvată pentru probele mai groase. Aceste probe au prezentat tendința de a se desprinde de pe platformă și de a se deforma (Fig.5.2.).

Tabel. 5.1. Parametrii variabili utilizați în fabricarea probelor

Parametru	Temperatură pat [°C]	Temperatură de printare [°C]	Viteză [mm/s]	Debit de material [mm <sup>3</sup> /s]
Valori	25 – temperatură cameră	70	10	0.9 1 1.1 1.4
	30	80 → 75	20	
	45	80	30	
	45 → 50	100	40	
	50	110	50	

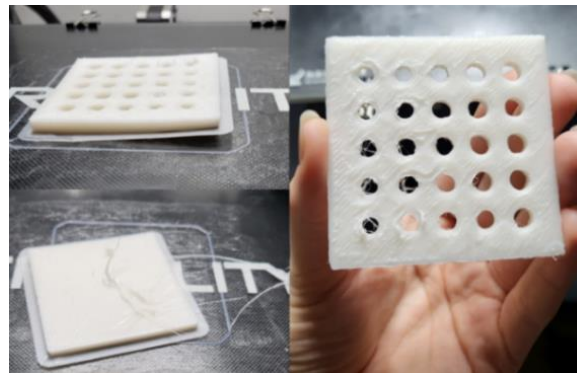


Fig.5.2. Desprinderea probelor și deformarea acestora

O problemă semnificativă în imprimarea cu PCL este acumularea de material pe duza de imprimare în timpul procesului. Din cauza răcirii lente, materialul se poate depune în alte zone ale piesei, provocând defecte. Pentru a îmbunătăți aderența și a minimiza aceste defecte, s-a decis dezactivarea răcirii pentru primele 4 straturi, după care răcirea a fost activată automat la 100%.

## 5.2. Comportamentul PCL-ului la diferite solicitări

Probele au fost supuse unor teste de termoformare pentru a verifica ipoteza că PCL se poate modifica în funcție de amprenta piciorului. De exemplu, proba cu găuri a fost expusă la apă fierbinte la 53°C timp de 1 minut, apoi a fost deformată. Inițial, piesa a prezentat fisuri ușoare, dar, în urma testelor suplimentare efectuate la o temperatură de 55°C, aceasta s-a rupt complet (Fig.5.3).

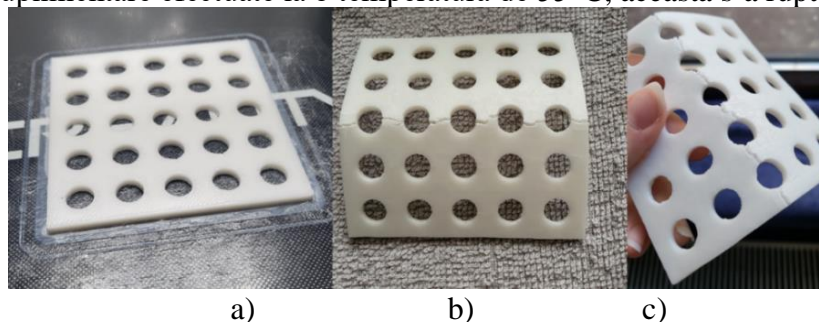


Fig.5.3. Probă cu găuri: a) proba imprimată aflată pe patul imprimantei; b) după prima termoformare; c) după a doua termoformare.

## Secțiunea 2. Fabricarea talonetelor din PCL

### 5.3. Stabilirea parametrilor de umplere pentru fabricarea prin MEX a talonetelor

Având în vedere că talonetele ar trebui să aibă densități variabile în diferite zone, în această etapă s-a trecut la stabilirea parametrilor de proces legați de densitatea de umplere. Specimenele de

test au inclus cuburi cu latura de 20 mm și forme simple de diferite dimensiuni, similare cu dimensiunile talonetelor. Parametri de proces utilizați sunt detaliați în Tabelul 5.2.

Tabel 5.2. Parametri de proces

Parametri constanți	Valori (strat 1 → strat 2)	Parametri variabili	Valori
Temperatură pat [°C]	45 → 50	Densitate de umplere	10% 20% 30% 40%
Temperatură de imprimare [°C]	80 → 75		
Viteză de imprimare [mm/s]	20		
Debit de material [mm <sup>3</sup> /s]	1		
Model de umplere	Gyroid		
Număr de contururi	0		
Răcire	0% → 100% (strat 4)		

Probele din PCL au fost testate pentru compresiune manuală, evidențiind diferențe de comportament în funcție de densitatea de umplere (*infill*). Proba de 10% s-a deformat plastic sub forță mică, în timp ce proba de 20% a prezentat deformări moderate sub o greutate de 50 kg, menținându-și flexibilitatea. Proba de 30% nu a suferit deformări semnificative, rămânând rigidă. O probă similară, V2, a fost testată pentru densități de 30% și 40%, constatându-se că, deși elastică la densitate de 30%, proba de 40% a prezentat fragilitate și s-a rupt la îndoire manuală.

În urma testelor efectuate, s-a observat că materialul PCL prezintă un comportament fragil la o înălțime a probei de 5 mm, potrivită pentru o talonetă de susținere. Această fragilitate a dus la ruperea probei sub solicitări, ceea ce limitează utilizarea sa pentru aplicația vizată. O talonetă completă imprimată cu setări optime, având designul din Capitolul 2, generat cu programul Gensole [74], a arătat zone de rigiditate variabilă, cu deformări în regiunile mai subțiri și rigiditate în cele mai groase (Fig.5.4).



Fig.5.4. Talonetă din PCL

## Concluzii și contribuții personale

### Contribuții personale:

- Analiza adecvării PCL pentru fabricarea talonetelor personalizate prin imprimare 3D;
- Calibrarea parametrilor de proces pentru imprimarea 3D a PCL;
- Testarea termoformabilității PCL.

### Concluzii capitol 5 și provocări:

- PCL-ul prezintă dificultăți în imprimarea 3D, având o răcire lentă și aderență dificilă la patul imprimantei. Ajustarea parametrilor precum temperatura extrudorului și patului, precum și viteza de imprimare, este esențială pentru a asigura calitatea suprafețelor.
  - Primul strat necesită o aderență bună la patul imprimantei, iar utilizarea unui pat din sticlă borosilicată a impus metode suplimentare pentru a asigura această aderență.
  - Parametrii optimi pentru piese simple nu s-au aplicat întotdeauna la piese mai complexe, fiind necesare ajustări și teste suplimentare.
  - PCL devine lipicios la temperaturi ridicate, limitându-i aplicabilitatea la condiții variabile de temperatură.
    - Densitatea și grosimea influențează comportamentul PCL-ului; piesele groase devin rigide și susceptibile la rupturi, iar cele subțiri sunt elastice, dar se deformează mai ușor.
    - Imprimarea la densități mari necesită timp suplimentar, fiind necesar un echilibru între densitatea de umplere și performanță.

- PCL-ul nu îndeplinește cerințele de performanță și durabilitate pentru talonete personalizate, având probleme de deformabilitate și rezistență la solicitări dinamice, fiind necesară explorarea altor materiale.

## **Capitolul 6. Investigații privind fabricarea prin imprimare 3D a talonetelor din TPU**

### **Secțiunea 1. FA prin MEX cu TPU**

#### **6.1. Stabilirea parametrilor de proces pentru imprimarea filamentelor de TPU cu diferite durități Shore A**

Au fost analizate filamente din TPU cu diferite durități Shore A pentru a evalua capacitatea acestora de a răspunde cerințelor specifice fabricării talonetelor personalizate prin imprimare 3D. Filamentele analizate includ: Filaflex de duritate 60A, 70A, 82A și PolyFlex 90A (Tabelul 6.1.). Analiza literaturii prezentată în Capitolul 1 a relevat că nu toate aceste filamente au fost studiate comparativ, ceea ce limitează specialiștii în podiatrie în alegerea materialului optim pentru fiecare pacient, în funcție de patologie și de distribuția presiunii plantare.

Tabel 6.1. Specificațiile producătorilor referitoare la materialele TPU studiate

Material	Densitate material [g/cm <sup>3</sup> ]	Duritate Shore A [HA]	Alungire material la rupere [%]
Filaflex 60A [94]	1.07	63	950
Filaflex 70A [95]	1.08	70	900
Filaflex 82A [96]	1.12	82	650
PolyFlex 90A [97]	1.12	90	586

Având în vedere că TPU se caracterizează printr-o elasticitate foarte mare și o alungire ridicată la rupere, acest aspect complică considerabil procesul de fabricație prin MEX. În cazul imprimantelor *low-cost* standard, imprimarea poate deveni chiar imposibilă fără ajustări tehnice semnificative. În acest context, teza de doctorat a avut ca obiective specifice OS7-99 identificarea soluțiilor tehnice și a parametrilor de proces care să permită fabricarea talonetelor personalizate pe imprimante 3D standard, fără a necesita modificări costisitoare. Astfel, pentru imprimarea tuturor print-urilor din teză a fost utilizată imprimanta Original Prusa i3 Mk3S+ (Prusa Research, Republica Cehă), echipată cu un extrudor E3D Revo 6 și cu Prusa Slicer ca software de tăiere.

#### **6.1.1. Etape pregătitoare înainte de fabricația prin MEX a TPU**

##### *a) Pregătirea filamentului.*

TPU este higroscopic și absoarbe rapid umiditatea din mediu, ceea ce impune deshidratarea filamentului înainte de imprimare. Durata deshidratării variază invers proporțional cu duritatea materialului. De exemplu, pentru filamentul Filaflex 70A, s-a aplicat un proces de deshidratare de 12 ore, urmat de deshidratarea continuă în timpul imprimării. Fără o deshidratare adecvată, TPU-ul poate suferi ruperea lanțurilor polimerice în timpul extrudării, afectând semnificativ calitatea pieselor imprimate (Fig.6.1.).



Fig.6.1. Filaflex 70A

##### *b) Pregătirea imprimantei 3D*

Imprimarea TPU necesită utilizarea unui extrudor de tip Direct Drive, care reduce riscul de blocare din cauza elasticității ridicate a materialului. Extrudorul E3D Revo 6 asigură un traseu neted pentru filament, prevenind înfundările. În comparație, un extrudor cu o duză standard nu este prelucrat la interior cu același nivel de precizie și poate prezenta abateri și/sau rugozități mai mari pe traseul filamentului.

### c) Pregătirea traseului parcurs de material

TPU, datorită aderenței sale ridicate, poate cauza blocaje în imprimarea 3D. Pentru a preveni acest lucru, filamentul trebuie să "curgă" liber, fără a fi ghidat prin tuburi care pot provoca îndoiri. Rola de filament a fost amplasată deasupra imprimantei, pe un suport special, pentru a facilita un flux uniform și a preveni blocajele (Fig. 6.2).

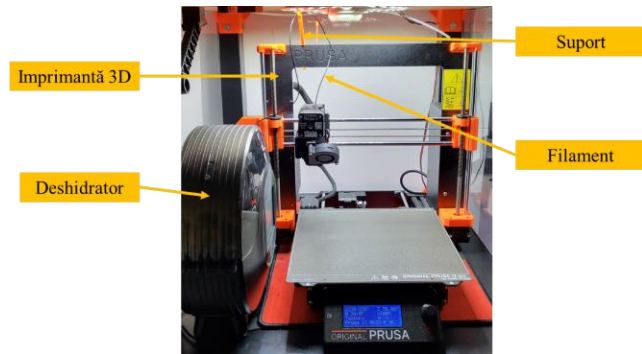


Fig.6.2. Configurația utilizată

### d) Pregătirea programului pentru imprimare

Pe baza recomandărilor producătorilor (Tabel 6.2.), s-a trecut la calibrarea parametrilor specifici imprimantei 3D utilizate, așa cum s-a procedat și pentru PCL (Capitolul 5). Această etapă este esențială pentru a asigura o imprimare optimă și pentru a obține rezultate de înaltă calitate, adaptând setările imprimantei (profile de printare) la cerințele specifice ale fiecărui material.

Tabel 6.2. Recomandările de la producători referitor la parametri de proces

Material	Temperatură de imprimare [°C]	Temperatură pat [°C]	Viteza de imprimare [mm/s]
Filaflex 60A	215 - 235	21	20 - 30
Filaflex 70A	215 - 235	0 - 40	20 - 40
Filaflex 82A	215 - 235	0	20 - 60
PolyFlex 90A	210 - 230	25 - 60	30 - 60

## 6.1.2. Filaflex 60A și Filaflex 70A

Filaflex 60A TPU [94] și Filaflex 70A TPU [95] de la Recreus (Spania) sunt elastomeri cu o duritate considerabil mai mică decât variantele obișnuite de TPU utilizate în imprimarea 3D. Cu o duritate Shore A de 60 și 70, aceste materiale sunt extrem de flexibile, iar imprimarea lor 3D a reprezentat o provocare semnificativă. Ele au fost analizate pentru a oferi opțiuni suplimentare de personalizare a durității talonetelor, în contextul lipsei informațiilor din literatură pe acest subiect, nefiind identificate nici ghiduri practice complete referitoare la problemele care pot apărea și la modalitățile de prevenire a acestora.

Problemele care pot apărea în cazul imprimării cu aceste materiale foarte flexibile:

- *Blocarea filamentului în extrudor* – apare atunci când filamentul nu este introdus corect în capul de imprimare (*hotend*), provocând blocaje datorate golurilor care pot rămâne între roțile de antrenare a filamentului și orificiul de intrare al acestuia.

- *Frecarea excesivă din interiorul duzei de extrudare* – apare din cauza dilatării termice a filamentului și a aderenței ridicate a materialului la interiorul duzei. Frecarea se intensifică atunci când se folosesc duze din oțel durificat cu o rugozitate mai mare sau când există o răcire insuficientă în zona de trecere prin canalul/tubul (*barrel*) care ghidează materialul către duză pentru extrudare.

- *Presiunea din interiorul părții calde a capului de imprimare termic (*hotend*)* – un diametru mai mic al duzei crește presiunea din interiorul capului de imprimare termic, ceea ce poate duce la probleme de extrudare. Astfel, diametrul duzei trebuie să fie invers proporțional cu presiunea generată în interiorul *hotend*-ului.

Aceste probleme au cauzat numeroase provocări tehnice în imprimarea filamentelor TPU Shore 60A și 70A, fiind necesară investigarea detaliată a multiplelor setări hardware și software pentru a asigura obținerea unor piese fără defecte.

Testele de calibrare au fost realizate folosind duze cu diametre de 0.4 mm și 0.6 mm. Pentru a calibra debitul de material extrudat, au fost utilizate specimene dreptunghiulare și cuburi cu dimensiunile de 30 mm x 20 mm x 0.65 mm și 10 mm x 10 mm x 10 mm, similar celor de la imprimarea PCL, pentru optimizarea imprimării 3D a fiecărui tip de TPU analizat.

### 1. Duza cu diametru de 0.4 mm

Pentru imprimarea TPU cu o duză de 0.4 mm este esențială o bună deshidratare a materialului deoarece, în interiorul duzei, presiunea crește, iar prezența umidității în material duce la blocarea filamentului chiar din momentul intrării în extrudor. Totodată, o temperatură de printare prea mică poate duce la blocarea filamentului încă de la începutul procesului de imprimare (Fig.6.3.a), în timp ce o temperatură prea ridicată poate deteriora filamentul sau suprafața piesei imprimate, din cauza degradării polimerilor care apare la temperaturi excesive în duză (Fig.6.3.b).

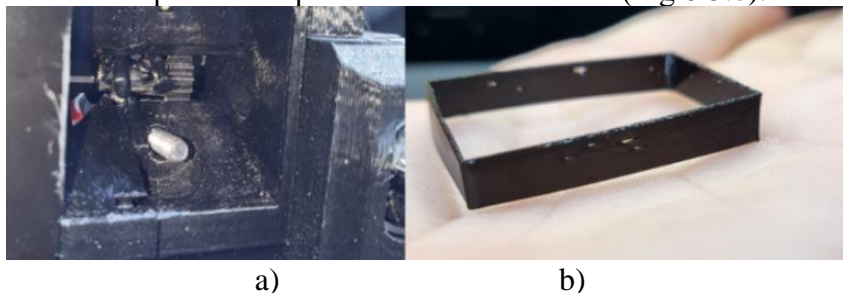


Fig.6.3. Filaflex 60A duză 0.4 mm: a) 215°C – blocarea filamentului; b) 235°C – suprafețe cu calitate redusă.

Plecând de la aceste observații și printr-o calibrare atentă a temperaturii de extrudare, precum și o răcire (prin ventilație) adaptată pentru dimensiunile mici ale pieselor, piesele de calibrare pentru duza de 0.4 mm au fost fabricate cu o calitate și o precizie foarte bună. Abaterile înregistrate au fost de  $\pm 0.05$  mm pentru speciunile dreptunghiulare și  $\pm 0.1$  mm pentru cuburi, atât în cazul Filaflex 60A, cât și în cazul Filaflex 70A.

### 2. Duza cu diametru de 0.6 mm

Calibrarea pentru duza de 0.6 mm a fost mai simplă, datorită experienței acumulate în rezolvarea dificultăților întâmpinate anterior cu duza de 0.4 mm. S-au utilizat aceleași probe de calibrare pentru a verifica dacă există vreo diferență semnificativă în debitul de material necesar pentru extrudare atunci când se trece de la diametrul de 0.4 mm la cel de 0.6 mm și dacă temperaturile optime identificate anterior sunt aplicabile și pentru această duză. Blocările filamentului au fost mai rare, datorită diametrului mai mare al duzei, care permite reducerea presiunii din interiorul capului de imprimare.

Tabel 6.3. Parametri de proces utilizați pentru imprimarea TPU Filaflex 60 A și 70A

Material	Temperatură de imprimare [°C]	Temperatură pat [°C]	Viteza de imprimare [mm/s]	Debit de material [%]	Viteza ventilatorului [%]
Filaflex 60A	Primul strat: 230 Următoarele: 225	0	20	100	50
Filaflex 70 A	228				Dezactivat pentru primele 3 straturi

### 6.1.3. Filaflex 82A & PolyFlex 90A

Filaflex 82A TPU de la Recreus (Spania) [96] și PolyFlex 90A TPU de la Polymaker (China) [97] reprezintă o altă categorie de elastomeri utilizați în imprimarea 3D, concepute să aibă o flexibilitate care să nu influențeze negativ viteza de imprimare, conform specificațiilor producătorilor. Aceste două materiale au o duritate Shore de 82A și, respectiv, 90A, și se remarcă printr-o rezistență excelentă la razele UV. Procesul de calibrare pentru aceste materiale a fost mai simplu, fără a necesita ajustări speciale, însă s-au urmat aceiași pași de calibrare descriși în secțiunea anterioară. Parametri de proces utilizați se regăsesc în Tabelul 6.4.

Tabel 6.4. Parametri de proces utilizați

Material	Temp. de imprimare [°C]	Temp. pat [°C]	Viteza de imprimare [mm/s]	Debit de material [%]
Filaflex 82A	240	40	20	115
PolyFlex 90A	215	Primul strat: 40 Următoarele: 0	30	98

## Secțiunea 2. Imprimabilitatea filamentelor de TPU cu duritate scăzută Shore A în contextul producției de talonete personalizate

### 6.2. Fabricarea talonetelor din Filaflex 60A și Filaflex 70A

A fost proiectat un model de talonetă plată utilizând Gensole (Capitolul 2) pentru a îmbunătăți confortul utilizatorului prin amortizare. Taloneta are o grosime de 6 mm, aleasă pentru a oferi suport și amortizare eficientă, păstrând integritatea formei în încălțăminte. Scanările efectuate cu Artec Eva Lite au fost folosite pentru personalizarea talonetei, având în vedere distribuția inegală a presiunii plantare. Ajustările pentru zonele cu presiune ridicată s-au realizat în Prusa Slicer, permițând ajustarea densității și a modelului de umplere în zonele țintă. Modificările parametrilor au fost introduse în G-code folosind corpurile modificatoare (Fig.6.4.).

#### 1. Evaluarea distribuției presiunilor plantare

Pentru a stabili corect parametrii de proces și a identifica zonele cu presiune plantară ridicată, s-a utilizat o metodă de amprentare a piciorului într-un model din lut, înainte ca taloneta cu senzori descrisă în Capitolul 4 să fie funcțională. Această abordare a permis o potrivire personalizată, adaptată contururilor piciorului, iar adâncimea amprentei din lut a oferit date despre presiunea plantară. Au fost create două matrițe pentru fiecare picior, imprimate 3D din PETG care au asigurat o distribuție uniformă a lutului. După amprentare, matrițele au fost încălzite la 60°C timp de 3 ore, apoi lutul solidificat a fost întărit complet la 150°C pentru 30 min. Ampretele obținute au fost scanate 3D cu RevoPoint Mini 3D și procesate cu software-ul Revo Scan 5 (Fig.6.5.).

