

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" din IAȘI
Facultatea de Construcții de Mașini și Management
Industrial



CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND REALIZAREA PIESELOR CU SUPRAFEȚE COMPLEXE PRIN PRINTARE 3D CU BRAȚ MECANIC ÎN 6 AXE

- REZUMAT -

Coordonator:

Prof. Dr. Ing. Cătălin-Gabriel Dumitraș

Doctorand:

ing. Valeriu-Fanică Hrib

2025





CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND REALIZAREA PIESELOR CU SUPRAFEȚE COMPLEXE PRIN PRINTARE 3D CU BRAȚ MECANIC ÎN 6 AXE

Valeriu – Fănică HRIB
domeniul: Inginerie Industrială

Președinte comisie doctorat:	Prof.dr.ing.
Conducător de doctorat:	Prof.dr.ing. Cătălin Gabriel DUMITRAȘ
Referenți oficiali:	Prof.dr.ing.
	Prof.dr.ing.
	Prof.dr.ing.

Comisia de îndrumare/Comisa de îndrumare și integritate academică:

Prof.dr.ing. Mihăiță Horodincă
Prof.dr.ing. Sever - Gabriel RACZ
Conf.dr.ing. Adriana MUNTEANU
Conf.dr.ing. Dragoș - Florin CHITARIU



Cuprins

Cap. 1	Generalități.....	7
1.1	Descrierea sistemului de printare 3D a pieselor cu suprafețe complexe	7
1.1.1	Definirea noțiunii de suprafață complexă	7
1.1.2	Tehnologia de printare 3D	7
1.1.3	Metode și metodologii de printare 3D a pieselor cu suprafețe complexe.....	8
1.2	Concluzii	8
Cap. 2	Stadiul actual al cunoașterii privind procesul de printare 3D a suprafețelor complexe	9
2.1	Realizarea de piese cu ajutorul imprimantelor 3D clasice, respectiv cu cele speciale	9
2.2	Realizarea reperelor 3D cu ajutorul brațelor robotice în 6 axe prin abordarea unor strategii de printare.....	11
2.3	Materiale utilizate în printarea 3D	11
2.3.1	Poliamidele	Error! Bookmark not defined.
2.3.2	Fabricarea poliamidelor	Error! Bookmark not defined.
2.3.3	Fibre	Error! Bookmark not defined.
2.3.4	Carbonul.....	Error! Bookmark not defined.
Cap. 3	Necesitatea și oportunitatea temei	13
3.1	Avantaje față de printarea 3D tradițională	13
3.1.1	Flexibilitate în printare.....	13
3.1.2	Scalabilitate.....	13
3.1.3	Printarea 3D cu o paletă largă de materiale.....	13
3.1.4	Dezvoltarea acestei tehnologii în diverse ramuri.	13
3.1.5	Eficiență și sustenabilitate	14
3.1.6	Reducerea costurilor pe termen lung.....	14
3.1.7	Provocări tehnice care necesită cercetare	14
3.1.8	Impact economic și industrial	14
3.1.9	Educație și cercetare.....	14
3.2	Concluzii	15
3.3	Obiective propuse pentru realizarea tezei de doctorat:.....	15
Cap. 4	Metodologii de cercetare și echipamente folosite în studiul imprimării 3D a suprafețelor complexe.....	16
4.1	Pregătirea planului experimental	16
4.1.1	Componenta printării 3D - Extrudor	16
4.1.2	Material utilizat la printarea epruvetelor	16
4.1.3	Robot UR3e (Universal Robots)	17



4.1.4	Echipament de încercare la tracțiune și compresiune LLOYD	Error! Bookmark not defined.
4.1.5	Determinarea deplasărilor utilizând sistemul optic metrologic PONTOS-GOM..	Error! Bookmark not defined.
4.1.6	Microscop Mitutoyo TM-505B	Error! Bookmark not defined.
4.1.7	Lampă UV	Error! Bookmark not defined.
4.1.8	Spectrometru VERTEX 70 FT-IR	Error! Bookmark not defined.
4.2	Metodologie aplicată în analiza cu elemente finite	Error! Bookmark not defined.
4.3	Concluzii.....	17
Cap. 5	Contribuții teoretice privind procesul de printare 3D a suprafețelor complexe	18
5.1	Determinarea normalelor la suprafață – abordare matematică.....	18
5.1.1	Determinarea normalei la suprafață.....	19
5.2	Analiza cu elemente finite a epruvetelor	19
5.2.1	Analiză FEA la compresiune utilizând programul CAD SolidWorks.....	19
5.2.2	Analiză FEA la tracțiune utilizând programul ANSYS.....	20
5.2.3	Concluzii:	21
5.3	Contribuții proprii privind optimizare procesului de printare 3D	22
5.3.1	Imprimarea 3D în 3 axe	Error! Bookmark not defined.
5.3.2	Programarea robotului UR3e	22
5.4	Modelarea 3D a epruvetelor în programe CAD.....	22
5.5	Concluzii.....	23
Cap. 6	Contributii teoretico-experimentale privind printarea 3D.....	23
6.1	Analiza FTIR a filamentului ONYX	23
6.2	Analiză microscopică a epruvetelor planare și nonplanare .	Error! Bookmark not defined.
6.3	Concluzii.....	24
6.4	Metodologia de cercetare	25
6.4.1	Stabilirea unui plane experimental prin prezentarea metodei Taguchi.	25
6.1	Metoda de testare la compresiune și tracțiune	27
6.1.1	Testare la compresiune	Error! Bookmark not defined.
6.1.2	Testare la tracțiune	27
6.2	Prelucrarea datelor experimentale	27
6.2.1	Rezultatele testului la compresiune.....	27
6.2.2	Rezultatele testului de tracțiune.....	27
6.2.3	Centralizator rezultate	28
6.3	Interpretare și evaluarea rezultatelor în MiniTAB	28
6.3.1	Analiza Taguchi:.....	29



6.3.2	Analiza regresiei:.....	29
6.3.3	Pareto pentru efectele standardizate.....	30
6.3.4	Probabilitate normală	30
6.3.5	Histograma.....	31
6.3.6	Raportul de optimizare și predicție pentru regresia multiplă	31
6.3.7	Concluzie generală:.....	32
6.4	Monitorizarea și evaluarea deformărilor la tracțiune prin aplicarea măsurătorii optice cu echipamentul GOM	32
Cap. 7	Concluzii generale, contribuții principale și direcții viitoare de dezvoltare a cercetării...	34
7.1	Concluzii generale	34
7.2	Contribuții personale	35
7.3	Direcții de cercetare viitoare:	36
Cap. 8	Bibliografie	39

Cap. 1 Generalități

1.1 Descrierea sistemului de printare 3D a pieselor cu suprafețe complexe

1.1.1 Definirea noțiunii de suprafață complexă

Suprafețele cu formă liberă, denumite și suprafețe complexe, sunt intens utilizate în industrii precum cea aerospațială, auto, a bunurilor de consum, precum și în construcția matrițelor și ștanțelor [1], [2]. Aceste suprafețe sunt proiectate în mod obișnuit pentru a satisface cerințe funcționale și/sau estetice avansate. Definirea lor este, în general, de natură intuitivă, neexistând un cadru formal strict pentru clasificarea acestora [3]. Ele sunt caracterizate prin prezența uneia sau mai multor regiuni non-planare și non-pătratice, fiind reprezentate prin modele matematice parametrice sau prin rețele mozaicate [4]. Modelarea acestor suprafețe în sistemele CAD necesită un efort substanțial din partea inginerului proiectant, iar fabricarea lor implică elaborarea unor strategii CAM complexe din partea programatorului, pentru a permite realizarea fizică precisă a pieselor cu geometrie complexă [2].

În literatura de specialitate, termenii utilizați pentru a descrie suprafețele geometrice avansate variază, incluzând denumiri precum „suprafețe sculptate”, „suprafețe cu formă liberă” sau „suprafețe cu porțiuni netede”, aceștia fiind considerați adesea sinonimi cu termenul „suprafețe complexe” [5], [6]. Noțiunea de „formă liberă” este frecvent folosită ca o descriere generală pentru acele suprafețe ale căror forme nu pot fi asociate cu entități geometrice simple și ușor de identificat, cum ar fi planele sau suprafețele cvadrice clasice [7]. Ținând cont de uzul terminologic preferat în lucrările de specialitate din literatura tehnică românească, în cadrul prezentei lucrări se va utiliza denumirea de „suprafață complexă” pentru a desemna aceste forme geometrice avansate [2], [8].

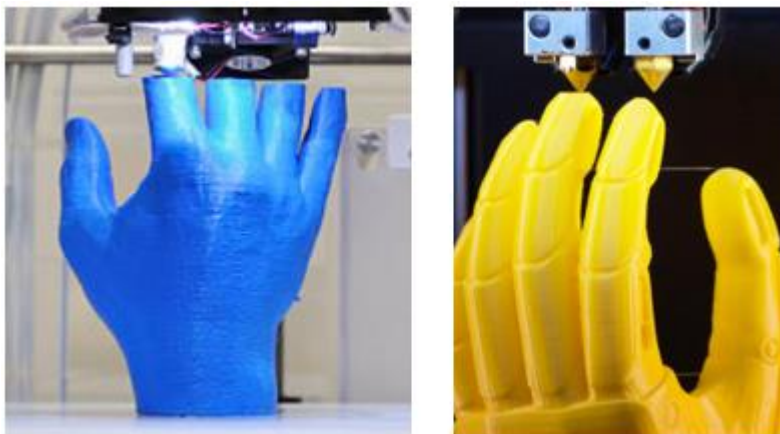


Fig. 1 - Suprafețe complexe printate 3D [9]

1.1.2 Tehnologia de printare 3D

În procesul de printare 3D a pieselor cu suprafețe complexe sau suprafețe care compun părțile active dintr-o piesă complexă, geometria și orientarea capului de printat pe suprafețe devin critice în procesul de printare cu filament. Capul de printat (CEX) poate să depună material pe suprafața de printat dacă punctul central al capului de printare (CEX) urmează pur și simplu suprafața de printat [14], [15]. În procesul de imprimare 3D, viteza de depunere a filamentului, factorul de umplere și temperatura de topire a filamentului sunt de o importanță crucială. În cazul programării CN și a realizării fișierelor de tip G-code pentru piesele care urmează să fie imprimate 3D pe o mașină care are șase grade de libertate (6 axe) trebuie să fie considerate atât traiectoria cât și orientarea capului de extrudare (CEX) pe suprafața piesei [16], [17].

Pentru a îmbunătăți productivitatea imprimantelor 3D, condițiile de printare precum și traiectoria capului de extrudat trebuie să fie optimizate fără a sacrifica precizia prelucrării. În cazul printării, temperatura

de extrudare joacă un rol important în determinarea condițiilor de extrudare, dat fiind faptul că uzura capului de extrudat este dependentă de aceasta. Slic3r a elaborat un algoritm de programare a vitezei de deplasare a capului de extrudat și a îmbunătățit timpul ciclului în realizare a pieselor cu suprafețe complexe [18] [19].

Vibrația în timpul procesului de printare a pieselor cu suprafețe complexe este o problemă serioasă ce trebuie luată în seamă, mai ales atunci când se printează cu diuze mici ca diametru și lungime mare a brațului de fixare până la aceasta [19].

1.1.3 Metode și metodologii de printare 3D a pieselor cu suprafețe complexe

1.1.3.1 Tehnologiile principale de imprimare 3D

Apariția imprimantelor 3D compacte cu open-source de utilizare au apărut încă din anii 2000, ce ofereau gratuit software de tip RepRap, ceea ce a permis ca tehnologia să fie folosită de un grup mai larg de utilizatori în scopuri comerciale, educaționale și personale la scară redusă (Jones, 2012). Apariția companiilor de imprimare 3D cu costuri reduse a condus la o schimbare de paradigmă în domeniu.

Proiectul RepRap a fost inițiat în 2004 la Universitatea din Bath (Regatul Unit) de către Dr. Adrian Bowyer [21]. Obiectivul proiectului a fost acela de a dezvolta o imprimantă 3D low-cost capabilă să se autoreplice. Din 2005, a început expirarea brevetelor referitoare la tehnologia aditivă menționată anterior. La 9 februarie 2008, RepRap 1.0 „Darwin” a imprimat cu succes peste 18% din propriile sale componente [22].

Impactul imprimantelor 3D în ziua de astăzi este unul enorm privind fabricarea aditivă prin prisma sustenabilității prin reducerea deșeurilor. Această idee inovativă are efecte în mai multe domenii: spre exemplu în medicină în fabricarea de proteze personalizate, implanturi dentare sau chiar de organe artificiale, în diferite industrii cum ar fi cea

spațială sau automotive prin prototipare rapidă, pentru diverși consumatori în modă și design sau produse de uz casnic.

Imprimantele 3D continuă să evolueze cu tehnologii inovative cum ar fi bioprintingul, printarea 4D sau printarea cu brațe robotice cu 6 axe.

Se prezintă mai jos descrierea unor procedee de printare tridimensională și sunt date unele detalii privind: materialele folosite, precizia dimensională obținută, producătorii de echipamente și principalele aplicații industriale. De evidențiat faptul că marea majoritate de producători la nivel mondial s-au axat pe două tehnologii de printare predominante: printare cu filament prin topire termică (FDM) și printare cu rășini prin polimerizare.

1.2 Concluzii

Printarea 3D a reperelor a adus odată cu ea și numeroase avantaje cum ar fi:

- Prototipare rapidă a reperelor;

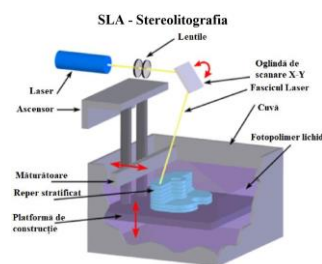


Fig. 2 - Schemă de printare SLA [24]

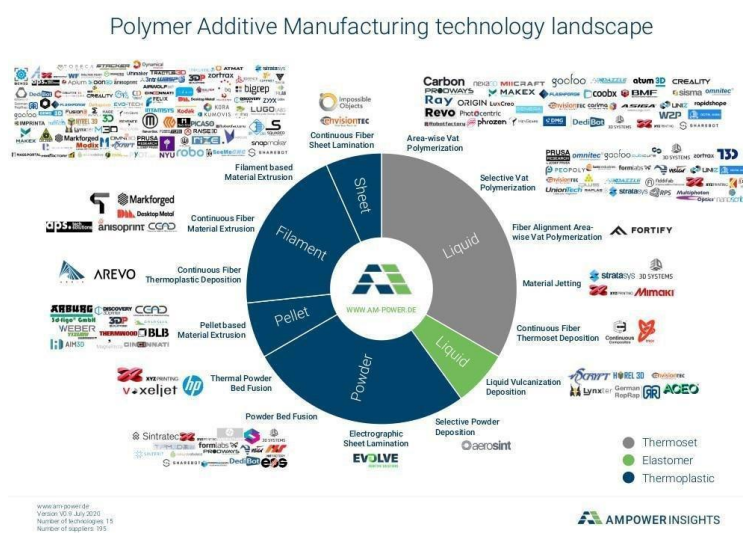


Fig. 3 - Tehnologii și producători de printare 3D [23]

- Flexibilitate posibilitatea printării unei game diverse de repere;
- Reducerea tipurilor de tehnologii;
- Reducerea timpilor de execuție a reperelor (plan de operații, faze tehnologice, etc.)
- Realizarea reperelor dintr-o gamă largă de materiale (PLA, PET, PET-G, ABS, PLA-CF, PETG-CF, PET-CF, materiale conductoare de electricitate, materiale ignifuge, pulberi metalice);
- Posibilitatea realizării reperelor 3D cu suprafețe complexe.
- Posibilitatea automatizării proceselor fără intervenție umană specializată;
- Eficiență prin abordarea acestor tehnologii aditive practic se depune materie doar acolo unde este nevoie.
- O mare diversitate constructivă de imprimante 3D.
- Posibilitatea introducerii principiului de stoc 0.
- Posibilitatea reproducerii oricând a reperelor de consum (Bucșe, carcase, casete, etc.)

