

## KUŞ ÇARPMASININ BİR SAVAŞ UÇAĞI KANOPİSİNİN YAPISAL BÜTÜNLÜĞÜNE VE RADAR KESİTİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ceyda ALTINTAŞ<sup>1</sup>, Arda GÜNAY<sup>1</sup>, Kaan Sadık  
ASLAN<sup>1</sup>, Canan Melis BULUT<sup>1</sup>  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Ankara

Aziz Taner ASTARLIOĞLU<sup>2</sup>  
TUSAŞ, Ankara

Muhammed Cihan TEZEL<sup>3</sup> ve Erdem ACAR<sup>4</sup>  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Ankara

### ÖZET

*Bu çalışmanın amacı, bir savaş uçağının kanopisine kuş çarpmasının yapısal dayanım ve radar kesit alanı üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu çalışmada, Düzgünleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (ing. smoothed particle hydrodynamics, SPH) sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılarak yarı küresel uçlu silindirik geometriye sahip kuş modeli kullanılmıştır. Kanopiye kuş çarpması modellenmiş ve sonuçlar literatürde mevcut deneysel ve nümerik verilerle karşılaştırılmıştır. Ardından, kanopinin radar kesit alanını hesaplamak üzere bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Son olarak, kanopinin mevcut tasarım kriterleri içinde kalarak farklı tasarım seçenekleri hem yapısal dayanım hem de radar kesit alanı bakımından karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler neticesinde geometride eniyileme yapılarak yapısal olarak en dayanıklı ve radar kesit alanı en küçük geometri belirlenmiştir.*

### GİRİŞ

Uçakların ve kuşların çarpışması bazen kaçınılmaz bir durum olabilmektedir. Bu durum uçuş güvenliğini tehlikeye attığı gibi ciddi maddi kayıplara da yol açmaktadır. ABD Federal Havacılık İdaresi (FAA) ve Avrupa Havacılık Güvenliği Ajansı (EASA) gibi havacılık otoriteleri bu konu ile ilgili güvenliği sağlamak ve maddi kayıpların önüne geçmek adına düzenlemeler yayınlamıştır. İstatistiklere göre, kuş çarpması sonucunda uçakların en fazla kanopi, motor, kanat ve kuyruk kısmı hasar almaktadır [Metz, 2020]. Bu yapıların kuş çarpmasına karşı daha dayanıklı hale gelmesi için test çalışmaları yapılmaktadır. Örneğin, Barber ve Wilbeck'in (1975) deneysel çalışmalarında, kuş çarpmasının sert bir levha üzerindeki etkisi araştırılmıştır ve deney sonucunda kuş üzerindeki darbe basınçları belirlenmiştir. Bahsi geçen test çalışmaları; numune üretimi ve test tekrarı gibi süreçler nedeniyle yüksek maliyete ve zaman kaybına sebep olabilmektedir. Bu nedenle kuş çarpması problemlerini incelemek için, düşük hesaplama maliyetine sahip ve yüksek doğruluk sunan simülasyon modelleri geliştirilmektedir. Bilgisayar kapasitesinin ve sonlu elemanlar yazılımlarının gelişmesi ile kuş çarpması problemlerinin çözümü simülasyon ortamında yapılmaya başlanmıştır.

Savaş uçaklarında ise, uçak parçalarının kuş çarpması gibi etkilere karşı dayanımlı olması gerektiği gibi, radar kesit alanlarının da düşük olması beklenmektedir. Bu gereksinimi karşılamak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler içerisinde uçağın geometrisi en büyük rolü oynarken, kullanılan malzemeler de radar sinyallerini emerek radar kesit alanını azaltır. Uçak gövdelerinde

<sup>1</sup>Lisans öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: caltintas@etu.edu.tr, agunay@etu.edu.tr, kaslan@etu.edu.tr, cananmelisbulut@etu.edu.tr,

<sup>2</sup>Uzman, TUSAŞ, E-posta: aziztaner.asterlioglu@tai.com.tr

<sup>3</sup>Yüksek lisans öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: muhammedcihantezel@etu.edu.tr

<sup>4</sup>Prof. Dr, Makine Müh. Böl., E-posta: acar@etu.edu.tr

radar sinyallerini emen boyalar kullanılırken uçak ön camı gibi şeffaf bölgelerde Jaumann absorber denen şeffaf plakalar arasında ince iletken filmler olan yapılar kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, uçak kanopisine (teknik olmayan dilde ön cam diyebileceğimiz parça) kuş çarpması olayının bilgisayar ortamında simüle edilerek çarpma anında kanopi üzerinde oluşabilecek hasar ve deformasyonların belirlenmesi, radar kesit alanı hesaplama yazılımları kullanılarak radar kesit alanı belirlenmesi ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda gerekli optimizasyon ve iyileştirmelerin yapılması amaçlanmaktadır. Önerilen proje ile TUSAŞ'ın 5.nesil savaş uçağı olan Milli Muharip Uçak (MMU)'da kullanılacak bir kanopi ön tasarımının TUSAŞ'a kazandırılması hedeflenmektedir.