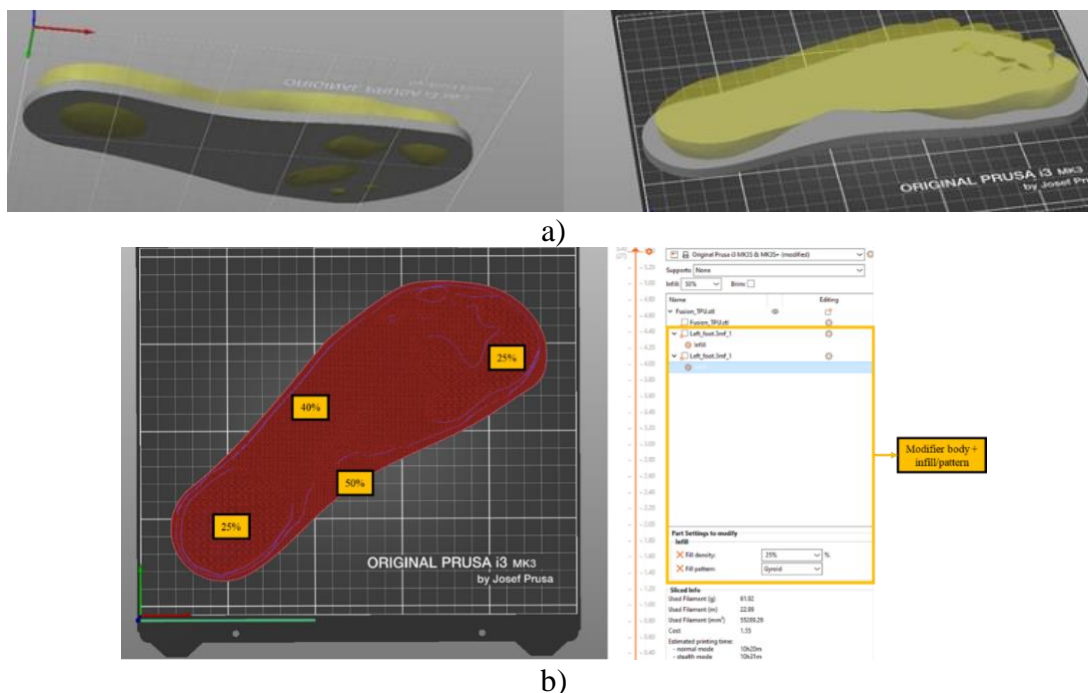
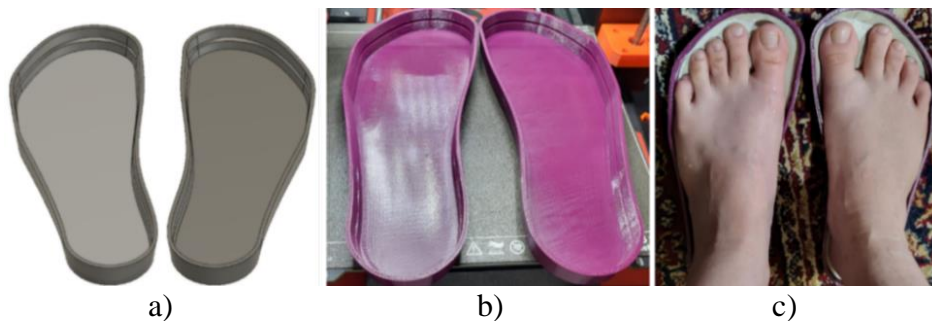


Fig.6.4. Prusa Slicer: a) corp modificator – *Modifier body*; b) zone modificate – *Mesh modifier*.



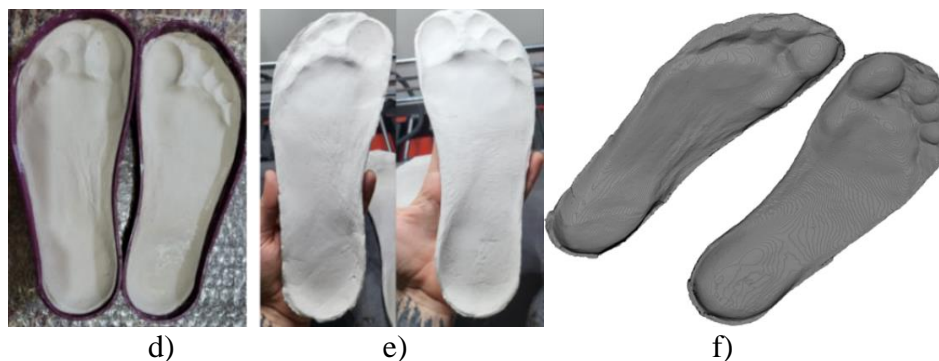


Fig.6.5. Evaluarea presiunii plantare maxime: a) modelarea 3D a matritelor; b) matrite imprimate 3D; c) formarea lutului; d) forme de coacere; e) lutul întărit; f) scanări ale amprentelor picioarelor.

Presiunea plantară a fost evaluată prin determinarea constantei elastice a lutului utilizat (producător Milan). Pentru aceasta, s-au aplicat mase de calibrare cu valori diferite asupra materialului, cu scopul de a aproxima presiunile prin măsurarea deplasărilor înregistrate pe modelul amprentat și ulterior scanat.

## 2. Determinarea durității talonetelor imprimate 3D

Această etapă a avut ca obiectiv corelarea valorilor de duritate ale unor probe test cu presiunile plantare determinate, pentru a putea stabili valorile de *infill* asociate din talonete, în funcție de aceste presiuni. Prin această abordare, s-a urmărit optimizarea structurii interioare a talonetelor, adaptând densitatea *infill-ului* pentru a oferi un suport adecvat în zonele cu presiune ridicată și confort în zonele cu presiune redusă. Pentru a determina duritatea talonetelor realizate cu diferite configurații ale parametrilor de proces din Tabelul 6.5., au fost imprimate 3D opt specimene paralelipipedice cu dimensiunile de 40 mm x 40 mm x 6 mm (Fig.6.6.). Duritatea acestor specimene a fost măsurată cu un durimetru Shore A. Valorile obținute au fost corelate cu rezultatele evaluării presiunilor plantare anterior determinate utilizând modelul din lut, pentru a personaliza densitatea de umplere a talonetelor, adaptându-le astfel la valorile înregistrate pentru fiecare zonă specifică a piciorului utilizatorului/pacientului.



Fig.6.6. Filaflex 60A – speciunile și măsurarea acestora cu durimetrul Shore A

Duritatea a fost calculată ca medie a 10 puncte aleatorii măsurate pe fiecare specimen. Modelele de umplere utilizate au fost de tip *gyroid* și cubic cu densitățile de 30%, 40%, 50%, 60%.

Tabel 6.5. Parametri de proces utilizați pentru producerea de talonete cu Filaflex 60A

Dimensiune specimen [mm x mm x mm]	No. Crt.	Model de umplere	Densitate de umplere [%]	Greutate [g]	Duritatea Shore A
40 x 40x 6	1	Cubic	30	2.89	8.6
	2		40	3.10	10.3
	3		50	3.71	20.75
	4		60	4.42	26.55
	5	Gyroid	30	3.40	15.65
	6		40	3.97	24.65
	7		50	4.50	28.85
	8		60	5.19	35.85

### 3. Parametri de proces pentru imprimarea 3D ale talonetelor din TPU

Modelele digitale ale amprentelor, obținute prin parcurgerea pașilor prezentați, au fost post-procesate pentru analiza și evaluarea grosimii. În acest scop s-a utilizat SolidWorks 2022 (Dassault Systèmes SE, Franța) – Fig.6.7.a. Din analiza rezultatelor s-a observat că cea mai semnificativă deformare pentru taloneta piciorului drept a fost 9.47 mm, iar pentru taloneta stângă, de 9.6 mm, ambele înregistrând aceste valori în zona călcâiului. Zona degetelor de la picioare a înregistrat, de asemenea, o valoare mai mare a presiunii plantare, dar nu și în zona metatarsofalangiană care a înregistrat o presiune mai mică (zone galbene). Cu toate acestea, această zonă este cea supusă solicitărilor ciclice de încovoiere. Zonele albastre indică o presiune plantară foarte mică în zona arcului. Fig.6.7. b) prezintă graficele de presiune pentru taloneta piciorului drept și stâng.

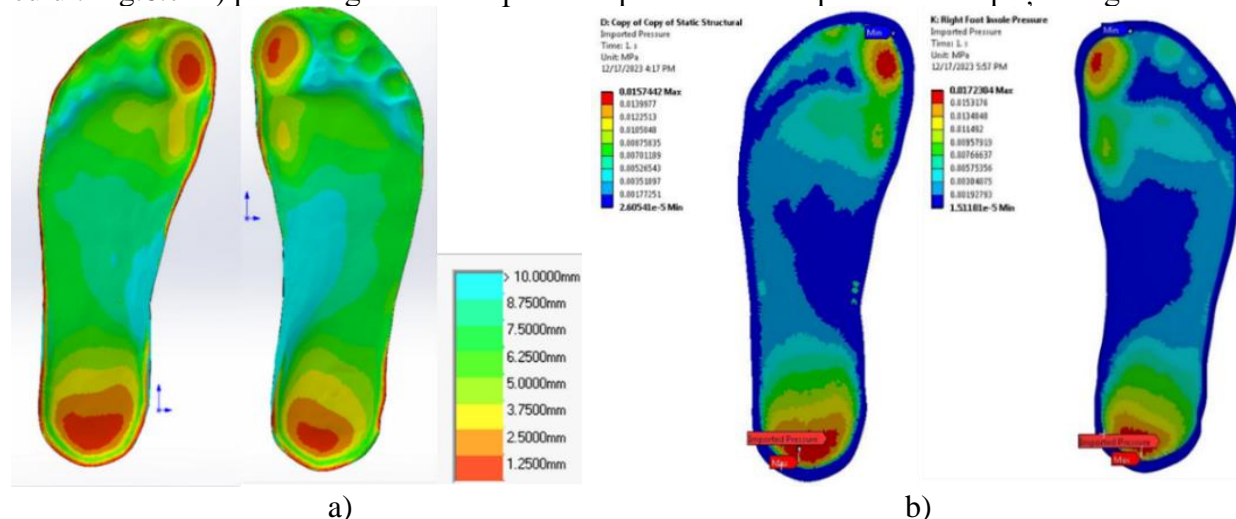


Fig.6.7. Analizarea amprentelor: a) Analiză de grosime cu SolidWorks vs. b) Presiunea plantară realizată cu ANSYS pentru taloneta piciorului stâng și drept.

O aproximare liniară este derivată pentru a descrie relația dintre deplasarea măsurată și constanta elastică ca:  $k = 1.131 \cdot x + 4.7501$  (1). Interfața de date externă de la ANSYS Workbench 19.0 a fost utilizată în scopuri de vizualizare. În ambele cazuri, presiunea maximă a fost concentrată în zona degetului mare și a călcâiului. Există o diferență semnificativă de 8.7% între cele două grafice, acest comportament fiind în concordanță cu aspectele prezentate în secțiunea anterioară.

### 4. Imprimarea 3D a talonetelor

În Tabelul 6.6. sunt prezentați parametri de proces utilizați pentru imprimarea 3D ale talonetelor din TPU 60A și 70A. Valoarea densității de umplere au fost personalizată pe baza evaluării presiunilor plantare și a valorii durităților (Tabel 6.5.). Astfel, au fost realizate câte două specimene pentru fiecare picior, acestea fiind ulterior testate și la confort. Specimenul 1 a fost imprimat cu 25% infill peste tot, iar Specimenul 2 a fost imprimat cu infill variabil: zonele cu verde a au fost imprimate cu 40%, iar cele cu presiune mai mare (zonele roșii din Fig.6.7. a) cu densitate de 50% (Fig.6.8.).

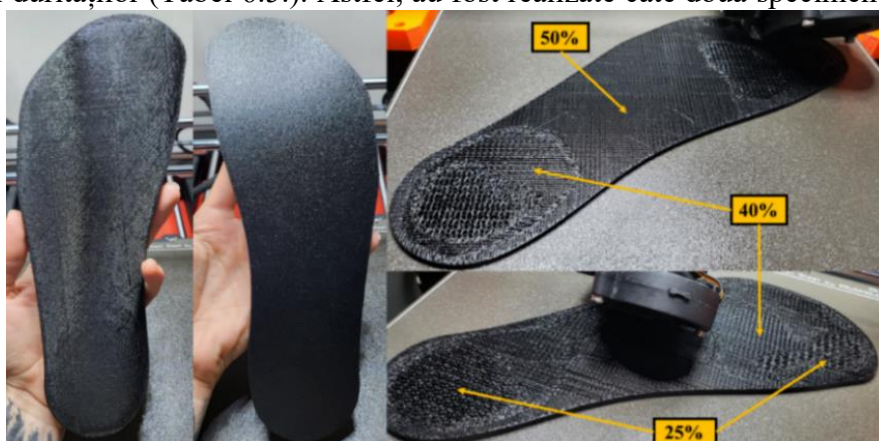


Fig.6.8. Filaflex 60A – Taloneta picior stâng (25%, 40% 50% densitățile de umplere)



Tabel. 6.6. Parametri de proces utilizați pentru imprimarea 3D ale talonetelor – Filaflex 60A

Parametri de proces	Valori
Temperatura de imprimare [°C]	Primul strat: 230; Celelalte straturi: 225
Temperatura patului [°C]	0
Viteza de imprimare [mm/s]	20, stratul plin superior; 25
Debitul de material [%]	1.03
Înălțimea stratului [mm]	0.2
Straturi sus/jos	3/2
Densitatea și modelul de umplere	Specimen 1: Gyroid, 50%
	Specimen 2: Gyroid 25% Zonele cu presiune mare, 40% și 50% celelalte zone

### 5. Evaluarea experienței utilizatorului

Talonetele au fost testate la mers normal, stat pe loc și sărituri de pe loc, timp de o oră, de un utilizator sănătos ale cărui amprente au fost folosite ca model. Concluzia este că utilizatorul preferă confortul oferit de Specimenul 2, deși și Specimenul 1 a fost considerat confortabil.

## Concluzii și contribuții personale

### Contribuții personale:

- Au fost analizate și testate filamente TPU cu durități Shore A (Filaflex 60A TPU, Filaflex 70A TPU, Filaflex 82A TPU și PolyFlex 90A TPU) diferite pentru a identifica soluțiile cele mai potrivite în fabricarea talonetelor personalizate;
- În lipsa unor date din literatură referitoare la printabilitatea și comportamentul acestor filamente, metodologia de imprimare și optimizare prezentată constituie o contribuție originală în domeniu;
- Au fost optimizați parametri de proces pentru TPU pe imprimante 3D standard:
  - Printr-o abordare de tip *trial-and-error*, au fost identificați și calibrați parametri optimi de proces pentru imprimarea TPU, asigurând obținerea de piese de calitate fără defecte majore, chiar și pe imprimante standard *low-cost*;
  - Testele au inclus ajustarea temperaturii de imprimare, a vitezei de imprimare, a răcirii și a debitului de material, pentru a depăși provocările întâmpinate cu TPU-uri foarte flexibile, precum cele de 60A și 70A.
    - Personalizarea densității de umplere a talonetelor utilizând metoda amprentării în lut;
    - S-a evaluat influența densității de umplere (*infill*) asupra durității talonetelor din TPU;
    - Imprimarea 3D a talonetelor personalizate și evaluarea lor;
  - Talonetele fabricate au fost testate de un utilizator sănătos pentru a evalua confortul și performanța lor în condiții de utilizare cotidiană. Evaluarea a indicat că talonetele cu densitate variabilă de umplere au oferit un confort superior în zonele cu presiune ridicată;
  - Au fost realizate două specimene pentru fiecare picior, iar diferențele observate în nivelul de confort și duritate au demonstrat eficiența metodologiei propuse.

### Concluzii capitol 6:

Filaflex 60A și 70A evidențiază provocările asociate cu aceste filamente cu flexibilitate ridicată, care necesită atenție în ajustarea parametrilor de proces pentru a evita blocajele în extrudor și degradarea calității suprafețelor. Temperaturile optime de imprimare sunt de 230°C pentru Filaflex 60A și 228°C pentru 70A, iar calibrările sunt esențiale pentru precizie. În schimb, imprimarea cu Filaflex 82A și PolyFlex 90A este mai ușoară. Filaflex 82A imprimă la 240°C, oferind calitate superioară, în timp ce PolyFlex 90A se poate printa și la 215°C. Ambele materiale asigură o bună aderență între straturi și stabilitate în timpul imprimării, fiind preferabile pentru aplicații ce necesită un echilibru între flexibilitate și durabilitate.

## **Capitolul 7. Investigații privind fabricarea prin imprimare 3D a talonetelor din varioShore**

### **Secțiunea 1. FA prin MEX cu varioShore**

#### **7.1. Stabilirea parametrilor de proces pentru imprimarea cu varioShore**

Dintre filamentele care încorporează tehnologie de spumare, opțiunile disponibile pe piață includ: Colorfabb LW-PLA și Colorfabb varioShore TPU. LW-PLA a fost subiect de interes în literatura curentă [98,99], dar varioShore TPU este mult mai puțin investigat, și prezintă potențial pentru aplicații de confort, în special în contextul fabricării de talonete [100,101]. În timp ce ABS este frecvent utilizat pentru fabricarea de ghiduri chirurgicale personalizate [102], PLA adesea folosit pentru orteze [103] pentru a menține rigiditatea articulațiilor, de exemplu, filamentele flexibile fiind recomandate pentru talonetele personalizate pentru diferite afecțiuni, cum ar fi piciorul diabetic [104].

Analiza literaturii nu doar că a permis colectarea informațiilor despre modul în care parametri de proces referitori la structura internă afectează rezistența la compresiune și duritatea, dar a arătat și lipsa datelor privind procesul de calibrare pentru TPU [105], în special în ceea ce privește filamentul varioShore TPU [106]. Aceste lacune a arătat necesitatea unor cercetări suplimentare pentru a optimiza procesul de imprimare și pentru a dezvolta ghiduri mai precise pentru utilizarea filamentului varioShore TPU în aplicații de confort.

Parametri de proces, precum temperatura de imprimare, viteza de imprimare, viteza ventilatorului sau debitul de material, au un impact semnificativ asupra gradului de spumare al filamentului, influențând astfel duritatea și rezistența la compresiune a pieselor imprimate [107]. Filamentele TPU cu agenți de spumare activi sunt sensibile la temperatura de imprimare. Sub acțiunea căldurii, acești agenți generează goluri în material, creând o structură poroasă care modifică duritatea și masa printului [107,108]. Fig.7.1. arată influența acestor agenți, investigațiile prin SEM (*Scanning Electron Microscopy*) fiind realizate la Facultatea de Știința Materialelor din cadrul Universității Politehnica București, utilizând microscopul Pro-X (Phenom-World, BV, Olanda). La 190°C, expansiunea porilor este minimă sau inexistentă (Fig.7.2. a). La 220°C, porii au o formă sferică (Fig.7.2. b), sugerând un grad mediu de spumare, iar la 240°C, porii devin mai mici și ovalizați sau aplatizați, indicând un grad mai mare de spumare (Fig.7.2. c) [109].

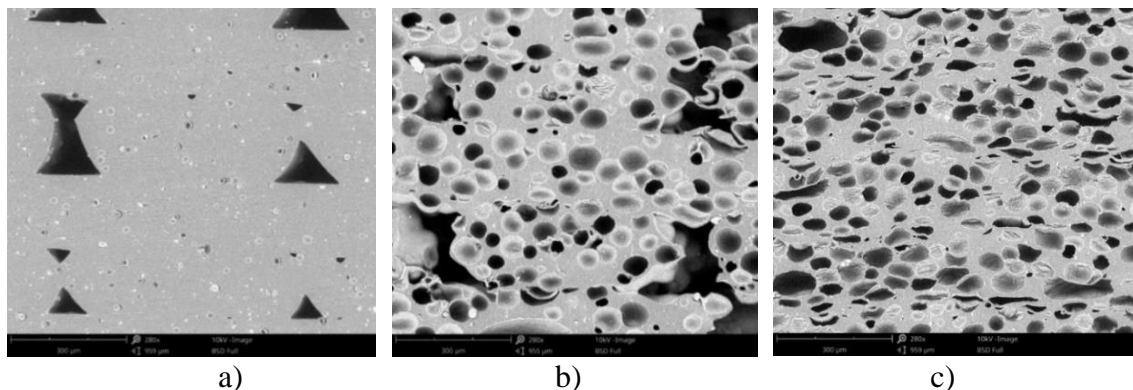


Fig.7.1. Structuri poroase specimene cilindrice – rezultate SEM: a) Specimen 190°C; b) Specimen 220°C; c) Specimen 240°C.

În Fig.7.2., structura poroasă a unui specimen paralelipipedic cu densitatea de umplere de 18%, imprimat la 190°C și 220°C, arată diferențele între cele două temperaturi analizate. Trecerea de la 190°C la 220°C a fost realizată prin codul G, folosind comanda M104 S220, iar debitul de material a fost ajustat de la 125% la 60% prin comanda M221 S48. La interfața dintre cele două zone se observă diferențe de culoare și densitate a porilor, fără întrepătrundere. La 220°C, agentul de spumare este activat, rezultând o structură poroasă, în timp ce la 190°C, spumarea este minimă sau inexistentă. În Fig.7.2. a, porii la 190°C au de ~33.5 μm, iar la 220°C dimensiunile ajung la ~223.5

$\mu\text{m}$  prin unirea mai multor pori. Într-o altă zonă (Fig.7.2. b), porii la  $190^{\circ}\text{C}$  au un diametru maxim de  $\sim 72.5 \mu\text{m}$ , în timp ce în Fig.7.2. c, la  $220^{\circ}\text{C}$ , porii ating dimensiuni de  $\sim 206 \mu\text{m}$ .

