

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KUŞ ÇARPMASINA MARUZ HELİKOPTER KANOPİLERİNİN YAPISAL
DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Meriç KAHVECİOĞLU

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KUŞ ÇARPMASINA MARUZ HELİKOPTER KANOPİLERİNİN YAPISAL
DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Meriç KAHVECİOĞLU
(511151123)**

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zahit MECİTOĞLU

HAZİRAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511151123 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Meriç KAHVECİOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KUŞ ÇARPMASINA MARUZ HELİKOPTER KANOPİLERİNİN YAPISAL DAVRANIŞI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Zahit MECİTOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Halit Süleyman TÜRKMEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Erol UZAL**
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2019**
Savunma Tarihi : **10 Haziran 2019**





Eşime ve anneme,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında sayısal yöntemler kullanılarak, seçilecek farklı şeffaf helikopter kanopilerinin farklı kritik noktalarına, farklı hızlarda kuş çarpması durumundaki deformasyon ve hasarlar karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Kuş çarpması olayları, uçuş güvenliğini önemli derecede etkilemekle birlikte hava araçları için büyük bir tehdit oluşturmaktadırlar. Havacılık dünyasında gerçekleşen kuş çarpması olaylarında, önemli ölçüde kayıplar yaşanmaktadır. Toplam kuş çarpması kazalarına bakıldığında ise, maddi hasarlı kazaların yüzde 4'ü, yaralanmalı kuş çarpması kazalarının ise yüzde 17'si helikopterlere aittir. Sayısal yöntemler ile gerçek malzemelerle yapılan pahalı fiziksel testler kıyaslandığında; sayısal yöntemlerin daha verimli ve maliyeti daha düşük olan bir araç olduğu ortaya çıkmaktadır.

Tez konusunu seçerken isteklerimi göz önünde bulundurup bana yardımcı olan; planlamada ve araştırmada desteklerini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden fazlasıyla faydalandığım ve çalışmamın bilimsel temeller ışığında şekillenmesini sağlayan tez danışmanım ve sayın hocam Prof. Dr. Zahit Mecitoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2019

Meriç Kahvecioğlu
(Uçak Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	2
1.2 Tezin Organizasyonu.....	3
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
2.1 Kuş Modeli Oluşturma Yöntemleri.....	5
2.2 Kuş Geometrisinin Modellenmesi ve Malzeme Özellikleri	16
2.3 Hedefin Oluşturulması	27
2.4 Kuş Çarpması Çalışması	31
2.5 Kuş Çarpması Verileri.....	33
3. KUŞ ÇARPMASI TEORİSİ	35
4. DOĞRULAMA ÇALIŞMASI	39
4.1 Çarpan Parçacık Modelinin Oluşturulması	39
4.2 Hedef Cisim Modelinin Oluşturulması	40
4.3 Çarpma Analizinin Gerçekleştirilmesi	41
4.4 Sonuçların Karşılaştırılması	42
5. KUŞ VE KANOPİ MODELİ	45
5.1 Kuş Modeli	45
5.2 Kanopi Modelleri	46
6. KUŞ ÇARPMASI ANALİZİ	51
6.1 Gazelle SA341 Helikopteri.....	51
6.1.1 Kanopi geometrisinin ortasına üç farklı hız ile çarpma analizi.....	51
6.1.1.1 Kanopinin ortasına V=90 m/s hız ile çarpma analizi.....	53
6.1.1.2 Kanopinin ortasına V=100 m/s hız ile çarpma analizi.....	54
6.1.1.3 Kanopinin ortasına V=110 m/s hız ile çarpma analizi.....	56
6.1.1.4 Sayısal Sonuçlar	57

6.1.2 Kanopinin çeşitli bölgelerine 100 m/s hızla çarpma analizleri.....	57
6.1.2.1 Kanopinin ortasına çarpma	58
6.1.2.2 Kanopinin üst bölgesine çarpma	58
6.1.2.3 Kanopinin köşesine çarpma	61
6.1.2.4 Sayısal sonuçlar	63
6.2 Dauphin AS365 Helikopteri	64
6.2.1 Kanopi geometrisinin ortasına üç farklı hız ile çarpma analizi	64
6.2.1.1 Kanopinin ortasına V=90 m/s hız ile çarpma analizi.....	65
6.2.1.2 Kanopinin ortasına V=100 m/s hız ile çarpma analizi.....	67
6.2.1.3 Kanopinin ortasına V=110 m/s hız ile çarpma analizi.....	68
6.2.1.4 Sayısal Sonuçlar	70
6.2.2 Kanopinin çeşitli bölgelerine 100 m/s hızla çarpma analizleri.....	70
6.2.2.1 Kanopinin ortasına çarpma	70
6.2.2.2 Kanopinin üst bölgesine çarpma	70
6.2.2.3 Kanopinin köşesine çarpma	73
6.2.2.4 Sayısal sonuçlar	76
6.3 Deplasman ve von Mises Gerilmeleri Sonuçlarının Gösterimi	77
6.4 Enerji Grafiklerinin Karşılaştırılması	77
6.4.1 Gazelle SA341 helikopter kanopisi	77
6.4.2 Dauphin AS365 helikopter kanopisi.....	80
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ	91

KISALTMALAR

ALE	: Arbitrary Lagrangian Euler
CEL	: Coupled Eulerian and Lagrangian
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Plastic
CPU	: Central Processing Unit
CT	: Computed Tomography
DLR	: Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt
EOS	: Equation of State
FAA	: Federal Aviation Administration
FEM	: Finite Element Methods
IBSRG	: International Bird Strike Research Group
JAA	: Joint Aviation Authorities
PVB	: Polyvinyl butyral
SPH	: Smooth Particles Hydrodynamics



SEMBOLLER

C	:Lineer Polinomik EOS malzeme katsayıları
D	:Çap
e	:Birim kütle başına iç enerji
E	:Elastisite Modülü
kg	:Kilogram
L	:Uzunluk
m	:Metre
P	:Basınç
t	:Zaman
V	:Hız
μ	:Basma (Compression)
ρ	:Yoğunluk
ρ_0	:Katı, sıfır basınç yoğunluğu



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Kuş çarpmasına maruz kalan ve zarar gören helikopter parçaları [2].	2
Çizelge 2.1: Literatürde kuş çarpması ile ilgili yeterli verilerin bulunduğu çalışmalar gösterimi.	33
Çizelge 4.1: Çarpan çelik kürenin özellikleri [29].	40
Çizelge 4.2: Dairesel polikarbonat plak için kullanılan bilgiler [29].	40
Çizelge 5.1: Kuş modeli için belirlenen girdiler [30].	45
Çizelge 5.2: Kanopi modeli için belirlenen girdiler [35].	50
Çizelge 6.1: Analiz sonuçlarından elde edilen maksimum değerler.	77



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Ak yanaklı ördek (Bufflehead) ve SPH modelleri [6].....	7
Şekil 2.2: Yaban ördeği için kullanılan geleneksel SPH modeli [7].	8
Şekil 2.3: Kuş ve palin çarpma esnasındaki etkileşimi (Lagrangian yaklaşımı) [9]. ..	9
Şekil 2.4: Yaban ördeğinin gerçeğe yakın SPH modeli [10].....	10
Şekil 2.5: Açıklık oranı 5 olan (solda) ve açıklık oranı 10 olan (sağda) Lagrangian kuş modeli [11].	11
Şekil 2.6: ALE kuş modelinde elemanlar (solda) ve akışkan malzeme (sağda) [11].	12
Şekil 2.7: 1.800 parçacıklı(solda) ve 4.500 parçacıklı(sağda) SPH kuş modeli [11].	13
Şekil 2.8: Lagrangian, ALE ve SPH modellerinin deformasyonları [11].....	14
Şekil 2.9: Farklı geometrideki SPH kuş modellerinin plağa çarpması [6].	19
Şekil 2.10: Farklı malzemelerden oluşturulmuş örnek kuş modeli [21].....	20
Şekil 2.11: SPH(solda,LS-DYNA çözücüsü) ve Lagrangian (sağda,Dytran çözücüsü) metotlarının uygulandığı çarpmaların 2 ms ve 3.6 ms'deki gösterimleri [24].	21
Şekil 2.12: Kuş çarpması sürecinin farklı zamanlarda yüksek hızlı kamera ile çekilen fotoğrafları ve analiz sonuçlarının kıyaslanması [8].	22
Şekil 2.13: Lagrangian ve SPH ile küre şeklinde modellenen örnekler [8].....	23
Şekil 2.14: 1 ms'deki çarpma tepkisi [22].	23
Şekil 2.15: 4 ms'deki çarpma tepkisi [22].	24
Şekil 2.16: Silindirik kuş modeli ve basitleştirilmiş kare plak [22].	24
Şekil 2.17: SPH ile modellenen çeşitli kuş geometrilerinin analiz sırasında görünümü [25].	25
Şekil 2.18: CEL yöntemi ile yapılan analiz sonucu ile Wilbeck'in deney verilerinin karşılaştırılması [4].....	26
Şekil 2.19: Analiz yöntemlerinde kuşların şekillerinin ve basınç eğrilerinin değişimi [23].	27
Şekil 2.20: Kuş ve hedefin kurulumu ve kullanılan 4 sensörün konumları [10].	28
Şekil 2.21: a) Eş değer gerilme-eş değer yer değiştirme diyagramı b) Eş değer yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak hasar değişkeni [27].	30
Şekil 2.22: Ön yüklemeli kompozit plakta kuş çarpması simülasyonu (V=150 m/s) [28].	32
Şekil 3.1: Kuş modeli geometrisi ve Wilbeck'in deney sonuçları [23].....	37
Şekil 4.1: Çarpma noktalarının gösterimi [29].	39
Şekil 4.2: Çelik bilye için LS Pre – Post girdileri.	40
Şekil 4.3: Polikarbonat plak için LS Pre – Post girdileri.....	41
Şekil 4.4: t=0 ms anındaki çarpma analizinin merkezden 0, 10, 20, 30, 40, 50 mm uzaklık için gösterimi.	41
Şekil 4.5: Enerji emiliminin zamanla değişimi [29].....	42

Şekil 4.6: Enerji emiliminin zamanla değişimi (Bu çalışma).	42
Şekil 4.7: Gerininin zamanla değişimi [29].	43
Şekil 4.8: Gerininin zamanla değişimi (Bu çalışma).	43
Şekil 5.1: Kuş malzeme özellikleri için LS Pre – Post girdileri.	46
Şekil 5.2: SPH yöntemi ile LS-DYNA’da modellenen yarım küre uçlu silindir geometrisindeki kuş modeli.	46
Şekil 5.3: Gazelle SA341 helikopteri 3D Geometrisi [33].	47
Şekil 5.4: Gazelle SA341 helikopterine ait çarpmanın gerçekleştiği kanopi [33].	47
Şekil 5.5: Dauphin AS365 helikopteri 3D Geometrisi [34].	48
Şekil 5.6: Dauphin AS365 helikopterine ait çarpmanın gerçekleştiği kanopi [34]. ..	48
Şekil 5.7: Gazelle SA341 helikopterinin kanopi modeli	49
Şekil 5.8: Dauphin AS365 helikopterinin kanopi modeli.	49
Şekil 5.9: Kanopi modeli için LS Pre – Post girdileri.	50
Şekil 6.1: $t=0$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin ortasına çarpma – üstten görünüm.	52
Şekil 6.2: $t=0$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin ortasına çarpma – yandan görünüm.	52
Şekil 6.3: $t=7,5$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin ortasına $V=90$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.	53
Şekil 6.4: $t=7,5$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).	53
Şekil 6.5: $t=7,5$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).	54
Şekil 6.6: $t=7,5$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin ortasına $V=100$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.	54
Şekil 6.7: $t=7,5$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).	55
Şekil 6.8: $t=7,5$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).	55
Şekil 6.9: $t=7$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin ortasına $V=110$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.	56
Şekil 6.10: $t=7$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).	56
Şekil 6.11: $t=7$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).	57
Şekil 6.12: $t=0$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin üst bölgesine çarpma – üstten görünüm.	58
Şekil 6.13: $t=0$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin üst bölgesine çarpma – yandan görünüm.	59
Şekil 6.14: $t=5,5$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin üst bölgesine $V=100$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.	59
Şekil 6.15: $t=5,5$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).	60
Şekil 6.16: $t=5,5$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).	60
Şekil 6.17: $t=0$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin köşesine çarpma – üstten görünüm.	61
Şekil 6.18: $t=0$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin köşesine çarpma – yandan görünüm.	61
Şekil 6.19: $t=7,5$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin köşesine $V=100$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.	62
Şekil 6.20: $t=7,5$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).	62
Şekil 6.21: $t=7,5$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).	63
Şekil 6.22: $t=0$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin ortasına çarpma – üstten görünüm.	64

Şekil 6.23: $t=0$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin ortasına çarpma – yandan görünüm.	65
Şekil 6.24: $t=6,7$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin ortasına $V=90$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.	65
Şekil 6.25: $t=6,7$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).	66
Şekil 6.26: $t=6,7$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).	66
Şekil 6.27: $t=6,4$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin ortasına $V=100$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.	67
Şekil 6.28: $t=6,4$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).	67
Şekil 6.29: $t=6,4$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).	68
Şekil 6.30: $t=6$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin ortasına $V=110$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.	68
Şekil 6.31: $t=6$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).	69
Şekil 6.32: $t=6$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).	69
Şekil 6.33: $t=0$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin üst bölgesine çarpma – üstten görünüm.	71
Şekil 6.34: $t=0$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin üst bölgesine çarpma – yandan görünüm.	71
Şekil 6.35: $t=4,5$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin üst bölgesine $V=100$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.	72
Şekil 6.36: $t=4,5$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).	72
Şekil 6.37: $t=4,5$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).	73
Şekil 6.38: $t=0$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin köşesine çarpma – üstten görünüm.	73
Şekil 6.39: $t=0$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin köşesine çarpma – yandan görünüm.	74
Şekil 6.40: $t=5$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin köşesine $V=100$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.	74
Şekil 6.41: $t=5$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).	75
Şekil 6.42: $t=5$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).	75
Şekil 6.43: Gazelle SA341 - Kuş geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı iç enerji değişimi.	79
Şekil 6.44: Gazelle SA341 - Kuş geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı kinetik enerji değişimi.	79
Şekil 6.45: Gazelle SA341 - Kanopi geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı iç enerji değişimi.	79
Şekil 6.46: Gazelle SA341 - Kanopi geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı kinetik enerji değişimi.	80
Şekil 6.47: Dauphin AS365 - Kuş geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı iç enerji değişimi.	81
Şekil 6.48: Dauphin AS365 - Kuş geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı kinetik enerji değişimi.	81
Şekil 6.49: Dauphin AS365 - Kanopi geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı iç enerji değişimi.	82
Şekil 6.50: Dauphin AS365 - Kanopi geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı kinetik enerji değişimi.	82



KUŞ ÇARPMASINA MARUZ HELİKOPTER KANOPİLERİNİN YAPISAL DAVRANIŞI

ÖZET

Kuş çarpmasının havacılık alanındaki tanımını yapılacak olursa; uçuş esnasında, kalkışta veya inişte, bir hava aracı ile bir kuş arasında gerçekleşen çarpışma olayı olarak ifade edilebilir. Kuş çarpması olayları, uçuş güvenliğini önemli derecede etkilemekle birlikte hava araçları için büyük bir tehdit oluşturmaktadırlar. Havacılık dünyasında gerçekleşen kuş çarpması olaylarında, önemli ölçüde kayıplar yaşanmaktadır. Geçmiş istatistiki veriler incelendiğinde; kuş çarpması olayları, yıldan yıla artış göstermektedir. Bu durumun yaşanması küreselleşme ile birlikte yıldan yıla artan uçuş sayısı, kuş popülasyonlarının dünya üzerindeki yayılma etkisi ve sürülerin göç durumu ile açıklanabilir. Tüm kuş çarpması vakaları incelendiğinde; çoğunlukla hava araçlarının kalkış ve inişleri sırasında, ya da düşük irtifadaki uçuşları sırasında meydana geldiği görülmektedir. Az sayıda da olsa, yüksek irtifalarda (6000-9000 m arası) kaydedilen kuş çarpması kazaları da bulunmaktadır.

FAA'in 2005'te vahşi yaşam yönetimi konusunda hazırladığı rapora bakıldığında, kazaların %8'den azı 900 metrenin üzerinde gerçekleşmiştir. Kazaların %61'i ise 30 metreden düşük irtifalarda meydana gelmiştir. Uçağa çarpma kuvveti; çarpan nesnenin ağırlığına, hız farklarına ve çarpışmanın yönüne bağlı olmaktadır. Çarpma enerjisi, hız farkının karesi ile doğru orantılı olarak arttığından; küçük bir kuşun düşük hızda, bir araba ön canına çarpması durumunda daha düşük bir zarar meydana gelecektir. Yüksek hızlı çarpışmalar önemli derecede maddi zarara yol açmakla birlikte ölümcül kazalara da sebebiyet vermektedirler. Ancak, FAA'e göre, kuş çarpmalarının sadece %15'i uçakta maddi hasara sebep olmaktadır. Son yıllarda (1990 ile 2009 arasında) gerçekleşen, hava araçları adına kayıtlı bulunan 99.420 kuş çarpması kazasının yaklaşık binde 5'i helikopterlere aittir ve helikopter kazalarının yaklaşık yüzde 50'si maddi zararlar sonucunda olmuştur. Toplam kuş çarpması kazalarına bakıldığında, maddi hasarlı kazaların yüzde 4'ü, yaralanmalı kuş çarpması kazalarının ise yüzde 17'si helikopterlere aittir. İstatistiki verilere göre; bu projede incelenecek olan helikopterlerin kanopi bölgesine kuş çarpması; helikopter parçalarına kuş çarpması yüzdesi olarak en üst basamakta bulunmaktadır.

Sertifikasyon amacıyla gerçekleştirilen deneylerde, çarpan ve çarptırılan cisimlerin çeşitliliği maliyetlerin yüksek olmasına sebep olmaktadır. Gerçekleştirilen bu deneylerde mevcut parametrelerin çokluğu, kuş çarpması kazasının test ortamında yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bu koşullar düşünüldüğünde, kuş çarpması problemini bilgisayar ortamında gerçekleştirilerek maliyet yükünden kurtulmayla birlikte, deneylerde kullanılan kuşların varlıklarını sürdürebilmesine olanak sağlanacaktır. Modelleme imkanlarını geliştirmek ve sayısal yöntemlerle doğrulama yapmak, zaman ve para kaybını ciddi anlamda önlemektedir. Çarpma etkisi altında uçak yapılarının nasıl tepki vereceğini tahmin edebilmek için, doğru şekilde bir kuş modeli

oluşturulması gerekmektedir. Az sayıda deney yapılmış olmasıyla birlikte, kuş modelleri genelde son 30 yıldaki test verilerine göre geliştirilmektedir.

Kuş modellemede kullanılan yöntemler, Lagrangian kuş modeli, ALE kuş modeli, ve SPH modeli olarak sıralanabilir. Birçok çalışma incelenerek elde edilen sonuçlarda, 1970'lerde basit simülasyon modellerinin kullanıldığı, ardından çarpan cismin Lagrangian ile modellendiği, sonraki zamanlarda ise, Lagrangian modelde çözüm ağı bozulmalarının fazla olmasından dolayı Eulerian ve SPH yöntemlerinin daha çok öne çıktığı ifade edilmiştir. Ayrıca, bu yöntemlerden hepsinin aslında dezavantajları olduğu, ancak farklı problemler için farklı yöntemlerin kullanılabileceği de sonuçlar içerisinde. Bir diğer sonuç ise; oda sıcaklığında su ve hava karışımı özellikleri kullanılarak, çarpan cisim için SPH metodunun durum denklemi ile birlikte kullanımının ön plana çıkmasıdır. Bu sonuçlar doğrultusunda; model oluşturulurken, kuş karakterlerini en iyi yansıtan yöntem olan SPH metodunun kullanılması uygun görülmüştür.

Kuş çarpması analizlerinde; ana problemler, şeklin seçimi ile başlar, malzeme özellikleri ve kuş modellemede kullanılacak olan simülasyon yaklaşımı ile devam eder. Katı kuş modeli oluşturmada, yaygın teknik olarak silindir, küre yada yarım küre uçlu silindir şekilleri kullanılır. Bu geometriler içinden, kuş geometrisine en yakın olan yarım küre uçlu silindir geometrisi, projede çarpan cisim olarak seçilmiştir. Malzeme özellikleri ise genel olarak suyun özelliklerine benzer olarak seçilmiş ve sıfır boşluk oranı kullanılmıştır.

Yapılan kuş çarpması analizindeki asıl amaç, 2 farklı kanopi geometrisinin farklı bölgelerine farklı hızlarla yapılan çarpma analizlerinin nihayetinde elde edilecek sonuçların birbirleriyle karşılaştırılmasıdır. Havacılık sektöründe faal durumda bulunan Gazelle SA341 ve AS365 Dauphin helikopterlerinin kanopisinin modellemesi gerçekleştirilmiştir. LS-DYNA çözücüsünde; yarım küre uçlu silindir şeklinde oluşturulan ve SPH metodu ile modellenen kuş modelinin, oluşturulan iki farklı kanopi modelinin kritik olduğu düşünülen orta, üst ve köşe bölgelerine, 3 farklı hızla çarpma analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu analizlerin sonucunda; kanopi geometrileri üzerinde oluşan deplasman değerleri ile von Mises gerilmeleri, ve kuş geometrisi ile kanopilerin enerji değişimleri elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Farklı kanopi geometrilerinin benzer noktalarına aynı hız ile yapılan çarpma analizleri sonucunda, geometri etkisiyle farklı sonuçlar ortaya çıkmış, bombeli yapılara nazaran düzlemsel yapıdaki kanopilerin kuş çarpmasına daha az dayanıklı olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı kanopinin farklı noktalarına yapılan çarpma analizleri sonucunda ise yoğunlukla ankastre bağlı kenarlara yaklaştıkça, oluşan maksimum deplasman değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bir kanopinin aynı bölgesine farklı hızlarla gönderilen kuşun çarpması sonucunda ise, artan enerjinin sonucu olarak; hız arttıkça oluşan maksimum deplasmanlar artmış ve maksimum von Mises gerilmeleri daha fazla çıkmıştır. Çarpma anında yüksek kinetik enerjiye sahip kuş modeli ise, çarpmadan sonra enerjisini kanopiye aktararak kanopinin kinetik ve iç enerjisinin zamanla artmasına sebep olmaktadır. Kaybedilen bu enerjinin çoğunu kanopi modeli iç enerji olarak almaktadır. Kuş geometrisinin iç enerjisi ise, diğer enerjilere nazaran az da olsa sürekli bir artış göstermektedir. Genel duruma bakıldığında ise, polikarbonat malzemesinin sünek özelliğinden (düşük kırılma gerinimi ve düşük elastisite modülü) dolayı, yüksek deplasmanlar elde edilmiş ancak verilen hızlarda kırılma olayı gerçekleşmemiştir. Daha yüksek hızlarda çarpma analizi yapılması durumunda kırılmanın gerçekleşeceği öngörülmektedir.

STRUCTURAL BEHAVIOR OF HELICOPTER CANOPIES SUBJECTED TO BIRD STRIKE

SUMMARY

In aviation field; the definition of the bird strike can be expressed as a collision between any air vehicle and a bird while take off, descending or cruise flight. Bird strike incidents are a big threat to the air vehicles and have a significant effect to the flight safety. These strikes also lead to the rejected take off situations. Heavy losses occur on the bird strike incidents. In the last 20 years; there are 200 loss of lives during 18 big bird strike accidents. In addition, the annual cost of these bird strike events are 1.5 billion dollars for the whole aviation sector. According to the statistics of the past informations; bird strike occurrences are increasing year by year, although the resistance of the structure of air vehicles to the strike is increasing while designing an aircraft. The main reasons of this contradiction can be explained as the increasing flight numbers year by year with the globalizing world, propagation of bird populations over the world and immigration of flocks of birds. According to the investigation of all bird strike incidents, it can be clearly seen that these collisions mostly occurs during take off and landing phases or low altitude flights. However, there are also collisions with a small number which occurs during flight at high altitudes between 6000 and 9000 meters.

Considering FAA, which was prepared for the topic of wild life management in 2005; less than 8% of the accidents occurred at above 900 meters altitude. On the other hand, 61% of the accidents occurred at less than 30 meters altitude. The force of any strike to an air vehicle is dependent to the weight of impacted object, speed differences and the direction of the collision. Since the strike energy is increasing as directly proportional to the square of speed difference, there would be a small damage in case of a collision between a small bird with low speed and a car windshield. The collisions with higher speeds not only cause material damages, but also results in several fatal accidents. However, according to the FAA, only 15 % of all bird strike incidents result in material damages. Recent years (Between 1990 and 2009), helicopters have 0,5 % of recorded 99420 bird strike accidents for air vehicles. Additionally, approximately half of the bird strike accidents on helicopters ended up with material damages. In accordance with the data of previous accidents, canopy has the maximum number of the strikes compared to the other components of helicopter.

Considering the tests aiming certification process, the variety of birds and targets leads to high costs. Existing lots of parameters in the tests makes difficult to perform these tests. With these conditions, by solving these bird strike problems in computers will not only decrease the cost for the tests, but also save the life of birds which are used in these tests. By improving modelling possibilities and make corrections with numerical methods will significantly prevent loss of time and money. In order to predict how the aircraft structures will give a reaction in case of any bird strike, it is essential to create a bird model in an accurate way. With the fact that there exist only small numbers of tests, bird models are generally improved by the test data of last 30 years. LS Dyna solver is mainly used for this kind of problems. LS Dyna is the most ordinarily utilized

unequivocal recreation program, equipped for simulating the reaction of materials to brief times of serious loading. Its numerous components, contact definitions, material models and different controls can be utilized to simulate complex models with control over every one of the subtleties of the issue. In order to perform a bird strike simulation, it is essential to model a bird or similar geometry.

The main methods to model the bird object can be expressed as Lagrangian bird model, ALE bird model, and SPH model. The Lagrangian method divides an infinite volume to the so many elements which are small geometries. Related geometries have a simple shape, so it becomes easy to understand the state of the solid during the simulation with the mathematical expressions. It is increasingly difficult to calculate the state and the stresses in the elements because the time step is decreasing with large deformations. In the ALE formulation, related material goes through the mesh. A material moves through a fixed mesh similar to Eulerian formulation. On the contrary, mesh is allowed to deform and move so as to follow the flow of fluid. This situation decreases the size of the required mesh. The SPH method is a particle method. Unlike the particle in cell method, SPH does not need a grid to calculate spatial derivatives. Instead, they are found by analytical differentiation of interpolation formula. According to the main results, which were obtained by investigating lots of studies; basic simulation models were used in the 1970s, afterwards, the bird object was modelled with Lagrangian. After that, because of the fact that there are lots of meshing degradation in Lagrangian; Eulerian and SPH came to the fore. Besides, it is already known that all these methods have disadvantages, however, different methods can be used for different cases. The another result for the bird model is to use the equation of state with SPH method by using the characteristics of the mixture of water and wheather in the room temperature. In the direction of these results, in order to get most successful output, the most convenient method was chosen as SPH method to create bird model. In the bird strike simulations, the bird acts like a fluid and divides into very small particles in severe conditions.

In order to verify the method of this project; the verification study for the article with the name of “Effect of distance from the support on the penetration mechanism of clamped circular polycarbonate armor plates” has been performed. In this study, the rigid projectile is impacted to the polycarbonate plate for the different locations with both experiments and analyses. The related strike is performed for the locations at 0 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm and 50 mm with 138 m/s velocity. In this article, the effect of the distance for the circular polycarbonate plate for the strike condition was investigated.

In the bird strike simulations, the main problems begin with the selection of the geometry and continue with the material specifications and simulation approach which will be used in bird modelling. After having a wide literature review, it is found that there are several geometries used instead of bird geometry. Cylinder, sphere or cylinder with semi spherical ends are commonly used geometries for creating the solid bird model. Within these geometries, the cylinder with semi spherical ends was chosen as the bird geometry for this project, because the most similar geometry for the bird shape is cylinder with semi spherical ends. Material specifications were generally chosen as similar to the water specifications with zero porosity. In order to simulate the bird strike analysis for the different locations on the canopy, it is essential to create a canopy model. In this project, it is mainly intended to investigate and compare the results of bird strike analyses with different velocities and in different locations (middle, top and corner) of two different canopies. The canopy geometry can also be

investigated since analyses are performed for two different canopy geometry. The canopies for the active helicopters Gazelle SA341 and AS365 Dauphin were chosen. The 3D CAD drawings of these geometries were obtained. Afterwards, these canopies are modelled in LS-DYNA program. In the LS-DYNA solver, the analysis for the strike has been performed with the bird geometry, which is modelled with the SPH method and in the geometry of cylinder with hemi spherical ends, to the different locations of different canopies with different velocities.

For the both canopies, bird strike analyses have been performed to the middle upper and corner regions with the velocities of 90 m/s, 100 m/s and 110 m/s. The results of these analyses were compared in terms of obtaining maximum displacement values and maximum von Mises stress values of canopies, internal and kinetic energy changes with time for both bird geometry and canopy geometries. The definitions can be given for these physical expressions. Von Mises stress is a value used to determine if a given material will yield or fracture. It is mostly used for ductile materials. The von Mises yield criterion states that if the von Mises stress of a material under load is equal or greater than the yield limit of the same material under simple tension, which is easy to determine experimentally, then the material will yield. Displacement is an object's change in position, only measuring from its starting position to the final position. Kinetic energy is the energy of motion, observable as the movement of an object, particle, or set of particles. Internal energy is defined as the energy associated with the random, disordered motion of molecules. It is separated in scale from the macroscopic ordered energy associated with moving objects; it refers to the invisible microscopic energy on the atomic and molecular scale.

For the two different canopy geometries; according to the results of the the bird strike analysis to the similar regions of the canopies with the same velocity, it is seen that curved structures have more resistance to the bird strike event compared with less curved structures. Because the maximum displacement values for curved canopy are so much lower than flat one. Behind the other design parameters, designers should take attention to this point for the strike conditions. The other result for the bird strike analysis which is performed for the same canopy but for different regions is that the maximum displacement value is getting smaller while the impact region is getting closer to the edges of canopy. In other words, the maximum displacement value is most in the case for striking in the middle area of canopy. However, the maximum von Mises stress is higher for the strike analysis which is performed at the corner region of the canopies. The other existing factor in this project is performing bird strike analysis with different velocities for the same region of each canopy. In this case, while the velocity value is increasing, with the result of increasing energy, maximum displacement values and maximum von Mises stresses are increasing. At the beginning of the strike event, the bird model has its own velocity. This is the reason that only the bird model have kinetic energy in the first phase of strike. However, after the strike starts, this kinetic energy is transferring to the canopy model time by time as both kinetic energy and internal energy. The kinetic energy of bird model is getting smaller while most of missing energy is obtained by canopy geometry as canopy internal energy. Even it is smaller when compared to the internal energy of canopy, the kinetic energy of the canopy is also increasing while the kinetic energy of the bird model is decreasing. Meanwhile, the internal energy of the bird model is slightly increasing time by time. According to the all these bird strike analysis, because of the ductility (low failure strain and low elasticity module) of the polycarbonate material, which is used as the main material for the canopy models, high displacement values are obtain

but there is no failure for the canopy model with the given velocities. These velocities are probable bird strike velocities for the helicopters. However, it is foreseen that the failure will occur in the higher velocities for the canopy geometries.



1. GİRİŞ

Gerçekleşen kuş çarpması olaylarında, önemli ölçüde kayıplar yaşanmakta ve uçuş güvenliği önemli derecede etkilenmektedir. Geçmiş istatistiki veriler incelendiğinde kuş çarpması olayları, uçakların tasarımında çarpmaya karşı dayanıklılık ne kadar artırılrsa da, yıldan yıla artış göstermektedir. Bu zıtlığın yaşanması küreselleşme ile birlikte yıldan yıla artan uçuş sayısı, kuş popülasyonlarının dünya üzerindeki yayılma etkisi ve sürülerin göç durumu ile açıklanabilir.

Tüm kuş çarpması vakaları incelendiğinde; çoğunlukla hava araçlarının kalkış ve inişleri sırasında, ya da düşük irtifadaki uçuşları sırasında meydana geldiği gözlemlenmektedir. Az sayıda da olsa, yüksek irtifalarda (6000-9000 m arası) kaydedilen kuş çarpması kazaları da bulunmaktadır. FAA'in 2005'te vahşi yaşam yönetimi konusunda hazırladığı rapora bakıldığında, kazaların %8'den azı 900 metrenin üzerinde gerçekleşmiştir. Kazaların %61'i ise 30 metreden düşük irtifalarda meydana gelmiştir [1].

Uçağa çarpma kuvveti; çarpan nesnenin ağırlığına, hız farklarına ve çarpışmanın yönüne bağlı olmaktadır. Çarpma enerjisi, hız farkının karesi ile doğru orantılı olarak arttığından; küçük bir kuşun düşük hızda, bir araba ön canıma çarpması durumunda daha düşük bir zarar meydana gelecektir. Yüksek hızlı çarpışmalar önemli derecede maddi zarara yol açmakla birlikte ölümcül kazalara da sebebiyet vermektedirler. Ancak, FAA'e göre, kuş çarpmalarının sadece %15'i uçakta maddi hasara sebep olmaktadır.

Son yıllarda (1990 ile 2009 arasında) gerçekleşen, hava araçları adına kayıtlı bulunan 99.420 kuş çarpması kazasının yaklaşık binde 5'i helikopterlere aittir ve helikopter kazalarının yaklaşık yüzde 50'si maddi zararlar sonucunda olmuştur. Toplam kuş çarpması kazalarına bakıldığında, maddi hasarlı kazaların yüzde 4'ü, yaralanmalı kuş çarpması kazalarının ise yüzde 17'si helikopterlere aittir [2]. İlk helikopter uçuşundan 2014 yılına kadar olan süreçte kayda geçen helikopterlere kuş çarpması kazalarının, helikopterlerin kısımlarına göre dağılımı Çizelge 1.1'de görülmektedir.

Çizelge 1.1: Kuş çarpmasına maruz kalan ve zarar gören helikopter parçaları [2].

Bölge	Çarpma		Zarar Görme	
	Sayı	Yüzde	Sayı	Yüzde
Kanopi	283	35	150	39
Pervane	165	20	43	11
Burun	91	11	44	11
Gövde	77	9	26	7
Radom	21	3	11	3
Kuyruk	23	3	15	4
Işıklandırma	9	1	8	2
Motor	24	3	3	1
İniş Takımı	10	1	4	1

Bu projede incelenecek olan helikopterlerin kanopi bölgesine kuş çarpması etkisinin Çizelge 1.1’de yüzde olarak en üst basamakta bulunduğu görülmektedir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu proje yapılırken ki esas amaç sayısal yöntemler kullanılarak, seçilecek farklı şeffaf helikopter kanopilerinin farklı kritik noktalarına, farklı hızlarda kuş çarpması durumundaki deformasyon ve hasarların karşılaştırılması ve sonuçların yorumlanmasıdır. Sayısal yöntemler ile gerçek malzemelerle yapılan pahalı fiziksel testler kıyaslandığında sayısal yöntemlerin daha verimli ve maliyeti daha düşük olan bir araç olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu çerçevede, literatür araştırması yapılarak kullanılan yöntemler, kuş malzeme ve geometri modellemesi, kuş çarpması teorisi, çözüm yöntemi, incelenen parametreler, elde edilen sonuçlar vb. bakımlarından analiz edilmiştir.

Bu projedeki amacımız, seçilecek iki farklı şeffaf helikopter kanopisinin (Gazelle SA341 ve Dauphin AS365) farklı noktalarına (orta, üst ve köşe), farklı hızlarda (90 m/s, 100 m/s, 110 m/s) kuş çarpması durumundaki deformasyon ve hasarların sonuçlarını incelemek ve bu farklı durumların karşılaştırmasını yaparak bu sonuçları yorumlamaktır. Kuş çarpması, LS-DYNA çözücüsünde gerçekleştirilmiştir. Kuş geometrisi olarak, yarım küre uçlu silindir seçilmiş ve SPH metodu ile modellenmiştir. Yarım küre uçlu silindir modellenirken, literatürde en çok kullanılan ve daha doğru sonuçlar veren Lineer Polinomik EOS denklemleri kullanılmıştır. Hedef olarak ise, farklı kanopi modelleri incelenmiş ve sektörde öneme sahip iki helikopter kanopisi seçilmiştir. Bu kanopilerin ANSYS LS-DYNA yazılımında sonlu eleman modeli

oluşturulmuş malzeme olarak polikarbonatın mekanik ve fiziksel özellikleri girilmiştir. Kuş arpması işlemi yapılırken kanopi üzerindeki alt, orta ve köşe olmak üzere kritik noktalar baz alınmış, 90 m/s, 100 m/s ve 110 m/s olarak 3 farklı hızda çarpma analizleri gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan farklı sonuçlar değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

1.2 Tezin Organizasyonu

Tezin Giriş bölümünde konunun önemi ve uygulamadaki yerleri anlatıldıktan sonra tezin amacı ve kapsamı ile organizasyonu verilmiştir. Literatürdeki çalışmaların analizinin incelendiği 2. Bölümde, konu başlıkları altında sınıflandırmalar yapılmış; kuş modeli oluşturma yöntemleri, kuş geometrisi modellemesi ve malzeme özellikleri, hedefin oluşturulması gibi bilgiler özetlenmiştir. 3. Bölümde kuş çarpması teorisi anlatılmıştır. 4. Bölümde tezde uygulanan yönteminin doğrulanması amacıyla literatürden seçilen bir çalışmadaki çarpma olayının modellenmesi ve analiz yapılmış, elde edilen sonuçlar literatürdekilerle karşılaştırılmıştır. 5. Bölümde arpma analizlerinde kullanılacak olan kuş ve kanopi modelleri oluşturulmuştur. 6. Bölümde iki farklı kanopi modeli için 100 m/s hızla kanopilerin kritik olacağı düşünülen farklı bölgelerine çarpma analizleri gerçekleştirilmiş olup, ardından bu iki kanopi modeli için 3 farklı hızda çarpma analizi yapılmış ve sayısal sonuçlar bu bölümde verilmiştir. 7. Bölümde yapılan çalışmanın zeti, tüm bu yapılan analizlerin yorumlanması, değerlendirilmesi, analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve yapılan çıkarımlar bulunmaktadır.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatür analizinde bazı çalışmalarda hem deneysel hem sayısal çözüm çalışmalarının birlikte yapıldığı; bazı çalışmalarda yalnız sayısal analizlerin yapıp diğer araştırmacıların yaptığı deneysel çalışma sonuçlarıyla doğrulandığı görülmektedir. Heimbs [4], kompozit uçak yapılarına kuş çarpması simülasyonu konusunda yapılan çalışmaları tarayarak kapsamlı bir inceleme gerçekleştirmiştir. Heimbs'in çalışmasının odak noktası kompozit yapılara yumuşak cismin çarpmasından kaynaklanan yüksek hızlı darbe yüklerinin Abaqus/Explicit yazılımı ile sayısal modellemesi ve simülasyonudur. Çalışmada; önce, düz kompozit plaklar üzerine darbe yüklerini deneysel ve sayısal olarak inceleyen çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar modelleme yöntemlerinin doğrulanmasını sağlamaktadır. Bu plakların bir kısmı mekanik davranışın etkisini incelemek amacıyla basma ve çekme ön yüklemelerine maruz bırakılmışlardır. Bu ön yüklemelerin plağın yapısal cevabı üzerinde önemli etkilerinin olduğu gösterilmiştir.

