

BİR SAVAŞ UÇAĞINDA PASİF AKIŞ DÜZENLEYİCİSİNİN SÜRÜKLEME DİRENCİNİN AZALTILMASI VE RADAR KESİT ALANI İYİLEŞTİRİLMESİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

Ahmet İVENÇ¹, Yahya KARAKAŞ¹, Melike
KAYA¹ ve Samet TORAMAN¹
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya

Onur KESİMOĞLU²
BAYKAR Teknoloji, İstanbul

Muammer ÖZGÖREN³
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, hayalet savaş uçakları gibi hava araçlarının akış kontrol elemanları etrafındaki akış yapılarını analiz ederek radar görünürlüğünü azaltmak ve aerodinamik verimliliği artırmaktır. Akış ayrılmalarının olumsuz etkilerini azaltmak için pasif akış kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada, akış düzenleyicilerin geometrisi ve farklı türbülans modellerinin etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, radarda görünmezlik ve aerodinamik performansı iyileştirmek için kullanılan yöntemleri belirlemeye yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, literatüre yeni bir bakış açısı sunmayı ve gelecekteki çalışmalar için temel oluşturmayı hedeflemektedir. Onera M-6 deneysel kanadı kullanılarak validasyon çalışması yapılmıştır. Validasyon çalışmasının tamamlanmasının ardından, dokuz adet ogive şekilli ve dokuz adet elmas şekilli akış düzenleyicinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ve radar kesit alanı (RKA) analizleri gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar sonucunda, ogive şekilli akış düzenleyicilerin elmas şekilli akış düzenleyicilere göre daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ogive yapısındaki pasif akış düzenleyicilerin incelenmesi sonucunda elde edilen maksimum radar kesit alanı değeri 1.791 m^2 ve en az sürüklenme katsayısı değeri $0,01647$ olarak hesaplanmıştır. Elmas şekilli pasif akış düzenleyicilerin incelenmesi sonucunda elde edilen maksimum radar kesit alanı değeri 2.163 m^2 ve en az sürüklenme katsayısı değeri $0,0187$ olarak hesaplanmıştır.

GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ve değişen savaş paradigmaları radara görünmezlik teknolojilerinin önemini artırmıştır. Bu teknolojiler, düşman radarları tarafından tespit edilmeyi güçleştirerek savaş uçaklarının düşman hattına radara görünmeden girip çıkmasını sağlar. Süpersonik şartlarda uçuş gerçekleştiren savaş uçakları, sürüklenme direncini azaltarak daha hızlı ve manevra kabiliyeti yüksek operasyonlar yapabilirler. Bu da kritik öneme sahip bir avantajdır, çünkü düşman hattına radar izi bırakmadan sızma ve operasyon gerçekleştirme yeteneği, stratejik üstünlük sağlar. Süpersonik hızlara çıkmak için tasarlanmış ve radar izi düşük olma isterleri dikkate alınınca günümüz hava araçları dış yüzeylerine gelen anten, kamera, ışık ve füze ikaz sistemi gibi parçaları gövde içerisine alınmaya çalışıldığı görülmektedir. Elektro-optik hedefleme sistemi (EOTS), kontrol yüzeyleri için kullanılan hidrolik ve servo sistemleri, ışıklar vb. sistemler, boyutları ve çalışma koşulları nedeni ile gövde üzerinde çıkıntı yapmaktadırlar [Mamur, 2023]. Şekil 1'de görüldüğü gibi

¹ Lisans öğrencisi., Uçak Müh. Böl., E-posta: 18030021074@ogr.erbakan.edu.tr, yahyakarakas@ogr.erbakan.edu.tr, 19030021091@ogr.erbakan.edu.tr, samettoraman@ogr.erbakan.edu.tr

² Uzman, E-posta: kesimogluonur@gmail.com

³ Prof. Dr. Makine Müh. Böl., E-posta: mozgoren@erbakan.edu.tr

gövde üzerinde çıkıntı yapan elektro-optik hedefleme sistemi radar kesit alanı isterlerine uygun tasarlanmışken kontrol yüzeyleri hidrolik sistemi için tasarlanmış olan akış düzenleyiciler, düşük sürüklenme direnci, yüksek taşıma kuvveti, kararlılık ve kontrol, gürültü azaltma gibi aerodinamik isterler dikkate alınarak tasarlanmıştır. Elektro-optik hedefleme sistemi (EOTS) akış ayrılmalarından kaynaklı sürüklenme direnci meydana getireceği ve kontrol yüzeyleri hidrolik sistemi için tasarlanmış olan akış düzenleyicilerinin radar kesit alanını artırıcı etki göstereceği öngörülmektedir. Şekil 1'deki J-20 ve diğer savaş uçakları incelendiği zaman bu durumun değişmediği görülmektedir.

Bir akış içerisinde hareket eden cismin ön ve arka kısmındaki basınç farkı, cisim etrafında oluşan akış ayrılmasından dolayı sürekli olmayan sürüklenme direnci oluşturur. Aynı zamanda cisimler üzerinde akış yapısından kaynaklanan titreşimler istenmeyen yönde hareketlere neden olur. Bu da hareket halindeki hava araçlarının manevra kabiliyetlerini olumsuz etkiler. Bunların yanında cisimler üzerinde meydana gelen akış ayrılması, girdap kopması, türbülans etkileri gibi akış karakteristiklerinin kontrol edilmesi için cismin geometrisinin optimize edilmesi gerekir. Radar kesit alanı iyileştirmesi istenen hava araçlarında bu tür etkiler dikkate alınarak aerodinamik koşulların da korunduğu çok disiplinli bir yaklaşım ile geometrinin oluşturulması hedeflenmektedir.



(a)

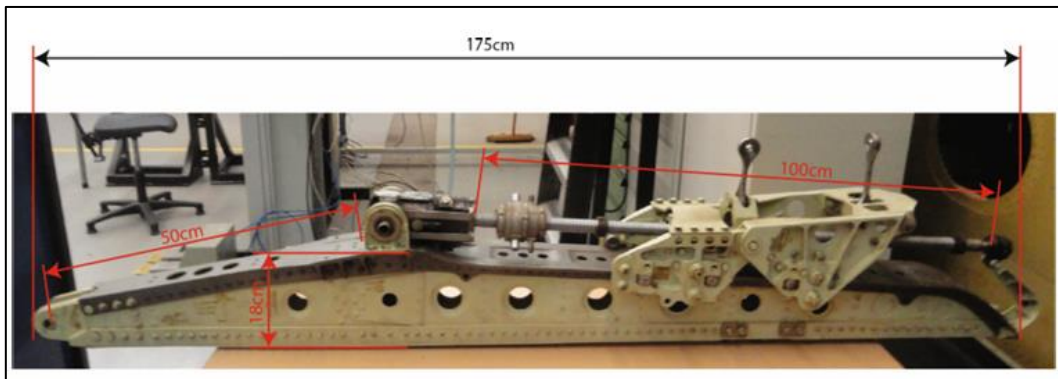
(b)

Şekil 1: J 20 Savaş uçağı (a) Pasif akış kontrol uygulama görseli (b) İşaret ışıkları

