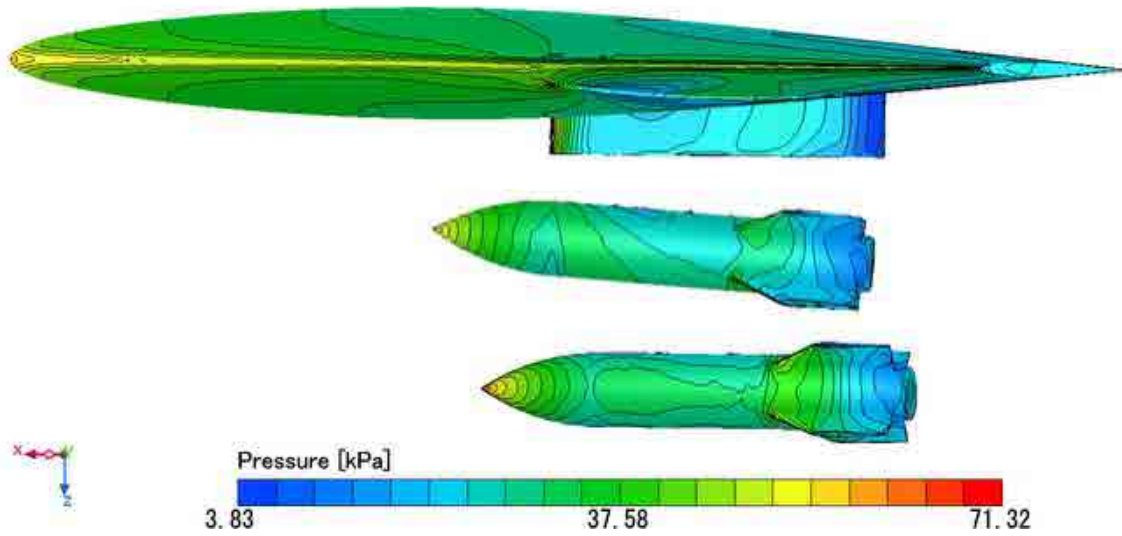


TEKNİK DOKÜMAN



Cradle CFD

Bu teknik yazıda MSC Cradle CFD yazılımı ile güvenli ayrılma (Store Separation) doğrulama simülasyonu yapılarak, zamana bağlı analiz sonuçları test sonuçları ile kıyaslanmaktadır.



BİAS
MÜHENDİSLİK



HEXAGON

Authorised Hexagon reseller

Cradle CFD ile Finli Harici Yük Ayrılmasının Deneysel Verilerle Doğrulanması

Hazırlayan
Önder YILMAZ Kıdemli Uzman CFD Uygulama Mühendisi

Tarih: 10/09/2025

Birinci Dünya savaşı sırasında, pilotlar uçaklardan bombaları elleri ile atmaktaydı. Gelişen teknoloji ile artık bombalar özel salan mekanizmaları ile en güvenli ve en uygun şartlarda uçaklardan atılmaktadır. Benzer şekilde uzay araçlarında bitmiş yakıt tankları ve görevini tamamlamış kapsül kademeleri özel itici sistemler ile uzay araçlardan uzaklaştırılmaktadır. Hava araçlarından yakıt tankı, mühimmat veya faydalı yüklerin atılması-uzaklaştırılması kritik öneme sahiptir. Güvenli ayrılmadaki iki ana unsur salan mekanizması ve cismin aerodinamik tasarımıdır. Bu iki unsur uzaklaştırılan cismin yörüngesini belirlemektedir. 1960'lı yıllara kadar güvenli ayrılma denemeleri sadece uçuş testleri ile yapılabilmekteydi. Uçuş testleri ile yapılan denemeler tehlikeli, pahalı ve uzun zaman almaktaydı. 1960'lardan sonra rüzgâr tüneli testleri yapılmaya başlandı [1]. Rüzgâr tüneli testlerinde hava aracının belirli bir ölçekteki modeli ile benzetilmiş ortam şartlarında testler yapılmaktadır. Gelişen teknoloji ile HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımları 1990'lı yıllardan sonra güvenli ayrılma analizlerinde kullanılmaya başlanılmıştır. HAD yazılımları uçuş ve rüzgâr testlerine nazaran çok daha hızlı ve ekonomik çözüm sunmaktadır. Cradle CFD yazılımı içerdiği Overset Mesh (Üst küme) ağ elemanı yöntemi ve altı serbestlik dereceli katı cisim çözücüsü (6DOF Rigit Body Solver) ile güvenli ayrılma analizlerinde etkin bir çözüm sunmaktadır. Bu teknik yazıda, Cradle CFD ile güvenli ayrılma (store separation) analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada analiz sonuçlarının referans makale ve test verileri ile örtüştüğü görülmüştür [2].

1. GİRİŞ

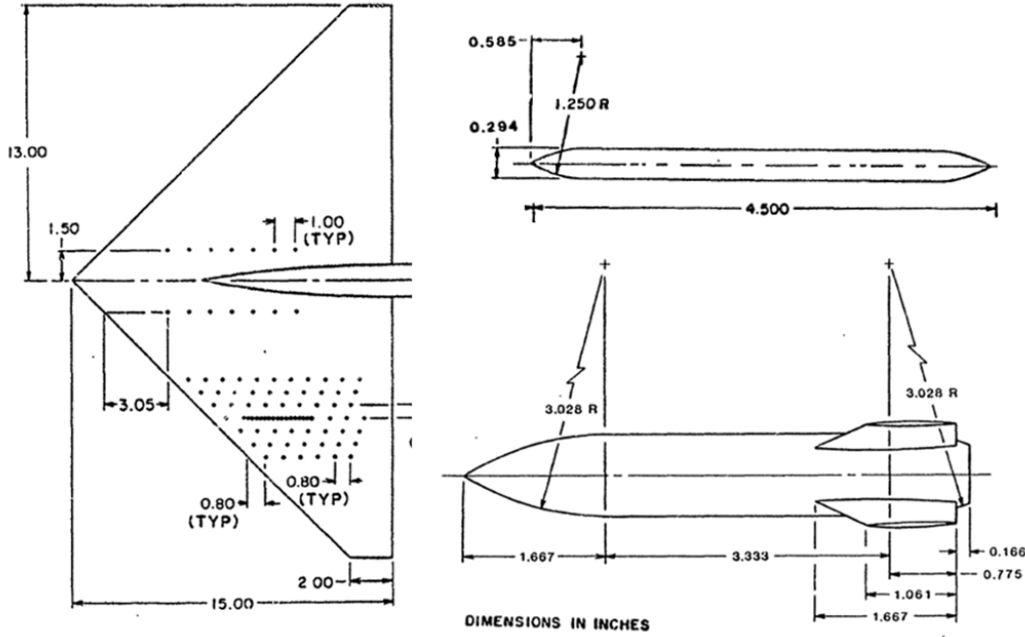
Bu çalışmada, 1991 yılında Arnold Engineering Development Center tarafından rüzgâr tüneli testleri yapılan Kanat/Salan/Finli (Kanatçıklı) harici yük test modeli referans alınmıştır [2]. Testler 1/20 model ile gerçekleştirilmiş olup harici yük için yörünge, kuvvet, moment ve yüzey basınç dağılımı verileri çıkartılmıştır. Rüzgâr tüneli test raporunda 0.35 s için harici yük ağırlık merkezinin X, Y, Z eksenlerindeki yer değiştirmesi, çizgisel hızı ve açılal pozisyon değerleri paylaşılmıştır [2].

2. GÜVENLİ AYRILMA DOĞRULAMA SİMÜLASYONU MODELLEMESİ

Güvenli ayrılma analizi doğrulama çalışması referans makaledeki geometrik bilgilerden 3B model hazırlanarak yapılmıştır. Finli harici yükün kütleli bilgileri sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Analiz ilk aşamada zamandan bağımsız yapılarak geometri etrafındaki akışın gelişmesi ve yakınsaması sağlanmıştır. Zamandan bağımsız analiz daha sonra zamana bağlı analizde başlangıç sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Zaman bağlı analizde 0.35 s süre boyunca finli harici yükün yörünge koordinatları kayıt edilmiştir.