Kuş çarpması analizlerinde; ana problemler, şeklin seçimi ile başlar, malzeme özellikleri ve kuş modellemede kullanılacak olan simülasyon yaklaşımı ile devam eder. Katı kuş modeli oluşturmada, yaygın teknik olarak silindir, yarım küre yada yarım küre uçlu silindir şekilleri kullanılır. Malzeme özellikleri genel olarak suyun özelliklerine benzer olarak seçilir. Simülasyon yaklaşımı, LS-DYNA'da bulunan Lagrangian, SPH ya da ALE yaklaşımları ile yapılabilir.

Literatür özeti kısmında, daha önce yapılan çalışmalardaki deneyler ve sayısal analizlerle birlikte kuş modelleri, hedef modellenmesi için kullanılan yöntemler incelenecektir.

2.1 Kuş Modeli Oluşturma Yöntemleri

Modelleme imkanlarını geliştirmek ve sayısal yöntemlerle doğrulama yapmak, zaman ve para kaybını ciddi anlamda önlemektedir. Çarpma etkisi altında uçak yapılarının nasıl tepki vereceğini tahmin edebilmek için, doğru şekilde bir kuş modeli

oluşturulması gerekmektedir. Az sayıda deney yapılmış olmasıyla birlikte, kuş modelleri genelde son 30 yıldaki test verilerine göre geliştirilmektedir. Kuş modellemede kullanılan yöntemler, Lagrangian kuş modeli, ALE kuş modeli, ve SPH modeli olarak sıralanabilir.

Daha önceki yapılan kuş çarpma analizlerinde hedefe kuş tarafından uygulanan yük hedefin tepkisinden bağlantısız hale getirilirdi. Bu simülasyonlarda kuşun bir sonlu eleman modeli oluşturulmaz ve kuşların etkisi bir takım basitleştirici hipotezlerle oluşturulan bir zamana ve konuma bağlı yük olarak yapıya uygulanırdı [5]. Ancak 2000'den sonra yapılan çalışmaların çoğunda kuşun da sonlu eleman modeli oluşturulmuş, kuşun çarpacağı yüzeyde uygunluk sağlanarak çarpılan yapının cevabı ile bağlılık sağlanmıştır.

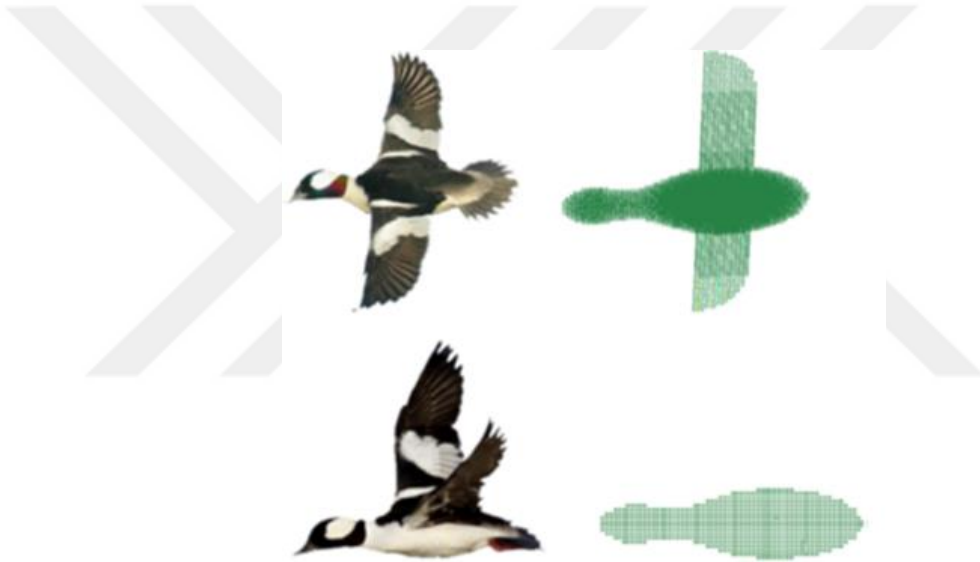
Bir kuş çarpmasında kuş bir akışkan gibi davranır ve çok ciddi durumlarda kuş çok küçük parçacıklar halinde dağılır. Kuş çarpması olaylarında kuşun modellenmesinde farklı sayısal yaklaşımlar ortaya konmuştur ve bunlardan aşağıda kısaca bahsedilecektir.

Hedayati ve Rad [6], yeni bir kuş modeli oluşturulmasını amaçlayan bir çalışma yapmışlar ve çözüm yöntemlerinden seçim yapmışlardır. Kuş çarpması sertifikasyon işlemleri için, deneysel testler çok pahalı olmakta ve aşırı zaman kaybına yol açmaktadır. Çok masraflı olan bu testlerin sayısını azaltmak için, çarpan cismin ve hedef tahtasının yani çarpılan cismin vereceği tepkileri güvenilir derecede tahmin etmek gerekir; bu da güvenilir bir analiz aygıtı ile yapılabilir. Sonlu elemanlar benzetimi, çok sayıda yapısal tasarım yöntemlerinin etkin bir şekilde değerlendirilmesini mümkün kılar. Bu şekilde yapısal ağırlık minimuma indirgenebilir ve sivil ya da askeri uçakların kuş çarpması riski, tasarım ile azaltılabilir.

Hedayati ve Rad ak yanaklı ördeğe (bufflehead) benzer geometride bir kuş modeli oluşturarak geleneksel kuş modelleri ve deneysel verilerle karşılaştırmışlardır [6]. Bu çalışmada; kuşu modellemek için uygulanmış olan SPH metodu, çözüm ağının kullanılmadığı bir yöntemdir. Bu yöntem, hareketin akış denklemlerini çözmek için kullanılan bir Lagrangian sayısal tekniğidir ve kuş modellemede en çok kullanılan yöntemdir. Oluşturulan kuş modeli dört farklı yönelimle (baş kısmından, kanat kısmından, alt kısmından veya kuyruk kısmından) uçağa çarptırılmıştır. Sonlu elemanlar benzetimlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kuşun alttan çarpması

durumu en çok hasara sebep olurken, kuyruktan çarpmasının minimum hasara sebebiyet verdiği belirlenmiştir. Gerçek kuşun gerçek şeklini modellemek zaman alıcı olduğundan, kuş şekli yerine küre, düz uçlu silindir, yarım küre uçlu silindir ve elipsoid kullanılmıştır. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde alttan çarpma durumları için elipsoid, kuyruktan çarpma durumları için ise yarım küre uçlu silindirin en uygun seçim oldukları tespit edilmiştir.

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi gerçek bir ak yanaklı ördek (bufflehead) esas alınarak onun SPH modeli oluşturulmuştur. Modeldeki kuş 0,3 kg ağırlığa ve 0,187 metre uzunluğa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca 0,31 metre kanat açıklığına sahiptir. 3 milimetre aralıklarla 16.284 SPH elementinden oluşan bu model kullanılarak daha önce anlatılan 4 farklı çarpma kategorisi incelemeye alınmıştır.



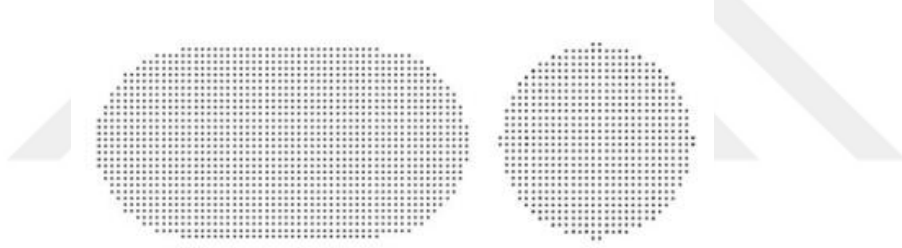
Şekil 2.1: Ak yanaklı ördek (Bufflehead) ve SPH modelleri [6].

Geçmişte, teknolojinin bu denli gelişmiş olmamasından dolayı; kuş çarpması testlerinin çoğu, rijit bir plağın hedef olarak kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Birçok farklı gövde biçimine sahip, farklı ağırlıklarda kuşlar kullanılmıştır.

Kuş çarpması, şiddeti yüksek ve kısa süren yüklemelerle karakterize edilmiştir. Malzemeler; yüksek gerinim oranlarına, büyük deformasyonlara ve elastik olmayan gerinimlere maruz kalırlar. Malzeme için kabul edilen elastik-plastik davranışlar, kuş ve hedef arasındaki etkileşimi incelemek için kullanılabilir. Sonlu eleman yazılımlarında, çarpma durumunda kuş modelini oluşturmak için çeşitli yaklaşımlar kullanılmıştır. Bunlar Lagrangian yaklaşımı, ALE yaklaşımı ve son zamanlarda sıkça kullanılan SPH yaklaşımı olarak ifade edilmiştir.

Hedayati ve Rad [7], gerçek bir yaban ördeğinin (mallard) anatomisini, CT görsellerinden sayısal olarak oluşturmuş ve SPH yöntemiyle analiz etmişlerdir, (Şekil 2.4).

Bu çalışmada, rijit bir hedefe yaban ördeğinin çarpması incelenmiştir. Gerçek kuş için elde edilen sonuçlar geleneksel kuş modellerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yaban ördeği (mallard) hedefe çarptığında; boşlukların (kavitelerin), havanın ve farklı yönelimlerin hesaba katılmasının etkileri de incelenmiştir. Yaban ördeği için yarım küre uçlu silindir modeli SPH yöntemiyle oluşturulmuştur. Bu model oluşturulurken, model içerisindeki boşluklar havanın SPH (air SPH) elemanları kullanılarak modellenmiştir. Bu da oluşabilecek maksimum basıncın, içerisindeki boşluklar doldurulmamış modele göre daha az olmasını sağlamaktadır. Ancak, hava dolu SPH elemanlarla boşlukların modellenmesi sonuçları önemli ölçüde etkilemez (etkisi %2'nin altındadır). Yaban ördeği için kullanılan geleneksel SPH modeli ise Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2: Yaban ördeği için kullanılan geleneksel SPH modeli [7].

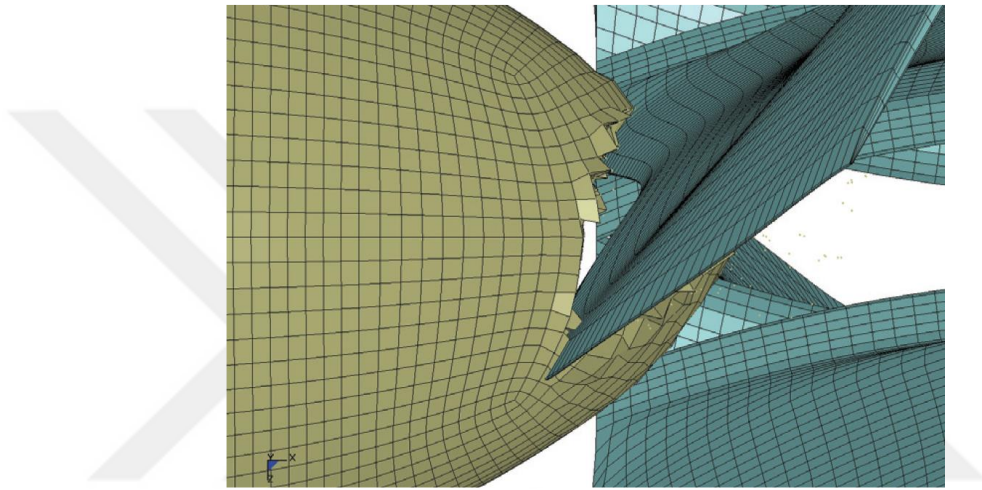
Liu ve diğ. [8], yüksek hızlı çarpmalar için SPH metodunun kullanılmasını uygun görmüş ve oluşturulan bu model, 150 m/s hızda hedefe çarpıtılmıştır. SPH ve sonlu elemanlar yöntemleri, kuş çarpması sürecini ve hedefin dinamik tepkisini simüle edebilmiştir. Farklı bölgelerde ölçülen ve hesaplanan gerinimler karşılaştırıldığında birbiriyle örtüşen sonuçlar vermiştir. Ek olarak, tahmin edilen deformasyonlar ve hasarlar, yüksek hızlı kamerada alınan sonuçlarla örtüşmektedir. Bu örtüşmeler de kullanılan yöntemlerin doğruluğunu göstermektedir.

Ryabov ve diğ. [9], SPH, ALE ve Lagrangian yaklaşımlarıyla fan palasına kuş çarpması analizini LS-DYNA yazılımını kullanarak karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçları kıyaslamıştır.

Bu çalışmada, pal modelleri için 440.000 elemanlı katı sonlu elemanlar ve *MAT_RIGID malzeme modeli kullanılmıştır.

Bütün yaklaşımlar için, kuş katı elipsoit olarak modellenmiş ve suya benzer malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Kuşun Lagrangian modeli 90.000 katı sonlu elemandan oluşmuştur ve pale çarpma esnasındaki görüntüsü Şekil 2.3'te verilmiştir. Gerçekleştirilen analizler esas alındığında Lagrangian modelinin, bu tip problemlerde daha tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

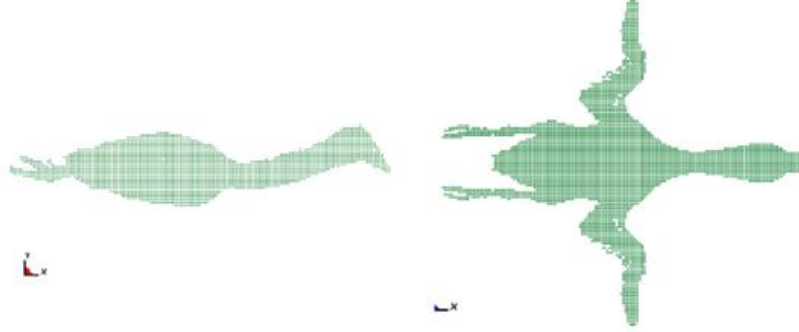


Şekil 2.3: Kuş ve palin çarpma esnasındaki etkileşimi (Lagrangian yaklaşımı) [9].

Hedayati ve diğ. [10] çalışmalarında, sayısal yöntemlerle oluşturulan farklı kuş modellerinin, rijit bir plağa çarpması durumunda elde edilecek basınç profillerini değerlendirerek Hugoniot ve daimi basınçların gerçek değerlerinin ne olduğunu, teorik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmak suretiyle incelemişlerdir. Ayrıca, kuş modelinin SPH yöntemi kullanılarak nasıl oluşturulacağı hakkında spesifik bilgiler vermişlerdir. Kuş modeliyle daha iyi sonuçlar almak için, SPH elemanlarının yoğunluğu modelin her tarafında homojen olmalıdır. Kuş şeklinde oluşturulan bu silindirin, sonlu elemanlar modeli 11.704 SPH modelinden oluşmuştur ve Şekil 2.4'te iki farklı açıdan gösterilmiştir.

Araştırmacıların bu çalışmadaki asıl amacı, teorik ve deneysel verilerden elde edilen Hugoniot ve daimi basıncın, birbirleriyle örtüşmemeleri problemine bir çözüm aramaktır. Yarım küre uçlu silindir ve yaban ördeği kuş modelleri kullanılmış ve iki basınç okuma yöntemi (ortalama alma ve sensör) kullanılmıştır. Sonuç olarak bu

Çalışmada sunulan yaban ördeği modelinin, basit fakat gerçekçi olmayan kuş geometrisi için elde edilen teorik değerlere yakın sonuç vermediği halde, deneysel verilere çok daha uygun sonuçlar verdiği görölmüştür.



Şekil 2.4: Yaban ördeğinin gerçeğe yakın SPH modeli [10].

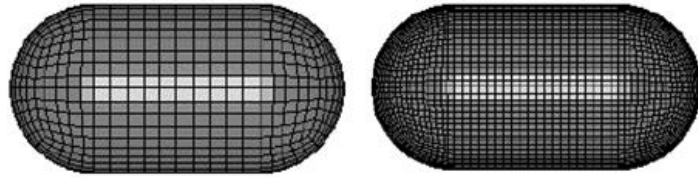
Lavoie ve diğ. [11], mevcut sayısal modelleri deneysel testlerle ve simölasyon araçlarıyla doğrulamak amacıyla kuş çarpması olayını incelemiştir. Bu alışma yapılırken, yöntemler detaylı olarak incelenmiş, şekillerle anlatılmış ve modeller oluşturulurken, daha iyi sonuçlar elde edebilmek için, her model birden fazla oluşturularak, kendi içerisinde de kıyaslama yapılmıştır. Mevcut olan modellerin performansları bazı kriterlere göre değerlendirilmiştir ve bu kriterler; çarpma merkezindeki basınç profili, kütle kaybı, çarpma merkezindeki impuls profili, radyal basınç dağılımı, oluşan deformasyonların şekli ve çözüm süresi olarak sıralanabilir. ALE, SPH ve Lagrangian metotları kullanılarak akışkan yapı etkileşimine tesir eden faktörlerin parametrik olarak çalışılması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut teorik ve deneysel bilgilerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Bu makalede 1 kg'lık bir kuş, 0,5x0,5 m ebatlarında bir kare plağa arpdırılmıştır. Plak 1200 kabuk elemana bölünmüştür. Plak ya rijit olarak ya da uygun sınır şartları tanımlanarak modellenmiştir. Kuş maddesinin yoğunluğu 950 kg/m^3 ve gözenekliliği %10 olarak alınmıştır. Seçilen modele bağlı olmaksızın elastik-plastik hidrodinamik kuş modeli bir durum denklemi (EOS) ile kullanılmıştır. Kuş için kullanılan malzeme modelinin kayma modülü 2,0 GPa, akma gerilmesi 0,02 MPa ve plastik pekleşme modülü 0,001 MPa'dır.

İlk özetlenen; Lagrangian model oluşturma yöntemi, bir hacmi çok fazla sayıda küçük geometrilere ayırır ve bu geometriler elemanlar olarak adlandırılır. Bu geometriler şekil olarak basit oldukları için, matematiksel bağıntılar kullanılarak simölasyon

boyunca, katının durumunu bilmeye imkan sağlar. Ancak, deformasyonlar çok büyük olduğu zaman, elemanlardaki durum (state) ve gerilmeleri hesaplamak aşırı derecede zorlaşır. Çünkü eleman açıklık oranına bağlı olarak değişen zaman adımları hızla azalmaya başlar. Bunun yanında, elde edilen sonuçların doğruluğu da azalmaya başlar. Ek olarak, bu yöntemde malzeme, çözüm ağı ile birlikte hareket ettiği için, malzeme büyük deformasyonlara maruz kaldığında, çözüm ağı da aynı büyük deformasyonlara maruz kalacaktır ve bu durum sonuçların doğruluğunun yitirilmesine ve sayısal kararsızlık oluşmasına sebep olacaktır.

Katı Lagrangian elemanları ile modellenen kuş modeli Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Soldaki şekilde gösterilen kuş modelinde, açıklık oranı (eleman uzunluğunun yarıçapa oranı) 5'tir ve bu model 2.000 katı kübik elemandan oluşmuştur. Sağdaki şekilde sunulan modelde ise bu oran 10'dur ve 16.000 katı kübik elemandan oluşmuştur.

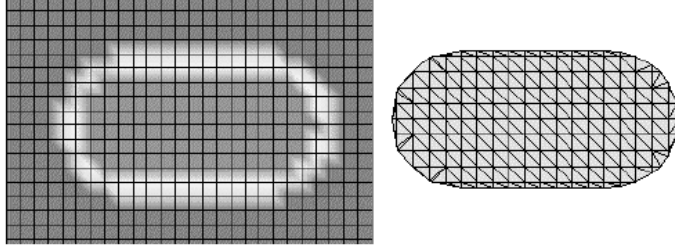


Şekil 2.5: Açıklık oranı 5 olan (solda) ve açıklık oranı 10 olan (sağda) Lagrangian kuş modeli [11].

Hedef ile olan etkileşim kuş ve hedef arasındaki düğüm-yüzey etkileşim algoritmasıyla kontrol edilir. Büyük bozulmaların üstesinden gelmek için, açıklık oranı 5 olan elemanlar 4,0, açıklık oranı 10 olan elemanlar ise 2,4 gerinim değerine ulaştıkları zaman silinirler. Bu çalışmada kullanılan ikinci modelleme metodu keyfi Lagrangian-Euler (ALE) metodudur. Bu formülasyonda, malzeme çözüm ağı boyunca hareket eder. Eulerian formülasyonundan farklı olan temel şey, burada çözüm ağının deformasyona uğrayabilmesi ve akışkanın akışını takip edecek şekilde hareket edebilmesidir. Bu da, Eulerian yöntemine kıyasla çok daha az sayıda çözüm ağı kullanılmasını sağlar.

Analizin ilk başlarında, daha yoğun olan malzeme çözüm ağının bir tarafında yoğunlaşır, ancak analiz ilerledikçe, akışkanın her yere dağılması mümkün hale gelir. Her zaman adımında, malzemenin konumu düğümlere göre hesaplanır. LS-DYNA programında, ALE kuş modeli, çoklu malzeme karakteristiğini kullanmaktadır. Bu da malzemelerin (kuş ve hava), simülasyon başlangıcında bir elemanda birlikte var

olmalarına imkan sağlamaktadır. Kuş ve çevresini oluşturmak için, eşit uzunluktaki, genişlikteki, ve derinlikteki yaklaşık 19.000 katı elemandan bir çözüm ağı oluşturulmuştur. Şekil 2.6’da ALE çözüm ağıının bir kısmı gösterilmektedir.



Şekil 2.6: ALE kuş modelinde elemanlar (solda) ve akışkan malzeme (sağda) [11].

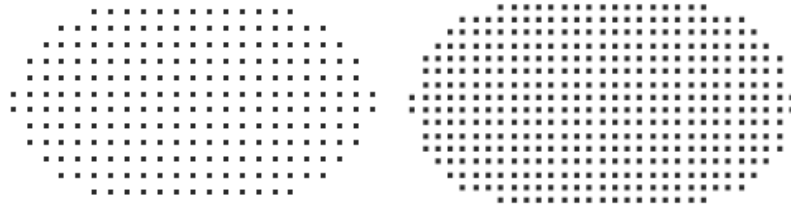
ALE yöntemi kullanıldığında, iyi sonuçlar almak için, kuş ve yapı arasındaki etkileşimin, `*CONSTRAINED LAGRANGE-IN-SOLID` komutu kullanılarak gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Sadece kuşla yapı arasında eşleşmeye (coupling) imkan vermek çok önemlidir. Aksi takdirde havanın boşlukları araya girip karışabilmektedir. Aynı zamanda, bir eleman için hesaplanan gerekli minimum hacim fraksiyonunun yeterince yüksek olması gerektiği belirtilmiştir. Böylece basınç artışı kuş çarptığında anlık olmaktadır. Sönümlenme öyle bir ayarlanmalıdır ki, basınç her zaman pozitif kalmalıdır. Son olarak, araştırmada bulunan en önemli parametre penaltı faktörüdür ve bu faktör akışkan ve yapı arasındaki etkileşimi kontrol etmektedir. İki adet eşleşme opsiyonu bulunmaktadır: Bir tanesi penaltı faktörünü sabit bir değere ayarlayabilmekte, diğeri ise bir yük eğrisi kullanarak, penetrasyona bağlı olarak direngenliği (stiffness) lineer şekilde arttırabilmektedir. Her iki seçenek de simülasyonlarda düşünülebilir.

SPH metodu Monaghan [12] tarafından 1970’in sonlarında, astrofizik problemleri için hiper hız (~ 10 km/s) çarpma uygulamalarında geliştirilmiştir. Bir kuşun çarpma sırasındaki büyük deformasyonlarından dolayı, bu teorinin düşük hızlardaki kuş çarpması analizlerinde bile kullanımı kabul görmektedir. Johnson [13] ve McCarthy [14] son zamanlarda bu tekniği kuş çarpması analizlerinde başarıyla kullanmış ve kabul edilebilirliğini de teyit etmiştir. SPH kuş modelinde, araştırmacılar tarafından varılan sonuçlar şu şekilde anlatılabilir: SPH metodu, hareket denklemleri için Lagrangian formülasyonunu kullanır, ancak grid yerine, interpolasyon formüllerini kullanmaktadır. Bu formüller Kernel fonksiyonları olarak adlandırılmaktadır ve bu fonksiyonlar herhangi bir noktada alan değişkenlerinde bir tahmin yürütmek için

hesaplama yapmada kullanılmaktadır. Kernel fonksiyonu yalnızca tanımlanan bir civar (neighbourhood) alanda her düğüm için aktiftir ve bu da destek alan (support domain) olarak adlandırılmaktadır. Her düğümün verilen bir kütleyle sahip olduğu ve durum değişkenlerinin her düğüm konumunda değerlendirilmesiyle bir elemandan oluştuğu belirtilmiştir. Bu yöntem, çözüm ağı olmadan düşünülür çünkü önceden tanımlı sınırlayıcı düğüm gridleri bulunmamaktadır.

Pratikte, SPH metodunda ALE metoduna kıyasla daha az eleman kullanılmaktadır, onunla bağlantılı malzeme arayüz problemlerini önlemekte, ve daha kısa çözüm zamanına sahip olmaktadır. Aynı zamanda kuşun akışını diğer metodlara göre daha doğru şekilde takip etmektedir. Özellikle kuşun bir diğer yapısal parçaya sekme durumunda, ikinci kuş çarpması durumunda, bu olay daha çok etkisini göstermektedir.

Lagrangian çözüm ağına benzer olarak, SPH parçacıklarının boyutu ya da kullanılan parçacıkların miktarının, akışkan-yapı etkileşimine, böylelikle de en son sonuçlara bir etkisi bulunmaktadır. Lavoie ve diğ. [11], kuş modeli oluşturma yöntemlerini incelemiştir. Kullanılan ilk model 1.800 parçacıklıdır ve her biri 0,56 gram yığılı (lumped) ağırlığa sahiptir ve ikinci model 4.460 düğüm içerirken, her biri 0,22 gram yığılı (lumped) ağırlığa sahiptir. Parçacıklar eşit şekilde, homojen olarak dağıtılmıştır ve destek alanının ilk boyutları bütün parçacıklar için aynı olduğundan bu dağılımın çok önem arz ettiği ifade edilmiştir. Şekil 2.7’de iki SPH kuş modeli gösterilmektedir.



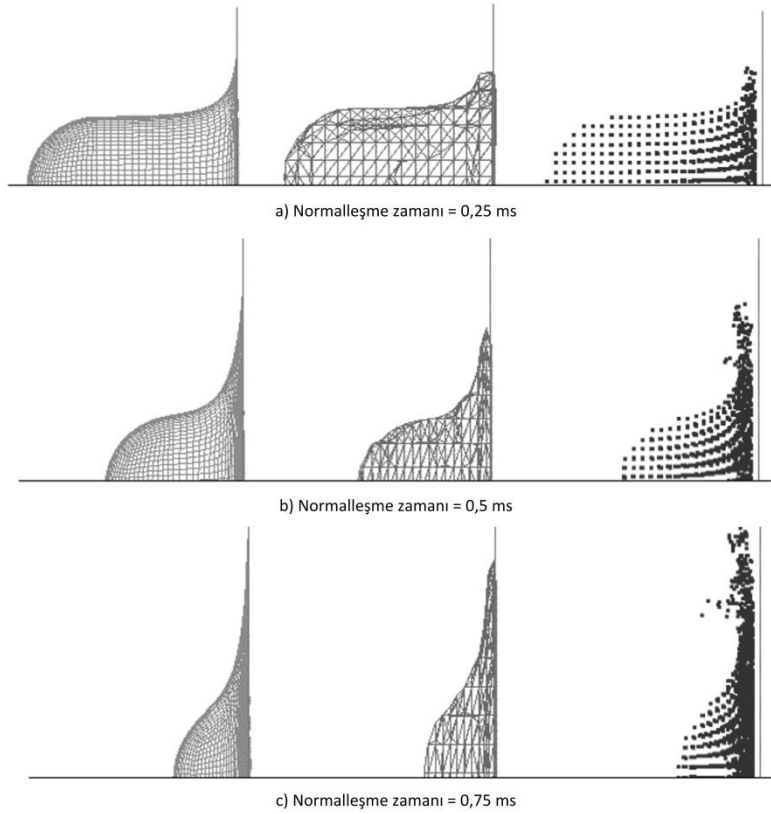
Şekil 2.7: 1.800 parçacıklı(solda) ve 4.500 parçacıklı(sağda) SPH kuş modeli [11].

Lavoie ve diğ. [11], kuş modeli oluşturma yöntemlerinin incelendiği ve kıyaslandığı çalışmalardaki sonuçlarından biri, artık Lagrangian yaklaşımının bu problemlerde kullanımının uygun olmadığıdır. Basıncın ve kütle kaybının doğru olmadığı ve inceltilmiş çözüm ağı kullanıldığında çözüm zamanının çok uzun olduğu belirtilmiştir. ALE yaklaşımı, uygun parametreler takımı kullanıldığında, bütün değerlendirme kriterlerine göre doğru sonuçlar verdiği neticesine varılmıştır. Araştırma boyunca ulaşılan sonuçlara göre SPH yaklaşımında, daha az sayıda parametreler kullanılarak,

daha kolay yollarla sonuçlara ulaşıldığı belirtilmiştir ve elde edilen sonuçların kalitesi ALE metoduyla elde edilenlere yakındır.

Yukarıda bahsedilen ve tanımlanan yöntemlerin, avantaj ve dezavantajları üzerinde tartışılmalıdır. Şekil 2.8’de bu yöntemlerin belirli anlardaki deformasyonları gösterilmektedir.

Lagrangian modelinin başlıca avantajları; basit model oluşumu, düşük CPU zamanı (çözüm ağı bozulması öncesi), çarpan cismin (impactor) sınırının tanımlı olmasıdır. Dezavantajları ise; çözüm ağı bozulmaları zaman adımlarının azalmasına, yapay sertleşmeye, hassasiyet kaybına yol açar, eleman aşındırması, simülasyondan kütle kaybına yol açabilir, sıçrama davranışlarını göstermek zor olur ve kuş parçalanmalarını ifade etmek zor olur.



Şekil 2.8: Lagrangian, ALE ve SPH modellerinin deformasyonları [11].

Eulerian modelinin avantajları; çözüm ağı bozulmasının olmaması, sabit zaman adımlarının olması, sayısal olarak durağan simülasyonlar olması, karmaşık kuş parçalanmalarının benzetimini yapabilmesidir, sıçrama davranışlarını iyi göstermesi, hesaplama maliyetlerini azaltmasıdır. Dezavantajları ise; model oluşturulmasının ve sonuçların incelenme kısmının daha karışık olması, dış sınırının tanımlı ve belirli

olmaması, toplam enerjinin zamanla sürekli azalması, çarpma bölgesinde iyi bir çözüm ağı gerektirmesi nedeniyle maliyetin artması, diğerlerine oranla daha yüksek hesaplama zamanı gerektirmesidir.

SPH modelinin avantajları; çözüm ağı bozulmasının olmaması, sabit zaman adımları olması, sayısal olarak durağan simülasyonlar olması, karmaşık kuş parçalanmalarının benzetimini yapabilmesi, sıçrama davranışlarını iyi bir şekilde gösterebilmesi, Eulerian modele göre daha düşük hesaplama maliyetinin olmasıdır. Dezavantajları ise şöyledir: model oluşturulması daha karmaşık ve zordur, çarpan cismin dış sınırı belli değildir (tanımlanmamıştır), Lagrangian'a göre daha fazla CPU zamanına ihtiyaç vardır (çözüm ağı bozulması öncesinde).

Heimbs [15]'in tarama çalışmasında, (a) Lagrangian modelde, çözüm ağı yapılırken, düğümler (nodes) malzemenin üzerine sabitlenir ve modelin hareketiyle birlikte düğümler de hareket eder. (b) Eulerian modele göre, çözüm ağı yapılırken düğümler malzemenin üzerine sabitlenmez, çözüm ağı ve düğümler olduğu yerde sabit tutulur ve malzeme, bu çözüm ağının içinde hareket eder yani akışa tabi tutulur. (c) ALE modelde Eulerian çözüm ağı oluşturulmuş, ancak düğümler ne malzemeye ne de olduğu yere sabitlenmiştir. Malzeme akışını sürdürdüğü esnada, malzemeyi ve dışını kapsayan çözüm ağı da malzemeyle birlikte hareket etmektedir. (d) SPH modelde çözüm ağı kullanılmamaktadır. Burada malzeme akışkan olarak taneciklerle modellenmekte ve serbest hareket yani serbest akış gerçekleştirmektedir.

Bu taramada, birçok çalışma incelenerek elde edilen sonuçlarda, 1970'lerde basit simülasyon modellerinin kullanıldığı, ardından çarpan cismin Lagrangian ile modellendiği, sonraki zamanlarda ise, Lagrangian modelde çözüm ağı bozulmalarının fazla olmasından dolayı Eulerian ve SPH yöntemlerinin daha çok öne çıktığı ifade edilmiştir. Ayrıca, bu yöntemlerden hepsinin aslında dezavantajları olduğu, ancak farklı problemler için farklı yöntemlerin kullanılabileceği de sonuçlar içerisinde. Bir diğer sonuç ise; oda sıcaklığında su ve hava karışımı özellikleri kullanılarak, çarpan cisim için Eulerian veya SPH modelinin durum denklemi ile birlikte kullanımının ön plana çıkmasıdır.

2.2 Kuş Geometrisinin Modellenmesi ve Malzeme Özellikleri

Bu bölümde, daha önce 1.2.1. nolu kısmında anlatılan yöntemlerle birlikte değinilen bazı kuş modellerine ek olarak, diğer çalışmalarda kuşun davranışının nasıl modellendiği, malzemesi ve kullanılan kuş geometrileri ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Hedayati ve diğ. [10], gerçek kuş geometrisini modellemek için kullandıkları yaban ördeğinin (mallard) kütlesi 0,8 kg olduğundan; yarım küre uçlu silindir kuş modelini de aynı kütleye sahip olacak şekilde modellemişlerdir. Simülasyon 1,8 kg'lık yarım küre uçlu silindir kuş modeli için tekrar edilmiş ve Hugoniot basıncının %10 arttığı gözlenmiştir. Kuşun kütlesi 0,8 olarak alındığında, yarım küre uçlu silindir şeklindeki kuş modelinin çapı 8,67 cm olarak hesaplanmıştır. Kuş modelinin uzunluğu ise çapın 2 katıdır ve 17,33 santimetre olarak hesaplanmıştır.

Kuş çarpması genelde daha yüksek hızlarda gerçekleştiği için, kuş malzemesi üzerinde daha yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmeler, malzemenin dayanma kapasitesini fazlasıyla aşmaktadır. Bu da kuş malzemesi üzerinde akışkan benzeri deformasyona yol açmaktadır. Bu gözlem, kuş çarpmasının teorik analizinde hidrodinamik teori uygulanmasına imkân sağlar. Bu yaklaşımdaki, malzemenin akma sonrası davranışı ve viskozite ihmal edildiği zaman, basit bir basınç-yoğunluk durum denklemi, sayısal analizdeki kuş davranışlarını tanımlamada kullanılır. Bu bağlamda hatırlatmakta fayda vardır ki Wilbeck [18]'in deneysel sonuçlarından elde edilen kanı, en uygun kuş alternatif malzemesinin, %10 gözenek (porosity) ve 950 kg/m^3 yoğunluğa sahip jelatin olduğudur. Bir diğer önemli sonuç ise, en uygun vücut şekli yarım küre uçlu silindirdir ve bu silindirin uzunluk bölü çap oranı 2'ye eşittir.

Kuş çarpması simülasyonlarında rijit plaklarda sensör verisi okumanın yanı sıra yeni tasarım uçak, helikopter, tren ve rüzgâr türbini parçası yapmak esas olduğundan hem kuş hem de plaklarla ilgili farklı malzeme denemeleri yapılmıştır. Yine kuş malzemesinin yanı sıra kuş şekilleri üzerine de farklı çalışmalara rastlanmıştır.

Heimbs [15], bazı araştırmacıların sadece elastoplastik malzeme kuralları ve yanında kopma gerinimleri kullanarak modellediğini ifade etmiştir. Bu malzeme modellerinin bazı limitleri olduğunu yine farklı şekillerde göstermişlerdir. Görülmüştür ki akışkan benzeri akış yanıtı bu modeller ile elde edilememiş ancak düşük kayma modülü G

değerlerinde bu sağlanabilmiştir. Bazı çalışmalarda ise kauçuk benzeri hiperelastik Mooney-Rivlin malzemesi kuş çarpmasını modellemek için kullanılmıştır.

Çalışmalarda, kuşun modellenmesi için durum denklemlerinin kullanılması (EOS) daha genel bir yaklaşım halini almıştır. Diğer malzeme modelleri sınırlı kaldığından akışkan-katı arası ve sıvı davranış gibi durumları daha iyi gösterecek bu basınç-hacim denklemleri kullanılır. Bu şekilde basınç ve hacim arasında suyun oda sıcaklığındaki parametreleri belirlenmektedir. Birçok çalışmada bu sonuçlara ulaşılabilir. Literatürdeki belli başlı çalışmaları sınıflandıran Heimbs [15] bu konudaki çalışmalardan da bahsetmiştir. Önceki kısımlarda belirtildiği gibi 1970'li yılların sonunda Wilbeck'in [18] yaptığı deneylerin amaçlarından biri de durum denklemlerinin çıkarılabilmesiydi. Şu ana kadar birçok çalışmada denklem 2.1'de ve 2.2'de verilen polinomik EOS denklemleri kullanılmıştır.

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 \quad (2.1)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (2.2)$$

Bazı çalışmalarda ise daha sade olan Murghan EOS denklemi kullanılmıştır ve denklem 2.3'te gösterilmiştir.

$$p = p_0 + B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (2.3)$$

Kimi çalışmalarda ise daha geniş verileri içeren ve denlem 2.4'te gösterilen Gruneisen yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım analiz programlarında örneğin LS-DYNA'da durum denklemleri olarak programa EOS sekmesinden girilir.

