TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU KULLANILARAK FDM TİPİ 3 BOYUTLU SCARA KOLU YAZICININ TASARLANMASI

DESIGN OF AN FDM-TYPE 3D SCARA ARM PRINTER USING TOPOLOGY OPTIMIZATION

Makina Mühendisi, Güray GÜNAY1 / Prof. Dr., Naci ZAFER2

1Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Makine Teorisi ve Dinamiği, guray.94gunay@gmail.com, 0000-0001-7927-9128

2Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Makine Teorisi ve Dinamiği, nzafer@ogu.edu.tr, 0000-0001-5026-9102

Özet

Endüstriyel üretim süreçlerinde hız ve hassasiyetin ön plana çıkması, robotik sistemlerin üç boyutlu yazıcı teknolojileriyle entegrasyonunu giderek daha cazip kılmaktadır. Bu çalışmada, FDM (Fused Deposition Modeling) tipi bir üç boyutlu yazıcı için SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) kol mekanik sistemi tasarlanmış ve kritik yapısal bileşenler üzerinde topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. SCARA mimarisi; düşük atalet momenti, yüksek yatay hareket hızı ve mekanik sadeliği nedeniyle geleneksel kartezyen sistemlere kıyasla tercih edilmiştir. Tasarım süreci Siemens NX ortamında gerçekleştirilmiş, yapısal analizler ANSYS R1 2019 yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle yürütülmüştür. Topoloji optimizasyonu, PLA malzeme özellikleri ve belirlenen yük koşulları altında kol 1 ve kol 2 bileşenlerinde başlangıç kütlesinin %30 oranında azaltılması hedefiyle uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, optimize edilen geometrilerin yapısal bütünlükten ödün vermeksizin sistem ataletini ve malzeme kullanımını önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır. Sonuçlar, topoloji optimizasyonunun FDM tabanlı robotik baskı sistemlerinde enerji verimliliği ve sürdürülebilir tasarım açısından etkin bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: SCARA Robot, Topoloji Optimizasyonu, FDM, Eklemeli İmalat, Sonlu Elemanlar Analizi

Abstract

Recent developments in additive manufacturing have accelerated research on adapting robotic kinematic architectures to 3D printer design. In this study, a SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) mechanical system was designed for an FDM (Fused Deposition Modeling) type 3D printer using Siemens NX software, and SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization)-based topology optimization was applied to arm 1 and arm 2 components in ANSYS R1 2019. The SCARA architecture was selected over conventional Cartesian systems due to its low moment of inertia, high horizontal movement speed, and compact structure. Topology optimization was carried out under PLA material properties and defined static load conditions, targeting a 30% reduction in initial component mass. Results demonstrate that the optimized geometries significantly reduce system inertia and material consumption without compromising structural integrity. This study shows that topology optimization is an effective tool for lightweight and sustainable design in FDM-based robotic printing systems.

Keywords: SCARA Robot, Topology Optimization, FDM, Additive Manufacturing, Finite Element Analysis

1. GİRİŞ

Son yıllarda eklemeli imalat, yalnızca hızlı prototipleme aracı olmanın ötesine geçerek fonksiyonel parça üretiminde de ciddi bir yer edinmiştir. Geleneksel talaşlı imalatta geometrik karmaşıklık doğrudan maliyet ve süre anlamına gelirken eklemeli imalatta bu ilişki büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır. FDM (Fused Deposition Modeling), bu alandaki en erişilebilir yöntem olmayı korumaktadır. Düşük donanım maliyeti ve geniş malzeme seçeneği, FDM'yi hem üniversite laboratuvarlarında hem de küçük ölçekli endüstriyel uygulamalarda ilk tercih haline getirmektedir.

Klasik kartezyen FDM yazıcılarda baskı kafası, X ve Y eksenlerinde bağımsız kılavuz rayları boyunca hareket eder. Bu yapı pratik olmakla birlikte önemli bir dinamik yük getirir: hareketli kütle büyüdükçe atalet momenti artar, sistem yüksek hızda titreşmeye ve baskı kalitesi düşmeye başlar. Bu sınırlılığın giderilmesi amacıyla robotik uygulamalarda yaygın kullanılan SCARA mimarisinin yazıcıya uyarlanması değerlendirilmiştir. SCARA'nın döner eklem temelli yapısı, yatay düzlemdeki hareketli kütleyi önemli ölçüde azaltmakta ve atalet momentini düşürmektedir (Siciliano vd., 2016).

