

MODELAREA ȘI SIMULAREA STRUCTURILOR DE TIP LATTICE ALE MODULULUI VERTEBRAL DIN COMPONENTA UNUI EXOSCHELET UȘOR

ENACHE¹ Vlad¹, ENACHE² Andrei², IONESCU³ Raluca³

¹Facultatea de Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice, Specializarea Inginerie Economică Industrială, Anul 3, e-mail:enachevlad31@yahoo.com
Conducători științifici: Ș.l. dr. ing. ec. **ULMEANU Mihaela**, Prof. dr. ing. ec. **DOICIN Cristian**

Rezumat: Traumatismele coloanei vertebrale produc diferite leziuni grave: paralizare parțială sau totală a diferitelor părți ale corpului sau complicații neurologice asociate. Tratamentele pentru aceste afecțiuni pot fi foarte scumpe sau dureroase. Cea mai bună alternativă pentru ameliorarea consecințelor acestor traume o reprezintă exoscheletele robotice „portabile”. Lucrarea propune utilizarea structurilor lattice pentru a conduce la scăderea greutății ansamblului, dar păstrând rezistența acestuia. Elementele de noutate aduse în aceasta lucrare sunt: Proiectarea și modelarea unor structuri lattice de diferite forme ale celulei elementare; Simularea încărcării structurilor lattice; Tipărirea 3D a trei epruvete din aliaj de titan; Realizarea unui plan experimental pentru generarea structurilor lattice de diferite dimensiuni; Definirea și rularea simulărilor la compresiune. Lucrarea are ca scop realizarea unor structuri lattice de diferite forme și dimensiuni și dezvoltarea simulărilor la compresiune.

Cuvinte cheie: Lattice, Structuri, Stres, Compresiune.

1. Introducere

Traumatismele coloanei vertebrale produc leziuni grave, atât prin complexitatea lor, cât și prin complicațiile neurologice asociate. Leziunea coloanei vertebrale poate conduce la paralizarea parțială sau completă a membrilor inferioare și a trunchiului, în unele cazuri fiind afectat întregul corp.

Impactul pe care leziunile coloanei vertebrale îl au asupra vieții unei persoane, dar și a celor din jur, depinde de mai mulți factori, cum ar fi mărimea acesteia, vârsta celui afectat, resursele necesare tratării și mediul în care trăiește. Tratamentele posibile includ medicamente și terapie sau, în cazuri grave, intervenții chirurgicale care pot fi nu doar foarte costisitoare și dureroase, dar și lipsite de certitudinea unei vindecări complete. O alternativă pentru toate aceste proceduri de redare parțială sau totală a capacității motorii, dar și o modalitate preventivă pentru scăderea riscului de accident este reprezentată de diminuarea tensiunii asupra mușchilor, cauzată de încărcături grele, prin furnizarea unui sprijin exterior, pe perioada activităților fizice. Unele dintre echipamentele cele mai noi și mai sofisticate în acest sens sunt reprezentate de către exoscheletele robotice „portabile”.

Exoscheletul este un sistem mobil, antrenat de motoare electrice/pneumatice, pârghii și motoare hidraulice sau combinații, care susține efortul la efectuarea unor activități fizice, sporind capacitatea fizică și rezistența în timp. În prezent s-au dezvoltat mai multe tipuri de exoschelete spinale, care sunt folosite preponderent pentru persoane în vârstă sau cu dizabilități, dar și în domeniul construcțiilor de diferite tipuri.

Pe lângă consumul ridicat de energie și costul de fabricare ridicat, una dintre problemele principale cu care se confruntă producătorii și utilizatorii acestor exoschelete o reprezintă masa acestora, care pentru anumite tipuri de persoane poate fi o problemă majoră. Unele dintre cele mai ușoare exoschelete sunt Indego Personal și Pheonix Exoskeleton [26], care cântăresc cca. 12 kg, dar care oferă doar capacitate motorie a membrilor inferioare, alte modele ajungând să cântărească peste 50 kg, dar crescând stabilitatea și puterea.

Materialele care pot fi utilizate în construirea sistemelor sunt fibrele de carbon și de sticlă care, chiar dacă oferă performanțe bune, sunt foarte scumpe, dar și metal cu un amestec de ABS și policarbonat, ceea ce crește considerabil masa întregii construcții.

Lucrarea prezintă o variantă de reducere a masei unui exoschelet prin utilizarea structurilor lattice, în diverse forme constructive. Se preconizează că reducerea masei ansamblului va determina creșterea numărului de persoane care pot utiliza un astfel de echipament.

Elementele de noutate prezentate în lucrare sunt: 1. Proiectarea și modelarea unor structuri lattice de diferite forme ale celei elementare; 2. Simularea încărcării structurilor lattice în vederea re-proiectării sub această formă a unor reperi din componența unui modul spinal pentru exoschelete portabile; 3. Tipărirea 3D a trei epruvete din aliaj de titan; 4. Realizarea unui plan experimental pentru generarea structurilor lattice de diferite dimensiuni cu scopul testării acestora la solicitarea prin compresiune; 5. Definirea și rularea simulărilor la compresiune.