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (s_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{\mu + 1} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (2.4)$$

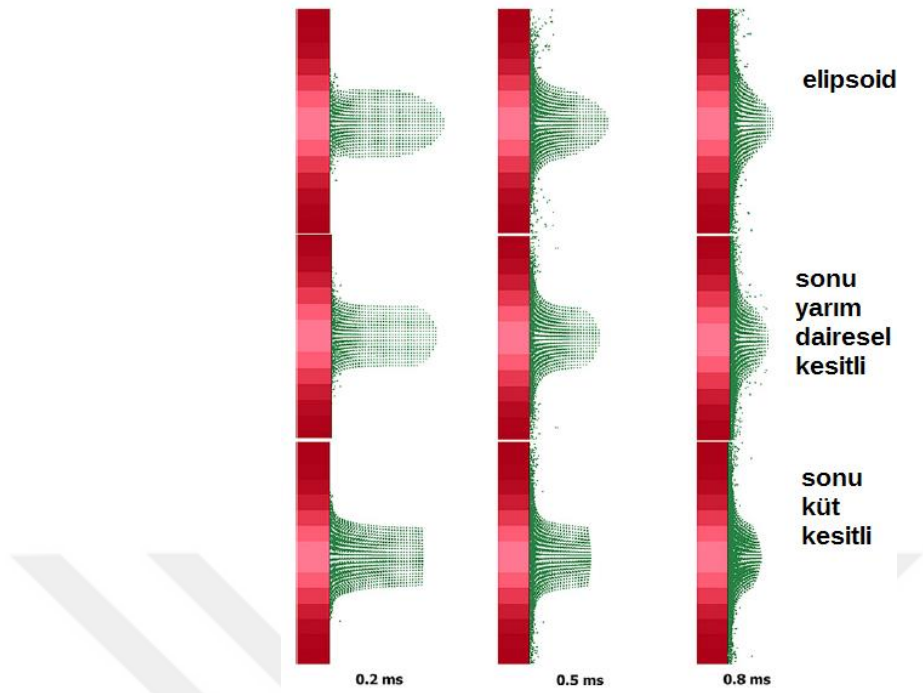
Tüm bu belirtilen denklemler farklı durumlarda basıncın elde edilme yöntemlerini göstermektedir. Literatürdeki boşluktan kesin bir modelin daha iyi sonuç verdiği yargısına varılamamış ancak Gruneisen EOS verileri hem daha geniş girdi

kullandığından hem de son zamanlarda raporlanan çalışmalardan dolayı en öne çıkan durum denklemi formülasyonudur.

Smojver ve Ivancevic [19], Abaqus yazılımı kullanarak gerçekleştirdikleri analizlerle, yeni kuş malzemesi modelleri ve durum denklemlerini literatürle karşılaştırarak incelemişlerdir. Bu sonuçlara göre flaplarda deformasyon ve bozulmaları gösteren analizler gerçekleştirmişlerdir. Farklı kuş davranış modellerlerinden hangisinin literatür ile daha uyumlu olacağını göstermeyi amaçlamışlardır. Kuş modellenirken su ve havadan oluşacak şekilde modellenmiş, farklı boşluk durumları (%10, %15) incelenmiştir. Ayrıca Mie-Gruneisen durum denklemi ile karşılaştırma yapmışlardır. Yeni kurdukları kuş modelinin durma basıncını yakaladığını ancak pik basınç değerlerinin olması gerekenden yüksek olduğunu göstermişlerdir. Abaqus programında plağı Lagrangian olarak, kuş ve ortamı ise Eulerian olarak modellemişlerdir. Sadece kuş modeli incelendiği için plak rijit olarak modellenmiştir.

Hedeyati ve Ziaei-Rad [6] geleneksel kuş modellerine alternatif kuş modeli getirmiş ve deneysel veri ile karşılaştırmıştır. Şekil 2.2'deki gibi Ak yanaklı ördek (Bufflehead) için kuşun farklı açılarından çarpmalarını modellemişlerdir. Basınç-zaman eğrileri, bu şekillere göre elde edilmiştir. Farklı duyarga (sensör) verileri ile karşılaştırma yapılmıştır. Kuş modellerinde 4 farklı şekil kullanarak SPH modeli ile denemeler yapmışlardır.

EOS (equation of state) ile kuşun SPH modeli tanımlanmış. Polinomik (Polynomial), Çizelge halinde (Tabulated) ve Gruneisen durum denklemleri önerilmiştir. Parametrik çalışmalarıyla Gruneisen denklemi ile kuşun çarpma davranışı daha iyi modellenbildiği belirtilmiştir. Bu denklem ile şok ve parçacık hızları arasında lineer bir ilişki vardır. Analiz ortamı için çalışmada 60 cm çapında 6 cm kalınlığında çelik plak kullanılmıştır. Kalın plak, rijit plak gibi davranmasını sağlamak için uygundur. 14.640 katı (solid) elemandan oluşur. 1 cm x 1 cm kabuk (shell) elemanı hedef merkezinde ve 3 adet 0,25 cm x 0,25 cm kabuk elemanı üst pozisyonlarda basınç profilini yakalamak için kullanılır. Düğüm noktasından yüzeye temas (Node to surface contact) algoritmaları kullanılır. SPH düğümleri “slave” olarak ele alınır. Farklı kuş kısımlarından çarpmalarda farklı basınç verileri elde edilir; alttan çarpma kuşun en geniş kesiti olduğundan en tehlikeli senaryo olup kuyruk kısmındaki kesitten en düşük olan elde edilir. Şekil 2.9'da çarpıtılan farklı şekilli kuş geometrileri ve parçalanmaları görülür.



Şekil 2.9: Farklı geometrideki SPH kuş modellerinin plağa çarpması [6].

Hedeyati ve diğ. [2], helikopter kanopisi için yaptıkları başka bir çalışmada kuş durum denklemlerini bazı formüllerle özetlemişlerdir. Farklı tip durum denklemleri ifadeleri olsa da yüksek verimliliğinden ve doğruluğundan dolayı Gruneisen EOS kullanılmıştır. Çekme ya da sıkıştırma durumuna göre bu model için basınç ve hacim ilişkisi iki farklı şekilde verilir. Sıkıştırma ile ilgili ilişki daha önce denklem 2.4'te verilmişti, çekme durumunu veren ilişki ise denklem 2.5'te gösterilmiştir.

Çekme:

$$P = \rho C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (2.5)$$

McCallum ve diğ. [21], kuş şeklinin etkisini yenilikçi bir yaklaşımla incelemişlerdir. Kuş çarpması modellerinde uyulması gereken standartlar FAA ve JAA standartları olup 20 yolcu üstü uçaklarda 3,62 kg kütleli kuşun seyir hızında çarptırılması beklendiği hatırlatılmış ve yeni kurdukları kuş modellerini standartlarda belirlenen veya tanımlanan modellerle karşılaştırmışlardır.

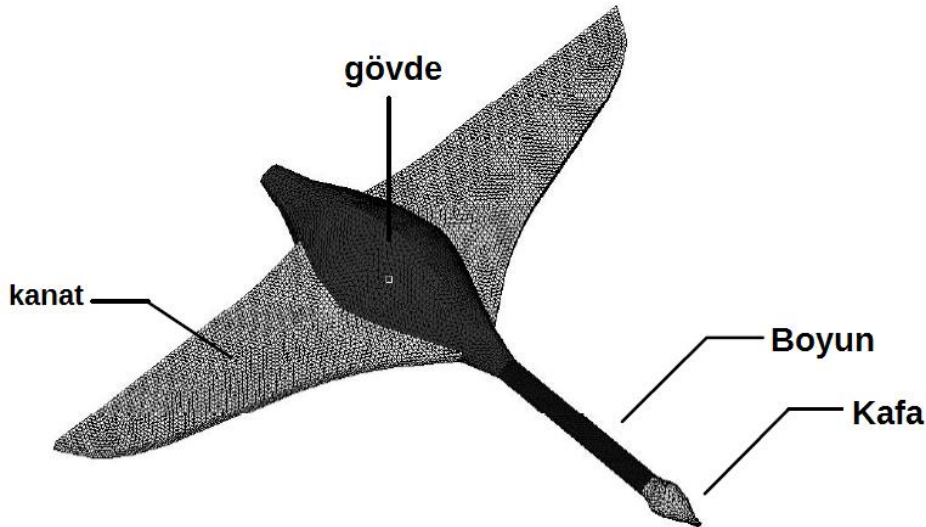
Kuş, bu çalışmada 3,6 kg olarak modellenmiş, ALE ve SPH metodları kullanılarak 180 m/s hızda çarpma durumu modellenmiştir. Farklı kuş şekillerinde (Örneğin, baş, boyun şekli farklı ise) hedefin farklı gerilme durumlarına girebileceği görülmüştür. Hedef

olarak AL L167 plak dört kenarından mesnetli olarak modellenmiştir. Çalışma kapsamında, tek malzeme ve çoklu malzeme olmak üzere farklı kuş modellemeleri kullanılmıştır. ALE ile SPH metodları için farklı modeller oluşturulmuştur. Kuşun davranışı modellenirken hem ALE hem de SPH metodu için Gruneisen hareket denklemleri kullanılmıştır. Hedef plak Lagrangian kabuk plak olarak 10 mm kalınlıkla modellenmiştir. Johnson ve Cook malzeme plastisite eğrileri kullanılmıştır.

Kuş çarpması çalışmalarında referans çalışmalar yapan “International Bird Strike Research Group” (IBSRG) yeni kuş modelleri ile farklı tasarımları incelemektedir. Küçük kuşlar için basit geometriler yeterli olsa da büyük kuşlar için basit geometrik modellemelerin yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Eğer IBSRG yeni kuş modelleri geliştirebilirse analizciler için kuş modellerini değiştirme ihtiyacı doğabilecektir.

Simülasyonlarda kuvvet-darbe modelleri ve deneysel süreçlerden elde edilen denklemler ile ortalama kuvvet kestirimi yapılabilir. Bu denklemler, momentum korunumu ile ilgili olmasına rağmen kompleks etkileşimleri (kuş-hedef) dikkate almayabilir. Modeller, hedefteki bozulmayı görmek için kullanılmaz.

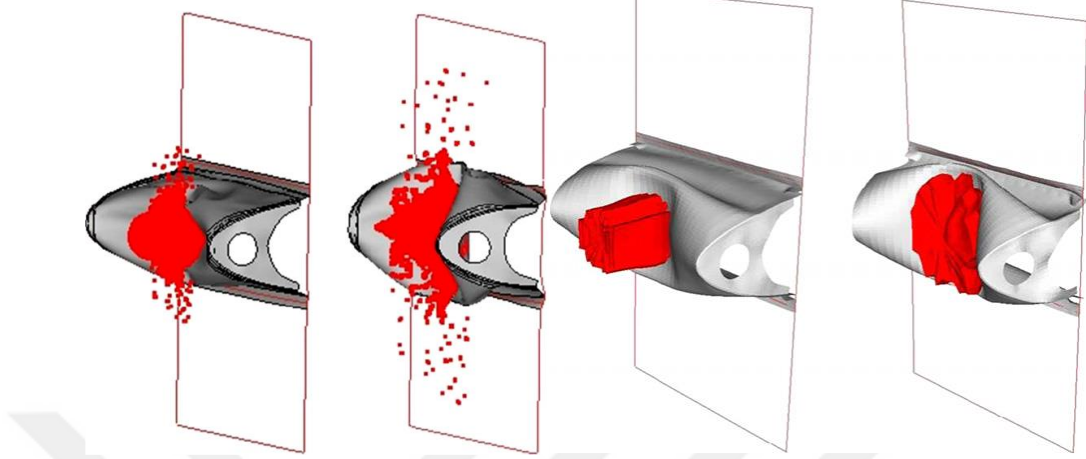
Örnek olarak, farklı malzemelerden oluşturulmuş ve gerçeğe çok yakın olan kuş modeli, Şekil 2.10’da verilmiştir.



Şekil 2.10: Farklı malzemelerden oluşturulmuş örnek kuş modeli [21].

Guida ve diğ. [24], SPH ve Lagrangian metodlarını kullanarak kanadın hücum kenarına kuş çarpması analizini gerçekleştirmişlerdir. Kuş silindirik olarak modellenmiştir, referans olarak ise 3,6 kg kütle ve 923,7 kg/m³ yoğunlukta

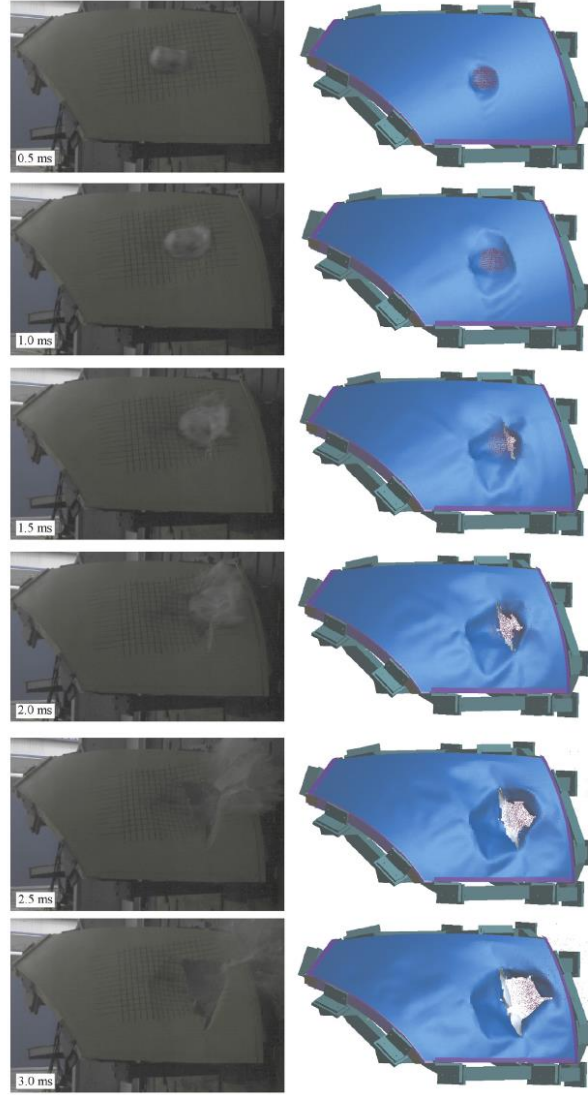
modellenmiştir. İlk olarak kuşun davranışını tam olarak anlamak için rijit plak kullanmışlardır, ardından plak için de malzeme modellerini kullanmışlardır, (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: SPH(solda,LS-DYNA çözücüsü) ve Lagrangian (sağda,Dytran çözücüsü) metotlarının uygulandığı çarpmaların 2 ms ve 3.6 ms'deki gösterimleri [24].

Liu ve diğ. [8], FEM ve SPH metotlarının birlikteliği ile deney ve analiz süreçlerini takip etmişlerdir. PAM-CRASH programı ile 106 mm çaplı 212 mm uzunluklu silindir kullanmışlardır. İdealleştirilmiş kuş ile SPH modeli kurmuş ve Murnaghan durum denklemi (EOS) modeli ile kuşun sıvısının hareketini modellemişlerdir. Çalışmada farklı olarak kuş modelindeki SPH yöntemi dışında plak Lagrangian yöntemi ile modellenmiştir.

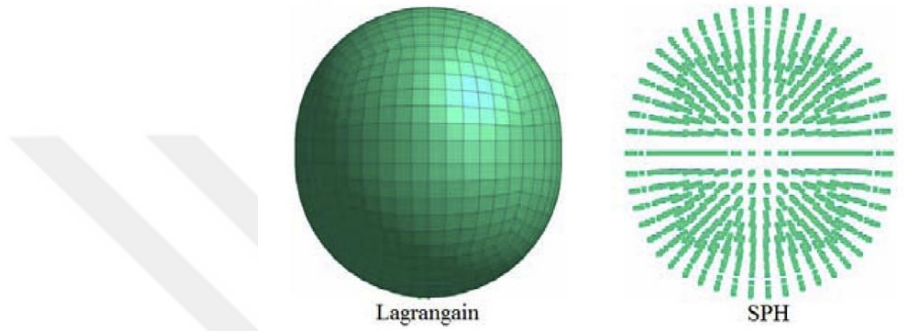
Analiz ortamında fikstür ve plak geometrileri de modellenmiş ve analiz yapılmıştır. Çalışmada 152 m/s hız ile plağa kuş çarptırılmış ancak plak rijit olarak modellenmemiştir. Couper-Seymonds plastisite denklemleri ile modellenen plaktaki deformasyonlar elde edilmiş; kuş ise SPH ile modellenerek doğru davranış sonuçları elde edilmeye çalışılmıştır. Sonuçta, 152 m/s hız ile çarpan kuş için 4 noktadan basınç ölçümleri alınmış ve karşılaştırılmıştır. Kuş ile plak arasındaki sürtünme, temas şekilleri gibi bazı kestirilmesi zor verilerden dolayı test ile analiz sonuçları farklılık göstermiştir. Şekil 2.12'den de görüldüğü gibi hızlı kamera ile kayıt edilen test ile analiz görüntüsünde plak delinmesi ve bozulmalar uyumludur. Birlikte kullanılan SPH ve FEM modelleri hem kuşun hem de plağın dinamik davranışını iyi simüle edebilmiştir. SPH yöntemi kuşun yüksek hızlardaki davranışını iyi şekilde yansıtmıştır. Neticede, iki modelin birlikte kullanımı iyi sonuçlar doğurmuştur.



Şekil 2.12: Kuş çarpması sürecinin farklı zamanlarda yüksek hızlı kamera ile çekilen fotoğrafları ve analiz sonuçlarının kıyaslanması [8].

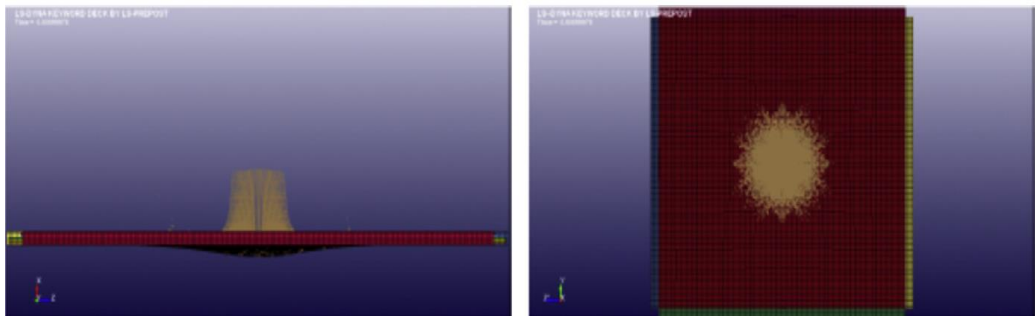
Liu ve diğ. [8], farklı hızlarda PAM-CRASH programı ile çok kullanılan 3 farklı kuş modeli için simülasyonlar yapmışlardır. Tahmin edilen yer değiştirme ve gerinim deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra deneysel olarak model kurup analizlerle doğrulama yapmışlardır. Ancak analizler neticesinde farklı hızlarda farklı malzeme modellerinin farklı yakınsadığını görmüşlerdir. Deneylerin sağladığı avantaj ile kurulacak kuş malzeme modellerine karar verilmiştir. Yaptıkları çalışmada hızlı kamera yardımı ile deneylerden elde ettikleri sonuçlarda, kuşların farklı hızlardaki çarpma ve çarpma sonrası davranışlarını gözlemlemişlerdir. Çarpma deneylerini 70 m/s, 120 m/s, 170 m/s hızlarında gerçekleştirip hangi hızlarda katı, sıvı, katı-sıvı davranış gösterdiklerini gözlemlemişlerdir. Hem Lagrangian hem de SPH analiz yöntemlerinde Şekil 2.13'teki gibi yarım küre uçlu silindir şekilli kuşlar

modellenmiştir. Yarım kürelerin yarıçapı 75 mm, silindirin uzunluğu 13,25 mm'dir. Lagrangian kuş modellerinin kullanıldığı 70 m/s ve 120 m/s çarpmalar için 3.696 eleman kullanılmış, 170 m/s yüksek hızlı çarpma için 3.696 SPH parçacığı kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki elastik-plastik malzeme modeli düşük hızlı çarpmalar için en uygundur. İzotropik elastik-plastik hidrodinamik model katı elemanlar için, SPH metodu ise yüksek hızlı çarpmalar için uygundur. Kuş için kurulan model 70 m/s, 120 m/s ve 170 m/s hızlarda denenmiştir. Hızlar arttıkça tahmin ve deneylerden elde edilen sonuçlar arasındaki farklar artmaktadır.

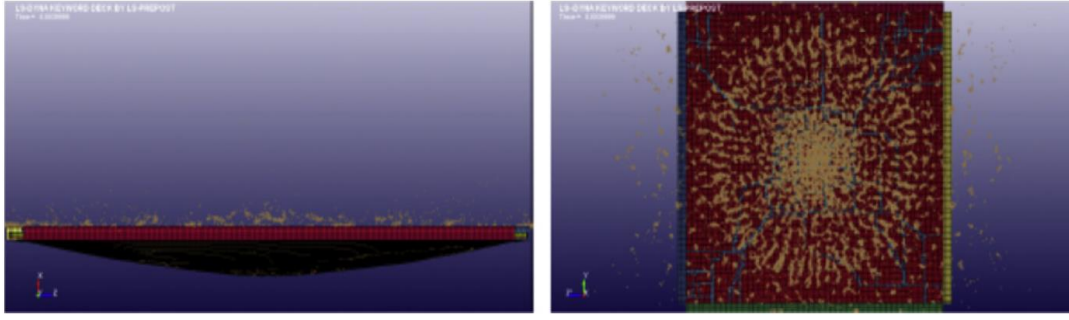


Şekil 2.13: Lagrangian ve SPH ile küre şeklinde modellenen örnekler [8].

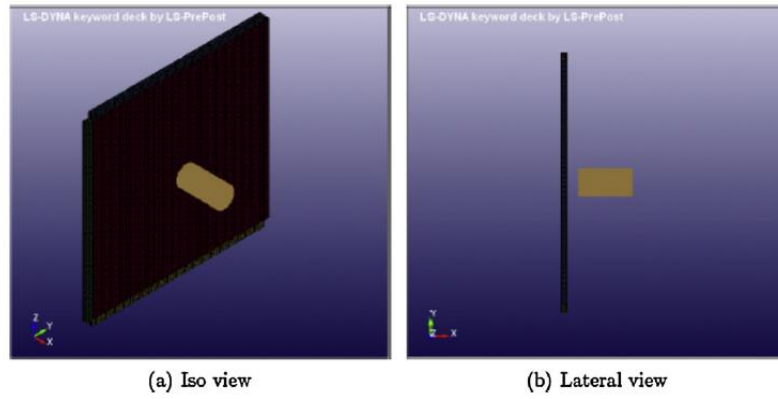
Grimaldi ve diğ. [22], SPH yöntemi ile kanopi uygulamalarında kuş çarpması üzerine yeni bir ürün tasarımı için bazı analiz gözlemlerini raporlamışlardır. Avrupa ve ABD havacılık kurallarından ilgili olan FAR/JAR 25.631'e göre gereklilikler ışığında kanopi tasarımları yapmışlardır. İlk olarak 1,8 kg, sadeleştirilmiş ama gerçekçi boyutlarda kuş modeli kurulmuş ve kare kanopiye 155 m/s hızda çarpıtılmışlardır. 1 ms ve 4 ms'deki çarpma tepkisi Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'te gösterilmektedir. Kullanılan kuş geometrisi 28.620 SPH parçacığından oluşmuş olup her parçacık merkezi arasında 5 mm mesafe bulunmaktadır. Şekil 2.16'da LS-DYNA ortamında modellenen silindir kuş modeli ve plak görülmektedir.



Şekil 2.14: 1 ms'deki çarpma tepkisi [22].



Şekil 2.15: 4 ms'deki çarpma tepkisi [22].

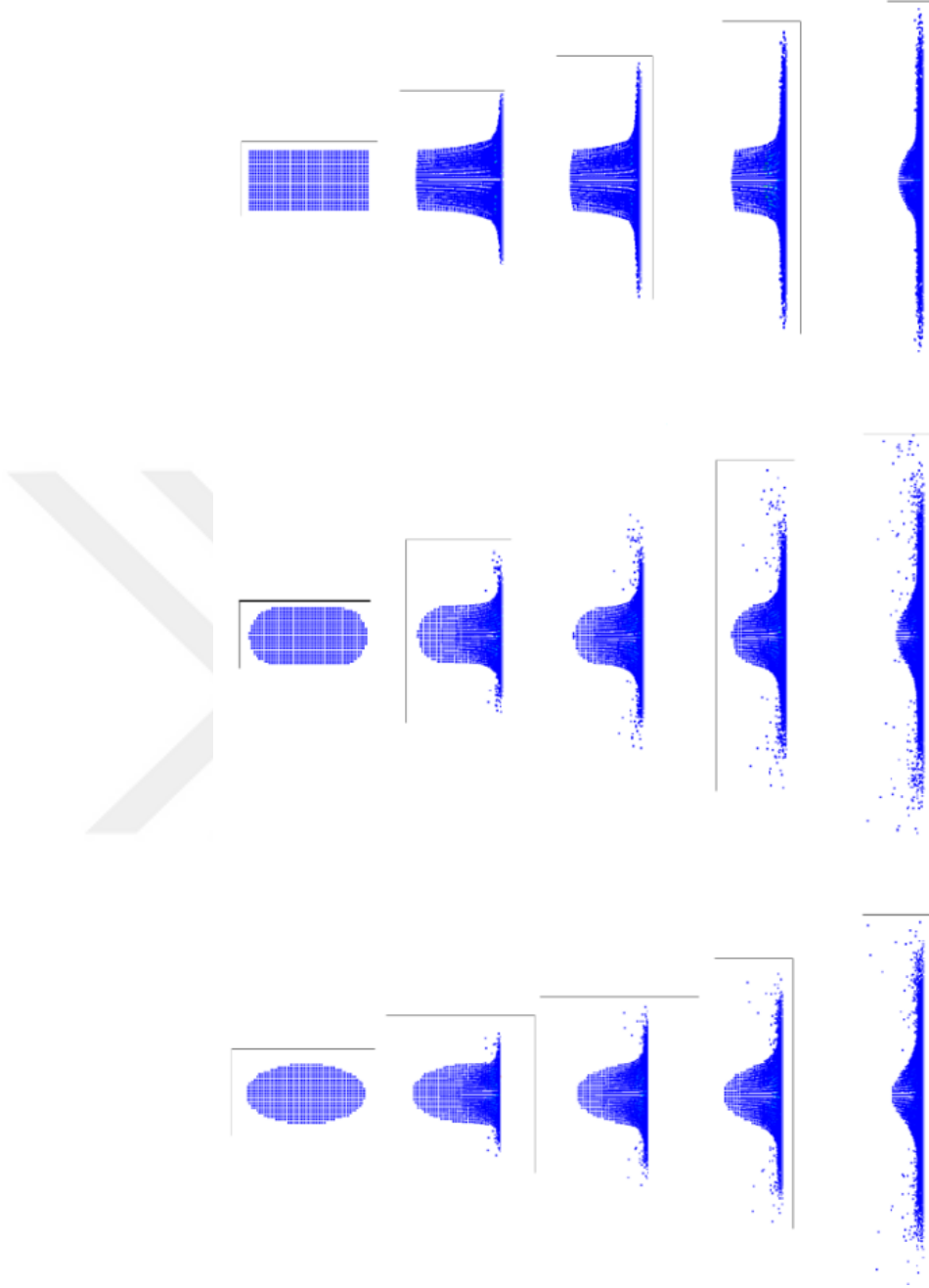


Şekil 2.16: Silindirik kuş modeli ve basitleştirilmiş kare plak [22].

Bheemreddy ve diğ. [25], üç farklı geometride SPH yöntemi ile analizler gerçekleştirmiş ve teorik hesaplarla karşılaştırmışlardır. 2 ucu yarım küre olan silindir %7,73 hata, silindir model %9,61 hata, eliptik model %25,97 hata vermiştir. Sonuç olarak bu yüksek hatanın sebebinin düşük temas yüzey alanı olduğu düşünülmüştür. Şekil 2.17'den görüleceği üzere eliptik ve yarım küre uçlu silindir kuş modelleri SPH yönteminde daha çok dağılma sergiliyor.

Heimbs [4] yaptığı analiz çalışmasında analiz yönteminin etkisi ve analizlerde malzeme üzerine gözlemlerini sunmuştur. Şekil 2.18'de kuşun farklı hızlarda çarpması ve deney sonuçları ile karşılaştırması görülmektedir. Yaptığı çalışmada Abaqus Açık (Explicit) çözücü kullanarak hem Lagrangian hem Eulerian modelleme tekniklerini incelemiştir. Yüksek hızlara çıkıldığının ve yüksek deformasyonların olduğunun altını çizerek Abaqus programında SPH modellemenin olmadığını belirterek öneri getirmiştir. Kuşun etrafındaki hava ortamını da dahil ederek Eulerian modelleme ve çarpılan plakta daha düşük deformasyonlar olacağından hareketle o kısımda

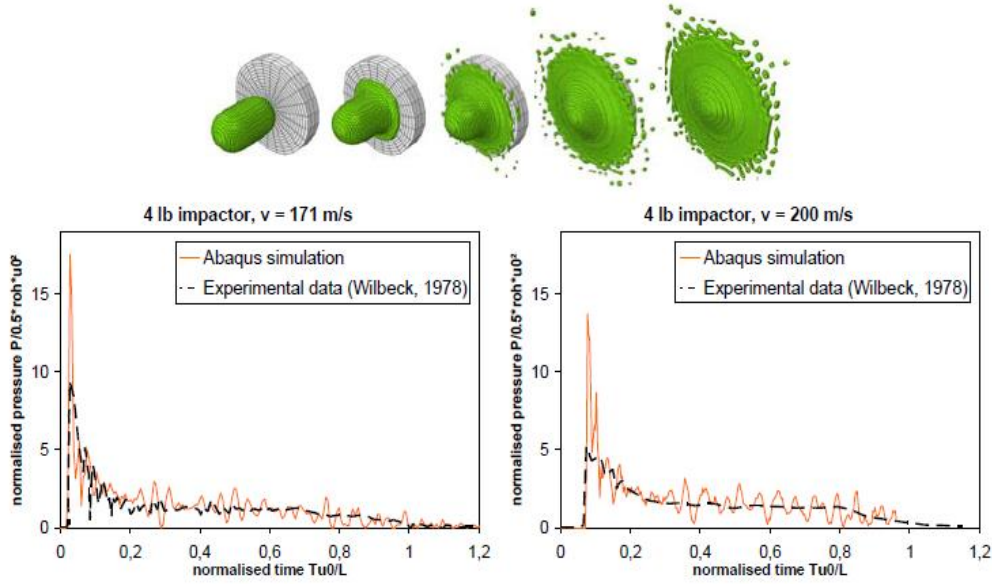
Lagrangian modelleme önermiştir. Bu yaklaşım, CEL (Coupled Eulerian and Lagrangian) olarak adlandırılmıştır.



Şekil 2.17: SPH ile modellenen çeşitli kuş geometrilerinin analiz sırasında görünümü [25].

Yapay kuş modellerinde kullanılan jelatinin genellikle sudan oluştuğunu belirtmiş ve bu yüzden su gibi hidrodinamik yapının kuş çarpmalarında doğru bir model yaklaşımı olacağını belirtmiştir. Abaqus programında Mie-Grüneisen EOS bu amaç için kullanılmıştır. Kuş modellerinin basınç-zaman davranışlarını doğrulamak için

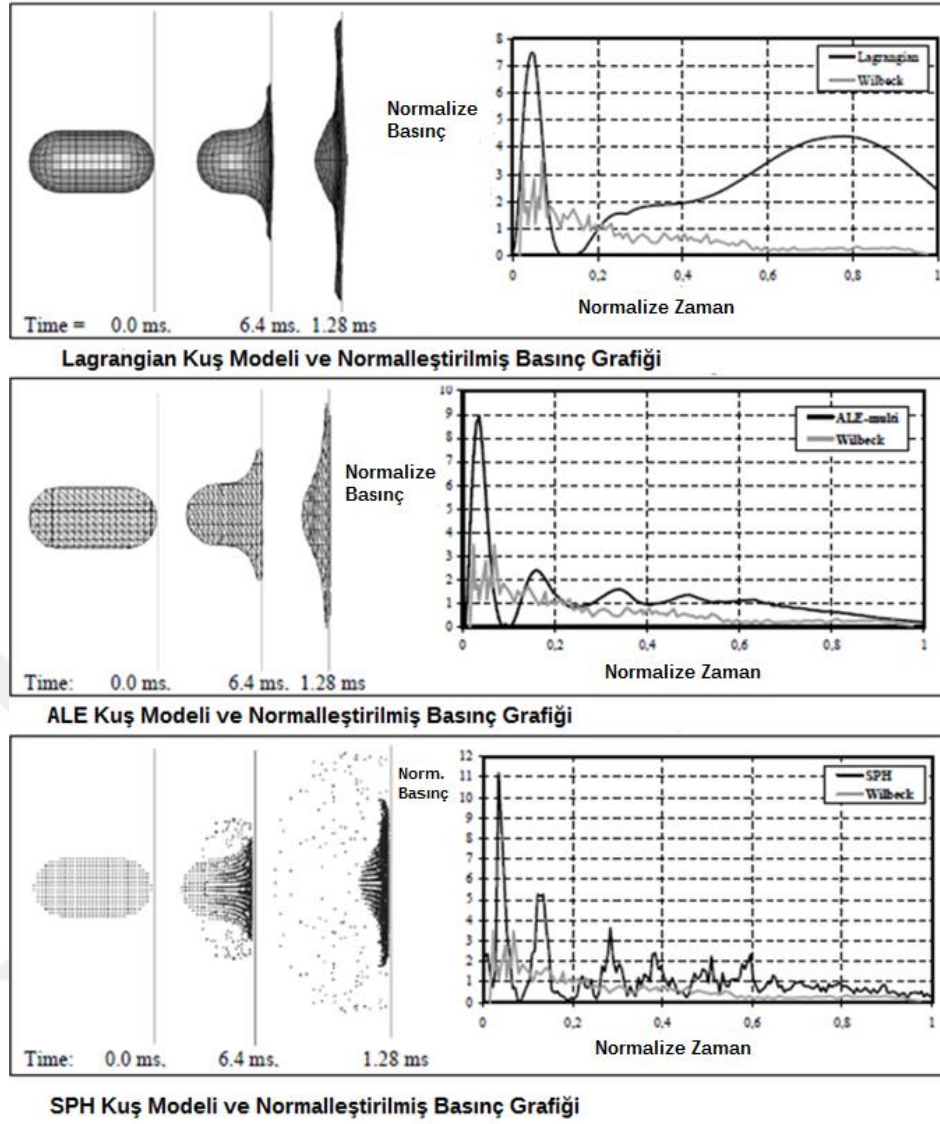
Wilbeck'in 1970'lerin sonunda kaydettiği deneysel veriler kullanılmaktadır. Değme algoritmalarının doğru uygulanması ile doğru reaksiyon kuvvetinin elde edilebileceği de Heimbs [4] tarafından belirtilmiştir. Şekil 2.18'de CEL yaklaşımı ile deneysel veriler arasındaki ilişki görülmektedir. Pik kuvvetler arasında farklılığın nedeni 1970'lerdeki veri kaydetme imkânlarının kısıtlı olması olarak yorumlanmaktadır.



Şekil 2.18: CEL yöntemi ile yapılan analiz sonucu ile Wilbeck'in deney verilerinin karşılaştırılması [4].

Jianyong ve diğ. [26], 2,6 kg'lık ölü tavuk ile 500 km/saat hızda tren aerodinamik fren kanadına çarpma deneyi yapmışlardır. Çalışmada, LS-DYNA modellemelerinde yarım küre uçlu silindir (cylinder with hemispherical end), 120 mm çapında ve 260 mm toplam uzunlukta yapay model olarak tanımlanmıştır. Çoğu çalışmada olduğu gibi yoğunluk 950 kg/m^3 olarak alınmıştır. ALE Metodu ile yapılan çalışmaların deneyler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Elde ettikleri sonuçlara göre kuş çarpmasına karşı kalkan benzeri bir yapı tasarlamışlardır.

Lavoie ve diğ. [23], literatürde var olan sayısal yöntemleri karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında 1 kg ağırlığındaki kuş, 0,5 x 0,5 m. kare plağa çarptırılmıştır. Kuş daha önceki çalışmalardaki gibi 950 kg/m^3 yoğunluktadır. Lagrangian modelde 500 eleman, ALE modelde kuş ve çevresi için 19.000 eleman ve SPH modelde 4.460 parçacık modellenmiştir. Bu modellerin normalleştirilmiş basınç grafikleri Şekil 2.19'da verilmiştir.

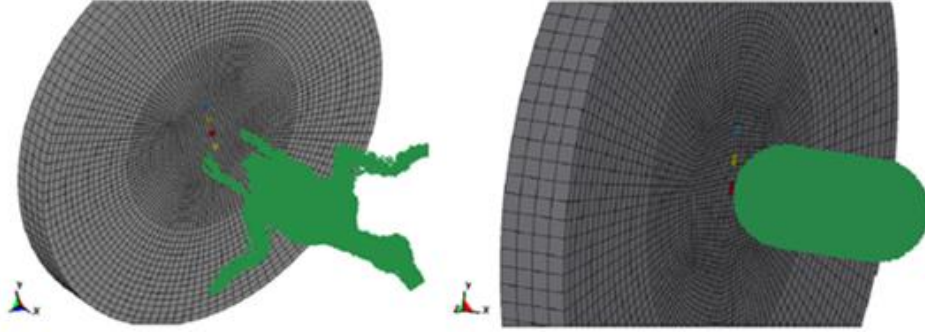


Şekil 2.19: Analiz yöntemlerinde kuşların şekillerinin ve basınç eğrilerinin değişimi [23].

2.3 Hedefin Oluşturulması

Hedayati ve diğ. [10], farklı kuş çarpması çalışmalarındaki sonuçları incelemiştir. Bu çalışmada, hedef rijit olarak düşünüldüğünden ve büyük deformasyonlara maruz kalmadığından, hedefin ölçüleri ve özellikleri modellemede büyük önem arz etmemektedir. Aslında, duyargalar tarafından ölçülen basınçlar önemli bulunmaktadır ve bunun kuşun çarptığı plağın deformasyonu ile bir ilgisi yoktur. Hedef plak; hedefin rijitliğini arttırmak ve böylece daha iyi bir modele sahip olabilmek için 0,06 metre kalınlığında ve 0,6 metre çapında bir disk olarak kullanılmış ve 14.640 katı elemandan oluşturulmuştur. Ek olarak, hedef diske etki eden basınç profilini daha iyi bir şekilde elde edebilmek için modellemede kabuk (shell), katı (solid) ve duyarga kabuk (sensor

shell) elemanları kullanılmıştır. Hedef ve sensörlerin pozisyonları Şekil 2.20’de gösterildiği gibidir. Bu çalışmada, daha önceki kısımda değinilen çalışmalarda olduğu gibi farklı kuş şekilleri için de modellemeler yapılmıştır.



Şekil 2.20: Kuş ve hedefin kurulumu ve kullanılan 4 sensörün konumları [10].

Hedeyati ve diğ. [2], kanopi için 5 farklı tasarım belirlemiş ve kuş çarpma analizleri yapmışlardır. Bu tasarımlar (i) tek katmanlı streç akrilik (stretch acrylic), (ii) tek katman cam, (iii) 2 duvarlı kast akrilik (cast acrylic), (iv) PVB (Polyvinyl butyral-Polivinil butral) ara katman ile akrilik, (v) PVB ara katman ile camdır.

Bu çalışma kapsamında her simülasyonda 1,5 cm büyüklüğünde elemanlardan oluşan plak modellenmiş, 1 ve 2 katman olanlar kabuk (shell) olarak modellenmiş ve ara katmanlı kanopi tasarımlarında 8 düğümlü elemanlar kullanılmıştır. Tek katmanlı 1 ve 2 durumları için 8.947, 3 katmanlı 4 ve 5 durumları için 27.360, 2 duvarlı 3 durumu için 13.039 eleman kullanılmıştır.

