

## BİR UÇAK KANADINA KUŞ ÇARPMASININ SAYISAL ANALİZİ

Ahmed Yiğit\* ve Orhan Özçelik†

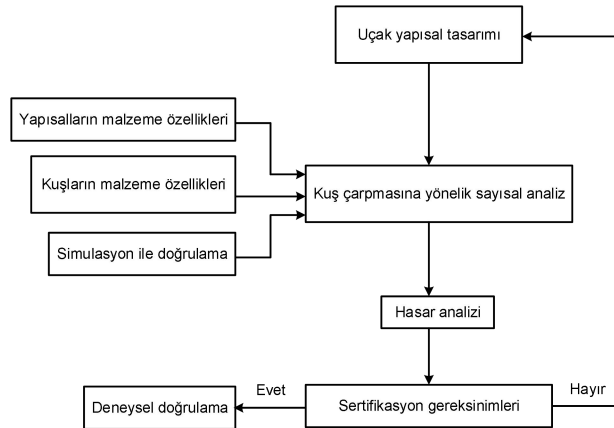
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara

### ÖZET

Uçakların maruz kaldığı kuş çarpmaları uçak yapılarına önemli zararlar verebildiği ve ciddi kazaların yaşanmasına sebep olabildiği için ana tehditlerin başında gelir. Bu yüzden uluslararası havacılık kuralları uçakların kuş çarpmalarına maruz kalabileceği düşünülen bütün parçalarının kuş çarpmasına karşı belirli bir dayanıma sahip olmasını zorunlu kılar. Kuş çarpma testleri söz konusu uçak parçalarının kuş çarpması dayanımını belirleyen doğrudan yöntemlerin başında gelir. Ancak uçak yapılarının tasarımı genellikle çok sayıda tasarım, üretim ve test iterasyonu gerektirdiği için kuş çarpma deneyleri hem çok zaman alıcı hem de oldukça pahalı testler olarak karşımıza çıkar. Ayrıca test sonuçları deney şartlarına bağlı olarak çok farklılıklar gösterebildiği için yapısal tasarımlarda doğrudan kullanılmaları her zaman mümkün olmaz. Yapılması gereken kuş çarpması test sayılarını azaltmak ve dolayısıyla tasarım aşamalarını hızlandırmak amacıyla sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada, literatürde mevcut olan oldukça kullanışlı ve kullanımı kolay bir analitik yöntemin bir uçak kanadı kabuğuna düzgünleştirilmiş parçacık hidrodinamiği (DPH) (Smoothed-Particle Hydrodynamics, SPH) metodu ile modellenmiş bir kuşun çarpması sonucu uçak kanadında oluşabilecek hasarı öngörmek üzere kullanılıp kullanılmayacağını araştırmak üzere bir sayısal analiz yapılmış ve analitik yöntemin bu durumlar için de oldukça yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

### GİRİŞ

Literatürde kuş çarpması simülasyonları için geliştirilen çok sayıda sayısal yöntem bulmak mümkündür. Şekil 1 uçak yapıları için kuş çarpması dayanımı tasarımına örnek bir akış diyagramını göstermektedir (Liu J., ve diğerleri, 2014).



Şekil 1: Kuş çarpmasına dayanımlı uçak yapılarının tasarımında iş akış diyagramı

\*Yüksek Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: ahmed.yigit9@gmail.com

† Dr. Öğr. Üye. Orhan Özçelik, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: oozcelik@aybu.edu.tr

Sayısal simülasyon sonuçlarını iyileştirmek amacıyla kuşlara yönelik farklı teorik modeller geliştirmek için geçmişte birçok çalışma yapılmıştır. Bazı araştırmacılar kuşu tanımlanmış bir hasar gerilimine sahip basit bir elastik-plastik malzeme yasasıyla modellemeye çalışırken; bazıları, bu basitleştirilmiş yaklaşımın kısıtlarını vurgulamışlardır (Zhang Y, Li Y., 2008). Literatürde farklı elastik-plastik modellerin sayısal simülasyonları ile elde edilen sonuçların deneylerle karşılaştırılmalarını da görmek mümkündür (Bai J., 2003). Bazı araştırmacılar (Wang F., Li L., Wang X., 2007, Zhang Y., Li Y., 2007) belirli teorik modeller için kuş malzeme sabitlerini tanımlamak amacıyla farklı hesaplama yöntemleri geliştirmiş ve kalibre edilmiş model parametrelerini kullanan sayısal simülasyon sonuçlarının, deneysel ölçümlerle uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

## YÖNTEM

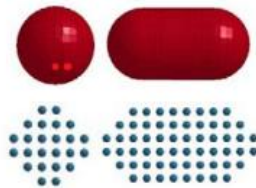
Bu çalışmada, Resim 1'deki şekilde çözüm ağı oluşturulan bir uçak kanadının hücum kenarının orta noktasına farklı hızlarda kuş çarpması olayı bilgisayar ortamında LS-DYNA programı kullanılarak simüle edilmiş, çarpma anında hücum kenarında oluşabilecek deformasyonların belirlenmesi amaçlanmıştır.



Resim 1: Uçak kanadı kabuk yapısı çözüm ağı görünüşü

## Kuş ve Kanat Modeli

Kuşun modellenmesinde literatürde sıklıkla kullanılan ve genellikle en iyi sonuçları verdiği düşünülen (kuşu temsil eden geometri hem çok yüksek deformasyonlara uğradığı hem de istenen doğruluğu makul analiz süreleri içerisinde sağlayabildiği için) düzgünleştirilmiş parçacık hidrodinamiği yaklaşımı kullanılmıştır (Şekil 2) (Shahimi vd. 2021, Heimbs 2011).