Cap. 2 Stadiul actual al cunoașterii privind procesul de printare 3D a suprafețelor complexe

2.1 Realizarea de piese cu ajutorul imprimantelor 3D clasice, respectiv cu cele speciale

Imprimarea 3D este considerată una dintre cele mai mari invenții ale omului pentru facilitarea producției implicite a prototipării rapide prin depunere de material. Mai nou această industrie este denumită și tehnologie aditivă (AM) și prezintă un mare avantaj: cu ajutorul imprimantelor 3D se pot realiza repere cu forme complexe. De aceea ele sunt ideale în operațiuni de prototipare considerând faptul că prin metode clasice de prelucrare ar necesita un efort mare pentru a le realiza (metode precum debitare, strunjire, frezare, găurire, filetare, îndoire, matrițare, ștanțare, etc.).

Există două tipuri de extrudare a filamentului: de tip Bowden și de tip direct drive. Fiecare dintre ele are avantaje și dezavantaje cum ar fi: extrudorul de tip Bowden are avantajul de a fi mai simplu, antrenarea filamentului de plastic se face la distanță față de duza de depunere. Firul este împins printr-un tub de teflon rigid de la motorul de antrenare care este montat într-o poziție fixă până la duza încălzită, aceasta fiind mobilă.

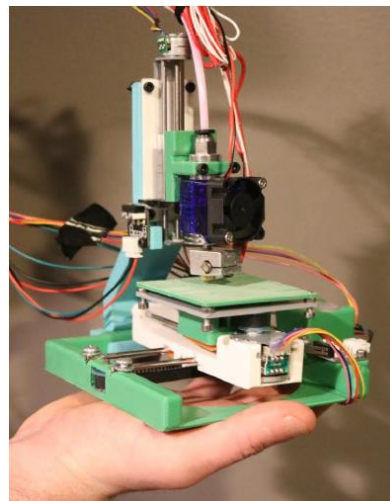


Fig. 44 - Realizarea fizică a imprimantei [29]

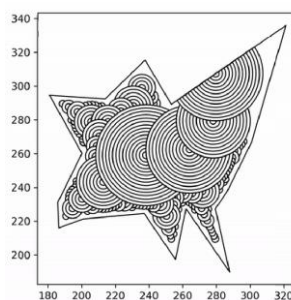


Fig. 55 - Printare planară fără suport [30]

O altă abordare privind printarea 3D a fost aplicarea unei noi strategii în vederea eliminării celei mai mari provocări ale imprimantelor 3D clasice și anume eliminarea suporturilor. Astfel pentru a îmbunătăți acest lucru s-a folosit o nouă strategie de printare și anume folosirea succesivă a arcelor de cerc.

Autorul sugerează și câteva reguli generale pentru imprimarea obiectelor 3D:

- Imprimarea ar trebui să se facă cât mai rece posibil. El a folosit un material din PLA dar la care depunerea s-a făcut la o temperatură de 195°C.
- Maximizarea răcirii, acest lucru se poate face prin setarea ventilatoarelor la puterea lor maximă.

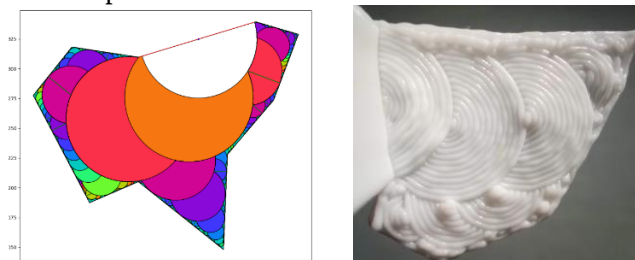


Fig. 6 - Strategie de printare [30]

Un alt concept de imprimare 3D este cel al lui Joshua Bird care pare interesant prin inovare și costuri reduse din zona imprimării 3D. YouTuber-ul pare să fi regândit complet modul în care se poate construi o imprimantă 3D cu 4 axe [34]. Conceptul lui Bird implică o platformă de printare rotativă și un singur cap de imprimare [33]. Această imprimantă are ca și specific o masă rotativă la 360° și deasemeni capul de printare se poate roti.

Apoi Bird a realizat un program de feliere care nu este prezent în programele tipice pe care le găsim la imprimantele clasice. El a folosit firmware-ul RepRap care acceptă o axă suplimentară.

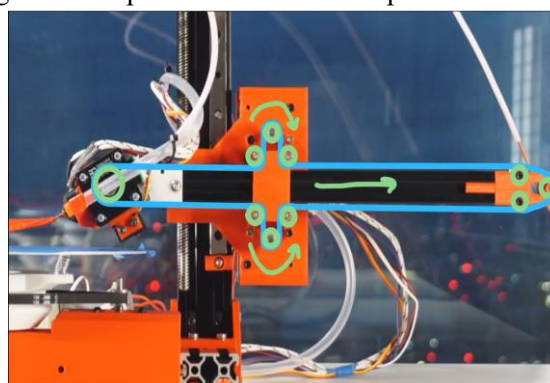


Fig. 7 - Mișcările imprimantei [33]

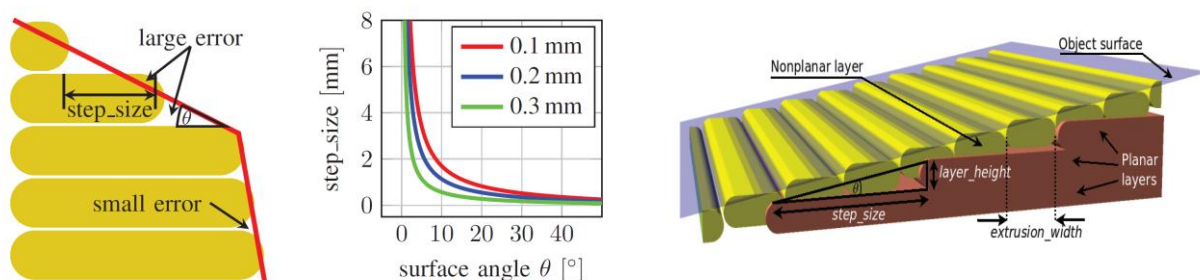


Fig. 8 - Traietorie de printare [35]

Unele probleme de printare nonplanară încep atunci când se dorește a se printa repere cu suprafețe complexe. Așa cum se relatează în lucrare, autorii care tratează problematica depunerii de material cu ajutorul unei imprimante clasice în raport cu traiectoria duzei extrudorului.

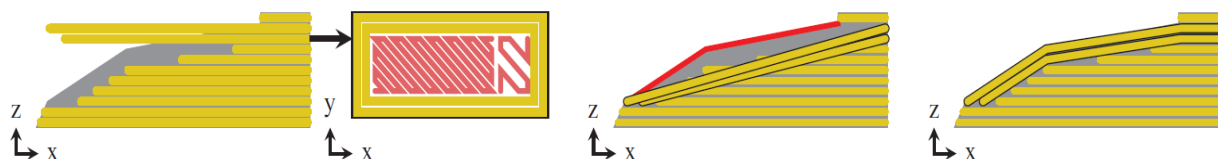


Fig. 9 - Pași pentru generarea traiectoriei nonplanară[35]

Tot pentru a realiza o piesă care să nu aibă nevoie de suport, autorii din lucrarea [37] au realizat posibilitatea printării unei piese fără suport cu ajutorul unei imprimante 3D, numai că de această dată se folosește de o a patra axă suplimentară de rotație în jurul axei Z

Detaliile acestui concept de bază, descrie principiul ROTBOT, în care capul de printat în speță duza de extrudare a filamentului este plasată la un unghi de 45 de grade, iar cea de a 4 axă este o axă ce se poate roti 360 de grade în jurul axei Z.

2.2 Realizarea reperelor 3D cu ajutorul brațelor robotice în 6 axe prin abordarea unor strategii de printare

Imprimarea cu robot sau imprimare cu braț robotic combină folosirea unui cap de extrudare care depune diverse tipuri de materiale (plastic, lichide, semisolide din beton) cu mișcările multiaxiale ale brațului robotic pentru ca împreună să creeze o imprimantă 3D multifuncțională și cât mai flexibilă decât modelele convenționale care există la ora actuală în lume.

Datorită flexibilității largi de mișcare a brațului robotic acesta este din ce în ce mai utilizat în proiecte mari de anvergură la fabricarea de matrițe, prototipuri la scară mare, sculpturi artistice, elemente arhitecturale, mobilier sau chiar în construcția aerospațială.

Acest progres tehnologic oferă o gamă largă de posibilități de realizare a reperelor fabricate prin imprimarea 3D cu braț robotic. Brațul robotic are capacitatea de a printa 3D printr-o multitudine de mișcări unghiulare combinate, astfel având posibilitatea de realizare a pieselor ce conțin suprafețe complexe neplanare. De asemenea aceste brațe robotice capătă și un mai mare interes dacă se poate adăuga pe lângă cele 6 axe de mișcare existente, o masă rotativă, două axe de rotație de tip leagăn, sau chiar un alt robot suplimentar cu 6 axe.

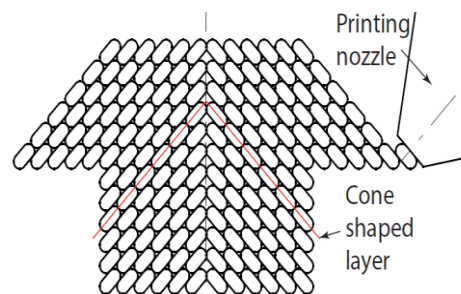


Fig. 10 - Strategia de imprimare cu straturi în formă de con [38]

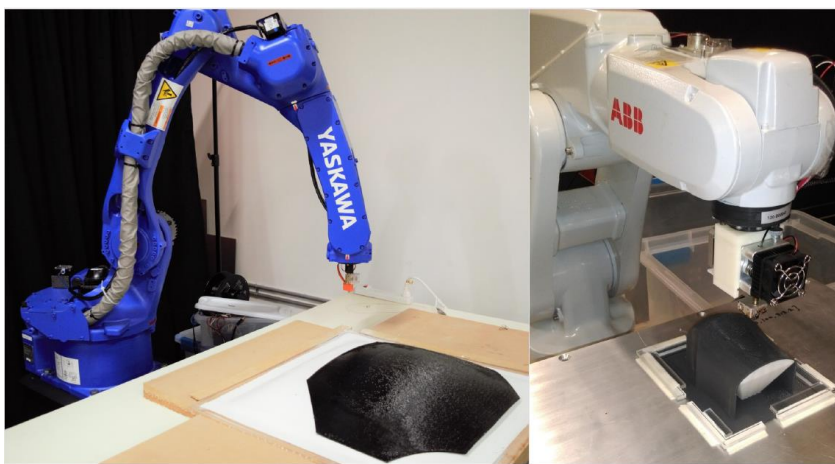


Fig. 116 - Printare cu robot Yaskawa și ABB [40]

2.3 Materiale utilizate în printarea 3D

Substanțele organice inițiale au fost adesea descoperite întâmplător, deoarece oamenii de știință nu s-au angajat de la început în sinteza unei substanțe cu proprietăți cunoscute pentru a înlocui o anumită substanță naturală. Ulterior, s-au făcut încercări de a obține înlocuitori. Cu toate acestea, eforturile inițiale în acest domeniu au utilizat, de asemenea, substanțe naturale. De exemplu, la mijlocul secolului al XIX-lea, cercetătorii au supus uleiul de in unui proces de fierbere în prezența acidului azotic, ceea ce a dus la solidificarea uleiului și la manifestarea unor proprietăți plastice analoge cu cele ale cauciucului. Acest fenomen a fost denumit „cauciuc de ulei” [49]. Obținerea fibrelor de carbon

Fibre de carbon din PAN (policrilonitril)

Fibrele de carbon PAN sunt produse folosind polimeri scumpi, spre deosebire de fibrele de carbon de gudron izotropice, care sunt produse folosind materii prime precum cărbunele sau gudronul de petrol, care sunt relativ ieftine. Fibrele de carbon PAN sunt utilizate în principal ca armături structurale datorită rezistenței lor ridicate la tracțiune. Cercetarea actuală încearcă să îmbunătățească rezistența și modulul prin dezvoltarea de procese și tehnologii, prin creșterea orientării structurale și prin realizarea unei structuri radiale mai uniforme. O altă inițiativă de cercetare se referă la modificarea chimică a suprafeței fibrelor pentru a optimiza interfața fibră-matrice, punctul slab al compozitului. Chimia suprafeței poate fi modificată printr-un număr mare de metode, inclusiv acoperirea fibrelor, tehnici îmbunătățite de oxidare a suprafeței și grefarea de specii reactive pe suprafață [57].

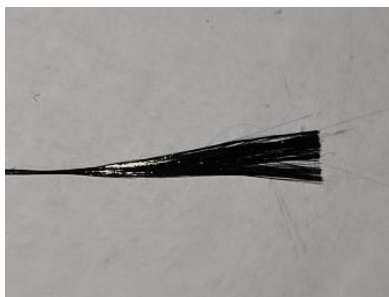


Fig. 129 - Filament 0,3mm cu fibre continue 1K



Fig. 130 - Țesătură prepreg tip covor

Concluzii

Materialele plastice, în mod particular materialele plastice armate cu microfibre sunt utilizate pe scară largă datorită unor proprietăți care le fac ideale pentru folosirea acestora în printarea 3D și anume:

1. Varietate de materiale (materiale biodegradabile, unele reciclabile, cu o bună conductivitate electrică, cu rezistență crescută la foc, materiale flexibile, etc.);
2. Prelucrare ușoară. Aceste materiale se depun la temperaturi relativ mici și se răcesc rapid; fiind materiale ușoare nu necesită aprovizionare cu scule scumpe.
3. Disponibilitate. Din start aceste materiale se găsesc disponibile în diverse culori și diferite proprietăți fiind armate cu diferite microfibre: de carbon, de sticlă sau de kevlar;
4. Prototipare rapidă. Cu ajutorul acestor materiale se poate realiza aproape în timp real machete sau chiar repere funcționale ale acestora.
5. Cost redus comparativ cu cele metalice sau ceramice aceste materiale plastice au un cost redus fiind mai ieftine și mai ușor de găsit în comerț;
6. Diverse proprietăți fizice și mecanice cu rezistență bună la uzură ABS sau nylon, ușoare PLA cu fibre, flexibile TPU, proprietăți bune de autolubrifiere, materiale ignifuge cu rezistență bună la foc sau cu rezistență chimică bună cazul PETG;
7. Rezistență mecanică bună fibrele conferă materialului o bună rezistență la compresiune, forfecare sau tracțiune, o rigiditate mai mare față de materialele plastice obișnuite;
8. Reducerea deformărilor materialele plastice armate cu microfibre rezistă la sarcini mai mari față de cele obișnuite fără să își modifice formele geometrice.
9. Reciclabile și biodegradabile ca în cazul PLA, etc.;
10. Aplicabilitate în domenii diverse pentru realizarea de componente auto, robotică și mecatronică, industria medicală, aerospațială, nautică, artă și design, decorațiuni, articole sportive.

Materialele armate cu fibre (carbon, sticlă, kevlar) pentru tehnologia de fabricație aditivă aduc clar un plus valoare într-o zonă de echilibru între: versatilitate de materiale, rezistență mecanică și greutate redusă. Aceste materiale duc mai departe posibilitățile de imprimare 3D prin realizarea unor repere funcționale, mai rezistente și adaptate noilor provocări industriale. Acestea reprezintă următorul pas în evoluția imprimării 3D transformând-o într-o viitoare metodă de producție industrială la scară largă, fiind puntea de legătură dintre realizarea reperelor de prototipare rapidă la cele rigide robuste din zonă industrială inginerească.



Cap. 3 Necesitatea și oportunitatea temei

Abordarea temei printării 3D cu braț robotic se bazează pe un concept nou **ORIUNDE, ORICÂND, ORICÂT** și este relevant din mai multe perspective, datorită potențialului său inovator și al aplicațiilor practice în diverse domenii.