Malzeme modeli olarak 4 farklı malzemenin de gerilme-gerinim diyagramını bilmek gerekmektedir. Akrilik türleri için deneysel veriler gerekse de elasto-plastik yaklaşım (bi-linear elastic-plastic) kullanılmıştır. Cam izotropik, şeffaf, amorf ve yüksek gevrekliğe sahip bir malzeme olduğundan PVB ara katmanlı cam veya akrilik tasarımlarında dış ve iç katmanlarda 2 farklı şekilde davranmaktadır. Küçük deformasyonlarda dış katman lineer davranmakta, yüksek deformasyona uğrarsa PVB ara katman yüksek kapasite yük taşımalarından dolayı anahtar rol oynamaktadır. PVB katmanlar şeffaf ve mukavemetin yanı sıra kopma öncesi yüksek deformasyon kabiliyetinden ötürü yüksek yırtılma dayanımı sunmaktadır Viskoelastik malzeme olarak modellenmektedir. Gerinim oranı etkisi (strain rate effect) Cowper-Symonds denklemi ile ifade edilmektedir. Yapılan deformasyon ve basınç eğrilerine göre PVB ara malzemeli cam en iyi sonucu veren plak olarak seçilmiştir.

Heimbs'ın [4] yaptığı çalışmada, güvenilir bilgisayar modellerinin kurulmasından ve çarpma kaynaklı kompozit plak katman kopma modlarının öneminden bahsedilmiştir. İç katman fiber/ matris hasarı ve katmanlar arası hasar (her katmanın ayrılması) bu durumlardır. Standart malzeme modeli ile katmanlar arası bozulma/hasar Hashin kopma (failure) kriteri kullanılarak modellenmiştir. Bu durumdaki bazı verileri elde etmek için farklı tip kupon testleri yapılmıştır. Yüksek hızlı çarpmalarda gerinim oranı (strain rate) önemli olsa da mevcut kompozit modellerinde olmadığından ötürü kullanılmamıştır. Düşük ve yüksek hızlı çarpma yüklerinde katman ayrılması (delamination) meydana gelebilmekte ve bunlar da katılığı ve geriye kalan dayanımı düşürmektedir. Bu yüzden kompozit plaklarda bu bozulmaları doğru modelleyebilmek önemlidir. Ayrıca çalışmalarında katmanlar arası ilişkiyi tanımlamak için “cohesive element” kullanılmıştır. Sayısal ortamda daha doğru yaklaşım için “cohesive zone” kullanılsa da bu yaklaşımın çözüm süresini uzatmasına ve bazı deneysel gerekliliklerin kullanılmamasına neden olduğu belirtilmiştir.

Smojver ve Ivančević [27] çarpışma esnasında bozulma durumları ve modelleme ilişkisini ele almışlardır. CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic-karbon elyaf takviyeli plastik) malzeme özelliklerinin bozulma (degradation) hasar parametreleri kullanılarak modellenmiş ve bu parametrelerin ilk baştaki hasarsız elastisite matrisini modifiye ettiği gösterilmiştir. Hasarlı elastisite matrisinin denklemindeki hasar parametreleri lif (d_f), matris (d_m) ve kesme (d_s) olarak verilmiştir. Bu hasar parametreleri hasarın mevcut durumunu yansıtmaktadır. Değerler, hasarsız durum için 0'dan, tamamen hasarlı durumda olan 1'e kadar değişebilmektedir. Bu hasarlı elastisite matrisinin denklemi aşağıdaki formdadır:

$$C_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)v_{12}E_2 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_f)G_{12}D \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.6 numaralı denklemde verilen D değeri, 2.7 numaralı denklemde formülize edilmiştir.

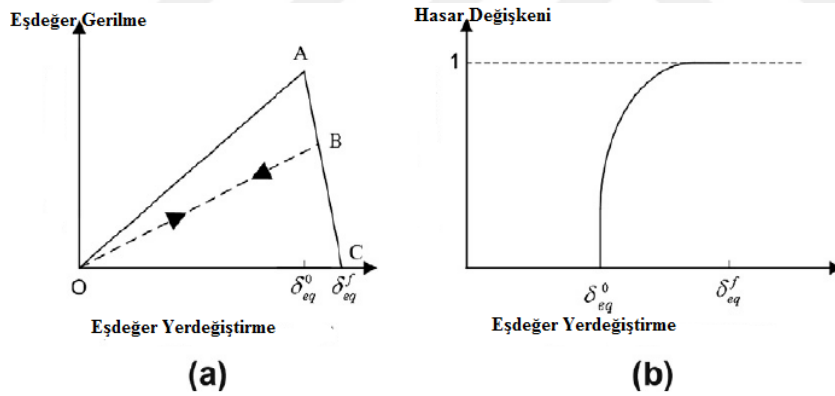
$$D = 1 - (1-d_f)(1-d_m)v_{12}v_{21} \quad (2.7)$$

Malzeme gevşemesi (softening) boyunca, çözüm ağı bağımlılığını önlemek için gerilme-eşdeğer yer değiştirme ilişkisi kullanılmıştır. Hasar başlangıcından önceki

lineer elastik davranış, gerilme-yer değiştirme eğrisinin pozitif eğimi ile gösterilmiştir. Hashin'in hasar başlatma kriterine erişildiğinde, hasar parametreleri katılık matrisini modifiye etmekte böylece mekanik özelliklerin bozulması modellenenmektedir. Gerilme-eş değer yer değiştirme eğrisinin bu kısmı negatif eğim eğrisi ile gösterilmektedir. Şekil 2.21-a'ya bakılırsa: Kısmi hasar durumundan, yük kaldırma (unloading) ve tekrar yükleme (reloading), BO çizgisi ile gösterilen lineer yol boyunca meydana gelir. OAC üçgeninin alanı, hasardan dolayı yok olan enerjiye eşittir. Hasar başlangıcından sonra, kısmi bozulma modunun hasar parametresi şu şekilde gelişir:

$$d = \frac{\delta_{eq}^f (\delta_{eq} - \delta_{eq}^0)}{\delta_{eq} (\delta_{eq}^f - \delta_{eq}^0)} \quad (2.8)$$

δ_{eq}^0 , Hashin'in hasar başlatma kriterine erişildiğinde, ilk baştaki eş değer yer değiştirme olarak tanımlanırken, δ_{eq}^f ise, bahsedilen bozulma moduna göre, malzemenin tamamen hasarlı olduğu durumdaki eş değer yerdeğiştirmedir. Denklem 2.8'in grafik olarak gösterimi, Şekil 2.21-b'de verilmiştir.



Şekil 2.21: a) Eş değer gerilme-eş değer yer değiştirme diyagramı b) Eş değer yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak hasar değişkeni [27].

Bu yaklaşımda, bütün malzeme noktaları kritik hasar değerine ulaştığı zaman, bozunmuş katılık özellikleriyle birlikte elemanların sonsuz gerinimlerini önlemek için çözüm açısından bir eleman çıkartılmaktadır. Bu değer, önceki sayısal simülasyonlar dikkate alındığında en iyi sonucu vereceği düşünülen 0,95 olarak seçilmiştir. Uygulanan hasar tahmin etme yöntemi, katman ayrılması hasarını tahmin edememektedir. Kompozit malzemelerdeki çarpma yüklenmesi iki farklı bozulma moduna sebep olabilir. Bunlardan birincisi katman ayrılmasıdır ve daha düşük enerji çarpışmalarıyla ilişkilendirilir, diğeri ise düzlem içi (in-plane) bozulmadır ve

yapılardaki en yüksek çatlama noktasını ve penetrasyonu kontrol eder. Temel endişe ise, yüksek hızlardaki yabancı cisimlerin çarpmasından dolayı oluşan karmaşık kompozit yapısının hasarını tahmin etmektir. Böyle yüklenme durumlarındaki beklenen bozulma modu, kompozit yapının penetrasyonu olarak ifade edilebilmektedir.

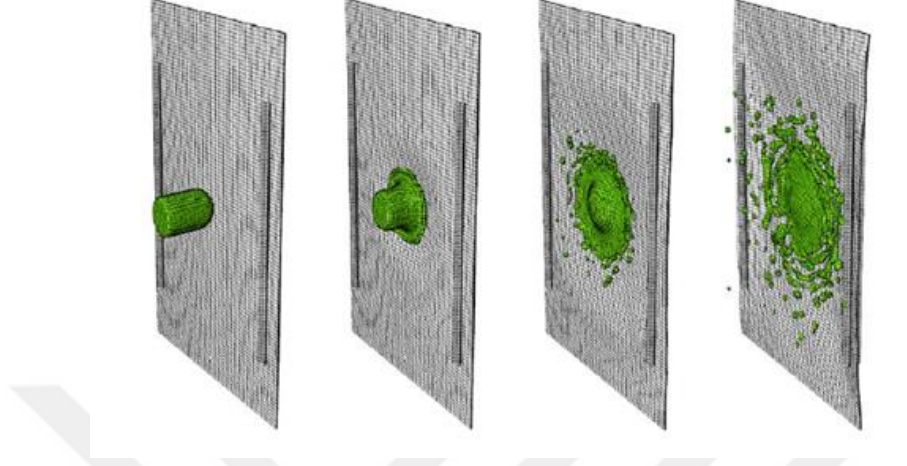
2.4 Kuş Çarpması Çalışması

Guimard ve Heimbs [28], kompozit yapılarda kuş çarpması olayını incelemiştir. Bu çalışmada; Abaqus/Explicit ile kuş çarpması simülasyonları için sayısal yöntemlerin değerlendirilmesinde bir sonraki adım, basitleştirilmiş, kapsamlı yük durumuna dayalıdır. Düz ve ince kompozit plağa yüksek hızlı kuş çarpmaları, deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Ayrıca, bu plak düz ön gerilmelere (çekme ve basma gerilmesi) maruz bırakılmıştır. Buradaki amaç ise, yüksek hızlı çarpma hareketlerinde ön yüklemenin etkisini araştırmaktır. Bu çalışmada, 1,625 mm kalınlığındaki hedef plak, T800S/M21 karbon kompozit malzemeden yapılmıştır ve 300x200 mm ölçülerinde bir serbest yüzeye sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Plagın uzunlamasına uçları birbirine kenetlenirken, serbest yüzeylerin kenarlarındaki ilave destekler içine katılmıştır. Yüksek hızlı çarpma testleri, Stuttgart'taki DLR (Alman Havacılık ve Uzay Merkezi) gaz tüfeği test tesisinde, bir ucu yarım küre olan, 50 mm uzunluğunda ve 30 mm çapında, 32 gr ağırlığındaki silindir şeklindeki jelatin kuşlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada çarpma hızları 100 ile 200 m/s arasında seçilmiştir.

Kompozit plak, istifli kabuk (stacked shell) yaklaşımı ile modellenmiştir, bu da 3 katman SC8R kabuk elemanından ve 2 katman COH3D8 koheziv (cohesive) elemandan oluşturulmuştur (Şekil 2.22).

Tek eksenli çekme ve sıkıştırma ön gerinimi, kompozit plağa, çarpma öncesinde % 0,25'e kadar uygulanmış ve çarpma performansındaki etki araştırılmıştır. Sayısal simülasyonlarda, çarpışma öncesi ön yüklemelerin nasıl modelleneceği konusunda farklı olasılıklar bulunmaktadır. Salınımların önlenemediği durumlarda, bu yaklaşımın iyi bir şekilde çalışacağı, ancak bunu yapmanın çok masraflı olacağı ifade edilmiştir. Hesaplama maliyetlerinin yarısı ön yükleme kısmına, diğer yarısı ise çarpışma simülasyonuna aittir. Daha uygun bir yaklaşım yapılmak istendiğinde, bu yaklaşımın Abaqus programında bulunan doğrudan yaklaşım (implicit-explicit coupling) olduğu belirtilmiştir. Ön yükleme, kapalı (implicit) hesaplama adımı boyunca

Abaqus/Standart'ta kısa bir sürede gerçekleştirilebilirken, model ve gerilme durumları çarpışma yükleri için bir hesaplama elde etmek için Abaqus/ Explicit'e transfer edilebilir.



Şekil 2.22: Ön yüklemeli kompozit plakta kuş çarpması simülasyonu ($V=150$ m/s) [28].

32 gram jelatinden oluşan kuş modelinin yüklenmemiş halde bulunan plağa, 200 m/s hıza kadar çarpıtılması sonucunda penetrasyon gerçekleşirse de, önemli iç yapı zararları meydana geldiği belirtilmiştir. Ultrasonik C-taraması test plaklarındaki zararın durumunu değerlendirmek için kullanılırken, katmanlar arası ilişki değişkenleri simülasyon modelinde değerlendirilmiştir.

150 m/s'ye kadar olan çarpışma hızları için çekme ön yüklemesi, yüklenmemiş duruma kıyasla plağın daha az eğilme deformasyonuna uğramasıyla sonuçlanmıştır. Sonuç olarak, katman ayrılması zararı nispeten daha az olmuştur. Katmanlar arası zarar biraz daha fazladır. Çünkü eleman kabuğunun en üst kısmında elemanların aşınma sayısında artış gözlenmiştir. Daha yüksek çarpma hızları için durum değişmektedir ve çekme ön gerinim ile plak sapması, ön yüklemesiz duruma kıyasla daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu olayın, yüksek çarpışma enerjisinden oluşan ve çekme ön gerilmesi tarafından desteklenen birçok katmanlar arası zarar olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Malzemenin büyük ölçekli bozulmalarının (degradation) daha büyük eğilme deformasyonlarına sebep olmasıyla birlikte katman ayrılması zararı artış göstermektedir. Bu sonuç aynı zamanda deneysel test plaklarının gözlemlenmesiyle de bulunmuştur.

2.5 Kuş Çarpması Verileri

Literatürdeki önemli kuş çarpması çalışmalardan alınan veriler Çizelge 2.1’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 2.1: Literatürde kuş çarpması ile ilgili yeterli verilerin bulunduğu çalışmalar gösterimi.

Makale İsmi	Durum Denklemi	Kuş Modeli	Kuş Şekli	Kuş Ölçüleri (cm)	Hedef Malzemesi	Hedef Ölçüleri	Çarpma Hızı (m/s)	Kuş Ağırlığı (kg)
Simulation of a rigid plate hit by a cylindrical hemispherical tip-ended soft impactor	Küçük polinomial EOS	Eulerian/ALE/Lagrangian	Yarım küre uçlu silindir	D=11,4 L=22,8	Rijit plak	50cm *50cm	116/197/253	1,8
Bird Strike Analysis On A Typical Helicopter Windshield With Different Lay-Ups	Grüneisen EOS	SPH/ALE/Lagrangian	Yarım küre uçlu silindir	D=9,3 L=18,6	Tek katmanlı akrilik/tek katmanlı cam ve diğerleri	Ölçü yok, optimum kalınlık 7,5-9 mm olarak belirlenmiştir	90/150/210/240	1
Bird Strike Simulations on Composite Aircraft Structures Finite Element Analysis Of Bird Strikes On Composite And Glass Panels	Grüneisen EOS	CEL	Yarım küre uçlu silindir	D=3 L=5	5 katmanlı T800s/M21 karbon kompozit	30cm*20cm plak ve 1,625 mm kalınlık	100/150/200	
A New bird model and the effect of bird geometry in impacts from various orientations	Lineer polinomial EOS	SPH/ALE/Lagrangian	Yarım küre uçlu silindir	D=11,4 L=11,4	Düz, rijit alüminyum plak	70cm*70cm plak ve 10 mm kalınlık	116	
The influence of bird-shape in bird-strike analysis	Grüneisen EOS	SPH	Gerçek Kuş Modeli	L=18,7 Wing Span=31	Rijit daire	60cm çaplı 6 cm kalınlığa sahip bir daire	116	0,3
Parametric study of a SPH high velocity impact analysis	Grüneisen EOS	ALE/SPH	Yarım küre uçlu silindir	L=33,4 3958 cm3 AR=1,6	Alüminyum L167 ile oluşturulan düz bir plak	0,25 m ² kare alan, 10 mm kalınlığa sahip	180	3,62
Bird strike damage analysis in aircraft structures using Abaqus/Explicit and coupled Eulerian Lagrangian approach Analysis of Bird Impact on a Composite Tailplane Leading Edge	Grüneisen EOS	SPH	Silindir	D=10,6 L=21,2	5 Katmanlı Cam Tabaka	1m*1m	155	1,8
	Grüneisen EOS	CEL/Lagrangian	Yarım küre uçlu silindir	D=2,5 L=5	Tek Yönlü (Unidirectional) Kompozit Tabaka	55cm*55cm	200/280	0,1
		Eulerian	Silindir	D=13,4 L=26,8	Rijit			3,6



3. KUŞ ÇARPMASI TEORİSİ

Lavoie ve diğ. [23], kuş çarpması için var olan sayısal yöntemlerin bir karşılaştırmasını oluşturmuştur. Bu çalışmada, süreç içerisindeki basınç denklemleri ayrı ayrı gösterilmiş ve fırlatılan cismin boyutlarına göre bu denklemlerin nasıl değişeceği anlatılmıştır. Ardından, test yapılırken kuş yerine farklı cisimler denenmiş ve test sonucunda bu cisimlerden en uygunu alınan sonuçlara göre değerlendirilmiştir. Kuş çarpması olayı, genelde su jetinin bir hedefe çarpması olarak düşünülmüştür. Bu süreç iki evreye ayrılabilir; ilk şok (initial shock) ve daimi akış (steady flow). İlk şok basıncı Hugoniot Basınç olarak adlandırılır iken daimi akış basıncı durma basıncı (Stagnation pressure), olarak adlandırılır. Durma basıncı Bernouilli denklemine göre hesaplanmaktadır. Her iki durum için hesaplamalar denklem 3.1 ve 3.2’de verilmiştir.

Hugoniot basıncı:

$$P_{\text{şok}} = \rho_0 V_{\text{şok}} V_{\text{çarpma}} \quad (3.1)$$

Durma basıncı (Stagnation pressure):

$$P_{\text{durma}} = \left(\frac{1}{2}\right) \rho_0 v^2 \quad (3.2)$$

Analitik olarak, bu iki basıncın önemli olduğu üzerinde durulmuştur, çünkü Hugoniot basıncının, çarpma için maksimum olası değeri verdiği; durma basıncının ise, akış dengede tutulduğunda beklenen değerin okunmasını sağladığı ifade edilmiştir. Belirtilen bir diğer önemli nokta ise, basıncın fırlatılan cismin boyundan tamamıyla bağımsız olduğudur. Çünkü kütle basınç denkleminde bir değişken olarak bulunmamaktadır. Böylelikle, fırlatılan cismin daha büyük olması durumunda, daha fazla hasar olsa da, basınç sonuçları aynı çıkacaktır. Durma basıncının hesaplanması için gerekli olan değişkenlerin değerleri kolaylıkla bulunabilir. Diğer taraftan, Hugoniot basıncı çarpma hızına ve şok hızına bağlıdır; şok hızı da zaten çarpma hızına bağlıdır. Araştırmada bulunan bir diğer faydalı bilgi ise kuş ve suyun ilişkilendirilmesinden oluşturulan durum denklemidir (equation of state-EOS) ve kuş

ortamı (bird medium) için basınç-yoğunluk ilişkisini tanımlamak için kullanılır. Birkaç tane denklem var olsa da, bu çalışmada kuş çarpması için en yaygın kullanılan denklem 3.dereceden polinom olarak verilen denklem 3.3 ve 3.4'tür:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 \quad (3.3)$$

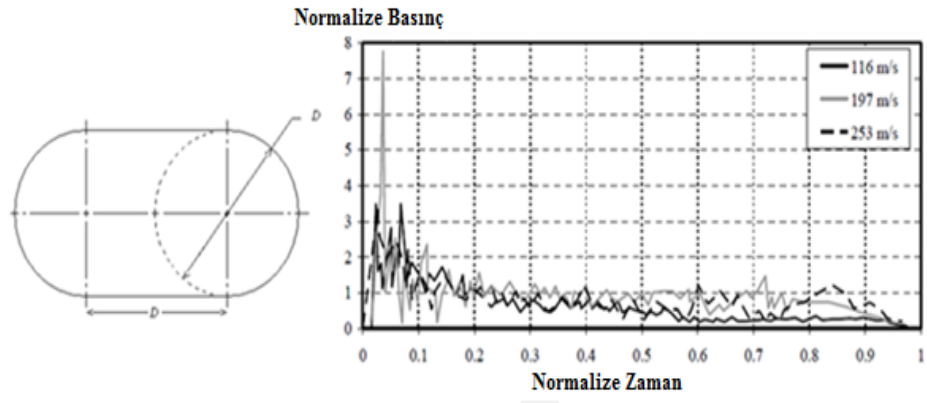
$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (3.4)$$

Hedayati ve Rad [7]'in makalesinde belirtildiği gibi, bir kuş çarpması tarafından ortaya çıkan basınç profilindeki, azami basınç ve durma basıncının, kuş büyüklüğüne yani ölçülerine veya kuş çeşidine bağlı olmadığı, Wilbeck [16]'in deneyinin asıl sonuçlarından biriydi. Dolayısıyla, bu basınçlar yoğunlukla kuşun ilk hızına bağlıdır. Aynı deneyde, bu hız da ortalama 116 m/s olarak seçilmiştir.

Chuan [17], sonlu elemanlar analizleri ile cam ve kompozit plaklara kuş çarpması olayını incelemiştir. Çarpma açısı, yüzeye dik olarak verilmiş, hızı ise burada da 116 m/s olarak alınmıştır. Çarpılan yüzeyin (impacted surface) şekli, düz bir plak olarak kabul edilmiştir. 1,8 kg ağırlığındaki kuşu, Lagrangian yöntemi ile modellemiş ve düz, rijit bir plağa karşı çarpma olayını gerçekleştirmiştir. Analizden elde ettiği basınç profilini, deneylerle kıyasladığında, Hugoniot basıncının %33, durma basıncının ise %20 daha fazla çıktığını gözlemlemiştir ve bunun sebebinin analizlerde yaptığı varsayımlar olduğunu belirtmiştir.

Wilbeck [16], kuş çarpması olayını deneysel olarak inceleyen ilk araştırmacılardan biridir, (Şekil 3.1). Sayısal kuş modelleri için kullanılan şekil ve karakterleri geliştirmiştir. Jelatin, et (beef), RTV kauçuğu (rubber) ve neoprin (sentetik kauçuk, neoprene), fırlatılan cisim olarak tavuğa karşı kıyaslamıştır. Deneyler sonucunda en uygun benzetimin jelatin ile sağlandığı anlaşılmıştır. Jelatin, 950 kg/m³ yoğunluğa sahiptir ve yalnızca %10 boşluk (porosity) içerir. Deneylerin önemli bir diğer sonucu da, fırlatılan cismin şeklinin çok önemli olduğudur. En uygun şekil olarak yarım küre uçlu silindir (cylinder with hemispherical ends) seçilmiştir. Şeklin uzunluk çap oranı 2 olarak belirlenmiştir.

Wilbeck'in yürüttüğü çarpma testlerinde, kuşlar ve yukarıda bahsi geçen diğer malzemeler rijit bir plağa 100 ile 300 m/s arasındaki hızlarda fırlatılmıştır.



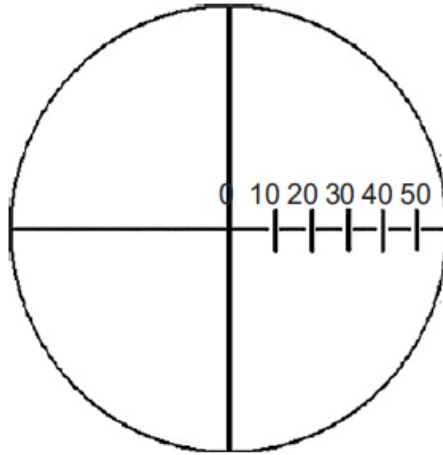
Şekil 3.1: Kuş modeli geometrisi ve Wilbeck'in deney sonuçları [23].



4. DOĞRULAMA ÇALIŞMASI

Bu projede gerçekleştirilen helikopter kanopisine kuş çarpması analizinin, yönteminin doğrulanması adına; polikarbonat bir malzemeye parçacık çarpması olayının deneysel olarak incelendiği ve analizinin gerçekleştirildiği Qasim H. Shaha ve Yousif A. Abakr’a ait “Effect of distance from the support on the penetration mechanism of clamped circular polycarbonate armor plates” [29] makalesi için doğrulama çalışması yapılmıştır.

Doğrulamanın yapılacağı ilgili çalışmada; 6,98 mm çapa sahip küre şeklindeki çelik bir parçacık; 115 mm çapa sahip olan 1,91 mm kalınlığındaki dairesel polikarbonat plağa deneysel olarak çarpıtılmış ve ayrıca sayısal simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Çarpma işlemi, merkezden 0 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm uzaklıktaki bölgeler için 138 m/s hız ile gerçekleştirilmiştir ve çarpma bölgeleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. İlgili çalışmada, dairesel polikarbonat plak üzerinde, çarpma bölgesinin uzaklığının hasar mekaniği üzerindeki etkisi incelenmiştir. [29]



Şekil 4.1: Çarpma noktalarının gösterimi [29].

4.1 Çarpan Parçacık Modelinin Oluşturulması

Rijit olarak çelik malzemesi ile küre şeklinde modellenen çarpan parçacık cismi için Çizelge 4.1’deki girdiler kullanılmıştır. Bilye 7284 adet 10 düğümlü dört yüzlü katı

elemanla modellenmiştir. Çelik bilye malzeme özellikleri için LS Pre – Post girdileri ise Şekil 4.2’de verilmiştir. Plak 41.751 kabuk eleman ile modellenmiştir. Plak modeli ve parçacık modeli birlikte Şekil 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.1: Çarpan çelik kürenin özellikleri [29].

Özellik	Değer
Boyutlar	6,98 mm çap
Yoğunluk	7870 kg/m ³
Elastisite Modülü	210 Gpa
Poisson Oranı	0,21

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done 2 elik bilye

☐ Use *Parameter (Subsys: 1 pc_dogrulama.k) Setting

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (1)

TITLE
elik bilye

1	MID	RQ	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	1	7.870e-009	2.100e+005	0.2100000	0.0	0	0.0	

2	CMQ	CON1	CON2
	0.0	0	0

3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

COMMENT:
Total Card: 1 Smallest ID: 2 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

Şekil 4.2: Çelik bilye için LS Pre – Post girdileri.

4.2 Hedef Cisim Modelinin Oluşturulması

Parçacağın çarpacağı cisim olarak dairesel polikarbonat plak Çizelge 4.2’deki bilgiler kullanılarak modellenmiştir. Polikarbonat malzeme özellikleri için LS Pre – Post girdileri ise Şekil 4.3’te verilmiştir Plak modeli ve parçacık modeli birlikte Şekil 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.2: Dairesel polikarbonat plak için kullanılan bilgiler [29].

Özellik	Değer
Boyutlar	115 mm çap
Kalınlık	1,91 mm
Sınır koşulları	Ankastre Kenar
Modelleme	MAT_PLASTIC_KINEMATIC
Kırılma Gerinimi	1,5
Akma Mukavemeti	63 MPa
Elastisite Modülü	1530 MPa

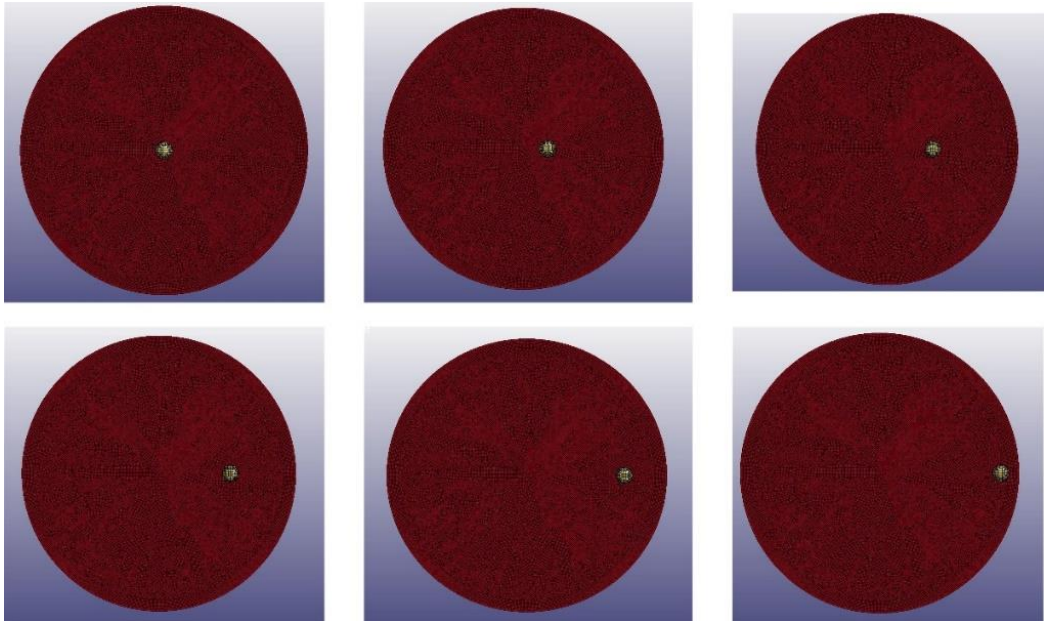
Çizelge 4.2 (devam) : Dairesel polikarbonat plak için kullanılan bilgiler [29].

Özellik	Değer
Poisson Oranı	0,38
Tanjant modülü	35 MPa
Yoğunluk	1200 kg/m ³

Şekil 4.3: Polikarbonat plak için LS Pre – Post girdileri.

4.3 Çarpma Analizinin Gerçekleştirilmesi

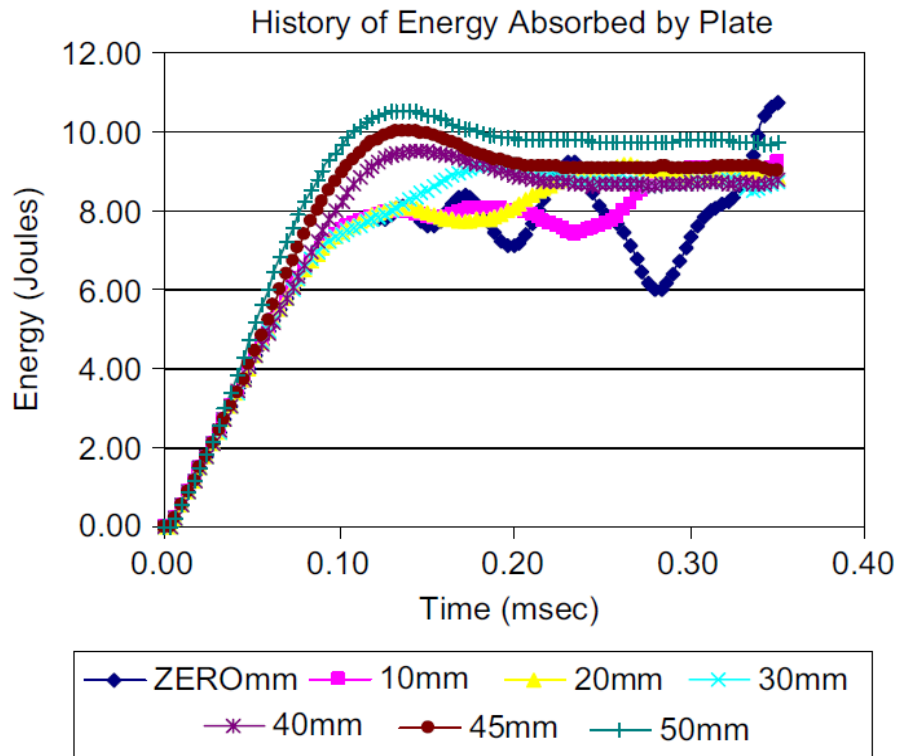
4.1 ve 4.2 kısımlarında oluşturulan parçacık ve plak modelleri kullanılarak 138 m/s hız ile plağın merkezinden 0, 10, 20, 30, 40, 45, 50 mm uzakdaki bölgelere çarpma analizi gerçekleştirilmiş ve çarpma simülasyonunun $t=0$ ms anındaki görüntüsü Şekil 4.4'te verilmiştir.



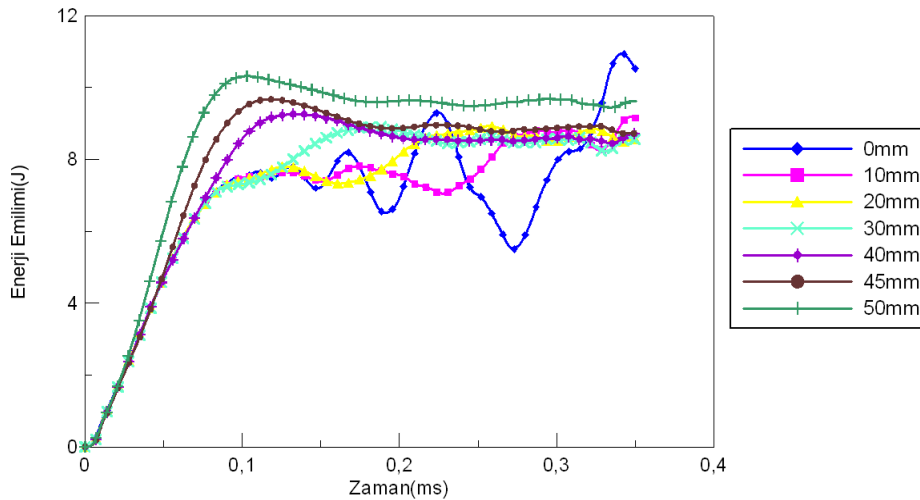
Şekil 4.4: $t=0$ ms anındaki çarpma analizinin merkezden 0, 10, 20, 30, 40, 50 mm uzaklık için gösterimi.

4.4 Sonuçların Karşılaştırılması

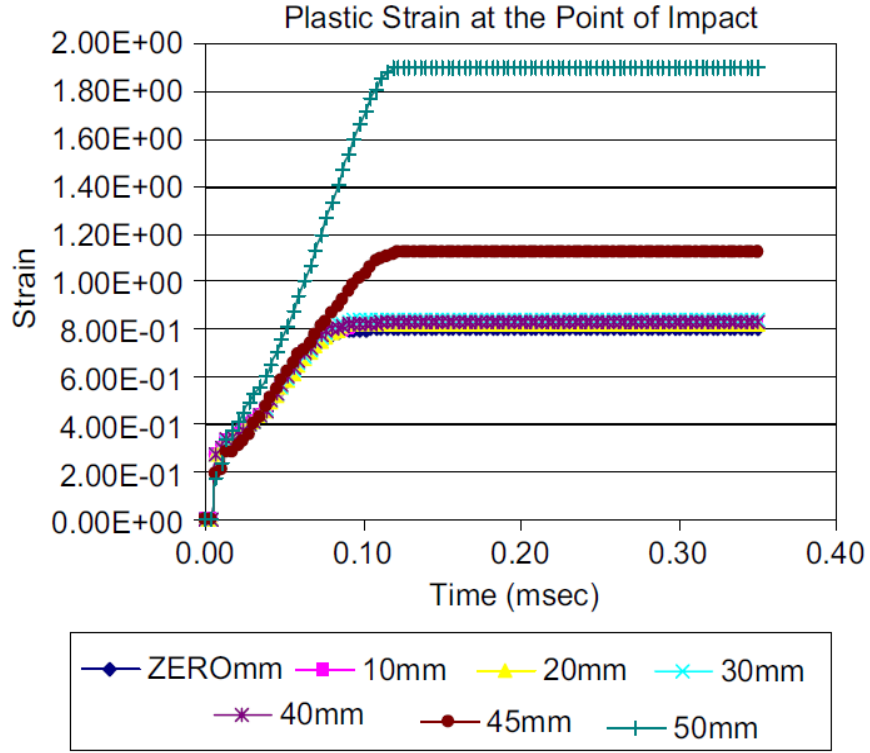
4.3 numaralı kısımda gerçekleştirilen çarpma analizi sonrası tüm çarpma noktaları için enerji soğurumunun ve gerinimin zamanla değişim grafikleri elde edilmiştir. Makaleden alınan enerji emilimin zamanla değişim grafiği Şekil 4.5'te, gerinimin zamanla değişim grafiği ise Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.6'da ve Şekil 4.8'de ise analizi gerçekleştirilen ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.



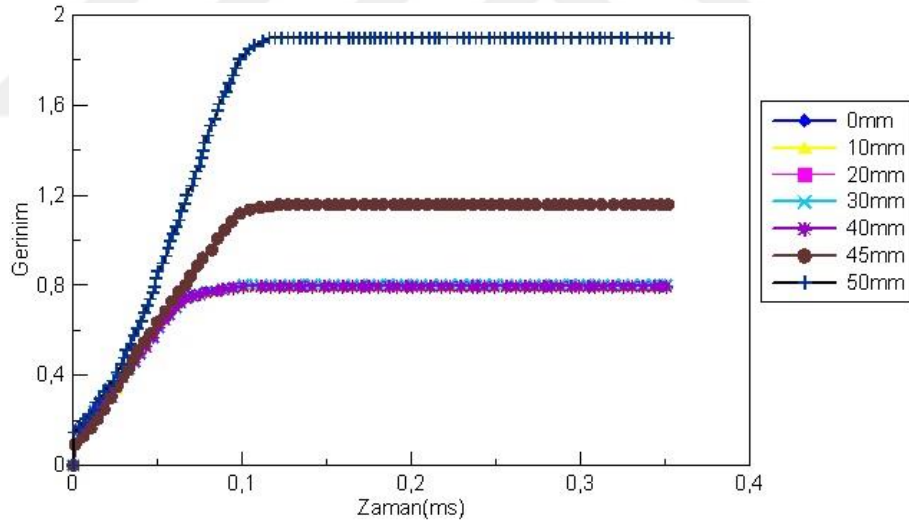
Şekil 4.5: Enerji emiliminin zamanla değişimi [29].



Şekil 4.6: Enerji emiliminin zamanla değişimi (Bu çalışma).



Şekil 4.7: Gerininin zamanla değişimi [29].



Şekil 4.8: Gerininin zamanla değişimi (Bu çalışma).

Makaleden alınan grafikler ile çarpma analizi sonucu elde edilen grafikler karşılaştırıldığında, makaledeki grafiklere çok yakın sonuçlar elde edildiği gözlenmektedir. Bu şekilde ilgili çalışmanın doğrulaması yapılmış ve bu projede kullanılacak olan yöntemin doğruluğu ispatlanmıştır.



5. KUŞ VE KANOPI MODELİ

5.1 Kuş Modeli

Literatürdeki kuş çarpması verileri incelendiğinde, çarpma sonrası gösterdiği karakteristik değerler açısından gerçek kuş geometrisine en yakın sonuç alınan kuş geometrisinin yarım küre uçlu silindir olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple kanopiye kuş çarpması analizlerinin yapılabilmesi adına yarım küre uçlu silindir geometrisinde kuş modeli oluşturulmuştur. Sayısal modelleme yöntemi ise, yine gerçek kuş karakteristiğine en yakın sonuçların alındığı SPH yöntemi olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.1’de verilen bilgiler doğrultusunda yarım küre uçlu silindir geometrisine sahip kuş modeli, LS-DYNA programında modellenmiştir.

Çizelge 5.1: Kuş modeli için belirlenen girdiler [30].