## YÖNTEM

### Kuş Modelinin Oluşturulması

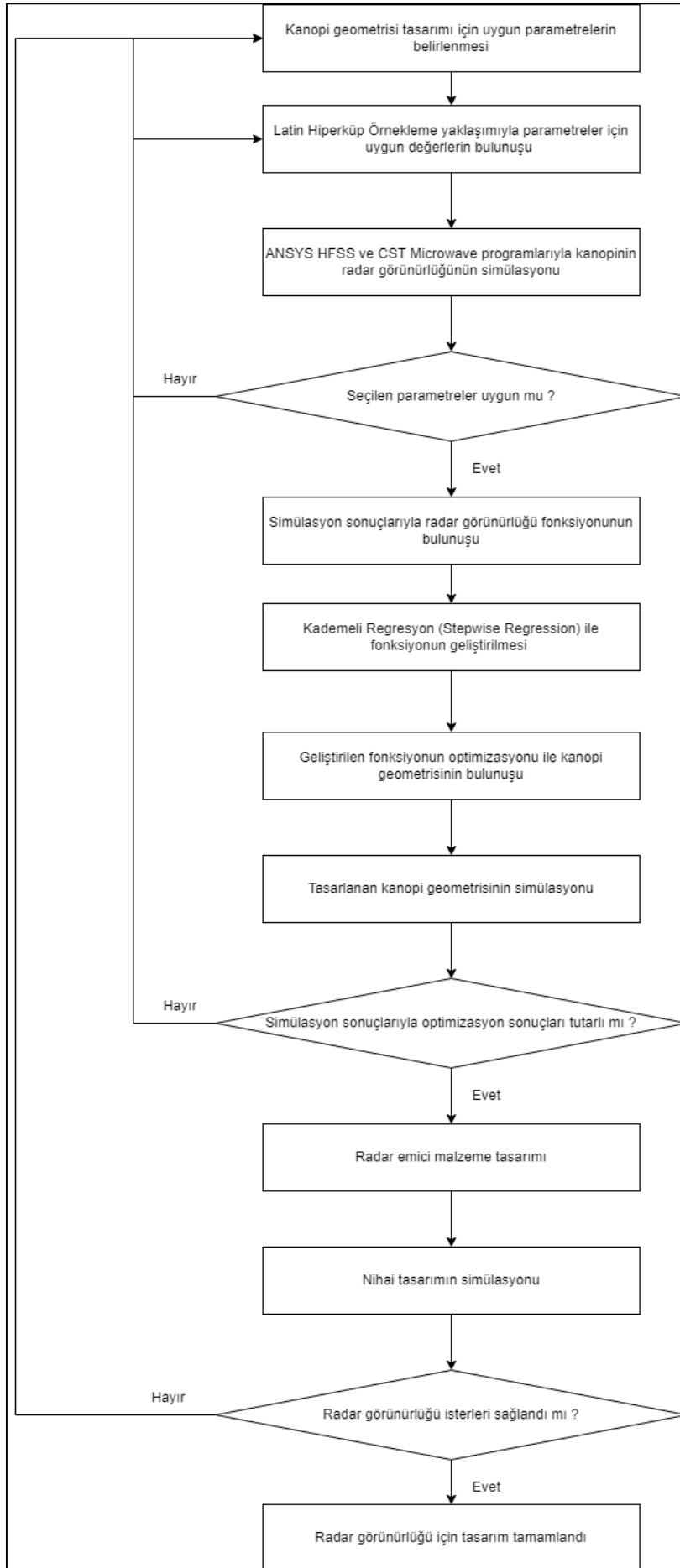
Çalışma kapsamında ilk olarak kuş çarpmasının önemi ve konuyla ilgili istatistiksel bilgiler ve raporlar ile FAA ve EASA tarafından belirlenen regülasyonlar incelenmiştir. Öncelikle, çarpma analizlerinin bilgisayar ortamında modellendiği literatür çalışmaları incelenmiştir. Analizde kullanılacak olan kuşun geometrik olarak nasıl modellendiği, malzeme modeli, kuş için kullanılacak durum fonksiyonları gibi parametreler incelenmiş olup, bu çalışmada ele alınan problem için en uygun olan model ve parametreler belirlenmiştir. Kuşun modellenmesi için literatürde sıklıkla kullanılan Düzgünleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (ing. smoothed particle hydrodynamics, SPH) yöntemi tercih edilirken, kuşun çarpacağı kanopi ise 8 düğümlü katı elemanlarla modellenmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen tüm analizler LS-DYNA sonlu elemanlar programında yapılmıştır. Kuş modelinin doğrulanması için, kuşun bir rijit plaka ile çarpışması için oluşturulmuş olan sonlu elemanlar modeli, literatürdeki verilerle karşılaştırılmıştır.

Kuş modelinin doğrulanmasından sonra TUSAŞ tarafından sağlanan kanopi geometrisi ile kanopi malzeme modeli oluşturulmuştur. Son olarak, farklı geometri ve malzeme türüne sahip kanopilerin kuş çarpması tehdidine karşı yapısal performansı ve radar kesit alanları karşılaştırarak TUSAŞ isterlerini karşılayan bir kanopi tasarımı gerçekleştirilmiştir.