În urma analizei făcute a stadiului actual al cunoașterii în care s-au analizat diverse soluții constructive și tehnice ale mai multor producători și cercetători, a consultării de site-uri web, dar și a unor articole publicate în diverse reviste și jurnale am evidențiat câteva idei care creionează necesitatea cercetării acestui subiect:

3.1 Avantaje față de printarea 3D tradițională

3.1.1 Flexibilitate în printare.

Brațele robotice pot realiza repere 3D cu suprafețe complexe sau în spații închise, unde imprimantele 3D standard (cu platformă fixă) au limitări mecanice. Acestor brațe pe lângă cele 6 grade de libertate li se mai pot adăuga axe suplimentare cum ar fi mese rotative pe care stă piesa de prelucrat, axe de translație ale robotului pentru executa prelucrări pe piese lungi sau chiar axe combinate ajungând până în momentul în care și piesa este montată pe un alt robot astfel încât prelucrarea se poate face cu roboți colaborativi. De asemenea acești roboți pot fi transportați în diverse locații formând celule de fabricație flexibile. Tot ca și flexibilitate pot opera cu diverse scule interschimbabile de printare, cu diverse tipuri de materiale, cu diverse tipuri de filamente din fibre continue de carbon, de sticlă sau de kevlar.

3.1.2 Scalabilitate.

Pot acoperi zone mai mari (ex: construcții sau structuri industriale) prin mișcarea robotică. Spre deosebire de imprimantele clasice care pentru a realiza piese mari care necesită structuri mecanice consistente, dar și elemente mecanice de transmisie mari brațele robotice se pot monta cu ușurință pe axe suplimentare de translație sau montarea în fața robotului a unei mese rotative. Acești roboți pot fi transportați pe șantiere, în zone afectate de dezastre naturale sau chiar în spațiu. Exemple se pot da: fabricarea de poduri în Olanda, fabricarea prototipurilor de dimensiuni mari (bărci, ambarcațiuni) sau chiar de case printate 3D în Africa.

3.1.3 Printarea 3D cu o paletă largă de materiale.

La ora actuală se știe că pe lângă printarea 3D cu materiale plastice de tip FDM (fusion deposit material) mai pot fi folosite și materiale vâscoase de exemplu beton, silicon, rășină epoxidică, cu metal pulbere sau fir continuu sau chiar în industria alimentară unde se poate folosi ca material de printare aluat de copt. De asemenea unele brațe robotice pot manipula mai multe materiale simultan sau pot comuta între ele mai multe tehnologii adică tehnologie aditivă cu tehnologie substractivă de exemplu se pot imprima bărci cu tehnologie FDM după care se pot freza dacă se schimbă scula în locul capului de extrudat se montează un cap de frezat cu o freză, completându-se cele două tehnologii.

3.1.4 Dezvoltarea acestei tehnologii în diverse ramuri.

Construcții și arhitectură: Printarea 3D cu braț robotic permite realizarea de structuri complexe (ex: poduri, case) sau reparații direct pe șantier. Aceste brațe robotice pot fi duse chiar la fața locului pentru fabricarea de locuințe noi sau a adăuga alte corpuri noi anexe de construcții față de cele existente.

Aerospațial, maritim și automotive: Producția de piese cu greutate mică sau repararea componentelor în locații inaccesibile. Aici se pretează pentru rezistență mecanică sporită la tracțiune imprimarea 3D cu fibră de carbon, rezistență la compresiune folosirea fibrelor de sticlă sau fibra de kevlar având bune proprietăți la forfecare exemplu cel mai des întâlnit la vestele antiglonț.

Arte și design: Crearea de sculpturi sau obiecte artistice cu detalii bine definite. Prin utilizarea brațelor robotice se pot realiza obiecte artistice de gabarite mari din materiale cum ar fi spuma sau polistiren



expandat sau extrudat care în mod normal erau migăloase și greu de realizat așa încât prin această tehnologie se salvează timp care ar fi necesar creației noilor proiecte.

3.1.5 Eficiență și sustenabilitate

Printarea aditivă cu braț robotic optimizează cantitatea de material folosită. Acesta poate să depună material doar acolo unde este nevoie fără a fi nevoit să depună material de suport astfel încât poate să reducă în acest mod producerea de deșeuri dar și evitarea de manoperă necesară curățării reperelor manual sau prin aplicarea de solvenți.

Repararea directă a pieselor uzate (ex: utilaje industriale sau diverse repere) prelungește durata de viață a produselor. Există posibilitate la ora actuală ca să nu se poată relua de la capăt o piesă printată îndeosebi la piese de gabarite mari și foarte mari să poată să se imprimă doar partea deteriorată astfel încât să se salveze atât material cât și timp suplimentar de lucru.

3.1.6 Reducerea costurilor pe termen lung.

Deși inițial implementarea unei astfel de soluții necesită investiții consistente pe termen lung aceste costuri se reduc în timp. Această economie se datorește grație automatizării, reducerea personalului, ceea ce duce în final la reducerea cheltuielilor operaționale. Reducerea costurilor se mai poate realiza și prin reducerea risipei de materiale procesul de printare fiind unul de tip aditiv și cu depunere de material doar acolo unde este nevoie.

3.1.7 Provocări tehnice care necesită cercetare

- Necesitatea realizării unor programe de stratificare complexe definite prin algoritmi matematici care să poată fi operate de către utilizatorul final într-un mod facil și cât mai ușor posibil.
- Precizie și calibrare: Menținerea cu acuratețe a preciziei brațului robotic în timpul depunerii de material printabil 3D.
- Controlul dinamic al procesului: Controlul digital și monitorizarea de la distanță fac posibilă pornirea și oprirea proceselor tehnologice ori de câte ori este nevoie, prin adaptarea la variații de temperatură sau viteze de depunere.
- Integrarea cu alte tehnologii inovative: Combinarea roboților cu scanare 3D, inteligență artificială AI pentru corecții în timp real.

3.1.8 Impact economic și industrial

Personalizare în masă: Producția la cerere a pieselor customizate reduce costurile de stocare nemaifiind nevoie de utilizare de stocuri suplimentare. Aceasta se bazează pe un nou concept ORIUNDE, ORICÂND, ORICÂT. Totodată în multe industrii implementarea acestor tehnologii poate combate cu ușurință lipsa de personal calificat.

Automatizare avansată: Brațele robotice pot fi integrate în linii de producție deja existente pentru fabricație hibridă om-robot.

3.1.9 Educație și cercetare

Dezvoltarea de competențe interdisciplinare: robotică, mecanică, mecatronică și design 3D. Abordarea acestei teme crește nivelul de pregătire practică ale studenților în mediul academic. Tot aici incurajează creativitatea și inovația prin prisma gândirii ingineresti oferind un spirit competitiv pe piața muncii. Experimentare cu materiale noi de exemplu cu materiale compozite fibre sintetice, de sticlă, de kevlar, carbon, rășini epoxidice sau chiar din materiale reciclate.



3.2 Concluzii

Printarea 3D cu braț robotic răspunde perfect cerințelor noului model de producție definit prin conceptul de oriunde, oricând, oricât. Această tehnologie permite construirea de structuri direct la fața locului, fără lanțuri logistice, în orice moment al zilei și în orice cantitate adaptându-se rapid nevoilor de la locul faptei.

Tema este actuală datorită potențialului de revoluție industrială pe care îl aduce, combinând avansările din robotică și mecatronică combinate cu printarea 3D, scanarea 3D și inteligența artificială. Abordarea acestei teme poate deschide noi oportunități pentru diverse ramuri de cercetare sau în industrie precum și soluții sustenabile în mai multe sectoare ale economiei.

Imprimarea nonplanară reprezintă o paradigmă emergentă în fabricația aditivă, oferind beneficii semnificative în comparație cu abordarea tradițională planară.

Principalele avantaje includ:

1. Optimizarea calității suprafeței

- Prin adaptarea traiectoriilor de depunere la geometrii complexe sau curbe, imprimarea nonplanară minimizează artefactele de stratificare (precum efectul de "trepte"), rezultând în suprafețe cu rugozitate redusă și o finisare superioară fără necesitatea unor operații extensive de post-procesare.

2. Eficiență îmbunătățită a procesului

- Stratificarea adaptivă permite economii de material prin distribuirea selectivă a acestuia în zonele critice, reducând risipa. În anumite cazuri, numărul de straturi necesare scade, ducând la timpuri de fabricație accelerate.

3. Performanțe mecanice superioare

- Alinierea fibrelor sau a liniilor de material poate fi orientată strategic pentru a îmbunătăți proprietățile mecanice (e.g., rezistență la tracțiune, rigiditate) în direcții specifice, depășind limitările impuse de stratificarea planară convențională.

4. Versatilitate geometrică

- Această tehnică permite fabricarea directă pe suprafețe neplane sau preexistente, eliminând constrângerile de planitate și facilitând realizarea unor structuri bioinspirate sau aerodinamice cu complexitate sporită.

Imprimarea nonplanară extinde capacitățile fabricației aditive prin abordări inovatoare de stratificare, oferind calitate geometrică, eficiență și performanță superioară pentru aplicații specializate. În ciuda provocărilor tehnologice, potențialul său de a revoluționa producția de componente complexe o recomandă ca subiect de cercetare și dezvoltare continuă.

3.3 Obiective propuse pentru realizarea tezei de doctorat:

- Realizarea unui studiu actual al printării suprafețelor 3D complexe cu ajutorul unui braț robotic;
- Realizare model virtualizat într-un mediu de proiectare parametrizată cum ar fi Inventor sau SolidWorks;
- Realizarea unui program de printare prin diverse medii de proiectare cu ajutorul unui program de proiectare cum ar fi Inventor sau SolidWorks;
- Realizarea unei interfețe dintre programul g-code și softurile utilizate cu ajutorul platformei RoboDK;
- O modelare matematică a suprafeței epruvetei și a extragerii normalelor la acestea;
- O testare virtuală cu element finit atât la compresiune cât și la tracțiune a epruvetei propuse;

- O testare comparativă atât la compresiune cât și la tracțiune a epruvetelor printate planar dar și nonplanar;
- Un studiu comparativ asupra productivității implicând timpii de printare planară și nonplanară;
- Rezistența mecanică a epruvetelor dacă ele sunt supuse în mod constant la raze UV;
- Rezistența mecanică a epruvetelor dacă ele sunt supuse la apariția umidității sau a absenței ei.
- O analiză chimică a materialului utilizat;
- Un test comparativ dintre o printare nonplanară cu filament compozit și una nonplanară cu material compozit și armată cu fibră de carbon continuă.

Cap. 4 Metodologii de cercetare și echipamente folosite în studiul imprimării 3D a suprafețelor complexe

Abordarea inedită a cercetărilor în domeniu ce urmează a fi definite asupra imprimării 3D asupra realizării suprafețelor complexe a făcut elaborarea unei strategii de experimentare și a unei metodologii specifice privind realizarea lor.

4.1 Pregătirea planului experimental

4.1.1 Componenta printării 3D - Extrudor

Extruderul DyzeXtruder Pro este compus din două părți principale care se pot detașa prin intermediul unei pârgii și anume:

- a. Partea de împingere a filamentului de plastic care este compusă dintr-un bloc de aluminiu în care este amplasat un mic reductor format dintr-un grup de roți dințate.
- b. Partea de depunere a materialului de plastic care este formată dintr-o zonă de încălzire la care are atașată și duza dintr-un material de tungsten împreună cu zona de răcire formată dintr-un bloc de aluminiu cu aripioare și ventilator;



Fig. 140 - Cap de printat [64]

4.1.2 Material utilizat la printarea epruvetelor

Filament - ONYX

Caracteristici tehnice ale ONYX	
Modulul la tracțiune (GPa)	2,4
Limita de curgere la tracțiune(MPa)	40
Rezistența mecanică la rupere (MPa)	37
Deformația de rupere la tracțiune(%)	25
Rezistența la încovoiere (MPa)	71
Modulul la încovoiere (GPa)	3
Temperatura de deformare termică (°C)	145
Densitatea (g/cm ³)	1,2

Materialul de tip Onyx este fabricat de firma americană Markforged.

Rezistența la impact (J/m)

330

Aceasta firmă este un producător mondial de imprimante 3D și consumabile care are următoarele caracteristici: imprimantele pot realiza repere printate 3D atât din material cu microfibre de carbon cu macinătură, dar poate imprima deasemenea și cu fibre continue de carbon. Cei de la Markforged produc mai multe tipuri de filamente cum ar fi: Onyx, Onyx FR, Onyx ESD, nylon, Ultem 9085, etc dar și filamente cu fir continuu cum sunt cele de sticlă, de kevlar sau de carbon [65].

Onyxul este un nylon umplut cu microfibră de carbon. Este de 1,4 ori mai rezistent și mai rigid decât ABS-ul și poate fi ranforsat cu orice tip de fibră continuă. Onyx-ul este foarte adecvat pentru finisajul suprafețelor printate 3d, o rezistivitate chimică ridicată și o bună comportare la căldură. Robot UR3e (Universal Robots)

UR3e este cel mai mic braț robotic colaborativ industrial din portofoliul firmei Universal Robots. Forma sa este una compactă atunci când se automatizează procese în spații de lucru înguste, cum ar fi pe bancuri de lucru sau în interiorul utilajelor de producție.

- Anvergură - 500 mm
- Încărcătură utilă - 3 kg
- Amprentă - Ø 128 mm
- Greutate - 11,2 kg

4.2 Concluzii

În esență pentru fabricarea și testarea epruvetelor s-a realizat adaptarea și utilizarea unor echipamente specifice:

- Kit DyzeEND Pro + DyzeXtruder Pro - pentru depunerea de filament s-a utilizat un cap specializat pentru printarea de filamente industriale în particular filament cu microfibre carbon de la firma DyzeDesign;
- Robot UR3e pentru realizarea mișcărilor complexe ale ca s-a utilizat cele șase axe ale robot de la firma Universal Robots;
- Stand de testare de la firma Lloyd Instruments LRX Plus pentru testarea la compresiune și tracțiunea epruvetelor;
- Sistemul optic metrologic PONTOS-GOM – pentru determinarea deplasărilor suprafeței epruvetei;
- Microscop Mitutoyo TM-505B pentru abordarea vizuală a ruperii materialului;
- Lampa ultravioletă UVA-340 folosită pentru degradarea materialului plastic;
- Spectrometru VERTEX 70 FT-IR care a determinat grupări funcționale de compuși organici, structura moleculară și proprietățile fizice ale materialului plastic.



Fig. 151 - Robot UR33 [66]

Toate aceste echipamente au dus la cercetarea științifică a unor fenomene (fizice, chimice, mecanice) fiecare specializat pe anumite direcții de: fabricări, măsurători, simulări sau analize precise.

Echipamentele tehnice moderne fac accesibil cercetătorilor să înțeleagă fenomene complexe de la scară mică microscopică până la scară cosmică.

Cap. 5 Contribuții teoretice privind procesul de printare 3D a suprafețelor complexe

5.1 Determinarea normalelor la suprafață – abordare matematică

Pentru a obține o suprafață 3D atât în cazul prelucrării prin așchiere sau prin imprimare 3D este necesar ca scula așchietoare sau capul de imprimat să fie în permanență (în orice punct) orientat pe direcție perpendiculară la suprafața de obținut.

În vederea obținerii acestei condiții este necesar să se determine normala la suprafață. Pentru a determina normala la suprafața de prelucrat sau de printat se va considera modelul 3D al piesei care dorim să fie printată. În figura este prezentat modelul salvat cu extensia *.stl.

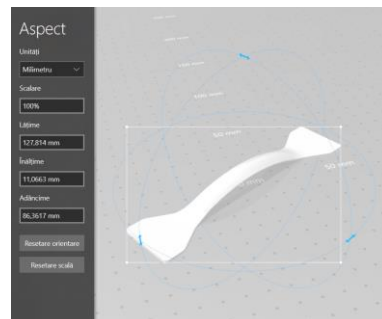


Fig. 16 - Model 3D epruvetă

Pentru acest lucru a fost utilizată comanda **m-function** din MATLAB un program care generează ecuația suprafeței. În cele ce urmează este prezentat pe scurt acest program de tip **m-function**.

