

## KÜTLESİ OPTİMİZE EDİLMİŞ KUŞ ÇARPMASINA DAYANIKLI POLİKARBONAT KANOPİ YAPISI GELİŞTİRİLMESİ

Abdullah Mesud Türkmen<sup>1</sup>, Ahmet Mert Çatalkaya<sup>2</sup>, Ahmed Aydın Bildik<sup>3</sup>, M. Cihan Tezel<sup>4</sup>, Erdem Acar<sup>5</sup>  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Ankara

### ÖZET

*Bu çalışmada, kuş çarpmasına dayanıklı, kütlesi merkezi deformasyona bağlı olarak optimize edilmiş kanopi yapısı elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle kuşun modellenmesi, ardından kanopi malzemesi olarak kullanılacak polikarbonatın çarpışma modelinin oluşturulması ve son olarak ise farklı eğrilik yarıçaplarındaki katmanlı kanopi yapısının kütlesinin, merkezi deformasyonuna bağlı olarak optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Kuş modelinin oluşturulmasında ucu yarı küresel silindir SPH kuş modelinin gerçek çarpışma durumuna en yakın sonucu verdiği görülmüş ve analizlerde bu model kullanılmıştır. Literatürden elde edilen SPH metodu ile kuşun sonlu elemanlar modelinin ve yine literatürden elde edilen polikarbonat plakanın çarpışma modelinin doğrulama çalışmaları yapılmış, doğrulanan modeller kullanılarak  $R=\infty$ ,  $R=1.25$ ,  $R=0.75$  ve  $R=0.5$  metre eğrilik yarıçaplarındaki 5 katmanlı bir kanopi panel tasarımının kütlesi merkezi deformasyonuna bağlı olarak genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda  $R=\infty$  tasarımı için %3.2,  $R=1.25$  tasarımı için %5.2,  $R=0.75$  tasarımı için %0.53,  $R=0.5$  tasarımı için %0.54 kütlede azalma elde edilmiştir.*

### GİRİŞ

Uçağın çeşitli parçaları arasında öne bakan bileşenlerden kanopi, kanat bileşenleri, kompresör kanadı vb. parçalarına kuş çarpma ihtimali daha yüksektir. Daha çok uçağın kalkışı veya inişi sırasında meydana gelen kuş çarpması olayında çarpma hızı 250-350 m/s'ye ulaşabilmektedir. Bu derece şiddetli bir darbeye gerinim oranı genellikle  $10^3 \text{ s}^{-1}$ 'den fazladır. Kuş çarpmaları, kanopi yüzeyinin ve kanopinin çatlamasına hatta delinmesine sebep olabilmektedir [Zhang ve Xu, 2019]. Bu yüzden uluslararası havacılık otoriteleri, EASA (Avrupa Birliği Havacılık Güvenliği Ajansı) ve FAA (ABD Federal Havacılık İdaresi) kuş çarpmalarında uçuş güvenliğini sağlamak amacıyla bazı regülasyonlar oluşturmuştur. Bu çalışmanın amacı; belirtilen regülasyonlara uygun; kütlesi, merkezi deformasyona bağlı olarak optimize edilmiş, kuş çarpmasına dayanıklı kanopi yapısı elde etmektir.

<sup>1</sup> Lisans Öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: abduhmesudturkmen@etu.edu.tr

<sup>2</sup> Lisans Öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: acatalkaya@etu.edu.tr

<sup>3</sup> Lisans Öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: a.bildik@etu.edu.tr

<sup>4</sup> Yüksek Lisans Öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: muhammedcihantezel@etu.edu.tr

<sup>5</sup> Prof. Dr., Makine Müh. Böl., E-posta: acar@etu.edu.tr

Kuş çarpmasına dayanıklı yapıların oluşturulması için darbeye maruz kalan kanopiye deneysel testler yapılmakta, her deneysel test için yeni bir kanopi tedariki gerekmektedir. Bu da maliyetli ve zaman alıcı bir süreçtir. Düşük hesaplama maliyeti ve yüksek doğruluğu sayesinde kuş çarpması problemi için sayısal simülasyonlar kullanılmaktadır. Oluşturan simülasyonda kuş ve kanopi yapısının doğru bir şekilde modellenmesi oldukça önemlidir. Düşük yoğunluğu, düşük imalat maliyeti, yüksek darbe direnci ve saydamlığı nedeniyle polikarbonat malzemesi kanopi yapılarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada kanopi malzemesi olarak polikarbonat kullanılmış ve bu malzemenin simülasyonda doğru modellenmesi adına doğrulama ve karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Kanopi yapısının kuş çarpmasına karşı dayanıklı olmasının yanı sıra, olabildiğince hafif olması uçak performansı için oldukça önemlidir. EASA CS 25.631 regülasyonunda belirli uçak parçalarının (kanopi vb.); 1.8 kg kütleyle sahip bir kuşun, uçağın deviz seviyesindeki uçuş hızında çarpması durumunda güvenli uçuşu devam ettirebilmesi ve inişi garanti etmesi beklenmektedir. Çarpışma koşulları bu regülasyon dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, bu çalışmada kuş çarpması olayı LS-DYNA sonlu elemanlar programında modellenerek, 5 katmanlı kanopi panel yapısı için kütle optimizasyonu çalışması yapılmıştır.

## YÖNTEM

Bu çalışmada kanopi paneline kuş çarpması üç bölümde incelenecektir; bunlar kuş modeli oluşturulması, polikarbonat kanopi malzemesinin modellenmesi ve oluşturulan katmanlı kanopi yapısının kütle optimizasyonundan oluşmaktadır.

Kuş modelinin oluşturulması; sonlu elemanlar sayısal modelinin oluşturulması, durum denkleminin belirlenmesi ve kuş geometrisinin oluşturulması aşamalarından oluşmaktadır. Yüksek hızda meydana gelen kuş çarpması probleminin sayısal modellenmesinde birbirinden farklı analiz metotları vardır: Lagrange Metodu (LM), Euler Metodu (EM), Değişken Langrange-Euler Metodu (ALE), Hidrodinamik Parçacık Metodu (SPH). Bu yöntemler kuş modellenmesinde analizlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Lagrange metodunda düğüm noktaları ile malzemenin konumu aynıdır, bu yüzden malzeme ile düğüm noktaları analizde beraber hareket etmektedir. Euler metodunda düğüm noktaları sabit kalmakta ve malzeme bu noktalar üzerinde hareket edebilmektedir. ALE metodu ise bahsedilen iki metodun birleşimi şeklinde oluşturulmuştur. SPH metodunda ise düğüm noktaları yoktur ve ağ yapısı değil tanecik yapısı kullanılır [Gülcan, 2019]. Lagrange, Euler ve SPH modellerin karşılaştırılması Tablo 1'de gösterilmiştir. Daha önceden yapılan çalışmalarda belirtildiği gibi modellemede SPH modelin kullanılması gerçek çarpışma durumuna en yakın sonuçları vermektedir [Kavitha ve Stanley, 2012; Zakir ve Li, 2012; Liu vd., 2014]. Bu çalışmada kuşun sayısal modellenmesinde SPH modeli kullanılmıştır.