Özellik	Değer
Kuş Geometrisi	Yarım Küre Uçlu Silindir
Kuş Modeli	SPH
Düğüm Sayısı	30.297
Boşluk Oranı [17]	% 0
Durum Denklemi [17]	Lineer Polinomik EOS
Kuş Bünye Denklemi	$C_0=0$, $C_1=2250$,
Katsayıları (Boşluk oranı yok) [17]	$C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=0$
Boyutları	$2D = L = 228 \text{ mm}$
Yoğunluk	934 kg/m^3
Ağırlık	1,80 kg
Kesme Modülü	2 GPa
Akma Mukavemeti	0,02 MPa
Plastik Sertleşme Modülü	0,001 MPa
Kuş Geometrisi	Yarım Küre Uçlu Silindir
Kuş Modeli	SPH
Düğüm Sayısı	30.297
Boşluk Oranı [17]	% 0
Durum Denklemi [17]	Lineer Polinomik EOS

LS-DYNA programında modelleme yapılırken, kullanılan değerler Şekil 5.1’de LS Pre – Post girdileri olarak gösterilmiş ve SPH yöntemiyle oluşturulmuş olan kuş modeli Şekil 5.2’de verilmiştir. Kuş modeli, 30.297 düğümden (nodes) oluşmaktadır.

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter (Subsys: 1 birdd_strike_orta.k) Setting

*MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO_(TITLE) (010) (1)

TITLE

Kuş hidro

1	MID	RO	G	SIGY	EH	PC	FS	CHARL
5	9.340e-010	2000.0000	0.0200000	0.0010000	0.0	0.0	0.0	

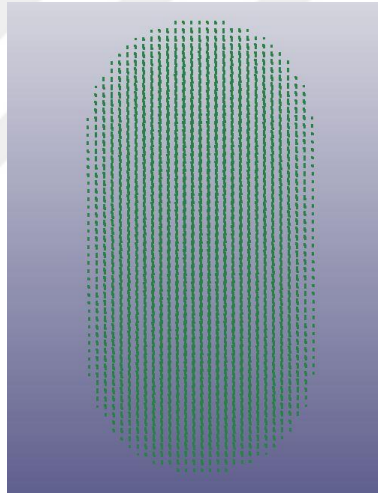
2	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

3	EPS9	EPS10	EPS11	EPS12	EPS13	EPS14	EPS15	EPS16
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Total Card: 1 Smallest ID: 5 Largest ID: 5 Total deleted card: 0

Şekil 5.1: Kuş malzeme özellikleri için LS Pre – Post girdileri.



Şekil 5.2: SPH yöntemi ile LS-DYNA’da modellenen yarım küre uçlu silindir geometrisindeki kuş modeli.

5.2 Kanopi Modelleri

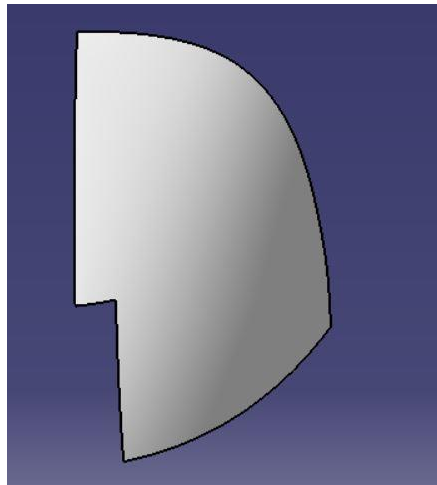
Kuş çarpması analizinin, kanopi üzerindeki farklı noktalarda gerçekleştirilebilmesi adına, rijit olmayan bir kanopi modeli oluşturmak gerekmektedir. Buradaki asıl amaç, 2 farklı kanopinin farklı noktalarına farklı hızlarla yapılan çarpma analizlerinin sonucunda elde edilecek verilerin yorumlanmasıdır. Havacılık sektöründe faal durumda bulunan iki farklı helikopterin kanopisinin seçilip modellenmesi kararlaştırılmıştır. Buradan yola çıkılarak; çok amaçlı kullanımı olan, düşük ağırlıklı

ve yaklaşık 23 ÷lkede kullanılan h÷cum helikopteri Gazelle SA 341 helikopteri ve birçok g÷revde kullanılabilen y÷ksek hızlı helikopterlerden olan AS365 Dauphin helikopteri proje için uygun bulunmuş ve kanopi modelleri oluşturulmuştur. Gazelle SA 341 helikopteri, Aerospatiale Helicopter Corporation (France) tarafından üretilmiş olmakla birlikte en hızlı helikopterlerden biridir. [31] AS365 Dauphin helikopteri, Airbus Helicopters tarafından üretilmektedir. Ancak ilk tasarımı ve üretimi yine Aerospatiale Helicopter Corporation (France) tarafından gerçekleşmiştir. [32]

SA341 Gazelle helikopterine ait 3D CAD geometrisi şekil 5.3'te verilmiştir. Kuş arpması analizinin yapıldığı kanopi geometrisi ise şekil 5.4'te g÷sterilmiştir.



şekil 5.3: Gazelle SA341 helikopteri 3D Geometrisi [33].

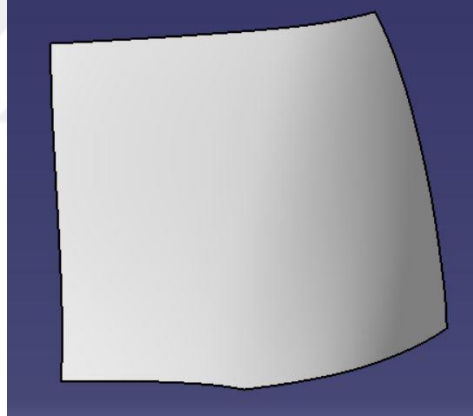


şekil 5.4: Gazelle SA341 helikopterine ait çarpmanın gerçekleştiğı kanopi [33].

AS365 Dauphin helikopterine ait 3D CAD geometrisi Şekil 5.5'te verilmiştir. Kuş çarpması analizinin yapıldığı kanopi geometrisi ise Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

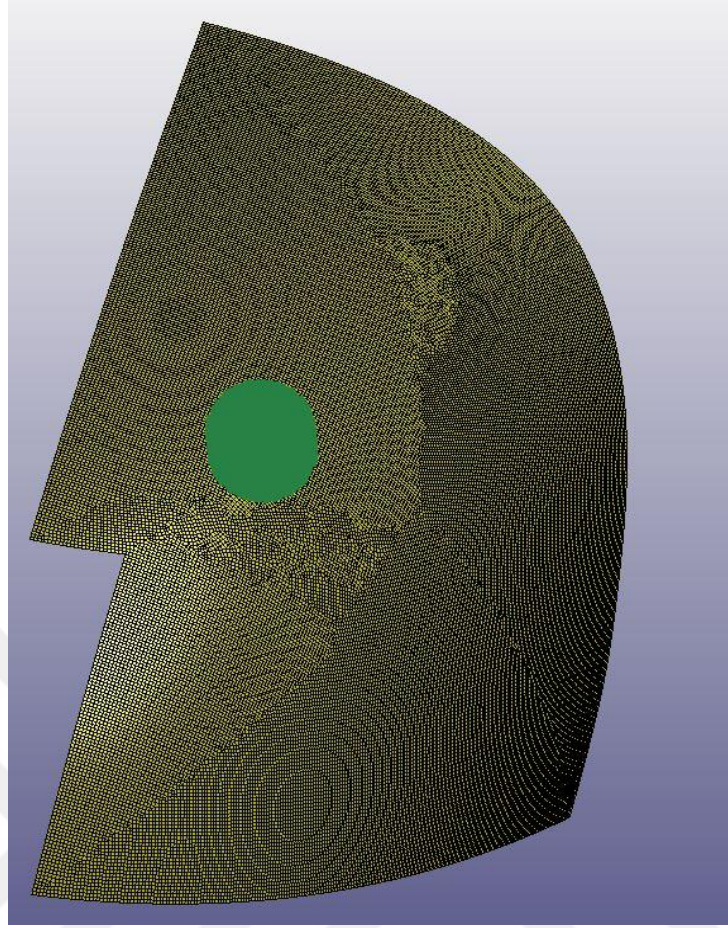


Şekil 5.5: Dauphin AS365 helikopteri 3D Geometrisi [34].

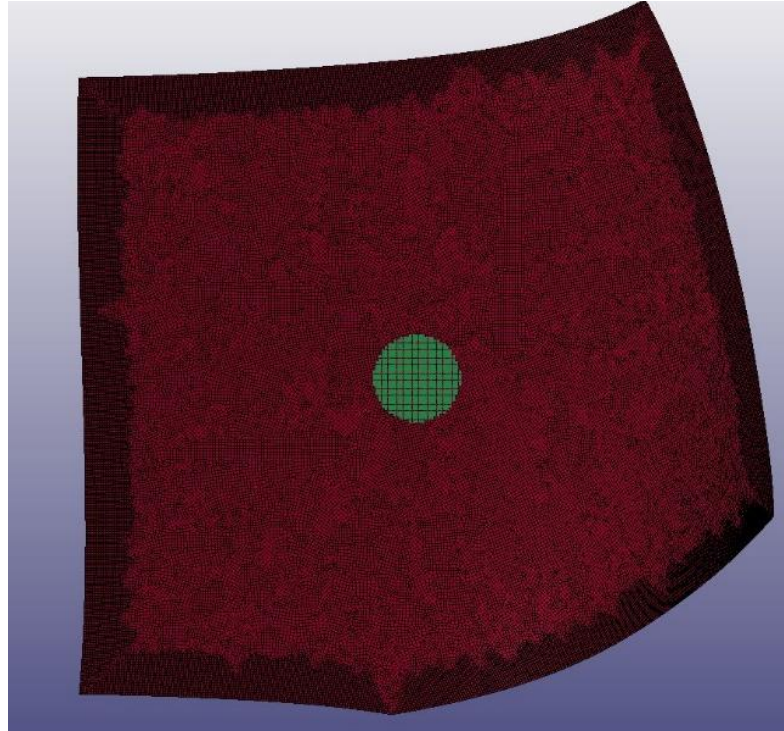


Şekil 5.6: Dauphin AS365 helikopterine ait çarpmanın gerçekleştiği kanopi [34].

Geometri modellemesi tamamlanan kanopiler; LS-DYNA yazılımında kabuk (shell) elemanlarla modellenmiş ve kenarları ankastre bağlı durumda, yani serbestlik derecesi ve dönme durumu her üç ekseninde de sıfır olarak ayarlanmıştır. Bu şekilde çarpma analizinin gerçekleştirilebilmesi için hazır hale getirilmiştir. Kanopiler modellenirken, polikarbonat malzeme özellikleri için Çizelge 5.2'deki değerler kullanılmıştır. Kanopilerin modellenmiş halleri kuş modeli ile birlikte Şekil 5.7 ve 5.8'de gösterilmektedir. Gazelle SA341 helikopterinin kanopi modeli 48.157 elemandan oluşmaktadır. Dauphin AS365 helikopterinin kanopi modeli ise 65.538 elemandan oluşmaktadır.



Şekil 5.7: Gazelle SA341 helikopterinin kanopi modeli



Şekil 5.8: Dauphin AS365 helikopterinin kanopi modeli

Çizelge 5.2: Kanopi modeli için belirlenen girdiler [35].

Özellik	Değer
Yoğunluk	1200 kg/m ³
Elastisite Modülü	1500 MPa
Akma Mukavemeti	62 MPa
Poisson Oranı	0,37
Tanjant Modülü	32 MPa
Kopma Gerinimi	1,5

Kanopi modelleri için LS Pre – Post girdileri ise Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

Şekil 5.9: Kanopi modeli için LS Pre – Post girdileri.

6. KUŞ ÇARPMASI ANALİZİ

Kuş çarpması analizlerinin gerçekleştirilebilmesi adına; yarım küre uçlu silindir geometrisine sahip kuş şekli için SPH yöntemi ile LS-DYNA programı yardımıyla modelleme yapılmıştır. Burada kuş geometrisi yerine kullanılacak olan bu model 30.297 elemana sahiptir.

3D CAD geometrileri tedarik edilen helikopter kanopileri, LS-DYNA programı yardımıyla modellenmiştir.

LS-DYNA Pre – Post kısmında çarpan ve hedef cisimler için farklı durumlar için farklı konumlar ayarlanmıştır. Kanopiler için kenarlar ankastre olacak şekilde sınır şartları verilmiş ve kuş ile kanopi etkileşimi için AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE seçilmiştir.

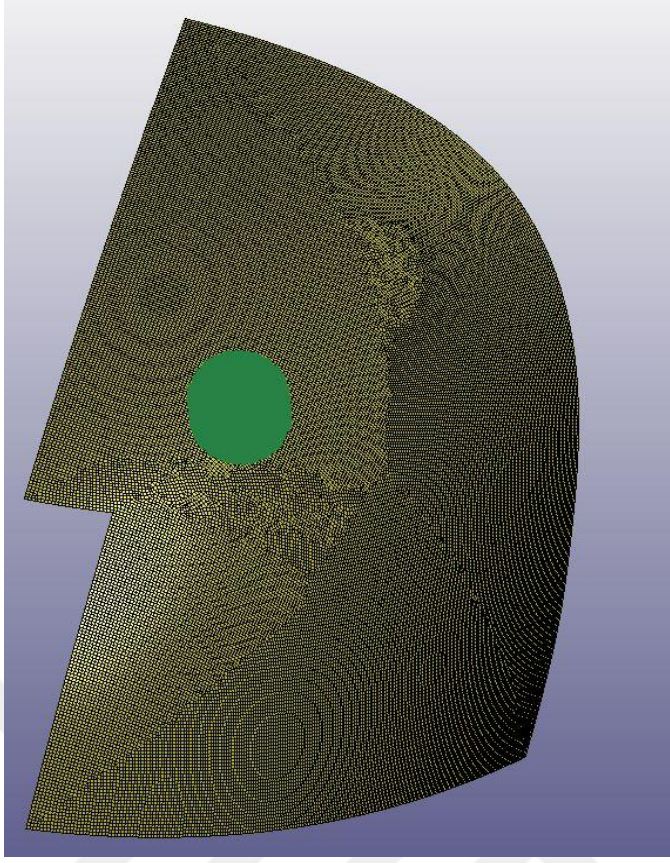
Kuş modeli ve kanopi modelleri için malzeme özellikleri girişleri yapıldıktan sonra, diğer tüm bilgiler de girilip tüm durumlar için kuş çarpması analizleri gerçekleştirilmiştir.

6.1 Gazelle SA341 Helikopteri

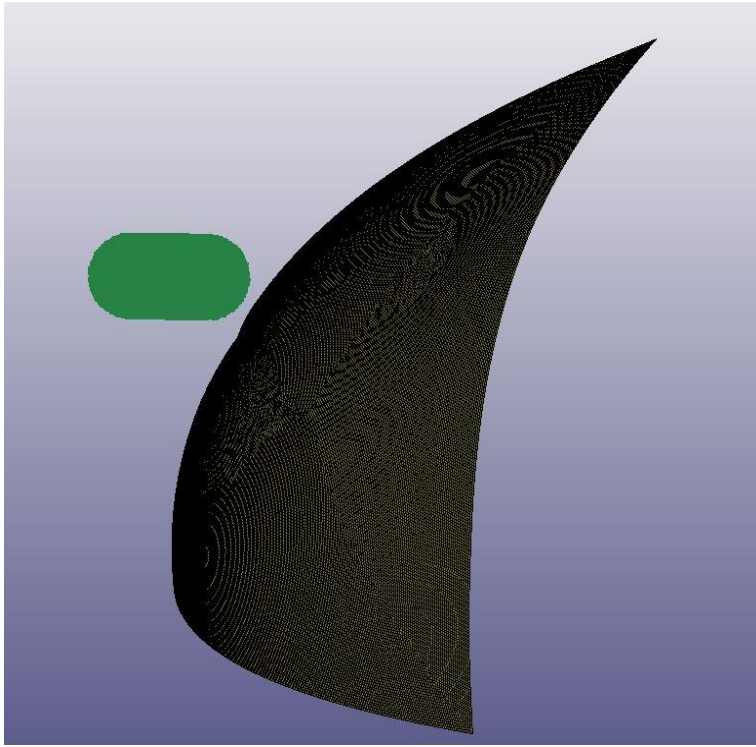
6.1.1 Kanopi geometrisinin ortasına üç farklı hız ile çarpma analizi

Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan SA341 Gazelle helikopterine ait kanopi geometrisinin ortasına 90 m/s, 100 m/s ve 110 m/s olmak üzere 3 farklı hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. Her üç hız için de $t=0$ ms anındaki kuş modeli ve kanopinin görüntüleri Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de sırasıyla üstten ve yandan görünüm olarak verilmiştir.

Helikopter kanopisinin modellenmesi 5. bölümde anlatılmıştır. Şekillerde yarım küre uçlu silindir şeklinde gözüken kuş geometrisi de yine 5. bölümde anlatıldığı şekilde modellenmiş ve her iki modelin görüntüleri gösterilmiştir.



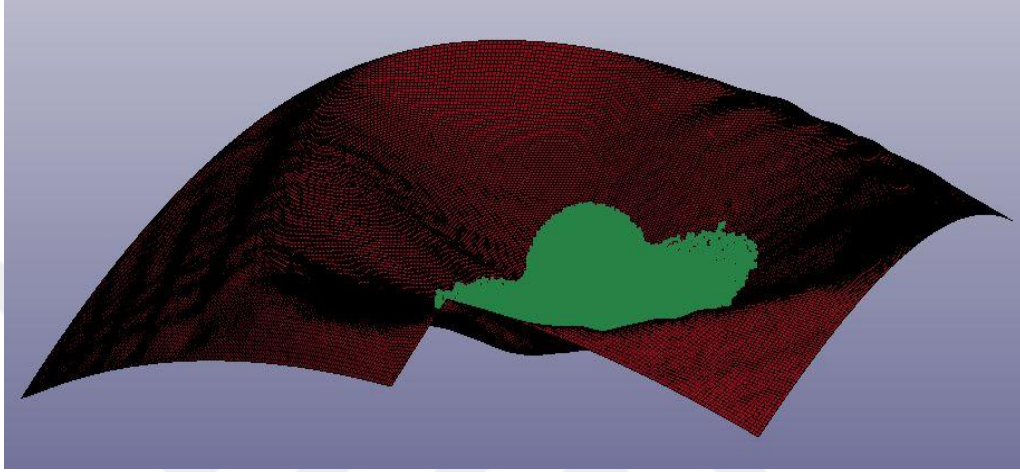
Şekil 6.1: $t=0$ ms anında Gazelle SA341 helikopterin ait kanopinin ortasına çarpma – üstten görünüm.



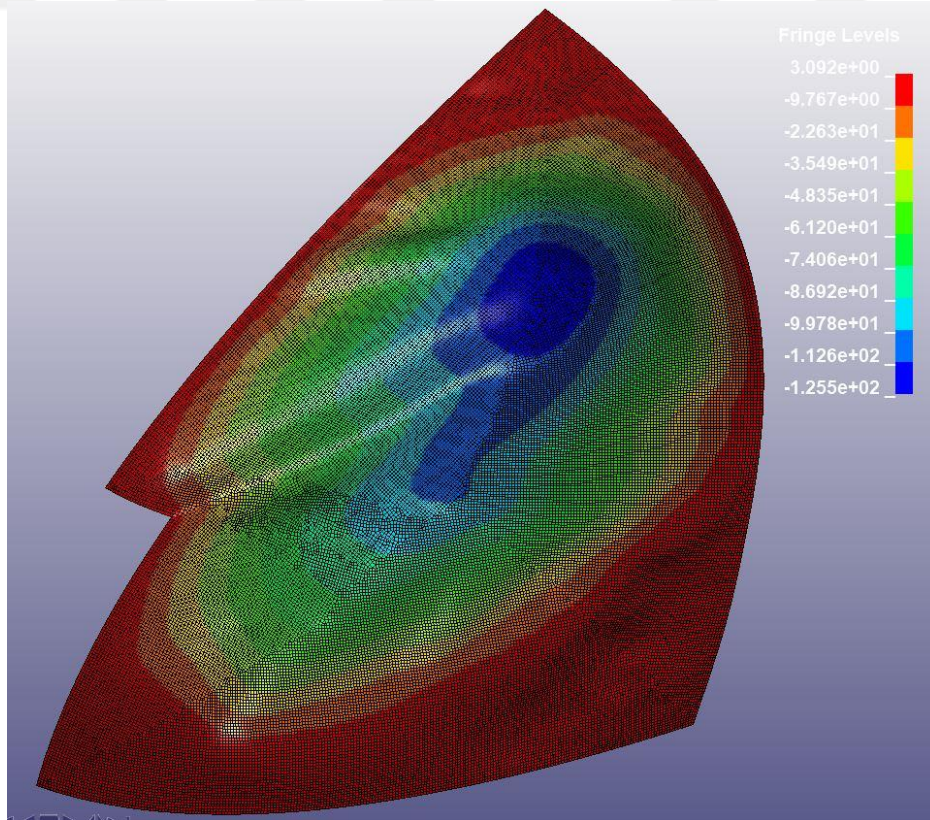
Şekil 6.2: $t=0$ ms anında Gazelle SA341 helikopterin ait kanopinin ortasına çarpma – yandan görünüm.

6.1.1.1 Kanopinin ortasına V=90 m/s hız ile çarpma analizi

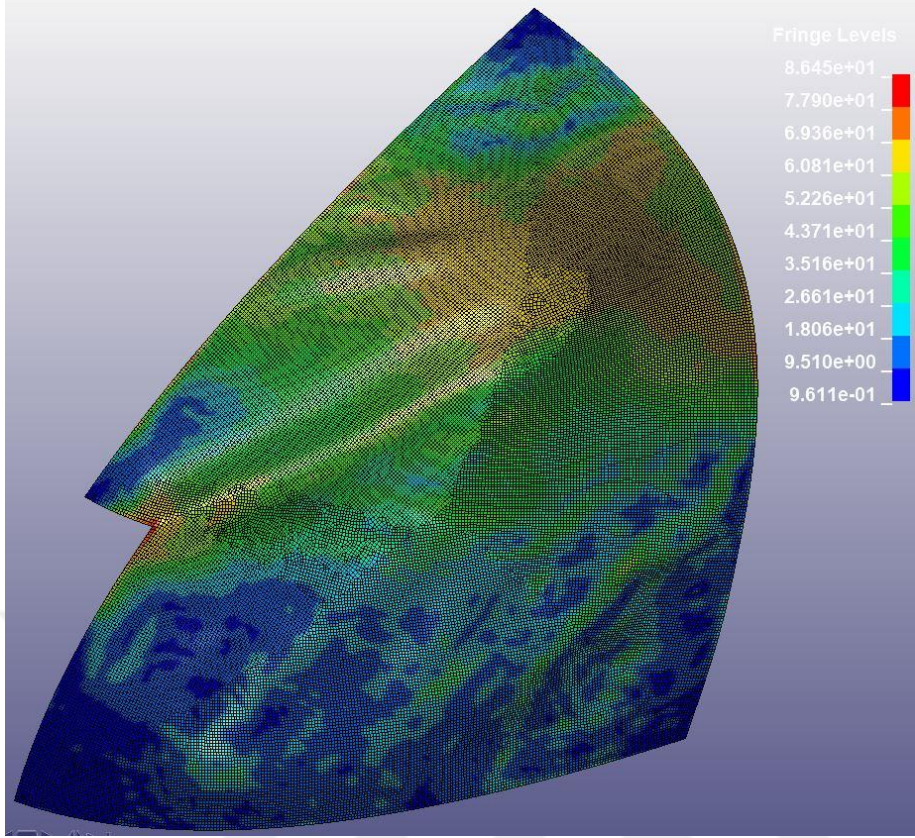
Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan SA341 Gazelle helikopterin ait kanopi geometrisinin ortasına 90 m/s hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. $t=7,5$ ms anındaki kuş modeli ve kanopinin görüntüsü Şekil 6.3'te verilmiştir. Yine $t=7,5$ ms anındaki deplasman değerleri Şekil 6.4'te verilmiş olup, von Mises gerilmeleri dağılımı Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3: $t=7,5$ ms anında Gazelle SA341 helikopterin ait kanopinin ortasına V=90 m/s hızla çarpmanın gösterimi.



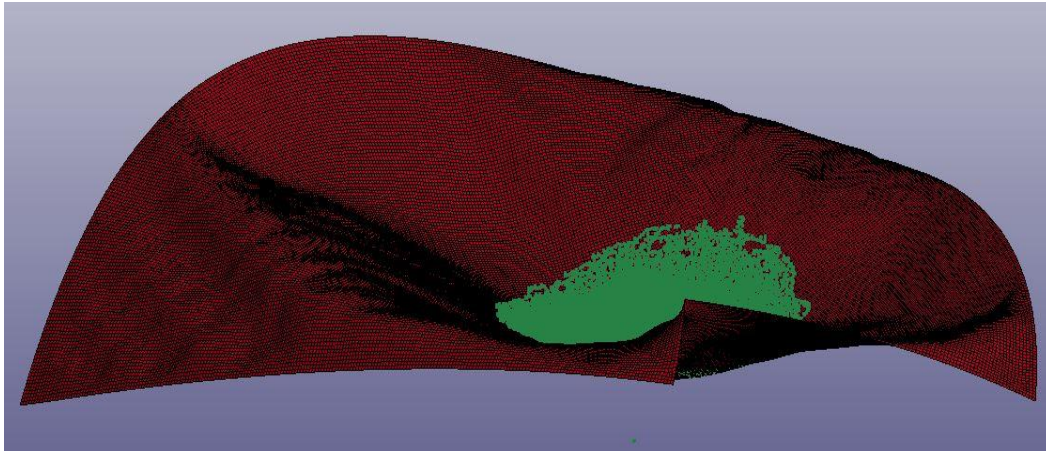
Şekil 6.4: $t=7,5$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).



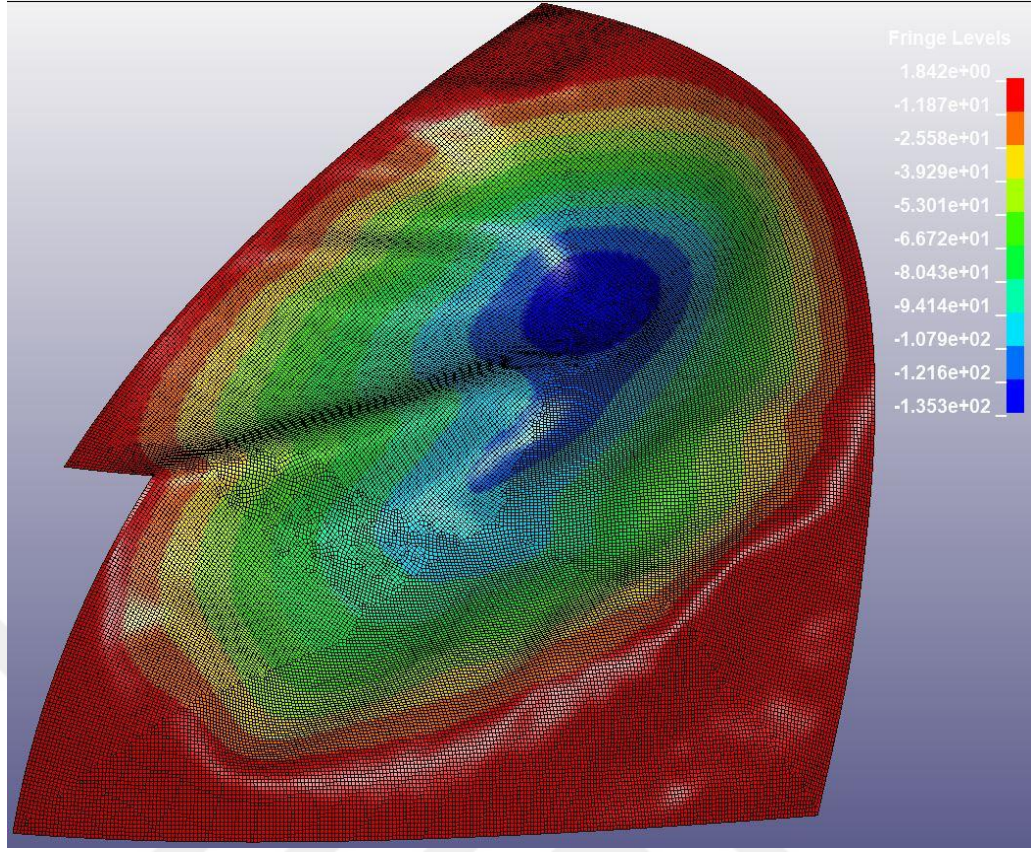
Şekil 6.5: $t=7,5$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).

6.1.1.2 Kanopinin ortasına $V=100$ m/s hız ile çarpma analizi

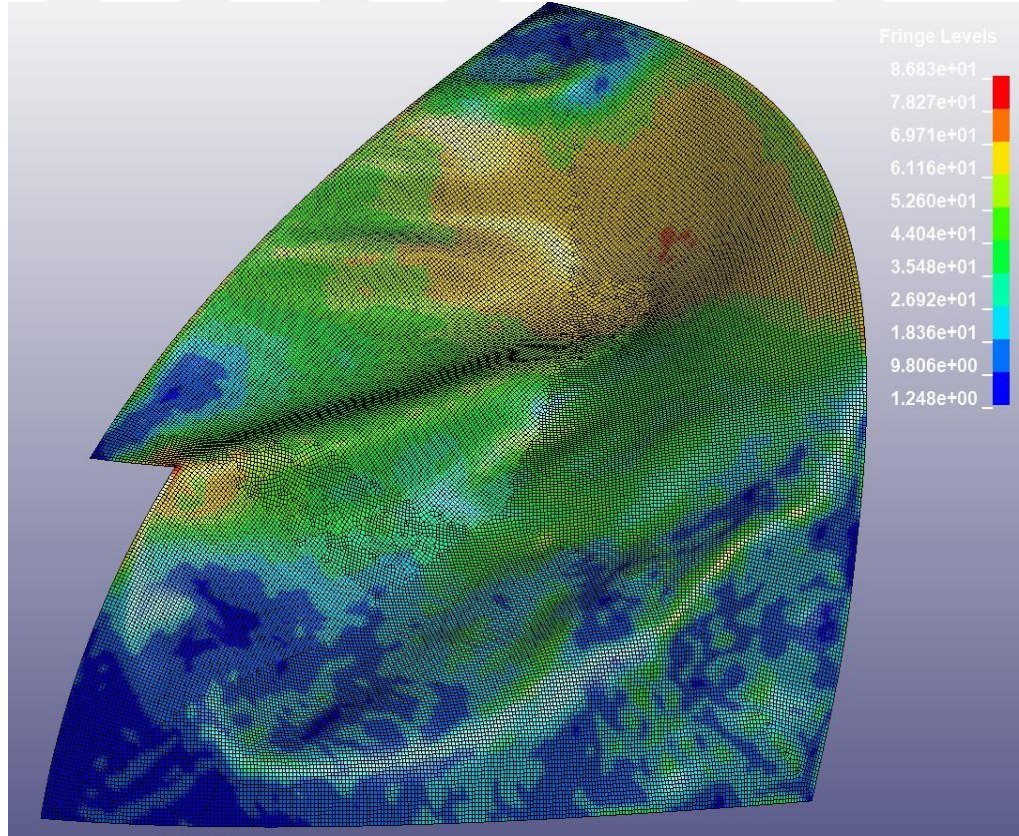
Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan SA341 Gazelle helikopterine ait kanopi geometrisinin ortasına 100 m/s hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. $t=7,5$ ms anındaki kuş modeli ve kanopinin görüntüsü Şekil 6.6’da verilmiştir. Yine $t=7,5$ ms anındaki deplasman değerleri Şekil 6.7’de verilmiş olup, von Mises gerilmeleri dağılımı Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



Şekil 6.6: $t=7,5$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin ortasına $V=100$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.



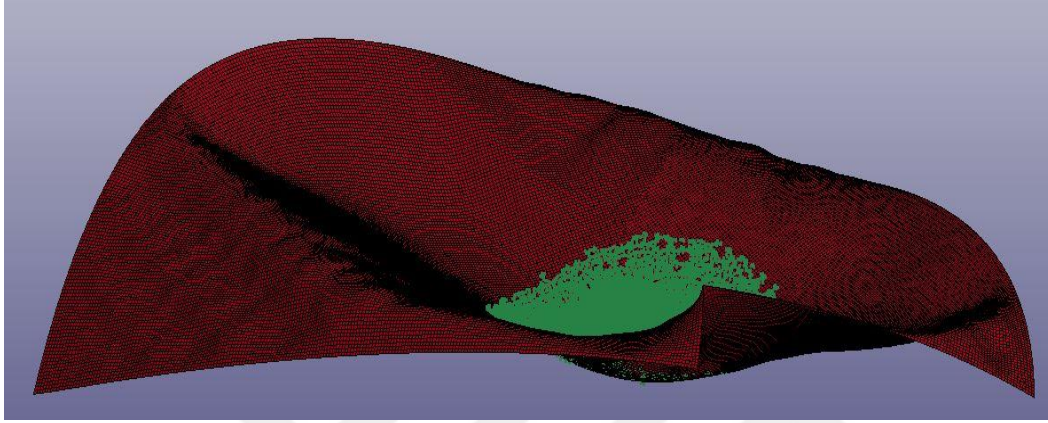
Şekil 6.7: $t=7,5$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).



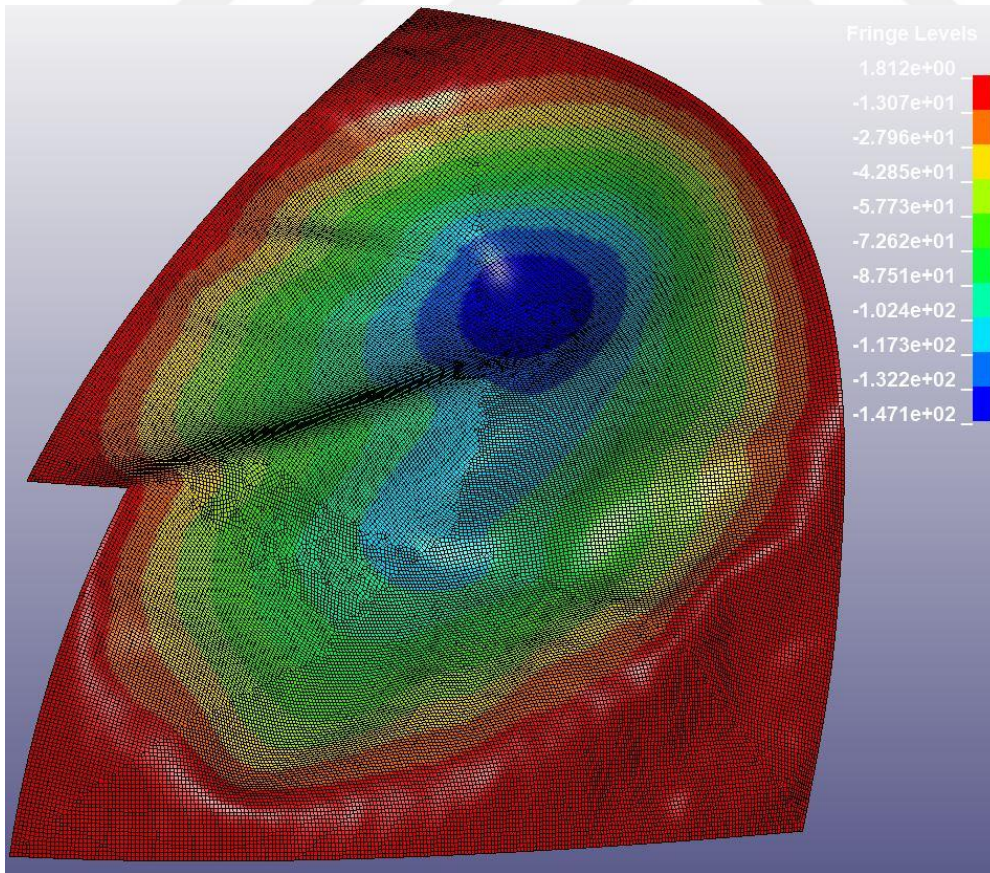
Şekil 6.8: $t=7,5$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).

6.1.1.3 Kanopinin ortasına V=110 m/s hız ile çarpma analizi

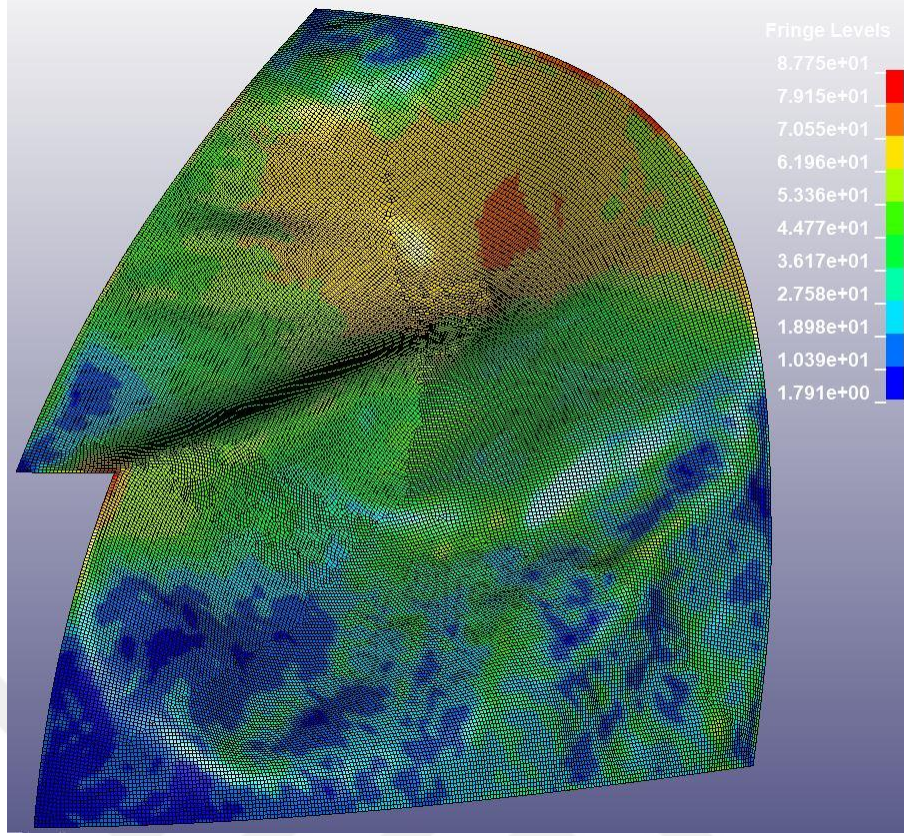
Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan SA341 Gazelle helikopterine ait kanopi geometrisinin ortasına 110 m/s hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. $t=7$ ms anındaki kuş modeli ve kanopinin görüntüsü Şekil 6.9’da verilmiştir. Yine $t=7$ ms anındaki deplasman değerleri Şekil 6.10’da verilmiş olup, von Mises gerilmeleri dağılımı Şekil 6.11’de gösterilmiştir.



Şekil 6.9: $t=7$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin ortasına V=110 m/s hızla çarpmanın gösterimi.



Şekil 6.10: $t=7$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).



Şekil 6.11: $t=7$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).

6.1.1.4 Sayısal Sonuçlar

Kanopinin orta bölgesine yapılan çarpma analizlerinde; deplasman değerleri çarpmanın gerçekleştiği bölgede maksimum olmuş olup, çarpma bölgesinden ankastre bağlanmış olan kenarlara doğru gidildikçe bu değer azalmaktadır. Maksimum deplasman değeri; 90 m/s hız için 125,5 mm , 100 m/s hız için 135,3 mm, 110 m/s hız için 147,1 mm'dir.