Se crează o funcție *.m în MATLAB care va citi și v-a transforma fișierul de tip *.stl
`function cad2mat(suprafata3D)`

Programul complet se poate consulta în **ANEXĂ**

`.fout = F'; % Orientează matricea pentru
utilizare directă în patch.`

`vout = v'; % "`

`cout = c';`

`%`

`fclose(fid);`

În urma rulării programului se poate genera modelul 3D expus în MATLAB.

Pentru a determina ecuația care guvernează suprafața trebuie să se facă apel la funcția **griddata** din MATLAB. În principiu nu este o soluție exactă, dar nu există alte variante de determinare.

Pentru determinarea ecuației suprafeței se va genera o nouă funcție de tip **m** prezentată în cele ce urmează.

`function [zgrid,xgrid,ygrid] = gridfit(x,y,z,xnodes,ynodes,varargin)`

Programul complet se poate consulta în **ANEXĂ**.

`.close(h)`

`if warncount>0`

`warning('GRIDFIT:tiling',[num2str(warncount),' tiles were underpopulated & filled with NaNs'])`

`end`

În urma rulării funcției a fost determinată funcția de mai jos, în **ANEXĂ**.

În Matlab am exprimat funcția și am obținut graficul din figura de mai jos:

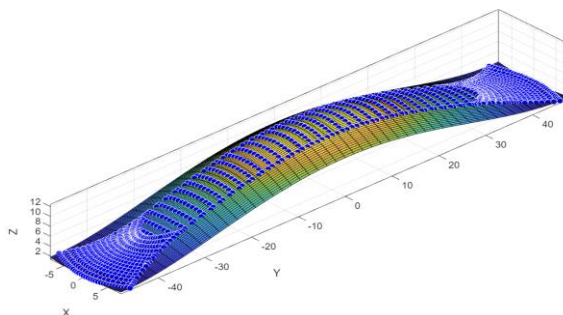


Fig. 17 - Piesa 3D exprimată ca model în MATLAB

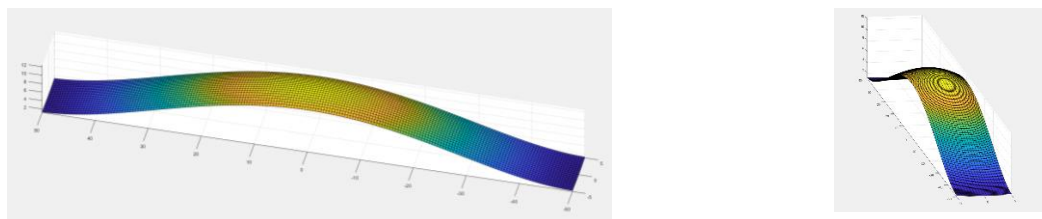


Fig. 180 - Suprafață obținută în MATLAB

5.1.1 Determinarea normalei la suprafață

Pentru a determina normala la o suprafață 3D într-un punct dat al acesteia, dacă suprafața este exprimată printr-o funcție explicită, urmezi pașii următori:

În urma calculului se obțin normalele în puncte la suprafață prezentate mai jos.

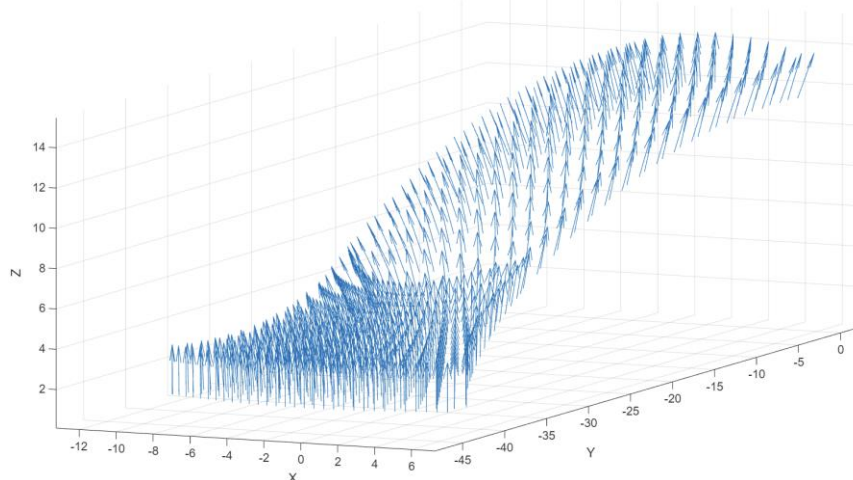


Fig. 419 - Normalele la suprafață în puncte

5.2 Analiza cu elemente finite a epruvetelor

5.2.1 Analiză FEA la compresiune utilizând programul CAD SolidWorks

În cele de mai jos s-a făcut o prezentare a analizei cu elemente finite a epruvetei propuse pentru a fi testate cu ajutorul programului de proiectare CAD numit SolidWorks.

De reținut este faptul că această epruvetă în momentul testării cu analiză FEA este considerată ca fiind fabricată dintr-un material unitar sau ideal. Astfel pentru a obține o deplasare de 2 mm avem nevoie de o forță de compresiune de aproximativ 89,7 newtoni adică aproximativ 9 kilograme forță.

După cum se poate observa alături epruvetei după aplicarea forței de compresiune capătă o formă de sinusoidă sau a literei omega.

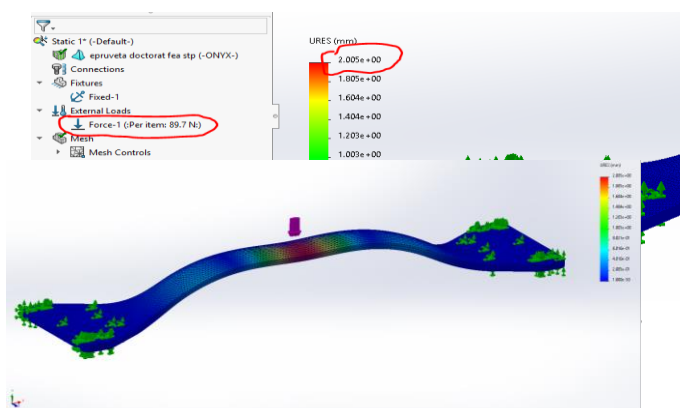


Fig. 21 - Deformarea epruvetei cu o deplasare axială de 2 mm pe direcția Y

În practică în domeniul mecanic factorul de siguranță al unui reper poate începe de la 1,5 din cauză că materialul folosit poate avea imperfecțiuni sau defecte de fabricație care poate duce la o rezistență mai mică decât cea din teste, considerate a fi ideale.

5.2.2 Analiză FEA la tracțiune utilizând programul ANSYS

5.2.2.1 Tracțiune/Întindere

Într-o analiză cu elemente finite (FEA - Finite Element Analysis), definirea proprietăților materialului este esențială pentru a obține rezultate realiste. Pentru un material compozit precum fibra de carbon cu măcinătură ONYX (un compozit de nylon armat cu microfibre de carbon, dezvoltat de Markforged), trebuie definite proprietățile mecanice specifice acestui material în software-ul FEA.

Pentru a confirma această afirmație și pentru considerarea cazului celui mai apropiat de realitate s-a considerat că trebuie făcută o analiză pentru ambele definiții de material urmând a se realiza o comparație și o confirmare a unei analize considerând și un experiment real.

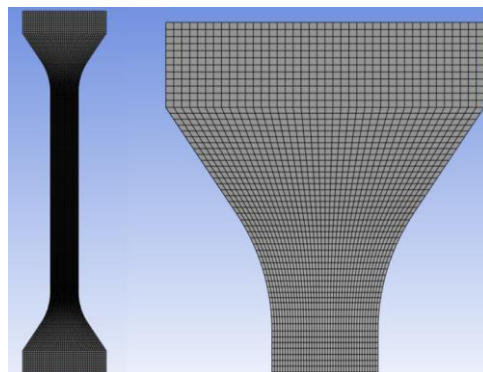


Fig. 22 - Model discretizat pentru solicitare la întindere – ANSYS

Se va lua în calcul definiția materialului ca fiind izotrop și vom prezenta rezultatele. În continuare se prezintă distribuția eforturilor unitare.

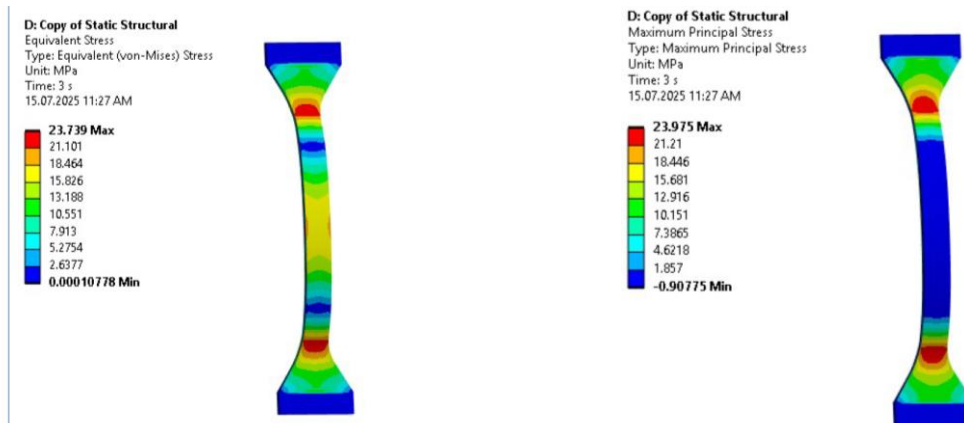


Fig. 23 - Câmpul eforturilor - izotrop

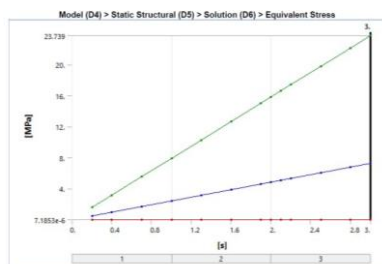


Fig. 24 - Eforturilor unitare Von Mises

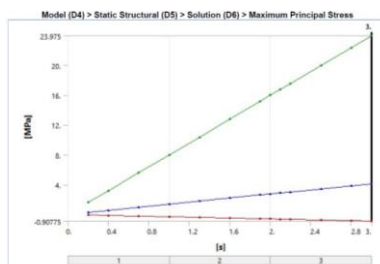


Fig. 25 - Eforturilor unitare maxim principal

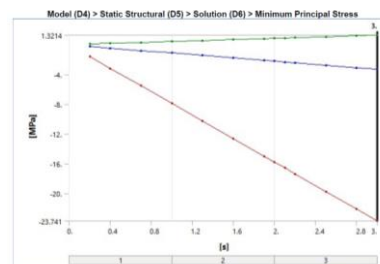


Fig. 26 - Eforturilor unitare minim principal

5.2.2.1.1 Materiale ortotrope

Pentru rezultate precise în piese printate 3D cu orientare complexă a straturilor va trebui definit materialul ONYX ca fiind un material **material ortotrop sau laminat**. În tabelul următor se prezintă proprietățile materialului.

În cazul probei ortotrope avem următoarele valori ale deformațiilor:

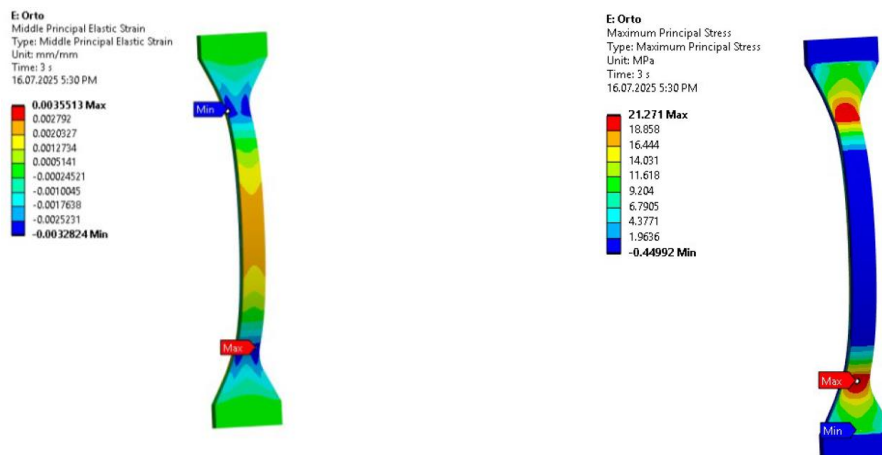


Fig. 27 - Câmpul eforturilor – ortotrop

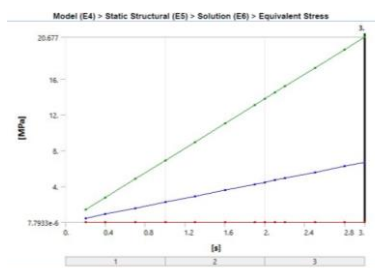


Fig. 28 - Eforturilor unitare Von Mises

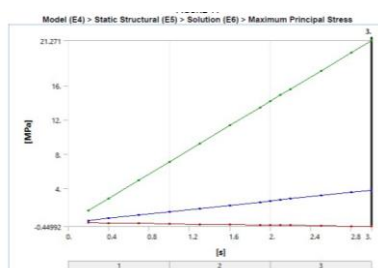


Fig. 29 - Eforturilor unitare maxim principal

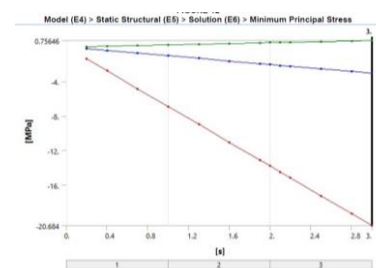


Fig. 30 - Eforturilor unitare minim principal

5.2.3 Concluzii:

Literatura de specialitate menționează faptul că în cazul în care avem un material compozit cu fibră de carbon măcinată poate fi considerat în analiză cu elemente finite ca fiind un material definit izotrop adică aceleași proprietăți materiale pe orice direcție.

Au fost considerate două cazuri de analiză cu elemente finite, unul în care proprietățile materiale sunt definite pentru material **izotrop** și una pentru material definit **ortotrop** urmând să fie realizat un studiu comparativ. Ipoteza de calcul a fost de a avea aceeași deplasare considerată sub acțiunea forței pentru că a fost considerat mai stabilă analiza din punct de vedere a convergenței rezultatului.

Totuși analiza comparativă a aceluiasi material definit **izotrop** și apoi **ortotrop**, adică proprietăți materiale diferite pe două direcții de verificare respectiv perpendiculare, indică faptul că rezultatele obținute prin considerarea celor două definiții de material sunt diferite cu peste 20% ceea ce înseamnă totuși că trebuie să fie luată în seamă definiția ortotropă a materialului. Mai mult efortul unitar echivalent Von Mises diferă mult, fiind mai mic în cazul materialului ortotrop ceea ce poate fi interpretat că asigură o deformație mai mare sub acțiunea solicitărilor până când apare rupătura probei.

5.3 Contribuții proprii privind optimizare procesului de printare 3D

5.3.1 Programarea robotului UR3e

În vederea validării că printarea 3D este viabilă s-a decis ca în firma Venqo Engineering să se împrumute timp de două săptămâni de la firma Multitech din Brașov un robot în șase axe UR3e al firmei Universal Robots. Tot datorită programului RoboDK s-a validat primele mișcări de traiectorii de printare ale unei piese printate 3D. În urma acestui rezultat firma Venqo Engineering ia decizia achiziționării unui astfel de robot de la un furnizor din Franța. Între timp s-a studiat timp de câteva săptămâni posibilitatea introducerii celei de a șaptea axe în controlerul robotului pentru a putea fi controlată extrudarea cu material plastic și testarea de noi programe.

Se proiectează și se execută ansamblul de bază pe care a fost amplasat noul robot achiziționat. Acesta a fost amplasat inițial pe un stâlp metalic din aluminiu pentru a putea face rapid o primă încercare de printare și cu acest robot. După cum se poate observa baza robotului este orientată spre podea.