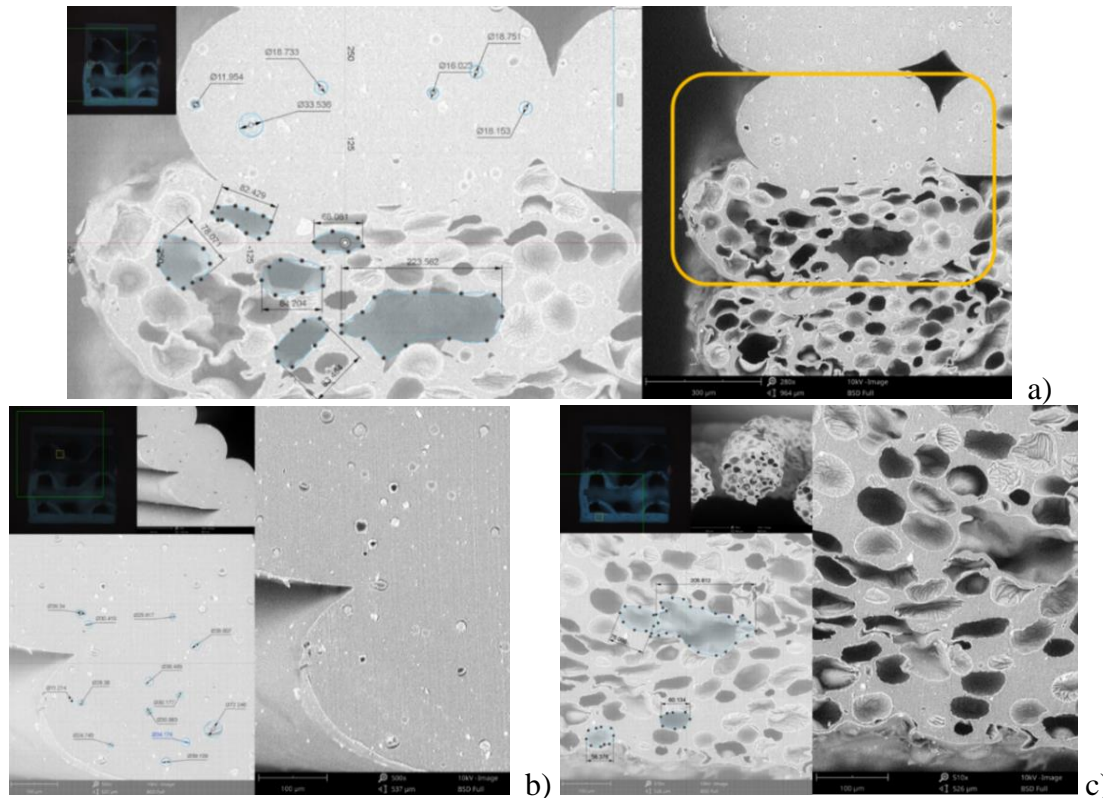


Fig.7.2. Specimen paralelipipedic – 18% densitate: a)  $190^{\circ}\text{C}$  și  $220^{\circ}\text{C}$ ; b)  $190^{\circ}\text{C}$ ; c)  $220^{\circ}\text{C}$ .

### 1. Calibrarea imprimantei pentru filamente de varioShore

În prima fază, filamentul varioShore a fost imprimat 3D folosind setările implicite ale profilului furnizat de slicerul Prusa. Temperatura de extrudare a fost setată la  $220^{\circ}\text{C}$ , iar debitul inițial a fost stabilit la 85%. Ulterior, a fost efectuat un test suplimentar, în care debitul a fost ajustat la 58%, conform valorilor de referință din [101]. Având în vedere că rezultatele obținute au corespuns cu cele raportate în studiul [101], s-a aplicat un proces incremental de reglaj fin pentru a atinge dimensiunile dorite. Scopul principal al acestei etape a fost reducerea abaterilor de debit, asigurând astfel o extrudare uniformă și precisă pe toată durata imprimării 3D.

Calibrarea debitului de material a fost realizat pentru toate temperaturile din Tabelul 7.1:

- Imprimarea specimenelor de calibrare: speciemele au fost realizate utilizând setările de temperatură stabilite pentru fiecare configurație de testare;
- Măsurarea dimensiunilor de gabarit și a lățimii liniei extrudate;
- Calibrarea debitului de material: debitul de material a fost ajustat pe baza dimensiunilor măsurate, pentru a atinge specificațiile dorite ale pieselor imprimate. Probele care au obținut cele mai bune cu valori dimensionale sunt prezentate în Fig.7.3.



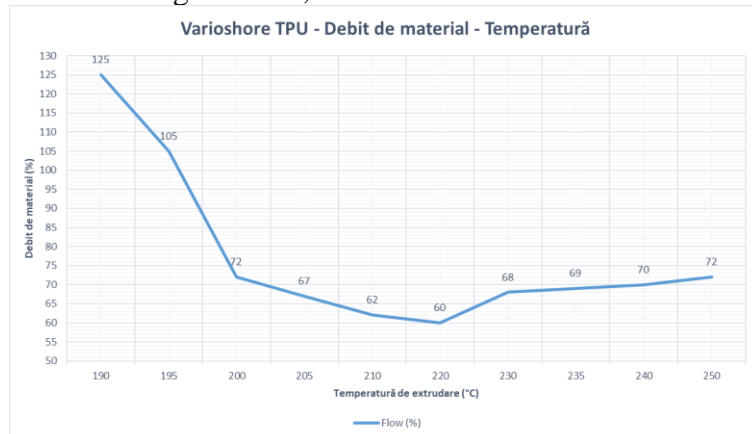
Fig.7.3. Probe de calibrare a debitului de material

Tabel 7.1. Parametri de proces utilizați pentru imprimarea cu varioShore

Specimen	Parametri variabili	Parametri constanți (10x10x10mm)	Parametri constanți (30x20x10mm)
	Temperatură de extrudare [°C]		
1	190	Diametru filament: 1.75 mm Temperatură pat: 50°C Densitatea de umplere: 30% Modelul de umplere: rectilinear Perimetre: 2 Sus/jos: 2 straturi Lățime strat: 0.65 mm Înălțime strat: 0.2 mm Viteză de imprimare: 35 mm/s Fără adeziv	Diametru filament: 1.75 mm Temperatură pat: 50°C Densitatea de umplere: 0% Modelul de umplere: none Perimetre: 1 Sus/jos: 0 straturi Lățime strat: 0.65 mm Înălțime strat: 0.2 mm Viteză de imprimare: 35 mm/s Fără adeziv
2	195		
3	200		
4	205		
5	210		
6	220		
7	230		
8	235		
9	240		
10	250		

Astfel s-au obținut valorile necesare pentru debitul de material în funcție de temperatură pentru imprimanta utilizată. Este important de menționat că fiecare utilizator trebuie să efectueze cu atenție aceste procese de calibrare pentru imprimanta proprie. Informațiile prezentate în această secțiune a tezei constituie o metodologie detaliată de calibrare, menită să servească drept ghid pentru ajustările necesare fiecărui echipament specific.

La o temperatură de 190°C, fluxul de material se comportă conform așteptărilor, menținând caracteristicile tipice pentru un filament TPU Shore 92A. Totuși, la 220°C, activarea agentului de spumare conduce la o creștere a porozității materialului extrudat, rezultând într-un volum mai mare. Această expansiune a materialului necesită o ajustare a debitului pentru a restabili precizia extrudării și a asigura conformitatea cu specificațiile dorite. Calibrarea parametrilor a fost urmată de fabricarea mai multor talonete din varioShore și testarea rezistenței lor la oboseală în comparație cu talonete cu design similar, dar fabricate din filamentele analizate în Capitolul 6.



Temperatură [°C]	Debit de material (%)
190	125
195	105
200	72
205	67
210	62
220	60
230	68
235	69
240	70
250	72

Fig.7.4. Curba debit – temperatură

## Secțiunea 2. Studiul comparativ al comportamentului la oboseală al talonetelor din diferite materiale TPU

### 7.2. Design, imprimare 3D și testare talonete confort personalizate

#### 7.2.1. Design-ul talonetelor

Primul tip de talonetă (design 1) are o înălțime de 7 mm și zona de așezare a piciorului este plată. Materialele utilizate pentru imprimarea acestora sunt Filaflex 60A, Filaflex 70A, Filaflex 82A (în variante de culoare albastru și negru), PolyFlex 90A și varioShore TPU – Fig.7.5. a) Cel de al doilea design de talonetă (Fig.7.5. b) are o înălțime de 8 mm în zona metatarsofalangiană, în zona călcâiului și a arcului piciorului și a fost imprimat cu filamente de Filaflex 82A, PolyFlex 90A și varioShore TPU.



Fig.7.5. Talonete pentru confort imprimate 3D: design 1 (a), design 2 (b)

### 7.2.2. Fabricația talonetelor prin MEX

Parametri de proces utilizați pentru imprimarea talonetelor cu Filaflex 60A, 70A, 82A și PolyFlex 90A se regăsesc în Tabelul 7.2, iar în Tabelul 7.3 se regăsesc parametri de proces pentru talonetele imprimate din varioShore.

Tabel 7.2. Parametri de proces utilizați pentru imprimarea cu Filaflex si PolyFlex

Material	Setări imprimantă 3D	Setări parametri
<b>Filaflex 60A</b>	Temperatură pat: Primul strat: 30°C Celelalte straturi: 0°C Temperatură de extrudare: 215°C Debit de material: 100%	Grosime strat: 0.3 mm Straturi superioare/inferioare: 1 Grosime minimă a pereților superiori/inferiori: 0.7 mm/0.5 mm Perimetre: 1 Densitate de umplere: 25% Model de umplere: Gyroid Viteză de imprimare: 15 mm/s Viteză ventilator: 30% Dezactivat pentru primele 4 straturi, complet la stratul 6
<b>Filaflex 70A</b>	Temperatură pat: Primul strat: 40°C Celelalte straturi: 0°C Temperatură de extrudare: 228°C Debit de material: 78%	Grosime strat: 0.3 mm Straturi superioare/inferioare: 1 Grosime minimă a pereților superiori/inferiori: 0.7 mm/0.5 mm Perimetre: 1 Densitate de umplere: 25% Model de umplere: Gyroid Viteză de imprimare: 15 mm/s Viteză ventilator: 30% Dezactivat pentru primele 4 straturi, complet la stratul 6
<b>Filaflex 82A</b>	Temperatură pat: 40°C Temperatură de extrudare: 240°C Debit de material: 115%	Grosime strat: 0.3 mm Straturi superioare/inferioare: 1 Grosime minimă a pereților superiori/inferiori: 0.7 mm/0.5 mm Perimetre: 1 Densitate de umplere: 20%, 25%, 40% în diferite zone ale talonetei Model de umplere: Gyroid Viteză de imprimare: 20 mm/s Viteză ventilator: 50% Dezactivat pentru primele 4 straturi, complet la stratul 6
<b>PolyFlex 90A</b>	Temperatură pat: 40°C Temperatură de extrudare: 215°C Debit de material: 98%	Grosime strat: 0.3 mm Straturi superioare/inferioare: 1 Grosime minimă a pereților superiori/inferiori: 0.7 mm/0.5 mm Perimetre: 1 Densitate de umplere: 20%, 50% în diferite zone ale talonetei Model de umplere: Gyroid Viteză de imprimare: mm/s Viteză ventilator: min. 30% - max. 50% Dezactivat pentru primele 4 straturi, complet la stratul 6

Tabel 7.3. Parametri de proces utilizați pentru VarioShore

Material	Parametri constanți	Parametri variabili
<b>varioShore 1</b>	Temperatură pat: 50°C Grosime strat: 0.3 mm Straturi superioare/inferioare: 1 Grosime minimă a pereților superiori/inferiori: 0.7 mm/0.5 mm Perimetre: 1	Temperatură de extrudare: 220°C Debit de material: 60% Densitate de umplere: 25%
<b>varioShore 2</b>	Model de umplere: Gyroid Viteză de imprimare: 35 mm/s Viteză de imprimare primul strat: 10 mm/s Viteză ventilator: 60% Dezactivat pentru primele 4 straturi, complet la stratul 6	Temperatură de extrudare: 190°C (pentru primi 1.4 mm) & 220°C Debit de material: 110% & 60% Densitate de umplere: 20%

varioShore a fost utilizat pentru fabricarea a două talonete (Fig.7.6.) prin reglarea temperaturii de extrudare la 190°C și 220°C, respectiv temperatura cu activarea cea mai mică a spumei active (echivalentă cu duritate cea mai mare) și temperatura cu activarea cea mai mare a acesteia (echivalentă cu duritatea cea mai mică), așa cum s-a prezentat în capitolul anterior. Se observă o diferență de culoare care indică cele două nivele de duritate ale materialului. Astfel, o talonetă (varioShore 1) a fost imprimată în întregime cu 220°C, iar a doua talonetă (varioShore 2) a avut primele 5 straturi imprimate cu 190°C și restul de straturi cu 220°C. Design-ul 1 a fost realizat cu setările varioShore 1 și 2 și design-ul 2 a fost imprimat cu setările varioShore 2. Densitățile de umplere ale talonetelor au fost uniforme pe întreaga suprafață de susținere.

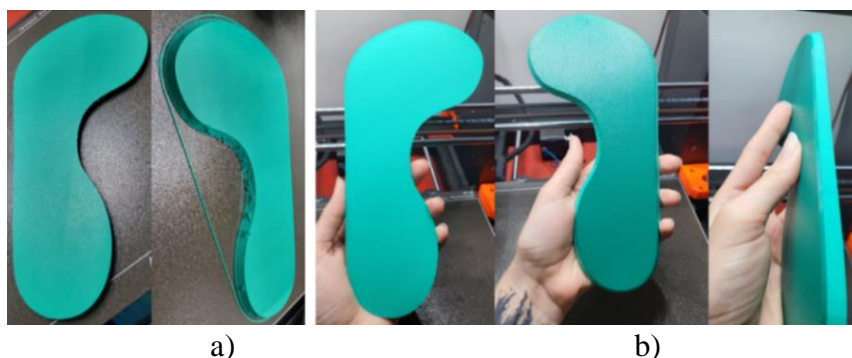


Fig.7.6. Talonete din varioShore a) Temperatura de imprimare 220°C; b) Temperaturi de imprimare 190°C și 220°C.

S-a observat o relație directă între debitul de material extrudat și temperatura de imprimare, ceea ce a impus calibrarea acestor parametri pentru a preveni erorile de imprimare. La temperatura de 190°C și debitul de 1.25 s-au întâmpinat dificultăți în extrudarea materialului din cauza caracterului său moale și a tendinței de încălzire rapidă în extrudor, în timp ce reducerea vitezei de imprimare a dus la deformarea filamentului. Testele au demonstrat că un debit de material de 1.1 oferă rezultate satisfăcătoare, deși au fost observate mici defecte la temperatura de 220°C, în special la modificarea unghiului de așezare a straturilor. Setările necesare pentru imprimarea talonetelor au fost realizate prin modificarea codului G direct din software-ul de secționare (*slicer*), introducând linii noi de cod pentru a optimiza procesul de imprimare.

### 7.2.3. Solicitarea la oboseală a talonetelor

Testarea la oboseală a talonetelor a fost realizată pe standul experimental prezentat în Capitolul 3. Totodată, talonetele au fost testate de către un utilizator sănătos, cu specializare în podiatrie.

În toate cazurile de testare pe stand, talonetele au fost solicitate în seturi de 7.000 de cicluri (această valoare fiind recomandarea medicală zilnică [110]), urmată de evaluarea lor vizuală și monitorizarea sunetelor distinctive generate de degradarea structurii interioare la apăsarea cu degetul. Testul a simulat purtarea zilnică a talonetelor și uzura acestora, cu alternarea perioadelor de solicitare la oboseală cu perioade de odihnă. În absența semnelor de degradare ale talonetelor, solicitările la oboseală au fost oprite după 700.000 de cicluri (pași).

Talonetele au fost solicitate după cum urmează:

### 1. Design 1:

- Filaflex 60A – solicitare la oboseală pe standul de testare;
- Filaflex 70A – solicitare la oboseală pe standul de testare;
- Filaflex 82A (albastru) – utilizare zilnică (testare utilizator) urmată de solicitarea pe stand;
- PolyFlex 90A - solicitare la oboseală pe standul de testare;
- varioShore 1 – solicitare la oboseală pe standul de testare;
- varioShore 2 – solicitare la oboseală pe standul de testare.

### 2. Design 2:

- Filaflex 82A (negru) – utilizare zilnică (testare utilizator);
- PolyFlex 90A solicitare la oboseală pe standul de testare;
- varioShore – solicitare la oboseală pe standul de testare.

#### 7.2.4. Testarea la uzura zilnică

Două dintre talonete (Filaflex 82A negru, design 1 și Filaflex 82A albastru, design 2) au fost solicitate la uzura prin purtarea zilnică a acestora de către utilizator. Cu taloneta din Filaflex 82A negru s-au parcurs cca. 200.000 de pași, apoi ea a fost depozitată într-un raft timp de aproape un an înainte de a fi solicitată la oboseală pe stand. Similar, pentru design-ul 2 din Filaflex 82A albastru, taloneta a fost purtată timp de 423.452 de pași de-a lungul a 203 zile/7.000 de pași/zi. După 310.000 pași, taloneta din Filaflex 82A, albastru, design 2 a fost evaluată cu sistemul profesional Pedar (Novel GmbH, Ge), datele fiind comparate cu talonetele originale din încălțăminte (Fig.7.7.).



Fig.7.7. Sistem de măsurare a presiunii In-Shoe Pedar: a) Talonete imprimate cu Filament 82A, albastru (stânga); b) Talonete originale ale încălțăminte (dreapta).

#### 7.2.5. Măsurarea durității talonetelor imprimate 3D

Duritatea talonetelor imprimate din TPU a fost evaluată cu un durimetru de tip A, prin măsurători efectuate în mai multe puncte pe suprafața acestora (Fig.7.8.) și prin calcularea mediei aritmetice a valorilor obținute. Imediat după fabricarea talonetelor, duritatea acestora a fost evaluată prin măsurători efectuate în 30 de puncte. După ce talonetele au fost testate la oboseală prin încovoiere, alte 30 de măsurători au fost realizate pe zonele cele mai solicitate ale talonetelor. Cea de-a doua măsurare a durității a fost efectuată la aproximativ 36-48 de ore după testarea pe stand.

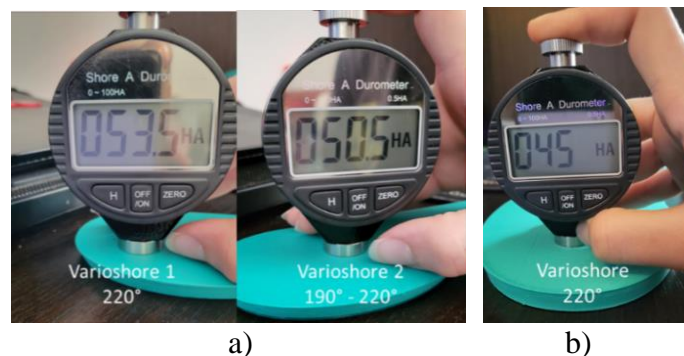




Fig.7.8. Măsurarea durității talonetelor varioShore: a) design 1; b) design 2; c) celelalte materiale.

Punctele măsurate inițial au fost selectate astfel încât să acopere întreaga suprafață a talonetei, în timp ce pentru talonetele testate, punctele s-au concentrat mai mult pe zonele în contact cu prinderile standului (zona din față a piciorului și călcâi). Măsurătorile finale au fost realizate după solicitarea talonetelor prin una sau ambele metode de solicitare la oboseală utilizate. Conform standardului ISO-7619-1-2004 [111], timpul de măsurare a unui punct cu durimetrul de tip A a fost de 3 s. Valorile durităților în cele 30 de puncte au fost utilizate pentru calcularea durității medii în starea inițială a talonetei ( $m_i$ ) și după testele de încercare la oboseală prin încovoiere ( $m_a$ ), precum și a deviației de la medie care a permis evaluarea varianței în setul de numere în comparație cu media.

### 7.2.6. Rezultate și discuții

În Fig.7.9.–7.11. sunt prezentate imagini ale talonetelor după testare, secționate pentru a evidenția eventualele modificări ale structurii interioare de tip gyroid. Starea suprafețelor exterioare a rămas intactă atât pentru talonetele testate în condiții reale, cât și pentru cele testate la oboseală prin încovoiere pe standul dedicat. Cu excepția talonetei fabricate din Filaflex 82A, negru, design 1, care a fost testată în condiții reale de purtare și ulterior pe standul de încercare, nicio altă talonetă nu a prezentat defecte în interiorul structurii în timpul solicitării pe stand. La taloneta din Filaflex 82A, negru, design 1, structura interioară a cedat după aproximativ 7.000 de cicluri pe standul de încercare, observându-se delaminarea straturilor (Fig.7.11). Ipoteza este că degradarea este rezultatul purtării în timpul verii (temperaturi ridicate și transpirație), dar și al îmbătrânirii, având în vedere că taloneta a fost testată după aproape un an, fiind depozitată în condiții necontrolate pe un raft. Totuși, sunt necesare studii suplimentare pentru a confirma sau infirma această ipoteză.

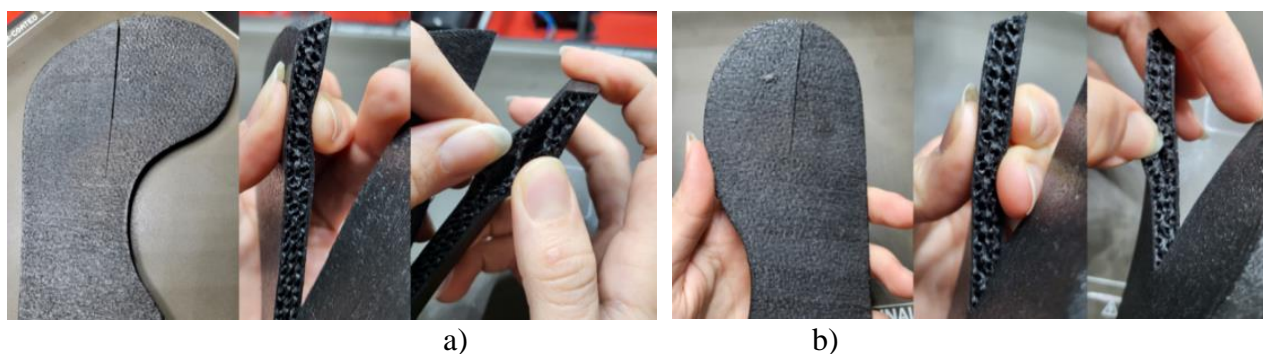


Fig.7.9. Taloneta din Filaflex 82A, negru (testată în condiții normale și urmată de solicitarea pe standul dedicat solicitării): a) Zona părți din față a piciorului; b) Zona călcâiului.

În Fig.7.11. este prezentată evoluția suprafeței exterioare a talonetei din varioShore 1, design 1 după un număr specific de cicluri. În zona călcâiului, urmele au dispărut rapid între ciclurile de testare, lăsând pe suprafață doar urmele de frecare produse de prinderile menționate. În zona din partea din față a piciorului, urmele lăsate de prinderi au fost mai adânci din cauza presiunii duble față de presiunea din zona călcâiului (175,6 kPa), însă, în timp, intensitatea acestora s-a redus mult, fără însă a dispărea complet.