Kol bileşenlerini hafifletmek için sezgisel yöntemlerle malzeme kaldırmak yerine bu çalışmada topoloji optimizasyonuna başvurulmuştur. Topoloji optimizasyonu, verilen yük koşulları altında bir tasarım uzayında malzemenin nereye konulup nereye konulmayacağına matematiksel olarak karar verir. Bendsøe ve Sigmund (2004) tarafından kapsamlı biçimde aktarılan SIMP yöntemi bu çalışmada kullanılan yaklaşımın temelini oluşturmaktadır. FDM ile birleştirildiğinde topoloji optimizasyonunun ürettiği organik geometriler, geleneksel imalatın kısıtladığı formları fiziksel gerçekliğe dönüştürebilmektedir.

Bu çalışmada, bahsedilen iki yaklaşım bir araya getirilmiştir: Siemens NX ile tasarlanan SCARA kolu FDM yazıcı sistemi ve ANSYS R1 2019 ortamında uygulanan SIMP tabanlı topoloji optimizasyonu. Kol bileşenlerinde %30 kütle azaltımı hedeflenmiş; genişlik ve kalınlık boyutları mekanik gereksinimler nedeniyle sabit tutulmuştur. İzleyen bölümlerde sistem tasarımı, analiz süreci ve elde edilen sonuçlar aktarılmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Topoloji optimizasyonu için literatürde pek çok farklı yöntem önerilmiştir. Fanni vd. (2013) MMA, SQP, OC ve HCA yöntemlerini karşılaştırmış; OC yönteminin küçük problemlerde hızlı çözüme ulaştığını, büyük ve karmaşık geometrilerde ise MMA'nın daha güvenilir davrandığını göstermiştir. Bu sonuçlar, ticari FEA yazılımlarında SIMP tabanlı çözücülerin neden yaygınlaştığını açıklamaktadır.

Larsson vd. (2022) ise kütle minimizasyonunu statik ve harmonik yükler altında ele alarak ilginç bir tespitte bulunmuştur: statik uyum kısıtı, dinamik kısıtlara kıyasla topoloji kararlarını çok daha güçlü biçimde yönlendirmektedir. Bu çalışmanın statik yük senaryosu üzerine kurulu olması bu tespit açısından değerlendirildiğinde metodoloji tutarlı görünmektedir.

Robot bileşenlerinde topoloji optimizasyonunun uygulandığı iki çalışma bu araştırma için özellikle yönlendirici olmuştur. Oliveri vd. (2011), Tribot mobil robotunun şasisini SKO yöntemiyle optimize ederek %25 ağırlık azaltımı ve %20 stabilite artışı elde etmiştir. Sha vd. (2020) ise sınır koşullarının hatalı tanımlanmasının optimizasyon sonuçlarını sistematik olarak saptırabileceğini göstermiştir. Montaj modeli tabanlı FEA ile gerçek sınır koşulları kullanıldığında geleneksel yaklaşıma göre %10,4 daha fazla kütle kazanımı elde edildiği bildirilmiştir. Bu çalışmada motor bağlantı yüzeylerinin sabit mesnet olarak tanımlanması doğrudan bu bulgudaki ilkeye dayanmaktadır.

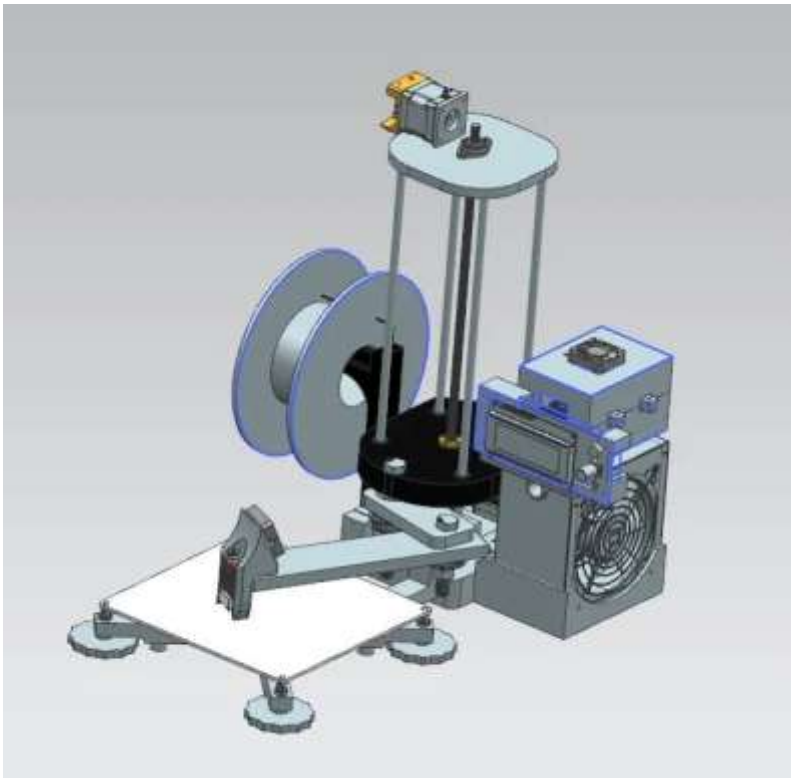
Yöntem seçimi açısından Sigmund ve Maute (2013) farklı topoloji optimizasyonu yaklaşımlarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmiş; her yöntemin farklı problem sınıflarında öne çıktığını göstermiştir. Liu ve Ma (2016) ile Zhu vd. (2016) ise eklemeli imalatla topoloji optimizasyonunun birleşiminin avantajına dikkat çekmiştir: FDM, organik geometrileri üretmede geleneksel imalata kıyasla çok daha elverişlidir.