Kuş çarpmasının çok yüksek hızlarda gerçekleşmesinden dolayı, kuşun çarpışma sonucu oluşturduğu deformasyon; elastik, plastik, hidrodinamik ve patlayıcı olmak üzere dört alt kategoride incelenir. Kuşun yapısı, su ve iç organlarında bulunan havadan oluşmaktadır. Yüksek hızda gerçekleşen çarpışmada; malzeme yüzeyinde oluşan gerilmeler, malzemenin dayanımını aştığından, hidrodinamik bölge geçişi malzemenin akışkan gibi davranmasına sebep olur [Hedayati ve Sadighi, 2015]. Analizlerde kullanılacak kuş modelleri hidrodinamik malzeme modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Bu modelin hacim mukavemet değerlerinin bulunması için durum denklemleri kullanılmıştır [Ivancevic ve Smojver, 2011]. Analizde kullanılabilecek durum denklemlerinden bazıları Tablo 2'de gösterilmiştir.

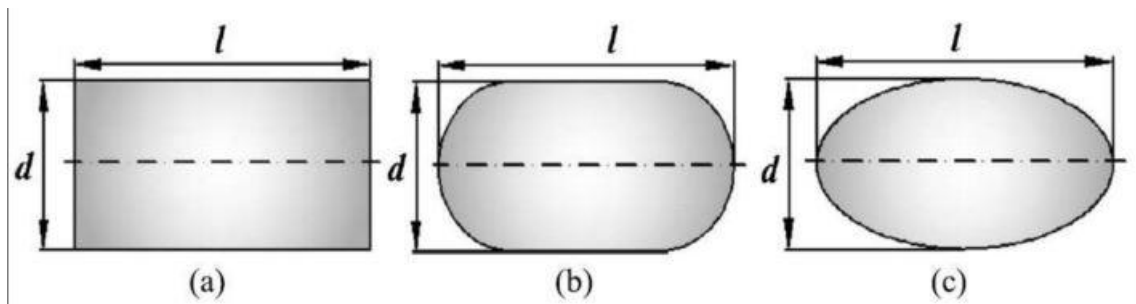
Uluslararası Kuş Çarpması Komitesi (International Bird Strike Committee) gerçek kuşların biyometrik özelliklerini ölçerek kuş çarpması testlerinde kullanmak için Şekil 1'de görüldüğü gibi en uygun üç farklı model önermiştir: ucu yarı küresel silindir, elipsoit ve ucu düz silindir [Budgey, 2000]. Yarı küresel uçlu silindir modelin uzunluğunun çapa oranının 2 olduğu kuş modelleri gerçek çarpışma durumuna en yakın sonuçları vermektedir. Bu doğrultuda, bu çalışmada kuşun modellenmesinde ucu yarı küresel silindir model kullanılmıştır.

Tablo 1: Lagrange, Euler ve SPH Metodların Karşılaştırılması [Heimbs, 2011]

	Lagrange	Euler	SPH
<b>Avantaj</b>	Model oluşturması basittir, CPU süresi azdır, kuş modelin sınırları net olarak belirlenmiştir.	Çözüm ağında bozulma olmaz, sayısal olarak istikrarlı sonuçlar verir, karmaşık kuş parçalanma simülasyonları yapabilir.	Çözüm ağında bozulma olmaz, sayısal olarak istikrarlı sonuçlar verir, karmaşık kuş parçalanma simülasyonları yapabilir, Euler modeline göre hesaplama maliyeti daha azdır.
<b>Dezavantaj</b>	Karmaşık kuş parçalanma simülasyonları yapmak zordur, çözüm ağında ciddi bozulmalar meydana gelir, bu da sonucun hassasiyetini düşürür.	Model oluşturması zordur, net belirlenmiş dış sınır yoktur, çarpma bölgesine çok sık ağ atılmalıdır, işlem süresi uzundur.	Model oluşturulması daha zordur, net olarak belirlenmiş dış sınır yoktur, Lagrange yöntemine göre daha fazla CPU süresi vardır.

Tablo 2: Durum denklemleri [Abrate, 2016; Hedayati ve Sadighi, 2015]

Model Adı	Denklem
Polinom durum denklemi	$\rho = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3$ , $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ , $C_1 = \rho_0 V^2$ , $C_2 = (2k - 1)C_1$ , $C_3 = (k - 1)(3k - 1)C_1$
Tait Durum denklemi	$\rho = B\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^t - 1$ , $B = \rho_0 C^2/t$ , $t = 4k - 1$
Rankine –Hugoniot durum denklemi	$\rho = \frac{\rho_0 c_0^2 n}{(1 - kn)^2}$ $n = 1 - \frac{\rho}{\rho_0}$
Mie – Grüneisen durum denklemi (basma durumu)	$\rho = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{\mu^2 a}{2}]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E$ ,
Mie – Grüneisen durum denklemi (çekme durumu)	$\rho = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E$



Şekil 1: Gerçek kuşu Simüle Edecek Kuş Modelleri a) Ucu Düz Silindir, b) Ucu Yarı Küresel Silindir, c) Elipsoit [Zhang ve Fei, 2016]

Shah vd. [Shah ve Abakr, 2008] çalışmalarında kenarlarından sabitlenmiş polikarbonat bir plakanın balistik etkiye maruz kalması durumunda, merkez noktasına olan uzaklığın oluşan hasar miktarındaki değişime etkisini incelemişlerdir. Bu doğrultuda polikarbonat malzemeyi doğrulamak için çekme testleri gerçekleştirmiş ve malzeme özelliklerini belirlemişlerdir. Dairesel bir polikarbonat plakanın merkezinden farklı uzaklıktaki noktalara 6.98 mm çapında demir küresel bir mermi ile 138 m/s hızında atış testi yapmışlardır. Daha sonra LS-DYNA yazılımını kullanarak bir sonlu elemanlar modeli oluşturmuş ve analizini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen deneysel veriler ile sayısal analiz sonuçları arasında plaka kalınlık değişimi ve göçük derinliği değerlerini karşılaştırılarak modeli doğrulamışlardır. Çalışmalarında polikarbonat malzemesinin davranışının benzetimi için MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC malzeme kartını kullanılmışlardır. Kütle optimizasyonu çalışmasında polikarbonat malzemenin sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında bu çalışmadan yararlanılmıştır.

