

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
R E C T O R A T U L

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de **25.09.2024** la ora **09:30** în sala **TCM7**, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

“ CERCETĂRI PRIVIND POSIBILITĂȚILE DE APLICARE A TEHNICILOR DE PROIECTARE PENTRU DEZASAMBLARE ȘI RECICLARE (DFD ȘI DFR) ÎN INGINERIA FABRICAȚIEI”

elaborată de domnul **ING. CUCOȘ MARIUS-MARIAN** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

- | | |
|---|------------------------|
| 1. Prof. univ. dr. ing. DODUN DES-PERRIERES Oana,
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași | președinte |
| 2. Prof. univ. dr. ing. NAGÎȚ Gheorghe,
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași | conducător de doctorat |
| 3. Prof. univ. dr. ing. Cătălin FETECĂU,
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați | referent oficial |
| 4. Prof. univ. dr. ing. Liviu Daniel GHICULESCU,
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica din București | referent oficial |
| 5. Conf. univ. dr. ing. Vasile MERTICARU
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași | referent oficial |

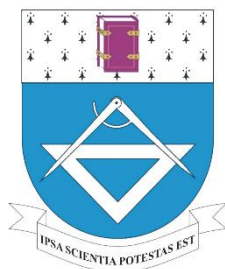
Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR,

Prof.univ.dr.ing. Dan Cașcaval

Secretar universitate,

.....



**UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI” DIN
IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII DE MAȘINI ȘI
MANAGEMENT INDUSTRIAL**



**CERCETĂRI PRIVIND POSIBILITĂȚILE DE APLICARE A
TEHNICILOR DE PROIECTARE PENTRU DEZASAMBLARE ȘI
RECICLARE (DFD ȘI DFR) ÎN INGINERIA FABRICAȚIEI**

- TEZĂ DE DOCTORAT -

Ing. Marius-Marian Cucos

Conducător de doctorat: Prof. Univ. Dr. Ing. Gheorghe Nagiț

IAȘI, 2024

CUPRINS

Referință numere pagini	Rezumat/Teză
Oportunitatea și importanța temei de cercetare	4/7
Structura și conținutul lucrării	6/9
Capitolul I. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND FOLOSIREA METODELOR DE PROIECTARE PENTRU DEZASAMBLARE ȘI RECICLARE ÎN INGINERIA FABRICAȚIEI	
1.1 Proiectarea pentru excelență DFX (engl. <i>Design for Excellence</i>) – integrarea metodelor și instrumentelor de proiectare pentru dezasamblare (DFD) și reciclare (DFR) în ingineria fabricației	13/16
1.2 Considerații generale privind proiectarea pentru dezasamblare (DFD) și reciclare (DFR) în ingineria fabricației	13/23
1.2.1 Proiectare pentru dezasamblare (DFD) – studiul instrumentelor în optimizarea și evoluția produselor din punct de vedere al procesului de dezasamblare	14/28
1.2.2 Proiectare pentru reciclare (DFR) – studiul instrumentelor în optimizarea și sustenabilitatea reciclării produselor	15/41
1.3 Contribuția metodelor DFX (DFD și DFR) pentru sprijinirea economiei circulare - CE (engl. <i>circular economy</i>) în ingineria fabricației	15/47
1.4 Contribuția metodelor DFX (DFD și DFR) în abordarea ingineriei concurente sau ingineriei simultane (engl. <i>Simultaneous Engineering – SiE</i>)	16/52
1.5 Studiul și analiza metodelor principale pentru dezasamblare (DFD) în ingineria fabricației	17/56
1.5.1 Generarea planurilor de dezasamblare utilizând planurile de asamblare	17/60
1.5.2 Generarea planurilor de dezasamblare prin utilizarea reprezentări limite a unui ansamblu	18/61
1.5.3 Utilizarea conceptului "sweeping table" pentru generarea secvențelor de dezasamblare	18/62
1.5.4 Metoda grafică ȘI/SAU (engl. <i>AND/OR</i>)	18/64
1.5.5 Diagrama directă de dezasamblare (engl. <i>direct diagram</i>)	19/66
1.5.6 Metoda grafică Petri – Net	19/67
1.5.7 Utilizarea metodei designului modular	19/68
1.5.8 Utilizarea hărților de dezasamblare (engl. <i>disassembly mapping method</i>)	20/70
1.6 Rolul metodelor de proiectare DFD și DFR în cadrul procesului de dezvoltare a produsului (PDP) în ingineria de fabricație	20/73
1.7 Studiul și analiza proiectării pentru asamblare (DFA) versus proiectare pentru dezasamblare (DFD)	21/75
1.8 Analiza beneficiilor aplicării principiilor DFD și DFR ținând cont de durata de viață a produselor	21/79
1.9 Concluzii	22/82

Capitolul II. OBIECTIVELE TEZEI. METODOLOGIA DE CERCETARE

- 2.1 Particularitățile de proiectare pentru conceptele DFD și DFR 25/86
- 2.2 Obiective teoretice și experimentale 25/86

Capitolul III. CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA CONVERGENTĂ A PRINCIPIILOR DFD-DFR ȘI A SOLUȚIILOR DE INGINERIE INTEGRATE AVANSATE PENTRU PROIECTAREA DURABILĂ A PRODUSELOR ÎN INGINERIA FABRICAȚIEI

- 3.1 Introducere. Definirea contextului și problemei actuale a cercetării 28/89
- 3.2 Abordarea cercetărilor în faza inițială de proiectare analitică prin integrarea conceptului DFX (DFD, DFR) și a ingineriei integrate (CAD, CAE, PLM) 28/90
- 3.3 Aplicarea principiilor DFX și a ingineriei integrate pentru dezvoltarea unei structuri de produse durabile pentru un dispozitiv adaptabil pe o mașină de descărcare electrică 30/93
 - 3.3.1 Descrierea dispozitivului tehnologic 30/93
 - 3.3.2 Algoritmul proiectării pentru excelență (DFD și DFR) în proiectarea conceptuală a dispozitivului tehnologic 31/94
 - 3.3.3 Proiectarea conceptuală utilizând ingineria integrată în cadrul software-ului Solid Edge, modulul Engineering Reference 31/95
- 3.4 Concluzii 33/103

Capitolul IV. CONTRIBUȚII PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA PROIECTĂRII CONCEPTUALE A PRODUSULUI PRIN UTILIZAREA EFICIENTĂ A PRINCIPIILOR DE DEZASAMBLARE (DFD) ȘI RECICLARE (DFR) ȘI A INSTRUMENTELOR DE MODELARE CAD PRIN PARAMETRIZAREA MODELULUI SOLID 3D ÎN INGINERIA FABRICAȚIEI

- 4.1 Introducere. Definirea generală a proiectării conceptuale a produselor prin parametrizarea modelului solid 3D 34/104
- 4.2 Abordarea cercetării și definirea modelului conceptual 34/105
- 4.3 Cercetări privind proiectarea optimizată de inginerie a produselor folosind relații matematice integrate în software-ul de proiectare Creo Parametric 35/106
- 4.4 Concluzii 37/110

Capitolul V. CONTRIBUȚII PRIVIND INTEGRAREA METODOLOGIILOR AVANSATE ȘI A TEHNICILOR DE PROIECTARE PENTRU DEZASAMBLARE (DFD) ȘI RECICLARE (DFR) A UNUI ACTUATOR LINIAR

- 5.1 Introducere 39/111
- 5.2 Cadrul conceptul și aprofundarea metodologiilor de proiectare DFD și DFR 39/112
- 5.3 Cercetări privind aplicarea metodologiilor DFD și DFR în proiectarea conceptuală pentru dezasamblare și reciclare 41/115
- 5.4 Contribuții teoretice privind aplicarea metodelor de proiectare pentru dezasamblare, Petri-Net și a graficului ȘI/SAU a unui actuator liniar 43/124

5.5 Studiu de caz privind aplicarea metodelor de proiectare pentru dezasamblare a unui actuator liniar folosind metoda Petri-Net și graficul ȘI/SAU	47/136
5.6 Concluzii	54/153

Capitolul VI. CONTRIBUȚII PRACTICE PRIVIND REALIZAREA UNUI PROTOTIP A ACTUATORULUI LINIAR CU AJUTOR IMPRIMĂRI 3D PENTRU PRE VALIDAREA PROIECTĂRII PENTRU DEZASAMBLARE ȘI RECICLARE ȘI PENTRU CREAREA PAȘAPORTULUI DE RECICLARE

6.1 Descrierea imprimantei 3D și a parametrilor inițiali de lucru utilizați pentru imprimarea componentelor actuatorului liniar	55/155
6.2 Descrierea parametrilor și caracteristicilor componentelor actuatorului liniar realizate la imprimanta 3D Anet a8	55/160
6.3 Cercetări privind optimizarea parametrilor de lucru și influența acestora în timpul imprimării	59/172
6.4 Concluzii	60/175

Capitolul VII. CONTRIBUȚII PRIVIND REALIZAREA UNUI PAȘAPORT DE RECICLARE A ACTUATORULUI LINIAR CARE POATE FI UTILIZAT ÎN CONTEXTUL PROIECTĂRII PENTRU RECICLARE ȘI DEZASAMBLARE ÎN INGINERIA FABRICAȚIEI

7.1 Introducere. Analiza documentelor specifice re-fabricării, mentenanței și reciclării – pașaport de reciclare (engl. <i>recycling passport</i>), pașaport digital al produselor (engl. <i>digital product passport</i>)	62/178
7.2 Structura și conținutul unui pașaport de reciclare (engl. <i>recycling passport</i>)	63/182
7.3 Procedura de realizare a unui pașaport de reciclare	63/183
7.4 Studiu de caz privind aplicarea metodelor de proiectare DFD și DFR pentru realizarea unui pașaport de reciclare a unui actuator linear	64/184
7.5 Dezasamblarea componentelor și definirea parametrilor de calcul a actuatorului liniar pentru realizarea pașaportului de reciclare	64/185
7.6 Concluzii	71/195

Capitolul VIII. CONCLUZII

8.1 Contribuții proprii la rezolvarea temei de cercetare	72/197
8.2 Concluzii finale	74/199
8.3 Direcții viitoare de dezvoltare a cercetărilor	78/203

Listă de lucrări publicate	79/204
Bibliografie Selectivă	81/206

Notă: Rezumatul tezei de doctorat prezintă într-o formă succintă introducerea, stadiu actual, metodologia cercetării experimentale și o parte din rezultatele obținute, concluziile generale și bibliografia selectivă. În acest rezumat s-a păstrat numerotarea capitolelor, paragrafelor, figurilor și tabelelor utilizate în cadrul tezei de doctorat.

OPORTUNITATEA ȘI IMPORTANȚA TEMEI DE CERCETARE

Proiectarea pentru dezasamblare (engl. *design for disassembly*) și reciclare (engl. *design for recycling*) sunt două concepte care fac parte din filozofia numită Proiectarea pentru Excelență - DFX (engl. *Design for Excellence*). Aceste două concepte de proiectare au fost aprofundate pentru prima dată în anii 1990, iar mai târziu au fost definite ca metodologii critice de proiectare conceptuală și de interes pentru sustenabilitatea produselor din secolul al XXI-lea. Preocuparea cercetătorilor din întreaga lume a crescut foarte mult cu privire la acest domeniu, iar pe baza acestor concepte DFD și DFR au fost elaborate numeroase lucrări de cercetare și dezvoltare. De asemenea, proiectarea pentru dezasamblare (DFD) a devenit un subiect important în procesul de proiectare conceptuală pentru foarte multe industrii, dar nu a fost încorporat în ghidurile principale de proiectare a produselor sau a proiectelor din majoritatea domeniilor de activitate. Unele companii, în principal din Europa, încorporează aspecte ale metodologiei DFD în practica lor pentru a sprijini economia circulară și sustenabilitatea mediului înconjurător.

Abordările de proiectare pentru dezasamblare și reciclare sunt esențiale pentru sprijinirea tranziției spre economia circulară industrială. Cu toate acestea, o limitare semnificativă a designului actual pentru metodele de dezasamblare este incapacitatea acestora de a modela impactul asupra scoaterii din uz a unui produs – EOL (engl. *end of life*). O altă limitare ar fi definirea efortului de dezasamblare realizat și a efectelor ulterioare asupra implementării strategii de proiectare a economiei circulare.

De asemenea, în faza de concepere și fezabilitate, proiectarea produselor prin integrarea soluțiilor avansate de inginerie – CAD (engl. *computer-aided design*) și ingineria asistată de calculator - CAE (engl. *computer-aided engineering*) a devenit o necesitate. Avantajele utilizării convergente a principiilor DFD - DFR și a soluțiilor de inginerie integrată pentru proiectarea durabilă a produselor, sunt importante pentru economia circulară datorită anumitor caracteristici precum: flexibilitatea și timpul de reacție mare oferit de software-ul CAD/CAE pentru anumite modificări, reducerea costurilor și a timpului de producție prin îmbunătățirea produselor și de asemenea, diminuarea timpului de planificare și lansare a produsului pe piață.

Parametrizare modelelor 3D reprezintă o altă soluție avansată de proiectare mecanică oferită de soluțiile software CAD/CAE. Prin folosirea unor ecuații matematice și algoritmi necesari pentru proiectarea conceptuală și îndeplinirea cerințelor de dezvoltare a produsului, acestea converg și împreună conduc la îmbunătățirea activității de proiectare, sustenabilitate pentru dezvoltarea produselor viitoare, creșterea eficacității și eficienței produsului.

Un domeniu important de cercetare și dezvoltare este reprezentat de proiectarea pentru reciclare. DFR reprezintă o strategie și o metodologie care urmărește reducerea impactului asupra mediului ciclului de viață al produsului iar rolul proiectării pentru dezasamblare este de a proiecta produse și componente care sunt mult mai ușor de reciclat în faza de scoatere din uz a produselor – EOL (engl. *End of life*). Potrivit Comisiei Europene [W, 003] un procent de 80% din impactul asupra mediului înconjurător legat de un produs este determinat în faza de proiectare conceptuală. Ținând cont de acest aspect, nu se

conștientizează cât de importantă este faza incipientă de proiectare a unui produs, atât pentru mediul înconjurător cât și pentru economia circulară.

Economia circulară (engl. *circular economy*) este un concept format din mai multe modele economice în care se urmărește atât creșterea duratei de viață a produselor cât și a materialelor utilizate, prin introducerea ciclurilor în buclă închisă. Aceste lucruri se fac prin activități de recondiționare, reparații, mentenanță și service înainte ca produsul să fie total reciclat. Spre deosebire de fluxul economiei liniare în care produsele sunt fabricate, folosite și aruncate, fluxul în buclă închisă a economiei circulare este un flux mult mai sustenabil deoarece acesta implică folosirea în comun a reutilizării, reparării, re-fabricării și reciclării materialelor pentru o perioadă lungă de timp. Primul pas în economia circulară este proiectarea conceptuală a produselor care pot avea o mentenanță ușoară și care pot fi ușor folosite. Alt aspect destul de important este proiectarea pentru reciclare (DFR) cu scopul de a avea o buclă închisă a economiei circulare pentru produse, cât mai mult timp posibil.

Comisia Europeană pentru sprijini tendința către o economie circulară și sustenabilitatea produselor viitoare, propune introducerea pașapoartelor digitale – DPP (engl. *digital product passports*) care ar putea conduce la utilizarea eficientă a materialelor și reducerea emisiilor de CO₂ [W, 008]. Aceste pașapoarte digitale sunt menite să faciliteze mentenanța, service și reciclarea produselor, să optimizeze resursele și fluxurile de energie, să îmbunătățească transparența legată de impactul produselor asupra mediului în timpul fabricării-asamblării, și pe parcursul întregului ciclu de viață al produselor.

Datorită complexității ridicate a proceselor de producție și asamblare, și a noilor interconexiuni care sunt create între industriile cu aplicabilitate în exploatarea resurselor, se dovedește a fi dificilă realizarea unui ecosistem industrial care să poată crea acest lucru de unul singur. Abordările de cercetare în acest domeniu au o atenție limitată datorită provocărilor de realizare în practică. Pentru sustenabilitatea și tranziția către o economie circulară este foarte important cum este structurat și organizat un pașaport digital, astfel încât toate entitățile și părțile relevante să se organizeze împreună și să ofere acces la bazele de date necesare pentru exploatarea și realizarea în condiții optime a DPP-urilor. Oamenii de știință și cercetătorii constată că prin transformarea digitală a mediului industrial, ingineria cunoștințelor dobândite va valorifica datele obținute pentru a genera anumite activități precum: luarea de decizii în regim propriu în momentul planificării producției pentru a scurta timpii de livrare, îmbunătățirea flexibilității și optimizarea lanțului de aprovizionare, impactul asupra sustenabilității produsului prin analizarea limitărilor sau chiar blocajul dat de lanțul de aprovizionare.

În ziua de astăzi, datorită dinamicii și a varietății de produse oferite în piață, gestionarea materialelor, resurselor și a deșeurilor a devenit o preocupare mare pentru societate și mediul înconjurător. Metoda nouă care ar putea diminua risipa de materiale și reciclabilitate scăzută datorită lipsei informațiilor, este pașaportul de reciclare (engl. *recycling passport*). Acest tip de pașaport este o altă ilustrare la nivel de industrie a unei inițiative de digitalizare care permite: colectarea informațiilor și evaluarea procentului de reciclare, realizarea impactului asupra mediului după reciclarea materialelor și evaluarea completă și complexă a ciclului de viață a mediului ecologic de reciclabilitate.

STRUCTURA ȘI CONȚINUTUL LUCRĂRII

În teza de doctorat sunt prezentate și evidențiate cercetările teoretice și practice întreprinse de autor în domeniul proiectării pentru dezasamblare și reciclare în ingineria fabricației privind sustenabilitatea produselor și tendința către o economie circulară (fabricare, utilizare, reparare, reciclare). Prin fuziunea cercetărilor teoretice cu cele practice și detalierea în studiile de caz, s-a reușit clarificarea unor concepte privind proiectarea și reciclabilitatea produselor. În cadrul acestora s-au studiat și detaliat proiectarea pentru dezasamblare-reciclare și mapa de reciclare a unui ansamblu tip actuator liniar.

Teza de doctorat intitulată “*Cercetări privind posibilitățile de aplicare a tehnicilor de proiectare pentru dezasamblare și reciclare (DFD și DFR) în ingineria fabricației*” este organizată în opt capitole. În partea introductivă se detaliază importanța lucrării de cercetare în contextul actual și de asemenea, oportunitatea oferită pentru rezolvarea sau îmbunătățirea unor procese sau metodologii a proiectării conceptuale.

Capitolul I reprezintă partea introductivă în care este detaliat și aprofundat studiul actual al cercetărilor în contextul curent, în domeniul proiectării pentru dezasamblare și reciclare în ingineria fabricației. Această analiză a determinat și realizat o vedere generală asupra conținutului științific din literatura de specialitate, prin care s-a confirmat că atenția din partea cercetătorilor în domeniul de dezasamblare și reciclare încă nu a ajuns la maturitate. Astfel, lipsa anumitor informații din literatură face ca abordarea de cercetare în cadrul tezei de doctorat să fie una de actualitate și de interes.

După consultarea literaturii de specialitate, se identifică importanța conștientizării ecologice a produselor și obiectivelor pentru scoaterea din uz a produselor – EOL (engl. *End of life*), cum ar fi: reutilizarea componentelor (componentele unui produs care se află la sfârșit de viață sunt utilizate fără modernizare tehnologică), re-prelucrarea (componentele dintr-un produs sunt utilizate într-un produs nou după îmbunătățirea tehnologică) și reciclarea (reutilizarea la nivel de material, cum ar fi reciclarea materialelor plastice). În momentul de față proiectarea pentru dezasamblare (DFD) și reciclare (DFR) devin două dintre cele mai puternice concepte a proiectării pentru excelență – DFX (engl. *design for excellence*) datorită contextului global (managementul deșeurilor, încălzirea globală, emisi gaze de seră, etc).

Analiza teoretică realizată în acest capitol de studiu actual este orientată pe două mari concepte de proiectare specifice DFX, și anume proiectarea pentru dezasamblare - DFD (engl. *design for disassembly*) și proiectarea pentru reciclare – DFR (engl. *design for recycling*). Pentru primul concept, și anume proiectarea pentru dezasamblare (DFR), au fost analizate și aprofundate:

- ghidurile de proiectare specifice DFD;
- contribuția metodelor pentru sprijinirea economiei circulare și abordarea acestora în ingineria concurentă;

- analiza principalelor metode pentru dezasamblare;
- rolul metodelor DFD în cadrul procesului de dezvoltare a produselor - PDP (engl. *product development process*);
- analiza beneficiilor după aplicarea conceptelor DFD și DFR.

Al doilea concept abordează proiectarea pentru reciclare (DFR), care se intersectează cu proiectarea pentru dezasamblare și cu o parte din analizele descrise în lucrarea de cercetare specifice DFD. Acestea sunt realizate la comun și unde există diferențe sunt evidențiate separat. Proiectarea pentru reciclare se concentrează pe studiul și analiza documentelor specifice re-fabricării, mentenanței și reciclării, și anume documente tip pașaport de reciclare (engl. *recycling passport*) și pașaport digital al produselor (engl. *digital product passport*), acestea fiind utilizate după implementarea proiectării pentru dezasamblare (DFD).

De asemenea, lipsa de claritate despre stocarea informațiilor în pașaportul digital al produselor face în continuare dificilă proiectarea pentru dezasamblare și reciclare cu privire la sprijinirea economiei circulare. Chiar dacă informațiile nu sunt organizate și structurate, este clar că schimbul de informații oferă un potențial mare pentru sectorul gestionării deșeurilor. Scopul unei economii circulare poate fi atins doar dacă politică despre DPP-uri se orientează pe gestionarea scoaterii din uz a produsului și nu doar pe faza de producție, asamblare și cost.

Principalul scop descris în capitol I este de a prezenta o vedere de ansamblu la nivel de produs, a unui concept de proiectare pentru sustenabilitatea produselor și a mediului înconjurător. Se urmărește detalierea și realizarea unei evaluări a produselor care sunt implicate în ciclu de viață a produselor după prelucrare, asamblare și mai apoi dezasamblare și ulterior reciclare. În ziua de astăzi obiectivele pentru produsele aflate la sfârșitul de viață, cum ar fi: reutilizarea componentelor, re-prelucrarea și reciclarea, constituie unele dintre cele mai importante motive pentru dezasamblarea produselor. Acest lucru poate fi atribuit impactului mare al deșeurilor industriale și casnice asupra mediului înconjurător.

Capitolul II reprezintă stabilirea obiectivelor tezei de doctorat și a metodologiei de cercetare a proiectării pentru dezasamblare și reciclare în ingineria fabricației. După analiza făcută asupra stadiului actual al cercetărilor din literatura de specialitate, s-a constatat că acest domeniu nu a ajuns la maturitate și există anumite lacune/limitări în domeniul proiectării pentru dezasamblare și reciclare. Astfel, ținând cont de aceste limitări, pentru teza de doctorat, au fost stabilite următoarele obiective majore de cercetare:

- Utilizarea convergentă în faza de proiectare conceptuală a componentelor unui dispozitiv tehnologic (arbori și roți dințate), utilizând principiile DFX (concret DFD și DFR) împreună cu integrarea soluțiilor avansate de proiectare 3D Solid Edge – Engineering Reference și PTC Creo Parametric;
- Realizarea și proiectarea unui ansamblu mecanic - actuator liniar cu scopul de a fi analizat din punct de vedere al proiectării pentru dezasamblare DFD și reciclare DFR;

- Evaluarea în detaliu al actuatorului liniar din punct de vedere al proiectării pentru dezasamblare DFD cât și din perspectiva proiectării pentru reciclare DFR. Aplicarea metodei de analiză Petri Net și a Graficul ȘI/SAU pentru evaluarea produsului inițial din perspectiva proiectării pentru dezasamblare;
- Reproiectarea componentelor actuatorului liniar în urma sugestiilor principiilor DFD-DFR și a analizei graficului ȘI/SAU, metodei Petri-Net și a matricelor de complexitate-accesibilitate a dezasamblării;
- Realizarea folosind fabricarea aditivă (imprimare 3D) a unor prototipuri a ansamblului actuator liniar pentru a putea fi utilizat pentru pre-validarea aplicării principiilor pentru dezasamblare (DFD) și pentru realizarea unui pașaport de reciclare;
- Definirea structurii, conținutului și a procedurii de realizare a unui „pașaport de reciclare” generic. Analizarea și elaborarea unui “pașaport de reciclare” pentru actuatorul liniar ținând cont de caracteristicile mecanice, operațiile de asamblare și sculele folosite.

În **Capitolul III** sunt prezentate cercetările realizate privind utilizarea convergentă a principiilor DFD/DFR și a soluțiilor de inginerie integrate avansate pentru proiectarea durabilă a produselor.

Contribuțiile specifice din acest capitol au fost definirea și realizarea unui cadru conceptual de proiectare analitică DFX (DFD și DFR) care fuzionează cu ingineria integrată (CAD, CAE, PLM, PDM) pentru sustenabilitatea produselor după definirea specificațiilor (engl. *product specification*), cerințelor produsului (engl. *requirements*) și a structurii de produs (engl. *product structure design*).

De asemenea, cercetările continuă cu un studiu de caz pentru aplicarea principiilor DFD-DFR și a ingineriei integrate, care se referă la performanța utilizării capabilităților avansate ale software-ului Solid Edge ca soluție CAD. Aceasta asigură parametrizarea și optimizarea structurii modelului de produs. De asemenea, ca instrument valoros CAE (*modulul Engineering Reference*), oferă generarea calculului geometrice și funcționale pentru componentele (arbori și angrenaje) dispozitivului tehnologic, care este adaptabil pe o mașină unealtă cu descărcare electrică, studiat anterior.

După aprofundarea studiului de caz, investigațiile realizate s-au dovedit a fi eficiente pentru proiectarea pentru dezasamblare și reciclare. În urma folosirii convergente, a implementării principiilor ingineriei integrate și a principiilor proiectării DFD și DFR, se sporește flexibilitatea și dimensionarea modelului de produs tehnologic. De asemenea, crește timpul de reacție pentru schimbările tehnologice apărute în timpul desfășurării activităților de design.

Capitolul IV conține cercetări teoretice cu privire la îmbunătățirea proiectării conceptuale a produsului prin utilizarea eficientă a principiilor de dezasamblare – DFD și reciclare – DFR și a instrumentelor de modelare CAD prin parametrizarea modelului solid 3D. Cercetările continuă cu un model conceptual de abordare a cercetărilor pentru îmbunătățirea eficacității și eficienței proiectării conceptuale a produsului. Utilizarea conceptului de parametrizare cu ajutorul modelelor matematice de

tip ecuații și relații, integrate mai apoi în soluțiile avansate de proiectare CAD/CAE/CAM conduc la dezvoltarea de familii de produse pentru o arhitectură mecanică a unui dispozitiv tehnologic.

Exploatarea structurii de parametrizare a modelelor 3D Intrare (engl. *input*) – Ecuații (engl. *equation*) – Ieșire (engl. *output*) a fost detaliată și aprofundată cu ajutorul unui studiu de caz privind parametrizarea unor arbori și roți dințate a unui dispozitiv tehnologic capabil să genereze profiluri cicloide bazate pe un mecanism de acționare dublu planetar adaptabil pe o mașină de descărcare electrică. Structura parametrizată a modelelor 3D, a arborilor și roților dințate s-a dovedit eficientă datorită flexibilității și timpului de reacție mare oferit de software-ul CAD/CAE pentru anumite modificări.

De asemenea, utilizarea soluțiilor de inginerie avansată (parametrizarea modelelor 3D) îmbunătățesc dezvoltarea durabilă a produselor cu scopul creșterii flexibilității schimbărilor apărute în faza conceptuală de proiectare. Un alt aspect al utilizării parametrizării 3D, ar fi reducerea timpului de lansare a produsului pe piață, costuri de producție mai mici și îmbunătățirea produselor într-un timp relativ scurt prin realizarea unei structuri modulare și a unor familii de produse.

Capitolul V conține contribuții teoretice privind integrarea metodologiilor avansate și a tehnologiilor de proiectare pentru dezasamblare (DFD) și reciclare (DFR) a unui ansamblu actuator liniar.

În prima parte, cercetările sunt orientate pe un model conceptual în care principiile DFD/DFR ale conceptului general DFX sunt detaliate pentru a face obiectul studiului de cercetare. Cele două principii sunt aprofundate în cadrul conceptual cu ajutorul metodologiilor și tehnologiilor specifice prezentate în studiul actual din capitolul I:

- modelarea modulară ierarhică a produsului;
- modele și ecuații matematice;
- utilizarea unor metode cum este cea a graficului ȘI / SAU (engl. *AND/OR*) dar și metoda Petri-Net (PN).

După definirea cadrului conceptual, cercetările se îndreaptă spre metoda graficului ȘI/SAU și a rețelelor Petri detaliate în stadiul actual din capitolul I. Aceste metode specifice DFD sunt diferite, dar din punct de vedere a principiilor de dezasamblare, ambele determină conexiunile dintre componente, subansambluri și secvențe potențiale de dezasamblare a unui ansamblu/produs în componente individuale. Mai departe, investigațiile continuă cu un studiu de caz al unui ansamblu mecanic simplu format din patru componente (capac, bară, cilindru și mâner) în care se cercetează partea de evaluare a complexității din punct de vedere al manipulării, dezasamblării și accesibilității.

În partea a doua a cercetărilor este propus și proiectat 3D un ansamblu tip actuator liniar pentru fabricare și asamblare cu ajutorul unor instrumente de inginerie integrate CAD/CAE/CAX (software-ul CATIA V5). Realizarea 3D a ansamblului are rolul de a demonstra și valida aplicarea metodologiilor DFD și DFR în proiectarea conceptuală și a ingineriei de produs. De asemenea, un alt rol ar fi

exemplificarea integrării metodologiilor avansate de proiectare conceptuală, care converge cu tehnologiile de proiectare pentru dezasamblare (DFD) și reciclare (DFR).

După realizarea 3D a ansamblului actuator liniar și a listei de materiale – BOM (engl *Bill of materials*), în continuare se detaliază un model conceptual bazat pe metodele de proiectare ale graficului ȘI/SAU și a rețelelor Petri. Acest model conceptual fiind descris în patru pași teoretici pentru a stabili și identifica care sunt rutele posibile și în final după identificarea lor, care este ruta cea mai potrivită pentru dezasamblare și mai apoi re-fabricare sau reciclare a ansamblului actuator liniar.

După identificarea rutelor posibile de dezasamblare (denumite în lucrare alfa, beta și omega) cercetările continuă pentru a stabili pentru fiecare rută de dezasamblare parametrii pentru complexitate manipulare și accesibilitate a componentelor. În urma analizei și a calculelor realizate în lucrare, a reieșit că nu se poate face o evaluare precisă și corectă asupra traseului optim pentru dezasamblare. Pentru a defini care este ruta optimă, cercetările continuă prin calcularea unui index general de utilizare cu ajutorul scorului Z (descriș în lucrare) pentru fiecare rută, în care se ia în considerare accesibilitatea și complexitatea dezasamblării.

În final, după integrarea tuturor parametrilor de complexitate, accesibilitate, manipulare și a scorului Z, din cele 3 rute discutate, traseul omega (culoare roșie) este cel mai potrivit pentru dezasamblare și reciclare, datorită scorului Z_{total} (-0.23).

Metodologiile propuse în acest capitol permit proiectanților să aibă o manieră organizată și structurată în proiectarea produselor pentru asamblare și ulterior re-fabricare sau reciclare. Nu trebuie să se țină cont de proiectarea dezasamblării pentru toate componentele unui produs, ci numai pentru acele componente care influențează dezasamblarea, împiedicând manipularea și accesibilitatea.

În **Capitolul VI** se prezintă contribuții practice privind realizarea prototipului actuatorului liniar descriș anterior în capitolul V, cu ajutorul imprimării 3D pentru pre-validarea proiectării pentru dezasamblare și reciclare, dar și pentru realizarea unui pașaport de reciclare.

În prima parte cercetările sunt orientate pentru realizarea fizică a componentelor actuatorului liniar prin imprimarea 3D folosind o imprimantă Anet a8 compatibilă cu software-ul Ultimaker Cura pentru generarea codurilor G-code și mai apoi transmiterea informațiilor către imprimantă. După definirea specificațiilor, parametrilor și realizarea fizică a componentelor, cercetările continuă cu măsurarea dimensională cu ajutorul unui șubler digital electronic, a pieselor fizice. Acest lucru se realizează, pentru a putea fi evaluate și măsurate din punct de vedere a toleranțelor obținute după procesul de imprimare 3D pentru asigurarea asamblării cu ușurință a componentelor.

În partea a doua, cercetările sunt orientate către optimizarea parametrilor de lucru și influența acestora în timpul imprimării 3D. De asemenea, sunt evidențiate și detaliate anumite exemple de învățare (engl. *lesson learn*) a unor probleme apărute în timpul imprimării 3D legate atât de imprimanta 3D Anet a8 cât și de specificațiile și parametrii folosiți pentru generarea fizică a componentelor actuatorului liniar.

După realizarea fizică a componentelor, pe baza principiilor de dezasamblare și reciclare, detaliate și aprofundate în capitolul V, cercetările continuă cu un studiu practic în care se aplică metodologiile folosite anterior pentru îmbunătățirea procesului de dezasamblare.

În urma analizei făcute în capitolul V a reieșit că ruta optimă pentru dezasamblare ar fi omega (culoarea roșie), iar în acest capitol se detaliază una din modificările de proiectare după aplicarea principiilor DFD – DFR pentru ruta omega. Ca studiu de caz, cercetările s-au concentrat asupra reducerii dimensiunii pistonului (poziția 19 BOM) cu 9.3 mm din lungimea totală de 60 de mm, astfel încât manipularea și accesibilitatea pentru dezasamblarea piuliței (poziția 15 BOM) să fie cât mai ușoară și fără a fi necesare anumite scule speciale.

Tehnicile din domeniul fabricării aditive – AM (engl. *additive manufacturing*), cunoscută în mod obișnuit ca imprimare tridimensională (3D) sau prototipare rapidă – RP (engl. *rapid prototyping*), în această lucrare au oferit cea mai bună alternativă pentru construirea relativ rapidă și controlată a unor prototipuri funcționale.

În **Capitolul VII** sunt prezentate contribuțiile practice privind realizarea fizică a unui pașaport de reciclare a ansamblului actuator liniar descris anterior în capitolele V și VI. Acest pașaport de reciclare poate fi utilizat și aprofundat în domeniul proiectării pentru dezasamblare și reciclare.