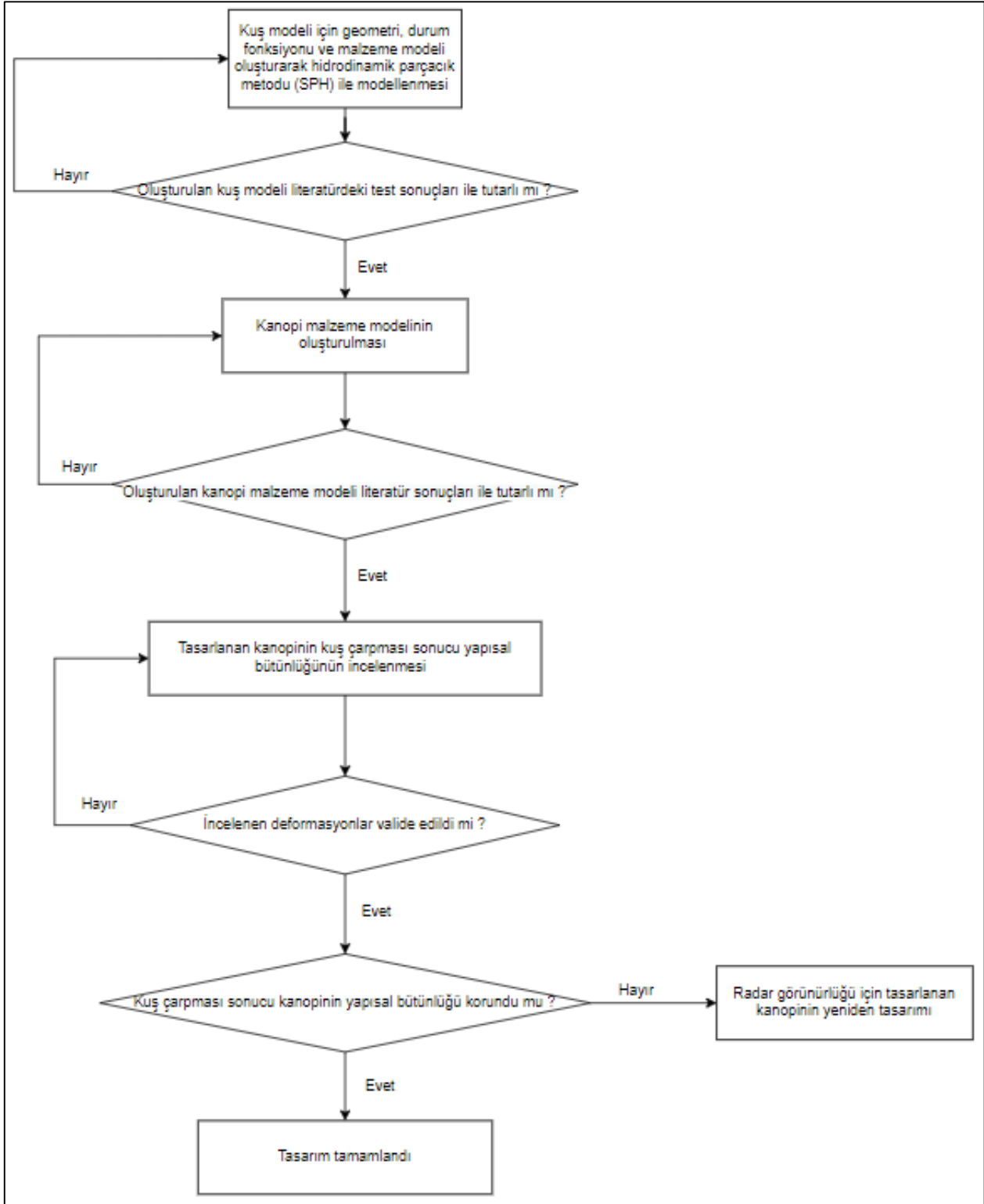
### Radar Görünürlüğü Tahmini

Uçağın radar görünürlüğü, taktik görevlerin tamamlanması için önemli bir husustur. Hayalet uçaklarda radar görünürlüğünün minimum olması istenir. Radar görünürlüğünü azaltmak için kullanılan bazı yöntemler yapı için en uygun şeklin belirlenmesi, radar emici malzemeler kullanılması, pasif iptal ve aktif iptal yöntemleri kullanılmasıdır. Bu çalışmada radar görünürlüğünü azaltmak için kanopinin geometrisi ve radar emici malzemesi üzerine çalışılmıştır. Kanopi geometrisi için, kanopi üzerinde uygun parametreler belirlenerek vekil tabanlı optimizasyon uygulanmıştır. Bu kapsamda, kademeli regresyon (stepwise regression) yöntemi kullanılarak radar görünürlüğü fonksiyonu elde edilmiştir. Radar emici malzeme ise uygun katmanların (Salisbury Screen, Dallenbach Layer) seçimi ile tasarlanmıştır. Radar görünürlüğü hesabı için CST Microwave yazılımı kullanılmıştır.

Uçak kanopisinin nihai tasarımı belirlenirken kullanılan, radar görünürlüğü için tasarım akış şeması Şekil 1'de, kuş çarpması sonucu kanopinin yapısal bütünlüğünün incelenmesi için oluşturulan akış şeması Şekil 2'de verilmiştir. Radar görünürlüğünü azaltan bir kanopi tasarımı, kuş çarpması ele alındığında yapısal bütünlüğünün korunması durumunda kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir.