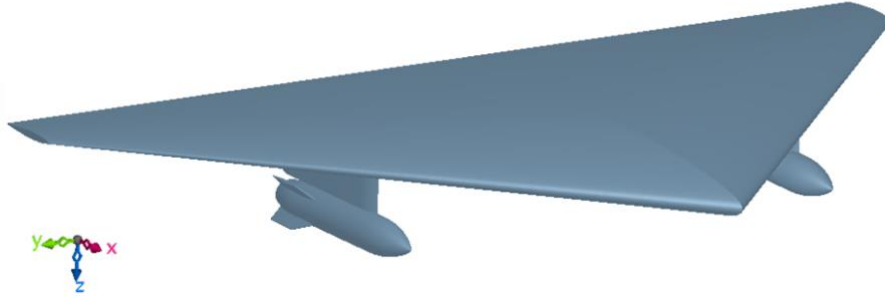
2.1 Rüzgâr Tüneli Testleri Yapılan Test Modeli

Rüzgâr tüneli testlerinde kullanılan 1/20 ölçekli model geometrisine ait Arnold Engineering Development Center tarafından yayınlanan raporda paylaşılan görseller Şekil 1'deki gibidir [3].



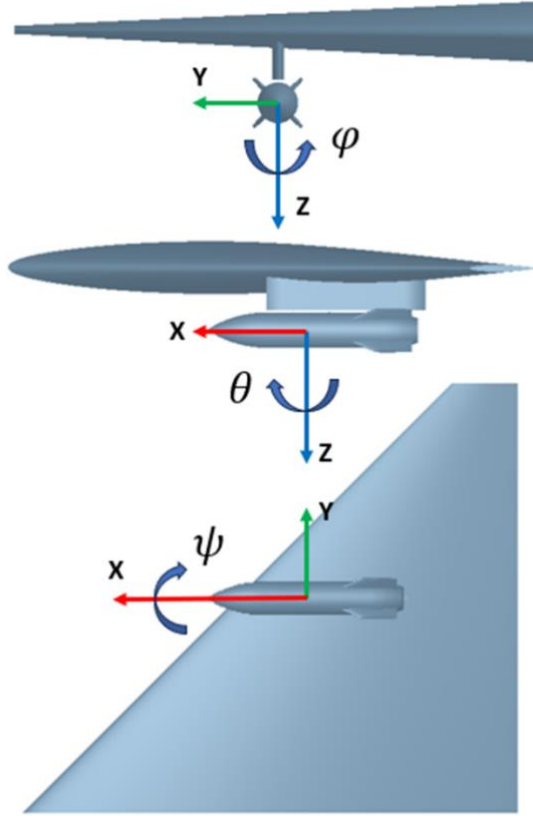
Şekil 1: Rüzgâr tüneli testleri yapılan 1/20 ölçekli model geometrisi detayları

Rüzgâr tüneli testleri yapılan kanat geometrisi, NACA-64A010 profil kesitine sahiptir. Kanat giriş kenarı süpürme açısı 45°'dir. Kanat kökünde veter boyu 7.62 m, kanat ucunda veter boyu 1.016 m'dir. Harici yük geometrisi silindirik gövde çapı 0.508 m'dir. Harici yük burun konisi Ojiv (Ogive) formundadır. Burun konisi Ojiv yarıçapı 1.538 m, Ojiv yarıçap merkezinin uca olan mesafesi ise 0.846 m'dir. Benzer şekilde arka koni Ojiv yarıçapı 1.538 m, yarıçapın arka kenara uzaklığı ise 0.478 m'dir. Harici yük toplam boyu 3.018 m'dir. Finli harici yükün ağırlık merkezinin burun konisi ucuna olan mesafesi 1.416 m'dir. Finli harici yükte NACA-0008 kesit profiline sahip 4 adet fin bulunmaktadır. Fin giriş kenarı süpürme açısı 60°, fin yüksekliği 0.223 m ve fin ucunda veter boyu 0.538 m'dir. Salan geometrisi 0.149 m genişliğe sahip düz plaka kesitten oluşmaktadır. Salan geometrisinin giriş ve çıkış kenarı Ojiv formundadır. Salan kenarları Ojiv yarı çapı 0.635 m, uca olan mesafesi 0.297 m'dir. Test raporunda paylaşılan geometrik bilgiler kullanılarak Kanat/Salan/Finli harici yük 3B modeli çizilmiştir. HAD analizlerinde kullanılmak üzere 1/1 ölçekli çizilen 3B model Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2: HAD analizleri için çizilen Kanat/Salan/Finli harici yük 3B modeli

3B HAD analiz modelinin üç görünüşü üzerinden açısal dönme eksenleri ve açısal tanımlar yapılmıştır. 3B modelde koordinat sisteminin orijini finli harici yükün ağırlık merkezidir. X eksenini etrafındaki dönüş φ (phi) ile, Y eksenini etrafındaki dönüş θ (tetha) ile, Z eksenini etrafındaki dönüş ψ (psi) ile gösterilmiştir. 3B HAD modelindeki koordinat sisteminin yerleşimi, açısal dönme eksenleri ve tanımları Lijewski ve diğ.'nin çalışmasıyla [2] aynı olacak şekilde model oryantasyonu yapılmıştır. Finli harici yük ağırlık ve atalet momenti bilgileri Tablo 1'de görülmektedir. 3B HAD analiz modeli ve açısal tanımlar aşağıda Şekil 3'te görülmektedir.



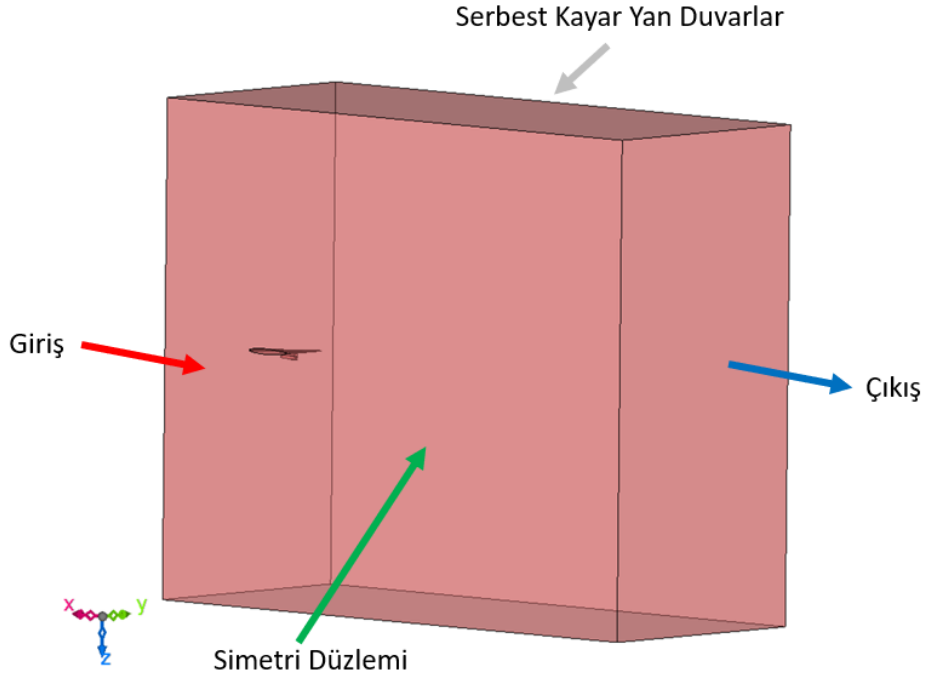
Şekil 3: Finli harici yük 3B HAD analiz modelindeki açısal dönme eksenleri ve açısal tanımlar

Tablo 1. Finli harici yük kütle, kütle merkezi ve atalet momentleri bilgisi

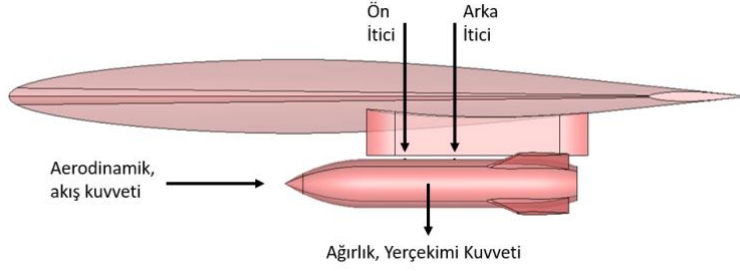
Finli harici yük kütle	907.18 kg
Finli harici yük kütle merkezi	X:0 m, Y:0 m, Z:0 m
Ixx	27.12 kgm ²
Iyy	488.1 kgm ²
Izz	488.1 kgm ²

2.2 Hesaplama Hacmi ve Sınır Şartları

Analiz sıkıştırılabilir hava akışkanı ile yapılmıştır. Analiz sınır koşulları Lijewski ve diğ.'nin çalışmasından [2] edinilmiştir. Analiz sınır koşulu olarak 26 kft irtifa ve 0.95 Mach hava hızı değeri kullanılmıştır. 26 kft irtifada ISA (Internatinal Standart Atmosphere) değerlerinde durağan ortam basıncı 35.988 kPa, ortam sıcaklığı -36.5 C° ve ses hızı değeri 308.6 m/s'dir. Analizde yanal rüzgâr açısı olmadığı için ve hesaplama süresinin düşürülmesi için simetrik model kullanılmıştır. Hesaplama hacmi görseli aşağıda Şekil 4'teki gibidir. Girişte hız sınır koşulu olarak 308.6 m/s, çıkış sınır koşulu durağan irtifa basıncı 35.988 kPa ve yan duvarlar için serbest kayma tanımlaması yapılmıştır. Salan üzerinde iki adet itici mekanizma (ejector) bulunmaktadır. Bu iticiler başlangıç anından 0.05 s anına kadar sabit kuvvet ile finli harici yüke düşey yönde (+Z) kuvvet uygulamaktadır. Ön iticinin burundan uzaklığı 1.24 m, arka iticinin burundan uzaklığı 1.75 m'dir. Ön itici, finli harici yüke 10675.7 N, arka itici finli harici yüke 42702.9 N kuvvet uygulamaktadır. Finli harici yükün yörüngesini, aerodinamik kuvvetler, yerçekimi ve itici kuvvetler belirlemektedir. Şekil 5'te finli harici yükün maruz kaldığı kuvvetler görülmektedir.



