DEZVOLTAREA UNUI ALGORITM DE OPTIMIZARE TOPOLOGICĂ

Ing. **Alexandru CHERDIVAR** [1]

[1] Universitatea „Transilvania” din Brașov, Brașov, România

REZUMAT. Lucrarea descrie dezvoltarea unui algoritm de optimizare structurală, bazat pe eliminarea materialului din zonele cu tensiuni reduse și ranforsarea celor solicitate intens, similar metodei BESO. Rezultatele obținute sunt comparabile cu soluțiile din literatura de specialitate și cu cele returnate de OptiStruct, demonstrând performanță structurală ridicată. Studiul detaliază mecanisme de control pentru presiunea de filtrare și rezoluția discretizării, contribuind la o implementare simplificată și eficientă, reducând dependența de intervenția umană.

Cuvinte cheie: optimizare structurală, optimizare topologică, BESO.

ABSTRACT The paper describes the development of a structural optimization algorithm based on removing material from low-stress regions and reinforcing highly stressed areas, similar to the BESO method. The obtained results are comparable to those found in the literature and those returned by OptiStruct, demonstrating high structural performance. The study details control mechanisms for filter pressure and discretization resolution, contributing to a simplified and efficient implementation that reduces dependence on human intervention.

Keywords: Structural optimization, Topology optimization, BESO.

1. INTRODUCERE

În proiectarea structurală inginerul are responsabilitatea fundamentală de a propune o soluție corectă de dimensionare. Performanța structurală influențează direct randamentul și eficiența sistemelor mecanice moderne, contribuind la îndeplinirea funcției tehnice și la impactul asupra mediului. Rațiunile economice impun o utilizare cât mai eficientă a materialelor pentru a reduce costurile și a spori competitivitatea. Procesul de proiectare structurală integrează tot mai frecvent analize avansate de optimizare structurală, care vizează identificarea celor mai eficiente configurații structurale.

Metodele tradiționale de proiectare se bazează pe experiența și intuiția proiectantului, dar nu garantează cea mai eficientă soluție din punct de vedere al masei. Optimizarea topologică este un proces aferent stadiului de concepție, care returnează cea mai eficientă geometrie a piesei, reprezentând o hartă tridimensională a distribuției optime a materialului în contextul problemei definite. Importanța optimizării structurale crește din cauza accesului limitat la materii prime, impactului asupra mediului și a competiției tehnologice, care necesită structuri ușoare, de înaltă performanță și cu cost redus de manufacturare.

Motivul alegerii temei este conștientizarea existenței unor instrumente care permit stabilirea unei geometrii optime, lăsând procesul de proiectare în seama stabilirii corecte a solicitărilor și realizării geometriei în format CAD. Cu toate acestea, soluțiile comerciale existente prezintă numeroși algoritmi și pași intermediari care introduc subiectivitate în proces, iar soluțiile discretizate necesită încă implicarea unui inginer proiectant pentru tranziția în domeniul CAD. Deși optimizarea topologică este cercetată activ încă din anii 1960, există încă nevoie de îmbunătățiri ale algoritmilor și ale fluxului de lucru.

Obiectivele studiului au inclus:

- dezvoltarea unui algoritm de optimizare topologică utilizând instrumente de programare ușor disponibile, pe baza conceptului spațiului de proiectare prediscretizat.
- validarea algoritmului prin rezolvarea unor probleme 2D sau 3D prin comparație cu soluții comerciale și probleme acceptate în literatura de specialitate (benchmark-uri);
- studiul influenței parametrilor de rulare și stabilirea mecanismelor relevante de control al algoritmului.

2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIU

Primele studii privind utilizarea eficientă a materialului structural datează din 1904, cu lucrarea lui Michell [1] despre criteriile de optimalitate pentru structuri din zăbrele cu masă minimă.

Rozvany și Prager au formulat ulterior, în 1976-1977, teoria generală a optimizării topologice, aplicabilă structurilor continue [2].