**Şekil 1.** Radar Görünürlüğü için Tasarım Akış Şeması

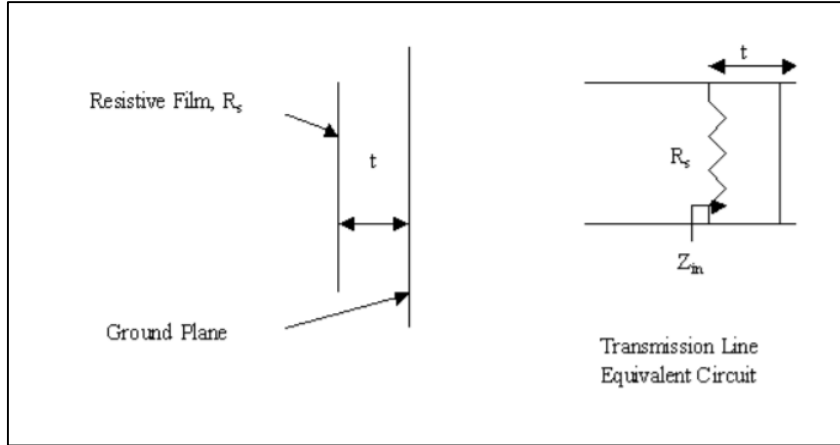


**Şekil 2.** Kuş Çarpması Sonucu Kanopinin Yapısal Bütünlüğünün İncelenmesi için Akış Şeması

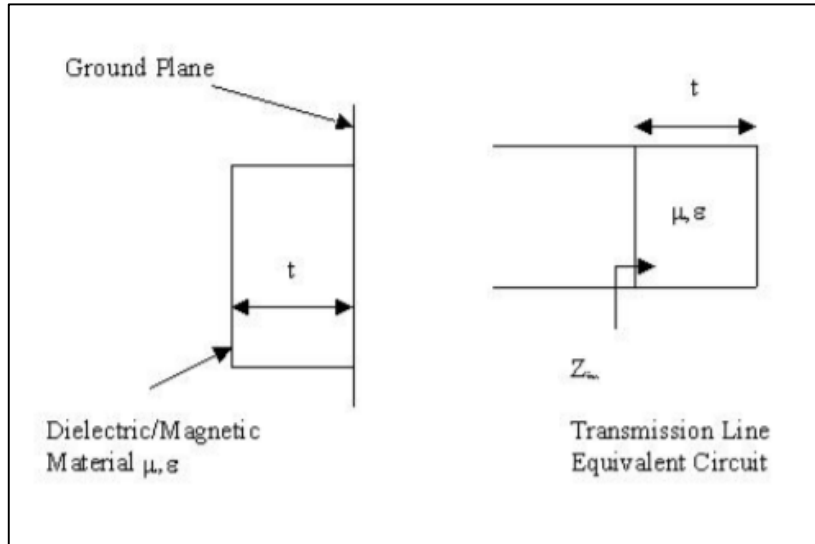
Radar emici malzeme için kullanılacak katmanlar Şekil 3 ve Şekil 4 üzerinde görüldüğü gibidir. Kullanılan malzemenin yansıtma katsayısının minimum olması istenir. Yansıtma katsayı Denklem 1 ile hesaplanabilir.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (1)$$

Verilen denklemde  $Z_{in}$  sistemin giriş empedansını,  $Z_o$  ise sistemin çıkış empedansını temsil etmektedir.



Şekil 3. Salisbury Screen [Yuzcelik, 2003]

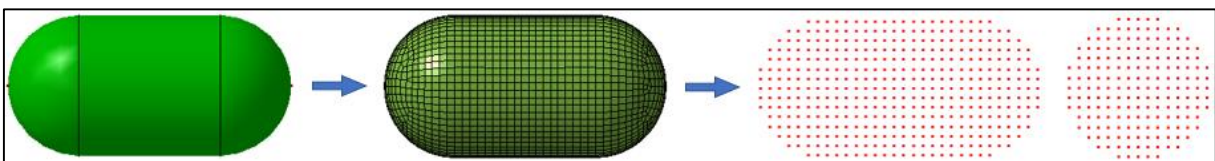


Şekil 4. Dallenbach Layer [Yuzcelik, 2003]

## UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

### Kuş Modelinin Oluşturulması

Kuş geometrisi için silindirik geometriye sahip ve yarım küre uçlu kuş geometrisi modeli tercih edilmiştir [Lavoie vd., 2009]. Lavoie'nin çalışmasında 1 kg'lık bir kuş, 100 m/s hızla,  $0.305 \times 0.305 \text{ m}^2$  boyutlarında, 0.0127 m kalınlığındaki sabitlenmiş bir plakaya çarpıtılmıştır. Başlangıçta 100 m/s hıza sahip olan kuşun plaka ile teması sonrası hızı 95 m/s olarak kaydedilmiştir. Bu nedenle, sayısal çalışmada kuşun hızı 95 m/s, kütlesi 1 kg ve yoğunluğu  $950 \text{ kg/m}^3$  kabul edilmiştir. Yarım küre uçlu silindirik kuş modelinin çapı 93 mm ve uzunluğu 186 mm'dir. Bu çalışmada kullanılan kuş modelinde, yazarların önceki bir çalışmasında [Tezel vd., 2021] olduğu gibi silindirik geometri kullanılmıştır. Kullanılan modelin parçacık dağılımı Şekil 5'te gösterilmiştir.