Conceptul de pașaport de reciclare după consultarea literaturii de specialitate are anumite limitări iar partea de reciclare a produselor și materialelor nu este tratată cu suficient interes din partea producătorilor. Aceștia ar trebui să se orienteze pe acele produse care să nu aibă un impact major asupra mediului înconjurător și de asemenea, ar trebui să pună accent pe sustenabilitatea și durabilitatea produselor până la scoaterea din uz.

Cercetările în prima parte sunt orientate în realizarea unei structuri, a conținutului unui pașaport de reciclare, precum și detalierea la nivel teoretic a unei proceduri pentru realizarea unui pașaport de reciclare. După ce partea introductivă a fost definită și analizată despre cum se realizează un pașaport de reciclare și care sunt limitele, în continuare se propune un studiu de analiză realizat cu ajutorul actuatorului liniar, descris în capitolele V și VI. În acest studiu se aplică metodele de proiectare DFD și DFR pentru realizarea fizică a unui pașaport de reciclare cu ajutorul componentelor fizice imprimate 3D.

Structura pașaportului de reciclare a fost cercetată și detaliată în acest capitol în 3 mari categorii de interes pentru sustenabilitatea proiectării pentru dezasamblare și reciclare:

- **A - Dezmembrarea sistemului de produs** în care se detaliază fiecare material folosit, procentul de reciclabilitate, timpul de dezasamblare, sculele folosite pentru dezasamblare, etc.
- **B – Figuri** în care sunt detaliate și documentate cu poze specifice pentru fiecare operație din timpul dezasamblării și a fiecărui component ce face parte din ansamblu actuator liniar.

- **C – Parametri de lucru** în care se definesc anumiți parametrii pentru procentul de reciclabilitate și de asemenea, costul după recuperarea materialelor.

Pașaportul de reciclare realizat pentru actuatorul liniar conține informații bine structurate despre produs într-un document care permite clienților (engl. *customers*) să verifice sustenabilitatea produsului, reciclabilitatea și impactul asupra mediului înconjurător. De asemenea, un alt avantaj este acela de a înțelege cum să reparați și să reciclați un produs în timpul vieții cât și la scoaterea din uz. Pentru a avea un procent cât mai mare de reciclabilitate, aceste pașapoarte ar trebui aplicate în viitorul apropiat pentru produsele de zi cu zi, precum electrocasnice și electronice (telefoane, televizoare, etc.), pe măsură ce lumea trece la o economie mai circulară.

Ingineri proiectanți și arhitecți pot lua decizii informate chiar în timpul etapei de planificare, având la îndemână informații detaliate despre materiale și tipul de conexiuni folosite pentru asamblare.. Această abordare susține dezvoltarea de modele creative care pot fi dezasamblate cu ușurință și de asemenea, susține produsele reversibile, modificându-le fără a deteriora structura componentelor sau materialelor implicate.

Capitolul VIII reprezintă partea de final a lucrării de cercetare, în care sunt detaliate contribuțiile proprii la rezolvarea temei de cercetare, concluziile finale și câteva direcții viitoare care nu au fost tratate suficient sau trebuie considerate pentru o dezvoltare ulterioară a cercetărilor din domeniul proiectării pentru dezasamblare și reciclare.

Teza de doctorat “*Cercetări privind posibilitățile de aplicare a tehnicilor de proiectare pentru dezasamblare și reciclare (DFD și DFR) în ingineria fabricației*” se finalizează cu enumerarea și detalierea lucrărilor științifice de cercetare realizate de autor în cadrul și în decursul activităților de cercetare și dezvoltare. La final urmează lista referințelor bibliografice care au fost consultate și au stat la baza demersului pentru realizarea lucrării de cercetare.

CAPITOLUL I

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND FOLOSIREA METODELOR DE PROIECTARE PENTRU DEZASAMBLARE ȘI RECICLARE ÎN INGINERIA FABRICAȚIEI

1.1 Proiectarea pentru excelență DFX (engl. *Design for Excellence*) – integrarea metodelor și instrumentelor de proiectare pentru dezasamblare (DFD) și reciclare (DFR) în ingineria fabricației

Proiectarea pentru Excelență - DFX (engl. *Design for Excellence*) este definită de cercetătorul Huang G. [Huang, 1996] ca un concept, o filozofie și o metodologie care ajută companiile să își schimbe modul în care gestionează dezvoltarea produselor și să devină mai competitive pe piață. De asemenea, această metodologie DFX este una dintre cele mai răspândite și utilizate principii abordate pentru îmbunătățirea și eficientizarea procesului de cercetare - dezvoltare a produselor tehnice noi sau inovative. Scopul lor principal este de a contribui la creșterea calității livrabilelor, de a reduce costurile și a timpului de livrare pentru a obține o competitivitate sporită a produselor tehnice proiectate [Huang, 1996].

Comparativ cu lucrările care se concentrează pe un singur principiu, cel al conceptului DFX, puțini cercetători au explorat utilizarea împreună a mai multor concepte DFX pentru a optimiza designul produsului dintr-o perspectivă mai holistică sau pentru a articula în general compoziția metodologiei DFX cu direcția de a dezvolta mai ușor metode noi [Radziwill, 2017].

DFD (Design for Disassembly) și DFR (Design for recycling) sunt 2 metodologi care își propun să ajute designerii să dezvolte produse luând în considerare procesul de dezasamblare a componentelor lor, făcând procesul mai simplu, mai ușor și mai puțin costisitor. Aceste metodologii sunt strâns legate de preocupările de mediu, deoarece crește durata de viață utilă a produsului și scade impactul asupra mediului și al eliminării produsului [Boothroyd, 1992]. În plus, DFD poate reduce și costurile legate de întreținere, reutilizare, refacere și reciclare a componentelor produsului. Prin urmare, DFD face posibilă creșterea duratei de viață utilă a produsului și reducerea costului de eliminare a produsului și impactul asupra mediului [Gandido, 2022].

1.2 Considerații generale privind proiectarea pentru Dezasamblare (DFD) și reciclare (DFR) în ingineria fabricației

Proiectarea pentru dezasamblare DFD și proiectarea pentru reciclare DFR au fost recunoscute ca o abordare eficientă de producție durabilă pentru a reduce impactul asupra mediului în timpul ciclului de viață al produsului. Deși producătorii din întreaga lume au demonstrat de multă vreme o prezență puternică pe piața globală, implementarea proiectării DFR și DFD în rândul producătorilor este lipsită [Ghazilla, 2015]. Aceste două metodologii de proiectare au devenit o practică de producție din ce în ce mai importantă iar responsabilitatea socială, factorii de reglementare economici și de afaceri împing

puternic multe industrii să implementeze strategii de producție durabile, cum ar fi DFR. În țările dezvoltate, un astfel de impuls este foarte vizibil în rândul industriilor care implementează diverse strategii durabile, printre care includerea DFR și DFD ca parte a strategiei lor de proiectare, raportate și documentate pe scară largă ([Cerdan, 2009], [Rahimifard, 2009]). Acest lucru este important pentru asigurarea îmbunătățirii continue către implementarea eficientă a metodelor DFD-DFR [Ghazilla, 2015].

Din punct de vedere conceptual, proiectarea pentru dezasamblare - DFD și reciclare - DFR sunt destinate managementului produsului la sfârșitul vieții - EOL. Reutilizarea și reciclarea produselor sunt pași importanți pentru a încetini rata creșteri depozitelor de gunoi, care deja sunt epuizate. În plus, atunci când un produs este trimis la o groapă de gunoi, nu numai componentele și materialele prețioase sunt irosite, precum și, pe termen lung, substanțele toxice din produs se pot scurge și contamina solul și apa subterană.

1.2.1 Proiectare pentru dezasamblare (DFD) – studiul instrumentelor în optimizarea și evoluția produselor din punct de vedere al procesului de dezasamblare

Design for Disassembly (DFD) este o metodologie de proiectare specială care face parte din conceptul DFX. Aceasta sprijină inginerii în dezvoltarea de produse industriale care pot fi ușor demontate în componente individuale. Proiectarea pentru dezasamblare (DFD) este un concept de design pe care ingineri proiectanți îl folosesc pentru a facilita procesul de dezmembrare a produselor [Ozen, 2017], iar în general, DFD implică [Favi, 2019]: simplificarea procesului de dezasamblare, reducerea timpului și costurilor necesare pentru dezasamblare- și permiterea recuperării componentelor și materialelor.

Proiectarea pentru dezasamblare (DFD) are la bază 3 concepte mari Reducere-Reciclare-Reutilizare (figura 1.3.) și este o metodologie a conceptului Design for X. Este un principiu în creștere pentru domeniul proiectării mecanice și este un factor important în proiectarea pentru mediu (DFE) [Rios, 2015].

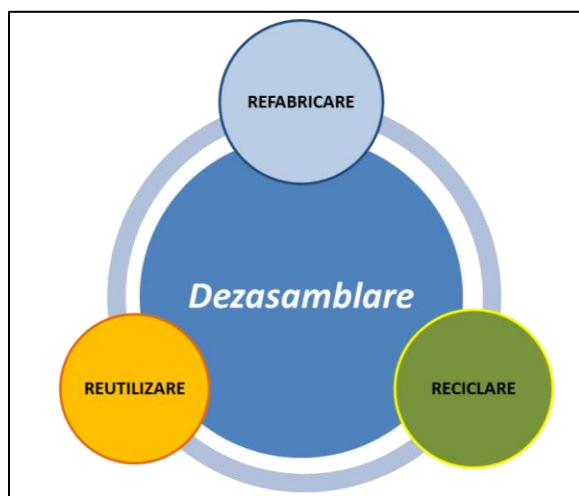


Fig. 1.3. Baza principiului Design for Disassembly (DFD), cei 3R: re-fabricare, reutilizare și reciclare (prelucrare după [Rios, 2015])

De asemenea, fiind o conștientizare ecologică la nivel global anumiți cercetători, ca Warnecke și alții [Warnecke, 1992] au creat ghiduri de proiectare DFD care sunt folosite și în ziua de astăzi (tabelul 1.4) în așa fel încât produsele după ce își termin ciclul de viață ele să fie reparate/refabricate, refolosite și reciclate pentru sustenabilitate mediului înconjurător.

1.2.2 Proiectare pentru reciclare (DFR) – studiul instrumentelor în optimizare și sustenabilitatea reciclării produselor

Proiectarea pentru reciclare (DFR) depinde de rezultatul bun al proiectării pentru dezasamblare (DFD). Aceste două principii desprinse din proiectarea pentru excelență (DFX) sunt strâns legate, deoarece fac parte din metodologia proiectării pentru mediu (DFE) și ar trebui aplicate împreună în timpul dezvoltării produsului de proiectare. DFR se concentrează pe reciclabilitate, rata maximă de dezasamblare și tratarea produsului la sfârșitul vieții.

Design for Recycling (DFR) este o metodologie care urmărește reducerea impactului asupra ciclului de viață al produsului iar rolul acestei metodologii care face parte din DFX este acela de a proiecta componente, ansamble și produse care au un grad de reciclabilitate la sfârșitul de viață a produsului - EOL [Maris, 2014]. Potrivit Comisiei Europene 2024 [W, 003], 80% din impactul asupra mediului legat de un produs este determinat în faza de proiectare. Având în vedere acest lucru, nu se conștientizează cât de importantă este de fapt faza de proiectare a unui produs. Economia circulară (CE) este un concept de modele economice în care se urmărește creșterea duratei de viață a produselor și a materialelor utilizate prin introducerea acestora în cicluri în buclă închisă. Acest lucru se face prin reparații, recondiționări etc. înainte ca produsul să fie reciclat pentru a închide bucla. Acesta este un flux mai sustenabil în comparație cu fluxul liniar, în care produsele sunt utilizate și aruncate. Primul pas în CE este proiectarea produselor care pot fi ușor actualizate și reparate. Un alt aspect al CE este proiectarea pentru reciclabilitate, cu scopul de a pune materialul folosit într-o buclă închisă cât mai mult timp posibil [den Hollander, 2017].

1.3 Contribuția metodelor DFX (DFD și DFR) pentru sprijinirea economiei circulare - CE (engl. circular economy) în ingineria fabricației

În ultimii ani, din cauza schimbărilor de reglementare, conceptul de Economie Circulară (CE) a început să joace un rol fundamental în multe afaceri. CE își propune să păstreze valoarea produsului cât mai mult timp posibil prin recircularea materialelor tehnice în economie, prin strategii precum proiectarea de produse reutilizabile și ușor de recuperat ([Jabbour, 2019], [Dias, 2022]). CE este văzut ca un concept larg care acoperă o varietate de subiecte și sectoare. Au fost dezvoltati mai mulți indicatori pentru a evalua circularitatea produselor și proceselor. O revizuire cuprinzătoare a indicatorilor CE la nivel de produs a fost efectuată de Jerome și alții [Jerome, 2022], unde au fost analizați peste 30 de indicatori iar în funcție de indicatorul selectat, sunt luate în considerare diferite faze ale ciclului de viață al produsului [Formentini, 2023].

Economia circulară a introdus o piramidă a deșeurilor (figura 1.10) pentru a indica acțiunile față de deșeuri. Piramida deșeurilor [Orbelians, 2023] arată că primul pas al procesării deșeurilor pentru o economie circulară este reducerea acestora, al doilea pas este reutilizarea directă, apoi reciclarea materialelor. Ultimii doi pași din această piramidă sunt reciclarea și eliminarea energiei. [Anne Sigrid Nordby, 2020]. Scopul principal al reutilizării în piramida deșeurilor este conservarea materialului resurselor, reducerea deșeurilor în timpul demolării și, în final, reducerea emisiilor de gaze de seră - GHG (engl. *greenhouse gas*). Strategiile pentru reducerea deșeurilor pot fi legate de adaptabilitatea construcției și de reciclarea materialelor extrase înapoi în economie, iar aceste opțiuni pot fi posibile prin proiectare având în vedere consumul viitor [Anne Sigrid Nordby, 2020].

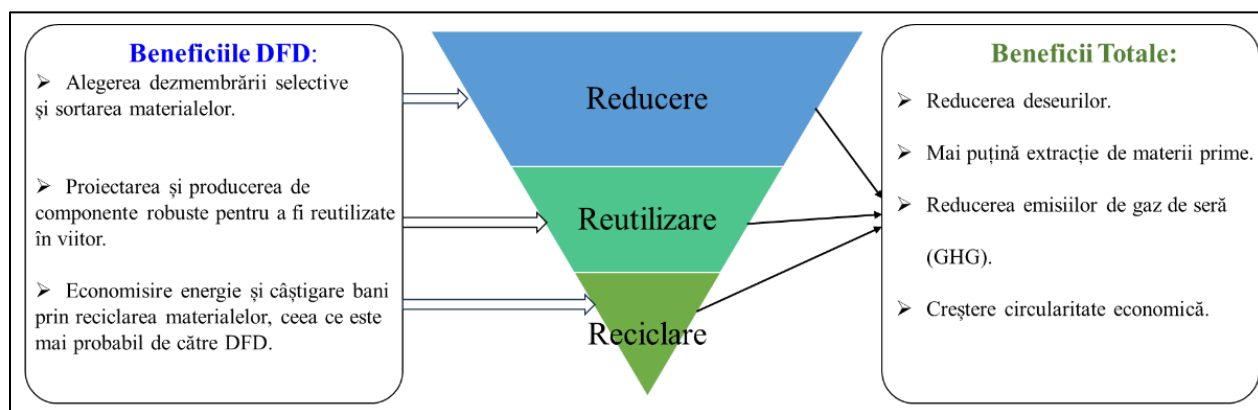


Fig. 1.10. Cei 3R (reducere, reutilizare, reciclare) în economia circulară și proiectarea DFD (prelucrare după [Orbelians, 2023])

1.4 Contribuția metodelor DFX (DFD și DFR) în abordarea ingineriei concurente sau ingineriei simultane (engl. *Simultaneous Engineering – SiE*)

Ingineria concurentă, denumită inginerie simultană sau inginerie paralelă, a fost definită în mai multe moduri de către diferiți autori, iar una dintre cele mai populară este cea definită de Winner și alții [Winner, 1988]. Aceasta afirmă că ingineria concurențială este o abordare sistematică a designului integrat și concurent al produselor și proceselor aferente, inclusiv fabricarea și susținerea acestora. Această abordare are ca scop să determine, de la începutul dezvoltării și să ia în considerare toate elementele ciclului de viață al produsului de la concepție la eliminare, inclusiv cerințele de calitate, cost, programare și utilizator [Sofuoglu, 2011].

Ingineria concurentă reprezintă capacitatea unei organizații de a realiza dezvoltarea produsului ca o serie de faze care se suprapun și care livrează produsul la timp, pentru a oferi satisfacția clienților la prețul potrivit. De asemenea, conceptul și metodologiile ingineriei concurente, reprezintă compatibilitatea fundamentală cu abordările principiilor DFX. De fapt, se poate spune că ingineria concurentă poate fi baza, temelia de susținere, pentru multe dintre principiile DFX [Huang, 1996].

Ca o concluzie finală se evidențiază că schimbarea metodelor tradiționale de lucru cu ingineria concurentă și principiile DFD - DFR implică responsabilități substanțial diferite pentru inginerii de

fabricație și de proiectare, față de cele cu care erau obișnuiți. Se pune accent mai degrabă pe munca în echipă decât pe efortul individual, iar sarcinile sunt împărțite în funcție de complexitatea lor. Aceste modificări implică mai mult decât o simplă schimbare a sarcinilor și acestea pot implica o schimbare fundamentală în modul de bază, în care sunt structurate responsabilitățile, atribuțiile, funcțiile, obiectivele și recompensele [Bralla, 1996].

1.5 Studiul și analiza metodelor principale pentru dezasamblare (DFD) în ingineria fabricației

În literatura de specialitate există mai multe tehnici și metode de analiză pentru proiectarea pentru dezasamblare (DFD) și reciclare (DFR) aplicate pentru sustenabilitatea produselor actuale. Următoarele metode pentru dezasamblare și reciclare din literatura de specialitate utilizate în industrie și mediul academic sunt propuse pentru stadiu actual:

- i. Generarea planurilor de dezasamblare utilizând planurile de asamblare;
- ii. Generarea planurilor de dezasamblare prin utilizarea reprezentări limite a unui ansamblu;
- iii. Utilizarea conceptului " *sweeping table* " pentru generarea secvențelor de dezasamblare;
- iv. Metoda grafică ȘI/SAU (engl. *AND/OR*);
- v. Diagrama directă (engl. *direct disassembly diagram*);
- vi. Metoda grafică Petri Net;
- vii. Utilizarea metodei designului modular;
- viii. Utilizarea hărților de dezasamblare (engl. *dissassembly mapping method*) – metodă definită de către [De Fazio 2021].

1.5.1 Generarea planurilor de dezasamblare utilizând planurile de asamblare.

Una dintre abordările utilizate pe scară largă pentru planificarea, generarea și selecția planurilor de dezasamblare se referă la generarea planurilor de asamblare. Procesul de asamblare a fost descris în detaliu, iar legătura cu dezasamblarea a fost evidențiată. Ideea de a le analiza simultan se datorează faptului că multe probleme legate de determinarea secvențelor de asamblare sunt transferate în determinarea ordinilor de dezasamblare.

De exemplu, una dintre metodele utilizate pe scară largă care determină automat secvența de asamblare folosind metodele de proiectare CAD bazată pe caracteristici se bazează pe următoarele ipoteze [Molloy, 1991]:

- Dezasamblarea este un proces în care fiecare parte poate fi îndepărtată din structura ansamblului fără a se prăbuși;
- Montajul este procesul invers de dezasamblare.

1.5.2 Generarea planurilor de dezasamblare prin utilizarea reprezentări limite a unui ansamblu.

Anumiți autori au descris diferite metode pentru reprezentarea și generarea secvențelor de dezasamblare. A fost prezentat un algoritm de elaborare a unui arbore de dezasamblare care produce o secvență minimă de mișcări liniare pentru un robot [Woo, 1991]. Pentru a construi arborele de dezasamblare, este descrisă structura de date utilizată de algoritm, iar aceasta dă un ansamblu care constă dintr-un număr de componente {a, b, c, d, h, f} ca grafic delimitat. Se compune din vârfuri, muchii și fețe care sunt folosite ca elemente pentru a descrie ansamblul iar fiecare față, care reprezintă o suprafață dintr-o componentă, constă dintr-un număr de muchii. Pe de altă parte, o muchie constă din două vârfuri. iar în acest fel, o componentă poate fi descrisă prin fețe (suprafețele), muchii și vârfuri (figura 1.17).

1.5.3 Utilizarea conceptului "sweeping table" pentru generarea secvențelor de dezasamblare prin utilizarea reprezentări limite a unui ansamblu.

Pentru ansamblurile complexe, Lee și Kumara [Lee, 1992] au introdus o nouă abordare algoritmică pentru generarea unui plan de dezasamblare, care include direcțiile de dezasamblare, precum și secvențele de dezasamblare, prin spațiile de libertate și interferență pentru următoarele cazuri [Lee, 1992]:

- a. Demontare și montaj complet;
- b. Înlocuirea pieselor prin demontare individuală;
- c. Înlocuirea pieselor prin demontarea grupului.

Această metodă sugerează că dezasamblarea unei părți particulare dintr-un ansamblu depinde de gradul de libertate și de gradul de interferență care acționează asupra acelei părți de către celelalte părți. Informațiile necesare pot fi găsite într-o matrice care conține gradul de libertate a elementelor din prima coloană iar pe de altă parte, primul rând dă numărul de componente din ansamblu să fie dezasamblate. În plus, o valoare într-o celulă reprezintă părțile și în ce direcții ar trebui să fie dezasamblate pentru a ajunge și a elimina partea din celula de sus a aceleiași coloane iar astfel de activități sunt rezumate pentru fiecare parte și pentru fiecare direcție. Acest lucru este folosit pentru a crea un concept de tip "sweeping table" care conține gradul de libertate și gradul de interferență a fiecărei părți (tabelul 1.5).

1.5.4 Metoda grafică ȘI/SAU (engl. AND/OR).

Abordare bazată pe metoda grafică reprezintă de obicei structura unui sistem, proces, produs, organizație și pot fi considerate ca o abstractizare a relațiilor. Teoria graficelor a fost folosită ca un instrument puternic pentru a rezolva problemele de planificare a dezasamblării și a modelului de reprezentare, cum ar fi diagrama de conexiune și graficul ȘI/SAU, și este de obicei utilizată în astfel de metode. Caracteristicile și funcțiile unui sistem de dezasamblare sunt exprimate în mod explicit în grafic, iar diferiți algoritmi de căutare sunt aplicați pentru a găsi toate secvențele de dezasamblare fezabile în funcție de constrângerile topologice, geometrice și tehnice [Zhu, 2017].

Există mai multe tipuri de grafice care pot fi utilizate pentru a trata problemele de dezasamblare, așa cum este ilustrat de o serie de cercetări, de exemplu Homen de Mello și Sanderson [De Mello, 1990], Kaebnick, O'Shea și Grewal [Kaebnick, 2000]. Aceștia au transferat problemele de dezasamblare în reprezentări grafice introductive. Este de un interes deosebit faptul că teoria graficelor s-a dovedit a fi un instrument puternic pentru a rezolva problemele secvenței de dezasamblare [Penev, 1996]. Teoria graficelor preferată pentru problemele de dezasamblare este teoria ȘI/SAU [Dong, 2011].

1.5.5 Diagrama directă de dezasamblare (engl. *direct disassembly diagram*)

Diagrama directă de dezasamblare [Tang, 2000] este o metodă de aplicare directă a graficului ȘI/SAU produselor pentru a obține toate secvențele posibile de dezasamblare. Această metodă este potrivită pentru dezasamblarea produselor formate dintr-un număr mic de piese ($n \leq 10$). Diagrama directă are ca punct de pornire un nod, care reprezintă ansamblul și se termină cu un alt nod care conține toate părțile demontate fezabile, așa cum se arată în figurile 1.20 și 1.21 (exemplu din lucrarea de cercetare “*Design for disassembly: a methodology for identifying the optimal disassembly sequence*” [Cappelli, 2007]). Nodurile intermediare arată câte moduri există pentru dezasamblarea diferitelor părți iar săgețile reprezintă modalitățile fezabile de dezasamblare.

1.5.6 Metoda grafică Petri Net

Abordarea bazată pe rețeaua Petri pe lângă abordarea tradițională a analizei de dezasamblare bazată pe grafice, Petri-Net (PN), ca instrument grafic și matematic, oferă un mediu uniform pentru modelarea și analizarea evenimentelor discrete statice și dinamice [Zhu, 2017].

Rețelele Petri (PN) oferă o metodă matematică foarte promițătoare în generarea secvenței de dezasamblare iar „Rețelele Petri, ca instrument grafic și matematic, oferă un mediu uniform pentru modelarea, analiza formală și proiectarea sistemelor de evenimente discrete [Tang, 2000].

Trebuie remarcat faptul că rețelele Petri, ca instrument grafic și matematic, oferă un mediu uniform pentru modelarea și analizarea evenimentelor discrete statice și dinamice. Prin urmare, ele oferă o metodă foarte promițătoare pentru generarea secvenței de dezasamblare [Zhu, 2017].

1.5.7 Utilizarea metodei designului modular

Smith și Yen [Smith, 2010] definesc metoda designului modular ca gruparea pieselor în module și îndepărtarea lor în paralel, pentru a face piesele mai ușor de îndepărtat și pentru a reduce timpul și costul de demontare. Pe mai departe pentru a exemplifica metoda designului modular se prezintă un exemplu de structură de produs (figura 1.22), din lucrarea de cercetare “*A novel selective parallel disassembly planning method for green design*”, [Smith, 2015].

Structura produsului descris în figura 1.22 conține nouă părți (cinci componente și patru elemente de fixare). Componenta selectată pentru dezasamblare este c3 iar utilizând noua metodă selectivă de

planificare a dezasamblării paralele poate elimina componenta c3. Metoda poate grupa piese în module, elimină module pe rând și, prin urmare, poate elimina mai multe piese în același timp. De asemenea, poate grupa componentele și elemente de fixare (c1, c2, f1) în module, poate elimina modulele f4, (c1, c2, f1), f2 și c3 pe rând [Smith, 2015].

1.5.8 Utilizarea hărților de dezasamblare (engl. *disassembly mapping method*)

Metoda „*Disassembly Map*” a fost dezvoltată de profesioniștii în proiectarea conceptuală în contextul unui proiect de cercetare privind proiectarea pentru reparații [De Fazio, 2019], în colaborare cu o companie producătoare. Scopul hărți de dezasamblare este de a ajuta proiectanții să evalueze ușurința de dezasamblare și repararea produselor de uz casnic. Harta de demontare se concentrează pe proiectarea pentru dezasamblare pentru a facilita repararea. Aceasta este un instrument de vizualizare pentru a interpreta cu ușurință parametrii și atributele [Campos Soto, 2023]. Sunt abordați următorii parametrii: componentele țintă, secvența de demontare, tipul de instrumente și acțiuni, penalități de demontare și timp de demontare.

Un exemplu de hartă de dezasamblare a unui aspirator realizată de către De Fazio și alții [De Fazio, 2021] este detaliată în figura 1.24 și are ca rezultat pașii necesari pentru a demonta produsul și timpul necesar pentru a realiza acest lucru. Această hartă include următoarele atribute extinse în legendă [Campos Soto, 2023]: tipul de mișcare, conectori, intensitatea forței, tipul instrumentului, penalități, componentele țintă.

1.6 Rolul metodelor de proiectare DFD și DFR în cadrul procesului de dezvoltare a produsului (PDP) în ingineria de fabricație

Dezvoltarea produsului numită și managementul produselor noi reprezintă o serie de pași care includ faza de concept, proiectare, dezvoltare și comercializarea bunurilor sau serviciilor nou create sau rebrenduite. De asemenea, dezvoltarea produsului include întreaga călătorie a unui produs de la ideea inițială până la lansarea sa pe piață.

Metodele de proiectare DFD și DFR au un rol esențial în proiectarea conceptuală întrucât în primele etape ale procesului de dezvoltare a produsului (PDP), deciziile deliberate privind utilizarea materialelor, eficiența energetică și evitarea deșeurilor pot minimiza sau elimina impactul asupra mediului. Cu toate acestea, odată ce conceptul de proiectare este stabilit, îmbunătățirea performanței de mediu implică, în general, iterații de proiectare care necesită timp. Prin urmare, proiectarea pentru dezasamblare și reciclare poate implica activități pe tot parcursul procesului de dezvoltare a produsului și necesită o abordare interdisciplinară (designul industrial, ingineria, achizițiile și marketingul lucrează împreună în dezvoltarea de produse ecologice). În multe cazuri, profesioniștii în dezvoltarea de produse cu pregătire DFE conduc eforturi de sustenabilitate a mediului în cadrul unui proiect, dar cu toate acestea, toți membrii echipei de dezvoltare a produsului beneficiază de înțelegerea principiilor DFE [Ulrich, 2016].

1.7 Studiul și analiza proiectării pentru asamblare (DFA) versus proiectarea pentru dezasamblare (DFD)

În ultimele două decenii proiectarea pentru asamblare – DFA (engl. *design for assembly*) a primit un efort considerabil de cercetare iar Boothroyd Geoffrey [Boothroyd, 1992] a dezvoltat instrumente de proiectare pentru asamblare relativ sistematică. Proiectarea pentru dezasamblare (DFD) cât și dezasamblare în general reprezintă o problemă cheie în considerentele ciclului de viață al produsului – EOL (engl. *end of life*) în două moduri [Jovane, 1993]. Dewhurst [Dewhurst, 1993] consideră în primul rând că dezasamblarea corectă este o cerință pentru extinderea duratei de viață a produsului și reducerea costurilor de service iar în al doilea rând, dezasamblarea este un pas important pentru re-fabricarea unui produs prin care un procent mai mare de material este reutilizat și aplicată proiectarea pentru reciclare (DFR). Problema designului pentru dezasamblare (DFD) a atras o atenție tot mai mare în ultimii ani. De asemenea, în timp ce unele tehnici DFA au atins un nivel rezonabil de maturitate, metodologia DFD este încă în stadiile incipiente de dezvoltare. Au existat puține cercetări cu privire la relația dintre DFA și DFD, mai ales în ceea ce privește implementarea lor [Tavakoli, 2003].

În primele etape ale cercetării DFD, a existat tendința de a crede că majoritatea îmbunătățirilor DFA ar cauza dificultăți la dezasamblare dar pe măsură ce problemele DFD au fost explorate în continuare, relația dintre DFA și DFD a atras mai multă atenție. Unii cercetători, Rosen și alții [Rosen, 1996] cred că liniile directe DFA au un efect pozitiv asupra DFD și invers [Massous, 2003].

1.8 Analiza beneficiilor aplicării principiilor de DFD și DFR ținând cont de durata de viață a produselor

Dezasamblarea și reciclarea este considerată în general o strategie importantă pentru atenuarea presiunilor societății asupra mediului (se economisesc resursele naturale, se reduc emisiile și se reduce sarcina deșeurilor solide). În același timp, reciclarea creează locuri de muncă și atrage investiții iar în ultimii ani, multe țări au înregistrat creșterii mari ale reciclării. Pe lângă cauzele interne, comerțul internațional a jucat un rol important în extinderea sectorului global de reciclare iar în ultimele decenii,

Proiectarea pentru dezasamblare și reciclare aduce anumite beneficii dacă este tratată încă de la început, iar companiile ar investi într-un design care este sustenabil pe viitor. Aceste beneficii sunt enumerate ca fiind de mai multe categorii:

i. Beneficii sociale și pentru mediu

Se presupune pe scară largă că reciclarea este benefică pentru mediu deoarece [Craighill, 1996], încetinește epuizarea resurselor și limitează utilizarea spațiului depozitului de deșeuri. Cu toate acestea, reciclarea generează și un impact semnificativ asupra mediului prin colectarea, sortarea și prelucrarea materialelor în produse noi. Prin urmare, nu este clar când reciclarea trebuie să fie preferată utilizării mărfurilor virgine sau când recuperarea deșeurilor ar trebui să înlocuiască depozitarea sau incinerarea.

Datorită diferențelor de efecte asupra mediului, studiile despre oportunitatea reciclării conduc uneori la concluzii opuse ([Leach, 1997], [Ackerman, 2013], [Bartelings, 2005], [Eriksson, 2010]).

ii. Beneficii economice

Pe lângă economiile făcute (taxe de eliminare, echipamente grele, valoarea de revânzare), dezasamblarea ar stimula crearea unei piețe noi pentru materialele salvate, dincolo de facilitățile existente [Chini, 2004]. Oportunități mari ar putea apărea și din deservirea și facilitarea legată de DFD (dezasamblarea, reciclarea și reutilizarea materialelor) iar pe măsură ce aceste practici devin populare și bine acceptate, beneficiile ar deveni mai evidente. Industria prelucrătoare ar avea oportunitățile de a-și face produsele să devină mai ușor de dezasamblat pentru a exploata noi piețe [Rios, 2015].

1.9 Concluzii

Principalul scop descris în capitol I este de a prezenta o vedere generică la nivel de produs, a unui concept sau filosofie de proiectare pentru sustenabilitatea produselor. Aceasta urmărește să detalieze și să realizeze o evaluare a produselor care sunt implicate în ciclul de viață al produselor după prelucrare și asamblare, și mai apoi dezasamblare și ulterior reciclare.

În ziua de astăzi de conștientizare ecologică, obiectivele de sfârșit de viață, cum ar fi: reutilizarea componentelor (componente dintr-un produs la sfârșit de viață utilizat fără modernizarea într-un produs nou), re-prelucrarea (componente dintr-un produs scos din uz utilizat într-un produs nou după un upgrade tehnologic) și reciclarea (reutilizarea la nivel de material, cum ar fi reciclarea materialelor plastice), constituie unele dintre cele mai importante motive pentru dezasamblarea produselor. Acest lucru poate fi atribuit impactului uluitor al deșeurilor industriale și casnice asupra mediului.

De asemenea, ingineria concurentă încurajează dezvoltarea holistică a produsului, luând în considerare toate aspectele produsului în deciziile de proiectare. Tehnicile „*Design for X*” (DFX) descrise în capitol I sunt populare pentru a face acest lucru, dar fiecare se concentrează doar pe un singur aspect al produsului (fabricare, cost, dezasamblare, reciclare, etc.). Pentru a oferi o abordare holistică cerută de ingineria concurentă, aceste tehnici trebuie reunite, dar acest lucru a primit puțină atenție în literatură.