Şekil 4: 3B HAD analizi simetrik hesaplama hacmi modeli



Şekil 5: Finli harici yük yörüngesini belirleyen kuvvetler

Harici yükün yörüngesinin hesaplanması için Cradle-CFD yazılımının katı cisim çözücüsü (Rigid Body Solver), Overset (Üstküme) ağ yapısı ve hareketli elemanlar (Moving Elements) özellikleri etkin hale getirilmiştir. Çözücü ayarlarında doğruluk oranının artırılması için ikinci dereceden (Second Order) sayısal çözümler tercih edilmiştir.

Analizde türbülans modeli olarak Standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Bu model, serbest akış bölgelerinde türbülans hesapları için uygun bir modeldir. Standart k- ϵ modeli için sınır tabaka hız profili hesapları ve gerekli ağ yoğunluğu bakımından daha avantajlıdır. Sınır tabaka hız profili hesaplaması için yazılımın uyarlanabilir duvar fonksiyonu (Adaptive Wall Function) özelliği aktif edilmiştir. Çözüm ağının hız profilini yeterli oranda yakalayamadığı noktalarda bu özellik devreye girerek gerekli katman hız hesaplarını yapmaktadır. Uyarlanabilir duvar fonksiyonu özelliğinin aktif edilmesi, çözüm ağı eleman sayısının düşük tutulması ve işlemci yükünün azaltılarak çözüm sürelerinin düşürülmesi noktasında avantajlıdır.

Sıkıştırılabilir bir akışkan için transonik hızlarda analiz yapıldığı için yoğunluk tabanlı çözücü (Density-Based Solver) kullanılmıştır. Kanat/Salan/Finli harici yük geometrisinin tüm duvar yüzeylerinde kaymaz duvar sınır koşulu kullanılmıştır.

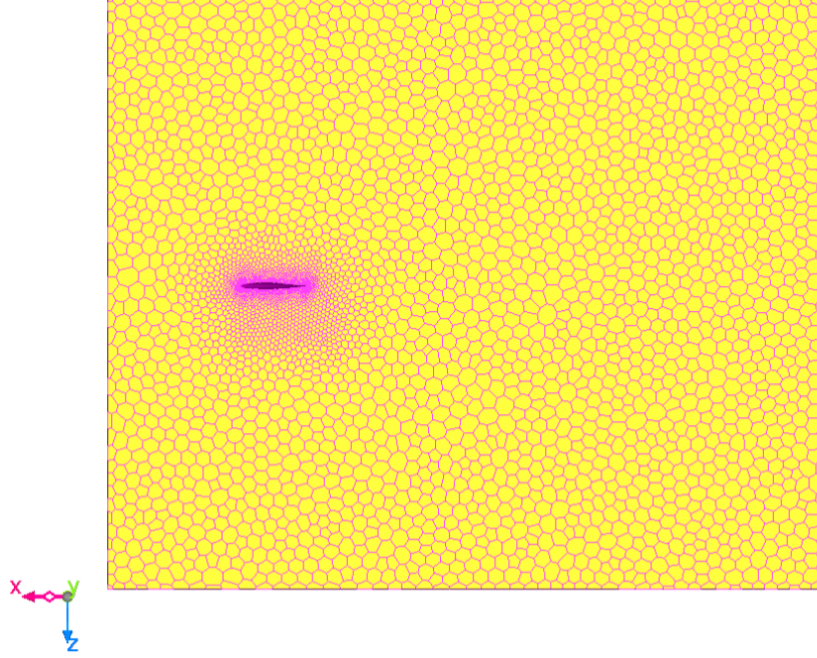
Analiz ilk olarak zamandan bağımsız koşturulmuştur. Zamandan bağımsız analiz ile geometri etrafındaki akışın gelişmesi ve kararlı hale ulaşması sağlanmıştır. Kararlı haldeki yakınsamış akış analiz sonucu, zamana bağlı analizin başlangıç sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Zamana bağlı analizde 0.35 s boyunca çözüm yaptırılarak finli harici yükün yörüngesi hesaplatılmıştır. Zamana bağlı analizin zaman adımı 2×10^{-6} s olarak ayarlanmıştır. Zaman adımı, Courant sayısı ve analizin yakınsama durumları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.

Finli harici yükün yer değiştirmesini takip ve kayıt etmek için burun konisinin önünde ve ağırlık merkezinin yan taraflarına toplam dört adet referans nokta tanımlanmıştır. Bu noktaların koordinatları 1×10^{-5} s zaman adımlarında kayıt ettirilmiştir. Analiz sonucu yörünge hesaplamaları bu kayıt noktalarından yapılmıştır.

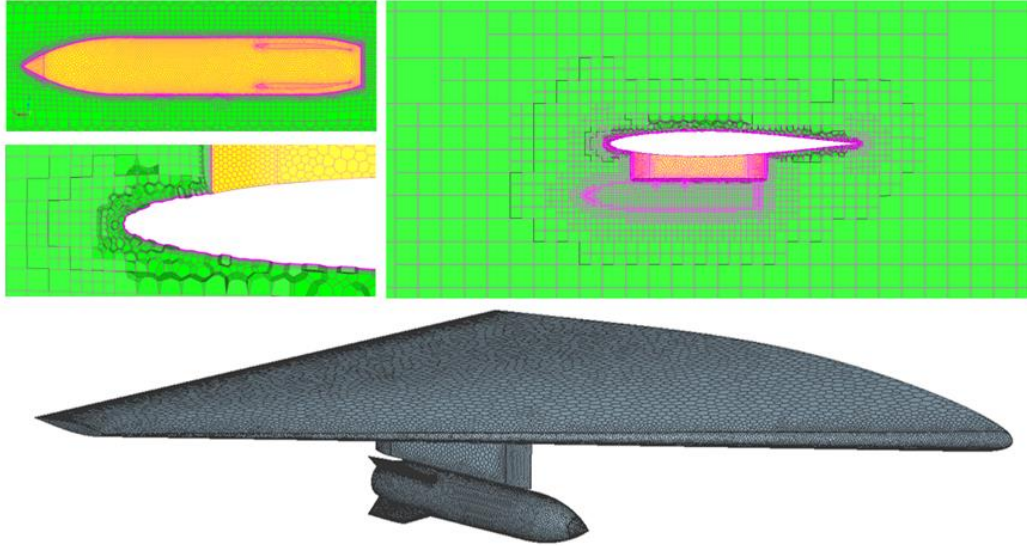
2.3 Hesaplama Hacmi Sayısal Ağ Yapısı

Hesaplama hacminin boyutları X ekseninde 85 m, Y ekseninde 35 m ve Z ekseninde 70 m'dir. Hesaplama hacmi boyutları, duvarların akış üzerinde bir etkisi olmayacak şekilde belirlenmiştir ve karakteristik kanat kökü veter boyu referans boy olarak alınmıştır. Girişte referans boyun 2 katı, çıkış yönünde 10 katı, düşeyde ve yatayda 5 katı olacak şekilde hesaplama hacmi boyutları belirlenmiştir. Hesaplama hacminde toplam 2.3 milyon düğüm noktası, 1.1 milyon ağ elemanı bulunmaktadır ve çok yüzlü (polyhedral) ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama hacmi ağ yapısı aşağıda Şekil 6 ve Şekil 7'de

görülmektedir. Hesaplama hacminde ağ elemanlarının genel ölçüsü 1.6 m'dir. Kanat yüzeyi eleman ölçüsü 0.1 m, kanat giriş ve çıkış kenarı eleman ölçüsü 0.025 m, salan yüzeyi eleman ölçüsü 0.05 m, kanatlı harici yük yüzey eleman ölçüsü 0.025 m, fin yüzeyi eleman ölçüsü 0.0125 m, fin kenarları eleman ölçüsü 0.00625 m'dir. Finli harici yükün hareket edeceği akış bölgesinde sayısal alan tanımı yapılarak eleman ölçüsü için 0.4 m değeri tanımlanmıştır.