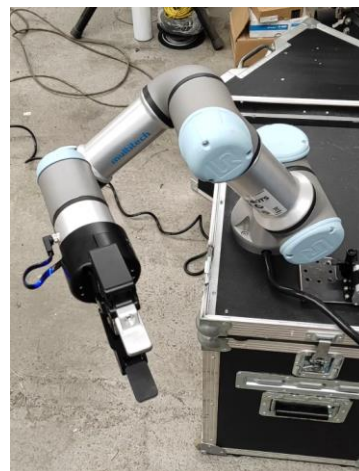


Fig. 31 - Braț robotic UR3e

5.3.1.1 Printare nonplanară cu braț robotic având curbe spline cu cap normal la platou

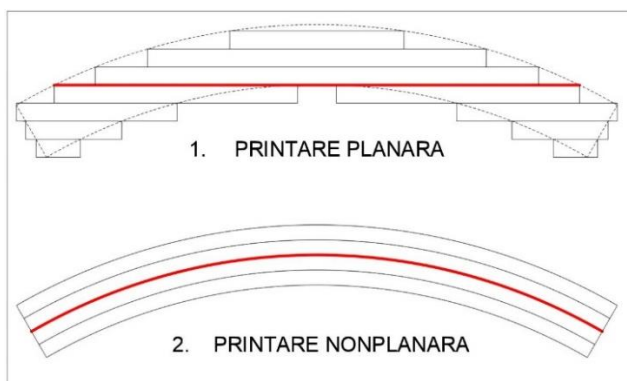


Fig. 32 - (1) Printare clasică, (2) Printare nonplanară



Fig. 33 - Printare nonplanară cu cap normal la platou

În imaginea prezentată mai sus avem câteva posibilități în care se poate realiza printarea 3D și anume:

- Printarea clasică planară strat cu strat pe care o poate realiza orice tip de imprimantă cu orice tip de program slicer.
- Printarea nonplanară cu vârful extrudorului normal la platou soft special UBUNTU + SLIC3R NONPLANAR pe care o poate executa limitat orice tip de imprimantă.
- Printarea nonplanară cu vârful normal la o suprafață complexă executate cu imprimante cu mai mult de 3 grade de libertate sau brațe robotice.

5.4 Modelarea 3D a epruvetelor în programe CAD

Strategia de lucru pentru realizarea virtuală a epruvetei a fost ca obținerea acestuia să se facă printr-o trecere succesivă de suprafețe asigurând în acest fel o continuitate respectând condiția ca ele să fie concepute din forme regulate în momentul proiectării.

Modelarea epruvetelor s-a realizat cu ajutorul unui mediu de proiectare parametrizată denumit SolidWorks.

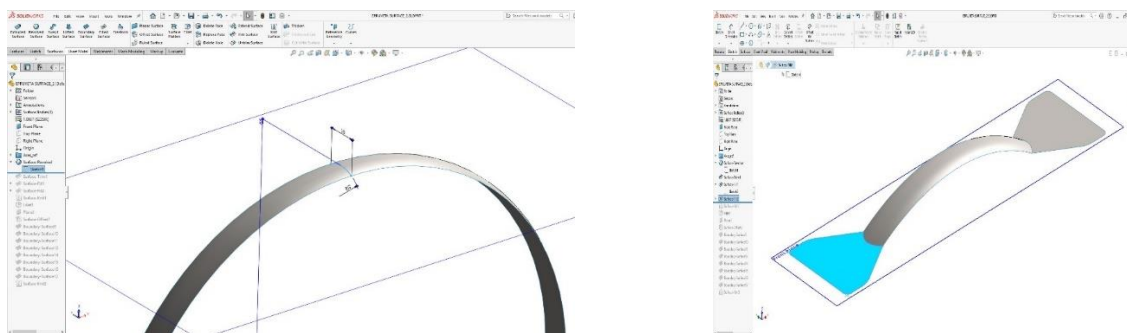


Fig. 34 – Realizarea epruvetei

Aceste formate sunt compatibile cu programele de feliere automată open-source ale diferiților producători de imprimante 3D sau exploatării acestora la scara mai largă.

5.5 Concluzii

- Realizarea de repere 3d cu suprafețe complexe se realizează utilizând mai multe programe CAD;
- Evitarea de curbe spline în concepția realizării reperelor 3D;
- Abordarea unor programe noi și similare ca RoboDK pentru mișcarea brațelor robotice;
- Abordarea matematică a normalei suprafețelor complexe cu programe Matlab;
- Implementarea și coordonare în circuitul fabricării a unei noi axe;
- Necesitatea cunoașterii unor programe FEA cum ar fi Ansys, etc.;
- Reperele cu suprafețe complexe concave sau convexe necesită utilizarea de suporturi;
- Realizarea de programe suplimentare pentru evitarea și printarea pe suporturi fizici;
- Cunoștințe tehnice ale parametrilor de printare, temperaturi, avansuri, etc.;

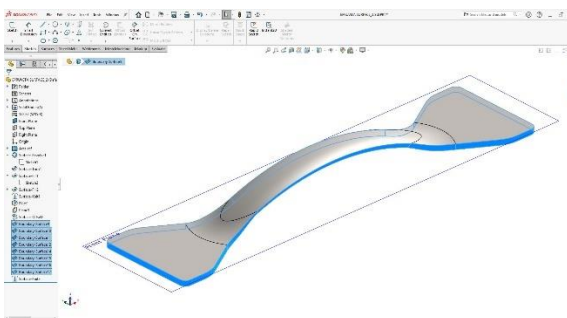


Fig. 35 – Etapă finală realizare epruvetă

În concluzie printarea 3D a suprafețelor complexe cu ajutorul unui braț robotic este un subiect care este abia la început și care pe viitor cu implicarea programatorilor vor duce la facilitarea de noi programe de feliere automată oferind disponibilitatea creării reperelor 3d din materiale compozite atât din microfibre cât și din fibre continue.

Cap. 6 Contributii teoretico-experimentale privind printarea 3D

6.1 Analiza FTIR a filamentului ONYX

În urma celor observate în subcapitolul anterior apare și întrebarea legată de tipul materialului, compoziția chimică, structura materialului, proprietățile fizico-mecanice înainte de printare și după printare. Pentru o analiză mai relevantă a temei s-a realizat o analiză a semifabricatului (filament) înainte de printarea 3D și o analiză a materialului printat.

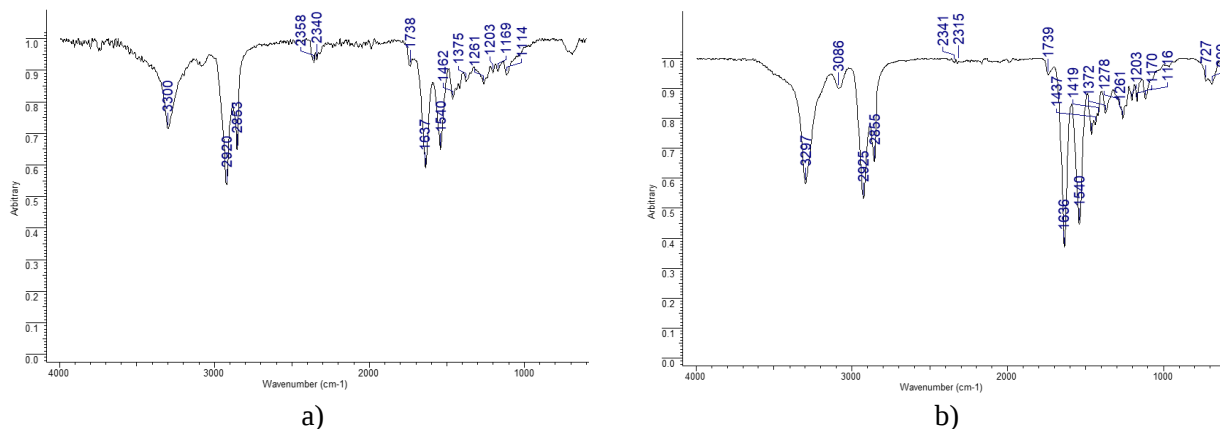


Fig. 3660 - Analiză tip FTIR: a) proba 0, b). proba ONYX

Din primele determinări s-a determinat că materialul este de tip poliacrilamida.

Conform definiției **Poliacrilamida** (PAM) este un polimer sintetic obținut prin polimerizarea acrilamidei. Este un material foarte versatil, folosit în diverse aplicații industriale, agricole și de laborator, în principal datorită proprietăților sale excelente de absorbție a apei și floculare.

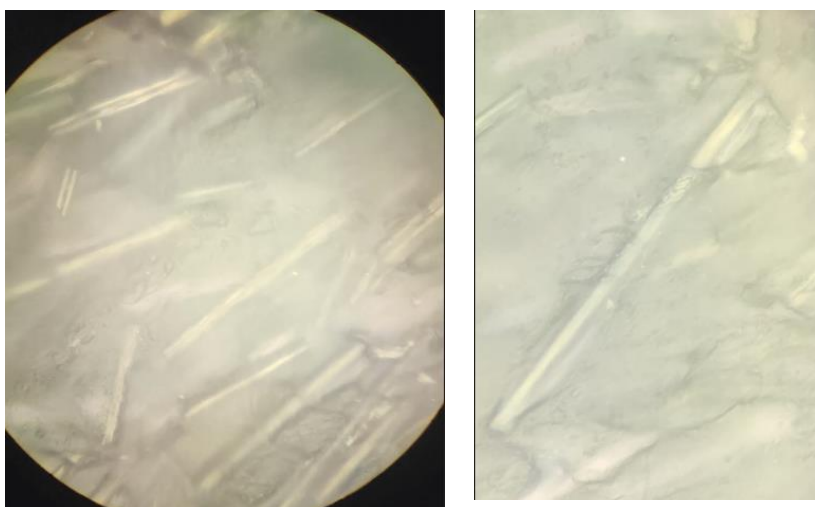


Fig. 37 - Analiză microscopică a materialului ONYX (matrice)

- Proba din stânga s-a rupt evident între straturi, ceea ce evidențiază o aderență slabă între straturile printate;
- Proba din dreapta s-a rupt într-o zonă mai slabă datorată materialului, fără dezlipire între straturi, sugerând un comportament mai omogen la printarea 3D nonplanară.

6.2 Concluzii

- Printarea planară reduce rezistența la tracțiune în direcția perpendiculară pe straturile printate, din cauza lipsei de adeziune între ele (posibil din cauza materialului sau a temperaturii de printare);
- Printarea nonplanară îmbunătățește rezistența fizico-mecanică, deoarece direcția de depunere a materialului urmează forma piesei, reducând punctele slabe evidente dintre straturi;
- Dezlipirea/Ruptura piesei planare este clar din cauza stratificării, ceea ce evidențiază principalul defect al tehnologiei FDM, adeziunea slabă între straturile printate;
- Piese nonplanare prezintă o ruptură mai *naturală*, indicând o distribuție mai uniformă a eforturilor interne;
- Materialul compozit (nylon+microfibre de carbon) se comportă diferit în funcție de orientarea straturilor de depunere, un fenomen tipic la modul de printare 3D;
- Depunerea aditivă prin procedeul nonplanar reduce anizotropia mecanică specifică printării 3D tradiționale;
- Printarea nonplanară reduce efectul de delaminare între straturi, crescând considerabil rezistența fizico-mecanică a piesei;
- Piese realizate prin soluția nonplanară poate influența pozitiv durabilitatea în aplicații reale;



- Alegerea direcției de printare trebuie să țină cont de direcția principală a solicitărilor mecanice în special la piese cu caracter funcțional;
- Această abordare de printare nonplanară sprijină cercetarea asupra optimizării strategiilor de printare în funcție de aplicația piesei;
- În urma analizei pe microscop se observă că structura epruvetelor este direct influențată de calitatea programelor G-code care sunt executate de brațului robotic în 6 axe plus capul de extrudat. Unde o problemă majoră o reprezintă viteza de depunere corelată cu debitul extrudorului;
- Calitatea piesei printate 3D cu brațul robotic este dată și de diametrul duzei care nu poate fi mai mic de 0.9mm pentru materialele care conțin mico-fibre de carbon.

6.3 Metodologia de cercetare

6.3.1 Stabilirea unui plane experimental prin prezentarea metodei Taguchi.

Creșterea rapidă a producției în domeniul industrial a creat o rampă a gradului de complexitate și de automatizare în ariile tehnico-economice industriale. Așteptările calitative din mai mari ale beneficiarilor necesită implementarea unor metodologii matematice contemporane, fundamentate științific, pentru gestionarea, organizarea și controlul eficient al sistemelor tehnice și economice [83].

Metoda Taguchi presupune că determinarea punctelor experimentale poate fi efectuată fără restricții prin declararea ortogonalității. Cu toate acestea, în numeroase cazuri, există variabile care limitează gama de parametri de proiectare care pot fi selectați.

- Tehnicile de asigurare a calității off-line;
- Este imperativ să se asigure calitatea atât a procesului, cât și a proiectării produsului;
- Proiectarea robustă este procedura care este utilizată în multe cazuri;
- Utilizarea matricelor ortogonale este un aspect fundamental al proiectării experimentale.

Metodele Taguchi sunt metode statistice concepute pentru îmbunătățirea calității produselor. Genichi Taguchi, o personalitate renumită în domeniul cercetării managementului calității, a formulat un set de principii de îmbunătățire a calității. Aceste principii, prezentate în [85], subliniază importanța abordărilor sistematice pentru îmbunătățirea performanțelor organizaționale și asigurarea îndeplinirii așteptărilor clienților [85].

- Calitatea produselor se determină ținând cont de pierderile totale suportate de societate ca urmare a produsului;
- Este imperativ să se recunoască necesitatea îmbunătățirii permanente atât a calității produselor, cât și a eficienței costurilor;
- Este general acceptat faptul că pierderea este direct proporțională cu pătratul abaterii caracteristicii de performanță de la valoarea sa nominală;
- Este evident că proiectarea și procesul de fabricație a unui produs au un impact considerabil asupra calității și costului produsului;
- Este evident că variația performanței poate fi atenuată prin exploatarea efectelor neliniare dintre parametrii produsului sau ai procesului și caracteristica dorită a produsului;
- Identificarea direcțiilor parametrilor produsului sau procesului care reduc variația performanței poate fi facilitată prin punerea în aplicare a experimentelor concepute statistic.

Combinarea parametrilor pentru un factorial 2⁵



1.	PRINTARE PLANARA și NONPLANARA
2.	TEMPERATURA 250°C și 270°C
3.	DIAMETRU DUZA 0.9 și 1.2
4.	ULTRAVIOLETE(UV)
5.	UMIDITATE 15% și 100%

<u>PARAMETRII</u>	1	2
PRINTARE	PP	PNP
TEMPERATURA (T)	250°C	270°C
DIAMETRU DIUZĂ (D)	0.9	1.2
ULTRAVIOLETE (UV)	0 ORE	500 ORE
UMIDITATE (H)	15%	100%

NR. CRT.	PRINTARE (PP – PNP)	TEMPERATURA (T)	DIAMETRU DUZA (D)	ULTRAVIOLE (UV)	UMIDITATE (H)
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	1
3	1	1	1	1	2
4	1	1	1	2	2
5	2	1	1	1	1
6	2	1	1	2	1
7	2	1	1	1	2
8	2	1	1	2	2
9	1	2	1	1	1
10	1	2	1	2	1
11	1	2	1	1	2
12	1	2	1	2	2
13	2	2	1	1	1
14	2	2	1	2	1
15	2	2	1	1	2
16	2	2	1	2	2
17	1	1	2	1	1
18	1	1	2	2	1
19	1	1	2	1	2
20	1	1	2	2	2
21	2	1	2	1	1
22	2	1	2	2	1
23	2	1	2	1	2
24	2	1	2	2	2
25	1	2	2	1	1
26	1	2	2	2	1
27	1	2	2	1	2
28	1	2	2	2	2
29	2	2	2	1	1
30	2	2	2	2	1
31	2	2	2	1	2
32	2	2	2	2	2

6.1 Metoda de testare la compresiune și tracțiune

6.1.1 Testare la tracțiune

Testarea epruvetelor s-a executat pe aceeași mașină datorită faptului că pe această mașină se poate executa atât teste de compresiune cât și teste de tracțiune. De dată aceasta dispozitivul este diferit. El se compune din două ansambluri mari: unul inferior și unul superior care sunt înșurubate fie în batiul mașinii în partea inferioară a acesteia fie în partea superioară a acesteia de traductorul mașinii. Prinderea epruvetelor în vederea testării la tracțiune se face prin intermediul a patru bacuri câte două stânga-dreapta pe fiecare ansamblu inferior și superior.