YÖNTEM

Geometrinin Oluşturulması:

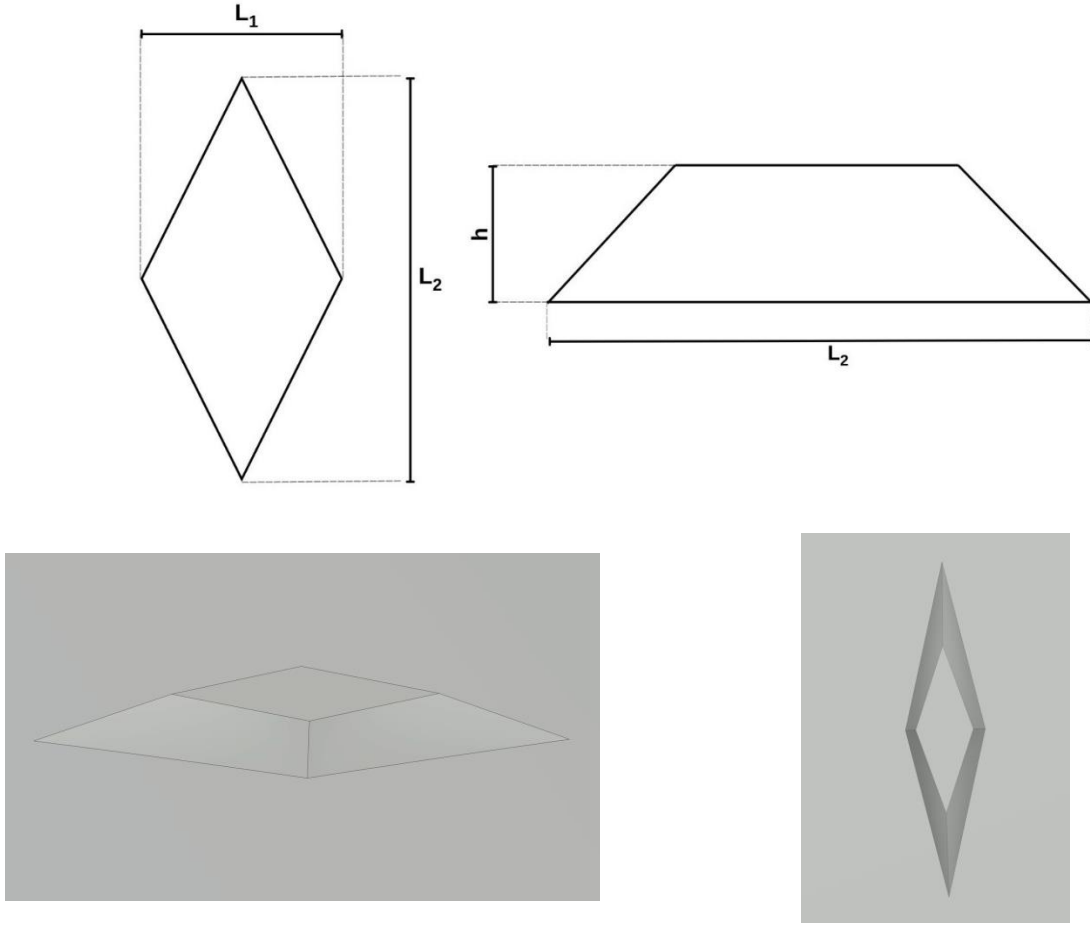
Çalışmamız kapsamında Zaccai ve ark. (2016) çalışmasında yer alan eyleyici tasarım ve ölçüleri dikkate alınarak akış düzenleyici (fairing) oluşturulmuştur. İlk geometri olarak eyleci elmas şeklinde pasif akış düzeleyicisi ile kaplanmıştır [Zaccai, 2016].



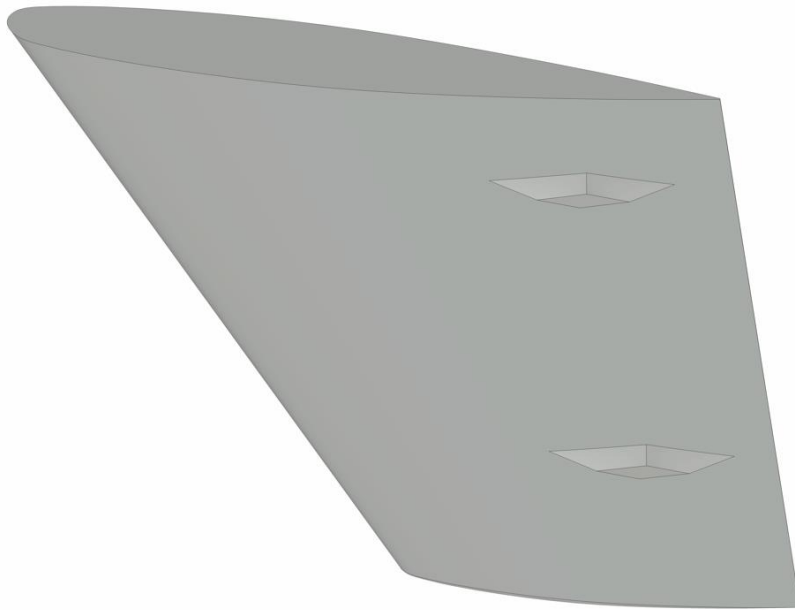
Şekil 2: Örnek bir eyleyici [Zaccai, 2016]

Şeklin kanat üzerindeki konumu için Howe ve Rorie (2000) ve arkadaşlarının çalışması baz alınarak öncelikle aileron geometrisine göre çizimlerin yeri belirlenmiştir. Savaş uçaklarında aileron çizimi için

kiriş uzunluğunun %26 'sını karşılayacak şekilde çizilirken kanat açıklığının %26'sına denk gelecek şekilde çizimler yapılmıştır. Uzunluk, yükseklik ve çap gibi parametrelerde değişiklik yapılarak farklı şekil konfigürasyonları modellenmiştir [Howe ve Rorie, 2000].