Şekil 6: Hesaplama hacmi çözüm ağı görseli



Şekil 7: Hesaplama hacmi çözüm ağı detay görseli

3. HESAPLAMALAR

3.1 Korunum Denklemleri

CRADLE yazılımı, Navier-Stokes denklemlerini çözerek sayısal analiz yapar. Bu denklemler kütle, momentum ve enerjinin korunumu kanunlarıdır ve ilgili çözümler sonlu hacimler yönteminin (FVM) kullanılmasıyla sayısal olarak gerçekleştirilir. Sonlu Hacimler Yönteminde, giriş ve çıkış arasındaki toplam denge, bir koruma denklemini temsil etmek üzere her kontrol hacmi içinde dikkate alınır. Sıkıştırılamaz akışkan için kütle korunum denklemi Denklem (1) 'de verilmiştir. Sıkıştırılamaz akışkan için momentumun korunum denklemi Denklem (2) 'de verilmiştir. Sıkıştırılamaz akış için enerji denklemi, Denklem (3) 'de verilmiştir [3].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v + \frac{\partial u}{\partial z} w \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho C_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} K \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \dot{q} \quad (3)$$

ρ : Özkütle C_p : Özgül ısı $\dot{q}$: Isı kaynağı T : Sıcaklık t : Zaman
 μ : Viskozite g_x : yer çekimi u, v, w : x, y, z hız bileşenleri
 K : Termal iletkenlik u_j : j yönündeki akış hızı

3.2 Standart k-ε Türbülans Modeli

Standart k-ε türbülans modelinde türbülans kinetik enerjisi (k), enerji yitimi (ε) ve türbülans viskozitesi (μ_t , eddy viscosity) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k = \frac{\overline{u'_i u'_i}}{2} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$\mu_t |k\varepsilon = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

k ve ε parametrelerinin iletimi, taşınımı, yayılımı ve tüketimi aşağıdaki denklemlerle hesaplanır ve bu denklemler k-ε denklemleri olarak bilinir [3].

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_S + G_T - \rho \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_S + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

$$G_S = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad G_T = g_i \beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad R_f = - \frac{G_T}{G_S + G_T}$$

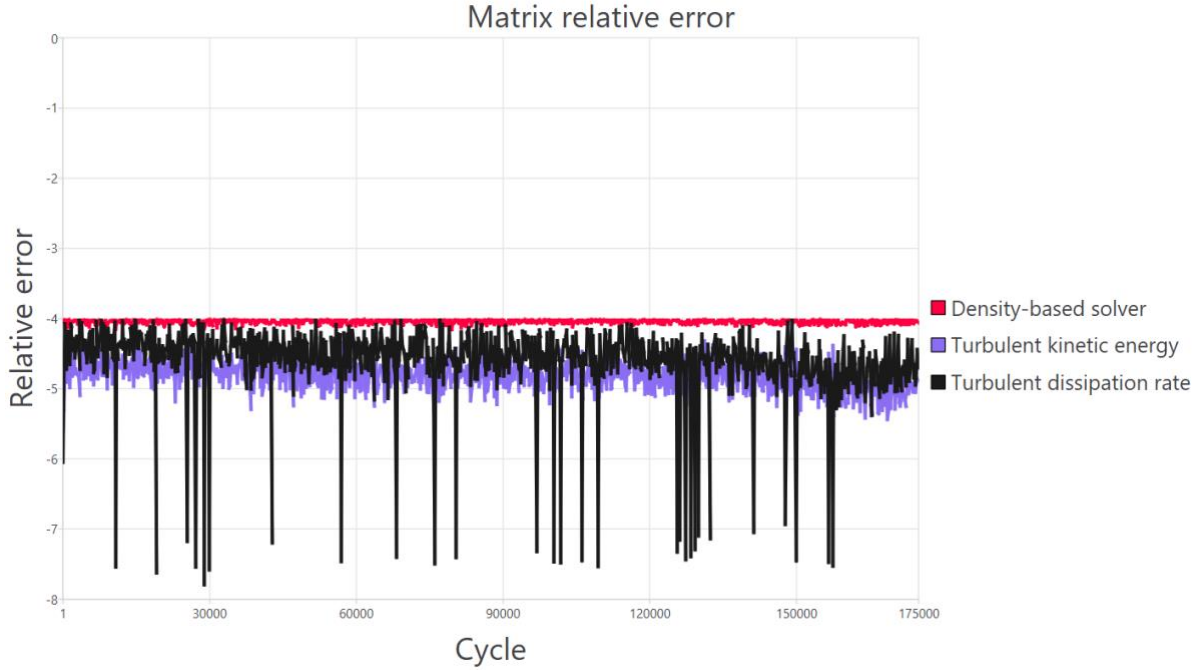
Model katsayıları ise Tablo 2’deki gibidir.

Tablo 2: Standart-ke türbülans modeli katsayıları

σ_k	σ_ε	σ_t	C_1	C_2	C_3	C_μ
1.0	1.3	0.9	1.44	1.92	0.0	0.9

3.3 Cradle CFD scFlow Sayısal Çözüm

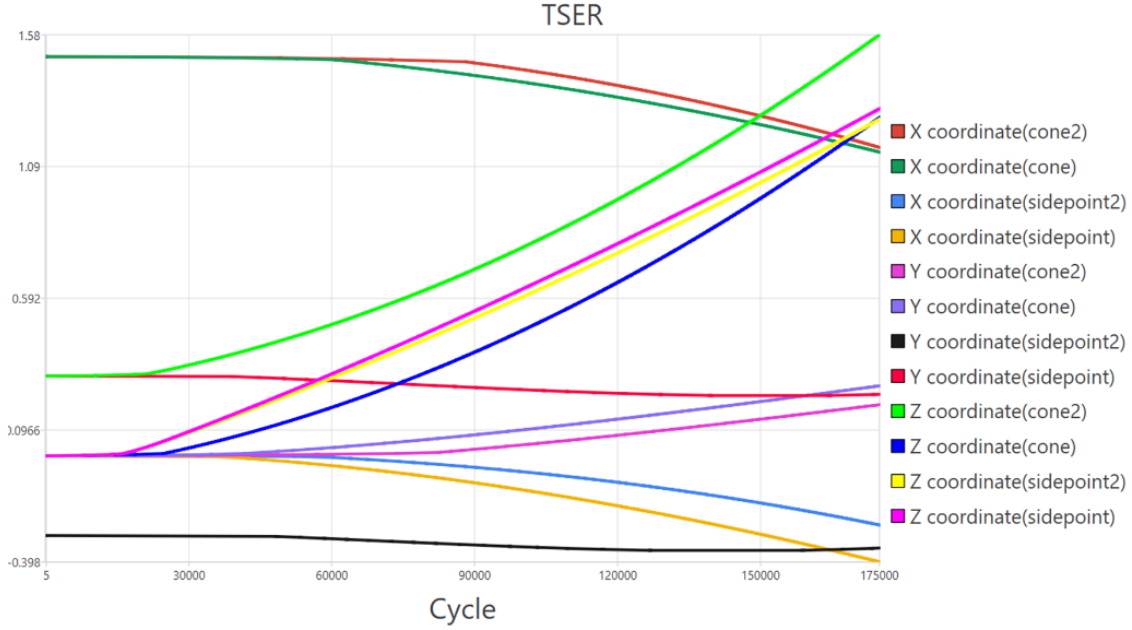
Bölüm-3.1 ve Bölüm 3.2 ’de paylaşılan denklemlerin her bir ağ elemanında iteratif olarak çözümü sonucunda ilgili denklem parametrelerinin literatüre göre en fazla 10^{-4} değerine yakınsaması gerekmektedir. Şekil 8’e göre çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlerde sayısal yakınsama gerekliliği sağlanmıştır.



Şekil 8: HAD analizi sayısal yakınsama değerleri

4. ANALİZ SONUÇLARI

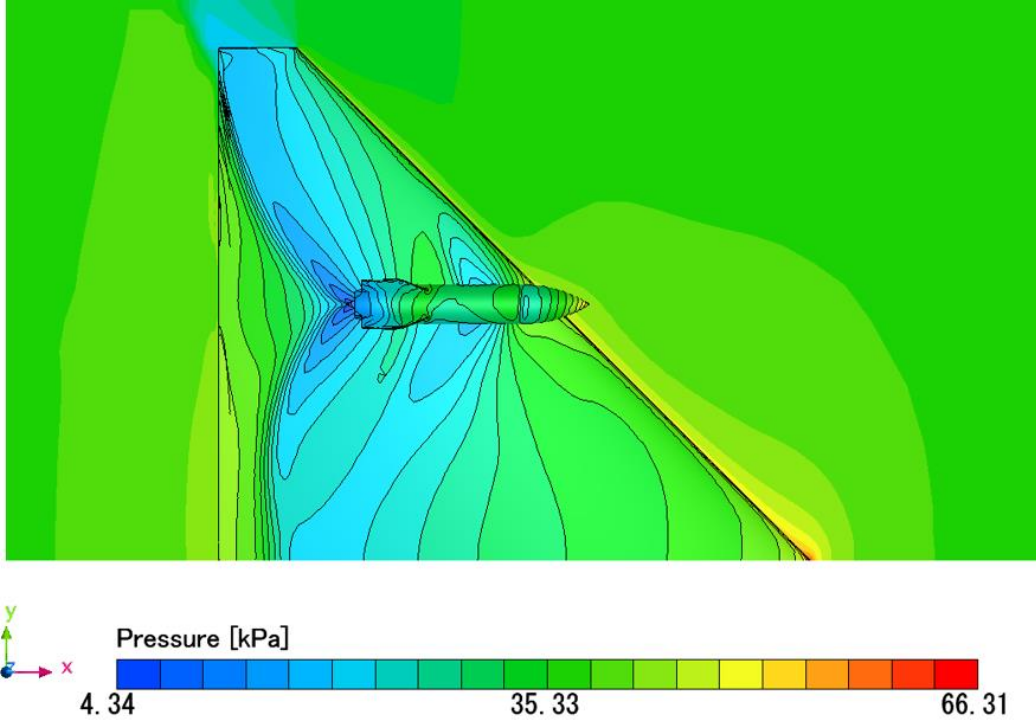
Analiz sonucunda ana hedef olan finli harici yükün yörüngesi hesaplanmıştır. Referans olarak tanımlanan dört noktanın koordinat değişimi $1e-5$ s zaman aralıklarında kayıt edilmiştir. Yazılım çözüm yaparken dört noktadaki koordinat değişimi Cradle CFD scSolver monitör ekranından takip edilmiştir. Dört noktanın koordinatlarındaki zaman bağlı değişim Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9: Dört referans noktanın koordinatlarının zamana bağlı değişimi

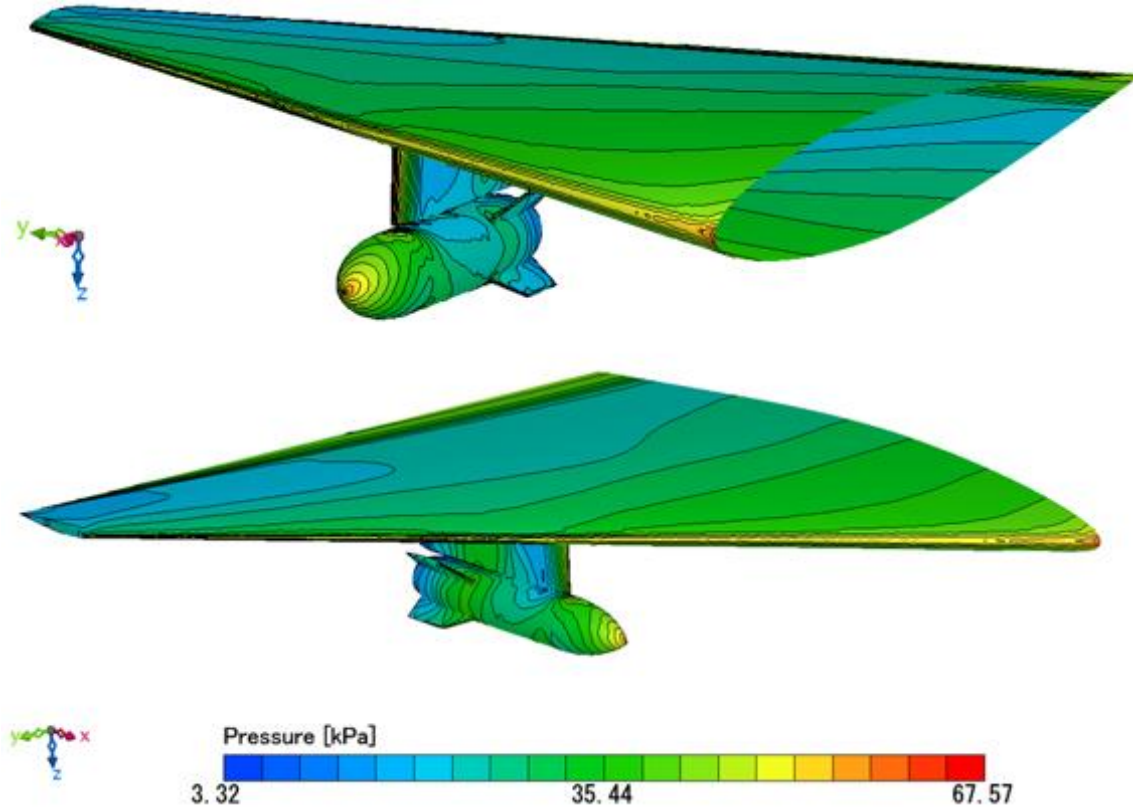
4.1 Zamandan Bağımsız Analiz Sonuçları

Kanat ve finli harici yük etrafındaki akışın gelişmesi ve yakınsaması için ilk olarak zamandan bağımsız analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile finli harici yükün maruz kaldığı aerodinamik yükler kararlı hale gelmiştir. Finli harici yük üzerine X ekseninde -5522 N, Y ekseninde -4351N, ve Z ekseninde -2507 N aerodinamik kuvvet etmektedir. Analizi gerçekleştirilen delta kanat yapısında kanat veter boyu ve kalınlığı kanat köküne doğru artmaktadır. Artan veter boyu ve kanat kalınlığı, kanat giriş kenarındaki durma bölgesini ve yüksek basınçlı bölgeyi alansal olarak büyötmektedir. Benzer şekilde artan veter boyu kanadın oluşturduğu yüksek hız ve düşük basınç bölgesini de alansal olarak büyötmektedir. Kanat altındaki salan ve finli harici yük, kanat altındaki akışı ikiye bölmektedir. Bu iki bölge arasında aerodinamik akış şartlarında farklılık bulunmaktadır. Bu farkın sebebi de ortalama kanat veter boyu ve kalınlıkların iki bölgede farklı olmasıdır. Bu farklılık finli harici yük üzerindeki aerodinamik kuvvetleri de etkilemektedir. Salan ve finli harici yükün kanat altı, kanat girişi ve kanat çıkış bölgelerine olan basınç etkisi Şekil 10'da görülmektedir.