Yapılan taramada SCARA mimarisini FDM yazıcı tasarımıyla ve topoloji optimizasyonuyla birlikte ele alan kapsamlı bir çalışmanın mevcut literatürde yer almadığı görülmektedir. Bu çalışma söz konusu kesişim noktasını doğrudan hedef almaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Sistem Tasarımı

Sistem dört temel alt birimden oluşmaktadır: dikey hareket mekanizması, yatay SCARA kol düzeneği, baskı kafası ve tahrik-kontrol altyapısı. Tüm bileşenler Siemens NX ortamında modellenmiş ve montaj düzeyinde birleştirilmiştir. Şekil 1'de sistemin genel görünümü verilmektedir.



Şekil 1. SCARA Kolu FDM Yazıcı — Siemens NX Montaj Görünümü

Dikey eksen trapez mil ve dört lineer mil düzeneğiyle sağlanmıştır. Yatay düzlemdeki iki boyutlu konumlandırma SCARA kollarıyla gerçekleştirilmekte olup bu yapı hareketli kütleyi ve atalet momentini kartezyen alternatiflere göre belirgin biçimde azaltmaktadır. Tahrik için NEMA 17 step motorlar, kontrol için Arduino Mega 2560 tercih edilmiştir.

Kol 1, PLA malzemeden ve belirlenmiş boyutlarda tasarlanmıştır. Motor flanşı ve rulman oturma yüzeyleri mekanik uyum açısından sabit tutulması gereken bölgeler olduğundan tasarım dışı uzay olarak tanımlanmıştır. Kol 2 daha uzun bir geometriye sahiptir; bununla birlikte en kesit boyutları kol 1 ile aynıdır.

3.2. Malzeme Özellikleri

Analizlerde PLA (Polylactic Acid) malzeme modeli kullanılmıştır. FDM ile üretilebilirlik, geniş literatür tabanı ve iyi tanımlanmış mekanik özelliklerin bir arada bulunması PLA'yı bu çalışmada uygun bir malzeme seçimi haline getirmiştir. FDM ile üretilen PLA bileşenlerin mekanik özellikleri Ahn vd. (2002) tarafından kapsamlı biçimde incelenmiştir. Kullanılan malzeme parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Özellik	Değer	Birim
Elastisite Modülü (E)	3500	MPa
Poisson Oranı (ν)	0,36	—
Çekme Dayanımı (σt)	65	MPa
Akma Dayanımı (σy)	55	MPa
Yoğunluk (ρ)	1240	kg/m³

Tablo 1. PLA malzeme özellikleri.

3.3. Sonlu Elemanlar Analizi

Yapısal analizler ANSYS R1 2019 Mechanical modülünde yürütülmüştür. Siemens NX'ten STEP formatında aktarılan model, 1 mm global eleman boyutu ve tetrahedron eleman türüyle ayrıklaştırılmıştır. Motor bağlantı yüzeyleri sabit mesnet olarak tanımlanmış; kol ucuna statik kuvvet ve moment yükleri uygulanmıştır. Güvenlik katsayısı 2,0 alınmıştır. Sınır koşullarının doğruluğunun optimizasyon sonuçlarını doğrudan etkilediği Sha vd. (2020) tarafından gösterildiğinden bu tanım özenle yapılmıştır.

