

RAPORT ȘTIINȚIFIC

PROTEZĂ GLEZNĂ INTELIGENTĂ EXPERIMENTALĂ BAZATĂ PE FLUIDE INTELIGENTE (ESAP-SMAM)

Etapa 3:

Realizarea testelor pentru sistemul complet (*COORDONATOR UCV+partener SEDONA*)

Activitatea 3.1: Realizarea testelor pentru sistemul complet

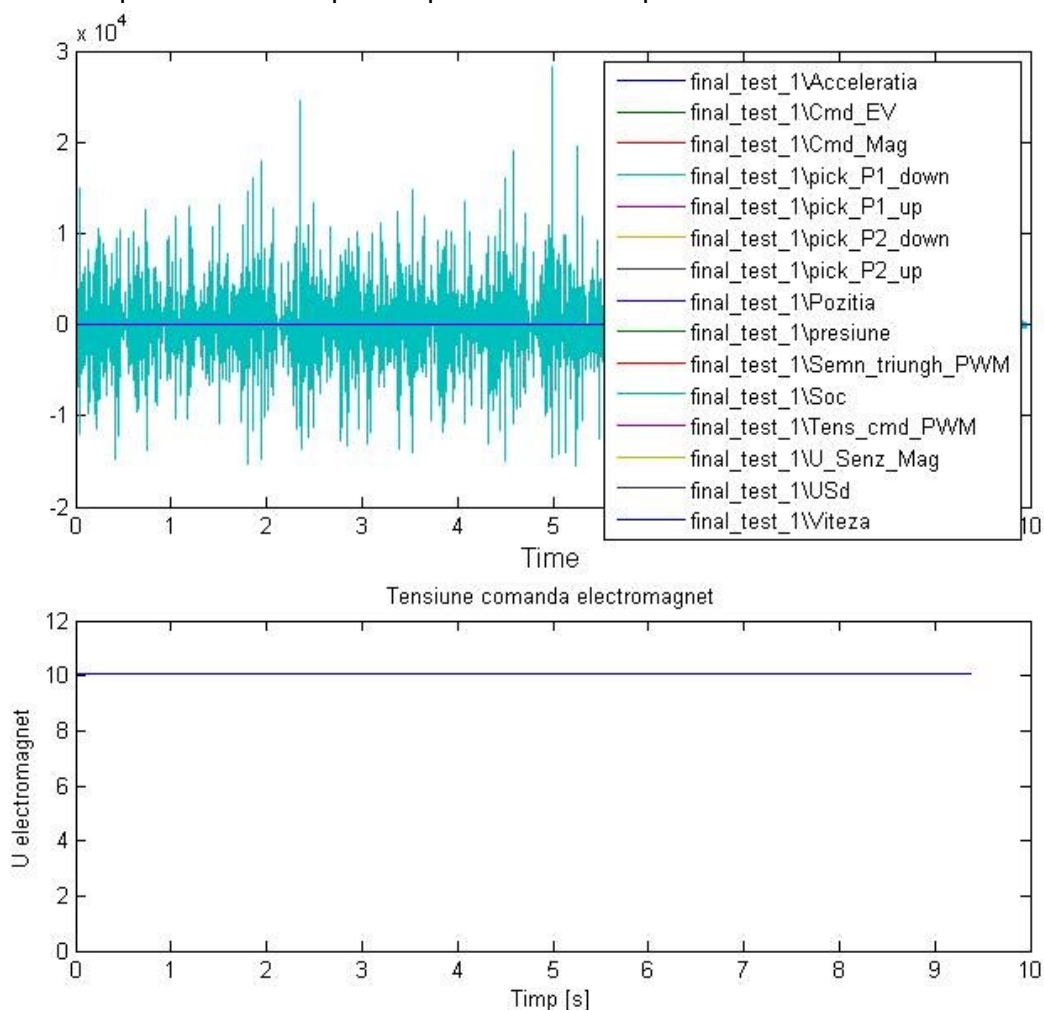
Categorie activitate: A2 – Cercetare industrială

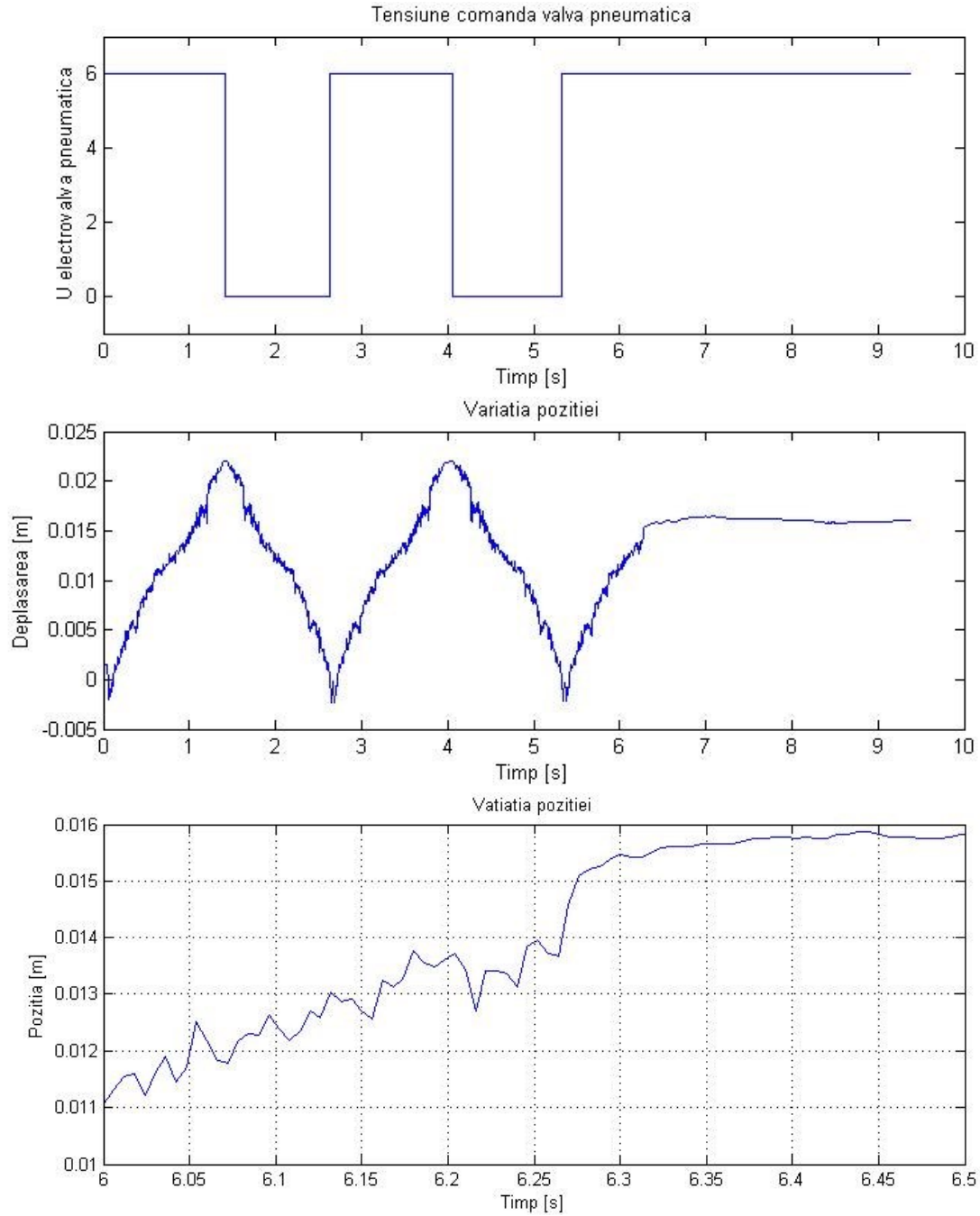
Activitatea 3.2: Realizările simulărilor pe datele obținute și sintetizarea rezultatelor din punct de vedere medical și inginer