Şekil 2: Kuş DPH modeli (Shahimi ve diğerleri 2021)

Bu modelde, parçacıklar birbirinden bağımsız kabul edilir ve kütle, hız ve malzeme kanunları her bir parçacık için ayrı ayrı yazılır. Böylece çarpmadan sonra Lagrange yöntemi kullanımında ortaya çıkan çözüm ağ yapısının bozulması önlenip kuşun büyük deformasyonlara maruz kalması sağlanmış olur. Bu çalışmada, kuş modeli olarak LS-DYNA programı ile deformasyon sırasında büyük gerinime maruz kalan malzemeleri modellemek için kullanılan ve akma gerilimi ve tanjant modülü ile tanımlanan (Shahimi S-S., Abdullah N. A., Hrairi M., and Ahmad M.I.M., 2021) basınca bağlı plastisite modeli (MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_HYDRO) kullanılmıştır. Bu model polinom formundaki hal denkleminle eşzamanlı olarak kullanılır: (EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL). Kuş için polinom hal denkleminin, kuş ortamının basınç-yoğunluk ilişkisinin izotropik ve viskoz olmayan bir model olarak tasvir edildiğini göstermektedir. Hal denklemi,  $P$  basıncını verir ve aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (1)$$

Burada  $P$  basıncı,  $E$  iç enerjiyi,  $C_i$  ( $i = 0,1, \dots, 6$ ) polinom katsayılarını göstermektedir. İzafi yoğunluk  $\mu$  aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır:

$$\mu = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) - 1 \quad (2)$$

Bu denklem çarpışma boyunca yoğunlukta oluşan değişimi göstermekte olup esas itibari ile anlık yoğunluğun,  $\rho$ , başlangıçtaki yoğunluğa,  $\rho_0$ , oranına eşittir.

Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	950
Kayma modülü (GPa)	2
Akma gerilmesi (MPa)	0.02
$C_1$	$2.1 \times 10^9$
$C_2$	6.2
$C_3$	10.1

Tablo 1: Kuş malzemesi ve hal denklemi (EOS) parametreleri

Hal denkleminde yer alan  $C_0$  ilk durum denge halindeki basıncı vermekte olup sıfır alınmıştır,  $C_0 = 0$ ,  $C_4$ ,  $C_5$ , ve  $C_6$  katsayıları su için sıfır alınmaktadır. Kuş malzemesi ve hal denkleminde bulunan diğer katsayılar Tablo 1'de verilmiştir (Shahimi S-S., Abdullah N. A., Hrairi M., and Ahmad M.I.M., 2021). Bu çalışmada kullanılan DPH kuş modelinde aralarındaki minimum mesafe tüm parçacıklar için eşit olacak şekilde (0.0057m) toplam 5549 adet parçacık kullanılmıştır.

Kuş, uçak kanadına çarptığında, yüksek elastik ve elastik olmayan gerilimler meydana gelecek ve bu da çarpma yükleri ile kanat arasında etkileşime neden olacaktır; dolayısıyla kanadın yapısının bu yüksek darbe yüküne dayanması gerekecektir (Mao R.H., Meguid S.A., Ng T.Y., 2007). Bu makalenin temel amacı Christoforou ve Yigit (2023)'in önerdiği analitik yaklaşımın bir uçak kanadı kabuğuna düzgünleştirilmiş parçacık hidrodinamiği (DPH) (Smoothed-Particle Hydrodynamics, SPH) metodu ile modellenmiş bir kuşun çarpması

sonucu uçak kanadında oluşabilecek hasarı öngörmek üzere kullanılıp kullanılmayacağını araştırmak olduğu için uçak kanadında oluşacak hasarı modellemek için Johnson-Cook viskoplastik malzeme modeli seçilmiştir. Eşdeğer gerilim,  $\sigma_{eq}$ , plastik gerinim, gerinim hızı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Johnson-Cook hasar modeliyle aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$\sigma_{eq} = [A + B\varepsilon_p^n][1 + c \ln(\dot{\varepsilon}^*)][1 - T^{*m}] \quad (3)$$

Burada  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $c$  ve  $m$  sabitlerdir,  $\varepsilon_p$  birikmiş plastik gerinimdir,  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_0$  boyutsuz gerinim oranı,  $\dot{\varepsilon}_0$  referans gerinim oranı ve  $T^* = (T - T_0)/(T_m - T)$ ;  $T$ ,  $T_0$  ve  $T_m$  sırasıyla çalışma sıcaklığı, oda sıcaklığı ve erime sıcaklığıdır. Uçak kanadının Tablo 2'de verilen malzeme özelliklerine sahip alüminyumdan yapıldığı varsayılmıştır.

Akma gerilmesi (MPa)	167
Pekleşme parametresi, B (MPa)	590
Pekleşme parametresi, n	0.551
Gerinim hassasiyet parametresi, c	0.001
Sıcaklık parametresi, m	0.859
Hasar parametresi, $D_1$	0.0261
Hasar parametresi, $D_2$	0.263
Hasar parametresi, $D_3$	-0.349
Hasar parametresi, $D_4$	0.247
Hasar parametresi, $D_5$	16.8
Elastisite modülü, E [Pa]	$7 \times 10^{10}$
Yoğunluk, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2700
Poisson oranı, $\nu$	0.33

Tablo 2: Alüminyum için Johnson-Cook hasar modeli sabitleri (Banerjee A., Dhar S., Acharyya S., Datta D., Nayak N., 2015)

Yapılan her bir simülasyonda hedef plaka için toplam 4800 eleman ve 12273 nod noktası kullanılmış ve zaman aralığı  $1 \times 10^{-7}$  saniye olarak seçilmiştir. Simülasyonların CPU zamanları kuşun çarpma hızı ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Bu değişim farklı hız değerlerinde simülasyonun çarpma olayının tamamen sonlandığı  $t=6$  ms'ye kadar koşulması halinde aşağıda Tablo 3'de gösterilmiştir.