Comparativ, urmele de compresiune lăsate pe talonetele din Filaflex și PolyFlex TPU au fost mai puțin proeminente. Observația a fost confirmată de utilizatorul talonetelor în timpul testelor de confort, acesta semnalând că deformațiile, percepute ca o reducere a rigidității, au apărut mai rapid la talonetele din varioShore comparativ cu celelalte. Același tip de comportament fost observat și pe



taloneta din Filaflex 82A, albastru, design 1, dar și pe taloneta pentru piciorul drept din Filaflex 82A, albastru, design 2, după 1.423.452 pași. Însă taloneta pentru piciorul stâng, care avea o densitate de umplere de 24% în zona metatarsofalangiană, nu s-a degradat. Astfel, s-a ajuns la că cercetările trebuie să continue cu infill variabil, cu densitate mai mare în zonele solicitate.

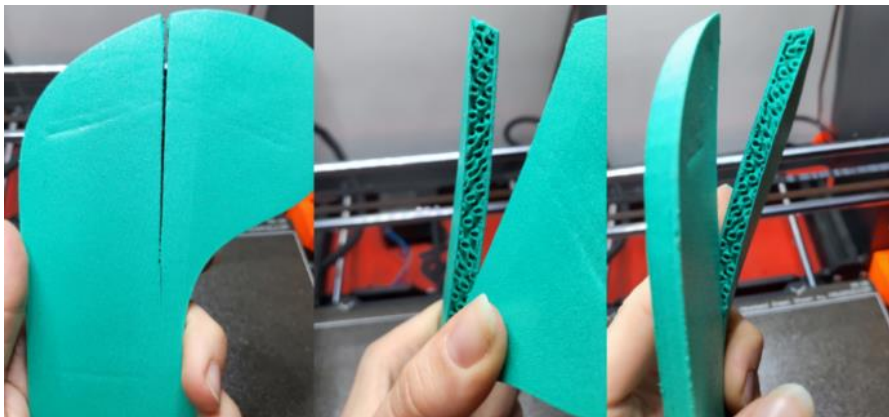


Fig.7.10. Taloneta din VarioShore 1 nu prezintă degradare a structurii interioare de tip gyroid



Fig.7.11. Evoluția talonetei din VarioShore 1 după: a) imprimare; b) 7,000 de cicluri; c) 42,000 de cicluri; d) 63,000 de cicluri; e) 98,000 de cicluri; f) 48 de ore.

Măsurarea presiunii plantare cu sistemul *in-Shoe* Pedar (Fig.7.12.) de la Facultatea de Mecanică și Mecatronică din cadrul Universității Naționale de Științe și Tehnologie Politehnica București și a firmei *Pedorthic Art* arătat o scădere a presiunii de vârf la purtarea talonetelor. Ceea ce înseamnă că talonetele imprimate 3D din TPU au capacitatea de a distribui presiunea plantară. În comparație cu taloneta originală a încălțăminteii, taloneta imprimată 3D din Filaflex 82A, albastru, design 2, reduce presiunea maximă observată în zona părții din față a piciorului, de la 250 kPa la 207 kPa (17% reducere) pentru piciorul stâng (24% densitatea de umplere) și de la 305 kPa la 280 kPa (9% reducere) pentru piciorul drept (20% densitatea de umplere). Aceste valori sunt mai mici față de cele furnizate de Birke et al. [112] pentru talonetele PORON pentru piciorul plat.

Pentru talonetele testate în condiții reale, deformația reziduală după 1.000.001 pași a fost în jur de 55% (4.4 mm din 8 mm) pentru densitatea de umplere cea mai mare și de 31.2% (2.5 mm din 8 mm). În literatura dedicată proprietăților fizice ale materialelor utilizate pentru talonetele destinate diabeticilor se raportează o deformație reziduală între 10% și 42% după 80.000 de cicluri [113].

Adițional testelor la oboseală și măsurării durtății, talonetele au fost evaluate și din punctul de vedere al confortului. Așa cum s-a menționat în Capitolul 4, utilizatorii au răspuns unui chestionar, după ce au purtat talonetele, pe rând timp de 15 min. Această evaluarea a confortului poate fi corelată doar cu senzația de amortizare, deoarece timpul de testare a fost prea scurt pentru a evalua și aspectele legate de transferul umidității și al căldurii care rămân un subiect deschis pentru studiile viitoare.

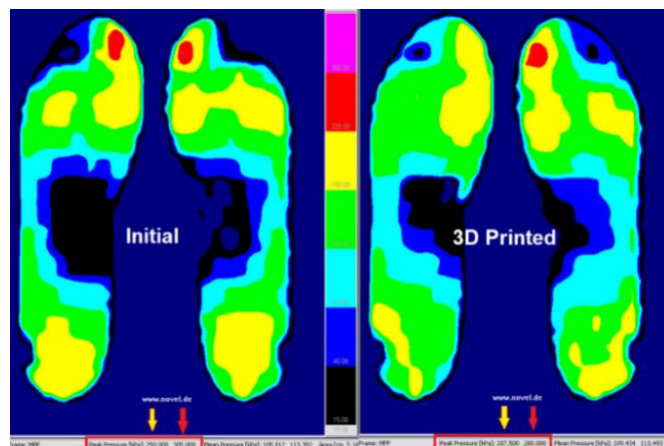


Fig.7.12. Rezultatele măsurării cu in-Shoe Pedar pentru taloneta Filaflex 82A, albastru, design 2

Tabelul 7.4. sintetizează cele mai importante rezultate ale testelor, incluzând duritatea Shore A și evaluarea la confort (scara Likert de la 1 – cel mai puțin confortabil la 5 – cel mai confortabil).

Fig 7.13. reprezintă grafic valorile durității Shore A pentru fiecare talonetă testată.

Tabel 7.4. Rezultatele testelor de duritate și confort

Specimen	Duritate înainte de testare (HA)	Duritate după testare (HA)	Tipul de degradare	Numărul de cicluri până la degradare	Numărul total de cicluri	Confort
Filaflex 60A design 1	3.5 – 12.5	2.5 – 11	Urme de compresiune și frecare	Fără degradarea structurii interioare	700.000	2
Filaflex 70A design 1	13.5 – 19.5	11 - 16	Urme de compresiune și frecare	Fără degradarea structurii interioare	700.000	4
Filaflex 82A negru design	49-58.5	44 – 55.5 (Zona degradată)	Structură internă	În jur de 7.000 de cicluri până când s-a auzit zgomot (Degradarea structurii interioare)	500.000 Urmă de 200.000 pași în utilizarea zilnică	1
Filaflex 82A albastru design 1	51.5 - 58	51 – 58	Ușoare urme de compresiune	Fără degradarea structurii interioare	700.000	1
PolyFlex 90A design 1	49 – 59.5	46.5 - 57	Fără degradare	Fără degradarea structurii interioare	700.000	2
VarioShore 1 design 1	53 - 60	50.5 – 58.5	Urme de compresiune și frecare	Fără degradarea structurii interioare	700.000	2
VarioShore 2 design 1	50 - 55	50 - 54	Urme de compresiune și frecare	Fără degradarea structurii interioare	700.000	5
PolyFlex 90A design 2	56.5 – 63.5	56.5 – 64.5	Urme de compresiune și frecare	Fără degradarea structurii interioare	700.000	2
VarioShore design 2	43 – 50	46 - 46	Urme de compresiune	Fără degradarea structurii interioare	700.000	3

Tabelul 7.5. prezintă rezultatele valorilor de duritate măsurată imediat după imprimarea 3D, respectiv după teste. Taloneta din PolyFlex 90A design 1 a prezentat cele mai puține abateri +0.03 între două măsurători. Cea mai mare abatere, observată la talonetele din Filaflex 70A cu o diferență de +0.45 de la valoarea măsurată inițial, urmată de varioShore 1 (design 1 și 2) cu -0.44 și +0.44.

În ceea ce privește modificările în duritate apărute după testarea talonetelor (valorile minime și maxime), s-a putut observa că talonetele cele mai puțin afectate de oboseala la încovoiere au fost cele din Filaflex 82A, albastru, PolyFlex 90A și varioShore 2, în timp ce cele mai afectate au fost Filaflex 60A și Filaflex 70A.

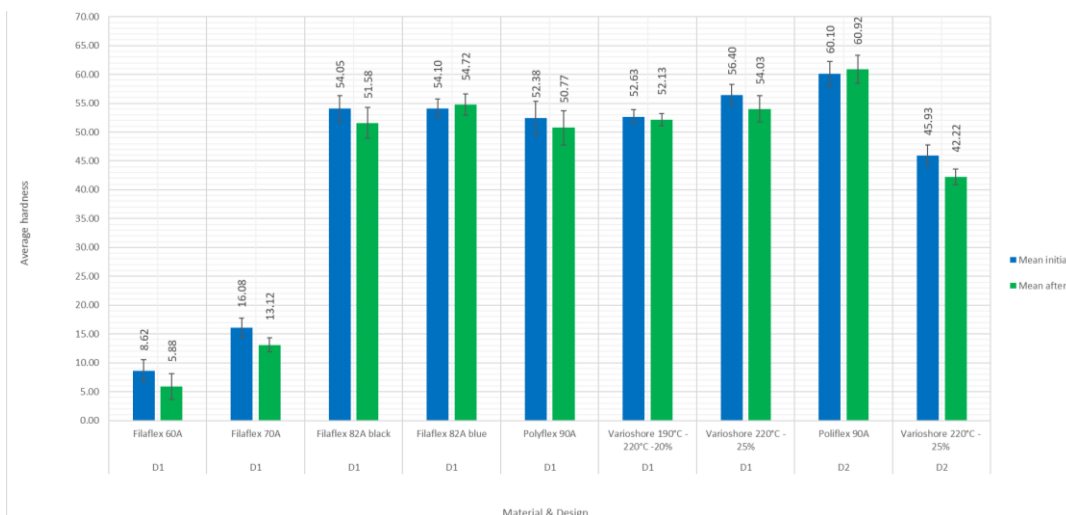


Fig.7.13. Duritatea Shore A: inițial – imediat după imprimare (albastru), după – după testare (verde)

Tabel 7.5. Deviația standard inițială (SD<sub>i</sub>) și după teste (SD<sub>a</sub>)

Material	Design	SD <sub>i</sub>	SD <sub>a</sub>	SD <sub>a</sub> - SD <sub>i</sub>
Filaflex 60A	D1	1.89	2.21	0.32
Filaflex 70A	D1	1.68	1.23	-0.45
Filaflex 82A negru	D1	2.30	2.65	0.35
Filaflex 82A albastru	D1	1.61	1.85	0.24
PolyFlex 90A	D1	2.93	2.96	0.03
varioShore 190°C – 220°C -20%	D1	1.22	1.07	-0.15
varioShore 220°C - 25%	D1	1.83	2.27	0.44
PolyFlex 90A	D2	2.18	2.44	0.25
varioShore 220°C - 25%	D2	1.80	1.36	-0.44

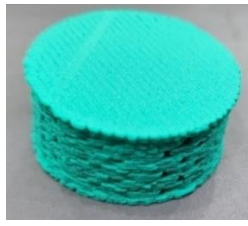
Din punctul de vedere al confortului, varioShore 1 se remarcă prin elasticitate, oferind o senzație amortizare a greutății corpului. Această talonetă are o deviație minimă față de măsurarea inițială, de -0.15, și o duritate de aproximativ 52A. Pe baza datelor din acest studiu comparativ, s-a concluzionat că varioShore este un material mai potrivit și mai versatil pentru aplicația de fabricare a talonetelor. Secțiunea 3 a acestui capitol se concentrează pe testarea la compresiune a acestui material, precum și pe testarea talonetelor utilizând taloneta cu senzori dezvoltată în Capitolul 4.

### Secțiunea 3. Studiul talonetelor personalizate din varioShore

#### 7.3. Efectul parametrilor de imprimare 3D asupra durității varioShore

În Tabelul 7.6. sunt prezentați parametri de proces investigați, pentru fiecare configurație fiind fabricate câte trei specimene cilindrice cu un diametru de 29 mm și o înălțime de 12.5 mm. Aceste specimene au fost măsurate cu durometrul pentru analiza durității și supuse testelor mecanice standardizate de compresiune pentru astfel de materiale. Duritatea speciemenelor a fost măsurată folosind durimetrul Shore A.

Tabel 7.6. Parametrii specifici pentru speciemenele cilindrice

Specimen	Parametri de proces variabili	Parametri de proces constanți
	<p>Temperatura de imprimare: Nivele: 190°C, 220°C, 240°C</p> <p>Densitatea de umplere: Nivele: 25%, 35%, 45%, Modelul de umplere: Nivele: gyroid, honeycomb</p>	<p>Temperatura pat: 0°C Debitul de material: 110%, 60%, 72% Grosimea stratului: 0.2 mm Număr de straturi sus/jos: 4 Viteza de imprimare: 35 mm/s Viteza ventilator: 70%</p> <p>Dezactivat pentru primele 4 straturi, viteză maximă la stratul 6</p>

Măsurătorile au fost realizate în zece puncte diferite pe suprafața speci­menelor, variația duri­tății fiind înregistrată ca un efect al densității de umplere. Valoarea medie a duri­tății pentru fiecare speci­men a fost calculată și comparată cu duri­tatea pieselor cu 100% densitate, utilizate ca referință.

Din măsurătorile de duri­tate în 10 puncte, au fost calculate valorile minimă, maximă, media aritmetică și abaterea de la medie, pentru a evalua variația în cadrul setului de valori măsurate în raport cu media lor. Pentru speci­menele cu densitate de umplere de 25%, s-a observat că modelul de umplere *honeycomb*/fagure imprimat la 190°C și 220°C oferă cea mai mare abatere standard de 2.57, respectiv 2.23 (Fig.7.14.).

Densitatea de umplere de 35% a produs speci­mene cu duri­tate mai uniformă, așa cum era de așteptat, cu o abatere standard scăzută, de aproximativ 0.34 pentru speci­menul 1, 240°C și 0.52 pentru speci­menul 3, 190°C, *gyroid* (Fig.7.15.). Explicația este că cu cât densitatea de umplere este mai mare, cu atât este mai puțin probabil să se măsoare duri­tatea Shore A în golurile produse de modelul de umplere. Astfel că densitatea de umplere de 45% a produs cele mai stabile speci­mene, cu o abatere standard de 0.39 pentru 190°C, *gyroid*. (Fig.7.16.)

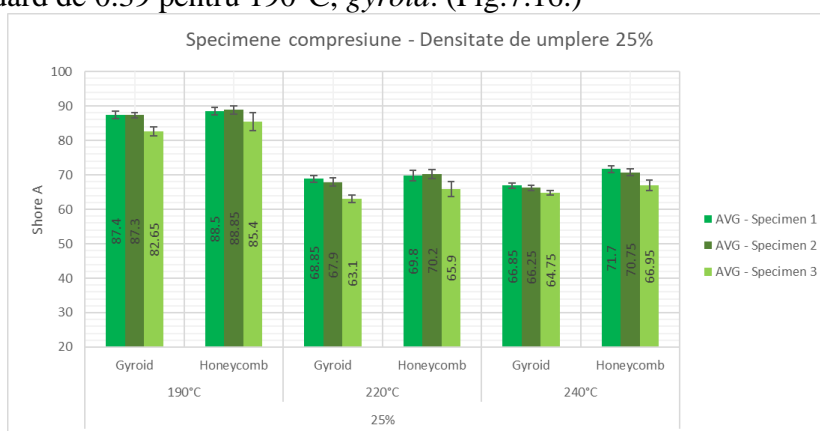


Fig.7.14. Duri­tate pentru speci­menele cu densitatea de umplere de 25% (valori medii pe speci­men)

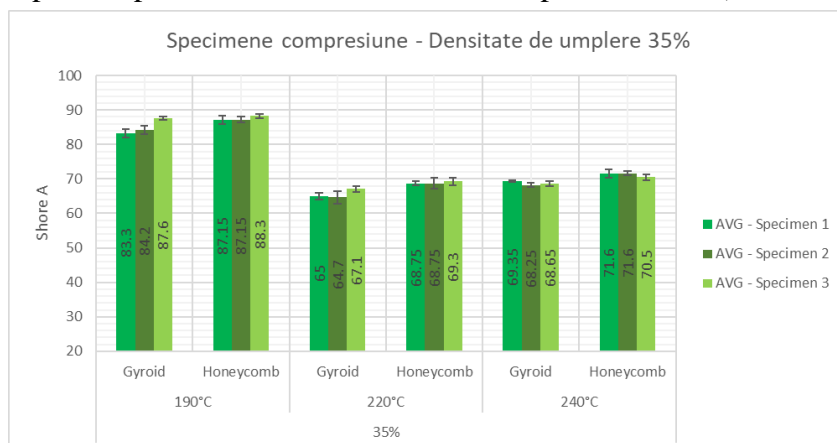


Fig.7.15. Duri­tate pentru speci­menele cu densitatea de umplere de 35% (valori medii pe speci­men).

În Tabelul 7.7. se prezintă sinteza datele în urma măsurării duri­tății utilizând valorile medii pentru trei speci­mene cu aceeași configurație a parametrilor de proces. *p-value* calculată utilizând ANOVA cu un singur factor a arătat o valoare foarte scăzută pentru datele privind temperatura de imprimare (nivel semnificativ 0.05), arătând că există o diferență statistic semnificativă a duri­tății în funcție de temperatura de imprimare/duză.

La 190°C duri­tatea rezultată depășește duri­tatea de la 220°C și 240°C deoarece duri­tatea de bază a materialului este Shore 92A (duri­tatea filamentului pe tambur). La 190°C, nu are loc spumare, astfel se păstrează duri­tatea originală a filamentului, acest lucru fiind confirmat în timpul procesului de imprimare 3D și în investigațiile SEM. Pe măsură ce temperatura crește la 220°C, filamentul își dovedește capacitatea de spumare, reducându-i-se duri­tatea. Cu toate acestea, după

depășirea temperaturii de 220°C, duritatea arată o creștere ușoară din nou până la atingerea temperaturii de 250°C.

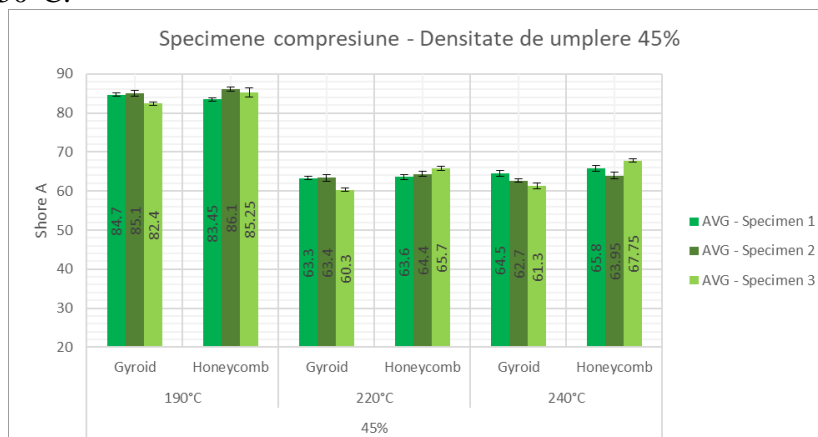


Fig.7.16. Duritate pentru speciunile cu densitatea de umplere de 45% (valori medii pe specimen).

Tabel 7.7. Valorile medii ale durității pentru diferite configurații ale parametrilor de proces

Temperatura de imprimare [°C]	Densitatea de umplere [%]	Modelul de umplere	Media durității
190	25	Gyroid	85.78
		Honeycomb	87.58
	35	Gyroid	85.03
		Honeycomb	87.53
	45	Gyroid	84.06
		Honeycomb	84.93
220	25	Gyroid	66.62
		Honeycomb	68.63
	35	Gyroid	65.60
		Honeycomb	68.93
	45	Gyroid	62.33
		Honeycomb	64.56
240	25	Gyroid	65.95
		Honeycomb	69.80
	35	Gyroid	71.78
		Honeycomb	68.75
	45	Gyroid	62.83
		Honeycomb	65.83

Rezultatele privind duritatea varioShore au putut fi comparate doar cu două referințe. În [101] au fost găsite informații despre relația dintre rezistența la compresiune și temperatura de imprimare pentru speciunile de 100% care au indicat că densitățile mai mari corespund temperaturilor de imprimare de 220°C, 205°C, 190°C, 235°C. Totuși, în [101] nu au fost incluse informații specifice cu privire la numărul de straturi superioare/inferioare ale speciunilor, deoarece studiul s-a concentrat în principal pe testarea la compresiune. O altă referință privind varioShore [106] a confirmat că rezultatele studiului, în sensul că cea mai mare valoare a durității este la 190°C.

Din graficele principalelor efecte pentru examinarea influenței celor trei parametri analizați asupra durității speciunilor, s-a observat că temperatura de imprimare este factorul cu influența cea mai importantă, urmat de densitatea de umplere. Cel mai puțin important este modelul de umplere. Trecerea de la o densitate de 35% la 45% produce un efect mai mare asupra durității decât o densitate mai mică de 35%. În cazul temperaturii de imprimare, influența trecerii de la 190°C la 220°C este mai semnificativă decât între 220°C și 240°C. Rezultatele din [106], pentru alte tipuri de TPU, au arătat că modelul de umplere nu are o influență semnificativă asupra rezistenței la compresiune, și că cel de tip *honeycomb*/figure are o rezistență la compresiune mai mare decât *gyroid*. Aceste observații au fost confirmate și în cercetarea actuală pentru filamentul varioShore TPU.

## 7.4. Comportamentul talonetelor de confort personalizate imprimate 3D din varioShore TPU

### 7.4.1. Analiza comportamentului la compresiune al varioShore

Au fost determinate caracteristicile de compresiune-deformare ale speciimenelor din varioShore în conformitate cu standardul pentru încercarea de compresiune a materialelor polimerice ISO 7743:2017 [114] León-Calero ș.a. care au testat diferite tipuri de speciimene din TPU (dar nu varioShore) cu modele de tip *grid*, *gyroid* și *honeycomb* și densități de umplere 0%, 20%, 50%, 80% și 100% [115].