În anii 1990, optimizarea de formă a atins un nivel matur, dar a eșuat în rezolvarea problemei scăderii calității modelului discretizat în urma modificărilor de formă, ceea ce poate duce la rezultate eronate. Interesul s-a mutat către metode alternative de determinare a celei mai bune configurații de distribuție a materialului. În 1988, Bendsøe și Kikuchi au publicat prima lucrare despre optimizarea topologică a structurilor continue, introducând abordarea prin metoda omogenizării pentru a obține rigiditatea maximă cu o greutate prescrisă [3]. În 1992, Rozvany și colegii au publicat o implementare cheie a metodei SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) [4], propusă inițial de Bendsøe în 1989 [5]. SIMP s-a dovedit a fi mai precisă decât metoda omogenizării și este astăzi cea mai aplicată metodă de optimizare topologică bazată pe densitate de element [6]. Aceasta atribuie elementelor o densitate între 0 și 1, aplicând o penalizare pentru a favoriza soluții cu distribuții de material clar delimitate.

În 1993, Xie și Steven au introdus ESO (Evolutionary Structural Optimization) [7], o abordare evoluționară care elimină treptat materialul cu portanță redusă. Ulterior, a fost publicată BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) [8], care permite algoritmului nu doar să elimine material, ci și să mărească secțiunea în zone cu tensiune prea mare, reducând riscul convergenței către o soluție locală.

Metoda funcției de nivel (Level Set Method, LSM) a fost adaptată la optimizarea structurală [9], [10], oferind o reprezentare continuă a frontierei solid-gol a soluției [11], spre deosebire de metodele bazate pe pixeli/voxeli. Totuși, soluțiile LSM pot necesita etape ulterioare de reconstrucție CAD.

VARTOP (Variational Topology Optimization), introdusă în 2019, se bazează pe reprezentarea implicită a domeniului printr-o funcție de nivel și returnează soluții cu frontiere clare, având costuri computaționale reduse [11] [12].

3. Metodologie

Investigația propusă se bazează pe un principiu simplu: adăugarea sau eliminarea de material în funcție de distribuția tensiunilor rezultate în urma analizei structurale. Acest principiu este cel al metodei BESO. Procesul de cercetare a fost orientat către implementarea unui flux de lucru automatizat, unde analiza structurală și modificarea topologiei se succed iterativ.

Etapele de cercetare au inclus:

- alegerea unei probleme de referință clasice: grinda încastrată și încărcată la capătul liber.
- utilizarea unui spațiu de proiectare prediscretizat pentru a concentra efortul pe modificarea topologiei.
- alegerea criteriului tensiunii echivalente Von Mises pentru filtrarea elementelor între iterații.
- dezvoltarea de cod Python pentru importul, exportul și citirea rezultatelor din OptiStruct, precum și pentru modificarea topologiei.
- monitorizarea și analiza evoluției algoritmului folosind instrumente OptiStruct și proprii.
- Compararea rezultatelor cu soluții OptiStruct și din literatura de specialitate.

Preprocesarea modelului a fost realizată cu Altair HyperMesh, iar proprietățile materialului au fost cele ale oțelului generic.

Provocări și Mecanisme de Control:

Implementarea euristică a eliminării materialului cu tensiuni scăzute este facilă, dar are un caracter empiric, necesitând calibrarea manuală a parametrilor. Obiectivul major al lucrării a fost reducerea dependenței algoritmului de intervenția utilizatorului. Eforturile s-au concentrat pe:

- Dezvoltarea unui mecanism adaptabil de modificare a presiunii de filtrare (stabilirea pragului de eliminare). O primă variantă a fost diferența dintre media și abaterea standard a tensiunilor din iterația curentă(FAS – filtrare pe baza abaterii standard). Deși eficientă, această metodă poate genera praguri negative din cauza distribuțiilor negaussiene ale tensiunilor.. O altă variantă eficientă a fost tensiunea aferentă unui anumit punct percentil (ex: 2.5%, 10%) (FPP – filtrare pe baza punctului percentil).

