



MINISTERUL EDUCAȚIEI
Universitatea POLITEHNICA din București
Școala Doctorală de
Inginerie Industrială și Robotică
Departamentul de Rezistența Materialelor

Florian G. VLĂDULESCU

REZUMAT TEZĂ DE
DOCTORAT

Proiectarea și optimizarea topologiei
componentelor structurale

Conducător științific,

Prof.dr.ing. Dan Mihai CONSTANTINESCU

Cuprins

Introducere	4
<i>Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor privind aplicabilitatea metodelor DOE în inginerie</i>	9
1.1. Scurt istoric	9
1.2. Cunoștințe necesare aplicării DOE în industrie	9
1.3. Procedură generală	10
1.4. DOE - Principii de bază	11
1.5. Concluzii	12
<i>Capitolul 2. Metode factoriale</i>	13
2.1. Planuri factoriale	13
2.1.1. Experimentul cu blocuri complet randomizate	13
2.1.2. Experimentul factorial complet	14
2.1.3. Experimentul factorial fracționat	14
2.1.4. Experimentul compus central	14
2.2. Metoda Taguchi	15
2.2.1. Design robust	15
2.2.2. Matrice ortogonale	16
2.3. Metoda suprafeței de răspuns	16
2.3.1. Tipuri de suprafețe de răspuns	17
2.3.2. Verificarea preciziei răspunsului	17
2.3.3. Procesarea rezultatelor	18
2.4. Concluzii	18
<i>Capitolul 3. Procesul de optimizare în ingineria mecanică</i>	19
3.1. Conceptele și structura procesului de optimizare	19
3.2. Utilizarea optimizării în inginerie	19
3.3. Optimizarea structurală	20
3.4. Utilizarea analizelor structurale în procesul de optimizare	21
3.4.1. Definiții și terminologie de bază	21
3.4.2. Definiția proprietăților de material	22
3.5. Corelarea numerică a parametrilor în procesul de optimizare	23

3.5.1. Metode de corelare	23
3.5.2. Diagrama de sensibilitate	24
3.6. Concluzii	24
<i>Capitolul 4. Optimizarea topologică</i>	25
4.1. Introducere	25
4.2. Tehnici integrate de optimizare structurală	25
4.3. Abordări clasice	26
4.4. Metode pentru configurarea problemelor de optimizare a topologiei	27
4.5. Considerații practice	28
4.6. Concluzii	28
<i>Capitolul 5. Îmbunătățirea răspunsului modal pentru un suport de montare utilizând optimizarea topologică de tip lattice</i>	29
5.1. Introducere	29
5.2. Optimizarea topologică a unui suport pentru un braț de robot (studiu de caz)	29
5.3. Modelul inițial	30
5.4. Analiza modală	31
5.5. Optimizarea de tip lattice	32
5.6. Omogenizarea structurii lattice utilizând metoda elementelor finite	34
5.7. Concluzii	37
<i>Capitolul 6. Fabricarea aditivă</i>	38
6.1. Introducere	38
6.2. Avantajele imprimării 3D în comparație cu procedeele tradiționale	39
6.3. Tehnologii de bază ale prototipării rapide	39
6.3.1. Stereolitografia	40
6.4. Simularea numerică a procesului de fabricare aditivă a unui suport de montare	41
6.4.1. Obiectivul studiului	42
6.4.2. Ipoteze de calcul	42
6.4.3. Modelul geometric	42
6.4.4. Modelul discretizat	43
6.4.5. Rezultate	44
6.5. Concluzii	44
<i>Capitolul 7. Verificarea răspunsului modal pentru un suport de montare utilizând simulări numerice și teste experimentale</i>	45
7.1. Introducere	45
7.2. Descrierea studiului de caz	45
7.3. Analiza modală	46

7.4. Optimizarea de tip lattice	46
7.5. Omogenizarea structurii lattice utilizând metoda cu elemente finite	48
7.6. Teste experimentale	49
7.7. Concluzii	52
<i>Capitolul 8. Concluzii finale</i>	53
8.1. Concluzii generale	53
8.2. Contribuții originale	55
8.3. Direcții viitoare de cercetare	55
Bibliografie	56

Cuvinte cheie: design, optimizare factorială, optimizare topologică, lattice, metoda elementelor finite, analiza modală, material omogenizat, fabricare aditivă

Introducere

(i) Obiectul cercetării doctorale

Optimizarea este un proces important în multe domenii de activitate și se realizează prin alegerea soluției celei mai bune dintre două sau mai multe soluții posibile. Subiectivismul însă își pune amprenta asupra căutării soluției optime și este cu atât mai pronunțat cu cât numărul soluțiilor posibile este mai mare. Cum domeniul soluțiilor posibile crește odată cu progresul tehnico-economic, alegerea optimului se face tot mai greu. În aceste condiții se impune obiectivizarea soluției optime, mai ales atunci când domeniul soluțiilor posibile crește nelimitat. În cele mai multe situații, domeniul soluțiilor posibile este infinit, iar din infinitatea acestor soluții una este cea mai bună pentru un anumit scop, adică optimă.

În prezent, se consideră că o soluție rațională pentru o problemă de optimizare poate fi obținută doar dacă se ține cont în egală măsură de multitudinea factorilor care o condiționează. În acest sens, se remarcă faptul că, elementele de optimizat nu pot fi privite independent de construcția din care fac parte, deoarece există o interdependență evidentă între acestea și restul construcției, interdependență ce trebuie exprimată în procesul optimizării. De asemenea, se constată că, cel puțin în etapa actuală, nu este posibilă efectuarea unei optimizări de ansamblu care să conducă la o soluție generală, capabilă să satisfacă toate aspectele și cerințele impuse, și de aceea cercetările care se întreprind vizează doar optimizarea anumitor aspecte tehnice, tehnologice și economice.

Deși rezolvarea strict matematică a problemei de optimizare oferă avantaje remarcabile, o astfel de abordare nu este însă întotdeauna acceptabilă, deoarece presupune considerarea a numeroși factori obiectivi și subiectivi. Aceștia pot avea caracteristici și influențe contradictorii asupra optimizării, funcție de condițiile în care se găsește structura respectivă, iar din acest motiv, la ora actuală, se acceptă și metode de optimizare mai puțin riguroase.

Procesul de optimizare urmărește atât concepția, alcătuirea de ansamblu a structurii de rezistență și stabilirea formei ei, cât și dimensionarea elementelor care o compun. Pentru a simplifica rezolvarea problemei, modul de alcătuire a structurii și parametri ei geometrici generali se fixează în prealabil, rămânând de optimizat doar parametrii fizico-mecanici, ca de exemplu distribuția materialului în elementele componente ale structurii de rezistență. În această situație, drept parametri de optimizare intervin anumite dimensiuni ce definesc secțiunile transversale ale elementelor, precum și caracteristicile geometrice ale acestora.

În general, deși variabilele de decizie sunt parametri independenți, există situații în care variabilele nu pot fi considerate independente. Acestea din urmă corespund cazului când variabilele satisfac fie anumite ecuații de condiție (specifice metodei eforturilor sau a deplasărilor), fie relații ce exprimă echilibrul mecanic în diferite stadii de lucru. În situațiile menționate, variabilele de proiectare reprezintă practic condiții restrictive și vor fi considerate în procesul de optimizare ca atare.

Variabilele de decizie reprezintă cantități numerice reale care trebuie determinate la proiectarea unei structuri de rezistență. Acestea sunt mărimi independente care descriu anumite aspecte specifice problemei, cum ar fi: caracteristicile geometrice ale elementelor componente, configurația structurii (mărimea deschiderilor, raportul dintre înălțime și deschidere), proprietățile fizico - mecanice ale materialelor din care este confecționată structura.

Parametrii menționați pot varia, fie prin valori continue, fie discrete, conducând astfel la un număr infinit, respectiv finit de combinații posibile.

Reducerea volumului problemei de optimizare este posibilă prin folosirea în alcătuirea structurilor de rezistență a unor elemente standardizate și tipizate, precum și prin impunerea anumitor considerații constructive.

Astfel, se elimină variația numărului acestor parametri care caracterizează secțiunile transversale ale elementelor de rezistență, ei putând avea un număr restrâns de valori, ceea ce duce la micșorarea numărului combinațiilor acestora.

(ii) Actualitatea și importanța cercetării doctorale

Simplificarea problemei optimizării constă, în etapa actuală, în faptul că se recurge la schematizarea situațiilor reale prin introducerea unor ipoteze simplificatoare cu caracter acoperitor. Având în vedere acest aspect, o parte din studiile efectuate până în prezent și-au găsit aplicarea în practică, datorită faptului că au fost finalizate sub formă de algoritmi și programe de calcul.

Metodele analitice (clasice) de optimizare se pot aplica la funcții obiectiv continue sau variabile. Aceste metode devin imposibil de aplicat pe măsură ce variabilele de decizie sunt restricții de tip egalitate sau inegalitate și crește dimensiunea problemei. Din acest motiv, metodele analitice se aplică doar pentru rezolvarea problemelor simple de optimizare cu număr mic de variabile de decizie.

Metodele numerice de optimizare sunt aplicabile pentru probleme de optimizare cu funcții obiectiv și restricții complexe și număr mare de variabile de decizie. Metodele din această clasă se bazează pe experimente numerice planificate prin care se înaintează pas cu pas spre extremul căutat al funcției obiectiv, prin îmbunătățiri succesive ale valorilor funcției.

Așadar, procedeele numerice de optimizare se folosesc când procedeele analitice sunt fie inoperante, fie laborioase și dificile (rezolvarea unui număr mare de ecuații implicate). De asemenea, procedeele numerice de testare a optimului sunt utile când nu se cunoaște expresia analitică a funcției de performanță, dar există posibilități experimentale, putându-se măsura performanța în prezența unor restricții cunoscute. Testarea numerică a optimului conduce la localizarea aproximativă a punctului de optim, eroarea de aproximare fiind dependentă de pasul de testare și de metoda de testare care implică diferite grade de convergență.

Modelarea matematică este o etapă importantă în cadrul algoritmului procesului de optimizare. Aceasta are drept scop identificarea unor relații matematice care descriu procesul ce urmează a fi optimizat. Etapa de modelare matematică nu este necesară atunci când se face o optimizare experimentală prin modificarea după un anumit plan a factorilor care influențează parametrii sistemului ce este optimizat cu scopul identificării soluției optime. Necesitatea elaborării unui model matematic al sistemului în cazul rezolvării unei probleme de optimizare derivă din faptul că, indiferent de criteriul de optimizare ales, expresia acestuia depinde de variabilele sistemului.

O metodă numerică foarte utilizată în prezent este optimizarea topologică dedicată structurilor lattice. Această metodă combinată cu procesul de fabricare aditivă permite realizarea unor piese cu o formă personalizată complexă, oferind în același timp un control precis al geometriei interne a pieselor. Acest subiect este studiat detaliat în lucrarea de față.

După proiectarea modelului geometric preliminar, este utilizată metoda cu elemente finite atât pentru soluționarea analizei de optimizare topologică din care rezultă structura lattice optimă cât și pentru a anticipa comportamentul structurii lattice la diverse solicitări mecanice și pentru a testa mai multe tipuri de celule lattice. Astfel, analiza cu elemente finite este utilă pentru optimizarea structurilor lattice. Precizia acestei analize depinde de: proprietățile materialului atribuit modelului 3D, dimensiunea elementelor, geometria celulei lattice și densitatea relativă a piesei. Analizând rezultatele obținute, s-a observat că densitatea relativă poate influența elasticitatea structurii și că analizele FEA pot fi utilizate pentru a evalua comportamentul structurilor lattice.

Proprietățile dimensionale și mecanice ale structurilor lattice au fost îmbunătățite. S-a constatat că un factor important care poate influența proprietățile mecanice ale structurilor lattice este tipul de celulă utilizat. Acesta are un efect direct asupra rigidității structurii. De asemenea, precizia dimensională joacă un rol important în obținerea proprietăților mecanice adecvate ale structurilor lattice. Alegerea corectă a parametrilor procesului de fabricare aditivă conduce la o calitate mai bună a structurilor lattice.

(iii) Scopul și obiectivele cercetării doctorale

Scopul principal al tezei de doctorat îl constituie prezentarea unei metodologii eficiente de analiză experimentală și numerică dedicată optimizării topologiei componentelor structurale, în vederea îmbunătățirii performanțelor structurale ale acestora, care să contribuie la extinderea utilizării structurilor lattice în diferite aplicații de interes științific sau industrial.

Pentru atingerea scopului enunțat, obiectivele tezei de doctorat pot fi grupate în două categorii:

1. Realizarea unei cercetări numerice din care să rezulte informații cu privire la comportamentul structurilor lattice la vibrații modale:

1.1. conceperea și realizarea unor modele numerice care să descrie cât mai fidel răspunsul la vibrații modale al structurilor lattice;

1.2. realizarea unui studiu comparativ a mai multor tipuri de celule lattice în vederea determinării tipului de celulă optim;

1.3. utilizarea metodei omogenizării în simulările numerice pentru studiul structurilor lattice;

1.4. simularea numerică a procedurii de fabricare aditivă;

1.5. utilizarea metodelor de optimizare factorială împreună cu metoda elementelor finite pentru determinarea comportamentului structurilor metalice la solicitări statice și dinamice.

2. Realizarea unei cercetări experimentale pentru determinarea frecvențelor proprii specifice structurilor lattice:

2.1. imprimarea 3D atât a modelului neoptimizat cât și a celui optimizat (modelul lattice) utilizând procedeul de fabricare aditivă stereolitografic;

2.2. determinarea frecvențelor proprii pentru cele două modele, atât în cazul în care acestea sunt fixate, cât și în cazul în care sunt libere;

2.3. analiza comparativă, pe baza frecvențelor obținute în urma efectuării testelor de vibrații modale, a performanțelor structurale ale celor două modele;

2.4. studiul influenței diferiților parametri geometrici, de fabricare aditivă și de testare asupra răspunsului modal al structurilor lattice;

2.5. analiza comparativă a rezultatelor numerice cu cele experimentale.

(iv) Organizarea tezei de doctorat

Teza de doctorat este structurată pe opt capitole și o anexă, al căror conținut este prezentat sumar în cele ce urmează.

Capitolul 1 prezintă un scurt istoric al metodelor DOE și aplicabilitatea acestora în inginerie. Sunt menționate cunoștințele necesare utilizării acestora în industrie precum și principiile care stau la baza lor. De asemenea este prezentată succint și o procedură generală de efectuare a experimentelor.

În prima parte a Capitolului 2 sunt descrise cele mai importante planuri de experimente utilizate în cadrul metodelor factoriale. Planurile de experimente stau la baza strategiei de planificare a încercărilor experimentale în vederea obținerii unor rezultate utile și precise. Este prezentată apoi metoda Taguchi care are drept obiectiv principal deviația unei variabile de ieșire de la valoarea

nominală, ideea de bază fiind aceea că minimizarea variației rezultatelor este principalul mijloc de îmbunătățire a calității unui produs. Un alt subiect important prezentat în Capitolul 2 este metoda suprafeței de răspuns. Această metodă se bazează exclusiv pe simularea numerică și furnizează valorile aproximative ale parametrilor de ieșire, din întreg domeniul de optimizare analizat, fără a fi nevoie să se realizeze o soluționare completă.

Capitolul 3 debutează cu detalii legate de conceptele și structura procesului de optimizare, cu accent pe optimizarea structurală. De asemenea este prezentată pe scurt și metodologia de evaluare a designului supus optimizării. Un alt subiect menționat în Capitolul 3 este despre utilizarea metodei cu elemente finite în analizele structurale. În finalul capitolului se prezintă noțiuni importante despre corelarea numerică a parametrilor în procesul de optimizare, cum ar fi exemple de metode de corelare sau diagrama de sensibilitate.

În Capitolul 4 sunt prezentate noțiuni fundamentale legate de optimizarea topologică, cum ar fi metode utilizate pentru configurarea problemelor de optimizare a topologiei sau diverse considerații practice. Este de asemenea prezentat și un scurt exemplu.

În Capitolul 5 este prezentat un studiu de caz care are ca subiect îmbunătățirea răspunsului modal pentru un suport de montare utilizând optimizarea topologică de tip lattice. Obiectivul acestui studiu a fost obținerea unui model lattice a cărui frecvență fundamentală să fie maximizată. În primă fază s-a realizat o optimizare topologică personalizată pentru structuri lattice. După ce s-a obținut un model lattice optim, s-a făcut o analiză modală utilizând chiar acest model. Deși au fost obținute rezultate, s-a constatat că este greu de generat și apoi de soluționat un model discretizat obținut direct pe o structură lattice. Din acest motiv, s-a creat un model echivalent obținut prin metoda omogenizării care permite generarea și apoi soluționarea mult mai rapidă a modelului discretizat. În cadrul acestui capitol s-a realizat și un studiu comparativ pentru mai multe tipuri de celulă lattice. În final s-au comparat rezultatele.

Capitolul 6 este dedicat procesului de fabricare aditivă. Sunt prezentate atât tehnologiile de bază ale prototipării rapide cât și avantajele imprimării 3D în comparație cu procedeele tradiționale. Se pune accent pe procedeul stereolitografic deoarece modelul lattice folosit în studiul experimental, a fost obținut prin această metodă de imprimare. În a doua parte a Capitolului 6 este prezentat un alt studiu de caz care constă în simularea numerică a procesului de fabricare aditivă a modelului lattice studiat.

În Capitolul 7 este prezentat un studiu de caz care are ca subiect verificarea răspunsului modal pentru un suport de montare utilizând simulări numerice și teste experimentale. La fel ca la Capitolul 5, obiectivul acestui studiu a fost obținerea unui model lattice, de data aceasta redus ca dimensiune față de cel din primul caz, a cărui frecvență fundamentală să fie maximizată. În primă fază s-a realizat o optimizare topologică personalizată pentru structuri lattice și s-a utilizat o celulă cubică. După ce s-a obținut un model lattice optim, s-a creat un model echivalent pe baza metodei omogenizării și acesta a fost ulterior folosit în cadrul studiului numeric. Modelul lattice rezultat din optimizarea topologică a fost tipărit fizic la imprimantă 3D și apoi a fost folosit în teste experimentale pentru determinarea răspunsului modal. Au fost testate atât numeric cât și experimental ambele modele, atât cel neoptimizat cât și cel optimizat, pentru două cazuri de studiu: model fixat și model liber. În final, modelele numerice au fost validate pe baza rezultatelor experimentale.

Capitolul 8 prezintă concluziile generale ale acestei lucrări, contribuțiile originale și direcțiile viitoare de cercetare.

În Anexa 1 se prezintă un studiu de caz în care se urmărește optimizarea structurii unui turn de comunicații utilizând metodele factoriale.

În acest scop, s-a creat un model geometric variabil care ia în considerare parametrii de lucru specifici, iar un model cu elemente finite s-a generat prin utilizarea elementelor de tip grindă și de tip placă pentru un studiu de optimizare.

Analiza cu elemente finite este actualizată automat pentru fiecare variantă a modelului geometric. Modelul turnului este supus încărcărilor statice și dinamice, inclusiv solicitărilor seismice. Algoritmul soluției de optimizare utilizat se bazează pe programarea neliniară pătratică Lagrange (NLPQL), care are o precizie bună în studiile de optimizare cu o singură funcție obiectiv și mai multe restricții de optimizare, cum este cazul de față. Din cele trei variante finale de design, este propusă cea care are masa minimă.

Rezultatele acestei lucrări demonstrează efectele diferiților parametri de proiectare a componentelor structurale, atât asupra caracteristicilor designului supus optimizării cât și asupra procesului de fabricare aditivă și oferă îndrumări esențiale pentru proiectarea acestor tipuri de structuri, având în felul acesta o largă aplicabilitate în aproape toate domeniile tehnice. Aceasta deoarece optimizarea designului ne ajută să obținem piese mai ușoare, cu o rezistență mai mare în exploatare și la un preț redus.

Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor privind aplicabilitatea metodelor DOE în inginerie

1.1. Scurt istoric

Design of Experiments (DOE) a cunoscut de la apariție și până în prezent patru perioade principale de evoluție. Astfel, perioada de debut este cuprinsă între anii 1918-1940 și își are originile în agricultură. Sir Ronald Fisher care lucra în acea perioadă la Institutul de Cercetări Agricole Rothamsted din Londra, împreună cu echipa sa, au descoperit și pus în practică metoda factorială (ANOVA) care a avut un impact profund asupra științelor agricole și care ulterior a fost folosită cu succes și în alte domenii.

A doua perioadă importantă este cea cuprinsă între anii 1951-1980, aceasta fiind practic prima eră industrială DOE. George Box și K.B. Wilson sunt de remarcă în această perioadă deoarece nu numai că au îmbunătățit metoda factorială dar au pus și bazele unei noi metode: metoda suprafeței de răspuns. Această nouă metodă are aplicabilitate în diverse industrii cum ar fi: auto, chimică, alimentară, textilă etc.

A treia perioadă importantă este cuprinsă între anii 1980-1990 și constituie practic a doua eră industrială DOE. Această perioadă a fost marcată de numeroase inițiative de îmbunătățire a calității în multe companii. De remarcă în această perioadă este Dr. Genichi Taguchi care a fost inginer și statistician în cadrul companiei Nippon Telephones & Telegraph din Japonia. Începând cu anii 1950, Taguchi a elaborat o metodologie de aplicare a statisticii în procesul de producție pentru a îmbunătăți calitatea produselor fabricate, scopul final fiind acela de a avea un produs cât mai robust.

Epoca modernă începe cu anul 1990 și constituie practic a patra perioadă importantă din istoria metodelor DOE. Aceasta se remarcă prin utilizarea pe scară largă a calculatoarelor, utilizarea extinsă a metodelor DOE în Six-Sigma și în afaceri și de asemenea combinarea metodelor DOE cu diverse metode numerice în experimente pe calculator.

1.2. Cunoștințe necesare aplicării DOE în industrie

Pentru realizarea cu succes a unui experiment industrial, în general sunt necesare următoarele competențe [1]:

- Abilități de planificare - Înțelegerea importanței experimentului pentru o anumită problemă, timp și buget necesar experimentului, câte persoane sunt implicate în experiment, stabilirea a ceea ce trebuie făcut etc.
- Abilități statistice - Implică realizarea analizei statistice a datelor obținute din experiment, atribuirea variabilelor și interacțiunilor la diferite coloane ale matricei de proiectare (schemei experimentale), interpretarea rezultatelor experimentului pentru luarea unor decizii solide și valabile în vederea unei eventuale îmbunătățiri etc.
- Abilități de lucru în echipă - Implică înțelegerea obiectivelor experimentului și înțelegerea comună (de către toți membrii echipei) a obiectivelor experimentale care trebuie atinse, o mai bună comunicare între persoanele cu abilități diferite și învățarea unuia de la celălalt etc.