În Fig.7.17. sunt prezentate speciimenele pentru testul de compresiune, fabricate cu parametri prezentați în Tabelul 7.6., pentru fiecare configurație fiind realizate câte trei speciimene. Valoarea debitului de material la printare a variat în funcție de diferitele temperaturi de extrudare, dar a rămas constantă pentru fiecare setare specifică de temperatură.



Fig.7.17. Specimenele pregătite pentru testul de compresiune



Fig.7.18. Specimen din VarioShore TPU solicitat la compresiune

Testele de compresiune uniaxială de-a lungul axei Z a speciimenelor au fost realizate în cadrul Departamentului de Rezistența Materialelor din Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică a Universității Politehnica București, utilizând dispozitivul Lloyd Instruments LRX Plus (Ametek, Inc., Marea Britanie) cu o celulă de sarcină de 5 kN (Fig.7.18.). Suprafețele superioare și inferioare ale probelor au fost lubrifiate pentru a reduce fricțiunea dintre probă și dispozitivele de instalare. Viteza de testare a fost de 10 mm/min pentru toate probele până la atingerea a 25% din alungirea relativă, conform standardului menționat, după care solicitarea a fost eliberată cu aceeași viteză. Procesul de încărcare (compresiune) și descărcare a fost realizat de 4 ori în total, rezultând 4 cicluri de compresiune neîntrerupte, înregistrarea făcându-se sub formă de curbe forță-deformare a ultimei încercări. Aceste curbe au fost ulterior transformate în coordonate tensiune-alungire relativă prin împărțirea forței la secțiunea transversală inițială și a deformației la lungimea inițială.

Toate ciclurile de încărcare au prezentat bucle de histererezis și o recuperare incompletă la sfârșitul fiecărui ciclu, sugerând astfel un comportament vâsco-elastic. Modulul de compresiune secant a fost extras pentru ultimul ciclu de încărcare. Datorită formării unei „regiuni deget” la începutul ciclului, începutul real al celui de-al patrulea ciclu a fost determinat prin extrapolarea curbei de încărcare în  $0.1 * \sigma_{\max}$  și  $0.2 * \sigma_{\max}$  (Fig.7.19. b), care a fost determinată la fi liniară. În consecință, modulele sunt extrase pentru 10% și 20% deformare din punctul de plecare extrapolat, urmând relația:  $E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}$ , unde:  $E_i$  – Modulul de compresiune pentru 10% și 20% deformare, exprimat în [MPa];  $\varepsilon_i$  – Deformarea formată în timpul ultimului ciclu de încărcare, exprimată în [mm/mm];  $\sigma_i$  - Tensiunea înregistrată la care  $\varepsilon_i$  se produce, exprimată în [MPa];

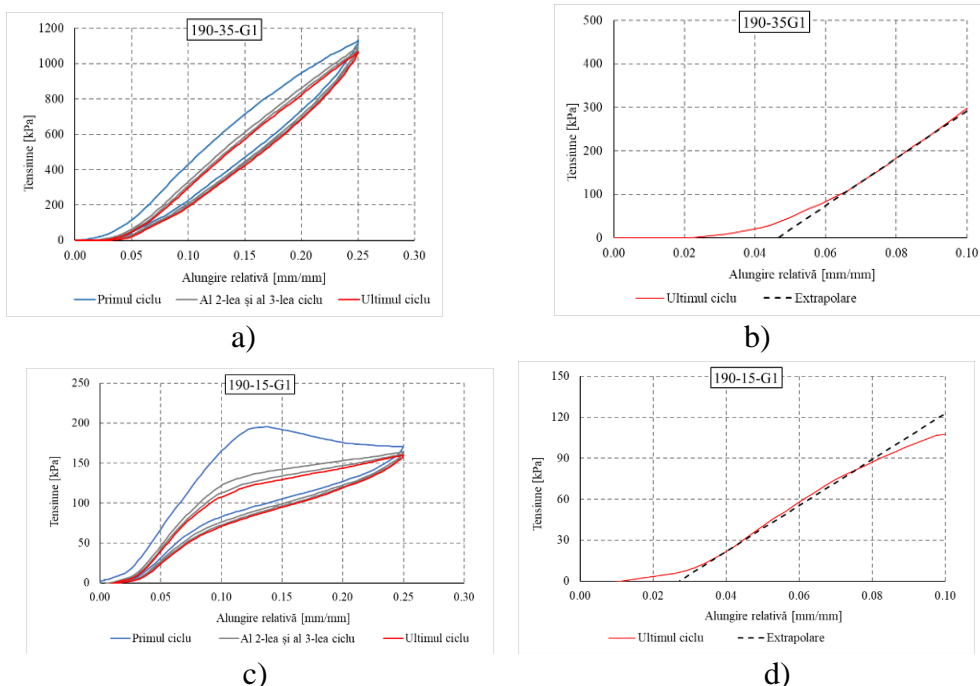


Fig.7.19. Exemplu de curbă tensiune-alungire relativă derivată, specimen gyroid imprimat 3D la 190°C, densitate de umplere 35%; b) extrapolarea începutului real al celui de-al patrulea ciclu; c) exemplu de curbă tensiune-alungire relativă, specimen gyroid imprimat 3D la 190°C, densitate umplere 15%; d) extrapolarea începutului celui de-al patrulea ciclu.

#### 7.4.2. Rezultatele testelor de compresiune pentru speciamele de varioShore

În Tabelul 7.8. sunt sintetizate datele experimentale pentru testele de compresiune. Speciamele sunt notate după cum urmează: temperatură – umplere, adică 190-35 indică un specimen imprimat 3D la 190°C cu o densitate de umplere de 35%, în timp ce G sau H indică *gyroid* sau *honeycomb*.

Tabel. 7.8. Valorile medii ale modului de compresiune pentru speciamele testate

Specimen	Modulul de compresiune [MPa] – medie la 10% alungire relativă, G	Modulul de compresiune [MPa] – medie la 20% alungire relativă, G	Modulul de compresiune [MPa] – medie la 10% alungire relativă, H	Modulul de compresiune [MPa] – medie la 20% alungire relativă, H
190-35	5.17 ±0.25	4.88 ±0.25	8.56 ±0.34	9.08 ±0.35
220-35	1.68 ±0.06	1.59 ±0.05	2.6 ±0.10	3.02 ±0.10
240-35	1.82 ±0.03	1.75 ±0.03	2.94 ±0.13	3.19 ±0.13
190-30	4.35 ±0.15	3.91 ±0.15	8.18 ±0.37	8.54 ±0.35
220-30	1.45 ±0.15	1.33 ±0.15	2.38 ±0.37	2.76 ±0.35
240-30	1.47 ±0.09	1.41 ±0.08	2.82 ±0.17	3 ±0.20
190-25	3.2 ±0.12	2.57 ±0.13	6.87 ±0.31	7.14 ±0.30
220-25	1.13 ±0.09	0.97 ±0.07	1.96 ±0.15	2.26 ±0.16
240-25	1.19 ±0.05	1.11 ±0.04	2.25 ±0.29	2.42 ±0.27
190-20	2.19 ±0.07	1.46 ±0.07	5.95 ±0.31	5.79 ±0.33
220-20	0.77 ±0.04	0.59 ±0.03	1.62 ±0.17	1.79 ±0.21
240-20	0.84 ±0.03	0.75 ±0.03	1.7 ±0.27	1.84 ±0.23
190-15	1.19 ±0.03	0.71 ±0.04	4.06 ±0.28	3.26 ±0.23
220-15	0.43 ±0.03	0.31 ±0.02	1.47 ±0.27	1.59 ±0.31
240-15	0.51 ±0.02	0.4 ±0.02	1.36 ±0.19	1.46 ±0.19
190-10	0.42 ±0.03	0.27 ±0.03	1.65 ±0.07	1.28 ±0.05
220-10	0.2 ±0.02	0.14 ±0.01	0.64 ±0.06	0.54 ±0.05
240-10	0.18 ±0.01	0.14 ±0.01	0.74 ±0.10	0.69 ±0.11

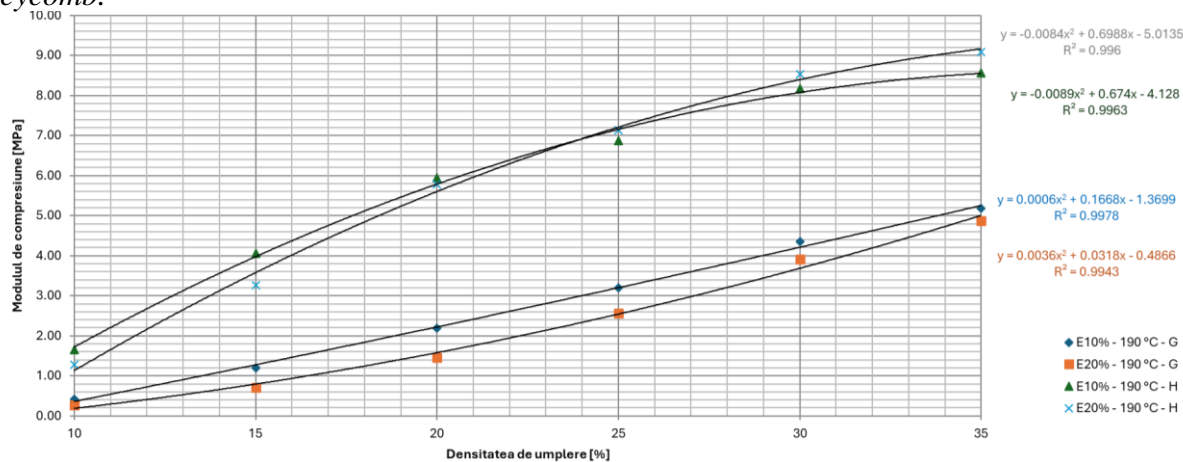
După cum se arată în Fig.7.19., varioShore, ca și alte TPU-uri, prezintă un răspuns vâsco-elastic la alungirea relativă semnificativ, caracterizat prin histerezis în comportamentul lor de tensiune-alungire relativă. Examinarea procesului de compresiune a speciamelelor din varioShore a indicat că flambajul și îndoirea, au fost mecanismele principale responsabile pentru deformarea structurilor, și nu fisurarea sau deformațiile permanente, așa cum s-a observat în [116]. De asemenea, se poate

observa că rezistența la compresiune este cea mai mare pentru probele de 190°C, urmate de cele de la 240°C și 220°C. Diferența de rezistență la compresiune între speciunile imprimate la 220°C și 240°C este considerabil mai mică în comparație cu cea dintre speciunile imprimate la 190°C și 240°C. Acest lucru indică faptul că cea mai mare procent de spumare este atins la 220°C, în timp ce speciunile imprimate la 190°C rămân nespumate.

Studiile au indicat că modelul de umplere honeycomb prezintă o rezistență la compresiune superioară comparativ cu modelul gyroid, indiferent de temperatura de imprimare, deși timpii de imprimare pentru ambele modele sunt aproape identici. De exemplu, la 190°C și 10% densitate de umplere, modelul honeycomb a necesitat 29 de minute, iar modelul gyroid 27 de minute pentru imprimare. Deși cercetările specifice privind TPU-ul cu agenți de spumare pentru tehnologia MEX lipsesc din literatura de specialitate, studiile mai largi asupra TPU-urilor au confirmat că modelul gyroid are o rezistență la compresiune mai mică decât alte modele de umplere, precum cele cubice, triunghiulare sau rectilinii. Un alt factor influent asupra comportamentului mecanic al speciunilor este temperatura de imprimare, mai ales pentru TPU cu agenți de spumare activați termic. La rate de deformare mari, TPU-ul cu densitate de umplere completă a dovedit o durabilitate excelentă, nefiind afectat nici la cele mai ridicate deformări de compresie testate. Astfel, se concluzionează că TPU-urile cu agenți de spumare, utilizate corect în procesul de imprimare, pot oferi soluții eficiente pentru aplicații ce necesită durabilitate mecanică, cu rezistență semnificativă la compresiune și ciclu de viață extins, mai ales în configurațiile de tip honeycomb.

Rezultatele testelor la compresiune au fost reprezentate grafic în Fig.7.20. Aceste date pot fi utilizate pentru a prezice valoarea modulului de compresiune la diferite densități de umplere și temperatură de imprimare, cu coeficienți de corelație care depășesc 0.97. Există o relație aproape liniară între densitatea de umplere și modulul de compresiune. Cel mai mare modul de compresiune a fost de 9.08 MPa pentru speciune de 190-35H, în timp ce cele mai mici valori au fost obținute pentru densitatea de umplere de 10% și 15% și temperaturi de 220 ° C și 240 ° C. Atunci când umplerea este sub 15% și temperatura de imprimare peste 220°C, tipul modelului de umplere nu este relevant (graficele de interacțiune prezentate susțin în continuare această observație).

Tabelul 7.9. oferă date privind densitatea probelor, indicând faptul că speciunile cu modelul de umplere *honeycomb* prezintă o densitate mai mare. În plus, arată că temperatura de imprimare influențează nivelul de spumare din fiecare probă, ceea ce influențează rezistența la compresiune. Pentru a caracteriza comportamentul materialului în timp, densitatea probelor a fost măsurată și la două luni după testarea rezistenței la compresiune, și au fost analizate diferențele. Codificarea speciunilor a fost următoarea: primul număr arată temperatura de printare, iar al doilea arată densitatea de umplere, în timp ce cu G s-a notat structura interioară de tip *gyroid* și cu H cea de tip *honeycomb*.



a)



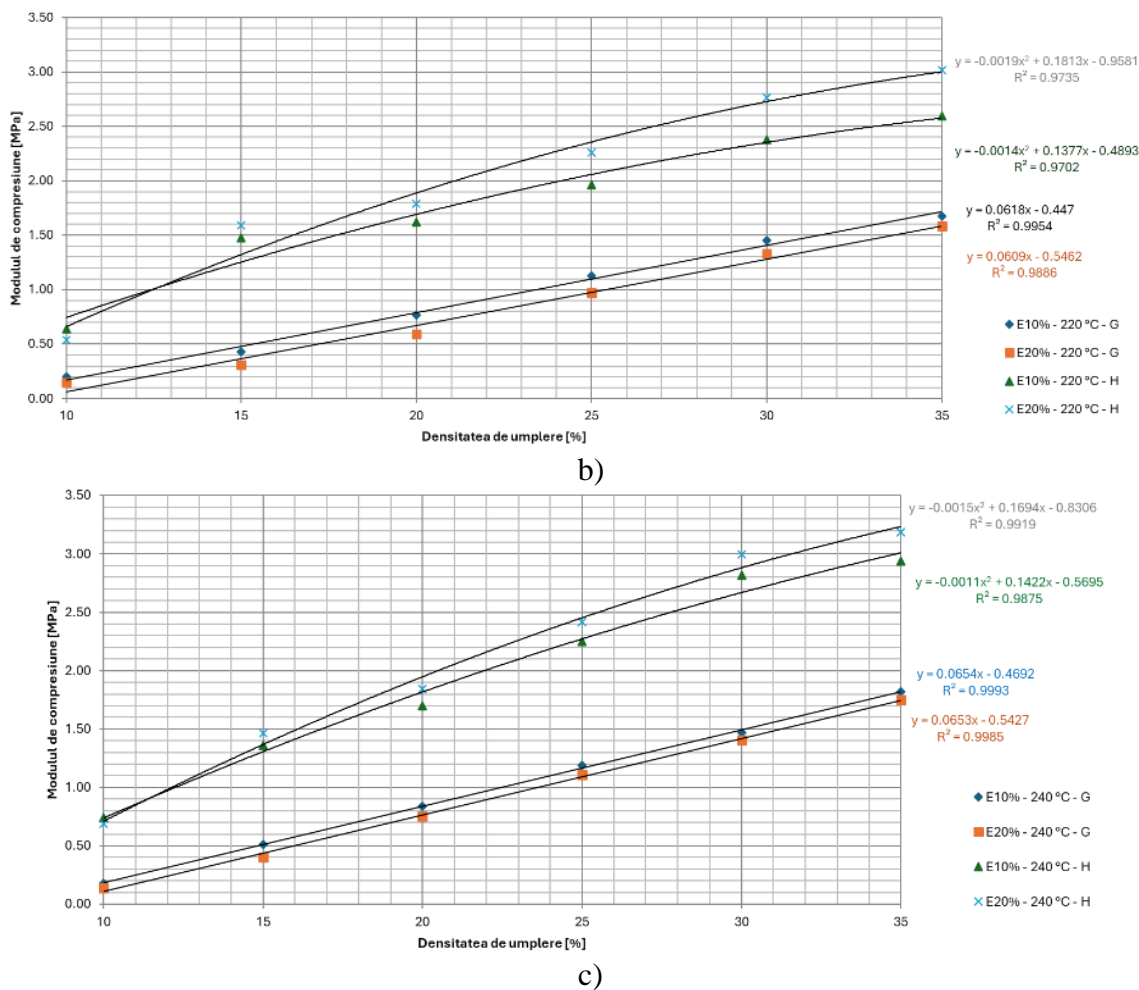


Fig.7.20. Module de compresiune pentru: a) probe 190°C; b) probe 220°C; c) probe 240°C

Tabelul 7.9. Densitatea medie a specimenelor înainte de testare și la 2 luni după testare

Specimen	Densitatea medie (kg/cm3)				Timp de imprimare 3D (min)	
	G		H		G	H
	Înainte de testare	2 luni după	Înainte de testare	2 luni după		
190-35	0.532	0.532	0.620	0.621	49	57
220-35	0.295	0.300	0.339	0.345	49	57
240-35	0.330	0.331	0.377	0.381	49	57
190-30	0.484	0.487	0.568	0.569	44	53
220-30	0.266	0.272	0.317	0.321	44	53
240-30	0.307	0.307	0.359	0.362	44	53
190-25	0.437	0.438	0.510	0.510	41	47
220-25	0.255	0.246	0.281	0.284	41	47
240-25	0.273	0.275	0.321	0.321	41	47
190-20	0.390	0.391	0.453	0.453	36	42
220-20	0.215	0.219	0.240	0.242	36	42
240-20	0.246	0.248	0.289	0.292	36	42
190-15	0.342	0.344	0.401	0.402	31	37
220-15	0.186	0.188	0.230	0.232	31	37
240-15	0.214	0.217	0.247	0.250	31	37
190-10	0.303	0.304	0.326	0.327	27	29
220-10	0.165	0.166	0.179	0.181	27	29
240-10	0.193	0.193	0.205	0.206	27	29

Tabel 7.10. Analize ANOVA

Factori	p-value
10% modul de compresiune la pentru gyroid și 20% modul de compresiune pentru gyroid	0.632
10% modul de compresiune la pentru fagure și 20% modul de compresiune pentru honeycomb	0.901
10% modul de compresiune la pentru gyroid și 10% modul de compresiune pentru honeycomb	0.0199
20% modul de compresiune la pentru gyroid și 20% modul de compresiune pentru honeycomb	0.0067
Timpi de imprimare 3D pentru probe de gyroid și honeycomb	0.043
Densitatea medie a probelor de gyroid vs. honeycomb	0.232
Densitatea medie înainte și la 2 luni după testarea probelor de gyroid	0.968
Densitatea medie înainte și la 2 luni după testarea pentru fagure gyroid	0.960

S-a utilizat analiza ANOVA unidirecțională (Tabel 7.10.), cu un nivel de semnificație de 0.05, pentru a evalua influența parametrilor asupra modului de compresiune. Astfel, s-a putut observa că valorile modului de compresiune la alungirea relativă de 10% și 20% au fost similare pentru tipuri de umpleri similare, dar sunt diferite între G și H. În Tabelul 7.10. sunt prezentate, de asemenea, rezultatele ANOVA pentru timpul de imprimare 3D a probele cu modele de umplere G vs. H și pentru evaluarea dacă există o diferență semnificativă între densitatea probelor înainte de testare și după 2 luni de termen de valabilitate. Rezultatele au indicat o diferență semnificativă statistic între densitățile probelor G și H. În același timp, nu există nicio diferență semnificativă între densitățile probelor înainte și 2 luni după testare, ceea ce înseamnă că structura probelor nu a fost afectată în timpul testării. Pentru valorile alungirii relative de 20%, diferența pentru influența variabilelor nu este la fel de evidentă ca la deformarea de 10%. Acest lucru arată că, cu cât probele sunt mai comprimate, cu atât structura lor de umplere este mai puțin importantă datorită deformării.

Din investigațiile prezentate în Secțiunea 7.3, evaluarea realizată de utilizator a talonetelor imprimate 3D din varioShore, cu densitate de umplere uniformă, dar imprimate la 220°C și 240°C, a relevat un nivel mai ridicat de confort pentru talonetele realizate la 220°C.

În Fig.7.21. sunt prezentate curbele tensiune-alungire relativă pentru diferite densități la 220°C cu modelele de umplere G și H. Acestea au fost luate în considerare pentru a stabili densități variabile de umplere. În acest scop, au fost stabilite corelații între valorile presiunii plantare maxime și densitățile de umplere în scopul reducerii și uniformizării presiunii plantare de vârf statice.

