PROIECTAREA UNUI EXOSCHELET PASIV PENTRU GENUNCHI FABRICAT PRIN IMPRIMARE 3D

Student Alexandru POSEA-CÎRSTEA

Deparatmentul de Inginerie Mecanica,
Universitatea Transilvania din Brașov, România

REZUMAT. Lucrarea prezintă proiectarea, dimensionarea, analiza și prototiparea unui exoschelet pasiv pentru genunchi, fabricat prin imprimare 3D. Soluția propusă utilizează un mecanism arc-cablu-scripeți, destinat stocării energiei elastice în timpul flexiei și eliberării acesteia în faza de extensie, cu scopul augmentării funcționale a mersului. Modelul a fost dimensionat pentru un utilizator de 70 kg și 173 cm, iar elementul elastic a fost definit cu rigiditatea de 5,935 N/mm. Materialul PETG utilizat pentru componentele structurale a fost caracterizat experimental, obținându-se o rezistență maximă la tracțiune de aproximativ 42 MPa și un modul de elasticitate de 2100 MPa. Validarea soluției a fost realizată prin analize prezentate separat: cinematică, dinamică, FEA și FlexBody, rezultatele indicând tensiuni maxime sub limita mecanică determinată experimental.

Cuvinte cheie: exoschelet pasiv; genunchi; imprimare 3D; PETG; analiză FEA; mecanism arc-cablu-scripeți.

ABSTRACT. The paper presents the design, sizing, analysis and prototyping of a passive knee exoskeleton manufactured by 3D printing. The proposed solution uses a spring-cable-pulley mechanism intended to store elastic energy during knee flexion and release it during extension, supporting functional gait augmentation. The model was sized for a 70 kg and 173 cm user, while the elastic element was defined with a stiffness of 5.935 N/mm. The PETG material used for the structural components was experimentally characterized, resulting in a tensile strength of approximately 42 MPa and a Young's modulus of 2100 MPa. The solution was validated through separate kinematic, dynamic, FEA and FlexBody analyses, with maximum stresses remaining below the experimentally determined material strength.

Keywords: passive exoskeleton; knee joint; 3D printing; PETG; FEA analysis; spring-cable-pulley mechanism.

1. INTRODUCERE

Articulația genunchiului are un rol esențial în activitățile zilnice, în special în mers, ridicare și menținerea poziției ortostatice. În timpul deplasării, genunchiul este solicitat prin momente variabile de flexie și extensie, iar reducerea parțială a efortului mecanic poate contribui la creșterea confortului și la sprijinirea funcțională a utilizatorului.

Exoscheletele pentru membrul inferior sunt sisteme mecanice purtabile proiectate pentru a funcționa în paralel cu corpul uman, având rolul de a susține, ghida sau augmenta mișcarea anumitor segmente corporale. În funcție de principiul de funcționare, acestea pot fi active sau pasive. Sistemele pasive prezintă avantajul unei construcții mai simple, al unei mase reduse și al independenței față de o sursă externă de energie, deoarece folosesc elemente elastice pentru stocarea și eliberarea energiei mecanice.

În cadrul acestei lucrări este propus un exoschelet pasiv pentru genunchi, fabricat prin imprimare 3D, destinat augmentării mișcării de flexie–extensie în timpul mersului. Soluția constructivă are la bază un mecanism de tip arc–cablu–scripeți, care permite acumularea energiei elastice în timpul flexiei genunchiului și eliberarea parțială a acesteia în faza de extensie. Astfel, sistemul urmărește reducerea parțială a efortului mecanic necesar revenirii membrului inferior, fără a limita mobilitatea naturală a utilizatorului.

2. SOLUȚIA CONSTRUCTIVĂ

Exoscheletul propus este alcătuit dintr-un segment superior pentru coapsă și un segment inferior pentru

gambă, conectate printr-o articulație mecanică laterală. Fixarea pe membrul inferior se realizează cu elemente de prindere cu velcro, iar pe partea interioară este prevăzut un limitator de unghi, care limitează flexia genunchiului la aproximativ 90°.

Mecanismul de augmentare este amplasat pe partea exterioară a ansamblului și este format dintr-un arc elastic, cablu de transmitere, scripeți, suporturi pentru scripeți și întinzător de cablu. În timpul flexiei genunchiului, cablul se tensionează prin sistemul de scripeți și determină deformarea arcului. Energia acumulată în arc este eliberată parțial la revenirea către extensie, contribuind la sprijinirea mișcării.