Tehnicile DFX existente pentru dezasamblare și reciclare sunt comparate pentru a vedea cum pot fi utilizate împreună. Astfel este evidențiată importanța relaționării tehnicilor DFX cu scopul general de abordare a unui produs, nu doar cu alte concepte DFX.

Deși tehnicile DFX sunt menite să susțină ingineria concurentă, fiecare se concentrează pe un aspect individual al produsului și în literatura de specialitate s-a lucrat cu privire la modul în care cele două se leagă de fapt împreună.

Aceste puncte descrise evidențiază importanța deciziilor de proiectare în inginerie simultană și, ca instrumente care sprijină această abordare, tehnicile DFX trebuie să fie legate de luarea deciziilor de proiectare mai amplă.

Proiectarea pentru reciclare și dezasamblarea ca parte a filosofiei DFX este o strategie importantă de management a mediului pentru producătorii de produse. Totuși, eforturile DFR și DFD pot necesita o investiție semnificativă de timp și resurse și pot, de asemenea, să concureze cu alte cerințe importante de proiectare în timpul fazei de proiectare a produsului. Prin urmare, este avantajos să se concentreze eforturile DFR și DFD asupra acelor strategii care sunt cele mai eficiente pentru îmbunătățirea reciclabilității produselor.

De asemenea, în capitolul I a fost prezentat că există mai multe linii directoare DFR și DFD pentru produse care nu sunt întotdeauna eficiente pentru îmbunătățirea reciclabilității componentelor. Evaluarea și prioritizarea ghidurilor DFR furnizate, pot fi utilizate pentru a ajuta la prioritizarea strategiilor de proiectare pentru reciclare, astfel încât atât reciclabilitatea produsului, cât și productivitatea proiectării să fie maximizate.

Fiecare dintre aspectele de proiectare pentru dezasamblare discutate pot îmbunătăți procesul de dezasamblare, dar cu toate acestea, ele contribuie în moduri diferite. Sinergia metodologiei, tehnologiei și factorilor umani servește la obținerea unui impact mai mare prin integrarea beneficiilor acestora pentru a face proiectarea pentru dezasamblare mai eficientă și completă. Toate aspectele pot fi încorporate în etapa inițială de proiectare a produsului.

În capitol I a studiului actual de cercetare s-a evidențiat un instrument de evaluare cantitativă care îi ajută pe ingineri proiectanți să aleagă modele de produse care sunt mai potrivite pentru reciclare. Două aspecte sunt critice pentru evaluarea reciclării:

- în primul rând necesitatea de a combina mai multe obiective de proiectare, cum ar fi reducerea costurilor și reducerea deșeurilor;
- în al doilea rând incertitudinea privind condițiile viitoare de reciclare, cum ar fi prețul materiilor prime, rafinarea tehnologiilor de proces și dezvoltarea taxelor și reglementărilor de descărcare.

Ambele aspecte au fost tratate cu succes prin integrarea metodelor de proiectare probabilistică în conceptul teoriei utilității. Reciclarea eficientă necesită adesea o anumită cantitate de dezasamblare iar prin urmare, în evaluare trebuie luate în considerare posibilitățile de dezasamblare a produselor uzate în componente.

Determinarea celei mai bune secvențe de dezasamblare este scopul principal al planificării procesului de dezasamblare. Cea mai bună secvență de dezasamblare decide cea mai bună ordine pentru separarea unui produs în părțile sale constitutive, componente sau alte grupări. De-a lungul ultimilor ani au fost dezvoltate multe metode noi pentru a genera secvențe de dezasamblare și a determina ruta cea optimă iar aceasta devine o problemă din ce în ce mai importantă în studiul dezasamblării.

Graficele ȘI/SAU pot fi folosite pentru a reprezenta toate posibilitățile de dezasamblare fezabile din punct de vedere tehnic într-o singură descriere. Pe baza modelului grafic ȘI/SAU, este dezvoltat un

nou grafic de recuperare prin includerea opțiunilor de reciclare pentru fiecare componentă. Astfel, problema identificării strategiei optime de reciclare se transformă într-o problemă de căutare grafică.

Ca o concluzie ghidurile de proiectare DFA și DFD par să se suprapună foarte mult, iar în prezent, problemele DFA și DFD par să fie luate în considerare separat în practica de proiectare. De asemenea, este dificil să găsești eforturi de cercetare care să se ocupe de considerentele DFA și DFD simultan.

Lipsa de claritate cu privire la ce și cum vor fi stocate informațiile în pașaportul digital al produselor face în continuare dificilă proiectarea conceptuală pentru sprijinirea economiei circulare. Cu toate acestea, este clar că schimbul de informații oferă un potențial mare pentru sectorul gestionării deșeurilor. Scopul unei economii circulare poate fi atins doar dacă sectorul de gestionare a deșeurilor și fluxurile sale de materiale joacă un rol central. Actuala discuție politică despre DPP-uri se bazează puternic pe faza de producție, în timp ce scoaterea din uz a produsului nu este adesea în centrul atenției. Conceptul de pașaport a produselor este un prim pas către prezentarea modulului de utilizare a informațiilor pentru EOL. Pentru a reflecta mai bine calea de gestionare a deșeurilor vor fi necesare module mai specifice ale diferiților responsabili pentru introducerea datelor și, prin urmare, conceptele și instrumentele ar trebui extinse.

După consultarea în detaliu și profunzime a stadiului actual al cercetărilor din domeniul proiectării pentru excelență – DFX (engl. Design for Excellence), mai precis proiectarea pentru dezasamblare (DFR) și reciclare (DFR) sau evidențiat anumite limitări în ceea ce privește partea de sustenabilitate a produselor (re-fabricare, reutilizare și reciclare). De asemenea, anumite informații și rezultate nu sunt disponibile în domeniul proiectării pentru dezasamblare și reciclare, ceea ce face ca aceste neajunsuri și limitări să fie transformate ulterior în obiective de cercetare care sunt detaliate în capitolul II.

CAPITOLUL II.

OBIECTIVELE TEZEI. METODOLOGIA DE CERCETARE

1.1 Particularitățile de proiectare pentru conceptele DFD și DFR

Analiza de studiu bibliografic realizată în această lucrare și implicit în capitolul 1 asupra stadiului actual al cercetărilor privind folosirea metodelor de proiectare pentru dezasamblare și reciclare pentru sustenabilitatea produselor, a scos la iveală anumite particularități care au fost parțial dezvoltate și urmează să fie aprofundate în continuare:

- i. Fiecare principiu al DFX se concentrează doar pe un singur aspect al produsului (fabricare, cost, dezasamblare, reciclare, etc.), dar pentru a oferi o abordare holistică și ingineria concurentă să fie cât mai eficientă iar aceste tehnici trebuie reunite.
- ii. Un alt punct care a ieșit în evidență este lipsa clară sau interesul scăzut de proiectare conceptuală a componentelor și produselor care să fie sustenabile pentru dezasamblare și mai apoi reciclare.
- iii. Lipsa cunoștințelor principiilor DFD și DFR pentru inginerii proiectanții în faza de început al conceptului de produs.
- iv. Dezvoltare insuficientă a unui plan de sustenabilitate (fabricare – utilizare – dezasamblare – re-fabricare sau reciclare) a produsului pentru ciclu complet de viață – EOL.
- v. Lipsa integrării metodelor DFD și DFR cu metodele avansate de proiectare 3D cât și cu metode care să implice modelarea parametrizată a produselor.
- vi. Lipsa unei strategii clare de proiectare conceptuală care să cuprindă fiecare etapă de proiectare și parcurgerea fiecărei metodologii a conceptului DFD și DFR.
- vii. De asemenea, pentru proiectarea pentru dezasamblare și reciclare nu există anumite programe software specifice și eficiente, cum sunt cele pentru asamblare și fabricare (Catia V5, etc).
- viii. Lipsa unor documente complete în care să fie definite anumite informații legate despre rata de dezasamblare și reciclarea unui produs în timpul vieții sau la scoaterea din uz a produsului.

1.2 Obiective teoretice și experimentale

După consultarea și aprofundarea literaturii de specialitate a stadiului actual al cercetărilor privind folosirea metodelor de proiectare pentru dezasamblare și reciclare pentru sustenabilitatea produselor de la concept până la scoaterea din uz – EOL, au fost stabilite următoarele obiective de cercetare propuse pentru a fi dezvoltate și analizate în cadrul lucrării abordate:

1. Obiective principale:
 - Utilizarea convergentă în faza de proiectare conceptuală a componentelor unui dispozitiv tehnologic (arbori și roți dințate), utilizând principiile DFX (concret DFD și DFR) împreună

cu integrarea soluțiilor avansate de proiectare 3D Solid Edge – Engineering Reference și PTC Creo Parametric pentru sustenabilitatea produselor;

- Elaborarea și proiectarea unui ansamblu mecanic - actuator liniar cu scopul de a fi analizat din punct de vedere al proiectării pentru dezasamblare DFD și reciclare DFR;
- Reproiectarea componentelor din actuatorul liniar în urma sugestiilor principiilor DFD-DFR și a analizei graficului ȘI/SAU, metodei Petri-Net și a matricilor de complexitate-accesibilitate a dezasamblării;
- Realizarea folosind fabricarea aditivă (imprimarea 3D) a unor prototipuri fizice a ansamblului actuator liniar pentru a putea fi utilizate pentru pre-validarea proiectării pentru dezasamblare și reciclare și pentru realizarea unui pașaport de reciclare;
- Analizarea și elaborarea unui „*pașaport de reciclare*” pentru actuatorul liniar ținând cont de caracteristicile mecanice, operațiile de asamblare și sculele folosite.

2. Obiective secundare:

- Elaborarea unor anumite componente tip arbori dintr-un dispozitiv tehnologic adaptabil pe o mașină unealtă cu descărcare electrică abordând în detaliu faza de proiectare utilizând calculul clasic versus integrarea soluțiilor avansate de proiectare (Solid Edge – modulul Engineering Reference);
- Realizarea unei structuri de proiectare parametrizată privind modelarea 3D a ansamblelor și produselor, care să realizeze modificarea rapidă a caracteristicilor elementelor constructive în faza de proiectare conceptuală;
- Exploatarea ecuațiilor matematice în realizarea de soluții ingineresti de proiectare avansată pentru dezvoltarea durabilă a produselor;
- Abordarea de proiectare parametrizată a anumitor componente – arbori și roți dințate a dispozitivului tehnologic descris în capitolul III prin modelarea 3D a produselor și aplicarea ingineriei avansate a programului 3D Creo PTC Parametric;
- Îmbunătățirea eficacității și eficienței componentelor (arbori și roți dințate), cât și crearea de familii de produs (engl. *construction kit*) cu scopul de modificare rapidă a elementelor de design încă din faza de proiectare detaliată fără a afecta calitatea livrată;
- Evaluarea în detaliu al actuatorului liniar din punct de vedere al proiectării pentru dezasamblare DFD cât și din perspectiva proiectării pentru reciclare DFR;
- Aplicarea metodei de analiză Petri Net și a Graficului ȘI/SAU pentru evaluarea produsului inițial din perspectiva proiectării pentru dezasamblare;
- Evaluarea parametrilor de manipulare și dezasamblare a actuatorului liniar pentru definirea matricilor de complexitate și accesibilitate;
- Definirea structurii, conținutului și a procedurii de realizare a unui „*pașaport de reciclare*” generic.

De asemenea, obiectivele de cercetare propuse pentru a fi dezvoltate și analizate în cadrul lucrării au fost sumarizate cu ajutorul unei scheme logice (figura 2.1) prin care se urmărește tendința și închiderea buclei economiei circulare pentru sustenabilitatea mediului înconjurător.

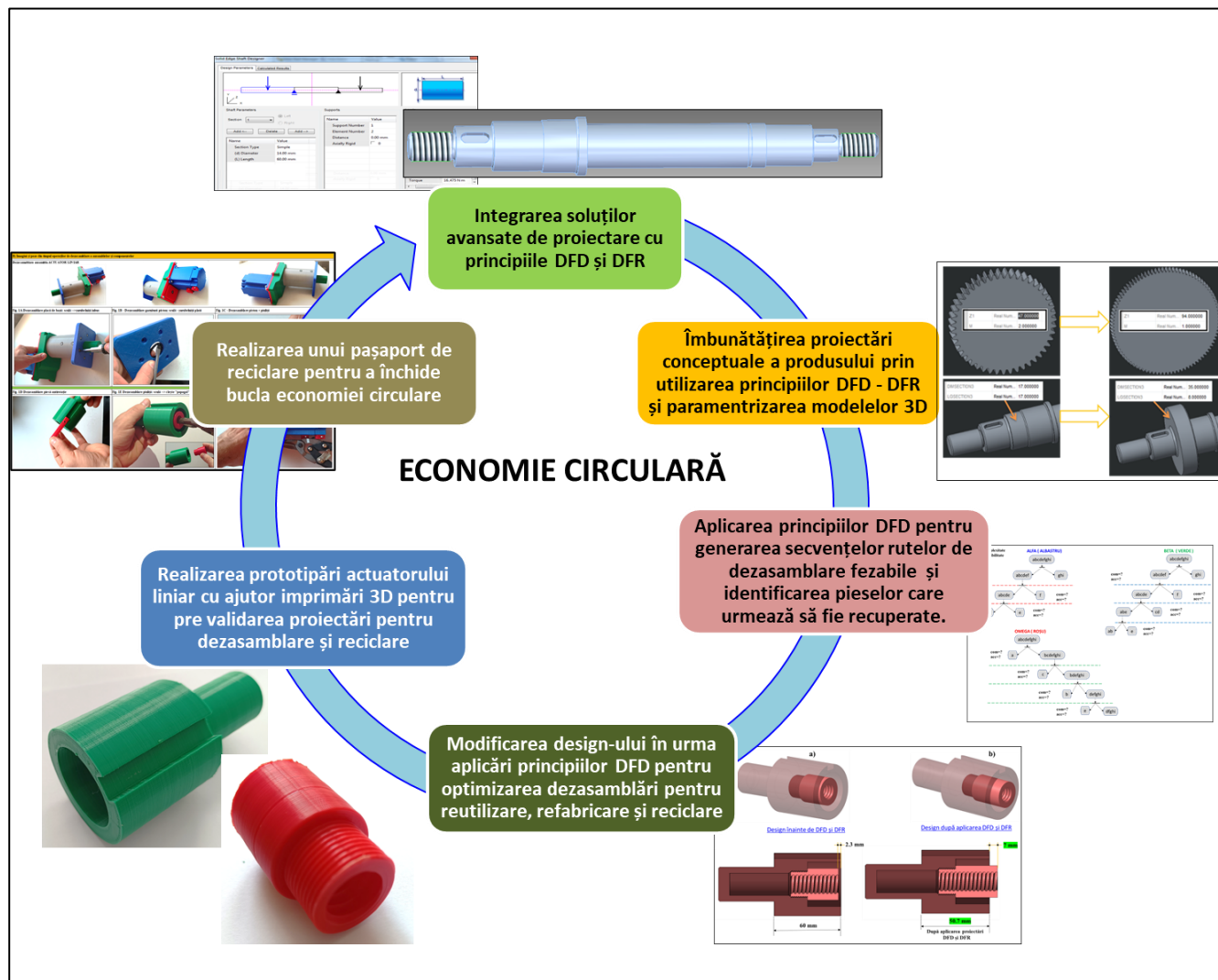


Fig. 2.1 Obiectivele de cercetare a tezei de doctorat sumarizate privind tendința și închiderea buclei economiei circulare pentru sustenabilitatea mediului înconjurător

CAPITOLUL III

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA CONVERGENTĂ A PRINCIPIILOR DFD-DFR ȘI A SOLUȚIILOR DE INGINERIE INTEGRATE AVANSATE PENTRU PROIECTAREA DURABILĂ A PRODUSELOR ÎN INGINERIA FABRICAȚIEI

3.1 Introducere. Definirea contextului și problemei actuale a cercetării

În ultima perioadă, producătorii din diferite domenii au început să pună accentul pe calitatea produselor având ca prim scop reutilizarea acestora prin întreținerea și reciclarea produselor. Astfel, pentru a supraviețui pe piață, majoritatea producătorilor au trebuit să vină cu noi idei de îmbunătățire și optimizare pentru a oferi timp și resurse necesare pentru dezvoltarea durabilă a instrumentelor și principiilor pentru proiectarea ingineriei moderne [Merticaru, 2013].

Designul modern are la baza anumite filosofii de inginerie și proiectare conceptuală care acționează astăzi, precum:

1. Proiectare pentru excelență – DFX (engl. *Design for Excellence*);
2. Dezvoltarea durabilă a produselor;
3. Inginerie integrată CAD / CAE / PLM / CAx [Merticaru, 2014].

3.2 Abordarea cercetărilor în faza inițială de proiectare analitică prin integrarea conceptului DFX (DFD, DFR) și a ingineriei integrate (CAD, CAE, PLM)

Pentru definirea cadrului de cercetare a fost inițial elaborat un model conceptual de abordare teoretică, așa cum este prezentat în figura 3.1.

Abordarea de cercetare are ca obiectiv general dezvoltarea durabilă a produselor. Problema generală a migrării cerințelor produsului (engl. *Product Requirments*) în specificații (engl. *Product Specifications*) a fost considerată ca punct inițial pentru modelul conceptual.

Putem detalia și specifica că principiile conceptului Design for Excellence (DFX) au fost luate în considerare în cadrul modelului conceptual menționat, în cazul în care un set de teorii ale designului precum Design for Manufacturing (DFM), Design for Environment (DFE), Design for Disassembly (DFD), Design for Recycling (DFR) , Design for Assembly (DFA) etc. sunt incluse. Atâta timp cât principiile studiate în lucrare DFD și DFR sunt vizate în special pentru a face obiectul studiului de cercetare, acestea sunt detaliate în cadrul modelului din figura 3.1, prin unele dintre principiile lor specifice.

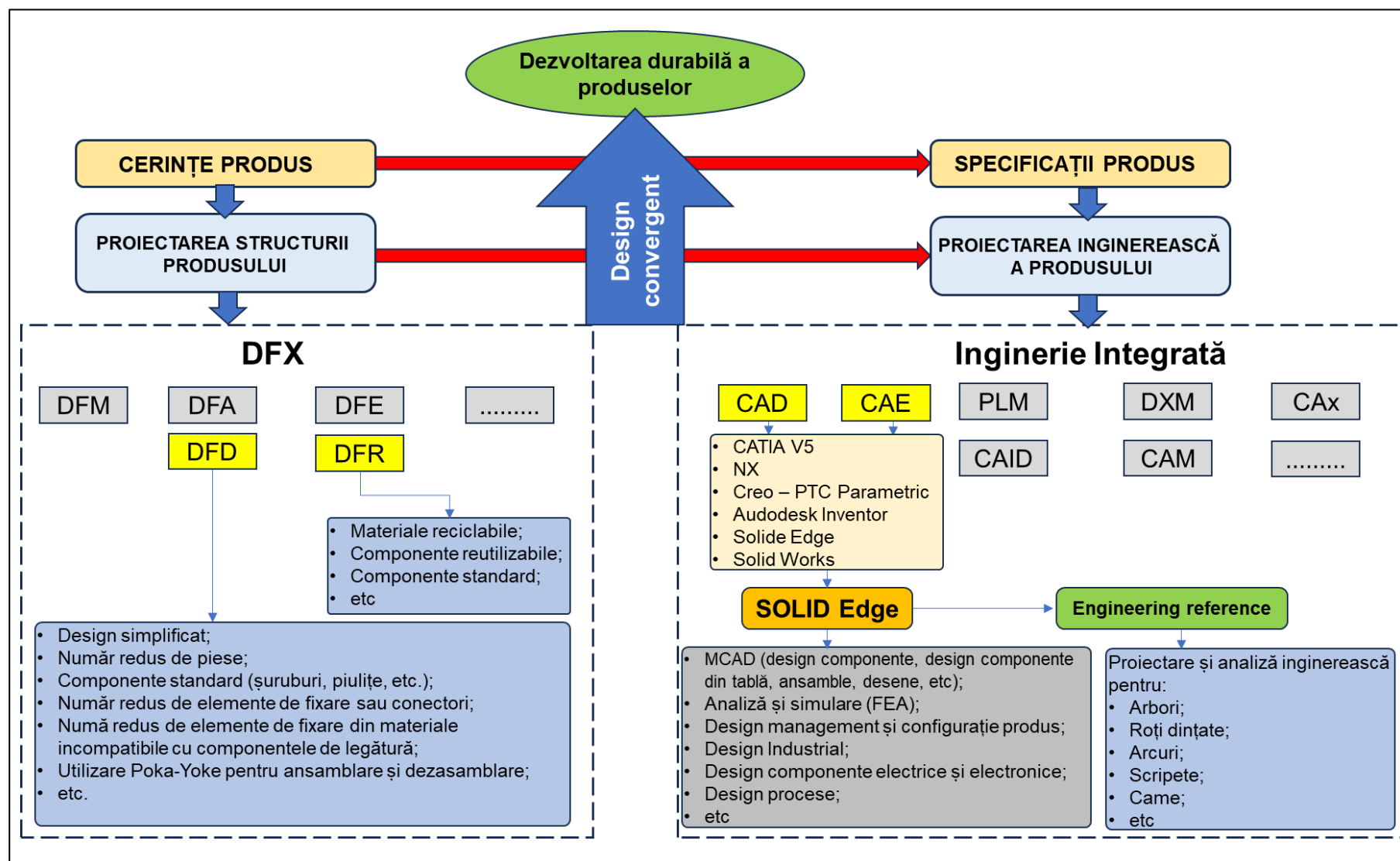


Fig. 3.1 Cadrul conceptual a proiectării analitice prin integrarea conceptului DFX (DFD, DFR) și a ingineriei integrate (CAD, CAE, PLM)

3.3 Aplicarea principiilor DFX și a inginerie integrate pentru dezvoltarea unei structuri de produse durabile pentru un dispozitiv adaptabil pe o mașină de descărcare electrică

Ca studiu de caz, se intenționează dezvoltarea unei structuri de produs durabile pentru un dispozitiv adaptabil pe o mașină de descărcare electrică cu scopul de a aborda aplicarea principiilor enunțate mai sus ale Design for Excellence (DFD, DFR).

Studiul de caz prezentat se referă, de asemenea, la performanța utilizării capabilităților avansate ale software-ului Solid Edge ca soluție CAD, care asigură parametrizarea și optimizarea structurii modelului de produs și, de asemenea, ca instrument valoros CAE (modulul Engineering Reference) care oferă calcule geometrice funcționale pentru componente mecanice (arbori și angrenaje sunt studiate în continuare).

3.3.1 Descrierea dispozitivului tehnologic

Dispozitivul tehnologic studiat și prezentat în figura 3.2, este un ansamblu adaptabil pe o mașină-unealtă cu descărcare electrică, fiind capabil să genereze profiluri cicloide bazate pe un mecanism de acționare cu mecanism dublu-planetar.

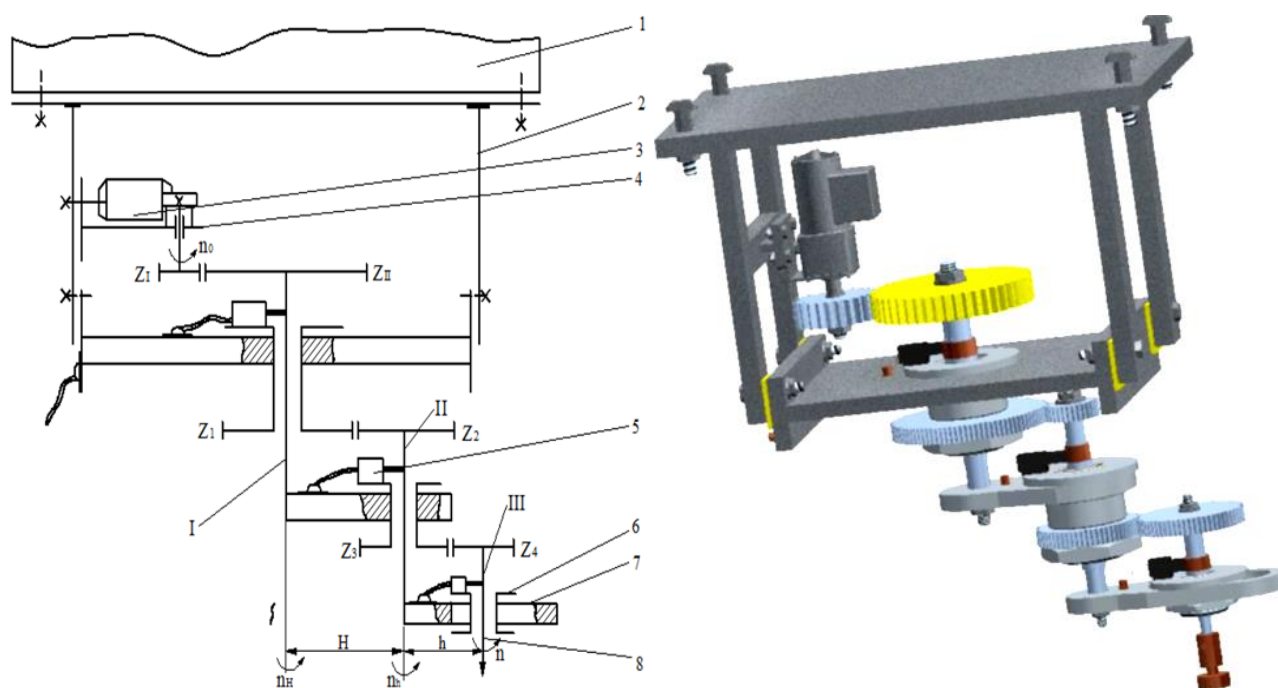


Fig. 3.2. Vedere 2D și 3D a dispozitivului tehnologic – vedere de ansamblu

3.3.2 Algoritmul proiectării pentru excelență (DFD și DFR) în proiectarea conceptuală a dispozitivului tehnologic

Principiile DFD și DFR, așa cum au fost nominalizate mai sus, au fost considerate ca având un rol important în optimizarea structurii parametrizate a dispozitivului tehnologic adaptabil pe o mașină unealtă cu descărcare electrică. Astfel, a fost oferită o soluție mai bună a produsului, un cost de producție mai mic și un timp redus pentru lansarea produsului pe piață. Piese componente ale dispozitivului (arbori, angrenaje, bușe, rulmenți) au fost concepute pentru a fi ușor reutilizabile și pentru a fi dezasamblate cu ușurință, cu un impact dăunător redus asupra mediului înconjurător și implicit asupra eficienței și eficacității structurii și funcționalității produsului.

Principiile DFD - DFR au și un alt rol important în proiectarea structurii produsului dispozitivului, urmărind trasabilitatea produsului din momentul inițial până la sfârșitul ciclului de viață al acestuia (reciclare și reutilizare). Dispozitivul adaptabil pe o mașină de descărcare electrică are o structură modulară complexă care poate genera o familie de produse, indiferent de mărime, respectând condițiile limită. Structura dispozitivului constă din mai multe părți de rezistență (cadru, plăci etc.) și o serie de elemente funcționale (angrenaje, arbori, rulmenți etc.)

În tabelul 3.1. este reprezentată lista componentelor dispozitivului tehnologic (BOM), precum și informații suplimentare despre material, greutate, descriere și cantitate.

3.3.3 Proiectarea conceptuală utilizând ingineria integrală în cadrul software-ului Solid Edge, modulul Engineering Reference

În continuare se prezintă 2 modalități de proiectare “*calculul manual*” și “*calculul automat*” pentru anumite componente ale dispozitivului tehnologic (arbori și roți dințate) utilizând funcționalitatea avansată de proiectare Solid Edge Engineering Reference. În final aceste două abordări conduc spre aceleași rezultate, dar cu eficiență și eficacitate diferită una față de cealaltă atât legat de timpii de proiectare cât și din punct de vedere calitativ.

Calculul detaliat pentru activitățile de proiectare și inginerie a fost elaborat în mod manual, fiind implicate o mulțime de sarcini de calcul și de proiectare. În calculul clasic, rezultatele nu sunt precise ca noua metodă avansată de proiectare. Anumite exemple, pentru arbori și angrenaje, sunt prezentate în continuare.

A. Calculul clasic (manual) al arborelui I folosind standarde de proiectare clasice pentru rezistența materialelor

În figura 3.4. este reprezentată diagrama de efort pentru componentul arbore I (numărul 16 din BOM) a dispozitivului tehnologic descris anterior.

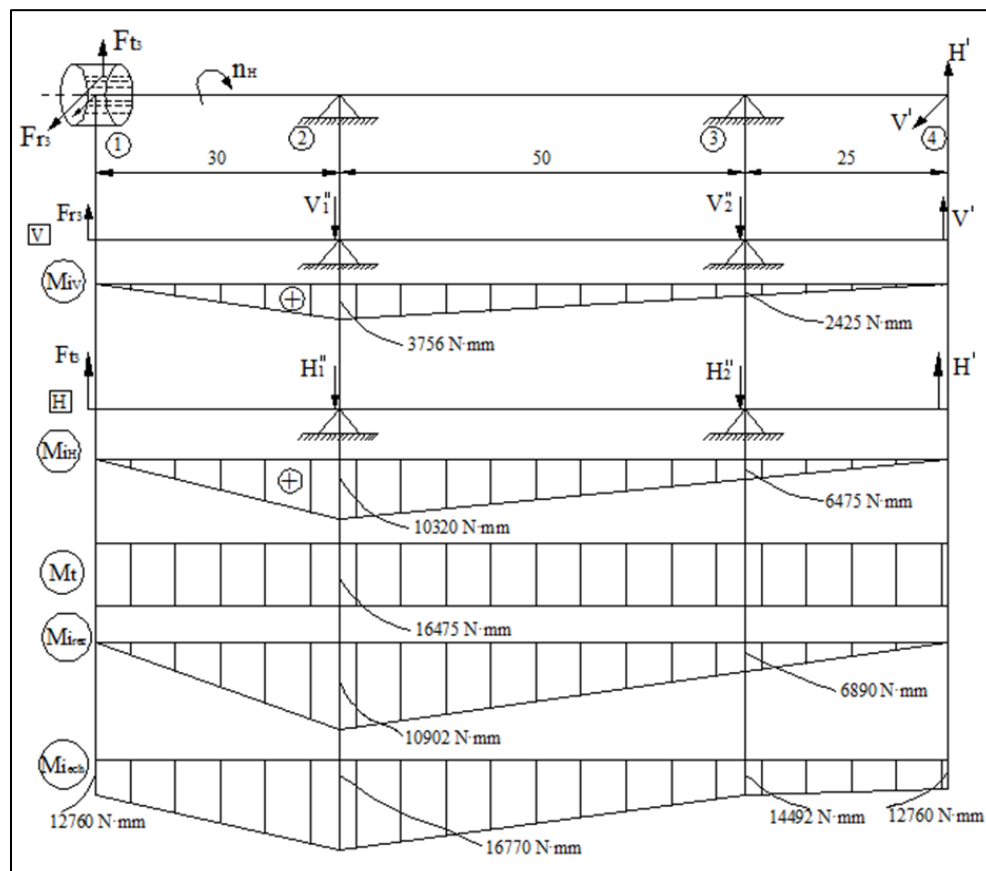


Fig. 3.4. Diagrama de efort pentru arborele I a dispozitivului tehnologic

B. Calculul automat al arborelui I folosind instrumente de inginerie integrate CAD/CAE

În figurile 3.11 și 3.12 sunt prezentate diagramele generate de modulul „Solid Edge Shaft designer” în planul XY și XZ (forță, moment, deviere, forfecare, tensiune, îndoire etc).

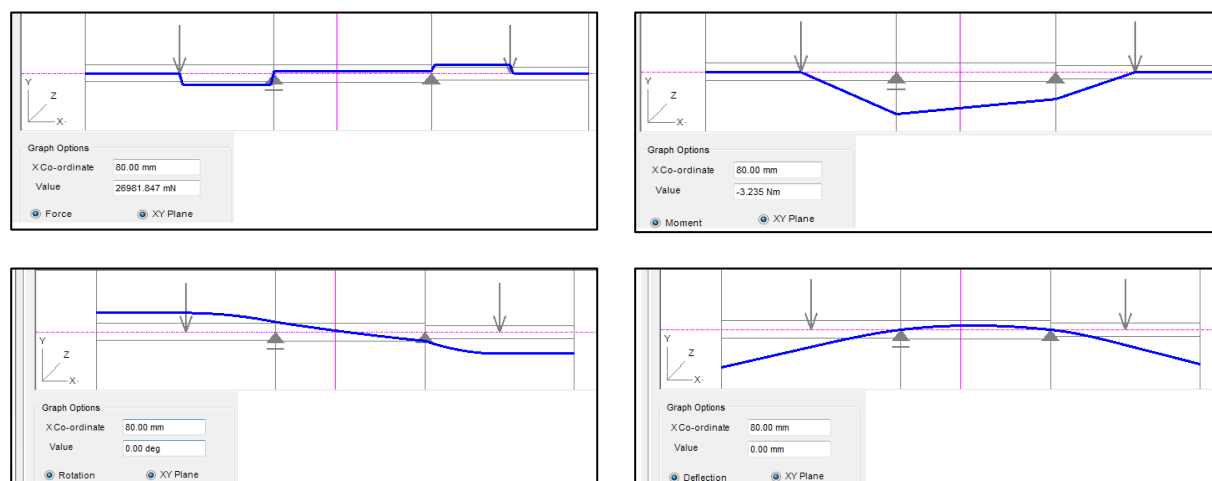


Fig. 3.11. Diagramele de eforturi rezultate cu ajutorul modulului „SE shaft designer”, în planul XY

După introducerea datelor în modulul „SE shaft designer” parte a programului Solid Edge se generează automat modelul 3D conform cu figura 3.13 pentru arborele I, dar fără anumite operații de prelucrare specifice și detaliate (filetare, frezare, găurire, etc.).