Grimaldi vd. [Grimaldi vd., 2013] çalışmalarında 5 katmanlı bir kanopi yapısına kuş çarpmasını modellemiş; kanopinin katman kalınlıklarını, eğrilik yarıçapını ve kuşun çarpma açısını değiştirerek kanopinin maruz kaldığı enerji miktarını incelemişlerdir. Çalışmalarında oluşturdukları kanopi, cam ve PVB katmanlarında oluşmaktadır. Başlangıç tasarımı olarak tüm katman kalınlıklarını 4 mm olarak tanımlamışlardır. Sonrasında PVB katmanlarının kalınlıklarının cam katmanların kalınlıklarına eşit, iki katı ve üç katı olması durumunda; kuş çarpması sonucu kanopiye iletilen enerji miktarlarını karşılaştırmışlardır.

Bu çalışmada ise; Grimaldi vd.'nin [Grimaldi vd., 2013] çalışmalarından esinlenerek  $R=\infty$ ,  $R=0.5$ ,  $R=0.75$  ve  $R=1.25$  metre eğrilik yarıçaplarında, farklı katman kalınlıklarına sahip kanopi yapısı için sayısal analizler gerçekleştirilerek kütlemin deformasyona bağlı olarak optimizasyon çalışması yapılmış ve optimum katman kalınlıkları belirlenmiştir. Bu amaçla MATLAB yazılımı ile deney tasarımları oluşturulmuş, oluşturulan tasarım değişkenleri kullanılarak farklı katman kalınlıklarında analizler yapılmış ve vekil modeller (ing. Surrogate model, metamodel) elde edilmiştir. Elde edilen vekil modeller bir optimizasyon algoritmasına (genetik algoritma) entegre edilerek katman kalınlıklarının minimum kütle için optimum değerleri belirlenmiştir.

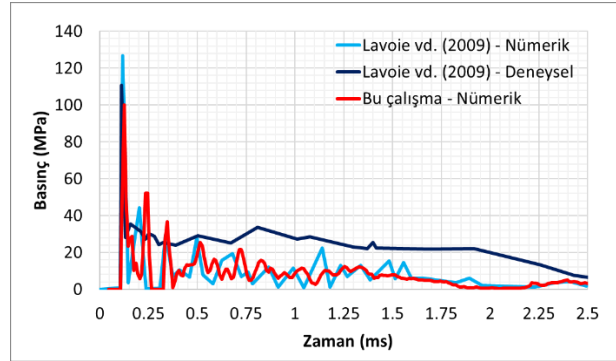
## UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

### Kuş Modelin Doğrulanması

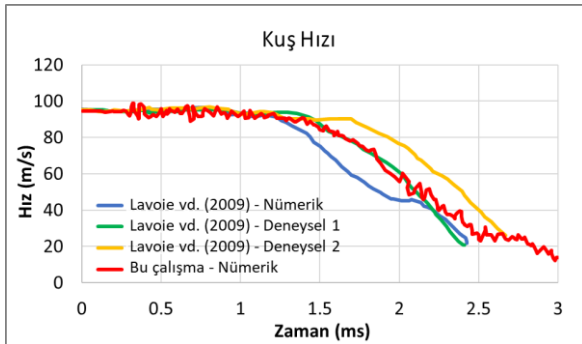
Kuş modelinin doğrulanmasında Lavoile vd.'nin çalışmalarından yararlanılmıştır [Lavoile vd., 2009]. Lavoile vd. çalışmalarında jelatin karışımıyla oluşturdukları kuş modelini 0.305 m x 0.305 m uzunluk ve genişliğe, 0.0127 m kalınlığa sahip çelik haddelenmiş homojen zırh (RHA Steel) plakaya 100 m/s çıkış hızı ile atış deneyini gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri deney verilerini kıyaslamak adına numerik simülasyonlar gerçekleştirmiş, kuş modellenmesinde ALE ve SPH metotlarını ayrı ayrı kullanarak sonuçları karşılaştırmışlardır. RHA çeliğin modellenmesinde MAT\_ELASTIC malzeme kartını kullanmış olup malzeme özellikleri yoğunluk  $7830 \text{ kg/m}^3$ , elastik modülü 207 GPa ve Poisson oranı 0.3 olarak ayarlanmıştır. Kuşun modellenmesinde MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_HYDRO malzeme kartıyla birlikte durum denkleminin tanımlanması adına EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL durum denklemi kartını kullanmışlardır. Kuş için malzeme kartı özellikleri yoğunluk  $950 \text{ kg/m}^3$ , kayma modülü 2 GPa, akma dayanımı 20 kPa, plastik sertleşme modülü 1 kPa ve diğer tüm parametreler 0 olarak ayarlanmıştır. Durum denkleminin parametreleri ise  $C_0 = C_4 = C_5 = C_6 = 0$ ,  $C_1 = 2.06 \text{ GPa}$ ,  $C_2 = 6.19 \text{ GPa}$ , and  $C_3 = 10.3 \text{ GPa}$  şeklindedir. Kuş ile plaka arasındaki temas CONTACT\_AUTOMATIC\_NODES\_TO\_SURFACE kartı kullanılarak tanımlanmıştır. Kuş kütlesi 1 kg ve kuş hızı ortalama hız olan 95 m/s olarak ayarlanmıştır. Elde ettikleri sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırarak doğrulamıştır. SPH ile ALE metodu deformasyon bakımından kıyaslandığında SPH metodunun daha doğru sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan kuş modelinin doğrulanması adına Lavoile vd. çalışmalarında belirtilen simülasyon koşulları oluşturularak çarpma merkezinde oluşan basınç, kuş hızı ve çap değişimi değerleri okunmuş ve elde edilen değerler literatür değerleriyle karşılaştırılmıştır [Lavoile vd., 2009].

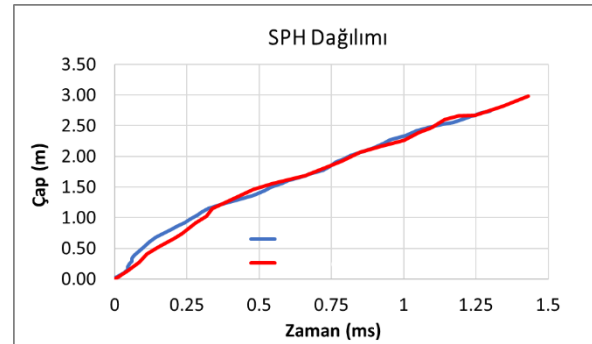
Şekil 2’te plaka yüzeyinde oluşan basınç değeri Lavoie vd. çalışmalarında elde ettiği deneysel ve nümerik sonuçlar ve karşılaştırılmış, sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, Şekil 3 ve 4’te görüldüğü gibi kuş model hızı ve modelin çapında oluşan değişim sayısal modelle uyumludur. Sonuç olarak kuş modelinin kabul edilebilir doğruluğa sahip olduğu görülmüştür (deney kuşu ve sayısal kuş modeli arasında %9,7 hata bulunmaktadır).