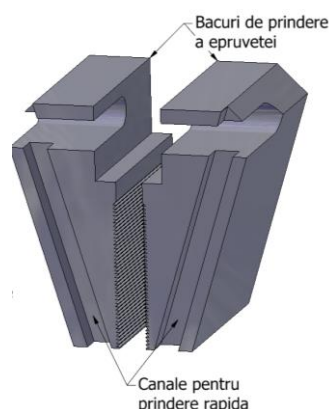


Fig. 39 - Bacuri stânga-dreapta de prindere a epruvetelor



Fig. 38 - Prindere a epruvetelor la tracțiune

6.2 Prelucrarea datelor experimentale

6.2.1 Rezultatele testului la compresiune

Toate epruvetele au fost supuse la compresiune pe o distanță fixă de 2mm pentru a nu ajunge în zona plastică și de a nu le distruge și a nu periclita rezultatele acestora la tracțiune. După cum se poate observa în această situație o influență o are diametrul duzei de printare. În partea superioară a graficului avem două curbe la printare la 270°C cu duză de 1,2mm, diferența dintre cele două este practic influența expunerii la razele UV. Următoarele două curbe sunt cele cu printare la 250°C cu duză de 0,9mm cu și fără UV. Și în această situație se observă influența apariției UV-ului în cele două tipuri de testări. Din cel de-al doilea grafic se poate observa foarte rapid ca rezistența mecanică este diminuată din start de la o valoare de 45N la printarea nonplanară coboară la o valoare de 35N la o printare planară. Ca și în cazul precedent valorile cele mai mari se obțin pentru temperaturi de 270°C și o duză de 1,2mm.

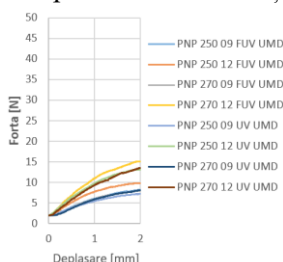


Fig. 40 - Compresiune printare nonplanare umede

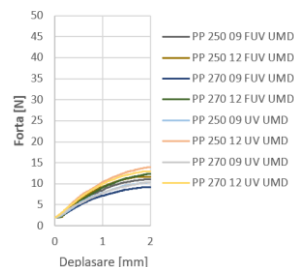


Fig. 41 - Compresiune printare planare umedă

6.2.2 Rezultatele testului de tracțiune

În urma testelor distructive a epruvetelor la tracțiune. Acestea au fost prinse atât în partea superioară cât și cea inferioară cu ajutorul unor fălci (bacuri) cu o suprafață zimțată.

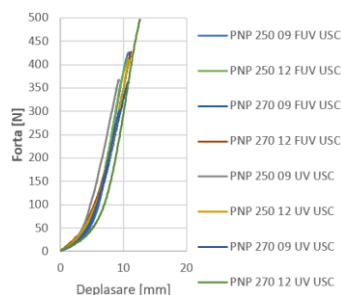


Fig. 42 - Tracțiune printare nonplanare uscată

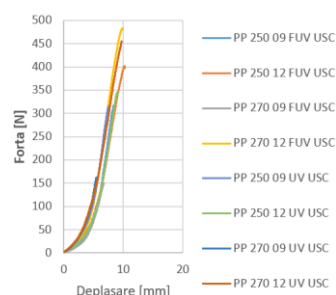


Fig. 43 - Tracțiune printare planare uscată

În urma încercărilor la tracțiune au rezultat graficele de mai sus. Se observă de aici că influența tipului de printare duce la o mai bună rezistență mecanică (la printarea nonplanară) față de câteva varfuri în cazul printării planare. Și aici se poate observa deteriorarea epruvetelor în cazul apariției razelor ultraviolete.

6.2.3 Centralizator rezultate

Tip Printare	Temperatură	Diametru Duză	Îmbatranire	Umiditate	ÎNCARCAREA (N)	ÎNCARCAREA TEST 2 (N)	Aria mm2	Rezistența la tracțiune(Mpa)	Rezistența la tracțiune (Mpa) TEST 2 (încarcarea)
1	250	0.9	3	15	314.8	264.8	17.73	17.76	14.94
1	250	0.9	3	100	116.4	66.4	18.73	6.21	3.55
1	250	0.9	4	15	317.3	267.3	17.43	18.2	15.34
1	250	0.9	4	100	112.2	62.2	18.13	6.19	3.43
1	250	1.2	3	15	345.8	295.8	17.95	19.26	16.48
1	250	1	3	100	227.4	177.4	18.64	12.2	9.52
1	250	1.2	4	15	401.5	351.5	18.51	21.69	18.99
1	250	1.2	4	100	192.3	142.3	17.69	10.87	8.05
1	270	0.9	3	15	162.4	112.4	18.04	9	6.23
1	270	0.9	3	100	74.1	24.1	18.46	4.02	1.31
1	270	0.9	4	15	150	100	17.19	8.73	5.82
1	270	0.9	4	100	114.7	64.7	17.24	6.66	3.76
1	270	1.2	3	15	455.1	405.1	18.7	24.34	21.66
1	270	1.2	3	100	175.3	125.3	17.18	10.2	7.29
1	270	1.2	4	15	483.2	433.2	17.85	27.07	24.27
1	270	1.2	4	100	179.9	129.9	17.39	10.35	7.47
2	250	0.9	3	15	314.9	314.9	17.49	18	18
2	250	0.9	3	100	116.4	116.4	18.38	6.33	6.33
2	250	0.9	4	15	317.3	317.3	17.06	18.6	18.6
2	250	0.9	4	100	112.2	112.2	18.88	5.94	5.94
2	250	1.2	3	15	345.8	345.8	17.54	19.71	19.71
2	250	1.2	3	100	227.4	227.4	17.61	12.91	12.91
2	250	1.2	4	15	401.5	401.5	18.7	21.47	21.47
2	250	1.2	4	100	192.3	192.3	17.72	10.85	10.85
2	270	0.9	3	15	162.4	162.4	18.61	8.72	8.72
2	270	0.9	3	100	74.1	74.1	18.26	4.06	4.06
2	270	0.9	4	15	150	150	18.35	8.18	8.18
2	270	0.9	4	100	114.7	114.7	18.64	6.16	6.16
2	270	1.2	3	15	455.1	455.1	18.42	24.71	24.71
2	270	1.2	3	100	175.3	175.3	18.05	9.71	9.71
2	270	1.2	4	15	483.2	483.2	18.28	26.43	26.43
2	270	1.2	4	100	179.9	179.9	18.72	9.61	9.61

6.3 Interpretare și evaluarea rezultatelor în MiniTAB

Planul Taguchi

Sumarul planului Taguchi

Taguchi Array	L32(2 ⁵)
Factors:	5
Runs:	32

Columns of L32(2³¹) array: 1 2 3 4 5

Interpretare - Design Summary:

Taguchi Array: L32(2⁵)

Acesta este un plan ortogonal de tip L32, ceea ce înseamnă că: vom avea 32 de combinații experimentale (runs), au fost studiați 5 factori, fiecare având 2 niveluri (nivel scăzut și nivel ridicat). Prin planul 2⁵ se indică faptul că s-a proiectat pentru a testa cinci factori binari (cu două niveluri fiecare). Factors:



5 - se analizează cinci factori de influență, care pot fi variabile de proces, materiale, temperaturi, viteze etc, Runs: 32 sunt efectuate 32 de experimente unice, fiecare corespunzând unei combinații diferite de niveluri ale celor 5 factori.

6.3.1 Analiza Taguchi:

Rezistența la tracțiune versus tip printare, temperatura, diametru duza, îmbătrânire, umiditate

Observații relevante:

- Toți cei 5 factori au același Rank = 3, ceea ce indică că influența lor asupra răspunsului (în termeni de variabilitate a raportului semnal-zgomot) este egală sau foarte apropiată.
- Deoarece datele numerice nu sunt vizibile (notate cu *), putem interpreta doar structural: niciun factor nu domină în mod clar comportamentul sistemului conform criteriului „Nominal is best”.

Temperatura	12.757	10.961	1.796	4
Duza	8.147	15.571	7.424	2
Îmbătrânire	11.571	12.148	0.577	5
Umiditate	16.847	6.871	9.975	1

Concluzie:

Răspunsul indică faptul că toți factorii (Tip de Printare, Temperatura, Diametru Duză, Îmbătrânirea, Umiditatea) contribuie într-un mod comparabil la stabilitatea caracteristicii analizate (probabil diametrul filamentului/pieseii imprimate). Aceasta sugerează că optimizarea trebuie abordată holistic, fără a exclude vreun factor aparent „neimportant”. În contextul metodei Taguchi, o influență redusă (valoare mică a delta) înseamnă că acel factor nu afectează semnificativ variația răspunsului, dar în acest caz influențele sunt echilibrate.

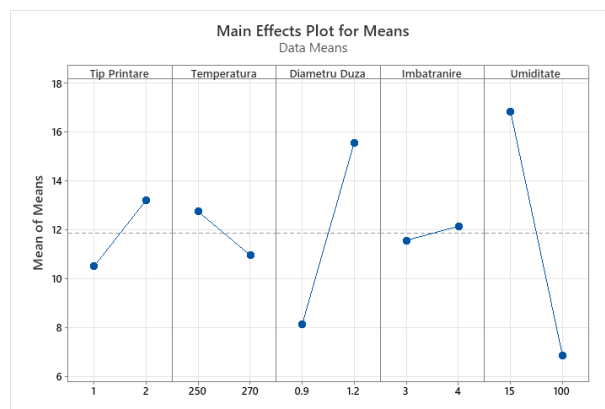


Fig. 44 - Diagrama efectelor

Graficul prezentat este un Main Effects Plot for Means – adică un grafic al efectelor principale asupra mediilor dintr-un experiment factorial sau Taguchi. Acesta evidențiază modul în care fiecare nivel al fiecărui factor influențează media răspunsului analizat — în acest caz, rezistența la tracțiune.

Concluzie :

Analiza efectelor principale asupra rezistenței la tracțiune arată că umiditatea și diametrul duzei sunt factorii determinanți în obținerea unor performanțe mecanice superioare. În special, o umiditate scăzută și o duză cu diametru mai mare favorizează formarea unor structuri mai omogene și mai rezistente. În schimb, temperatura de extrudare și metoda de printare influențează moderat rezistența, în timp ce efectul îmbătrânirii este nesemnificativ. Aceste rezultate evidențiază importanța controlului condițiilor de proces pentru optimizarea rezistenței mecanice în fabricarea aditivă.

6.3.2 Analiza regresiei:

Rezistența la Tracțiune versus Tip Printare, Temperatură, Diametru Duză, Îmbătrânire, Umiditate.

Concluzie:

Modelul de regresie liniară obținut pentru estimarea rezistenței la tracțiune prezintă performanțe statistice remarcabile. Coeficientul de determinare $R^2=82.85\%$ indică faptul că peste patru cincimi din variația variabilei dependente este explicată de factorii incluși în model, iar ajustarea sa ($R_{adj}^2=79.55\%$ confirmă relevanța acestora în absența redundanțelor semnificative. Mai mult, valoarea predictivă ($R_{pred}^2=74.02\%$) subliniază o capacitate consistentă de generalizare pe seturi de date noi, ceea ce validează robustetea

modelului. Eroarea standard a estimării ($S=3.25$) rămâne într-un interval acceptabil, sugerând o precizie rezonabilă a predicțiilor generate.

6.3.3 Pareto pentru efectele standardizate

Graficul Pareto al efectelor standardizate oferă o reprezentare vizuală a importanței relative a factorilor asupra răspunsului analizat — în acest caz, Rezistența la Tracțiune.

Interpretarea graficului Pareto (Efecte Standardizate)

Linia punctată roșie reprezintă pragul de semnificație statistică ($\alpha = 0.05$), cu valoarea 2.056.

Barele care depășesc această valoare sunt considerate semnificative statistic.

Concluzie:

Graficul Pareto al efectelor standardizate confirmă și consolidează concluziile obținute din analiza ANOVA și regresia multiplă. Factorii Umiditate (E) și Diametru Duza (C) se evidențiază ca fiind cei mai influenți asupra rezistenței la tracțiune, depășind considerabil pragul de semnificație stabilit ($\alpha = 0.05$). De asemenea, Tipul de Printare (A) are un efect semnificativ, dar de intensitate mai redusă. În schimb, variabilele Temperatura (B) și Îmbătrânire (D) nu contribuie semnificativ la variația răspunsului și pot fi considerate neesențiale în contextul experimental analizat.

6.3.4 Probabilitate normală

Graficul afișat este un Probabilitate Normală (Normal Probability Plot) (QQ plot) al reziduurilor pentru modelul de regresie cu răspunsul „Rezistența la Tracțiune - 50”. Acest grafic este utilizat pentru a verifica presupuziția de normalitate a reziduurilor, esențială în validarea modelelor de regresie liniară.

Interpretarea graficului de probabilitate normală

- Punctele se aliniază relativ bine de-a lungul liniei roșii de referință.
- Nu sunt prezente abateri sistematice evidente, de tip curbă sau acumulare în zone marginale.
- Există câteva abateri minore la extreme (cozile distribuției), dar acestea sunt acceptabile în contextul experimental.

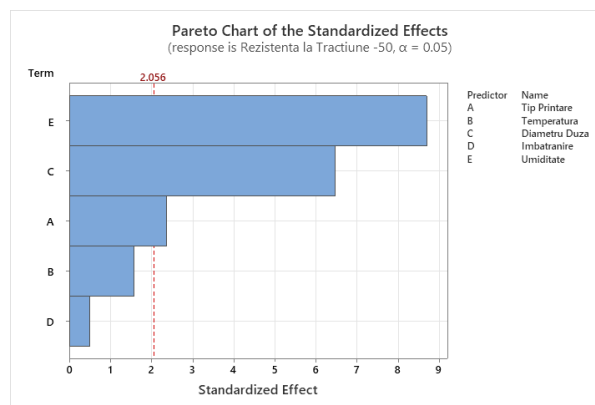


Fig. 45 - Grafic Pareto

Concluzie:

Distribuția reziduurilor respectă în mod rezonabil ipoteza normalității, conform graficului de probabilitate normală. Majoritatea punctelor sunt apropiate de linia de referință, indicând o distribuție aproximativ normală a erorilor. Această observație susține validitatea modelului de regresie din punct de vedere statistic și permite aplicarea testelor de semnificație fără a fi necesare transformări suplimentare asupra datelor.



6.3.5 Histograma

Histogramul reziduurilor oferă o imagine asupra distribuției acestora și este esențial pentru validarea ipotezei de normalitate a erorilor, una dintre condițiile de bază în regresia liniară.

Interpretarea histogramului reziduurilor

Centrare în jurul valorii 0:

Distribuția reziduurilor este aproximativ centrată în jurul valorii zero, ceea ce este un semn pozitiv.

Formă asimetrică:

Distribuția pare ușor bimodală sau neregulată, cu frecvență crescută în jurul valorilor 0 și 3.

Abateri de la simetrie:

Există o ușoară asimetrie la dreapta (mai mulți reziduuri pozitive de valoare mare), ceea ce ar sugera o ușoară deviere de la normalitate.

Concluzie:

Histogramul reziduurilor sugerează o distribuție aproximativ normală, dar cu posibile deviații minore, manifestate printr-o asimetrie ușoară și o tendință bimodală. Deși nu sunt prezente abateri severe care să invalideze ipoteza de normalitate, aceste aspecte indică posibilitatea unor efecte nelineare sau necuprinse suficient în modelul de regresie. Totuși, în contextul aplicativ al experimentului, această distribuție este considerată acceptabilă pentru interpretarea parametrilor și a semnificației statistice.

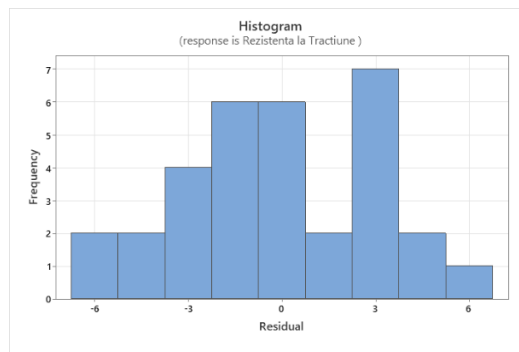


Fig. 47 - Histograma

6.3.6 Raportul de optimizare și predicție pentru regresia multiplă

Fig. 48 reprezintă fișa de evaluare finală (Report Card) a regresiei multiple pentru Rezistența I (rezistența la tracțiune). Aceasta oferă o validare calitativă a modelului din mai multe perspective: volum de date, distribuție, valoarea soluției optime. interpretarea fiecărei secțiuni:

Concluzie:

Deși modelul este semnificativ, este necesară prudență în generalizarea rezultatelor. Se recomandă confirmări experimentale suplimentare.

- Unusual Data (Valori atipice) — OK
 - Nu există valori atipice semnificative în datele analizate;
 - Acest lucru susține robustețea modelului și indică faptul că nicio observație individuală nu distorsionează semnificativ rezultatul.
- Normality (Normalitatea reziduurilor) — OK
 - Modelul are cel puțin 15 puncte de date, deci testele de semnificație (valori p) pot fi considerate conforme;
 - Nu s-au identificat abateri semnificative de la normalitate;
 - Acest aspect este esențial pentru validitatea testelor statistice din regresie.
- Evaluate Solutions (Evaluarea soluției optime) cu recomandare:

Raportul oferă o serie de considerații utile în evaluarea soluției optime propuse de model:

Multiple Regression for Rezistența I Report Card		
Check	Status	Description
Amount of Data		The sample size (n = 32) is not large enough to provide a very precise estimate of the strength of the relationship. Measures of the strength of the relationship, such as R-Squared and R-Squared (adjusted), can vary a great deal. To obtain a precise estimate, larger samples (typically 45 or more) should be used for a model of this size.
Unusual Data		There are no unusual data points. Unusual data points can have a strong influence on the results.
Normality		Because you have at least 15 data points, normality is not an issue, if the number of data points is small and the residuals are not normally distributed, the p-values used to determine whether there is a significant relationship between the Xs and Y may not be accurate.
Evaluate Solutions		The Prediction and Optimization Report displays the optimal solution, which is calculated using a numerical algorithm. It also displays a list of alternative solutions. When evaluating these solutions, consider the following: - The feasibility of the optimal solution from a practical perspective. - The sensitivity of Y to departures from the optimal X values. - The true optimal solution may not be located in the current sample space. - The alternative solutions may be more practical than the optimal solution. Once you have selected a solution, perform 20-30 confirmation runs to validate the optimal X values.

Fig. 48 - Fișa de evaluare

Factori de analizat:

- Fezabilitatea practică a soluției optime (poate fi aplicată real?);
- Sensibilitatea rezistenței la variații mici în jurul valorilor optime ale X-urilor;
- Limitările spațiului experimental (soluția reală optimă poate fi în afara zonei investigate)
- Soluții alternative mai accesibile practic pot avea performanțe comparabile

Recomandare:

După selectarea soluției optime, se recomandă 20–30 de teste de confirmare pentru validarea robustă a rezultatelor.

6.3.7 Concluzie generală:

Modelul de regresie multiplă construit pentru estimarea rezistenței la tracțiune (Rezistența I) este valid și bine ajustat, în limitele unui set de date de dimensiune medie ($n = 32$). Analiza nu a identificat valori atipice sau abateri de la normalitate, ceea ce susține aplicabilitatea testelor statistice utilizate. Cu toate acestea, din cauza dimensiunii reduse a eșantionului, se recomandă precauție în generalizarea concluziilor. Optimizarea parametrică propusă este promițătoare, dar trebuie validată prin experimente suplimentare de confirmare (20–30 de replici) pentru a asigura fiabilitatea și transferabilitatea practică a rezultatelor.

6.4 Monitorizarea și evaluarea deformărilor la tracțiune prin aplicarea măsurătorii optice cu echipamentul GOM

Pentru analiza deformațiilor în testele de tracțiune a epruvetelor printate 3D cu ajutorul brațului mecanic în 6 axe a fost utilizat un sistem optic de tip GOM, format din camere stereo de înaltă rezoluție și programe de analiză dedicate (ARAMIS și PONTOS). Această abordare a permis măsurători extrem de precise, în timp real, fără contact, ale deplasărilor și tensiunilor care apar în timpul solicitărilor mecanice a epruvetelor.

Prin intermediul acestui echipament putem observa o măsurare în coordonate tridimensionale a punctelor de referință (markere), unde se poate urmări modificări foarte fine a markerelor aplicate pe epruveta de test. Cu o rezoluție de măsurare de sub 0,005% și cu frecvențe de captare de până la 450 fps se poate analiza informații precum: tensiuni, viteze, accelerații tensiuni în suprafață precum și analiză a modului Young.

Pe baza analizei făcute cu softul ARAMIS se poate face și o comparație cu rezultate obținute prin simulări FEM precum ABAQUS sau ANSYS.

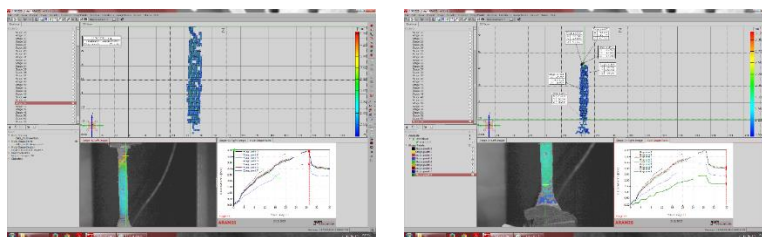


Fig. 49 - Deplasare pe direcția Z

Raport 1

Direcția curbelor de deplasare arată o zonă elastică urmată de o porțiune de stagnare chiar scădere a deplasării, în schimb ruperea s-a realizat local. Se poate observa că în zona evidențiată cu verde îngroșat prezintă deplasări reduse, ceea ce denotă faptul că zonele extreme ale epruvetei prezintă cel mai mare risc de rupere.

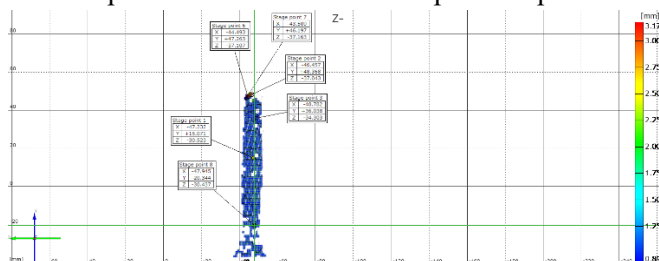


Fig. 50 - Raport de testare a eprivetei

Echipamentul GOM a măsurat o eformație maximă de 4,5 mm în timpul testului de tracțiune fără contact direct asupra epruvetei. Conform codului de culoare se poate observa o alungire accentuată centrală, având un comportament ductil. Distribuția deformărilor este influențată de forma și geometria epruvetei cât și de modul de printare a epruvetelor. Această soluție este bună pentru testarea rapidă și ușoară a diferitelor piese și materiale printate 3D.

Raport 2

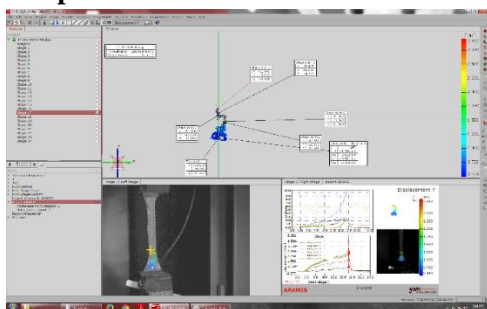


Fig. 51 - Raport probă

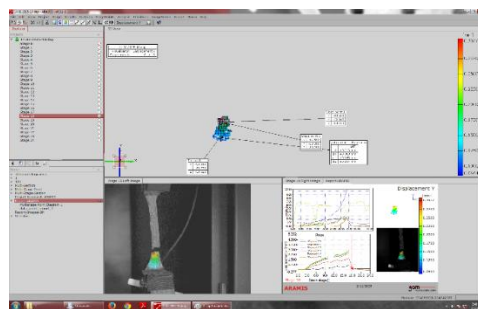
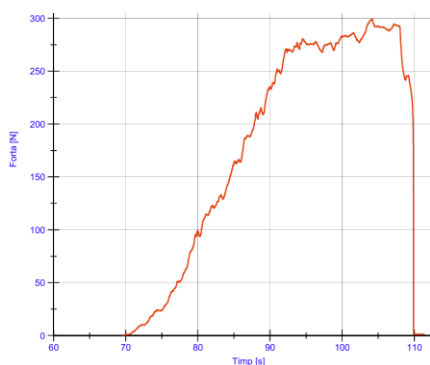


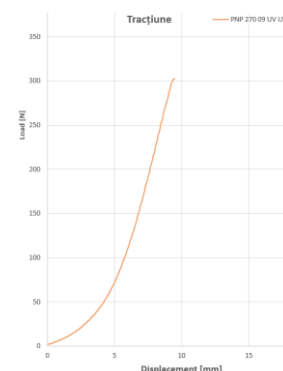
Fig. 52 - Ruperea probei

Deplasarea maximă pe direcția axei Y în zonele de monitorizare a fost cuprins între 2,3-2,5mm, înainte de a avea o scădere bruscă. În grafic se poate observa o slăbire clară în jurul Stage-ului 17, urmând de o scădere bruscă a deplasărilor ce ne poate duce cu gândul la o fisură locală.

Epruvetela are un comportament complex, care duce la deformări locale și cedări structurale bruște specifice printării 3D. Acest comportament se accentuează atunci când forma epruvetei este atipică față de standardele actuale dar nu și în ultimul rând trebuie ținut cont și de modul/metoda de printare 3D.



A. Test la tracțiune pe echipamentul GOM valoarea de 299,3 N



B. Test la tracțiune pe echipamentul LLOYD cu valoarea de 302,9 N

Fig. 53 - Ponderea forței pentru epruvetă nonplanară pentru PNP 270 09 UV USC

Concluzii:

Deformările maxime și distrugerea locală fără o alungire pe o plajă mai mare indică un comportament plastic accentuat, datorat defectelor de fabricație specifice printării 3D.

Deplasările mici confirmă un comportament local casant sau datorat unor fisuri locale.

Curbele de deplasare pe direcția Y au o dispersie între puncte neuniformă, care se poate datora materialului neomogen ce are zone de rigiditate diferite.

Fereastra termografică color evidențiază zona activă de maximă solicitare, în concordanță cu distribuția tensiunilor și respectiv cu graficele de deplasare.

Prin utilizarea echipamentului GOM în testarea și evaluarea materialelor noi în fabricarea aditivă se dovedește necesară pentru evaluarea integrității mecanice a pieselor printate 3D și dezvoltarea de soluții de optimizare a procesului de printare.



Prin compararea rezultatelor obținute pe cele două echipamente de tracțiune se poate observa că forțele sunt apropiate pentru epruvetele printate planar cât și pentru epruvetele printate nonplanar.

Cap. 7 Concluzii generale, contribuții principale și direcții viitoare de dezvoltare a cercetării

Integrarea împreună cu digitalizarea industrială pe termen lung în industria 4.0 odată cu autoamatzarea avansată va pune bazele a unuia dintre pilonii fabricației viitoare. În adoptarea acestei noi tehnologii este absolut necesar dezvoltarea de standarde noi, reducerea timpilor de procesare și implicit a reducerii costurilor de fabricație.

În concluzie printarea 3D cu brațe robotice nu este doar o alternativă de printare la metodele tradiționale de realizare a produselor ci o paradigmă de fabricație cu potențialul de a revoluționa modul în care proiectăm și producem obiectele în viitor.

7.1 Concluzii generale

1. Lucrarea abordează o serie de aspecte legate de imprimarea 3D în tehnologia aditivă avansată, a reperelor cu suprafețe complexe, ce pot fi utilizate în domenii de interes: automotive, aerospațiale, medicină precum și în domenii de artă vizuală;
2. Caracterul științific a tezei este definit prin metodologia de cercetare și aportul adus îmbunătățirii rezistenței mecanice a imprimării 3D nonplanare cu braț mecanic;
3. Prin analiza stadiului actual s-au extras o serie de concluzii prezentate în teză pe fiecare ramură punctată adiacentă fiecărui capitol;
4. Analizând informațiile din stadiul actual și din literatura de specialitate s-a considerat a fi oportun alegerea de noi direcții de cercetare prezentate în capitolul 3;

Odată cu dezvoltarea acestei tehnologii aditive din ultima perioadă se pot atribui numeroase avantaje:

- Posibilitatea operatorilor din industrie să realizeze în timp real prototipare rapidă a componentelor sau a ansamblor funcționale sau cu caracter informativ;
 - Tehnologia aditivă cu braț robotic oferă flexibilitate în realizarea produselor de test sau de prototipare;
 - Posibilitatea fabricării de repere mari prin adoptarea tehnologiei aditive cu brațe robotice;
 - Implementarea brațelor robotice într-un flux dinamic și complex prin adoptarea mai multor tehnologii într-un singur loc (imprimare 3D și ulterior prelucrare prin așchiere);
 - Flexibilitatea de a fabrica prin imprimare 3D cu diverse tipuri de materiale sau compozite;
 - Posibilitatea introducerii în fluxul de printare cu braț robotic a mai multor capete de extrudare interschimbabile, cu filamente diferite (compoziție chimică, mecanică sau chiar o paletă diferită de culori a filamentului).
5. Pentru atingerea obiectivelor principale în cadrul tezei s-a avut în vedere:
 - Alegerea tipului de material conform specificațiilor furnizate de producător, precum și analiza chimică a acestuia;
 - Alegerea tipului de braț robotic în 6 axe care să faciliteze înglobarea capului extrudor și respectiv programarea G-code. Unde s-a pregătit standul de realizare a epruvetelor ținând cont de complexitatea reperelor realizate planar și nonplanar;
 - S-a stabilit care sunt parametrii ce pot influența procesul de printare 3D, astfel s-a ales și un plan experimental care să valideze științific teoria printării 3D nonplanare;
 - S-au ales o serie de echipamente de verificare și testare a epruvetelor realizate prin imprimare 3D cu braț robotic în 6 axe;
 6. O concluzie importantă cu caracter general este, stâns legată de faptul că, piesele printate nonplanar cu brațul robotic în 6 axe, sunt mult mai ușor în ceea ce privește rezistența mecanică.
 7. O particularitate asupra procesului tehnologic de printare 3D este dată de, modul de programare CAM, în lipsa unui software dedicat strict către printarea 3D nonplanară cu braț mecanic în 6 axe.