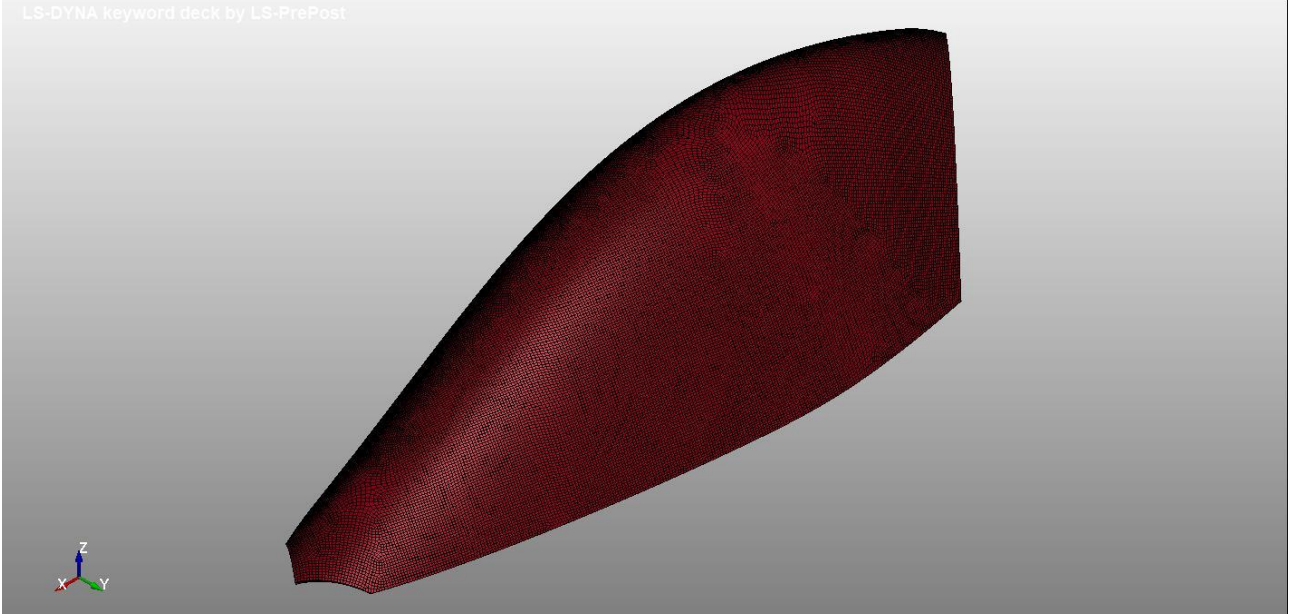


Şekil 5. SPH Üretim Aşaması ve Partikül Dağılımı

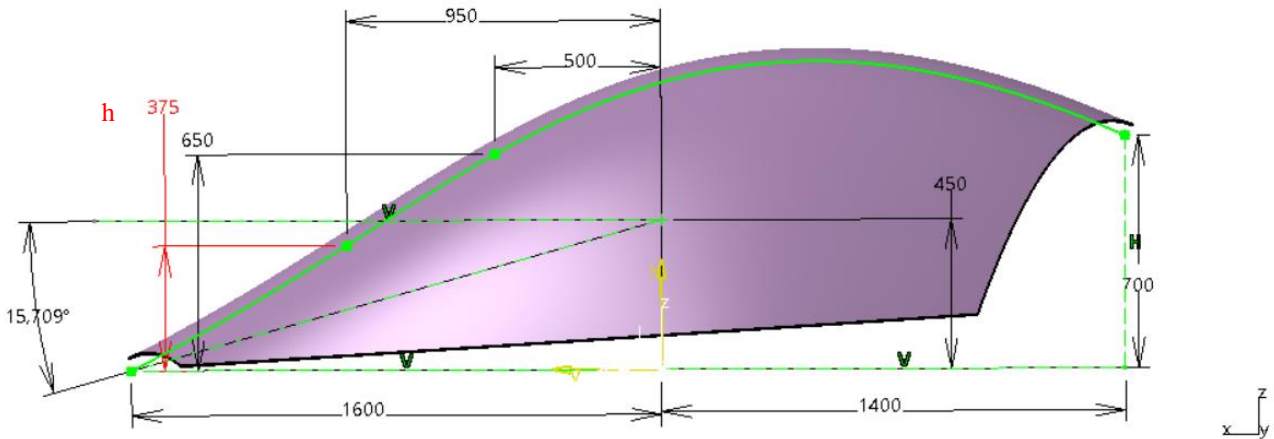
### Kanopinin Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Geometri ve malzeme bilgisi TUSAŞ tarafından sağlanan kanopi geometrisinin LS-DYNA yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. 3 katmandan oluşan kanopi modelinde, ilk katman 3.84 mm kalınlığında Polikarbonat, ikinci katman 1.25 mm kalınlığında TPU, son katman 5.44 mm kalınlığında Polikarbonat malzeme bilgisi kullanılarak oluşturulan kanopinin sonlu elemanlar modeli Şekil 6'da yer almaktadır. Sonlu elemanlar modelinde sayısal olarak her bir katman katı elemanlarla modellenmiştir.

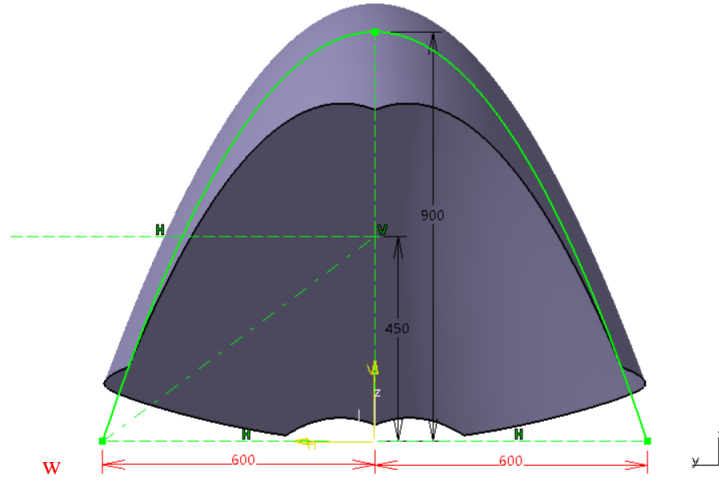
Bu çalışmada TAI tarafından verilen kısıtlı kanopi geometrisi üzerinde 2 parametre değeri değiştirilmiştir. Bu projede 15 farklı kanopi geometrisi üzerinde sonlu elemanlar analizi ve radar kesit analizi yapılmıştır. Değiştirilen parametreler, h ve w değerleri Şekil 7 ve Şekil 8'de kırmızı ile gösterilen değerlerdir.