Şekil 2: Basınç Karşılaştırması



Şekil 3: Hız kıyaslaması



Şekil 4: Çap değişimi kıyaslaması

### Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması

Polikarbonatın sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında Shah ve Abakr'ın (2008) çalışması kullanılmıştır. Bu kapsamda 6.98 mm çapındaki rijit bir çelik mermi 115 mm çapa sahip polikarbonat plaka yüzeyine çarptırılması LS-DYNA sonlu elemanlar programında modellenmiştir. Polikarbonat malzemeyi modellemek için MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC, çelik mermiyi modellemek için MAT\_RIGID malzeme kartı kullanılmıştır. Polikarbonat ve çelik mermi için malzeme özellikleri Tablo 3 ve Tablo 4'te listelenmiştir. Çalışmada bahsedilen polikarbonat plaka için 41.751 eleman ve rijit cisim için 7284 düğüm noktasına karşılık tutarlı olması adına polikarbonat plaka 41.472 elemandan ve rijit cisim 7351 düğüm noktası kullanılarak oluşturulmuştur.

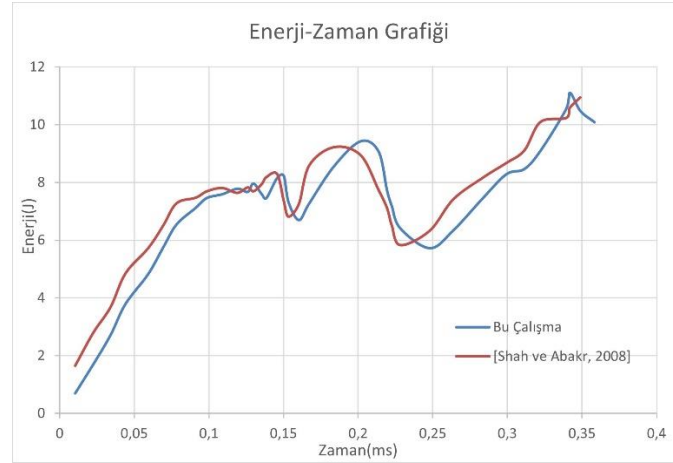
Şekil 5’de çarpışma sonrası plaka merkezinde oluşan enerji değeri ile Şekil 6’da plaka merkezinde oluşan plastik gerinim değerleri literatür değerleri ile karşılaştırmıştır. Şekillerden görüleceği üzere, bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile Shah ve Abakr'ın çalışmasında elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumludur.

Tablo 3: Polikarbonat İçin Malzeme Özellikleri

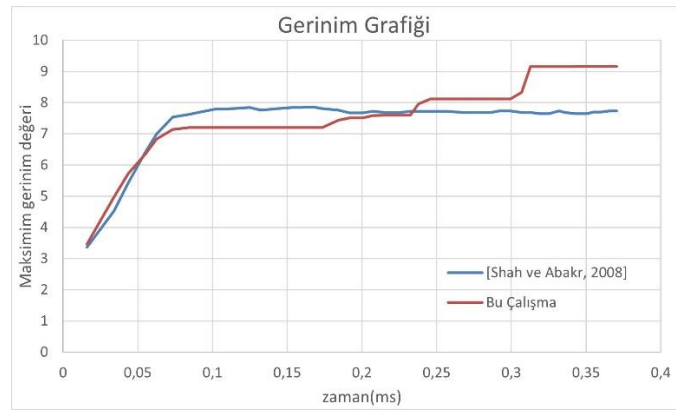
Yoğunluk	Poisson Oranı	Tanjant Modülü	Elastisite Modülü	Akma Dayanımı	Malzeme Modeli	Boyutlar	Kırılma Gerilmesi
1200 kg/m <sup>3</sup>	0.28	35 MPa	1.53 GPa	63 MPa	PLASTIC_KINEMATIC	115 mm çap	%150

Tablo 4: Çelik Bilye İçin Malzeme Özellikleri

Yoğunluk	Poisson Oranı	Elastisite Modülü	Malzeme Modeli	Boyutlar
7900 kg/m <sup>3</sup>	0.25	210 GPa	RIGID	6.98 mm çap



Şekil 5: Enerji emiliminin grafiği



Şekil 6: Gerinimin zamanla değişim grafiği

## Kütle Optimizasyonu

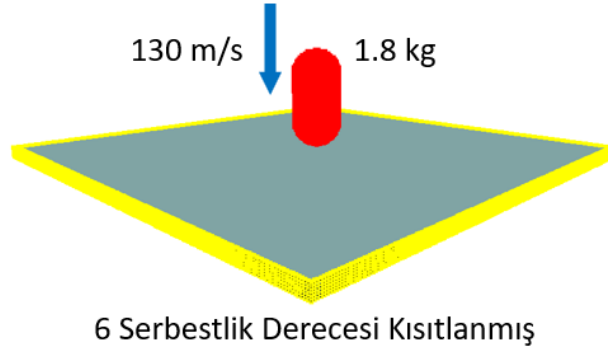
Uçak yapılarının sağlamlığının yanında hafif olması uçak performansı için oldukça önemlidir. Bu doğrultuda kanopi paneli yapısının hem kuş çarpmasına dayanıklı hem de hafif olması için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada, yüksek hızlı kuş çarpmasına maruz kalan basitleştirilmiş 1 m x 1 m ölçülerinde 5 katmandan oluşan kare bir uçak kanopisinin farkı yarıçap değerleri için kütesinin merkez deformasyonuna bağlı olarak optimizasyonu ele alınmıştır. Bu doğrultuda sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde çarpışma koşullarının belirlenmesinde Grimaldi vd. [Grimaldi vd., 2013] çalışmasından faydalanılmıştır. Etki koşulları; kuş ağırlığı 1.8 kg ve kuş hızı 130 m/s olarak belirlenmiştir. Kuş modeli olarak, doğrulanan SPH kuş modeli ve polikarbonatın malzeme modeli olarak doğrulanan Shah ve Abakr'ın (2008) çalışması kullanılmıştır. Kuş geometrisi yarım küre uçlu silindir olup 950 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa, 56.25 mm yarıçapa ve 225 mm uzunluğa sahiptir. Kuşun SPH parçacık sayısı 20588'dir. Kuşun hidrodinamik davranışını modellemek için EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL durum denklemi kullanılmıştır. Kanopiyi modelleyen; 1 m x 1 m ölçülerinde olan 5 katmanlı plaka sırasıyla polikarbonat, PVB, polikarbonat, PVB ve

polikarbonattan oluşmaktadır. Her katmanda kalınlık boyunca toplamda 40804 eleman bulunur. Yani sonlu eleman modeli 224608 elemana sahiptir. Polikarbonat malzeme Tablo 3'teki özelliklere sahiptir ve Tablo 5, PVB malzeme özelliklerini göstermektedir. LS-DYNA'da PVB malzeme modeli için MAT\_VISCOELASTIC malzeme kartı kullanılmıştır. Kontaklar ve kontrol parametreleri, Grimaldi'nin [Grimaldi vd., 2013] çalışmasıyla aynı şekilde belirlenmiştir. Kuş ve panel arasındaki temas kartı AUTOMATIC\_NODES\_TO\_SURFACE'tır. Katmanlar arasındaki bağlantıyı kurabilmek için TIED\_SURFACE\_TO\_SURFACE kullanılmıştır.