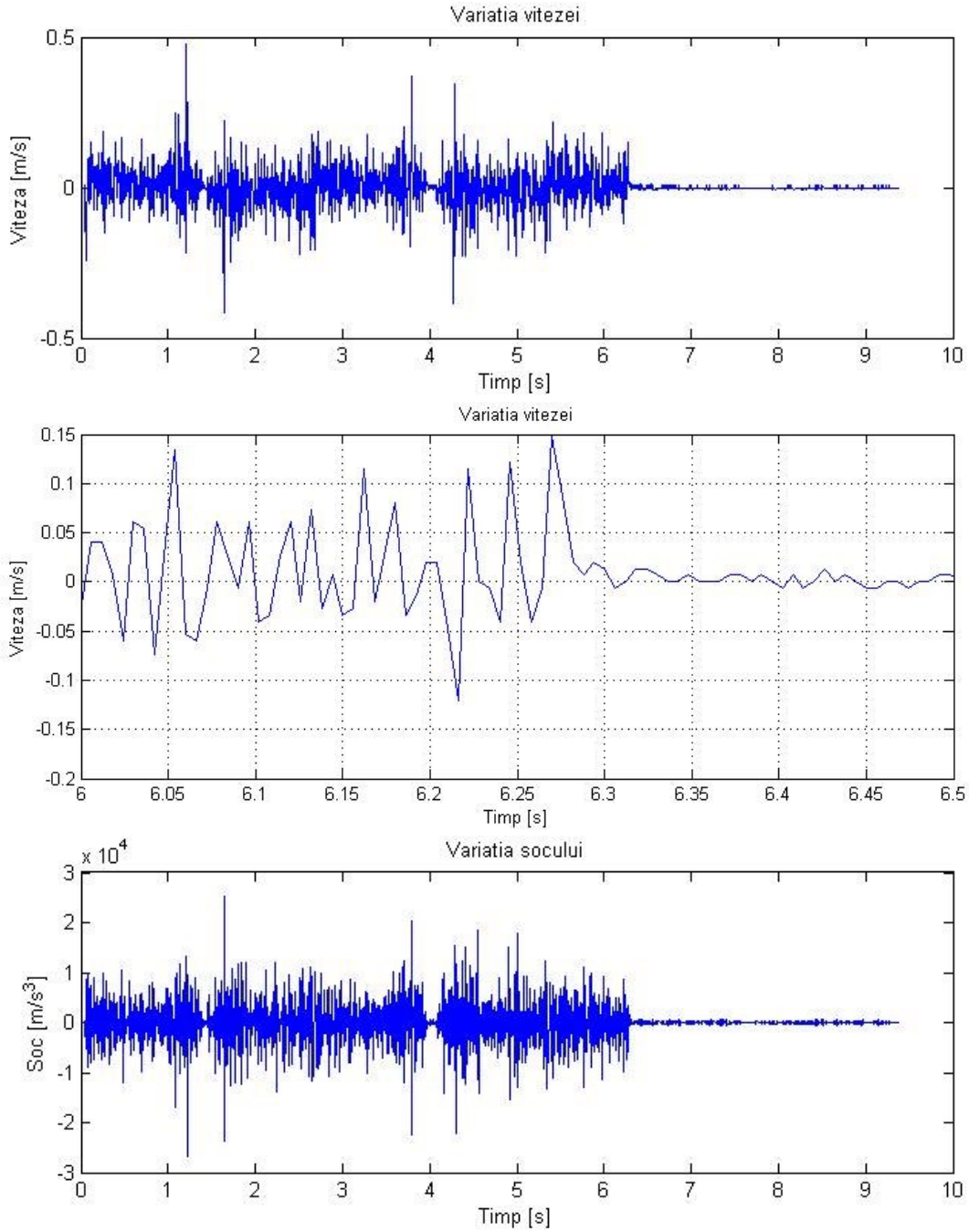
Categorie activitate: A2 – Cercetare industrială

1 PLATFORMA PENTRU DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A PARAMETRILOR VALVEI-STOP MAGNETOREOLOGICE

În această etapă s-au realizat determinări experimentale ale comportării valvei-stop la solicitările impuse de proteză. Valorile încărcării protezei/articulației/valvei-stop au fost determinate folosind platforma pentru determinarea parametrilor pășirii (descrisă în raportul 2 și tratată la punctul 2 din acest raport). În figurile următoare este reprezentată grafic evoluția parametrilor achiziționați cu ajutorul platformei, precum și parametrii de comandă ai platformei pentru una din determinări. Determinările au fost făcute în mod repetat, valorile obținute mediindu-se. Înaintea fiecărei determinări lichidul magnetoreologic a fost omogenizat prin deplasarea fluidului prin valva-stop fără expunere la câmp magnetic, prin multiple mișcări succesive în sens pozitiv/negativ ale pistoanelor hidraulice. Datele determinate experimental confirmă datele obținute prin simulări, deci confirmă faptul că valva-stop corespunde sarcinilor prescrise.