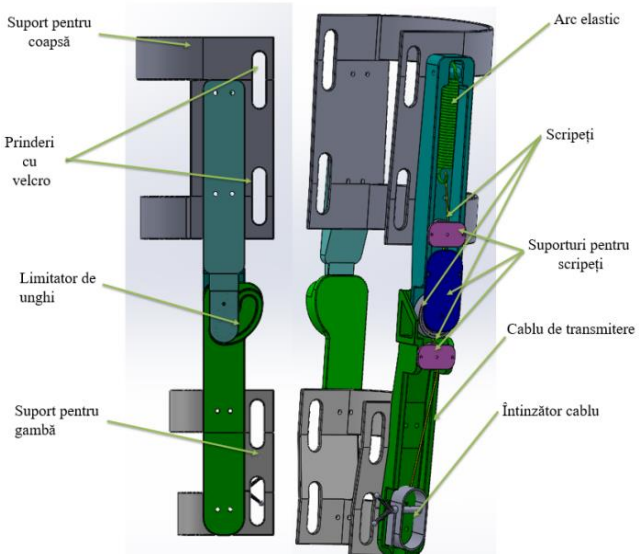


Fig. 1. Modelul CAD al exoscheletului și principalele componente ale sistemului.

Tabelul 1. **Caracteristici principale ale exoscheletului.**

Caracteristică	Valoare
Masa utilizatorului	70 kg
Înălțimea utilizatorului	173 cm
Rigiditatea arcului	5,935 N/mm
Cablu	7x7, diametru 1,5 mm
Materiale	PETG + ABS

3. ANALIZA CINEMATICĂ

Analiza cinematică a avut rolul de a defini mișcarea reală a membrului inferior și de a verifica dacă geometria exoscheletului este compatibilă cu ciclul de mers. Pentru aceasta, a fost realizată o captare video a mersului, iar traiectoriile șoldului, genunchiului și gleznei au fost preuate în Kinovea și prelucrate în MATLAB.

Datele obținute au fost normalizate în raport cu procentul din ciclul de mers, fiind determinate curbele de variație unghiulară ale genunchiului și coapsei. Aceste curbe au fost importate ulterior în MotionView, unde a fost realizată simularea cinematică a ansamblului exoschelet-membru inferior.

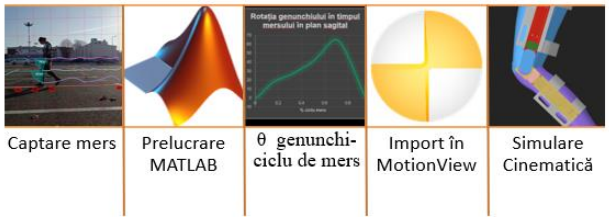


Fig. 2. Etapele analizei cinematice a mersului.

4. DIMENSIONAREA ARCULUI

Dimensionarea arcului a pornit de la masa utilizatorului și de la o valoare medie a momentului maxim dezvoltat la nivelul articulației genunchiului în timpul mersului. Pentru utilizatorul considerat, cu masa de 70 kg, momentul maxim a fost determinat cu relația:

$$Mmax = 0{,}54 \cdot 70 = 37{,}8 \text{ N·m} \qquad (4.1)$$

În cadrul proiectului s-a adoptat un nivel de asistare de 15% din momentul maxim, pentru a evita suprasolicitarea componentelor realizate prin imprimare 3D. Rezultă astfel un moment de asistare:

$$Masis = 0{,}15 \cdot 37{,}8 = 5{,}67 \text{ N·m} \qquad (4.2)$$

Pe baza razei efective de acționare a cablului, a fost determinată forța necesară în arc, iar rigiditatea elastică adoptată a fost de 5,935 N/mm. Această valoare a fost utilizată ulterior în modelul dinamic.

5. TESTAREA MATERIALULUI

Componentele principale ale exoscheletului au fost fabricate prin tehnologia FDM, ceea ce a impus caracterizarea experimentală a materialului utilizat. Au fost realizate epruvete din PETG gri, fiind analizate mai multe configurații de imprimare, cu densități de umplere, orientări ale infill-ului și număr de pereți exteriori diferite.

Rezultatele experimentale au indicat că proba cu 80% infill, orientare la 0° și 3 pereți exteriori a avut

cea mai bună comportare mecanică. Pentru această configurație au fost adoptate valorile prezentate în Tabelul 2, utilizate ulterior în analiza structurală.

Tabelul 2. **Proprietăți mecanice adoptate pentru materialul PETG.**

Material	E [MPa]	σmax [MPa]
PETG	2100	42

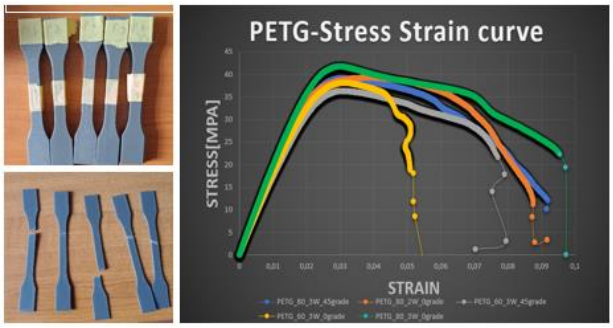


Fig. 3. Testarea materialului PETG și curba tensiune-deformație.