Tablo 5: PVB için Malzeme Özellikleri

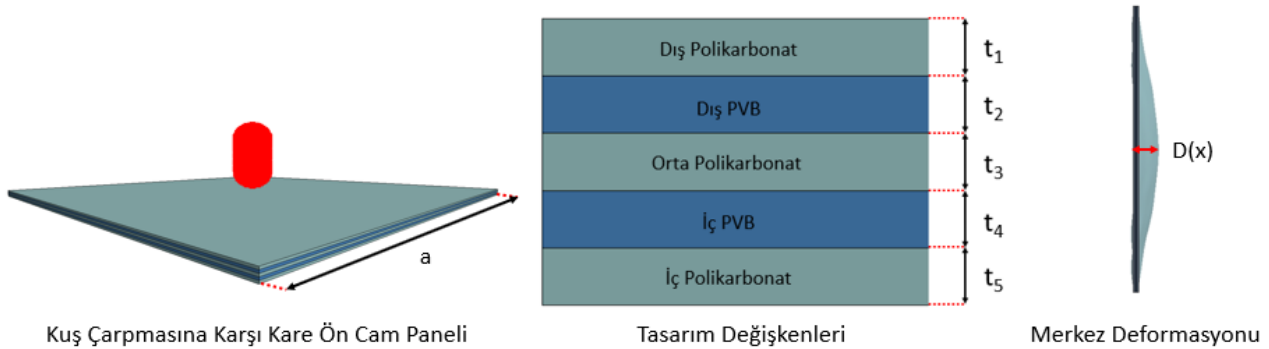
Yoğunluk	Kısa Zamanlı Kayma Modülü	Uzun Zamanlı Kayma Modülü	Bulk Modülü	Bozulma Sabiti	Kırılma Gerilmesi
1076 kg/m <sup>3</sup>	0.33 GPa	0.69 MPa	2 GPa	12.6 s <sup>-1</sup>	%175

1 m x 1 m ölçülerinden oluşan panelin kenarları 6 derece serbestlik derecesiyle kısıtlanmıştır. Sınır ve başlangıç koşulları Şekil 7'de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmek için LS-DYNA yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 7: Sınır ve Başlangıç Koşulları

Bu çalışmanın amacı, çarpma sonrası panel kütlelerinin merkez deformasyonuna bağlı olarak en aza indirmektir. Panelin kütlesi, katmanların kalınlığının bir fonksiyonudur. Merkez deformasyonu, panelin merkez noktasının maksimum yer değiştirmesi ile ölçülmektedir. Tabaka kalınlıklarına bağlı olarak deformasyon fonksiyonu hakkında bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle, deformasyon fonksiyonunu tanımlamak için bir vekil model oluşturulmalıdır. Bu durumda optimizasyon probleminin amaç fonksiyonları panelin kütlesidir. Tasarım değişkenleri ise 5 katmanın kalınlıklarıdır. Doğrulanmış çalışmalarla oluşturulan panel modeli, tasarım değişkenleri ve çarpışma sırasında oluşan merkez deformasyonu Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8: Optimizasyon parametreleri

Çok amaçlı optimizasyon problemini çözmek için genetik algoritma kullanılmıştır. Optimizasyon probleminde deformasyon kısıt, kütle amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Optimizasyon problemlerinin standart formülasyonu Şekil 9'da verilmiştir.

### Standart Formülasyon

#### Kütle Optimizasyonu

$$\text{Amaç} \quad x = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$$

$$\text{Min} \quad \text{Kütle}(x)$$

$$\text{K.s.} \quad g_1 = D(x) - D_{max} \leq 0$$

$$lb = \{2,2,2,2,2\}, ub = \{6,6,6,6,6\} \text{ (mm)}$$

Şekil 9: Optimizasyon probleminin standart formülasyonu.

Problemin çözümü için MATLAB'da "lhsdesign (Latin hypercube design)" örnekleme yöntemi kullanılarak 50 deney tasarımı oluşturulmuş, oluşturulan 50 deney tasarımı  $R=\infty$ ,  $R=500$ ,  $R=750$  ve  $R=1250$  mm yarıçaplı kanopi tasarımları için analiz edilmiş ve veriler kullanılarak vekil modeller oluşturulmuştur. İlk tasarım olarak [Grimaldi, Sollo, Guida ve Marulo, 2013]'nin çalışmalarında da aynı olan her biri 4 mm'den oluşan 5 katman oluşturulmuştur. Buna bağlı olarak katman kalınlıkları için alt ve üst limitler 2 mm ve 6 mm olarak ayarlanmıştır. Oluşturulan deney tasarımlarının katman kalınlıkları Tablo 6'da gösterilmiştir.

Katmanların kalınlığına bağlı kütle fonksiyonu Denklem (1)'de verilmiştir. Burada  $a$ , panelin kenar uzunluğu,  $\rho_{PC}$  ve  $\rho_{PVB}$  sırasıyla polikarbonat ve PVB malzemenin yoğunluğudur.  $a = 1 \text{ m}$ ,  $\rho_{PC} = 1200 \text{ kg/m}^3$ , ve  $\rho_{PVB} = 1076 \text{ kg/m}^3$ 'tür.

$$\text{Kütle}(x) = a^2 \cdot [\rho_{PC} \cdot (t_1 + t_3 + t_5) + \rho_{PVB} \cdot (t_2 + t_4)] \quad (1)$$

İlk tasarımların merkez deformasyonu kritik deformasyon olarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu kütle olduğunda izin verilen maksimum merkez deformasyonu  $R = \infty$  için 67.90 mm,  $R = 0,5 \text{ m}$  için 112.646 mm,  $R = 0.75 \text{ m}$  için 117.448 mm ve  $R = 1.250 \text{ m}$  için 116.908 mm olarak ayarlanmıştır.