Hız, $v$ [m/s]	CPU [s]
30	1058
50	532
70	430
100	360

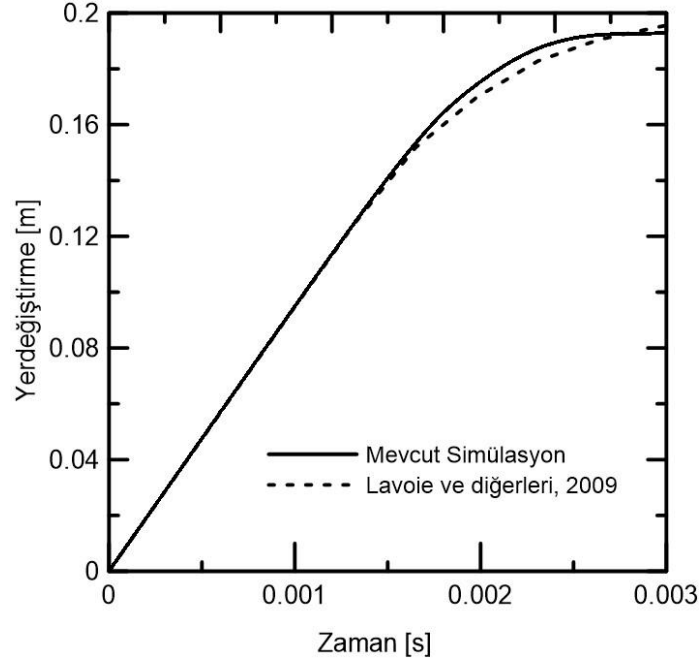
Tablo 3: Simülasyon CPU zamanının çarpma hızı ile değişimi

### Model Doğrulama

Bu bölümde DPH kuş modelinin doğrulanması için daha önce yayınlanan bir çarpma testi sonuçları (Lavoie ve diğerleri (2009)) bu çalışmada kullanılan simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Lavoie ve diğerleri (2009) yaptıkları deneysel çalışmada, çarpma anını yüksek hızlı kameralarla kaydetmiş ve çarpışma anında kuş hızını 95 m/s olarak belirlemişlerdir. Mevcut çalışma sonuçlarının söz konusu bu deneysel sonuçlar ile karşılaştırılabilmesi için bu çalışmada da 1 kg ağırlığındaki jelatin karışımından hazırlanmış kuş modeli, 12,7 mm kalınlığında ve 304,8x304,8mm boyutlarında kare şeklinde haddelenmiş zırh çeliğinden yapılmış bir levhaya dik olarak 95 m/s hız ile fırlatılmıştır. Levhanın Tablo 4'de verilen malzeme özelliklerine sahip çelikten yapıldığı varsayılmıştır.

Akma gerilmesi (MPa)	792
Pekleşme parametresi, B (MPa)	510
Pekleşme parametresi, n	0.26
Gerinim hassasiyet parametresi, c	0.014
Sıcaklık parametresi, m	1.03
Hasar parametresi, $D_1$	0.05
Hasar parametresi, $D_2$	3.44
Hasar parametresi, $D_3$	-2.12
Hasar parametresi, $D_4$	0.002
Hasar parametresi, $D_5$	0.61
Elastisite modülü, E [Pa]	$20.9 \times 10^{10}$
Yoğunluk, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	7860
Poisson oranı, $\nu$	0.28

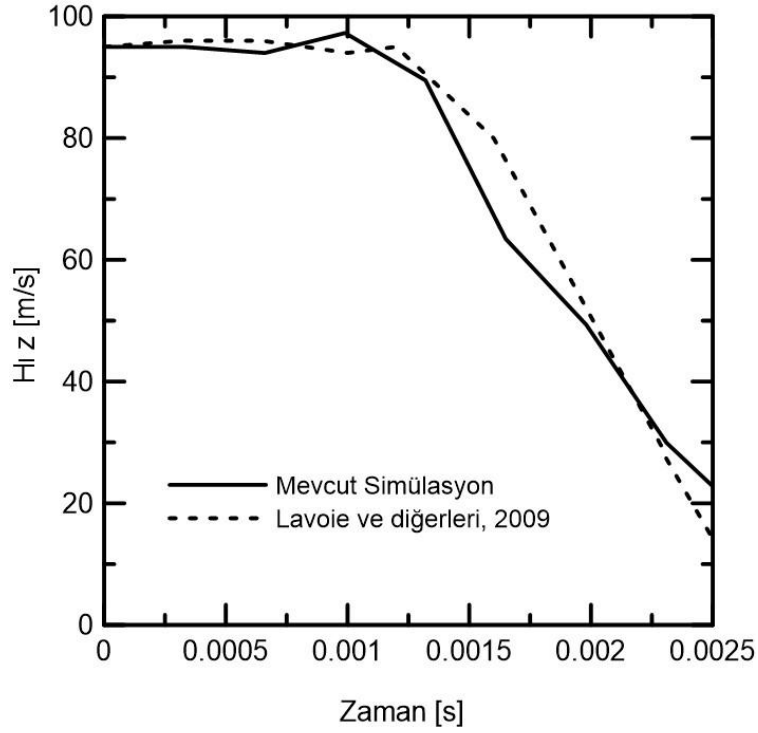
Tablo 4: Çelik için Johnson-Cook hasar modeli sabitleri (Rashed A., Yazdani M., Babaluo A.A., Parvin P.H., 2015)



Şekil 3: Simülasyon sonuçlarının Lavoie ve diğerlerine ait (2009) test sonuçları ile karşılaştırılması

Deneysel çalışmada yüksek hızlı kamera ile 0,33 ms aralıklarla görüntü kaydedilmiş olduğu için, modellenen simülasyonda da zaman aralığı 0,33 ms olarak seçilmiştir. Jelatin karışımı ile hazırlanan kuş modeli parametreleri olarak Tablo1'de verilen değerler kullanılmıştır. Çelik levha ise kabuk ve katı elamanlar için uygun bir malzeme modeli olan Johnson-Cook hasar modeliyle modellenmiştir. Sınır koşulları, dört kenar boyunca tüm noktalarda dönme ve öteleme hareketlerini tamamen kısıtlanarak tanımlanmıştır.

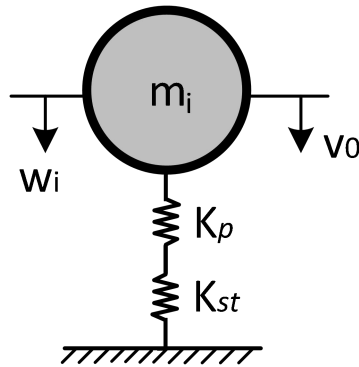
Şekil 3 ve 4'de Lavoie ve diğerlerinin (2009) çarpma testinde yüksek hızlı kamera ile kaydettikleri kuşun en arka noktasının zamana göre konum ve hız değişimleri ile mevcut simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve çok iyi bir uyum görülmüştür.