- Conservarea continuității structurale și prevenirea colapsului prin reluarea iterației precedente cu presiune redusă de filtrare la detectarea colapsului, asociat cu valori nule ale tensiunilor în cazul OptiStruct.

- Controlul situațiilor cu modificări mari în topologie care duc la creșteri mari de tensiuni, prin monitorizarea variațiilor bruște ale abaterii standard și intervenție adaptivă.

- Ranforsarea zonelor de înaltă tensiune se face pentru elementele care depășesc tensiunea maximă admisibilă. Aceasta contribuie la rafinarea soluției și la îndeplinirea criteriului de verificare structurală.

4. REZULTATE

Validarea algoritmului a fost realizată pe probleme de referință 2D și 3D din literatură (Valdez et

al. [13], Yago et al. [11]), precum și prin comparație cu OptiStruct.

Grinda cu consolă în spațiu bidimensional

S-a utilizat o grindă de 2000 mm lungime și 1000 mm înălțime, discretizată cu 160x80 elemente, încărcată în centrul capătului liber.

Fig. 4.1. Spațiul de proiectare pentru grinda cu consolă, 2D.

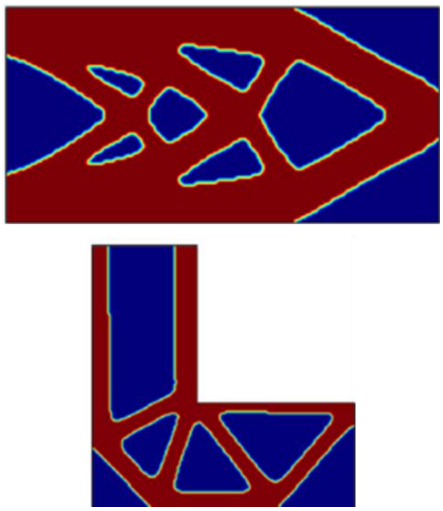

Fig. 4.2. Soluții pentru problemele 2D, după Valdez [13].

Fig. 4.3. Rezultatele returnate pentru grinda cu consolă 2D (sus - FPP, jos - FAS)

FAS, a produs o reducere de masă de 69% și o tensiune maximă de 79.9 MPa, cu o deplasare maximă de 1.14 mm, fiind comparabil cu OptiStruct (72% reducere masă, 79.9 MPa tensiune max, 1.65 mm deplasare max) și având o rigiditate mai mare (deplasare mai mică). Filtrarea cu percentila 10% a dus la o reducere de masă de 49%. Creșterea calității soluțiilor este asociată cu valori în general mai reduse ale pragurilor rezultate după FAS, dar și cu creșterea costurilor computaționale.

Structură în formă de L în spațiu bidimensional

Modelul a avut dimensiuni de 1000x1000 mm, cu o secțiune decupată și încărcat în colțus de sus al capătului liber.

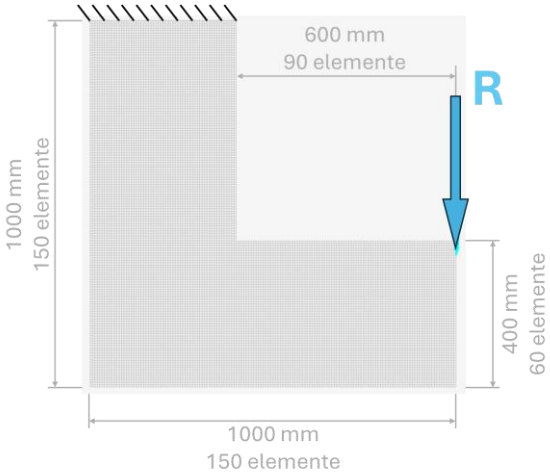

Fig. 4.4. Problema de proiectare pentru structura în forma de „L”, 2D.

