

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of the Effects of Topology Optimization Methods on Rotary Wing Unmanned Aerial Vehicle Design

Erdem GÜNEY^a, Gültekin UZUN^b

Submitted: 20.07.2024 Revised: 25.11.2024 Accepted:25.11.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR04

ABSTRACT

Lightweight structure designs using topology optimization attract attention in the aviation industry due to their mass properties. When the studies on this subject are examined, it is seen that the aim is to reduce the structure mass without changing the strength properties. Topology optimization methods are used to reduce the structure mass in the design of rotary-wing unmanned aerial vehicles, which are one of the types of aircraft and are increasingly used in the aviation industry due to their unique flight characteristics. Thanks to the application of these methods, the strength-to-weight ratio and efficiency of rotary wing unmanned aerial vehicles increase. In this study, studies in the literature on topology optimization of rotary wing unmanned aerial vehicles were investigated and the results obtained were presented. As a result of the research, it was determined that topology optimization methods affected the structure weight, structure stress and displacement value in the structure exposed to force in aerial vehicle design. In studies in the literature, it has been observed that two different strategies are used by researchers: optimization techniques that include a unit cell structure and optimization techniques that do not include a unit cell structure.

Keywords: Topology optimization, Rotary wing unmanned aerial vehicle, Unite cell structure, SIMP method, BESO method

^a Gazi University,
Graduate School of Natural and Applied
Sciences,
Dept. of Manufacturing Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0003-2955-582
e mail: erdem.guney@gazi.edu.tr

^b Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Manufacturing Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-6820-8209
e mail: uzun.gultekin@gazi.edu.tr

*Corresponding author:
erdem.guney@gazi.edu.tr

Topoloji Optimizasyonu Yöntemlerinin Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracı Tasarımına Etkilerinin İncelenmesi

ÖZ

Topoloji optimizasyonu kullanılarak gerçekleştirilen hafif yapı tasarımları kütle özelliklerinden dolayı havacılık sektöründe ilgi görmektedir. Bu konuyla ilgili olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde dayanım özellikleri değiştirilmeden yapı kütlesinin azaltılmasının hedeflendiği görülmektedir. Hava aracı çeşitlerinden biri olan ve kendine özgü uçuş özelliklerine sahip olmasından ötürü havacılık sektöründe kullanım alanı giderek artan döner kanatlı insansız hava araçlarının tasarımında yapı kütlesini azaltmak amacıyla topoloji optimizasyonu yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin uygulanması sayesinde döner kanatlı insansız hava araçlarının dayanım-ağırlık oranı ve verimi artmaktadır. Bu çalışmada, döner kanatlı insansız hava araçlarının topoloji optimizasyonu konusunda literatürde bulunan çalışmalar araştırılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Yapılan araştırma sonucunda topoloji optimizasyonu yöntemlerinin hava aracı tasarımında yapı ağırlığını, yapı gerilimini ve kuvvete maruz kalan yapıdaki yer değiştirme değerini etkilediği tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda araştırmacılar tarafından birim hücre yapısı içeren optimizasyon teknikleri ve birim hücre yapısı içermeyen optimizasyon teknikleri olmak üzere iki farklı strateji kullanıldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Topoloji optimizasyonu, Döner kanatlı insansız hava araçları, Birim hücre yapısı, SIMP yöntemi, BESO yöntemi

1. Giriş (Introduction)

Üzerinde pilot bulunmaksızın uzaktan kontrol edilebilen veya otonom uçabilen ve tümleşik sistemlerin bir araya getirildiği hava aracı olarak tanımlanan insansız hava araçlarının (İHA) birçok sektörde etkin şekilde kullanıldığı görülmektedir. İHA çeşitlerinden biri olan döner kanatlı insansız hava araçları dikey kalkış yapabilmeleri, havada asılı kalabilmeleri (hovering), yüksek manevra kabiliyetine sahip olmaları, dar alanlara iniş yapabilmeleri, nispeten düşük maliyetli olmaları ve çok çeşitli alanlarda kullanılabilmesi nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekerek araştırma çalışmalarına konu olmaktadır. Döner kanatlı insansız hava araçları üzerinde yürütülen geliştirme çalışmaları sayesinde verimlilikleri ve uçuş menzilleri artmaktadır. Tüm hava araçlarında olduğu gibi döner kanatlı insansız hava araçlarında da hafiflik, darbe dayanımı, termal kararlılık, korozyona dayanıklılık ve maliyet konuları önem arz etmektedir. Bu nedenle hava araçlarında genel olarak karbon fiber, seramik elyaf, fiberglas gibi kompozit malzemeler; epoksi, polyester, fenol formaldehit gibi reçineler ve çeşitli termoplastik malzemeler tercih edilmektedir [1].

Hava araçlarında arzu edilen hafiflik ve dayanıklılık özellikleri, düşük özkütleyle sahip hammadde kullanılarak elde edilebileceği gibi tasarımsal iyileştirmeler yoluyla da elde edilebilmektedir. Tasarımda iyileştirme çalışmaları genel anlamda yapısal optimizasyon işlemleri olarak adlandırılmakta ve üç çeşit yapısal optimizasyon işlemi bulunmaktadır. Yapısal optimizasyon türleri olan boyut optimizasyonu, şekil optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu işlemleri sayesinde ürünlerin önceden belirlenmiş kriterleri karşılayacak şekilde en ideal yapıda tasarlanabilmesi mümkün olmaktadır.

Boyut optimizasyonu işlemleri tasarımın geometrisinde herhangi bir değişiklik olmaksızın en uygun uzunluk ve kalınlık değerlerinin elde edilmesine olanak sağlarken şekil optimizasyonu işlemleri tasarımın boyutlarını değiştirmeden en uygun geometrilerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Diğer bir yapısal optimizasyon çeşidi olan topoloji optimizasyonu ise belirli dayanım koşulları altında hem boyut hem de şekil bakımından en uygun yapının elde edilmesini sağlamaktadır.

Topoloji optimizasyonu kullanılarak gerçekleştirilen işlemlerin aynı zamanda boyut ve şekil optimizasyonunu da içeriyor olması sayesinde daha kapsamlı çalışmalar yürütülebilmektedir. Bu nedenle yapı tasarımında hafifliğin en önemli gereklilik olduğu durumlarda topoloji optimizasyonu işlemleri tercih edilen bir yöntem olmaktadır. Topoloji optimizasyonu kullanılarak gerçekleştirilen hafif yapı tasarımları başta havacılık sektörü olmak üzere birçok sektörde büyük ilgi görmektedir. Bu konuyla ilgili olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde dayanım özellikleri değiştirilmeden yapı kütlelerinin azaltılmasının hedeflendiği görülmektedir.

Bu çalışmada, döner kanatlı insansız hava araçları için hafif yapı tasarımları geliştirmek amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmaların sonuçları başlıklara ayrılarak değerlendirilmiştir.

2. Topoloji Optimizasyonu Yöntemleri (Topology Optimization Methods)

Bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesi ile birlikte bilgisayar programları çeşitlenmekte ve mühendislik problemlerinin çözümünde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Bilgisayar teknolojisinin sıkça kullanıldığı alanlar arasında tasarım ve üretim süreçleri de yer almaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalar sayesinde bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design - CAD) programları geliştirilmektedir.

Bilgisayar destekli tasarım programları temel olarak kullanıcının komutları doğrultusunda çeşitli geometrik şekillerin çizilebilmesini ve bu çizimlerin depolanabilir biçimde bellekler üzerine kaydedilmesini sağlamaktadır. Çizilen geometrik şekillerin birbirleriyle irtibatlandırılabilmesi ve boyutlarının belirlenebilmesi sayesinde nesnelerin ölçeklendirilmiş olarak bilgisayar ortamında tasarlanabilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca tasarımı yapılan bir nesnenin rengi, hammaddesi ve sertliği gibi fiziksel özellikleri tayin edilebilmektedir.

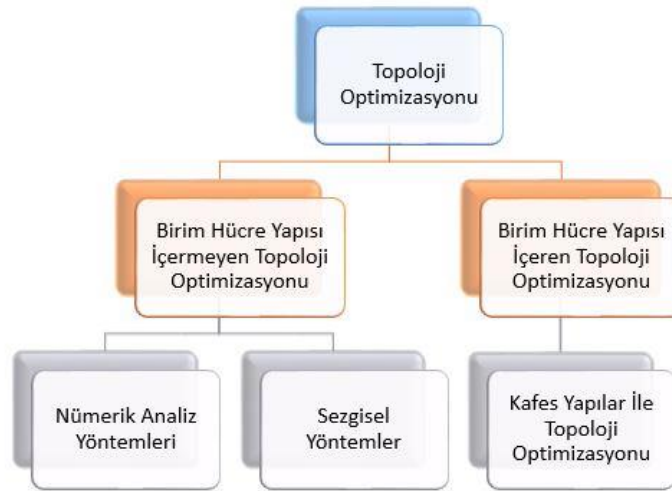
Üç boyutlu CAD programlarının çoğunda ayrıntılı matematiksel hesaplamalar yapabilmeyi sağlayan algoritmalar bulunmaktadır. Bu algoritmalar sayesinde nesnelerin fiziksel özellikleri ve tasarım

parametreleri kullanılarak dayanım analizleri, akış analizleri ve titreşim analizleri gibi birçok mühendislik hesaplamaları hızlı bir şekilde yapılabilmektedir.

Bir tasarımın hedeflediği teknik özelliklerin elde edilebilmesini sağlamak için oldukça fazla sayıda parametrenin kontrol edilmesi ve en ideal değerlerin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle en uygun parametrelerin tespit edilebilmesini sağlamak amacıyla bazı CAD programlarında eniyileme (optimizasyon) algoritmaları bulunmaktadır. Bu algoritmalar sayesinde tasarımların topolojileri optimize edilebilmektedir.

Topoloji kavramı, tasarım terminolojisinde yapıyı oluşturan parçacıkların temas bölgelerini ve yapı içindeki dağılımlarını temsil etmektedir. Topoloji optimizasyonu ise yapının içerisinde yer alan parçacık dağılımının düzenlenmesini ifade etmektedir. Topoloji optimizasyonu, var olan bir tasarımın yapısal özelliklerini geliştirmek amacıyla gerçekleştirildiği için genellikle mevcut tasarımdaki yapı parçacıklarının konumları ve işlevsellikleri değerlendirme konusu olmaktadır. Bu parçacıkların yapı içerisindeki konumları ve işlevsellikleri CAD programlarında bulunan optimizasyon algoritmaları kullanılarak en ideal biçime kavuşturulmakta ve böylece topolojik bakımdan optimize edilmiş tasarımlar gerçekleştirilmektedir.

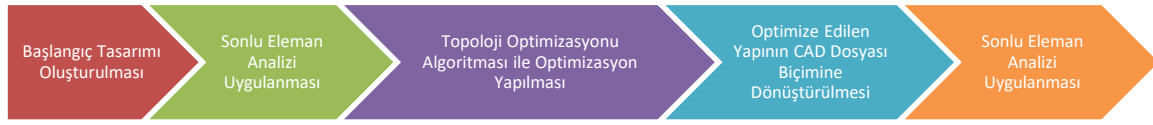
Bir tasarımın iç yapısı düzenlenirken tasarımın amaçları ve tasarıma etkiyen faktörler belirlenerek optimizasyon işleminde kriter olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, tasarımların iç yapı düzenini optimize etmek amacıyla yapılan optimizasyon işlemleri, optimizasyon kriterlerine bağlı olarak birim hücre (kafes yapı) içeren veya birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonları olmak üzere iki gruba ayrılarak incelenmiştir. Literatürdeki çalışmaları incelemek için oluşturulan kavram haritası Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Topoloji optimizasyonu kavram haritası
(Topology optimization mind map)

2.1. Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu (Topology optimization without unit cells)

Topoloji kavramı, tasarım terminolojisinde bir yapıyı oluşturan parçacıkların temas bölgelerini ve yapı içindeki dağılımlarını temsil etmektedir. Topoloji optimizasyonu çalışmaları ile yapının parçacık dağılımı düzenlenmektedir. Yapıyı oluşturan parçacıkların temas bölgelerini ve yapı içindeki dağılımlarını düzenlemek üzere gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu işlemlerinde yapının maruz kaldığı çevresel koşullar belirlenerek en uygun yapı düzeni hesaplanmaktadır. Yapının maruz kaldığı kuvvetler, momentler veya burkulmalar gibi çevresel koşullar nedeniyle oluşan iç gerilimler optimizasyon algoritmaları aracılığıyla tespit edilmekte ve içyapı düzeni değiştirilerek optimize edilmektedir. Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu işlemlerinde malzemenin içyapı düzeni optimizasyon algoritması tarafından çevresel koşullara göre belirlenmektedir. Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu süreci Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu süreci
(Topology optimization process that do not include unit cell)

Topoloji optimizasyonu yöntemlerinin çözüme ulaşma sistemleri, nümerik analiz gibi iteratif çözümleme teknikleri veya yapay zekâ gibi sezgisel teknikler olmak üzere iki farklı stratejiyi kullanarak çalışmaktadır.

2.1.1 Nümerik analiz yöntemleri (Numerical analysis methods)

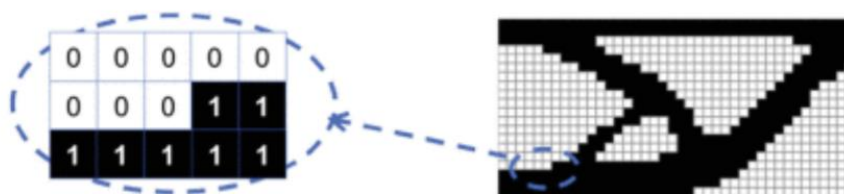
Topoloji optimizasyonu işlemi, var olan bir tasarımın yapısal özelliklerini geliştirmek amacıyla gerçekleştirildiği için genellikle mevcut tasarımdaki parçacıkların konumları ve işlevsellikleri değerlendirme konusu olmaktadır. Mevcut bir tasarımda yer alan içyapı parçacıklarının konumlarını düzenlemek amacıyla çeşitli nümerik analiz yöntemleri kullanılmaktadır.

Tasarım sürecinde eniyileme yapabilmek amacıyla kullanılan nümerik analiz yöntemleri arasında Doğrusal Programlama Yöntemleri (Simplex Yöntemi ve Tam Sayılı Programlama Yöntemi), Doğrusal Olmayan Programlama Yöntemleri (Kesen Düzlem yöntemi, Geometrik Programlama Yöntemi, İkinci Derece Programlama Yöntemi ve Cezalandırma Yöntemi) ve Ayrık Programlama Yöntemleri bulunmaktadır [2].

Birçok CAD programında topoloji optimizasyonu işlemleri için Cezalandırılmalı Katı İzotropik Malzeme (Solid Isotropic Material with Penalization - SIMP) yöntemi tercih edilmektedir. Yapısal topoloji optimizasyonu için en yaygın kullanılan metodolojiler, Cezalandırılmalı Katı İzotropik Malzeme (SIMP) yöntemini içeren yoğunluğa dayalı yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır [3].

Yoğunluğa dayalı yöntemler, her bir elemanın katı malzemeden mi yoksa boşluktan mı oluşması gerektiğini belirleyerek bir amaç fonksiyonunu en aza indirme temel amacı ile sonlu elemanlardan oluşan sabit bir alan üzerinde çalışmaktadır [3].

Yoğunluğa dayalı yöntemlerden biri olan SIMP metodu, temel olarak çeşitli yüklere, sınır koşullarına ve kısıtlamalara maruz kalan bir parça üzerinde malzemeyi en optimum şekilde dağıtmayı, böylece parçanın önceden tanımlanmış kısıtlamaları ihlal etmeden bir optimizasyon hedefini karşılamasını amaçlayan yoğunluk tabanlı bir topoloji optimizasyonu yöntemidir [4]. Bu yöntemde parçaya etkileyen dış kuvvetlerin ve sınırlılıkların meydana getirdiği gerilmeler öncelikle sonlu eleman analizi ile tespit edilmekte ve sonrasında sonlu elemanlara etkileyen gerilme değerlerine bağlı olarak her bir eleman için yoğunluk katsayısı değeri belirlenmektedir. Yoğunluk katsayısı değerleri 0 ile 1 arasında olacak şekilde tanımlanmaktadır. Herhangi bir elemanın sıfır değerini alması, elemanın yoğunluğunun olmadığı anlamına gelmektedir. Yoğunluğu sıfır olan elemanlar yok sayılarak parça yapısından çıkarılmakta ve böylece fonksiyonel elemanlardan oluşan içyapı düzeni elde edilmektedir. Elemanlara atanan yoğunluk katsayıları Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Elemanlara tanımlanan yoğunluk katsayıları [5]
(Density coefficients defined for elements)

SIMP yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu esnasında algoritma tarafından sıfır yoğunluk değeri verilerek yok sayılan sonlu elemanlar yapıdan silindiği için işlem sonucunda elde edilen yapıda pürüzlü bir yüzey durumu meydana gelmektedir. Silinen sonlu elemanların boyutlarına bağlı olarak yüzey durumunun çözünürlüğü değişkenlik göstermektedir. Küçük boyutlu elemanlar kullanılarak çözünürlük kalitesi artırılabilen fakat bu durum daha fazla sayıda eleman hesaplamasına neden olup işlem süresini uzatmaktadır.

Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen boşluklu yapıların genellikle düzenlenmesi ve kullanılabilir CAD dosyası formatına dönüştürülmesi gerekmektedir. Optimizasyon işleminin gerçekleştirildiği yazılımın imkân ve kabiliyetlerine bağlı olarak dosya dönüşümü aynı yazılım içerisinde veya başka yazılımlardan yararlanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Bir kol modelinin optimizasyon işlemi öncesindeki görünümü, optimizasyon sonrasındaki görünümü ve dosya dönüşümü sonrasındaki görünümü Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Dosya dönüşümü a) başlangıç modeli b) optimize edilen model c) CAD dosyasına dönüştürülen model
(File conversion a) initial model b) optimized model c) model converted to CAD file)

2.1.2. Sezgisel yöntemler (Heuristics methods)

Amacın kesin çözüm elde etmek olmadığı, çözüme yakın değerlerin elde edilmesinin sonuç için yeterli olduğu büyük boyutlu optimizasyon problemleri için sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Sezgisel yöntemler; sürü tabanlı fizik tabanlı, biyoloji tabanlı, sosyal tabanlı, kimya tabanlı ve müzik tabanlı olmak üzere altı farklı grupta incelenmektedir. Ayrıca bu yöntemlerin birleşimi ile oluşturulmuş melez yöntemler de bulunmaktadır [6].

Doğadaki canlıların çevre koşullarına adaptasyon yeteneklerine bağlı olarak hayatta kalabilmeleri ve nesillerini devam ettirebilmeleri biyoloji biliminde doğal seçim olarak adlandırılmaktadır. Çevreye en iyi şekilde uyum sağlayan canlıların popülasyonunda artış gerçekleşirken uyum sağlayamayan veya nispeten az uyum sağlayan canlıların popülasyonunda ise azalış meydana gelmektedir. Bu durum doğanın kendi kendine gerçekleştirdiği evrimsel bir optimizasyon olarak değerlendirildiğinde biyoloji tabanlı sezgisel optimizasyon yöntemlerinin ilham kaynağı hakkında fikir edinilebilmektedir.

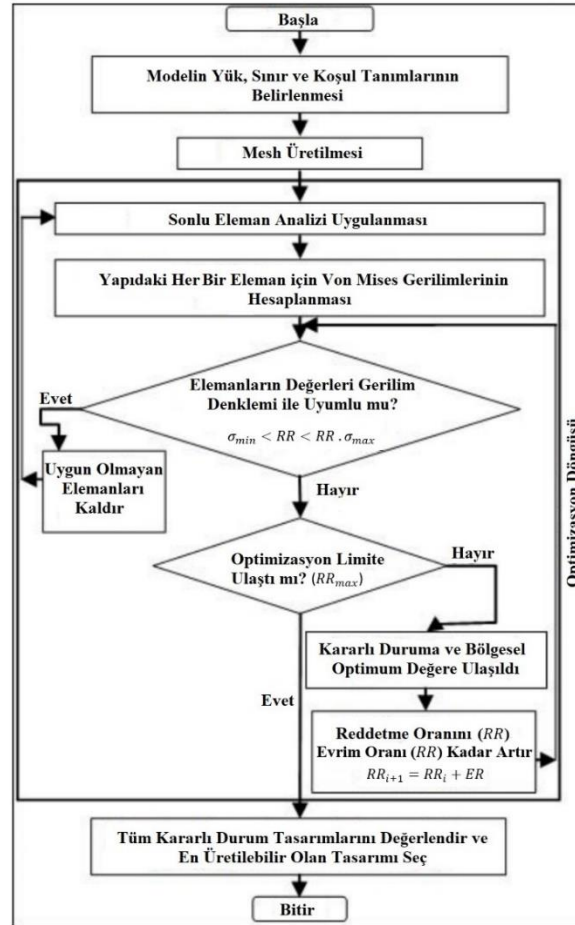
İlk olarak Xie ve Steven tarafından tanımlanan evrimsel yapı optimizasyonu (Evolutionary Structural Optimization - ESO) yöntemi, bir yapının en düşük gerilime sahip elemanlarını yavaş yavaş kaldırarak (hard-killing) optimuma doğru evrimleştiği basit ve ampirik bir kavrama dayanmaktadır [7].

Evrimsel yapı optimizasyonu yönteminde öncelikle modelin maruz kaldığı dış kuvvetler tanımlanmakta ve sonlu elemanların meydana getirilmesi için mesh oluşturulmaktadır. Tanımlanan koşullar altında sonlu eleman analizi gerçekleştirilerek elemanlara etkiyen gerilme ve yer değiştirme değerleri belirlenmektedir. Her bir elemanın sahip olduğu değerlerin teker teker kontrol edilmesi için döngü başlatılmaktadır.

Evrimsel yapı optimizasyonunda başlangıç reddetme oranı (RR_0) ve evrim oranı (ER) olmak üzere iki parametrenin tanımlanması gerekmektedir. Bu parametrelerin tipik değerleri RR_0 için %1 ve ER için %0,5 - %1 olarak kullanılmaktadır [8]. Başlangıç reddetme oranı kullanılarak döngünün ilk aşamasında elemanların gerilme değerleri kıyaslanmaktadır. Başlangıç reddetme oranına uygun olmayan elemanların tespit edilmesi durumunda bu elemanların reddedilmesi gerekmektedir.

Evrimsel süreçte yeni bir sonlu eleman ağı oluşturmaya gerek kalmamaktadır. Bunun yerine reddedilen elemanların malzeme özellik numarası sıfıra atanabilmekte ve küresel sertlik matrisi birleştirildiğinde bu unsurlar göz ardı edilmektedir. Ayrıca sonlu elemanların elastikiyet modülü, kalınlık veya yoğunluk gibi özelliklerinden birini azaltarak da elemanın göz ardı edilmesi sağlanabilmektedir [8]. Böylece elemanlar sistemden tamamen çıkarılmayıp geçici olarak yok sayılmakta, en uygun değere ulaşıncaya kadar kullanılabilir durumda bekletilmektedir.

Sonlu eleman analizi ve eleman çıkarma işleminde döngü boyunca aynı değerler kullanılarak karşılaştırma işlemi tekrarlanmaktadır. Kararlı bir duruma ulaşıldığında reddedilebilecek daha fazla öğenin olmadığı anlamına gelmekte ve reddetme oranına evrim oranı eklenerek sonraki döngü için yeni bir reddetme oranı belirlenmektedir. Böylece tüm kararlı durumlar değerlendirilmekte ve optimum sonuca yaklaşılmaktadır. Evrimsel yapı optimizasyonunun işlem basamakları Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Evrimsel yapı optimizasyonu algoritması [8]
(Evolutionary structure optimization algorithm)

Evrimsel yapı optimizasyonu yönteminin çift yönlü çalışabilen gelişmiş çeşitleri bulunmaktadır. Çift yönlü evrimsel yapısal optimizasyon (Bidirectional Evolutional Structural Optimization - BESO) yönteminde, yapının elemanları eklenebilmekte veya çıkarılabilmektedir [9].

Çift yönlü evrimsel yapı optimizasyonu yönteminde yapının işgal edebileceği maksimum izin verilen etki alanı belirlendikten sonra sonlu eleman ağı oluşturulmakta ve sınır koşulları tanımlanarak sonlu eleman analizi gerçekleştirilmektedir. Sonlu eleman analizi sonucunda az gerilimli ve aşırı gerilimli elemanlar tespit edilmektedir. Elemanların sahip oldukları gerilme değerleri Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 kullanılarak değerlendirilmektedir. Gerilme değerlerinin Eşitlik 1 koşulunu sağlaması durumunda düşük gerilimli elemanlar yapıdan çıkarılmakta ve Eşitlik 2 koşulunu sağlaması durumunda ise yapıya eklenmektedir [9].

$$\sigma_e \leq RR \cdot \sigma_{max} \quad (1)$$

$$\sigma_e \geq IR \cdot \sigma_{max} \quad (2)$$

Eşitlik 1'de ve Eşitlik 2'de verilen σ_e ifadesi elemanın sahip olduğu gerilme miktarını, σ_{max} ifadesi yapıdaki en büyük gerilme miktarını, RR ifadesi reddetme oranını ve IR ifadesi ise dâhil etme oranını temsil etmektedir. Reddetme oranının hesaplanmasında kullanılan denklem Eşitlik 3'te verilmiştir.

$$RR = r_0 + r_1 \cdot SS + a_{RR} \cdot ON \quad (3)$$

Eşitlik 3'te verilen SS ifadesi kararlı durum sayısını temsil etmektedir. Ayrıca Evrim sürecindeki kararlı durumların yanı sıra yerel minimumları içeren tüm durumları gösteren bir tamsayı sayacı olarak kullanılmaktadır. ON ifadesi osilasyon sayısını temsil etmektedir. Osilasyon sayısı her yinelemede birer birer artmaktadır. Eşitlik 3'te yer alan r_0 ifadesi başlangıç değeri olarak sıfır kabul edilmektedir. Aynı eşitlikte yer alan r_1 ifadesi BESO yönteminde sayısal deneyimlerden elde edilen sabit sayıyı temsil etmekte ve normal değeri 0,001 kabul edilmektedir. a_{RR} ifadesi BESO yönteminde osilatör sayı sabitini temsil etmekte ve normal değeri 0,01 kabul edilmektedir. Eşitlik 3'te verilen reddetme oranı aynı zamanda $0 \leq RR \leq 1$ koşulunu sağlamaktadır [9].

Eşitlik 2'de verilen dâhil etme oranının hesaplanmasında kullanılan denklem Eşitlik 4'te verilmiştir.

$$IR = i_0 - i_1 \cdot SS - a_{IR} \cdot ON \quad (4)$$

Eşitlik 4'te yer alan i_0 ifadesi başlangıç değeri olarak bir kabul edilmektedir. i_1 ifadesi BESO yönteminde sayısal deneyimlerden elde edilen sabit sayıyı temsil etmekte ve normal değeri 0,01 kabul edilmektedir. a_{IR} ifadesi BESO yönteminde osilatör sayı sabitini temsil etmekte ve normal değeri 0,1 kabul edilmektedir. Eşitlik 4'te verilen dâhil etme oranı aynı zamanda $0 \leq IR \leq 1$ koşulunu sağlamaktadır [9].

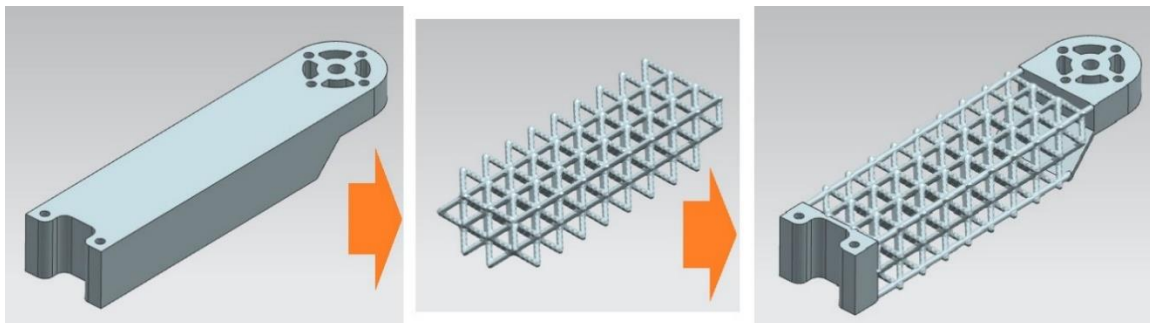
Tasarım alanındaki hiçbir öğenin karşılayamayacağı bir duruma ulaşıldığında Eşitlik 1 veya Eşitlik 2 için kararlı bir duruma ulaşıldığı sonucuna varılmaktadır. Optimizasyon sürecinin devam etmesi için kararlı durum sayacı 1 artırılmakta ve işlem tekrarlanmaktadır. Belirlenmiş olan minimum stres veya kriter limitlerine ulaşıncaya kadar döngü devam etmektedir [9].

2.2. Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu (Topology optimization with unit cell)

Hüresel yapılar, stokastik veya periyodik hüresel yapılar olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir. Stokastik hüresel yapılar malzeme içerisinde düzensiz bir şekilde dağılım gösteren hücrelerden meydana gelmektedir. Periyodik hüresel yapılar ise malzeme içerisinde kafes adı verilen belirli bir hücre şeklinin ardışık olarak dizilmesi ile oluşturulmaktadır. Ardışık olarak dizilmiş olan ve birbirinin aynısı olan her bir hüresel yapıya birim hücre adı verilmektedir.

Yüksek mukavemet-ağırlık oranı sayesinde havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılmakta olan birim hüresel yapılar, hava araçlarının verimliliğini geliştirebilecek olan performans-ağırlık oranını arttırmayı amaçlamaktadır [10]. Hüresel yapılar, üretim malzemesini yalnızca ihtiyaç duyulan yere koyarak malzeme ve imalat süresinden de tasarruf sağlamaktadır [10]. Bu yönüyle hüresel yapılar, malzemeyi oluşturan parçacıkların temas bölgelerini ve yapı içindeki dağılımlarını düzenleyerek topolojik açıdan optimizasyon sağlamaktadır. Hüresel yapılar kullanılarak üretilen gözenekli içyapılar ve optimize edilmiş geometriler, yüksek yük kapasitesi hedefleyen platformların ağırlığını azaltmakta ve yakıt verimliliğini artırmaktadır [11].

Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu işlemlerinde malzemenin içyapısı, optimizasyon işlemi için seçilen birim hücre geometrisi tarafından belirlenmektedir. Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu işlemi Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Birim hücre kullanılarak gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu işlemi
(Topology optimization process performed using unit cell)

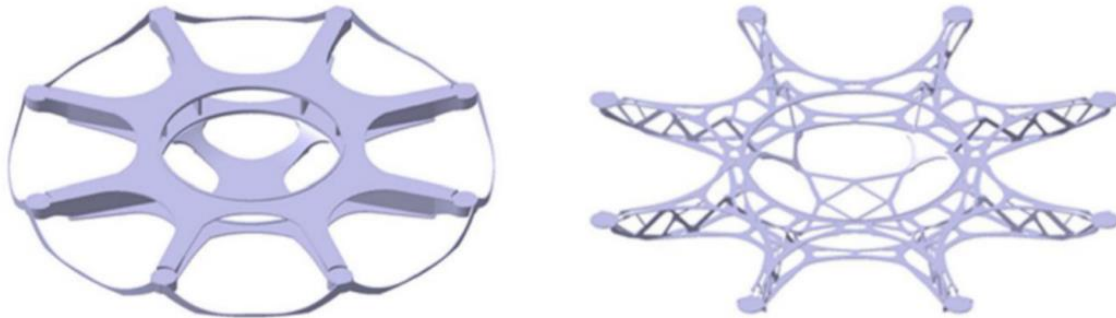
3. Topoloji Optimizasyonu Çalışmaları (Topology Optimization Studies)

Topoloji optimizasyonu konusunda yapılmış olan çalışmalar; birim hücre yapısı içermeyen çalışmalar ve birim hücre yapısı içeren çalışmalar olmak üzere iki başlık halinde gruplandırılarak incelenmiştir.

3.1. Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmaları (Topology optimization studies without unit cells)

Birim hücre yapısı içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmaları bilgisayar destekli mühendislik (Computer Aided Engineering - CAE) ve CAD programları bünyesinde bulunan optimizasyon araçları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalarda optimize edilecek parçaya etkiyen dış kuvvetlerin neden olduğu gerilme ve deformasyonlar dikkate alınarak yük taşıyan bölgeler tespit edilmekte ve sonrasında optimizasyon algoritması kullanılarak parçanın iç yapısı düzenlenmektedir.

Döner kanatlı insansız hava araçları üzerine yapılan birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmaları incelendiğinde optimize edilecek yapı olarak genellikle gövde merkezi ve kol kirişi tasarımı konusunda daha çok çalışıldığı, spesifik parçaların ise nadiren optimize edildiği görülmektedir. Ayrıca döner kanatlı insansız hava aracı tasarımında birleşik gövde (monokok) ve montajlı gövde olmak üzere iki farklı yapı şeklinin bulunduğu görülmektedir. Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu yönteminin döner kanatlı insansız hava aracı tasarımında kullanımı Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Topoloji optimizasyonu uygulanan döner kanatlı insansız hava aracı gövdesi [12]
(Rotary wing unmanned aerial vehicle body with topology optimization)

Döner kanatlı insansız hava aracı tasarımı konusunda literatürde bulunan ve birim hücre içermeyen çalışmalarda optimize edilen fonksiyonel parçaların dağılımı Tablo 1'de verilmiştir.

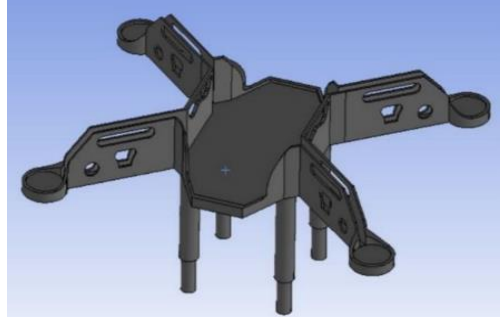
Tablo 1. Döner kanatlı insansız hava aracı tasarımında birim hücre kullanılmadan optimize edilen parçalar (Optimized parts in rotary wing unmanned aerial vehicle design without using unit cells)

Parçalar	Literatürdeki Çalışmalar																
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Gövde Merkezi	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓		✓			✓	
Kol Kirişi	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
Diğer Parçalar					✓	✓					✓	✓		✓			

3.1.1. Birim hücre içermeyen topoloji çalışmalarının yapı ağırlığına etkisi (The effect of topology studies without unit cells on structure weight)

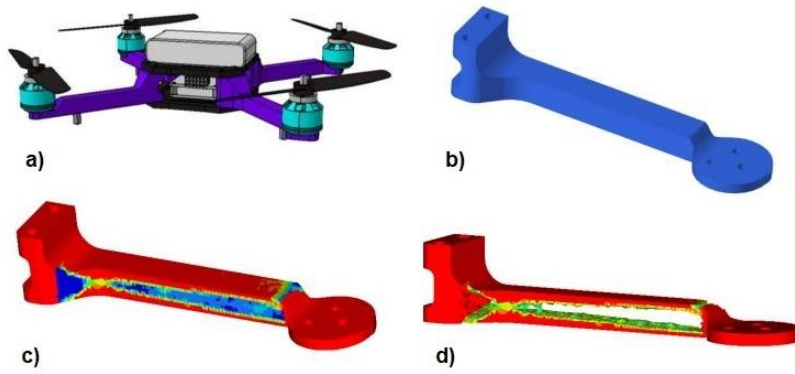
Döner kanatlı insansız hava araçlarında birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmalarının yapı ağırlığına etkisi incelendiğinde araştırmacıların tasarım kütlelerini azaltmayı hedefledikleri ve bu amaçla optimizasyon tekniklerinden faydalandıkları görülmektedir. Guo vd. [12] tarafından yapılan çalışmada hafif ve bakımı kolay bir İHA çerçevesi elde etmek için yeni bir tasarım yöntemi önerilmiştir. Optimizasyon öncesinde model ağırlığının 5,846 kg olduğu, optimize edilmiş olan model ağırlığının ise

2,332 kg olduğu belirtilmiştir. Tasarımı tamamlanan İHA modelinin çarpışmaya dayanıklılık yanıtlarını elde etmek için sonlu elemanlar analizi kullanılarak düşme testi gerçekleştirilmiş ve yapılan çalışma sonucunda dinamik düşme testi ile İHA çerçevesinin çarpışmaya dayanıklı olduğu bildirilmiştir. Rayed vd. [13] tarafından yapılan çalışmada İHA yapısının optimizasyonu, titreşim ve yorulma özelliklerinin simülasyon sonuçları ile değerlendirilmiştir. Yapının iyileştirilmesinin ardından model kütlesinin 387,65 gramdan 342,56 grama düşürüldüğü belirtilmiştir. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen tasarım Şekil 8'de gösterilmiştir.



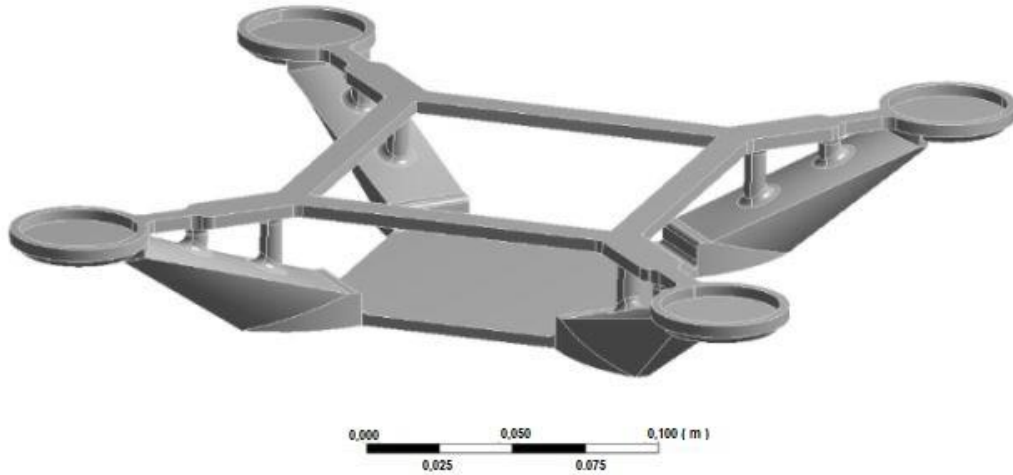
Şekil 8. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen tasarım [13]
(The design obtained as a result of the optimization process)

Yapı vd. [14] tarafından yapılan çalışmada eklemeli üretim yoluyla topolojisi optimize edilmiş hafif bir mikro İHA yapısının sayısal tasarımı ve üretimi için bir çerçeve geliştirilmesi amaçlanmıştır. Gereksinimlerine uygun bir yapıya ulaşabilmek için başlangıç tasarımı yapılmış ve ağırlığının 46 gram olduğu bildirilmiştir. Topoloji optimizasyonu Ansys Workbench 2020 R2 kullanılarak yapılmış ve optimizasyon işlemi birkaç kez gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen yapı 0,72 ve 0,96 mm olmak üzere iki farklı kalınlık değeriyle yeniden modellenmiş ve doğrulama testi için 3D yazıcı ile yazdırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sayısal ve deneysel veriler arasında yakın bir korelasyon elde edildiği belirtilmiştir. Gafurzade [15] tarafından yapılan çalışmada, tarımsal ilaçlama amacıyla üretilmiş olan ticari bir drone referans alınarak tasarlanan İnsansız hava aracına topoloji optimizasyonu uygulanarak hava aracının hafifletilmesi amaçlanmıştır. Tasarlanan modele ANSYS programında topoloji optimizasyonu uygulanmış ve gövde tasarım kütlesinin %52,4 oranında hafifletildiği belirtilmiştir. Klippstein vd. [16] tarafından insansız hava araçlarında boşluklu yapıların eklemeli imalat ile üretimi araştırılmıştır. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı kullanılarak oluşturulan döner kanatlı insansız hava aracının kol braketleri parçası üzerinde topoloji optimizasyonu uygulanmış ve 25 yinleme sonucunda nihai tasarım elde edilmiştir. Yapılan deney sonucunda topoloji optimizasyonu uygulanan parçanın ilk duruma göre %49,2 daha hafif olduğu bildirilmiştir. Goh vd. [17] tarafından yapılan çalışmada tasarım optimizasyonu ve 3D baskı tekniği kullanılarak drone için bir güvenlik kafesinin tasarımı ve üretimi araştırılmıştır. Drone pervanelerinin çevreye çarparak zarar vermesini önlemek için güvenlik kafesi tasarlanmıştır. Tasarlanan yapıya 20N kuvvet uygulayarak sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiş ve dayanım özellikleri incelenmiştir. Analiz sonucunda tespit edilen kritik noktaları boyutlandırmak üzere Solidworks tasarım optimizasyonu aracı kullanılarak topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Optimizasyon işlemi uygulanarak hafifletilen tasarıma 60 metre yükseklikten serbest düşme testi uygulanmış ve yeterli miktarda darbe tamponlaması sağladığı belirtilmiştir. Yıldız [17] tarafından yapılan çalışmada drone kolunu optimize etmek için hibrit INFO benzetimli tavlama algoritması geliştirildiği belirtilmiş ve drone kolunun dayanım özelliklerini koruyarak parça ağırlığını azaltmak hedeflenmiştir. Başlangıç ağırlığı 81,78 gram olarak ölçülen drone kolunun gerçekleştirilen optimizasyon işlemi sonucunda yeni ağırlık değerinin 61,49 gram olarak ölçüldüğü ve ağırlıktaki azalma miktarının %24,8 olduğu belirtilmiştir. Yıldız tarafından tasarlanan drone'un üç boyutlu modeli, drone kolu ve optimizasyon uygulanan kol modeli Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Tasarlanmış olan a) drone modeli, b) drone kolu, c) topoloji optimizasyonu işlemi, d) optimize edilen kol modeli [17]
(Designed a) drone model, b) drone arm, c) topology optimization process, d) optimized arm model)

Esakki vd. [19] tarafından quadrotor insansız hava aracı şasisinin dayanım-ağırlık oranını artırmak amacıyla yapılan çalışmada üç boyutlu model tasarımı, toplam çapı 770 mm olacak şekilde CATIA V5 programında gerçekleştirilmiştir. En iyi değerleri elde edebilmek için yakınsama doğruluğu %0,1 ve ceza faktörü 3 seçilerek ANSYS platformunda topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Uygulanan optimizasyon işlemi sonucunda yapının dayanım-ağırlık oranında yaklaşık %30 gelişme olduğu belirtilmiştir. Yakın vd. [20] tarafından yapılan çalışmada döner kanatlı insansız hava aracı şasisinin ağırlığını azaltmak hedeflenmiştir. Topoloji optimizasyonu işlemi ANSYS programında 35 yinleme ile gerçekleştirilmiştir. Tasarımın başlangıç kütlesinin 5,839 kg olduğu ve optimizasyon işleminden sonra yeni kütle değerinin 1,288 kg olduğu belirtilmiştir. Uygulanan topoloji optimizasyonu sayesinde tasarımın kütlesinde yaklaşık %22,057 oranında azalma elde edildiği belirtilmiştir. Nvss vd. [21] tarafından yapılan çalışma ile iki kilogram kalkış ağırlığına sahip bir quadcopter insansız hava aracı gövdesinin hafif yapıda tasarlanması amaçlanmıştır. Optimizasyon işlemi için ANSYS programında yer alan Solid Isotropic Microstructure with Penalization (SIMP) yöntemi tercih edilmiştir. Başlangıç ağırlığı 9,035 kg olan modelin gerçekleştirilen optimizasyon işlemi sonrasında ağırlığının 0,330 kg olduğu belirtilmiştir. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen tasarım Şekil 10'da gösterilmiştir.



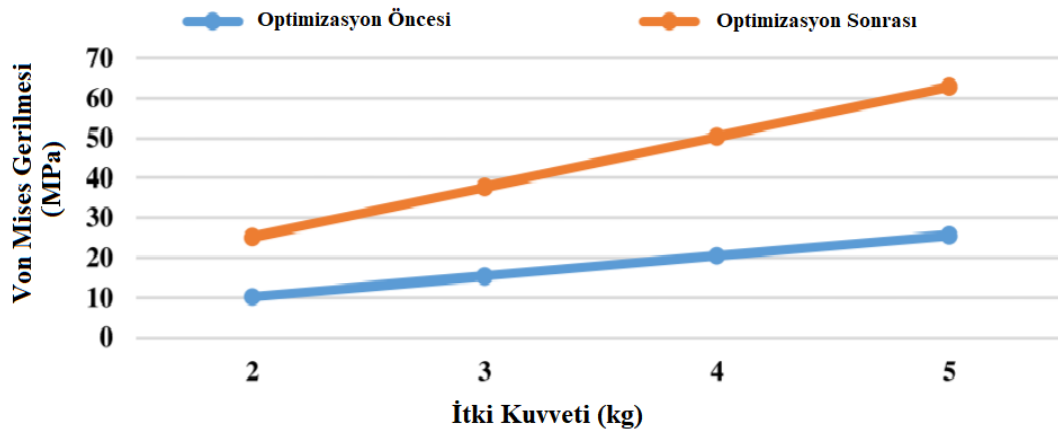
Şekil 10. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen tasarım [21]
(The design obtained as a result of the optimization process)

Prado [22] tarafından yapılan çalışma ile döner kanatlı insansız hava aracı gövdesinin üretim maliyetlerini azaltmak ve hafif bir yapı tasarlayarak verimliliği artırmak hedeflenmiştir. Uygulanan optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen tasarımların dayanım özelliklerini incelemek için Altair programı kullanılarak sonlu eleman analizi yapılmış ve başlangıç kütlesi 675 gram olan gövde tasarımına uygulanan optimizasyon işlemleri sayesinde kütle miktarının %40 azaltıldığı belirtilmiştir. Khan vd. [23] tarafından yapılan çalışmada quadcopter insansız hava araçları için dayanıklı ve hafif iniş takımı tasarlanması amaçlanmıştır. Tasarımın kütlesini azaltmak için Solidworks programında %15 oranında, %35 oranında ve %60 oranında olmak üzere üç farklı topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Elde edilen tasarımların dayanım açısından insansız hava aracının çalışma koşullarına uygun olduğu belirtilmiştir. Xiang vd. [24] tarafından yapılan çalışmada hava fotoğrafçılığına yönelik dört kollu küçük

bir İHA'nın gövde yapısı tasarlanmış ve gövde yapısının üç boyutlu modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan modelin 66,158 gram ağırlığında olduğu bildirilmiştir. Hava aracının kollarındaki fırçasız motorların monte edildiği alanlara 19,11 N dikey kaldırma kuvveti uygulanmış ve sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Modelin kütleini azaltmak için Inspire yazılımı kullanılmış ve değişken yoğunluk optimizasyonunu işlemi uygulanarak modelin kütleinin %51,5 oranında azaltıldığı belirtilmiştir. Natarajan [25] tarafından yapılan çalışma ile quadcopter insansız hava aracı için hafif yapı bileşenlerin tasarlanması amaçlanmıştır. Fusion 360 programında SIMP yöntemi kullanılarak topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan hafifletme çalışması sonucunda motor montaj kollarının ağırlığında %31,6 azalma sağlandığı belirtilmiştir. Ali vd. [26] tarafından yapılan çalışmada dayanıklı ve hafif bir drone çerçevesi tasarlanması hedeflenmiştir. Model üzerinde nispeten az gerilme oluşan noktalardaki kütlelerin optimizasyon algoritması tarafından kaldırıldığı, optimizasyon işleminden sonra yeni kütle miktarının 406 gram olduğu ve kütledeki azalma oranının yaklaşık %50 olduğu bildirilmiştir.

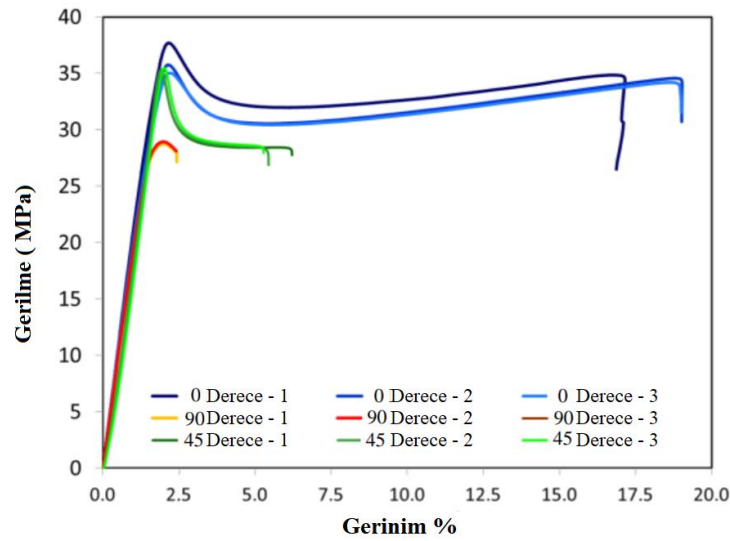
3.1.2. Birim hücre içermeyen topoloji çalışmalarının yapı gerilimine etkisi (The effect of topology studies without unit cells on structure stress)

Döner kanatlı insansız hava araçlarında birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmalarının yapı gerilimine etkisi incelendiğinde araştırmacıların optimizasyon işlemi sonucunda meydana gelen yapısal gerilme miktarlarını analiz ettikleri görülmektedir. Rayed vd. [13] tarafından yapılan çalışmada İHA yapısının optimizasyonu, titreşim ve yorulma özelliklerinin simülasyon sonuçları ile değerlendirilmiştir. İHA yapısının sonlu eleman analizi (FEA) için Polilaktik Asit (PLA) malzeme seçilmiştir. Toplam deformasyonu ve von-mises gerilimini belirlemek için ANSYS yazılımı kullanılarak İHA yapısı üzerinde statik yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. PLA malzeme kullanılarak tasarlanan modelin Von Mises gerilme değerinin 10,6 MPa olduğu belirtilmiştir. Mekanik mukavemetten ödün vermeden kütleli azaltmak ve stresi en aza indirmek için İHA yapısında topolojik optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimize edilen modelin Von Mises gerilme değerinin 25,62 MPa olduğu belirtilmiştir. İtki kuvvetinin yapı gerilmesine etkisi Şekil 11'de gösterilmiştir.



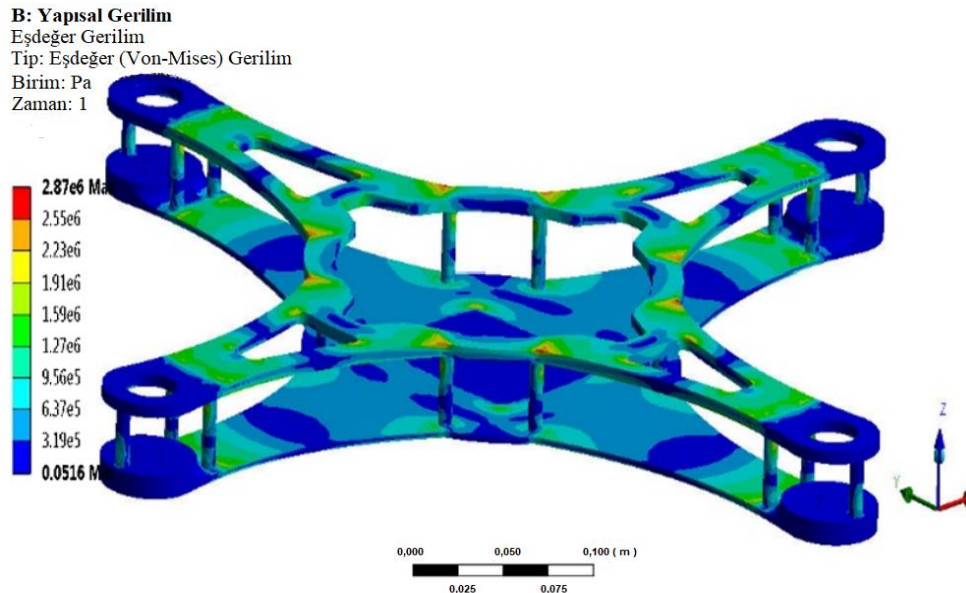
Şekil 11. İtki kuvvetinin yapı gerilmesine etkisi [13]
(Effect of thrust force on structure stress)

Klippstein vd. [16] tarafından insansız hava araçlarında boşluklu yapıların eklemeli imalat yöntemi ile üretimi araştırılmıştır. Eklemeli üretim yöntemi olarak ergiyik biriktirme metodu (FDM) seçilmiş ve döner kanatlı insansız hava aracının kol braketi parçası üzerinde topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Topoloji optimizasyonu uygulanan modelin eklemeli imalatında bal peteği yapısı, üçgen yapı ve dikdörtgen yapı olmak üzere üç farklı dolgu deseni kullanıldığı belirtilmiştir. Sonlu eleman analizi sonuçlarına göre dolgu yoğunluğu azaldıkça Von-Mises gerilim değerinin arttığı bildirilmiştir. FDM numunelerinin gerilme-yer değiştirme grafiği Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Gerilme – gerinim grafiği [16]
(Stress – strain graph)

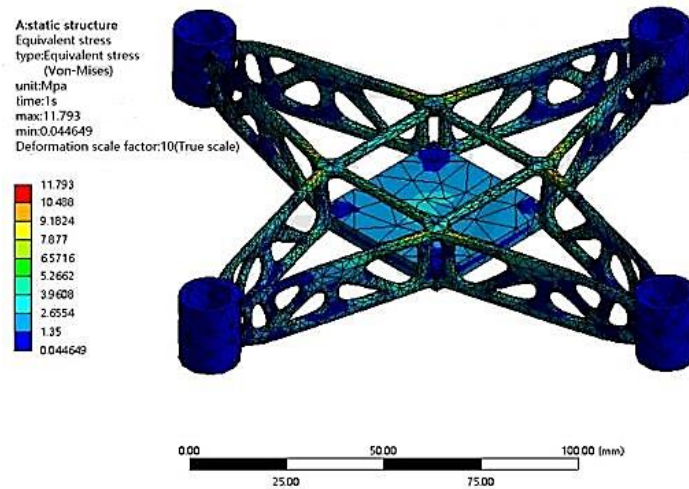
Yıldız [18] tarafından yapılan çalışmada drone kolunu optimize etmek için hibrit INFO benzetimli tavlama algoritması geliştirildiği belirtilmiştir. Drone kolunun dayanım özelliklerini koruyarak parça ağırlığını azaltmak hedeflenmiştir. Optimizasyon öncesinde modele etkiyen kuvvetlerin neden olduğu maksimum gerilme değerinin 5,22 MPa olarak ölçüldüğü ve optimizasyon sonrasında ise maksimum gerilme değerinin 42,11 MPa olarak ölçüldüğü belirtilmiştir. Esakki vd. [19] tarafından quadrotor insansız hava aracı şasisinin dayanım-ağırlık oranını artırmak amacıyla yapılan çalışmada başlangıç modelinin gerilim değerinin 4,05 MPa olduğu belirtilmiştir. Topoloji optimizasyonu uygulanan tasarımın başlangıçtaki modellere uygulanan sınır koşulları altında sergileyeceği dayanım özelliklerini değerlendirebilmek amacıyla yeni tasarım için sonlu eleman analizi uygulanmıştır. Analiz sonucunda maksimum gerilme değerinin 2,87 MPa olduğu belirtilmiştir. Sonlu eleman analizi ile elde edilen gerilme diyagramı Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Sonlu eleman analizi ile elde edilen gerilme diyagramı [19]
(Stress diagram obtained by finite element analysis)

Yakın vd. [20] tarafından yapılan çalışmada döner kanatlı insansız hava aracı şasisinin ağırlığını azaltmak hedeflenmiştir. İnsansız hava aracının maruz kalacağı dış kuvvetlere karşı dayanım özelliklerini inceleyebilmek amacıyla sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiş ve maksimum gerilim miktarının 0,39 MPa olduğu belirtilmiştir. Topoloji optimizasyonu işlemi ANSYS programında 35 yineleme ile gerçekleştirilmiş ve yapıdaki maksimum gerilme değerinin ise 1,282 MPa olduğu

belirtilmiştir. Nvss vd. [21] tarafından yapılan çalışma ile iki kilogram kalkış ağırlığına sahip bir quadcopter insansız hava aracı gövdesinin hafif yapıda tasarlanması amaçlanmıştır. Belirlenen sınır koşullar altında sonlu eleman analizi gerçekleştirildikten sonra maksimum gerilme değerinin 0,1 MPa olduğu belirtilmiştir. Tanımlanan koşullar altında topoloji optimizasyonu işleminin 21 yinleme sonrasında final modele ulaştığı ve optimize edilen modelin maksimum gerilme değerinin 3,02 MPa olduğu belirtilmiştir. Xiang vd. [24] tarafından yapılan çalışmada hava fotoğrafçılığına yönelik dört kollu küçük bir İHA'nın gövde yapısı tasarlanmış ve gövde yapısının üç boyutlu modeli tasarlanmıştır. Seçilen malzemenin elastikiyet modülü 2000 MPa, poisson oranı 0,35 ve akma dayanımı 45 MPa olarak belirtilmiştir. Hava aracının kollarındaki fırçasız motorların monte edildiği alanlara 19,11 N dikey kaldırma kuvveti uygulanmış ve sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Kuvvetler nedeniyle meydana gelen gerilme değerinin ise 2,838 MPa olduğu bildirilmiştir. İnspire yazılımı kullanılarak değişken yoğunluk optimizasyonunu işlemi uygulanmıştır. Optimize edilen modelin maksimum gerilme değerinin 11,793 MPa olduğu belirtilmiştir. Sonlu eleman analizi ile elde edilen gerilme diyagramı Şekil 14'te gösterilmiştir.

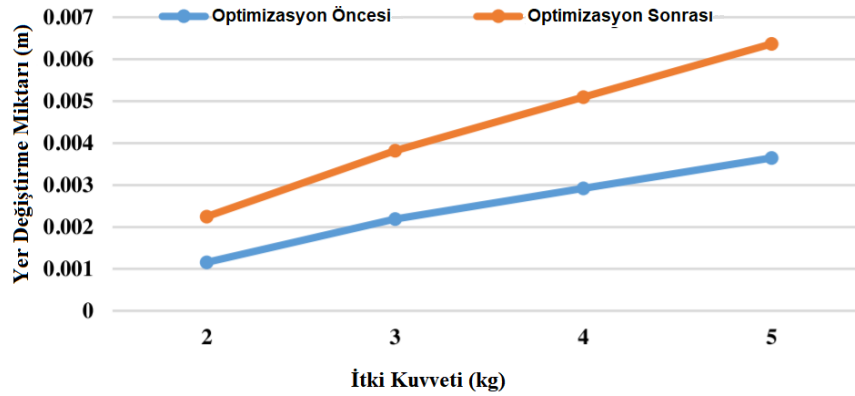


Şekil 14. Sonlu eleman analizi ile elde edilen gerilme diyagramı [24]
(Stress diagram obtained by finite element analysis)

Tang vd. [27] tarafından yapılan çalışmada kafes yapılar için istenilen baskı kalitesinin üretilebilirliğini dikkate alan bir tasarım ve optimizasyon stratejisi önerilmiştir. Bu çalışma ile heterojen yapıya sahip kafeslerin geliştirilmesi hedeflenmiş ve geleneksel topoloji optimizasyonu yöntemiyle (SIMP) elde edilen bir kıyaslama numunesi ile karşılaştırılmıştır. Herhangi bir optimizasyon işlemi uygulanmayan numunelerin Von-Mises gerilme değerlerinin ortalama 15,11 MPa olduğu belirtilmiştir. SIMP yöntemiyle üretilen numunelerin Von-Mises gerilme değerlerinin ise ortalama 2,42 MPa olduğu belirtilmiştir.

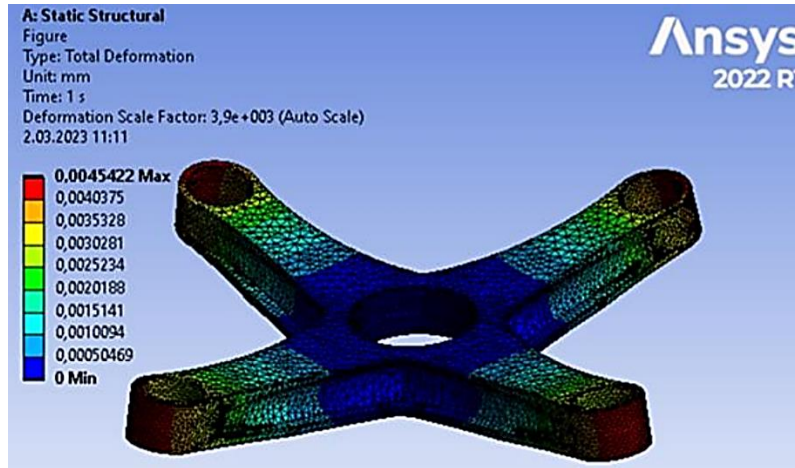
3.1.1. Birim hücre içermeyen topoloji çalışmalarının yapıdaki yer değiştirme miktarına etkisi (The effect of topology studies without unit cells on the amount of displacement in the structure)

Döner kanatlı insansız hava araçlarında birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmaları gerçekleştiren araştırmacılar yapı kütleindeki değişimin yer değiştirme miktarına etkisini incelemişlerdir. Rayed vd. [13] tarafından yapılan çalışmada İHA yapısının optimizasyonu, titreşim ve yorulma özelliklerinin simülasyon sonuçları ile değerlendirilmiştir. İHA yapısının FEA analizi için Polilaktik Asit (PLA) malzeme seçilmiştir. Toplam deformasyonu ve Von-Mises gerilimini belirlemek için ANSYS yazılımı kullanılarak İHA yapısı üzerinde statik yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. PLA malzeme kullanılarak tasarlanan modelin maksimum yer değiştirme değerinin 1,42 mm olduğu belirtilmiştir. Mekanik mukavemetten ödün vermeden kütleyi azaltmak ve stresi en aza indirmek için İHA yapısında topolojik optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimize edilen modelin maksimum yer değiştirme değerinin 3,8 mm olduğu belirtilmiştir. İtme kuvvetinin yer değiştirme değerlerine etkisi Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 15. İtici kuvvetinin yer değiştirme değerlerine etkisi [13]
(Effect of thrust force on displacement values)

Esakki vd. [19] tarafından quadrotor insansız hava aracı şasisinin dayanım-ağırlık oranını artırmak amacıyla yapılan çalışmada üç boyutlu model tasarımı, toplam çapı 770 mm olacak şekilde Catia V5 programında gerçekleştirilmiştir. Modelin dayanım özelliklerini incelemek için her bir motor yatağına 4,9 N kuvvet tanımlaması yapılarak sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç tasarımının maksimum yer değiştirme değerinin 0,64 mm olduğu belirtilmiştir. Gerilme miktarı sınır koşul olacak şekilde İHA şasisinin hafifletilmesi amacıyla topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Optimize edilen modelin dayanım özelliklerini değerlendirebilmek amacıyla yeni tasarım için sonlu eleman analizi uygulanmış ve analiz sonucunda maksimum yer değiştirme değerinin 2,3 mm olduğu belirtilmiştir. Yakın vd. [20] tarafından yapılan çalışmada döner kanatlı insansız hava aracı şasisinin ağırlığını azaltmak hedeflenmiştir. İnsansız hava aracının maruz kalacağı dış kuvvetlere karşı dayanım özelliklerini inceleyebilmek amacıyla sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiş ve gövde üzerinde meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarının 0,00113 mm olduğu belirtilmiştir. Sonlu eleman analizi ile elde edilen yer değiştirme diyagramı Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Sonlu eleman analizi ile elde edilen yer değiştirme diyagramı [20]
(Displacement diagram obtained by finite element analysis)

Tasarımın kütlesini azaltmak için topoloji optimizasyonu işlemi Ansys programında 35 yineleme ile gerçekleştirilmiştir. Optimize edilen şasi tasarımının dayanım özelliklerini inceleyebilmek amacıyla üzerinde sonlu eleman analizi yapılmış ve maksimum yer değiştirme değerinin 0,00454 mm olduğu belirtilmiştir. Nvss vd. [21] tarafından yapılan çalışma ile iki kilogram kalkış ağırlığına sahip bir quadcopter insansız hava aracı gövdesinin hafif yapıda tasarlanması amaçlanmıştır. Belirlenen sınır koşullar altında sonlu eleman analizi gerçekleştirildikten sonra maksimum yer değiştirme değerinin 0,003 mm olduğu bildirilmiştir. Tanımlanan koşullar altında topoloji optimizasyonu işleminin 21 yineleme sonrasında final modele ulaştığı ve optimize edilen modelin maksimum yer değiştirme değerinin 0,14 mm olduğu belirtilmiştir. Xiang vd. [24] tarafından yapılan çalışmada hava fotoğrafçılığına yönelik dört rotorlu küçük bir İHA'nın gövde yapısı tasarlanmış ve gövde yapısının üç boyutlu modeli tasarlanmıştır. Seçilen malzemenin elastikiyet modülü 2000 MPa, poisson oranı 0,35 ve akma dayanımı 45 MPa olarak belirtilmiştir. Hava aracının kollarındaki fırçasız motorların monte

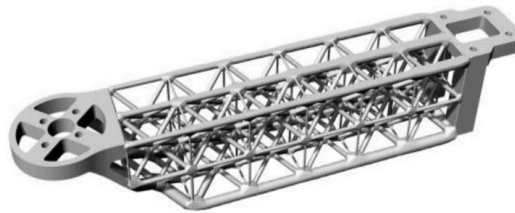
edildiği alanlara 19,11 N dikey kaldırma kuvveti uygulanmış ve sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Kuvvetler nedeniyle meydana gelen gerilme değerinin ise 0,39 olduğu bildirilmiştir. İnspire yazılımı kullanılarak değişken yoğunluk optimizasyonu işlemi uygulanmıştır. Optimize edilen modelin maksimum yer değiştirme değerinin 1,127 mm olduğu belirtilmiştir. Natarajan [25] tarafından yapılan çalışma ile quadcopter insansız hava aracı için hafif yapı bileşenlerin tasarlanması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen hafifletme çalışması sonucunda motor montaj kollarının ağırlığında %31,6 azalma sağlandığında motor montaj kollarındaki yer değiştirme miktarının 4,151 mm olarak ölçüldüğü ve elde edilen yer değiştirme miktarının yeterli olduğu belirtilmiştir. Tang vd. [27] tarafından yapılan çalışmada kafes yapılar için istenilen baskı kalitesinin üretilebilirliğini dikkate alan bir tasarım ve optimizasyon stratejisi önerilerek heterojen yapıya sahip kafeslerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca geleneksel topoloji optimizasyonu yöntemiyle (SIMP) elde edilen bir kıyaslama numunesi de üretilmiştir. Herhangi bir optimizasyon işlemi uygulanmayan numunelerin yer değiştirme değerlerinin ortama 4,834 mm olduğu ve SIMP yöntemiyle üretilen numunelerin yer değiştirme değerlerinin ise ortalama 0,354 mm olduğu belirtilmiştir.

3.2. Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu çalışmaları (Topology optimization studies including unit cells)

Birim hücre yapısı içeren topoloji optimizasyonu çalışmaları genellikle CAD programları bünyesinde bulunan kafes yapı araçları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kafes yapı araçları topolojik optimizasyon yaparken birim hücre şeklindeki yapıları yan yana ve üst üste dizerek içerisinde boşluklar bulunan bir iskelet sistemi oluşturmaktadır. Bu iskelet sistemi başlangıçta kalınlık değeri bulunmayan bir tel kafes şeklinde oluşturulmakta ve daha sonra gerekli kalınlık değeri tanımlanarak katı modele dönüştürülmektedir.

Bir parçaya birim hücre içeren topoloji optimizasyonu uygulanırken parçanın tamamında büyük boşluklar meydana gelmesi nedeniyle parçada yer alan bağlantı yüzeyleri, civata ve pim delikleri gibi fonksiyonel yüzeyler tecrit edilerek optimizasyon işleminden hariç tutulmaktadır.

Döner kanatlı insansız hava araçları için yapılan birim hücre içeren topoloji optimizasyonu çalışmaları incelendiğinde genellikle giriş tasarımı konusunda optimizasyon yapıldığı, diğer parçaların ise nadiren optimize edildiği görülmektedir. Ayrıca döner kanatlı insansız hava araçları için gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarında genellikle farklı birim hücre yapılarının birbirleriyle mukayese edildikleri görülmektedir. Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu yönteminin döner kanatlı insansız hava aracı tasarımında kullanımı Şekil 17’de gösterilmiştir.



Şekil 17. Birim hücre yapısı kullanılarak tasarlanan döner kanatlı insansız hava aracı kolu [27]
(Rotary wing unmanned aerial vehicle arm designed using unit cell structure)

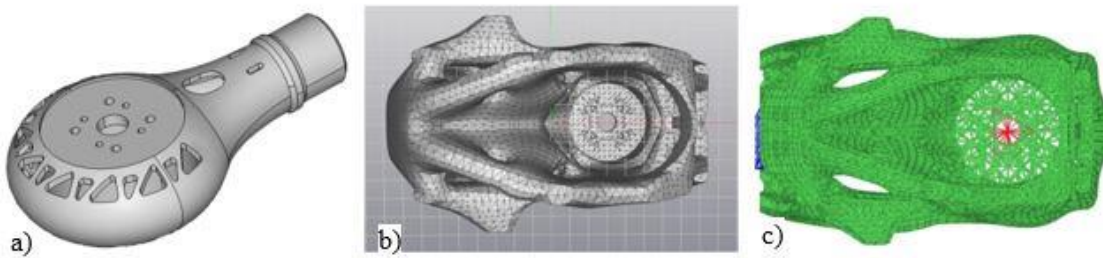
Döner kanatlı insansız hava aracı tasarımı konusunda literatürde bulunan ve birim hücre içeren çalışmalarda optimize edilen fonksiyonel parçaların dağılımı Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Döner kanatlı insansız hava aracı tasarımında birim hücre kullanılarak optimize edilen parçalar (Parts optimized using unit cells in rotary wing unmanned aerial vehicle design)

Parçalar	Literatürdeki Çalışmalar										
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Gövde											
Merkezi											
Kol											
Kirişi	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Diğer											
Parçalar		✓		✓							

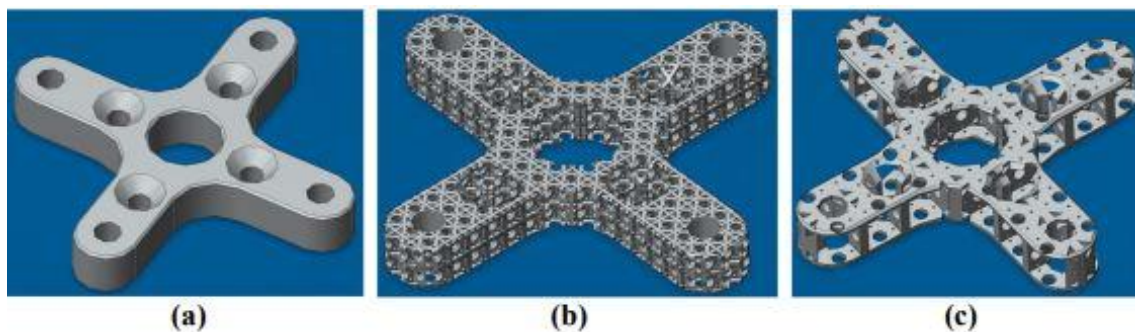
3.2.1. Birim hücre içeren topoloji çalışmalarının yapı ağırlığına etkisi (The effect of topology studies including unit cells on structure weight)

Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu çalışmalarının döner kanatlı insansız hava araçlarında yapı ağırlığına etkisi incelendiğinde araştırmacıların tasarım kütlelerini azaltmayı hedefledikleri ve bu amaçla kafes yapıların dayanım özelliklerinden yararlandıkları görülmektedir. Sripada [28] tarafından yapılan çalışma ile sağlam ve hafif yapıya sahip drone motor montaj parçası tasarlanması hedeflenmiştir. Optimizasyon işlemi %25 ile %40 arasındaki hacim oranları için gerçekleştirilmiştir. Yapılan optimizasyon işlemleri sonucunda %25 hacim oranına sahip modelin en uygun yapıda olduğu belirtilmiştir. Modelin iç yapısını kafeslerden oluşacak şekilde düzenleyebilmek için “nTopology” firması tarafından geliştirilen Element Pro yazılımı kullanılmıştır. Kenar uzunluğu 5 mm olan tetrahedral yapıya sahip bir kafes tasarımı yapılmıştır. Kafes kirişlerinin kalınlığı 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm olacak şekilde üç farklı durum için kafes optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve modelin tamamen kafes yapıya sahip olması sağlanmıştır. Kafes kirişlerinin kalınlığı 1 mm olan modelin kütlesi 224 gr, kafes kirişlerinin kalınlığı 1,5 mm olan modelin kütlesi 505,5 gr ve kafes kirişlerinin kalınlığı 2 mm olan modelin kütlesi ise 898,67 gr olarak belirtilmiştir. Optimizasyon süreci Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18. Optimizasyon süreci a) başlangıç modeli b) optimize edilen model c) kafes yapılı model [28]
(Optimization process a) initial model b) optimized model c) lattice structure model)

Palomba vd. [29] ekosistem gözleminde kullanılmak üzere tasarlanan quadcopter dronlarda yenilikçi hafif tasarım çözümleri geliştirmek için yaptıkları çalışmada topolojik açıdan iki farklı birim hücre yapısını incelemişlerdir. Drone kollarının üretiminde F-RD kafes yapısının kullanılması durumunda ağırlığın 1,8 kg olacağı, HS kafes yapısının kullanılması durumunda ise ağırlığın 1,9 kg olacağını belirtmişlerdir. Laporte [30] tarafından yapılan çalışmada fırçasız motorun hava aracı gövdesine sabitlenmesini sağlayan tutucunun kütlelerini azaltırken, mekanik kuvvetlere ve motorun neden olduğu titreşimlere karşı direnç gösterme yeteneğini korumak hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan birim hücre yapısının organik ilhamlı (ORG) kafes olduğu ve içinin boş olduğu belirtilmiştir. ORG kafeslerinden oluşan farklı türde birim hücreler Catia yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve Fusion 360 Autodesk yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Her biri 2,5x2,5x2,5 mm boyutlarında 202 birim hücreden oluşan yapı “Lattice 202” olarak adlandırılmış ve her biri 5x5x5 mm boyutlarında 28 birim hücreden oluşan yapı “Kafes 28” olarak adlandırılmıştır. Tutucu tasarımı üzerine toplamda 11,67 N değerinde bir itme kuvveti uygulanarak sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç tasarımı kütlelerinin 5 gram olduğu, Lattice 202 adlı kafeslerden oluşan yapı kütlelerinin 2,2 gram olduğu, yani gerçek tutucuya göre %56 daha az olduğu belirtilmiştir. Lattice 28 adlı kafeslerden oluşan yapı kütlelerinin 2 gram olduğu, yani başlangıç modeline kıyasla %60 daha az olduğu belirtilmiştir. Gerçekleştirilen tasarımlar Şekil 19’da gösterilmiştir.



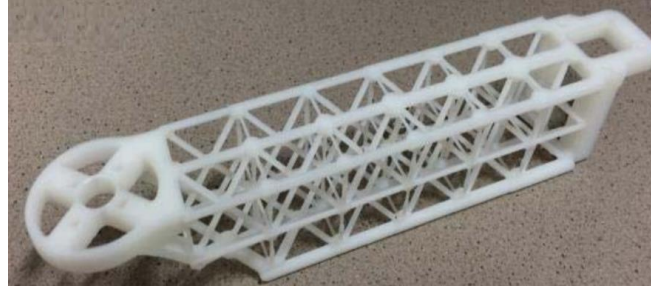
Şekil 19. Tutucu tasarımları a) başlangıç modeli b) Lattice 202 modeli c) Lattice 28 modeli [30]
(Holder designs a) starter model b) Lattice 202 model c) Lattice 28 model)

Wang ve Tamijani [31] tarafından yapılan çalışmada, bir quadcopter kolunun iç yapıları, kübik kafes ve sekizli kafes yapısı kullanılarak tasarlandıktan sonra geleneksel optimizasyon yöntemleri kullanılarak elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre sekizli kafes yapısının kübik kafes yapısına oranla daha izotropik davranış sergilediği belirtilmiştir. Periyodiklik parametresi 0,9 olduğunda ön görülen hacim oranının %34,11 olduğu belirtilmiştir. Ren vd. [32] tarafından yapılan çalışmada heterojen yapıların performansını ve işlevini daha da geliştirmek için geometrik sürekliliğe sahip çok ölçekli ve çoklu TPMS kafeslerin optimal tasarım yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak amacıyla sonlu elemanlar analizi ve deneysel doğrulama yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde Sınıf-P-IWP numunenin ağırlığı 79,8 gram, Sınıf-P numunenin ağırlığı 78,1 gram ve Sınıf-IWP numunenin ağırlığı 79,6 gram olarak belirtilmiştir. Oliveira ve Carvalho [33] tarafından yapılan çalışmada çok rotorlu bir drone'un iskeletini üretmek için tüketici sınıfı eklemeli imalat malzemelerinin kullanılmasının uygulanabilirliğini değerlendirmek ve mekanik performansını incelemek amaçlanmıştır. Simülasyonlar ve sonlu eleman analizleri için ABS malzeme seçilmiştir. ABS malzemenin bükülme ve çekme dayanımlarının sırasıyla 19,73 MPa ve 14,5 MPa olduğu belirtilmiştir. Aynı dış görünüme sahip fakat üst düzlem ile alt düzlem arasındaki bölgenin doldurulma şekli farklı olan dört çeşit tasarım oluşturulmuştur. Bu tasarımlar; içi tam dolu, içi boş, içi kafes dolgulu ve içi ızgara dolgulu olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Tam dolu modelin kütlesinin 333,38 g olduğu belirtilmiştir. İçi boş olan tasarımın kütlesinin 109,59 g olduğu, içi kafes dolgulu olan tasarımın kütlesinin 141,30 g olduğu ve içi ızgara dolgulu olan tasarımın kütlesinin 131,18 g olduğu belirtilmiştir. Zhang vd. [34] tarafından yapılan çalışmada, yeni bir kafes yapı oluşturulmuş ve geliştirilen yöntemin performansı, mevcut kafes yapı optimizasyonu yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Yaptıkları çalışmada, x-y düzlemindeki kafes özelliklerine odaklanıldığı belirtilmiş ve farklı hacim kesri kısıtlamalarına uygun olmak üzere üç kafes grubu, sırasıyla x eksen yönünde maksimum çekme modülüne, y eksen yönünde maksimum çekme modülüne ve x-y düzlemi içinde maksimum kesme modülüne sahip olacak şekilde topoloji optimizasyonu yoluyla tasarlanmıştır. Tasarlanan kafes grupları farklı kombinasyonlar halinde birbirleriyle birleştirilerek çeşitli kafes yapı biçimleri elde edilmiştir. Çalışmada öngörülen destek ve yükleme koşulu altında yapısal deformasyonu en aza indiren malzeme yoğunluk dağılımını bulmayı amaçlayan minimum uyumluluk problemi araştırılmıştır. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak amacıyla giriş modeli üzerinde üç noktalı bükme deneyleri gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Kütle hafifletme oranı %40 olarak belirlenerek optimize edilmiş olan giriş modellerinin üretiminde sıvı reçineyi katı yapılara dönüştüren eklemeli imalat yöntemi kullanıldığı belirtilmiştir. Bükme testlerini kullanılacak olan her bir giriş modelinden 120x30x20 ebatlarında ikişer adet üretildiği ve bükme deneylerinin universal bir test cihazında 2 mm/s ilerleme hızıyla gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Nihai tasarımın hacminin 48750 mm³ olduğu ve ilk tasarıma göre %24,92 azalma gösterdiği bildirilmiştir. Patel vd. [35] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çeşitli kafes yapılarını analiz etmek ve insansız hava araçları için en uygun dayanım özelliklerine sahip yapıyı tespit etmek amaçlanmıştır. Çalışmada bal peteği yapısı, kagome yapısı ve piramit yapısı olmak üzere üç çeşit kafes yapısı incelenmiştir. Ölçüleri 20 x 20 x 100 mm olan girişler tasarlanmış ve girişlerin her biri kafes yapıları ile doldurularak sandviç panel haline getirilmiştir. Birim hücrelerin duvar kalınlığı değerlerinin 1 mm ile 2 mm arasında olacak şekilde tasarlandığı belirtilmiştir. Bal peteği şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 5 çeşit, kagome şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 6 çeşit ve piramit şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 6 çeşit tasarlandığı belirtilmiştir. Tasarlanan panellerin eklemeli imalat yöntemiyle üretimi, Akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzeme kullanılarak FDM yazıcıda gerçekleştirilmiştir. Yapıların dayanım özelliklerini incelemek için Solidworks yazılımında panellere 15 N kuvvet uygulanarak üç nokta bükme testi uygulayarak statik analiz gerçekleştirilmiştir. Kagome yapısının 54,7 N/gram değeri ile en yüksek dayanım-ağırlık oranına sahip model olduğu belirtilmiştir.

3.2.2. Birim hücre içeren topoloji çalışmalarının yapı gerilimine etkisi (The effect of topology studies including unit cells on structure stress)

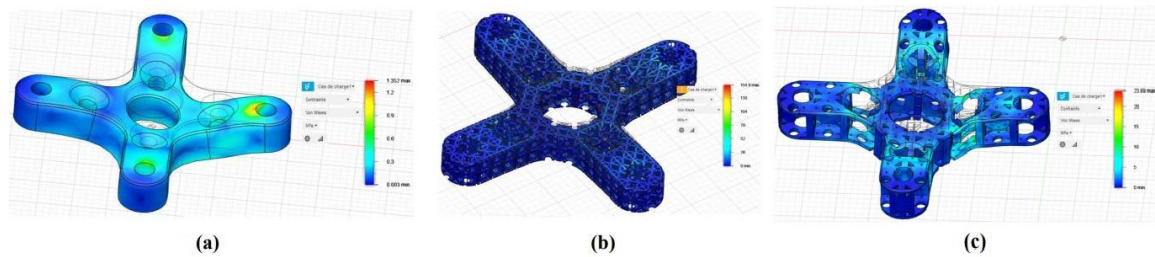
Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu çalışmalarının döner kanatlı insansız hava araçlarında yapı gerilimine etkisi incelendiğinde araştırmacıların optimizasyon işlemi sonucunda meydana gelen yapısal gerilme miktarını analiz ettikleri görülmektedir. Tang vd. [27] tarafından yapılan çalışmada kafes yapıları için istenilen baskı kalitesinin üretilebilirliğini dikkate alan bir tasarım ve optimizasyon stratejisi önerilmiştir. Kafes çerçeve oluşturmak için hexahedron birim hücreler periyodik olarak dizilerek tasarım hacmi birim hücreler ile doldurulmuştur. Deney numuneleri üretmek üzere FDM yöntemi seçilmiştir. FDM yazıcısı olarak Zortrax M200, baskı malzemesi olarak ise Z-ABS tercih edilmiştir. Herhangi bir optimizasyon işlemi uygulanmayan numunelerin Von Mises gerilim değerlerinin ise ortalama 15,11 MPa olduğu belirtilmiştir. Optimizasyon işlemi sonrasında kafes yapıya

sahip numunelerin Von Mises gerilim değerlerinin ortama 4,351 MPa olduğu belirtilmiştir. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen yapı Şekil 20'de gösterilmiştir.



Şekil 20. Eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen yapı [27]
(Structure produced using the additive manufacturing method)

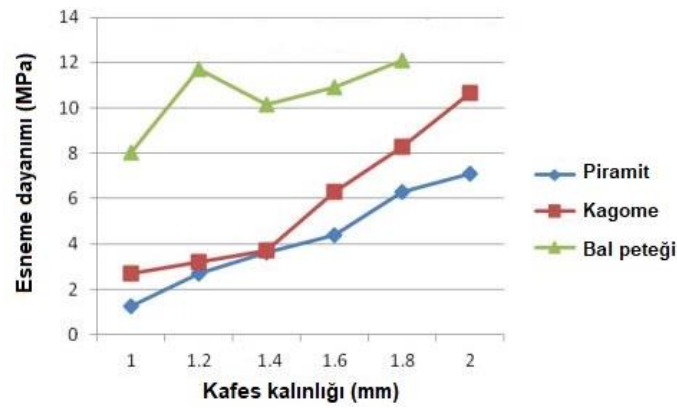
Palomba vd. [29] ekosistem gözleminde kullanılmak üzere tasarlanan quadcopter dronlarda yenilikçi hafif tasarım çözümleri geliştirmek için yaptıkları çalışmada topolojik açıdan iki farklı birim hücre yapısını incelemişlerdir. Deney numunelerinin üretiminde ergiyik biriktirme yöntemi (FDM) kullanılmış ve üretim malzemesi olarak polilaktik asit (PLA) tercih edilmiştir. Numunelere basma testleri 25 kN kapasiteli Italsigma marka test cihazı kullanılarak 2 mm/dak ve 5 mm/dak ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan basma testleri sonucunda F-RD kafes yapısına sahip numunelerin maksimum 4,5 MPa dayanım gösterdiği, HS kafes yapısına sahip numunelerin ise maksimum 4,0 MPa dayanım gösterdiği belirtilmiştir. Laporte [30] tarafından yapılan çalışmada fırçasız motorun hava aracı gövdesine sabitlenmesini sağlayan tutucunun kütlesini azaltırken, mekanik kuvvetlere ve motorun neden olduğu titreşimlere karşı direnç gösterme yeteneğini korumak hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan birim hücre yapısının organik ilhamlı (ORG) kafes olduğu ve içinin boş olduğu belirtilmiştir. ORG kafeslerinden oluşan farklı türde birim hücreler Catia yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve Fusion 360 Autodesk yazılımı kullanılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Her biri 2,5x2,5x2,5 mm boyutlarında 202 birim hücreden oluşan yapı "Lattice 202" olarak adlandırılmış ve her biri 5x5x5 mm boyutlarında 28 birim hücreden oluşan yapı "Kafes 28" olarak adlandırılmıştır. Tutucu tasarımı üzerine toplamda 11,67 N değerinde bir itme kuvveti uygulanarak sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç tasarımının gerilme değerinin 1,352 MPa olduğu, "Lattice 202" kafeslerden oluşan yapının gerilme değerinin 154,9 MPa olduğu ve "Lattice 28" kafeslerden oluşan yapının gerilme değerinin 23,89 MPa olduğu belirtilmiştir. Sonlu eleman analizi ile elde edilen gerilme diyagramı Şekil 21'de gösterilmiştir.



Şekil 21. Analiz sonucunda elde edilen gerilme diyagramları a) başlangıç tasarımı b) Lattice 202 c) Lattice 28 [30]
(Stress diagrams obtained by analysis a) initial design b) Lattice 202 c) Lattice 28)

Ren vd. [32] tarafından yapılan çalışmada heterojen yapıların performansını ve işlevini daha da geliştirmek için geometrik sürekliliğe sahip çok ölçekli ve çoklu TPMS kafeslerin optimal tasarım yöntemi önerilmiştir. Kafes yapılar, üçlü periyodik minimal yüzeylerden (TPMS) türetilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak amacıyla sonlu elemanlar analizi ve deneysel doğrulama yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde Sınıf-P-IWP numunenin maksimum kuvveti 260,8 N, Sınıf-P numunenin maksimum kuvveti 231,4 N ve Sınıf-IWP numunenin maksimum kuvveti 171,4 N mm olarak belirtilmiştir. Oliveira ve Carvalho [33] tarafından yapılan çalışmada çok rotorlu bir drone'un iskeletini üretmek için tüketici sınıfı eklemeli imalat malzemelerinin kullanılmasının uygulanabilirliğini değerlendirmek ve mekanik performansını incelemek amaçlamıştır. Simülasyonlar ve sonlu eleman analizleri için ABS malzeme seçilmiştir. ABS malzemenin bükülme ve çekme dayanımlarının sırasıyla 19,73 MPa ve 14,5 MPa olduğu belirtilmiştir. Aynı dış görünüme sahip fakat üst düzlem ile alt düzlem arasındaki bölgenin doldurulma şekli farklı olan dört çeşit tasarım oluşturulmuştur. Bu tasarımlar; içi tam dolu, içi boş, içi kafes dolgulu ve içi ızgara dolgulu olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Tam dolu

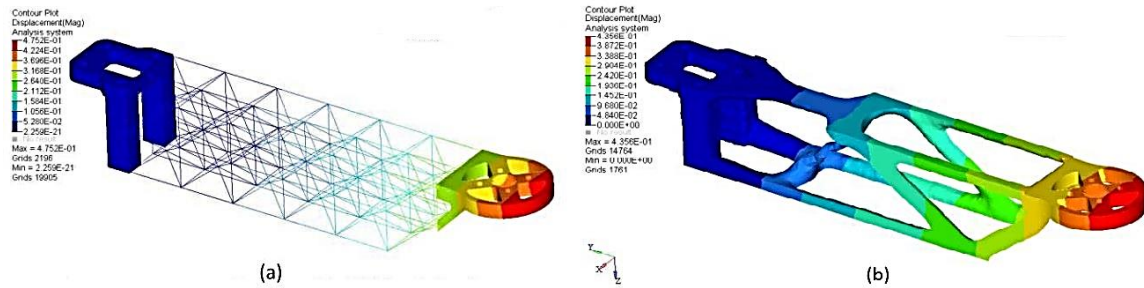
modelin maksimum gerilme değerinin 0,215 MPa olduğu, içi boş olan tasarımın maksimum gerilme değerinin 0,484 MPa olduğu, içi kafes dolgu olan tasarımın maksimum gerilme değerinin 0,509 MPa olduğu ve içi ızgara dolgu olan tasarımın maksimum gerilme değerinin 0,479 MPa olduğu belirtilmiştir. Patel vd. [35] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çeşitli kafes yapılarını analiz etmek ve insansız hava araçları için en uygun dayanım özelliklerine sahip yapıyı tespit etmek amaçlanmıştır. Çalışmada bal peteği yapısı, kagome yapısı ve piramit yapısı olmak üzere üç çeşit kafes yapı incelenmiştir. Ölçüleri 20 x 20 x 100 mm olan kirişler tasarlanmış ve kirişlerin her biri kafes yapılar ile doldurularak sandviç panel haline getirilmiştir. Birim hücrelerin duvar kalınlığı değerlerinin 1 mm ile 2 mm arasında olacak şekilde tasarlandığı belirtilmiştir. Bal peteği şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 5 çeşit, kagome şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 6 çeşit ve piramit şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 6 çeşit tasarlandığı belirtilmiştir. Tasarlanan panellerin eklemeli imalat yöntemiyle üretimi, Akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzeme kullanılarak FDM yazıcıda gerçekleştirilmiştir. Yapıların dayanım özelliklerini incelemek için Solidworks yazılımında panellere 15 N kuvvet tatbik edilerek üç nokta bükme testi uygulanmış ve statik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen dayanım grafiği Şekil 22’de verilmiştir.



Şekil 22. Esneme dayanımı-kafes kalınlığı grafiği [35]
(Deflection strenght-lattice thickness graph)

3.2.3. Birim hücre içeren topoloji çalışmalarının yapıdaki yer değiştirme miktarına etkisi (The effect of topology studies including unit cells on the amount of displacement in the structure)

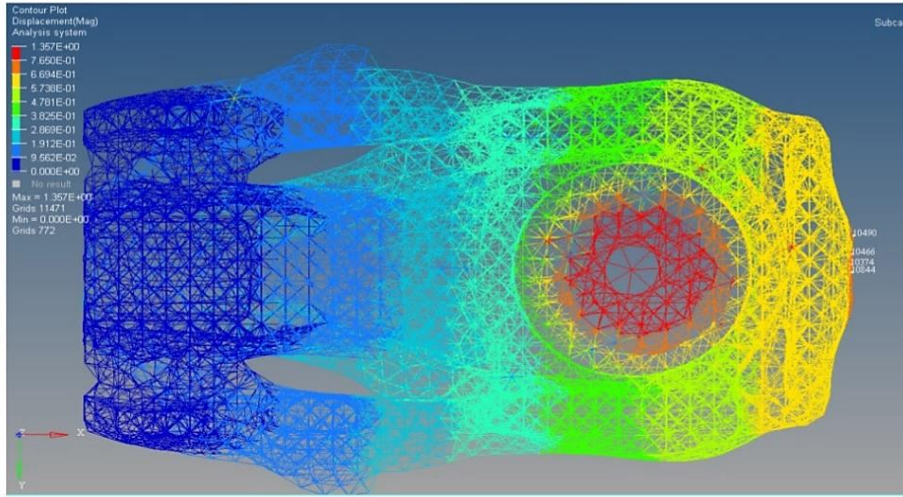
Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmaları gerçekleştiren araştırmacılar döner kanatlı insansız hava araçlarının yapı kütleindeki değişimin maksimum yer değiştirme miktarına etkisini incelemişlerdir. Tang vd. [27] tarafından yapılan çalışmada kafes yapılar için istenilen baskı kalitesinin üretilebilirliğini dikkate alan bir tasarım ve optimizasyon stratejisi önerilerek heterojen yapıya sahip kafeslerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca geleneksel topoloji optimizasyonu yöntemiyle (SIMP) elde edilen bir kıyaslama numunesi de üretilmiştir. Herhangi bir optimizasyon işlemi uygulanmayan numunelerin yer değiştirme değerlerinin ortalama 4,834 mm olduğu, homojen kafes yapıya sahip numunelerin maksimum yer değiştirme değerlerinin ortalama 0,875 mm olduğu ve SIMP yöntemiyle üretilen numunelerin yer değiştirme değerlerinin ise ortalama 0,354 mm olduğu belirtilmiştir. Analiz edilen modeller Şekil 23’te gösterilmiştir.



Şekil 23. Analiz edilen modeller a) Heterojen kafes yapısı b) SIMP yöntemi ile tasarlanmış yapı [27]
(Analyzed models a) Heterogeneous lattice structure b) Structure designed with the SIMP method)

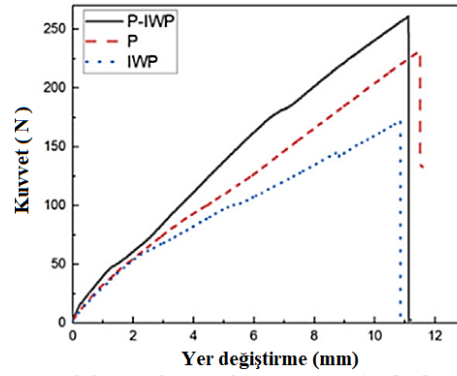
Sripada [28] tarafından yapılan çalışma ile sağlam ve hafif yapıya sahip drone motor montaj parçası tasarlanması hedeflenmiştir. Motor bağlantı bölgesi ve drone kolu bağlantı bölgesi için ölçü sınırlamaları içeren bir blok model, CAD programı kullanılarak tasarlanmış ve OptiStruct programına

aktarılmıştır. Modelin 0,77 mm yer değiştirme miktarına sahip olduğu belirtilmiştir. Blok model üzerinde bulunan montaj bölgeleri seçilerek sabit tutulan bölge olarak belirlenmiş ve optimizasyon uygulanmıştır. Element Pro yazılımı kullanılarak modelin içyapısı düzenlenmiş ve kafeslerden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Kafes kirişlerinin kalınlığı 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm olacak şekilde üç farklı durum için kafes optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve modelin tamamen kafes yapıya sahip olması sağlanmıştır. Yapılan analiz sonucunda kafes kirişlerinin kalınlığı 1 mm olan modelin yer değiştirme değeri 0,675 mm, kafes kirişlerinin kalınlığı 1,5 mm olan modelin yer değiştirme değeri 0,35 mm ve kafes kirişlerinin kalınlığı 2 mm olan modelin yer değiştirme değeri ise 0,2 mm ölçüldüğü belirtilmiştir. Kafes kirişlerinin kalınlığı 1 mm olan modelin yer değiştirme diyagramı Şekil 24'te gösterilmiştir.



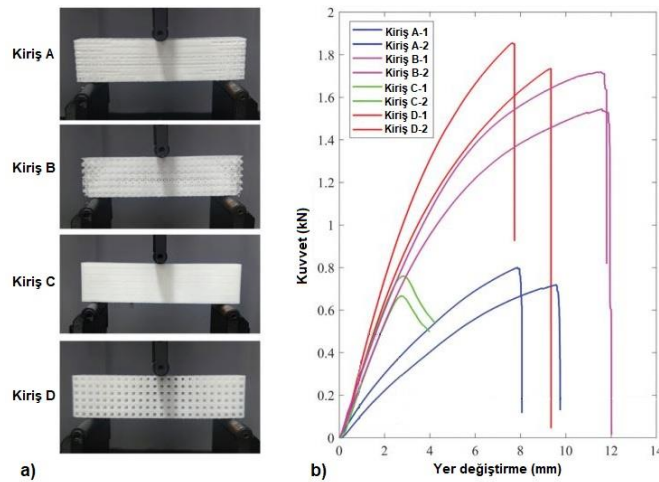
Şekil 24. Kafes kirişlerinin kalınlığı 1 mm olan modelin yer değiştirme diyagramı [28]
(Displacement diagram of the model with 1 mm thickness of the truss)

Laporte [30] tarafından yapılan çalışmada fırçasız motorun hava aracı gövdesine sabitlenmesini sağlayan tutucunun kütesini azaltırken, mekanik kuvvetlere ve motorun neden olduğu titreşimlere karşı direnç gösterme yeteneğini korumak hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan birim hücre yapısının organik ilhamlı (ORG) kafes olduğu ve içinin boş olduğu belirtilmiştir. ORG kafeslerinden oluşan farklı türde birim hücreler Catia yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve Fusion 360 Autodesk yazılımı kullanılarak simülasyonu yapılmıştır. Her biri 2,5x2,5x2,5 mm boyutlarında 202 birim hücreden oluşan yapı "Lattice 202" olarak adlandırılmış ve her biri 5x5x5 mm boyutlarında 28 birim hücreden oluşan yapı "Kafes 28" olarak adlandırılmıştır. Tutucu tasarımı üzerine toplamda 11,67 N değerinde bir itme kuvveti uygulanarak sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç tasarımının yer değiştirme değerinin 1,23e-4 mm olduğu, "Lattice 202" kafeslerden oluşan yapının yer değiştirme değerinin 9,717e-3 mm olduğu ve "Lattice 28" kafeslerden oluşan yapının yer değiştirme değerinin 2,619e-3 mm olduğu belirtilmiştir. Ren vd. [32] tarafından yapılan çalışmada heterojen yapıların performansını ve işlevini daha da geliştirmek için geometrik sürekliliğe sahip çok ölçekli ve çoklu TPMS kafeslerin optimal tasarım yöntemi önerilmiştir. Kafes yapılar, üçlü periyodik minimal yüzeylerden (TPMS) türetilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak amacıyla sonlu elemanlar analizi ve deneysel doğrulama yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde Sınıf-P-IWP numunenin maksimum yer değiştirmesi 11,1 mm, Sınıf-P numunenin maksimum yer değiştirmesi 11,5 mm ve Sınıf-IWP numunenin maksimum yer değiştirmesi 10,8 mm olarak belirtilmiştir. Numunelere uygulanan yük sonucunda elde edilen grafik Şekil 25'te gösterilmiştir.



Şekil 25. Yük - yer değiştirme grafiği [32]
(Load - displacement graph)

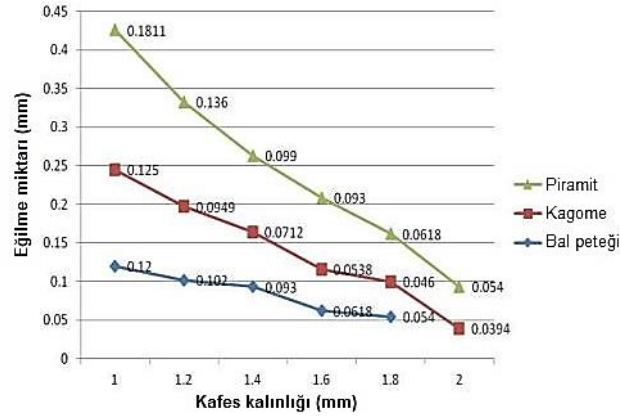
Li vd. [36] tarafından yapılan çalışmada, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş hücreli yapıların istenen mekanik özelliklere uygun tasarlanması için yeni bir optimizasyon stratejisi geliştirilmiştir. Sonlu eleman analizi ile inceleme yapmak için sade gyroid kafes, standart topoloji optimizasyonu, geliştirilen yaklaşım (Şekil korumalı FGCS) ve yön korumalı FGCS olmak üzere dört farklı optimizasyon stratejisi değerlendirmeye alınmıştır. Katı modeller ile yapılan deneylerin sonucunda sade gyroid kafes yapısı ile üretilen modelin 1,843 mm yer değiştirme değerine sahip olduğu, FGCS optimizasyonu ile üretilen modelin ise 1,020 mm yer değiştirme değerine sahip olduğu belirtilmiştir. Zhang vd. [34] tarafından yapılan araştırmada, yeni bir kafes yapı oluşturulmuş ve geliştirilen yöntemin performansı, mevcut kafes yapı optimizasyonu yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Yaptıkları çalışmada, x-y düzlemindeki kafes özelliklerine odaklanıldığı belirtilmiş ve farklı hacim kesri kısıtlamalarına uygun olmak üzere üç kafes grubu, sırasıyla x ekseninde maksimum çekme modülüne, y ekseninde maksimum çekme modülüne ve x-y düzlemi içinde maksimum kesme modülüne sahip olacak şekilde topoloji optimizasyonu yoluyla tasarlanmıştır. Tasarlanan kafes grupları farklı kombinasyonlar halinde birbirleriyle birleştirilerek çeşitli kafes yapı biçimleri elde edilmiştir. Çalışmada öngörülen destek ve yükleme koşulu altında yapısal deformasyonu en aza indiren malzeme yoğunluk dağılımını bulmayı amaçlayan minimum uyumluluk problemi araştırılmıştır. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak amacıyla kiriş modeli üzerinde üç noktalı bükme deneyleri gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Kütle hafifletme oranı %40 olarak belirlenerek optimize edilmiş olan kiriş modellerinin üretiminde sıvı reçineyi katı yapıya dönüştüren eklemeli imalat yöntemi kullanıldığı belirtilmiştir. Bükme testlerinde kullanılacak olan her bir kiriş modelinden 120x30x20 ebatlarında ikişer adet üretildiği ve bükme deneylerinin universal bir test cihazında 2 mm/s ilerleme hızıyla gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Bükme deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 26'da gösterilmiştir.



Şekil 26. Bükme deneyi ve sonuçları a) bükme deneyleri b) kuvvet - yer değiştirme grafiği [34]
(Force - displacement graph)

Patel vd. [35] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çeşitli kafes yapılarını analiz etmek ve insansız hava araçları için en uygun dayanım özelliklerine sahip yapıyı tespit etmek amaçlanmıştır. Çalışmada bal peteği yapısı, kagome yapısı ve piramit yapısı olmak üzere üç çeşit kafes yapısı incelenmiştir. Ölçüleri 20 x 20 x 100 mm olan kirişler tasarlanmış ve kirişlerin her biri kafes yapılar ile doldurularak

sandviç panel haline getirilmiştir. Birim hücrelerin duvar kalınlığı değerlerinin 1 mm ile 2 mm arasında olacak şekilde tasarlandığı belirtilmiştir. Bal peteği şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 5 çeşit, kagome şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 6 çeşit ve piramit şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 6 çeşit tasarlandığı belirtilmiştir. Tasarlanan panellerin eklemeli imalat yöntemiyle üretimi, Akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzeme kullanılarak FDM yazıcıda gerçekleştirilmiştir. Yapıların dayanım özelliklerini incelemek için Solidworks yazılımında panellere 15 N kuvvet tatbik edilerek üç nokta bükme testi uygulanmış ve statik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen yer değiştirme grafiği Şekil 27’de verilmiştir.



Şekil 27. Eğilme-kafes kalınlığı grafiği [35]
(Deflection-lattice thickness graph)

Zhou vd. [37] tarafından yapılan çalışmada, özelleştirilebilir mekanik özellikler elde etmek için kafes yapıların mimari özellikleri değiştirilen çoklu morfolojiye sahip kompozit kafes yapılar incelenmiştir. I-Wrap Packet (IWP) kafes yapısı ile ilkel kafes (P) yapısı birleştirilerek kompozit bir yapı (IWP-P) elde edilmiştir. IWP, IWP-P izotropik ve IWP-P anizotropik olmak üzere üç farklı optimizasyon tasarımı gerçekleştirilmiş ve sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Sonlu eleman analizleri sonucunda; IWP kafes ile tasarlanan modelin maksimum yer değiştirme miktarı 0,96 mm, IWP-P izotropik kafes ile tasarlanan modelin maksimum yer değiştirme miktarı 0,73 mm ve IWP-P anizotropik kafes ile tasarlanan modelin maksimum yer değiştirme miktarı 0,65 mm olarak belirtilmiştir. IWP-P izotropik kafes ile tasarlanan modelin maksimum yer değiştirme miktarında %23,96 ve IWP-P anizotropik kafes ile tasarlanan modelin maksimum yer değiştirme miktarında %32,29 azalma olduğu belirtilmiştir.

4. Tartışma ve Bulgular (Discussion and Findings)

Literatürde bulunan ve döner kanatlı insansız hava araçları için gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu çalışmaları incelendikten sonra elde edilen bulgular başlıklar halinde tartışılmıştır.

Birim hücre içermeyen topoloji çalışmaları incelendiğinde literatürdeki çalışmalar ile genellikle yapı ağırlığının, yapıdaki iç gerilmelerin ve kuvvete maruz kalan yapıdaki maksimum yer değiştirme değerlerinin araştırıldığı görülmüştür. Bazı çalışmalarda [12,29] modal analiz yapılarak frekans değerlerinin de araştırıldığı, bazı çalışmalarda [12,20] ise yorulma dayanımı değerlerinin araştırıldığı görülmüştür. Birim hücre içeren topoloji çalışmaları incelendiğinde literatürdeki çalışmalar ile genellikle yapı ağırlığının, yapıdaki iç gerilmelerin ve kuvvete maruz kalan yapıdaki yer değiştirme değerlerinin araştırıldığı görülmüştür. İncelenen çalışmalarda genel olarak döner kanatlı insansız hava araçlarında kol tasarımının optimize edildiği görülmüştür. Fakat bir çalışmada [28] kol bağlantı parçasının optimize edildiği, başka bir çalışmada [30] ise motor bağlantı parçasının optimize edildiği görülmüştür. Birim hücre içeren optimizasyon çalışmalarında, başlangıç tasarımının gelişimini incelemekten ziyade TPMS, gyroid, hexahedron vb. gibi farklı birim hücre yapılarının dayanım özelliklerinin araştırıldığı görülmüştür. Fakat bazı çalışmalarda [26,27,29,33] başlangıç tasarımına ait verilerin de yer aldığı görülmüştür.

4.1. Yapı ağırlığındaki değişim için elde edilen bulguların tartışılması (Discussion of the findings for the change in structure weight)

Döner kanatlı insansız hava araçlarında yapı ağırlığını azaltmayı hedefleyen topoloji optimizasyonu çalışmaları incelendiğinde birim hücre içermeyen çalışmalarda genellikle kütle azaltma oranının %20

ile %60 arasında olduğu görülmüş iken birim hücre içeren çalışmalarda bu oranın %57 [33] ile %60 [30] arasında olduğu görülmüştür. Birim hücre içermeyen bazı çalışmalarda [12] hafifletme oranının %60 değerinden fazla olduğu, bazı çalışmalarda [12,18] ise %20 değerinden az olduğu görülmüştür. Fakat birim hücre kullanılarak gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu çalışmalarında başlangıç tasarımının ağırlığına ilişkin verilerin bazı çalışmalarda bulunmaması nedeniyle birim hücre yapısı kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon işleminin başlangıç tasarımındaki ağırlığa etkisinin incelenmediği görülmüştür. Yapılan çalışmaların sonuçları incelendiğinde araştırmacıların uyguladıkları optimizasyon işlemleri sayesinde hava araçlarının kütlelerinde azalma meydana gelmesine rağmen yapısal dayanımın korunduğu görülmüştür.

4.2. Yapı gerilimindeki değişim için elde edilen bulguların tartışılması (Discussion of the findings obtained for the change in structure stress)

Döner kanatlı insansız hava araçlarında uygulanan topoloji optimizasyonu çalışmaları incelendiğinde topoloji optimizasyonu işlemi öncesindeki modelin gerilme değerlerinin optimizasyon sonrasındaki modelin gerilme değerlerinden genel olarak daha düşük olduğu belirtilmiştir. Araştırmacıların bu sonucunu destekleyen ve birim hücre içermeyen bir çalışmada [13] verilen gerilme-kuvvet grafiği incelendiğinde, optimizasyon işlemi nedeniyle yapı geriliminin arttığı ve optimize edilen yapıdaki gerilim-kuvvet eğrisinin eğiminde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Fakat birim hücre içermeyen iki çalışmada [18,26] ve birim hücre içeren bir çalışmada [27] optimizasyon işlemi nedeniyle model üzerinde oluşan gerilme değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Birim hücre içeren bir çalışmada [35] verilen esneme dayanımı grafiği incelendiğinde, birim hücre kalınlığındaki artışın tüm numunelerde dayanım artışı sağladığı görülmüştür. Bir çalışmada [16] verilen gerilme-gerinim grafiği incelendiğinde, dolgu deseni açısının değişimine bağlı olarak yapıdaki gerilme miktarının değiştiği görülmüştür.

Birim hücre içermeyen optimizasyon işlemi sonrasında meydana gelen gerilim değişimi değerlerinin genellikle 1,5 kat [13] ile 8 kat [18] arasında olduğu görülürken birim hücre içeren optimizasyon işlemleri sonrasında meydana gelen gerilim değişimi değerlerinin 2 kat [33] ile 114 kat [30] arasında olduğu görülmüştür. Birim hücre içeren optimizasyon çalışmalarında gerilim değerlerinin nispeten yüksek olmasına, optimizasyon işleminin algoritmalarından bağımsız bir şekilde tasarımcı tarafından seçilen birim hücre yapısına dayalı olmasının sebep olduğu düşünülmüştür. Bazı araştırmacılar [20] gerilim değerlerindeki artış miktarının makul olduğunu ve modelin güvenli bir şekilde işlevini yerine getirebileceğini belirtmiştir.

4.3. Yapıdaki maksimum yer değişimi için elde edilen bulguların tartışılması (Discussion of the findings for the maximum displacement in the structure)

Döner kanatlı insansız hava araçları için gerçekleştirilmiş olan topoloji optimizasyonu çalışmalarının yapıdaki yer değiştirme miktarına etkileri incelendiğinde, birim hücre içermeyen bir çalışmada [13] verilen yer değiştirme-kuvvet grafiğinde yapıdaki yer değiştirme miktarının arttığı ve optimize edilen yapıdaki yer değiştirme-kuvvet eğrisinin eğiminde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Birim hücre içermeyen çalışmalar arasında en küçük yer değişimi değerinin 2 kat [13] olduğu ve en büyük yer değişimi değerinin ise 13 kat [27] olduğu görülmüştür. Birim hücre içeren çalışmalar arasında ise en küçük yer değişimi değerinin 1,1 kat [28] olduğu ve en büyük yer değişimi değerinin 79 kat [30] olduğu görülmüştür. Yer değiştirme miktarındaki değişimin 79 kat olduğu çalışmada [30] test edilen başka bir kafes yapısının yer değiştirme miktarındaki değişimin 21 kat olduğu görülmüştür. Bu değerler yorumlandığında birim hücre içeren optimizasyon çalışmasında [30] yer değiştirme değerinin nispeten yüksek olmasına, optimizasyon işleminin algoritmalarından bağımsız bir şekilde tasarımcı tarafından seçilen birim hücre yapısına dayalı olmasının sebep olduğu düşünülmüştür.

Topoloji optimizasyonu işlemi uygulanan tasarımların yer değiştirme değerlerinde genel olarak artış meydana geldiği fakat birim hücre içermeyen bir çalışmada [27] ve birim hücre içeren üç çalışmada [26,27,35] yer değiştirme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Birim hücre içeren bir çalışmada [35] verilen eğilme miktarı-kafes kalınlığı grafiği incelendiğinde, kafes kalınlığındaki artış ile birlikte yer değiştirme miktarının azaldığı görülmüştür.

Birim hücre kullanılarak gerçekleştirilen bazı optimizasyon çalışmalarında [26,27,32] TPMS, gyroid hexahedron vb. gibi çeşitli birim hücrelerin yapıdaki yer değiştirme miktarına etkileri incelenmiş ve temel kafes yapılar ile kıyaslandığında modifiye edilmiş kafes yapıların daha küçük yer değiştirme

değerlerine sahip oldukları belirtilmiştir. Araştırmacıların elde ettikleri bu sonucu destekleyen bir çalışmada [32] verilen kuvvet-yer değiştirme grafiği incelendiğinde yalın IWP hücrelerden oluşan yapının 171,4 N kuvvete karşılık 10,8 mm yer değiştirdiği, yalın P hücrelerden oluşan yapının 231,4 N kuvvete karşılık 11,5 mm yer değiştirdiği ve P-IWP kompozit hücrelerden oluşan yapının 260,8 N kuvvete karşılık 11,1 mm yer değiştirdiği gözlemlenmiştir. Grafik verilerine göre melez hücrelerden oluşan yapının yalın hücrelerden oluşan yapılarla karşılaştırıldığında daha küçük yer değiştirme davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Benzer bir çalışmada [34] verilen kuvvet-yer değiştirme grafiği incelendiğinde tek tip hücrelerden oluşan "Kiriş A" isimli yapının yaklaşık 800 N kuvvete karşılık 8 mm yer değiştirdiği, karma hücrelerden oluşan "Kiriş D" isimli yapının yaklaşık 1800 N kuvvete karşılık 8 mm yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Birim hücre içeren iki çalışmada [26,32] birim hücrelerin kullanıldığı optimizasyon işlemi ile birim hücrelerin kullanılmadığı optimizasyon işlemi karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalarda verilen yer değiştirme diyagramları incelendiğinde, birim hücrelerin kullanıldığı yapıdaki yer değiştirme miktarının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

5. Sonuçlar (Results)

Hava araçlarında hafiflik ve dayanıklılık konuları büyük önem arz etmektedir. Hava aracı çeşitlerinden biri olan döner kanatlı hava araçlarında topoloji optimizasyonu, hafif ve dayanıklı yapıların tasarlanması ve üretilmesi sürecinde kullanılan bir yöntemdir. Topoloji optimizasyonu yöntemlerini kullanarak yüksek dayanım-ağırlık oranlarına sahip tasarımlar elde etmek mümkün olmaktadır. Bu çalışmada topoloji optimizasyonu yöntemlerinin döner kanatlı hava aracı tasarımına etkileri araştırılmıştır. Bu araştırmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Hava aracı tasarımında hafif ve dayanıklı yapılar geliştirmek amacıyla gerçekleştirilen çalışmalarda araştırmacılar tarafından birim hücre yapısı içeren optimizasyon teknikleri ve birim hücre yapısı içermeyen optimizasyon teknikleri olmak üzere iki farklı strateji kullanıldığı görülmüştür.
- Birim hücre yapısı içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmalarında en çok tercih edilen yöntemin SIMP yöntemi olduğu gözlemlenmiştir.
- Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda genellikle hava araçlarının gövde merkezi ve kol kirişi parçalarının optimize edildiği, birim hücre içeren topoloji optimizasyonu teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda ise genellikle kol kirişi parçalarının optimize edildiği gözlemlenmiştir.
- İncelenen optimizasyon çalışmalarında, birim hücre içermeyen çalışmalar ile başlangıç tasarımındaki yapısal gelişimin araştırıldığı görülmüş fakat birim hücre içeren çalışmaların sadece bazılarında başlangıç tasarımındaki yapısal gelişimin araştırıldığı görülmüştür.
- Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu yönteminde kullanılan birim hücrelerin çok çeşitli olmaları ve her bir birim hücre tipinin kendine özgü mekanik özellikleri bulunması nedeniyle bu yapıların üstün ve zayıf yönlerini, birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu yöntemleriyle kıyaslayan az sayıda çalışma olduğu görülmüştür.
- Topoloji optimizasyonu yöntemlerinin hava aracı tasarımında yapı ağırlığını, yapı gerilimini ve kuvvete maruz kalan yapıdaki yer değiştirme değerini etkilediği tespit edilmiştir. Birim hücre yapısı içermeyen optimizasyon yöntemlerine ait etkilerin, birim hücre yapısı içeren optimizasyon yöntemlerinin etkilerine göre parametrik bakımdan daha kontrol edilebilir olduğu gözlemlenmiştir.
- Topoloji optimizasyonu yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tasarımların geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi zor geometrilere sahip olabildiği ve bu nedenle modellerin üretiminde eklemeli imalat yöntemlerinin tercih edildiği gözlemlenmiştir. İncelenen çalışmalarda topoloji optimizasyonu yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tasarımların eklemeli imalat teknikleriyle üretimi için genellikle FDM yönteminin kullanıldığı görülmüştür.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] O. Villi and M. Yakar, "İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ve Sensör Tipleri," *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, vol 4, no 2, pp 73-100, Kasım 2022. doi:10.51534/tiha.1189263
- [2] T. Şeker, "Düzlemsel Çelik Çerçevelerin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [3] J. D. Deaton and R. V. Grandhi, "A Survey of Structural and Multidisciplinary Continuum Topology Optimization: Post 2000," *Struct Multidisc Optim*, vol. 49, pp. 1–38, July 2014. doi:10.1007/s00158-013-0956-z
- [4] D. Ö. Helvacı, "Tiling of Cellular Structures Into the Parts According To the Density Values of SIMP Topology Optimization," MSc dissertation, Middle East Technical Univ, Ankara, Turkey, 2020.
- [5] M. F. Polat, "Generative Topology Optimization for Additive Manufacturing," Yüksek lisans tezi, Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2021.
- [6] V. Kılıç, "Alüminyum Kafes Sistemlerin Meta Sezgisel Optimizasyon Tekniklerine Göre Optimum Tasarımı," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye, 2018.
- [7] X. Huang and Y. M. Xie, "A further Review of ESO Type Methods for Topology Optimization," *Struct Multidisc Optim*, vol. 41, pp. 671–683, January 2010. doi:10.1007/s00158-010-0487-9
- [8] F. M. Özkal and H. Uysal, "General Aspects of Evolutionary Structural Optimization: A Review," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 15, sayı 3, sayfa 383-393, July 2009.
- [9] Q. M. Querin, G. P. Steven and Y. M. Xie, "Evolutionary Structural Optimisation (ESO) Using a Bidirectional Algorithm," *Evolutionary Structural Optimisation*, vol. 15, no. 8, pp. 1031-1048, April 1998.
- [10] A. Nazir, K. M. Abate, A. Kumar and J. Y. Jeng, "A State-of-the-art Review on Types, Design, Optimization, and Additive Manufacturing of Cellular Structures," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, pp. 3489-3510, June 2019. doi:10.1007/s00170-019-04085-3
- [11] Y. Sağlam, H. Gökçe, N. Top and İ. Şahin, "Design of an Artificial Femur Scaffold for Bone Tissue Engineering," *Alpha Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol 1, no 1, pp 1–9, 2023. doi:10.1557/s43578-021-00156-y
- [12] H. Guo, M. Li, P. Sun, C. Zhao, W. Zuo and X. Li, "Lightweight and Maintainable Rotary-Wing UAV Frame from Configurable Design to Detailed Design," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 7, July 2021. doi:10.1177/168781402111034999
- [13] E. M. Rayed, B. Esakki, A. Ponnambalam, S. C. Banik and K. Aly, "Optimization of UAV Structure and Evaluation of Vibrational and Fatigue Characteristics Through Simulation Studies," *Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim.*, vol. 12, no. 17, August 2021. doi:10.1051/smdo/2021020
- [14] Y. L. Yap, W. Toh, A. Giam, F. R. Yong, K. I. Chan, J. W. Tay, S. S. Teong, R. Lin and T. Y. Ng, "Topology optimization and 3D printing of micro-drone: Numerical design with experimental testing," *International Journal of Mechanical Sciences*, 237, September 2023. doi:10.1016/j.ijmecsci.2022.107771
- [15] F. Gafurzade, "İnsansız Hava Araçlarına Ait Termoplastik Kompozit Yapısal Parçaların Topoloji Optimizasyonu Yöntemi ile Tasarımı ve Eklemeli İmalat Metodu ile Üretim Şartlarının İncelenmesi," Yüksek lisans tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2022.
- [16] H. Klippstein, H. Hassanin. A. D. Sanches, Y. Zweiri. and L. Seneviratne, "Additive Manufacturing of Porous Structures for Unmanned Aerial Vehicles Applications," *Advanced Engineering Materials*, vol. 20, no. 9, May 2018. doi:10.1002/adem.201800290
- [17] G. L. Goh, V. Dikshit, R. Koneru, Z. K. Peh, W. Lu, G. D. Goh and W. Y. Yeong, "Fabrication of Design-optimized Multifunctional Safety Cage with Conformal Circuits for Drone Using Hybrid 3D Printing Technology," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no 120, pp. 2573-2586, January 2022. doi:10.1007/s00170-022-08831-y
- [18] B. S. Yıldız, "Yeni Bir Hibrit Metasezgisel Algoritma ile Drone Kolunun Yapısal Optimizasyonu." *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, vol 21, no 2, pp 74-80, Ağustos 2023. doi: 10.56193/matim.1302774
- [19] B. Esakki, S. Mathiyazhagan, M. Moses, K. J. Rao and G. Ganesan. "Development of 3D-Printed Floating Quadrotor for Collection of Algae in Remote Water Bodies," *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, July 2019. doi:10.1016/j.compag.2019.104891
- [20] A. Yakin, T. Simsek. and A. Akkurt, "Remodeling of the Drone Chassis Designed for Additive Manufacturing Method According to Topology Optimization," in *5 th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences, All Science Proceedings*,

2023, Konya, Turkey, July 10-12, 2023.

- [21] S. Nvss, B. Esakki, L. J. Yang, C. Udayagiri. and K. S. Vepa, "Design and Development of Unibody Quadcopter Structure Using Optimization and Additive Manufacturing Techniques," *Design*, vol. 6, no. 8, January 2022. doi:10.3390/designs6010008
- [22] J. L. Prado, "Economic Optimization of Drone Structure for Industrial Indoor Use by Additive Manufacturing," MSc dissertation, Politecnico di Torino, Torino, Italy, December 2022.
- [23] S. A. Khan, Z. Mehmood. and Z. Afshan, "Design, Analysis and Topology Optimization of a Landing Gear Strut for a Quadcopter Upon Impact," *International Conference on Applied and Engineering Mathematics, ICAEM*, 2021, London, United Kingdom, July 2021.
- [24] G. Xiang, Y. Zhu, X. Cheng. and C. Liu, "Lightweight Design and Analysis of Four-Wing UAV Fuselage Structure Based on Topology Optimization," *In Proceedings of the 2nd International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology*, 110-116, 2023.
- [25] E. Natarajan, C. T. Ang, W. H. Lim, G. Kosalishkwaran, C. Ang. and S. Parasuraman, "Design Topology Optimization and Kinematics of a Multi-modal Quadcopter and Quadrupe," *Student Conference on Research and Development, SCORED*, 2019, Perak, Malaysia, October 15-17, 2019.
- [26] K. M. Ali, M. A. Tawafik. and A. A. Laber, "Quadcopter Topology Optimization Based on Impact Analysis," *4th International Scientific Conference of Alkafeel University, ISCKU*, 2022, AIP Conference Proceedings, December 22, 2023.
- [27] Y. Tang, G. Dong, Q. Zhou, and Y. F. Zhao, "Lattice Structure Design and Optimization With Additive Manufacturing Constraints," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 1546-1562, October 2018, doi:10.1109/TASE.2018.2875650
- [28] N. S. Sripada, "A Methodology for Topology and Lattice Structure Optimization of a Cargo Drone Motor Mount," MSc. dissertation, The University of Texas at Arlington, Texas, USA, 2017.
- [29] G. Palomba, V. Crupi. and G. Epasto, "Additively Manufactured Lightweight Monitoring Drones: Design and Experimental Investigation," *Polymer*, 242, January 2022, doi:10.1016/j.polimer.2022.124557
- [30] T. Laporte, "Design, Simulation and Optimisation of Lattice Structures for Remote Control Aeroplane," *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, vol. 3, no. 1, pp. 106-114, February 2021, doi:10.1108/JIMSE-12-2020-0028
- [31] Z. Wang. and A. Y. Tamijani, "Computational Synthesis of Large-scale Three-dimensional Heterogeneous Lattice Structures," *Aerospace Science and Technology*, 120, November 2022, doi:10.1016/j.ast.2021.107258
- [32] F. Ren, C. Zhang, W. Liao, T. Liu, D. Li, X. Shi, W. Jiang, C. Wang, J. Qi, Y. Chen and Z. Wang, "Transition Boundaries And Stiffness Optimal Design For Multi-TPMS Lattices," *Materials & Design*, 210, August 2021. doi:10.1016/j.matdes.2021.110062
- [33] T. L. Oliveira and J. Carvalho, "Design And Numerical Evaluation Of Quadrotor Drone Frame Suitable For Fabrication Using Fused Filament Fabrication With Consumer Grade ABS," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 436, August 2021. doi:10.1007/s40430-021-03160-9
- [34] C. Zhang, J. Liu, Z. Yuan, S. Xu, B. Zou, L. Li, and Y. Ma "A Novel Lattice Structure Topology Optimization Method with Extreme Anisotropic Lattice Properties," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 1367-1390, 2021, doi:10.1093/jcde/qwab051
- [35] S. Patel, A. Bhoi, V. Maurya, A. Wanghede and R. Bakshi, "Design and Test 3D Printed Lattice Structure for UAV," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 7, no. 5, pp. 7169-7174, May 2020.
- [36] D. Li, W. Liao, N. Dai, G. Dong, Y. Tang, and Y. M. Xie, "Optimal Design and Modeling of Gyroid-based Functionally Graded Cellular Structures for Additive Manufacturing," *Computer-Aided Design*, vol. 104, pp. 87-99, June 2018. doi:10.1016/j.cad.2018.06003
- [37] H. Zhou, D. Z. Zhang, N. He. and M. Zhao, "Topology Optimization of Multi-morphology Composite Lattice Structure with Anisotropy Properties," *Composite Structures*, 321, June 2023. doi:10.1016/j.compstruct.2023117294

This is an open access article under the CC-BY license