6. ANALIZA DINAMICĂ

Analiza dinamică a fost realizată în MSC ADAMS, modelul fiind redus la componentele exterioare aflate în contact direct cu sistemul arc-cablu-scripeți. Au fost analizate două cazuri: mersul normal și flexia controlată a genunchiului până la 90°.

Rezultatele au evidențiat că reacțiunea maximă apare pe scripetele 2, poziționat în zona articulației genunchiului. Pentru cazul de flexie la 90°, forța maximă rezultată pe scripetele 2 a fost de aproximativ 360 N, iar în timpul mersului a fost de aproximativ 250 N. Aceste valori au fost utilizate ca încărcări în analiza structurală.

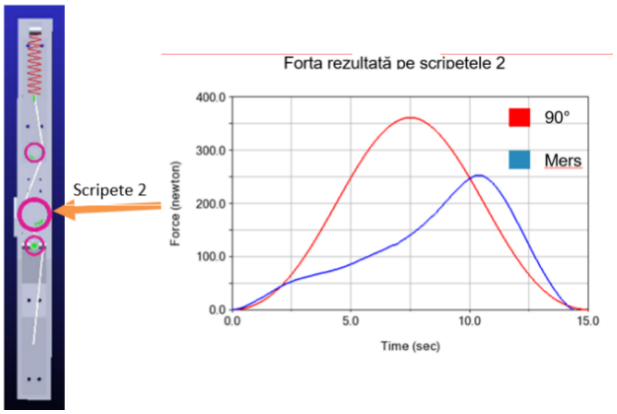


Fig. 4. Rezultatele analizei dinamice pentru sistemul arc-cablu-scripeți.

7. ANALIZA STRUCTURALĂ FEA

Analiza structurală cu element finit a avut rolul de a verifica dacă piesele printate 3D pot prelua încărcările determinate în analiza dinamică. Modelul a fost discretizat cu elemente solide tetraedrice, iar forțele au fost aplicate în zonele de transmitere a sarcinii, respectând direcțiile rezultate din simularea dinamică.

Rezultatele au indicat o tensiune echivalentă von Mises maximă de aproximativ 21,99 MPa, localizată în zona de contact și prindere asociată elementelor de transmitere a forței. Valoarea este sub rezistența maximă la tracțiune determinată experimental pentru PETG, ceea ce indică o comportare structurală acceptabilă pentru cazul analizat.

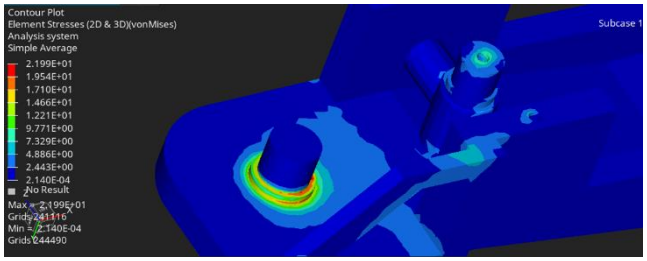


Fig. 5. Rezultatele analizei structurale FEA pentru componenta solicitată.

8. ANALIZA CU ELEMENT FLEXIBIL

Pentru o verificare suplimentară a componentei critice, modelul a fost reluat în ADAMS, iar piesa cea mai solicitată a fost introdusă ca element flexibil. Această abordare permite evaluarea deformabilității componentei în regim dinamic, în timp ce mecanismul arc-cablu-scripeți funcționează sub acțiunea mișcării impuse.

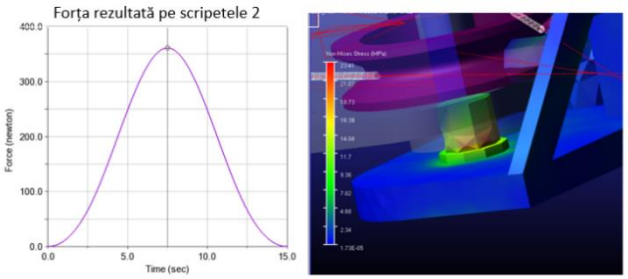


Fig. 6. Analiza dinamică cu element flexibil în zona scripetelui 2.

În analiza cu element flexibil, forța maximă a fost de aproximativ 360 N la momentul t = 7,5 s, iar

tensiunea maximă obținută a fost de 23,41 MPa. Valoarea este apropiată de cea obținută în analiza FEA statică și rămâne sub limita mecanică determinată experimental, confirmând zona critică și coerența rezultatelor numerice.