Şekil 4: Simülasyon sonuçlarının Lavoie ve diğerlerine ait (2009) test sonuçları ile karşılaştırılması

### Boyutsuz Analiz

Eğer bir çarpma olayında çarpan kütlesi çok büyük ise çarptığı yapının kütlesi ihmal edilebilir ve çarpma davranışı Şekil 5’de gösterildiği gibi sanki-statik çarpma modeli ile modellenebilir (Christoforou ve Yigit (2009)). Görüleceği üzere bu asimtotik durumda çarpma olayı birbirine seri olarak bağlı iki yay elemanı ile desteklenmiş bir çarpan kütlesinden ibaret tek serbestlik dereceli bir kütle-yay sistemi ile modellenebilir. Christoforou ve Yigit (2009) çalışmalarında sanki-statik model olarak Şekil 5’de görülen bu basit modeli kullanarak esnek bir hedefe bir cismin çarpması olayını oldukça kullanışlı ve kullanımı kolay analitik bir yaklaşım ile modellemiş ve bir “boyutsuz karakterizasyon diyagramı” ile tüm çarpma olayının dinamiğini belirlemeyi başarmışlardır. Bu modelde  $K_p$  lokal kontak yay katsayısını,  $K_{st}$  ise statik yapı rijitliğini ifade etmektedir.



Şekil 5: Sanki-statik çarpma için kullanılan model (Christoforou ve Yigit (2009))

Bu bölümde 0,97 kg ağırlığındaki jelatin karışımından hazırlanmış kuş modeli, farklı kalınlıklarda ve 378,5x378,5 mm boyutlarında kare şeklinde düz bir alüminyum levhaya farklı hızlarda çarpıtılmış ve elde edilen sonuçlar sanki-statik durum (quasi-static case) için Christoforou ve Yigit (2023) tarafından verilen “boyutsuz karakterizasyon diyagramı” ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla aşağıdaki boyutsuz parametre tanımları kullanılmıştır:

$$\bar{F} = \frac{F}{\sqrt{2E_0K_p}} ; \quad \zeta = \frac{1}{16} \sqrt{\frac{m_i K_p}{\rho h D}} ; \quad \lambda = \frac{K_{st}}{K_p} ; \quad \mu = \frac{m_i}{m_{seq}} \quad (3)$$

Burada  $F$  çarpma kuvvetini,  $\bar{F}$  normalize edilmiş çarpma kuvvetini,  $m_i, m_{seq}$  ve  $E_0$  sırasıyla kuş kütlesi, eşdeğer kütle ve çarpma enerjisini,  $K_p$  lineer kontak yay katsayısını (rijitliğini),  $K_{st}$  statik yapısal rijitliği,  $\rho, h$  ve  $D$  sırasıyla malzeme yoğunluğunu, plaka kalınlığını ve eğilme rijitliğini göstermektedir.  $\lambda$  izafi rijitliği ifade etmekte olup bu çalışmada 0.2 olarak alınmıştır.  $\mu$  efektif kütle oranını,  $v$  çarpma hızını göstermektedir.

Yukarıda tanımlanan boyutsuz parametreler kullanılarak Şekil’5’de gösterilen basit kütle-yay probleminin boyutsuz hareket denklemleri yazılacak olursa

$$\ddot{w} + \left(\frac{\lambda}{\lambda+1}\right) w = 0 \quad (4)$$

elde edilir. Bu durumda normalize çarpma cevabı sadece boyutsuz  $\lambda$  parametresi ile tanımlanabilir olmaktadır. Dolayısıyla normalize çarpma kuvveti sadece  $\lambda$  parametresine bağlı olarak

$$\bar{F}(\tau) = f(\lambda, \tau) = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\lambda+1}\right)} \sin\left(\sqrt{\frac{\lambda}{\lambda+1}} \tau\right) \quad (5)$$

şeklinde bulunur. Christoforou ve Yigit (2009), Christoforou ve Yigit (2023)) bir çarpışma olayını bütünüyle tanımlayabilmek için sadece çarpan cismin izafi rijitlik (relative stiffness) ve izafi hareketliliğini (relative mobility) bilmenin yeterli olacağını göstermişlerdir. Bu boyutsuz parametreler basit yapılar için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, daha kompleks yapılar için ise deneysel çalışmalar sonucunda elde edilebilir.

Christoforou ve Yigit (2023) ayrıca aynı  $\lambda, \zeta$  ve  $\mu$  çarpma parametrelerine sahip yapıların aynı normalize çarpma davranışı sergileyeceğini de göstermişlerdir. Yapısal rijitlik ve kontak rijitliği statik yük-yer değiştirme testi ile tespit edilebilir. Bu amaçla yapı üzerine uygulanan yükün ve yapının yer değiştirmelerinin ölçülmesi yeterlidir. Böylece izafi rijitlik elde edildiğinde çarpan cismin kütlesi değiştirilerek elde edilecek farklı izafi hareketlilik değerleri için deneysel çalışmalar sürdürülebilir. Bundan sonra plakanın şekli, büyüklüğü ve mesnet tipi değiştirilerek izafi rijitliğin aynı kalması sağlanır. Christoforou ve Yigit (2023)’in hipotezine göre izafi rijitlik ve izafi hareketlilik değerlerinin bilinmesi durumunda karakterizasyon diyagramı, Şekil 5 (Christoforou ve Yigit (2023)) kullanılarak çarpma öncesinde çarpma sonrası oluşacak normalize maksimum bileşke kuvvet ve yapıdaki hasar hakkında önemli ipuçları elde edilebilmektedir. Bu çalışma ile Christoforou ve Yigit (2023)’ün hipotezinin DPH modeli kullanılarak modellenmiş bir kuşun düz kare şeklindeki alüminyum bir levhaya çarpması durumunda hangi şartlarda geçerli olduğunun gösterilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla rastgele bir izafi rijitlik değeri ( $\lambda=0.2$ ) seçilmiş yukarıda açıklandığı şekilde plaka boyutlarını sabit tutup sadece kalınlığı değiştirerek çok sayıda sayısal analiz gerçekleştirilerek  $\lambda =0.2$ ’de sabitlenmeye çalışılmış ve elde edilen normalize maksimum