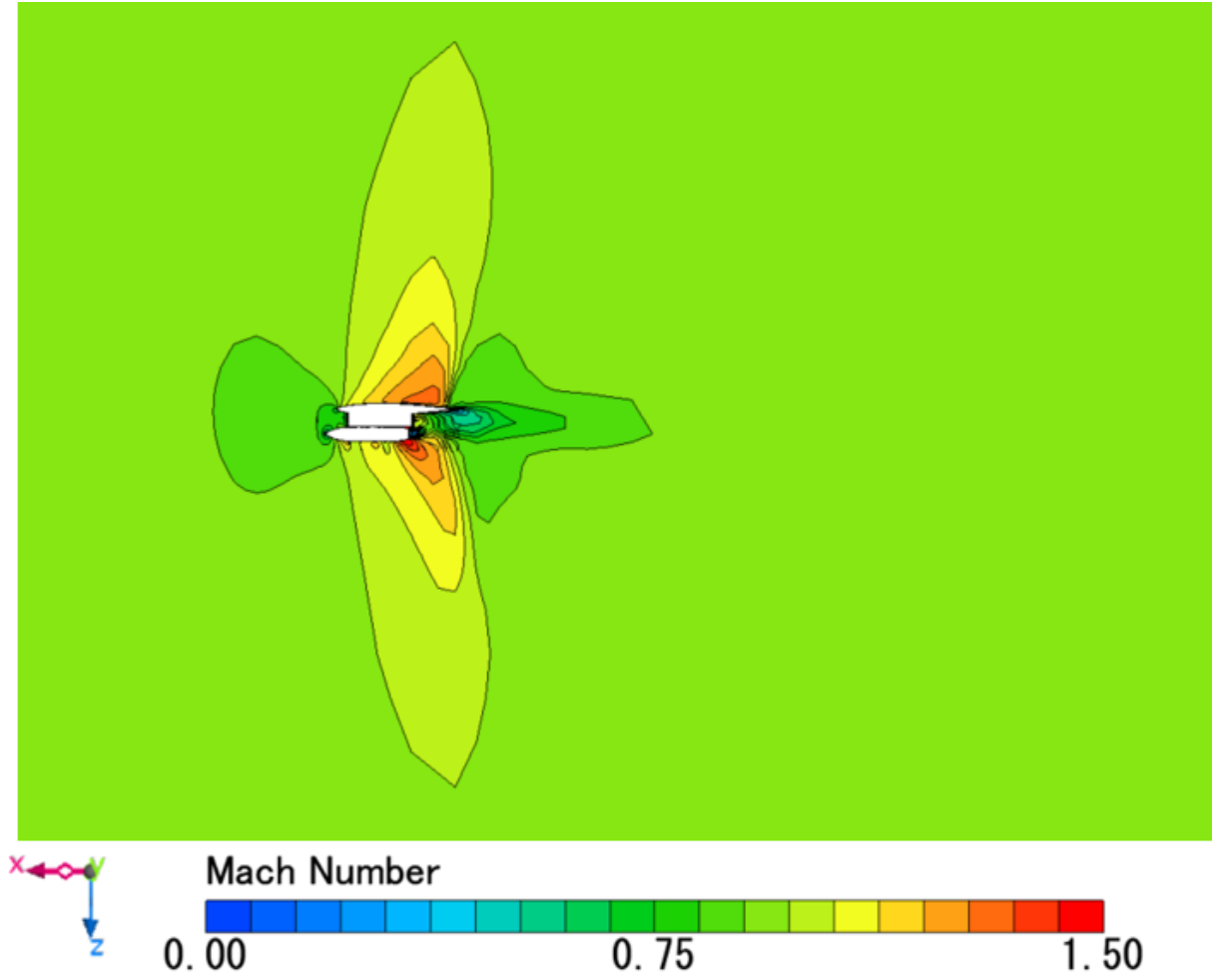
Şekil 10: Salan ve finli harici yükün kanat altı ve kanat giriş çıkış basınç bölgelerine etkisi

Şekil 11’de geometri üzerindeki basınç dağılımı görülmektedir. Bu basınç değerleri birim alan ile çarpıldığında geometriye etkiye basınç kuvvetlerini oluşturmaktadır. Buna göre finli harici yük, konik burun bölgesinden +Y yönünde, fin bölgesinden ise -Y yönünde kuvvet oluşturacak şekilde yüksek ve düşük basınç bölgelerine maruz kalmaktadır. Bu basınç kuvvetleri finli harici yükü pozitif ψ yönünde açısal dönmeye zorlamaktadır. X eksenindeki kuvvetin kaynağı sürüklenmedir. Sürüklenme kuvveti 0.95 Mach uçuş hızının oluşturduğu basınç kuvveti ve viskoz sürtünme kuvvetlerinin toplamıdır. Bu kuvvet finli harici yükü, -X yönüne doğru hareket ettirecektir. Kanat geometrisinin akışı hızlandırıp basıncı düşürmesi ve salan giriş çıkış kenarında benzer şekilde akışın hızlanarak basıncın düşmesi neticesinde genel olarak finli harici yükün kanata bakan yönünde daha düşük basınç bölgeleri oluşmaktadır. Finli harici yükün +Z ve -Z yönlerine bakan yüzeylerindeki bu basınç farkı, Z eksenindeki -2507N değerindeki kuvveti oluşturmaktadır. Finli harici yük ağırlığı ve salan itici kuvvetleri -Z yönündeki aerodinamik kuvvetten çok daha büyük olduğu için finli harici yüke uygulanan bileşke kuvvet +Z yönlüdür. Bu durum finli harici yükün düşey yönde hareket etmesine sebep olacaktır.



Şekil 11: Kanat/Salan/Finli harici yük üzerindeki basınç dağılımı

Şekil 12 incelendiğinde geometri etrafında transonik akış rejimi olduğu görülmektedir. Kanat profilinde yaklaşık 0.7 Mach hızdan sonra ses-üstü akış oluşumları başlamaktadır. Analizde giriş sınır koşulu 0.95 Mach'dır. Kanat geometrisi ve finli harici yük geometrisindeki alanların genişlediği bölgelerde hız artarak 1.5 Mach mertebesine kadar ulaştığı görülmektedir. Transonik akış rejimleri HAD analizleri için zorlayıcıdır ve hata oranları ses altı hızlar ve ses üstü hızlara göre daha yüksek mertebelerde olabilir. Transonik akışlarda belli belirsiz şok dalgası oluşumları ve akış rejiminde hızlı değişimler olduğu için çözüm noktasında zorlayıcıdır. Bu duruma örnek olarak Şekil 13'te F16 savaş uçağının sürüklenme kuvvetinin analiz edildiği çalışmadaki sürüklenme katsayılarının transonik akış bölgesindeki ani değişimi örnek olarak verilebilir [4].



Şekil 12: Finli harici yük merkezinden geçen düzlem üzerinde Mach sayısı dağılımı

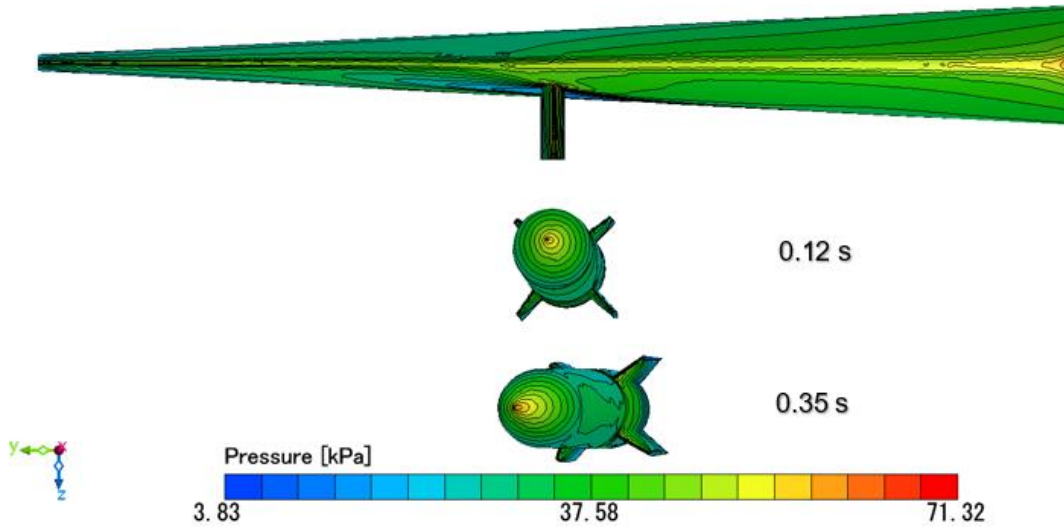


Şekil 13: F16 savaş uçağı sürüklenme katsayılarının Mach sayısı ile değişimi

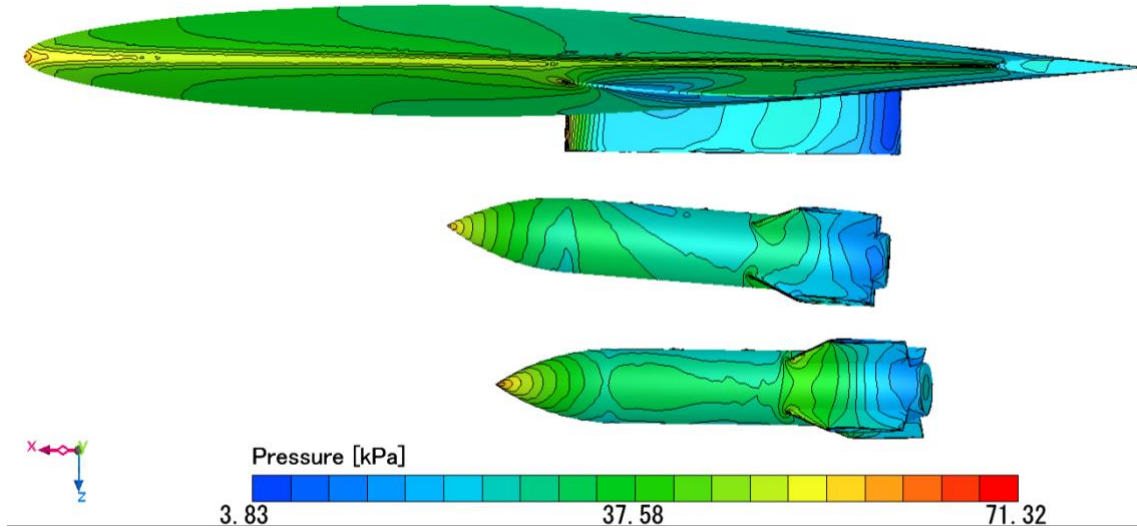
4.2 Zamana Bağlı Analiz Sonuçları

Finli harici yükün yörünge hesaplaması zaman bağlı analiz ile gerçekleştirilmiştir. Cradle-CFD yazılımının katı cisim çözücüsü ve Overset ağ modeli birlikte kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Toplam analiz süresi 0.35 s'dir. Bu süre zarfında referans noktalar ile finli harici yükün yer değiştirmesi X, Y, Z koordinatlarında kayıt edilmiştir.