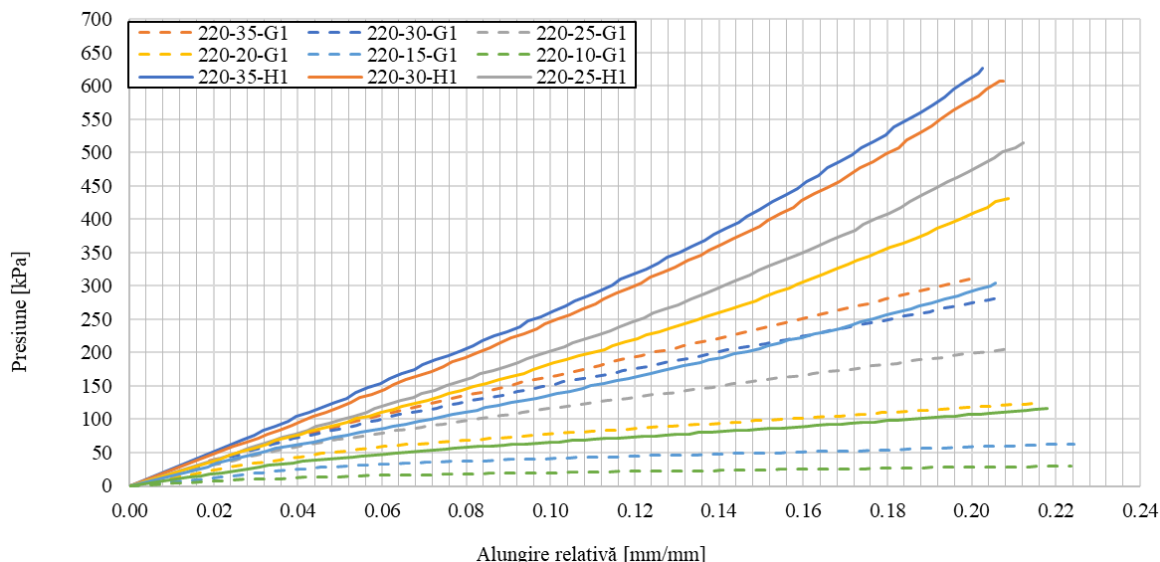


Fig.7.21. Curba tensiune-alungire relativă pentru ultimul ciclu de încărcare

### 7.4.3. Evaluarea presiunii plantare cu ajutorul unei talonete cu senzori

Un utilizator care cântărește 48 kg a participat la testele realizate în această secțiune pentru a demonstra modul în care pot fi aplicate informațiile din testele mecanice anterioare. O metodologie similară poate fi aplicată și pentru persoane cu greutate și caracteristici de presiune plantară diferite, urmând fluxul de lucru propus.

Pe baza datelor obținute din studiile experimentale cu taloneta cu senzori (Capitolul 4), s-a efectuat mai întâi o măsurare a presiunii plantare a piciorului desculț (Fig.7.22.). Au fost selectate trei configurații ale modelului de umplere a densității de umplere (V1-V3) pe baza valorilor de compresiune determinate experimental, corespunzătoare celor trei valori de vârf ale presiunii plantare vizate: 161.84 kPa, 91.67 kPa și 53.47 kPa. În plus, alte două talonete cu densitate uniformă de umplere, rigiditate medie, au fost imprimate 3D pentru a fi utilizate ca referințe: 20% model de umplere G (gyroid) (V4), 20% model de umplere H (honeycomb) (V5). Timpii de printare pentru talonetele V1-V5 (pentru fiecare picior) au fost următorii: V1 - 3h 15 min, V2 - 3h 13 min, V3 - 2h 58 min, V4 - 3h 13 min, V5 - 2h 43 min. Având în vedere că acest studiu s-a axat pe dezvoltarea talonetelor statice de confort, a fost selectată o varietate de valori de deplasare: 0.06 mm, 0.08 mm și 0.2 mm – Fig.7.23. Aceste valori reprezintă gradul de reducere a înălțimii talonetelor sub greutatea utilizatorului. Cu toate acestea, este important de remarcat faptul că podiatrul trebuie să stabilească aceste valori pe baza unei analize detaliate a patologiei pacientului și a caracteristicilor individuale.

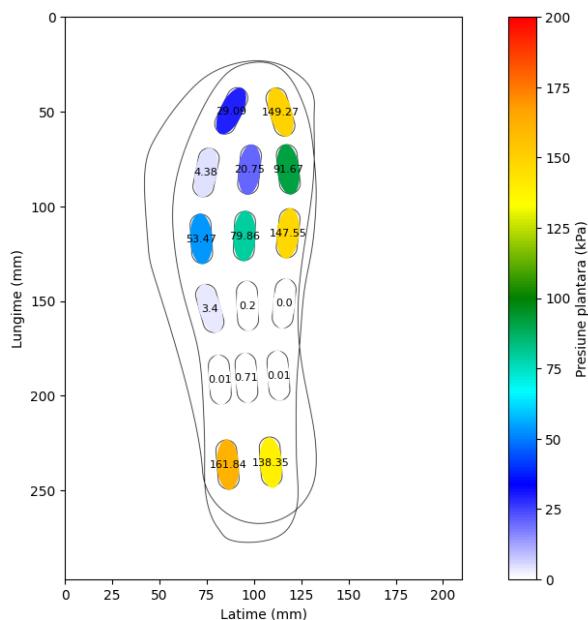


Fig.7.22. Valorile presiunii plantare de vârf cu piciorul gol al utilizatorului

Tabel 7.11. Model și densitate de umplere utilizate pentru talonetele imprimate 3D

Valoarea presiunii [kPa]	Model și densitate de umplere				
	Taloneta V1	Taloneta V2	Taloneta V3	Taloneta V4	Taloneta V5
161.84	H30	H25	G25	G20	H20
91.67	G25	H15	H10		
53.47	H10	G20	G15		

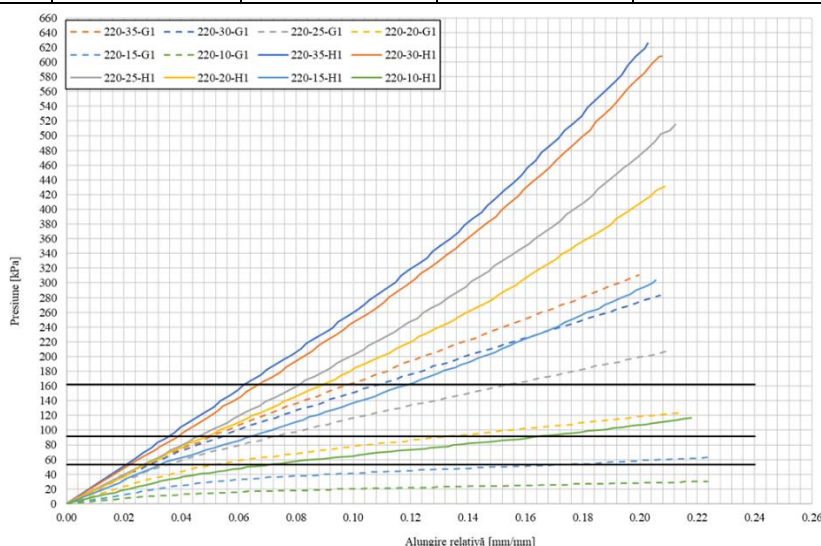


Fig.7.23. Selectarea modelului de configurare-densitatea de umplere pentru diferite presiuni plantare (liniile orizontale indică presiunea plantară de interes)

Fig.7.23. a fost utilizată pentru selectarea combinației model de umplere – densitate de umplere corespunzătoare diferitelor zone de presiune plantară. Modelul de umplere și densitatea au fost selectate în jurul zonelor în care liniile orizontale ale presiunii plantare intersectează curbele de tensiune-deformare și liniile verticale corespunzătoare diferitelor valori de deplasare. Fig.7.24.

surprinde diferite faze ale fabricării talonetelor cu densitate de umplere variabilă pentru a ilustra structura în diferite zone ale talonetelor, evidențiind, de asemenea, zonele cu diverse configurații de umplere. Toate talonetele au fost tipărite 3D la 220°C, deoarece această temperatură de imprimare oferă cel mai bun confort raportat de utilizator [16].

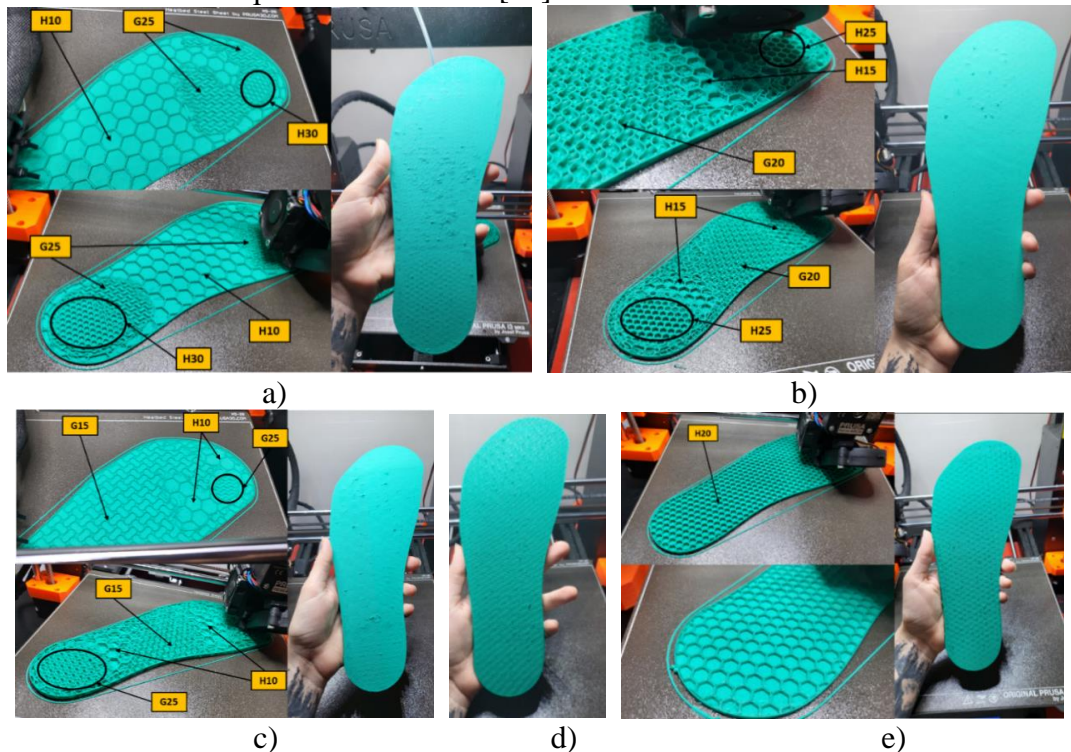


Fig.7.24. Talonete imprimate 3D: a) V1; b) V2; c) V3; d) V4; e) V5.

Talonetele imprimate 3D au fost testate cu senzori și au arătat o reducere semnificativă a presiunii plantare maxime (Fig. 7.25). Rezultatele au fost rezumate pentru a compara presiunea plantară maximă a piciorului gol în două zone importante: piciorul posterior (călcâiul) și partea din față a piciorului. Conducând ANOVA pentru valorile din Tabelul 7.12 ( $p$ -value = 0.677 pentru V1-V5, valoarea  $p$  = 0.876 pentru talonetele V1-V3 cu umplere variabilă), s-a constatat că există o diferență semnificativă între valorile presiunii plantare de vârf. Acest lucru arată importanța selectării parametrilor de umplere.

Valorile presiunii plantare au fost mai mari atunci când a fost utilizat V3, deoarece acest taloneta a inclus două zone cu modelul de umplere *gyroid* (G25, G15) - modelul *gyroid* a fost mai puțin rigid decât *honeycomb* și una cu *honeycomb* cu densitate scăzută de umplere (H10). Acest lucru explică valorile de vârf ale presiunii de peste 90 kPa, în comparație cu talonetele V1 sau V3.

Taloneta V3 a înregistrat presiunea mai mare din jurul degetului de la picior (pe un senzor) și călcâi (pe doi senzori), în timp ce pentru celelalte talonete, presiunea a fost distribuită și pe ceilalți senzori din zona din față a piciorului. Concluzii interesante pot fi trase atunci când se compară taloneta V3 cu V4 (G20). În acest caz, am considerat că umplerea uniformă a *gyroid*-ului a permis o distribuție mai bună a presiunii, datorită comportamentului aproape izotrop al acestui pattern [117].

În comparație, talonetele V1 și V2 au fost resimțite în mod similar în ceea ce privește distribuția presiunii. Cu toate acestea, V2 a fost perceput ca fiind mai moale datorită unei suprafețe mai mari de umplere cu model *gyroid*. În zonele cu presiune plantară ridicată, V2 s-a simțit ferm datorită pereților verticali care caracterizează modelul *honeycomb*. Comparativ, V3 a fost semnificativ mai moale, ceea ce a permis picioarelor să se așeze confortabil pe talonete. Zonele de presiune de vârf abordate cu modelul de umplere *gyroid* au fost resimțite mai moi, ceea ce a contribuit la un confort sporit, chiar dacă presiunea plantară nu a fost complet redusă (aproximativ 35% din presiunea plantară inițială). V4 și V5 au fost destul de distincte: V4 a fost confortabil și moale, creând senzația că taloneta se mulează pe talpa piciorului. În schimb, V5 a fost mai rigidă, transmițând

senzația că modelul de umplere suferă o deformare minimă sub influența greutății utilizatorului. Taloneta V3 a primit cel mai favorabil feedback pentru obținerea unui confort optim prin reducerea presiunii. = Taloneta cu model gyroid pentru zonele cu presiune ridicată și joasă susține în mod eficient distribuția greutății și oferă utilizatorului o poziție confortabilă în picioare.

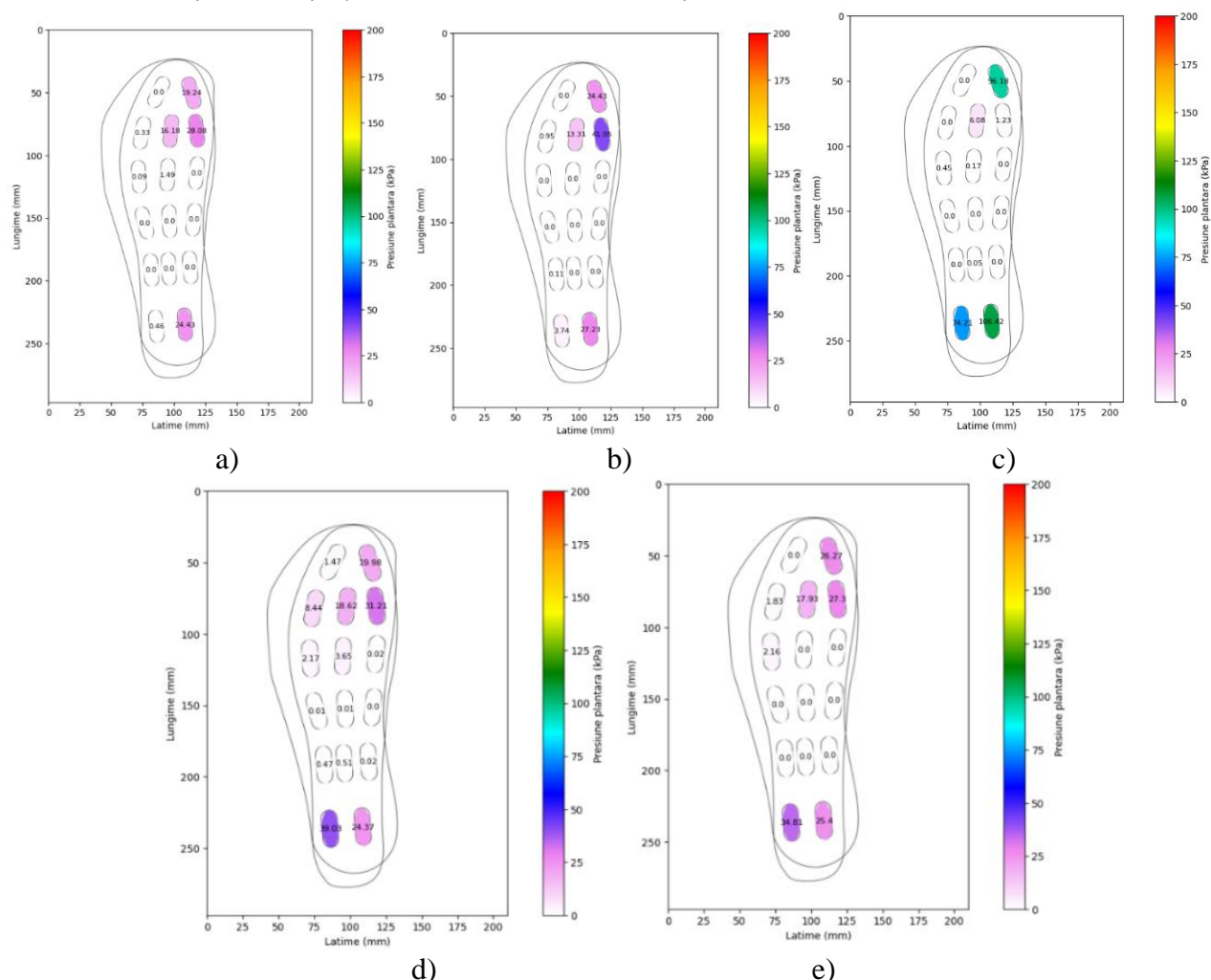


Fig.7.25. Rezultatele presiunii plantare statice la utilizarea: a) V1; b) V2; c) V3 d) V4; e) V5.

## Concluzii și contribuții personale

### Contribuții personale:

- Calibrarea și optimizarea procesului de imprimare pentru toate filamentele TPU studiate (Filaflex 60A, 70A, 82A, PolyFlex 90A, varioShore);
- Testarea talonetelor din TPU cu durități diferite atât în condiții reale, cât și la oboseală pe standul de încercare la încovoiere;
- Colectarea și analiza feedback-ului utilizatorilor privind utilizarea talonetelor din TPU;
- Investigarea filamentului varioShore TPU cu agent activ de spumare pentru determinarea durității în funcție de parametri de proces (temperatura de imprimare, debit de material);
- Realizarea de investigații SEM pentru a analiza structura internă a varioShore și a evalua impactul temperaturii de imprimare asupra dimensiunii și formei porilor;
- Investigarea mai multor metode de determinare a presiunii plantare și utilizarea datelor pentru fabricarea diferitelor tipuri de talonete;
- Analiza comparativă a durității a talonetelor din TPU și varioShore, fabricate la temperaturi diferite de imprimare 3D și cu densitate uniformă de umplere;

- Dezvoltarea unei metode de personalizare a talonetelor, adaptând densitatea și modelul de umplere în funcție de presiunile plantare individuale, îmbunătățind astfel funcționalitatea și eficiența acestora;
- Testarea confortului și a distribuției presiunii oferite de talonetele din varioShore cu densitate variabilă de umplere, utilizând taloneta cu senzori.

#### **Concluzii capitol 7:**

- Investigațiile au demonstrat capacitatea varioShore TPU de a produce piese cu diferite niveluri de duritate, utilizând un singur cap de extrudare, pe o imprimantă 3D cu cost redus. Exemplele de piese imprimate 3D, inclusiv talonetele personalizate, evidențiază flexibilitatea și versatilitatea acestui filament în crearea de produse adaptate nevoilor individuale;
- Personalizarea talonetelor, în special în ceea ce privește rigiditatea (duritatea, rezistența la compresiune), este esențială pentru amortizare, având o importanță deosebită pentru persoanele cu afecțiuni ca diabetul, piciorul plat flexibil, etc., precum și pentru cei care stau mult în picioare;
- Ajustarea rigidității în funcție de presiunea plantară a îmbunătățit confortul talonetelor varioShore prin distribuirea uniformă a presiunii.
- Talonetele imprimate din TPU rezistă la cel puțin 700.000 de cicluri de laborator și 1.4 milioane de pași în condiții reale, fără degradări semnificative, confirmând durabilitatea și eficiența acestora;
- Testele mecanice efectuate asupra specimenelor de varioShore au arătat că temperatura de printare joacă un rol esențial în determinarea durității materialului. Analiza statistică nu a relevat o diferență semnificativă în modulul de compresiune între alungirea relativă de 10% și 20%. Este de remarcat faptul că au existat doar mici variații ale efectelor modulului de compresiune la temperaturi de 220°C și 240°C, în timp ce o diferență substanțială a fost observată la 190°C. Aceste teste nu numai că au identificat factorul cel mai influent, dar au facilitat și stabilirea corelațiilor între valorile presiunii plantare și diferite configurații de densitate de umplere pentru a obține deplasări specifice;
- Talonetele imprimate din varioShore la 220°C au rezistat la peste 300.000 de cicluri de flexiune fără ca structura internă a acestora să fie afectată;
- Testele mecanice au demonstrat că temperatura de printare are cea mai mare influență asupra comportamentului la compresiune, rezultat confirmat și prin investigații SEM. De asemenea, testele de compresiune au ajutat la crearea curbelor de tensiune-alungire relativă care au oferit perspective asupra parametrilor de proces necesari pentru imprimarea 3D.

## **Capitolul 8. Rezultate, contribuții personale, concluzii și direcții de continuare a cercetărilor**

Această lucrare de doctorat a avut ca scop investigarea și optimizarea procedurii MEX pentru producerea de talonete personalizate, utilizând materiale flexibile și inovatoare, precum TPU cu diferite grade de duritate (Filaflex 60A, 70A, 82A, PolyFlex 90A) și varioShore TPU. Printr-o abordare interdisciplinară ce combină analiza presiunii plantare, scanarea 3D, simulările mecanice și testele experimentale de compresiune și oboseală, cercetarea aduce contribuții semnificative în domeniul imprimării 3D aplicate în scopuri ortetice și de confort. Proiectul a explorat atât performanțele mecanice ale materialelor, cât și modul în care acestea pot fi ajustate prin variația parametrilor de imprimare, cum ar fi temperatura, densitatea și modelul de umplere, pentru a obține produse personalizate care să ofere confort și suport optim.

În plus, un alt aspect inovator al cercetării a fost dezvoltarea și utilizarea unor echipamente specializate pentru testarea rezistenței și comportamentului mecanic al talonetelor, inclusiv un sistem personalizat pentru monitorizarea ciclică a solicitărilor. Aceste echipamente au permis evaluarea durabilității talonetelor în condiții de uzură reală, contribuind semnificativ la validarea soluțiilor propuse.

Totodată, cercetarea a explorat modul în care variațiile parametrilor de imprimare – temperatura, densitatea și modelul de umplere – influențează flexibilitatea și duritatea talonetelor. Materialul varioShore TPU s-a remarcat prin capacitatea de a permite ajustarea gradului de flexibilitate și duritate, în funcție de cerințele utilizatorilor, deschizând noi perspective pentru fabricarea soluțiilor ortopedice personalizate. În plus, s-au efectuat investigații de microscopie electronică (SEM) pentru a analiza microstructura și a înțelege mai bine impactul procesului de imprimare asupra proprietăților mecanice ale produselor.