- Cunoștințe de inginerie - Determinarea numărului de niveluri (valori posibile) ale fiecărei variabile de intrare, a intervalului de variație a fiecărei variabile, determinarea a ceea ce se măsoară în cadrul experimentului, determinarea capacității sistemului de măsurare, determinarea variabilelor care pot fi controlate și care nu pot fi controlate în timpul experimentului etc.

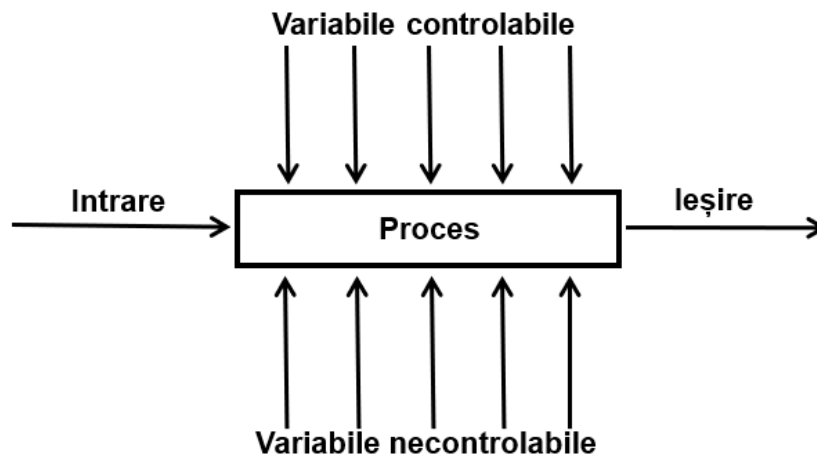


Fig. 1.1. Modelul general al unui proces / sistem [1]

1.3. Procedură generală

Se poate adopta următoarea succesiune a fazelor de efectuare a experimentului [1]:

1. Se identifică procesul care va fi studiat și scopul efectuării experimentelor
2. Se identifică rezultatele, denumite și variabile de răspuns, care trebuie să fie îmbunătățite
3. Se stabilește precizia măsurătorilor, pe baza repetabilității și studiilor de reproductibilitate
4. Se identifică variabilele de intrare care pot fi controlate, numite și factori
5. Se aleg limitele sau nivelurile pentru fiecare factor. De obicei, vor fi utilizate două niveluri pentru fiecare variabilă. Se notează nivelul superior cu “+” iar cel inferior cu “-”
6. Se stabilește și se documentează proiectarea experimentelor. Aceasta include:
 - toate combinațiile diferite între niveluri care ilustrează ce niveluri ale variabilelor vor fi pentru diferite combinații
 - de câte ori va fi supusă experimentului fiecare combinație (acțiune denumită replicare)
 - succesiunea tuturor încercărilor, aleasă într-o ordine aleatorie (denumită randomizare)
7. Se realizează experimentul, urmărind riguros planul acestuia
8. Se analizează datele obținute și se trag concluzii. Pentru realizarea calculelor sunt disponibile programe specializate
9. Dacă în urma concluziilor se pot realiza modificări pentru îmbunătățirea procesului, se verifică acele rezultate și se autorizează noul proces
10. Se stabilește dacă există experimente suplimentare care pot fi realizate. Acestea sunt planificate și realizate reîncepând cu pasul 5.

1.4. DOE - Principii de bază

O bună înțelegere a problemei

Cercetările au arătat că unul dintre motivele cheie pentru care un experiment industrial este nereușit se datorează lipsei de înțelegere a problemei în sine. Succesul oricărui experiment industrial depinde în mare măsură de natura problemei, de pregătirea profesională a echipei precum și de efortul deosebit depus de aceasta.

Stabilirea strategiei de lucru

Aplicarea cu succes a DOE necesită un amestec de abilități statistice, de planificare, de inginerie, de comunicare și nu în ultimul rând lucrul în echipă. Stabilirea strategiei de lucru trebuie tratată ca o parte integrantă în proiectarea unor experimente eficiente [2].

Selectarea răspunsului adecvat sau a caracteristicii de calitate

Un răspuns este caracteristica de performanță a unui produs care este cel mai important indiciu pentru clienți și care reflectă adesea calitatea produsului. Este important să se aleagă și să se măsoare un răspuns adecvat pentru experiment. Următoarele idei pot fi utile celor implicați în selectarea caracteristicilor de calitate pentru experimentele industriale [2]:

- Se utilizează răspunsuri care pot fi măsurate cu exactitate
- Se utilizează răspunsuri direct legate de transferul de energie asociat mecanismului fundamental al produsului sau al procesului
- Se utilizează răspunsuri care sunt complete, adică acele răspunsuri care acoperă perfect relația intrare-ieșire pentru un anumit produs sau proces

Selecția variabilelor de proces

Selecția variabilelor de proces este utilă pentru reducerea numărului de variabile de proces la un număr ușor gestionabil ceea ce implicit conduce la reducerea numărului de încercări experimentale și la reducerea costurilor asociate întregului proces de experimentare. De exemplu, pot fi utilizate șapte variabile de intrare realizând doar opt încercări experimentale. Este recomandabil să nu se investească mai mult de 25% din bugetul alocat experimentului în prima fază a oricărui experiment. După identificarea variabilelor cheie, interacțiunile dintre acestea pot fi studiate utilizând experimente factoriale complete sau reduse [3].

Utilizarea strategiei de grupare pentru creșterea eficienței experimentului

Strategia de grupare poate fi utilizată pentru a minimiza influența diferiților factori externi cum ar fi: schimbarea mașinii de lucru, schimbarea membrilor echipei, locația experimentului sau ziua în care s-a făcut efectiv experimentul etc.

Efectuarea încercărilor experimentale de confirmare a răspunsului

Este necesar să se repete încercări (probe) de confirmare pentru a verifica rezultatele analizei statistice. Unele dintre cauzele posibile pentru nerealizarea obiectivului experimentului sunt alegerea greșită a designului pentru experiment, eșecul identificării variabilelor cheie ale procesului care afectează răspunsul sau sistemul de măsurare inadecvat pentru efectuarea măsurătorilor [3].

1.5. Concluzii

În general în utilizarea metodelor DOE se urmărește atât determinarea efectului fiecărei variabile de intrare asupra răspunsului cât și modul în care variabilele de intrare pot interacționa una cu cealaltă. DOE permite dezvoltarea unui model matematic care să prezică modul în care variabilele de intrare interacționează pentru a crea variabile de ieșire (răspunsuri) într-un proces sau sistem. De asemenea este foarte importantă determinarea valorilor variabilelor de intrare care optimizează răspunsurile - de exemplu se maximizează o variabilă, dar se minimizează o altă variabilă.

Astfel, DOE urmărește obținerea și analiza datelor experimentale cantitative necesare pentru determinarea relației dintre factorii care influențează un proces și rezultatele respectivului proces, printr-o abordare care aplică principii și tehnici statistice ce asigură generarea și susținerea de concluzii valide și consistente pe baza numărului minim de date necesare, ceea ce implică un consum minim de resurse (bani, timp etc.). De obicei, necesită utilizarea unor instrumente de analiză statistică, pentru analiza și interpretarea datelor colectate (ANOVA, analiza de corelare, analiza de regresie), ceea ce face utilă achiziționarea unor programe speciale de calcul.

În cazul anumitor metode, cum ar fi metoda Taguchi, pe lângă cele menționate mai sus, este foarte importantă determinarea variabilelor de intrare necesare pentru a minimiza atât variabilitatea răspunsului cât și efectul variabilelor de intrare necontrolabile sau greu controlabile.

DOE este o metodologie de aplicare sistematică a statisticilor în experimentare și poate fi folosit pentru o gamă largă de experimente în diverse scopuri, în aproape toate domeniile de inginerie și chiar în marketing sau afaceri.

Capitolul 2. Metode factoriale

2.1. Planuri factoriale

Planurile de experimente reprezintă strategia de programare (planificare) a încercărilor experimentale în vederea obținerii unor rezultate utile și cu un nivel de încredere satisfăcător. Un experiment este factorial dacă se combină fiecare nivel al unui factor cu fiecare nivel al celorlalți factori din experiment.

Se definesc drept factori parametri care caracterizează intrările în sistemul cercetat, numiți și factori de intrare sau variabile de intrare. Parametrii obținuți în urma desfășurării experimentului se numesc rezultate, factor-rezultat, variabile de răspuns sau variabile de ieșire, adică rezultatele înregistrate în experimentare [4].

Factorii experimentului (variabilele) pot fi:

- factori cantitativi, adică posibil de măsurat, de exemplu, concentrația, temperatura, presiunea, umiditatea etc.;
- factori calitativi sunt factori nemăsurabili care se pot identifica printr-un atribut, de exemplu, tipul de materie primă, tipul de catalizator, schimburile de lucru într-o fabrică etc.

Factorii calitativi, nemăsurabili sau atributivi nu pot fi utilizați decât în modele de tip matriceal.

În cadrul experimentelor factoriale, variabilele de intrare cantitative (factorii controlați) sunt modificate forțat la diferite subdiviziuni discrete numite niveluri, experimentul desfășurându-se după un program (plan) astfel ales încât cu minimum de măsurări și calcule de prelucrare a datelor experimentale, să se obțină un model al procesului (fenomenului) cercetat, cu precizie acceptabilă [5]. Termenul "variabilă independentă" nu este recomandat a fi utilizat (cf. ISO 3543-3: 2013). Primii care au propus astfel de programe au fost Box și Wilson [5].

Planurile de experimente pot fi de forma:

- *experiment factorial complet* la două niveluri, cunoscut și ca plan de tip " 2^k ", respectiv plan factorial la trei niveluri sau plan de tip " 3^k "; " k " reprezintă numărul de factori. Prin niveluri se înțelege numărul de valori diferite pe care o variabilă/factor îl poate lua, conform cu discretizarea sa; pentru fiecare factor se alege același număr de niveluri, deși există metode de proiectare a experimentelor care admit diferențierea numărului de niveluri pentru variabile [6];
- *experiment factorial fracționat* rezultă prin divizarea unui plan de tip " 2^3 " în două semiplanuri de tip " 2^2 "; experimentul fracționat poate fi o jumătate sau un sfert din experimentul factorial complet;
- planuri de *experimente Taguchi*, care fac parte din categoria planurilor fracționare;
- planuri de experimente de tip *pătrat latin* și *pătrat greco-latin*.

2.1.1. Experimentul cu blocuri complet randomizate

Termenul *bloc* își are originea în experimente din agricultură, în care un câmp a fost subdivizat în secțiuni care au condiții comune, de exemplu, aceeași expunere la vânt, proximitatea unor ape subterane sau grosimea stratului arabil. În alte situații, blocurile se bazează pe loturi de materiale brute/materii prime comune, aceiași operatori, numărul de unități studiate în aceeași zi, produse fabricate în același schimb de lucru, etc. Prin urmare, un experiment factorial este efectuat "în blocuri" dacă sunt menținute condiții omogene (comune) în cursul experimentelor. Experimentul cu *blocuri complet randomizate* (în engleză Randomized Complete Block Design - RCBD) este o metodă de proiectare a experimentelor bazată pe blocare.

Prin blocare se înțelege un aranjament al unităților experimentale în blocuri. Într-un experiment, există întotdeauna diferiți factori care pot influența rezultatul (variabila-răspuns). Unii dintre acești factori sunt necontrolabili (aleatori), de aceea ei trebuie să fie randomizați (alocați în mod întâmplător) în timpul efectuării experimentului, astfel încât, în medie, influența lor va fi neglijabilă [7].

2.1.2. Experimentul factorial complet

Planul experimental complet este o strategie curentă și intuitivă a proiectării experimentelor. Acest plan este utilizat în studii de optimizare. Un experiment este factorial complet dacă se combină fiecare nivel al unui factor cu fiecare nivel al celorlalți factori din experiment, adică eşantioanele (în engleză samples) experimentale sunt date de orice combinație posibilă a nivelurilor factorilor. Așa cum s-a menționat mai înainte, factorii pot fi cantitativi, de exemplu, temperatura și presiunea sau pot fi calitativi, de exemplu două mașini-unelte sau doi operatori ($k = 2$) [8].

În contextul problematicii experimentelor factoriale se utilizează și noțiunea de *grad de libertate*. Din punct de vedere matematic, numărul de grade de libertate asociat unui factor este egal cu numărul de niveluri atribuite acestui factor, minus unu. În cazul unei interacțiuni între doi factori, numărul gradelor de libertate ale acestora se calculează ca produs al numerelor gradelor de libertate ale factorilor ce o compun. Uneori în literatura despre proiectarea experimentelor se întâlnesc și experimente factoriale complete în care și punctul central (sau nivelul de bază) al spațiului factorial este adăugat în selecții [8].

2.1.3. Experimentul factorial fracționat

Atunci când numărul de factori se mărește, experimentul factorial complet poate deveni foarte dificil de realizat, din cauza numărului mare de experimente. Ideea proiectării unui experiment factorial fracționat este de a derula numai o parte (un subgrup sau o fracțiune) din experimentul factorial complet. Experimentul factorial fracționat poate fi o jumătate din experimentul complet atunci când planul/experimentul complet este descompus în două semi-planuri sau poate fi un sfert din experimentul complet, etc. De exemplu, un plan experimental complet de tip 2^3 este descompus în două semi-planuri de tip 2^2 . Dacă există numai trei factori ai experimentului, atunci experimentul factorial complet necesită opt derulări ale experimentării, iar experimentul fracționat la jumătate va necesita patru derulări. Cu cât numărul de factori se mărește, cu atât fracțiunile devin mai mici: fracțiuni 1/8, 1/16 etc. Construirea experimentelor factoriale fracționate pe două niveluri ale factorilor se bazează pe structura experimentului factorial complet pe două niveluri. Generalizând, la un experiment complet de tip 2^k , experimentul fracționat la jumătate este de tip 2^{k-1} [3].

2.1.4. Experimentul compus central

Experimentul compus central (în engleză Central composite design) este un experiment factorial complet de tip 2^k în care la cele 2^k puncte experimentale sunt adăugate puncte experimentale suplimentare: punctul central al experimentului și $2k$ puncte “în stea” (“star points”) la distanța α (uneori scrisă distanța “alfa”) față de punctul central, ajungându-se la dimensiunea selecției $2^k + 2k + 1$. Deoarece punctele experimentale sunt simetrice față de punctul central al experimentului, acesta este denumit “central”. Există situații în care sunt necesare două sau mai multe experimente în punctul central și situații când unul sau două experimente în centru sunt suficiente.

Notând cu n_c numărul de experimente în centru, numărul total de puncte experimentale N pentru k factori va fi: $N = 2^k + 2k + n_c$. Experimentele în punctul central oferă informații despre existența curburii suprafeței de răspuns [8].

Dacă se constată curbura în sistem, adăugarea punctelor experimentale “în stea” permite estimarea eficientă a termenilor pur pătratici. Experimentul compus central este definit în funcție de criteriul pe baza căruia se calculează distanța α , cele mai întâlnite în practică fiind experimentele compuse centrale de ordinul doi ortogonale și cele de ordinul doi rotabile. Faptul că există mai multe selecții decât cele strict necesare pentru o interpolare biliniară (2^k) permite să fie estimată curbura spațiului experimental.

2.2. Metoda Taguchi

Metoda Taguchi a fost criticată la început de unii statisticieni occidentali clasici dar alții au acceptat-o, multe dintre conceptele introduse de el fiind utilizate apoi cu succes. Astfel, Taguchi a fost identificat cu apariția a ceea ce a ajuns să fie numită astăzi *ingineria calității*. Scopul actual al *ingineriei calității* este de a muta acțiunile de îmbunătățire a calității în amonte de faza de producție până la etapa de proiectare a produsului.

După cum demonstrează chiar metoda sa, principala preocupare a lui Taguchi este deviația unei variabile de ieșire de la valoarea nominală. Parametrii necontrolabili (“noise parameters”) sunt adesea responsabili pentru această abatere și prin urmare, abordarea lui Taguchi în proiectarea experimentală are ca scop proiectarea de produse sau procese de producție care sunt rezistente (robuste) la acest tip de parametri (temperatură, umiditate, timp de execuție, inexactitatea mașinilor unelte, eroarea umană etc.) [9]. O atenție deosebită este acordată proiectării sistemelor astfel încât performanțele lor să nu fie sensibile la schimbările de mediu.

Efectul diferiților parametri de intrare (de proiectare sau de tip “noise”) asupra caracteristicilor de performanță într-un set condensat de experimente poate fi examinat prin utilizarea modelelor de matrice ortogonale propuse de Taguchi.

2.2.1. Design robust

Design robust este o metodă experimentală bazată pe principii statistice, cu ajutorul căreia se obțin produse de calitate a căror performanță este insensibilă la variația parametrilor de tip “noise”. DOE clasic s-a concentrat asupra modului în care diferiți parametri de proiectare influențează nivelul mediu al rezultatelor.

În metoda DOE a lui Taguchi care face parte din categoria de metode de tip “design robust”, variația rezultatelor este mai interesantă pentru studiu decât media lor. Opinia lui Taguchi este că minimizarea variației rezultatelor este principalul mijloc de îmbunătățire a calității [10].

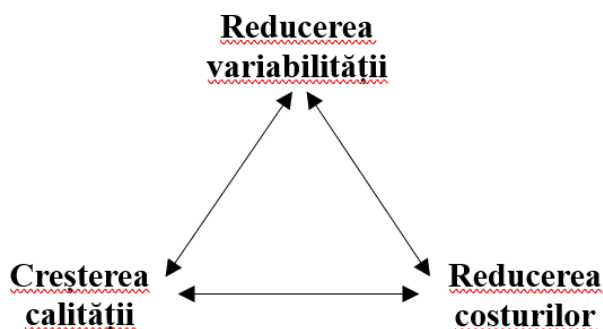


Fig. 2.1. Interdependența variație rezultate - calitate - costuri

2.2.2. Matrice ortogonale

Taguchi a proiectat o serie de matrice ortogonale pentru a fi folosite la realizarea experimentelor. Aceste matrice sunt de fapt modele de matrice factoriale reduse.

El utilizează două matrice pentru realizarea experimentului:

- Matricea interioară este utilizată pentru a studia efectele parametrilor de proiectare pe care dorim să le studiem
- Matricea exterioară este utilizată pentru a modela parametrii necontrolabili sau greu controlabili care pot afecta performanța procesului sau calitatea produsului

Una dintre cele mai simple matrice ortogonale ale lui Taguchi este cea din tabelul 2.1:

Tabel 2.1. Matrice ortogonală de tip $L_8(2^7)$

Exp.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

2.3. Metoda suprafeței de răspuns

Metoda suprafeței de răspuns (RSM) se bazează exclusiv pe simularea numerică și este potrivită pentru cazuri de studiu care utilizează până la circa zece parametri de intrare. Suprafețele de răspuns furnizează valorile aproximative ale parametrilor de ieșire, din întreg domeniul de optimizare analizat, fără a fi nevoie să se realizeze o soluționare completă. Din acest motiv rezultatele optime sunt aproximative și trebuie verificate prin metode specifice. Metoda suprafeței de răspuns prezintă și avantaje deoarece “acoperă” întregul domeniu de optimizare (Fig. 2.2), timpul de calcul este redus iar modificarea criteriului de optimizare și reluarea soluționării se fac rapid și ușor [11].

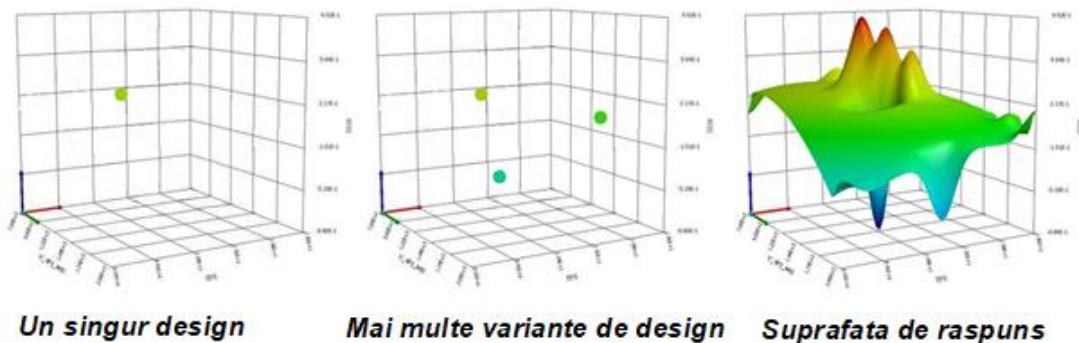


Fig. 2.2. Reprezentarea grafică a suprafeței de răspuns [12]

2.3.1. Tipuri de suprafețe de răspuns [12]

Putem exemplifica câteva modele matematice:

- **Standard Response Surface**

Este eficient atunci când variația parametrilor de ieșire este progresivă în comparație cu parametrii de intrare.

- **Kriging**

Este eficient într-un studiu care utilizează un număr mare de variante de design și este potrivit răspunsurilor care implică neliniarități și utilizează întotdeauna puncte de verificare pentru controlul preciziei răspunsurilor.

- **Non-parametric Regression**

Este potrivit răspunsurilor care implică neliniarități dar prezintă dezavantajul că soluționarea se realizează lent.

- **Neural Network**

Este potrivit răspunsurilor care implică neliniarități mari dar controlul asupra algoritmului este foarte limitat.

- **Sparse Grid**

Este potrivit pentru studii care conțin discontinuități și de obicei soluționarea se realizează rapid. O alegere bună pentru multe cazuri de studiu este modelul matematic Kriging cu autorafinare.

2.3.2. Verificarea preciziei răspunsului

O metodă rapidă de evaluare a calității suprafeței de răspuns este “Goodness of fit” (GoF). În esență, GoF rezumă de obicei discrepanța dintre valorile observate și valorile așteptate conform modelului în cauză. Astfel de măsuri pot fi utilizate în testarea ipotezelor statistice, de exemplu, pentru a testa dacă două probe sunt extrase din distribuții identice sau dacă frecvențele rezultatului urmează o distribuție specificată.

În Fig. 2.3 este prezentată evaluarea calității suprafeței de răspuns utilizând GoF. Valorile reprezentate pe abscisă rezultă din soluționarea variantelor de design iar valorile reprezentate pe ordonată sunt rezultate din soluționarea suprafeței de răspuns. În Fig. 2.3 (a) se observă că parametrii de lucru sunt aliniați perfect cu graficul ceea ce înseamnă că suprafața de răspuns rezultată este excelentă iar în Fig. 2.3 (b) aceștia sunt mai degrabă împrăștiați, ceea ce înseamnă că suprafața de răspuns este de o calitate medie sau chiar slabă.