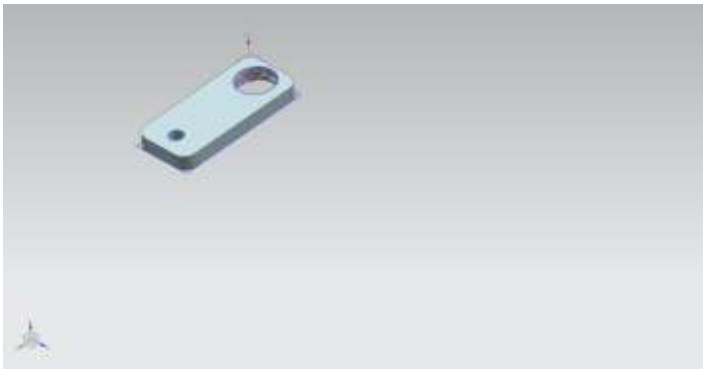
3.4. Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu ANSYS Mechanical'ın SIMP modülüyle (Bendsøe ve Sigmund, 2004) yürütülmüştür. Hedef yapısal uyum (compliance) minimizasyonudur; başka bir deyişle mevcut malzeme miktarıyla en yüksek rijitliği elde etmek. Hacim fraksiyonu kısıtı %70 olarak belirlenmiş, yani başlangıç kütlesinin %30'una kadar malzeme kaldırılabilmektedir. Motor flanşları, cıvata delikleri ve rulman yüzeyleri tasarım dışı uzay olarak belirlenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Optimizasyon Öncesi Geometri

Optimizasyon öncesinde Kol 1'in kütlesi Siemens NX Mass Properties modülü aracılığıyla hesaplanmıştır. Malzeme yoğunluğu 1240 kg/m³ alınan PLA için elde edilen değer, optimizasyon sonuçlarıyla karşılaştırmanın referans noktasını oluşturmaktadır. Başlangıç geometrisi Şekil 2'de görülmektedir.

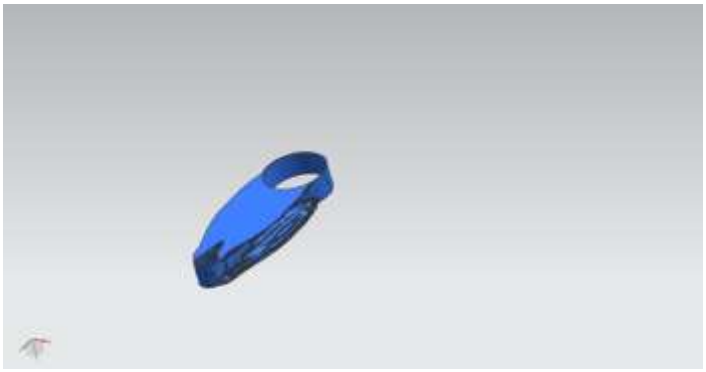


Şekil 2. Kol 1 — Topoloji Optimizasyonu Öncesi Geometri

4.2. Optimizasyon Sonrası Geometri

Optimizasyon tamamlandığında Kol 1 geometrisinde belirgin bir geometrik dönüşüm gözlemlenmiştir. Uzunluk başlangıç değerinden hedef değere gerilerken genişlik ve kalınlık boyutları, flanş ve rulman yüzeyleri nedeniyle değişmemiştir. Algoritmanın ürettiği geometri incelendiğinde yük taşıma yolları boyunca malzemenin

korunduğu, düşük gerilme bölgelerinin boşaltıldığı görülmektedir. Optimizasyon sonrası görünüm Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Kol 1 — Topoloji Optimizasyonu Sonrası Geometri

4.3. Sayısal Sonuçlar

Topoloji optimizasyonundan elde edilen sayısal bulgular Tablo 2'de özetlenmektedir.

Bileşen	Boyutlar (mm)	Kütle (g)	Değişim	GK
Kol 1 — Öncesi	115 × 50 × 12	70,6	—	2,0
Kol 1 — Sonrası	86,5 × 50 × 12	49,4 (a)	↓ %30	≥2,0
Kol 2 — Öncesi	240 × 50 × 12	178,6 (b)	—	2,0
Kol 2 — Sonrası	—	125,0 (a)	↓ %30	≥2,0

Tablo 2. Topoloji optimizasyonu sonuçları. GK: Güvenlik Katsayısı; (a) hedef değer; (b) tahmini değer.

Kol 1'de uzunluk yaklaşık %25, kütle hedef değeri ise %30 oranında azalmıştır. Bu fark, algoritmanın yalnızca kol boyunu kısaltmakla kalmadığını; kesit içinden de malzeme kaldırdığını göstermektedir. Kol 2 için benzer bir oran hedeflenmektedir. Her iki bileşende güvenlik katsayısı 2,0 tasarım eşiğinin korunması esas alınmıştır.