Oluşturulan 50 deney tasarımı  $R=\infty$ ,  $R=0.5$ ,  $R=0.75$  ve  $R=1.25$  metre yarıçaplarındaki kanopi modelleri için numerik analizleri çözdürülmüştür. Analizler sonucunda elde edilen merkez deformasyonları Tablo 8'de gösterilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak vekil model tabanlı optimizasyon yaklaşımıyla optimizasyon problemi çözülmüştür. Bu doğrultuda sabit eğimli Gauss korelasyonlu Kriging, lineer eğimli Gauss korelasyonlu Kriging, doğrusal polinom, saf ikinci derece polinom ve ikinci derece polinom olmak üzere beş adet vekil model oluşturulmuştur. Kriging üstel ve lineer korelasyon modellerinde, en iyi performansı gösterdiği için sadece Gauss korelasyon modeli kullanılmıştır [Acar, 2013]. Vekil modelleri karşılaştırmak için test verileri yerine çapraz doğrulama RMSE (RMSE<sub>CV</sub>) değerleri dikkate alınmış, daha sonra vekil modellerin ne kadar doğru olduğunu görmek için değerler merkez deformasyonlarına göre normalize edilmiştir. Vekil modeller ve doğrulukları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7'ye göre  $R=\infty$  konfigürasyonu için doğrusal eğimli Kriging model en doğru modeldir. Diğer modellerin de doğruluk değerleri yakın olarak çıkmış ve hepsinin RMSE<sub>CV</sub> değerleri, kabul edilebilir değer olan %5'ten az olarak bulunmuştur.  $R=1.25 \text{ m}$  yarıçaplı model için  $R=\infty$  yarıçapı ile benzer olarak doğrusal eğimli Kriging model en doğru model olarak bulunmuştur. RMSE<sub>CV</sub> değerleri karşılaştırıldığında sabit eğimli Kriging model dışında diğer modellerin doğruluklarının bu model için %5'ten az olduğu görülmüş ve kabul edilebilir aralıkta bulunmuşlardır.  $R=0.5 \text{ m}$  yarıçaplı konfigürasyon için ise ikinci derece polinom modelin doğruluğu en iyi model olarak bulunmuştur. RMSE<sub>CV</sub> değerleri karşılaştırıldığında sabit eğimli Kriging model dışında diğer modellerin doğruluklarının kabul edilebilir aralıkta olduğu görülmüştür.  $R=0.75 \text{ m}$  yarıçaplı model için doğrusal polinom model en doğru model olarak bulunmuştur. RMSE<sub>CV</sub> değerleri karşılaştırıldığında sabit



eğimli Kriging model dışında diğer modellerin doğruluklarının kabul edilebilir aralıkta olduğu görülmüştür.

Tablo 6: Deney Tasarımları

Katman	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)	t4 (mm)	t5 (mm)	Toplam t (mm)
<b>Başlangıç</b>	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	20.00
1	4.68	3.16	3.00	3.80	5.08	19.72
2	5.40	4.60	5.24	2.20	3.72	21.16
3	3.00	5.40	3.96	5.80	5.40	23.56
4	5.56	2.84	4.44	5.96	4.52	23.32
5	2.92	2.28	2.84	3.96	3.64	15.64
6	2.44	4.04	4.84	4.68	5.88	21.88
7	3.64	5.48	3.64	3.64	5.56	21.96
8	3.88	3.88	5.16	5.72	4.60	23.24
9	5.96	4.44	5.00	3.88	5.00	24.28
10	5.16	2.20	5.08	2.76	4.76	19.96
11	3.24	5.64	4.20	4.92	2.60	20.60
12	5.80	2.92	2.20	3.40	3.40	17.72
13	5.64	3.80	3.16	3.00	4.28	19.88
14	3.80	4.76	5.80	3.48	2.92	20.76
15	5.24	5.00	2.92	2.92	5.48	21.56
16	2.76	5.80	4.92	2.04	2.52	18.04
17	3.48	4.52	4.36	5.56	2.76	20.68
18	5.48	3.00	5.96	5.88	2.44	22.76
19	4.28	2.76	2.28	4.04	2.84	16.20
20	5.32	2.68	3.88	2.36	3.96	18.20
21	4.12	5.24	2.36	2.60	3.48	17.80
22	2.20	2.44	5.88	3.56	5.72	19.80
23	5.88	5.96	2.12	5.64	4.04	23.64
24	5.00	2.36	4.76	2.12	2.36	16.60
25	4.60	5.16	5.40	2.52	5.64	23.32
26	4.44	3.24	5.72	3.08	5.96	22.44
27	4.04	3.08	2.52	4.84	4.12	18.60
28	2.84	3.40	3.72	4.36	2.20	16.52
29	4.20	4.84	3.40	4.44	3.08	19.96
30	2.52	3.64	5.32	3.72	3.80	19.00
31	4.52	3.56	4.28	5.08	4.84	22.28
32	2.28	4.92	5.56	2.68	3.16	18.60
33	3.16	4.68	3.24	5.24	4.92	21.24
34	2.12	3.96	3.48	2.84	5.16	17.56
35	2.68	5.88	2.76	4.52	2.68	18.52
36	4.36	3.32	2.44	2.44	2.28	14.84
37	4.84	5.08	5.64	3.16	3.32	22.04
38	3.32	5.32	4.52	4.60	3.56	21.32
39	5.72	4.28	4.68	5.32	3.88	23.88
40	2.04	3.72	2.68	2.28	4.44	15.16
41	3.08	2.60	5.48	5.40	2.12	18.68
42	2.36	2.12	4.60	5.00	3.24	17.32
43	4.92	4.20	3.80	4.28	5.32	22.52
44	5.08	5.56	4.12	3.32	2.04	20.12
45	3.40	5.72	4.04	4.12	5.80	23.08
46	2.60	2.04	2.04	3.24	5.24	15.16
47	3.56	4.36	3.32	4.20	4.36	19.80
48	3.72	4.12	2.60	4.76	4.68	19.88
49	3.96	2.52	3.08	5.16	3.00	17.72
50	4.76	3.48	3.56	5.48	4.20	21.48

Tablo 7: Vekil Modeller ve Doğrulukları

Model ( $R=\infty$ )	RMSE	RMSE <sub>CV</sub>	Normalize RMSE <sub>CV</sub>
Doğrusal polinom model	0.84	0.99	% 3.2
Saf ikinci derece polinom model	0.73	0.97	% 3.2
İkinci derece polinom model	0.40	1.01	% 3.3
Sabit eğimli Kriging model	0	1.05	% 3.4
Doğrusal eğimli Kriging model	0	0.75	% 2.4

Model ( $R=1.25$ m)	RMSE	RMSE <sub>CV</sub>	Normalize RMSE <sub>CV</sub>
Doğrusal polinom model	0.89	0.99	% 4.0
Saf ikinci derece polinom model	0.87	1.05	% 4.3
İkinci derece polinom model	0.72	1.17	% 4.8
Sabit eğimli Kriging model	0	2.32	% 9.5
Doğrusal eğimli Kriging model	0	0.91	% 3.7

Model ( $R=0.75$ m)	RMSE	RMSE <sub>CV</sub>	Normalize RMSE <sub>CV</sub>
Doğrusal polinom model	2.69	2.88	%4.02
Saf ikinci derece polinom model	2.66	2.99	%4.18
İkinci derece polinom model	2.59	3.81	%5.3
Sabit eğimli Kriging model	0	9.87	%13.8
Doğrusal eğimli Kriging model	0	3.02	%4.21

Model ( $R=0.5$ m)	RMSE	RMSE <sub>CV</sub>	Normalize RMSE <sub>CV</sub>
Doğrusal polinom model	1.93	2.10	%4.0
Saf ikinci derece polinom model	1.92	2.26	%4.3
İkinci derece polinom model	1.15	1.65	%3.1
Sabit eğimli Kriging model	0	5.05	%9.5
Doğrusal eğimli Kriging model	0	1.96	%3.7