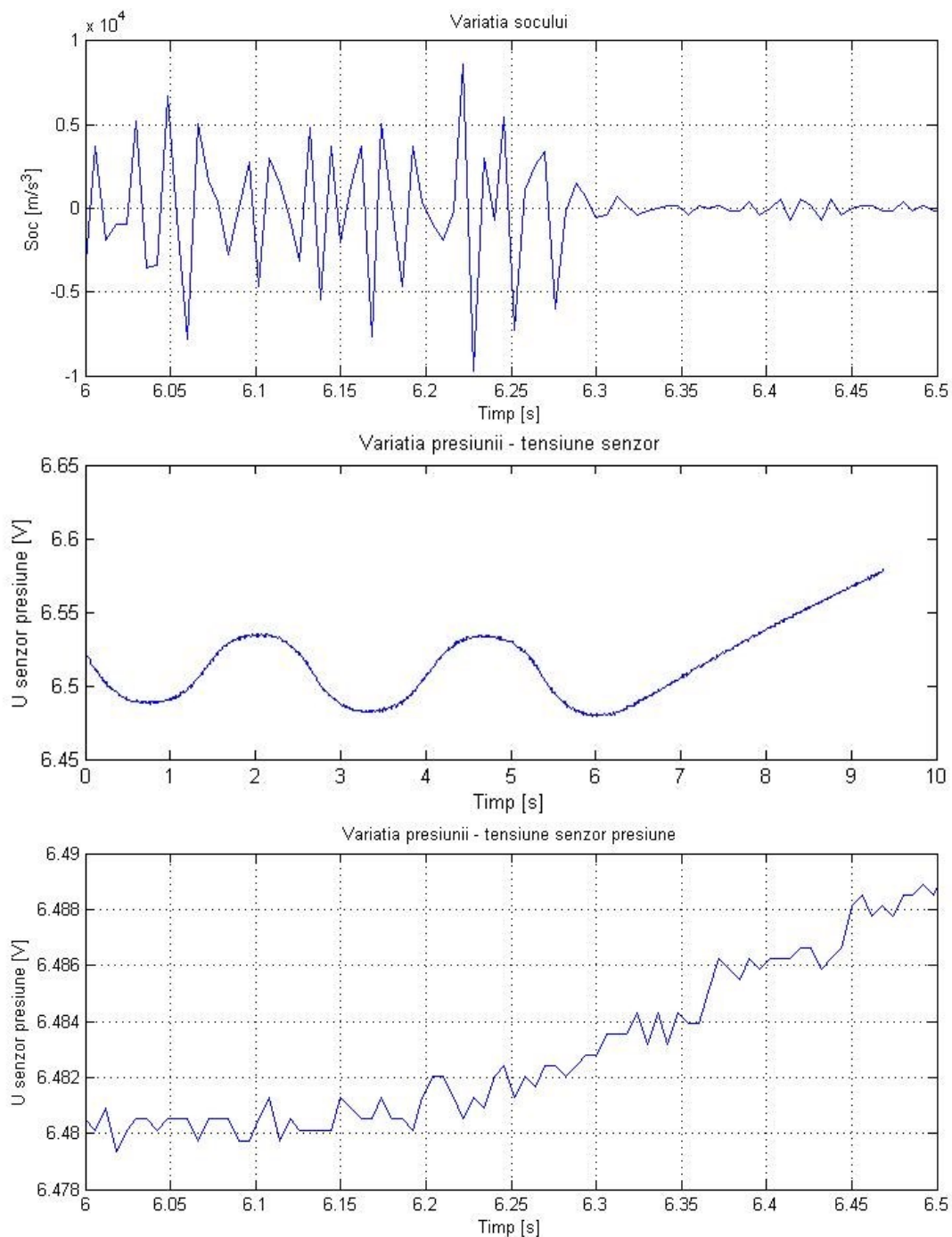


Figura 1 Evoluția în timp a parametrilor valve-stop. Semnal treaptă la 6 secunde după pornire, tensiune generator excitație 6V.

2 STUDIU EXPERIMENTAL ASUPRA PROPRIETĂȚILOR FLUIDULUI MAGNETOREOLOGIC

S-a realizat un studiu experimental asupra proprietăților fluidului magnetoreologic folosit în cadrul protezei, respectiv MRF122. S-a făcut un studiu comparativ asupra a două mostre. Prima mostră a constat din lichid expus pentru o perioadă mare de timp în câmp magnetic. Ce-a de-a doua mostră conținea același lichid, neexpus câmpului magnetic. De asemenea S-a realizat un studiu asupra dependenței vâscozității fluidului (și a altor proprietăți) de expunerea la temperatură, de la temperatura mediului ambiant, până la temperaturi extreme (peste 1000°).