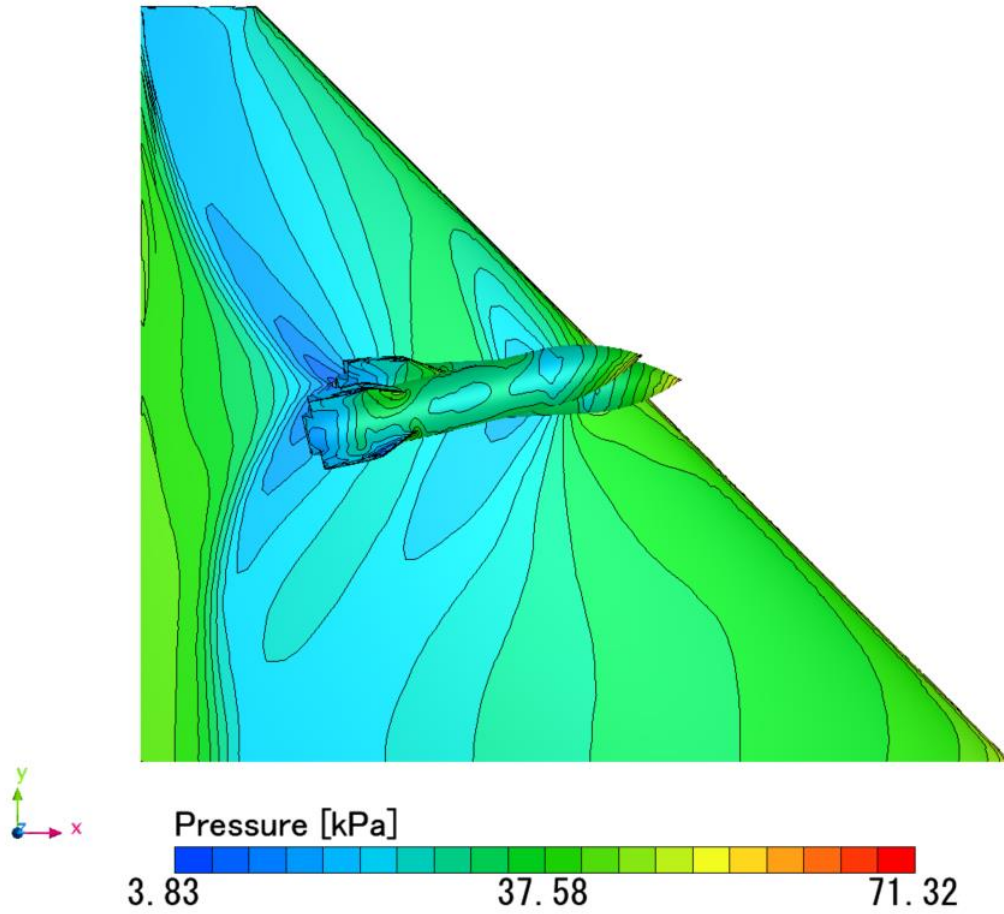
Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16'da üç farklı görünüş için finli harici yükün 0.12 s ve 0.35 s zamanlarındaki pozisyonu verilmiştir. Buna göre finli harici yükün ilk hareketinde salan itici kuvvetlerinin baskın olduğu görülmektedir. Salan üzerindeki arka itici 42,712.9 N, ön itici 10,675.7 N ile finli harici yüke düşey yönde kuvvet uygulamaktadır. Finli harici yük ağırlık merkezi bu iki itici kuvvetlerin uygulandığı bölgelerin arasında bulunmaktadır. Arka itici kuvvet ön itici kuvvetin 4 katı mertebesinde dir. Arka itici kuvvetin finli harici yükün ağırlık kuvvetine oranı ise 4.8'dir. Arka itici kuvvetin diğer kuvvetlere göre baskın olması finli harici yükün hareketinde kendini göstermektedir. Arka itici kuvvetin etkisi ile finli harici yük ilk olarak Y eksenini etrafında dönerek 0.19 s'de 5.4° θ açısı yapmaktadır. X açısı zamanla aerodinamik kuvvetler ve yer çekimi etkisi ile azalmakta ve finli harici yükü burun aşağı yönlü dönecek şekilde karakter sergilemektedir. Finli harici yükün Z eksenini etrafındaki dönüşü (ψ) incelendiğinde burun bölgesindeki +Y yönlü pozitif basıncın oluşturduğu kuvvet ve fin bölgesindeki -Y yönlü negatif basıncın oluşturduğu kuvvetin moment etkisi ile 0.35 s'de 13.5° ψ açısı kadar dönmektedir. Bu dönüş ile finli harici yük burun konisini kanat ucuna doğru çevirmektedir. Finli harici yükün X eksenini etrafındaki dönüş incelendiğinde finlerin üzerindeki basınç farkı ile 0.32 s'de 5.1° φ açısı kadar dönmektedir.



Şekil 14: Finli harici yükün 0.12 s ve 0.35 s zamanlarındaki pozisyonu (Ön görünüş)

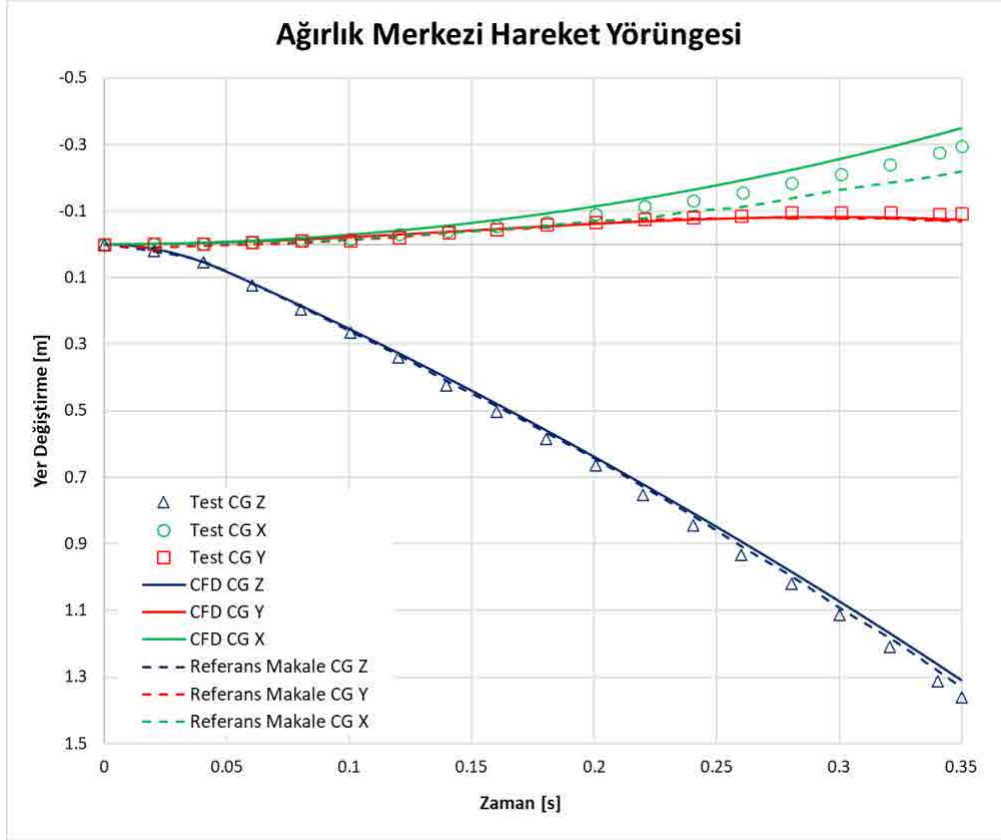


Şekil 15: Finli harici yükün 0.12 s ve 0.35 s zamanlarındaki pozisyonu (Yan görünüş)