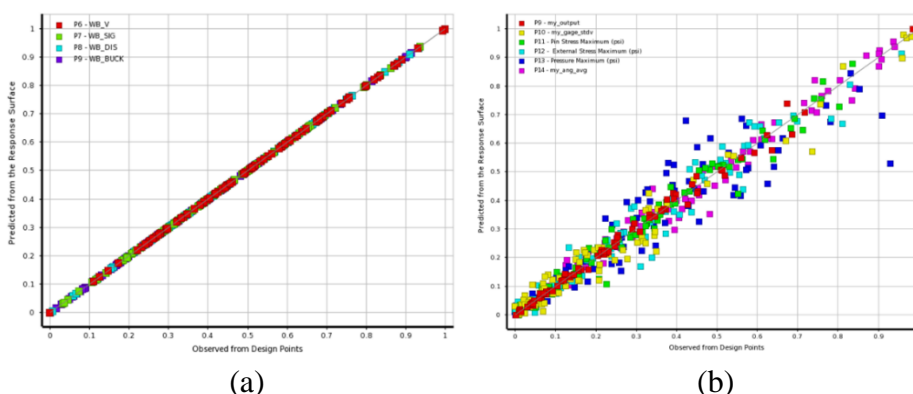


Fig. 2.3. Evaluarea rapidă a calității suprafeței de răspuns: calitate excelentă (a), calitate medie / slabă (b) [12]

2.3.3. Procesarea rezultatelor

Reprezentarea grafică a suprafețelor de răspuns atât 2D cât și 3D, este utilă pentru stabilirea valorilor de răspuns dorite și a condițiilor de funcționare. Într-o reprezentare grafică 2D, suprafața de răspuns este văzută ca un plan bidimensional în care toate punctele care au același răspuns sunt conectate pentru a produce linii contur de răspunsuri constante. O reprezentare grafică 3D afișează în general o vedere care poate oferi o imagine mai clară a răspunsului. Dacă modelul studiat nu conține efecte de interacțiune, suprafața de răspuns prevăzută va fi un plan (adică liniile de contur vor fi drepte). În schimb, dacă modelul conține efecte de interacțiune, liniile de contur nu vor mai fi drepte ci curbe [12].

2.4. Concluzii

În cercetarea experimentală, se utilizează termenul de variabilă de control pentru a desemna variabila al cărei efect vrem să-l controlăm sau să-l eliminăm. Se verifică astfel certitudinea relației dintre variabila independentă și cea dependentă, altfel spus, efectul obținut să nu fie explicat prin prezența altei variabile decât cea independentă. Practic, dacă influența altor variabile este controlată sau eliminată, iar valoarea variabilei dependente se menține, atunci relația cauză-efect (variabilă independentă-variabilă dependentă) este una adevărată. În general, ne propunem să controlăm acele variabile pentru care există suspiciunea că ar influența rezultatele cercetării.

Planul experimental reflectă structura generală a unui experiment (variabile, condiții experimentale) și nu dă detalii despre modul de desfășurare, ipoteze etc. Sunt mai multe elemente implicate în clasificarea planurilor experimentale: numărul variabilelor independente, numărul condițiilor experimentale date de nivelurile variabilelor independente și utilizarea unei singure categorii de modele de studiu (comparații în cadrul aceleiași categorii) sau a mai multor categorii (comparații între ele). În forma sa cea mai simplă, experimentul presupune efectuarea a două măsurări: una înaintea manipulării experimentale, iar cealaltă după aceasta. Diferența dintre prima măsurare (pre-testare) și a doua măsurare (post-testare) reflectă efectul variabilei independente.

Spre deosebire de cercetarea științifică, unde se fac experimente factoriale complete, proiectarea experimentelor (DOE) propusă de Taguchi este simplificată și se bazează pe experimente factoriale parțiale, care permite culegerea datelor experimentale prin modificarea doar a unora dintre variabile și prin selectarea câtorva niveluri relevante ale valorilor acestora (minim două niveluri, de obicei se preferă trei niveluri și rar se consideră patru niveluri. Trei, patru sau mai multe niveluri se utilizează doar pentru variabile continue care se influențează reciproc.

Capitolul 3. Procesul de optimizare în ingineria mecanică

3.1. Conceptele și structura procesului de optimizare

Optimizarea este, în esență, o opțiune științifică și constă în elaborarea și trierea sistematică a soluțiilor posibile ale unei probleme ingineresti. Scopul final al optimizării este selectarea acelei soluții care, în limitele unui cadru de referință definit prin condițiile admise sau impuse inițial, conduce la folosirea cea mai avantajoasă a resurselor de care se dispune pentru materializarea ei. Optimizarea unei mașini, instalații sau construcții de un anumit tip se poate face prin optimizarea separată a componentelor sale, a subansamblurilor sau a părților constructive distincte, structura de rezistență fiind una dintre acestea. În special la aceasta se vor face referiri în cele ce urmează. Bazele matematice ale proceselor de optimizare le constituie cercetarea operațională, programarea liniară, programarea dinamică, programarea geometrică, algoritmi genetici etc.

Scopul principal al optimizării unei structuri - sau, altfel spus, al proiectării optimale a structurii - este determinarea formei acesteia. Determinarea tensiunilor și a deplasărilor constituie o etapă ulterioară în procesul proiectării, în care se verifică dacă forma și dimensiunile structurii satisfac exigențele scopului urmărit [13].

Cele mai utilizate criterii care stau la baza modelelor de calcul pentru optimizarea structurilor sunt: greutate minimă, tensiuni minime (rezistență maximă), energie potențială de deformație minimă, rigiditate maximă, deplasări minime, rigiditate maximă pentru o greutate dată, formă de egală rezistență, cost minim etc.

Din punct de vedere matematic, nu este vorba de rezolvarea unui sistem de ecuații algebrice, compatibile, care are o soluție unică. Algoritmii matematici al procesului de optimizare este, de regulă, o “strategie euristică” de găsim a celei mai bune soluții din mulțimea celor posibile.

3.2. Utilizarea optimizării în inginerie

Procesul de optimizare este o componentă a proiectării și realizării unui produs, dar în final structura optimizată trebuie să îndeplinească și alte condiții sau restricții, prezente totdeauna în ingineria mecanică, adică rezultatul “teoretic” al procesului de optimizare trebuie validat, în final, de considerente tehnologice, de montaj, de transport, de exploatare, estetice, ergonomice, ecologice etc. Aceste restricții sunt formulate matematic sub forma unor relații între variabilele de proiectare. Ele limitează domeniul de variație al acestor variabile și deci “spațiul de proiectare” în care se caută soluția optimală [13].

Restricții tehnologice. Orice structură se realizează într-un ansamblu de condiții tehnologice existente sau accesibile executantului, care determină unele “adaptări” ale produsului, deoarece fiecare tip de proces tehnologic are avantajele, limitele și dezavantajele sale.

Condiții de montaj. Structura nu va putea fi acceptată pentru execuție, dacă ea nu îndeplinește condițiile de montaj. Toate componentele și subansamblele structurii trebuie să poată fi executate individual și apoi asamblate în condițiile de precizie, etanșare etc., prevăzute în proiect.

Condiții de transport. Structura în ansamblu, sau componentele sale - dacă structura este de mari dimensiuni - trebuie să fie transportate la beneficiar în condiții care să nu afecteze forma geometrică, precizia dimensională sau parametrii funcționali ai produsului. În anumite situații, aceste considerente pot influența decisiv configurația structurii, soluțiile constructive sau tehnologice la care va recurge proiectantul.

Condiții de exploatare. Validarea finală a oricărei activități ingineresti este comportarea în exploatare a produsului, mașinii, dispozitivului sau instalației care au constituit obiectivul proiectanților, executanților, utilizatorilor etc.

3.3. Optimizarea structurală

Optimizarea structurală implică determinarea variabilelor de proiectare, care controlează forma, proprietățile materialului sau dimensiunile unei structuri, astfel încât să respecte anumite restricții și să îmbunătățească anumite proprietăți pentru a obține structuri optime [14].

În procesul proiectării structurilor, în diverse domenii ingineresti, proiectanții aleg cea mai bună variantă decizională, la fiecare pas, legată de aspecte structurale și non-structurale, cum ar fi rigiditatea, rezistența, proprietățile estetice. Cu alte cuvinte, aceștia iau decizii pentru a realiza cel mai bun design, astfel încât procesul proiectării structurale poate fi privit ca design optimal chiar dacă nu urmărește expres găsirea unui optim. Optimizarea structurală este privită ca aplicarea metodelor de optimizare în proiectarea structurală [15].

Proprietățile mecanice, ce includ deplasările nodurilor, tensiunile în elemente, frecvențe de vibrație, încărcări de flambaj sunt luate drept variabile de proiectare. Problema de optimizare structurală poate fi formulată, ca alternativă, pentru a urmări maximizarea unei proprietăți mecanice, supusă unor restricții de cost. Deși există multiple formulări ale problemei de optimizare, de exemplu design pentru greutate minimă, design pentru rigiditate maximă, termenul de optimizare structurală sau design optimal se referă la toate tipurile de probleme de optimizare asociate designului structural.

Metoda elementului finit poate fi folosită ca nucleu numeric pentru rezolvarea generală a problemelor de calcul pentru cele mai diverse tipuri de structuri și solicitări. Există o multitudine de programe de calcul care folosesc MEF, acestea furnizând toate datele necesare pentru a fi procesate în algoritmul de optimizare.

Pentru a lucra în regim integrat este necesară folosirea unor automatisme “software” pentru definirea problemei și rezolvarea ei automată folosind MEF. De asemenea, este necesar ca programul să poată prelua automat datele din programul de element finit și să le folosească mai departe. Formularea problemei de optimizare ar trebui făcută automat. Întrucât rezolvarea problemelor folosind MEF este un proces costisitor din punct de vedere al calculului, este necesar să se minimizeze numărul de rulări ale modelului folosind MEF [16]. Pentru a evita deteriorarea modelului structural modelat în urma ajustării geometriei sau topologiei în procesul de optimizare, este necesară definirea unui set de restricții suplimentare față de restricțiile ce țin de configurația structurii (tensiuni, eforturi, deplasări). Pentru o bună poziționare a procesului de căutare în spațiul soluțiilor este foarte utilă analiza sensibilității. Folosind analiza sensibilității, spațiul de căutare este redus la șablonul sugerat de coeficienții de sensibilitate [12].

În vederea creșterii eficienței metodei este folosită o strategie duală, în care optimizarea cu variabile discrete este realizată după optimizarea cu variabile continue. Statistic a fost stabilit că această metodă duală este cu cel puțin un ordin de mărime mai eficientă decât alte metode în cazul problemelor de optimizare cu mai mult de 20 de variabile.

Un element de noutate îl constituie posibilitatea folosirii unei mulțimi discrete pentru variabilele de proiectare, lucru care reprezintă o abordare pragmatică a procesului de optimizare structurală, prin posibilitatea obținerii de valori care au aplicabilitate în practică [17]. Algoritmii clasici au ca element de legătură utilizarea metodei elementului finit ca procedură de calcul a tensiunilor și deformațiilor structurii analizate.

Analiza metodelor de optimizare, atât prin prisma faptului că se folosește MEF pentru calculul deplasărilor și tensiunilor, cât și în ceea ce privește ușurința în aplicare, precum și necesitatea unei anumite accesibilități “hardware” și “software”, duce la concluzia că pot fi considerate două variante de lucru în vederea optimizării structurale: fie utilizarea unui modul de optimizare cuplat cu un modul de analiză structurală cu MEF, fie crearea unui modul de optimizare propriu, cuplat cu un modul de analiză structurală cu MEF, care să răspundă unor anumite cerințe specifice [18, 19, 20].

3.4. Utilizarea analizelor structurale în procesul de optimizare

3.4.1. Definiții și terminologie de bază

Analize statice liniare

Pentru o analiză structurală statică liniară, deplasările $\{u\}$ sunt rezolvate cu ajutorul ecuației matriceale de mai jos:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (3.1)$$

Ipoteze:

- Matricea $[K]$ este constantă
 - Se presupune comportamentul materialului elastic liniar
 - Se folosește teoria micilor deformații
 - Se pot include și anumite condiții la limită neliniare
- Forța $\{F\}$ este aplicată static
 - Nu sunt luate în considerare forțe care variază în funcție de timp
 - Nu sunt incluse efecte inerțiale

Analize dinamice

Pentru analizele structurale dinamice avem următoarea ecuație generală care, în funcție de tipul analizei capătă o formă specifică [21, 22, 23]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (3.2)$$

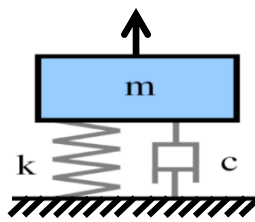


Fig. 3.1. Structură mecanică amortizată [22]

unde:

- $[M]$: matricea masică
- $[C]$: matricea de amortizare
- $[K]$: matricea de rigiditate
- $\{\ddot{u}\}$: vectorul accelerație
- $\{\dot{u}\}$: vectorul viteză
- $\{u\}$: vectorul deplasare
- $\{F\}$: vectorul forță

Pentru analize structurale statice liniare, modulul lui Young și coeficientul lui Poisson sunt necesare și suficiente. Dacă dorim să aplicăm sarcini inerțiale sau gravitaționale într-o analiză structurală statică va fi necesar să definim și densitatea [24].

Pentru analize structurale dinamice liniare care sunt definite în funcție de frecvență sau de timp, modulul lui Young, coeficientul lui Poisson și densitatea sunt necesare și suficiente [25].

3.4.2. Definierea proprietăților de material

Pentru analizele structurale statice și dinamice neliniare pe lângă proprietățile mai sus menționate mai trebuie adăugate și cele care definesc comportamentul neliniar al materialului (ex. curba tensiuni - deformații).

Sunt trei categorii principale de neliniarități [22, 26, 27]:

- *Neliniarități geometrice*: Dacă o structură are deformări mari, modificarea configurației geometrice poate determina un comportament neliniar (Fig. 3.2 (a)).
- *Neliniarități de material*: O relație neliniară de tip tensiune-deformație, cum ar fi plasticitatea prezentată în Fig. 3.2 (b), este un alt exemplu de neliniaritate.
- *Neliniarități de contact*: Includerea efectelor de contact este un tip de neliniaritate datorată schimbării “statutului”, deoarece se poate produce o schimbare bruscă a rigidității când corpurile implicate intră sau ies din contact (Fig. 3.2 (c)).

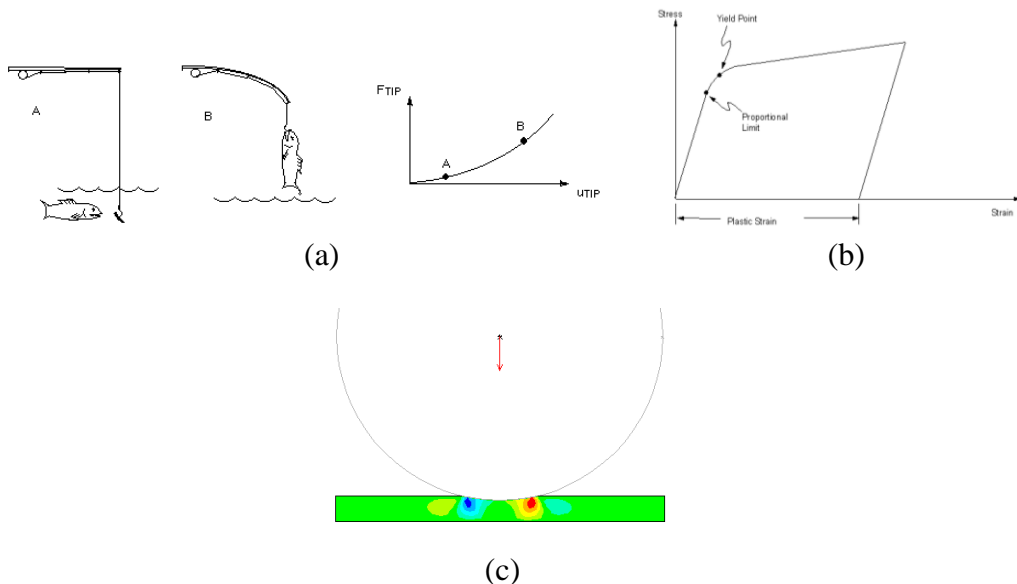


Fig. 3.2. Tipuri de neliniarități: geometrice (a), de material (b), de contact (c) [22]

În principiu, în analize dinamice pare a fi convenabilă utilizarea aceluiași model cu elemente finite ca cel construit pentru analiza statică. Totuși adesea modelul static conține mai multe detalii decât sunt necesare în analiza dinamică, astfel că se face apel la condensare sau substructurare dinamică pentru a reduce ordinul problemei dinamice înainte de soluționare [28].

3.5. Corelarea numerică a parametrilor în procesul de optimizare

Într-un studiu DOE, numărul de variante de design crește rapid odată cu creșterea numărului de parametri de intrare, ceea ce poate reduce eficiența studiului. Se recomandă excluderea parametrilor de intrare neimportanți pentru a reduce eșantioanele inutile.

Corelarea și monitorizarea parametrilor ne permite să identificăm parametrii importanți iar matricea de corelare, reprezentarea grafică a acestora și graficele de sensibilitate ajută de asemenea la înțelegerea relațiilor parametrice [29]. Corelarea parametrilor efectuează simulări bazate pe o eșantionare aleatorie a domeniului de optimizare, astfel încât să se realizeze între toți parametrii.

Numărul de eșantioane necesare pentru a calcula corelarea este determinat în funcție de convergențele abaterilor standard sau medii ale parametrilor de ieșire. La fiecare iterație, convergențele abaterilor standard sau medii sunt verificate în raport cu precizia impusă inițial de către inginer. Repetarea se oprește atunci când precizia este îndeplinită sau numărul de eșantioane depășește limita stabilită inițial, oricare dintre acestea survine mai întâi.

3.5.1. Metode de corelare

Două dintre cele mai utilizate metode de corelare sunt:

1) Corelarea liniară (metoda Pearson)

- Utilizează date reale pentru evaluarea corelării
- Detectează o relație liniară între două variabile

2) Corelarea graduală (în trepte) (metoda Spearman)

- Detectează o relație monotonă între două variabile
- Este mai puțin restrictivă decât o relație liniară
- Este considerată a fi mai precisă și, prin urmare, este recomandată

Metodele Pearson și Spearman se bazează pe aceeași ecuație. Diferența este că în prima se folosesc valori efective iar în cea de-a doua ranguri (trepte) [12].

$$r = \frac{\sum((X-X_M)(Y-Y_M))}{\sqrt{\sum(X-X_M)^2 \sum(Y-Y_M)^2}} \quad (3.3)$$

Matricea de corelare

Coefficientul de corelare indică dacă există o relație între două variabile și această relație este reprezentată de un număr pozitiv sau negativ. Matricea de corelare ne permite să analizăm relația dintre oricare două variabile.

Cu cât valoarea este mai aproape de extremele -1 sau 1 cu atât relația este mai puternică. În Fig. 3.3 (a) putem observa valorile iar în Fig. 3.3 (b) zonele dreptunghiulare colorate corespunzător acestor valori.

Zonele de culoare roșie de pe diagonala matricei și cele de culoare albastru închis corespund valorilor 1, respectiv -1. Valorile pozitive ne indică faptul ca cele două variabile se influențează direct proporțional iar cele negative ne indică faptul că cele două variabile se influențează invers proporțional. Zonele de culoare gri corespund unor valori mici iar acest lucru ne indică faptul că între cele două variabile este o relație slabă, deci se influențează foarte puțin sau deloc [12].

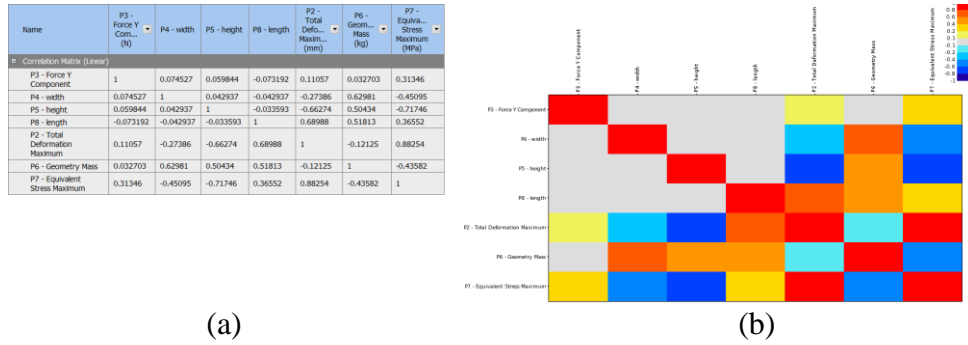


Fig. 3.3. Matricea de corelare: valori specifice (a), zone corespunzătoare (b) [12]

3.5.2. Diagrama de sensibilitate

Sensibilitatea ne arată cum diferite valori ale unei variabile independente vor influența o anumită variabilă dependentă. Aceasta este “pozitivă” atunci când creșterea valorii unui parametru de intrare conduce la creșterea valorii unui parametru de ieșire. De asemenea, sensibilitatea este “negativă” atunci când creșterea valorii unui parametru de intrare conduce la scăderea valorii unui parametru de ieșire. Sensibilitățile statistice se bazează pe coeficienți de corelare de tip Spearman care iau în considerare ambele aspecte în același timp.

3.6. Concluzii

Optimizarea bazată pe metodele numerice se face printr-un proces iterativ, definindu-se o stare inițială folosită ca punct de start pentru o căutare sistematică în scopul îmbunătățirii structurii. Procesul iterativ este stopat când toate criteriile sunt satisfăcute, astfel încât configurația curentă obținută să fie cât mai aproape de optimul căutat.

Designul optim trebuie să se afle în domeniul fezabil. Se poate spune că optimul poate fi găsit prin rezolvarea unor ecuații diferențiale cu o formă clar precizată. Această observație ne poate conduce la concluzia parțial adevărată că optimul ar putea fi găsit întotdeauna cu ajutorul unui algoritm clar formulat. Totuși, trebuie precizat că ecuațiile ce definesc condițiile de optimalitate sunt supuse unor condiții extrem de restrictive.