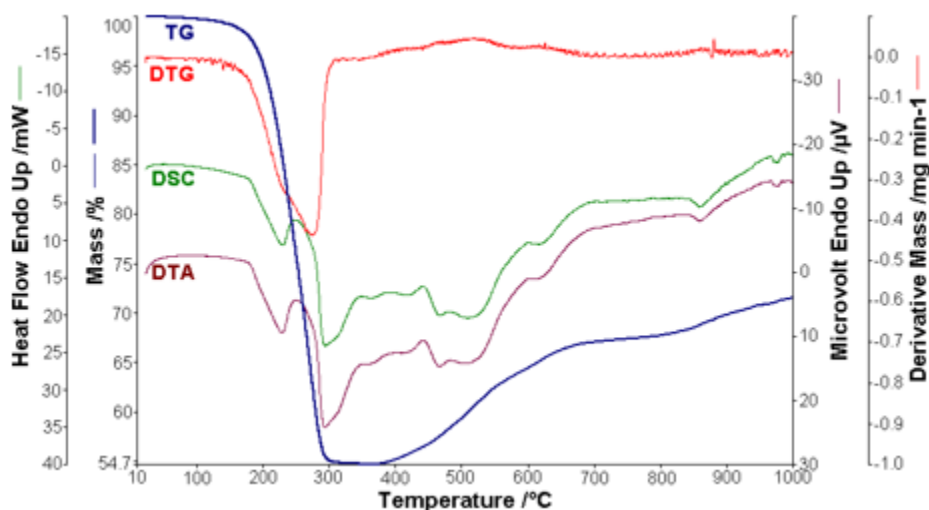


Figura 2 Curbe termoanalitice pentru încălzirea aerului de MRF122

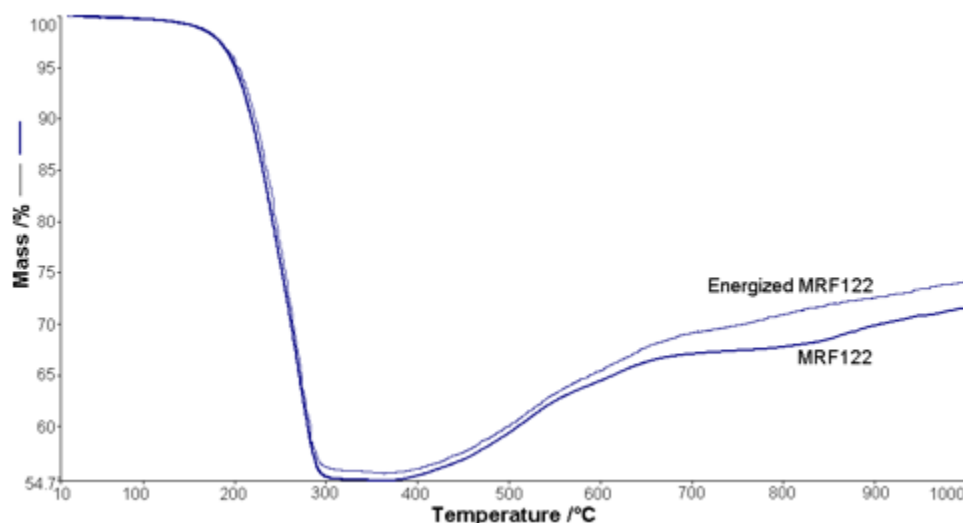


Figura 3. Evoluția maselor celor două mostre studiate

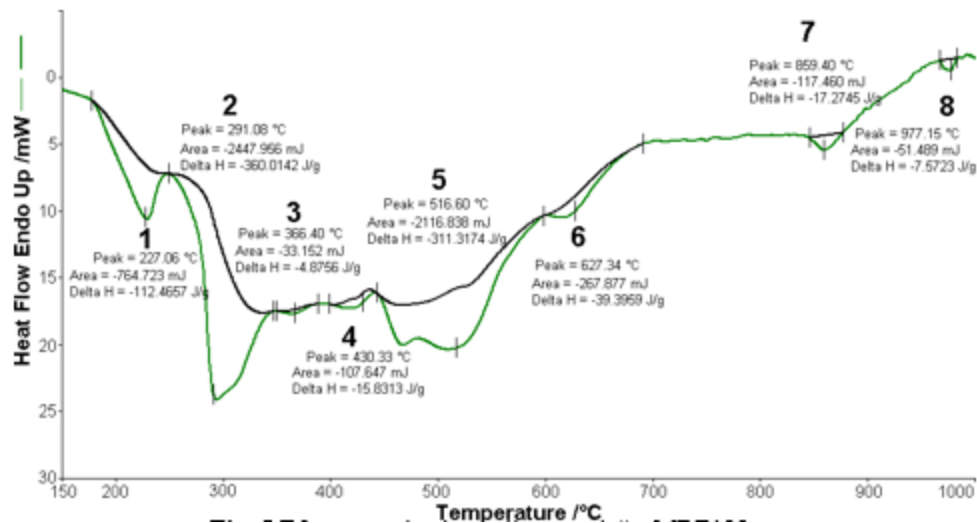


Figura 4. Efecte termice la analiza termică a MRF122

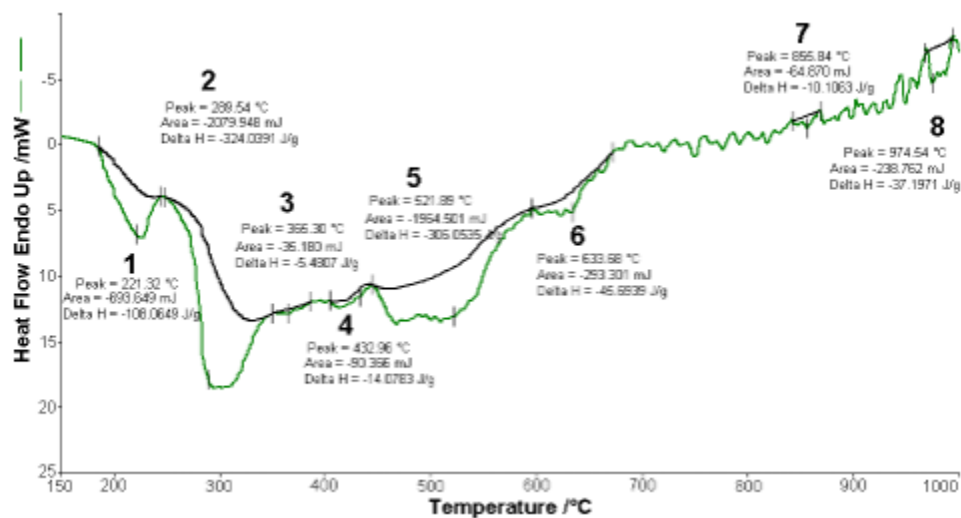


Figura 5. Efecte termice la analiza termică sub tensiune a MRF122

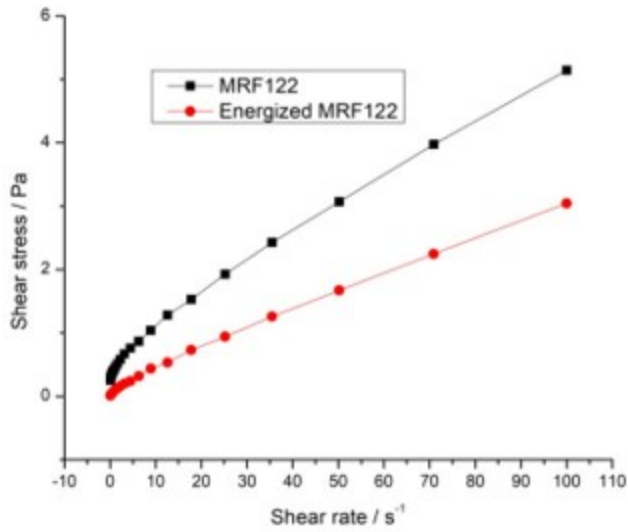


Figura 6. Reprezentarea efortului de forfecare

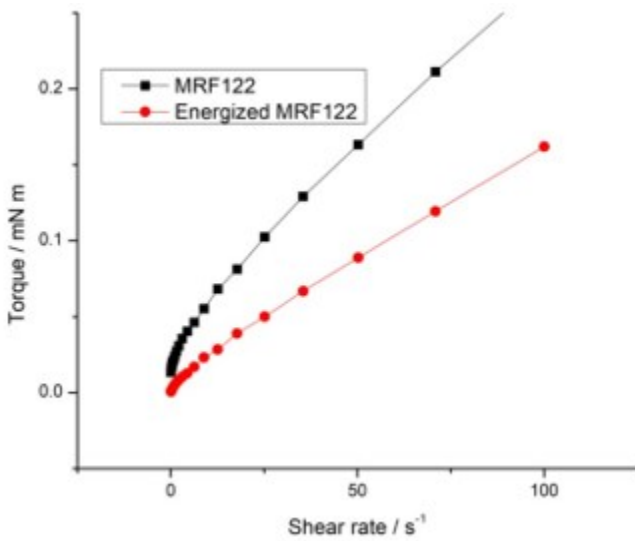


Figura 7. Reprezentarea cuplului în raport cu viteza de forfecare

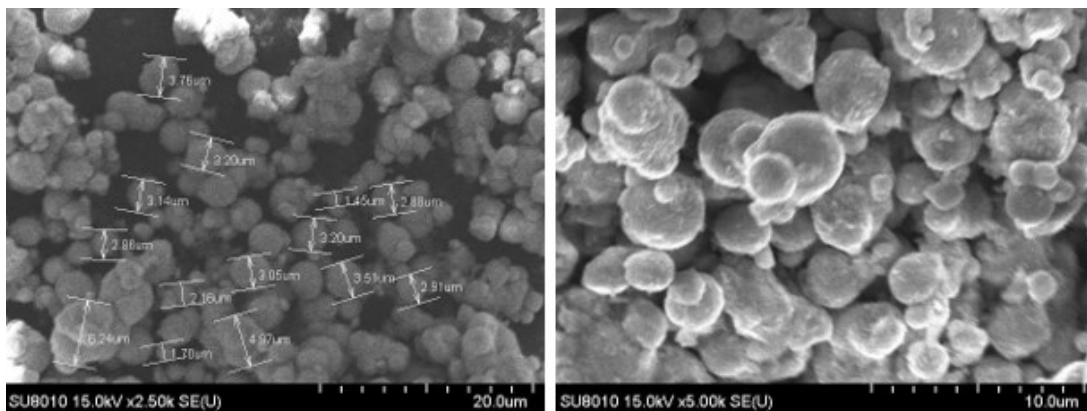


Figura 8. Imagini SEM ale probei calcinate 8 ore la 300°C. mărire 2500x, mărire 5000x.

Concluzii

Proprietățile de stabilitate termică, comportament reologic și proprietăți morfologice ale fluidului MRF122 au fost determinate pentru utilizarea într-o articulație sferică controlată magnetoreologic, utilizată în ortopedie, robotică, endoscopie, etc.

Măsurătorile au fost efectuate în absența câmpului magnetic excitant, deoarece echipamentele folosite nu au permis acest lucru. S-au studiat astfel numai aspectele reologice ale fluidului, în special vâscozitatea.

Au fost folosite două probe cu fluid MRF122, din care una a fost supusă unui câmp magnetic de 0.37T timp de cinci zile, fluidul fiind reomogenizat la fiecare două ore (pentru evitarea sedimentării). S-au studiat astfel și efectele expunerii îndelungate la câmpul magnetic de excitație.

S-a observat că la temperaturi mai mici decât 175°C fluidul este stabil termic. La temperaturi între 177°C și 350°C componenta de ulei a fluidului se vaporizează și fluidul prezintă o descompunere oxidativă a amestecului de hidrocarburi cu particule feromagnetice.

Peste această temperatură fluidul MRF122 prezintă efecte exodermice, oxidare a fierului și fenomene de tranziție spre oxizi.

Reologic ambele probe prezintă comportamentul unor fluide non-Newtoniene, a căror vâscozitate scade o dată cu creșterea vitezei de forfecare.

Proprietățile elastice scad cu creșterea frecvenței unghiulare, similar cu tangenta creșterii factorului de pierderi.

Fluidul energizat (proba 1) prezintă o foarte slabă structură a forțelor interne, și are un comportament de fluid vâscoelastic la care predomină proprietățile plastice.