**Şekil 6.** Kanopi Sonlu Elemanlar Modeli



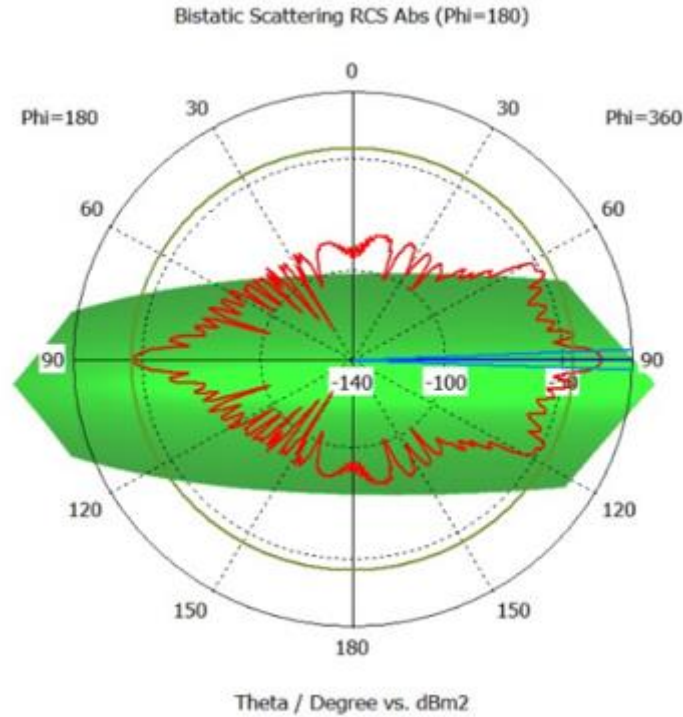
**Şekil 7.** Kanopinin Yandan Görünümü



**Şekil 8.** Kanopinin Arkadan Görünümü

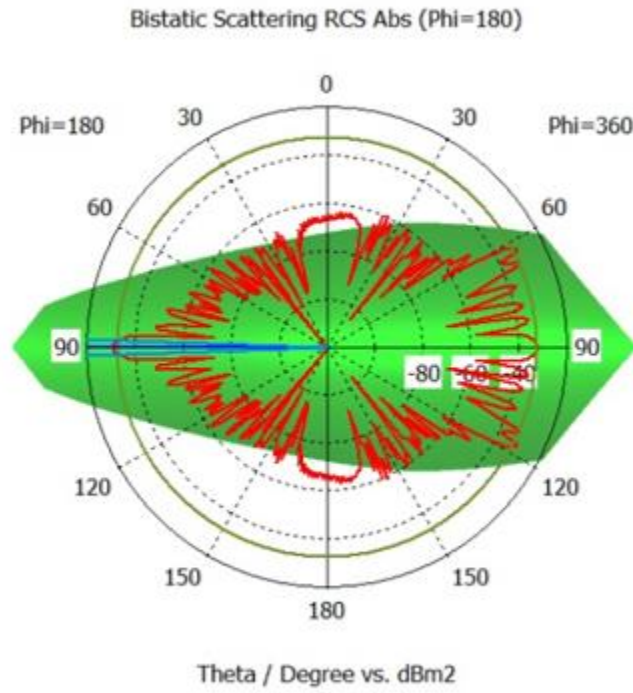
### Kanopinin Radar Görünürlüğünün Simülasyonu

Kanopinin radar görünürlüğü CST Microwave programı ile simüle edilmiştir. Simülasyonda polikarbonat malzeme kullanılmış olup radar frekansı 5MHz verilmiştir. İncelenen simülasyonda düzlem dalga (theta) 90 derece olarak alınmıştır. Yumuşak ve keskin hatlı iki kanopi için radar görünürlüğü analizi sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Daha detaylı analizi ise sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilmiştir. Keskin kenarlı kanopinin radar görünürlüğünün daha az olduğu görülmektedir.