Domeniul de analiză reprezintă un model al corpului studiat, sau numai al unei regiuni semnificative aparținând acestuia. El se obține printr-un proces de idealizare a geometriei corpului original și uneori de selecție a regiunii de analiză. Idealizarea este necesară pentru a reduce din complexitatea configurației geometrice a corpului original, pentru a micșora efortul de pregătire a datelor de intrare și de calcul.

În ultimul timp analizele bazate pe metoda elementelor finite au abordat probleme de optimizare avansate și s-au implementat o serie de legi constitutive de material care să permită calculul materialelor de altă natură decât cele metalice clasice (compozite, plastice etc.) atât în domeniul liniar cât și în cel neliniar. S-au dezvoltat elemente finite noi, mult mai performante decât cele folosite inițial, există foarte multe tipuri de elemente finite de cuplare a efectelor (efectul termic cu cel mecanic, electric sau magnetic etc). Pentru a facilita operația de discretizare s-au dezvoltat noi tehnici de discretizare automată, bazate pe eroarea de calcul obținută la o primă discretizare grosieră.

Progresul și succesul metodei elementelor finite din ultima vreme se datorează dezvoltării spectaculoase a calculatoarelor numerice precum și a programelor de calcul cu elemente finite. Se poate afirma cu tărie că în momentul de față proiectarea este de neconceput fără utilizarea metodei elementelor finite în calcule de rezistență, optimizare, stabilitate, oboseală etc.

Capitolul 4. Optimizarea topologică

4.1. Introducere

Termenul *topologie* provine din combinația substantivelor grecești *topos* (τόπος) și *logos* (λόγος) care semnifică *loc*, respectiv *studiu*. Așadar, topologie înseamnă literal "studiul locului". Nu sunt necesare ipoteze prioritare cu privire la formă.

Topologia se deosebește de geometria euclidiană prin modul de considerare a echivalenței dintre obiecte. În geometria euclidiană, două obiecte sunt echivalente dacă se pot transforma unul în celălalt prin izometrii - transformări care păstrează valoarea unghiurilor, lungimilor, ariilor și volumelor. Topologia este o ramură a matematicii, mai precis o extensie a geometriei care studiază deformările spațiului prin transformări continue.

Optimizarea topologică a unei structuri constă în găsirea celei mai bune forme pentru acea structură care respectă criteriile de rezistență cerute în exploatare, conectabilitatea, numărul și locația găurilor etc., astfel încât una sau mai multe funcții obiectiv stabilite inițial să fie minimizezate sau maximizate. Această metodă de optimizare se bazează exclusiv pe simularea numerică.

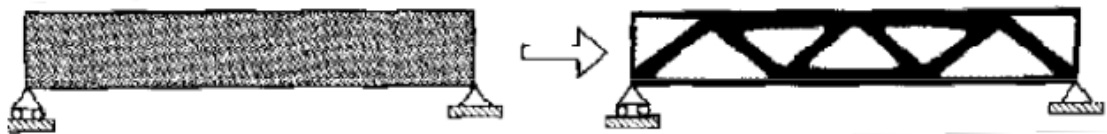


Fig. 4.1. Model optimizat topologic [30]

4.2. Tehnici integrate de optimizare structurală

Scopul implementării tehnicilor integrate de optimizare topologică în programele de inginerie asistată de calculator îl reprezintă automatizarea procedurilor de proiectare și scăderea duratei proiectării. Nucleul procesului de proiectare îl constituie programul "software" utilizat, care are și un modul de calcul bazat pe metoda cu elemente finite. În acest sistem procedurile de optimizare topologică trebuie introduse în fazele inițiale [31].

Tehnicile actuale de optimizare structurală sunt sintetizate în Fig. 4.2. Optimizările de topologie urmăresc distribuția optimă a materialului într-o structură pentru solicitările date. Este o optimizare multicriterială, procedura găsind soluții pentru solicitări multiple. Optimizările de topografie se mai numesc și optimizări de amprentă. Se aplică pentru structuri cu pereți subțiri. Optimizările de formă sunt optimizări locale și urmăresc găsirea formei optime pentru o singură solicitare a structurii. Se accesează la elaborarea detaliilor. Optimizările de parametri urmăresc găsirea valorii parametrilor care satisfac cel mai bine criteriile definite de utilizator și permit minimizarea unei funcții obiectiv [32].

Optimizarea topologică reprezintă stabilirea configurației spațiale generale a elementelor componente sau a legăturilor unei structuri. Scopul este repartizarea cât mai rațională a întregului material utilizat. Optimizarea topologică se mai numește și optimizarea generalizată a formei.

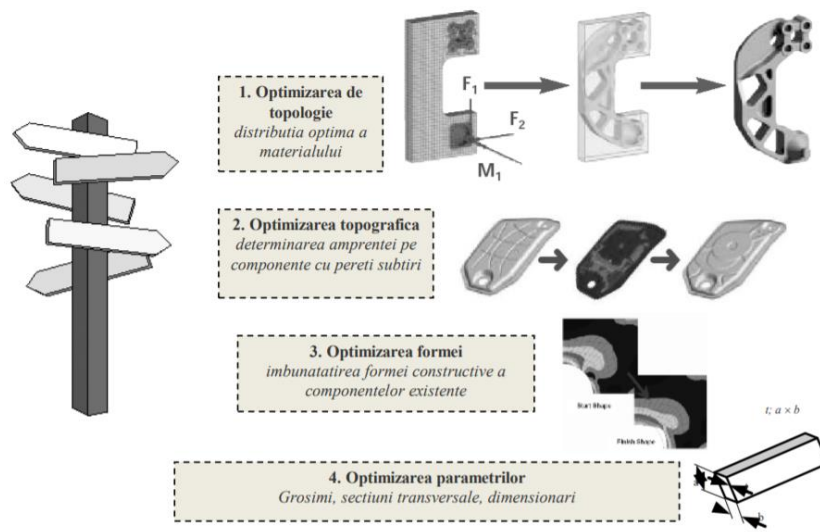


Fig. 4.2. Tehnici de optimizare actuale [33]

4.3. Abordări clasice

- Dimensionarea structurilor de grinzi cu zăbrele

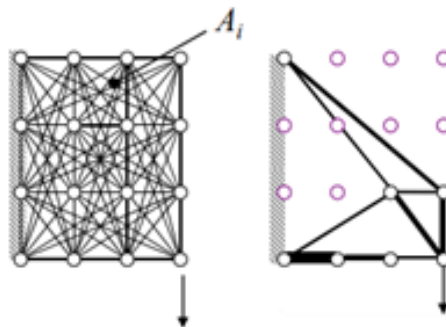


Fig. 4.3. Structură de grinzi cu zăbrele [34]

- Optimizarea grosimii plăcilor

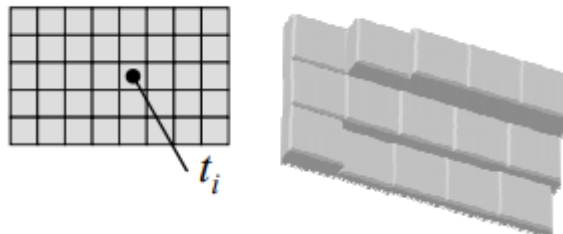


Fig. 4.4. Placă cu grosime variabilă [34]

- Metoda de omogenizare

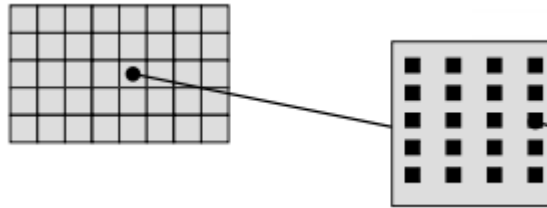


Fig. 4.5. Dimensionarea microstructurii [34]

4.4. Metode pentru configurarea problemelor de optimizare a topologiei

Cele mai utilizate metode matematice în procesul de optimizare topologică sunt cele bazate pe modul de distribuire a materialului:

- Metoda penalizării
- Metoda omogenizării

Ideea de bază constă în reprezentarea geometrică a structurii ca o redare alb-negru a imaginii modelului supus procesului de optimizare topologică [34].

Se determină punctele din spațiul de referință care trebuie să fie:

- Zone cu material ($\chi=1$)
- Zone cu vid (fără material) ($\chi=0$)

Astfel încât criteriile stabilite pentru funcțiile obiectiv să fie îndeplinite.



Fig. 4.6. Reprezentarea geometrică a structurii [34]

În cadrul procesului de optimizare topologică trebuie să avem grijă la apariția eventualelor instabilități numerice [35]. Acestea se pot manifesta astfel:

- “Tabla de șah”: Formarea de regiuni cu elemente alternante solid și vid dispuse asemănător tablei de șah.

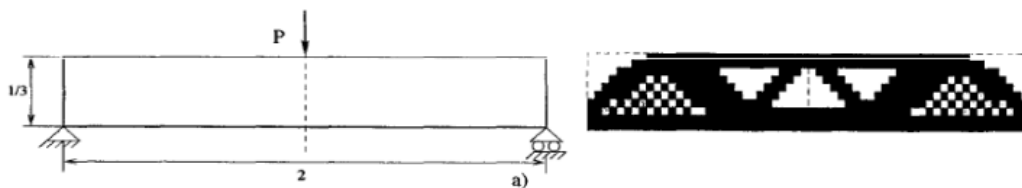


Fig. 4.7. Regiuni cu elemente alternante solid și vid [36]

- Dependența de rețeaua de discretizare: soluții care diferă calitativ pentru diferite dimensiuni ale elementelor sau tipuri de discretizări.

Soluție pentru:



Fig. 4.8. Dependența de rețeaua de discretizare [36]

4.5. Considerații practice

Realizând o analiză de optimizare topologică, se determină un design optim al geometriei din punct de vedere structural pentru o zonă bine stabilită a modelului, cu obiective și constrângeri specifice de proiectare [37].

Optimizarea topologică este o optimizare care se bazează pe un set de încărcări și condiții la limită furnizate de una sau mai multe analize care o precedă. Analiza de optimizare topologică este precedată de o analiză structurală ori de o combinație de analize structurale cuplate între ele. Încărcările și condițiile la limită definite în analiza din amonte sunt utilizate pentru a crea o componentă structurală optimizată pe baza obiectivelor și constrângerilor specificate în analiza de optimizare topologică. Este necesară utilizarea acelorași condiții la limită pentru toate analizele anterioare [38].

Odată finalizată analiza de optimizare topologică, se validează noul design. Este important de menționat că pentru a efectua o validare, analiza de optimizare topologică trebuie să fie soluționată în prealabil.

Validarea noului design devine posibilă prin conversia acestuia din format STL într-un model geometric solid care este apoi analizat utilizând aceleași încărcări și condiții la limită folosite în analiza structurală inițială. După validare, noul design este propus pentru fabricație.

4.6. Concluzii

În prezent procesul de optimizare este parte componentă a procesului de proiectare și de fabricație. Modelul final rezultat în urma procesului iterativ de optimizare trebuie să satisfacă condițiile și restricțiile impuse la funcționarea produsului final. Dintre metodele existente de optimizare a structurilor care sunt utilizate până în prezent, optimizarea topologică este una dintre cele mai folosite. Prin utilizarea optimizării topologice se poate reduce volumul materialului și creșterea rigidității modelului optimizat.

Optimizarea topologică a structurilor mecanice este un proces de determinare a celei mai eficiente forme geometrice a piesei. Forma optimizată a piesei rezultă în urma aplicării criteriilor de optimizare. Prin optimizarea structurală se dorește determinarea tensiunilor minime din piesă, rigiditate mare, deplasări minime, cost minim și o masă minimă a piesei.

Optimizarea este un proces matematic complex, iterativ care impune utilizarea calculatorului și a programelor “software” dedicate. În general orice detaliu al unei piese poate fi optimizat, cum ar fi: dimensiunile de gabarit ale piesei, forma piesei prin crearea de raze de racordare, frecvențele proprii etc. Încă din etapele inițiale ale proiectării concepția structurii este orientată către tipul de solicitare real.

Capitolul 5. Îmbunătățirea răspunsului modal pentru un suport de montare utilizând optimizarea topologică de tip lattice

5.1. Introducere

Fabricarea aditivă (AM) permite metode de proiectare care sunt imposibil de pus în practică folosind metode convenționale de fabricație. O metodologie nouă care este din ce în ce mai utilizată este cea a structurilor de tip lattice. Datorită raportului ridicat dintre rigiditate și greutate și a proprietăților reglabile, structurile lattice, cunoscute alternativ ca structuri celulare, s-au răspândit pe scară largă la fabricarea aditivă a pieselor metalice [39, 40] și sunt aplicate treptat în diferite domenii, cum ar fi aerospațial [41] sau biomecanică [40, 42]. Dezvoltarea tehnologiilor de imprimare 3D a făcut posibilă în prezent producerea unor astfel de materiale metalice și nemetalice. În mod clasic, structurile lattice pot fi periodice sau aleatorii în funcție de aspectul lor. Au fost efectuate studii ample pentru a demonstra performanța superioară a rețelelor periodice în comparație cu cele aleatorii. În lucrări revizuite specifice proiectării și optimizării structurale în AM [43] s-a subliniat că optimizarea structurală bazată pe expertiză, cum ar fi structura lattice, nu are întotdeauna ca obiectiv reducerea masei, deoarece rigiditatea este mult compromisă în schimbul unor cerințe estetice și constituie mai degrabă o practică de proiectare. Optimizarea topologiei (TO), o metodă binecunoscută de proiectare structurală, a fost evidențiată de Sigmund [44], care abordând metoda omogenizării și implementării densității bazate pe TO a pus bazele metodelor din zilele noastre.

Prezentul studiu este realizat în două etape. Folosind un model geometric, se realizează o analiză cu elemente finite prin utilizarea programului ANSYS 2019 R2 [21, 45, 46] pentru a determina prima frecvență naturală a unui suport de montare utilizat pentru un braț de robot industrial. Pornind de la acest design inițial, în prima etapă se obține un model lattice optimizat care devine baza unui al doilea studiu, în care se creează un model omogenizat cu proprietăți variabile ale materialului definite special pentru acest tip de structură [47]. Calea de la optimizarea structurii lattice la omogenizarea modelului este o soluție pentru simplificarea calculului numeric și reducerea costurilor.

Se realizează o comparație între rezultatele privind creșterea frecvenței fundamentale și scăderea masei obținute prin cele două abordări de proiectare [48].

5.2. Optimizarea topologică a unui suport pentru un braț de robot (studiu de caz)

În general, optimizarea topologică se bazează pe un set de solicitări și condiții la limită furnizate de una sau mai multe analize anterioare. Analiza de optimizare topologică în sine poate fi precedată de o analiză structurală sau de mai multe analize structurale cuplate. Solicitățile și condițiile la limită definite în analiza din amonte sunt utilizate pentru a obține o componentă structurală optimizată pe baza obiectivelor și constrângerilor specificate în analiza de optimizare topologică [49]. Este necesar să se utilizeze aceleași solicitări și condiții la limită în analiza de validare a modelului optimizat.

Prin urmare, în acest studiu, este analizat un suport de montare specific pentru un braț de robot industrial. Astfel, se obține mai întâi modelul geometric 3D al suportului. Sunt utilizate metode clasice de modelare geometrică pentru a obține modelul geometric 3D (Fig. 5.1). Suportul de montare analizat și optimizat în acest studiu este fixat în cele șase găuri de la baza sa (Fig. 5.2).

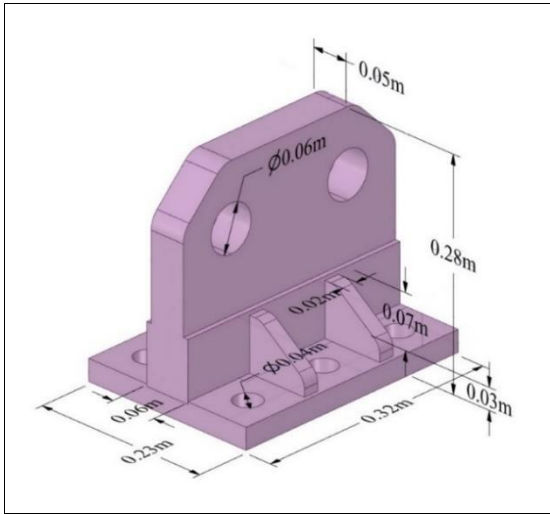


Fig. 5.1. Modelul geometric inițial

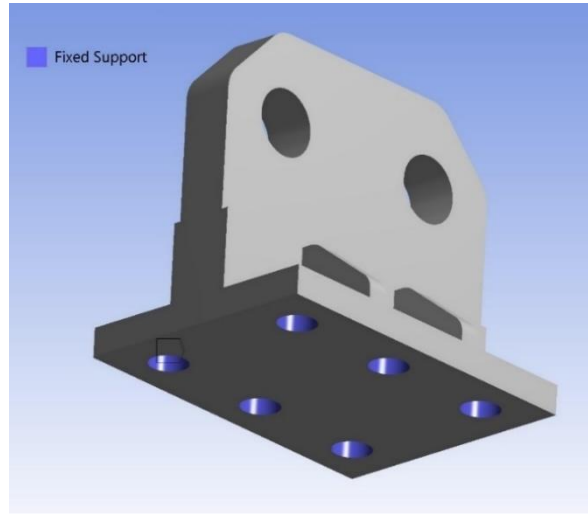


Fig. 5.2. Condiții la limită

Analiza modală este realizată pentru a evalua apariția fenomenului de rezonanță. În acest caz suntem interesați să obținem valoarea primei frecvențe naturale (frecvența fundamentală), astfel încât în procesul de optimizare a structurii lattice să obținem un model îmbunătățit care permite creșterea acestei valori și, în același timp, dorim să minimizăm masa suportului. În al doilea rând, se realizează și o analiză a modelului omogenizat din care rezultă o valoare alternativă a primei frecvențe naturale pe care o comparăm cu cea rezultată din modelul lattice.

Pentru modelul inițial se folosește un material metalic omogen și izotrop la temperatura ambiantă având un comportament elastic liniar, cu următoarele proprietăți: densitate $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, modulul lui Young $E = 210000 \text{ MPa}$, coeficientul lui Poisson $\nu = 0.3$, limita de curgere la întindere și compresiune egală cu 250 MPa și limita de rupere la întindere egală cu 460 MPa .

Prima abordare principală de proiectare începe cu obținerea modelului geometric. Acest model este apoi discretizat și utilizat în analiza modală, pentru a obține frecvențele naturale și modurile proprii de vibrație. De asemenea, în această etapă se realizează optimizarea topologică care, în acest caz, vizează maximizarea valorii primei frecvențe naturale.

Pe baza rezultatelor analizei de optimizare topologică, se generează structura lattice corespunzătoare, care permite realizarea acestui obiectiv, împreună cu minimizarea masei.

5.3. Modelul inițial

Atunci când se realizează o optimizare topologică de tip lattice, se recomandă în general, ca obiectiv de optimizare, să se minimizeze masa, respectând restricțiile specifice analizei care o precedă. Din acest motiv, este adesea necesar să se stabilească cerințe de proiectare mai stricte decât în cazul optimizării topologice standard. Deoarece nu este întotdeauna posibil să se estimeze cu exactitate randamentul componentei optimizate, poate fi necesar să se înceapă optimizarea cu constrângeri din ce în ce mai stricte înainte de a obține rezultatul dorit din optimizarea topologică de tip lattice.

Geometria nu este complicată, deci se obține cu ușurință un model cu elemente finite de calitate bună, luând în considerare: tipul de element finit Solid 185 de ordinul întâi care permite mai multe forme geometrice și astfel a fost generat un model cu elemente finite hibrid, cu o dimensiune a elementului de 8 mm [21, 45].

5.4. Analiza modală

Determinarea frecvențelor naturale și a modurilor proprii corespunzătoare pentru componentele structurale poate fi realizată prin analiza modală. Analiza modală este o analiză liniară. Orice neliniaritate, cum ar fi plasticitatea materialului sau contactele neliniare, sunt ignorate, chiar dacă sunt definite [45].

Pentru modelul neoptimizat au fost extrase primele 6 frecvențe naturale, având valorile prezentate în Tabelul 5.1. Rezultatele obținute pentru o dimensiune a elementelor de 4x4x4 mm sunt, de asemenea, prezentate în acest tabel. Deoarece dimensiunea elementelor este redusă, frecvențele naturale scad puțin ca valoare, însă cu cel mult 2%, dar trebuie menționat faptul că a apărut un avertisment în timpul soluționării în care se preciza că dimensiunea elementelor a fost prea mică.

Se observă că prima frecvență naturală are o valoare de 839 Hz (Fig. 5.3) cu o deformație totală maximă în partea de sus a suportului de 14,2 mm.

Tabel 5.1. Primele 6 frecvențe naturale pentru modelul de suport neoptimizat

Frecvența [Hz]	Model neoptimizat	
	8x8x8 mm	4x4x4 mm
1	839.1	827.4
2	1471.9	1454.8
3	1532.9	1504.0
4	2808.1	2773.7
5	3110.9	3045.7
6	3710.9	3671.5

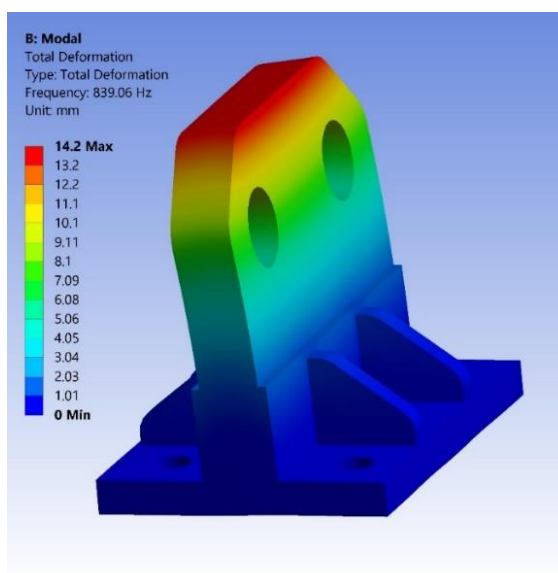


Fig. 5.3. Modul propriu corespunzător primei frecvențe naturale

5.5. Optimizarea de tip lattice

Un tip special de optimizare topologică este optimizarea de tip lattice, considerată aici ca fiind în prima etapă a analizei. În acest tip de optimizare, modelul este “umplut” cu o structură optimizată de tije / bare interconectate care formează un corp comun sub forma unei rețele, iar elementele solide sunt înlocuite de aceasta rețea. Când se realizează optimizarea de tip lattice, se poate, de exemplu, maximiza rigiditatea sau minimiza masa ca obiectiv de optimizare, cu aceleași constrângeri de optimizare disponibile ca și în cazul optimizării topologice standard.