Şekil 3: Elmas şekillerin üst ve yan görünüşü

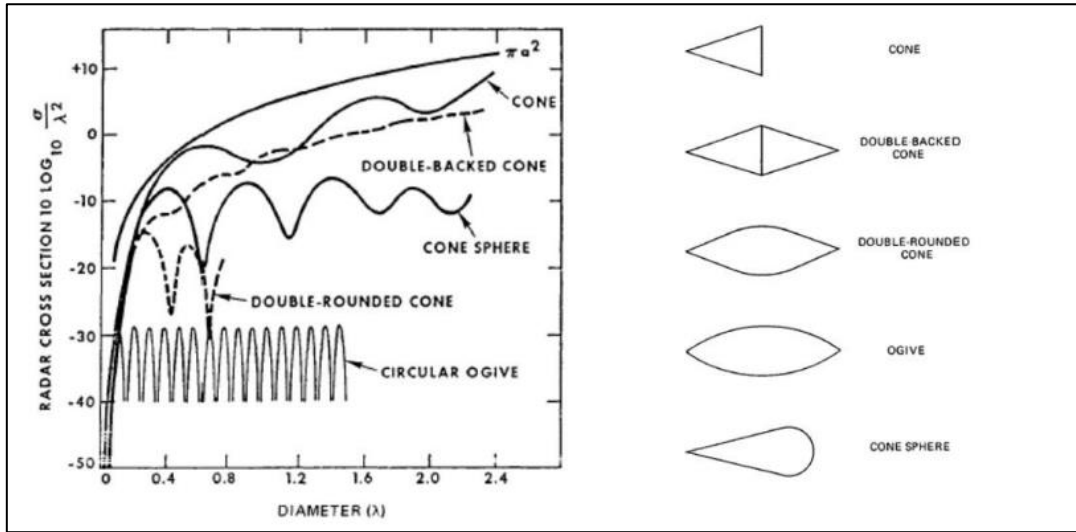


Şekil 4: Elmass şekilli akış düzenleyicisi modellenmiş kanat

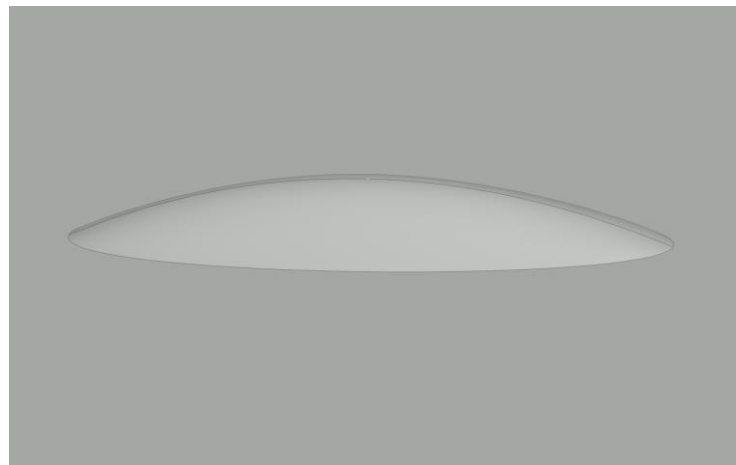
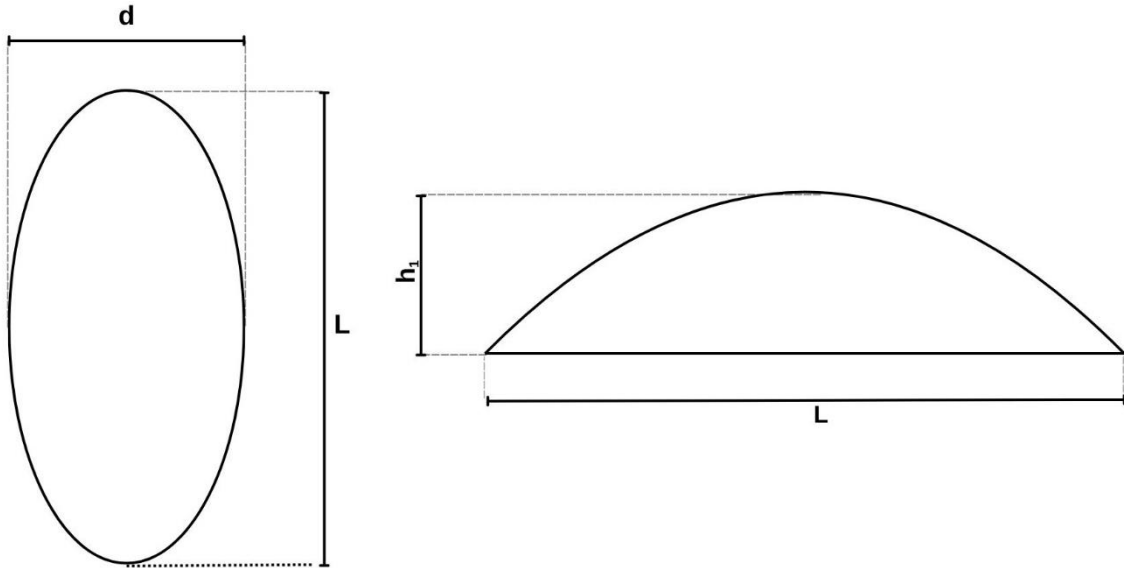
Tablo 1. Parametrik Değişkenler

Model No	Parametrik Değişkenler [mm]
1	L ₁ =190 L ₂ =95 h=20,57
2	L ₁ =190 L ₂ =95 h=22,57
3	L ₁ =190 L ₂ =95 h=25,57
4	L ₁ =200 L ₂ =100 h=20,57
5	L ₁ =200 L ₂ =100 h=22,57
6	L ₁ =200 L ₂ =100 h=25,57
7	L ₁ =210 L ₂ =105 h=20,57
8	L ₁ =210 L ₂ =105 h=22,57
9	L ₁ =210 L ₂ =105 h=25,57

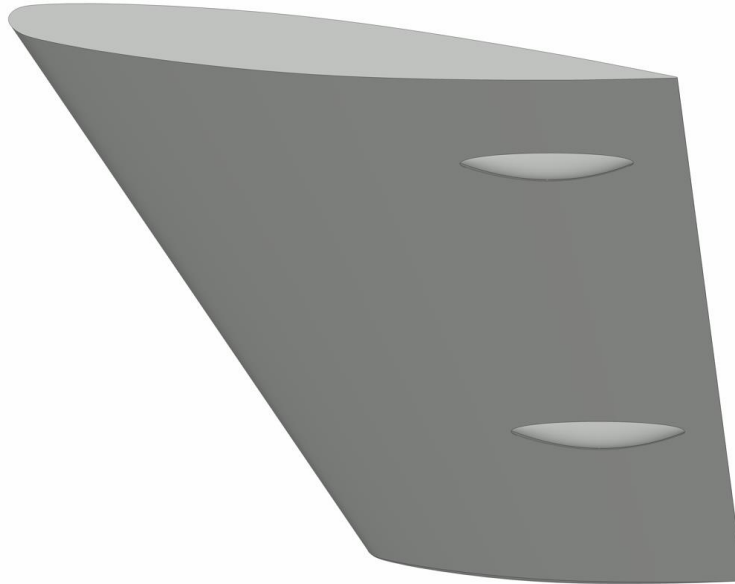
Eugene F. Knott'un "Radar Cross Section" isimli kitabında yer alan en düşük radar kesit alanı için ogive şeklinde pasif akış düzenleyicisi oluşturulmuştur. Tasarım parametreleri yükseklik (H) ve uzunluk (L) olarak belirlenmiştir [Knott, 1990].