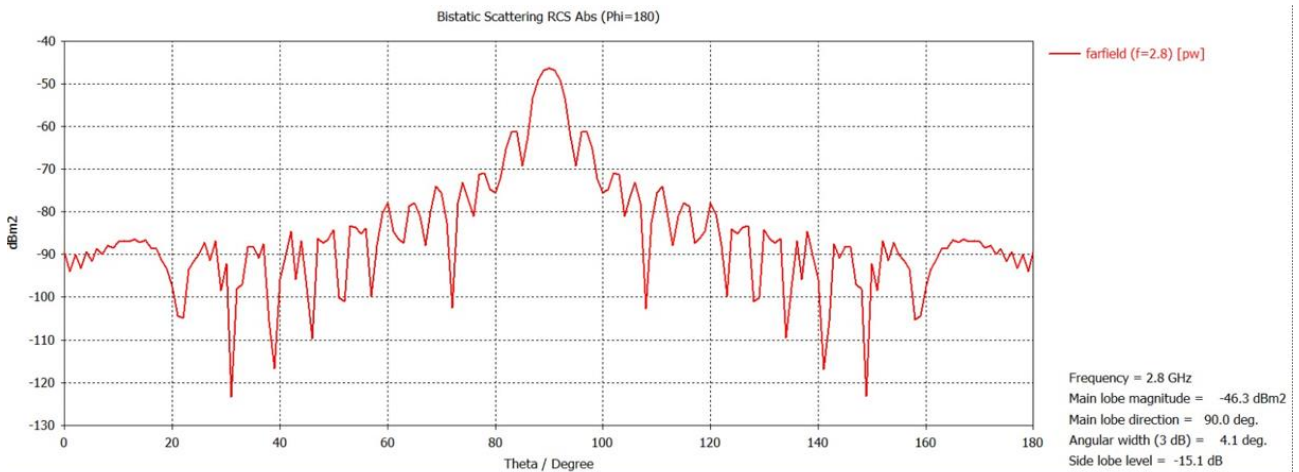


**Şekil 9.** Yumuşak Hatlı Kanopi

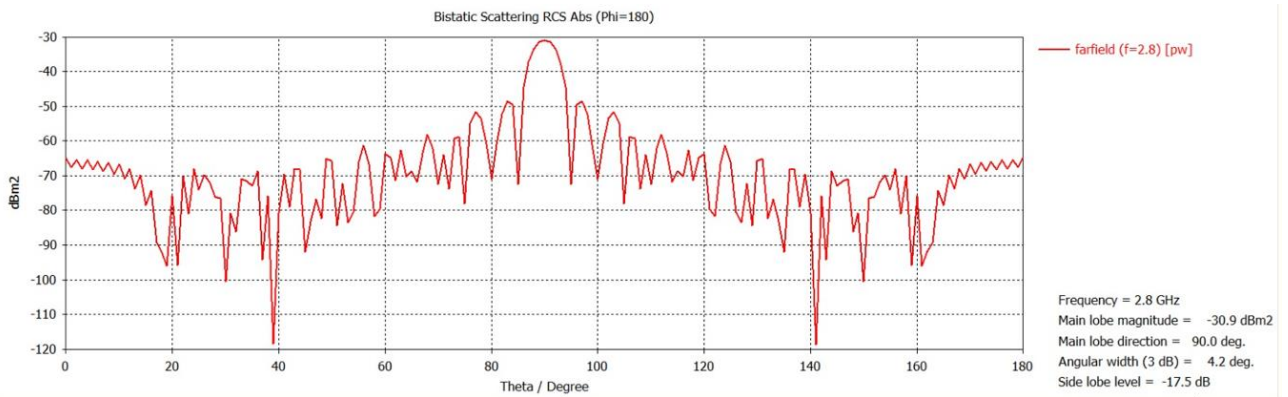




Şekil 10. Keskin Hatlı Kanopi



Şekil 11. Yumuşak Hatlı Kanopinin Radar Görünürlüğü Analizi




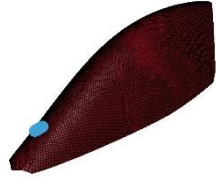
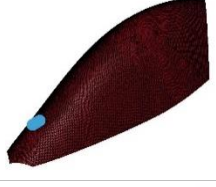
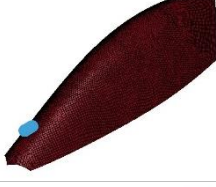
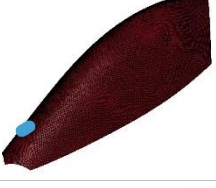
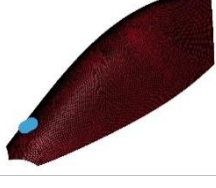
Şekil 12. Keskin Hatlı Kanopinin Radar Görünürlüğü Analizi

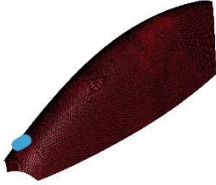
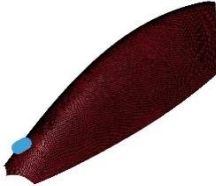
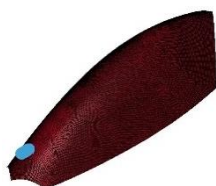
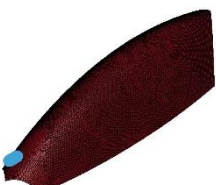

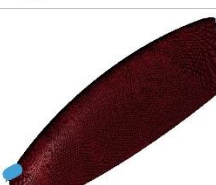





## SONUÇ

Katmanların malzeme ve kalınlık değerleri tüm konfigürasyonlarda sabit tutulmuştur. Kum Saati Enerji/İç Enerji değeri tüm konfigürasyon değerleri için %10'un altındadır. Kanopiye uygulanan darbe sonuçlarına göre kanopide herhangi bir yırtılma meydana gelmemiştir. Ayrıca tüm konfigürasyonlarda analizler tamamlandığında kanopinin orijinal durumuna dönme eğilimi gözlemlenmiştir. Kuş çarpması analizi sonucunda Tablo 1'de gösterildiği gibi tüm konfigürasyonlarda yapısal bütünlük korunmuştur. Her bir geometri için elde edilen Radar Kesit Alanı sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Sonuçlar doğrultusunda -29dBm<sup>2</sup> ile -52dBm<sup>2</sup> arasında değişen değerler bulunmuştur. Bu değerle genelde h değeri ile ters orantılı bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir.

**Table 1.** Gereksinimleri Karşılıyan Kanopi Yapıları

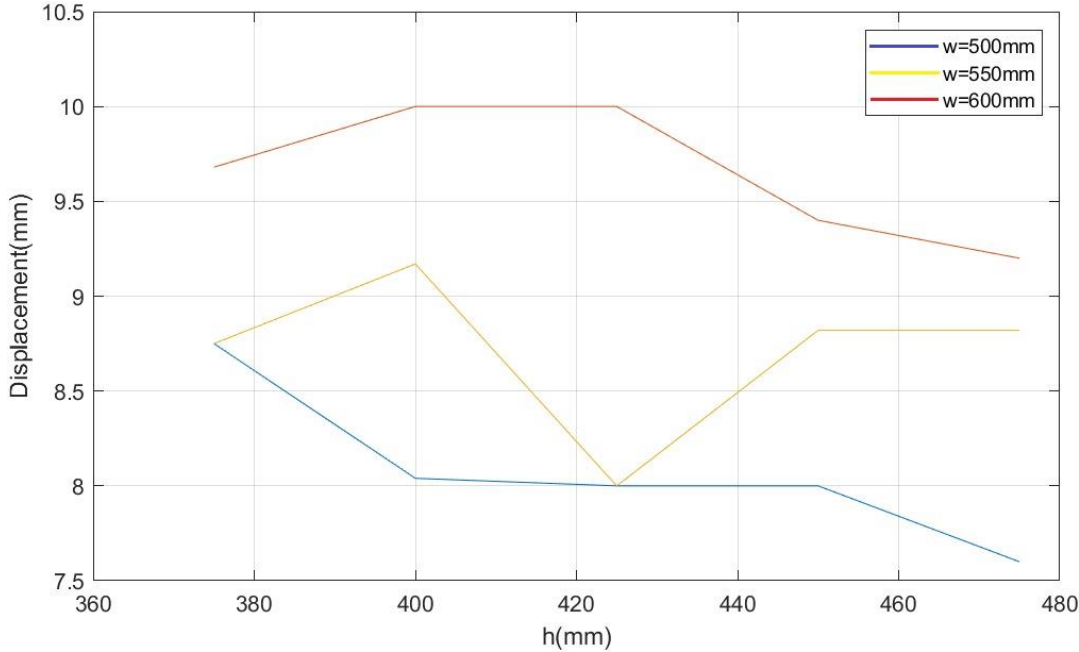
Sıra	Alternatif Konfigürasyonlar	Değişen Parametreler (mm)	Kuş Çarpması Testi	Maksimum Radar Kesit Alanı (dB/m <sup>2</sup> )
1		h = 375 w = 500	Başarılı	-30
2		h = 375 w = 550	Başarılı	-29.4
3		h = 375 w = 600	Başarılı	-29.1
4		h = 400 w = 500	Başarılı	-33.2
5		h = 400 w = 550	Başarılı	-33
6		h = 400 w = 600	Başarılı	-33.2