kuvvet değerleri Tablo 5'de raporlanmıştır. Elde edilen değerlerin Christoforou ve Yigit (2023)'in Denklem 5 kullanılarak hesaplanan sonuçları ile çok büyük oranda uyumlu olduğu görülmektedir. Tablo 5'ün sol sütunundaki değerler arasındaki küçük farklılıkların plaka kalınlığı değiştirilerek elde edilen  $\lambda$  değerinin tam olarak 0.2'ye eşitlenememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla Christoforou ve Yigit (2023)'in Christoforou ve Yigit (2023) DPH modeli ile temsil edilen kuş çarpması olaylarında da kullanılabileceğini söylemek mümkündür. Jelatin karışımından hazırlanmış kuş modeli için statik kontak rijitliği,  $K_p = 1.0382 \times 10^6$  N/m kabul edilmiştir. Bu değer yüksek çarpma kuvveti oluşturamayacak kadar küçük olduğu aşikardır. Bu yüzden statik kontak rijitliğinin nonlineer visko-elasto-plastik etkisi göz önüne alınarak hız arttıkça artacak şekilde formüle edilmesi gerekmektedir (Christoforou ve Yigit (2023)). Christoforou ve Yigit (2023) çalışmasında bu değişim

$$K_{pd} = K_p(1 + \beta v) \quad (6)$$

şeklinde tespit edilmiştir. Burada  $K_{pd}$  efektif dinamik kontak rijitliği,  $\beta$  sönüm parametresini ve  $v$  de hızı ifade etmektedir. Bu çalışmada önerilen efektif dinamik kontak rijitlik değeri  $K_{pd}$  değeri ise

$$K_{pd} = K_p(1 + \beta_1 v + \beta_2 v^2) \quad (7)$$

şeklinde dir. Burada  $\lambda=0.2$  için (sanki-statik durumlar için)  $K_p = 1.0382 \times 10^6$  N/m,  $\beta_1 = 0.014204$  kg/ms ve  $\beta_2 = 0.0004843$  kg/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Görüleceği üzere özellikle çarpma hızı arttıkça nonlineer visko-elasto-plastik davranış daha belirgin olmaktadır.

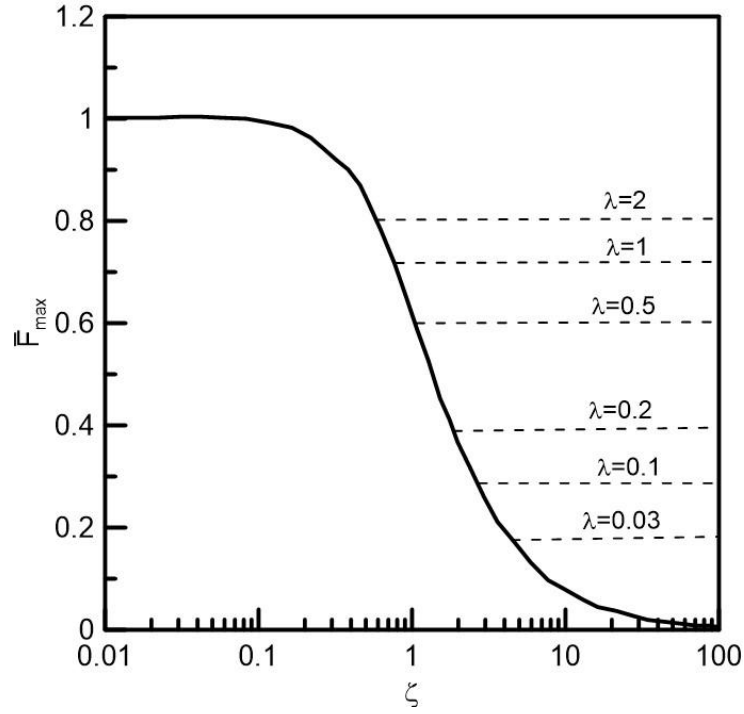
Tablo 5: Sanki-statik durumlar için mevcut çalışma ve Christoforou ve Yigit (2023) sonuçlarının karşılaştırılması

Denklem 7 farklı çarpma hızları ile yapılan çok sayıda simülasyon sonuçlarının MATLAB programı kullanılarak eğri uydurma yöntemi ile tekrar edilmesi yöntemiyle elde edilmiştir. Burada Christoforou ve Yigit (2023) çalışmasından farklı olarak hız ile lineer olarak artan  $K_{pd}$  efektif dinamik kontak rijitlik değerine hızın karesi ile artan  $K_p \beta_2 v^2$  terimi ilave edilmiştir. Hedef levhanın Johnson-Cook viskoplastik malzeme modeli ile modellendiği ve böylelikle hedef levhada oluşan plastik deformasyon ve termal etkilerinin göz önüne alındığı bu çalışmada bu ilave terim DPH ile modellenen kuş çarpma hızının statik kontak rijitliği nasıl değiştirdiğini göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışma Christoforou ve Yigit (2023) tarafından çarpma parametrelerinin tespitinde kullanılması önerilen karakterizasyon diyagramı'nın  $K_{pd}$

Hız, $v$ [m/s]	Normalize bileşke kuvvetin maksimum değeri, $\bar{F}_{max}$ (Mevcut Çalışma)	Maksimum bileşke kuvvet, $F_{max}$ [N] (Mevcut Çalışma)	Normalize bileşke kuvvetin maksimum değeri, $\bar{F}_{max}$ (Christoforou ve Yigit (2009))
10	0.408	4626.47	0.408
30	0.408	15849.2	0.408
50	0.408	35524.4	0.408
70	0.405	62173.5	0.408
100	0.408	110091	0.408