Acest studiu dovedește importanța dependenței vâscozității de temperatură, factor important în algoritmul de control.

În concluzie, folosirea fluidului MRF122 în cadrul protezei, respectând intervalul de temperatură impus de producător, este optimă și nu impune o ajustare a ecuației descriptive a controlului prin introducerea unui nou termen care induce dependența vâscozității de temperatură. La folosirea în medii cu variații mari ale temperaturii de lucru (alte aplicații) acest aspect este necesar (nu numai indicat).

3 SISTEM DE ACHIZIȚIE PENTRU DETERMINAREA FAZEI DE PĂȘIRE ȘI A CARACTERISTICILOR MERSULUI

În această etapă a fost asamblat și testat sistemul de achiziție a parametrilor pentru determinarea fazei de pășire și a caracteristicilor mersului.

Pentru atingerea acestui obiectiv a fost reproiectată și realizată o nouă versiune a sistemului, din punct de vedere mecanic. A fost reproiectată talpa corectând deficiențele de funcționare determinate anterior.

Astfel a fost reproiectată și realizată o nouă articulație a tălpii (în zona degetelor).

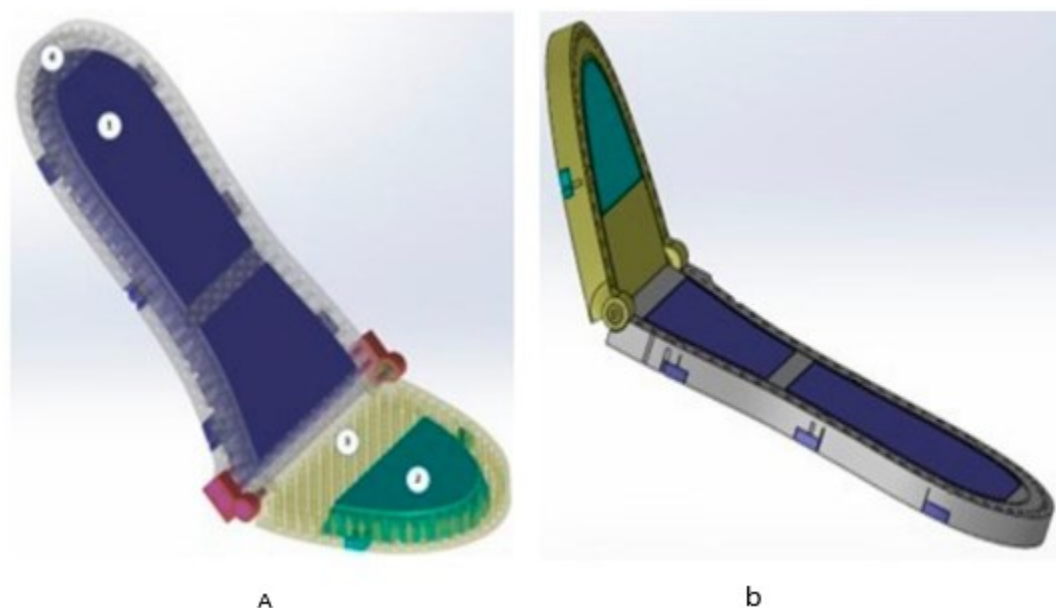


Figura 1. Talpă sandală—Design Solidworks: (a) vedere interioară a tălpii; (b) talpă cu vedere la exterior; (c) elementele tălpii: 1 — talpa călcâiului; 2—cadru talpă călcâi; 3 — talpa degetului; 4—cadru tălpii degetelor.

A fost reproiectat din punct de vedere mecanic sistemul senzorial de pe talpă, destinat determinării încărcării cu sarcină a tălpii în timpul pășirii.



Figura 6. Senzor montat pe talpa sandalei—prototip de imprimantă 3D, ABS—detaliu de poziționare folosind excentric, detaliu de montare a senzorului în carcasă.

Prin crearea unor șabloane pentru senzorii de presiune s-a optimizat poziționarea senzorilor funcție de mărimea brânțului și tipul acestuia (bărbat/femeie).



Figura 2. (a) Distribuția senzorilor de presiune pe talpă;

Sistemul de achiziție este robust, ieftin (în jur de 200EUR), fapt care îl recomandă pentru performanță/preț, printre cele mai eficiente din domeniu. Suplimentar sistemul îmbină două sisteme de achiziție, respectiv măsurarea distribuției greutateii pe talpă în timpul pășirii, cu determinarea parametrilor dinamici ai mersului în timpul pășirii. Sistemele de achiziție similare din domeniu sunt independente și relativ scumpe, comparativ cu cel realizat. De asemenea sistemul a fost proiectat și realizat astfel încât după realizarea achiziției parametrilor, care vor constitui baza de date pentru determinarea fazei pășirii, să fie integrat în proteză.

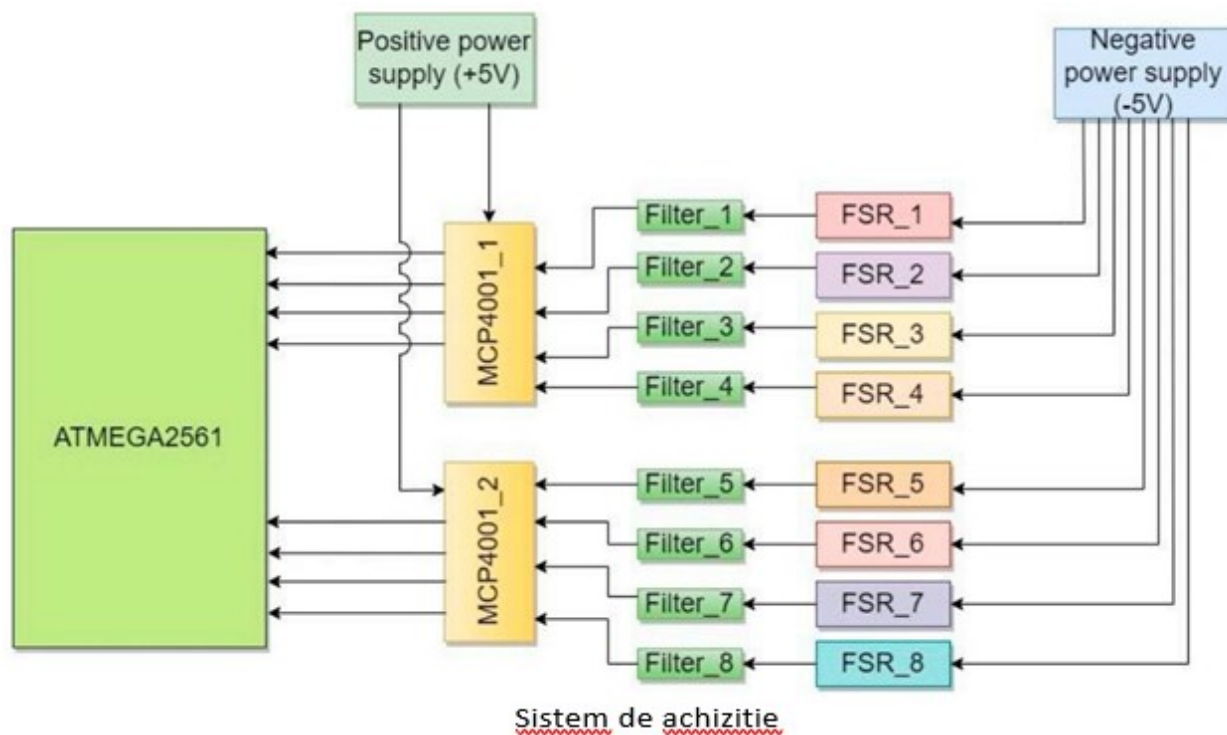


Figura 3. Schema hardware a sistemului de achiziție

Datele pentru sistemul senzorial au fost validate, verificând repetabilitatea, intervalul de măsurare, omogenitatea, folosind metode de metrologie specifice.