Yine aynı bölge için von Mises gerilmeleri dağılımına baktığımızda, bu değer, çarpmanın gerçekleştiği bölgenin üst taraflarına doğru artarak ve dalgalanarak gitmektedir. Ankastre yapılmış kenarlarda ise bu gerilmeler çoğunlukla çok düşüktür. Bu kenarların bazı noktalarında yüksek gerilmeler mevcuttur. Maksimum von Mises gerilmesi; 90 m/s hız için 86,45 MPa, 100 m/s hız için 86,83 MPa, 110 m/s hız için 87,75 MPa 'dır.

6.1.2 Kanopinin çeşitli bölgelerine 100 m/s hızla çarpma analizleri

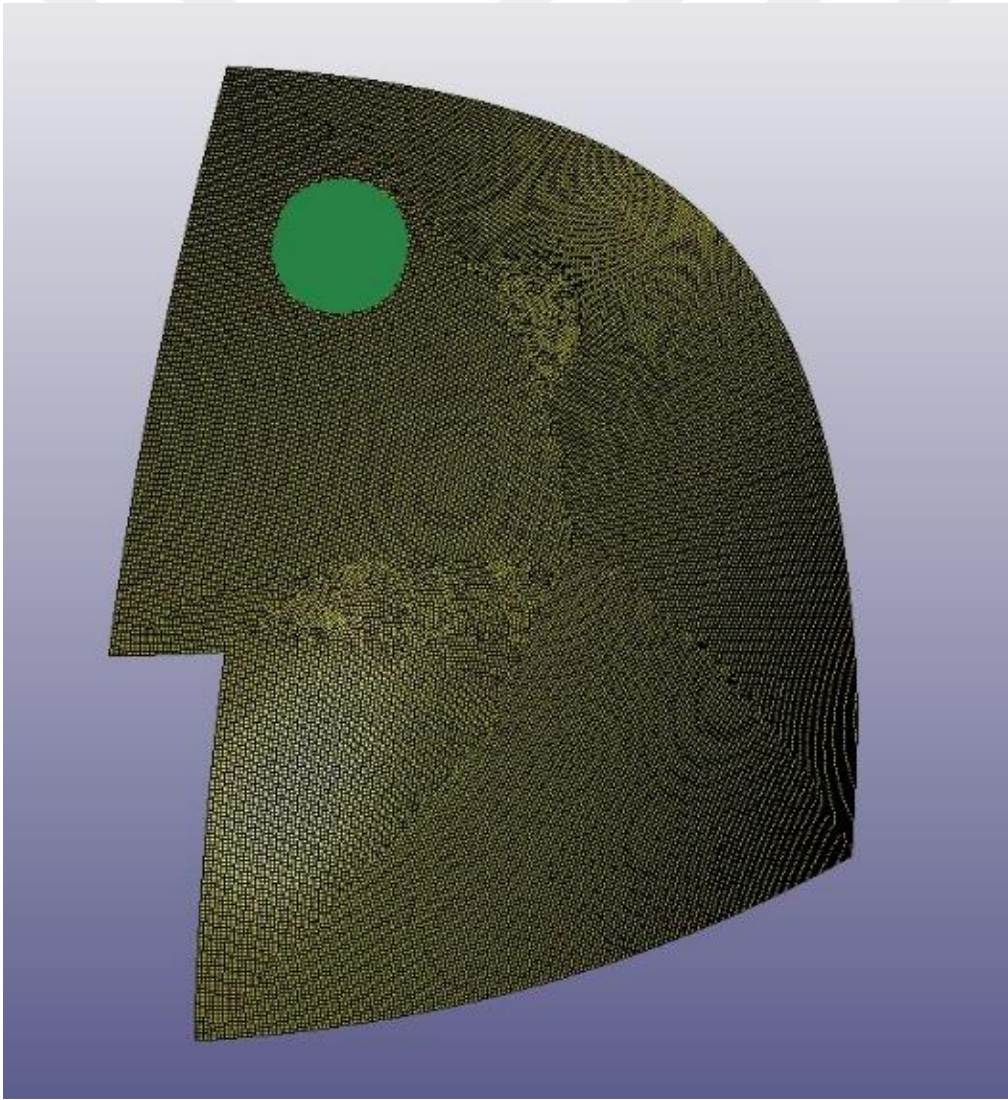
Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan SA341 Gazelle helikopterine ait kanopi geometrisinde seçilen 3 farklı bölgeye 100 m/s hızla kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir.

6.1.2.1 Kanopinin ortasına çarpma

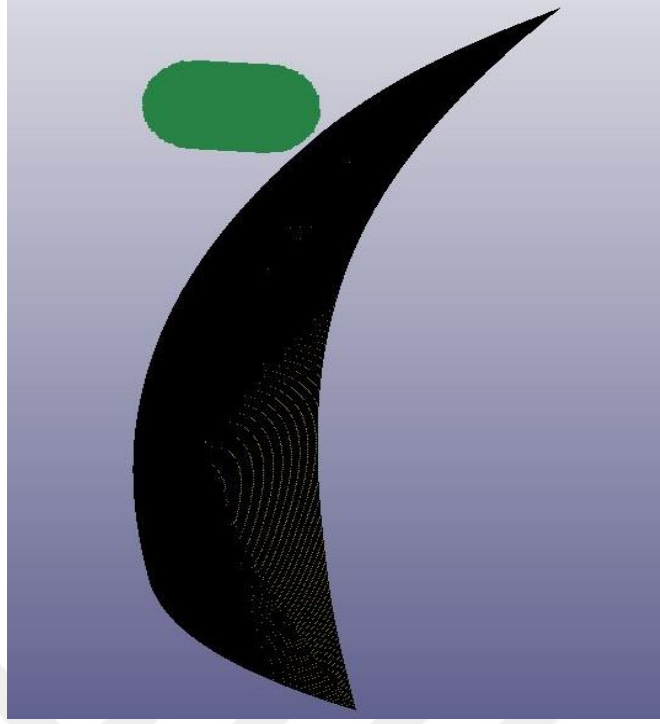
Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan SA341 Gazelle helikopterine ait kanopi geometrisinin orta bölgesine 100 m/s hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile ilgili sonuçlar 6.1.1.2’de de incelenmiş olup, burada verilmiştir.

6.1.2.2 Kanopinin st bölgesine arpma

Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan SA341 Gazelle helikopterine ait kanopi geometrisinin st bölgesine 100 m/s hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. $t=0$ ms anındaki kuş modeli ve kanopi geometrisinin görüntüsü şekil 6.12 ve 6.13’te verilmiştir.

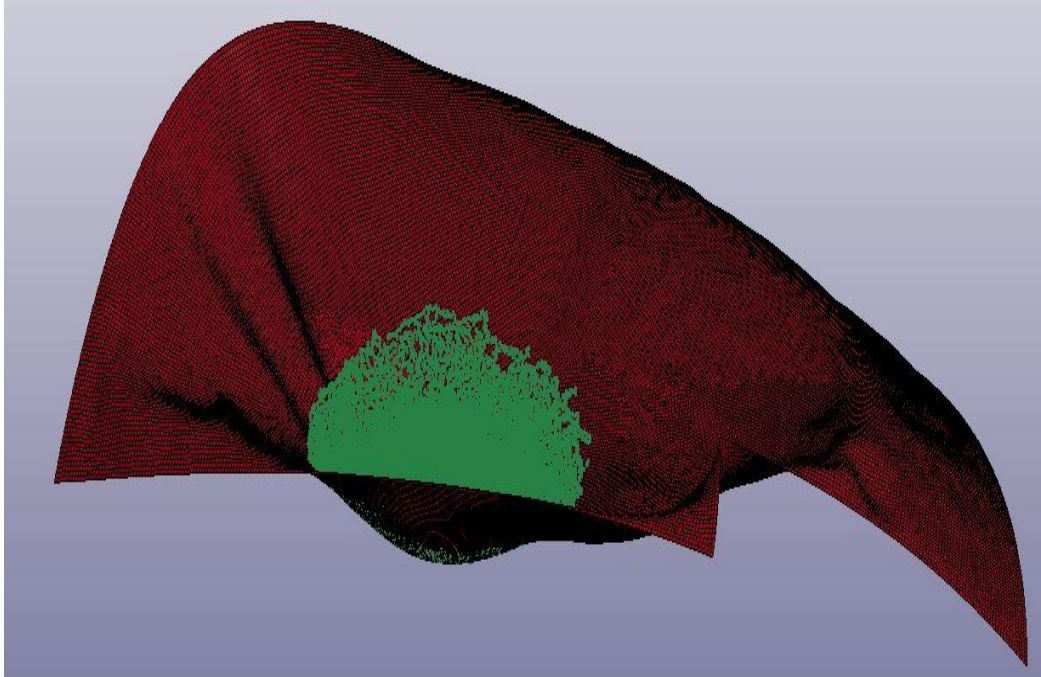


şekil 6.12: $t=0$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin st bölgesine çarpma – stten görünüm.

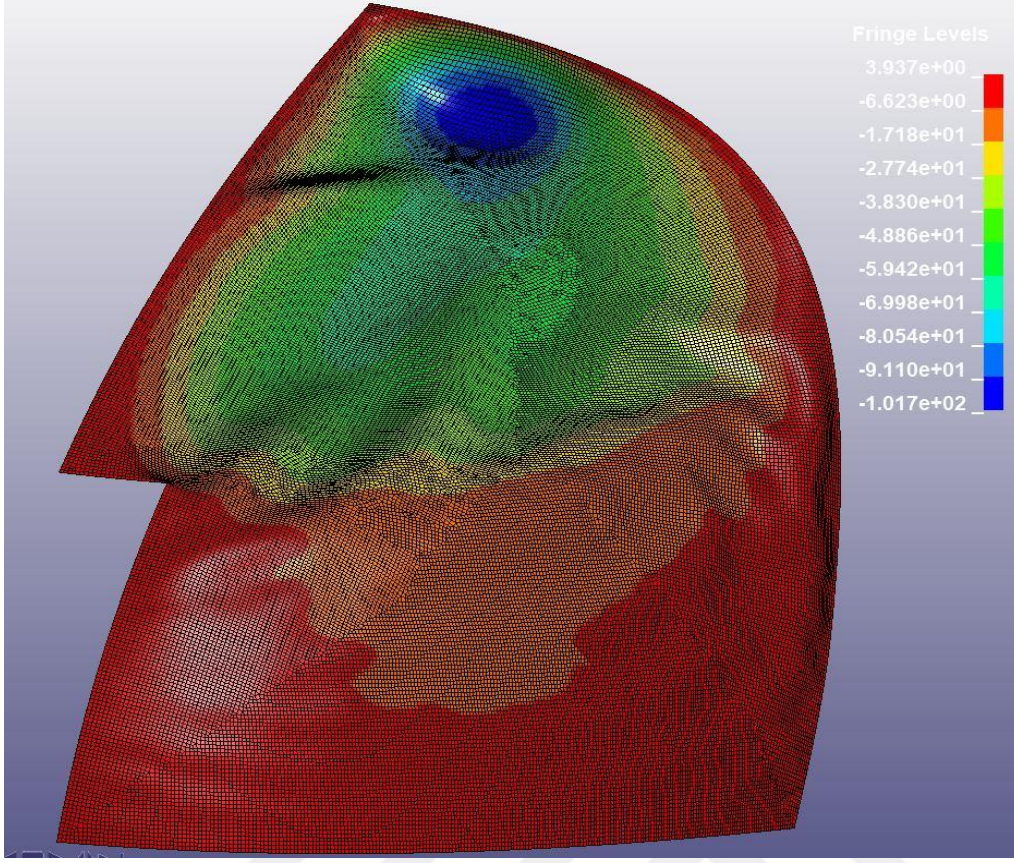


Şekil 6.13: $t=0$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin üst bölgesine çarpma – yandan görünüm.

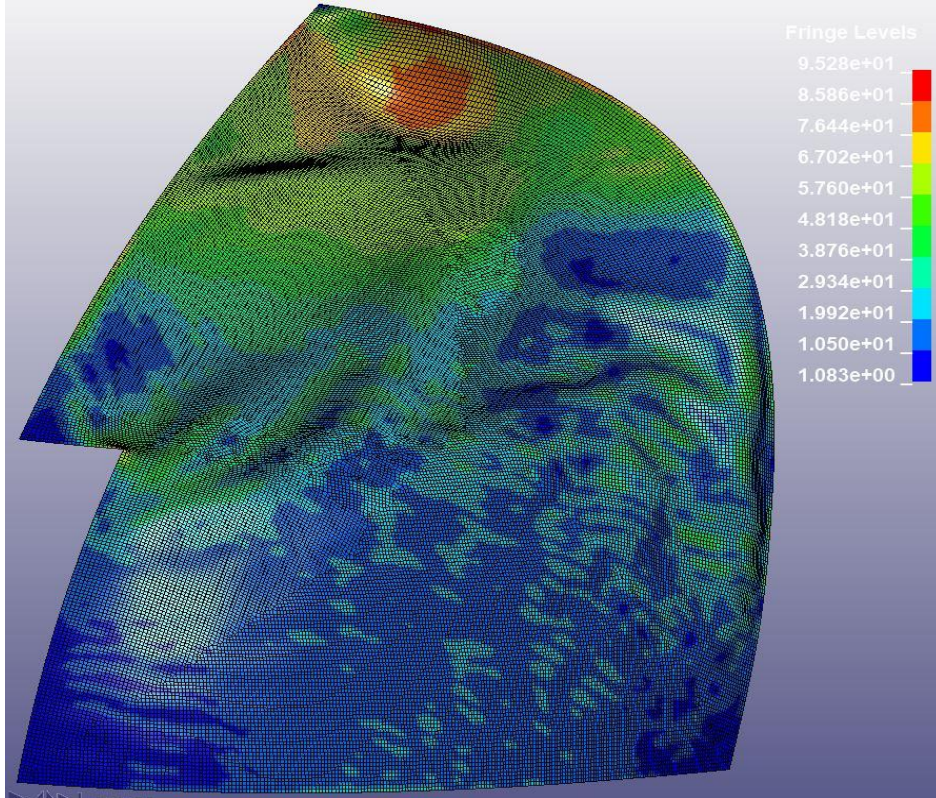
$t=5,5$ ms anındaki kuş modeli ve kanopinin görüntüsü Şekil 6.14’te gösterilmiştir. Yine $t=5,5$ ms anındaki deplasman değerleri Şekil 6.15’te verilmiş olup, von Mises gerilmeleri dağılımı Şekil 6.16’da gösterilmiştir.



Şekil 6.14: $t=5,5$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin üst bölgesine $V=100$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.



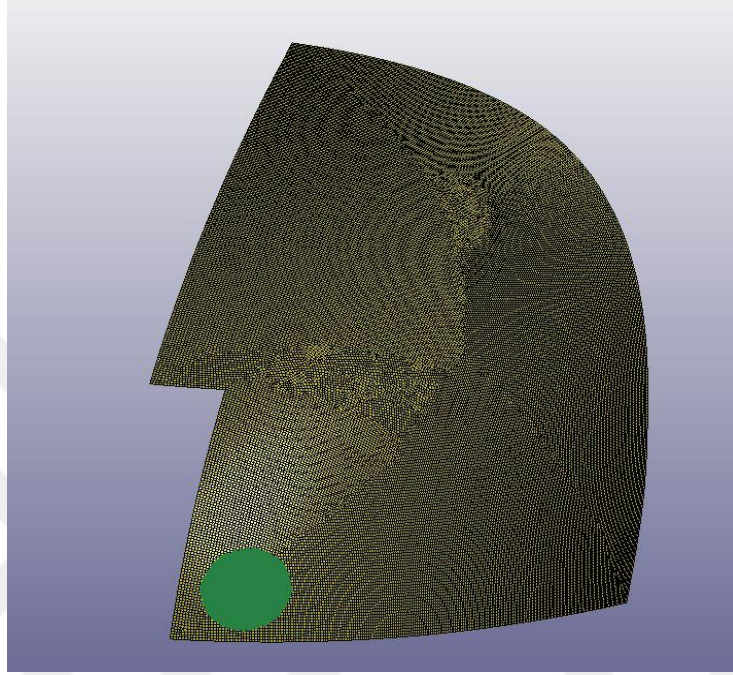
Şekil 6.15: $t=5,5$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).



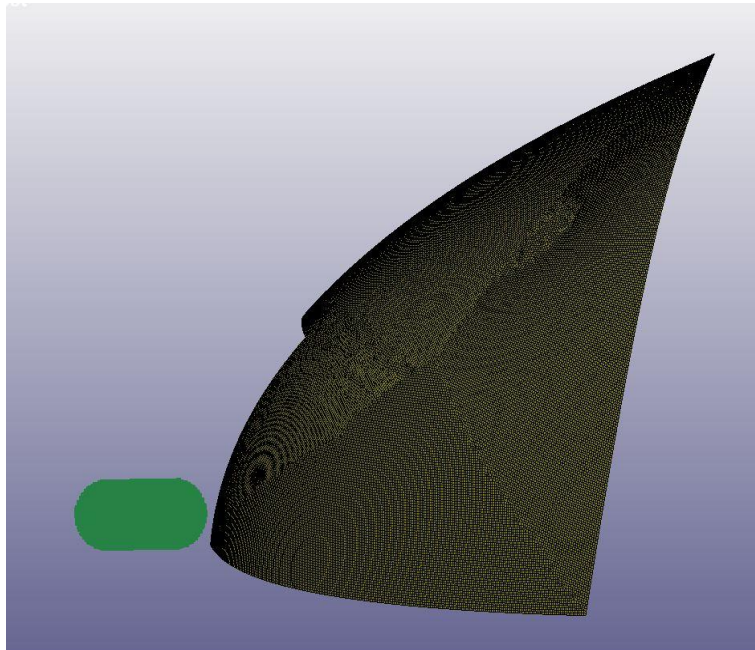
Şekil 6.16: $t=5,5$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).

6.1.2.3 Kanopinin köşesine çarpma

Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan SA341 Gazelle helikopterine ait kanopi geometrisinin köşesine 100 m/s hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. $t=0$ ms anındaki kuş modeli ve kanopi geometrisinin görüntüsü Şekil 6.17 ve 6.18’de verilmiştir.

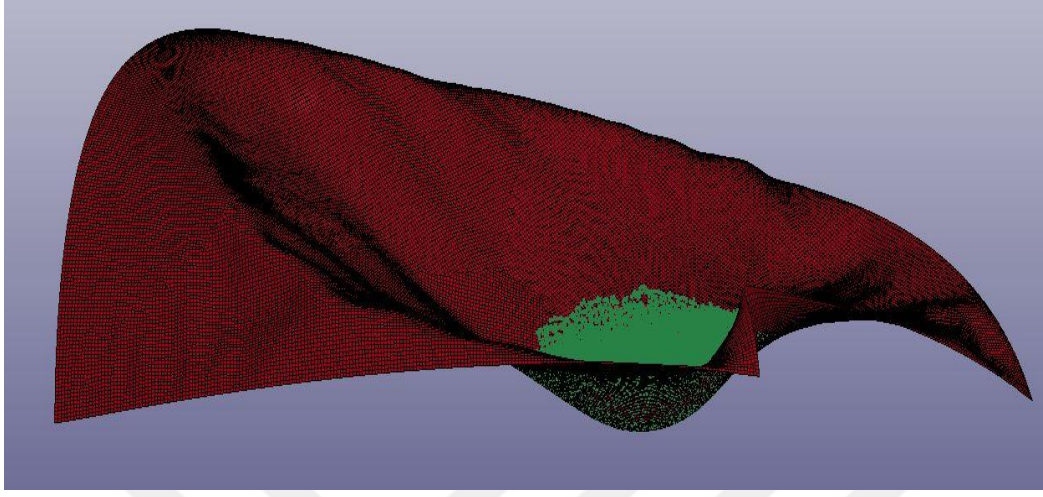


Şekil 6.17: $t=0$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin köşesine çarpma – üstten görünüm.

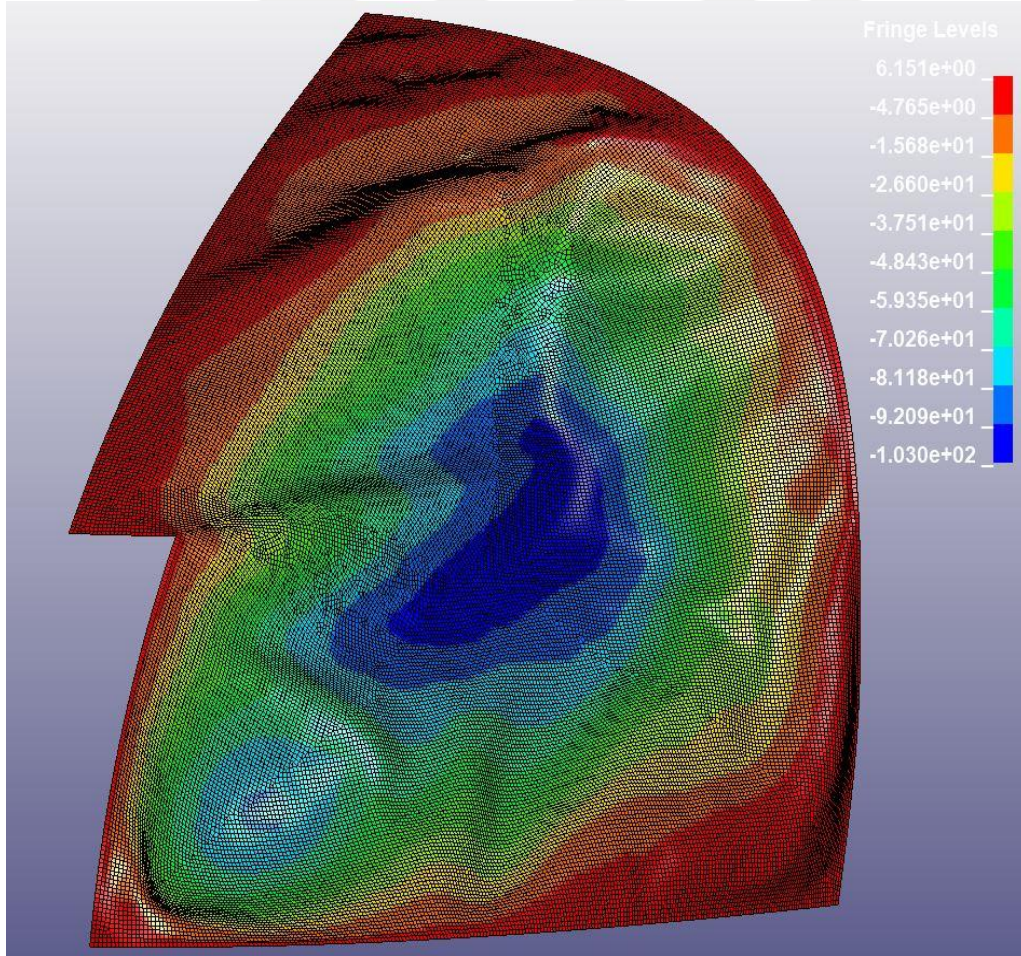


Şekil 6.18: $t=0$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin köşesine çarpma – yandan görünüm.

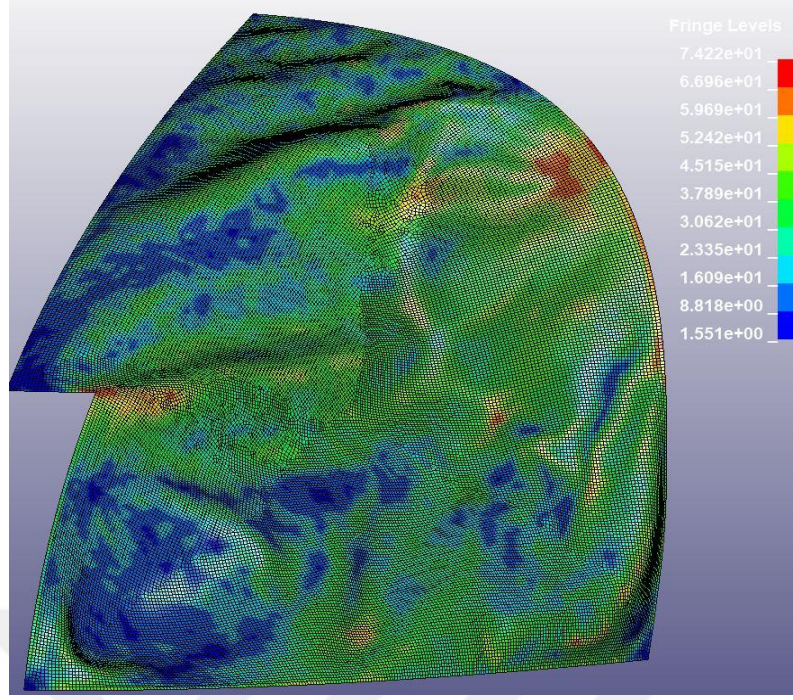
$t=7,5$ ms anındaki kuş modeli ve kanopinin görüntüsü Şekil 6.19’da gösterilmiştir. Yine $t=7,5$ ms anındaki deplasman değerleri Şekil 6.20’de verilmiş olup, von Mises gerilmeleri dağılımı Şekil 6.21’de gösterilmiştir.



Şekil 6.19: $t=7,5$ ms anında Gazelle SA341 helikopterine ait kanopinin köşesine $V=100$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.



Şekil 6.20: $t=7,5$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).



Şekil 6.21: $t=7,5$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).

6.1.2.4 Sayısal sonuçlar

Kanopinin orta bölgesine çarpma

Kanopinin orta bölgesine 100 m/s hızla yapılan çarpma analizinde; deplasman değerleri çarpmanın gerçekleştiği bölgede maksimum olmuş olup, çarpma bölgesinden ankastre bağlanmış olan kenarlara doğru gidildikçe bu değer azalmaktadır. Maksimum deplasman değeri; 135,3 mm'dir.

Yine aynı bölge için von Mises gerilmeleri dağılımına baktığımızda, bu değer, çarpmanın gerçekleştiği bölgenin üst taraflarına doğru artarak ve dalgalanarak gitmektedir. Ankastre yapılmış kenarlarda ise bu gerilmeler çoğunlukla çok düşüktür. Bu kenarların bazı noktalarında yüksek gerilmeler mevcuttur. Maksimum von Mises gerilmesi; 86,83 MPa'dır.

Kanopinin üst bölgesine çarpma

Kanopinin üst bölgesine 100 m/s hızla yapılan çarpma analizinde; deplasman değerleri çarpmanın gerçekleştiği bölgede maksimum olmuş olup, çarpma bölgesinden ankastre bağlanmış olan kenarlara doğru gidildikçe bu değer azalmaktadır. Maksimum deplasman değeri; 101,7 mm'dir.

Yine aynı bölge için von Mises gerilmeleri dağılımına baktığımızda, bu değer, çarpmanın gerçekleştiği bölgede maksimum olup, yan taraflarına doğru azalarak ve

dalgalanarak gitmektedir. Aşağı kısımlarda çok düşük gerilmeler mevcuttur. Ankastre yapılmış kenarlarda ise bu gerilmeler çoğunlukla çok düşüktür. Bu kenarların bazı noktalarında yüksek gerilmeler mevcuttur. Maksimum von Mises gerilmesi; 95,28 MPa'dır.

Kanopinin köşesine çarpma

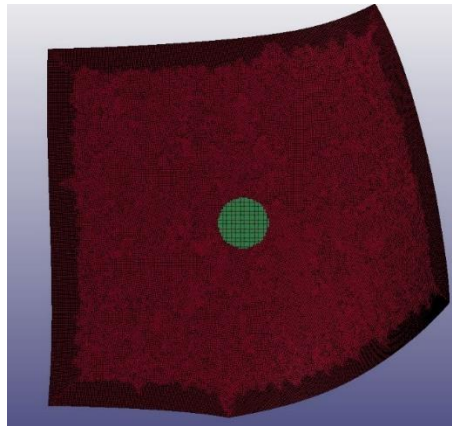
Kanopinin köşe bölgesine 100 m/s hızla yapılan çarpma analizinde; deplasman değerleri çarpmanın gerçekleştiği bölgenin üst tarafında maksimum olmuş olup, bu bölgeden ankastre bağlanmış olan kenarlara doğru gidildikçe bu değer azalmaktadır. Çarpma bölgesinde ise buralara nazaran daha yüksek deplasman değerleri mevcuttur. Maksimum deplasman değeri; 103 mm'dir.

Yine aynı bölge için von Mises gerilmeleri dağılımına baktığımızda, bu değer, çarpmanın gerçekleştiği bölgenin üst taraflarına doğru artarak ve dalgalanarak gitmektedir. Ankastre yapılmış kenarlarda ise bu gerilmeler çoğunlukla çok düşüktür. Bu kenarların bazı noktalarında yüksek gerilmeler mevcuttur. Maksimum von Mises gerilmesi; 74,22 MPa'dır.

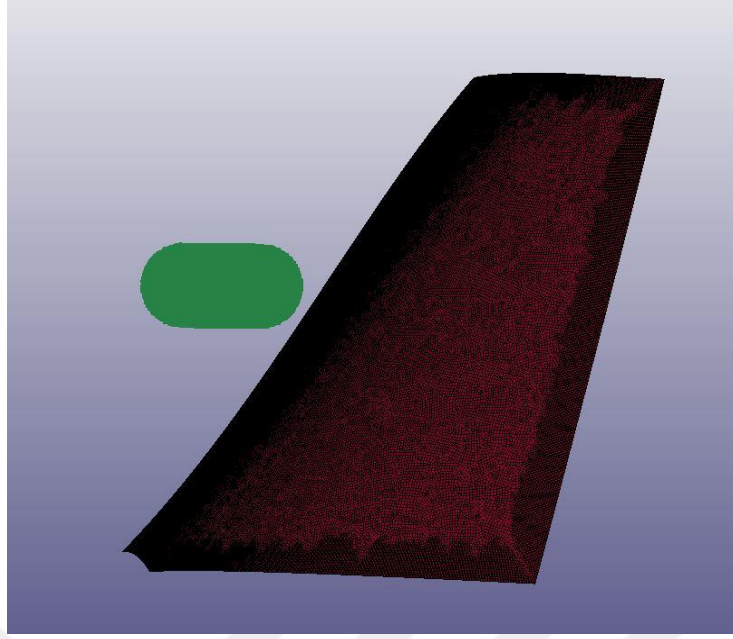
6.2 Dauphin AS365 Helikopteri

6.2.1 Kanopi geometrisinin ortasına üç farklı hız ile çarpma analizi

Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan AS365 Dauphin helikopterine ait kanopi geometrisinin ortasına 90 m/s, 100 m/s ve 110 m/s olmak üzere 3 farklı hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. Her üç hız için de $t=0$ ms anındaki kuş modeli ve kanopinin görüntüleri Şekil 6.22 ve Şekil 6.23'te verilmiştir.



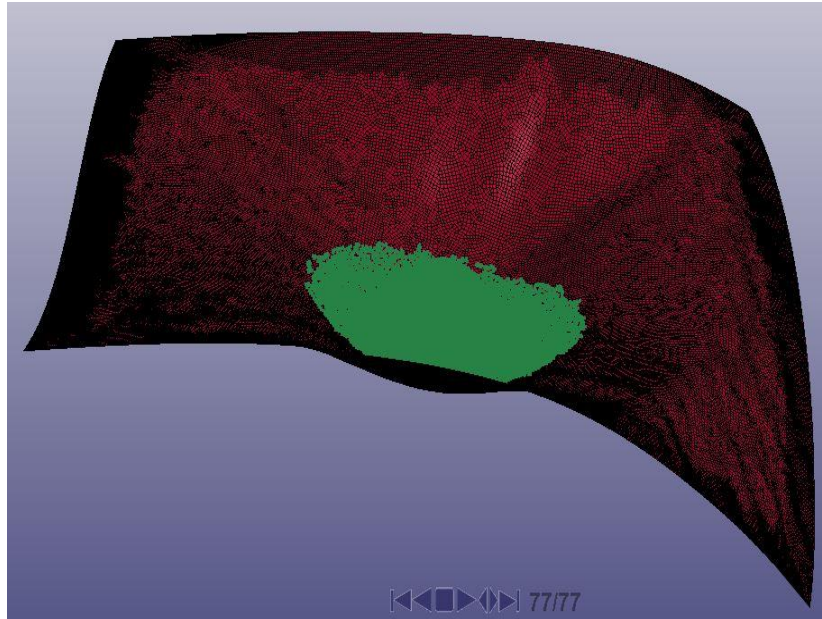
Şekil 6.22: $t=0$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin ortasına çarpma – üstten görünüm.



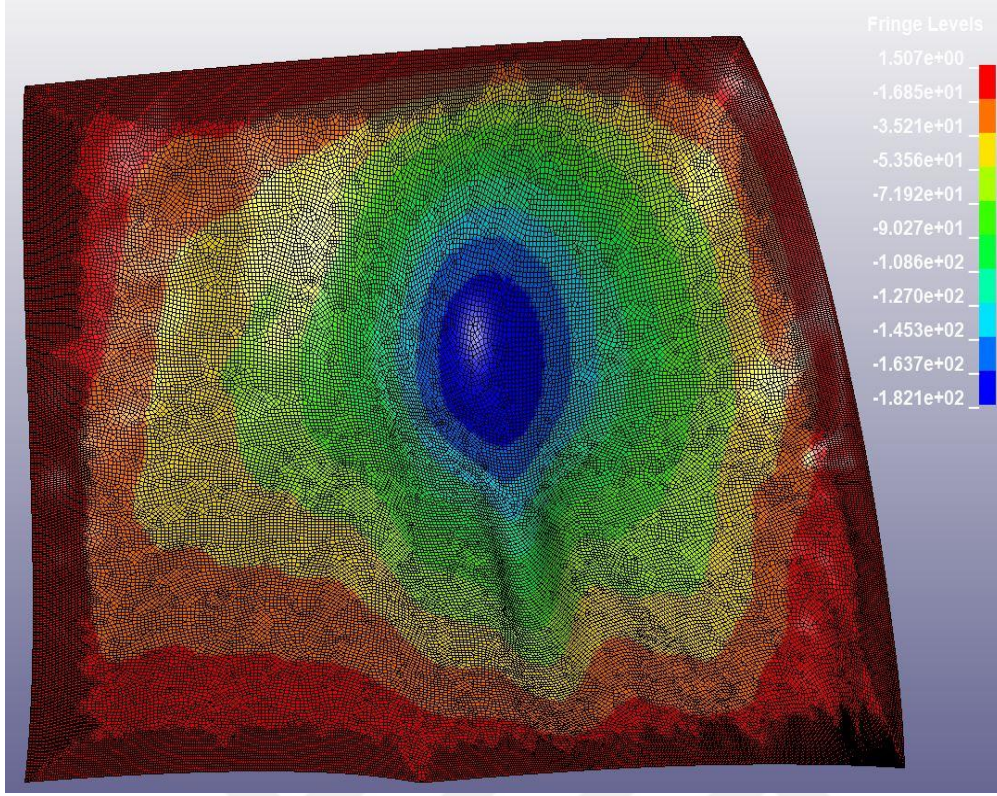
Şekil 6.23: $t=0$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin ortasına çarpma – yandan görünüm.

6.2.1.1 Kanopinin ortasına $V=90$ m/s hız ile çarpma analizi

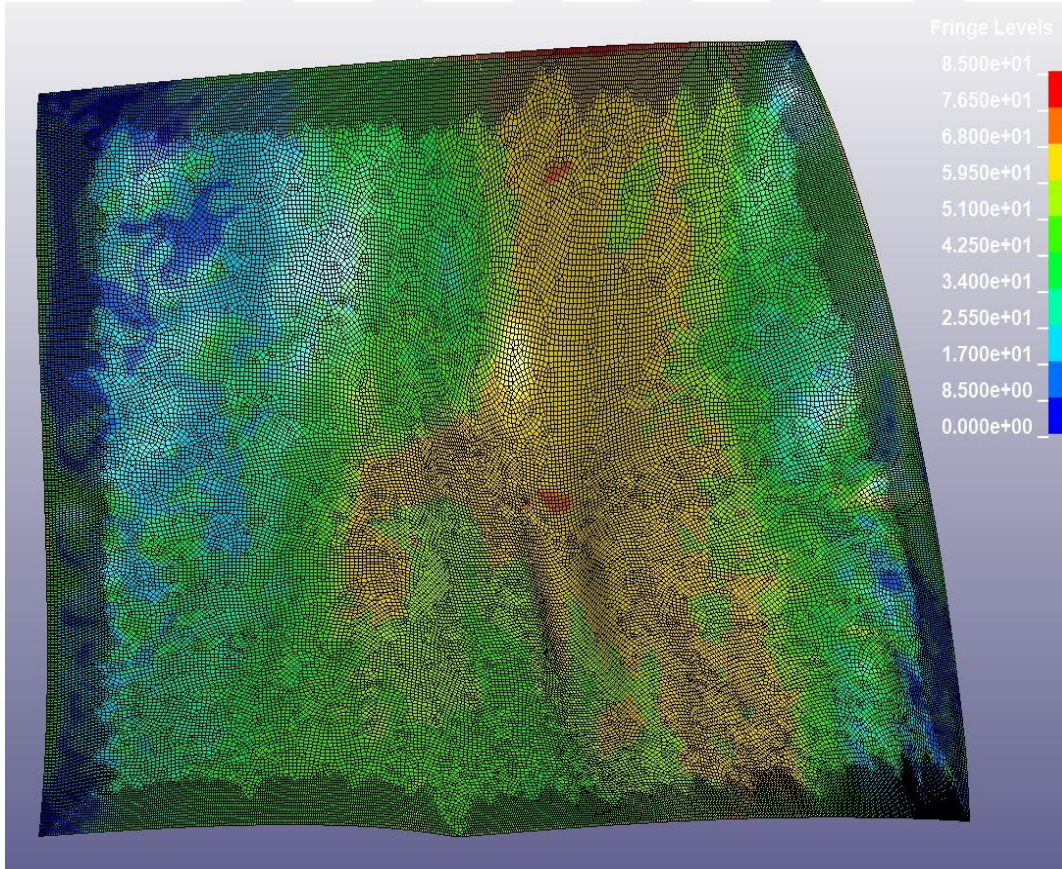
Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan AS365 Dauphin helikopterine ait kanopi geometrisinin ortasına 90 m/s hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. $t=6,7$ ms anındaki kuş modeli ve kanopinin görüntüsü Şekil 6.24'te verilmiştir. Yine $t=6,7$ ms anındaki deplasman değerleri Şekil 6.25'te verilmiş olup, von Mises gerilmeleri dağılımı Şekil 6.26'da gösterilmiştir.



Şekil 6.24: $t=6,7$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin ortasına $V=90$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.