2. Stadiul actual

Principala arie aplicativă a exoscheletelor este reabilitarea, un număr mic dintre acestea fiind însă concepute și pentru aplicații militare [1]. Utilizarea lor în industrie este limitată din cauza lipsei standardelor de siguranță [2]. Exoscheletele pot fi clasificate ca active sau pasive. Exoscheletele pasive sunt, în principal, menite să suporte spatele inferior, în timp ce exoscheletele active sunt introduse pentru a susține mai multe regiuni ale corpului, incluzând partea inferioară, trunchiul și partea superioară. Exoscheletele pasive pot reduce activitatea mușchilor spatelui cu aproximativ 10 - 40% în timpul ridicării dinamice, în timp ce exoscheletele active pot reduce cu până la 80% activitatea musculară [2]. În plus, exoscheletele robotizate pot fi clasificate [4] după: 1) zonele corporale pe care sunt aplicate 2) nivelul de autonomie (DoF), 3) metoda de acționare, 4) metoda de transmisie a puterii, 5) domeniul de aplicabilitate, 6) configurația legăturilor, și 7) metoda de control. Siguranța este un motiv de îngrijorare major în cazul exoscheletelor [6]. Standardele ISO (ISO/TS 15066, ISO 10218 și 13482) sunt majoritar concepute pentru roboți ce nu pot fi purtați de om, acestea intrând într-o altă categorie de risc.

Utilizarea exoscheletelor în industrie se face în 2 contexte: optimizarea ergonomiei umane și susținerea îmbătrânirii active. Un exemplu popular de tehnologie a exoscheletului este așa-numita "steady-cam" sau camera suspendată, utilizată în industria cinematografică (figura 1). Exoscheletele suportă întregul corp [7] sau anumite părți ale corpului (picioare în figura 2, trunchi în figura 3, mâini în figura 4) sau pot fi modulare [22]. Pentru a exploata noul potențial inovativ există diverse proiecte de cercetare [8]. Astfel, proiectul RoboMate a introdus criterii de evaluare pentru detectarea căderii, balansarea activă, detașare activă, detectarea coliziunii și frânarea motorului automat [25].

Multe concepte și aplicații sunt destinate domeniilor aerospațial [9] sau auto [3], [12]. Cele mai multe sisteme folosite în industrie sunt exoscheletele inteligente pasive (cântăresc 2-9 kg) pentru compensare mică, care suportă forțe de până la 10 kg [13], [14] și au o structură antropomorfică solidă pentru a redirecționa forțele. În plus, se dorește și implementarea exoscheletelor active (figura 5) cu forțe mai dinamice și forțe de susținere [23].

O prezentare generală a exoscheletelor este redată în [24]. Multe studii ergonomice investighează diferite exoschelete, locuri de muncă și metode [15], [16], [17], [2].



Fig. 1 Exoschelet Steadycam pentru îmbunătățirea situației ergonomice și calității. [27]



Fig. 2 Exoschelet pasiv pentru suportul picioarelor în timpul flexării genunchilor. [10]



Fig. 3 Exoschelet pasiv pentru suportul trunchiului în timpul aplecării. [11]



Fig. 4 Exoschelet pasiv pentru suportul mâinilor în operațiile care necesită muncă deasupra capului. [28]



Fig. 5 Exoschelet activ pentru suportul structurii superioare și inferioare a mâinii. [28]

Un exoschelet trebuie adaptat scopului propus și, în acest sens, este utilizată programarea agilă (PA) pentru personalizarea în masă în cadrul industriei medicale, dentare și aerospațiale. Cele mai multe adaptări pe baza PA sunt realizate prin achiziția de informații de la utilizator pentru ajustarea pe corp sau pentru geometrii relevante ale acestuia [18], ca în personalizarea proiectării măștilor de față protectoare [19] sau în producția ședurilor personalizate care se ajustează pe corp, folosind scanare cu laser tridimensională, inginerie inversă și PA [20], [21].

În acest context, autorii au ales să propună ideea modelării personalizate a unui modul spinal al unui exoschelet cu structuri lattice, ținând spre industria PA. În acest scop, lucrarea de cercetare analizează cel mai potrivit set de parametri pentru a crea structurile lattice.

3. Metode și etape de realizare

Pentru a realiza simulările necesare structurilor lattice s-a început cu proiectarea unei epruvete, cu ajutorul aplicației software Autodesk Inventor, cu dimensiunile: diametrul $\Phi 20$ și înălțimea $h20$, acestea fiind valorile standard ale unei epruvete supuse la solicitarea de compresiune, pentru a măsura forțele ce apar la solicitarea structurilor lattice aflate în componența exoscheletului.