Pe parcursul tezei, a fost pus un accent deosebit pe testarea și evaluarea practică a talonetelor, utilizând echipamente avansate de măsurare a presiunii plantare și simulări de uzură, care au permis o validare riguroasă a soluțiilor propuse, precum și testări de confort prin colectarea feedback-ului utilizatorilor. Personalizarea talonetelor în funcție de presiunile plantare identificate prin scanare și modelare a fost esențială pentru a optimiza confortul și eficiența acestora. Astfel, această cercetare contribuie la înțelegerea modului în care tehnologia imprimării 3D poate transforma domeniul ortopedic, oferind soluții accesibile și eficiente pentru utilizatori cu nevoi specifice, precum persoanele cu picior diabetic sau alte afecțiuni ortopedice.

### 8.1. Contribuții personale

Contribuțiile personale ale tezei sunt multiple și aduc o serie de inovații în domeniul fabricării aditive a talonetelor personalizate, prin investigarea unor materiale noi și dezvoltarea unor metode și echipamente dedicate. În această cercetare, s-a evidențiat necesitatea unei abordări integrate a designului, fabricării și testării talonetelor, luând în considerare atât aspectele medicale, cât și provocările tehnice ale imprimării 3D cu diferite materiale.

Un prim aspect relevant este dezvoltarea unei metodologii de personalizare a talonetelor, pornind de la scanarea 3D a piciorului pentru obținerea unor modele digitale precise. Această metodologie a fost integrată cu echipamente de măsurare a presiunii plantare și cu design-ul asistat, astfel încât să se creeze talonete adaptate nevoilor individuale. Astfel, s-a adus o contribuție semnificativă în domeniul personalizării talonetelor pentru confortul.

O altă contribuție majoră a tezei este dezvoltarea și testarea echipamentelor pentru evaluarea oboselii la încovoire și a presiunii plantare. Aceste echipamente au fost esențiale pentru testarea în condiții reale a durabilității talonetelor imprimate 3D. Studiile au demonstrat că talonetele realizate din TPU și VarioShore pot rezista la cicluri lungi de utilizare, oferind suport și confort pe termen lung. Prin utilizarea sistemului de măsurare a presiunii *in-shoe* Pedar, au fost colectate date relevante care au permis evaluarea și optimizarea performanței talonetelor.

Contribuția tehnologică se reflectă și în investigarea unor materiale noi pentru imprimarea 3D, cum ar fi PCL și VarioShore TPU. Studiul asupra VarioShore a demonstrat capacitatea acestuia de a oferi talonete cu rigiditate variabilă, ajustând parametri de proces precum temperatura de imprimare, modelul și densitatea de umplere. Această flexibilitate materială permite crearea unor talonete adaptate la diverse afecțiuni medicale, cum ar fi piciorul diabetic sau fasciita plantară. Rezultatele au arătat că talonetele imprimate cu acest material pot rezista la solicitări mecanice prelungite și pot oferi confort chiar și după un număr mare de pași.

În plus, teza aduce contribuții semnificative prin analiza comparativă a mai multor modele de umplere și densități pentru imprimarea 3D, evidențiind modul în care aceste variabile influențează rezistența la compresiune și comportamentul mecanic al talonetelor. S-a demonstrat că temperatura de imprimare are cel mai mare impact asupra durității și comportamentului la compresiune, stabilind astfel un set optim de parametri de proces pentru obținerea unor produse durabile și confortabile.

### 8.2. Principalele rezultate obținute

Rezultatele principale ale tezei și corespondența lor cu obiectivele teoretice și experimentale specifice pot fi sintetizate astfel:

#### 1. Analiza literaturii de specialitate:

- Analiza literaturii a inclus: biomecanica mersului, patologiiile frecvente ale picioarelor , tehnologiile existente în fabricarea echipamentelor de tip ortetic pentru picioare și studiul sistematic al celor mai recente cercetări în utilizarea tehnologiei de imprimare 3D pentru producerea de talonete personalizate. Aceste aspecte teoretice au contribuit la atingerea obiectivelor **OS1** și **OS2**.

#### **2. Personalizarea și adaptarea talonetelor:**

- Studiul a demonstrat cu succes dezvoltarea unor talonete personalizate utilizând scanare 3D și software-uri specializate pentru design. Acest rezultat corespunde **OS3** și **OS4**.

#### **3. Dezvoltarea echipamentului de testare:**

- S-a dezvoltat un echipament pentru testarea rezistenței la oboseală a talonetelor, esențial pentru evaluarea comportamentului mecanic. Acest rezultat corespunde direct obiectivului **OS5**.

#### **4. Optimizarea materialelor:**

- Cercetarea a explorat utilizarea unor noi materiale elastomerice, și a optimizat parametri de proces (temperatura, densitatea de umplere), pentru a ajusta duritatea și flexibilitatea talonetelor. Acest rezultat este în concordanță cu **OS7-OS9**.

#### **5. Dezvoltarea unui sistem de măsurare a presiunii plantare:**

- A fost creat un sistem pentru măsurarea presiunii plantare în condiții statice, utilizat pentru a evalua confortul și eficiența talonetelor personalizate. Acest rezultat se aliniaza obiectivului **OS6**.

#### **6. Evaluarea printabilității și durabilității:**

- Studiul a testat diverse materiale și a evaluat capacitatea lor de a fi imprimate utilizând tehnologia MEX, asigurând că produsele finale sunt durabile și rezistente pe termen lung. Acest rezultat corespunde obiectivului **OS10**.

#### **7. Performanța talonetelor:**

- Cercetarea a validat confortul și durabilitatea talonetelor atât prin feedback subiectiv, cât și prin măsurători obiective, corespundent cu obiectivul **OS11**.

### **8.3. Concluzii principale**

Sintetizarea concluziilor detaliate pentru fiecare capitol este prezentată în continuare:

- Cercetarea a demonstrat că imprimarea 3D oferă flexibilitate și eficiență în fabricarea talonetelor personalizate, putând să ofere eficiente soluții adaptate presiunii plantare și confortului individual, spre deosebire de metodele convenționale. Metoda de fabricație prin imprimare 3D a permis ajustarea formei și durității talonetelor prin utilizarea materialelor elastomerice și a setărilor variabile de umplere;

- Utilizarea tehnicilor avansate de scanare 3D și software-uri de proiectare, precum Gensole și Fusion 360, a permis dezvoltarea unor design-uri complexe și optimizate. Acestea au fost gândite pentru a susține arcul plantar și a redistribui presiunea în zonele critice, contribuind la ameliorarea disconfortului pentru utilizatorii care petrec mult timp în picioare sau care suferă de afecțiuni ortopedice. Designul parametrizat al structurii interne a talonetelor a permis ajustarea flexibilității și durității în funcție de patologia specifică și de cerințele de utilizare;

- S-a realizat o analiză detaliată a talonetelor imprimate din diferite materiale, precum Filaflex 60A, 70A, 82A și PolyFlex 90A, evaluându-se duritatea și confortul acestora. Testele au arătat că duritatea talonetelor poate fi ajustată prin modificarea parametrilor de imprimare, iar materialele mai flexibile, cum ar fi Filaflex 60A, au oferit un confort mai mare, însă cu o durabilitate mecanică ușor redusă comparativ cu cele mai rigide;

- Materiale elastomerice analizate s-au dovedit adecvate pentru fabricarea talonetelor personalizate. Rezultatele testelor la oboseală, realizate pe standul experimental dezvoltat în cadrul tezei, au demonstrat rezistența și durabilitatea talonetelor la uzura mecanică intensă, inclusiv peste 700.000 de cicluri în laborator și 1.4 milioane de pași în condiții reale;

- Atenția s-a concentrat în mod special asupra investigării noului filament varioShore TPU cu agent de spumare, demonstrându-se că acesta permite ajustarea gradului de duritate și flexibilitate, oferind soluții pentru utilizatorii cu afecțiuni podiatrice. Parametri de proces, precum temperatura, densitatea de umplere și modelul de umplere, au avut un impact semnificativ asupra durabilității și



confortului talonetelor din varioShore. Imprimarea la 220°C a oferit echilibrul între confort și durabilitate, iar umplerea *honeycomb* s-a dovedit mai rigidă decât *gyroid* pentru densități mai mari;

- Evaluarea subiectivă a confortului talonetelor din varioShore cu densitate variabilă a evidențiat pentru talonetele cu infill de tip gyroid oferă confort și amortizarea presiunii plantare;
- Asocierea datelor colectate privind distribuția presiunii plantare a unui utilizator cu densitatea de umplere variabilă a interiorului talonetelor a demonstrat eficiența unui astfel de abordări din perspectiva confortului și a amortizării. O astfel de abordare de fabricație este actualmente posibilă doar prin utilizarea imprimării 3D;
- Cercetarea a inclus dezvoltarea unor echipamente dedicate și cu cost redus pentru testarea rezistenței la oboseală mecanică a talonetelor și monitorizarea presiunii plantare.

#### 8.4. Direcții de continuare a cercetărilor

- Cercetările viitoare vor continua prin colectarea unui volum extins de date experimentale pentru dezvoltarea unui model cu elemente finite al talonetei, care va facilita personalizarea semi-automată a variabilității de umplere. Acest model va integra informații esențiale despre distribuția presiunii plantare, valorile dinamice ale presiunii de vârf, presiunea plantară maximă admisă și deplasările, în funcție de specificațiile furnizate de podiatru și de patologia fiecărui pacient. Scopul acestui model este de a optimiza fabricarea talonetelor prin adaptarea rigidității și a confortului în funcție de nevoile individuale;
- În plus, cercetările viitoare vor extinde aria de aplicabilitate a acestui tip de imprimare 3D și la alte produse de confort, cum ar fi suporturi personalizate pentru scaune sau perne ergonomice, care necesită proprietăți variabile de flexibilitate și durabilitate. Studiile vor explora și alte filamente expandabile, evaluându-se adecvarea acestora nu doar pentru talonete, ci și pentru alte soluții de confort. Investigarea va include teste privind duritatea, confortul la utilizare prelungită, rezistența la oboseală și respirabilitatea materialelor;
- Totodată, se vor testa noi aspecte privind performanța talonetelor în condiții de umiditate, pentru a evalua rezistența materialelor și impactul asupra confortului termic. Aceasta va oferi informații suplimentare pentru alegerea optimă a filamentului, cu scopul de a dezvolta soluții personalizate și accesibile pentru confort și sănătate;
- O direcție viitoare de cercetare va aborda sustenabilitatea materialelor utilizate, explorând filamente biodegradabile sau reciclabile pentru talonete și alte produse de confort. Aceste materiale vor fi evaluate pentru printabilitate, performanțele mecanice și confort, contribuind la reducerea impactului ecologic și promovând soluții inovatoare, personalizate și sustenabile.
- O direcție viitoare importantă a cercetării poate fi automatizarea personalizării talonetelor prin inteligență artificială și *machine learning*. Aceste tehnologii vor corela datele de presiune plantară cu variabilitatea materialelor și a parametrilor de proces, optimizând designul și producția pentru fiecare utilizator. Pe termen lung, se va explora și utilizarea materialelor sustenabile, cum ar fi filamentele biodegradabile.

## Bibliografie

1. Asociația de Podiatrie Available online: <https://podiatrie.ro/despre-podiatrie/> (accessed on 7 April 2024).
2. Pedorthic Association Of Australia Available online: <https://pedorthics.org.au/about-pedorthics/> (accessed on 7 April 2024).
3. Foot Orthotic Insoles Market - Fortune Business Insights Available online: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/foot-orthotic-insoles-market-100348> (accessed on 22 July 2024).
4. Global Market Size, Forecast, and Trend Highlights Over 2024 - 2036 Available online: <https://www.researchnester.com/reports/foot-orthotic-insoles-market/4528> (accessed on 22 July 2024).
5. Grand View Research - Foot Orthotic Insoles Market Size, Share & Trends Analysis Report By Material (Thermoplastic, Composite Carbon Fiber, Others), By Type (Pre-Fabricated, Custom-Made), By Distribution Channel, By Region, And Segment Forecasts, 2023 - 2030 Available online: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/foot-orthotic-insoles-market> (accessed on 30 April 2024).
6. Amer, A.O.; Jarl, G.M.; Hermansson, L.N. The Effect of Insoles on Foot Pain and Daily Activities. *Prosthet Orthot Int* **2014**, *38*, 474–480, doi:10.1177/0309364613512369.
7. Nagano, H.; Begg, R. Shoe-Insole Technology for Injury Prevention in Walking. *Sensors* **2018**, *18*, 1468, doi:10.3390/s18051468.
8. Park, J.-H.; Jeon, H.-S.; Kim, J.-H.; Yoon, H.-B.; Lim, O.-B.; Jeon, M. Immediate Effect of Insoles on Balance in Older Adults. *The Foot* **2021**, *47*, 101768, doi:10.1016/j.foot.2020.101768.

9. Hatton, A.L.; Gane, E.M.; Maharaj, J.N.; Burns, J.; Paton, J.; Kerr, G.; Rome, K. Textured Shoe Insoles to Improve Balance Performance in Adults with Diabetic Peripheral Neuropathy: Study Protocol for a Randomised Controlled Trial. *BMJ Open* **2019**, *9*, doi:10.1136/bmjopen-2018-026240.
10. Ahmed, S.; Barwick, A.; Butterworth, P.; Nancarrow, S. Footwear and Insole Design Features That Reduce Neuropathic Plantar Forefoot Ulcer Risk in People with Diabetes: A Systematic Literature Review. *J Foot Ankle Res* **2020**, *13*, doi:10.1186/s13047-020-00400-4.
11. Huang, Y.; Peng, H.-T.; Wang, X.; Chen, Z.-R.; Song, C.-Y. The Arch Support Insoles Show Benefits to People with Flatfoot on Stance Time, Cadence, Plantar Pressure and Contact Area. *PLoS One* **2020**, *15*, e0237382, doi:10.1371/journal.pone.0237382.
12. Zhang, Z.; Dai, Y.; Xu, Z.; Grimaldi, N.; Wang, J.; Zhao, M.; Pang, R.; Sun, Y.; Gao, S.; Boyi, H. Insole Systems for Disease Diagnosis and Rehabilitation: A Review. *Biosensors (Basel)* **2023**, *13*, 833, doi:10.3390/bios13080833.
13. Anderson, J.; Williams, A.E.; Nester, C. Development and Evaluation of a Dual Density Insole for People Standing for Long Periods of Time at Work. *J Foot Ankle Res* **2020**, *13*, doi:10.1186/s13047-020-00402-2.
14. Ko, M.; Ma, T.; Xiong, S. Acute Effects of Carbon Fiber Insole on Three Aspects of Sports Performance, Lower Extremity Muscle Activity, and Subjective Comfort. *Sensors* **2023**, *23*, 2154, doi:10.3390/s23042154.
15. Wang, Y.; Lam, W.-K.; Cheung, C.-H.; Leung, A.K.-L. Effect of Red Arch-Support Insoles on Subjective Comfort and Movement Biomechanics in Various Landing Heights. *Int J Environ Res Public Health* **2020**, *17*, 2476, doi:10.3390/ijerph17072476.
16. Iacob, M.C.; Popescu, D.; Petcu, D.; Marinescu, R. Assessment of the Flexural Fatigue Performance of 3D-Printed Foot Orthoses Made from Different Thermoplastic Polyurethanes. *Applied Sciences* **2023**, *13*, 12149, doi:10.3390/app132212149.
17. Prakotmongkol, V.; Chaemkhuntod, C.; Nutchamong, Y.; Charoenvitvorakul, T.; Tongchai, S.; Janvikul, W.; Thavornnyutikarn, B.; Kosorn, W.; Praewpipat, B. Comparison of Effectiveness, Patient Satisfaction, and Durability between 3D-Printed Customized Insoles and Conventional Custom-Made Insoles for Flat Feet: A Randomized Controlled Trial. **2023**.
18. EVO Laboratoire Available online: <https://laboratoireevo.com/en/benefits-of-orthosis-made-by-3d-printing> (accessed on 7 April 2024).
19. Alina Dragomir *Confortul Piciorului*; 2022;
20. Mariana Cristiana, I.; Diana, P.; Tudor George, A. Printability of Thermoplastic Polyurethane with Low Shore A Hardness in the Context of Customized Insoles Production. *UPB Scientific Bulletin, Series D* **2024**, *86*.
21. Iacob, M.C.; Popescu, D.; Stochioiu, C.; Baciu, F.; Hadar, A. Compressive Behavior of Thermoplastic Polyurethane with an Active Agent Foaming for 3D-Printed Customized Comfort Insoles. *Polym Test* **2024**, *137*, 108517, doi:10.1016/j.polymertesting.2024.108517.
22. Giza, E.; Cush, G.; Schon, L.C. The Flexible Flatfoot in the Adult. *Foot Ankle Clin* **2007**, *12*, 251–271, doi:10.1016/j.fcl.2007.03.008.
23. Francisco, R.; Chiodo, C.P.; Wilson, M.G. Management of the Rigid Adult Acquired Flatfoot Deformity. *Foot Ankle Clin* **2007**, *12*, 317–327, doi:10.1016/j.fcl.2007.03.013.
24. Michaud, T.C. Foot Orthoses and Other Forms of Conservative Foot Care.; 1997.
25. Jeffcoate, W.J.; Harding, K.G. Diabetic Foot Ulcers. *The Lancet* **2003**, *361*, 1545–1551, doi:10.1016/S0140-6736(03)13169-8.
26. Ma, Z.; Lin, J.; Xu, X.; Ma, Z.; Tang, L.; Sun, C.; Li, D.; Liu, C.; Zhong, Y.; Wang, L. Design and 3D Printing of Adjustable Modulus Porous Structures for Customized Diabetic Foot Insoles. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* **2019**, *2*, 57–63, doi:10.1016/j.ijlmm.2018.10.003.
27. Shaikh, S.; Jamdade, B.; Chanda, A. Effects of Customized 3D-Printed Insoles in Patients with Foot-Related Musculoskeletal Ailments—A Survey-Based Study. *Prosthesis* **2023**, *5*, 550–561, doi:10.3390/prosthesis5020038.
28. Segal, A.; Rohr, E.; Orendurff, M.; Shofer, J.; O'Brien, M.; Sangeorzan, B. The Effect of Walking Speed on Peak Plantar Pressure. *Foot Ankle Int* **2004**, *25*, 926–933, doi:10.1177/107110070402501215.
29. Buldt, A.K.; Forghany, S.; Landorf, K.B.; Levinger, P.; Murley, G.S.; Menz, H.B. Foot Posture Is Associated with Plantar Pressure during Gait: A Comparison of Normal, Planus and Cavus Feet. *Gait Posture* **2018**, *62*, 235–240, doi:10.1016/j.gaitpost.2018.03.005.
30. Gupta, S.; Jayaraman, R.; Sidhu, S.; Malviya, A.; Chatterjee, S.; Chhikara, K.; Singh, G.; Chanda, A. Diabot: Development of a Diabetic Foot Pressure Tracking Device. *J (Basel)* **2023**, *6*, 32–47, doi:10.3390/j6010003.
31. Bacarin, T.A.; Sacco, I.C.N.; Hennig, E.M. Plantar Pressure Distribution Patterns During Gait in Diabetic Neuropathy Patients with a History of Foot Ulcers. *Clinics* **2009**, *64*, 113–120, doi:10.1590/S1807-59322009000200008.
32. Surmen, H.; Ortes, F.; Arslan, Y.Z. Design and Production of Subject Specific Insole Using Reverse Engineering and 3D Printing Technology. **2016**, *5*, 11–15, doi:10.6084/m9.figshare.19729495.
33. Choo, Y.J.; Boudier-Revéret, M.; Chang, M.C. 3D Printing Technology Applied to Orthosis Manufacturing: Narrative Review. *Ann Palliat Med* **2020**, *9*, 4262–4270, doi:10.21037/apm-20-1185.
34. Hastings, M.K.; Mueller, M.J.; Woodburn, J.; Strube, M.J.; Commean, P.; Johnson, J.E.; Cheuy, V.; Sinacore, D.R. Acquired Midfoot Deformity and Function in Individuals with Diabetes and Peripheral Neuropathy. *Clinical Biomechanics* **2016**, *32*, 261–267, doi:10.1016/j.clinbiomech.2015.11.001.
35. Ferreira, R.C.; Gonçalves, D.H.; Filho, J.M.F.; Costa, M.T.; Santin, R.A.L. Midfoot Charcot Arthropathy In Diabetic Patients: Complication Of An Epidemic Disease. *Revista Brasileira de Ortopedia (English Edition)* **2012**, *47*, 616–625, doi:10.1016/S2255-4971(15)30013-6.
36. Najafí, B.; Wrobel, J.S.; Burns, J. Mechanism of Orthotic Therapy for the Painful Cavus Foot Deformity. *J Foot Ankle Res* **2014**, *7*, doi:10.1186/1757-1146-7-2.
37. Shaikh, S.; Jamdade, B.; Chanda, A. Effects of Customized 3D-Printed Insoles in Patients with Foot-Related Musculoskeletal Ailments—A Survey-Based Study. *Prosthesis* **2023**, *5*, 550–561, doi:10.3390/prosthesis5020038.
38. Xu, J.; Ding, L.; Love, P.E.D. Digital Reproduction of Historical Building Ornamental Components: From 3D Scanning to 3D Printing. *Autom Constr* **2017**, *76*, 85–96, doi:10.1016/j.autcon.2017.01.010.
39. Cha, Y.H.; Lee, K.H.; Ryu, H.J.; Joo, I.W.; Seo, A.; Kim, D.-H.; Kim, S.J. Ankle-Foot Orthosis Made by 3D Printing Technique and Automated Design Software. *Appl Bionics Biomech* **2017**, *2017*, 1–6, doi:10.1155/2017/9610468.
40. Schrank, E.S.; Hitch, L.; Wallace, K.; Moore, R.; Stanhope, S.J. Assessment of a Virtual Functional Prototyping Process for the Rapid Manufacture of Passive-Dynamic Ankle-Foot Orthoses. *J Biomech Eng* **2013**, *135*, doi:10.1115/1.4024825.
41. Walbran, M.; Turner, K.; McDaid, A.J. Customized 3D Printed Ankle-Foot Orthosis with Adaptable Carbon Fibre Composite Spring Joint. *Cogent Eng* **2016**, *3*, 1227022, doi:10.1080/23311916.2016.1227022.
42. Aydin, L.; Kucuk, S. A Method for More Accurate FEA Results on a Medical Device Developed by 3D Technologies. *Polym Adv Technol* **2018**, *29*, 2281–2286, doi:10.1002/pat.4339.
43. Woolley, S.M.; Czaja, S.J.; Drury, C.G. An Assessment of Falls in Elderly Men and Women. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* **1997**, *52A*, M80–M87, doi:10.1093/gerona/52A.2.M80.
44. Wojciechowski, E.; Chang, A.Y.; Balassone, D.; Ford, J.; Cheng, T.L.; Little, D.; Menezes, M.P.; Hogan, S.; Burns, J. Feasibility of Designing, Manufacturing and Delivering 3D Printed Ankle-foot Orthoses: A Systematic Review. *J Foot Ankle Res* **2019**, *12*, doi:10.1186/s13047-019-0321-6.
45. Mavroidis, C.; Ranky, R.G.; Sivak, M.L.; Patritti, B.L.; DiPisa, J.; Caddle, A.; Gilhooly, K.; Govoni, L.; Sivak, S.; Lancia, M.; et al. Patient Specific Ankle-Foot Orthoses Using Rapid Prototyping. *J Neuroeng Rehabil* **2011**, *8*, 1, doi:10.1186/1743-0003-8-1.
46. Creylman, V.; Muraru, L.; Pallari, J.; Vertommen, H.; Peeraer, L. Gait Assessment during the Initial Fitting of Customized Selective Laser Sintering Ankle Foot Orthoses in Subjects with Drop Foot. *Prosthet Orthot Int* **2013**, *37*, 132–138, doi:10.1177/0309364612451269.