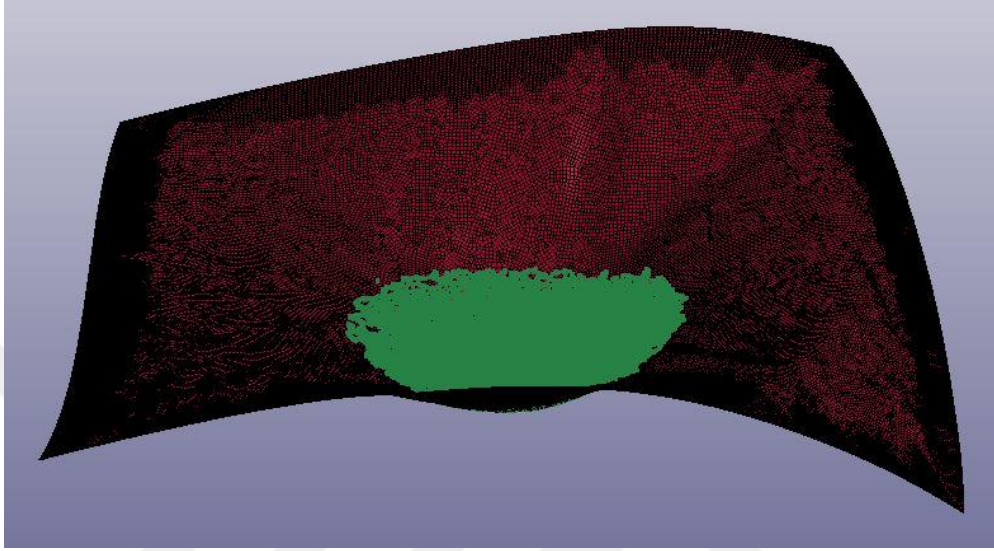
Şekil 6.25: $t=6,7$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).



Şekil 6.26: $t=6,7$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).

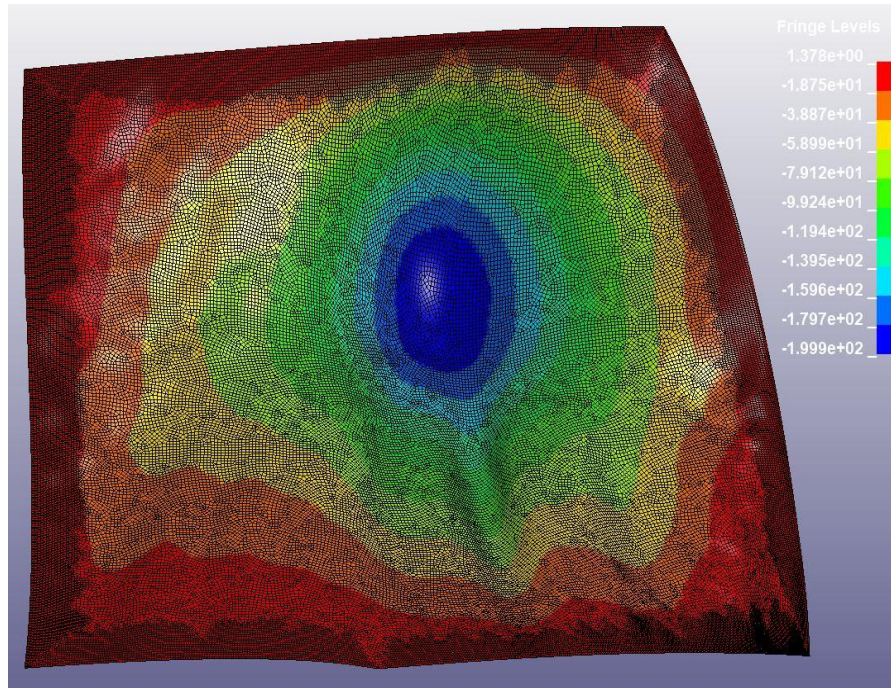
6.2.1.2 Kanopinin ortasına V=100 m/s hız ile çarpma analizi

Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan AS365 Dauphin helikopterine ait kanopi geometrisinin ortasına 100 m/s hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. $t=6,4$ ms anındaki kuş modeli ve kanopinin görüntüsü Şekil 6.27’de verilmiştir.

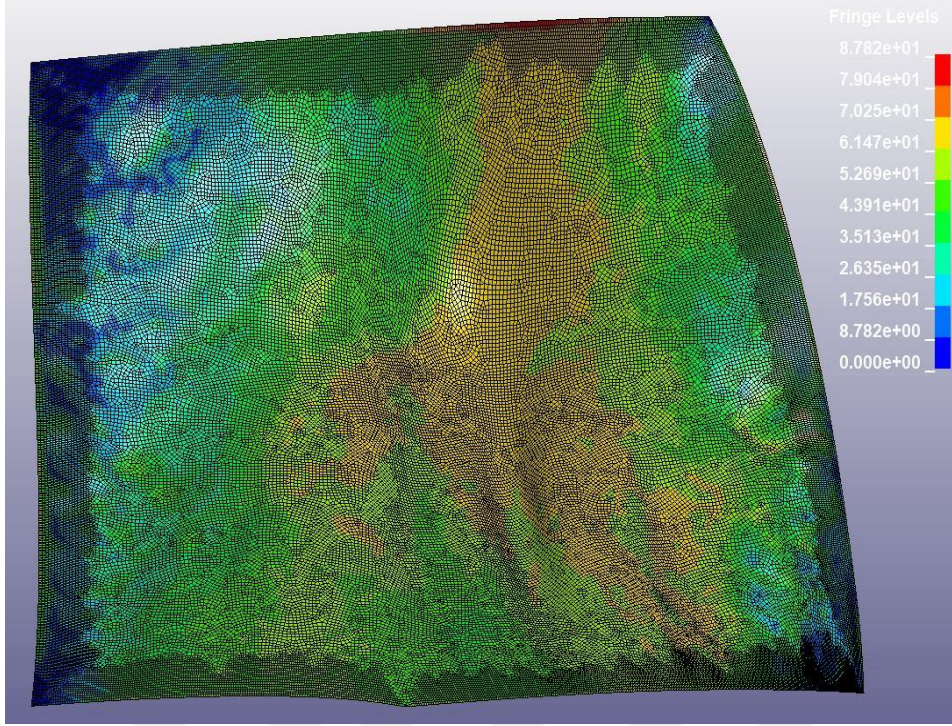


Şekil 6.27: $t=6,4$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin ortasına $V=100$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.

Yine $t=6,4$ ms anındaki deplasman değerleri Şekil 6.28’de verilmiş olup, von Mises gerilmeleri dağılımı Şekil 6.29’da gösterilmiştir.



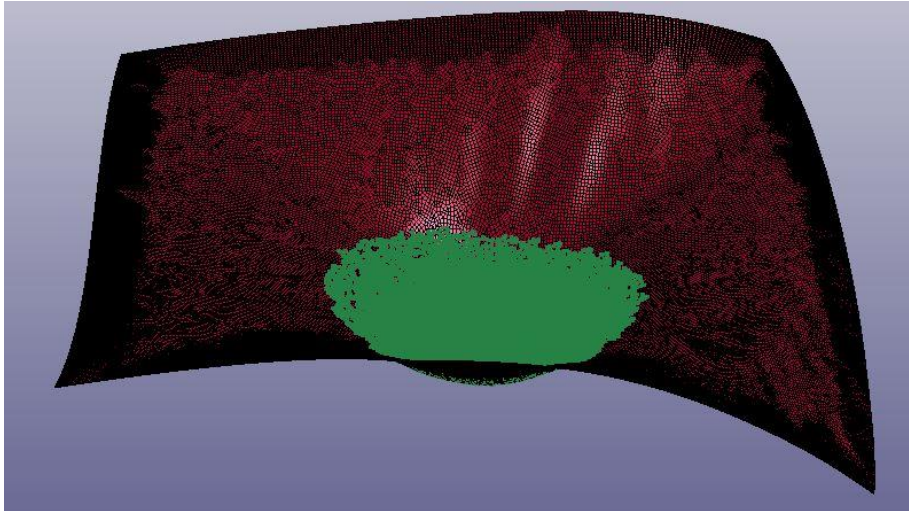
Şekil 6.28: $t=6,4$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).



Şekil 6.29: $t=6,4$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).

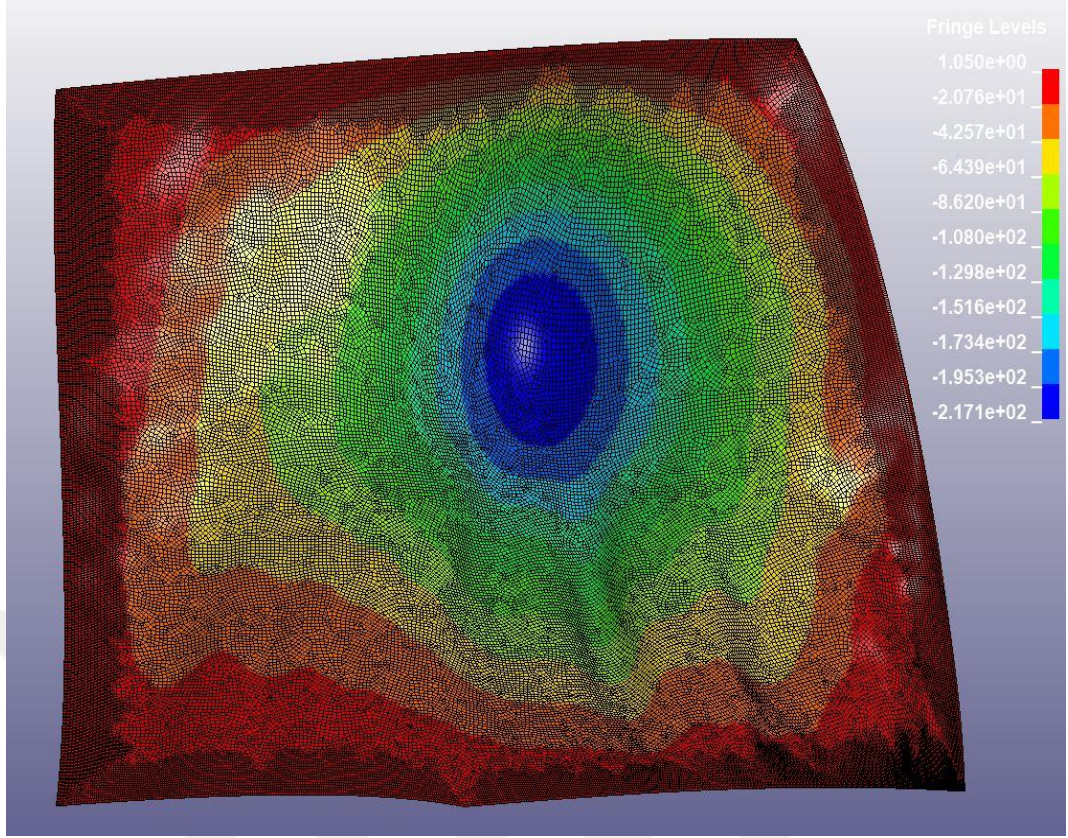
6.2.1.3 Kanopinin ortasına $V=110$ m/s hız ile çarpma analizi

Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan AS365 Dauphin helikopterine ait kanopi geometrisinin ortasına 110 m/s hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. $t=6$ ms anındaki kuş modeli ve kanopinin görüntüsü Şekil 6.30’da verilmiştir.

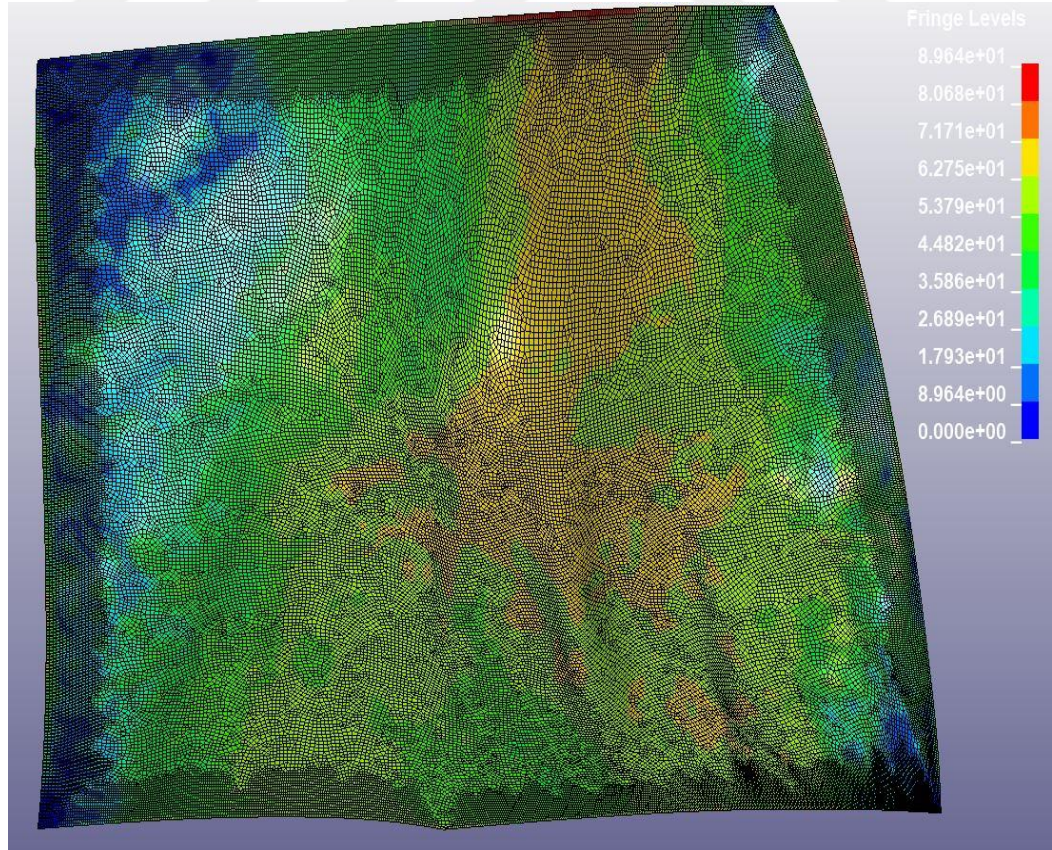


Şekil 6.30: $t=6$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin ortasına $V=110$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.

Yine $t=6$ ms anındaki deplasman değerleri Şekil 6.31’de verilmiş olup, von Mises gerilmeleri dağılımı Şekil 6.32’de gösterilmiştir.



Şekil 6.31: $t=6$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).



Şekil 6.32: $t=6$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).

6.2.1.4 Sayısal Sonuçlar

Kanopinin orta bölgesine yapılan çarpma analizlerinde; deplasman değerleri çarpmanın gerçekleştiği bölgede maksimum olmuş olup, çarpma bölgesinden ankastre bağlanmış olan kenarlara doğru gidildikçe bu değer azalmaktadır. Maksimum deplasman değeri; 90 m/s hız için 182,1 mm, 100 m/s hız için 199,9 mm, 110 m/s hız için 217,1 mm'dir.

Yine aynı bölge için von Mises gerilmeleri dağılımına baktığımızda, bu değer, çarpmanın gerçekleştiği bölgenin üst taraflarına doğru artarak ve dalgalanarak gitmektedir.

Ankastre yapılmış kenarlarda ise bu gerilmeler çoğunlukla çok düşüktür. Bu kenarların bazı noktalarında yüksek gerilmeler mevcuttur. Maksimum von Mises gerilmesi; 90 m/s hız için 85 MPa, 100 m/s hız için 87,82, 110 m/s hız için 89,64 MPa 'dır.

6.2.2 Kanopinin çeşitli bölgelerine 100 m/s hızla çarpma analizleri

Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan AS365 Dauphin helikopterine ait kanopi geometrisinde seçilen 3 farklı bölgeye 100 m/s hızla kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir.

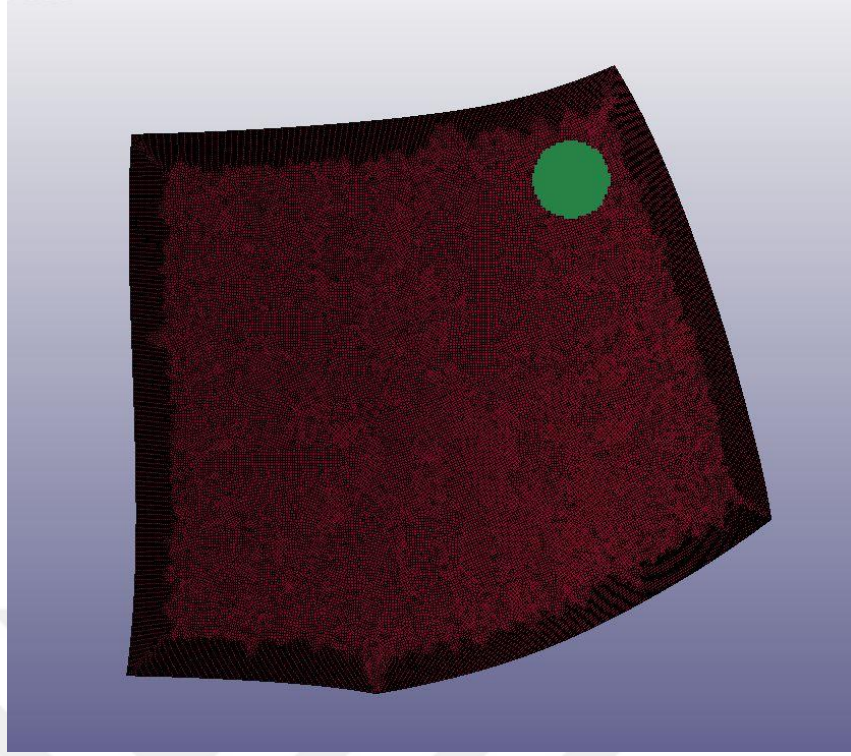
6.2.2.1 Kanopinin ortasına çarpma

Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan AS365 Dauphin helikopterine ait kanopi geometrisinin orta bölgesine 100 m/s hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile ilgili sonuçlar 6.2.1.2'de de incelenmiş olup, burada verilmiştir.

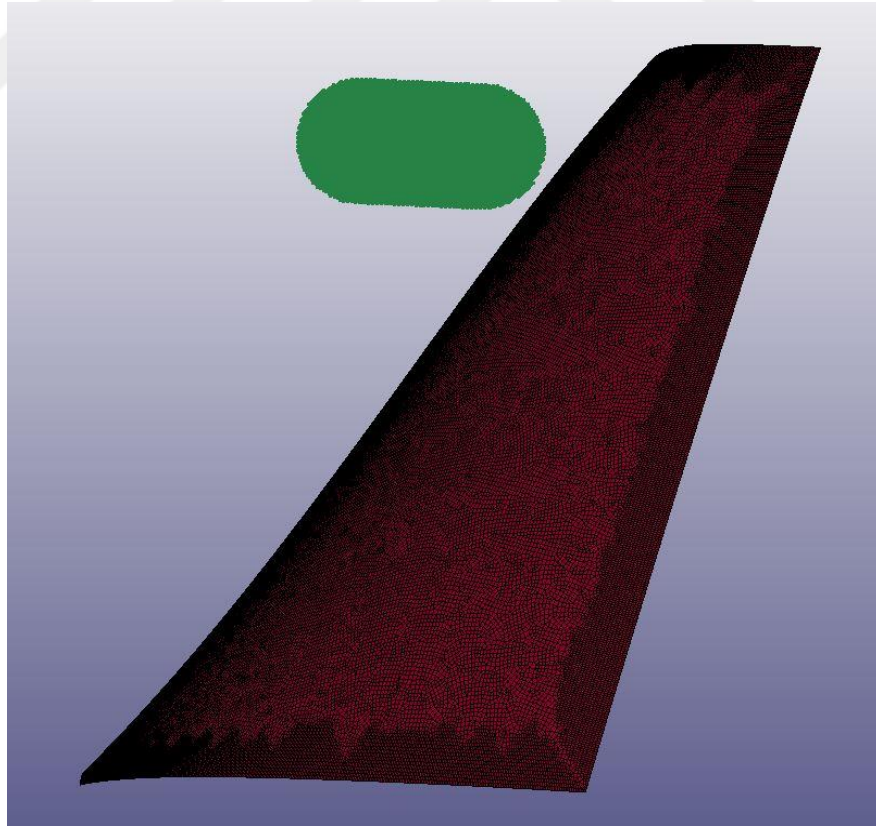
6.2.2.2 Kanopinin üst bölgesine çarpma

Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan AS365 Dauphin helikopterine ait kanopi geometrisinin üst bölgesine 100 m/s hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir.

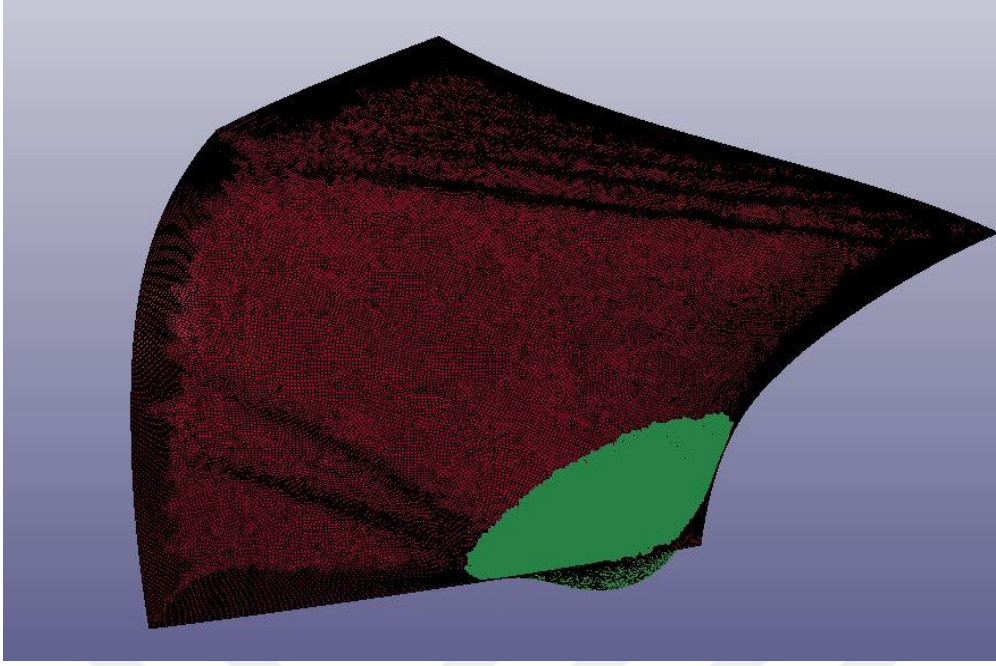
$t=0$ ms anındaki kuş modeli ve kanopi geometrisinin görüntüsü Şekil 6.33 ve 6.34'te verilmiştir. $t=4,5$ ms anındaki kuş modeli ve kanopinin görüntüsü Şekil 6.35'te gösterilmiştir.



Şekil 6.33: $t=0$ ms anında Dauphin AS365 helikopterinin ait kanopinin üst bölgesine çarpma – üstten görünüm.

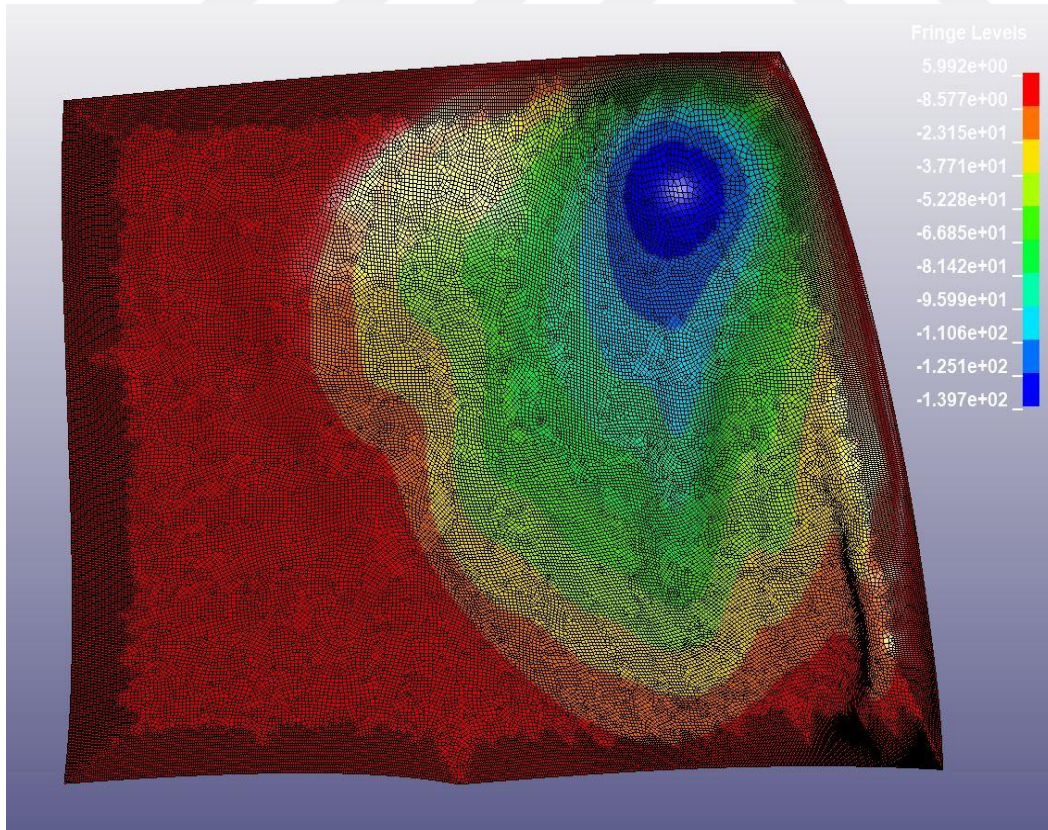


Şekil 6.34: $t=0$ ms anında Dauphin AS365 helikopterinin ait kanopinin üst bölgesine çarpma – yandan görünüm.

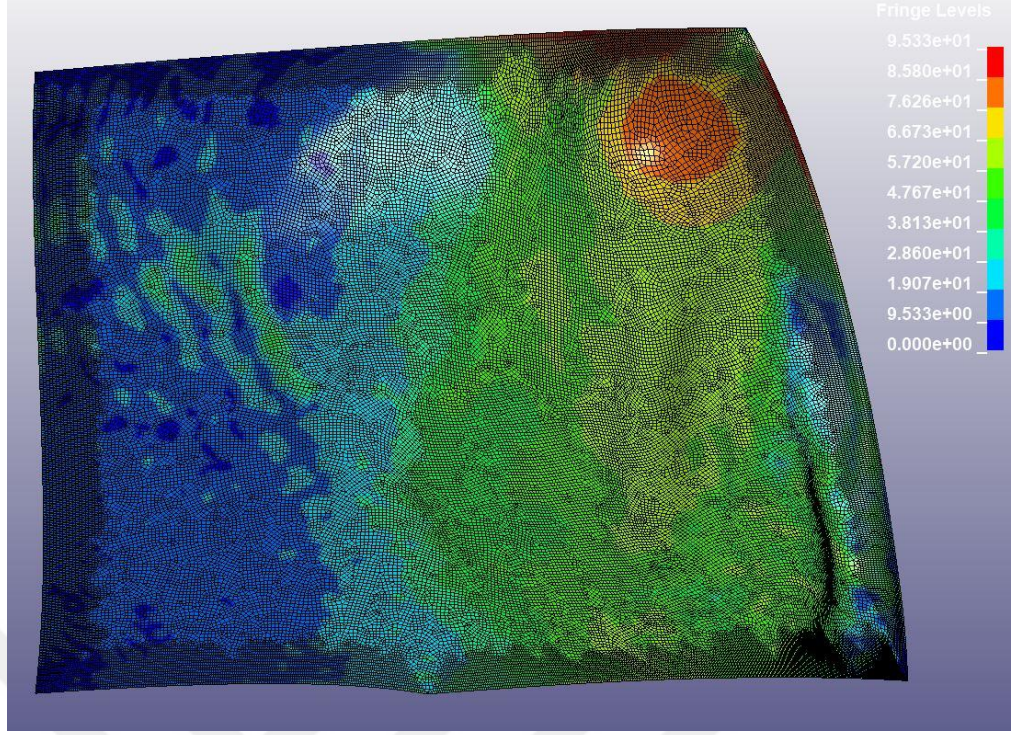


Şekil 6.35: $t=4,5$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin üst bölgesine $V=100$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.

Yine $t=4,5$ ms anındaki deplasman değerleri Şekil 6.36’da verilmiş olup, von Mises gerilmeleri dağılımı Şekil 6.37’de gösterilmiştir.



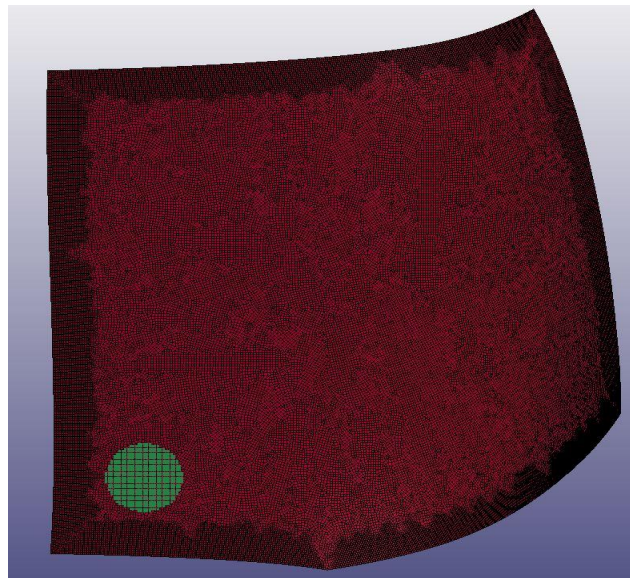
Şekil 6.36: $t=4,5$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).



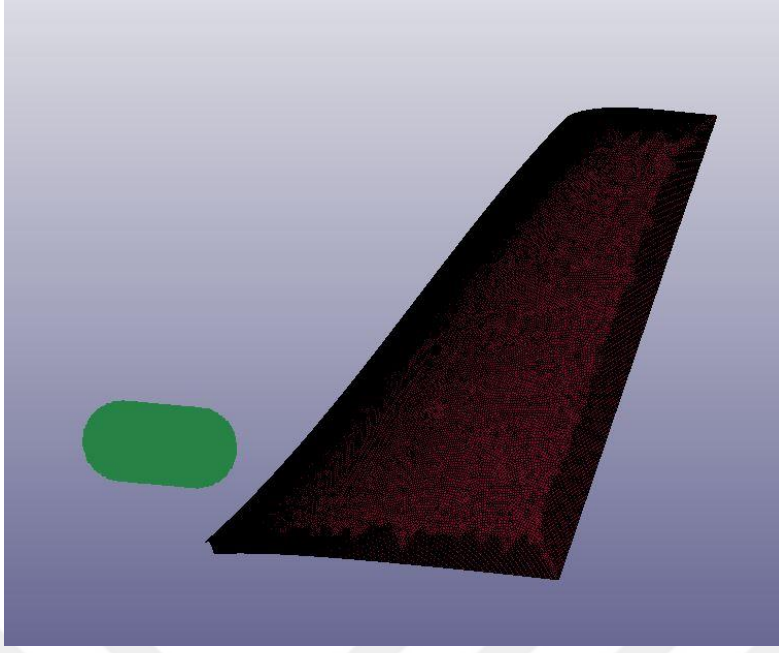
Şekil 6.37: $t=4,5$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).

6.2.2.3 Kanopinin köşesine çarpma

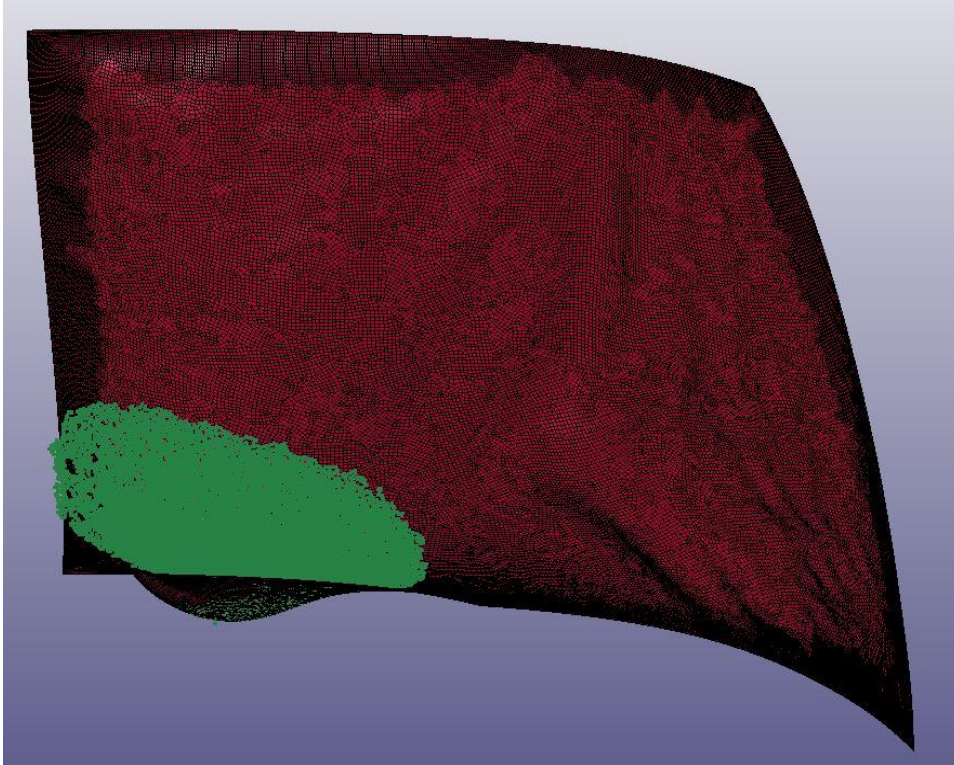
Kabuk olarak modellenen ve kenarları ankastre bağlı olan AS365 Dauphin helikopterine ait kanopi geometrisinin köşesine 100 m/s hızda kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir. $t=0$ ms anındaki kuş modeli ve kanopi geometrisinin görüntüsü Şekil 6.38 ve 6.39’da verilmiştir. $t=5$ ms anındaki kuş modeli ve kanopinin görüntüsü Şekil 6.40’ta gösterilmiştir.



Şekil 6.38: $t=0$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin köşesine çarpma – üstten görünüm.

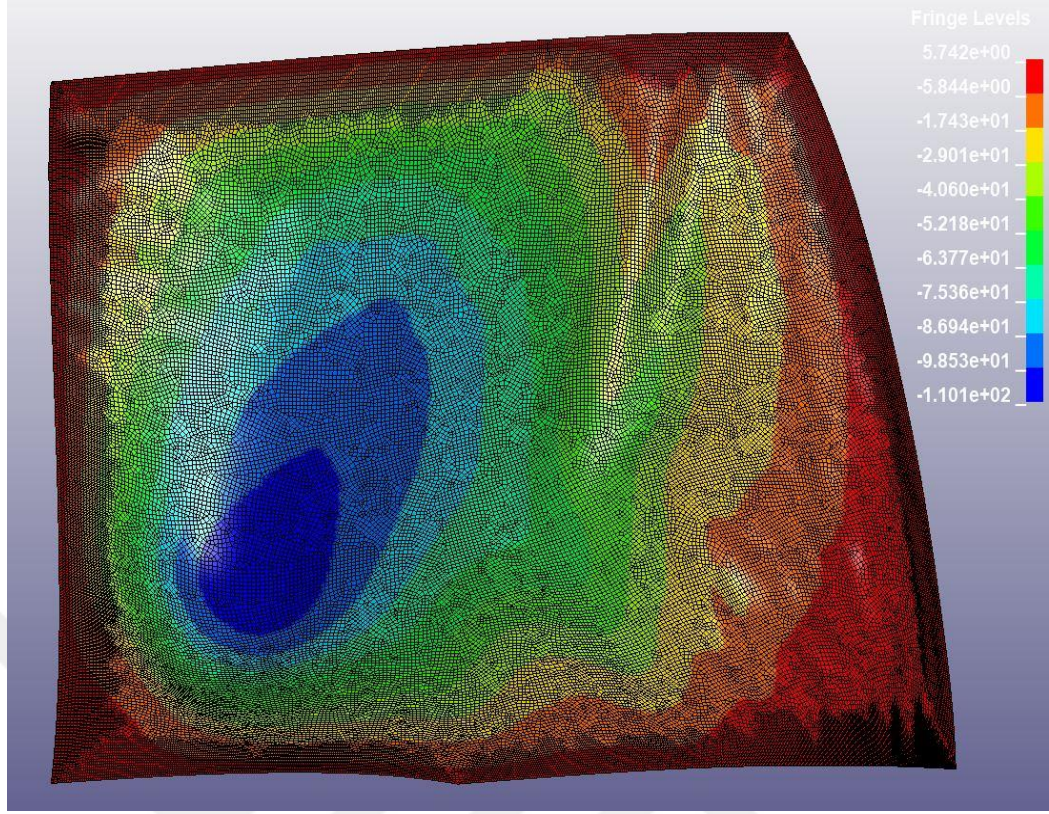


Şekil 6.39: $t=0$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin köşesine çarpma – yandan görünüm.

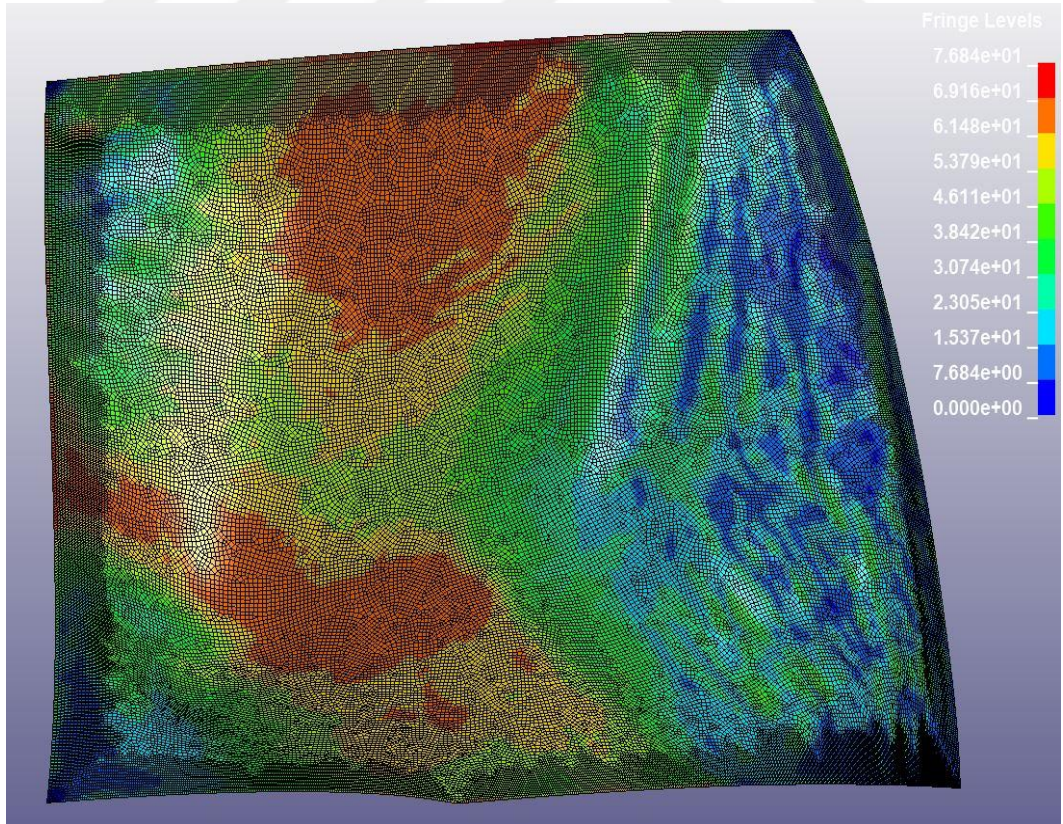


Şekil 6.40: $t=5$ ms anında Dauphin AS365 helikopterine ait kanopinin köşesine $V=100$ m/s hızla çarpmanın gösterimi.