7		$h = 425$ $w = 500$	Başarılı	-36.7
8		$h = 425$ $w = 550$	Başarılı	-37.2
9		$h = 425$ $w = 600$	Başarılı	-38.1
10		$h = 450$ $w = 500$	Başarılı	-43.5
11		$h = 450$ $w = 550$	Başarılı	-41.2
12		$h = 450$ $w = 600$	Başarılı	-52.5
13		$h = 475$ $w = 500$	Başarılı	-51.1
14		$h = 475$ $w = 550$	Başarılı	-42.2
15		$h = 475$ $w = 600$	Başarılı	-41.4

Çalışmanın temel amacı olan RCS değeri küçük ve kuş çarpması sonucunda hasarsız olarak görevine devam edecek optimal bir kanopi tasarımı için TAI tarafından sağlanan geometrik kısıtlar içerisinde 15 farklı geometri tasarlanmıştır. Ardından bu geometriler LS-DYNA ve CST microwave simülasyon yazılımları ile mekanik ve elektronik olarak değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları optimal geometrinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Kuş çarpması simülasyonlarında elde edilen veriler hiçbir geometrinin kırılmadığını ve plastik deformasyona uğramadığını göstermektedir. Her bir geometri için elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri Şekil 13'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre h değerinin artması ile yer değiştirme genel olarak azalma eğilimindedir. Bunun sebebi h değeri arttıkça geometri daha yumuşak hatlara sahip olmaktadır ve gerilme azalmaktadır. Ayrıca w değeri arttıkça, yer değiştirme değeri artmaktadır. Bunun sebebi ise geometrinin genişlemesidir. Kuş geometriye tam ortadan çarptığı için geniş bir geometride yüksek miktarda yer değiştirme oluşmaktadır. Mekanik olarak optimal geometride h değerinin fazla olması, w değerinin de az olması kanopinin kuş çarpmasından minimum düzeyde etkilenmesi için önem arz etmektedir.

Radar Kesit Alanı simülasyonlarından elde edilen verilere göre h değerinin artması genel olarak Radar Kesit Alanı değerini azaltmaktadır. Çünkü h değeri arttıkça geometri daha yumuşak hatlara sahip olmaktadır. Yumuşak hatlar örneğin bir küre radar dalgalarının çoğunu kaynaktan başka yerlere yansıtır. Bu sayede Radar Kesit Alanı küçülmüş olur. W değerindeki artış ise hatları yumuşatırken aynı zamanda geometrinin yüzey alanında ciddi artışa sebep olmaktadır. Yüzey alanı büyüdükçe daha fazla radar dalgası yansıtır ve bu da Radar Kesit Alanı'nda artmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle w değerinin etkisi, h değerinin etkisine göre daha karmaşıktır.

Değerlendirme yapılan 15 geometri içerisinde en büyük Radar Kesit Alanı -29.4 dBm<sup>2</sup> değeri ile 2 numaralı geometri olmuştur. En küçük RCS ise -52.5 dBm<sup>2</sup> değeri ise 12 numaralı geometri olmuştur. Yapılan mekanik simülasyon kuş çarpması testleri sonucunda hiçbir geometride kalıcı deformasyon gözlenmediği için Radar Kesit Alanı verileri üzerinde optimizasyon çalışması yapılarak, Radar Kesit Alanı değeri en düşük olan 12 numaralı geometri belirlenmiştir.



Şekil 13. Kanopi Geometrileri için Yer Değiştirme Sonuçları

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 20AG001 numaralı program altında, 20AG027 numaralı proje kapsamında ve 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında desteklenmektedir.

**Kaynaklar**

- Barber, J. P., Taylor, H. R., & Wilbeck, J. S. (1975). Characterization of Bird Impacts on a Rigid Plate, Air Force Flight Dynamics Laboratory Technical Report. AFFDL-TR-75-5.
- Grimaldi, A. (2011). SPH High Velocity Impact Analysis A Birdstrike Windshield Application. Department of Aerospace Engineering, University of Naples Federico II, Ph. D thesis.
- Lavoie, M. A., Gakwaya, A., Ensan, M. N., Zimcik, D. G., & Nandlall, D. (2009). Bird's substitute tests results and evaluation of available numerical methods. *International Journal of Impact Engineering*, 36(10-11), 1276-1287.
- Metz, I. C., Ellerbroek, J., Mühlhausen, T., Kügler, D., & Hoekstra, J. M. (2020). The bird strike challenge. *Aerospace*, 7(3), 26.
- Tezel M.C., Y. Yamaner, B.A. Çoğuz, E. Acar, Exploring Design Options for Wing Leading Edge against Bird Strike, accepted to be published in the AIAA Journal.
- Yuzcelik, Cihangir Kemal (2003). Radar Absorbing Material Design. Master of Science In Systems Engineering from the Naval Postgraduate School. Theses and Dissertations. California.