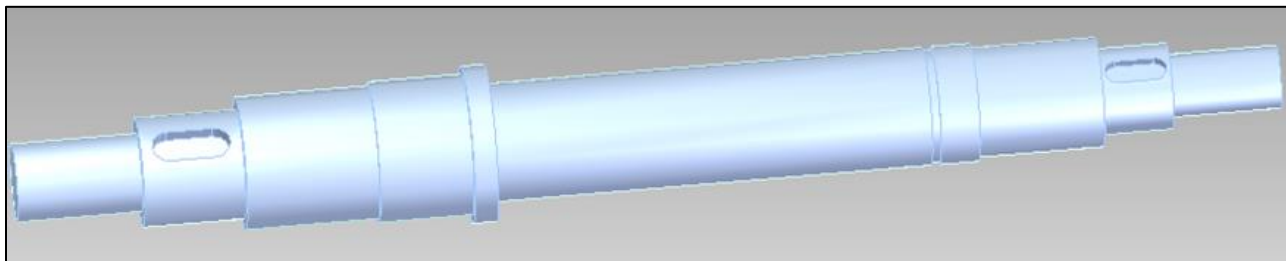


Fig. 3.13. Modelul 3D al arborelui I generat automat cu modulul „SE shaft designer”, fără a include operațiile de prelucrare specifice (filetare, găurire, frezare, etc)

Modelul 3D trebuie să fie dezvoltat în mod corespunzător în funcție de poziționarea și funcționalitatea sa în cadrul ansamblului produsului, așa cum se arată în figura 3.14.

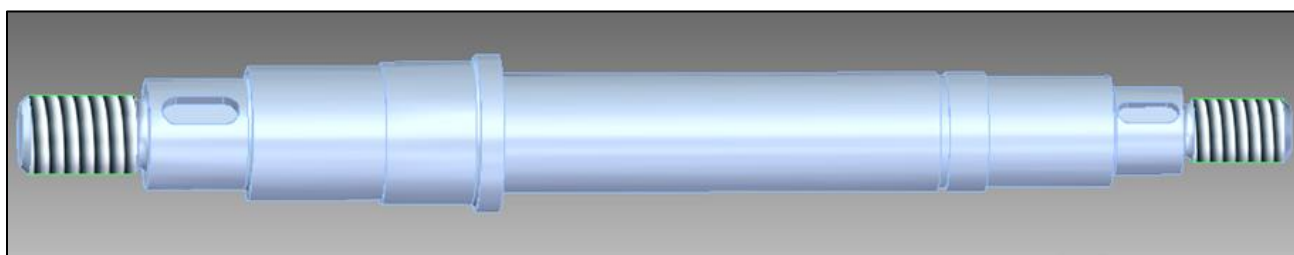


Fig. 3.14. Modelul 3D al arborelui I după integrarea operațiilor de prelucrare specifice (filetare, găurire, frezare, etc)

3.5 Concluzii

Abordarea teoretică și studiul de caz din lucrare contribuie la îmbunătățirea sustenabilității designului și dezvoltării durabile a dispozitivului tehnologic studiat. Aceste obiective au fost îndeplinite și realizate cu ajutorul utilizării principiilor de proiectare pentru dezasamblare (DFD) și reciclare (DFR), care converg cu soluțiile avansate de Inginerie Integrată (CAD/CAE/PLM/ CAX).

Instrumentele moderne de Inginerie integrată CAD/CAE (*Solid Edge Shafts și Gears Designer*), utilizate în cadrul proiectării produsului pentru dispozitivul tehnologic supus studiului, furnizează informații referitoare la optimizarea produselor și creșterea productivității designului. De asemenea, utilizarea software-urilor de proiectare 3D crește flexibilitatea realizării modelelor conceptuale a produselor și agilitatea implementării schimbărilor tehnologice.

În continuare, în capitolul IV, sunt prezentate și detaliate integrarea metodologiilor avansate de proiectare, având la bază dezvoltarea de noi produse din domeniul industrial, utilizând competențe avansate de proiectare (parametrizarea produsului 3D și realizarea unei familii de produse).

CAPITOLUL IV.

CONTRIBUȚII PRIVIND ÎMBUNĂȚĂȚIREA PROIECTĂRII CONCEPTUALE A PRODUSULUI PRIN UTILIZAREA EFICIENTĂ A PRINCIPIILOR DE DEZASAMBLARE (DFD) ȘI RECICLARE (DFR) ȘI A INSTRUMENTELOR DE MODELARE CAD PRIN PARAMETRIZAREA MODELUI SOLID 3D ÎN INGINERIA FABRICAȚIEI

4.1 Introducere. Definirea generală al proiectării conceptuale a produselor prin parametrizarea modelului solid 3D

În ultima vreme, clienții au devenit foarte riguroși în ceea ce privește calitatea produselor și de aceea producătorii au început să dezvolte familii de modele de produse parametrizate folosind instrumente software de proiectare mecanică parametrică (Creo Parametric, NX, Inventor etc.). Acest lucru a devenit realizabil pentru a satisface pe deplin nevoile clienților și pentru a respecta calitatea și condițiile de livrare a pieței ținând cont de partea de dezasamblare și ulterior reciclare.

Studiul de caz și aspectele teoretice prezentate în continuare fac parte dintr-o mare categorie de concepte fundamentale de cercetare privind optimizarea proiectării ingineriei de produse prin îmbunătățirea eficienței și eficacității activităților de proiectare, inclusiv prin încorporarea unor principii, concepte, strategii, metode cum ar fi: modelare parametrică pentru proiectare mecanică avansată, proiectarea holistică, principii a conceptului DFX.

În primul rând, este propus un model conceptual de abordare a cercetărilor, în care utilizarea modelelor matematice (ecuații și relații matematice) integrate în soluții avansate de proiectare CAD/CAE conduc la parametrizarea structurii produsului pentru obținerea unor componente (angrenaje, arbori, șuruburi, piulițe, bucși, etc.), sau familii de produse modulare (engl. *construction kit*).

4.2. Abordarea cercetării și definirea modelului conceptual

Un model conceptual de abordare al cercetărilor teoretice a fost inițial elaborat și este propus în figura 4.1. De asemenea, principiile de proiectare parametrice converg cu utilizarea unor instrumente puternice ale unei soluții CAD/CAE ingineresti avansate pentru îmbunătățirea eficacității și eficienței proiectării ingineriei de produs.

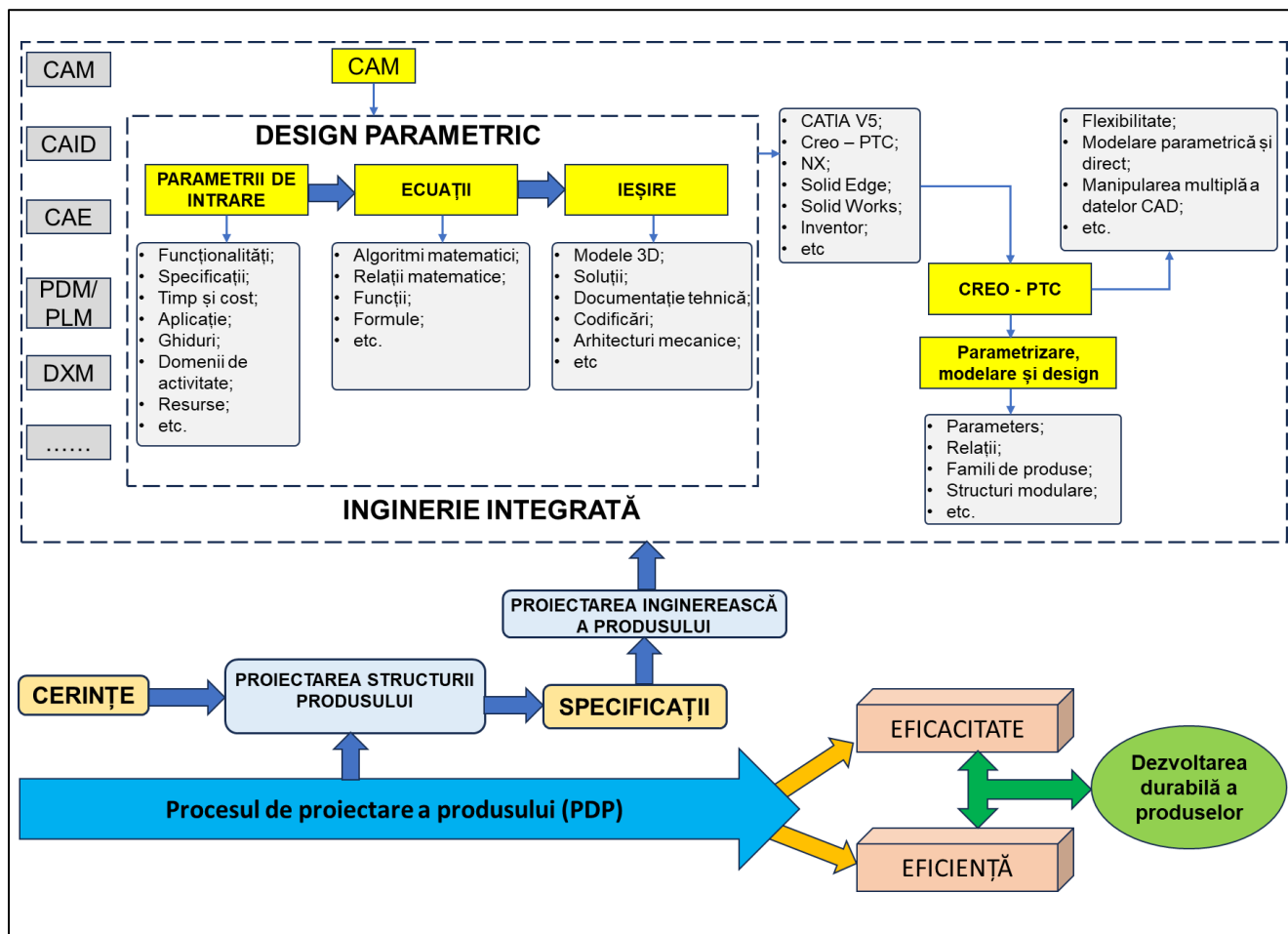


Fig. 4.1. Cadru conceptual a proiectării mecanice prin utilizarea eficientă a instrumentelor de modelare CAD prin parametrizarea modelului solid 3D

4.3. Cercetări privind proiectarea optimizată de inginerie a produselor folosind relații matematice integrate în software-ul de proiectare Creo Parametric

Ca studiu de caz, lucrarea de cercetare prezintă o abordare a aplicării principiilor de proiectare parametrizate (algoritmi, formule, relații matematice, etc) integrate în software-ul 3D Creo Parametric pentru creșterea eficacității și eficienței activităților de proiectare în dezvoltarea ansamblului de produse și modele de piese (exemplificate aici pentru piese componente precum arbori și angrenaje) pentru o construcție particulară a unui dispozitiv tehnologic. Unele concluzii adecvate sunt prezentate la sfârșit și sunt incluse și câteva indicații ale cercetărilor ulterioare.

Produsul studiat este un dispozitiv tehnologic capabil să genereze profiluri cicloide bazate pe un mecanism de acționare dublu planetar, adaptabil pe o mașină de descărcare electrică. Acest dispozitiv este detaliat și explicat în capitolul II al acestei lucrări.

Pentru a demonstra optimizarea unui design folosind relații matematice și algoritmi integrați la nivel de sistem, dispozitivul tehnologic studiat în capitolul III a fost reproiectat anterior folosind software-ul de proiectare 3D Creo PTC. Exploatarea relațiilor matematice cu ajutorul software-ului Creo Parametric CAD / CAE, este necesară pentru a crea o structură modulară și pentru a optimiza designul pentru componentele dispozitivului tehnologic prezentate în capitolul III (tabel 3.1).

Mai departe este prezentată trasabilitatea structurii de proiectare parametrizată *INPUT-EQUATIONS-OUTPUT* (INTRARE – ECUAȚII – IEȘIRE) pentru reducerea timpului de proiectare pentru arborele 1 și angrenajul Z1 din figura 4.2 (aceste modele fiind descrise în capitolul III).

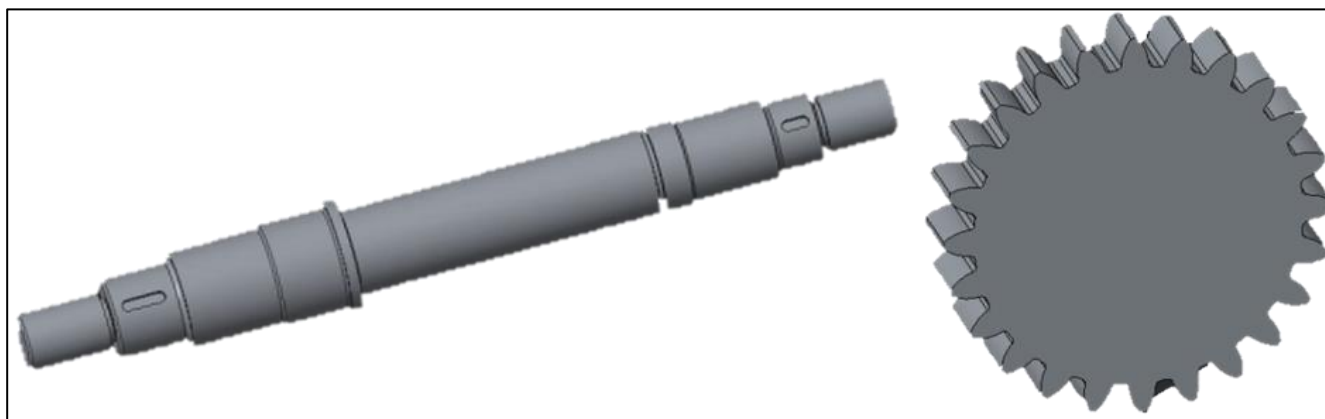


Fig. 4.2. Modele 3D generate de către software-ul Creo Parametric pentru componentele dispozitivului tehnologic: Arborele I și roata dințată Z1=24 dinți

În primul rând, pentru arborele 1 și angrenajul Z1, prezentate mai sus, sunt definiți parametri de intrare care sunt stabiliți înainte de proiectare și apoi integrați în software-ul de proiectare Creo Parametric (figura 4.3).

Name	Type	Value	Desig...	Access
DIAMSECT1	Real Num...	8.000000	☐	Full ...
RADIUS1	Real Num...	1.000000	☐	Full ...
LGSECTION1	Real Num...	16.000000	☐	Full ...
LGSECTION2	Real Num...	13.000000	☐	Full ...
DIAMSECT3	Real Num...	35.000000	☐	Full ...

Name	Type	Value	Desig...	Access
Z1	Real Num...	94.000000	☐	Full ...
X1	Real Num...	0.000000	☐	Full ...
PSI	Real Num...	8.000000	☐	Full ...
P	Real Num...	20.000000	☐	Full ...
M	Real Num...	1.000000	☐	Full ...

Fig. 4.3. Parametrii de intrare asociați de software-ul PTC Creo pentru arborele I și roata dințată Z1

După parcurgerea și identificarea datelor de intrare și aplicarea relațiilor matematice, rezultă ca date de ieșire, o structură de produs parametrică și modulară care poate fi ușor optimizată modificând doar parametrii de setare, dar ținându-se cont de condițiile limită impuse (figura 4.6).

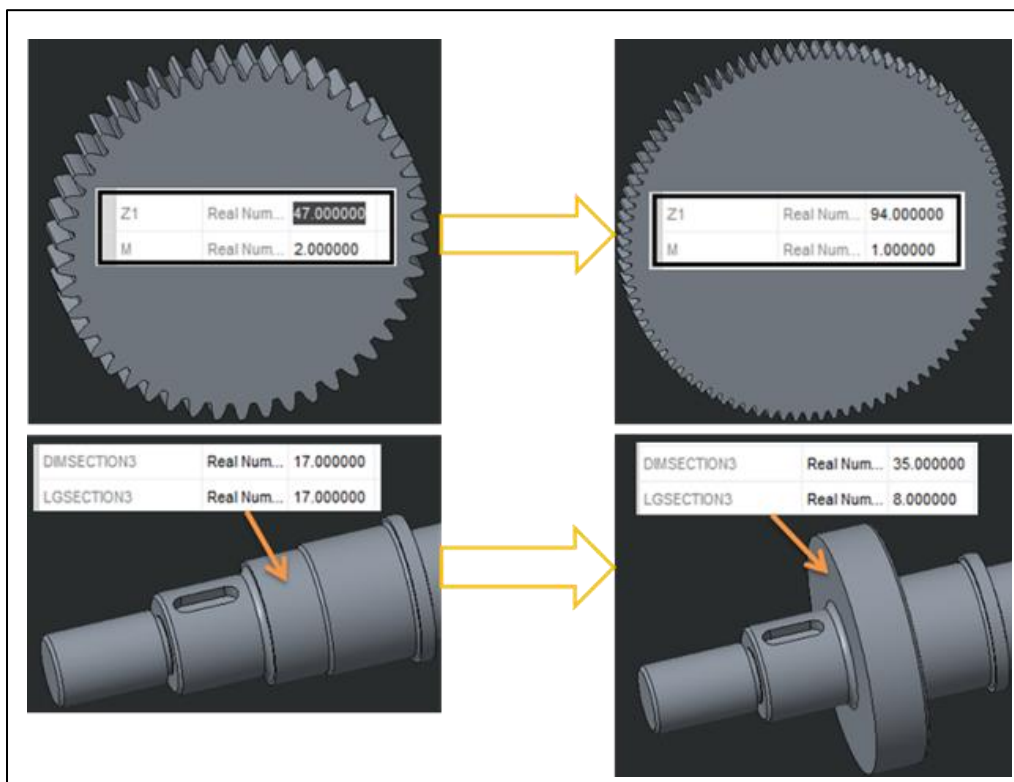


Fig. 4.6. Generarea automată a modelelor 3D: Modele 3D inițiale (partea stângă) și modele parametrizate (partea dreaptă) pentru arborele I și roata dințată Z1

În figura 4.6 se poate observa că respectând structura de proiectare parametrizată *INPUT-EQUATIONS-OUTPUT*, metoda duce la optimizarea timpilor de proiectare pentru arborele I și angrenajul Z1. Exemplu descris în figura 3.6, reprezintă modificarea numărului de dinți de la 47 în 94 și modulul din 2 în 1, rezultă un model 3D parametrizat cu $Z = 94$ și $m = 2$, respectând condițiile limită.

4.4. Concluzii

Exploatarea capacităților avansate de proiectare parametrică oferită de soluțiile software CAD/CAE prin utilizarea unor algoritmi/ecuații matematice, contribuie la îmbunătățirea eficacității și eficienței produsului, precum și a activităților de proiectare și sustenabilitate a produselor. Aceste funcții specifice ingineriei integrate sunt necesare pentru a satisface cerințele de dezvoltare a produsului final ținând cont de cerințele producătorilor.

Elementele teoretice prezentate în lucrare fac parte dintr-o categorie largă de concepte fundamentale de cercetare a ingineriei integrate. Aceste concepte ajută la optimizarea proiectării structurii produselor și a proiectării detaliate a produsului prin exploatarea flexibilității oferite de instrumentele de proiectare software CAD/CAE, inclusiv prin încorporarea unor principii, strategii și metode.

Utilizarea soluțiilor de inginerie avansată (parametrizarea modelelor 3D) îmbunătățesc dezvoltarea durabilă a produselor cu scopul de a crește flexibilitatea schimbărilor apărute în faza conceptuală de proiectare. Un alt aspect al utilizării parametrizării 3D, ar fi reducerea timpului de lansare a produsului pe piață, costuri de producție mai mici și îmbunătățirea produselor într-un timp relativ scurt prin realizarea unei structuri modulare și a unor familii de produse.

În continuare sunt identificate câteva direcții de dezvoltare a cercetării privind proiectarea parametrizată. Aceste direcții aprofundează abordarea unor alte metode și principii precum DFX (DFM, DFA, DFD, DFR, etc.), integrarea metodologiilor avansate și a tehnologiilor de proiectare pentru dezasamblare și reciclare a produselor.

CAPITOLUL V.

CONTRIBUȚII PRIVIND INTEGRAREA METODOLOGIILOR AVANSATE ȘI A TEHNICILOR DE PROIECTARE PENTRU DEZASAMBLARE (DFD) ȘI RECICLARE (DFR) A UNUI ACTUATOR LINIAR

5.1 Introducere

Proiectarea pentru dezasamblare (DFD) implică dezvoltarea de produse ușor de separat și astfel facilitează reciclarea și eliminarea materialelor periculoase. Cercetarea DFD a crescut dramatic în ultimii ani, iar în așteptarea legislației privind „preluarea”, producătorii europeni au explorat modalități de dezasamblare a produselor din mijlocul anilor 1980 [Wilder, 1990]. Primele investigații în acest domeniu, au fost realizate în primul rând de compania auto BMW (Bayerische Motoren Werke). Aceștia s-au limitat la proiecte pilot, dar au și generat linii directoare generale privind proiectarea pentru reciclabilitate [Constance, 1992]. Conceptele fundamentale ale DFD, precum armarea pieselor și utilizarea îmbinărilor cu fixare rapidă, au fost, de asemenea, demonstrate [Bakerjian, 1992].

În conștientizarea mediului de astăzi, obiectivele de sfârșit de viață, cum ar fi reutilizarea componentelor (componente ale unui produs la sfârșitul vieții utilizate fără modernizare într-un produs nou), reprocesarea (componentele unui produs expirat reutilizate într-un produs nou după o actualizare tehnologică) și reciclare (reutilizarea materialelor, cum ar fi reciclarea plasticului) sunt unele dintre cele mai importante motive pentru dezasamblarea produselor. Acest lucru poate fi atribuit impactului uluitor al deșeurilor industriale și menajere asupra mediului înconjurător. Utilizarea pe scară largă a bunurilor de consum și cicluri de viață mai scurte ale produselor au dus la eliminarea unui număr fără precedent de produse folosite.

5.2 Cadrul conceptual și aprofundarea metodologiilor de proiectare DFD și DFR

În primul rând, a fost elaborat un model conceptual de abordare al cercetărilor prezentat în continuare în figura 5.1. Punctul de plecare pentru modelul conceptual al abordării cercetării pentru dezvoltarea durabilă a produsului a fost traducerea cerințelor în specificațiile produsului ce trebuie respectate în faza de proiectare conceptuală.

Principiile DFD și DFR ale conceptului general Design for Excellence (DFX) sunt detaliate pentru a face obiectul studiului de cercetare. Aceste principii sunt aprofundate în cadrul modelului din figura 5.1, prin unele metodologii și tehnologii specifice, precum modelarea modulară ierarhică a produsului și prin utilizarea metodei graficului ȘI/SAU (AND/OR) dar și prin metoda grafică Petri-Net prezentată anterior în capitolul I.

Principiile DFX și ingineria integrată converg pentru a elabora metodologiile pentru DFD și DFR, iar aceste metode și principii converg către susținerea dezvoltării durabile a produselor.

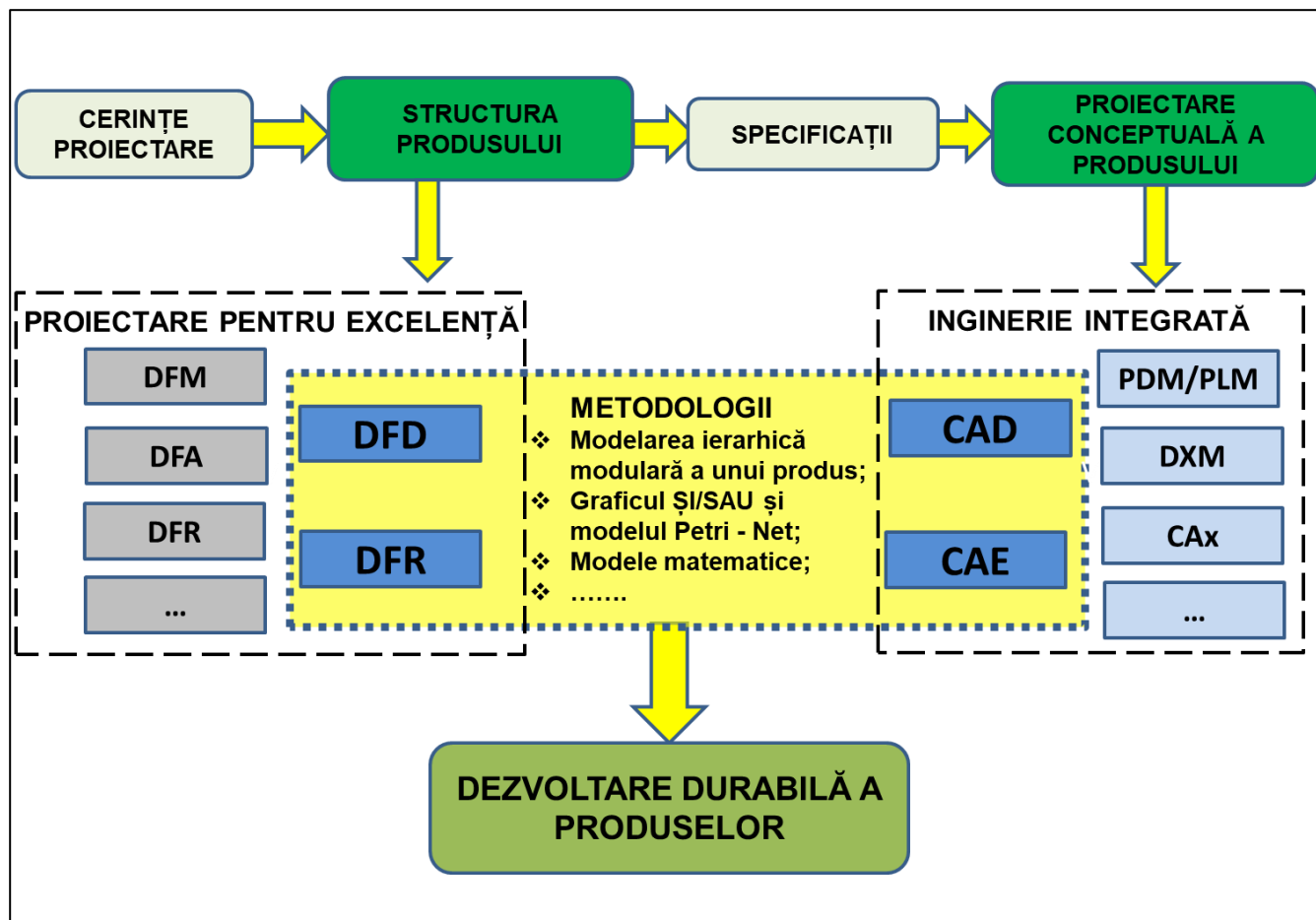


Fig. 5.1. Cadrul conceptual privind integrarea metodelor avansate și a tehnologiilor de proiectare pentru dezasamblare (DFD și DFR)

În multe circumstanțe, un produs poate fi dezasamblat într-o multitudine de piese sau subansambluri și la rândul lui fiecare subansamblu, în piese și componente diferite. Un produs poate avea multe subansambluri, iar acesta poate reprezenta un sistem modular, formând un arbore ierarhic matematic de produse, cum este cel prezentat în figura 5.2.

Una dintre abordările utilizate pe scară largă pentru planificarea, generarea și selectarea planurilor de dezasamblare este generarea planurilor de asamblare. Procesul de asamblare a fost descris în detaliu și a fost evidențiată legătura de demontare. Ideea de a le analiza simultan se datorează faptului că multe probleme legate de determinarea secvențelor de asamblare sunt transferate la determinarea ordinelor de dezasamblare.

Reprezentarea graficului ȘI/SAU [De Mello, 1990] și Petri-Net [Moore, 2001] sunt câteva dintre modelele modulare care au fost propuse pentru a susține relațiile dintre părțile și subansamblurile componentelor. Reprezentarea graficului ȘI/SAU prezentat ca un exemplu general în figura 5.3, se bazează pe strategia de a găsi toate subansamblurile durabile ale componentelor și toate descompunerile fezabile ale unui ansamblu, care pot fi procesate prin analizarea graficului de conexiune adecvat.

Problema generării operațiunilor de asamblare este transferată la generarea operațiilor de dezasamblare iar acest grafic ȘI/SAU este considerat o procedură sistematică care garantează generarea tuturor secvențelor fezabile. Expresia „sarcină de dezasamblare” este considerată reversul unei sarcini de asamblare fezabile și fiecare descompunere corespunde unei sarcini de demontare. Analizând toate descompunerile ansamblului, putem găsi toate modalitățile prin care demontarea poate fi descompusă în două subansambluri. Această abordare duce la o reprezentare grafică ȘI/SAU a secvențelor de dezasamblare și a secvențelor de asamblare inversă corespunzătoare.

5.3 Cercetări privind aplicarea metodologiilor DFD și DFR în proiectarea conceptuală pentru dezasamblare și reciclare

Metoda de dezasamblare ȘI/SAU și modelul Petri-Net conform cu stadiul actual descris la capitolul I, acestea sunt modelele diferite care au fost sugerate pentru a determina conexiunile dintre componente și subansambluri și modalitățile potențiale de dezasamblare a unui ansamblu/produs. Modelul grafic Petri-Net poate dezvolta resursele unui sistem de dezasamblare și poate procesa împreună. Modelele matematice descrise în procesul de dezasamblare pot fi utilizate pentru a stabili o cronologie adecvată de dezasamblare derivată din modalitatea ușoară de a atinge un miez.

În continuare sunt evidențiate anumite aspecte despre metodele de evaluare pentru dezasamblare, printre care regăsim și metoda grafică ȘI/SAU. Pentru a exemplifica demonstrarea principiilor, este prezentat un ansamblu simplu compus din 4 componente, după care se realizează dezasamblarea, în funcție de analiza graficului ȘI/SAU (figura 5.4).

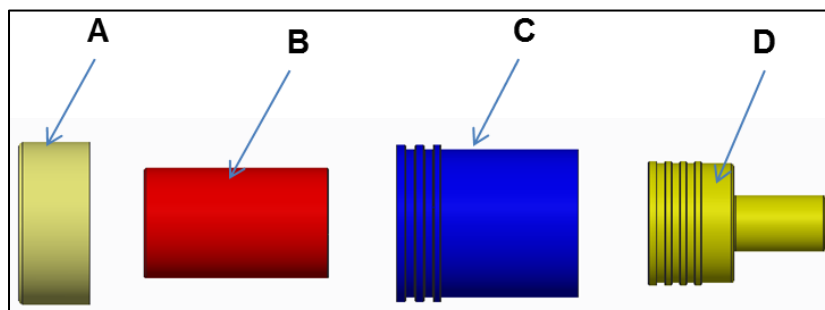


Fig. 5.4. Vederea explodată a mecanismului tehnologic simplu și identificarea principalelor piese componente: A- capac; B – bară; C – cilindru; D – mâner.

Figura 5.5 reprezintă un grafic ȘI/SAU pentru produsul simplu descris mai sus. Nodurile dintr-un astfel de grafic corespund numărului de componente sau subansambluri. Nodul superior, care nu are strămoș, corespunde întregului ansamblu iar nodurile care nu au descendenți corespund componentelor individuale. Săgețile sunt direcționate și reprezintă operațiunile de dezasamblare. Trebuie subliniat faptul că un astfel de grafic nu are un ciclu, cu alte cuvinte, după ce un stadiu a fost realizat, nu este posibilă revenirea la starea anterioară. În plus, nodurile care corespund ansamblurilor care conțin doar o parte din componente sunt nodurile terminale. Această abordare poate fi considerată un pas spre elaborarea unei proceduri sistematice de generare a tuturor secvențelor de dezasamblare fezabile și ar trebui să fie luată în considerare atunci când se referă la problemele de dezasamblare.

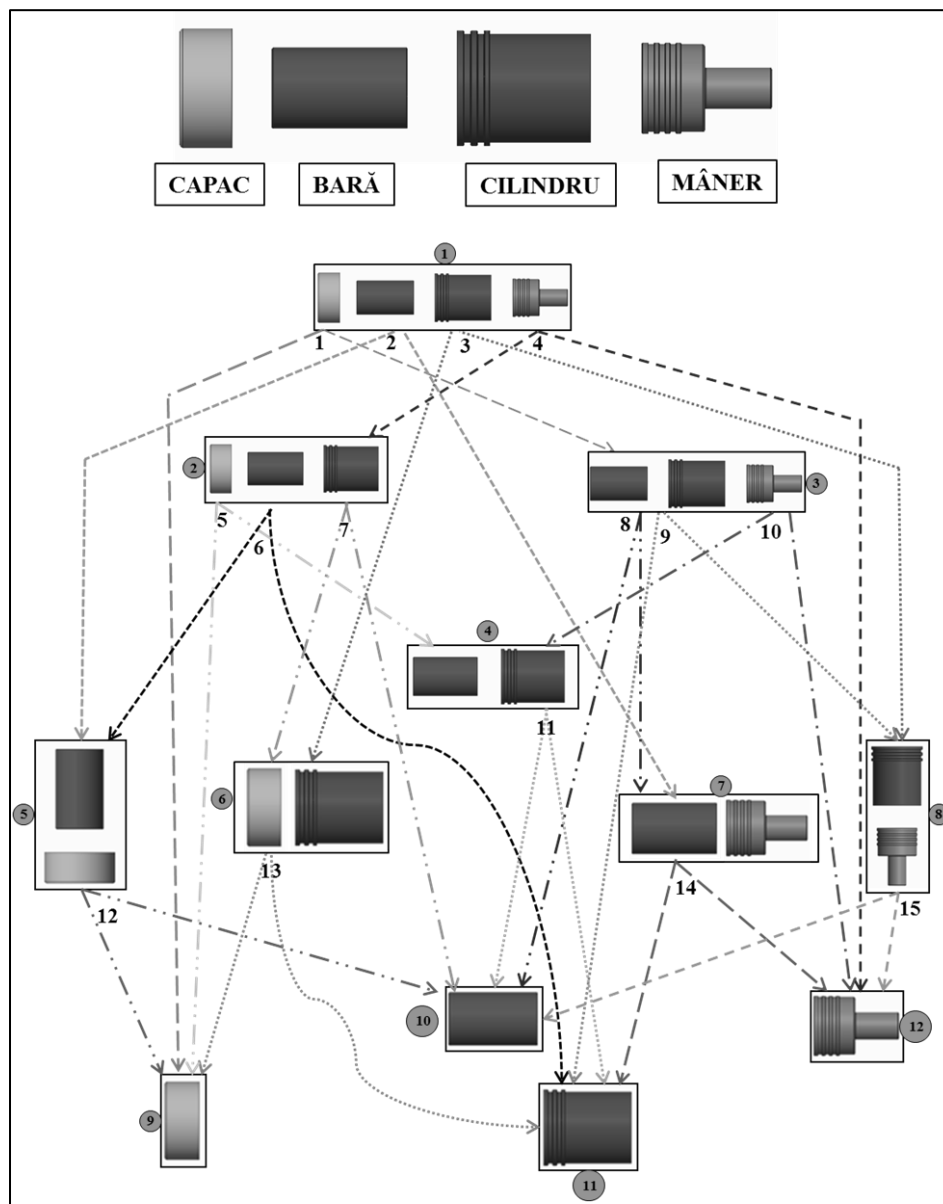


Fig. 5.5. Secvențele de dezasamblare reprezentate de graficul ȘI/SAU pentru mecanismul simplu

Evaluarea complexității din punct de vedere al manipulării, dezasamblării și accesibilității a mecanismului simplu se face folosind generarea secvențelor pentru dezasamblare și modelul de dezasamblare a efortului U [Cucos, 2018].