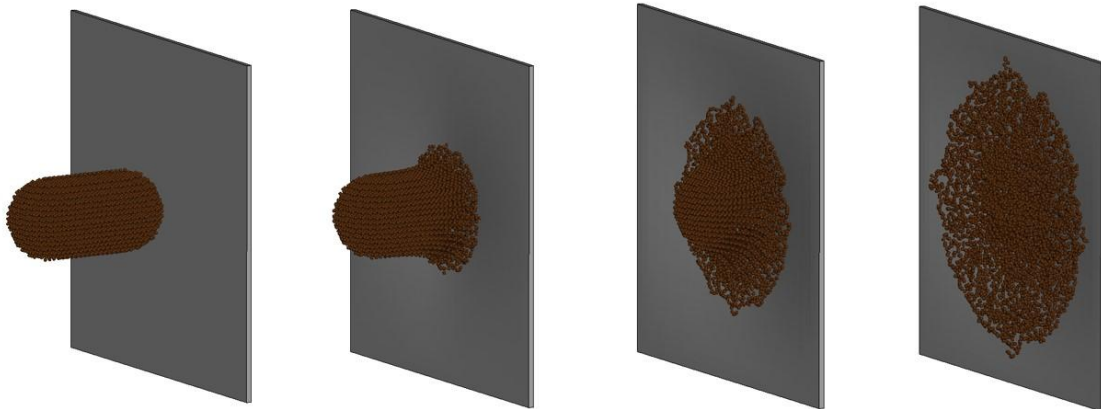
efektif dinamik kontak rijitlik değerinin Denklem 7'in kullanılması ile elde edilmesi halinde oldukça doğru sonuçlar vereceğini göstermektedir. Literatürde de raporlandığı üzere kuş çarpması deneylerini yapmak oldukça zordur. Dolayısıyla raporlanan deneysel sonuçlar

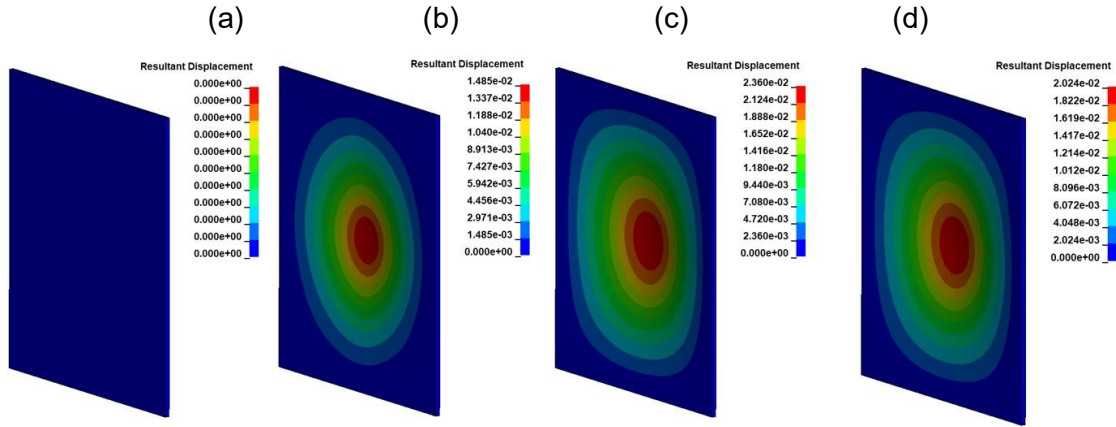
geniş bir aralıkta değişmekte ve farklılık göstermektedir. Ayrıca nümerik hesaplamalar Tablo 3'de de gösterildiği üzere çarpma hızı ile değişmekte ve özellikle düşük hızlarda oldukça uzun zaman gerektirmektedir. Bu yüzden güvenilir sayısal veya analitik yöntemlerin geliştirilmesi büyük önem arz eder. Bu çalışma ile Christoforou ve Yigit (2023)'nin hipotezinin DPH modeli kullanılarak modellenmiş bir kuşun düz kare şeklindeki alüminyum bir levhaya çarpması durumunda hangi şartlarda geçerli olduğunun gösterilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 5: Sanki-statik çarpma durumunda esnek cisimlerin esnek yapılarla çarpması olayları için karakterizasyon diyagramı (Christoforou ve Yigit (2023))

Resim 2  $v=100$  m/s hızla alüminyum plakaya çarpan kuş modelinin farklı  $t$  anlarında alüminyum plakanın orta noktasında oluşturduğu hasarı göstermektedir. Görüleceği üzere  $t=0.0006$  s,  $t=0.0013$  s ve  $t=0.002$  s anlarında plakada oluşan maksimum yer değiştirmeler sırasıyla  $1.485 \times 10^{-2}$  m,  $2.360 \times 10^{-2}$  m ve  $2.024 \times 10^{-2}$  m olarak ölçülmüştür.



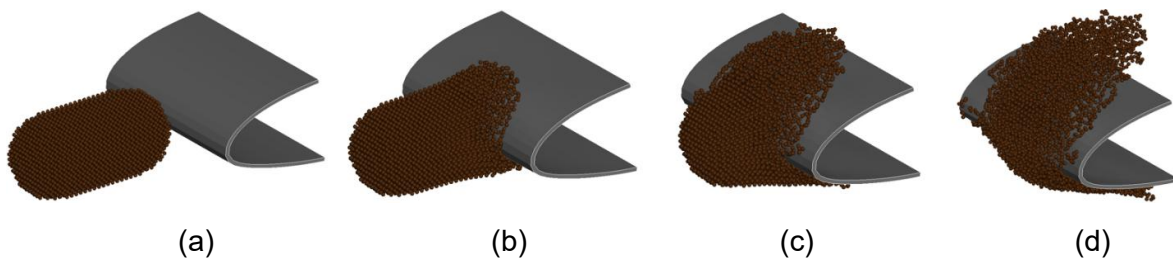


Resim 2:  $v=100$  m/s hızla alüminyum plakaya çarpan kuşun ve plakanın deformasyonu.  
(a)  $t=0$  s, (b)  $t=0.0006$  s, (c)  $t=0.0013$  s, (d)  $t=0.002$  s