În acest studiu, obiectivul principal este de a maximiza valoarea corespunzătoare primei frecvențe naturale, urmată de cerința de a păstra minim 40% din masa inițială a suportului. Materialul atribuit modelului și condițiile la limită sunt aceleași ca și pentru analiza modală a modelului neoptimizat. Regiunea de optimizare este evidențiată în albastru în Fig. 5.4 și va fi transformată într-o structură lattice. Găurile de montare nu fac parte din regiunea de optimizare și sunt evidențiate în roșu în aceeași figură.

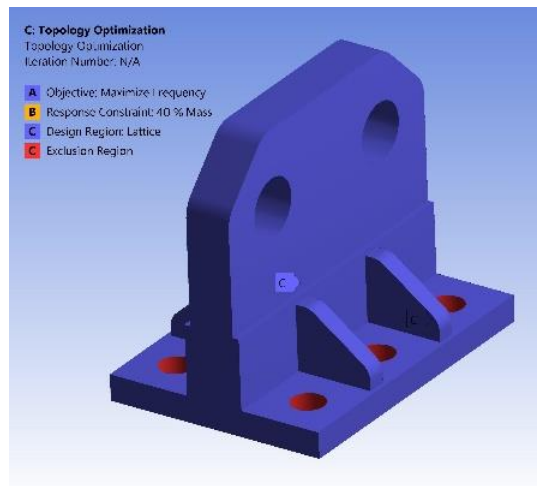


Fig. 5.4. Regiunea de optimizare a suportului și găurile de montare

S-a folosit o celulă lattice cubică, dimensiunea celulei lattice fiind identică cu cea utilizată pentru elementul finit (8x8x8 mm), deși acest lucru nu este obligatoriu. Pentru soluționare, se stabilește inițial un prag maxim de 500 de iterații, dar, deoarece nu este un model foarte mare, soluția se obține după doar 30 de iterații. Noua structură a suportului constituită dintr-o rețea lattice cu celulă cubică este prezentată în Fig. 5.5.

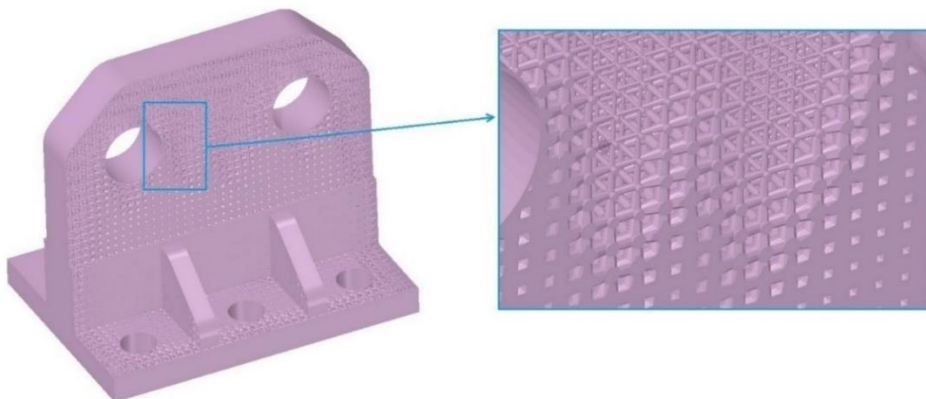


Fig. 5.5. Rețea lattice cu celulă cubică - vedere laterală

După soluționarea analizei de optimizare lattice, noua distribuție a materialului poate fi observată în Fig. 5.6. În zona roșie, practic nu se îndepărtează material absolut deloc și pe măsură ce se îndreaptă spre zona albastră se elimină tot mai mult material. De fapt, după efectuarea optimizării lattice, rezultatele sunt convertite automat în Ansys SpaceClaim Direct Modeler [46] într-un fișier format „.stl” și astfel se generează geometria rețelei lattice, pentru a fi trimisă în cele din urmă către imprimanta 3D. De asemenea, trebuie menționat faptul că geometria inițială a suportului a fost modelată în Ansys SpaceClaim Direct Modeler.

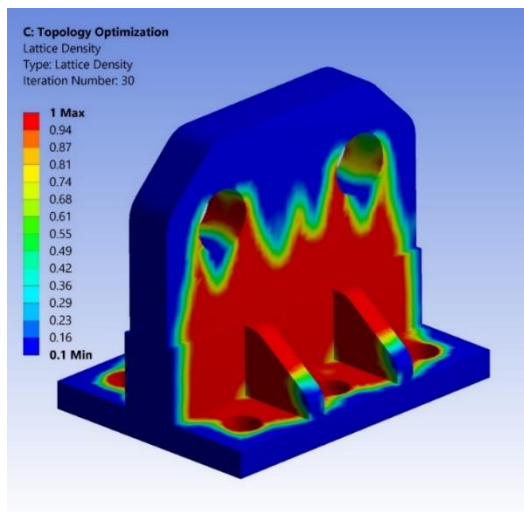












Fig. 5.6. Distribuția materialului rezultată după soluționarea analizei de optimizare lattice











Notând sistemul ortogonal local al axelor principale pentru fiecare celulă cu 1, 2 și 3, modulele longitudinale Young și modulele transversale G sunt practic aceleași pe toate cele trei direcții pentru celula cubică (Tabelul 5.2) și celula de tip cușcă (Tabelul 5.3). Au rezultat câteva diferențe minore pentru valorile coeficientului lui Poisson, în majoritatea cazurilor la a patra zecimală.

Pentru o celulă cubică și o fracție de volum cu valoarea de 0,9, doar o cantitate mică de material este îndepărtată din centrul cubului. Pentru fracțiile de volum specifice celulei de tip cușcă cu valoarea de 0,8 sau 0,9 este aproape imposibil să se detecteze materialul îndepărtat (Tabelul 5.3, figurile de sus), deci celula de tip cușcă este puțin mai rigidă decât celula cubică, deoarece valorile Young sunt, de asemenea, puțin mai mari pentru toate fracțiile de volum.

Tabel 5.2. Seturi de constante elastice pentru celula cubică de 8x8x8 mm și diferite fracții de volum lattice

Fracția de volum lattice										
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
E_1 [GPa]	8.20	18.2	30.1	44.0	60.3	79.7	103.0	130.020	162.0	200.0
E_2 [GPa]	8.20	18.2	30.1	44.0	60.3	79.7	103.0	130.020	162.0	200.0
E_3 [GPa]	8.20	18.2	30.1	44.0	60.3	79.7	103.0	130.020	162.0	200.0
G_{12} [GPa]	0.199	1.06	3.04	6.53	12.0	19.9	30.7	44.589	61.2	76.9
G_{23} [GPa]	0.199	1.06	3.04	6.53	12.0	19.9	30.7	44.589	61.2	76.9
G_{31} [GPa]	0.199	1.06	3.04	6.53	12.0	19.9	30.7	44.589	61.2	76.9
ν_{12} [-]	0.056394	0.085389	0.11149	0.13594	0.1619	0.1896	0.22001	0.25079	0.28013	0.3
ν_{13} [-]	0.056452	0.085419	0.11107	0.13612	0.16145	0.18954	0.21996	0.2514	0.28031	0.3
ν_{23} [-]	0.056452	0.085419	0.11108	0.13612	0.16147	0.18955	0.21996	0.25137	0.2803	0.3
ρ [kg/m ³]	785	1570	2355	3140	3925	4710	5495	6280	7065	7850

Tabel 5.3. Seturi de constante elastice pentru celula de tip cușcă de 8x8x8 mm și diferite fracții de volum lattice

Fracția de volum lattice										
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
E_1 [GPa]	8.27	18.5	30.7	45.2	62.5	83.1	107.0	134.0	164.0	200.
E_2 [GPa]	8.27	18.5	30.7	45.2	62.5	83.1	107.0	134.0	164.0	200.
E_3 [GPa]	8.27	18.5	30.7	45.2	62.5	83.1	107.0	134.0	164.0	200.
G_{12} [GPa]	0.216	1.19	3.36	7.20	13.0	21.2	31.9	44.3	59.3	76.9
G_{23} [GPa]	0.216	1.19	3.36	7.20	13.0	21.2	31.9	44.3	59.3	76.9
G_{31} [GPa]	0.216	1.19	3.36	7.20	13.0	21.2	31.9	44.3	59.3	76.9
ν_{12} [-]	0.057745	0.087889	0.11432	0.14051	0.16796	0.19726	0.2261	0.25105	0.27445	0.3
ν_{13} [-]	0.057741	0.087860	0.11426	0.14053	0.16797	0.19727	0.22582	0.25108	0.27441	0.3
ν_{23} [-]	0.057741	0.087860	0.11426	0.14053	0.16797	0.19727	0.22584	0.25108	0.27441	0.3
ρ [kg/m ³]	785	1570	2355	3140	3925	4710	5495	6280	7064.9	7850

Modelul lattice constituie o dată de intrare pentru analiza modală care va oferi noi frecvențe naturale. Când se utilizează o celulă cubică, prima frecvență naturală are acum o valoare de 1227 Hz, care a crescut considerabil în comparație cu valoarea inițială de 839 Hz, acesta fiind de fapt principalul obiectiv al analizei de optimizare. Deformația totală a crescut la 59,8 mm comparativ cu 14,2 mm pentru suportul solid.

5.6. Omogenizarea structurii lattice utilizând metoda elementelor finite

Imprimarea 3D permite generarea unor piese cu microstructuri complexe, uneori multi-scalare. Raportul dintre scările de lungime implicate poate fi semnificativ și, utilizând un model cu elemente finite unic, problema diferențelor de scară de lungime (la reducerea dimensiunii celulei) va conduce la provocări semnificative în ceea ce privește calculul. În astfel de situații abordarea standard este omogenizarea [47]. Pe baza presupunerii unei separări a scărilor de lungime, omogenizarea numerică este adesea utilizată pentru a modela structurile lattice prin intermediul proprietăților de material echivalente, așa cum au făcut Jansen și Pierard [50]. În lucrarea lor, un suport industrial este, de asemenea, utilizat ca studiu de caz pentru a analiza eficiența omogenizării.

În studiul de față, se efectuează o singură etapă de pre-procesare complexă din punct de vedere al calculului, care duce la un material omogenizat cu caracteristici variabile și are ca rezultat o simulare macroscopică care este semnificativ mai puțin costisitoare din punct de vedere al calculului. În toate metodele de simulare există o ipoteză de separare a scării de lungime.

Structurile microscalare trebuie să fie semnificativ mai mici decât cele macroscale. Dacă această presupunere este depășită, microscara și macrosara nu pot fi modelate independent. Totuși, această presupunere este rezonabilă atât pentru materialele compozite, cât și pentru structurile lattice și este utilizată în multe calcule [51].

În această a doua abordare de proiectare a acestui studiu se obține un model omogenizat pe baza căruia se efectuează o nouă analiză modală. În această analiză, condițiile la limită și caracteristicile modelului cu elemente finite (ordinul, tipul și dimensiunea elementelor etc.) sunt identice cu cele utilizate în analiza modală inițială.

Prin urmare, a doua etapă principală a acestui studiu începe cu proiectarea unui model de material ale cărui proprietăți pentru o celulă cubică variază în funcție de densitatea lattice. Pentru a obține un astfel de material, se generează un fișier care conține coordonatele nodale și valorile densității lattice corespunzătoare acestora, valorile locale fiind prezentate în Fig. 5.7. Densitatea relativă este indicată în câteva puncte din imagine pentru a ilustra distribuția sa pe suprafața și în secțiunea suportului de montare.

Modelul de material astfel obținut este utilizat ca dată de intrare într-o nouă analiză modală care va furniza frecvențele naturale, prima dintre ele fiind cea fundamentală, creșterea acesteia fiind principalul obiectiv al procesului de optimizare.

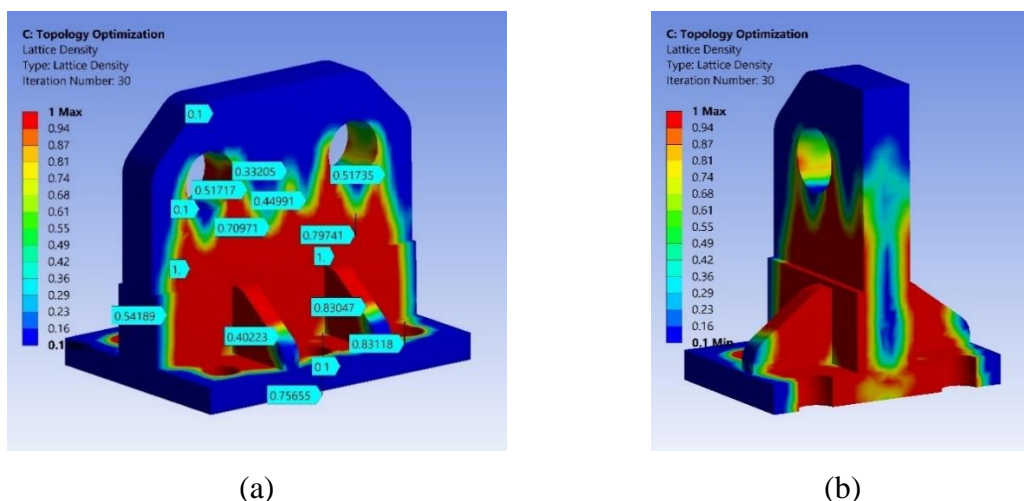


Fig. 5.7. Valori locale ale densității lattice: vedere laterală (a), vedere în secțiune (b)

După soluționarea analizei modale în care este utilizat modelul omogenizat, se stabilește că prima frecvență naturală are o valoare de 1366 Hz (Fig. 5.8), care crește considerabil comparativ cu valoarea inițială de 839 Hz pentru modelul neoptimizat, acesta fiind de fapt principalul obiectiv al analizei de optimizare. Deplasarea maximă totală a devenit acum 49,4 mm, fiind puțin redusă față de valoarea obținută pentru modelul lattice cu celulă cubică.

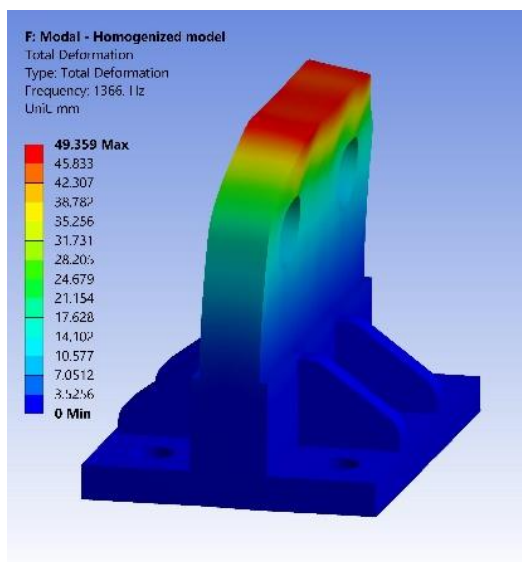


Fig. 5.8. Prima frecvență naturală pentru modelul omogenizat

Tabelul 5.4 prezintă valorile obținute pentru primele șase frecvențe naturale rezultate în urma soluționării analizelor pentru modelul neoptimizat și modelul optimizat pentru care au fost utilizate cele două abordări de proiectare: lattice și omogenizare. Atât pentru elementul finit cât și pentru celula cubică, dimensiunile luate în calcul au fost 8x8x8 mm și 4x4x4 mm. Pentru cazul în care celula cubică a avut dimensiunea 4x4x4 mm, simularea lattice nu a funcționat.

Este interesant de observat că pentru modelul omogenizat primele două frecvențe naturale au crescut la reducerea dimensiunii celulei, în timp ce următoarele trei frecvențe au scăzut ușor.

Tabel 5.4. Compararea frecvențelor naturale pentru modelele neoptimizate și optimizate ale suportului de montare obținute pentru celula cubică

Frecvența [Hz]	Model Neoptimizat		Model Optimizat			
	8x8x8 mm	4x4x4 mm	Lattice		Omogenizare	
			8x8x8 mm	4x4x4 mm	8x8x8 mm	4x4x4 mm
1	839.06	827.44	1227	-	1366	1405
2	1471.9	1454.8	1893.1	-	1560.1	1579.8
3	1532.9	1504	2082.8	-	1658.5	1618.8
4	2808.1	2773.7	2342.7	-	2192.1	2147.4
5	3110.9	3045.7	2575.8	-	2389.6	2332.6
6	3710.9	3671.5	2718.7	-	2553.5	2563.1

Pentru diferite topologii de celule de dimensiuni 8x8x8 mm, primele șase frecvențe naturale obținute prin utilizarea omogenizării sunt prezentate în Tabelul 5.5. Frecvența fundamentală crește pe măsură ce celula lattice devine mai rigidă.

Tabel 5.5. Primele șase frecvențe naturale obținute pentru diferite topologii de celule lattice

Frecvența [Hz]	Model optimizat omogenizat			
	Celulă cubică	Celulă de tip cușcă	Celulă de tip diagonală	Celulă încrucișată
1	1366	1383.3	1465.8	1483.4
2	1560.1	1586.7	1879.3	1845.7
3	1658.5	1688.5	1963.3	1969.4
4	2192.1	2238.3	2612.5	2633.8
5	2389.6	2447.1	3072.4	3048.
6	2553.5	2621.8	3115.3	3125.4

Prin urmare, am efectuat analiza modală pentru structura lattice în două moduri: în prima abordare, structura lattice obținută din analiza topologică a fost utilizată ca model, iar în a doua abordare a fost utilizat un model omogenizat. În ambele cazuri a fost atins obiectivul procesului de optimizare, care a constat în creșterea frecvenței fundamentale și, în același timp, a fost respectată restricția de optimizare care a constat în minimizarea masei. Masa suportului a fost redusă cu mai mult de jumătate, de la 45,5 kg la doar 21,77 kg după optimizare (modelul lattice și cel omogenizat au dat practic aceeași valoare pentru masă) cu celula cubică așa cum este prezentat în Tabelul 5.6. De asemenea, din acest tabel se poate observa că atunci când se utilizează o celulă de tip cușcă, masa are minimum 18,22 kg. Dacă se utilizează o celulă de tip diagonală sau o celulă încrucișată, structura este mai rigidă și masa crește în consecință.

Tabel 5.6. Masa suportului de montare stabilită după omogenizare pentru diferite tipuri de celule lattice

	Model optimizat omogenizat			
	Celulă cubică	Celulă de tip cușcă	Celulă de tip diagonală	Celulă încrucișată
Masa [kg]	21.77	18.22	29.50	27.10

În concluzie, frecvențele fundamentale rezultate obținute pentru modelul optimizat au fost: 1227 Hz pentru modelul lattice cu celulă cubică și 1366 Hz pentru cel omogenizat cu celulă cubică sau 1383 Hz cu celulă de tip cușcă.

Există o diferență între valorile obținute pentru frecvența fundamentală prin cele două metode de calcul de optimizare. Această diferență se poate datora nivelului de rafinare a modelului cu elemente finite pentru structura lattice, deoarece în acest caz nu a fost posibil să se utilizeze un model discretizat foarte rafinat.

De asemenea, este foarte dificil să se genereze un model discretizat pentru o structură lattice, care necesită un calculator performant și o perioadă lungă de timp pentru soluționare. Din acest motiv, în multe analize cu elemente finite dedicate structurilor lattice, se preferă utilizarea unui model omogenizat.

5.7. Concluzii

Optimizarea topologiei ne ajută să proiectăm componente durabile și ușoare pentru orice domeniu de activitate. Putem defini cu ușurință obiectivele și putem aplica controale specifice pentru a ne asigura că sunt îndeplinite cerințele de fabricație, că sunt stabilite grosimile minime ale materialului și că sunt definite corect zonele de excludere. Astfel, optimizarea topologică duce la o reducere a costurilor de producție, fiind utilizată o cantitate minimă de material necesară pentru a îndeplini standardele de funcționare în condiții optime și pentru a crește durata de viață a produsului.

Într-o primă etapă, optimizarea lattice a fost utilizată ca un pas extins de la optimizarea topologiei, eficient pentru aplicații practice de inginerie care implică imprimarea 3D. În primul pas al acestei lucrări a fost stabilit un model inițial al unui suport de montare considerat ca studiu de caz, utilizând analiza cu elemente finite. Au fost definite condiții la limită și a fost utilizat algoritmul Block Lanczos într-o analiză modală pentru calcularea primelor șase frecvențe naturale. De asemenea, a fost determinată masa suportului. Metoda de optimizare lattice ne-a permis să calculăm o distribuție optimă a rețelei lattice cu densitate variabilă. Un nou model geometric a fost generat automat prin utilizarea programului ANSYS și au fost utilizate celule cubice de două dimensiuni. Celula de 8x8x8 mm a dus la o creștere a frecvenței fundamentale de la 839 Hz pentru modelul neoptimizat la 1227 Hz pentru cel optimizat, iar masa a fost redusă de la 45,5 kg la doar 21,77 kg, mai puțin de jumătate. Celula cubică mai mică, cu dimensiunea de 4x4x4 mm, nu a putut fi utilizată eficient.

În cea de-a doua etapă a studiului, s-a analizat modelul omogenizat, iar o nouă analiză modală a fost efectuată utilizând aceleași condiții ca și în primele două analize, pe modelul neoptimizat, respectiv pe modelul lattice, dar de data aceasta s-a folosit un material special conceput pentru a echivala configurația lattice cu densitate variabilă, astfel încât analiza modală s-a putut face mai repede și mai ușor. Au fost utilizate patru tipuri de celule. Celulă cubică la fel ca în cazul optimizării lattice și alte trei tipuri de celule: cușcă, diagonală și încrucișată, toate fiind disponibile în ANSYS. Procedura de omogenizare a dus la creșterea rigidității suportului utilizând celule cu fracții de volum diferite care generează un material ortotrop local și, prin urmare, frecvența fundamentală a crescut la 1366 Hz pentru celula cubică de exemplu. Schimbând tipul de celulă, s-a modificat rigiditatea locală și astfel s-au obținut cele mai bune rezultate cu celula de tip cușcă, deoarece frecvența a fost crescută la 1383 Hz și masa a fost redusă la 18,22 kg.

Rezultatele obținute pot da încredere în utilizarea unei optimizări topologice de tip lattice, dar ar trebui să se aibă grijă să nu se reducă prea mult dimensiunea celulei, deoarece soluția numerică poate deveni ineficientă. Omogenizarea s-a dovedit a fi mai eficientă pentru optimizarea răspunsului modal al suportului de montare, prin creșterea frecvenței fundamentale și reducerea masei sale.

Capitolul 6. Fabricarea aditivă

6.1. Introducere

Sfârșitul anilor '80 începe cu dezvoltarea tehnologiilor de formare a obiectelor 3D, nu conform metodelor tradiționale de înlăturare a adaosului (strunjirea, frezarea, prelucrarea prin erodare) sau schimbarea formei semifabricatului (laminarea, matrițarea), ci folosind o metodă de adăugare a materialului sau schimbare a proprietăților fizice în faza de prelucrare a materialului.

În momentul de față sunt tehnologii avansate de formare strat cu strat a obiectelor 3D conform prototipului în format electronic (CAD). Aceste tehnologii sunt cunoscute sub denumirea de proiectare rapidă (RP-Rapid Prototyping), numită generic *fabricare aditivă* (imprimare 3D).

Tehnologia prototipării rapide și-a găsit întrebuințarea în diverse ramuri industriale cum ar fi: construcții de mașini, electronică, medicină etc., oriunde sunt create mecanisme complexe și sunt fabricate o serie de modele experimentale și machete ale pieselor, care necesită un timp mai îndelungat de proiectare și fabricație.

În momentul de față sunt utilizate diferite sisteme de prototipare rapidă care produc modele conform diferitelor tehnologii și din diferite materiale care au la bază metoda de formare strat cu strat a modelelor și constau în:

- Preluarea modelului 3D din programul CAD (Fig. 6.1 (a))
- Divizarea modelului 3D pe straturi cu ajutorul unui program (Fig. 6.1 (b))
- Formarea piesei divizate strat cu strat de jos în sus pînă la obținerea modelului real

Stratele se formează de jos în sus unul peste altul și sunt legate între ele. Formarea prototipului se desfășoară conform datelor conținute de modelul divizat (Fig. 6.1 (b)) [52].

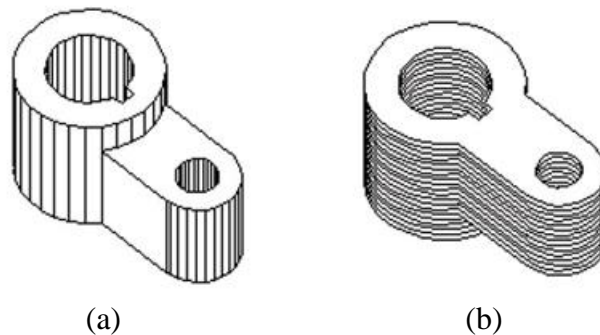


Fig. 6.1. Principiul de creare a modelului real: preluarea modelului 3D din programul CAD (a), divizarea modelului 3D pe straturi (b) [52]

Pe piață, echipamentele de prototipare rapidă apar în anul 1987 când compania 3D Systems a lansat pe piață mașina stereolitografică. În momentul de față există multe alte companii care activează în acest domeniu.

Putem menționa câteva dintre cele mai cunoscute metode de prototipare rapidă:

- Stereolitografia (SLA sau SL - Stereolithography)

- Depunerea de material topit sau modelarea prin extrudare termoplastică (FDM - Fused Deposition Modeling)
- Aplicarea razei laser asupra pulberii (SLS - Selective Laser Sintering)
- Fabricarea piesei prin laminare (LOM - Laminated Object Manufacturing)

6.2. Avantajele imprimării 3D în comparație cu procedeele tradiționale

Procesul de imprimare 3D nu necesită matrițe datorită metodei de fabricație, materialul fiind adăugat în straturi succesive. Imprimarea 3D are câteva avantaje majore față de metodele tradiționale de fabricație:

a. Reducerea timpului de realizare

Din cauza complexității lor, matrițele moderne necesită uneori câteva săptămâni pentru a fi realizate. Obiectele realizate prin imprimare 3D nu numai că nu necesită matrițe, dar pentru ca și cele mai complexe modele să poată fi tipărite 3D într-o singură bucată, nu este necesar nici un procedeu de asamblare a produsului, odată ce materialul suport a fost eliminat, avem piesa finită.

b. Rapiditate

Pentru că acest procedeu nu implică nici un tip de matriță, durata de fabricație constă în timpul necesar tipării 3D a produsului. Astfel, un obiect de mici dimensiuni poate fi realizat și livrat în doar câteva ore. Dacă obiectul dorit are o structură complexă, prin tehnologiile tradiționale, doar realizarea matriței ar dura săptămâni, iar dacă procesul necesită și asamblare, timpul și costurile de producție cresc pe măsură.

c. Cost raportat doar la volum

Una dintre calitățile cele mai incitante ale tipării 3D este faptul că la baza calculării costului de fabricație stă exclusiv volumul de material utilizat. Deoarece tehnologia de imprimare 3D constă în “construirea” obiectului sau mecanismului gata asamblat prin depunere succesivă de straturi de material, complexitatea lucrării nu contează, nefiind necesare alte manopere și procedee adiacente. Cheltuielile de producție vor fi raportate astfel doar la dimensiunea obiectului, indiferent de complexitatea acestuia.

d. Realizarea de forme imposibile pentru tehnologia tradițională

Imprimarea 3D are incredibila capacitate de a realiza mecanisme perfect funcționale, dintr-o singură operațiune, fără alte procedee de asamblare și post-producție. Mecanisme cum sunt rulmenții cu bile, lanțuri, chiar și cutii de viteze întregi sau motoare pot fi imprimate într-un singur procedeu tehnologic.

e. Înaltă precizie

Imprimanta 3D, prin construcția ei compactă și robustă, precum și datorită compoziției materialului utilizat, oferă obiectului o rigiditate mecanică excelentă, iar extrudorul ultra-compact asigură aplicarea precisă și uniformă a materialului cu o precizie de 0,15 mm/strat.

6.3. Tehnologii de bază ale prototipării rapide

Funcționarea sistemelor de prototipare rapidă are la bază un proces chimic de fotopolimerizare, unde soluția de tip polimer lichid se transformă în polimer solid sub influența razelor ultraviolete.

Alte sisteme de prototipare rapidă funcționează având la bază procesele termice prin intermediul cărora sunt obținute modelele fizice. Acest proces tehnologic presupune o funcționare prin injectare a materialelor termoplastice, care, prin suprapunerea straturilor, formează modelul fizic. Sub influența proceselor termice, materialul de tip pudră se solidifică și straturile depuse succesiv se unesc.

6.3.1. Stereolitografia

Tehnologiile de prototipare rapidă au la bază stereolitografia. Stereolitografia (SLA sau SL) a fost înaintată de compania 3D Systems în anul 1987 și în momentul de față peste 500 din sistemele stereolitografice (Stereo Lithography Apparatus - SLA) sunt promovate și folosite de companiile din toată lumea. Sistemele stereolitografice produc obiecte fotopolimerice de înaltă precizie pe baza modelelor 3D CAD.

Procesul stereolitografic presupune schimbarea locală a fazelor mediului (trecerea din stare lichidă în stare solidă) în volumul de polimerizare indicat. Scopul fotopolimerizării constă în formarea prin intermediul razelor laser în mediul lichid activ a capacităților de interacțiune (radicali, ioni, particule active), care intră în reacție cu moleculele monomer, care inițiază creșterea polimerilor în lanț. Ca urmare a acestui proces are loc schimbarea fizică a mediului, adică la interacțiunea dintre raza laser și lichidul activ se obține polimerul solid [53].

Laserul reprezintă elementul de lucru principal al stereolitografiei care, pas cu pas, generează forma secțiunii obiectului. Fotopolimerul lichid se solidifică în locul unde se află în contact nemijlocit cu raza laser. Platforma cu avans pe care crește piesa, este amplasată mai jos decât suprafața cu substanța de fotopolimerizare pe distanță egală cu grosimea primului strat. Pe suprafața de fotopolimerizare se formează imaginea, care corespunde cu prima secțiune a obiectului. În spațiul de acțiune a razei laser se formează pelicula polimerului solid. După formarea primului strat, platforma cu pelicula formată se deplasează în jos la distanța egală cu grosimea următorului strat. Stratul nou de material se amplasează pe suprafața formată iar pe suprafața cu substanța de fotopolimerizare se proiectează imaginea care corespunde cu a doua secțiune a piesei. Apoi platforma cu avans se deplasează la distanța egală cu grosimea următorului strat și procesul se repetă automat până la obținerea piesei. Odată cu obținerea ultimului strat, platforma se deplasează în sus până la primul strat unde piesa tipărită se preia de pe platformă, apoi de pe suprafața piesei se înlătură substanța lichidă a fotopolimerului și în final piesa se usucă [54].

Tehnologia de imprimare stereolitografică a fost propusă de Charles Hall în anul 1984. Mașina stereolitografică a fost lansată pe piață de către compania 3D Systems Inc. din Statele Unite ale Americii iar primele aparate au apărut în anul 1988. Schema structurală de implementare a tehnologiei este prezentată în Fig. 6.2.

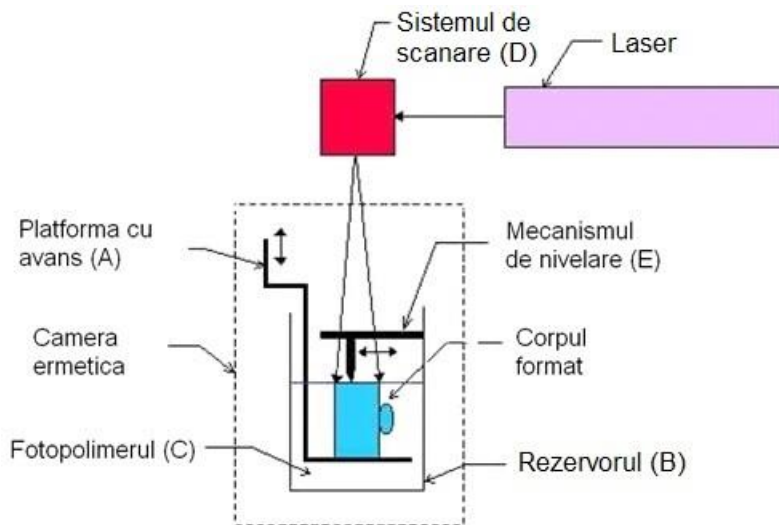


Fig. 6.2. Schema procesului stereolitografic

Procesul continuă pas cu pas până în momentul în care piesa este finalizată. Unele modele ale piesei pot avea mici deviații și au nevoie de suport suplimentar în timpul procesului de tipărire. Suportii se creează în timpul modelării 3D a piesei cu ajutorul diverselor programe de inginerie asistată de calculator.

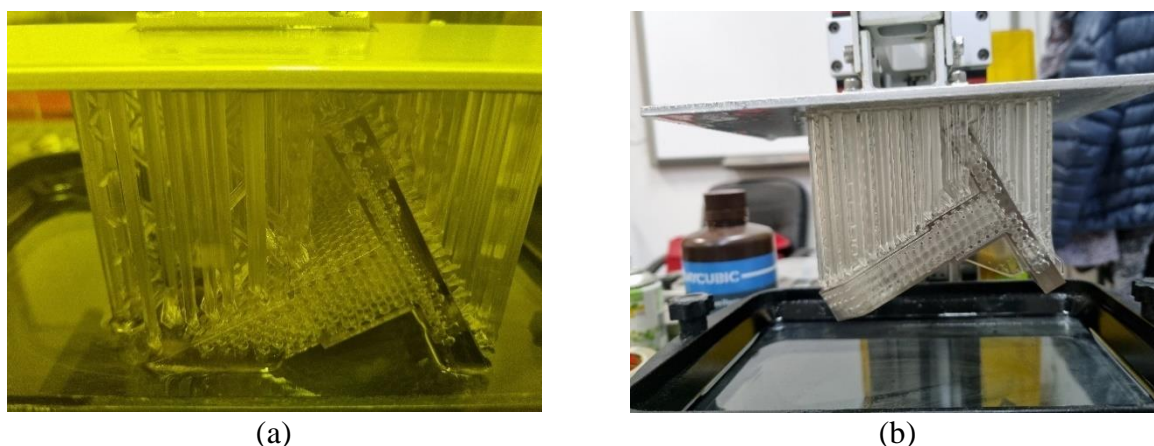
Suportii permit:

- stabilizarea piesei
- împiedică dezamblarea straturilor în zonele dificile ale piesei
- corectează unele deviații ale straturilor
- scoaterea facilă a piesei tipărite din camera de lucru
- fabricația modelelor complicate divizate în mai multe părți

La fabricația prototipului unul dintre cele mai importante obiective este precizia. Analiza cercetărilor și experimentelor a permis depistarea a trei factori principali care influențează precizia de realizare a prototipurilor:

- parametrii sistemului
- generarea modelului strat cu strat
- materialul utilizat pentru realizarea piesei

În Fig. 6.3 (a), (b) sunt prezentate secvențe din procesul de imprimare 3D.



(a) (b)
Fig. 6.3. Imprimarea 3D a unui suport cu structură lattice:
fază intermediară (a), fază finală (b)

6.4. Simularea numerică a procesului de fabricare aditivă a unui suport de montare

Anumite programe bazate pe metoda cu elemente finite permit studii de optimizare topologică, acestea presupunând minimizarea sau maximizarea unor funcții obiectiv în timp ce sunt impuse constrângeri specifice de proiectare, determinându-se în final un design optim pentru o componentă structurală [55, 56].

Un caz particular al procesului de optimizare topologică îl constituie optimizarea de tip lattice. Când se realizează o astfel de optimizare, se poate de exemplu, maximiza rigiditatea sau minimiza masa ca obiectiv de optimizare, cu aceleași constrângeri de optimizare disponibile ca în cazul optimizării topologice standard.

Atunci când se soluționează o optimizare de tip lattice, se recomandă, în general, dacă programul utilizat permite, inclusiv simularea procesului de fabricare aditivă.

Aceasta deoarece structurile de tip lattice sunt fabricate, de cele mai multe ori, prin acest procedeu. În studiul de față este pusă în evidență o astfel de simulare [57].

6.4.1. Obiectivul studiului

În simularea procesului de fabricare aditivă se utilizează modelul geometric optimizat rezultat din studiul de caz prezentat la capitolul 5. Simularea constă într-o analiză termică tranzitorie personalizată pentru fabricare aditivă. Ca metodă numerică de calcul este folosită metoda cu elemente finite.

Obiectivul acestui studiu este de a realiza o verificare preliminară a modului de desfășurare a procesului de fabricație real.

Diagrama completă a studiului numeric este prezentată în Fig. 6.4.

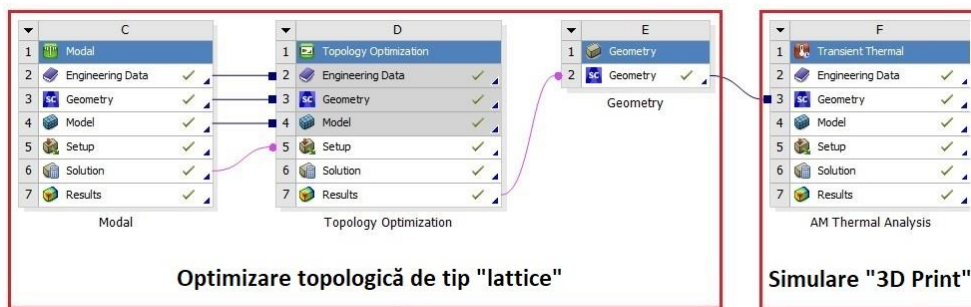


Fig. 6.4. Diagrama studiului numeric

6.4.2. Ipoteze de calcul

După realizarea optimizării topologice de tip lattice rezultă în mod automat structura de tip lattice corespunzătoare, acest model geometric fiind apoi folosit în simularea procesului de fabricare aditivă [39]. Așa cum am menționat mai sus, această simulare este de natură termică, dependentă de timp și este constituită din două mari etape:

- În prima etapă are loc depunerea consecutivă a straturilor de elemente la temperaturile specifice acestui tip de proces de fabricație și ținând cont de toate detaliile tehnice pe care le implică acesta
- A doua etapă constă în simularea răcirii modelului tipărit și implicit solidificarea acestuia

În această simulare s-au folosit datele de intrare specifice procedurii tehnologice Powder Bed Fusion (PBF) iar materialul utilizat în simulare este Inconel 718.

6.4.3. Modelul geometric

După cum am menționat mai sus, în simularea procesului de fabricare aditivă este folosit modelul geometric al unui suport de montare rezultat din optimizarea topologică de tip lattice prezentată la capitolul 5, acesta fiind un suport de fixare specific unui braț robotic industrial. În Fig. 6.5 - 6.6 este reprezentat modelul geometric de tip lattice în secțiune transversală, respectiv longitudinală.

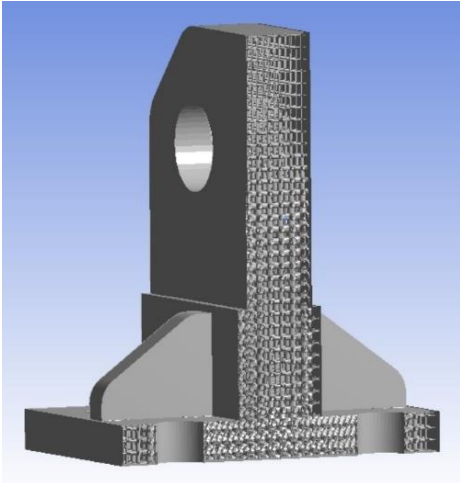


Fig. 6.5. Model geometric - secțiune transversală

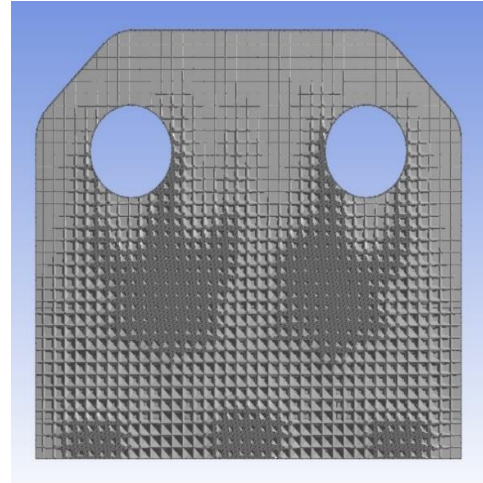


Fig. 6.6. Model geometric - secțiune longitudinală

6.4.4. Modelul discretizat

Dat fiind faptul că modelul geometric are o structură complexă, este dificil de obținut un model discretizat de calitate bună printr-o metodă clasică. Din acest motiv s-a folosit pentru discretizarea piesei tipărite precum și a suportului pe care se sprijină aceasta, metoda carteziană. S-a impus o mărime a elementelor de 1 mm. Este important de menționat că pentru suport a fost generat automat modelul discretizat de către program fără a fi necesară crearea în prealabil a unui model geometric pentru acesta. Nici nu putea fi posibil din cauza complexității structurii "lattice".

Metoda carteziană generează un mesh structurat, uniform, alcătuit numai din elemente de formă cubică. Dimensiunea elementului trebuie să fie suficient de mică pentru a respecta cât mai bine modelul geometric. Modelele discretizate folosite în simulări dinamice explicite sau modelele cu aspect geometric regulat, sunt exemple bune pentru care s-ar putea folosi această metodă de discretizare. De asemenea, este recomandată pentru simularea procesului de imprimare în fabricarea aditivă [58]. Pentru discretizarea plăcii de bază s-a generat un mesh clasic. În Fig. 6.7 piesa fabricată este evidențiată în culoare roșie, placa de bază are culoare albastru închis iar suportul piesei este colorat în albastru turcoaz.

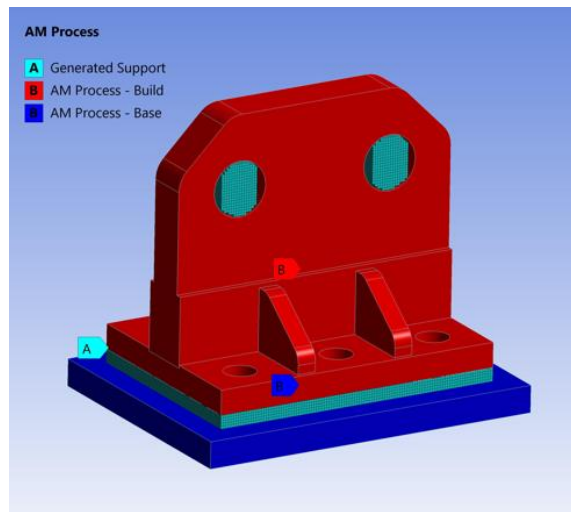
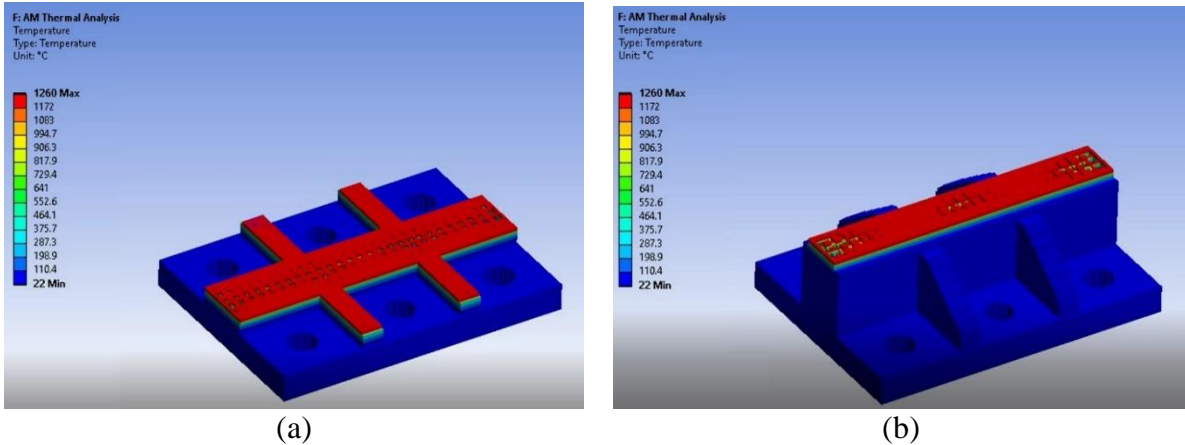


Fig. 6.7. Modelul complet utilizat în simularea AM

6.4.5. Rezultate

În urma soluționării analizei termice tranzitorii, se poate observa procesul de generare a piesei în diferite faze intermediare precum și distribuția de temperaturi. În zonele de culoare roșie temperatura atinge valoarea maximă iar pe măsură ce se merge către zona de culoare albastră, piesa se răcește ajungând să aibă temperatura camerei (22 °C) deoarece s-a impus această valoare când au fost definite condițiile de răcire (Fig. 6.8 (a), (b)).



(a) (b)
Fig. 6.8. Secvențe din timpul simulării AM

6.5. Concluzii

Crearea unui nou tip de produs este un proces de lungă durată și complexitate sporită care necesită mai multe etape de proiectare și analiză până la momentul în care începe producția de masă. Parcurgerea mai rapidă a acestor etape este posibilă implementând metodele de modelare 3D. Sistemele moderne de proiectare asistată de calculator permit micșorarea considerabilă a timpului de proiectare și modelare a unui nou produs cât și diminuarea costurilor. Însă problema de fabricație a primului model real sau a unui element al unei piese care are o formă mai complexă rămâne pe primul loc, deoarece crearea procesului tehnologic de fabricare a piesei și a elementelor ce contribuie la acest proces necesită cheltuieli importante.

În procesul de lucru specific unui proiect nou, mai ales în faza inițială de proiectare, sunt greu de depistat neajunsurile și greșelile, având doar modelul geometric 3D din calculator. Dacă avem și modelul real al piesei se pot depista și înlătura diferitele erori și de asemenea se pot îmbunătăți metodele procesului de proiectare. Prototipul piesei poate fi folosit ca un model concept pentru vizualizare și analiză. Prototipul permite proiectanților să efectueze unele teste funcționale și eventuale modificări.

Modelele prototip ajută la micșorarea cheltuielilor de proiectare și a timpului de lansare a produsului de masă pe baza depistării încă din fazele inițiale a posibilelor erori, facilitează dialogul între proiectanți și cel care comandă produsul și nu în ultimul rând micșorează timpul de lansare a produsului pe piață.

Capitolul 7. Verificarea răspunsului modal pentru un suport de montare utilizând simulări numerice și teste experimentale

7.1. Introducere

Studiul numeric este realizat în două etape. Folosind un model geometric, se realizează o analiză cu elemente finite prin utilizarea programului ANSYS 2019 R2 [21, 45, 46] pentru a determina prima frecvență naturală a unui suport de montare. Pornind de la acest design inițial, în prima etapă se obține un model lattice optimizat care devine baza unui al doilea studiu, în care se creează un model omogenizat cu proprietăți variabile ale materialului definite special pentru acest tip de structură [47]. Calea de la optimizarea structurii lattice la omogenizarea modelului este o soluție pentru simplificarea calculului numeric și reducerea costurilor. În final se realizează o comparație între rezultatele obținute prin simulare numerică și cele obținute experimental.

7.2. Descrierea studiului de caz

În acest studiu, este analizat un suport de montare similar cu cel prezentat anterior în capitolul 5 dar de dimensiuni reduse pentru a putea fi imprimat și testat experimental mai ușor (Fig. 7.1). Acest suport este fixat în cele șase găuri de jos și rezemat la bază.

Analiza modală este realizată pentru a evalua apariția fenomenului de rezonanță. În acest caz suntem interesați să obținem valoarea primei frecvențe naturale (frecvența fundamentală), astfel încât în procesul de optimizare a structurii lattice să obținem un model îmbunătățit care permite creșterea acestei valori și, în același timp, dorim să minimizăm masa suportului.

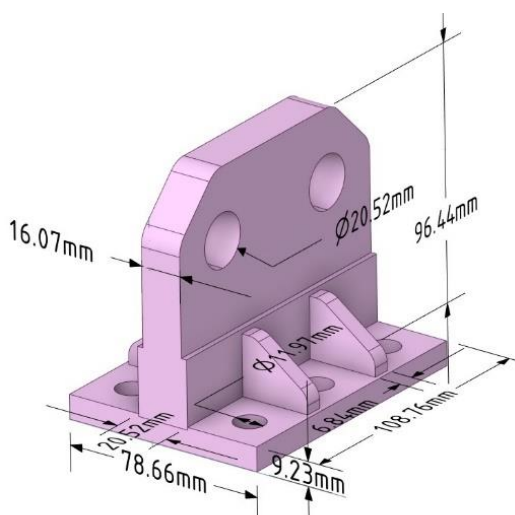


Fig. 7.1. Modelul geometric inițial

Prin urmare, studiul numeric este alcătuit din două etape principale de proiectare care la rândul lor conțin mai multe subetape:

- analiza de optimizare a structurii lattice constând din: crearea geometriei modelului inițial; definirea tuturor datelor de intrare inclusiv a condițiilor la limită și a proprietăților materialului (date tehnice); optimizarea topologiei;
- analiza omogenizării luând în considerare: aceleași date tehnice ca în primul caz, configurarea datelor externe, adică un fișier „csv” care nu este generat direct de ANSYS Mechanical [45] și care conține toate informațiile despre nodurile combinate în Excel cu valorile corespunzătoare densității lattice; la rândul său, acest fișier „csv” este combinat cu cel rezultat din ANSYS Material Designer [47] și astfel rezultă modelul omogenizat; evaluarea modelului omogenizat.

Pentru modelul inițial se folosește un material omogen și izotrop (rășină PLA) la temperatura ambiantă având un comportament elastic liniar, cu următoarele proprietăți: densitate $\rho = 1180 \text{ kg/m}^3$, modulul lui Young $E = 1027 \text{ MPa}$, coeficientul lui Poisson $\nu = 0.36$ și rezistența de rupere la tracțiune egală cu 32 MPa .

Geometria nefiind complicată, se obține cu ușurință un model cu elemente finite de calitate bună, luând în considerare: tipul de element finit Solid 185 de ordinul întâi care permite mai multe forme geometrice și astfel a fost generat un model cu elemente finite hibrid, cu o dimensiune a elementului de 3 mm .

7.3. Analiza modală

Pentru modelul neoptimizat au fost extrase primele 6 frecvențe naturale, având valorile prezentate în Tabelul 7.1. Pentru o mai bună comparație a rezultatelor, au fost extrase și primele 6 frecvențe naturale pentru același model dar fără a mai defini condiții la limită (model liber). Acestea sunt prezentate de asemenea în Tabelul 7.1. Se observă că prima frecvență naturală pentru modelul fixat are o valoare de 323 Hz , iar pentru modelul liber are o valoare de 510 Hz .

Tabel 7.1. Primele 6 frecvențe naturale pentru modelul neoptimizat obținute numeric cu MEF

Frecvența [Hz]	Model neoptimizat	
	Model fixat	Model liber
1	323	510
2	632	863
3	1011	1267
4	1412	1563
5	1891	1931
6	1987	2029

7.4. Optimizarea de tip lattice

În acest studiu, obiectivul principal este de a maximiza valoarea corespunzătoare primei frecvențe naturale, urmată de cerința de a păstra minim 50% din masa inițială a suportului. Materialul atribuit modelului și condițiile la limită sunt aceleași ca și pentru analiza modală a modelului neoptimizat. Regiunea de optimizare este evidențiată în albastru în Fig. 7.2 și va fi transformată într-o structură lattice.

Găurile de montare, suprafața de la bază și cele două găuri din partea de sus a piesei nu fac parte din regiunea de optimizare și sunt evidențiate în roșu în aceeași figură.

Aceasta înseamnă că din aceste zone nu se va elimina material. Excluderea acestor zone din regiunea de optimizare facilitează procesul de fabricare aditivă a structurii lattice, conferind de asemenea o rezistență mai mare a piesei în exploatare.

Am folosit o celulă lattice cubică, dimensiunea celulei lattice fiind identică cu cea utilizată pentru elementul finit (3x3x3 mm), deși acest lucru nu este obligatoriu. Pentru soluționare, se stabilește inițial un prag maxim de 500 de iterații, dar, deoarece nu este un model foarte mare, soluția se obține după doar 18 iterații. Noua structură a suportului este prezentată în Fig. 7.3.

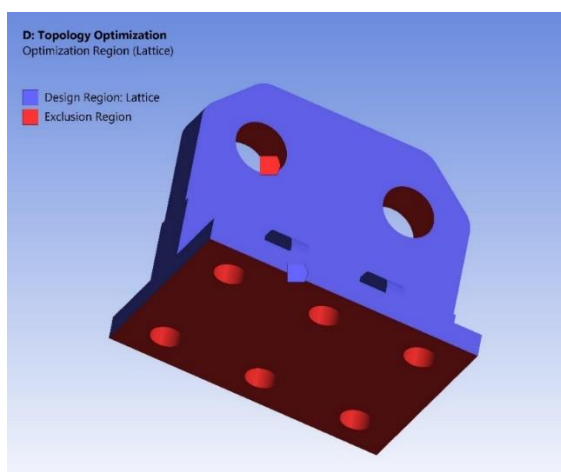


Fig. 7.2. Regiunea de optimizare a suportului și zonele excluse

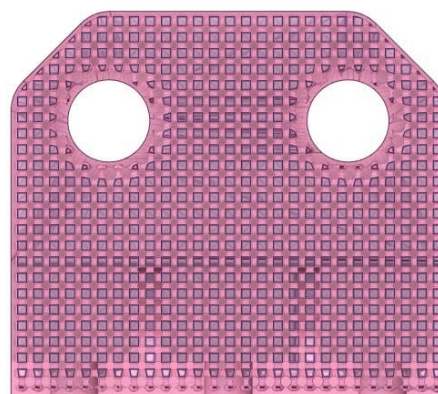


Fig. 7.3. Modelul lattice al suportului: vedere laterală în secțiune pentru rețeaua lattice cu celulă cubică

După soluționarea analizei de optimizare lattice, noua distribuție a materialului poate fi observată în Fig. 7.4. În zona roșie, practic nu se îndepărtează material absolut deloc și pe măsură ce se îndreaptă spre zona albastră se elimină tot mai mult material. De fapt, după efectuarea optimizării lattice, rezultatele sunt convertite automat în Ansys SpaceClaim Direct Modeler [46] într-un fișier format „stl” și astfel se generează geometria rețelei lattice, pentru a fi trimisă în cele din urmă către imprimanta 3D.

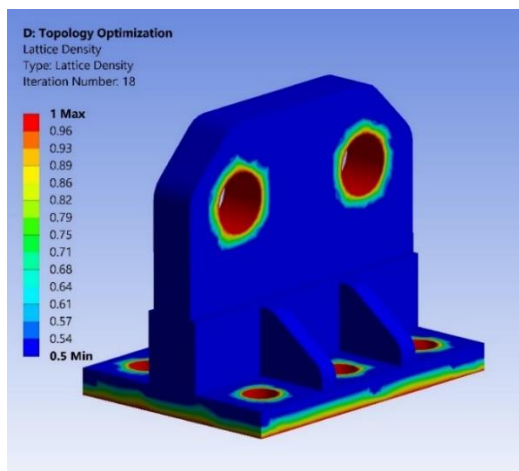


Fig. 7.4. Distribuția materialului rezultată după soluționarea analizei de optimizare lattice

Notând sistemul ortogonal local al axelor principale pentru fiecare celulă cu 1, 2 și 3, modulele longitudinale Young și modulele transversale G sunt practic aceleași pe toate cele trei direcții pentru celula cubică (Tabelul 7.2). Au rezultat câteva diferențe minore pentru valorile coeficientului lui Poisson, în majoritatea cazurilor la a patra zecimală.

Pentru o celulă cubică și o fracție de volum cu valoarea de 0,9, doar o cantitate mică de material este îndepărtată din centrul cubului.

Tabel 7.2. Seturi de constante elastice pentru celula cubică și diferite fracții de volum lattice

Fracția de volum lattice	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
E_1 [GPa]	0.607	0.804	1.035	1.308	1.628	2
E_2 [GPa]	0.607	0.804	1.035	1.308	1.628	2
E_3 [GPa]	0.607	0.804	1.035	1.308	1.628	2
G_{12} [GPa]	0.120	0.198	0.302	0.434	0.589	0.735
G_{23} [GPa]	0.120	0.198	0.302	0.434	0.589	0.735
G_{31} [GPa]	0.120	0.198	0.302	0.434	0.589	0.735
ν_{12} [-]	0.18886	0.22191	0.25847	0.29556	0.33249	0.36
ν_{13} [-]	0.1888	0.22193	0.25754	0.29597	0.3326	0.36
ν_{23} [-]	0.18881	0.22193	0.2576	0.29593	0.33259	0.36
ρ [kg/m ³]	590	708	826	944	1062	1180

7.5. Omogenizarea structurii lattice utilizând metoda cu elemente finite

A doua etapă principală a acestui studiu începe cu proiectarea unui model de material ale cărui proprietăți pentru o celulă cubică variază în funcție de densitatea lattice. Pentru a obține un astfel de material, se generează un fișier care conține coordonatele nodale și valorile densității lattice corespunzătoare acestora, valorile locale fiind prezentate în Fig. 7.5. Densitatea relativă este indicată în câteva puncte din imagine pentru a ilustra distribuția sa pe suprafața și în secțiunea suportului de montare. Modelul de material astfel obținut este utilizat ca dată de intrare într-o nouă analiză modală care va furniza frecvențele naturale, prima dintre ele fiind cea fundamentală, creșterea acesteia fiind principalul obiectiv al procesului de optimizare [48].

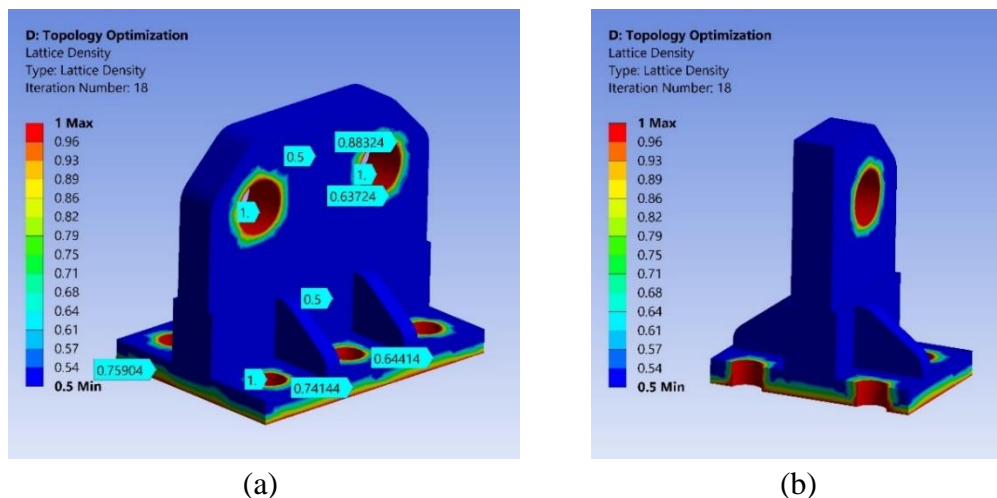


Fig. 7.5. Valori locale ale densității lattice: vedere laterală (a), vedere în secțiune (b)

După soluționarea analizei modale în care este utilizat modelul optimizat, se stabilește că prima frecvență naturală are o valoare de 470 Hz, care crește considerabil comparativ cu valoarea inițială de 323 Hz pentru modelul neoptimizat, acesta fiind de fapt principalul obiectiv al analizei de optimizare. Este important de menționat că aceste valori corespund modelului fixat.

Tabelul 7.3 prezintă valorile obținute pentru primele șase frecvențe naturale rezultate în urma soluționării analizelor atât pentru modelul neoptimizat cât și pentru cel optimizat.

Tabel 7.3. Frecvențe naturale determinate numeric

Frecvența [Hz]	Model neoptimizat		Model optimizat	
	Model fixat	Model liber	Model fixat	Model liber
1	323	510	470	693
2	632	863	918	982
3	1011	1267	1415	1373
4	1412	1563	1491	1613
5	1891	1931	2032	1972
6	1987	2029	2115	2085

Prin urmare, am efectuat analiza modală atât pentru modelul neoptimizat cât și pentru cel optimizat în două moduri: în prima abordare am considerat modelul fixat (montat), iar în a doua abordare modelul a fost considerat liber. În ambele cazuri a fost atins obiectivul procesului de optimizare, care a constat în creșterea frecvenței fundamentale și, în același timp, a fost respectată restricția de optimizare care a constat în minimizarea masei. Masa suportului a fost redusă considerabil, de la 0,273 kg la doar 0,175 kg după optimizare așa cum este prezentat în Tabelul 7.4.

Tabel 7.4. Masa suportului de montare înainte și după optimizare

	Model neoptimizat	Model optimizat
Masa [kg]	0,273	0,175

În concluzie, frecvențele fundamentale rezultate obținute pentru modelul neoptimizat au fost 323 Hz pentru cazul fixat și 510 Hz pentru cazul liber, iar pentru modelul optimizat au fost 470 Hz pentru cazul fixat și 693 Hz pentru cazul liber. Geometria structurii care urmează a fi omogenizată va juca un rol în stabilirea fracției variabile de volum a rețelei lattice, respectiv a densității variabile. Aceste atribute sensibile vor modifica îndeaproape masa piesei și frecvența fundamentală a acesteia.

7.6. Teste experimentale

Metoda cel mai des utilizată în analiza modală experimentală pentru excitarea unei structuri este cea de tip impact, efectuată cu ajutorul unui ciocan de impact, numit și ciocan modal (Fig. 7.6 (a)). Forma de undă produsă în urma impactului, dată fiind durata de timp foarte mică, se înscrie în regimul excitațiilor tranzitorii.

Durata impactului și forma spectrului forței excitatoare, sunt determinate de masa și rigiditatea celor două corpuri: ciocanul modal și structura suportului. Capul ciocanului acționează ca un filtru mecanic, el determinând domeniul frecvențelor în care este concentrată energia vibrației.

Forța măsurată este forța obținută din produsul dintre accelerație și masa care se găsește în spatele captorului de forță. Forța reală, care excită structura, este egală cu masa totală de impact (inclusiv masa captorului de forță) înmulțită cu accelerația din timpul impactului.

Sistemul de achiziție și prelucrare a datelor utilizat în experiment este un model Pulse 7700 realizat de compania Brüel & Kjær (Fig. 7.6 (b)).

Rezultatele determinate în cadrul studiului numeric sunt astfel verificate prin teste experimentale. A fost testat atât modelul neoptimizat cât și cel optimizat, fixat (montat) în cele șase găuri de jos și rezemat pe suprafața de la bază. Suportul studiat a fost prins de o masă de 15,950 kg în care s-au dat șase găuri pentru șurub M8. A fost prins cu piulițe care au distribuit pe o suprafață mai mare solicitarea care apare atunci când se strâng șuruburile. Pe suport s-a montat de asemenea și un accelerometru piezoelectric cu conector superior de tip 4384. Acest tip de accelerometru este proiectat pentru testarea și analiza vibrațiilor și pentru măsurători de înaltă frecvență de uz general.

În Fig. 7.6 (a) este prezentată o secvență din testul experimental realizat pentru modelul optimizat, iar în Fig.7.6 (c) este pus în evidență modelul neoptimizat.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7.6. Determinarea experimentală a frecvențelor naturale pentru suportul studiat:
model optimizat - detaliu (a), model optimizat - vedere de ansamblu (b),
model neoptimizat - detaliu (c)

Spectrul mobilității mecanice pentru cazul fixat (acelerație - mărime de ieșire / forță - mărime de intrare) înregistrat de către accelerometrul piezoelectric montat pe piesă este prezentat în Fig. 7.7.

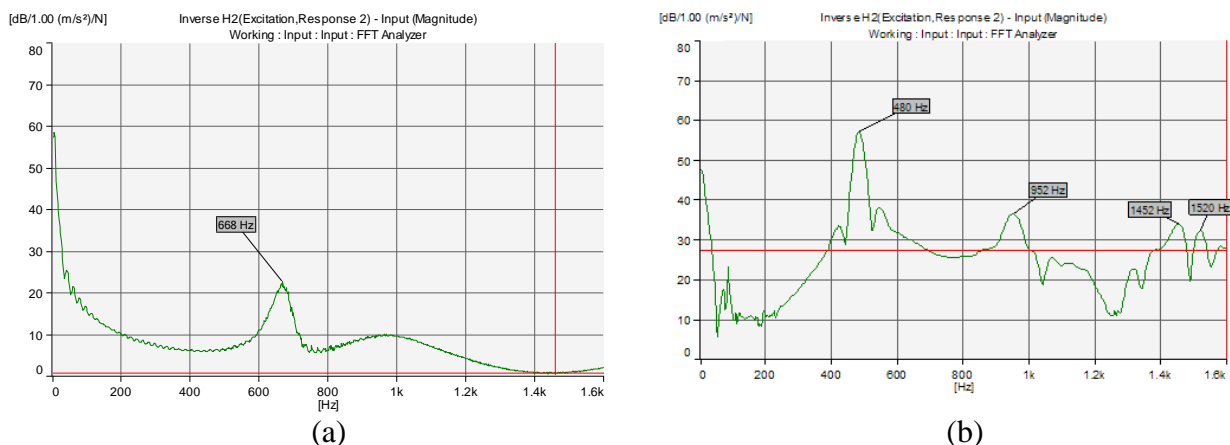


Fig. 7.7. Spectrul mobilității mecanice pentru cazul fixat: model neoptimizat (a), model optimizat (b)

În Fig. 7.8 este reprezentat schematic modul de prindere a modelului în vederea determinării frecvențelor naturale pentru cazul liber. Modelul este prins de cadrul de susținere cu cabluri flexibile din cele patru găuri din colțuri. La fel ca în cazul fixat, este montat pe piesă, în aceeași locație, un accelerometru piezoelectric cu conector superior de tip 4384.

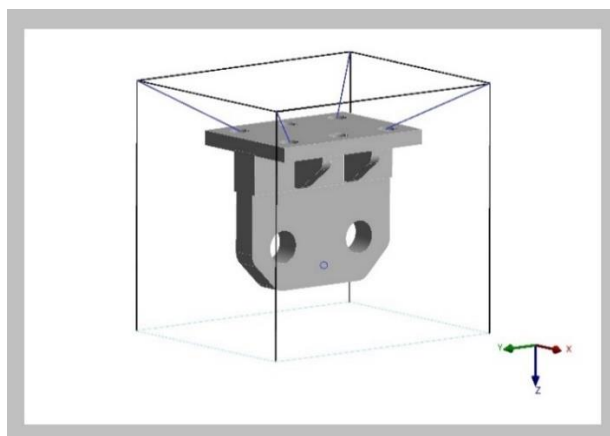


Fig. 7.8. Reprezentarea schematică a modului de prindere pentru testarea modelului liber

În Tabelul 7.5 sunt prezentate frecvențele determinate experimental atât pentru modelul neoptimizat cât și pentru cel optimizat, corespunzătoare ambelor cazuri (fixat și liber).