După modelarea 3D a epruvetei, s-a definit structura acesteia, prin intermediul mai multor tipuri particulare de structuri lattice. S-a utilizat programul software NTopology Element Pro, care permite alegerea dintr-o gamă variată de structuri, permițând și crearea unor structuri proprii de către utilizatori. În program s-au selectat 10 tipuri de structuri lattice: Cube Edge, Cube Vertex Centroid, Cubic Diamond, Cubic Fluoride, Hex Prism Laves Phase, Hex Prism Vertex Centroid, Hex Prism Diamond, Tet Oct Edge, Tet Oct Vertex Centroid, Tet Vertex Centroid (Figura 1), care au fost apoi aplicate pe epruvetă. Pentru că structura rezultată a fost prea densă, s-a utilizat opțiunea Step, măriindu-se numărul de celule de 3 ori, pentru a apropia tipul structurii cât mai bine de cea osoasă. Totodată, s-a stabilit mărimea celulelor lattice. Având în vedere faptul că programul a adaptat mărimea unei celule pe mărimea epruvetei, aceasta fiind de 3.17 mm se vor alege 3 mărimi diferite ale celulelor și anume 2x2x2 mm; 2.5x2.5x2.5 mm; 3x3x3 mm. În etapa următoare se decupează marginile structurii, deoarece celulele lattice, fiind multiplicat de 3 ori în etapa anterioară, depășesc conturul epruvetei și trebuie decupate după conturul acesteia.

Se îndepărtează firele libere (Figura 6) de pe modele, pentru a obține rezultate mai bune la simulări, cu opțiunea Clean Up.

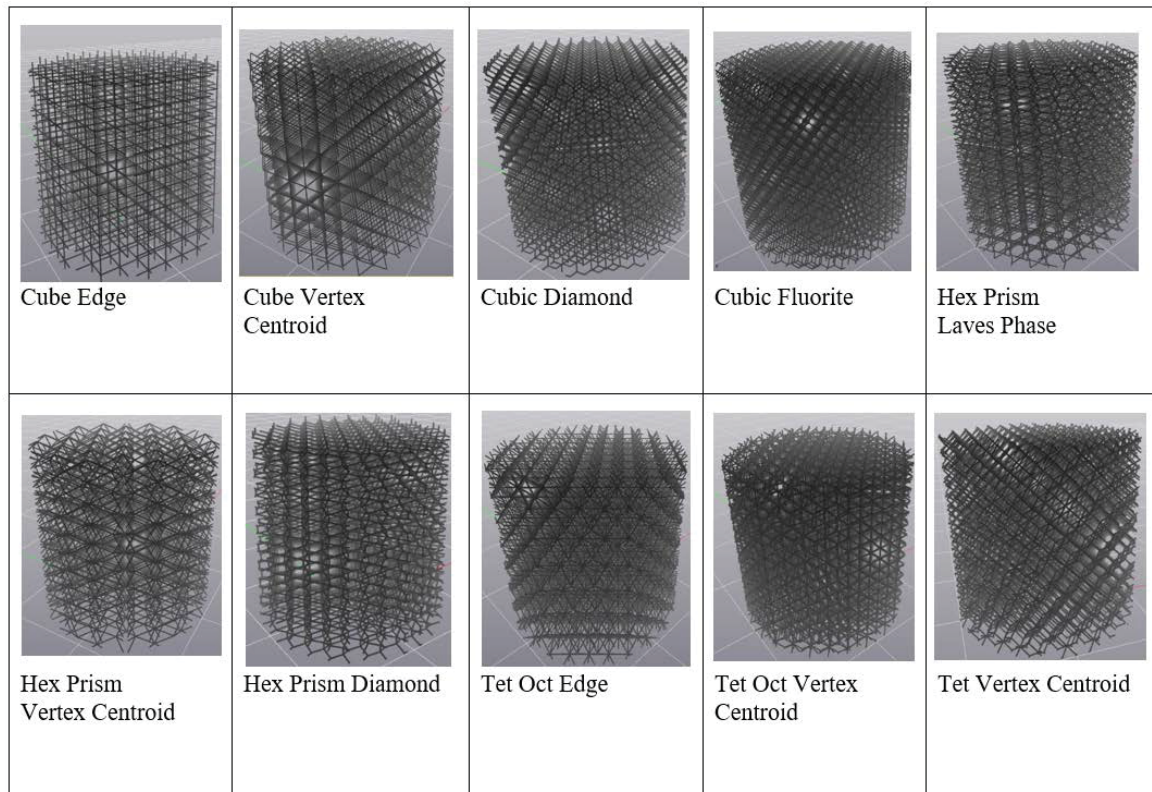


Figura 6. Structuri lattice realizate după dimensiunea epruvetei care au firele netăiate

Pentru analiza structurilor realizate, acestea trebuie supuse unei forțe de 3690 N, valoare care reprezintă forța necesară ridicării unui obiect de 30 de kilograme. Forța astfel aleasă este selectată ca Distributed Force și se acționează pe axa Z a modelului, fiind introdusă cu semnul minus în program deoarece se aplică în sensul opus al axei.

Forța de compresiune care acționează pe un disc intervertebral din zona lombară este calculată cu relația (1).

$$F_c = F_m + F_{wx} + F_{lx} \quad [N] \quad (1)$$

Unde, F_c – forța de compresiune exercitată asupra discului [N]
 F_m – forța aplicată de musculatură pentru a menține poziția coloanei vertebrale [N]
 F_w – greutatea trunchiului [N]
 F_l – greutatea obiectului ridicat [N]
 α – unghiul trunchiului față de planul axial [°]

Solicitățile s-au calculat utilizând următorii parametri de intrare: $F_m = 3020$ N [29]; $F_w = 380$ N; $F_l = 300$ N; $\alpha = 80^\circ$. S-a considerat ridicarea unui obiect de 30 kg de către o persoană de 80 kg. Astfel, înlocuind în formula (1) se obține valoarea forței distribuite $F_c = 3690$ N.

$$F_c = 3020 + 380 \cdot \sin(80^\circ) + 300 \cdot \sin(80^\circ) \Rightarrow F_c = 3690 \text{ N}$$

Pentru a simula corect această forță, este nevoie ca piesa să fie rezemată, rezemele fiind simulate în partea inferioară a modelului.

În continuare se poate alege dacă se va face simularea pentru Stress sau pentru Efort (Strain). Se pot modifica mai multe opțiuni, cum ar fi Maximum Stress sau Maximum Strain sau pot fi alese alte valori ale modulului lui Young pentru materiale diferite. Momentan, simularea a fost făcută pentru Titan Ti-6Al-4V, acesta fiind materialul necesar pentru exoschelet.

După apăsarea butonului Solve va apărea din nou modelul lattice pe care s-a făcut simularea, dar cu mici modificări în locurile în care programul a decis că solicitările erau prea mari și materialul nu va rezista, așa că în unele locuri se prezintă îngroșări. Structura astfel optimizată va fi importată în program, în tabelul Generate, pentru a o putea vedea mai bine, aceasta fiind salvată ca model. Rezultatul simulării va fi salvat din tabelul de Analysis.

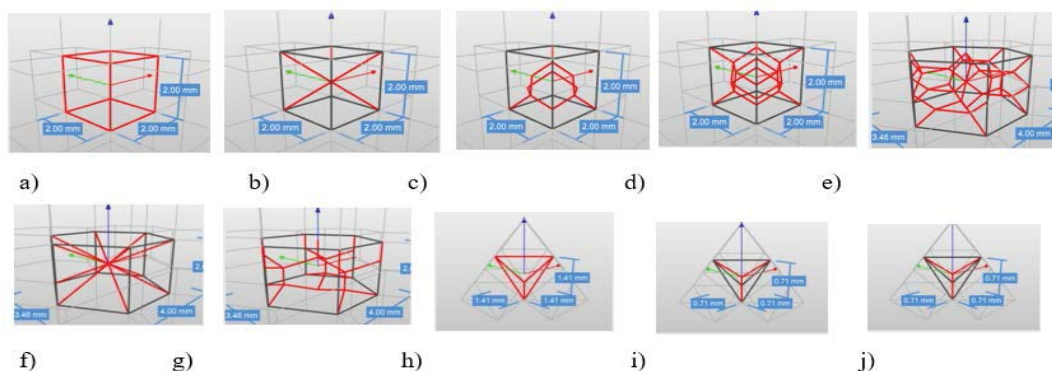


Fig. 7. Elementele modulare utilizate la definirea structurilor lattice: a) Cube Edge b) Cube Vertex Centroid c) Cubic Diamond d) Cubic Fluorite e) Hex Prism Laves Phase f) Hex Prism Vertex Centroid g) Hex Prism Diamond h) Tet Oct Edge i) Tet Oct Vertex Centroid j) Tet Vertex Centroid

4. Date si Rezultate

În Tabelul 1 se pot observa valorile obținute în urma simulărilor realizate.

Tabel 1. Rezultatele simulărilor pentru cele 3 dimensiuni ale celulelor

	2x2x2 [mm]					
	Von Mises		Displacement		Strain	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Cube Edge	894.3632	894.3841	0	0.141465	0.00785908	0.00785908
Cube Vertex Centroid	124.103	3472.41	0	0.15324	0.00109053	0.0305133
Cubic Diamond	50.7617	1545.05	0	0.117423	0.000446061	0.0135769
Cubic Fluorite	18.1996	3585.06	0	0.106373	0.000159926	0.0315032
Hex Prism Laves Phase	0.389013	1585.37	0	0.097748	0.00000342	0.0139312
Hex Prism Vertex Centroid	257.411	1423.1	0	0.222962	0.00226196	0.0125052
Hex Prism Diamond	0	1215.16	0	0.140221	0	0.0106781
Tet Oct Edge	451.082	1057	0	0.209258	0.00396382	0.00928819
Tet Oct Vertex Centroid	19.1439	1108.91	0	0.127105	0.000168224	0.00974442
Tet Vertex Centroid	5.85625	4710.63	0	0.116426	5.15E-05	0.041394
	2.5x2.5x2.5 [mm]					
	Von Mises		Displacement		Strain	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Cube Edge	953.578	953.595	0	0.146641	0.00837942	0.00837957
Cube Vertex Centroid	188.663	4333.6	0	0.152936	0.00165785	0.0380808
Cubic Diamond	50.6656	1432.11	0	0.127165	0.00044522	0.0125844