47. Faustini, M.C.; Neptune, R.R.; Crawford, R.H.; Stanhope, S.J. Manufacture of Passive Dynamic Ankle–Foot Orthoses Using Selective Laser Sintering. *IEEE Trans Biomed Eng* **2008**, *55*, 784–790, doi:10.1109/TBME.2007.912638.
48. Schrank, E.S.; Stanhope, S.J. Dimensional Accuracy of Ankle–Foot Orthoses Constructed by Rapid Customization and Manufacturing Framework. *The Journal of Rehabilitation Research and Development* **2011**, *48*, 31, doi:10.1682/JRRD.2009.12.0195.
49. Telfer, S.; Pallari, J.; Munguia, J.; Dalgarno, K.; McGeough, M.; Woodburn, J. Embracing Additive Manufacture: Implications for Foot and Ankle Orthosis Design. *BMC Musculoskelet Disord* **2012**, *13*, 84, doi:10.1186/1471-2474-13-84.
50. Deckers, J.P.; Vermandel, M.; Geldhof, J.; Vasiliauskaitė, E.; Forward, M.; Plasschaert, F. Development and Clinical Evaluation of Laser-Sintered Ankle Foot Orthoses. *Plastics, Rubber and Composites* **2018**, *47*, 42–46, doi:10.1080/14658011.2017.1413760.
51. Cha, Y.H.; Lee, K.H.; Ryu, H.J.; Joo, I.W.; Seo, A.; Kim, D.-H.; Kim, S.J. Ankle-Foot Orthosis Made by 3D Printing Technique and Automated Design Software. *Appl Bionics Biomech* **2017**, *2017*, 1–6, doi:10.1155/2017/9610468.
52. Shahar, F.S.; Sultan, M.T.H.; Shah, A.U.M.; Saffri, S.N.A. A Comparative Analysis between Conventional Manufacturing and Additive Manufacturing of Ankle-Foot Orthosis. *Applied Science and Engineering Progress* **2020**.
53. SR ISO/ASTM 52900:2016 - Fabricație Aditivă. Principii Generale. Terminologie Available online: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en> (accessed on 7 April 2024).
54. DE Editors Transforming Ankle Foot Orthosis with 3D Printing Available online: <https://www.digitalengineering247.com/article/transforming-ankle-foot-orthosis-3d-printing/> (accessed on 7 April 2024).
55. Yick, K.L.; Tse, C.Y. Textiles and Other Materials for Orthopaedic Footwear Insoles. In *Handbook of Footwear Design and Manufacture*; Elsevier, 2013; pp. 341–371.
56. Daryabor, A.; Kobayashi, T.; Saeedi, H.; Lyons, S.M.; Maeda, N.; Naimi, S.S. Effect of 3D Printed Insoles for People with Flatfeet: A Systematic Review. *Assistive Technology* **2023**, *35*, 169–179, doi:10.1080/10400435.2022.2105438.
57. Xu, R.; Wang, Z.; Ren, Z.; Ma, T.; Jia, Z.; Fang, S.; Jin, H. Comparative Study of the Effects of Customized 3D Printed Insole and Prefabricated Insole on Plantar Pressure and Comfort in Patients with Symptomatic Flatfoot. *Medical Science Monitor* **2019**, *25*, 3510–3519, doi:10.12659/MSM.916975.
58. Mo, S.; Leung, S.H.S.; Chan, Z.Y.S.; Sze, L.K.Y.; Mok, K.-M.; Yung, P.S.H.; Ferber, R.; Cheung, R.T.H. The Biomechanical Difference between Running with Traditional and 3D Printed Orthoses. *J Sports Sci* **2019**, *37*, 2191–2197, doi:10.1080/02640414.2019.1626069.
59. Walker, K.J.; Przewrzelski, B.T.; Kaluf, B.; Driggers, N.H.; Ballard, W.D.; Pruett, T.C.; Hoeffner, S.L.; DesJardins, J.D. Novel 3D-Printed Foot Orthoses with Variable Hardness: A Comfort Comparison to Traditional Orthoses. *Med Eng Phys* **2023**, *115*, 103978, doi:10.1016/j.medengphys.2023.103978.
60. Channasanon, S.; Praewpipat, B.; Duangjinda, N.; Sornchalerm, L.; Tesavibul, P.; Paecharoen, S.; Tanodekaew, S. 3D-Printed Medial Arch Supports of Varying Hardness versus a Prefabricated Arch Support on Plantar Pressure: A 1-Month Randomized Crossover Study in Healthy Volunteers. *Prosthet Orthot Int* **2023**, *47*, 210–217, doi:10.1097/PXR.000000000000178.
61. Jonnala, U.K.; sankineni, R.; Ravi Kumar, Y. Design and Development of Fused Deposition Modeling (FDM) 3D-Printed Orthotic Insole by Using Gyroid Structure. *J Mech Behav Biomed Mater* **2023**, *145*, 106005, doi:10.1016/j.jmbbm.2023.106005.
62. Rico-Baeza, G.; Pérez-Soto, G.I.; Morales-Hernández, L.A.; Cuan-Urquiza, E.; Camarillo-Gómez, K.A. Additively Manufactured Foot Insoles Using Body-Centered Cubic (BCC) and Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Cellular Structures. *Applied Sciences* **2023**, *13*, 12665, doi:10.3390/app132312665.
63. Siegkas, P.; Lane, C.; Apps, C. Plantar Pressure Distribution Using Personalised 3D Printed Lattice Insoles with Distributed Stiffness. *Engineering Research Express* **2024**, *6*, 025529, doi:10.1088/2631-8695/ad4435.
64. Kang, L.-P.; Gong, T.-S. Design of 3D Printed Pressure-Reducing Insoles Based on Changes in Parameters of Lattice Structure. *Advances in Mechanical Engineering* **2023**, *15*, doi:10.1177/16878132231216609.
65. Kumar, R.; Sarangi, S.K. 3D Printed Customized Diabetic Foot Insoles with Architecture Designed Lattice Structures – a Case Study. *Biomed Phys Eng Express* **2024**, *10*, 015019, doi:10.1088/2057-1976/ad1732.
66. Hudak, Y.F.; Li, J.-S.; Cullum, S.; Strzelecki, B.M.; Richburg, C.; Kaufman, G.E.; Abrahamson, D.; Heckman, J.T.; Ripley, B.; Telfer, S.; et al. A Novel Workflow to Fabricate a Patient-Specific 3D Printed Accommodative Foot Orthosis with Personalized Latticed Metamaterial. *Med Eng Phys* **2022**, *104*, 103802, doi:10.1016/j.medengphys.2022.103802.
67. Zoboli, L.; Bianchi, D.; Falcinelli, C.; Gizzi, A. Improving the Manufacturing of 3D Printed Insoles through a Combined Experimental and Topology Optimization Approach. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* **2024**, 1–15, doi:10.1080/15376494.2024.2326667.
68. Ning, K.; Yick, K.-L.; Yu, A.; Yip, J. Effects of Textile-Fabricated Insole on Foot Skin Temperature and Humidity for Enhancing Footwear Thermal Comfort. *Appl Ergon* **2022**, *104*, 103803, doi:10.1016/j.apergo.2022.103803.
69. Ning, K.; Yick, K.-L.; Yu, A.; Yip, J. Effects of Textile-Fabricated Insole on Foot Skin Temperature and Humidity for Enhancing Footwear Thermal Comfort. *Appl Ergon* **2022**, *104*, 103803, doi:10.1016/j.apergo.2022.103803.
70. Leung, M.S.; Yick, K.; Sun, Y.; Chow, L.; Ng, S. 3D Printed Auxetic Heel Pads for Patients with Diabetic Mellitus. *Comput Biol Med* **2022**, *146*, 105582, doi:10.1016/j.compbiomed.2022.105582.
71. Rico-Baeza, G.; Pérez-Soto, G.I.; Morales-Hernández, L.A.; Cuan-Urquiza, E.; Camarillo-Gómez, K.A. Additively Manufactured Foot Insoles Using Body-Centered Cubic (BCC) and Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Cellular Structures. *Applied Sciences* **2023**, *13*, 12665, doi:10.3390/app132312665.
72. Geiger, F.; Keibach, M.; Vogel, D.; Weissmann, V.; Bader, R. Efficient Computer-Based Method for Adjusting the Stiffness of Subject-Specific 3D-Printed Insoles during Walking. *Applied Sciences* **2023**, *13*, 3854, doi:10.3390/app13063854.
73. Ebrahim, M. 3D Laser Scanners: History, Applications, And Future. **2014**, doi:10.13140/2.1.3331.3284.
74. Gensole Available online: <http://gensole.com/> (accessed on 7 April 2024).
75. SATRA Performance Footwear Testing Available online: [https://www.youtube.com/watch?v=V-Tag1Gc8tY&ab\\_channel=SatraTechnologyCentre](https://www.youtube.com/watch?v=V-Tag1Gc8tY&ab_channel=SatraTechnologyCentre) (accessed on 2 June 2024).
76. Whole Shoes Flexing Tester GT-KA01-2B Available online: [https://www.youtube.com/watch?v=T2NDCQfkJyQ&ab\\_channel=GesterInstruments](https://www.youtube.com/watch?v=T2NDCQfkJyQ&ab_channel=GesterInstruments) (accessed on 2 June 2024).
77. International Standard ISO 17707:2005 - Footwear - Test Methods for Outsoles - Flex Resistance Available online: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/31478/e04fd9b056347b4bb0a39e85e9541e6/ISO-17707-2005.pdf> (accessed on 7 April 2024).
78. Popescu, D.; Gheorghe Amza, C.; Marinescu, R.; Cristiana Iacob, M.; Luminița Căruțașu, N. Investigations on Factors Affecting 3D-Printed Holes Dimensional Accuracy and Repeatability. *Applied Sciences* **2022**, *13*, 41, doi:10.3390/app13010041.
79. Nancharaiyah, T.; Raju, D.; Raju, V. An Experimental Investigation on Surface Quality and Dimensional Accuracy of FDM Components. *Int J Emerg Technol* **2010**, *1*.
80. Zhu, Q.; Liu, Y.; Cai, Y.; Wu, M. Research on the Shrinkage of Model with Hole in PLA Material Based on the FDM 3D Printing. In Proceedings of the Proceedings of the 2017 6th International Conference on Measurement, Instrumentation and Automation (ICMIA 2017); Atlantis Press: Paris, France, 2017.
81. Buj-Corral, I.; Bagheri, A.; Sivatte-Adroer, M. Effect of Printing Parameters on Dimensional Error, Surface Roughness and Porosity of FFF Printed Parts with Grid Structure. *Polymers (Basel)* **2021**, *13*, 1213, doi:10.3390/polym13081213.

82. Hernandez, D. Factors Affecting Dimensional Precision of Consumer 3D Printing. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace* **2015**, doi:10.15394/ijaaa.2015.1085.
83. Amza, C.G.; Zapciu, A.; Baci, F.; Vasile, M.I.; Popescu, D. Aging of 3D Printed Polymers under Sterilizing UV-C Radiation. *Polymers (Basel)* **2021**, *13*, 4467, doi:10.3390/polym13244467.
84. Lin, W.; Xie, G.; Qiu, Z. Effects of Ultraviolet Aging on Properties of Wood Flour–Poly(Lactic Acid) 3D Printing Filaments. *Bioresources* **2019**.
85. Amza, C.G.; Zapciu, A.; Baci, F.; Vasile, M.I.; Nicoară, A.I. Accelerated Aging Effect on Mechanical Properties of Common 3D-Printing Polymers. *Polymers (Basel)* **2021**, *13*.
86. Hernandez, D. Factors Affecting Dimensional Precision of Consumer 3D Printing. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace* **2015**, doi:10.15394/ijaaa.2015.1085.
87. Herath, H.M.D.B.; Thalagala, S.; Gamage, P. Enhancing the Dimensional Accuracy of Components Fabricated Using Rapid Prototyping Technique by Optimizing Machine Parameters of a 3D Printer. In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM); IEEE, December 2019; pp. 1379–1383.
88. Zhu, Q.; Liu, Y.; Cai, Y.; Wu, M. Research on the Shrinkage of Model with Hole in PLA Material Based on the FDM 3D Printing. In Proceedings of the Proceedings of the 2017 6th International Conference on Measurement, Instrumentation and Automation (ICMIA 2017); Atlantis Press: Paris, France, 2017.
89. Pearson, E.J.M. Comfort and Its Measurement – A Literature Review. *Disabil Rehabil Assist Technol* **2009**, *4*, 301–310, doi:10.1080/17483100902980950.
90. Kromolowska, K.; Kluza, K.; Kańtoch, E.; Sulikowski, P. Open-Source Strain Gauge System for Monitoring Pressure Distribution of Runner’s Feet. *Sensors* **2023**, *23*, 2323, doi:10.3390/s23042323.
91. Pressure Mapping FS-INS-16Z Foot Pressure Distribution. LEGACT - Leading Force Sensing Technology Solution Provider Available online: <https://film-sensor.com/product/pressure-mapping-fs-ins-16z> (accessed on 7 April 2024).
92. McKeen, L.W. Environmentally Friendly Polymers. In *Permeability Properties of Plastics and Elastomers*; Elsevier, 2012; pp. 287–304.
93. Reshmy, R.; Philip, E.; Vaisakh, P.H.; Sindhu, R.; Binod, P.; Madhavan, A.; Pandey, A.; Sirohi, R.; Tarafdar, A. Biodegradable Polymer Composites. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals*; Elsevier, 2021; pp. 393–412.
94. TPU Filament Filaflex 60A, Flexible Filament for 3d Printing. Recreus. Available online: <https://recreus.com/gb/filaments/1-filaflex-60a.html> (accessed on 7 April 2024).
95. TPU Filament Filaflex 70A, Flexible Filament for 3D Printing. Recreus Available online: <https://recreus.com/gb/filaments/6-filaflex-70a.html> (accessed on 7 April 2024).
96. TPU Filament Filaflex 82A, Flexible Filament for 3D Printing. Recreus. Available online: <https://recreus.com/gb/filaments/9-684-filaflex-82a.html> (accessed on 7 April 2024).
97. MerchantPro. Filament Polymaker PolyFlex TPU-90A Teal (Turcoaz) 750g. Filamente 3D. Available online: <https://www.filamente3d.ro/filamente/filament-polymaker-polyflex-tpu-90a-teal-turcoaz-750g> (accessed on 7 April 2024).
98. Damanpack, A.R.; Sousa, A.; Bodaghi, M. Porous PLAs with Controllable Density by FDM 3D Printing and Chemical Foaming Agent. *Micromachines (Basel)* **2021**, *12*, 866, doi:10.3390/mi12080866.
99. Crowe, S.; Maxwell, S.; Brar, H.; Yu, L.; Kairn, T. Use of Light-Weight Foaming Poly(lactic acid) as a Lung-Equivalent Material in 3D Printed Phantoms. *Phys Eng Sci Med* **2023**, *46*, 1811–1817, doi:10.1007/s13246-023-01318-4.
100. Kalaycıoğlu, Ş.G. Mechanical Behaviour Of Polymeric Lattice Structures Produced By Additive Manufacturing. Master of Science, Middle East Technical University, 2022.
101. Hermann, S. Testing ColorFabb VarioShore TPU - Foaming 3D Printing Filament. Available online: <https://www.cnckitchen.com/blog/testing-colorfabb-varioshore-tpu-foaming-3d-printing-filament> (accessed on 7 April 2024).
102. Popescu, D.; Lăptoiu, D.; Marinescu, R.; Botezatu, I. Design and 3D Printing Customized Guides for Orthopaedic Surgery – Lessons Learned. *Rapid Prototyp J* **2018**, *24*, 901–913, doi:10.1108/RPJ-05-2017-0099.
103. Wang, Z.; Dubrowski, A. A Semi-Automatic Method to Create an Affordable Three-Dimensional Printed Splint Using Open-Source and Free Software. *Cureus* **2021**, doi:10.7759/cureus.13934.
104. Chatzistergos, P.E.; Gatt, A.; Formosa, C.; Farrugia, K.; Chockalingam, N. Optimised Cushioning in Diabetic Footwear Can Significantly Enhance Their Capacity to Reduce Plantar Pressure. *Gait Posture* **2020**, *79*, 244–250, doi:10.1016/j.gaitpost.2020.05.009.
105. Pivar, M.; Gregor-Svetec, D.; Muck, D. Effect of Printing Process Parameters on the Shape Transformation Capability of 3D Printed Structures. *Polymers (Basel)* **2021**, *14*, 117, doi:10.3390/polym14010117.
106. ColorFabb VarioShore TPU Available online: [https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS\\_E\\_ColorFabb\\_varioShore\\_TPU.pdf](https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS_E_ColorFabb_varioShore_TPU.pdf) (accessed on 7 April 2024).
107. Nofar, M.; Utz, J.; Geis, N.; Altstädt, V.; Ruckdäschel, H. Foam 3D Printing of Thermoplastics: A Symbiosis of Additive Manufacturing and Foaming Technology. *Advanced Science* **2022**, *9*, doi:10.1002/adv.202105701.
108. Sun, B.; Wu, L. Research Progress of 3D Printing Combined with Thermoplastic Foaming. *Front Mater* **2022**, *9*, doi:10.3389/fmats.2022.1083931.
109. Popescu, D.; Iacob, M.C.; Tarbă, C.; Lăptoiu, D.; Cotruț, C.M. Exploring a Novel Material and Approach in 3D-Printed Wrist-Hand Orthoses. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* **2024**, *8*, 29, doi:10.3390/jmmp8010029.
110. Paluch, A.E.; Gabriel, K.P.; Fulton, J.E.; Lewis, C.E.; Schreiner, P.J.; Sternfeld, B.; Sidney, S.; Siddique, J.; Whitaker, K.M.; Carnethon, M.R. Steps per Day and All-Cause Mortality in Middle-Aged Adults in the Coronary Artery Risk Development in Young Adults Study. *JAMA Netw Open* **2021**, *4*, e2124516, doi:10.1001/jamanetworkopen.2021.24516.
111. ISO 7619-1:2004 - Rubber, Vulcanized or Thermoplastic — Determination of Indentation Hardness — Part 1: Durometer Method (Shore Hardness). Available online: <https://www.iso.org/standard/31078.html> (accessed on 7 April 2024).
112. Birke, J.A.; Foto, J.G.; Pfeifer, L.A. Effect of Orthosis Material Hardness on Walking Pressure in High-Risk Diabetes Patients. *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics* **1999**, *11*.
113. Brodsky, J.W.; Pollo, F.E.; Cheleuitte, D.; Baum, B.S. Physical Properties, Durability, and Energy-Dissipation Function of Dual-Density Orthotic Materials Used in Insoles for Diabetic Patients. *Foot Ankle Int* **2007**, *28*, 880–889, doi:10.3113/FAL.2007.0880.
114. Rubber, Vulcanized or Thermoplastic - Determination of Compression Stress-Strain Properties ISO 7743:2017. Available online: <https://www.iso.org/standard/72784.html> (accessed on 7 April 2024).
115. León-Calero, M.; Reyburn Valés, S.C.; Marcos-Fernández, Á.; Rodríguez-Hernandez, J. 3D Printing of Thermoplastic Elastomers: Role of the Chemical Composition and Printing Parameters in the Production of Parts with Controlled Energy Absorption and Damping Capacity. *Polymers (Basel)* **2021**, *13*, 3551, doi:10.3390/polym13203551.
116. Płatek, P.; Rajkowski, K.; Cieplak, K.; Sarzyński, M.; Małachowski, J.; Woźniak, R.; Janiszewski, J. Deformation Process of 3D Printed Structures Made from Flexible Material with Different Values of Relative Density. *Polymers (Basel)* **2020**, *12*, 2120, doi:10.3390/polym12092120.
117. Bean, P.; Lopez-Anido, R.A.; Vel, S. Numerical Modeling and Experimental Investigation of Effective Elastic Properties of the 3D Printed Gyroid Infill. *Applied Sciences* **2022**, *12*, 2180, doi:10.3390/app12042180.