4.4. Sistem Performansına Etkisi

Kütle azaldıkça atalet momenti de düşmektedir. Bu, motorun aynı hareketi daha az enerji harcayarak yapabilmesi demektir. Pratikte baskı hızı artışına ve enerji tasarrufuna dönüşen bu kazanım, optimizasyonun yalnızca yapısal bir iyileştirme olmadığını; sistem verimliliğine doğrudan katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

4.5. Tartışma

Oliveri vd. (2011) robotik şasi optimizasyonunda %25 azaltım bildirmiştir. Hedeflenen %30 bu değerle karşılaştırıldığında ulaşılabilir görünmektedir. Sha vd. (2020)'nin sınır koşullarına ilişkin bulgularının bu çalışmada yöntem seçimini etkilediği yukarıda belirtilmişti; elde edilen geometrik sonuçlar bu yaklaşımın tutarlılığını desteklemektedir.

Bu çalışmanın en belirgin sınırlılığı yalnızca statik yük durumunun dikkate alınmış olmasıdır. Dinamik koşullarda atalet yükleri topolojiyi farklı biçimde etkileyebilir. Larsson vd. (2022) bu konuyu incelemiş ve statik kısıtın genellikle baskın çıktığını göstermiştir; bu nedenle mevcut sonuçlar güvenilir bir başlangıç noktası olarak değerlendirilebilir. Dinamik analiz ve üretim sonrası doğrulama ölçümleri ilerleyen çalışmalara bırakılmıştır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada FDM tipi bir 3B yazıcı için SCARA kolu mekanik sistemi Siemens NX ortamında tasarlanmış, kritik kol bileşenleri üzerinde ANSYS R1 2019 yazılımında SIMP tabanlı topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:

SCARA mimarisi, kartezyen düzenlemelere kıyasla düşük hareketli kütle ve atalet momenti avantajı sunmaktadır; bu durum yüksek baskı hızı ve daha iyi enerji verimliliği potansiyeli anlamına gelmektedir. Topoloji optimizasyonu, kol bileşenlerinde hedeflenen %30 kütle azaltımını; flanş, rulman yüzeyleri ve güvenlik katsayısı korunarak gerçekleştirmiştir. Bu sonuçlar, SIMP tabanlı topoloji optimizasyonunun FDM tabanlı robotik baskı sistemleri için uygulanabilir ve etkin bir tasarım aracı olduğunu ortaya koymaktadır.

Gelecek çalışmalar kapsamında optimize edilmiş geometrilerin FDM ile imal edilmesi ve boyutsal doğrulama ölçümlerinin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Dinamik yük koşullarının analiz çerçevesine dahil edilmesi ise mevcut çalışmanın önemli bir sınırlılığını giderecektir.**KAYNAKÇA**

Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. ve Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. Rapid Prototyping Journal, 8(4), 248-257.

Bendsøe, M. P. ve Sigmund, O. (2004). Topology optimization: Theory, methods and applications (2. baskı). Springer.

Demir, E. ve Yıldız, A. R. (2017). A comparative study of algorithms for thin wall structures under crashworthiness criterion. Thin-Walled Structures, 118, 169-177.

Fanni, M., Shabara, M. N. ve Alkalla, M. G. (2013). A comparison between different topology optimization methods. Engineering Journal, Aralık 2013.

Larsson, J., Wennhage, P. ve Göransson, P. (2022). Mass minimization with conflicting dynamic constraints by topology optimization using sequential integer programming. Finite Elements in Analysis and Design, 200, 103683.

Liu, J. ve Ma, Y. (2016). A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. Advances in Engineering Software, 100, 161-175.

Oliveri, S. M., Calì, M., Sequenzia, G. ve Fatuzzo, G. (2011). Structural and topological optimization in robot design. Proceedings of the IMProVe 2011 International Conference on Innovative Methods in Product Design. Venedik, İtalya.

Sha, L., Lin, A., Zhao, X. ve Kuang, S. (2020). A topology optimization method of robot lightweight design based on the finite element model of assembly. Science Progress, 103(3), 1-16.

Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L. ve Oriolo, G. (2016). Robotics: Modelling, planning and control. Springer.

Sigmund, O. ve Maute, K. (2013). Topology optimization approaches: A comparative review. Structural and Multidisciplinary Optimization, 48(6), 1031-1055.

Turner, B. N., Strong, R. ve Gold, S. A. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes. Rapid Prototyping Journal, 20(3), 192-204.

Zhu, J., Zhang, W. ve Xia, L. (2016). Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. Archives of Computational Methods in Engineering, 23(4), 595-622.