Cubic Fluorite	24.5163	5661.09	0	0.111804	0.00021543	0.0497459
Hex Prism Laves Phase	14.3762	1520.44	0	0.100192	0.00012633	0.0133606
Hex Prism Vertex Centroid	791.837	1742.84	0	0.231423	0.00695814	0.015315
Hex Prism Diamond	0	1205.64	0	0.144793	0	0.0105944
Tet Oct Edge	573.624	1005.58	0	0.22444	0.00504063	0.00883636
Tet Oct Vertex Centroid	63.4767	1065.94	0	0.151243	0.151243	0.00936681
Tet Vertex Centroid	82.6596	1805.86	0	0.12542	0.00072636	0.0158687
	3x3x3 [mm]					
	Von Mises		Displacement		Strain	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Cube Edge	932.13	932.141	0	0.122865	0.00819095	0.00819105
Cube Vertex Centroid	686.923	1132.86	0	0.155518	0.00603623	0.00995484
Cubic Diamond	43.8176	1148.74	0	0.123102	0.00038504	0.0100944
Cubic Fluorite	19.6432	1992.37	0	0.117415	0.000172611	0.0175077
Hex Prism Laves Phase	0	1323.39	0	0.142432	0	0.0116291
Hex Prism Vertex Centroid	865.802	1375.73	0	0.198608	0.0076081	0.012089
Hex Prism Diamond	0	1130.72	0	0.147357	0	0.00993604
Tet Oct Edge	862.185	983.614	0	0.222659	0.00757632	0.00864335
Tet Oct Vertex Centroid	86.0412	1055.78	0	0.149029	0.000756074	0.00927753
Tet Vertex Centroid	111.497	1490.35	0	0.124214	0.00097976	0.0130962

În următoarele grafice se pot observa rezultatele celor 3 tipuri de simulări: Von Misses (figura 8), Displacement (figura 9) și Strain (figura 10) pe cele 3 dimensiuni ale celulelor 2x2x2 mm; 2.5x2.5x2.5 mm; 3x3x3 mm .

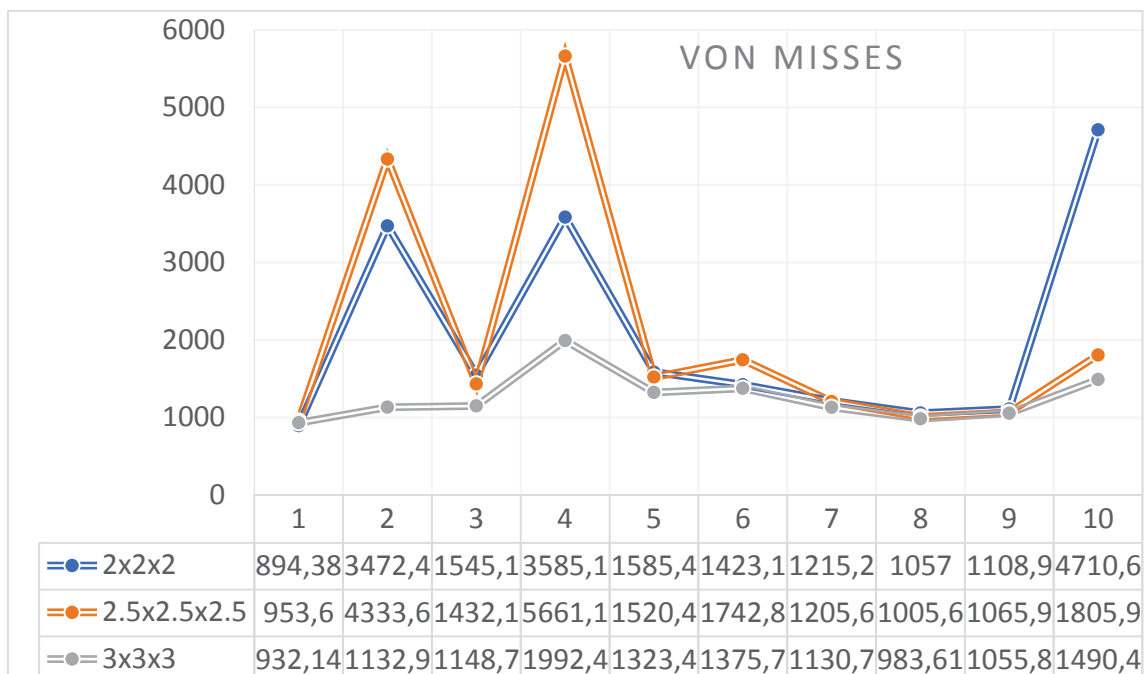


Fig. 8. Graficul rezultatelor la simularea Von Misses

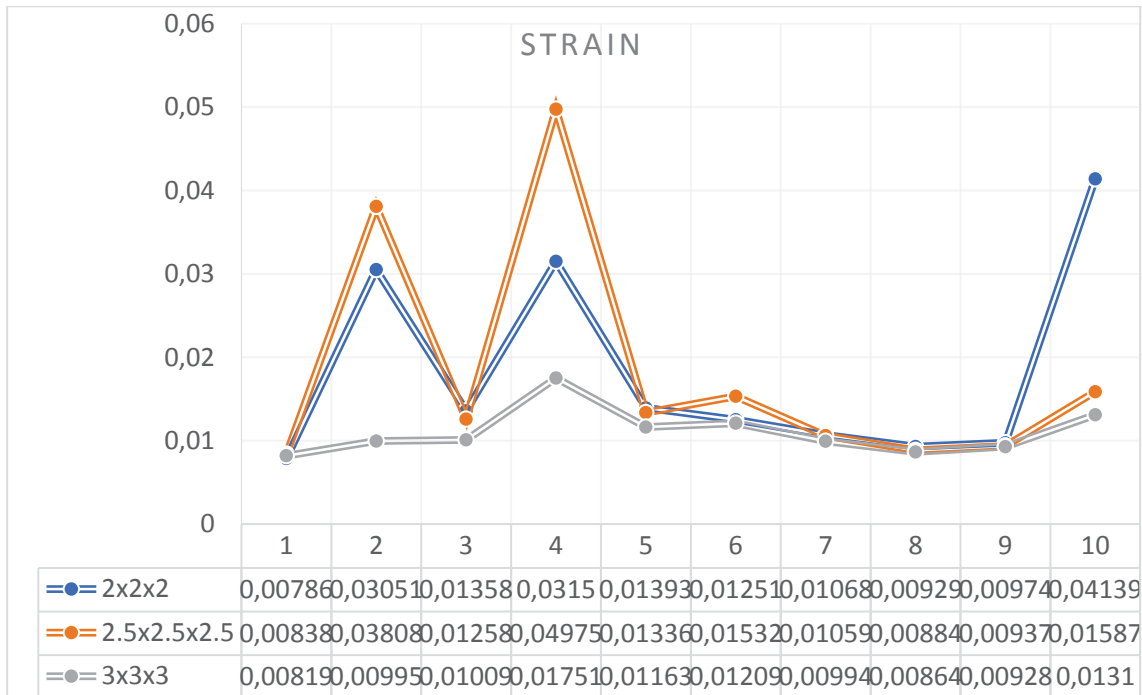


Fig. 9. Graficul rezultatelor la simularea de efort (Strain)

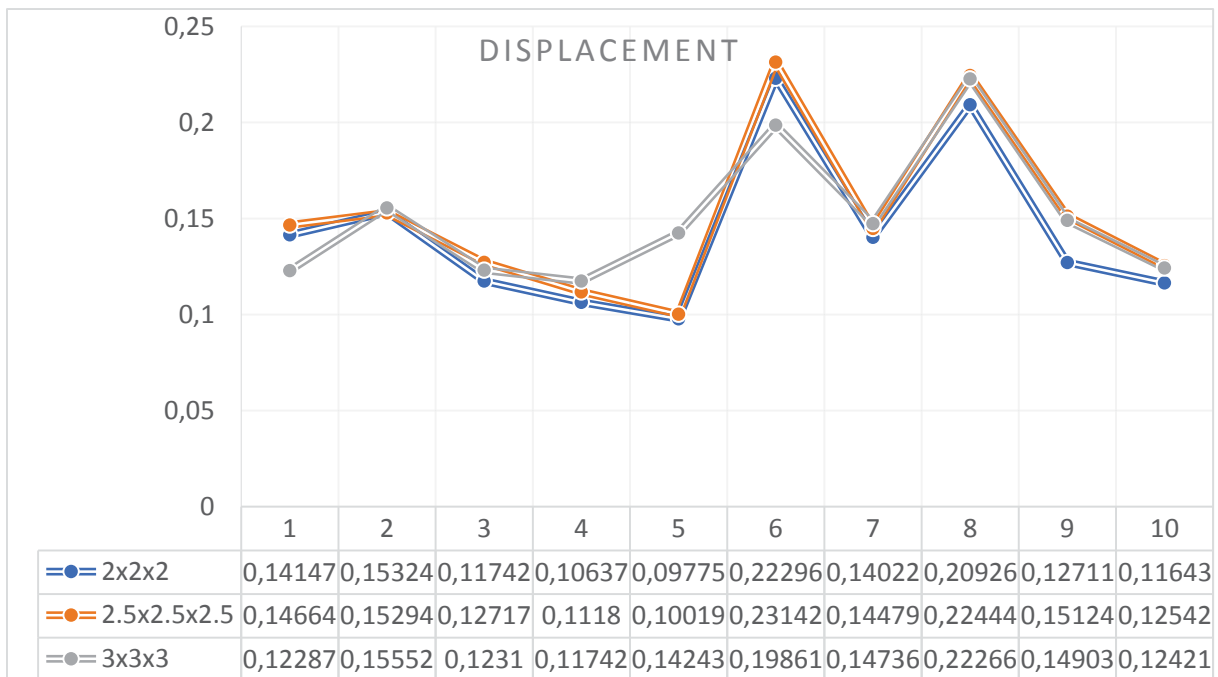
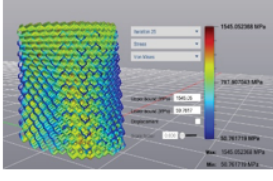
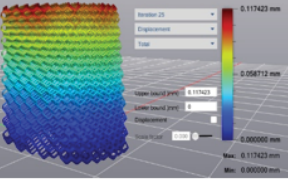
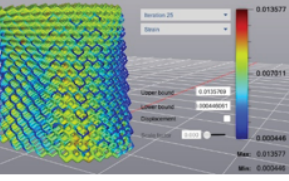
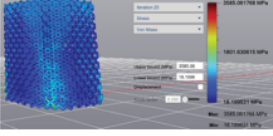
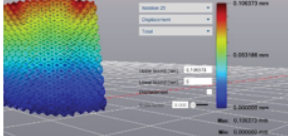
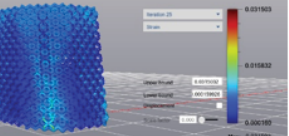
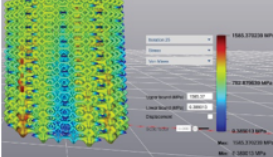
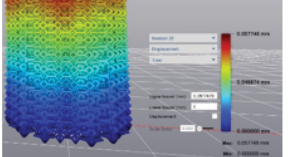
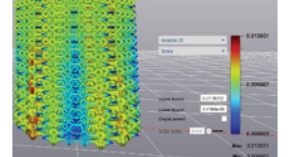