Accesibilitatea pentru componente reprezintă calea de dificultate prin care o componentă poate fi manipulată. De multe ori, cu cât complexitatea este mai mare, timpul suplimentar pentru a o îndepărta este esențial. Pentru asamblarea descrisă în figura 5.6 există o singură cale de demontare pentru a ajunge la componentul B – Bară. Pentru a determina toate combinațiile posibile, asamblarea este evaluată în funcție de complexitatea și dificultatea modului de accesibilitate precum și de nivelul diferit de dificultate al procesului de demontare.

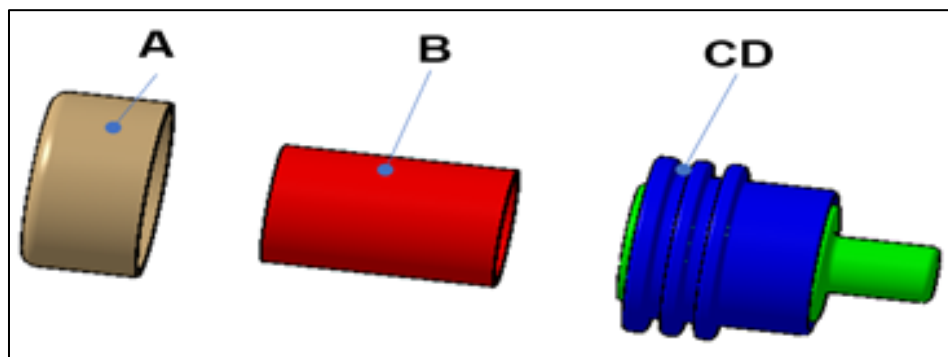


Fig. 5.6. Secvența de dezasamblare fezabilă pentru componentul B – Bară după evaluarea accesibilității și complexitatea manipulării

5.4 Contribuții teoretice privind aplicarea metodelor de proiectare pentru dezasamblare Petri-Net și a graficului ȘI/SAU a unui actuator liniar

Pentru a exemplifica integrarea metodelor avansate și a tehnologiilor de proiectare pentru dezasamblare și reciclare este propus și proiectat pentru fabricare și asamblare cu ajutorul unor instrumente de inginerie integrate CAD/CAE/CAX (software-ul CATIA V5) un ansamblu de actuator liniar (figura 5.15) cu rolul de a demonstra și valida aplicarea principiilor și metodelor DFD și DFR.

Ansamblu actuator liniar descris în figura 5.15, este un ansamblu care poate fi folosit pe bancuri de testare (figura 5.16) a duranței (engl. *key life tests*) pentru anumite componente mecanice de exemplu: șurubul cu bile, roțile dințate, care sunt supuse la teste de durabilitate în timp pentru a verifica cât de robust este designul de componentă ținând cont de ciclurile de testare comprimate într-un timp relativ scurt. Ansamblu este format din anumite componente majore: motor electric, roți dințate, șurub cu bile, ansamblu piston cilindric. Arhitectura mecanică și lista completă de componente incluzând materialele, greutatea care formează ansamblu actuator liniar sunt descrise în detaliu în figura 5.17 (desen de ansamblu și dimensiuni de gabarit) și figura 5.18 (lista de materiale – BOM).

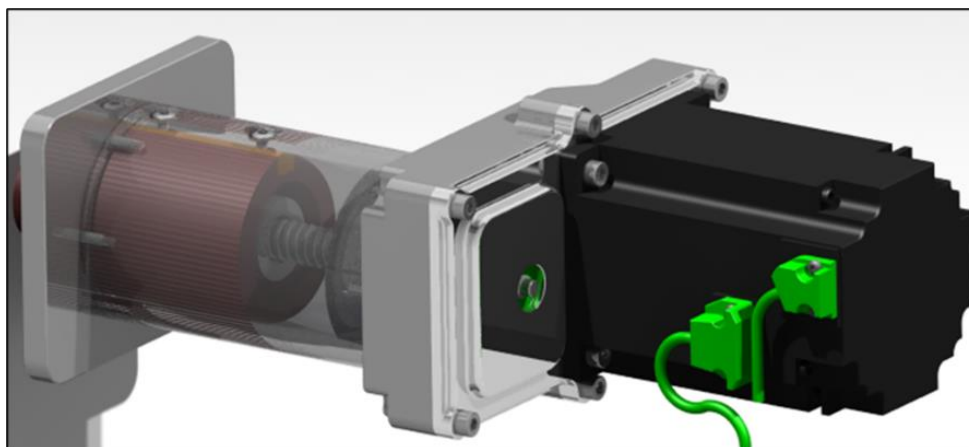


Fig. 5.15. Vedere izometrică actuator liniar utilizat pentru testele de duranță din industria auto pentru validarea designului componentelor mecanice

După definirea dimensiunilor generice de ansamblu și lista de materiale, pentru a putea evalua principiile DFD și DFR și alte investigații desfășurate în lucrarea de cercetare, pentru fiecare component care face parte din ansamblu actuator linier se definesc anumite informații tehnice utile pentru pașii următori din lucrare (figurile 5.19, 5.20 și 5.21).

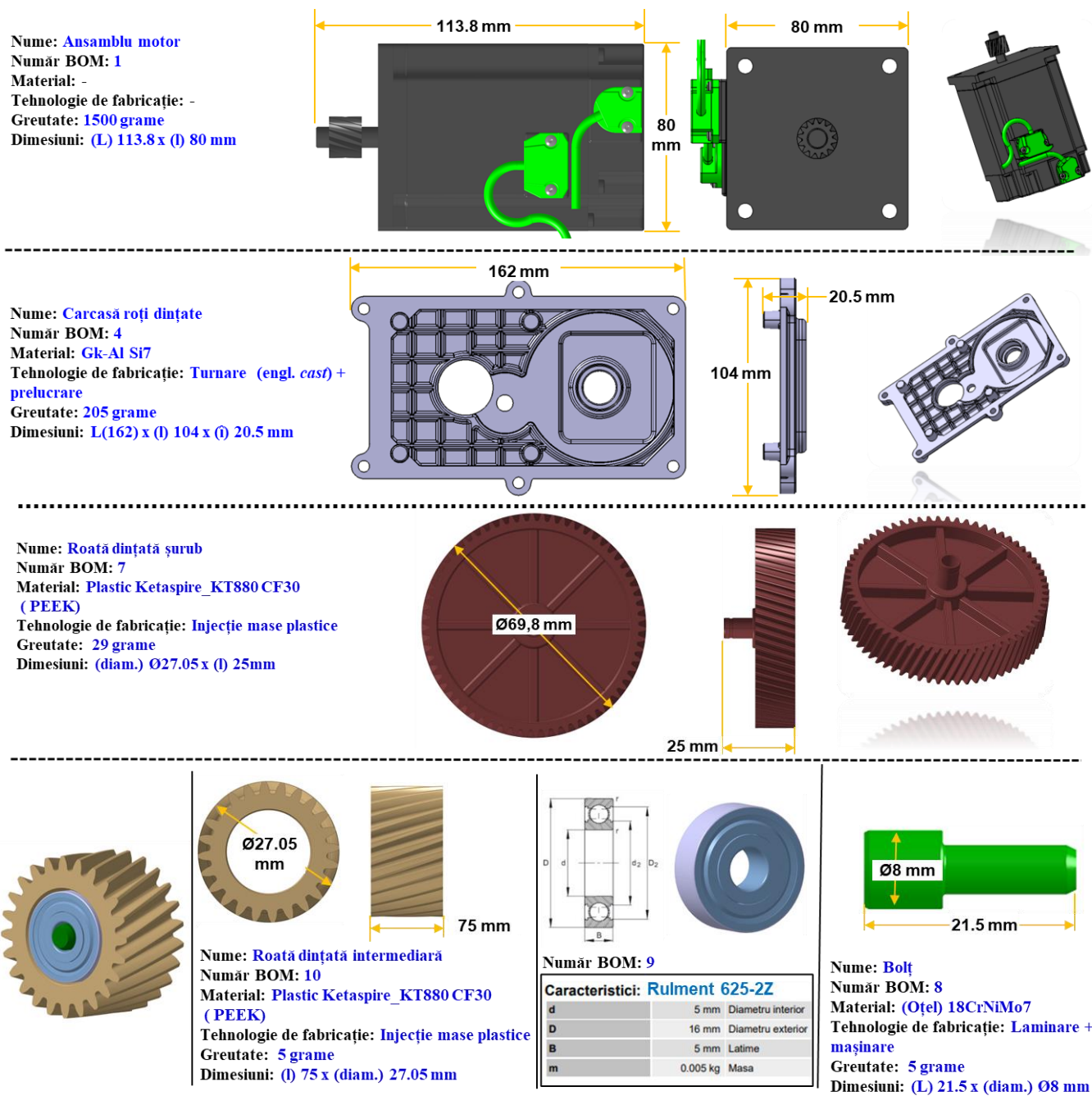


Fig. 5.19. Vedere 2D și informații tehnice (material, greutate, dimensiuni, tehnologie, număr BOM) despre componentele ansamblului actuator linier: 1- ansamblu motor; 4- carcasă roți dințate; 7 – roată dințată șurub; 8 – bolț; 9 – rulment cu bile 625-2Z; 10 – roată dințată intermediară

După definirea arhitecturii mecanice a unui ansamblu mecanic de tip actuator liniar, mai departe este detaliat un cadru conceptual teoretic de cercetare în patru pași constructivi pentru a stabili care sunt rutele posibile și mai apoi ruta optimă de dezasamblare și ulterior re-fabricarea/reciclarea ansamblului descris anterior:

A. Primul pas - generarea secvențelor pentru toate rutele de dezasamblare fezabile a actuatorului liniar.

Obiectivul generării unei căi de dezasamblare este de a determina o cale optimă de dezasamblare pe baza celui mai mic efort, care este un obiectiv esențial de demontare pentru re-fabricare. Generarea tuturor dezasamblărilor fezabile și a secvențelor unui produs asigură în primul rând relația de legătură pentru fiecare dintre părți și subansambluri și în al doilea rând determinarea numărului de rute de demontare fezabile ale unei piese. Reprezentarea grafică ȘI/SAU și metoda Petri-Net sunt 2 modele care au fost propuse să stabilească relațiile dintre subansambluri/componente și căile posibile de dezasamblare a unui produs. Abordarea metodei Petri-Net la fel cum a fost prezentată în capitolul I este capabilă să modeleze un proces de dezasamblare împreună cu resursele sistemului simultan.

Pentru a exemplifica principiul și metodologiile propuse se folosește ansamblul actuator liniar descris anterior. De asemenea, pentru a valida aplicarea principiilor DFD, o nouă structură este creată (figura 5.22) pentru actuatorul liniar (figura 5.15). Pentru exemplificarea scopului descris mai sus, *componentul e (ansamblu șurub + piuliță)* este partea propusă pentru a fi dezasamblată și re-fabricată în vederea restaurării.

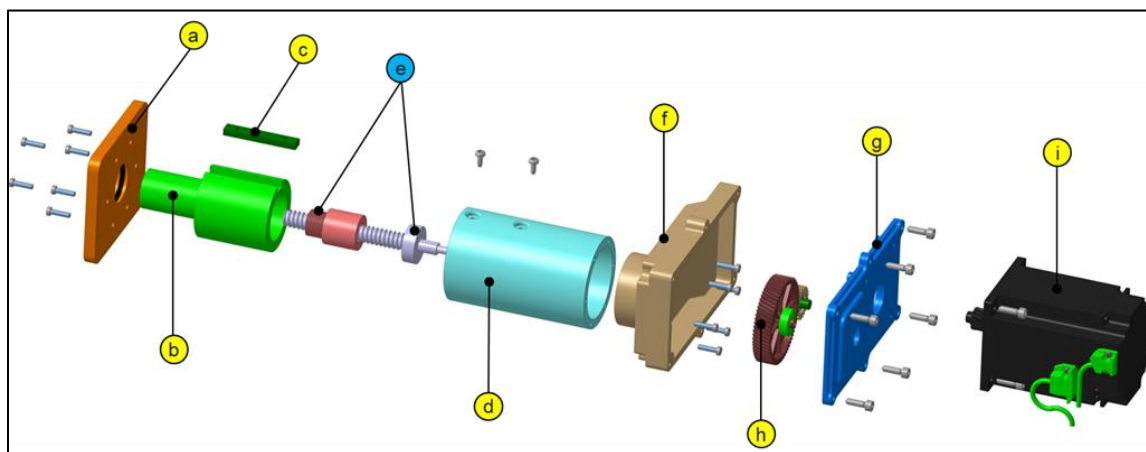


Fig. 5.22. Vedere explodată a actuatorului liniar: a – placa de bază; b – piston; c - piesă antirotație; d – carcasă tub; e – ansamblu șurub cu bile + piuliță; f – carcasă suport roți dințate; g – carcasă roți dințate; h – ansamblu roți dințate; i – ansamblu motor.

B. Pasul II - identificarea piesei/pieselor care urmează să fie recuperate pentru re-fabricare și a rutelor de dezasamblare fezabile ale acesteia.

Din figura 5.23, presupunând că *componentul e (ansamblu șurub cu bile)* este componenta din actuatorul liniar care trebuie recuperată, există trei rute fezabile marcate cu alfa (culoare albastră), beta (culoare verde) și omega (culoare roșie). Figura 5.24 prezintă defalcarea fiecărei rute.

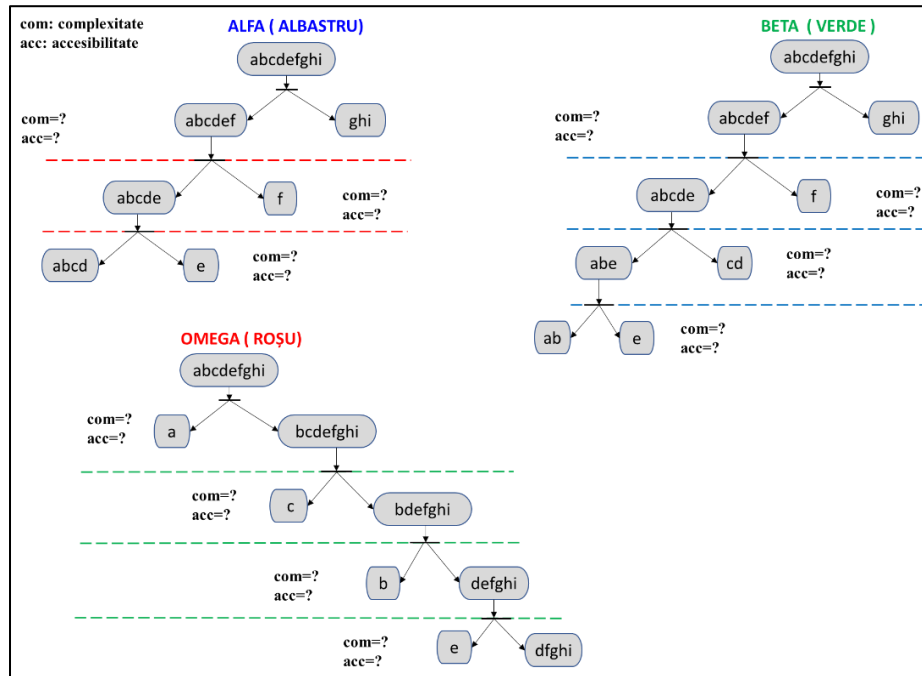


Fig. 5.24. Modelul DFD Petri Net pentru cele 3 rute de dezasamblare (alfa, beta și omega) pentru componentul e (ansamblu șurub cu bile + piuliță)

În această conjunctură, nu se poate formula nici o concluzie cu privire la care dintre cele 3 rute descrise mai sus este optimă. Deși traseul roșu are cele mai puține nivele (trei niveluri), procedura de dezasamblare poate fi mai dificilă practic în comparație cu traseele albastre și verzi, astfel încât poate fi necesar mai mult timp. Astfel de considerente practice, precum accesibilitatea piesei și complexitatea dezasamblării, pentru fiecare secvență ar trebui să fie încorporată în evaluarea dezasamblării pentru a determina cea mai bună cale posibilă.

C. Pasul III - studiu metric bazat pe considerații practice, complexitatea procesului de dezasamblare și accesibilitatea piesei fiind evaluate pentru fiecare dintre rutele identificate.

În lucrarea de cercetare, metodologia propusă converge detaliul particular al nivelului de analiză a complexității ansamblului cu modelul de demontare a efortului U pentru a asigura o examinare cantitativă pentru procesul de demontare.

Dificultatea a fost construită pe media ponderată pentru indicii de dificultate al pieselor, ca în ecuația de mai jos [Soh, 2015].

$$I_{com} = \frac{C_h \sum_{j=1}^J C_{h,f} + C_r \sum_{f=1}^K C_{r,f}}{\sum_{j=1}^J C_{h,j} + \sum_{f=1}^K C_{r,f}} \quad (5.1)$$

Pentru ansamblul descris în figura 5.22, există o rută optimă de dezasamblare pentru a ajunge la componentul e din figura 5.23. Pentru a determina toată combinația posibilă, asamblarea este evaluată pe baza complexității de accesibilitate și a nivelului de dificultate diferit pentru procesul de demontare.

Factorul de dificultate pentru un proces de dezasamblare mecanică este normalizat din indicii U-efort obținuți de către Das, S.K. and S. Naik în lucrarea „*Process planning for product disassembly*” [Das, 2002] așa cum este prezentat în tabelul 5.2.

Accesibilitatea reprezintă ușurința sau dificultatea cu care se poate ajunge la un component sau la un subansamblu, iar cu cât o piesă este mai dificil de accesat, cu atât este nevoie de mai mult timp pentru a o dezasambla. Indicele de accesibilitate (I_{acc}) măsoară cât de ușor poate fi prinsă o piesă cu mâna sau cu o unealtă în timpul unei operațiuni de demontare [Suh, 1990]. Accesibilitatea unui component poate fi calculată prin ecuația 5.2 [Soh, 2015]:

$$I_{acc} = - \left(\log_2 \frac{\Delta X}{X} + \log_2 \frac{\Delta Y}{Y} + \log_2 \frac{\Delta Z}{Z} \right) \quad (5.2)$$

D. Pasul IV - reprezintă combinația metrică (calculul scorului z), fiind utilizată pentru a permite proiectantului de produs să aibă o identificare succintă a căii optime de dezasamblare.

Obiectivul acestei metodologii este de a identifica o rută ideală pentru optimizarea ulterioară a procesului de dezasamblare, în loc de a aborda proiectarea pentru dezasamblare pentru toate piesele. Măsurile de accesibilitate și complexitate pot fi integrate pentru a oferi un punctaj unic, pentru a permite designerului de produs să aibă o vedere de ansamblu asupra fezabilității relative a rutelor de dezasamblare. Valorile sunt combinate într-un index general pentru a permite proiectantului de produs să aibă o indicație distinctă care este ruta optimă. Cel mai mic indice fiind ruta optimă iar ecuația 5.3. arată cum poate fi calculat scorul z [Soh, 2015].

$$Z_{score} = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (5.3)$$

5.5 Studiu de caz privind aplicarea metodelor de proiectare pentru dezasamblare a unui actuator liniar folosind metoda Petri-Net și graficul ȘI/SAU

Ca studiu de caz, pentru a exemplifica principiul și metodologiile propuse se folosește ansamblul actuator liniar descris anterior în figura 5.22. Pentru exemplificarea scopului descris mai sus, *componentul e (ansamblu surub + piuliță)* este partea propusă pentru a fi dezasamblată și re-fabricată în vederea restaurării.

După cum s-a menționat în secțiunea 5.4 pasul B, figura 5.24, există trei căi de dezasamblare și anume alfa (culoare albastră), beta (culoare beta) și omega (culoare verde) pentru a ajunge la componentul e descris în figura 5.25. Fiecare dintre trasee este evaluat pe baza ușurinței de accesibilitate a componentelor și a complexității rutelor de dezasamblare, conform informațiilor din secțiunea 5.4. pasul C.

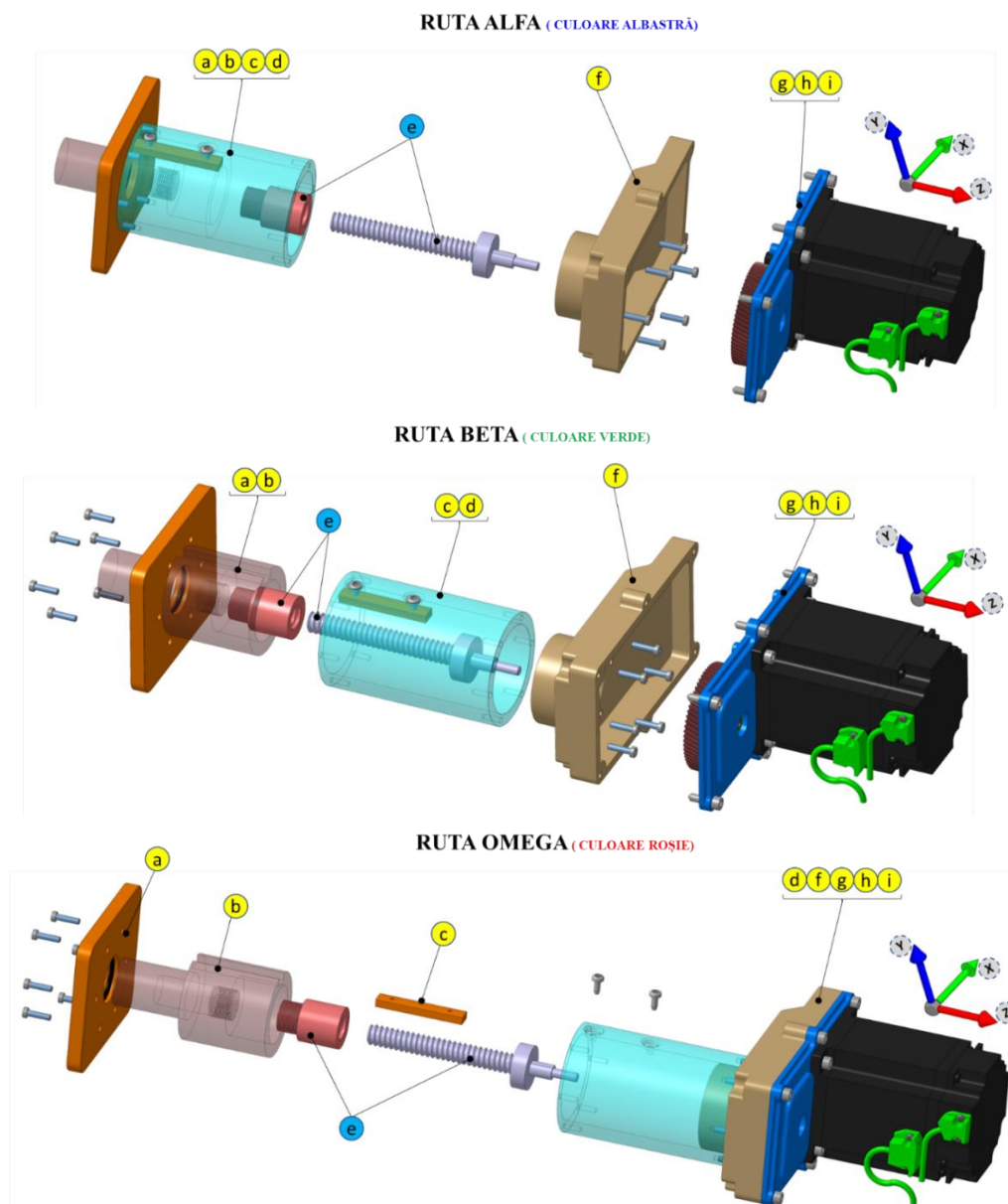


Fig. 5.25. Vedere explodată a rutelor fezabile de dezasamblare (alfa, beta, omega) a componentului e

În tabelul 5.3 sunt detaliate piesele și subansamblurile împreună cu atributele lor fizice (lățime, lungime, grosime și greutate).

Evaluarea metricilor se realizează din perspectiva eliminării subansamblurilor mai mici dintr-un ansamblu relativ mai mare. De exemplu, subansamblul „ghi” este o componentă mai mică în comparație cu subansamblul „abcdef” iar evaluarea accesibilității și complexității se bazează pe scoaterea celui mai mic din ansamblul mai mare.

În continuare sunt definite pentru fiecare rută de dezasamblare descrise anterior (alfa, beta și omega) parametrii de manipulare și dezasamblare în care se arată matricile de complexitate (I_{com}) și accesibilitate (I_{acc}):

1. Ruta Alfa (culoare albastră) – studiul de complexitate pentru manipulare și dezasamblare.

Pentru a ajunge la componentul „e” pentru ruta alfa trebuie să se evaluează parametrii de manipulare și dezasamblare pentru fiecare secvență de dezasamblare în parte.

A. Dezasamblarea modului ansamblu motor, ansamblu roți dințate și carcasă roți dințate → abcdef: ghi

Pentru început se definesc parametrii de manipulare pentru ansamblu modul „ghi” descris în figura 5.26. În proporție mare se ține cont de caracteristicile componentelor mecanice: lungime, grosime, greutate.

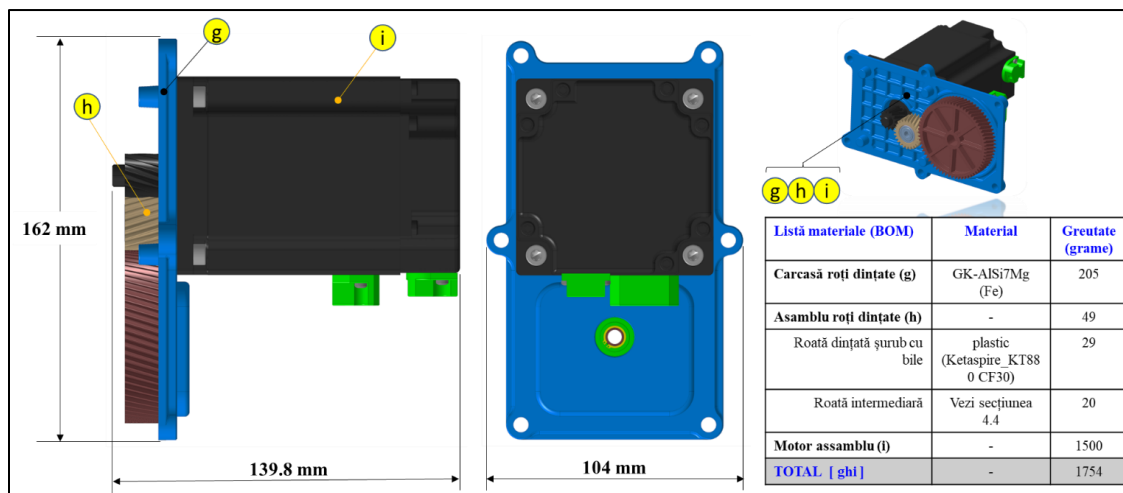


Figura 5.26. Vedere 2D - parametrii lungime, lățime, adâncime și greutate pentru modulul „ghi”

Mai departe se determină complexitatea medie de manipulare și complexitatea medie de dezasamblare conform cu informațiile și formulele descrise în capitolul V, secțiunea 5.4.

$$C_h = \frac{\sum_1^J C_{h,f}}{J} = \frac{\sum_1^3 1.52}{3} = 0.51 \quad (5.4)$$

$$C_r = \frac{\sum_1^K C_{r,j}}{K} = \frac{\sum_1^2 3.68}{2} = 1.84 \quad (5.5)$$

În final pentru examinarea corectă în această cercetare, metodologia propusă converge detaliul particular al nivelului de analiză a complexității ansamblului cu modelul de demontare a efortului U pentru a asigura o examinare cantitativă pentru procesul de demontare. Dificultatea a fost construită pe media ponderată pentru indicele de dificultate al pieselor folosind ecuația de mai jos:

$$I_{com} = \frac{C_h \sum_1^J C_{h,f} + C_r \sum_1^K C_{r,f}}{\sum_1^J C_{h,f} + \sum_1^K C_{r,f}} = \frac{0.51 \sum_1^3 1.52 + 1.84 \sum_1^2 3.68}{\sum_1^3 1.52 + \sum_1^2 3.68} = 1.45 \quad (5.6)$$

Pentru fiecare secvență de dezasamblare se calculează indicele I_{com} de complexitate separat (la fel cum sa realizat pentru modulul „ghi”, iar mai apoi în tabelul 5.4 sunt descrise informațiile detaliate și definite pentru fiecare pas de dezasamblare separat.

Tabel 5.4. Parametrii de complexitate a dezasamblării și manipulării pentru ruta alfa (culoare albastră)

Complexitate		Manipulare					Dezasamblare					I_{com}	Remarci
		Lungime	Adâncime	Greutate	$\sum C_{h,f}$	C_h	Efort U	Sculă necesară	Sculă specială	$\sum C_{r,f}$	C_r		
ALFA	abcdef:ghi	0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	3.08	0.6	0	3.68	1.84	1.45	
	abcde:f	0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	1.48	0.6	0	2.08	1.04	0.76	
	abcd:e	0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	0.56	0.6	0	1.16	1.16	0.64	șurub
		0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	1.48	0.6	1	3.08	1.54	0.92	piuliță
	Total											3.77	

2. Ruta Alfa (culoare albastră) – studiul de complexitate pentru accesibilitate

Pe lângă studiul de complexitate pentru manipulare și dezasamblare pentru ruta alfa se urmărește accesibilitatea fiecărui pas de dezasamblare conform cu formula 5.2. Diferite indexuri de accesibilitate I_{acc} se definesc pentru fiecare traseu atribuit în principal din accesul z (figura 5.34). Majoritatea componentelor pot fi prinse sau susținute fără dificultăți în ceea ce privește accesul x și y.

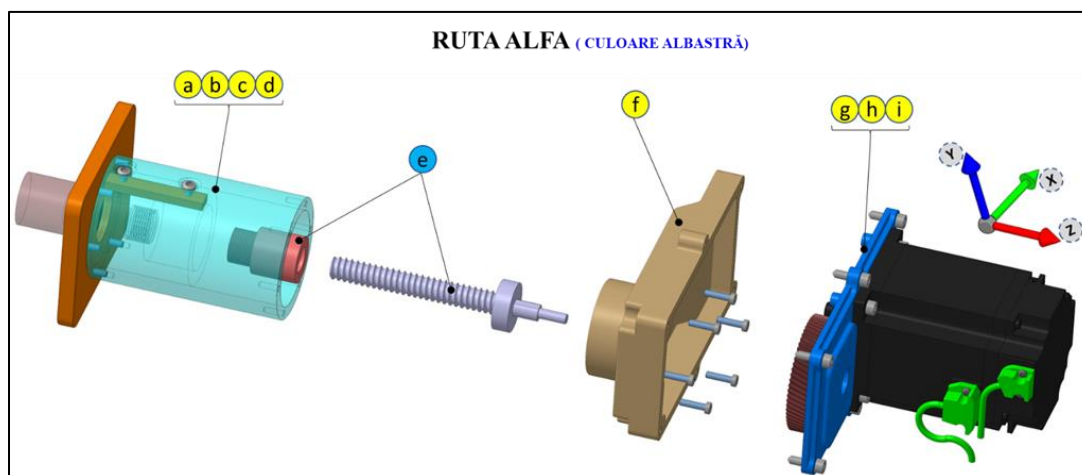


Figura 5.34. Vedere explodată ruta alfa având x,y,z descrise și orientate pentru studiul de accesibilitate

Conform cu figura 5.34 pentru ruta alfa se definesc următoarele matrici de accesibilitate prezentate în tabelul 5.5 pentru fiecare dezasamblare în parte. Parametrii de dezasamblare și caracteristicile fiecărui component și subansamblu au fost definite din punct de vedere al caracteristicilor mecanice descrise în tabelul 5.2 și accesibilitatea conform cu parametrii din figura 5.34.

Tabel 5.5. Parametrii de accesibilitate pentru ruta alfa (culoare albastră)

Accesibilitate		Manipulare						$\log_2$			I_{acc}	Remarci
		ΔX	X	ΔY	Y	ΔZ	Z	$(\Delta X/X)$	$(\Delta Y/Y)$	$(\Delta Z/Z)$	$-(1+2+3)$	
ALFA	abcdef: ghi	162	162	104	104	139.5	139.5	0	0	0	0	
	abcde:f	162	162	104	104	28.5	50.5	0	0	-0.84	0.84	
	abcde	23	23	23	23	42	143.9	0	0	-1.78	1.78	șurub
	abcd:e	28.25	28.25	28.35	28.25	1	42.7	0	0	-5.42	5.42	piuliță
										Total	8.04	

Ținând cont de faptul că o parte din atributele de la ruta alfa (culoarea albastru) privind studiul de complexitate pentru manipulare și dezasamblare se refolosesec pentru rutele beta (culoare verde) și omega (culoare roșie) mai departe o să fie definiți parametrii în tabelul 5.6. fără a se mai detalia pas cu pas dezasamblare și definirea relațiilor matematice și a formulelor.

Tabel 5.6. Parametrii de complexitate a dezasamblării și manipulării pentru ruta beta (culoare verde) și omega (culoare roșie)

Complexitate		Manipulare					Dezasamblare					I_{com}	Remarci
		Lungime	Adâncime	Greutate	$\sum C_{h,f}$	C_h	Efort U	Sculă necesară	Sculă specială	$\sum C_{r,f}$	C_r		
BETA	abcdef: ghi	0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	3.08	0.6	0	3.68	1.84	1.45	
	abcde:f	0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	1.48	0.6	0	2.08	1.04	0.76	
	abe: cd	0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	1.48	0.6	0	2.08	1.04	0.76	
	ab: e	0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	0.56	0.6	0	1.16	1.16	0.64	șurub
		0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	1.48	0.6	1	3.08	1.54	0.92	piuliță
											Total	4.53	
OMEGA	bcdefghi: a	0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	1.48	0.6	0	2.08	1.04	0.76	
	bdefgh: c	0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	1.16	0.6	0	1.76	0.58	0.64	
	defghi: b	0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	0.56	0	0	0.56	0.56	0.52	
	dfghi: e	0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	1.48	0.6	1	3.08	1.54	0.92	șurub
	b: e	0.75	0.27	0.50	1.52	0.51	1.48	0.6	1	3.08	1.54	0.92	piuliță
											Total	3.76	

După stabilirea parametrilor de complexitate pentru manipulare și dezasamblare pentru rutele beta și omega se definesc matricile de accesibilitate prezentate în tabelul 5.7 conform cu caracteristicile mecanice descrise în tabelul 5.2 și accesibilitatea conform cu parametrii din figura 5.25.