Ambele metode de filtrare (FPP 10% și FAS) au returnat soluții cu reduceri de masă de aproximativ 60% și tensiuni maxime aproape de 80 MPa, cu deplasări maxime comparabile (0.77 mm și 0.73 mm). OptiStruct a demonstrat o reducere de masă mai mare (78%). prin reducerea efectelor locale ale concentratorilor de tensiune, evidențiind avantajul implementărilor SIMP față de abordarea euristică.

Fig. 4.5. Structură în formă de „L”, 2D (stânga - FPP, dreapta - FAS.)

Grindă cu consolă în spațiu tridimensional

Problema a fost modelată ținând cont de simetrie și discretizare grosieră din cauza costurilor mari computaționale asociate discretizării din lucrarea de referință [11].

Filtrarea cu punctul percentil 10 (FPP 10%) a dus la 94% reducere de masă în 23 minute, cu tensiune

maximă de 79.3 MPa, în timp ce filtrarea cu abaterea standard a obținut 93% reducere de masă în 11.6 minute, cu tensiune maximă de 72.3 MPa. Soluțiile sunt calitativ comparabile cu cele din literatura de specialitate.

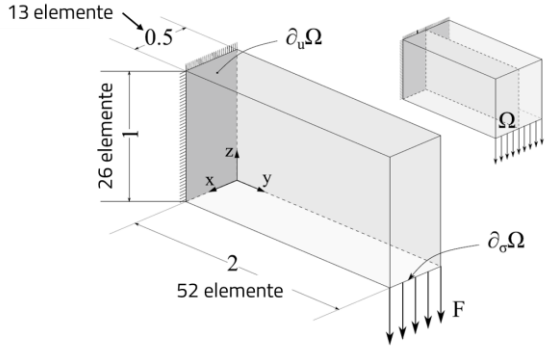

Fig. 4.6. Problema grinzii cu consolă, 3D. Adaptat după Yago [11].

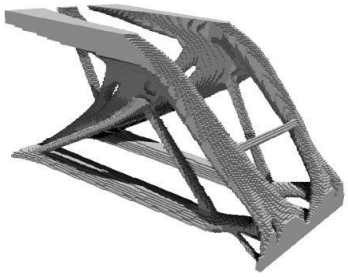

Fig. 4.7. Soluție pentru problema grinzii cu consolă, 3D, după Yago [11].

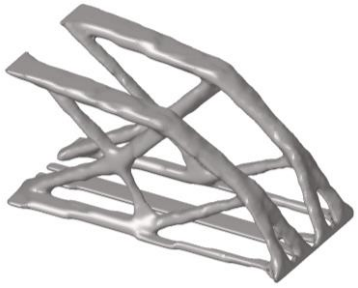

Fig. 4.8. Soluția problemei grinzii cu consolă, 3D, returnată de FPP 10%.

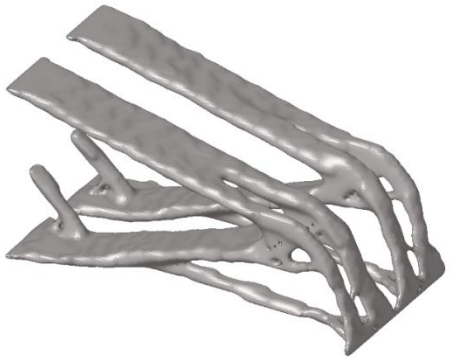

Fig. 4.9. Soluția problemei grinzii cu consolă, 3D, returnată de FAS.

Structura în formă de L în spațiu tridimensional

Problema a fost modelat într-un mode similar celei precedente.

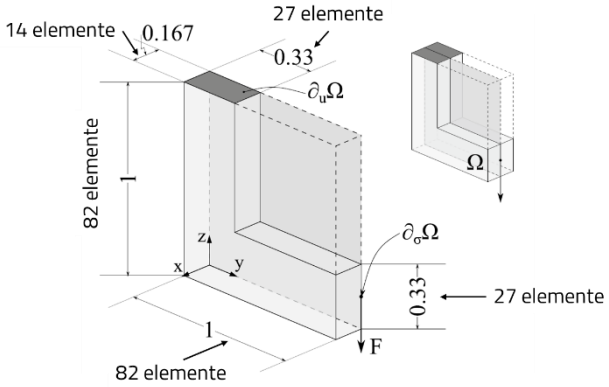

Fig. 4.10. Problema structurii în formă de „L”, 3D. Adaptat după Yago [11].

FAS a returnat o structură mai ușoară (94% reducere de masă) în 20.7 minute, în timp ce FPP 15% a obținut 92% reducere de masă în 7.7 minute.

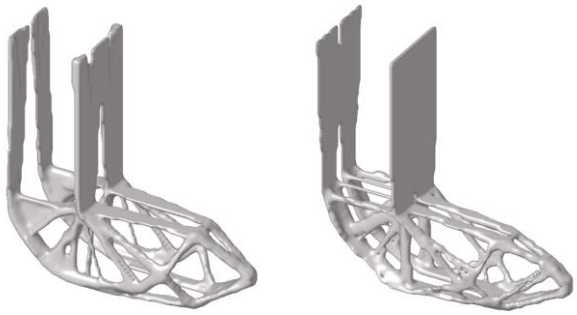

Fig. 4.11. Soluția returnată pentru problema structurii în formă de „L”; stânga - FPP15%, dreapta - FAS.

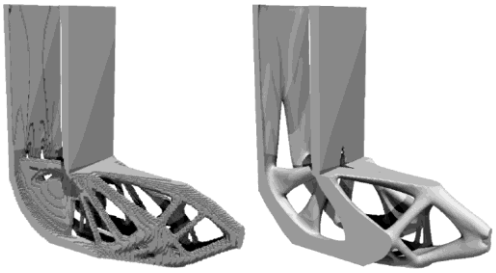

Fig. 4.12. Soluții pentru problema structurii în formă de „L”, după Yago [11].

5. CONCLUZII

Algoritmul dezvoltat are ca obiectiv principal optimizarea topologică a structurilor printr-o metodă euristică inspirată din metoda BESO, eliminând materialul din zone cu grad redus de solicitare și ranforsând cele cu portanță mai mare a tensiunii. Acesta utilizează tensiunea Von Mises ca unic criteriu și integrează solverul OptiStruct pentru analiză. A fost validat pe două cazuri clasice, ambele

spațiu bidimensional și tridimensional, demonstrând capacitatea sa în obținerea unor structuri mai eficiente structural, dar capabile să suporte solicitările aplicate.

Un factor esențial în controlul comportamentului algoritmului este pragul de eliminare, care determină stabilitatea și performanța soluției. S-au testat două metode de filtrare: filtrarea pe baza abaterii standard și filtrare pe baza punctului percentil. Deși ambele metode au returnat soluții performante, cea de-a doua este considerata mai stabilă.

Pentru creșterea autonomiei, au fost dezvoltate mecanisme suplimentare pentru ranforsarea automată, oprirea condiționată, păstrarea caracteristicilor topologice esențiale și controlul presiunii de filtrare. Acestea au contribuit la evitarea blocajelor și a degradării soluției. În același timp, s-a observat că rezoluția discretizării și presiunea de filtrare influențează direct acuratețea, costul computațional și continuitatea structurală, necesitând o balansare atentă.

Analiza performanței a evidențiat o tendință a soluțiilor optime de a avea tensiuni mai ridicate și o deviere standard mai mare, aspect contraintuitiv ce necesită investigații suplimentare. De asemenea, analiza istoricului de rulare în unele cazuri sugerează că ranforsarea fără depășirea tensiunii maxime admisibile poate da un caracter explorator algoritmului și astfel, returna o soluție mai fidelă, fenomen de investigat în continuare.