Fig. 10. Graficul rezultatelor la simularea Displacement

Conform acestor grafice se poate observa ca in cazul celulelor de dimensiune 3mm au cele mai bune rezultate in urma simulărilor.

Tabel 2. Simulări Von Mises, Displacement si Strain pentru 2x2x2 mm

Cubic Diamond			
Cubic Fluorite			
Hex Prism Laves Phase			

În prima iterație au fost realizate 54 de rezultate. Pentru a ajunge la rezultatele corecte ale simulărilor a fost nevoie de 2 iterații de simulări, deoarece firele libere din modele influențau valorile finale.

După interpretarea rezultatelor, s-a constatat că trebuie îndepărtate firele libere din modele, deoarece acestea influențau negative rezultatele.

Erorile apărute în urma simulărilor se datorează limitărilor softului, deoarece simulările nu ofereau rezultate concludente dacă modelele lattice nu aveau firele libere decupate (Figura 11). Astfel ca a fost necesară decuparea modelelor (Figura 12), astfel pierzând-se puțin din forma cilindrică a epruvetei.

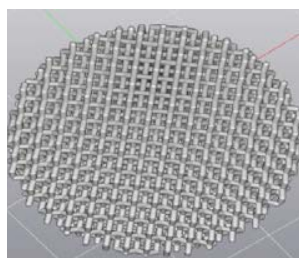


Fig. 12. Cubic Diamond

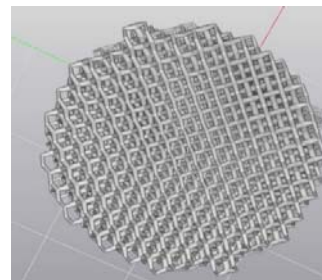


Fig. 11. Cubic Diamond

În prezent s-au fabricat 3 modele de epruvete (Tet Vertex Centroid, Hex Prism Laves Phase, Hex Prism Diamond) utilizând tehnologia aditivă de Topire Selectivă cu Laser (SLM-Selective Laser Melting) pe echipamentul Realizer 150 de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca. Urmează testarea acestor epruvete la compresiune în condiții de laborator utilizând echipamentul INSTRON 8800. Rezultatele testelor efectuate în laborator vor fi comparate cu rezultatele obținute în urma efectuării simulărilor cu software-ul nTopology Element Pro. În cazul în care rezultatele simulărilor nu vor fi asemănătoare se va căuta o altă soluție software pentru repetarea acestora. În cazul în care

rezultatele vor fi apropiate urmează dezvoltarea unor simulări cu varierea dimensiunilor celulelor elementare până la 10 mm. Acestea se vor fabrica utilizând tehnologia SLM și vor fi testate în condiții de laborator. În urma rezultatelor se va alege structura optimă pentru proiectarea modulului spinal din componența unui exoschelet ușor.

6. Concluzii și direcții viitoare de cercetare

Modelarea și simularea structurilor lattice joacă un rol important în definirea unor produse care să simuleze cât mai realist structura internă a oaselor umane. Lucrarea face un prim pas în acest demers, reușind să prezinte un număr impresionant de variante de structuri interne, dintre care 3 au fost fabricate din titan. Urmează testarea acestora și mărirea gamei de structuri fabricate, astfel încât să se apropie cât mai mult de structura osoasă. Pe baza unui model experimental factorial, să se definească exact modelele care se potrivesc cât mai bine scopului propus. În continuare acestea se vor utiliza, în primul rând pentru realizarea elementelor de forță ale exoscheletului ușor, urmând ca, ulterior, rezultatele cercetărilor să fie transferate către domeniul simulării structurii osoase a pacienților umani.