Şekil 5: Şekillere bağlı RKA değişimi [Knott, 1990]



Şekil 6: Ogive geometri görünümü



Şekil 7: Ogive şekilli akış düzenleyicisi modellenmiş kanat

Akışkan Hesaplanması:

Bu proje bağlamında hedeflenen amaçlara ulaşabilmek için akış düzenleyicileri, radar kesit alanı ve sürükleme hakkında detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Sonra halihazırda bulunan tasarımlar incelenerek ve yeni geometrilerin tasarımı CAD programları ile tasarlanmıştır. Ses üstü hızlarda yaygın olarak kullanılan Spalart-Allmaras türbülans modelleri ile ön çözümler yapılmıştır. Değerlerin deneysel verilere yakın çıkması karşın tekrarlanan analizlerde deneysel verilerden sapmalar gözlenmiştir. Sapmaların küçük olmasına rağmen sonuçları etkilememesi adına SST k-w türbülans modeline geçilmiştir. SST k-w modeli ile yapılan analiz sonuçlarının daha tutarlı olduğu saptanmıştır. Birden fazla türbülans modeli ile yapılan analiz sonuçlarının SST k-w modelinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

SST k-w Türbülans Modeli [Menter, 1994];

Türbülans Kinetik Enerjisi (k) Denklemi:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (1)$$

Spesifik Dağılıma Oranı (ω) Denklemi:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2)$$

Harmanlama Fonksiyonu F_1 :

$$F_1 = \tanh \left(\left(\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right)^4 \right) \quad (3)$$

$CD_{k\omega}$:

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (4)$$

Tablo 2. Farklı Türbülans Modelleri ile hesaplanan taşıma ve sürüklenme direnç katsayılarının karşılaştırması

Türbülans Modeli	CD	CL
SST k-w	0,018265	0,26266
Spalart–Allmaras	0,018265	0,26516
DES / SST k-w	0,014583	0,25036
Standart k-w	0,044868	0,22104
Generalized k-w	0,018115	0,26691
Standart k-e	0,024005	0,25654
Realizable k-e	0,021121	0,26237
RNG k-e	0,021733	0,25859

Sürüklenme direnci, uçuş hattının zıt yönde veya bozulmamış akışın hareketiyle aynı yönde etki eden kuvvet bileşenidir. Sürüklenme direnci kuvveti viskoz kuvvetler, parazit etkenler, indüklenmiş direnç kuvveti, şoklardan oluşan dalga kuvvetleri, eğrisel yüzeylerde basınç değişimlerinin yatay bileşeni olan form direnç kuvvetinden oluşmaktadır. Bunların toplamı uçuş koşullarına bağlı olarak, uçağın hareketine karşı koyan direnç kuvvetidir [Houghton, 2010].

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S} \quad (5)$$

F_D : aerodinamik direnç kuvveti (N), S :akışa dik kesit kanat alanı (m^2), ρ : havanın yoğunluğu (kg/m^3), V_∞ : serbest akım hızı (m/s) temsil etmektedir temsil etmektedir. Burada $\frac{1}{2} \rho V_\infty^2$ işlemi akışın dinamik basıncıdır.

Radar Kesit Alanı:

Radar Kesit Alanı (RKA) arama radarından gelen elektromanyetik dalgalarla kesişerek, saçılan elektromanyetik dalgaların oluşmasına neden olan hedefin etkin izdüşüm alanıdır. Diğer bir ifadeyle, RKA hedefin maruz kaldığı radar işaretleri şeklindeki elektromanyetik dalgaların (enerjinin) ne kadarını geri saçtığını (yansıttığını) gösteren bir parametre olup bu enerjinin yansıtma yeteneğinin bir ölçüsü olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda elektromanyetik enerjinin bir kısma hedef tarafından absorbe edilirken ve bir kısmı da farklı yönlere saçılmaktadır. Böylece hedefin ilgili fiziksel alanı genelde RKA'sından daha büyük olmaktadır [N.Williams, 1987].

$$\sigma = P_s / S_i \quad (6)$$

Burada, σ : Radar kesit alanı (m^2), P_s :Hedeften saçılan güç (W) ve S_i :Hedefin aldığı güç yoğunluğu (Wm^{-2}) göstermektedir.

Radar kesit alanını düşürmek için 4 temel teknik mevcuttur. Bunlar şekillendirme(shaping), radar emici malzemeler (Radar absorbing materials, RAM), pasif iptal (passive cancellation) ve aktif iptaldir (active cancellation). Bu teknikler arasında, mevcut çalışmada RKA'yı azaltmak için yapılan şekillendirme tekniğini, transonik uçuşlarda uçak üzerindeki akış düzenleyicisinin açısından incelenmiştir. Şekillendirmenin amacı, gelen radar enerjisini tehdit alıcısından uzağa, tehdit olmayan uzaysal bölgelere sıçratmak ya da yönlendirmektir. Çoğu radar sistemi, alıcı ve vericinin yan yana yerleştirildiği monostatiktir, dolayısıyla şekillendirme, geri saçılım yönündeki yansımanın en aza indirilmesiyle ilgilidir. Şekillendirme uygulamasında iki yaklaşım benimsenebilir. Birincisi, düz yüzeyleri kavisli yüzeylerle değiştirmek ve böylece dar ama yoğun speküler lobları ortadan kaldırmaktır. Bu speküler yankıların büyüklüğünü azaltırken, yakın açılardaki genel yankı seviyelerini artırır. Diğer yaklaşım ise yoğunluğunu artırsa bile düz ve tekli kavisli yüzeyleri genişleterek speküler lobları daha da daraltmaktır [Knott, 1990]. Bu bilgiler kullanılarak şekillendirilen akış düzenleyicilerin (Flap track fairing) RKA analizleri ANSYS HFSS programında yapılmıştır.

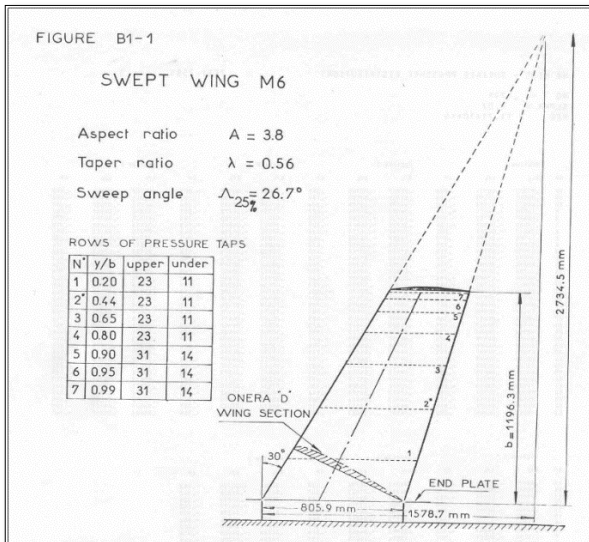
UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Akış Analizi

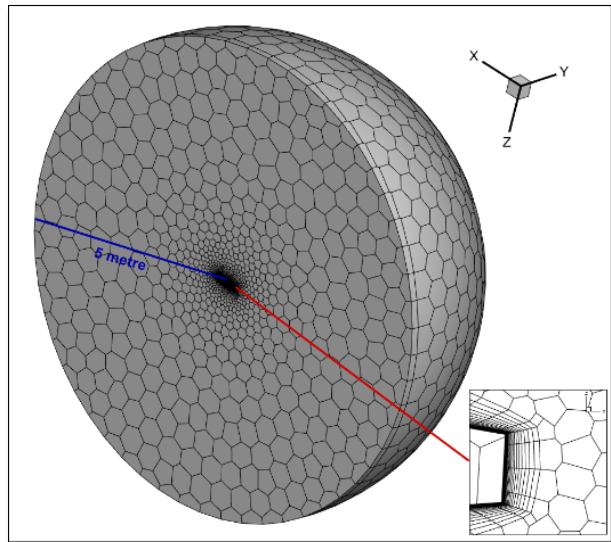
Bu çalışmada, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında kullanılan veriler [Schmitt ve Charpin, 1979] tarafından sunulmuştur. Deneysel veride Onera M6 kanadı kullanılmıştır (Şekil 8). Geometri ve üzerindeki değişiklikler CATIA tasarım programı ile yapılmış olup, ağ yapısı ve HAD analizleri Ansys Fluent aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. HAD analizleri için oluşturulan 10 m çapında yarım küreye sahip akış hacmi Şekil 9'de, ağ yapısı ise Şekil 10'da gösterilmiştir. Toplam hücre sayısı 8,425,749 ve düğüm sayısı 15,531,938 olarak belirlenmiştir. Maksimum skewness değeri, hücrelerin şekil bozukluğunu belirten bir parametre olup, 0.89 olarak belirlenmiştir. Y+ değeri, duvar yakınındaki hücrelerin kalitesini ve uygunluğunu gösteren boyutsuz bir parametre olup, 0.9 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. Alınan sınır koşulları değerleri

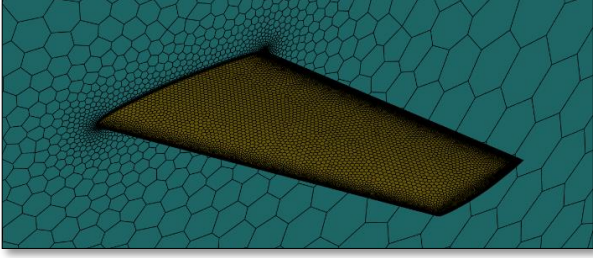
Toplam Basınç	98858.97 Pa
Toplam Sıcaklık	300 K
Mach Sayısı	0.84 Ma
Referans Alan	0.76532 m ²
Referans Uzunluk	0.64607 m
Hücum Açısı	3,06°
Yoğunluk	1,148 kg/m ³
Hız	291,56 m/s
Viskozite	1,789e ⁻⁰⁵ kg/(m.s)



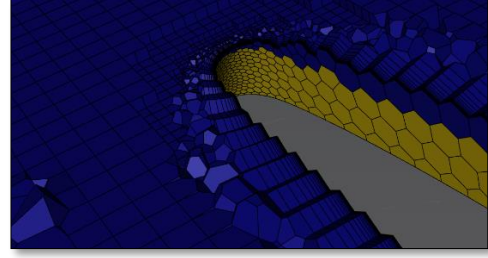
Şekil 8: Deneysel kanat ölçüleri



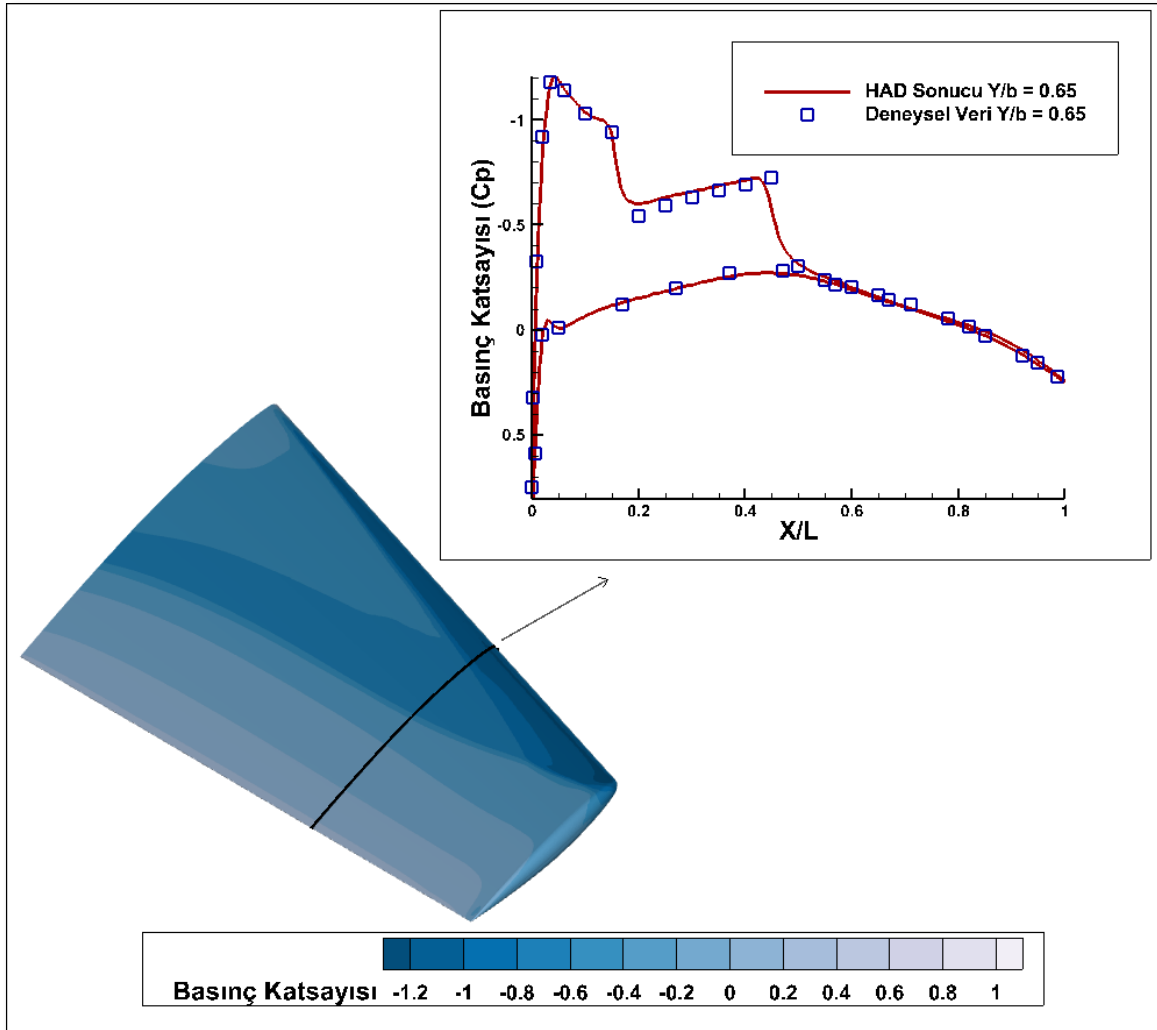
Şekil 9: Akış hacmi



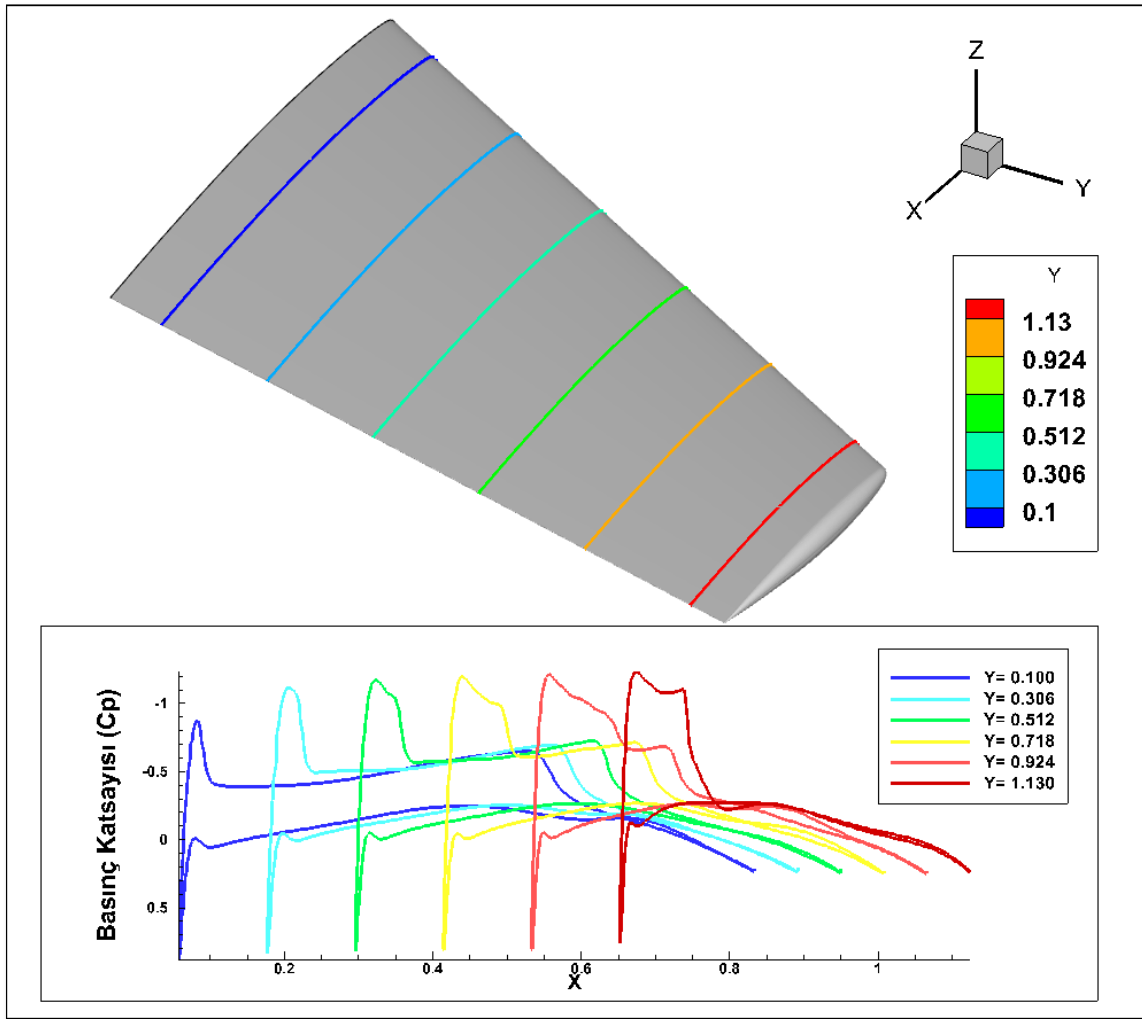
Şekil 10: Geometrinin ağ yapısı



Şekil 11: Sınır tabaka ağ yapısı

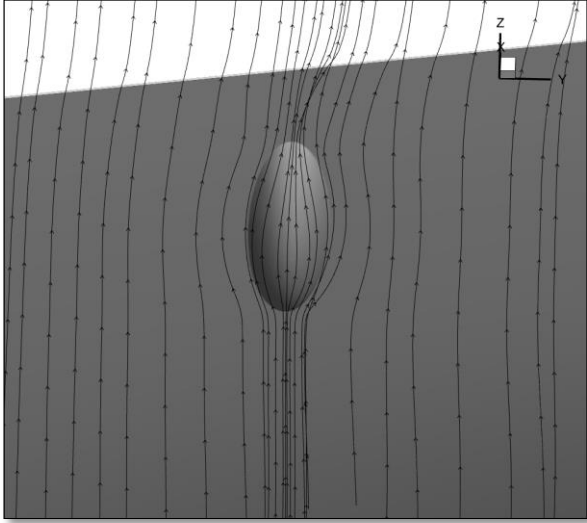


Şekil 12: Boyutsuz basınç katsayısı Cp'nin Karşılaştırması

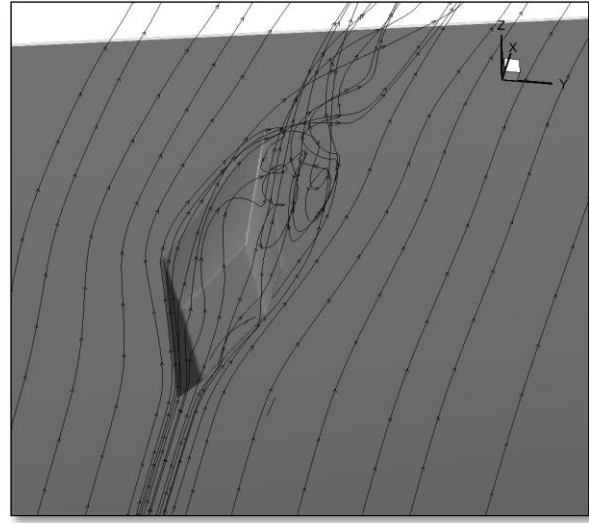


Şekil 13: Farklı kesitlerde basınç katsayısı C_p Grafikleri

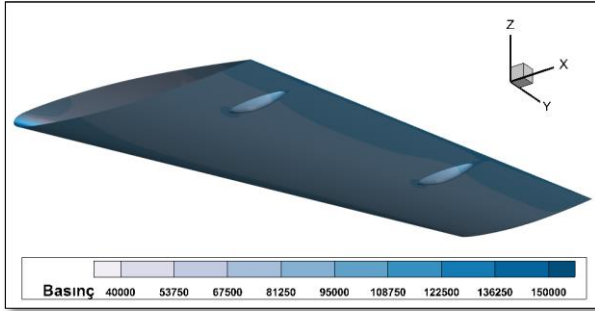
Validasyon çalışmasının tamamlanmasının ardından, dokuz adet ogive şekilli ve dokuz adet elmas şekilli akış düzenleyicinin HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, validasyon çalışmasında deneysel verilere en yakın sonuçları veren ağ yapısı kullanılarak yapılmıştır. Ogive ve elmas şekilli akış düzenleyicilerin akım çizgileri sırasıyla Şekil 14 ve Şekil 15'de gösterilmektedir. Elmas şekilli akış düzenleyicinin etrafındaki akış ayrılmaları açıkça gözlenmektedir. Bu durum, elmas şekilli düzenleyicinin daha belirgin türbülanslı akış yapıları oluşturduğunu göstermektedir. Akış düzenleyici tasarımlarının basınç dağılımı üzerindeki etkileri Şekil 16 ve Şekil 17'de gösterilmektedir.



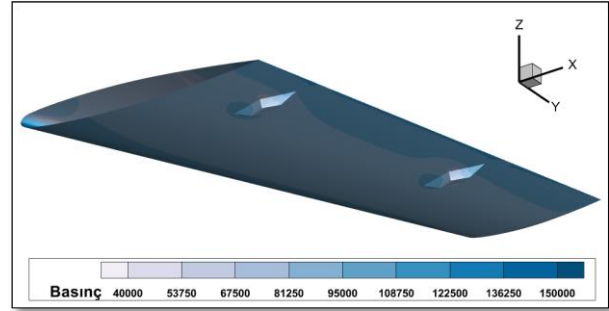
Şekil 14: Ogive şekilli akış düzenleyicisi akım çizgileri değişimi



Şekil 15: Elmas şekilli akış düzenleyicisi akım çizgileri değişimi



Şekil 16: Ogive şekilli akış düzenleyicisinin basınç dağılımı




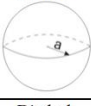


Şekil 17: Elmas şekilli akış düzenleyicisinin basınç dağılımı

Radar Kesit Alanı Analizi

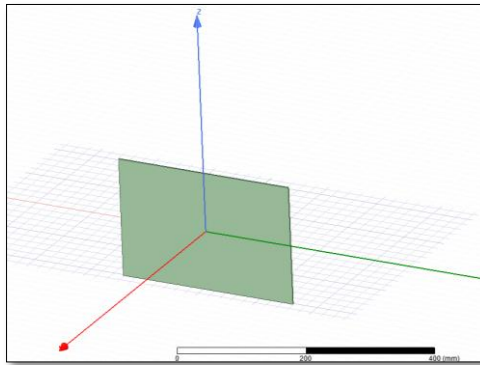
RKA analizleri yapılırken ANSYS HFSS programı tercih edilmiştir. Yöntem olarak Seken Işınlar Yöntemi (SIY) tercih edilmiştir. Temel olarak SIY yöntemi, Geometrik Optik (GO) ve Fiziksel Optik (FO) yaklaşımlarının avantajlarını birleştiren yüksek frekanslı bir yöntemdir. Frekans seçimi yapılırken SIY yönteminin yüksek frekanslarda doğru sonuçlar vermesi dikkate alınmıştır. Türkiye’inde sahip olduğu S-400 gibi sistemlerin kullandığı S-bandı olan 3 GHz seçilmiştir. Amacımız şekillendirme ile radar kesit alanını azaltmak olduğu için analizler yapılırken malzeme olarak ANSYS HFSS programı içerisinde 3D katılar için ideal iletken olarak kullanılan PEC (Perfect Electric Conductor) malzeme seçilmiştir. Elektromanyetik dalgaların geliş açısı seçimi yapılırken birden fazla makale inceleyerek karar verilmiştir. Azimut açısı (θ) 0 ile 360 derece arasında 1 derecelik adım sayısı ile analiz yapılmıştır. Düzlem dalga bir diğer adıyla zenit açısı (θ) 90 derece olarak seçilmiştir.

Miacci ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma ile SIY metodu ile yaptığımız RKA analizlerinin validasyonu yapılmıştır [Ruck, 1970; Miacci, 2012].

300 mm x 200 mm uzunluklarına sahip dikdörtgen bir alüminyum plakaya 8 GHz frekansında SIY metodu ile RKA validasyonu yapılmıştır.

Geometry	RCS (m ²)
Flat Plate 	$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$
Sphere 	$\sigma = \pi a^2$
Diedral 	$\sigma = \frac{8\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$
Cylinder 	$\sigma = \frac{4\pi a b^2}{\lambda}$

Şekil 18: Basit şekiller için maksimum RKA [Ruck, 1970]

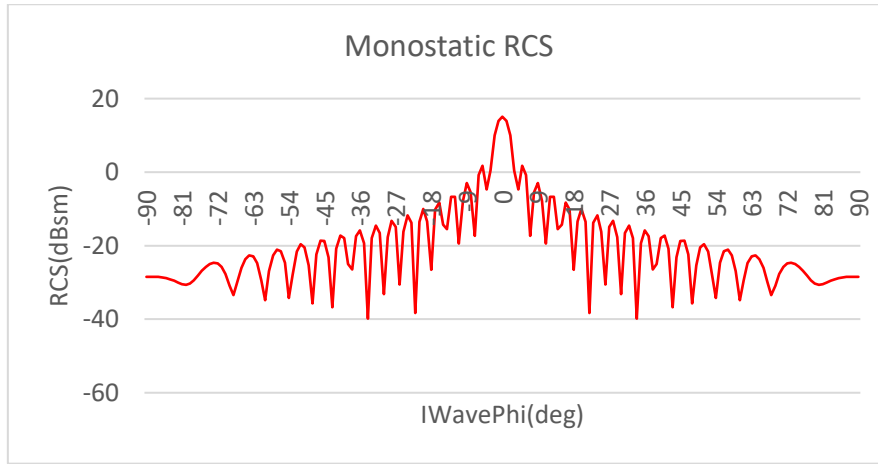


Şekil 19: ANSYS HFSS'de alüminyum plakanın görüntüsü

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{8 \times 10^9} = 0,0375 \text{ m}$$

$$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} = \frac{4 \times \pi \times (0,2^2)(0,3^2)}{0,0375^2} = 32,17 \text{ m}^2$$

Düz plaka için tablodan alınan formüle göre hesaplama yapıldığında maksimum RKA 32,17 m² bulunmuştur. SIY metodu ile yapılmış monostatik RKA analizinden elde edilen grafik aşağıda verilmiştir.



Şekil 20: Alüminyum plakanın SIY yöntemi ile RKA analizi

Elektromanyetik dalgaların plakaya dik geldiği 0° açısında maksimum RKA değerine ulaşılmıştır. Burada radar kesit alanı 15,08051 dBsm (decibel square meter) değerindedir. Bu değer $32,21 \text{ m}^2$ değerine karşılık gelir.

$$\sigma = 10^{(0.1 \times (\sigma_{dB}))}$$

$$\sigma_{max} = 10^{(0.1 \times (15.08051))} = 32,21 \text{ m}^2$$

Miacci ve arkadaşlarının aynı ölçülerdeki alüminyum plakaya yapmış olduğu deneysel çalışmada 0° de tepe noktası gözlenmektedir ve RKA -25,3 dBm (decibel meter) değerine karşılık gelir. Bu da $32,1 \text{ m}^2$ değerine karşılık gelmektedir [Miacci, 2012] ve hesaplanan sonucu doğrulamaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma, transonik şartlarda pasif akış kontrollerinin sürüklenme direncini azaltma ve radar kesit alanını iyileştirme potansiyelini sayısal olarak incelemeyi amaçlamıştır. Araştırma sürecinde, ogive ve elmas şekilli pasif akış düzenleyiciler kullanılarak çeşitli simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, her iki yapının aerodinamik performansı ve radar kesit alanı üzerindeki etkilerini karşılaştırmamıza olanak tanımıştır.

Ogive yapısındaki pasif akış düzenleyicilerin incelenmesi sonucunda elde edilen maksimum radar kesit alanı değeri 1.791 m^2 olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda, ogive yapısının sürüklenme katsayısı değeri 0,01647 olarak hesaplanmıştır. Bu düşük sürüklenme değeri, aracın daha az enerji harcayarak daha yüksek hızlara ulaşabilmesi anlamına gelmektedir.

Elmas şekilli pasif akış düzenleyicilerin incelenmesi sonucunda elde edilen maksimum radar kesit alanı değeri 2.163 m^2 olarak bulunmuştur. Bu değer, ogive yapısına kıyasla daha yüksek olup, radar tarafından tespit edilme olasılığının daha fazla olduğunu göstermektedir. Ayrıca, elmas şekilli düzenleyicinin sürüklenme katsayısı değeri 0,0191 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, ogive yapısına kıyasla daha yüksek bir sürüklenme direnci göstermektedir.

Tablo 4. Elmas şekil için RKA ve sürüklenme değerleri

Model No	Parametrik Değişkenler [mm]	Maksimum Radar Kesit Alanı [dBsm]	Maksimum Radar Kesit Alanı [m ²]	Sürüklenme Kuvveti [Newton]	Sürüklenme Katsayısı (C _D)
1	L ₁ =190 L ₂ =95 h=20,57	3,35	2,163	703,695	0,0191
2	L ₁ =190 L ₂ =95 h=22,57	3,42	2,198	714,804	0,0192
3	L ₁ =190 L ₂ =95 h=25,57	3,52	2,249	721,025	0,0194
4	L ₁ =200 L ₂ =100 h=20,57	3,39	2,183	713,695	0,0190
5	L ₁ =200 L ₂ =100 h=22,57	3,47	2,223	724,804	0,0194
6	L ₁ =200 L ₂ =100 h=25,57	3,57	2,275	731,024	0,0196
7	L ₁ =210 L ₂ =105 h=20,57	3,47	2,223	698,627	0,0187
8	L ₁ =210 L ₂ =105 h=22,57	3,53	2,254	708,316	0,0192
9	L ₁ =210 L ₂ =105 h=25,57	3,60	2,291	718,854	0,0193

Aynı h değerleri için L₁ arttıkça maksimum radar kesit alanı artmıştır. Aynı L₁ değerleri için h arttıkça maksimum radar kesit alanı artmıştır. Bu beklenen bir sonuçtur. Cisim büyüdükçe yüzey alanları büyüyecek ve elektromanyetik dalga'nın radara geri yansımaları artacaktır. Yükseklik ve boy (h ve L₁) değerleri arttıkça RKA'nın artış miktarı artmıştır. Bu durum SBR sayesinde hesaba katılan çoklu sıçrama etkilerinin hesaba katılmasından kaynaklanabilir. En iyi RKA sonuçlarına Model 1 ve Model 4 şekillerinde ulaşılmıştır.

Tablo 5. Ogive şekil için RKA ve sürüklenme değerleri

Model No	Parametri Değişkenler [mm]	Maksimum Radar Kesit Alanı [dBsm]	Maksimum Radar Kesit Alanı [m ²]	Sürüklenme Kuvveti [Newton]	Sürüklenme Katsayısı (C _D)
1	L=190 d=47,5 h ₁ =20,57	2.87	1,936	662,029	0,01783
2	L=190 d=50 h ₁ =20,57	2.71	1,866	661,873	0,01651
3	L=190 d=52,5 h ₁ =20,57	2,53	1,791	661,869	0,01651
4	L=200 d=47,5 h ₁ =20,57	2.86	1,932	660,844	0,01649
5	L=200 d=50 h ₁ =20,57	2.71	1,866	664,870	0,01659
6	L=200 d=52,5 h ₁ =20,57	2.55	1,799	660,565	0,01648
7	L=210 d=47,5 h ₁ =20,57	2.87	1,936	662,302	0,01652
8	L=210 d=50 h ₁ =20,57	2,70	1,862	660,660	0,01648
9	L=210 d=52,5 h ₁ =20,57	2,53	1,791	660,386	0,01647

Elmas şekil oluşturulurken bir önceki modelde yükseklikle artan RKA sonuçlarından dolayı yükseklik sabit ve 20,57 mm alınmıştır. Ogive şekilleri için oluşturulan modellerin sonuçlarına bakıldığında L değişimi ile çok fazla değişim olmadığı görülmektedir. Değişimlerin az olduğu ve doğrusal olmadığı gözlenmektedir. Çap (d) ile değişime baktığımızda, çapın artması ile birlikte RKA değerinin azaldığı gözlenmektedir. Ogive şekilleri için yansıyan dalgaların çapın artması ile birlikte alıcıya daha az geri yansıdığı görülmektedir. Ogive şekiller için literatürdeki çalışmalarda da en az RKA değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu nedenle elmas şekilde oluşturulan modellerimizde ogive şekilde oluşturulan modellere göre daha fazla RKA değerlerine ulaşılmıştır.

Yaptığımız hesaplamalar sonucunda pasif akış kontrolcülerini için ogive şekillerin elmas şekillere göre tercih edilmesi daha az radara görünürlük ve daha az sürüklenme sağlayacaktır. Uçağın gövde eksenine paralel olan L uzunluğu boyunca değişimin RKA değerine etkisi çok azdır. Şeklin çapının artması ile RKA değeri azalır. Bu parametrelere dikkat ederek ogive şekiller tasarlanabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 1139B412302814 başvuru numaralı 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında desteklenmektedir. Projede sağladığı işbirliği desteği için BAYKAR Teknoloji Şirketine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Houghton, E.L, Carpenter, “*Aerodynamic for Engineering Students*”, Butterworth-Heinemann ,2010
- Howe, D., & Rorie, G. (2000). Aircraft conceptual design synthesis (pp. 118-127). London, UK: Professional Engineering Publishing.
- Knott, Eugene F. “*Radar Cross Seciton*” Radar Handbook, Mcgraw-Hill,1990
- Mamur, F. (2023). Hava Araçlarının Dışındaki Anten Akış Düzenleyici Kapaklarının Aerodinamik Parametrelerinin araştırılması. YÖKTEZ. Tez no: 806698
- Menter, F. R. (1994). "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications." *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605. doi:10.2514/3.12149
- Miacci, M. A., Rezende, M. C., & Haq, Z. (2012). Basics on radar cross section reduction measurements of simple and complex targets using microwave absorbers. *Applied Measurement Systems*, 361-389.
- N. Williams, “Radar cross section: engineering for stealth,” *Electronic Engineering*, February 1987, pp. 49-60.
- Ruck, G. T. (1970), *Radar cross section handbook*, Plenum Press, New York, USA.
- Schmitt, V. and F. Charpin, "Pressure Distributions on the ONERA-M6-Wing at Transonic Mach Numbers," *Experimental Data Base for Computer Program Assessment*. Report of the Fluid Dynamics Panel Working Group 04, AGARD AR 138, May 1979.
- Zaccai, David & Bertels, Francesco & Vos, Roelof. (2016). Design methodology for trailing-edge high-lift mechanisms. *CEAS Aeronautical Journal*. 7. 10.1007/s13272-016-0202-7.