Contribuția autorului constă în simplificarea metodei BESO prin eliminarea calculului de sensibilitate, validarea algoritmului pe probleme relevante și identificarea unor parametri și mecanisme cheie pentru controlul și îmbunătățirea performanței. Lucrarea trasează câteva direcții pentru cercetări viitoare, cum ar fi rafinarea controlului presiunii de filtrare, extinderea algoritmului pentru încărcări multiple și medii mai complexe, precum și explorarea altor criterii de retenție a elementelor, cu scopul de a crește robustețea și aplicabilitatea practică a metodei.

BIBILOGRAFIE

[1] Michell, A. G. M., *LVIII. The limits of economy of material in frame-structures*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science., **Numărul 47**, 1904.

[2] Rozvany, G. I. N., *A critical review of established methods of structural topology optimization*, Structural and Multidisciplinary Optimization., **Numărul 3**, 2008.

[3] Bendsøe, M. P., Kikuchi, N., *Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering., **Numărul 2**, 1988.

[4] Rozvany, G. I. N., Zhou, M., Birker, T., *Generalized shape optimization without homogenization*, Structural Optimization., **Numărul 3–4**, 1992.

[5] Bendsøe, M. P., *Optimal shape design as a material distribution problem*, Structural Optimization., **Numărul 4**, 1989.

[6] Tang, T., Wang, L., Zhu, M., Zhang, H., Dong, J., Yue, W., Xia, H., *Topology Optimization: A Review for Structural Designs Under Statics Problems*, Materials., **Numărul 23**, 2024.

[7] Xie, Y. M., Steven, G. P., *A simple evolutionary procedure for structural optimization*, Computers & Structures., Numărul 5, 1993.

[8] Querin, O. M., Steven, G. P., Xie, Y. M., *Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm*, Engineering Computations., **Numărul 8**, 1998.

[9] Hurtado-Pérez, A. B., Pablo-Sotelo, A. J., Ramírez-López, F. H. G., Jorge J., Mata-Rivera, M. F., *On Topology Optimisation Methods and Additive Manufacture for Satellite Structures: A Review*, Aerospace., **Numărul 12**, , 2023.

[10] Sethian, J. A., Wiegmann, A., *Structural Boundary Design via Level Set and Immersed Interface Methods*, Journal of Computational Physics., **Numărul 2**, 2000.

[11] Yago, D., Cante, J., Lloberas-Valls, O., Oliver, J., *Topology Optimization Methods for 3D Structural Problems: A Comparative Study*, Archives of Computational Methods in Engineering., **Numărul 3**, 2021.

[12] Oliver, J., Yago, D., Cante, J., Lloberas-Valls, O., *Variational approach to relaxed topological optimization: Closed form solutions for structural problems in a sequential pseudo-time framework*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019.

[13] Valdez, S. I. ,Botello, S. Ochoa, Miguel A., Marroquín, J. L., Cardoso, V., *Topology Optimization Benchmarks in 2D: Results for Minimum Compliance and Minimum Volume in Planar Stress Problems*, Archives of Computational Methods in Engineering., **Numărul 4**, , 2016.

Despre autor

Ing. **Alexandru CHERDIVAR**
Universitatea „Transilvania” din Brașov, Brașov, România

Absolvent al Facultății de Inginerie Mecanică, cu un master în Simulare și Testare în Ingineria Mecanică în cadrul aceleași facultăți. Subiectul optimizării a fost atins în cursul programului de licență, provocând interes în domeniu. În cursul programului de master a participat la conferința Proceedings of 21st Internațional Conference Applied Computing(AC2024), cu lucrarea „Parametric Structural Optimization Using Genetic Algorithms”. Prezenta lucrare reprezintă o introducere în optimizarea neparametrică și topologică.