Bibliografie:

- [1] Viteckova S., Kutilek P., Jirina M. (2013). Wearable lower limb robotics: A review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering* 33(2): 96–105.
- [2] Looze M.P. de, Bosch T., Krause F., Stadler K.S., O'Sullivan L.W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics* 59(5): 671–681.
- [3] Goergen A. (2017). (Wir sind) die Roboter. See <http://dhl-freight-connections.com/de/we-are-the-robots/> (accessed 15.04.2017).
- [4] Gopura R.A. et al. (2016). Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review. *Robotics and Autonomous Sys.* 75: 203–220.
- [5] Bartenbach V., Wyss D., Seuret D., Riener R. (2015). A lower limb exoskeleton research platform to investigate human-robot interaction. In *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics Vol. 2015–September*, 600–605.
- [6] Veneman J. F. (2017). Safety Standardization of Wearable Robots—The Need for Testing Methods. *BIOSYSROB* 16: 189–193.
- [7] ROBRADY - Lockheed Martin (2017) Exoskeleton Technologies: Industrial · Lockheed Martin. See <https://www.lockheedmartin.com/us/products/exoskeleton/industrial.html> (accessed 12.04.2018).
- [8] Accelopment AG - RoboMate (2017) Robo-Mate. See <http://www.robo-mate.eu/> (accessed 24.04.2018).
- [9] Nördinger S. (2017). Exoskelette verleihen Superkräfte. See <https://www.produktion.de/trends-innovationen/exoskelette-verleihen-superkraefte-226.html> (accessed 2.04.2018).
- [10] Perry J. (2017) Man or machine? - Automotive Manufacturing Solutions. See <https://automotivemanufacturingsolutions.com/technology/man-or-machine> (accessed 21.04.2018).
- [11] Volkswagen AG (2017). Audi Produktion: Rückenschonend arbeiten mit dem Exoskelett. See https://www.volkswagenag.com/de/news/2017/12/audi_exoskelett.html (accessed 21.03.2018).
- [12] FedEx (2017). FedEx Forecasts Annual Global Economic Megatrends. See <http://about.van.fedex.com/newsroom/fedex-forecasts-annual-global-economic-megatrends/> (accessed 21.02.2017).
- [13] Constantinescu C., Muresan P.C., Simon G.-M. (2016). JackEx: the new digital manufacturing resource for optimization of Exoskeleton-based factory environments. 26th CIRP Design Conference. Stockholm. 508-511.

- [14] Constantinescu C., Popescu D., Muresan P.C., Todorovic O. (2016). Optimisation of advanced manufacturing environments with integrated intelligent Exoskeletons. 4th International Conference on Production Research - Regional Conference Africa, Europe and the Middle East.
- [15] Constantinescu C., Muresan P.C., Ginta, S., Todorovic, O. (2014). Modelling and simulation of advanced factory environments integrating intelligent exoskeleton. International Conference on Production Research - Regional Conference Africa, Europe and the Middle East 53: 109-114.
- [16] Rashedi E. et al. (2014). Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. *Ergonomics* 57(12): 1864–1874.
- [17] Bosch T., van Eck J., Knitel K., de Looze M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics* 54: 212–217.
- [18] Ko H. et al. (2015). Design knowledge representation to support personalised additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping* 10(4): 217–226.
- [19] Cazon A., Aizpurua J., Paterson A., Bibb R., Campbell R.I. (2014). Customised design and manufacture of protective face masks combining a practitioner-friendly modelling approach and low-cost devices for digitising and additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping* 9(4):251– 261.
- [20] Deradjat D., Minshall T. (2017). Implementation of rapid manufacturing for mass customisation. *J. of Manufacturing Technology Management* 28(1): 95-121.
- [21] Wohlers T., Caffrey T. (2014). Wohlers Report 2014: 3D printing and additive manufacturing state of the industry; Fort Collins, Col.: Wohlers Associates.
- [22] Smith M. (2017). suitX Named 2017 Gold Edison Award Winner For Innovative Exoskeleton. Industry tap into news. Available at: <http://www.industrytap.com/suitx-named-2017-gold-edison-award-winner-innovative-exoskeleton/42323>, last accessed 15.04.2018
- [23] Fraunhofer IPA. (2017). DRIVE SYSTEMS AND EXOSKELETONS. Fraunhofer IPA. Available at: https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/en/documents/Expertises/Biomechatronische-Systeme/Product_sheet_Drive_Systems_Exoskeletons_offen.pdf. last accessed 17.04.2018
- [24] Marinov B, Dao T. (2017). Exoskeleton Report. Available at: <http://exoskeletonreport.com/>. last accessed 08.04.2018.
- [25] S. Toxiri, J. Ortiz, J. Masood, J. Fernandez, L. A. Mateos, D. G. Caldwell. (2015). A Wearable Device for Reducing Spinal Loads during Lifting Tasks: Biomechanics and Design Concepts. International Conference on Robotics and Biomimetics. Zhuhai, China: 2295–2300
- [26] Carlson T. (2018). Exoskeletons: The Best Available for SCI Survivors. *SpinalCord*. Available at <https://www.spinalcord.com/blog/exoskeletons-the-best-available-for-sci-survivors>. last accessed at 10.04.2018
- [27] Voostore A.B. (2017). Steadycam Leopard IV Standard Le401 - Voostore. See <https://www.voostore.com/de/steadycamstabilizer/steadycam-leopard-ii-standard-le201> (accessed 21/12/2017).
- [28] Gonzalez C. (2017). Manufacturing Workers Become More than Human with Exoskeletons. *MachineDesign*. Available at: <http://www.machinedesign.com/motion-control/manufacturing-workers-become-more-human-exoskeletons>. Last accessed 02.04.2018
- [29] M. Nordin, V.H. Frankel, *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System*, 4th Edition, LWW Publisher, ISBN-13: 978-1609133351 (2012)