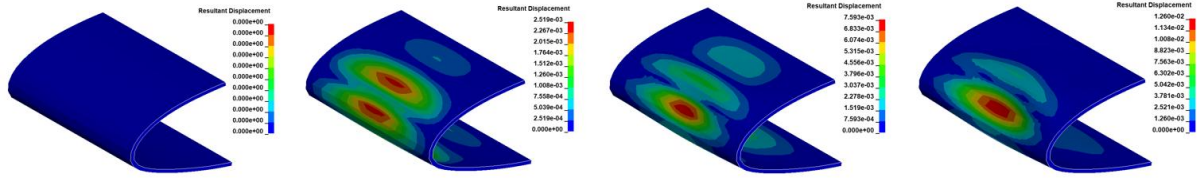
### UÇAK KANADINA KUŞ ÇARPMASI

Bu bölümde yukarıda açıklanan yöntem bir kuşun uçak kanadına çarpması durumuna uyumlandırılmaya çalışılacaktır. Bu amaçla Resim 1’de görülen şekilde alüminyum bir kabuk göz önüne alınmış ve yukarıda özellikleri verilen kuş modeli bu kabuğa farklı hızlarda çarptırılmıştır. Aynı  $\lambda$  değeri (aynı boyut ve fakat farklı kalınlıklardaki uçak kanadı modeli) için elde edilen sonuçlar aşağıda Tablo 6’de sunulmuştur. Görüleceği üzere normalize maksimum bileşke kuvvet farklı hızlarda çok değişmemektedir. Sayısal değerlerdeki küçük farklılıkların sayısal analizlerde  $\lambda$  değerinin tam olarak aynı nümerik değerde sabit tutulamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 6: Farklı hızlarda bileşke ve normalize bileşke kuvvetin maksimum değeri



Hız, $v$ [m/s]	Maksimum bileşke kuvvet, $F_{\max}$ [N]	Normalize bileşke kuvvetin maksimum değeri, $\bar{F}_{\max}$
50	10296.7	0.13
70	18061.2	0.14
100	35746.3	0.14

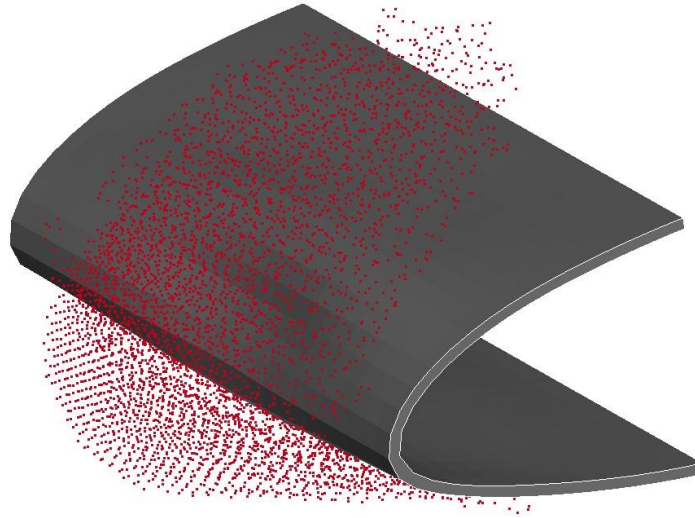


Resim 3: Sanki-statik yükleme durumunda  $v=100$  m/s hızla alüminyum kabuğa çarpan kuşun ve kabuğun deformasyonu. (a)  $t=0$  s, (b)  $t=0.0006$  s, (c)  $t=0.0012$  s, (d)  $t=0.0018$  s

Resim 3 sanki-statik durumlar için  $v=100$  m/s çarpma hızı için oluşan farklı zaman dilimlerindeki deformasyon durumunu göstermektedir.

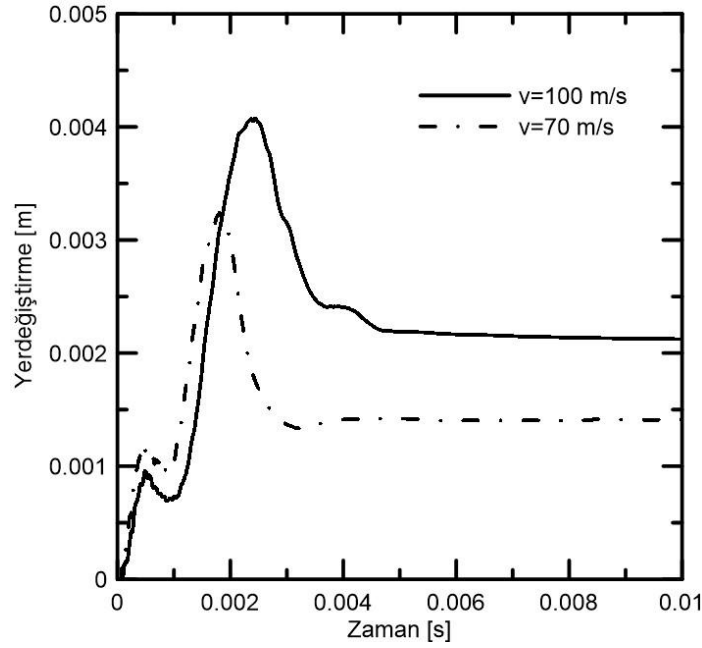
## DEĞERLENDİRME

Yapılan simülasyonlarda kanat kabuğu üzerinde oluşan bileşke reaksiyon kuvvetinin zaman ile değişimi incelendiğinde çarpma hızının artmasının bileşke reaksiyon kuvvetinin maksimum değerini artırdığı gözlemlenmiştir. Göz önüne alınan tüm hızlarda 6 ms civarında bileşke reaksiyon kuvvetinin sıfırlandığı gözlemlenmiştir. Bu da çarpma olayının tamamlandığı anlamına gelmektedir.