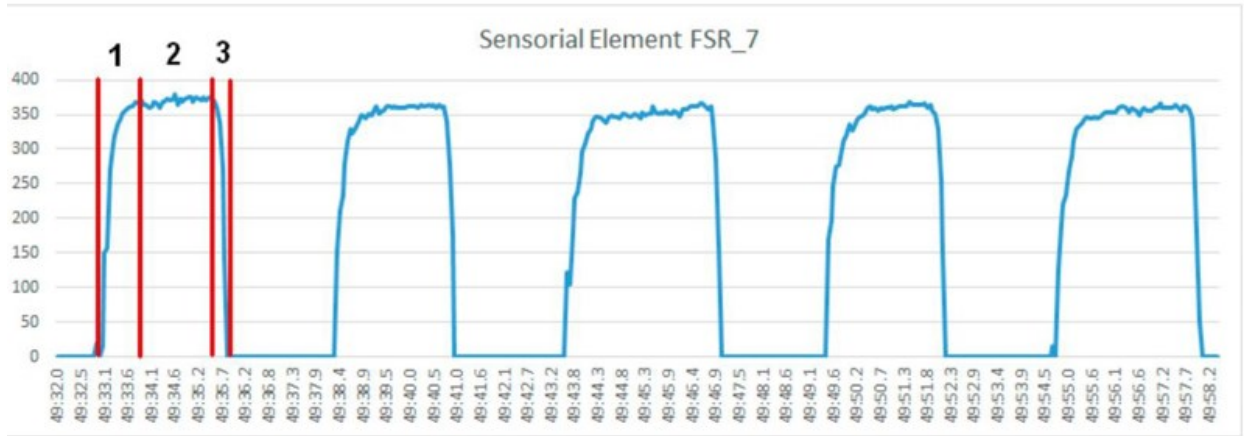


Figura 4. Eșantion dintr-un set de date de repetabilitate pentru senzorul FSR_7, folosind o greutate de 10 kg.

Au fost făcute determinări pe un lot de zece persoane, bărbați și femei.



Figura 5. Sistemul de determinare a fazei pășirii

Tabel 1 Rezultatele testului de repetabilitate

Senzorial											
Element ID	Valoare 1	Valoare 2	Valoare 3	Valoare 4	Valoare 5	Valoare 6	Valoare 7	Valoare 8	Valoare 9	Valoare 10	SD medie (%)
FSR_0	110	140	141	132	108	103	106	138	124	116	121,8 12,39
FSR_1	119	118	96	121	73	64	100	59	110	84	94,4 24,46
FSR_2	41	53	74	90	63	76	49	59	63	70	63,8 21,94
FSR_3	102	90	99	101	98	99	108	94	102	91	98,4 5,56
FSR_4	38	37	26	30	38	31	34	37	31	32	33,4 11,97
FSR_5	45	52	43	57	37	52	50	52	44	48	48 12,10
FSR_6	74	66	79	56	63	64	82	55	82	73	69,4 14,40
FSR_7	102	67	98	97	73	50	79	68	65	51	75 25,40
FSR_0	154	170	174	187	190	157	188	167	144	146	167 10,17
FSR_1	204	186	157	147	165	197	189	199	193	228	186,5 12,93
FSR_2	211	201	197	217	228	222	221	214	234	207	215,2 5,40
FSR_3	200	210	204	196	201	181	198	197	214	193	199,4 4,56
FSR_4	180	189	192	170	187	190	172	191	183	187	184,1 4,23
FSR_5	55	60	52	72	60	60	68	56	61	61	60,5 9,73
FSR_6	213	192	186	194	191	194	216	220	192	217	201,5 6,55
FSR_7	214	222	227	219	207	220	196	222	212	211	215 4,20
FSR_0	308	271	283	277	295	295	315	307	294	264	292 5,60
FSR_1	287	248	368	317	366	437	345	351	345	270	331,2 15,91
FSR_2	202	209	215	202	204	210	210	209	230	211	209,8 3,71
FSR_3	275	336	260	267	284	279	322	316	340	293	298,5 9,36
FSR_4	267	226	239	232	223	229	217	222	221	226	230,1 5,91
FSR_5	144	136	114	147	175	105	116	102	101	100	123,6 19,51
FSR_6	185	187	202	209	215	211	216	224	253	290	219,2 13,60
FSR_7	325	316	317	323	310	311	312	311	294	304	312 2,73

Sarcina maximă a senzorilor utilizați în elementul senzorial este, conform acestora fișă tehnică, 50 kg. Seturile de date au fost înregistrate ca valori digitale, unde 0 reprezintă absența sarcinii de greutate pe senzor, iar valoarea digitală maximă este 1024. Valoarea 1 la Valoarea 10 reprezintă valoarea medie înregistrată în faza de măsurare stabilă. Prin urmare, am considerat că este mai benefic să indicați abaterea standard ca procentaj raportat la valoarea medie calculată peste cele zece măsurători, sub coloana SD (%)

Am analizat datele din Tabelul 1 urmând criteriile enunțate. În special datele obținute pentru măsurătorile efectuate pentru greutatea de testare de 10 kg. Noi am remarcat că FSR_1, FSR_5 și FSR_6 prezintă o abatere standard (SD%) mai mare decât 10% din valoarea medie. Prin urmare, am ajuns la concluzia că senzorii utilizați pe senzorial elementele nu pot furniza date fiabile, repetabile. Pe baza acestei analize, cercetarea echipa a decis să le înlocuiască cu senzori similari, care au trecut cu o repetabilitate similară. O altă concluzie se referă la citirile pentru sarcina de 1 kg. Din moment ce sarcina maximă pentru un senzor este de 50 kg, iar 1 kg reprezintă 2% din sarcina sa completă, se poate observa că abaterea standard prezintă valori procentuale ridicate; astfel, repetabilitatea este scăzută. Deoarece astfel de sarcini mici apar doar în momente scurte, tranzitorii, între fazele mersului, le putem considera acceptabile.

De asemenea, se poate observa că răspunsul de ieșire al senzorilor este neliniar puternic.

Astfel, în lucrările viitoare, vom lua în considerare utilizarea mai multor valori ale greutateții de testare pentru a determina caracteristică neliniară.

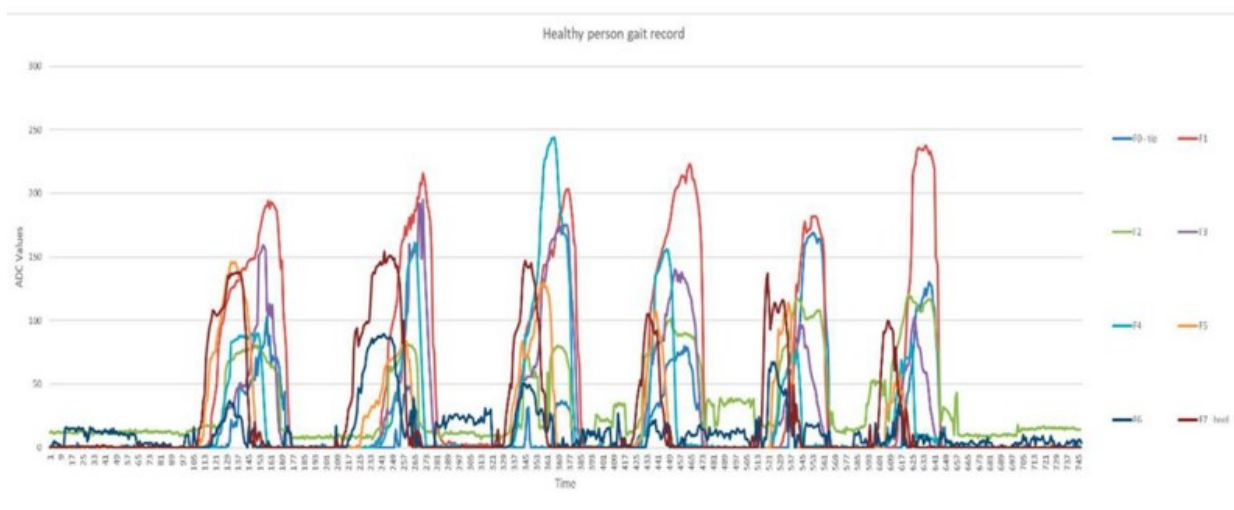


Figura 6. Înregistrarea mersului pentru piciorul stâng al unei persoane sănătoase.

O altă constatare după încheierea testelor de repetabilitate este că ieșirea senzorilor răspunsul nu este omogen — elemente senzoriale diferite oferă valori diferite de ieșire pentru aceeași sarcină - oferind încă o repetabilitate bună pentru acea ieșire. Astfel, echipa de cercetare a determinat un raport proporțional între valoarea cea mai mare oferită de unul dintre senzoriale elementele FSR_0 ... FSR_7 și valoarea pentru un anumit element senzorial. În cele din urmă, factori de amplificare sunt aplicați pentru toate măsurătorile prezentate în continuare

După ce s-a încheiat validarea datelor pentru sistemul senzorial, echipa de cercetare a înregistrat mersul persoanelor sănătoase conform metodologiei descrise. Înregistrările au fost efectuate pentru 10 persoane sănătoase, alese dintre membrii echipei de cercetare a proiectului. Dorim să avem reprezentanți de ambele sexe, care să acopere o gamă cât mai largă de vârstă, greutate și mărime de încălțăminte. Măsurătorile au fost efectuate pentru 4 femele și 6 bărbați. Am testat mărimile UE de încălțăminte 35, 36, 37 (pentru femele) și 41, 42, 43 și 44 (pentru bărbați). Greutatea corporală a variat între 46 și 57 kg (la femele) și 70 până la 85 kg (la bărbați). Înălțimea a variat între 1,65 m până la 1,75 m (pentru femele) și 1,71 până la 1,84 (pentru bărbați). Toți cei zece participanți au fost evaluați, din punct de vedere ortopedic, de medicul specialist și membru al proiectului – niciunul nu a prezentat deficiențe ortopedice. De asemenea, mersul lor a fost evaluat.

Apoi, am analizat evoluția distribuției presiunii în timp, relevată de elementele senzoriale montate pe tălpile sandalelor. Figura reprezintă distribuția greutateții pe talpă, în ciclul de pas, pentru un picior: 1—picior în echilibru. - contactul cu călcâiul, 2—contact cu călcâiul plus partea de mijloc a tălpii, 3-4-5— contact ferm cu talpa, sprijin pe un picior, celălalt picior în echilibru, 6— ridicarea călcâiului solul, 7—sprijin doar pe partea din față a tălpii, 8—sprijin pe degete (degetele de la picioare), ridicarea piciorului de pe sol și intrarea în echilibru.

Fiecare dintre elementele senzoriale individuale poate suporta o sarcină de până la 50 kg. Setul de date ilustrat în figura este înregistrat pentru o persoană care cântărește cca. 60 kg. Astfel, încărcarea pe fiecare senzor nu atinge valori mari, după cum se poate observa.

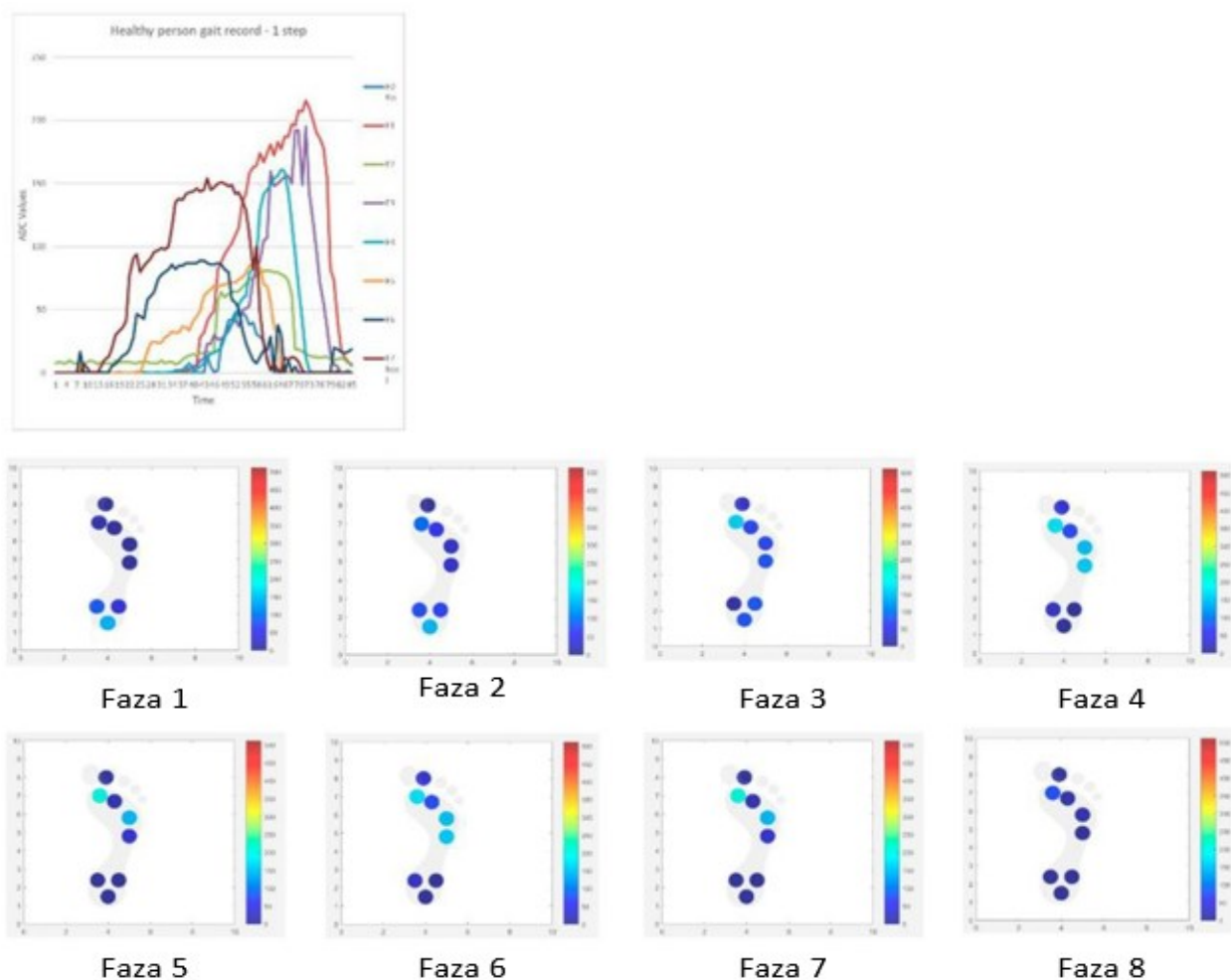


Figura 7. Fazele în opt pași sunt date înregistrate pentru un pas, mersul persoanei sănătoase, piciorul drept și încărcarea elementelor senzoriale.

Concluzii

Această lucrare a prezentat o nouă proteză a membrilor inferioare, cu costuri reduse, bazată pe senzori plasați într-un branț plantar. Platforma propusa are următoarele avantaje:

- Poate fi folosită pentru orice tip sau dimensiune de picior.
- Este proiectat modular, permițând ca majoritatea componentelor să fie reutilizate atunci când se reconfigurează pentru o altă dimensiune a piciorului.
- Talpa vă permite să reconfigurați numărul de senzori și poziționarea acestora.
- Talpa vă permite să reglați poziția bretelelor de pe sandale.
- Sistemele de prindere (sandale și senzori giroscopici) permit o reglare optimă.
- Sistemul poate fi extins din punct de vedere al senzorilor de presiune și giroscopici.

- Sistemul de achiziție este ușor și asemănător unei perechi obișnuite de pantofi, limitând erorile întrucât nu perturbă mersul.
- Precizia achiziției de date depășește cu mult nevoile unui astfel de sistem.
- Sistemul simplificat și optimizat poate fi integrat într-o proteză, coordonând constant configurația acesteia în funcție de faza pasului și de tipul mișcării.
- Costul sistemului de achiziție de date este în jur de 200 de euro, ceea ce poate fi considerat, astfel, cost redus și eficiență ridicată.

4 CONCLUZII

După analiza platformelor și echipamentelor descrise anterior putem enunța următoarele concluzii:

- Platforma pentru testarea și determinarea parametrilor valvelor-stop magnetoreologice răspunde cu succes cerințelor, putând face determinări repetate în diferite condiții de intrare, tocmai pentru a obține valorile medii ale parametrilor.
- Echipamentul pentru determinarea fazei de pășire furnizează datele care descriu fidel mișcarea și încărcarea picioarelor în timpul mersului. Comparând cu pachete de date predefinite se poate determina cu precizie faza de pășire. Nu se poate determina cu precizie tipul mersului, erorile apărând la schimbarea regimului de mers, la oprire, pornire. Este necesară mărirea bazei de șabloane, sau implementarea unui algoritm cu autoînvățare. De asemenea acestea trebuie optimizate și particularizate pentru un pacient.
- Articulația universală tip Hook funcționează corect pentru presiuni/sarcini medii, deci demonstrează justetea principiului. Erorile apar datorită scăderii etanșeității la presiuni mari, datorită realizării prototipului în condiții de laborator. Și în aceste condiții articulația este funcțională pentru o persoană cu greutatea mai mică de 60 kg. Este necesară re-proiectarea acesteia, cel puțin la nivelul degetelor, unde este necesară o articulație cilindrică. O articulație cilindrică poate oferi, de asemenea, și o etanșare mult mai bună.
- Ansamblul îndeplinește cerințele obiectivelor, în condiții de laborator (teren plat, suprafață dură, persoanele de test fără abateri ortopedice, etc). De asemenea datorită prototipării cu rășină echipamentul rezultat nu este rezistent în timp în zonele cu solicitări majore. Deși funcționalitatea a fost demonstrată în condiții de laborator echipamentul poate fi folosit numai în condiții impuse (mers lent sau normal, fără întoarceri bruște, persoane cu greutate sub 60kg, etc).

În etapa următoare se urmărește:

- Optimizarea articulației universale tip Hooke. Realizarea unei configurații a protezei cu articulații cilindrice.
- Pe baza determinărilor realizate cu platforma pentru testarea și determinarea parametrilor valvelor-stop reologice se va realiza valva-stop la nivel industrial folosind materiale metalice mult mai rezistente.
- Realizarea de achiziții de date pentru determinarea fazei pășirii, folosind un lot extins de subiecți care include defecte de pășire, persoane cu diferite grade de amputare, amputare a ambelor picioare, deplasare pe diverse tipuri de teren, etc..
- Determinarea relației dintre încălțăminte și tipul pășirii, prin folosirea a două rețele senzoriale pentru determinarea încărcării, pentru fiecare picior, una pe talpa piciorului și una pe talpa încălțăminteii.
- Realizarea efectivă a protezei cu trei articulații (include o articulație suplimentară la baza degetelor), pentru un comportament cât mai similar cu piciorul uman.

5 DISEMINAREA REZULTATELOR

Site-ul de prezentare a proiectului:

<http://em.ucv.ro/ESAP-SMAM/index.html>

Lucrări publicate în Jurnale internaționale sau Volume ale conferințelor în 2021 (WOS / SCOPUS / BDI) :

Vladu i.C.; Pană, C.F.; Negrea M.; Petrisor I.; *On the flow model of a rheological fluid*, Annals of the University of Craiova Physics AUC, vol.30(part.II), p.230-235, 2020, ISSN 1223-6039

Vladu i.C.; Pană, C.F.; Negrea M.; Petrisor I.; *Some aspects of the solutions of a Navier Stokes equation for a charged particle in a magnetic field*, Annals of the University of Craiova Physics AUC, vol.30(part.II), p.230-235, 2020, ISSN 1223-6039

Pană, C.F.; Manta F.L.; Vladu i.C.; Cismaru,S.,I.; Petcu, F.L.; Cojocaru D.; Bîzdoacă, N.G.; *The Design of a Smart Lower-Limb Prosthesis Supporting People with Transtibial Amputation—A Data Acquisition System*, vol.12, f.13, p.1-18, DOI <https://doi.org/10.3390/app12136>, **JCI 2.84**

Vladu i.C.; Manta F.L.; Pană, C.F.; Cismaru,S.,I.; Trășculescu, A.; Cojocaru D.; *Cost Effective System for Determining the Weight Distribution Correlated with the Stepping Phase for Lower Limb Prosthesis*, 23rd International Carpathian Control Conference (ICCC), IEEE Xplore, 2022, DOI 10.1109/ICCC54292.2022.9805865

Sârbu D.; Bizdoaca Nicu George, Cioateră N.; Vladu i.C.; Rotaru A.; Pană, C.F.; Pătrașcu-Pană, D.M.; Florian G.; Rotaru P.; *Thermal stability, rheological and morpho-structural properties of the magnetorheological fluid MRF122 employed in spherical joint mechanisms*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, DOI <https://doi.org/10.1007/s10973-0>, 2022, **JCI 4.75**

Pană, C.F.; Rădulescu, V.M.; Pătrașcu-Pană, D.M.; Petcu, F.L.; Reșceanu, I.C.; Cismaru,S.,I.; Trășculescu, A.; Bîzdoacă, N.G.; *The Impact of COVID on Lower-Limb Exoskeleton Robotic System Patents—A Review*. Appl. Sci. 2022, 12, 5393., DOI <https://doi.org/10.3390/app12115393>, , **JCI 2.84**

Rezultate asteptate

S-au obtinut urmatoarele rezultate:

Au fost realizate testele pentru sistemul complet

Au fost realizate simulările pe datele obținute și sintetizarea rezultatelor din punct de vedere medical și ingineresc

Participare la conferințe, sau publicarea de articole în reviste ISI / BDI indexate sau rezultate preliminare plasate pe site-ul web

Șef lucrări Vladu Ionel Cristian