Oluşturulan 50 deney tasarımının farklı yarıçaptaki plakalar için analizinden elde edilen merkez deformasyonları Tablo 8'de gösterilmiştir. Buradan elde edilen veri seti kullanılarak vekil modeller oluşturulmuş ve optimizasyon problemi Şekil 9'a göre genetik algoritma kullanılarak çözülmüştür. Çoklu yerel minimum değerlerin çözümü adına çoklu başlangıç yaklaşımı kullanılmıştır. MATLAB'da vekil modeller için optimum çözümler elde edildikten sonra sonuçları doğrulamak için LS-DYNA'da optimum tasarımların analizi yapılmıştır. Analizde elde edilen sonucun izin verilen maksimum merkez deformasyondan fazla olması durumunda elde edilen sonuç veri setine eklenerek optimizasyon problemi tekrar çözülmüştür. Elde edilen analiz sonucu deformasyon kısıtını sağlayana kadar bu işlem devam etmiştir. Bu işlemler sonucunda farklı vekil modellerden farklı eğrilik yarıçapındaki plaka tasarımları için elde edilen optimum sonuçlar Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 8: Analizler Sonucunda Elde Edilen Merkez Deformasyonları

Tasarım	R = ∞ (Düz)		R = 1250 mm		R = 750 mm		R = 500 mm	
	Kütle (kg)	Merkez Deformasyonu (Analiz Sonucu) mm	Kütle (kg)	Merkez Deformasyonu (Analiz Sonucu) mm	Kütle (kg)	Merkez Deformasyonu (Analiz Sonucu) mm	Kütle (kg)	Merkez Deformasyonu (Analiz Sonucu) mm
Başlangıç	23.01	67.90	22.82	116.908	22.70	117.448	22.55	112.646
1	22.80	68.35	22.61	118.633	22.49	122.569	22.33	117.533
2	24.55	65.00	24.37	112.839	24.26	111.790	24.11	105.169
3	26.88	62.96	26.64	110.613	26.49	102.685	26.30	95.4615
4	26.89	62.13	26.67	109.648	26.53	102.323	26.35	95.4315
5	17.99	79.97	17.84	128.895	17.74	133.392	17.61	136.326
6	25.17	65.17	24.94	113.643	24.79	110.400	24.60	104.58
7	25.22	65.16	25.01	114.199	24.87	113.418	24.70	108.141
8	26.70	63.21	26.47	111.085	26.32	105.005	26.13	98.5108
9	28.10	60.02	27.89	105.503	27.75	96.697	27.57	85.2367
10	23.34	66.74	23.15	115.752	23.03	118.077	22.87	113.522
11	23.41	67.69	23.23	117.176	23.11	118.085	22.96	113.029
12	20.48	71.94	20.33	122.368	20.24	127.595	20.11	122.873
13	23.01	67.59	22.84	116.136	22.73	106.203	22.59	113.129
14	23.89	66.19	23.71	114.798	23.59	115.558	23.44	110.398
15	24.89	65.16	24.69	113.801	24.57	111.023	24.41	105.62
16	20.68	72.99	20.52	122.353	20.43	127.939	20.30	124.242
17	23.57	67.35	23.38	116.364	23.26	105.065	23.10	112.419
18	26.21	62.68	26.01	110.585	25.88	105.077	25.72	98.8585
19	18.60	76.50	18.45	126.097	18.36	133.070	18.24	129.701
20	21.22	70.66	21.05	120.083	20.95	124.959	20.82	121.08
21	20.39	73.19	20.24	123.337	20.14	128.761	20.02	125.365
22	23.02	68.73	22.80	119.638	22.66	122.621	22.48	118.179
23	26.93	62.68	26.73	109.932	26.60	101.084	26.43	93.1913
24	19.36	73.81	19.23	121.939	19.14	127.081	19.03	124.133
25	27.03	61.47	26.81	108.337	26.67	100.631	26.49	94.0847
26	26.14	63.32	25.92	111.808	25.78	108.865	25.59	103.674
27	21.34	71.18	21.16	121.939	21.04	126.362	20.89	122.178
28	18.86	78.08	18.71	123.318	18.61	133.951	18.49	134.234
29	22.80	68.39	22.63	115.288	22.51	120.119	22.37	115.776
30	21.89	71.00	21.70	121.665	21.58	125.964	21.42	121.779
31	25.66	64.34	25.45	113.06	25.31	109.127	25.13	103.489
32	21.38	71.16	21.20	120.463	21.09	125.671	20.95	121.594
33	24.26	67.34	24.05	117.408	23.91	117.855	23.73	112.907
34	20.23	74.28	20.04	125.72	19.93	130.273	19.78	126.52
35	20.93	73.28	20.77	123.565	20.66	129.755	20.53	126.033
36	17.09	79.93	16.97	127.869	16.90	135.103	16.80	133.294
37	25.43	63.66	25.24	111.49	25.12	107.667	24.96	101.118
38	24.35	66.21	24.16	115.58	24.03	113.978	23.87	108.646
39	27.47	61.04	27.25	106.257	27.12	96.748	26.94	87.6816
40	17.45	81.01	17.29	129.986	17.19	135.038	17.07	137.216
41	21.42	70.69	21.25	119.857	21.14	124.853	20.99	120.984
42	19.90	74.27	19.72	125.701	19.61	130.715	19.46	127.168
43	25.97	63.74	25.76	112.149	25.62	107.949	25.44	101.862
44	23.04	67.67	22.89	116.087	22.79	116.279	22.66	111.295
45	26.48	63.10	26.25	111.161	26.10	104.903	25.91	97.8775
46	17.54	82.18	17.37	128.49	17.26	137.413	17.13	138.413
47	22.70	69.49	22.51	120.429	22.39	123.701	22.23	119.123
48	22.75	69.58	22.56	120.307	22.44	123.432	22.28	118.959
49	20.31	73.64	20.14	124.091	20.04	130.283	19.90	126.572
50	24.66	65.98	24.46	115.931	24.33	116.750	24.17	111.884