Şekil 6: Kuşun  $v=100$  m/s hız ile çarpması durumunda  $t=0.00143$  s anında kanat kabuğuna oluşan deformasyon

Şekil 6 çarpma hızının 100 m/s olması durumunda çarpma sonrası kanat üzerinde oluşan deformasyonu göstermektedir. Şekil 7 incelendiğinde çarpma hızının artmasıyla kanat üzerindeki maksimum deformasyonun artacağı ve çarpma olayı tamamlandığında bile kalıcı bir hasarın oluştuğu görülmekte olup, kanat kabuğunda çarpma sonrası oluşabilecek böyle bir hasarı mümkünse önlemek veya en azından azaltmak amacıyla kabuk iç yüzeyinin destek elemanları ile kuvvetlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 7: Kanat kabuğunun orta noktasında oluşan yer değıştirmenin zaman ile değışimi

Hava araçlarına kuş çarpması olayı oldukça karmaşık model ve çözüm yöntemleri geliştirmeyi gerektirmektedir. Literatürde de raporlandığı üzere kuş çarpması deneylerini yapmak da oldukça zordur. Geliştirilen sayısal yöntemler ise özellikle düşük hızlarda ve hedef levhanın kompozit malzemeden yapılmış olması durumunda oldukça uzun hesaplama zamanı gerektirmektedir. Bu yüzden güvenilir sayısal veya analitik yöntemlerin geliştirilmesi büyük önem arz eder. Bu çalışmanın en önemli çıktısı Christoforou ve Yigit (2023) tarafından geliştirilen analitik yöntemin DPH modeli ile modellenmiş bir kuş çarpması olayında da büyük bir güvenle kullanılabileceğinin göstermiş olmasıdır. Bu yöntemin ayrıca daha karmaşık sayısal modellerin planlanmasında rehberlik sağlayıp, ışık tutacağı aşikardır.

## SONUÇ

Uçak yapılarının tasarımı genellikle çok sayıda tasarım, üretim ve test iterasyonu gerektirmektedir. Kuş çarpma deneyleri çok zaman alıcı ve oldukça pahalı testler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, kuş çarpması test sayılarını azaltmak ve dolayısıyla tasarım aşamalarını hızlandırmak amacıyla sayısal bir model geliştirilmiştir. Bu amaçla bir uçak kanadı kabuğunun iç yüzeyinde destek elemanları olmadan kuş çarpmasına vereceği tepki üç farklı çarpma hızı için incelenmiştir. Kuş DPH (Düzenleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği) yaklaşımı ile modellenmiş olup, yapısal hasar tespiti için Johnson-Cook viskoplastik malzeme hasar modeli kullanılmıştır.

Çalışmanın sonraki aşamasında, nümerik simülasyonlar sivil havacılık otoriteleri (FAA ve EASA) tarafından uçuş sertifikasyonu için gerekli görülen standart kuş çarpması testleri için gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar "boyutsuz karakterizasyon diyagramı" (Christoforou, A.P. ve Yigit, A.S., 2023) yöntemi ile bulunan sonuçlarla karşılaştırılarak standart kuş çarpması testlerinin uygunluğu tartışılmıştır.

Bu çalışmada çok sayıda sayısal analiz gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar önce literatürde raporlanan bazı deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulukları test edilmiştir. Daha sonra sanki-statik durumlar için farklı hızlarda gerçekleştirilen kuş çarpması simülasyon

sonuçları Christoforou ve Yigit (2023)'in bulduğu sonuçlar ile karşılaştırılmış ve elde edilen değerlerin çok büyük oranda uyumlu olduğu gösterilmiştir. Dolayısıyla Christoforou ve Yigit (2023)'in karakterizasyon tablosunun DPH modeli ile temsil edilen kuş çarpması olaylarında da kullanılabileceği tespit edilmiştir. Boyutsuz karakterizasyon diyagramının DPH modeli ile kullanımını ilk defa göstermesi bu çalışmanın özgün değerini güçlendirmektedir.

### Teşekkür

Bu makalenin hazırlanması süreci boyunca sürekli destek ve geri bildirimleri için Sayın Hocamız Prof. Dr. Ahmet Salih Yiğit'e teşekkür ederiz.

### Kaynaklar

Bai J., (2003), Inverse issue study of bird impact to aircraft windshield based on neural network method. *PhD thesis*, Xi'an, China: Northwestern Polytechnical University.

Banerjee A., Dhar S., Acharyya S., Datta D., Nayak N., 2015, Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 640, pp. 200-209.

Christoforou A.P. ve Yigit A.S., (2009), Scaling of low-velocity impact response in composite structures, *Composite Structures* Vol. Volume 91 (3), pp. 358-365.

Christoforou A.P. ve Yigit A.S., (2023), The Characterization of Impact Dynamics in Aerospace Structures - The Case of Deformable Impactors, *10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies, RAST 2023*, İstanbul, Türkiye, 7 - 09 June 2023.

Heimbs S. (2011), Computational methods for bird strike simulations: A review, *Computers and Structures*, Vol. 89, pp. 2093 – 2112.

Laovie, M.A., Gakwaya, A., Nejad Ensan, M., Zimcik, D.G. and Nandlall, D. (2009). Bird's Substitute Tests Results and Evaluation of Available Numerical Methods, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, pp. 1276-1287.

Liu J., Li Y., ve Gao X., (2014), Bird strike on a flat plate: Experiments and numerical simulations, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 70, pp. 21 – 37.

Mao R.H., Meguid S.A., Ng T.Y., 2007, "Finite element modeling of a bird striking an engine fan blade," *Journal of Aircraft*, Vol. 44(2), pp. 583 – 596.

Rashed A., Yazdani M., Babaluo A.A., Parvin P.H., 2015, Investigation on high-velocity impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers, *Journal of Composite Materials*, Vol. 50 (25), pp.1-16.

Shahimi S-S., Abdullah N. A., Hrairi M., and Ahmad M.I.M., (2021), Numerical Investigation on the Damage of Whirling Engine Blades Subjected to Bird Strike Impact, *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, Vol. 53, No. 2, pp. 193 – 200.

Wang F., Li L., Wang X., (2007), A method to identify bird's material parameters. *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.*, Vol. 28(2), pp. 344 – 347.

Zhang Y. ve Li Y., (2007), Back analysis of bird material parameter. *Aeronaut. Comput. Tech.* Vol. 37(6), pp. 1 – 4.

Zhang Y. ve Li Y., (2008), Analysis of the anti-bird impact performance of typical beam-edge structure based on ANSYS/LS-DYNA. *Adv. Mater. Res.*