Tabel 5.7. Parametrii de accesibilitate pentru ruta beta (culoare verde) și omega (culoare roșie)

Accesibilitate		Manipulare						$\log_2$			I_{acc}	Remarci
		ΔX	X	ΔY	Y	ΔZ	Z	$(\Delta X/X)$	$(\Delta Y/Y)$	$(\Delta Z/Z)$	$-(1+2+3)$	
BETA	abcdef: ghi	162	162	104	104	139.5	139.5	0	0	0	0	
	abcde:f	162	162	104	104	28.5	50.5	0	0	-0.84	0.84	
	abe:cd	74	74	74	74	116.9	116.9	0	0	0	0	
	abcd:e	23	23	23	23	42	143.9	0	0	-1.78	1.78	șurub
		28.25	28.25	28.25	28.25	2.3	42.7	0	0	-4.23	4.23	piuliță
	Total										6.85	
OMEGA	bcdefg hi: a	114	114	94	94	10	10	0	0	0	0	
	bdefgh: c	9.8	9.8	5.8	5.8	60	60	0	0	0	0	
	defghi: b	31.75	31.75	31.75	31.75	50	110	0	0	-1.14	1.14	
	dfghi: e	23	23	23	23	25	143.9	0	0	-3.26	2.52	șurub
	b: e	28.25	28.25	28.25	28.25	2.3	42.7	0	0	-4.23	4.23	piuliță
	Total										7.89	

Ca o concluzie după definirea tuturor parametrilor I_{acc} și I_{com} pentru complexitate, manipulare și accesibilitate obținuți în tabelele 5.4, 5.5, 5.6 și 5.7, nu se poate efectua o evaluare concretă asupra traseului optim pentru dezasamblare și reciclare. Ca un prim argument ar fi că traseul BETA (culoare verde) este cel mai accesibil dar este și cel mai complex din punct de vedere al dezasamblării ceea ce reiese că este greu de judecat de către proiectant și este o contradicție care trebuie analizată. Totuși pentru a putea să fie definită ruta optimă de dezasamblare și reciclare/re-fabricare se calculează un index general de utilizare prin calculul scorului z pentru I_{acc} și I_{com} , definit ca noțiuni generale la secțiunea 5.4 pasul D din cadrul lucrării de cercetare.

$$Z_{scor} I_{com} = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (5.15)$$

În tabelul 5.8 sunt adăugate toate informațiile legate de parametrii de complexitate, manipulare și accesibilitate cât și scorurile z descrise mai sus pentru fiecare rută în parte pentru a putea să se determine ruta optimă de dezasamblare a componentului e (șurub cu bile + piuliță).

Tabel 5.8. Evaluarea indexului Z pentru cele 3 rute de dezasamblare definite în cadrul cercetării

	I_{com}	I_{acc}	Z_{com}	Z_{acc}	Z_{total}
Ruta Alfa	3.77	8.04	-0.59	0.54	-0.05
Ruta Beta	4.53	6.85	1.16	-0.88	0.28
Ruta Omega	3.73	7.89	-0.59	0.36	-0.23
Media μ	4.06	7.59			
Deviația standard σ	0.45	0.84			

Ca o primă concluzie, după stabilirea parametrilor de complexitate, manipulare, accesibilitate și indexul scorului z pentru cele 3 rute de dezasamblare este aceea că traseul omega (culoare roșie) are cel mai scăzut scor Z_{total} (-0.23) și direct este traseul cel mai potrivit și optim pentru dezasamblare și reciclare.

O altă concluzie este aceea că traseul alfa are cel mai mic număr de dezasamblări (4) dar prezintă acces redus pentru o sculă care ar trebui să ajungă și să scoată piulița, deoarece este închisă în carcasa tub (componentul d). Astfel, dezasamblarea folosind traseul alfa pentru a recupera ansamblul șurubului cu bile (componentul e) ar putea fi dificilă (figura 5.35).

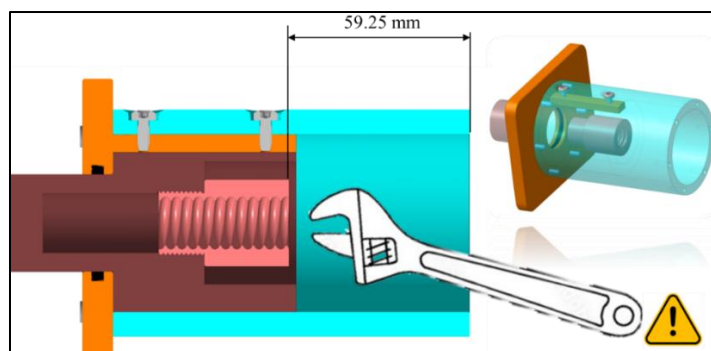


Figura 5.35. Vedere 2D/3D și dimensiunea posibilă de accesibilitate a componentului piuliță din ansamblu „e”

După ce s-a identificat pe baza evaluării, că traseul omega (culoare roșie) este optim, metodologia proiectării pentru dezasamblare (DFD) și reciclare (DFR) poate fi aplicată acestui traseu pentru a se îmbunătăți procesul de dezasamblare. Una dintre modificările de proiectare care pot fi făcute pentru îmbunătățirea proiectării prin reciclare sau re-fabricare este reducerea dimensiunii pistonului, astfel încât să fie mai ușor să se ajungă la piulița pentru dezasamblare și să nu se folosească scule speciale pentru prinderea și ulterior dezasamblarea piuliței, așa cum se arată în figura 5.36.

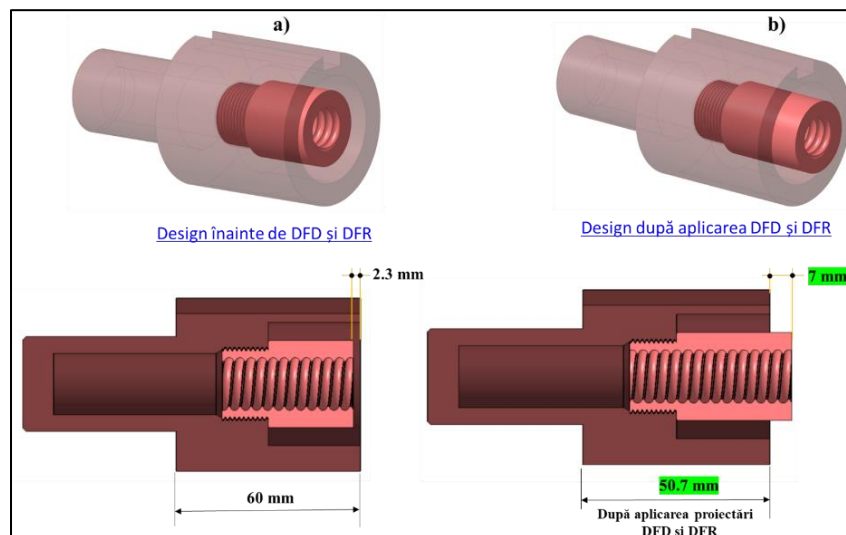


Figura 5.36. Modificarea designului componentului B (piston) în urma implementării metodologiei DFD pentru a facilita dezasamblarea componentului e (piuliță) pentru traseu omega: a) Design inițial înainte aplicării DFD și DFR; b) Design modificat după aplicarea principiilor DFR și DFR

5.6 Concluzii

Dintre metodele specifice generării secvențelor de dezasamblare, prezentate în lucrarea de cercetare, s-a constatat că metodele grafice ȘI/SAU și metoda Petri-Net sunt cele mai potrivite pentru problema dezasamblării. Aceste metode oferă generarea tuturor secvențelor de dezasamblare fezabile și posibilitatea utilizării puterii programării dinamice pentru a găsi planul optim de dezasamblare. În acest fel, procesul de căutare se poate baza pe cerințele tehnice și economice în timp ce se îndeplinesc cerințele legislației, inclusiv aspectele de mediu.

Metodologia propusă în acest capitol permite proiectantului să aibă o abordare sistematică și structurată în proiectarea produselor cu intenția de reciclare și re-fabricare pentru o utilizare ulterioară a componentului într-un alt produs. De asemenea, proiectanții de produs nu vor trebui să ia în considerare metodologia DFD pentru toate componentele produsului, ci doar pentru acele componente găsite pe ruta optimă identificată. Problemele conflictuale cu care se confruntă un designer ar putea fi minimizate sau eradicat, iar aplicarea concomitentă a designului pentru asamblare și dezasamblare ar putea fi o adevărată provocare.

De asemenea, considerațiile practice descrise în capitolul V cum ar fi complexitatea, manipularea dezasamblării și accesibilitatea pieselor, ar trebui să fie încorporate ca pas de verificare în procesul de evaluare și în ghidurile de proiectare. Acest pas este important deoarece dezasamblarea necesită în mare măsură efort uman și scule manuale sau speciale care trebuie folosite în spații cu accesibilitate redusă.

Folosind proiectarea pe calculator (CAD) se pot face îmbunătățiri pentru dezvoltarea și integrarea în continuare a valorilor pentru a extrage informații despre piese privind evaluarea accesibilității și complexității. În plus, evaluarea bazată pe modelul 3D proiectat într-un stadiu incipient al dezvoltării produsului va adăuga mai multă valoare designului produsului.

CAPITOLUL VI.

CONTRIBUȚII PRACTICE PRIVIND REALIZAREA UNUI PROTOTIP A ACTUATORULUI LINIAR CU AJUTORUL IMPRIMĂRII 3D PENTRU PRE VALIDAREA PROIECTĂRII PENTRU DEZASAMBLARE ȘI RECICLARE ȘI PENTRU CREAREA PAȘAPORTULUI DE RECICLARE

6.1 Descrierea imprimantei 3D și a parametrilor inițiali de lucru utilizați pentru imprimarea componentelor actuatorului liniar

Domeniul imprimării 3D își continuă dezvoltarea rapidă atât în mediul academic, cât și în cel industrial iar dezvoltarea domeniului fabricării aditive – AM (engl. *additive manufacturing*), cunoscută în mod obișnuit ca imprimare tridimensională (3D) sau prototipare rapidă – RP (engl. *rapid prototyping*) are multe aplicații și implementări în prototipuri rapide, scule, stomatologie, dispozitive biomedicale, ingineria auto, replicarea componentelor sau obiectelor etc.

Pentru demonstrarea principiilor de proiectare DFD și DFR cât și pentru crearea pașaportului de reciclare (engl. *recycling passport*) după modificarea designului ansamblului actuator liniar descris în capitolul V, a fost necesară imprimarea 3D a componentelor actuatorului liniar pentru validarea informațiilor și principiilor descrise în cadrul aceste lucrări. În cazul produselor realizate din material tip polimeric, prin procedeul de fabricare aditivă (exemplu imprimarea 3D) validarea conceptului funcțional cu componente obținute prin aceste procedee de imprimare 3D, a fost considerată pentru lucrarea de cercetare ca o soluție rapidă, ieftină și disponibilă pe piață datorită avansului tehnologic.

Pentru realizarea ansamblului actuator liniar prin imprimare 3D se va folosi imprimanta 3D model “Anet a8” care operează și lucrează cu tehnologia de printare “*Fused deposition modeling*” – FDM cu o precizie de imprimare ce poate ajunge la maxim 0.1 mm, volumul construcției de imprimat este de 220 x 240 x 220 mm și o viteză maximă de până la 120 mm/s. Parametri și specificațiile imprimantei Anet a8 sunt detaliate în tabelul 6.1 iar componentele majore/părțile cheie sunt detaliate ulterior în figura 6.1. Acest lucru se realizează pentru a înțelege mai bine ce fac și cum lucrează aceste componente împreună.

Componentele actuatorului liniar au fost proiectate în softul de proiectare 3D CATIA V5, care ulterior pentru a putea fi realizate la imprimată 3D au fost salvate într-un format tip SLT (engl. *stereolitografie*) care este compatibil cu software-ul Ultimaker Cura pentru imprimarea 3D.

6.2 Descrierea parametrilor și caracteristicilor componentelor actuatorului liniar realizate la imprimanta 3D Anet a8

Pentru aplicarea și demonstrarea metodelor de proiectare pentru dezasamblare (DFD), reciclare (DFR) cât și validarea principiilor unui pașaport de reciclare s-au aprofundat noțiunile specifice de imprimare 3D cât și realizarea fizică a tuturor componentelor ansamblului actuator liniar descris tehnic și în detaliu în capitolele IV și V. Ansamblul și toate componentele actuatorului liniar au fost realizate în

software-ul de proiectare 3D CATIA V5 (figura 6.4. a) realizat de Dassault Systems, apoi transferate în software-ul utilizat pentru imprimarea 3D Ultimaker Cura versiunea 5.7.2 pentru realizarea fizică a fiecărui component (figura 6.4. b).

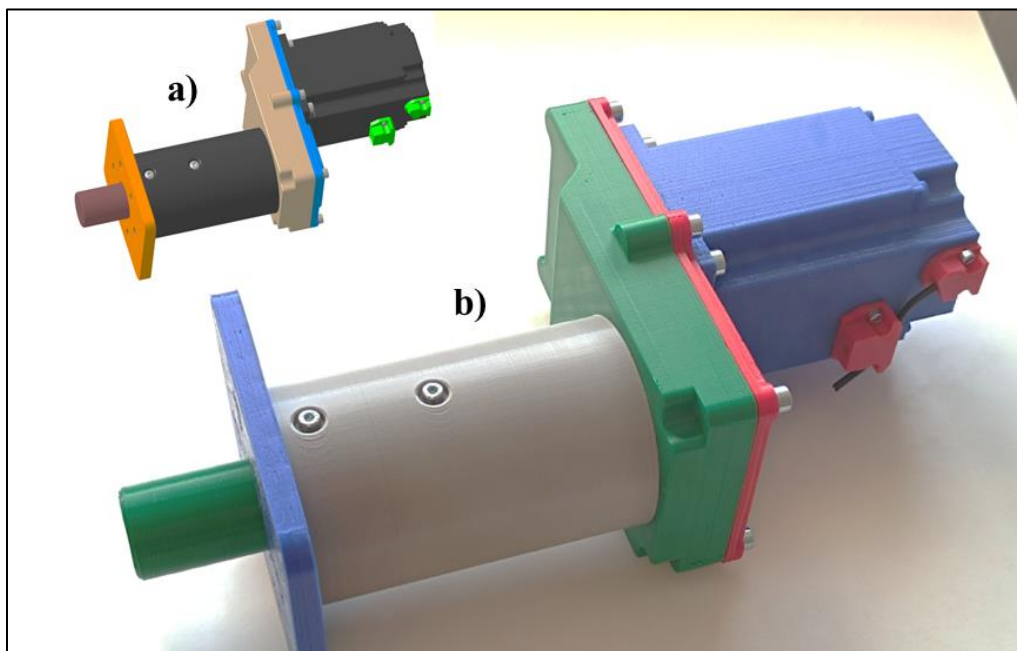


Fig. 6.4. Vedere izometrică actuator liniar: a) Ansamblu proiectat în CATIA V5; b) Ansamblu realizat fizic prin imprimare 3D

După analizarea software-ului Ultimaker și limitele date de imprimanta 3D Anet a8, s-a pornit la amortizarea parametrilor de lucru și definirea setărilor optime pentru imprimarea 3D a componentelor actuatorului liniar pentru o calitate optimă.

1. Carcasă roți dințate (numărul 4 din BOM):

Parametrii de imprimare 3D folosiți pentru realizarea fizică a componentului (figura 6.5):

- Înălțime strat material (engl. *layer height*): 0.2 mm
- Grosimea pereților (engl. *wall thickness*): 1.2 mm
- Grosime umplere fețe sus/jos (engl. *top/bottom thickness*): 1 mm
- Procesul de umplere (engl. *infill density*): 15%
- Tipul de umplere (engl. *infill pattern*): model tip plasă (engl. *grid*)
- Temperatura de printare (engl. *printing temperature*): 200° C
- Temperatură masă de lucru (engl. *build plate temperature*): 60° C
- Viteză de printare (engl. *print speed*): 40 mm/s
- Retragera duzei pe axa Z (engl. *Z hop when retracted*): DA, activat
- Condițiile de răcire (engl. *cooling*): DA activat, 100% viteză
- Suport necesar (engl. *generate support*): NU, neactivat
- Adeziunea piesei (engl. *build plateadhesion*): Tip fustă (engl. *skirt*)

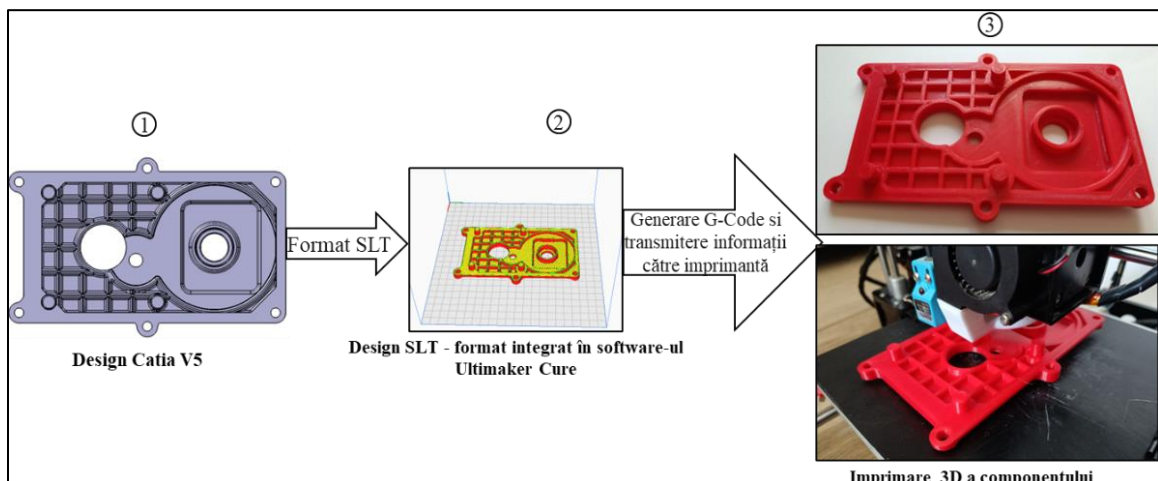


Fig. 6.5. Traseu conceptual de realizare al componentului carcasă roți dințate: 1) Design convențional 3D Catia V5; b) Formatare în fișier SLT și apoi integrare în software-ul Ultimaker Cura; c) Imprimarea 3D

Prin definirea exemplurilor din acest subcapitol se poate argumenta că toți parametri și specificațiile utilizate pentru printarea componentelor 3D a actuatorului liniar au fost evidențiate și evaluate. Ca o concluzie putem spune că următorii 3 parametri joacă un rol esențial de la caz la caz pentru printarea celorlalte componente: procesul de umplere (engl. *infill density*), viteză de printare (engl. *print speed*) și suport necesar (engl. *generate support*).

În continuare restul de componente ce fac parte din actuatorul liniar, vor fi enumerate și detaliate în figura 6.9 fără a se mai intra în detalii de printare 3D și parametrii specifici pentru fiecare design în parte.



Fig. 6.9. Imagini cu componentele printate 3D cu ajutorul imprimantei Anet a8. Numerele asociate fiecărei imagini corespunde cu lista de materiale – BOM descrisă în figura 5.18

După realizarea fizică a componentelor ansamblului actuator liniar se trece la faza de măsurare geometrică a pieselor fizice pentru a putea fi evaluate din punct de vedere a toleranțelor obținute după procesul de imprimare 3D și de asemenea, dacă aceste componente se pot asambla cu ușurință sau ar trebui modificate și refăcute pentru a putea fi utilizate. Pentru măsurarea pieselor printate 3D se folosește un șubler digital electronic marca Parkside (figura 6.10) folosit pentru măsurători de exterior, interior, adâncime.

Dimensiunile și cotele componentelor actuatorului liniar sunt considerate cote libere și abaterile sunt precizate ca Toleranțe generale ISO 2768 mk (clasă mijlocie), care reprezintă că abaterile dimensiunilor vor fi luate automat din ISO 2768 așa cum sunt trecute în figura din tabelul 6.2.

După cum s-a precizat anterior mai departe vor fi măsurate componentele fizice printate 3D și evaluate în funcție de toleranțele din ISO 2768 și de necesitatea cerută în lucrarea de cercetare. În continuare sunt date exemplu anumite dimensiuni și cazuri pentru componentele actuatorului liniar.

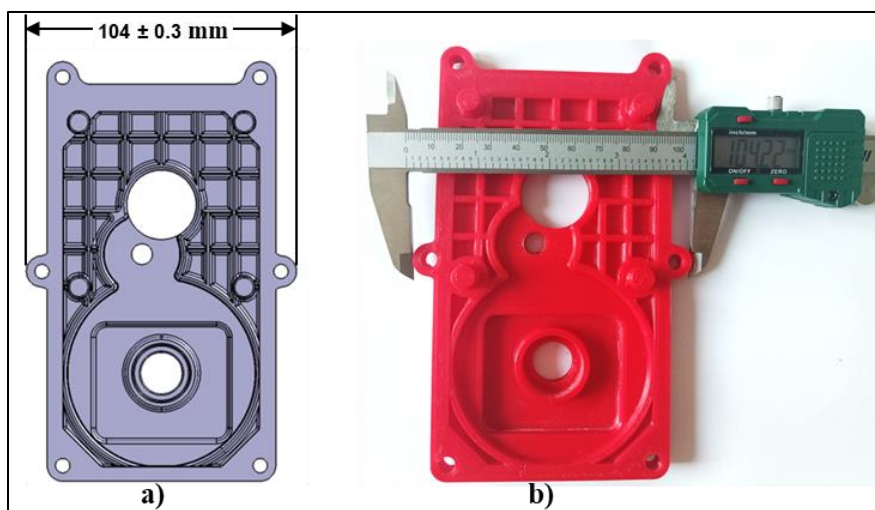


Fig. 6.11. Dimensiuni teoretice și reale pentru carcasă roți dințate (număr 4 BOM):

a) Dimensiune liniară CATIA V5/desen de execuție; b) Dimensiune reală măsurată cu șublerul digital

După analizarea primelor anumitor exemple se constată că imprimarea 3D se încadrează în toleranțele și abaterile dimensionale impuse. Pentru prima piesă carcasă roți dințate (figura 6.11) dimensiunea liniară teoretică înscrisă este $104 \pm 0.3 \text{ mm}$, asta înseamnă că abaterea superioară poate fi 104.3 mm iar abaterea inferioară 103.7 mm . După măsurarea reală cu șublerul digital se constată că valoarea după măsurare este 104.22 mm ceea ce reprezintă o valoare conformă care se încadrează în limitele cerute. Pentru piesa numărul 2 roată dințată șurub cu bile (figura 6.12) sunt aprofundate 2 dimensiuni liniare:

- Prima dimensiune $\varnothing 7.2 \pm 0.2 \text{ mm}$ – unde abaterea superioară poate fi $\varnothing 7.4 \text{ mm}$ iar abaterea inferioară $\varnothing 7 \text{ mm}$. După măsurarea reală cu șublerul se constată că valoarea după măsurare este $\varnothing 7.14 \text{ mm}$ ceea ce confirmă că valoarea obținută se încadrează în limitele impuse;

- Dimensiunea 14 ± 0.2 mm – ca interpretare abaterea superioară poate fi 14.2 mm iar abaterea inferioară 13.8 mm. După măsurătoarea reală cu șublerul digital s-a constatat că valoarea obținută este de 13.12 mm iar conform cu abaterile date în figura 5.12 dimensiunea nu se încadrează în toleranțele cerute. Însă, ca interpretare pentru studiul de caz specific pentru DFD și DFR această dimensiune specifică este acceptabilă deoarece nu influențează foarte mult partea de asamblare și dezasamblare.

După analizarea și măsurătoarea reală cu șublerul digital a dimensiunilor specifice fiecărui component după printarea 3D, se poate spune că imprimarea 3D respectă abaterile limită conform cu ISO 2768 și această soluție este una rapidă și eficientă pentru demonstrarea principiilor din lucrarea de cercetare.

6.3 Cercetări privind optimizarea parametrilor de lucru și influența acestora în timpul imprimării

După definirea și realizarea fizică a componentelor actuatorului liniar, în continuare se detaliază anumite exemple de învățare (engl. *lesson learn*) realizate după anumite probleme apărute în timpul imprimării 3D a componentelor legate atât de imprimanta 3D Anet a8 cât și de parametrii folosiți pentru imprimarea fizică. Parametrii principali actualizați, împreună cu anumite exemple a componentelor din ansamblu actuator liniar care au avut probleme în timpul imprimării 3D și cum s-au modificat specificațiile, sunt descrise și detaliate în continuare:

1. Carcasă ansamblu motor (poziția 1 în BOM)

Parametrii inițiali definiți pentru a asigura un timp de imprimare relativ redus și o calitate bună pentru carcasa ansamblu motor au fost cei prestabiliți de software-ul Ultimaker Cura: înălțime strat material printat 0.3 mm, grosimea pereților de 2 mm, grosime umplere fețe sus/jos 2 mm, viteza de printare 50 mm/s, procesul de umplere 30% cu model de tip plasă. După definirea parametrilor, imprimarea 3D a componentului a ajuns la un nivel de 30% din volumul total de printare, apoi s-a oprit și după retragerea duzei și verificarea piesei s-a constatat că o parte din material este topit într-o anumită zonă. S-a observat că a fost un exces de material pe care imprimanta 3D nu a putut să îl gestioneze în timpul printării (figura 6.15).

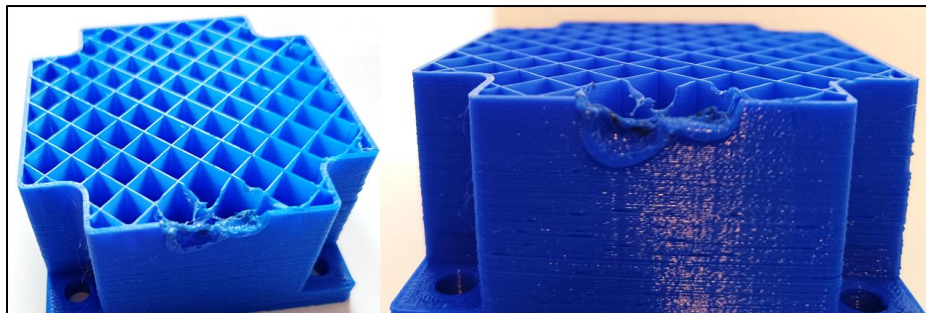


Fig. 6.15. Imagini cu un prototip neconform al carcasei motorului realizat din PLA cu defecte în timpul imprimării 3D

Parametrii actualizați după identificarea problemei apărute (engl. *Root cause analysis*) au fost următorii: înălțime strat material de la 0.3 mm la 0.2mm, grosimea pereților de la 2 mm la 1.2 mm, grosimea de umplere a fețe sus/jos de la 2mm la 1 mm (5 straturi de material), viteza de printare de la 50 mm/s la 40 mm/s iar procesul de umplere de la 30% la 20% pentru a reduce timpul și eventual supraîncălzirea echipamentului, fără a afecta partea funcțională (figura 6.16).

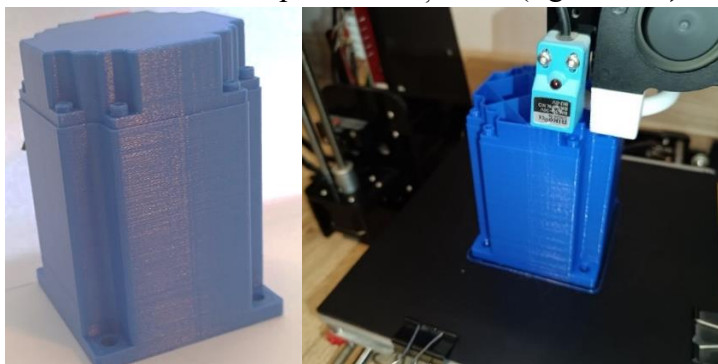


Fig. 6.16. Imagini cu un prototip conform al carcasei motorului realizat din material PLA după modificarea parametrilor descriși mai sus

6.4 Concluzii

După realizarea fizică a componentelor 3D a actuatorului liniar, pe baza principiilor și metodelor folosite în capitolul V pentru dezasamblare (DFD) și reciclare (DFR) se trece la studiul practic în care se aplică principiile folosite pentru îmbunătățirea procesului de dezasamblare. La fel cum s-a specificat anterior una din modificările de design pentru îmbunătățirea proiectării pentru reciclare sau re-fabricare este reducerea dimensiunii pistonului (poziția 19 din BOM). Această modificare de design este realizată încât să fie mai ușor să se ajungă la piulița (poziția 15 BOM) pentru dezasamblare și să nu se folosească scule speciale pentru prinderea și dezasamblarea piuliței, așa cum se arată în figurile 6.19 și 6.20.

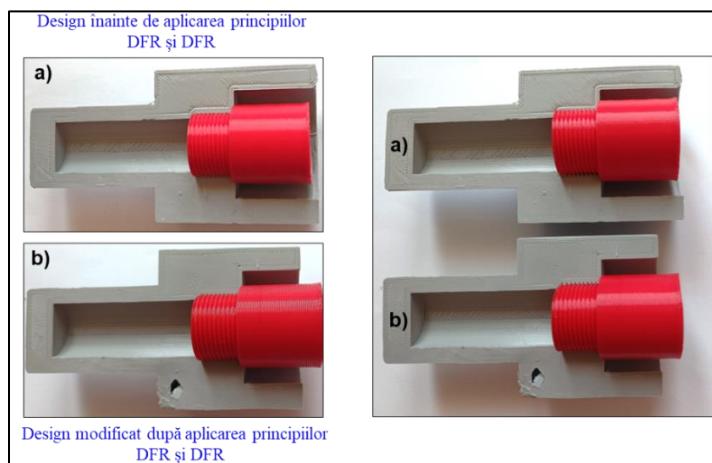


Fig. 6.19. Imagine cu modificarea designului componentului piston (poziția 19 din BOM) înainte și după implementarea metodologiei DFD conform cu capitolul V pentru a facilita dezasamblarea componentului piuliță șurub cu bile: a) Imagine cu design inițial înaintea aplicării DFD și DFR; b) Imagine cu design modificat după aplicarea principiilor DFR și DFR

După cum s-a menționat anterior designul inițial piston + piuliță era deficitar din punct de vedere al accesibilității și manipulării piuliței pentru dezasamblare și reciclare (figura 6.20). Recomandarea la fel cum s-a demonstrat în figura 5.36 este de a micșora lungimea pistonului cu 9.3 mm pentru a putea dezasambla piulița cu mâna sau cu o sculă normală.

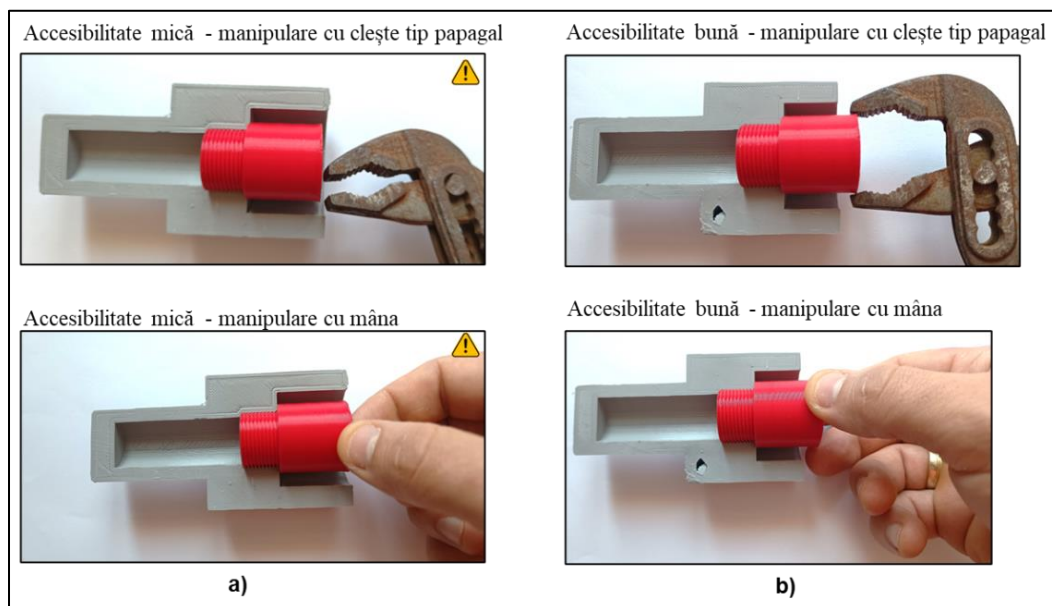


Fig. 6.20. Imagine cu accesibilitatea designului componentului piston (poziția 19 din BOM) înainte și după modificarea designului conform cu principiile DFD și DFR: a) Imagine accesibilitate piuliță cu design inițial înainte aplicării DFD și DFR; b) Imagine accesibilitate cu design modificat după aplicarea principiilor DFR și DFR

Tehnicile din domeniul fabricării aditive – AM (engl. *additive manufacturing*), cunoscută în mod obișnuit ca imprimare tridimensională (3D) sau prototipare rapidă – RP (engl. *rapid prototyping*), în această lucrare au oferit cea mai bună alternativă pentru construirea relativ rapidă și controlată a unor prototipuri funcționale. Această tehnologie nu necesită forme sau prelucrare și nu are impact asupra funcționalității produsului, realizând un cost mic și o greutate redusă a componentelor. Folosind inovațiile legate de chimia polimerilor, imprimarea 3D a deschis noi direcții în diverse domenii, cum ar fi micro fluidica, stomatologia, dispozitivele biomedicale, ingineria auto, etc.