## SONUÇ

Bu çalışmada, kuş çarpmasına dayanaklı, kütlesi merkezi deformasyona bağlı olarak optimize edilmiş kanopi yapısı elde edilmiştir. Tablo 9'da belirtilen optimum sonuçlar sırasıyla doğrusal polinom, saf ikinci derece polinom, ikinci derece polinom, sabit eğimli Kriging ve doğrusal eğimli Kriging model kullanılarak elde edilmiştir.  $R=\infty$  tasarımı için kısıt koşulu olan merkez deformasyonu 67.90 mm'dir. Kısıt koşulun altında bir değerde deformasyona sahip olacak şekilde ikinci derece polinom model kullanılarak (Optimum 3) %3.2 kütlede azalma elde edilmiştir.  $R=1.25$  m tasarımı için doğrusal polinom (Optimum 1), saf ikinci derece polinom (Optimum 2), ikinci derece polinom (Optimum 3) vekil modelleri ile elde edilen sonuçlar kısıt koşulunu sağlamıştır. Doğrusal polinom modelden elde edilen tasarım sonucu ile %5.2, saf ikinci derece polinom modelden elde edilen tasarım sonucu ile %4, ikinci derece polinom model ile elde edilen tasarım sonucu ile %2.9 değerinde kütle azalması elde edilmiştir.  $R=0.75$  m tasarımı için doğrusal polinom (Optimum 1) vekil modeli ile elde edilen sonuçta kısıt koşulu sağlanmıştır. Doğrusal polinom modelden elde edilen tasarım sonucu ile %0.044 değerinde kütle azalması elde edilmiştir. Saf ikinci derece polinom (Optimum 2) değerinde ise sınır koşuluna çok yakın bir değer elde edilerek %0.53 değerinde kütle azalması elde edilmiştir.  $R=0.5$  m tasarımı için doğrusal polinom (Optimum 1) vekil modeli ile elde edilen sonuçta kısıt koşulu sağlanmıştır. Doğrusal polinom modelden elde edilen tasarım sonucu ile %0.40 değerinde kütle azalması elde edilmiştir. Saf ikinci derece polinom (Optimum 2) değerinde ise sınır koşuluna çok yakın bir değer elde edilerek %0.54 değerinde kütle azalması elde edilmiştir.

Tablo 9: Farklı Eğrilik Yarıçapı Değerleri İçin Elde Edilen Optimum Katman Kalınlıkları

Tasarım ( $R=\infty$ )	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	Kütle (kg)	MD (mm) (Vekil model)	MD (mm) (Analiz sonucu)
Başlangıç	4	4	4	4	4	23.01		67.90
Optimum 1	6	3.06	6	2	2	22.24	67.90	68.22
Optimum 2	6	2.65	5.21	3.26	2.17	22.41	67.90	67.95
Optimum 3	6	2	6	3	2.08	22.28	67.90	67.82
Optimum 4	4.44	2	6	2	3.92	21.54	67.90	69.79
Optimum 5	6	3.18	6	2	2	22.37	67.90	67.95
Tasarım ( $R=1.25$ m)								
Başlangıç	4	4	4	4	4	22.82		116.91
Optimum 1	6	2.8	6	2	2	21.64	116.90	116.85
Optimum 2	6	2	6	2.74	2	21.90	116.91	116.20
Optimum 3	5.46	3.19	5.78	2.63	2	22.16	116.91	116.54
Optimum 4	2.85	2.87	5.95	2	2	18.21	116.91	123.00
Optimum 5	5.16	2.65	6	2	2	20.79	116.91	119.14
Tasarım ( $R=0.75$ m)								
Başlangıç	4	4	4	4	4	22.70		117.45
Optimum 1	6	6	3.93	2	2	22.69	117.45	117.43
Optimum 2	6	4.25	4.11	2	3.32	22.58	117.45	118.11
Optimum 3	6	4.89	2.94	2	3.85	22.50	117.45	118.92
Optimum 4	2.14	4.81	4.06	5.56	2	20.72	117.45	127.51
Optimum 5	6	4.22	2	5.73	2	22.37	117.45	119.45
Tasarım ( $R=0.5$ m)								
Başlangıç	4	4	4	4	4	22.55		112.65
Optimum 1	6	6	3.83	2	2	22.46	112.65	112.58
Optimum 2	6	6	3.81	2	2	22.43	112.65	112.66
Optimum 3	6	2.44	3.35	5.98	2	22.27	112.65	116.55
Optimum 4	5	4.9	2.80	2	3.84	21.0	112.65	120.13
Optimum 5	5.87	5.30	2.83	2	3.42	22.02	112.65	115.52

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 20AG001 numaralı program altında, 20AG027 numaralı proje kapsamında ve TÜBİTAK Stajyer Araştırmacı Burs Programı kapsamında desteklenmektedir.

### Kaynaklar

- Abrate, S. (2016). Soft impacts on aerospace structures. *Progress in Aerospace Sciences*, 81, 1-17.
- Acar, E. (2013). Effects of the correlation model, the trend model, and the number of training points on the accuracy of K riging metamodels. *Expert Systems*, 30(5), 418-428.
- Budgey, R. (2000, April). The development of a substitute artificial bird by the international birdstrike research group for use in aircraft component testing. In *Proceedings of the 25th Annual Meeting of the International Bird Strike Committee, IBSC25/WP-IE3*. Amsterdam (pp. 17-21).
- Grimaldi, A., Sollo, A., Guida, M., & Marulo, F. (2013). Parametric study of a SPH high velocity impact analysis—A birdstrike windshield application. *Composite Structures*, 96, 616-630.
- Gülcan, O. (2019). Kuş çarpmaları ve uçaklara etkileri üzerine bir gözden geçirme çalışması. *Mühendis ve Makina*, 60(696), 192-220.
- Hedayati, R., & Sadighi, M. (2015). *Bird strike: an experimental, theoretical and numerical investigation*. Woodhead Publishing.
- Heimbs, S. (2011). Computational methods for bird strike simulations: A review. *Computers & Structures*, 89(23-24), 2093-2112.
- Ivančević, D., & Smojver, I. (2011). Hybrid approach in bird strike damage prediction on aeronautical composite structures. *Composite Structures*, 94(1), 15-23.
- Kavitha, M. S., & Stanley, C. S. (2012). Target parametric studies on bird impact behaviour of aircraft leading edge. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(11), 421-428.
- Lavoie, M. A., Gakwaya, A., Ensan, M. N., Zimcik, D. G., & Nandlall, D. (2009). Bird's substitute tests results and evaluation of available numerical methods. *International Journal of Impact Engineering*, 36(10-11), 1276-1287.
- Liu, J., Li, Y., Gao, X., & Yu, X. (2014). A numerical model for bird strike on sidewall structure of an aircraft nose. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(3), 542-549.
- Shah, Q. H., & Abakr, Y. A. (2008). Effect of distance from the support on the penetration mechanism of clamped circular polycarbonate armor plates. *International Journal of Impact Engineering*, 35(11), 1244-1250.
- Yu, P., Yao, X., & Han, Q. (2016). The dynamic response and failure of Polycarbonate plate by soft body impact. *Polymer Engineering & Science*, 56(10), 1160-1168.
- Zakir, S. M., & Li, Y. (2012). Dynamic response of the leading-edge wing under soft body impact. *International Journal of Crashworthiness*, 17(4), 357-376.
- Zhang, D., Fei, Q. 2016. "Effect of Bird Geometry and Impact Orientation in Bird Striking on a Rotary Jet-Engine Fan Analysis Using SPH Method", *Aerospace Science and Technology*, vol. 54, p. 320-329.,
- Zhang, W., & Xu, Y. (2019). *Mechanical properties of polycarbonate: experiment and modeling for aeronautical and aerospace applications*. Elsevier.