9. PROTOTIPAREA

Prototipul fizic a fost realizat prin imprimare 3D, utilizând setările selectate în urma testelor de material. Componentele printate au fost asamblate împreună cu elemente standardizate, precum arc, cablu, scripeți, rulmenți și elemente de reglare.

Prototiparea a permis verificarea practică a geometriei, a traseului cablului și a modului de integrare a mecanismului elastic în ansamblul final. Această etapă a confirmat posibilitatea realizării fizice a soluției propuse și a evidențiat importanța alinierii corecte a elementelor de transmitere a forței.



Fig. 7. Prototipul fizic al exoscheletului pasiv de genunchi.

10. CONCLUZII

În cadrul lucrării a fost proiectat și realizat un exoschelet pasiv pentru articulația genunchiului, fabricat prin imprimare 3D. Sistemul propus utilizează un mecanism arc-cablu-scripeți, care permite acumularea energiei elastice în timpul flexiei și asistarea revenirii către extensie.

Analizele au fost prezentate separat pentru a evidenția rolul fiecărei etape. Analiza cinematică a definit mișcarea, dimensionarea arcului a stabilit rigiditatea mecanismului, testarea materialului a furnizat proprietățile PETG-ului, analiza dinamică a determinat forțele transmise, iar analizele FEA și FlexBody au verificat comportarea structurală a pieselor critice.

Rezultatele obținute indică faptul că soluția propusă este fezabilă din punct de vedere tehnic pentru cazul analizat. Direcțiile viitoare pot include testarea cu senzori EMG, optimizarea geometrică a componentelor și modelarea materialului imprimat 3D ca material ortotrop, pentru o descriere mai realistă a comportării pieselor FDM.

BIBLIOGRAFIE

[1] Chen B., Zi B., Wang Z., and Ling Q., Knee exoskeletons for gait rehabilitation and human performance augmentation: A state-of-the-art, Mechanism and Machine Theory. Wei-Hsin Liao.

[2] J. Zhang, "Epidemiology of Knee Osteoarthritis: An Updated Global View," J Orthop Res, vol. 40, no. 9, pp. 1821-1832, 2022.

[3] F. Moldovan, L. Moldovan, and T. Bataga, "A Comprehensive Research on the Prevalence and Evolution Trend of Orthopedic Surgeries in Romania," Healthcare, vol. 11, p. 1866, 2023.

[4] "W. Petersen et al., 'Biomechanical effect of unloader braces for medial osteoarthritis of the knee: a systematic review,' Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery, 2016.".

[5] M. Kalra et al., 'The effect of unloader knee braces on medial meniscal strain,' 2019.".

[6] T. Cong et al., 'Current Practices for Rehabilitation After Meniscus Repair,' 2024.".

[7] K. Md. Wu et al., 'Robotic exoskeletons and total knee arthroplasty: The future of knee rehabilitation and replacement,' 2024.".

[8] D. A. Mistry et al., 'An Update on Unloading Knee Braces in the Treatment of Unicompartmental Knee Osteoarthritis,' 2018.".

[9] Y. Han et al., 'Design and Evaluation of a Soft Knee Exosuit for Reducing Knee Adduction Moment,' 2025.".

[10] W. Petersen et al., "Biomechanical effect of unloader braces for medial osteoarthritis of the knee: a systematic review (CRD 42015026136," Arch Orthop Trauma Surg, vol. May;136(5):649-56, 2016, doi: 10.1007/s00402-015-2388-2.

[11] H. Herr, "Exoskeletons and orthoses: classification, design challenges and future directions," J NeuroEngineering Rehabil, vol. 6, p. 21, 2009.

[12] M. Fontana, R. Vertechy, S. Marcheschi, F. Salsedo, and M. Bergamasco, "The body extender: A full-body exoskeleton for the transport and handling of heavy loads," IEEE Robot Autom. Mag, vol. 21, no. 4, pp. 34-44, Dec. 2014.

[13] Z. Wang, Z. Zhou, L. Ruan, X. Duan, and Q. Wang, "Mechatronic Design and Control of a Rigid-Soft Hybrid Knee Exoskeleton for Gait Intervention," IEEEASME Trans. Mechatron., vol. 28, no. 5, pp. 2553-2564, Oct. 2023.

[14] H. Lu, "Design and Analysis of a Knee Exoskeleton with Self-alignment Capability," in 30th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP, Leeds, United Kingdom, 2024, pp. 1-6,. doi: 10.1109/M2VIP62491.2024.10746174.

[15] A. Barrera Sánchez et al., "State of the Art Review of Active and Passive Knee Orthoses," State Art Rev. Act. Passive Knee Orthoses Mach., 2022..