Tabel 7.5. Frecvențe naturale determinate experimental

Frecvența [Hz]	Model neoptimizat		Model optimizat	
	Model fixat	Model liber	Model fixat	Model liber
1	343	494	480	708
2	648	874	952	994
3	1034	1278	1452	1352
4	1435	1546	1520	1593
5	1910	1942	2087	1985
6	2015	2043	2140	2103

După cum se poate observa din Tabel 7.3 și Tabel 7.5, între rezultatele studiului numeric și cele obținute experimental sunt mici diferențe, acestea din urmă fiind puțin mai mari ca valoare, însă aceste diferențe pot fi considerate acceptabile. Acestea se pot datora atât unor mici erori numerice cât și colectării uneori imprecise a datelor experimentale.

7.7. Concluzii

În prima etapă a studiului numeric prezentat în acest capitol a fost stabilit un model inițial al unui suport de montare de dimensiuni reduse și realizat din rășină la imprimantă 3D. Metoda de optimizare lattice ne-a permis să calculăm o distribuție optimă a rețelei lattice cu densitate variabilă, fiind utilizată celula cubică. Astfel, un nou model geometric a fost generat automat prin utilizarea programului ANSYS.

În cea de-a doua etapă a studiului, pe baza structurii lattice obținute în prima etapă s-a realizat modelul omogenizat. Astfel, s-a folosit un material special conceput pentru a echivala configurația lattice cu densitate variabilă, astfel încât analiza modală s-a putut face mai repede și s-au utilizat resurse de calcul reduse. Acest model echivalent a fost apoi utilizat în noi analize modale pentru a determina cele șase frecvențe naturale specifice modelului optimizat. Au fost luate în considerare două cazuri de studiu: unul în care modelul a fost fixat (montat) și altul în care modelul a fost analizat liber.

În urma optimizării topologice de tip lattice, masa a fost redusă de la 0,273 kg la doar 0,175 kg iar frecvențele fundamentale determinate numeric au crescut de la 323 Hz la 470 Hz pentru cazul fixat și de la 510 Hz la 693 Hz pentru cazul liber. În urma testelor experimentale, frecvențele fundamentale au crescut de asemenea, de la 343 Hz la 480 Hz pentru cazul fixat și de la 494 Hz la 708 Hz pentru cazul liber.

Așa cum s-a menționat și mai sus, micile diferențe de valori dintre rezultatele studiului numeric și cele obținute experimental se pot datora atât unor mici erori numerice cât și colectării uneori imprecise a datelor experimentale.

Rezultatele obținute pot da încredere în utilizarea unei optimizări topologice de tip lattice, dar ar trebui să se aibă grijă să nu se reducă prea mult fracția de volum a celulei lattice, deoarece soluția numerică poate deveni inefficientă și de asemenea este mult mai dificil de tipărit piesa la imprimanta 3D. Omogenizarea s-a dovedit eficientă pentru optimizarea răspunsului modal al suportului de montare, prin creșterea frecvenței fundamentale și reducerea masei sale.

Capitolul 8. Concluzii finale

8.1. Concluzii generale

Proiectarea experimentelor (DOE) pune la dispoziție metode sistematice pentru a determina relația dintre factorii care influențează un proces de optimizare și rezultatul procesului respectiv. Cu alte cuvinte, aceste metode sunt folosite pentru a găsi relații cauză-efect. Aceste informații sunt necesare pentru a gestiona intrările într-un proces în vederea optimizării ieșirilor. Înțelegerea acestor metode necesită mai întâi cunoașterea unor instrumente statistice și concepte de experimentare. Deși de multe ori pot fi utilizate programe “software”, este important pentru practicieni să înțeleagă conceptele de bază pentru o aplicare corectă.

Principalele preocupări în proiectarea experimentelor includ stabilirea validității, fiabilității și replicabilității. De exemplu, aceste preocupări pot fi abordate parțial alegând cu atenție variabila independentă, reducând riscul de eroare de măsurare și asigurând că documentația metodei este suficient de detaliată. Preocupările conexe includ atingerea nivelurilor adecvate de precizie și sensibilitate statistică. Pe baza rezultatelor obținute se pot formula următoarele concluzii generale:

- (1) Metodele factoriale sunt considerate metode DOE clasice. Cu toate acestea ele sunt foarte utilizate și azi. Aceste metode prezintă avantajul că pot fi utilizate atât în experimentele fizice cât și în cele realizate pe calculator, astfel putând fi combinate cu diverse metode numerice.
- (2) În această lucrare au fost prezentate câteva dintre cele mai importante aspecte ale utilizării metodei cu elemente finite în ingineria mecanică, punând accent pe aplicabilitatea acesteia în procesul de optimizare a componentelor structurale. În faza de elaborare a modelului de calcul destinat optimizării trebuie avute în vedere și aspectele practice care de multe ori sunt dificil de formulat în termeni numerici. Găsirea unei soluții se face de către inginerul proiectant sau de către alți membri ai echipei tehnice pe baza intuiției și experienței acumulate de-a lungul timpului.
- (3) Tehnicile de optimizare s-au impus tot mai mult ca instrumente de proiectare foarte utile pentru realizarea unor structuri ușoare, rezistente și care implică costuri mici. Foarte multe dintre aceste tehnici de optimizare se bazează pe metoda cu elemente finite și pe utilizarea unor calculatoare din ce în ce mai performante. Aceasta deoarece, în general, studiile de optimizări implică realizarea a numeroase experimente și de asemenea nivelul de rafinare a modelului cu elemente finite impune de multe ori utilizarea unui calculator performant. Pentru o modelare eficientă se recomandă utilizarea unor tipuri de elemente finite care mai întâi trebuie analizate atât din punct de vedere teoretic cât și practic, astfel încât să se cunoască performanțele acestora și dacă acestea se potrivesc sau nu cu designul supus optimizării. Utilizarea funcțiilor de formă, a integrării numerice precum și calculul deplasărilor și tensiunilor sunt de asemenea importante. Utilizatorul metodei cu elemente finite trebuie să cunoască bine toate aceste noțiuni pentru că altfel utilizarea acestei metode poate conduce la rezultate eronate / inexacte.
- (4) Metoda suprafeței de răspuns și optimizarea topologică pot fi utilizate doar în experimentele realizate pe calculator. Acest lucru presupune bineînțeles și utilizarea unei mașini de calcul performantă, în special pentru optimizarea topologică. Ambele metode folosesc algoritmi matematici specifici și de asemenea depind de nivelul de rafinare utilizat în obținerea modelului discretizat.

(5) Optimizarea topologică este cea mai nouă dintre aceste metode de optimizare și prezintă avantajul că este ușor de realizat de către orice inginer care are cunoștințe de bază despre metoda elementului finit. De asemenea, optimizarea topologică este foarte utilizată în procesul de fabricare aditivă asistat de calculator care folosește imprimante 3D și care este foarte des întâlnită în multe fabrici moderne. Metodele clasice de proiectare nu sunt foarte compatibile cu noile procese de fabricație, cum ar fi fabricarea aditivă, care elimină constrângerile de proiectare și deschid noi posibilități. Forma optimă a unei piese este adesea organică și contraintuitivă, astfel încât proiectarea acesteia necesită o abordare diferită. Optimizarea topologică permite să specificăm unde se află condițiile la limită și încărcările pe o componentă structurală, după care programul “software” găsește cea mai bună formă pentru aceasta. Astfel optimizarea topologică conduce la o reducere a costurilor de producție, fiind utilizată o cantitate minimă de material necesară pentru a îndeplini standardele de funcționare în condiții optime și pentru a crește durata de viață a produsului.

(6) În ceea ce privește studiul de caz prezentat la capitolul 5, în prima etapă au fost definite condițiile la limită specifice piesei studiate, s-a stabilit numărul de frecvențe proprii care urmează a fi extrase precum și algoritmul folosit în analiza modală și apoi s-a realizat analiza de optimizare topologică particularizată pentru structuri de tip lattice, rezultând astfel o nouă configurație internă pentru modelul optimizat. Următorul pas a constat într-o validare a acestui nou model, realizându-se o nouă analiză modală în aceleași condiții în care a fost făcută și prima. Este important de evidențiat că în urma optimizării de tip lattice a rezultat o piesă mai rigidă, ceea ce s-a și urmărit, având în vedere că valoarea primei frecvențe naturale a crescut considerabil și în același timp, masa acesteia a fost redusă la mai puțin de jumătate din cât avea inițial.

(7) Imprimantele 3D permit proiectanților să producă într-un timp foarte scurt un prototip. În consecință prototipul poate fi testat și remodelat rapid. Producția acestor piese prin metode clasice durează câteva săptămâni, însă folosirea acestor noi tehnologii de imprimare reduce acest interval de timp la 48 de ore. Astfel, timpul câștigat oferă posibilitatea testării mai multor variante ale componentelor cu scopul dezvoltării cât mai rapide a soluției propuse. Imprimarea 3D este, de asemenea, distinctă de tehnicile de prelucrare tradiționale, care se bazează în principal pe eliminarea materialului prin metode cum ar fi tăiere, frezare, găurire, etc. Prin imprimare 3D se pot realiza mecanisme pe deplin functionale, dintr-un singur proces tehnologic, fara a mai fi necesare alte procedee de asamblare post-producție. O imprimantă 3D este până la urmă un alt tip de robot industrial, care este capabil să efectueze acest proces sub control computerizat.

(8) Programele “software” completează acest sistem tehnologic modern bazat în mare măsură pe utilizarea calculatoarelor, permițând realizarea unui flux de lucru complet care începe cu realizarea modelului geometric 3D CAD și se încheie cu imprimarea acestuia. Din acest flux de lucru fac parte, în mod evident și etape precum optimizarea designului sau testarea acestuia utilizând metode numerice de calcul. Posibilitatea de a simula numeric procesul de fabricare aditivă este un mare avantaj pentru acest flux de lucru atât din punct al reducerii timpului de lucru dar mai ales al reducerii costurilor de producție. Acest tip de simulare necesită, în general, un model discretizat fin pentru a respecta toate detaliile geometrice, inclusiv acele zone ale modelului care sunt subțiri sau foarte subțiri. Acest lucru conduce în general la un model discretizat cu un număr mare de noduri și elemente care necesită resurse de calcul semnificative. Mașinile de calcul HPC sunt preferate în astfel de situații.

Lucrarea și-a atins principalul obiectiv de realizare a unui studiu experimental și numeric detaliat cu privire la optimizarea topologiei componentelor structurale. Cu toate acestea, există o serie de direcții ce pot fi urmărite pentru a aduce îmbunătățiri studiului, și anume:

(1) Îmbunătățirea procedurii de fabricare aditivă, în vederea imprimării unor structuri lattice mult mai complexe.

- (2) Îmbunătățirea procedurii experimentale de testare pentru determinarea frecvențelor proprii specifice modelului liber prin introducerea unui sistem de prindere mai flexibil.
- (3) Obținerea tuturor datelor de intrare specifice materialului utilizat pentru simularea numerică a procedurii de fabricare aditivă.
- (4) Posibilitatea de a simula numeric imprimarea 3D prin cât mai multe metode de fabricare aditivă, utilizând modele discretizate care să aproximeze mult bine modelul fizic real.

8.2. Contribuții originale

Contribuțiile personale aduse cercetării experimentale și numerice cu privire la optimizarea topologiei componentelor structurale, se remarcă prin:

- (1) Elaborarea unei metodologii clare și eficiente de analiză experimentală și numerică în vederea proiectării și optimizării topologiei componentelor structurale.
- (2) Realizarea unui studiu comparativ al influenței unor parametri geometrici, de fabricare aditivă și de testare asupra răspunsului modal al structurilor lattice.
- (3) Realizarea unor modele numerice, validate experimental, de analiză a structurilor lattice la vibrații.
- (4) Realizarea unui studiu comparativ a mai multor tipuri de celule lattice în vederea determinării tipului de celulă optim, folosit ulterior atât în studiile numerice cât și în cele experimentale.
- (5) Evidențierea, prin argumente calitative, a comportamentului structurilor lattice la vibrații, având totodată avantajul unor mase mai mici în comparație cu piesele “pline”.
- (6) Folosirea cu succes a metodei elementelor finite în simularea numerică a procedurii de fabricare aditivă.
- (7) Evidențierea modalității de evitare a dificultăților de obținere a modelului discretizat pentru o structură lattice, utilizând modelul omogenizat echivalent.
- (8) Utilizarea metodelor de optimizare factorială combinate cu metoda elementelor finite în simulări numerice avansate pentru determinarea comportamentului structurilor metalice la solicitări statice și dinamice.

8.3. Direcții viitoare de cercetare

Rezultatele obținute în cadrul acestei teze de doctorat oferă informații importante legate de răspunsul structurilor lattice la vibrații și constituie în același timp un punct de pornire pentru câteva direcții viitoare de cercetare:

- (1) Studiul experimental și numeric al rezistenței structurilor lattice la vibrații ordonate și aleatorii, studiate atât separat cât și combinat, pentru verificarea comportamentului structurii în cazul cel mai defavorabil.
- (2) Studiul experimental și numeric al răspunsului dinamic tranzitoriu al structurilor de tip lattice.
- (3) Studiul experimental și numeric al răspunsului dinamic al structurilor de tip lattice la impact.

Bibliografie

- [1] Antony, J.: Design of Experiments for Engineers and Scientists, Elsevier, Oxford, UK, 2003
- [2] Poterașu, V.F., Florea, N.: Practica optimizării structurilor, Editura Junimea, Iași, 1984
- [3] Box, G.E.P., Hunter, W.G., Hunter, J.S.: Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building, John Wiley and Sons Inc., New York, 1978
- [4] Schmit, L., Myers, R.H.: Structural synthesis and design parameters. Hierarchy. s.l., Journal of the Struct. Division, Proceedings of the ASCE, 89:269–299, 1963
- [5] Box, G.E.P., Wilson, K.B.: On the experimental attainment of optimum conditions, J. R. Stat. Soc. B., 13(1), 1-45, 1951
- [6] Arora, J.S.: Guide to structural optimization. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 90, 1997
- [7] Box, G.E.P., Behnken, D.: Some new three level designs for the study of quantitative variables, Technometrics, 2(4), 455-475, 1960
- [8] Fisher, R.A.: The Design of Experiments, Edinburgh, Oliver & Boyd, 1935
- [9] American Supplier Institute Inc (ASI), Taguchi Methods: Implementation Manual, ASI, Dearborn, MI, 1989
- [10] Roy, R.K.: A Primer on the Taguchi Method, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, USA, 2010
- [11] Myers, R.H., Montgomery, D.C.: Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, (2nd Edition), John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA, 2002
- [12] ANSYS 2019 R2, DesignXplorer User's Guide, ANSYS Inc., Canonsburg, USA, 2019a
- [13] Eschenauer, H., Koski, J., Osyczka, A.: Multicriteria design optimization, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Germany, 1990
- [14] Valery, V.V.: Optimal Design Theory and Applications to Materials and Structures. Lancaster: Technomic, 1999
- [15] Bletzinger, K.U., Bletzinger, R.E.: Structural optimization and form finding of lightweight structures, Computers & Structures, vol. 79, pp. 2053-2062, 2001
- [16] Sorohan, Ș., Constantinescu, I.N.: Practica modelării și analizei cu elemente finite, Editura Politehnica Press, București, 2003
- [17] Baracu, T., Pătrașcu, M., Teodosiu, C., Bîrsan, M.V., Gheorghian, A., Streche, C., Boșneagu, R., Babiș, C., Ioniță, C., Rădoiu, V.B., Costinaș, S., Stan, L., Meșteru, C., **Vlădulescu, F.**, Galeano, G.C.: Deterministic matrix-based radiative design using a new general formulation of exergy and exergy efficiency for hybrid solar collectors, Applied Thermal Engineering, 182, 115318, 2021
- [18] Sorohan, Ș., Petre, C.: Programe și aplicații cu elemente finite, Editura Printech, București, 2004
- [19] Baracu, T., Costinaș, S., Ghiașu, C., Badea, A., Avram, R., **Vlădulescu, F.**, Jugrăvescu, D.: New analytical methodologies for radiative heat transfer in enclosures based on matrix formalism and network analogy, Applied Thermal Engineering, 107: 1269-1286, 2016
- [20] Ana, G., **Vlădulescu, F.**, Ana, R., Pasca, G., Niculescu, A.: Thermal analysis of a cryogenic distillation column for hydrogen isotopes separation, Fusion Engineering and Design, 146, Part B: 1868-1871, 2019
- [21] ANSYS 2019 R2, Meshing User's Guide, ANSYS Inc., Canonsburg, USA, 2019c
- [22] ANSYS 2019 R2, Mechanical APDL Analysis User's Guide, ANSYS Inc., Canonsburg, USA, 2019d
- [23] Radeș, M.: Analiza cu elemente finite, UPB, București, 2006
- [24] Adetu, C., Năstăsescu, V., Adetu, A.E., **Vlădulescu, F.**: Upon Using of Plastics Layer in Light Multilayered Armor, Revista Materiale Plastice, 57 (2): 265-275, 2020

- [25] **Vlădulescu, F.**, Ciolofan, C.: Impact analysis between an aircraft and a small solid body during flight, Proceedings of the International Conference of Aerospace Sciences “AEROSPATIAL 2010” Bucharest, ISSN 2067-8614, 397-404, 2010
- [26] Pascariu, I.: Elemente finite Concepte-Aplicații, Editura Militară, București, 1985
- [27] Sandu, M., Sandu, A., Constantinescu, D.M., Apostol, D., **Vlădulescu, F.**: Mechanical behaviour of structural sandwich panels with a cellular grid, ICEM16 conference, oral presentation, British Society for Strain Measurement, Cambridge, UK, 2014
- [28] Blumenfeld, M.: Introducere în metoda elementelor finite, Editura Tehnică, București, 1995
- [29] Leoveanu, I.S.: Optimizarea proceselor tehnologice, Vol.1, Editura Lux Libris, Brașov, 2006
- [30] Bendsøe, M.P., Sigmund, O.: Material Interpolation Schemes in Topology Optimization, Arch. Appl. Mech. 69, 635–654, 1999
- [31] Scurtu, L., Bodea, I., Jurco, S.M., Nadia, A.: Design optimization method used in mechanical engineering, Journal of Industrial Design and Engineering Graphics (JIDEG), vol.11, nr.2, 2016
- [32] Sigmund, O., Maute, K.: Topology optimization approaches: a comparative review, Struct. Multidiscip. Optim. 48, 1031–1055, 2013
- [33] Scurtu, L., Bodi, S., Dragomir, M.: Optimization Method Applied in CAD Based Furniture Design, Acta Technica Napocensis Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering Vol. 58, Issue IV, November, 2015
- [34] Bendsøe, M.P., Sigmund, O.: Topology Optimization - Theory, Methods and Applications, Springer, Berlin, 2003
- [35] Sivapuram, R., Dunning, P.D., Kim, H.A.: Simultaneous material and structural optimization by multiscale topology optimization, Struct. Multidisc. Optim. 54, 1267–1281, 2016
- [36] Magan, C.: Topology optimization of a concrete floor slab guided by vacuumatic formwork constraints, Master Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 2016
- [37] Rodrigues, H., Guedes, J.M., Bendsøe, M.P.: Hierarchical optimization of material and structure, Struct Multidisc. Optim. 24, 1–10, 2002
- [38] Huang, X., Xie, M.: Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures, John Wiley & Sons, 2010
- [39] Rosen, D.W.: Computer-aided design for additive manufacturing of cellular structures, Comp.-Aided Des. Appl. 4, 585–594, 2007
- [40] Murr, L., Gaytan, S., Medina, F., Lopez, H., Martinez, E., Machado, B., Hernandez, D., Martinez, L., Lopez, M., Wicker, R.: Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays, Philos. T. R. Soc. S-A 368, 1999–2032, 2010
- [41] Shapiro, A., Borgonia, J., Chen, Q., Dillon, R., McEnerney, B., Polit-Casillas, R., Soloway, L.: Additive manufacturing for aerospace flight applications, J. Space Rockets, 952–959, 2016
- [42] Arabnejad, S., Johnston, B., Tanzer, M., Pasini, D.: Fully porous 3D printed titanium femoral stem to reduce stress-shielding following total hip arthroplasty, J. Orthop. Res. 35, 1774–1783, 2016
- [43] Plocher, J., Panesar, A.: Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures, Mater. Design 183, 108164, 2019
- [44] Sigmund, O.: A 99 line topology optimization code written in Matlab, Struct. Multidiscip. Optim. 21, 120–127, 2001
- [45] ANSYS 2019 R2, Mechanical User's Guide, ANSYS Inc., Canonsburg, USA, 2019f
- [46] ANSYS 2019 R2, SpaceClaim Direct Modeler User's Guide, ANSYS Inc., Canonsburg, USA, 2019g
- [47] ANSYS 2019 R2, Material Designer User's Guide, ANSYS Inc., Canonsburg, USA, 2019h
- [48] **Vlădulescu, F.**, Constantinescu, D.M.: Lattice structure optimization and homogenization through finite element analyses, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 234 (12): 1490-1502, 2020
- [49] **Vlădulescu, F.**: Lattice optimization of structural components using numerical simulations, Mechanical Testing and Diagnosis, ISSN 2247-9635, 2020 (X), 1:5-9, 2020

- [50] Jansen, M., Pierard, O.: A hybrid density/level set formulation for topology optimization of functionally graded lattice structures, *Comput. Struct.* 231, 106205, 2020
- [51] **Vlădulescu, F.**, Constantinescu, D.M.: Lattice topology homogenization and crack propagation through finite element analyses. *Procedia Structural Integrity*, 28: 637-647, 2020
- [52] Zasedatel, V.S.: Technologies of 3D-printing in the educational process of the university, *Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference*, 2015
- [53] Leibov, A.M., Kamenev, R.V., Osokina, O.M.: Application of 3D-prototyping technologies in the educational process, *Modern problems of science and education*, 2014
- [54] Dong, G., Wijaya, G., Tang, Y., Zhao, Y.F.: Optimizing process parameters of fused deposition modeling by Taguchi method for the fabrication of lattice structures, *Addit Manuf*, 19: 62–72, 2018
- [55] **Vlădulescu, F.**, Constantinescu, D.M.: Tower structure optimization through finite element analyses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 997(1), 012108, 2020
- [56] **Vlădulescu, F.**: Design optimization of a civil structure using numerical simulations, *Mechanical Testing and Diagnosis*, ISSN 2247-9635, 2020 (X), 2: 5-13, 2020
- [57] **Vlădulescu, F.**: Design and additive manufacturing process simulation of a bracket using finite element method, 1st Winter School on Trends on Additive Manufacturing for Engineering Applications (online), oral presentation, *Universitatea Politehnica Timișoara*, 2021
- [58] ANSYS Workbench Additive Manufacturing Analysis User's Guide R2, ANSYS Inc., Canonsburg, USA, 2019i