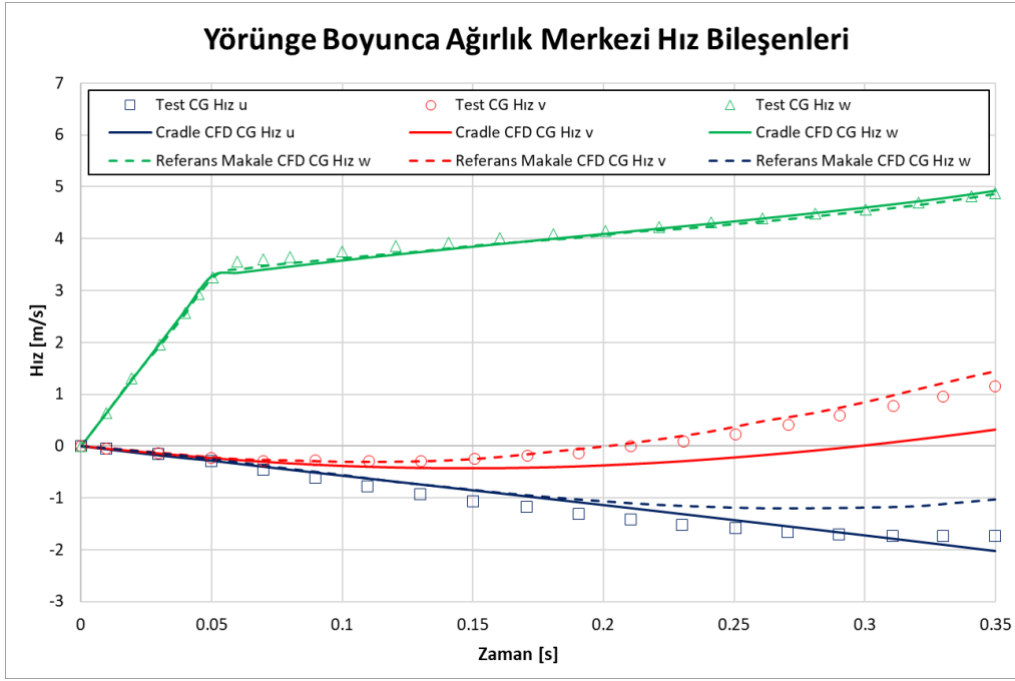


Şekil 16: Finli harici yükün 0.12 s ve 0.35 s zamanlarındaki pozisyonu (Alt görünüş)

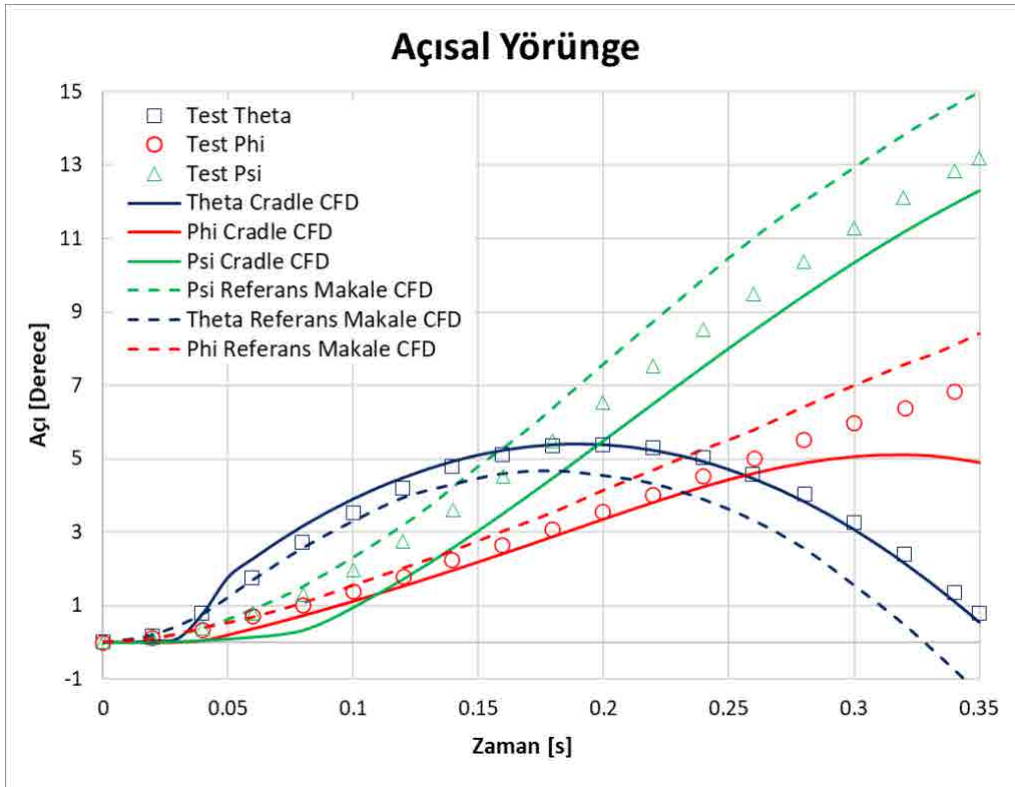
Cradle-CFD yazılımı ile gerçekleştirilen HAD analiz sonuçları, Lijewski ve diğ.'nin çalışmasındaki [2] analiz sonuçları ve test sonuçları ile kıyaslanmıştır. Şekil 17'de finli harici yükün ağırlık merkezi yörüngesinin X, Y, Z koordinatlarındaki değişimi, Şekil 18'de ağırlık merkezi çizgisel hızları ve Şekil 19'da Euler açıları verilmiştir. Sonuç grafikleri incelendiğinde Cradle-CFD yazılımı sonuçlarının test verileri ile yüksek oranda örtüştüğü görülmektedir. Sayısal olarak hesaplanması ve doğru sonuç alınması görece daha zor olan Transonik akış rejiminde ve havada tamamen serbest hareket edebilen bir katı cismin yörünge hesaplarının test verileri ile bu oranda örtüşmesi Cradle-CFD yazılımının hesaplama başarımını göstermektedir.



Şekil 17: Finli harici yükün ağırlık merkezinin X,Y,Z eksenlerindeki yer değiştirmesi



Şekil 18: Finli harici yükün ağırlık merkezinin X,Y,Z eksenlerindeki hız bileşenleri



Şekil 19: Finli harici yükün X,Y,Z eksenlerindeki açısal değişimleri

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Transonik akış rejimlerinin baskın olduğu şartlarda akışkan değişkenleri ani değişimler gösterebilmektedir. Ses hızı bandına çok yakın olan serbest akış hızı, geometri etrafındaki engel veya genişleme bölgelerinde ses hızını geçerek şok dalgaları oluşturmaktadır. Geometri üzerinde ses-altı ve ses-üstü akış bölgeleri iç içe geçmektedir. Bu değişkenlik, hesaplamaları zorlamakta ve olası hata oranlarını artırabilmektedir.

Cradle-CFD yazılımı ile 26 kft irtifa koşullarında, transonik akış şartlarında (0.95 Mach) 4 günlük bir analiz çözüm süresinde gerçekleştirilen ayrılma analizi ile test verileri arasında yüksek mertebede örtüşen sonuçlar elde edilmiştir. Test maliyetlerinin yüksek olduğu ve uzun test kampanya takvimleri gerektiren güvenli ayrılma fenomeninin bilgisayar ortamında hızlı ve maliyet etkin bir şekilde hesaplanabilmesi mühendislik uygulamalarında büyük kolaylık sağlamaktadır. Doğrulanmış ayrılma analizi referans alınarak birçok irtifa ve hız şartlarında farklı geometriler için analiz yapılarak testler öncesi veya tasarım öncesi doğrulama analizleri yapılabilir.

6 KAYNAKÇA

- [1] A. Cenko, «Experince in the use of computational aerodynamics to predict store release characteristic,» *Progress inAerospace Sciences*, cilt 37, no. 5, pp. 477-495, 2001.
- [2] L. E. Lijewski ve N. E. Suhs, «Time-Accurate Computational Fluid Dynamics Approach to Transonic Store Separation Trajectory Prediction,» *Journal Of Aircraft*, cilt 31, no. 4, 1994.
- [3] *CRADLE CFD scFLOW User's Guide Analysis Method*, 2024.
- [4] O. Akgun, A. I. Golcuk, D. F. Kurtulus ve U. Kaynak, «Drag Analysis of a Supersonic Fighter Aircraft,» %1 içinde *Ninth İnternatiaonal Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD9)*, İstanbul, 2016.
- [5] H. E. Rolland, «CFD Wing/Pylon/Finned Store Mutual Interface Winf Tunnel Experiment,» Arnold Engineering Development Center, Tennessee, February 1991.