De asemenea, imaginile, modelarea 3D și tehnologiile CAD au un impact enorm asupra tuturor aspectelor specifice proiectării conceptuale, din diferite domenii de activitate. Imprimarea 3D face posibilă realizarea cu precizie a formelor geometrice complexe, într-o varietate de materiale, la nivel local sau în centre industriale. Imprimarea 3D este o tehnologie de fabricație inovatoare care permite imprimarea obiectelor prin acumularea de straturi succesive. Pentru componentele ansamblului liniar Acidul polilactic (PLA) a fost folosit ca material de imprimare, iar componentele au fost construite cu o imprimantă Anet a8 care utilizează tehnologia de modelare prin depunerea fuzionată a filamentului (FDM)

CAPITOLUL VII.

CONTRIBUȚII PRIVIND REALIZAREA UNUI PAȘAPORT DE RECICLARE A ACTUATORULUI LINIAR CARE POATE FI UTILIZAT ÎN CONTEXTUL PROIECTĂRII PENTRU RECICLARE ȘI DEZASAMBLARE ÎN INGINERIA FABRICAȚIEI

7.1 Introducere. Analiza documentelor specifice re-fabricării, mentenanței și reciclării – pașaport de reciclare (engl. *recycling passport*), pașaport digital al produselor (engl. *digital product passport*)

Pentru sustenabilitatea produselor, reutilizarea și reciclare acestora, Comisia Europeană propune introducerea pașapoartelor digitale pentru produse – DPP (engl. *digital product passports*) pe piața unică europeană ca un facilitator al practicilor comerciale circulare care conduc la utilizarea eficientă a materialelor și la reducerea emisiilor de CO₂ [W, 008]. Un pașaport de produs digital (DPP) este definit ca un set de date specifice produsului care poate fi accesat electronic printr-un suport de date și care poate oferi informații despre originea, compoziția, opțiunile de reciclare, posibilitățile de reparare ale unui produs și multe altele [Gotz, 2022]. Introducerea unui DPP promite o serie de beneficii, cum ar fi accesul la informații pentru consumatori și factorii de decizie politică, transparență sporită, trasabilitate și coerență a datelor, sursă pentru dezvoltarea de modele de afaceri complet noi și optimizarea resurselor.

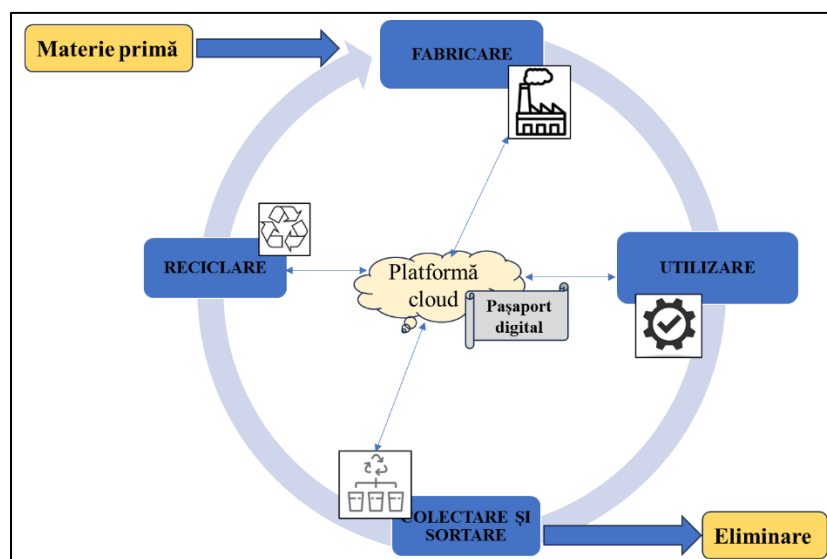


Fig. 7.1. Conceptul de pașaport de produs digital pentru produsele care ajung la EOL (prelucrare după [Plocienik, 2022])

Potrivit lui Honic și alții [Honic, 2019], gestionarea resurselor și a deșeurilor este o preocupare tot mai mare pentru societate iar o nouă metodă este pașaportul de reciclare (engl. *recycling passport*), care este o altă ilustrare a unei inițiative de digitalizare la nivel de industrie care permite colectarea de date și evaluarea potențialului de reciclare și a impactului asupra mediului al materialelor, împreună cu o evaluare completă a ciclului de viață a mediului ecologic [Kopparapu, 2023].

După consultarea literaturii de specialitate s-a observat că noțiunea “recycling passport” nu este tratată suficient de bine partea de reciclare de către producători pentru a face ca produsele să fie sustenabile în timp. De asemenea, în literatura de specialitate se regăsesc anumite modele de “recycling passport” dar sunt incomplete și nu satisfac în totalitate nevoia de reciclare și recuperare.

În cadrul acestui capitol se propune detalierea unui pașaport de reciclare care să conțină: structura și conținutul pașaportului, procedura și etapele de realizare, dezasamblarea componentelor, definirea parametrilor și informații despre recuperare cost după reciclare.

7.2 Structura și conținutul unui pașaport de reciclare (engl. *recycling passport*)

În general, fiecare produs ar trebui să aibă un pașaport de reciclare iar pentru a putea folosi același “*Recycling Passport*” pentru cât mai multe variante de produs, se recomandă crearea unui concept „*generic*” pentru o întreagă familie de produse. Pașaportul de reciclare ca structură trebuie să conțină următoarele informații necesare și ținte care trebuie urmărite:

- Golirea (dacă este necesar) fluidelor și demontarea sistemului de produs (de exemplu, prin fotografii);
- Tipul, reciclabilitatea materialului de bază utilizat și ponderea materialelor reciclate;
- Determinarea internă sistematică, documentarea și evaluarea informațiilor despre reciclare legate de produs ca bază pentru atingerea obiectivelor menționate mai sus de „reciclare ecologică” a produselor;
- Transmiterea eficientă și uniformă a informațiilor necesare privind reciclarea către clienți.

Un pașaport de reciclare poate fi folosit pentru diferite produse și în diferite domenii poate fi structurat în următoarele părți:

1. *PARTEA A. Dezasamblare* – trebuie să cuprindă fișe informative pentru dezmembrarea sistemului de produs selectat și a componentelor acestuia;
2. *PARTEA B. Figuri* - pentru ilustrarea procesului de dezmembrare descris în punctul 1;
3. *PARTEA C. Parametri de calcul* - descrierea parametrilor utilizați pentru calcularea indicatorilor de reciclare din punctul 1.

7.3 Procedura de realizare a unui pașaport de reciclare

Baza pentru realizarea unui pașaport de reciclare este un test manual de dezasamblare pentru fiecare produs principal. Toate piesele care pot fi demontate cu ajutorul instrumentelor standard, cum ar fi o șurubelniță, un ciocan, clește sau un ferăstrău de mână, vor fi descrise ca piese demontabile în pașaportul de reciclare iar componentele care nu pot fi separate manual (conexiune ireversibilă) nu sunt raportate ca piese demontabile. Pentru fiecare pas al testului de demontare manuală se estimează timpul de demontare și se fotografiază cei mai importanți pași ai dezasamblării iar în final se vor obține următoarele informații: lista componentelor care pot fi demontate manual, estimarea timpului de demontare pe pas de dezasamblare și fotografii ale principalelor etape de dezasamblare.

7.4 Studiu de caz privind aplicarea metodelor de proiectare DFD și DFR pentru realizarea unui pașaport de reciclare (engl. *recycle passport*) a unui actuator liniar

Ca studiu de caz pentru aprofundarea și crearea unui pașaport de reciclare, este propus și detaliat ansamblu actuator liniar descris în detaliu în capitolele V și VI. Structura ansamblului, arhitectura mecanică și lista completă de componente incluzând materialele, greutatea care formează ansamblu actuator liniar sunt descrise în detaliu în figura 7.2 (vedere explodată și listă materiale – BOM) pentru a putea fi mult mai ușor de urmărit la evaluarea parametrilor de reciclare și secvențelor de dezasamblare.

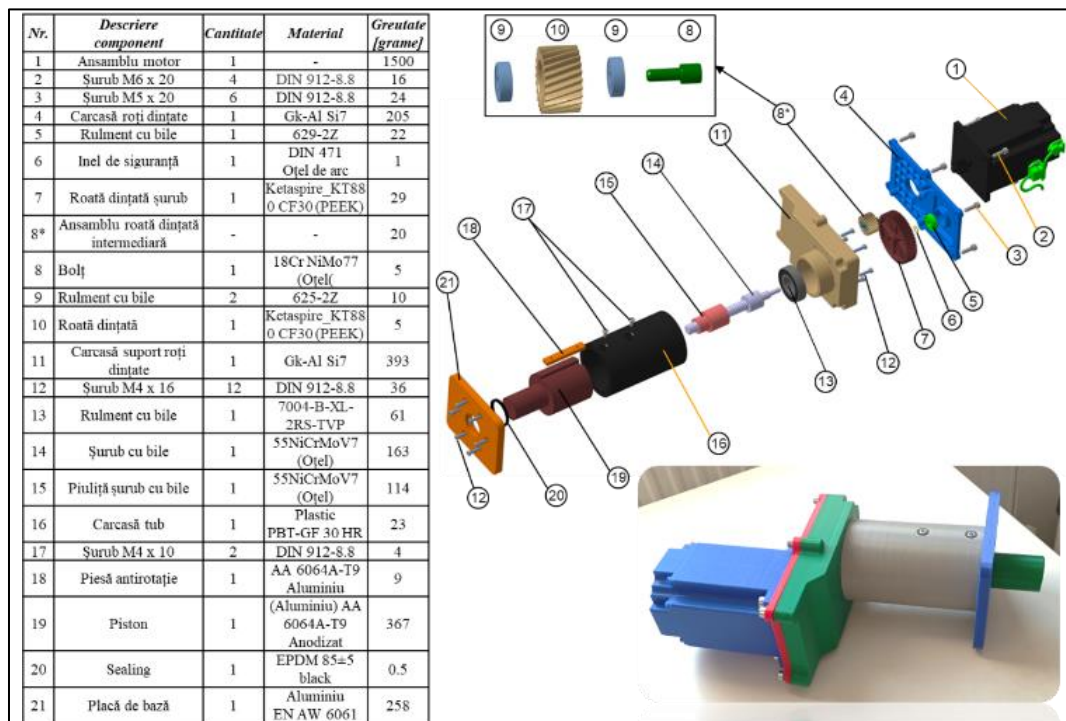


Fig. 7.2. Vedere explodată, izometrică și lista de materiale (BOM) al actuatorului liniar descris în care sunt evidențiate informații despre număr BOM, nume, cantitate, materiale și greutate

7.5 Dezasamblarea componentelor și definirea parametrilor de calcul a actuatorului liniar pentru realizarea pașaportului de reciclare

În prima parte descrisă „A. Dezmembrarea sistemului de produs” conform cu informațiile descrise la capitolul VII secțiunea 7.2, este descrisă dezasamblarea produsului la nivel de sistem în componentele principale iar componentele pot fi demontate în subcomponente, dacă este cazul.

După definirea structuri și a regulilor pentru crearea unui pașaport de reciclare, pentru partea „A Dezmembrarea sistemului de produs” se propun pe mai departe (exemplu figura 7.3) două modele de dezasamblare: unul pentru dezasamblarea întregului ansamblu și cel de-al 2-lea pentru dezasamblarea ansamblu roată dințată (8 din BOM-ul descris în figura 7.2). Aceste două modele sunt propuse pentru a exemplifica principiul și etapele în care se menționează ce ar trebui să conțină un ansamblu/component pentru a fi sustenabil pe viitor în momentul când este propus pentru dezasamblare și reciclare.

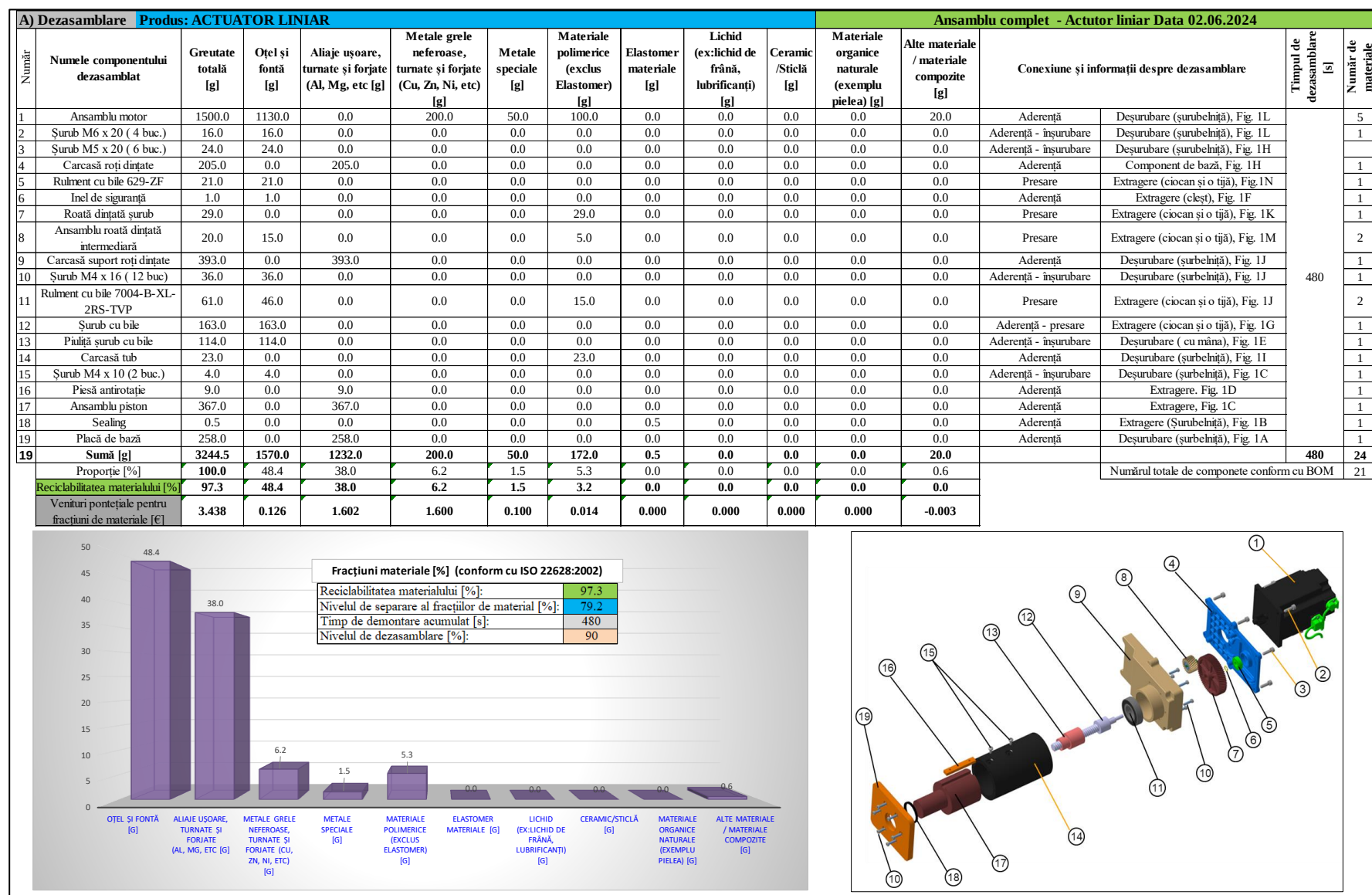


Fig. 7.3. Fișă de dezasamblare și reciclare a ansamblului actuator liniar

În figurile descrise la secțiunea 7.5, s-a realizat pentru ansamblu actuator liniar la nivel de sistem cât și pentru ansamblu roată dințată intermediară 2 mape/fișe de reciclare care conțin mai multe informații despre: *reciclabilitatea materialului, nivelul de separare al fracțiilor de material, timpul de demontare acumulat, nivelul de dezasamblare.*

După definirea mapelor de dezasamblare se trece mai departe în partea a 2 a numită „B – Figuri“, unde se adaugă imagini, figuri din momentul dezasamblării componentelor. Această secțiune trebuie să conțină următoarele informații tip poză care sunt descrise ca exemplu în detaliu pentru actuatorul liniar (figura 7.5) și roata dințată intermediară (figura 7.6):

- Pași de dezasamblare pentru fiecare subansamblu și componente;
- Sculele folosite pentru dezasamblare;
- Dispozitivele de prindere a ansamblului/componentului pentru a facilita dezasamblarea;
- Explodată pentru fiecare ansamblu/subansamblu.

Pentru a exemplifica partea „B – Figuri“ ansamblu actuator liniar descris în figura 7.2 este propus pentru a fi realizat la imprimantă 3D pentru a putea exemplifica pași de dezasamblare, timpul de dezasamblare, sculele și tipul de conexiune în timpul demontării. De asemenea, în capitolul VI partea de imprimare 3D a actuatorului liniar a fost aprofundă cu noțiuni specifice imprimării 3D și a parametrilor folosiți pentru realizarea pieselor.

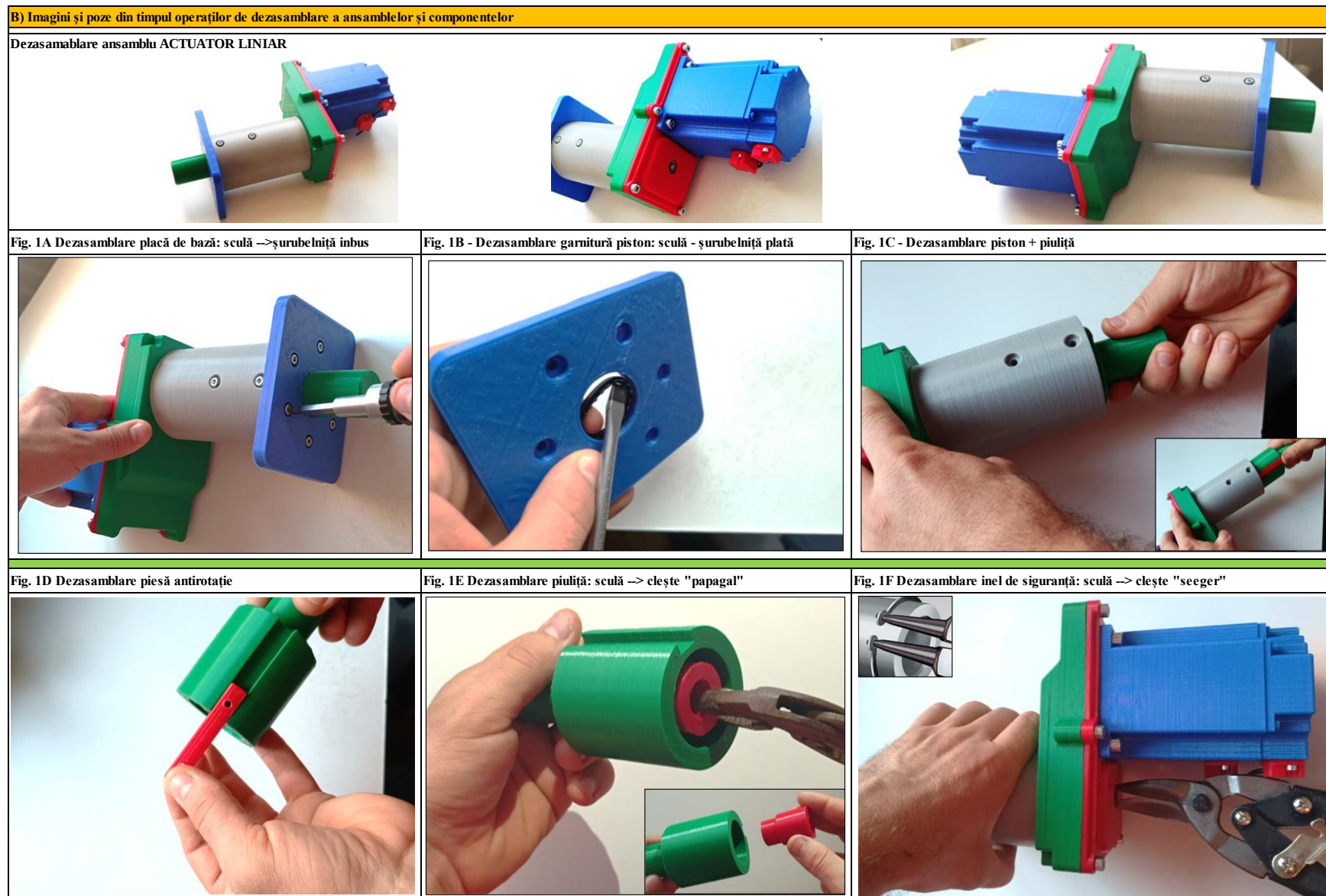


Fig. 7.5. Fișă/mapă dezasamblare și reciclare pentru ansamblu ACTUATOR LINIAR

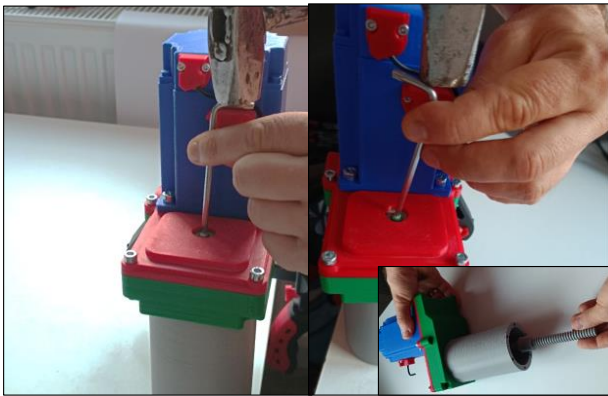
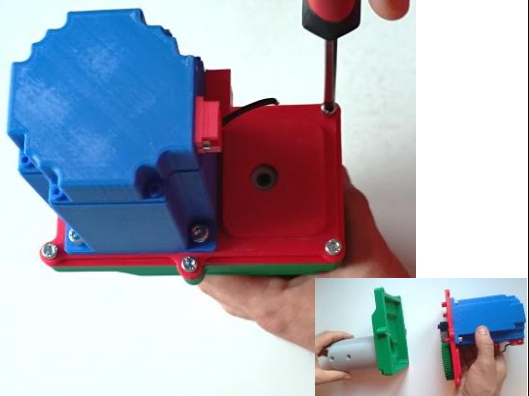
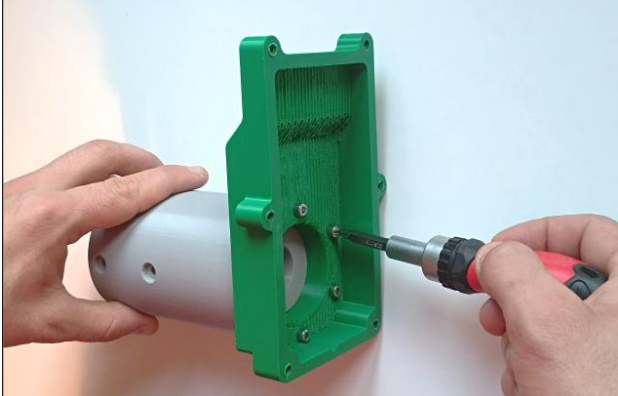
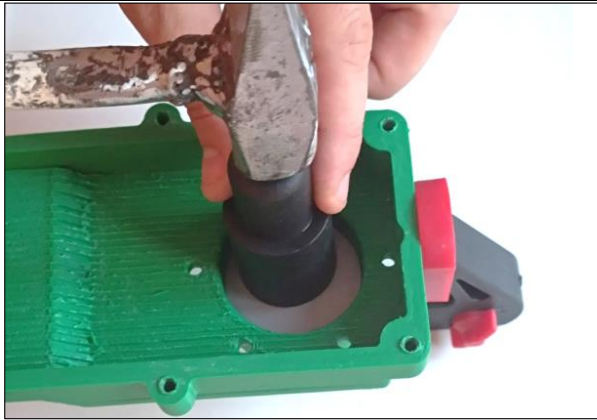
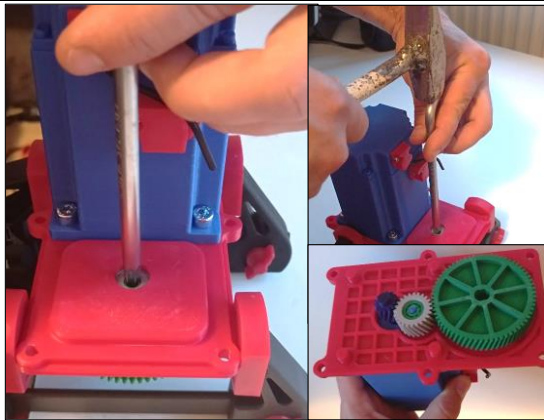
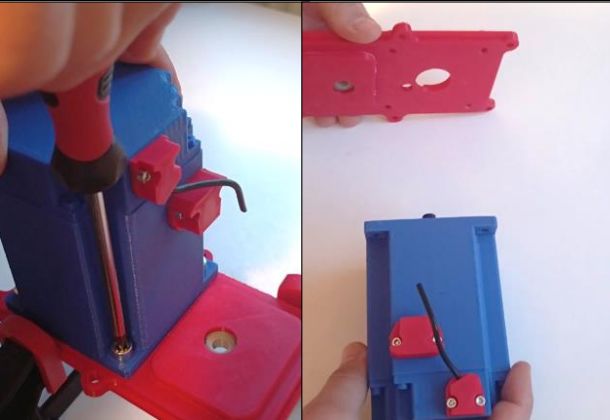
B) Imagini și poze din timpul operațiilor de dezasamblare a ansamblurilor și componentelor		
Fig. 1G Dezasamblare șurub cu bile: sculă → tijă și ciocan	Fig. 1H - Dezasamblare ansamblu carcasă roți dințate, carcasă tub și rulment cu bile → șurubelniță cap imbus	Fig. 1I - Dezasamblare carcasă tub → șurubelniță cap imbus
		
Fig. 1J Dezasamblare rulment cu bile → tijă și ciocan	Fig. 1K Dezasamblare roată dințată șurub: sculă → tijă și ciocan	Fig. 1L Dezasamblare motor: sculă → șurubelniță cap imbus
		

Fig. 7.5. Fișă/mapă dezasamblare și reciclare pentru ansamblu ACTUATOR LINIAR - Continuare

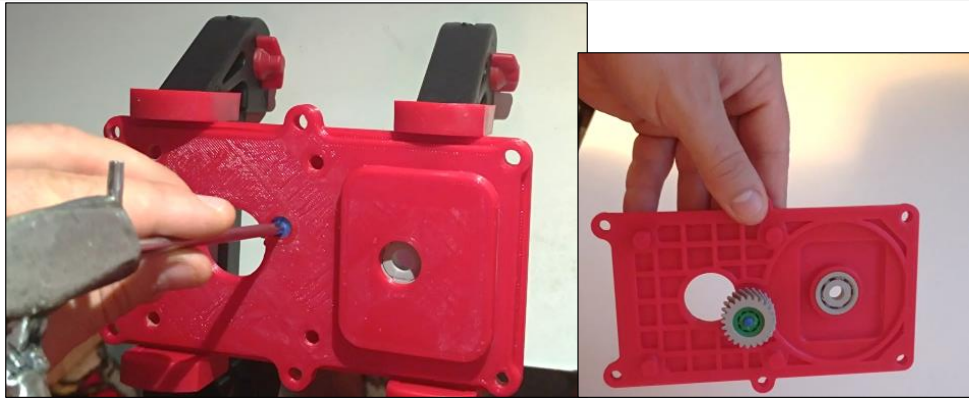
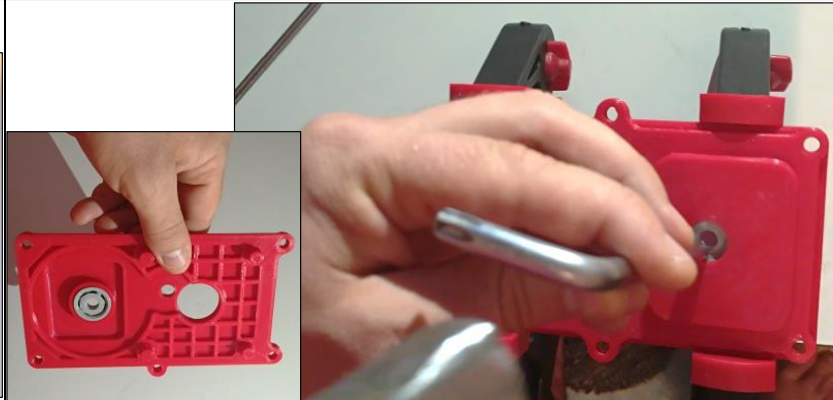
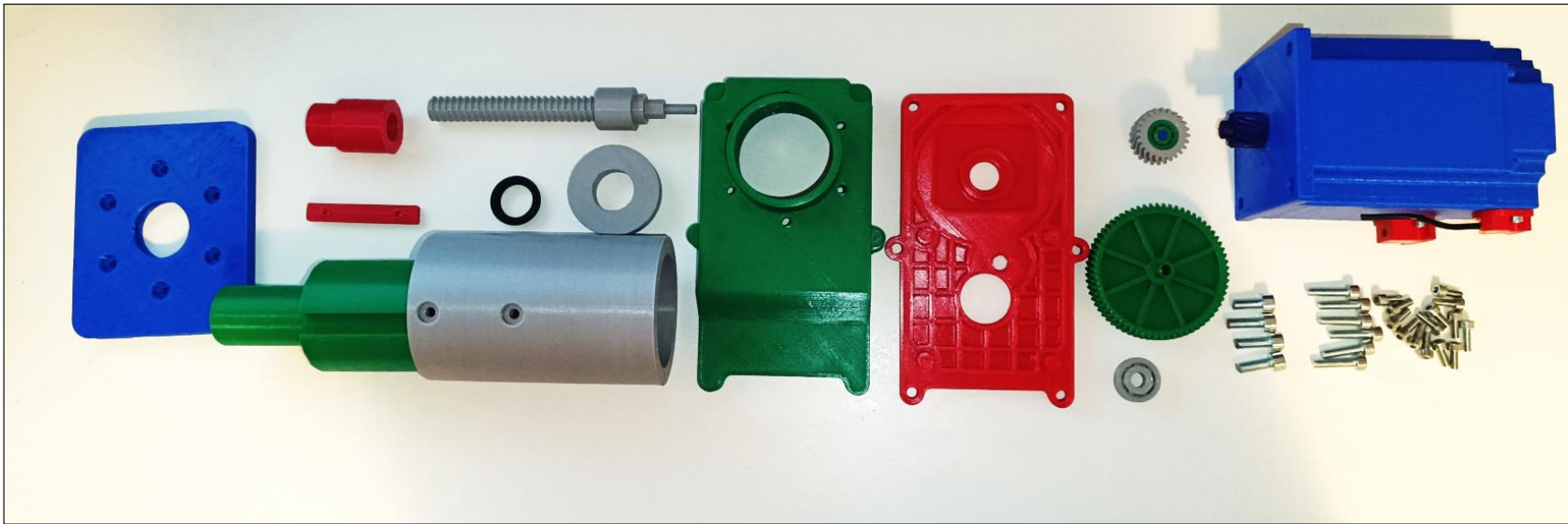
B) Imagini și poze din timpul operațiilor de dezasamblare a ansamblelor și componentelor	
Fig. 1M Dezasamblare anamblu roată intermediară: sculă -->tijă și ciocan 	Fig. 1N - Dezasamblare rulment cu biule -->șurubelniță cap imbus 
Fig. 1P Ansamblu ACTUATOR LINIAR dezasamblat complet 	

Fig. 7.5. Fișă/mapă dezasamblare și reciclare pentru ansamblu ACTUATOR LINIAR - Continuare

După realizarea pașilor de dezasamblare și documentarea lor specifică cu poze ,imagini reale se trece la ultima parte numită „ C – Parametri de calcul “ în care se definesc parametri de calcul pentru reciclabilitatea și costul după recuperarea a materialelor. Conform cu standardul DIN EN ISO 22628:2002 corelat cu informații din literatura de specialitate [W, 013] au reieșit anumiți parametri de calcul pentru reciclabilitate (tabelul 7.1) și de asemenea, partea de recuperare cost după reciclarea materialelor (tabelul 7.2).

Tabel 7.1. Parametrii de calcul pentru recuperarea materialelor [W, 013]

C: Parametri de calcul			
Nr.	Fracții de materiale	Rating reciclare	Comentari
1	Oțel și fontă	90-100%	Reciclabilitate excelentă
2	Aliaje ușoare, turnate și forjate (Al, Mg)	90-100%	Reciclabilitate excelentă
3	Metale grele neferoase, turnate și forjate (Cu, Zn etc)	90-100%	Reciclabilitate excelentă
4	Metale speciale	90-100%	Reciclabilitate excelentă
5	Materiale polimerice (exclus Elastomer)	60%	Reciclabilitatea variază în funcție de tipul de polimer
6	Elastomer materiale	25%	Reciclabilitatea variază în funcție de tipul de elastomer
7	Lichid (ex:lichid de frână, lubrificanți)	100%	Reciclabilitatea variază în funcție de nivelul de contaminare
8	Ceramic/Sticlă	80%	Reciclabilitatea variază în funcție de tipul de ingrediente
9	Materiale organice naturale (exemplu pielea)	25%	Anumite materiale organice pot fi reciclate
10	Electronice	25%	Anumite materiale din produsele electronice pot fi reciclate
11	Alte materiale / materiale compozite	0%	Materiale nespecificate

Tabel 7.2. Venituri potențiale după dezasamblare din fracțiuni de materiale [W, 013,014. 015, 016]

C: Parametrii de calcul			
Nr.	Venituri potențiale din materialele dezasamblate	Cost venit /tonă [Euro/tonă]	Sursa de informare
1	Oțel și fontă	80	[W, 013-14] Estimare
2	Aliaje ușoare, turnate și forjate (Al, Mg)	1300	[W, 013-14] Estimare
3	Metale grele neferoase, turnate și forjate (Cu, Zn, etc)	8000	[W, 013-14] Estimare
4	Metale speciale (exemplu platin)	2000	[W, 015] Estimare pentru platin este 28000 euro, pentru celelalte materiale prețurile pot varia
5	Materiale polimerice (exclus Elastomer)	460	[W, 016] Estimare
6	Elastomer materiale	-70	Estimare

7	Lichid (ex: lichid de frână, lubrifianți)	-200	Estimare
8	Ceramic/Sticlă	60	[W, 014] Estimare
9	Materiale organice naturale (exemplu pielea)	-120	Estimare
10	Electronice	-80	Estimare
11	Alte materiale / materiale compozite	-130	Estimare

7.6 Concluzii

Pașaportul de reciclare a ansamblului actuator liniar descris în lucrarea de cercetare conține informații bine organizate și structurate despre produs într-un document care permite clienților (engl. *customers*) să verifice sustenabilitatea, rata dezasamblării, reciclabilitatea și impactul asupra mediului. Un alt aspect important ar fi acela, de a înțelege cum să reparați și să reciclați un produs în timpul sau la sfârșitul de viață - EOL. Pentru a avea un procent cât mai mare de sustenabilitate a produselor, aceste pașapoarte de reciclare ar trebui realizate și utilizate în viitorul apropiat pentru produsele de zi cu zi precum electrocasnice (frigidere, mașini de spălat, etc) și electronice (telefoane, televizoare, etc.), pe măsură ce lumea are tendința de a trece la o economie mai circulară.

Aceste documente numite pașapoarte de reciclare pot fi instrumente puternice pentru a încuraja reutilizarea componentelor și reciclarea materialelor, precum și pentru a încuraja utilizarea materialelor care sunt ecologice și nu sunt supra exploatare în ziua de astăzi. Dacă produsul este planificat ținând cont de obiectivele de circularitate și sustenabilitate, un pașaport de materiale poate servi ca un document cheie în faza de proiectare. Acesta asigură că produsele folosesc componente care pot fi reutilizate ușor și în siguranță, cum ar fi produsele certificate care permit dezasamblarea și reutilizarea ușoară.

În mod ideal, un pașaport de reciclare este creat înainte de fabricarea unui produs, dar ele pot fi dezvoltate și pentru produsele existente, prin tehnici precum analiza planurilor și scanarea digitală 3D. Aceste analize pot ajuta să se înțeleagă calitatea materialelor deja utilizate în ansamble și durata de viață a materialelor specifice, informând întreținerea în timp util. Analizele pot fi aplicate la o scară mai mare și în diferite domenii de activitate (construcții, industria auto, etc).

De asemenea, documentarea și crearea unui inventar complet al materialelor unui produs oferă un nivel de detaliu esențial pentru întreținerea, re-fabricarea ulterioară și asigură că materialele sunt utilizate la întregul lor potențial. Aceste documente simplifică dezasamblarea produselor pentru recuperarea materialului iar reciclarea și reutilizarea eficientă reduc nevoia de noi resurse prin identificarea materialelor utilizate și încorporate.

Ingineri proiectanți și arhitecți pot lua decizii informate și bine structurate chiar din faza de planificare, având la îndemână informații detaliate despre materiale și tipul de dezasamblare folosit. Această abordare încurajează dezvoltarea de modele conceptuale creative care pot fi dezasamblate cu ușurință. De asemenea, aceste modele creative susțin produsele reversibile, modificându-le fără a deteriora structura componentelor unui produs sau a materialelor implicate în proiectare.

CAPITOLUL VIII.

CONCLUZII

8.1 Contribuții proprii la rezolvarea temei de cercetare

Obiectivele propuse de cercetare - dezvoltare, în cadrul tezei de doctorat și realizarea acestora a fost posibilă după consultarea în detaliu și profunzime a studiului actual al cercetărilor din domeniul proiectării pentru excelență, mai precis proiectarea pentru dezasamblare și reciclare.

S-a analizat principalele progrese din domeniu DFD-DFR, limitările date de proiectarea conceptuală în ceea ce privește partea de sustenabilitate (re-fabricare, reutilizare, reciclare) a produselor ținând cont de economia circulară.

Contribuțiile proprii la rezolvarea temei de cercetare din domeniul proiectării pentru dezasamblare – DFD și reciclare – DFR, pot fi urmărite în continuare:

- Pe baza informațiilor din literatura de specialitate s-a identificat rolul și s-a conștientizat importanța fazei incipiente de proiectare conceptuală a unui produs pentru sustenabilitatea mediului înconjurător și a economiei circulare;
- Analizarea principiilor de proiectare pentru dezasamblare și reciclare, integrate în contextul metodologiei proiectării pentru excelență, precum și interconexiunile cu alte principii DFX (proiectarea pentru asamblare, proiectarea pentru service, etc);
- Identificare și realizarea unui studiu detaliat privind ghidurile de proiectare folosite în mediu de cercetare privind proiectarea pentru dezasamblare și reciclare. De asemenea, s-a ținut cont de limitările care apar pentru fabricare – asamblare dar și punând accent pe partea de beneficii materiale respectând etapele din ghidurile propuse;
- Identificarea etapelor esențiale pentru realizarea unui plan de dezasamblare care satisface toate cerințele din punct de vedere a stadiului de proiectare, respectând și condițiile de proiectare pentru mediu înconjurător și reciclabilitate;
- Realizarea unei analize detaliate cu privire la contribuțiile metodelor DFX (DFD și DFR) pentru sprijinirea economiei circulare și identificarea beneficiilor parțiale și totale, dacă se respectă strategia și piramida 3R (reducere, reutilizare și reciclare);
- Analizarea contribuțiilor metodelor de proiectare DFD și DFR în abordarea ingineriei concurente care reprezintă o abordare sistematică a conceptului de design integrat și concurent al proceselor și produselor, inclusiv producția și susținerea acesteia;
- Realizarea unui studiu amplu în literatura de specialitate privind principalele metode de proiectare pentru dezasamblare și reciclare, cât și analiza acestora în contextual economiei circulare;
- Identificarea în cadrul procesului de dezvoltare a produselor (PDP) a rolului metodelor de proiectare DFD și DFR;

- Realizarea unui studiu amplu privind interconexiunile și compatibilitățile dintre proiectarea pentru dezasamblare – DFD și proiectarea pentru asamblare a produselor – DFA;
- Aplicarea utilizării convergente a principiilor DFD-DFR și a soluțiilor de inginerie avansată integrată CAD/CAE privind proiectarea unei structuri de produse durabile a unor componente tip roți dințate și arbori ce fac parte dintr-un dispozitiv tehnologic;
- Analizarea comparativă a beneficiilor între proiectarea conceptuală realizată cu ajutorul inginerie integrate – CAM (modulul engineering reference) și calculul clasic folosind standarde de proiectare din literatura de specialitate;
- Elaborarea instrumentelor de modelare CAD prin parametrizarea modelului solid 3D, exploatarea funcțiilor avansate și a relațiilor matematice. Scopul fiind îmbunătățirea proiectării conceptuale prin utilizarea eficientă a instrumentelor de inginerie integrată, care poate fi utilizată atât la nivel de componentă cât și la nivel de ansamblu;
- Dezvoltarea și proiectarea 3D a unui actuator liniar cu scopul de a fi folosit în proiectarea pentru dezasamblare și mai apoi pentru trasabilitatea reciclării la scoaterea din uz a produsului – EOL;
- Identificarea contribuțiilor teoretice pentru proiectarea conceptuală a unui ansamblu tip actuator liniar, privind aplicarea metodelor de proiectare DFD, cu ajutorul metodelor graficului ȘI/SAU și a rețelelor Petri;
- Realizarea detaliată a unui cadru conceptual de cercetare în patru pași în care se urmărește stabilirea și identificarea rutelor posibile de dezasamblare. Apoi la final identificarea rutei optime având ca scop avantajele specifice pentru sustenabilitatea reciclării și re-fabricării a componentelor actuatorului liniar;
- Elaborarea unui studiu de caz prin care se urmărește exemplificarea principiilor și metodologiilor pentru dezasamblare – DFD, utilizând metodele graficului ȘI/SAU și a rețelelor Petri-Net;
- Evaluarea ansamblului inițial a actuatorului liniar după aplicarea principiilor proiectării pentru dezasamblare, cu scopul de a identifica îmbunătățirea designului înainte de a trimite produsul în producția de serie;
- Realizarea fizică a unor prototipuri funcționale a componentelor actuatorului liniar cu ajutorul imprimării 3D, cu scopul de a fi utilizat ulterior pentru crearea pașaportului de reciclabilitate și definirea parametrilor pentru dezasamblare (timpul de dezasamblare, sculele folosite pentru dezasamblare, etc);
- Analiza și măsurarea dimensională și geometrică a componentelor printate 3D cu ajutorul unui șubler digital, având ca scop verificarea toleranțelor pieselor înainte de asamblarea propriu zisă;
- Exemple de învățare (engl. *leasson learn*) legate de configurarea parametrilor și specificațiilor de imprimare corespunzătoare programului de imprimare 3D Ultimaker Cura, pentru a realiza ulterior o calitate mai bună și dimensiuni care se încadrează în toleranțe specificate pe desene;

- Elaborarea unui studiu privind limitarea și maturitatea documentelor specifice reciclării și a re-fabricării (pașapoartelor de reciclare disponibile în literatura de specialitate);
- Definirea structuri, conținutului și crearea unei proceduri de realizarea a unui pașaport de reciclare cu scopul de a fi utilizat de majoritatea produselor din diferite domenii de activitate;
- Realizarea și detalierea pașaportului de reciclare folosind componentele realizate prin imprimarea 3D, sculele și dispozitive de fixarea specifice pentru dezasamblarea componentelor.

8.2 Concluzii finale

Lucrarea de doctorat intitulată *“Cercetări privind posibilitățile de aplicare a tehnicilor de proiectare pentru dezasamblare și reciclare (DFD și DFR) în ingineria fabricației”* face parte din preocupările din domeniul proiectării și sustenabilități produselor în ingineria fabricației. Ca abordare de cercetare se detaliază și aprofundează toate etapele ciclului de viață a unui produs, începând cu proiectarea conceptuală și în final validarea și propunerea pentru reciclare a produsului la sfârșit de viață – EOL. Activitățile descrise în lucrarea de cercetare au avut ca scop creșterea eficienței și eficacității gradului de sustenabilitatea a produselor. Acestea fiind obținute ca rezultat al utilizării convergente a instrumentelor de inginerie avansată (CAD, CAM, CAE) și a metodelor de proiectarea pentru excelență – DFX (DFD și DFR).

Analiza și abordarea realizată în această teză de doctorat se dezvoltă având la bază metodologiile și principiile proiectării pentru dezasamblare și reciclare în ingineria fabricației. Aceste principii DFD și DFR au fost folosite și aplicate în lucrarea de cercetare pentru dezvoltarea și proiectarea unui ansamblu actuator liniar.

Realizarea și îndeplinirea obiectivelor propuse în lucrarea de cercetare a fost posibilă doar după consultarea lucrărilor de specialitate din domeniu și realizarea unui studiu detaliat pentru stadiul actual al cercetărilor privind evoluția și progresul în ingineria de fabricație a proiectării pentru dezasamblare și reciclarea a produselor. După consultarea literaturii de specialitate și analizarea informațiilor descrise în lucrările de cercetare, s-au evidențiat atât avantaje tehnico-economice cât și cele legate de sustenabilitatea mediului înconjurător și tendința către o economie circulară. De asemenea, sa identificat o relație și o convergență cu alte concepte avansate de proiectare cum ar fi Ingineria concurentă, Ingineria simultană (engl. *Simultaneous engineering*) și proiectarea pentru Excelență (DFX). Adicional, s-a constatat că metodologiile „*Design for Disassembly and Recycling*” în ingineria fabricației reprezintă două concepte care în momentul actual devin unele dintre cele mai puternice metodologii a proiectării pentru excelență – DFX (engl. *design for excellence*), datorită contextului global și tendința către sprijinirea economiei circulare prin reutilizarea în buclă închisă a materialelor.

După studierea și analizarea surselor bibliografice din literatura de specialitate, s-a identificat că aplicarea și utilizarea conceptelor de proiectare DFD și DFR în ingineria fabricației este realizată în mai multe etape de proiectare (dezasamblare, reducere, reutilizare, reciclare). Prima etapă fiind proiectarea pentru dezasamblare – DFD, urmată de proiectarea pentru reciclare – DFR.

Cercetarea și dezvoltarea realizată în lucrarea de doctorat a avut ca punct de pornire utilizarea convergentă a principiilor DFD-DFR și a soluțiilor de inginerie integrate avansate pentru proiectarea durabilă a produselor. Ulterior, pe baza informațiilor obținute s-a abordat în detaliu principiile și ghidurile de proiectare DFD cu scopul inițial de analizare a designului iar mai apoi identificarea rutelor optime de dezasamblare și în final reproiectarea ansamblului actuator liniar după aplicarea metodologiilor DFD. În plus, după analizarea rezultatelor obținute în etapele precedente, pe baza acestora a fost detaliată și aprofundată partea de reciclare cu ajutorul principiilor de proiectare pentru reciclare – DFR și a conceptului pentru sustenabilitate a produselor numit pașaport de reciclare (engl. *recycling passport*).

După analizarea cercetărilor teoretice și experimentelor practice realizate în cadrul tezei de doctorat, pe baza acestora se pot formula următoarele concluzii:

- Ingineria concurentă stimulează dezvoltarea holistică a produsului, luând în considerare toate aspectele produsului în deciziile de proiectare. Tehnicile proiectării pentru excelență (DFX) descrise în capitolul I sunt detaliate pentru a aprofunda o abordare holistică, doar că fiecare principiu DFX se concentrează pe un singur aspect al produsului (fabricare, cost, dezasamblare, reutilizare, întreținere, reciclare, etc.). Pentru a realiza o abordare holistică solicitată de ingineria concurentă, aceste tehnici DFX trebuie să aibă conexiuni între principii și să fie unite, dar acest lucru a primit puțină atenție în literatura de specialitate. Tehnicile DFX existente pentru dezasamblare și reciclare sunt comparate pentru a identifica cum pot fi utilizate împreună. De asemenea, se evidențiază importanța relaționării tehnicilor DFX cu scopul general al unui produs, nu doar cu alte principii DFX.
- Proiectarea pentru dezasamblare (DFD) și reciclare (DFR) în ingineria fabricației face parte din filozofia proiectării pentru excelență (DFX), fiind o strategie importantă și esențială pentru managementul mediului înconjurător, pentru producătorii și pentru tendința către o economie circulară. Aplicarea principiilor DFR și DFD poate necesita o investiție semnificativă de resurse și timp. De asemenea, aceste principii pot să concureze, interconecteze cu alte cerințe importante de proiectare conceptuală în timpul fazei de planificare a proiectării produsului. Prin urmare, este avantajos să se concentreze eforturile DFR și DFD asupra acelor strategii care sunt cele mai eficiente pentru îmbunătățirea reciclabilității produselor. În capitol I au fost identificate anumite ghiduri de proiectare DFR și DFD pentru produsele care nu sunt întotdeauna eficiente pentru îmbunătățirea reciclabilității componentelor. Analizarea și prioritizarea ghidurilor de proiectare DFD și DFR pot fi utilizate pentru a ajuta la prioritizarea strategiilor de proiectare pentru reciclare, astfel încât atât reciclabilitatea produsului, cât și productivitatea proiectării să fie maximizate.
- Abordarea teoretică și studiul de caz din capitolul III al lucrării de cercetare prezintă integrarea principiilor de proiectare pentru dezasamblare și reciclare cu elemente specifice soluțiilor avansate de inginerie integrată. Aceste două concepte converg împreună pentru a susține importanța integrării instrumentelor avansate CAD/CAE/CAM/PLM pentru proiectarea durabilă și îmbunătățirea sustenabilității designului, diminuarea timpului și a lansării pe piață, reducerea costurilor și a timpurilor de producție. Definirea unui cadru de

cercetarea a proiectării conceptuale sa dovedit eficient pentru sustenabilitatea produselor ținând cont de definirea specificațiilor (engl. *product specification*), cerințelor produsului (engl. *requirements*) și a structuri de produs (engl. *product structure design*).

- Modelul conceptual de cercetare descris în capitolul IV vine să sprijine dinamică nevoilor, dezvoltarea durabilă a structurii produselor și a proiectării conceptuale detaliate. Exploatarea structurii de parametrizare a modelelor 3D arbori, roți dințate au ajutorul structurii Intrare (engl. *input*) – Ecuații (engl. *equation*) – Ieșire (engl. *output*), sa dovedit eficientă pentru îmbunătățirea flexibilități oferită de software-ul CAD /CAE. În plus, structura de produs parametrică și modulară poate fi ușor optimizată modificând doar parametrii de setare, dar ținând cont de condițiile limită impuse (date de ieșire). Prin urmare, prin aplicarea parametrizării 3D împreună cu principiile DFD și DFR, se obține reducerea timpului de lansare a produsului pe piață, costuri de producție mai mici și îmbunătățirea produselor într-un timp relativ scurt prin crearea unei structuri modulare și a unor familii de produse.
- Aplicarea metodelor și principiilor DFD în ingineria fabricației utilizate pentru evaluarea designului inițial, identificare rutelor optime de dezasamblare și în final reproiectarea actuatorului liniar, au evidențiat și identificat o metodă eficientă și sustenabilă pentru dezasamblarea produselor și mai apoi reciclarea materialelor în condiții de siguranță. Metodele graficului ȘI/SAU și a rețelelor Petri folosite în cadrul lucrării de cercetare oferă toate secvențele posibile de dezasamblare și eventualitatea utilizării programării dinamice pentru a găsi planul optim de dezasamblare a ansamblului actuator liniar. În acest fel, procesul de căutare se poate baza pe cerințele tehnice și economice în timp ce se îndeplinesc cerințele legislației, inclusiv aspectele de mediu. Problemele conflictuale cu care se confruntă un designer ar putea fi minimizate sau eradicate, iar aplicarea concomitentă a designului pentru asamblare și dezasamblare ar putea fi o adevărată provocare. Considerațiile practice de complexitate, manipularea dezasamblării și accesibilitatea pieselor, descrise pentru dezasamblarea actuatorului liniar ar trebui să fie integrate ca pas de verificare în procesul de evaluare, deoarece dezasamblarea necesită efort uman și anumite scule care trebuie folosite în zone cu accesibilitate redusă.
- Metodologiile propuse în capitolul IV permit inginerilor proiectanți să aibă o manieră organizată și structurată în proiectarea produselor. Nu trebuie să se țină cont de proiectarea dezasamblării pentru toate componentele ansamblului produsului, ci numai pentru acele componente care influențează dezasamblarea, împiedicând manipularea și accesibilitatea. În cadrul studiului de caz, sa identificat traseul optim din punct de vedere al complexității, manipulării și accesibilității (traseul omega, culoarea roșie). Identificând ruta optimă de dezasamblare se aplică metodologia proiectării pentru dezasamblare (DFD) pentru a se îmbunătăți procesul de dezasamblare. Una dintre modificările de design care pot fi efectuate pentru îmbunătățirea proiectării pentru dezasamblare, este reducerea lungimi pistonului, astfel încât să realizeze o accesibilitate mai bună a piuliței și să nu se folosească scule speciale pentru manipulare și ulterior dezasamblarea acesteia. De asemenea, putem concluziona că proiectarea pentru dezasamblare (DFD) în ingineria fabricației aduce avantaje atât pentru

proiectarea pentru asamblare cât și pentru sustenabilitatea produselor cu tendință către economia circulară (dezasamblare, reducere, reutilizare, reciclare).

- În lucrarea de cercetare, tehnicile din domeniul fabricării aditive – AM (engl. *additive manufacturing*), cunoscută în literatura de specialitate ca imprimare tridimensională (3D), au oferit cea mai bună variantă de fabricare pentru construirea relativ rapidă și controlată a unor prototipuri funcționale ale ansamblului actuator liniar. Nu a fost nevoie de scule și dispozitive speciale și de asemenea, imprimarea 3D nu a avut impact asupra funcționalității produsului. Adicional, modelarea 3D și instrumentele avansate de proiectare CAD au un impact mare asupra aspectelor din diferite domenii de activitate iar imprimarea 3D a făcut posibilă realizarea cu precizie a formelor geometrice complexe a ansamblului actuator liniar. Cu ajutorul imprimării 3D a componentelor fizice a actuatorului liniar, se demonstrează practic și experimental aplicarea principiilor folosite pentru îmbunătățirea procesului de dezasamblare a componentului numit piuliță (număr 15 BOM). Partea practică a avut la bază principiile și metodele folosite în capitolul 4 pentru dezasamblare (DFD).
- Realizarea unor prototipuri a componentelor ansamblului actuator liniar a facilitat contribuția privind realizarea unui pașaport de reciclare a actuatorului liniar care poate fi folosit în contextul proiectării pentru reciclare și dezasamblare. După analizarea lucrărilor de cercetare și consultarea literaturii de specialitate sa identificat că nu este tratată suficient de bine partea de reciclare de către producători iar maturitatea conceptului “recycling passport” este încă foarte scăzută. În literatura de specialitate se regăsesc anumite modele de “recycling passport” realizate de către anumiți producători, dar sunt incomplete și nu satisfac nevoia de reciclare și recuperare, în totalitate.
- Pașaportul de reciclare realizat pentru actuatorul liniar a avut ca scop închiderea buclei economiei circulare în care prima etapă a fost partea de fabricare, apoi aplicarea principiilor pentru dezasamblare și în final utilizarea unui document pentru sustenabilitatea reciclării. Documentul de reciclare conține informații bine structurate despre produs care permite clienților să verifice ce influență are produsul asupra mediului înconjurător și pentru a înțelege cum să-l recicleze atât în timpul cât și la sfârșitul de viață al produsului – EOL. De asemenea, pentru a avea un procent cât mai mare de reciclabilitate și influență negativă cât mai mică asupra mediului înconjurător, aceste documente numite pașapoarte de reciclare ar trebui utilizate și aplicat tuturor produselor de zi cu zi pentru a sprijini trecerea și tranziția către o economie circulară. Ca o concluzie se poate justifica că pașaportul de reciclare (engl. *recycling passport*) poate fi utilizat ca un document cheie în faza de proiectare conceptuală a produselor pentru a asigura că componentele utilizate în design pot fi reutilizate ușor și permit dezasamblare fără a afecta funcționalitatea ulterioară. Acest lucru fiind posibil doar dacă produsul a fost planificat ținând cont de obiectivele de circularitate și sustenabilitate.
- Ingineri proiectanți, arhitecți sau alte persoane specializate în proiectarea conceptuală a produselor, pot lua decizii încă din faza etapei de planificare, având la îndemână informații detaliate despre materiale, tipul acestora și gradul de reciclabilitate. Acest concept încurajează dezvoltarea și realizarea de modele creative care pot fi dezasamblate cu ușurință. În plus, pot

fi realizate produse reversibile care se pot modifica fără a deteriora structura, componentele sau materialele implicate a produselor. De asemenea, documentarea și crearea unui pașaport de reciclare reprezintă inventarierea completă al materialelor unui produs care oferă un nivel de detaliu esențial pentru întreținere, renovare ulterioară și asigură că materialele sunt utilizare la întregul lor potențial conform cu procesul de fabricație.

În urma cercetărilor teoretice și experimentale, a reieșit faptul că un proiect poate fi eficient (timp redus, cost mic) și sustenabil doar prin utilizarea interconexiunilor dintre soluțiile avansate de proiectare CAD/CAM/CAE, parametrizarea modelelor 3D, aplicarea principiilor proiectării DFX (DFD și DFR), imprimarea 3D ca soluție rapidă de prototipare și realizare unui document de sustenabilitate a produselor.

8.3 Direcții viitoare de dezvoltare a cercetărilor

În urma cercetărilor efectuate și aprofundate în lucrarea de doctorat, și a concluziilor detaliate separat pentru fiecare capitol, anumite direcții posibile de cercetare au fost identificate ca fiind de interes pentru cercetare și dezvoltare:

1. Realizarea unui manual de mentenanță (engl. *service concept*) pentru actuatorul liniar, care poate fi folosit în contextul proiectării pentru mentenanță.
2. Aplicarea unei noi metode diferite de graficul ȘI/SAU și rețelele Petri, numită hartă de dezasamblare (engl. *dissassembly map*) dezvoltată de cercetătorul [DeFazio 2021], pentru dezasamblarea produselor studiate, cu scopul de a verifica eficiența și limitările metodei în procesul de dezasamblare.
3. Analiza și abordarea planificării pentru dezasamblare bazată pe inteligență artificială (algoritmi genetici și matematici, rețele logice și neuronale etc.) și prin folosirea anumitor programe specifice dezasamblări.
4. Realizarea unor prototipuri funcționale a ansamblului actuator liniar, în care componentele să fie realizate prin tehnologiile de fabricare specifice cum ar fi turnare aluminiu, laminare, injecție mase plastice, etc. cu scopul de a realiza anumite teste de asamblare și dezasamblare.
5. Determinarea parametrilor reali de asamblare și dezasamblare (momentul de strângere al șuruburilor, forța de presare necesară pentru a dezasambla un component fără a afecta materialul, etc), pentru fiecare component din actuatorul liniar, ca mai apoi informațiile să fie transferate în pașaportul de reciclare.
6. Actualizarea și adăugarea unor noi informații în pașaportul digital, specifice dezasamblări produselor care au în componența lor lichid hidraulic, lichid de frână sau alte substanțe pentru care trebuie creată o specificație separată de extragere în condiții de siguranță.

După definirea direcțiilor viitoare de cercetare, consider că în literatura de specialitate sunt anumite limitări, informații și rezultate lipsă din domeniul proiectării pentru dezasamblare și reciclare, ceea ce face ca aceste obiective propuse să fie realiste și consider că se pot realiza practic și experimental.

Rezultatele cele mai importante obținute în activitatea de cercetare dobândită pe parcursul studiilor doctorale au făcut obiectul anumitor publicații de lucrări științifice care au fost susținute în reviste de specialitate sau conferințe științifice pe plan național cât și internațional. În continuare este prezentată lista de lucrări științifice publicate atât ca autor sau coautor:

1. Ciubotariu, V., Câcu, A., Rotundu, I. A., **Cucoș, M. M.**, & Coteață, M. (2014). Influence of some factors on surface roughness parameters at electrical discharge machining. *Applied Mechanics and Materials*, 657, 291-295. *Lucrare indexată Web of Science*. <https://www.scientific.net/AMM.657.291>
2. Merticaru, V., Ripanu, M. I., Mihalache, M. A., & **Cucos, M. M.** (2015). Integrating Advanced Engineering Solutions for Enhancing Product Development Sustainability. *Applied Mechanics and Materials*, 809, 1492-1497. *Lucrare indexată Web of Science*. <https://www.scientific.net/AMM.809-810.1492>
3. **Cucoș M.M.**, Merticaru, V., Nagîț, G. & Pișta, I.M (2017). Convergent use of DFD-DFR principles and of advanced integrated engineering solutions for sustainable product design (Vol. 63 (67), numărul 3, 2017). Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Secția CONSTRUCȚII DE MAȘINI. *Lucrare indexată în BDI*. http://www.cmmi.legacy.tuiasi.ro/wp-content/uploads/buletin/2017%20fasc%203/L2_CM%203_2017.pdf
4. Pișta, I. M., Nagîț, G., Merticaru, V., Rîpanu, M. I., & **Cucoș, M.** (2017). Axiomatic design theory applied in developing a technological device for automated assembly. In Buletinul Institutului Politehnic Din Iași (Vol. 63 (67), No. 3). Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Secția CONSTRUCȚII DE MAȘINI. *Lucrare indexată în BDI*. https://www.cmmi.tuiasi.ro/wp-content/uploads/buletin/2017%20fasc%203/L1_CM%203_2017.pdf
5. **Cucoș, M.M.**, Nagîț, G., Pișta, I.M., & Dzetzit, A.G. (2018). Integration of advanced methodologies and technologies of design for disassembly and recycling for sustainable product design. In Buletinul Institutului Politehnic Din Iași (Vol. 64 (68), No. 4). Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Secția CONSTRUCȚII DE MAȘINI. *Lucrare indexată în BDI*. <https://www.cmmi.tuiasi.ro/wp-content/uploads/buletin/2018%20fasc%204/L4%20CM%204%202018.pdf>

6. **Cucos, M. M.**, Pista, I. M., & Ripanu, M. I. (2018). Product engineering design enhancing by parameterizing the 3D solid model. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 178, p. 05011). *Lucrare indexată Web of Science*. https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/37/mateconf_imanee2018_05011/mateconf_imanee2018_05011.html
7. Merticaru, V. V., Merticaru, E., Butnariu, I., & **Cucos, M. M.** (2018). Enhancing product structure design for an automation mechanism, by involving axiomatic design theory. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 178, p. 05003). EDP Sciences. *Lucrare indexată Web of Science*. https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/37/mateconf_imanee2018_05003/mateconf_imanee2018_05003.html
8. Pișta, I. M., Nagîț, G., Merticaru, V., Rîpanu, M. I., & **Cucoș, M.** (2019, October). Analyses and redesign of a technological device for automated assembly, using Design for Manufacturing and Assembly approach. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 564, No. 1, p. 012058). IOP Publishing. - *Lucrare indexată Web of Science*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/564/1/012058/meta>

Bibliografie selectivă

- [1] [Abuzied, 2020] Abuzied, H., Senbel, H., Awad, M., & Abbas, A. (2020). A review of advances in design for disassembly with active disassembly applications. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(3), 618-624
- [14] [Battaia, 2018] Battaia, O., Dolgui, A., Heragu, S. S., Meerkov, S. M., & Tiwari, M. K. (2018). Design for manufacturing and assembly/disassembly: joint design of products and production systems. *International Journal of Production Research*, 56(24), 7181-7189.
- [20] [Benabdellah, 2019] Benabdellah, A. C., Bouhaddou, I., Benghabrit, A., & Benghabrit, O. (2019). A systematic review of design for X techniques from 1980 to 2018: concepts, applications, and perspectives. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 3473-3502.
- [42] [Candido, 2022] Candido, G. M., Kaminski, P. C., Medeiros, M. A., & de Araújo, A. G. L. (2022). Design for Excellence (DfX) in vehicle armoring operations: improvements and speed up a systematic literature review. *Product: Management and Development*, 20(1), 0-0.
- [43] [Cappelli, 2007] Cappelli, F., Delogu, M., Pierini, M., & Schiavone, F. (2007). Design for disassembly: a methodology for identifying the optimal disassembly sequence. *Journal of Engineering Design*, 18(6), 563-575.
- [64] [De Fazio, 2021] De Fazio, F., Bakker, C., Flipsen, B., & Balkenende, R. (2021). The Disassembly Map: A new method to enhance design for product repairability. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128552
- [65] [De Mello, 1990] De Mello, L. H., & Sanderson, A. C. (1990). AND/OR graph representation of assembly plans. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 6(2), 188-199.
- [87] [Farouk, 2019] Farouk, H., & Abdelsabour, I. (2019). (DFD) DESIGN FOR DISASSEMBLY FRAMEWORK: AN APPROACH TO ENHANCE THE DESIGN CONSTRUCTION PROCESS. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 47(6), 883-898.
- [107] [Gotz, 2022] Götz, T., Berg, H., Jansen, M., Adisorn, T., Cembrero, D., Markkanen, S., & Chowdhury, T. (2022). Digital product passport: the ticket to achieving a

- climate neutral and circular european economy? CLG Europe: Cambridge, UK, 2022; p. 36
- [124] [Heinrich, 2019] M. Heinrich, W. Lang, Materials Passports - Best Practice. Innovative Solutions for a Transition to a Circular Economy in the Built Environment. 2019. Available online: https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/02/BAMB_MaterialsPassports_BestPractice.pdf.
- [156] [Kim, 2016] Kim, S., Moon, S. K., Jeon, S. M., & Oh, H. S. (2016, December). A disassembly complexity assessment method for sustainable product design. In *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 1468-1472). IEEE.
- [166] [Kopparapu, 2023] Kopparapu, S., Sharma, A. (2023) Digital Product Passports: Exploring Product information and its role in fostering the Circular Economy, : Department of Informatics, Lund School of Economics and Management, Lund University, Master Thesis, number of pages 154
- [185] [Martinez Leal, 2020] Martínez Leal, J., Pompidou, S., Charbuillet, C., & Perry, N. (2020). Design for and from recycling: A circular ecodesign approach to improve the circular economy. *Sustainability*, 12(23), 9861.
- [198] [Merticaru, 2015] MERTICARU, V., NAGIT, G., PRALEA, B., & OANA, R. (2014). CONVERGENT USE OF ADVANCED CAD/CAE/CAM CAPABILITIES FOR SUSTAINABLE INTEGRATED ENGINEERING. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 12(2).
- [201] [Moore, 2001] Moore, K. E., Güngör, A., & Gupta, S. M. (2001). Petri net approach to disassembly process planning for products with complex AND/OR precedence relationships. *European Journal of Operational Research*, 135(2), 428-449.
- [236] [Ravi, 2012] Ravi, V. (2012). Evaluating overall quality of recycling of e-waste from end-of-life computers. *Journal of Cleaner Production*, 20(1), 145-151.
- [268] [Soh, 2014] Soh, S. L., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2014). Design for disassembly for remanufacturing: methodology and technology. *Procedia CIRP*, 15, 407-412.
- [269] [Soh, 2015] Soh, S. L., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2015). Application of design for disassembly from remanufacturing perspective. *Procedia CIRP*, 26, 577-582.

- [291] [Veerakamolmal, 2000] Veerakamolmal, P., & Gupta, S. (2000). Design for disassembly, reuse, and recycling. In *Green Electronics/Green Bottom Line* (pp. 69-82). Butterworth-Heinemann.
- [310] [Zussman, 1998] Zussman, E., Zhou, M. C., & Caudill, R. (1998, May). Disassembly Petri net approach to modeling and planning disassembly processes of electronic products. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. ISEE-1998 (Cat. No. 98CH36145)* (pp. 331-336). IEEE.
- [314] Comisia Europeană European Commission (2022). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council Establishing a Framework for Setting Ecodesign Requirements for Sustainable Products and Repealing Directive 2009/125/EC.https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation_en
- [318] [W, 004] Circular economy: definition, importance and benefits: Informații despre economia circulară Comisia Europeană disponibile la adresa: [Circular economy: definition, importance and benefits | Topics | European Parliament \(europa.eu\)](#) la data de 20.05.2024
- [323] [W, 008] European Commission (2022). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council Establishing a Framework for Setting Ecodesign Requirements for Sustainable Products and Repealing Directive 2009/125/EC.https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation_en accesat la data de 06.06.2024
- [327] [W, 012] ISO 22628:2002 Road vehicles, Recyclability and recoverability - Calculation method : Informații despre reciclare conform ISO 22628:2002 <https://www.iso.org/standard/35061.html> accesat la data de 03.06.2024
- [330] [W, 014] Informații despre reciclare materialelor și cost: <https://pajurca.ro/preț.php> accesat la data de 05.06.2024.
- [333] [W, 017] Informații format SLT folosit pentru imprimarea 3D: <https://www.adobe.com/creativecloud/file-types/image/vector/stl-file.html> accesat la data de 16.06.2024