7.2 Contribuții personale

Pentru realizarea obiectivelor activității doctorale de cercetare care au fost menționate în capitolul, în cadrul studiului s-au adus următoarele contribuții:

1. A fost realizat un studiu al stadiului actual al cunoștințelor atât în domeniul printării 3D cât și al materialelor utilizate în acest domeniu. Acest studiu este prezentat în mod sintetic și critic, pe baza lor fiind trasate direcții de dezvoltare a studiului.
2. A fost realizat și optimizat un stand experimental care conține un braț robotic cu 6 axe destinat printării 3D non-planare. Trebuie menționat faptul că la momentul abordării temei de doctorat erau puține informații vizavi de printarea cu braț robotic în literatura de specialitate ceea ce a făcut destul de dificilă proiectarea acestui stand. Soluția optimă găsită implică montarea brațului pe partea superioară a carcasei astfel încât să existe spațiu optim de lucru și cu suprafață mai mare în plan orizontal.
3. A fost creată o interfață specială pentru printarea 3D calculator-robot UR5, cu ajutorul software-ului ROSCH, care consideră informațiile necesare procesului de printare 3D, cum ar fi viteza de extrudare, încălzirea diuzei și retragerea filamentului la capăt de nivel.
4. Au fost utilizate și adaptate software de tip CAM (Autodesk, PowerMill) în vederea generării G-code destinat deplasării non-planare a capului de printare.
5. A fost creat și s-a testat un Slicer destinat obținerii de traiectorii spațiale, adică un program de tip Open Source care să calculeze și să genereze traiectoriile în timp real
6. Au fost utilizate materiale cu fibră de carbon, atât cu fibră de carbon măcinată cât și cu fibră continuă în vederea obținerii de modele 3D printate non-planar. Materialele sunt de tip ONYX de la firma Markforged
7. Au fost proiectate și executate mai multe dispozitive pentru realizarea printării spațiale în vederea eliminării suportului de susținere a modelului.
8. A fost creat și utilizat un program de tip m-function în MATLAB destinat importului de puncte de pe suprafața modelului CAD care apoi au condus prin interpolare la determinarea ecuației care definește suprafața
9. A fost creat și utilizat un program de tip m-function în MATLAB care a avut ca scop determinarea normalei la suprafață în orice punct
10. A fost utilizat software-ul MINITAB pentru aplicarea planului experimental de tip Taguchi și interpretarea rezultatelor obținute.
11. A fost realizat un plan experimental de tip Taguchi 2^5 în vederea determinării și optimizării funcției rezistență la tracțiune și la compresiune
12. Au fost supuse accelerat la condiții de expunere în mediu UV conform standerdelor în vigoare utilizând echipamente cu lumină UV-C
13. Au fost supuse probele unor condiții reale de lucru care au considerat mai multe cazuri de umiditate
14. Au fost proiectate și realizate dispozitive de prindere a probelor imprimate 3D spațial pe echipamentul de încercare la tracțiune
15. A fost utilizat echipament de tip GOM – Aramis în vederea determinării comportamentului probelor printate 3D la tracțiune în timp real.
16. Au fost realizate mai multe analize de tip FEA utilizând software ANSYS în vederea studiului la tracțiune și compresiune a probelor. Au fost considerate definiții ale materialelor atât izotrop cât și ortotrop. Au fost comparate și interpretate rezultatele.
17. S-a făcut un studiu comparativ a rezultatelor obținute prin analiză FEA și cele obținute pe echipamentul GOM.



7.3 Direcții de cercetare viitoare:

Printarea 3D robotică este un domeniu în evoluție rapidă, dar care încă se confruntă cu numeroase provocări tehnice și limitări. Pentru a-și atinge întregul potențial, sunt necesare cercetări avansate în mai multe direcții cheie. Iată cele mai promițătoare zone de dezvoltare viitoare:

1. Îmbunătățirea preciziei și calității imprimării

- Compensarea dinamică a erorilor care pot să apară în timpul printării;
- Sisteme de feedback în timp real (camere video 3D, senzori LiDAR, senzori de forță) pentru corectarea traiectoriei în funcție de deformări termice sau vibrații;
- Algoritmi de auto-calibrare bazate pe învățare automată pentru ajustarea automată a parametrilor de printare;
- Control avansat al procesului de fabricație;
- Modelare predictivă a comportamentului materialului în timpul depunerii (ex: simulări FEA – Finite Element Analysis);
- Reglare adaptivă în timp real a vitezei de printare și a temperaturii în funcție de geometria piesei și condițiile de mediu.

2. Dezvoltarea de noi materiale și tehnologii de depunere

- Materiale avansate de fabricație;
- Materiale hibride (ex: beton cu fibre, termoplaste armate cu fibră continuă);
- Materiale funcționale (conductive, ignifuge, auto-reparabile, cu proprietăți schimbătoare în funcție de stimulii externi);
- Tehnologii multi-material și gradație de proprietăți;
- Capete de extruzie cu comutare rapidă pentru schimbarea materialelor în timpul printării;
- Depunere simultană a mai multor materiale pentru structuri cu proprietăți zonale (ex: rigiditate variabilă);

3. Robotică avansată și autonomie sporită;

- Sisteme multi-robot coordonate;
- Colaborarea între mai multe brațe robotice pentru printarea de structuri mari sau complexe;
- Flotele de roboți autonomi pentru construcții la scară extinsă (ex: printarea de clădiri);
- Integrarea cu inteligența artificială;
- Generarea automată a traiectoriilor folosind algoritmi generativi (ex: optimizare topologică + path planning);
- Autodiagnosticare și reparație automată a defectelor în timpul imprimării;

4. Software și digital twin (simulare avansată);

- Platforme unificate de programare;
- Comunicarea și integrarea ușoară între software-ul de modelare 3D (ex: CAD) și controlul robotic;
- Democratizarea prin soluții open-source pentru accesul la printarea 3D robotică;
- Digital Twin și simulare în timp real;
- Modele virtuale ale procesului de printare pentru predicția erorilor și testarea parametrilor înainte de fabricație;
- Optimizare bazată pe date folosind IoT (senzori conectați și analiză Big Data);

5. Aplicații inovative și domenii noi;

- Printare 3D în medii extreme;
- Roboți pentru printare sub apă (repararea structurilor offshore);
- Sisteme de printare în spațiu (fabricația aditivă în gravitație scăzută pentru stații spațiale);
- Biofabricarea și medicina personalizată;
- Printarea de țesuturi și organe folosind bio-materiale și brațe robotice de precizie;
- Dispozitive medicale adaptative (ex: proteze imprimate direct pe pacient);

6. Sustenabilitate și economie circulară;

- Reciclarea materialelor în timpul printării;
- Sisteme de re folosire a deșeurilor (ex: topirea și re folosirea plasticului rezidual);
- Materiale biodegradabile pentru aplicații efemere;
- Reducerea consumului de energie;



- Optimizarea traiectoriilor pentru minimizarea timpului și energiei;
- Utilizarea surselor regenerabile(ex: roboți alimentați cu energie solară în construcții);

Viitorul va fi cel al printării 3D robotice. Cercetarea în printarea 3D cu brațe robotice va fi dominată de interdisciplinaritate combinarea roboticii, AI, științei materialelor și fabricației digitale.

Direcțiile cheie includ:

1. Automatizare inteligentă (AI + robotică);
2. Materiale și procese inovatoare;
3. Scalabilitate și aplicații extreme;
4. Sustenabilitate și eficiență.

Prin abordarea acestor provocări, printarea 3D robotică poate deveni un pilon al Industriei 4.0, transformând nu doar producția, ci și construcțiile, medicina și explorarea spațială. Investițiile în cercetare și colaborarea între universități, industrie și guverne vor fi esențiale pentru accelerarea adoptării.



Bibliografie selectivă – lucrări de doctorat publicate

Lucrări representative:	▪ Valeriu Fănică HRIB, Florin CHIFAN, Cătălin Gabriel DUMITRAȘ, <i>"COMPARATIVE STUDY BETWEEN CONVENTIONAL AND ROBOTIC METHODS IN 3D PRINTING"</i>, BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘI, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Vol. 69(73), Nr. 4, Secția <i>"CONSTRUCȚII DE MAȘINI"</i>, DOI:10.2478/bipcm-2023-37; ▪ Valeriu Fănică HRIB, Florin CHIFAN, Mariana CIORAP, Cătălin Gabriel DUMITRAȘ, <i>AN STUDY REGARDING A NEW CONCEPT OF 3D PRINTING USING A 6 AXIS INDUSTRIAL ROBOTIC ARM</i>, BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘI, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Vol. 69 (73), Nr. 3, 2023, Secția CONSTRUCȚII DE MAȘINI, DOI:10.2478/bipcm-2023-0026; ▪ Valeriu Fănică HRIB, Florin CHIFAN, Constantin Cătălin DOSOFTEI, <i>IMPLEMENTATION OF USING COLLABORATIVE ROBOTS IN THE ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS</i>, International Journal of "Modern Manufacturing Technologies", ISSN 2067–3604, Vol. XV, No. 1 / 2023, https://doi.org/10.54684/ijmmt.2023.15.2.191; ▪ Valeriu Fănică HRIB, Andrei Iulian IANCU, CONSTANTIN CĂTĂLIN DOSOFTEI, <i>A Co-simulation Environment for an Educational Hydraulic Workstation</i>, 17th International Conference on "DEVELOPMENT AND APPLICATION SYSTEMS", Suceava, Romania, May 23-25, 2024, DOI: 10.1109/DAS61944.2024.10541200 ▪ CHITARIU.D.F., ILHAN.M., DUMITRAS.C.G., EDUTANU.F.D., HRIB.V.F., HORODINCA.M., <i>Research On Measurement Of Elastic Roller Deformations In Roller Bearings By Image Correlation Method</i>, ACTA TECHNICA NAPOCENSIS Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, Vol. 67, Issue Special I, February, 2024, lucrare ISI
------------------------------------	--



Cap. 8 Bibliografie selectiva

- [1] Leondes.C.T, "Computer-Aided and Integrated Manufacturing Systems: Techniques and Technology, vol. 2. CRC Press, .," 2003.
- [2] Hofer.M and Pottmann.H, "Geometry of the squared distance function to curves and surfaces, Computer Aided Geometric Design, vol. 22, no. 7, pp. 593–618,," 2005..
- [3] Choi.B.K and Jerard.RB., "Sculptured surface machining theory and applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers,," 1998.
- [4] Mao.X, Gao.L and Zhang.Y, "Free-form surface modeling and its applications in the automotive and aerospace industries," Computer-Aided Design, vol. 40, no. 3, pp. 403–415,," 2008..
- [5] Hoschek.J and Lasser.D, "Fundamentals of Computer Aided Geometric Design, Wellesley, MA: AK Peters,," 1993..
- [6] Choi.Y.K and Patrikalakis.N.M, "Design and manufacturing of free-form surfaces, Annals of the CIRP, vol. 47, no. 2, pp. 611–634,," 1998..
- [7] Ravani.B and T. J. Martin.T.J, "Characterization and design of free-form surfaces using differential geometry, ASME Journal of Mechanical Design, vol. 112, no. 3, pp. 378–386,," 1990..
- [8] Tumbleston.J and e. al, "Continuous liquid interface production of 3D objects, Science, vol. 347, no. 6228, pp. 1349–1352,," 2015..
- [9] Gibson.I, Rosen.D.W and Stucker.B, "Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, 2nd ed. New York: Springer,," 2015..
- [10] Gerald.F, Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design, 1993.
- [11] Hoschek.J and Lasser.D, Fundamentals of Computer Aided Geometric Design 1st Edition, 1996.
- [12] Piegl.L and Wayne.T, The NURBS Book.
- [13] Ungureanu.Gh., Computer Aided designe - Legătura între secțiunile CAD și CAM, Iași: Editura TEHNOPRESS.
- [14] Shahid.S.T, "Modeling of non-planar slicer for improved surface quality in material extrusion 3D printing," 2024. .
- [15] Zhang.t and “. et al., "Singularity-aware motion planning for multi-axis additive manufacturing," 2021.
- [16] Manual, "Material Extrusion – Autospeed," Slic3r, [Online]. Available: https://manual.slic3r.org/expert-mode/print-settings?utm_source=chatgpt.com.
- [17] "PACKT," Unravel the mysteries behind taking a virtual model and turning it into a physical object, 2025. [Online]. Available: https://www.packtpub.com/en-mx/product/instant-slic3r-9781783284979?utm_source=chatgpt.com.
- [18] "slic3r," Fast G-code generation is fast., 2024. [Online]. Available: <https://slic3r.org/>.
- [19] Guidetti.X and e. al, "Stress Flow Guided Non-Planar Print Trajectory Optimization," Jan. 2023.. [Online].
- [20] Hull.C.W“, "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography, U.S. Patent 4 575 330 A, filed Aug. 8, 1984,," Mar. 11, 1986..
- [21] Zaleski.A, "WIRED," The 3D Printing Revolution That Wasn't, 2016. [Online]. Available: https://www.wired.com/2016/12/the-3d-printing-revolution-that-wasnt/?utm_source=chatgpt.com.
- [22] Ultimaker, "https://ultimaker.com/," The first 3D printers, [Online]. Available: <https://ultimaker.com/learn/the-complete-history-of-3d-printing/#>.
- [23] Insights, "AMPOWER GmbH & Co. KG," Polymer Additive Manufacturing Technology Landscape," Version V3.0, July 2020. [Online]. Available: <https://ampower.eu/>.
- [24] Reddy.K.S, "ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES," Adama Science and Technology University, Iunlie 2019.
- [25] Kumar.M.B; Sathiya.P., "Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges," *ScienceDirect*, no. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107228>, 2020.
- [26] Ananth.K.P; Jayram.N.D., "A comprehensive review of 3D printing techniques for biomaterial-based scaffold fabrication in bone tissue engineering," no. <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2023.100141>, 2023.



- [82] Bodrero.A., "3DCompany Markforged," [Online]. Available: <https://3dcompany.it/author/alberto/page/2/>. [Accessed 02 04 2024].
- [83] PUGNA.A.P, CERCETĂRI PRIVIND PROIECTAREA ROBUSTA TAGUCHIA PROCESULUI DE CREȘTERE PRIN METODA HIDROTERMALĂ A MONOCRISTALELOR DE alfa-CUART, Timușoara: Teză de doctorat, 2005.
- [84] Krishnaiah.K; Shahabudeen.P, "Applied design of experiments and Taguchi methods, PHI Learning, New Delhi,," no. ISBN-978-81-203-4527-0,, 2012.
- [85] (accesat la data de 09.08.2024), [Online]. Available: <http://www.tribunaeconomica.ro>.
- [86] Carata.E and Zetu.D., "Modelarea și simularea sistemelor de fabricație, Editura Junimea, Iași,," no. ISBN 973-37-0559-4,, 2001.
- [87] Hüller.C, "Agile Cylinder Head Manufacturing System. Brochure No. 5101e 5000903," 2008.
- [88] Ungureanu.Gh., Legătura între secțiunile CAD și CAM.
- [89] S. Manual, "Material Extrusion – Autospeed," [Online]. Available: https://manual.slic3r.org/expert-mode/print-settings?utm_source=chatgpt.com.
- [90] "packt," Unravel the mysteries behind taking a virtual model and turning it into a physical object, 2025. [Online]. Available: https://www.packtpub.com/en-mx/product/instant-slic3r-9781783284979?utm_source=chatgpt.com.
- [91] Slic3r, "slic3r," Fast G-code generation is fast., 2024. [Online]. Available: <https://slic3r.org/>.
- [92] A. Insights, "AMPOWER GmbH & Co. KG," Polymer Additive Manufacturing Technology Landscape," Version V3.0, July 2020. [Online]. Available: <https://ampower.eu/>.
- [93] Zackary Fischer, s.a., "Palm Print: Handheld 3D Printer," 2019.
- [94] Fischer.Z., "Palm Print: Handheld 3D Printer,," 2019. .
- [95] Daniel Ahlers, s.a., "3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation," *IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2019.
- [96] Michael Wuthrich, s.a., "A Novel Slicing Strategy to Print Overhangs Without," 2021.
- [97] Aniruddha S., s.a., "Generating robot trajectories for Conformal 3D Printing Using Non-Planar Layers," *ResearchGate*, 2021.
- [98] Mitropoulou.I and s. , "Nonplanar 3D Printing og Bifurcating Forms," 2022.
- [99] Jaksch.E and s.a., "Materiale plastice poliamidice Ed. Tehnică, 1988, București pag. 61-63".
- [100] Mihalcu.M, Materiale plastice armate p59-61.
- [101] SCUTARU.M.L and s.a., Materiale plastice și compozite în ingineria autovehiculelor pag. 54-56..
- [102] Hubca.Ghe and s. -, Materiale compozite p137-138.
- [103] Lupescu.M.B, Fibre de armare pentru materiale compozite, p122-127.
- [104] G. Hubca.Ghe and s.a., Materiale compozite, Ed. Tehnică, București, 1999.
- [105] Drăgulescu.D and s.a., Enciclopedia materialelor compozite p209-211.
- [106] DyzeDesign, "DyzeDesign," [Online]. Available: www.dyzedesign.com/dyzend-pro-hotend/. [Accessed 2 07 2024].
- [107] "Universal Robots," [Online]. Available: www.universal-robots.com/products/ur3e/. [Accessed 14 10 2024].
- [108] J. Giesel, 2025. [Online]. Available: <https://github.com/stmcclloch/arc-overhang?tab=readme-ov-file#readme>.