Yine $t=5$ ms anındaki deplasman değerleri Şekil 6.41’de verilmiş olup, von Mises gerilmeleri dağılımı Şekil 6.42’de gösterilmiştir.



Şekil 6.41: $t=5$ ms anındaki deplasman değerleri (mm).



Şekil 6.42: $t=5$ ms anındaki von Mises gerilme değerleri (MPa).

6.2.2.4 Sayısal sonuçlar

Kanopinin orta bölgesine çarpma

Kanopinin orta bölgesine 100 m/s hızla yapılan çarpma analizinde; deplasman değerleri çarpmanın gerçekleştiği bölgede maksimum olmuş olup, çarpma bölgesinden ankastre bağlanmış olan kenarlara doğru gidildikçe bu değer azalmaktadır. Maksimum deplasman değeri; 199,9 mm'dir.

Yine aynı bölge için von Mises gerilmeleri dağılımına baktığımızda, bu değer, çarpmanın gerçekleştiği bölgenin üst taraflarına doğru artarak ve dalgalanarak gitmektedir. Ankastre yapılmış kenarlarda ise bu gerilmeler çoğunlukla çok düşüktür. Bu kenarların bazı noktalarında yüksek gerilmeler mevcuttur. Maksimum von Mises gerilmesi; 87,82 MPa'dır.

Kanopinin üst bölgesine çarpma

Kanopinin üst bölgesine 100 m/s hızla yapılan çarpma analizinde; deplasman değerleri çarpmanın gerçekleştiği bölgede maksimum olmuş olup, çarpma bölgesinden ankastre bağlanmış olan alt kenara ve yanlara doğru gidildikçe bu değer azalmaktadır. Maksimum deplasman değeri; 139,7 mm'dir.

Yine aynı bölge için von Mises gerilmeleri dağılımına baktığımızda, bu değer, çarpmanın gerçekleştiği bölgede fazlasıyla yoğunlaşmış olup, çarpmaya uzak olan kısımlara doğru azalarak ve dalgalanarak gitmektedir. Ankastre yapılmış kenarlarda ise bu gerilmeler çoğunlukla çok düşüktür. Bu kenarların bazı noktalarında yüksek gerilmeler mevcuttur. Maksimum von Mises gerilmesi; 95,33 MPa'dır.

Kanopinin köşesine çarpma

Kanopinin köşesine 100 m/s hızla yapılan çarpma analizinde; deplasman değerleri çarpmanın gerçekleştiği bölgede maksimum olmuş olup, çarpma bölgesinden ankastre bağlanmış olan üst kenara ve yanlara doğru gidildikçe bu değer azalmaktadır. Maksimum deplasman değeri; 144,3 mm'dir.

Yine aynı bölge için von Mises gerilmeleri dağılımına baktığımızda, bu değer, çarpmanın gerçekleştiği bölgede fazlasıyla yoğunlaşmış olup, çarpmaya uzak olan kısımlara doğru azalarak ve dalgalanarak gitmektedir. Ankastre yapılmış kenarlarda ise bu gerilmeler çoğunlukla çok düşüktür. Bu kenarların bazı noktalarında yüksek gerilmeler mevcuttur. Maksimum von Mises gerilmesi; 74,78 MPa'dır.

6.3 Deplasman ve von Mises Gerilmeleri Sonuçlarının Gösterimi

Bölüm 6.1.1.4., 6.1.2.4., 6.2.1.4. ve 6.2.2.4.’te incelenen analiz sonuçlarının sayısal verilerine göre Çizelge 6.1 elde edilmiştir. Deplasman değerleri ve von Mises gerilmeleri için sonuçların karşılaştırılması bu çizelge yardımı ile yapılabilmektedir ve ve maksimum değerler görülebilmektedir.

Çizelge 6.1: Analiz sonuçlarından elde edilen maksimum değerler.

Bölge	Hız	Değer	Sonuç	
			Gazelle SA341	Gazelle SA341
Orta	90 m/s	Maksimum Deplasman (mm)	125,5	182,1
Orta	100 m/s	Maksimum Deplasman (mm)	135,3	199,9
Orta	110 m/s	Maksimum Deplasman (mm)	147,1	217,1
Köşe	100 m/s	Maksimum Deplasman (mm)	103,0	110,1
Üst	100 m/s	Maksimum Deplasman (mm)	101,7	139,7
Maksimum von Mises Gerilmesi(MPa)				
Orta	90 m/s	Maksimum von Mises Gerilmesi(MPa)	86,45	85,0
Maksimum von Mises Gerilmesi(MPa)				
Orta	100 m/s	Maksimum von Mises Gerilmesi(MPa)	86,83	87,82
Maksimum von Mises Gerilmesi(MPa)				
Orta	110 m/s	Maksimum von Mises Gerilmesi(MPa)	87,75	89,64
Maksimum von Mises Gerilmesi(MPa)				
Köşe	100 m/s	Maksimum von Mises Gerilmesi(MPa)	74,22	76,84
Maksimum von Mises Gerilmesi(MPa)				
Üst	100 m/s	Maksimum von Mises Gerilmesi(MPa)	95,28	95,33

6.4 Enerji Grafiklerinin Karşılaştırılması

6.4.1 Gazelle SA341 helikopter kanopisi

Gazelle SA341 helikopteri kanopisine yapılan çarpma analizleri sonucunda; kuş geometrisi üzerindeki enerji değişimleri Şekil 6.43 ve Şekil 6.44’te verilmiştir. Kanopi geometrisi üzerindeki enerji değişimleri ise Şekil 6.45 ve Şekil 6.46’da verilmiştir. Bu grafikler yardımıyla enerjilerin birbiriyle olan ilişkileri gözlenebilmektedir.

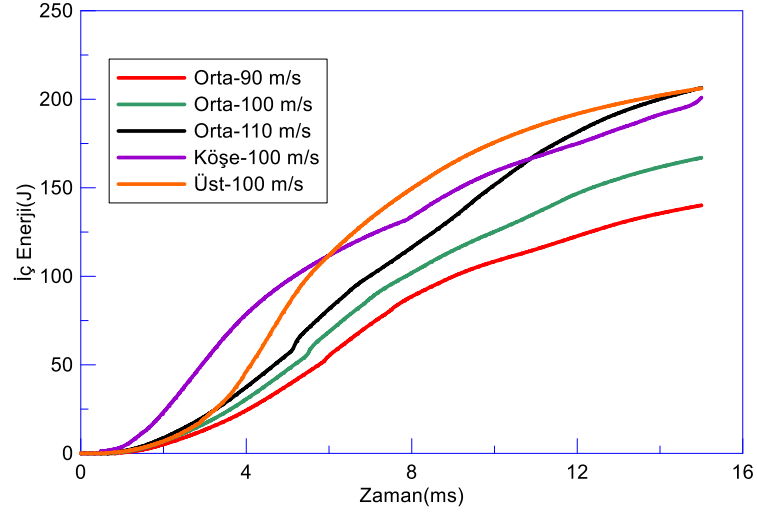
Kanopinin ortasına yapılan çarpma analizinin sonucunda; her üç hız için de, kuş modelinin çarpma anından itibaren zamanla kinetik enerjisinin hızla azaldığı ve belirli bir zamandan sonra önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. , Kanopi yapısının ise çarpma öncesi sıfır olan kinetik enerjisinin çarpma ile birlikte hızla arttığı, zirve yaptıktan sonra tekrar dalgalanarak aşağıya doğru hızla azalmaya başladıktan bir süre

sonra artık enerjide önemli bir değişim olmadığı görülmüştür. Kuşun ilk başta sahip olduğu kinetik enerjinin çoğunu kanopi, iç enerji olarak almakta ve kuşun kinetik enerji kaybettiği grafiğin tersi olarak kanopi yapısında iç enerji artışı görülmektedir. Kuşun iç enerjisi ise, diğer enerjilere nazaran daha az miktarda da olsa çarpma boyunca artış eğilimindedir.

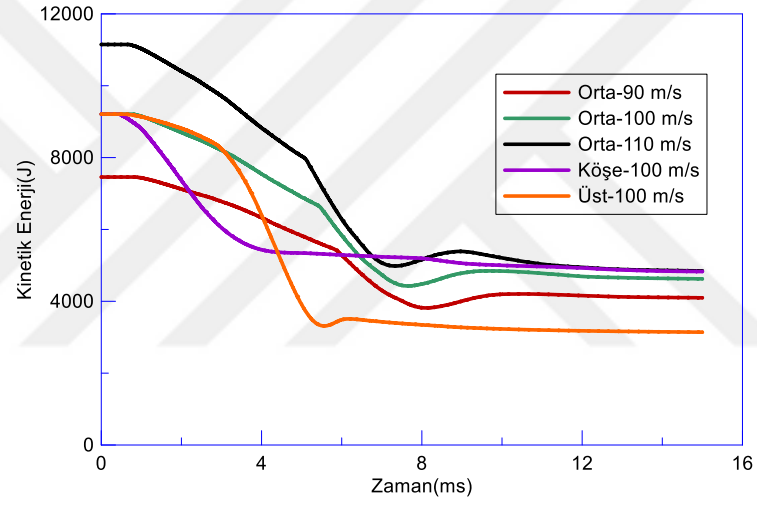
Kanopinin üst bölgesine yapılan çarpma analizinin sonucunda; kuş geometrisinin çarpma anından itibaren zamanla kinetik enerjisinin azaldığı ve dip yaptıktan sonra bir süre sonra yaklaşık sabit kaldığı, kanopi geometrisinin ise çarpma öncesi sıfır olan kinetik enerjisinin çarpma ile birlikte arttığı, ilk zirvesini yaptıktan sonra daha yüksek bir ikinci zirve yapıp tekrar dalgalanarak aşağıya doğru azalmaya başladıktan bir süre sonra yaklaşık sabit kaldığı görülmektedir. Kuşun ilk başta sahip olduğu kinetik enerjinin çoğunu ise; kanopi, iç enerji olarak alır ve kuşun kinetik enerji kaybettiği grafiğin tersi olarak kanopi üzerinde iç enerji artışı gözlenir. Kuşun iç enerjisi ise, diğer enerjilere nazaran daha az miktarda da olsa çarpma boyunca artış eğilimindedir.

Kanopinin köşe bölgesine yapılan çarpma analizinin sonucunda; kuş geometrisinin çarpma anından itibaren zamanla kinetik enerjisinin azaldığı ve dip yaptıktan sonra bir süre sonra yaklaşık sabit kaldığı, kanopi geometrisinin ise çarpma öncesi sıfır olan kinetik enerjisinin çarpma ile birlikte arttığı, zirve yaptıktan sonra yaklaşık sabit kalmasının ardından aşağıya doğru azalmaya başladığı ve bir süre sonra tekrar yaklaşık sabit kaldığı görülmektedir. Kuşun ilk başta sahip olduğu kinetik enerjinin çoğunu ise; kanopi, iç enerji olarak alır ve kuşun kinetik enerji kaybettiği grafiğin tersi olarak kanopi üzerinde iç enerji artışı gözlenir. Kuşun iç enerjisi ise, diğer enerjilere nazaran daha az miktarda da olsa çarpma boyunca artış eğilimindedir.

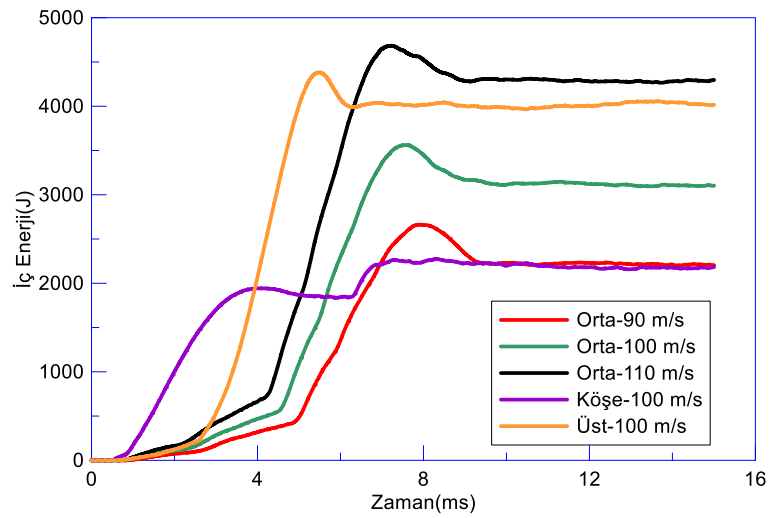
Kanopinin köşe bölgesine yapılan çarpma analizinin sonucunda; kuş geometrisinin çarpma anından itibaren zamanla kinetik enerjisinin azaldığı ve dip yaptıktan sonra bir süre sonra yaklaşık sabit kaldığı, kanopi geometrisinin ise çarpma öncesi sıfır olan kinetik enerjisinin çarpma ile birlikte arttığı, zirve yaptıktan sonra tekrar dalgalanarak aşağıya doğru azalmaya başladıktan bir süre sonra yaklaşık sabit kaldığı görülmektedir. Kuşun ilk başta sahip olduğu kinetik enerjinin çoğunu ise; kanopi, iç enerji olarak alır ve kuşun kinetik enerji kaybettiği grafiğin tersi olarak kanopi üzerinde iç enerji artışı gözlenir. Kuşun iç enerjisi ise, diğer enerjilere nazaran daha az miktarda da olsa çarpma boyunca artış eğilimindedir.



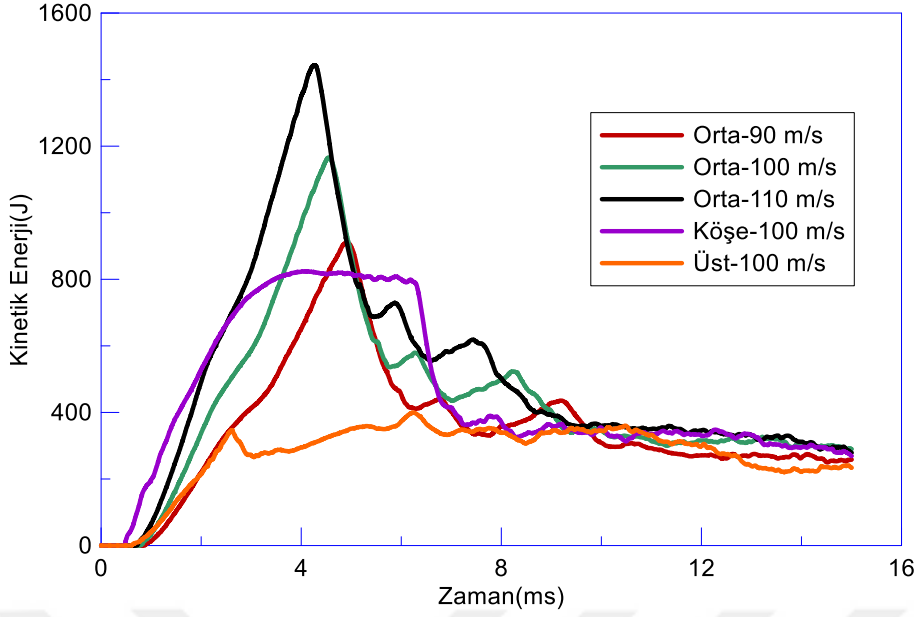
Şekil 6.43: Gazelle SA341 - Kuş geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı iç enerji değişimi.



Şekil 6.44: Gazelle SA341 - Kuş geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı kinetik enerji değişimi.



Şekil 6.45: Gazelle SA341 - Kanopi geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı iç enerji değişimi.



Şekil 6.46: Gazelle SA341 - Kanopi geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı kinetik enerji değişimi.

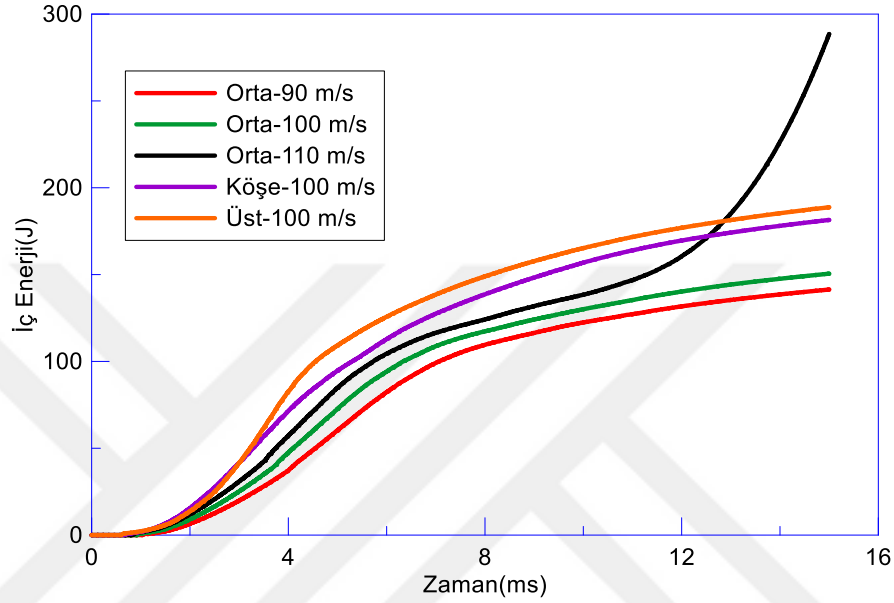
6.4.2 Dauphin AS365 helikopter kanopisi

Dauphin AS365 helikopteri kanopisine yapılan çarpma analizleri sonucunda; kuş geometrisi üzerindeki enerji değişimleri Şekil 6.47 ve Şekil 6.48'de verilmiştir. Kanopi geometrisi üzerindeki enerji değişimleri ise Şekil 6.49 ve Şekil 6.50'de verilmiştir. Bu grafikler yardımıyla enerjilerin birbiriyle olan ilişkileri gözlemlenmektedir.

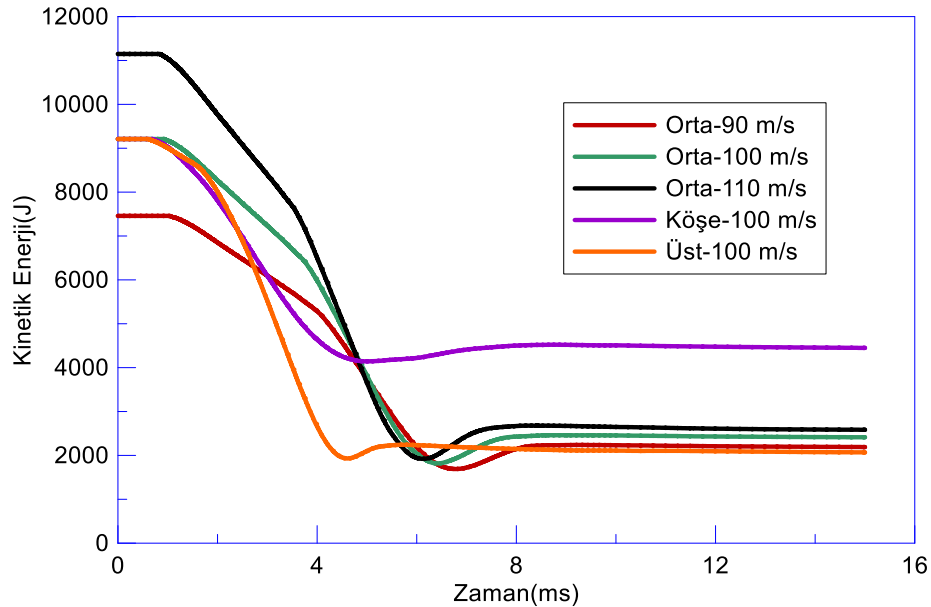
Kanopinin ortasına yapılan çarpma analizinin sonucunda; her üç hız için de, kuş modelinin çarpma anından itibaren zamanla kinetik enerjisinin hızla azaldığı ve belirli bir zamandan sonra önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Kanopi yapısının ise çarpma öncesi sıfır olan kinetik enerjisinin çarpma ile birlikte hızla arttığı, zirve yaptıktan sonra tekrar dalgalanarak aşağıya doğru hızla azalmaya başladıktan bir süre sonra artık enerjide önemli bir değişim olmadığı görülmüştür. Kuşun ilk başta sahip olduğu kinetik enerjinin çoğunu kanopi, iç enerji olarak almakta ve kuşun kinetik enerji kaybettiği grafiğin tersi olarak kanopi yapısında iç enerji artışı görülmektedir. Kuşun iç enerjisi ise, diğer enerjilere nazaran daha az miktarda da olsa çarpma boyunca artış eğilimindedir.

Kanopinin üst bölgesine yapılan çarpma analizinin sonucunda; kuş geometrisinin çarpma anından itibaren zamanla kinetik enerjisinin azaldığı ve dip yaptıktan sonra bir süre sonra yaklaşık sabit kaldığı, kanopi geometrisinin ise çarpma öncesi sıfır olan

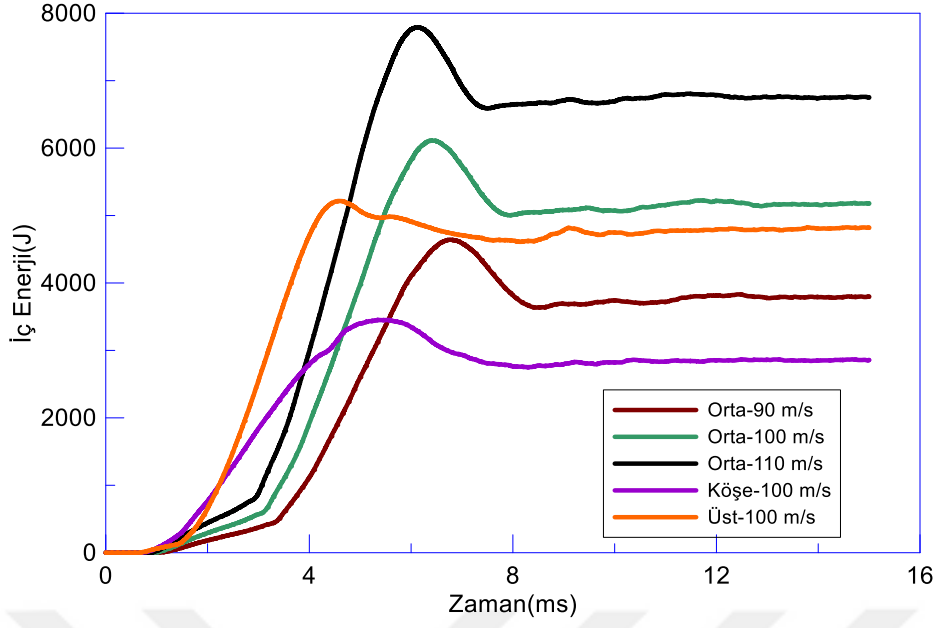
kinetik enerjisinin çarpma ile birlikte arttığı, ilk zirvesini yaptıktan sonra ikinci bir zirve yapıp tekrar dalgalanarak aşağıya doğru azalmaya başladıktan bir süre sonra yaklaşık sabit kaldığı görülmektedir. Kuşun ilk başta sahip olduğu kinetik enerjinin çoğunu ise; kanopi, iç enerji olarak alır ve kuşun kinetik enerji kaybettiği grafiğin tersi olarak kanopi üzerinde iç enerji artışı gözlenir. Kuşun iç enerjisi ise, diğer enerjilere nazaran daha az miktarda da olsa çarpma boyunca artış eğilimindedir.



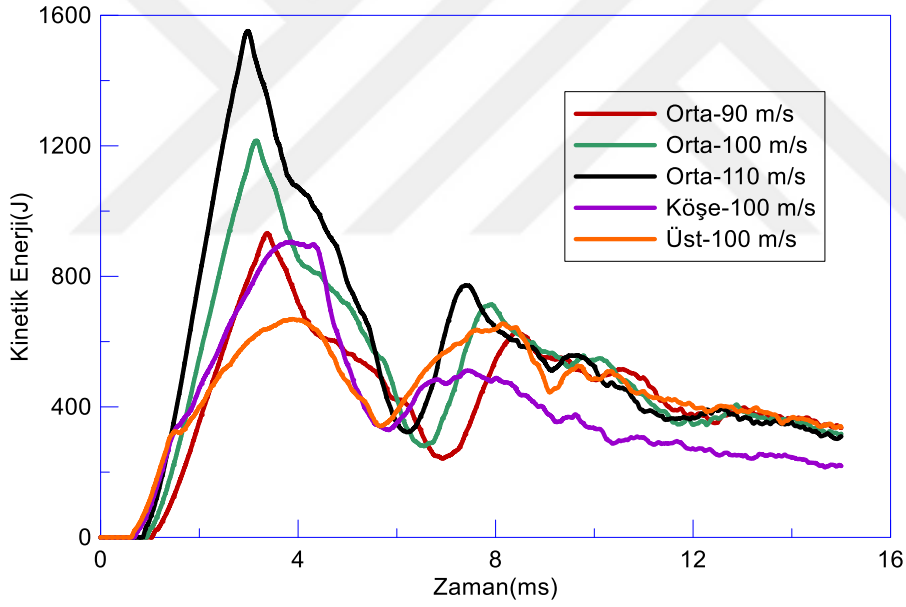
Şekil 6.47: Dauphin AS365 - Kuş geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı iç enerji değişimi.



Şekil 6.48: Dauphin AS365 - Kuş geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı kinetik enerji değişimi.



Şekil 6.49: Dauphin AS365 - Kanopi geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı iç enerji değişimi.



Şekil 6.50: Dauphin AS365 - Kanopi geometrisinin tüm durumlar için zamana bağlı kinetik enerji değişimi.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu projede; kuş çarpma olaylarındaki, mevcut hız, kanopi geometrisi ve çarpmanın gerçekleştiği farklı bölgelerin vereceği sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Bu sebeple iki farklı helikopter kanopisinin, kritik olacağı düşünülen üç farklı bölgesine aynı hız ile, ayrıca bu iki kanopinin orta bölgelerine üç farklı hızla kuş çarpması analizi LS-DYNA programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Seçilen kanopilerden biri, daha bombeli yapıda olup, diğeri daha düzlemseldir. Çarpma analizinde kullanılacak olan ve kuş şekline en yakın olduğu düşünülen yarım küre uçlu silindir geometrisi, SPH ile modellenmiştir. Her iki kanopinin; orta bölgesine 90 m/s, 100 m/s ve 110 m/s hızlarla ve bu kanopilerin orta, üst ve köşe bölgelerine 100 m/s hızla kuş çarpması analizi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1'deki sayısal sonuçlardan hareketle değişen parametreler için sonuçlar incelenmiştir. Kanopi geometrisi değişkeni göz önüne alındığında; aynı hız ile benzer bölgelerine çarpma analizi yapılan, malzeme özellikleri de aynı olan iki farklı kanopiden, geometrisi daha bombeli olan Gazelle SA341 helikopterinin kanopisindeki maksimum deplasman değerlerinin daha az olduğu aşıkardır. Buradan yola çıkılırsa, daha bombeli geometriye sahip kanopi modellerinin kuş çarpmasına karşı nasıl davranış gösterdiği gözlenebilir. Hız değişkeni düşünüldüğünde ise; her iki kanopinin orta bölgelerine yapılan çarpma analizleri dikkate alındığında, artan çarpma hızı ile birlikte artan enerji göz önüne alınırsa, doğal olarak her iki kanopi için de maksimum deplasman ve maksimum von Mises gerilme değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir.

Bombeli yapıdaki Gazelle SA341 helikopteri kanopisinin kritik olacağı düşünülen farklı bölgeleri değişken olarak ele alındığında; aynı hızdaki çarpmalarda bu kanopinin maksimum deplasman değerinin ortaya çarpma durumunda en fazla olduğu gözlemlenmiştir. Aynı kanopi geometrisi için; her üç bölgeye çarpma durumunda maksimum von Mises gerilmeleri üst bölgede en fazla, köşede ise en az olmuştur. Üst bölgede fazla olmasının sebebi ise bu bölgeye çarpma durumunda, ankastre yapılmış kenarlara yakınlık fazla olduğundan, von Mises gerilmeleri çok fazla dağılmadan çarpmanın gerçekleştiği yerde yoğunlaşmasıdır.

Daha düzlemsel bir geometriye sahip olan Dauphin AS365 helikopteri kanopisinin farklı bölgelerine gerçekleştiren çarpma analizlerine bakıldığında ise; aynı hızdaki çarpmalarda, yine maksimum deplasman değerinin en fazla ortaya çarpma durumunda gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Aynı kanopi geometrisi için; her üç bölgeye çarpma durumunda maksimum von Mises gerilmeleri üst bölgede en fazla, köşede ise en az olmuştur. Üst bölgede fazla olmasının sebebi ise bu bölgeye çarpma durumunda, ankastre yapılmış kenarlara yakınlık fazla olduğundan, von Mises gerilmeleri çok fazla dağılmadan çarpmanın gerçekleştiği yerde yoğunlaşmasıdır. 4. kısımdaki kuş çarpması analizi sonucunda elde edilen enerji grafikleri incelendiğinde; genel olarak, kuş geometrisinin çarpma anından itibaren zamanla kinetik enerjisinin azaldığı ve dip yaptıktan sonra bir süre sonra yaklaşık sabit kaldığı, kanopi geometrisinin ise çarpma öncesi sıfır olan kinetik enerjisinin çarpma ile birlikte arttığı, zirve yaptıktan sonra tekrar dalgalanarak aşağıya doğru azalmaya başladıktan bir süre sonra yaklaşık sabit kaldığı görülmektedir. Kuşun ilk başta sahip olduğu kinetik enerjinin çoğunu ise; kanopi, iç enerji olarak alır ve kuşun kinetik enerji kaybettiği grafiğin tersi olarak kanopi üzerinde iç enerji artışı görülür. Kuşun iç enerjisi ise, diğer enerjilere nazaran daha az miktarda da olsa çarpma boyunca artış eğilimindedir. Ayrıca, kuşun sahip olduğu kinetik enerjinin azalma miktarı zamanla yavaşlamaktadır. Aynı bölgeye farklı hızlarla yapılan çarpma analizlerinde, enerji miktarları değişse bile, farklı hızlar için elde edilen enerji zaman grafikleri birbirine benzerdir. Enerjinin zamanla değişimleri genel olarak bu şekilde olsa da; bazı bölgeler için farklı durumlar mevcuttur. Ankastre bağlanmış olan kenarlara yakın yer olan üst bölgede gerçekleştirilen çarpma analizlerinde, kanopinin sahip olduğu kinetik enerjide ilk zirve sonrası ikinci bir zirve daha oluşur ve ardından grafik yatay şekilde devam eder. Sebebi ise kenarlara yakın yerlerde çarpma sonrası kısa bir süre hareketliliğin azalması ve ardından tekrar başlamasıdır. Analizin gerçekleştirildiği hızlar, ilgili helikopterlerin çarpmaya maruz kalabileceği olası hızlar olmakla birlikte, polikarbonat malzemesinin yüksek kırılma gerinimine ve düşük elastisite modülüne sahip olmasından dolayı analiz sonuçlarına göre bu hızlarda kırılma yaşanmamış ve yüksek miktarda deplasman değerlerine ulaşılmıştır. Çarpma analizinin gerçekleştiği hızların daha üst seviyelere ulaşması durumunda deplasmanların artarak sonucunda kırılmaya sebep olacağı öngörülmektedir. Projede verilen hızlar ile yapılan analizlere göre, von Mises gerilmeleri birçok noktada akma mukavemetinden yüksek olmakla birlikte, plastik deformasyon oluştuğunu göstermiştir. Tüm bu sonuçların incelenmesinin ve

yorumlanmasının akabinde; helikopter kanopilerinin tasarımında, diğer tasarım faktörlerinin (aerodinamik, ağırlık, vs.) önemi ile birlikte; oluşturulacak kanopi geometrilerinin daha bombeli şekilde tasarlanması, orta bölgelerinin diğer bölgelere göre daha dayanıklı olacak şekilde tasarlanması çarpmaya karşı dayanıklılığın arttırılmasını sağlayacaktır. Ek olarak; polikarbonat malzemesinin kırılma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri sebebiyle, kullanımına devam edilmesi kırılmaların yaşanmasının önlenmesini sağlayacaktır.





KAYNAKLAR

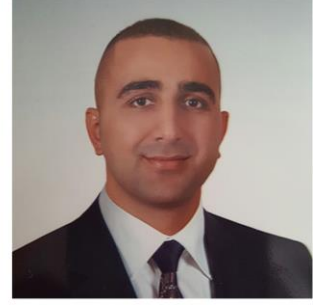
- [1] **Dolbeer, R.A.W., Weller, John R., Anderson, Amy L. & Begier, Michael J.** (2016). Wildlife Strikes to Civil Aircraft in the United States 1990–2015.
- [2] **Hedayati, R., Rad, S. Z., Eyvazian, A. & Hamouda, A.M.** (2014). Bird strike analysis on a typical helicopter windshield with different lay-ups, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28, pp. 1381-1392.
- [3] **Url-1** <<https://www.airbus.com/helicopters/civil-helicopters/medium/as365-n3plus.html>>, erişim tarihi 15.01.2019.
- [4] **S. Heimbs.** (2011). Bird strike simulations on composite aircraft structures, in *2011 SIMULIA customer conference*. Barcelona, Spain, 2011, pp. 73-86.
- [5] **F. Wang and Z. Yue.** (2010). Numerical simulation of damage and failure in aircraft windshield structure against bird strike. *Materials & Design*, vol. 31, pp. 687-695.
- [6] **Hedayati, R. & Rad, S. Z.** (2013). A new bird model and the effect of bird geometry in impacts from various orientations. *Aerospace Science and Technology*, pp. 9-20.
- [7] **Hedayati, R. & Rad, S. Z.** (2012). Effect of bird geometry and orientation on bird-target impact analysis using SPH method. *International Journal of Crashworthiness*, pp. 445-459.
- [8] **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*, vol. 27, pp. 542-549.
- [9] **Ryabov, A. A., Romanov, V. I. & Kukanov, S. S.** (2009). Fan Blade Bird Strike Analysis Using Lagrangian, SPH and ALE Approaches. in *6th European LS-DYNA Users'Conference*.
- [10] **Hedayati, R., Sadighi, M. & Aghdam, M. M.** (2014). On the difference of pressure readings from the numerical, experimental and theoretical results in different bird strike studies, *Aerospace Science And Technology*, pp. 260-266.
- [11] **Lavoie, M. A., Gakwaya, A., Ensan, M. N. & Zimcik, D. G.** (2007). Validation of Available Approaches for Numerical Bird Strike Modeling Tools. *International Review of Mechanical Engineering*, vol. 20, pp. 380-389.
- [12] **Monaghan, J. J.** (1992). Smoothed particle hydrodynamics. *Annual review of astronomy and astrophysics*, vol. 30, pp. 543-574.

- [13] **Johnson A. F. & Holzapfel, M.** (2003). Modelling soft body impact on composite structures. *Composite Structures*, vol. 61, pp. 103-113.
- [14] **McCarthy, M., Xiao, J., McCarthy, C., Kamoulakos, A., Ramos, J. & Gallard, J.** (2004). Modelling of bird strike on an aircraft wing leading edge made from fibre metal laminates–Part 2: modelling of impact with SPH bird model. *Applied Composite Materials*, vol. 11, pp. 317-340.
- [15] **Heimbs, S.** (2011). Computational methods for bird strike simulations: A review. *Computers & Structures*, vol. 89, pp. 2093-2112.
- [16] **Wilbeck, J. S.** (1978). Impact behavior of low strength projectiles. DTIC Document.
- [17] **Chuan, K. C.** (2006). Finite Element Analysis Of Bird Strikes On Composite And Glass Panels. National University Of Singapore, Singapore.
- [18] **Wilbeck, J. S. & Rand, J. L.** (1981). The development of a substitute bird model. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 103, pp. 725-730.
- [19] **Smojver, I. & Ivančević, D.** (2012). Advanced modelling of bird strike on high lift devices using hybrid Eulerian–Lagrangian formulation. *Aerospace Science and Technology*, pp. 224-232.
- [20] **Isbell, W. M.** (2005). Measuring the Dynamic Response of Materials. World Scientific.
- [21] **McCallum, S. & Constantinou, C.** (2005). The influence of bird-shape in bird-strike analysis. In *5th European LS-DYNA Users Conference*.
- [22] **Grimaldi, A., Sollo, A., Guida, M. & Marulo, F.** (2013). Parametric study of a SPH high velocity impact analysis—a birdstrike windshield application. *Composite Structures*, vol. 96, pp. 616-630.
- [23] **Lavoie, M., Gakwaya, A., Nejad Ensan, M. & Zimcik, D.** (2007). Review of existing numerical methods and validation procedure available for bird strike modelling. In *Int. Conf. Comp. Exp. Eng. Sci. (ICCES)*, pp. 111-118.
- [24] **Guida, M., Marulo, F., Meo, M., Grimaldi, A. & Olivares, G.** (2011). SPH–Lagrangian study of bird impact on leading edge wing. *Composite Structures*, vol. 93, pp. 1060-1071.
- [25] **Bheemreddy, V., Chandrashekhara, K. & Schuman, T.P.** (2011). Finite Element Modeling Of Bird Strikes And Parametric Evaluation Using Design Of Experiments (DOE). In *Proceedings of the 5th Annual ISC Research Symposium*.
- [26] **Jianyong, Z., Xiaoyu, Z. & Mengling, W.** (2015). Numerical simulation of a bird impact on a composite aerodynamic brake wing of a high-speed train. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 229, pp. 223-236.
- [27] **Smojver, I. & Ivančević, D.** (2011). Bird strike damage analysis in aircraft structures using Abaqus/Explicit and coupled Eulerian Lagrangian approach. *Composites science and technology*, vol. 71, pp. 489-498.

- [28] **Guimard J.M. & Heimbs, S.** (2011). Towards The Industrial Assessment Of Bird Strike Simulations On Composite Laminate Structures. *EADS Innovation Works*, pp. 627-634.
- [29] **Shah, Q. S., Abakr, Y.A.** (2007). Effect of distance from the support on the penetration mechanism of clamped circular polycarbonate armor plates. *International Journal of Impact Engineering* 35, pp. 1244–1250
- [30] **Jenq, S. T., Hsiao, F. B., Lin, I.C., Zimcik, D. G. & Ensan, M. N.** (2007). Simulation of a rigid plate hit by a cylindrical hemi-spherical tip-ended soft impactor. *Computational Materials Science* 39, pp. 518-526.
- [31] **Url-2** <https://en.wikipedia.org/wiki/Aéropatiale_Gazelle>, erişim tarihi 30.03.2019
- [32] **Url-3** <https://en.wikipedia.org/wiki/Eurocopter_AS365_Dauphin>, erişim tarihi 30.03.2019
- [33] **Url-4** <<https://grabcad.com/library/sa341-gazelle-1>>, erişim tarihi 30.03.2019.
- [34] **Url-5** <<https://grabcad.com/library/as365-n3-dauphine>>, erişim tarihi 30.03.2019.
- [35] **Shah, Qasim H.** (2009). Impact resistance of a rectangular polycarbonate armor plate subjected to single and multiple impacts. *International Journal of Impact Engineering* 36, pp. 1128-1135.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Meriç Kahvecioğlu
Doğum Tarihi ve Yeri : 28.08.1992 ADANA
E-posta : merickahvecioglu1@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği
- **Yükseklisans** :2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı, Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı