

**T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**AHMED GÖVDESİNİN FARKLI ARKA YÜZEY GEOMETRİK
KONFIGÜRASYONLARI İÇİN AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN
SAYISAL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cafer KAMACI

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı**

MART, 2022

T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



AHMED GÖVDESİNİN FARKLI ARKA YÜZEY GEOMETRİK
KONFIGÜRASYONLARI İÇİN AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN
SAYISAL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cafer KAMACI
(Y1913.080003)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Kenan KAYA

MART, 2022

ONAY SAYFASI



ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “AHMED GÖVDESİNİN FARKLI ARKA YÜZEY GEOMETRİK KONFIGÜRASYONLARI İÇİN AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Kaynakça’ da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (05/01/2022)

Cafer KAMACI

ÖNSÖZ

'Bir damla petrol, bir damla kandan daha değerlidir'

-Winston Churchill

20. yüzyılın önemli siyasi karakterlerinden biri olan Churchill, geçmişten günümüze kadar yapılan birçok savaşın temelinde yatan ve neticesinde yüz binlerce insanın yaşamını yitirmesine neden olan petrolü bu sözle tanımlıyor. Uğrunda birçok masum insanın yaşamını yitirdiği doğal kaynakların verimli bir şekilde kullanılması gerektiği konusunda farkındalık yaratan bu durum, geride kalan insanlar tarafından petrolün veya türevi kaynakların bir damlasının bile boşa harcanmasının ne kadar da büyük bir hata ve bencillik olduğunu gösterir. Özellikle biz mühendislerin tarihten ders alarak verimlilik konusunda daha dikkatli tasarımlar yapmayı ilke edinmesi gerektiğinin de bir sebebidir.

Günümüzde tasarlanan araçlarda tasarım kriterleri arasında aerodinamik kuvvetler önemli bir yer tutmaktadır. Sürüklenme kuvvetleri ve kaldırma kuvvetlerinden meydana gelen bu aerodinamik kuvvetler tasarımın ihtiyacına göre istenip veya istenmemektedir. Tasarım aşamasında tespit edilmesi gereken aerodinamik kuvvetler 18. Yüzyılın başlarından buyana tasarlanmak istenen bir araç modeli “rüzgâr tüneli” adı verilen, kurulumu oldukça pahalı olan ortamda hesaplanıyordu. Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişimi ile bu mali israftan kurtulma yolunu sunan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) önemli bir kolaylık ve tasarruf sağlamıştır.

Bu çalışmada bana bilgi birikimi ile desteğini gösteren ve benim HAD ile tanışmamı sağlayan yeri geldiğinde maddi ve manevi her türlü yardımını sunan çok saygıdeğer hocam olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kenan KAYA’ ya teşekkürlerimle beraber saygılarımı arz ederim.

Ocak 2022

Cafer KAMACI

AHMED GÖVDESİNİN FARKLI ARKA YÜZEY GEOMETRİK KONFIGÜRASYONLARI İÇİN AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada 25° ve 35° 'lik arka eğim açlarına sahip Ahmed gövdesinin arka eğimli yüzeyinin hücum kenarı üzerine dikdörtgen kesitli kanatlar eklenmiş ve Reynolds sayısının 2.6 milyon olduğu durum için bu model etrafındaki üç boyutlu, türbülanslı, daimî, sıkıştırılmaz akış alanı sayısal çözümler yoluyla hesaplanmıştır. Tek, iki, üç ve dört kanat ile uzun tek kanat olmak üzere beş farklı geometrik konfigürasyon göz önüne alınmıştır. Sayısal çözümler ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü ANSYS Fluent kullanılarak yapılmıştır. Farklı türbülans modeli ve duvar fonksiyonu kombinasyonları için sayısal çözümler yapılmış ve daha önce üzerine kanat eklenmiş Ahmed gövdesinin incelendiği bir deneysel çalışmadan elde edilen sürüklenme katsayısı sonuçları referans alınarak sayısal model doğrulanmıştır. Buna göre, k-epsilon Realizable türbülans modeli ve Menter-Lechner duvar fonksiyonu kombinasyonu %8.8'lik hata ile söz konusu deneysel çalışmadakine en yakın sonucu vermiştir. Sayısal çözüm sonuçlarına göre, arka eğim açısı 25° olan Ahmed gövdesi için en iyi performans, kanatsız modele göre sürüklenme katsayısında 2.6% oranında bir düşüş ile üç kanatlı durumda elde edilmiştir. Çeşitli düzlemlerdeki hız vektörleri, akım çizgileri ve basınç kontürleri birlikte incelenmiş ve arka eğim açısı 25° olan Ahmed gövdesinde sürüklenme katsayısı düşürme mekanizmasının, arka yüzeyin hücum kenarı üzerinde kısmi yüksek basınç bölgeleri oluşmasına ve arka eğimli yüzey üzerinde oluşan ikincil girdabın yok edilerek, ters yönlü olduğu halde akımın arka yüzeye tutunmasına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, arka eğim açısı 35° olan Ahmed gövdesinde arka eğimli yüzey üzerinde ikincil bir girdabın oluşmadığı ve buradaki ters akım zaten yüzeye tutunduğundan arka eğimli yüzey üzerinde akım ayrılmasının gerçekleşmediği görülmüştür. Bu nedenle arka eğim açısı 35° olan Ahmed gövdesinde kanat eklenmesinin sürüklenme katsayısında yarattığı değişim

ihmal edilebilir düzeyde kalmakla birlikte, iki, üç ve dört kanat eklenmesi durumunda sürüklenme katsayısının küçük bir oranda arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kanat, Pasif akış kontrolü, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Türbülanslı akış, Sürüklenme katsayısı.



**NUMERICAL INVESTIGATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF
AHMED BODY FOR DIFFERENT REAR SLANTED SURFACE
CONFIGURATIONS**

ABSTRACT

The present study investigates aerodynamic characteristics of Ahmed Body numerically, in case of that rectangular flaps are attached to the leading edge of the rear slanted surface with rear slant angles of 25° and 35° . Numerical calculations have been conducted for three-dimensional, turbulent, steady, incompressible flow; for a Reynolds number of 2.6 million. Five different flap configurations have been considered: single flap, two flaps, three flaps and four flaps, as well as a single long flap. The commercial computational fluid dynamics solver ANSYS Fluent is used for the computations. Numerical solutions have been conducted with different combinations of turbulence model and wall functions, and the numerical model is validated considering the values of drag coefficient obtained in a previous experimental work which studied slanted surface with flaps attached. Accordingly, the k-epsilon Realizable turbulence model with Menter-Lechner wall function estimates the drag coefficient the closest to that of the previous experimental study, with an error of 8.8%. Results of the numerical calculations have shown that, for the Ahmed model with 25° rear slant angle, the best performance is obtained with three flaps mounted on the leading edge of the rear slanted surface, which provides a reduction in drag coefficient by 2.6%, compared to the model without flaps. Velocity vectors, streamlines and pressure contours in various planes are examined together and it is found that the drag reduction mechanism for the Ahmed model with a rear slant angle of 25° , relies on generating a suction line along the leading edge of the rear slanted surface and thus eliminating the secondary vortex formed on the rear slanted surface, so that the flow remains attached, although it is reversed. On the other hand, for the Ahmed model with 35° rear slant angle, a secondary vortex does not form on the rear slanted surface, since the reverse flow here is already attached, and no flow separation

occurs on the rear slant. Therefore, change in the drag coefficient by employing flaps is negligible, moreover, the drag coefficient slightly increases for the two-, three-, and four-flap configurations.

Keywords: Flap, Passive flow control, Computational fluid dynamics, Turbulent flow, Drag coefficient.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	ix
SEMBOLLER LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xiii
I. GİRİŞ.....	1
A. Literatür Özeti	2
II. SAYISAL YÖNTEMLER	6
A. Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD).....	6
1. Çözüm Adımları	7
2. Diferansiyel Hareket Denklemleri	9
3. Türbülans Modelleri	10
III. SAYISAL MODEL VE DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI.....	13
A. Parametrik Çözümler	13
1. Ağdan Bağımsızlık	14
a. Geometri.....	14
b. Çözüm ağı	16
c. Problem kurulumu ve çözümü	22

2. Farklı Türbülans Modellerinin Karşılaştırılması	24
IV. FARKLI ARKA YÜZEY KONFIGÜRASYONLARININ SAYISAL ÇÖZÜMÜ.....	25
A. Sayısal Model.....	25
B. Kanatlı Model İçin Sayısal Çözüm Sonuçları.....	27
V. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	48
VI. KAYNAKÇA	50
ÖZGEÇMİŞ.....	54



KISALTMALAR LİSTESİ

- 3B** : 3 Boyutlu
- CPU** : Central Processing Unit
- DES** : Detached Eddy Simulation
- DNS** : Direct Numerical Simulation
- HAD** : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
- LES** : Large Eddy Simulation
- RANS** : Reynolds Averaged Navier-Stokes
- RSM** : Reynolds Stress Model
- SST** : Shear Stress Transport

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Yüzey alanı
A_D	: Serbest akıma dik doğrultudaki projeksiyon alanı
A_L	: Akıma paralel düzlem üzerindeki iz düşüm alanı
C_D	: Sürüklenme katsayısı
C_L	: Kaldırma kuvveti katsayısı
F_D	: Toplam sürüklenme kuvveti
F_L	: Toplam kaldırma kuvveti
k	: Türbülans kinetik enerjisi
L	: Araç uzunluğu
p	: Basınç
Re	: Reynolds sayısı
t	: Zaman
V	: Serbest akım hızı
$u_{i,j,k}$: Hızın i,j,k bileşenleri
u'	: Çalkantı hızının toplamı
\bar{u}	: Zaman ortalamalı hız
x,y,z	: Üç boyutlu Kartezyen koordinat sistemi eksenleri
ε	: Türbülans sönümlenme katsayısı
ν	: Kinematik viskozite
ρ	: Yoğunluk

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1 HAD analizinin üç ana elemanı arasındaki bağıntı yolları (Tu vd., 2018: 35)	9
Şekil 2 Türbülanslı akışa ait geliş güzel bir konumda meydana gelen hızın zamana bağlı çalkantıları (Tu vd., 2018: 99)	11
Şekil 3 Kanat eklenmiş Ahmed gövdesine ait detaylı teknik çizim (Aider ve Beaudoin, 2008: 491-501)	14
Şekil 4 XZ düzlemi boyunca kesilmiş Ahmed gövdesinin YZ düzleminde görünüşü	16
Şekil 5 Ahmed gövdesinin çözüm alanı içerisindeki konumu ve sınır şartları	16
Şekil 6 Ahmed gövdesi yüzeylerinin isimlendirilmesi	17
Şekil 7 2.4 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı için seçilen en dıştaki hacime ait boyutlandırma detayları	17
Şekil 8 2.4 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı için Ahmed gövdesinin seçilen alt, üst ve yan yüzeylerindeki prizmatik elemanlara ait detaylar	18
Şekil 9 2.4 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı için seçilen tüm araç yüzeylerine uygulanan boyutlandırma detayları	18
Şekil 10 2.4 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı için seçilen Ahmed gövdesinin kanat yüzeylerine ve arka eğim yüzeyindeki prizmatik elemanlara ait detaylar	19
Şekil 11 2.4 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı için seçilen Ahmed gövdesinin arka eğik yüzeyine ve kanadın alt yüzeyine ait uygulanan boyutlandırma detayları	20
Şekil 12 2.4 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı için Ahmed gövdesine ait kanadın iç bükey ve dış bükey radüslerine ait uygulanan boyutlandırma detayları	20
Şekil 13 Araç çevresindeki çözüm ağının genel görünüşü	21
Şekil 14 Yapılan işlem sonunda toplam eleman sayısı 2 400 447	21
Şekil 15 Kanat çevresindeki ağın inceltilmesi	21

Şekil 16 Sayısal çözümlerde kullanılan Ahmed gövdesinin a) yan görünüş, b) arka görünüş ve c) parçalı kanat detay görünüşü (Uzunluk ölçü birimleri mm cinsindedir.)	25
Şekil 17 Ahmed gövdesi için uygulanan farklı arka eğimli yüzey konfigürasyonları	26
Şekil 18 Oluşturulan çözüm ağının genel ve detay görünüşleri.....	27
Şekil 19 Ahmed gövdesi yüzeylerinin gösterimi	31
Şekil 20 25° Ahmed gövdesi için net sürüklenme kuvvetinin yüzeylere göre dağılımı	32
Şekil 21 Simetri düzlemindeki ($y/W = 0$) akım çizgileri ve vektörler a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (25° arka eğim açısı)	35
Şekil 22 Ahmed gövdesi üzerindeki basınç konturları a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (25° arka eğim açısı).....	38
Şekil 23 $x/L = -0.08$ düzlemindeki akım çizgileri ve vektörler: a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (25° arka eğim açısı).....	40
Şekil 24 $x/L = 0$ düzlemindeki akım çizgileri ve vektörler: a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (25° arka eğim açısı).....	41
Şekil 25 35° Ahmed gövdesi için net sürüklenme kuvvetinin yüzeylere göre dağılımı	43
Şekil 26 Simetri düzleminde çizilen akım çizgileri ve vektörler ($y/W = 0$) a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (35 ° arka eğim açısı)	44
Şekil 27 $y/W = 0.4$ düzleminde çizilen akım çizgileri ve vektörler a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (35 ° arka eğim açısı).....	45
Şekil 28 Ahmed gövdesi üzerindeki basınç konturları a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (35° arka eğim açısı).....	46

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1 Ağdan bağımsızlık çalışmasına ait sonuçlar	24
Çizelge 2 Farklı türbülans modellerinin karşılaştırılmasına ait sonuçlar	24
Çizelge 3 Sayısal çözümlerden elde edilen sürüklenme katsayısı değerleri	28
Çizelge 4 25° arka eğim açılı Ahmed gövdesinin yüzeyleri üzerine etkiyen sürüklenme kuvveti değerleri.....	31
Çizelge 5 Arka yüzeyler üzerindeki ortalama basınç değerleri	32
Çizelge 6 35° arka eğim açılı Ahmed gövdesinin yüzeyleri üzerine etkiyen sürüklenme kuvveti değerleri.....	43
Çizelge 7 25° ve 35° arka eğim açılı Ahmed modelleri için elde edilen kaldırma katsayısı değerleri.....	47

I. GİRİŞ

Ortalama bir sürata sahip bir kara aracının sarf ettiği enerjinin %60'ını sürüklenme direncini yenmek için harcamaktadır (Byrne, 1999: 398-398). Bu nedenle aerodinamik tasarımların iyileştirilerek yakıt sarfiyatında azalma, egzoz emisyonunda iyileşme ve araçlardaki gürültünün azaltılmasını sağlamak amacıyla birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir araştırmaya göre taşıtların aerodinamik sürüklenme kuvvetindeki %12'lik iyileşmenin yaklaşık 12 milyon m³ yakıt tasarrufu sağlayacağı ve 28 milyon ton daha az egzoz gazı üretildiği tespit edilmiştir (Salari vd., 2004).

Çoğu aerodinamik problemi analitik yöntemlerle ele alındığında çözülemeyecek kadar komplekstir ve bu sebepten ötürü ampirik datalara dayanan bağıntılara güvenilmektedir. Ancak ampirik verileri elde etmek oldukça pahalı ve zaman alıcı bir yoldur. Bu nedenle teknolojinin ilerlemesiyle üretilen hızlı bilgisayarlar sayesinde esas denklemleri nümerik olarak çözerek bir takım nümerik deneyi hızlı bir şekilde gerçekleştirerek tasarımın zaman alıcı ve pahalı testleri son aşamada, yani rüzgâr tünellerinde gerçekleştirmeye olanak kılmıştır. İster tasarlanan araç hava içerisinde hareket etsin ister hava duran araç üzerinden hareket etsin, görünüşte farklı olan bu olaylar aslında birbirlerine denktir. Amaçlanan hava ile model arasındaki bağıl harekettir. Ampirik çalışmalarda kullanılan basitleştirilmiş model araç çoğunlukla Ahmed Gövdesi (Ahmed Body) olarak isimlendirilen basit modeldir (Ahmed, 1984: 473-503).

Yüksek hızlı bir akışkanı, keskin köşelere sahip bir modelin üzerinden akmaya zorlanırsa, akışkan cismin keskin şekle sahip yüzeyine tutunamayıp ayrılır ve aracın arka kısmında düşük basınçlı bölge yani ayrılmış bölge meydana gelmesine neden olur. Bu olay da aracın ön kısmı ile arka kısmı arasında bir basınç farkı meydana gelmesine yol açmaktadır. Basınç farkı, direnç katsayısını (C_D) arttırmaktadır ve dolayısı ile titreşim, gürültü ve yakıt sarfiyatının artmasına neden olmaktadır. Araçlarda keskin köşelerin kaldırılıp akım çizgili hale getirilmesi günümüzdeki metal

şekillendirme teknolojisi ile daha mümkün hale gelmektedir. Ortalama C_D değeri 1940 yılında 0.70, 1970 yılında 0.55, 1980 yılında 0.45 ve 1990 yılında 0.30'a kadar düşürülmüştür (Çengel ve Cimbala, 2008: 576).

A. Literatür Özeti

Siddiqui ve Chaab, (2021: 147-164) arka eğim açısı 35° olan Ahmed gövdesi modelinin arka eğimli yüzeyi ile aracın tavanı arasındaki kenara dikdörtgen kanat ekleyerek yaptıkları tasarımda, ekledikleri bu kanadı 0° ile 25° arasında 7.8×10^5 Reynolds sayısı ile birlikte FLUENT yazılımını kullanarak SST k-omega türbülans modeli ile yaptıkları çözümlemede dikdörtgen kanadın arka eğim yüzeyi ile yaptığı 10° 'lik açıda sürtünme direncinin belirtilen şartlar altında en yüksek %14 oranında azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Delassaux vd., (2021: 104757) yaptıkları çalışmada arka eğim açısı 25° olan orijinal Ahmed gövdesi ile kenarları yuvarlatılmış arka eğik yüzey için Shear Stress Transport modellerini kullanarak mukayeseli bir araştırma yapmışlardır. Sonuç olarak keskin kenarlı model etrafındaki akışın hibrit modeller ile daha doğru çözülebileceğini belirtmişlerdir. Hanfeng vd., (2017: 34-44) yaptıkları çalışmada arka eğim açıları 25° ve 35° olan iki adet Ahmed gövdesi referans olarak arka eğimleri üzerine yerleştirdikleri büyük ve küçük kanatlar ile 60 m/s hız ve 4.29×10^6 Reynolds sayısı için yaptıkları araştırmalarda 25° 'lik arka eğim açısına sahip Ahmed gövdesi için eklenen kanatların her birinde uzunlamasına girdapları zayıflattığı ve arka eğimli yüzeyin yan kısmına eklenen kanadın 80° 'lik açı için sürtünme katsayısında %21.2'lik azalma olduğunu, 40° ve 20° açılarda büyük ve küçük kanatlar için %17.9'luk bir azalmayı tespit etmişlerdir. Arka eğim açısı 35° olan Ahmed gövdesi için de aracın üst kısmındaki büyük kanadın 30° 'de olması durumunda ve aynı zamanda yan kısmında bulunan büyük kanadın 80° 'lik pozisyonunda hesaplanan sürtünme katsayısında %6'lık bir değerde azalma meydana geldiğini görmüşlerdir. McNally vd., (2015) yaptıkları çalışmada 25° 'lik arka eğim açısına sahip Ahmed gövdesinin arka eğim kısmına uyguladıkları mikro jet dizileri vasıtasıyla aracın ön kısmı ile arka kısmı arasında oluşan basınç farkını minimize etmeye çalışmışlardır. Eğimli yüzeyin, arka üst kenarında ve arka alt yüzeyin yan kenarlarında uygulanan mikro jetler araç arkasında %1 ve %7'lik çok az bir basınç artışı tespit etmişlerdir. Bu çalışma esnasında hedeflenen en büyük basınç artışına %45 ile sebep olan eğik kenarların aşağı tarafında model boyunca yan yönlü çalıştırılan mikro jetler de

gözlemlemiştir. Tsai vd., (2009: 3661-3673) yaptıkları çalışmada Ahmed gövdesine benzer bir araç modelini Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımı ile etrafındaki akışı incelemiştir. Çalışmalarında aerodinamik olarak ele alınan kısımlarında k-epsilon türbülans modeli ile ticari bir yazılım olan FLUENT, aeroakustik kısımları içinde Large Eddy Simulation (LES) türbülans modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada düşük Mach sayılı akış ortamları için aeroakustik ve aerodinamik yöden tahmini için iki basamaklı yöntemle doğrulama yapılmıştır. Kurec vd., (2019: 105140) yaptıkları çalışmada bir otomobile takılan arka kanadın düşük ve yüksek hücum açıları incelemiştir. Otomobil üzerinde farklı bölgelere yerleştirilen hava freninin otomobilin dengesini nasıl etkilediğini, ön ve arka akslarda meydana gelecek yük dağılımlarını incelemiştir. Rüzgâr tüneline yapılan incelemeler sonucu elde edilen verilere göre aerodinamik özelliklerin bir otomobil frenleme manevrasında üzerinde ne kadar etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Bunlarla birlikte otomobil arka kanat elemanının otomobil etrafındaki hava akışını etkileyebileceği bastırma kuvveti ile birlikte sürüklenme kuvvetini artırmak içinde nasıl istifade edileceğini göstermişlerdir. Han vd., (2016: 285-298) yaptıkları çalışmada cam elyaf ve alaşım tel takviyeli şekil hafızalı kompozit bir malzeme ile dokuma tipi akıllı yumuşak kompozit tasarlayarak bir aracın arka spoylerine 1/8 ölçek oranında uygulamışlar ve aracın aerodinamik performans ölçülerini belirlemek için bir rüzgâr tüneline çeşitli rüzgâr hızlarda, farklı çalışma seçenekleri altında ve farklı hücum açıları ile rüzgâr tüneline deneyleri yapmışlardır. Bastırma kuvveti, sürüklenme kuvveti, yalpalama momenti ve yan kuvvetler araç modelinin kütle merkezine takılmış aerodinamik bir çubuk vasıtasıyla eklenen dinamometre istifade edilerek spoylerin çalışmasından önce ve çalışması sırasında ölçümler yapmışlardır ve rüzgarlığın çalıştırılması esnasında sürüklenme katsayısı takribi olarak %41 artarken bastırma kuvveti %198 arttığını gözlemlemiştir. Yuan vd., (2017: 12927-12933) Ahmed gövdesi bir aracın arka kısmına ekledikleri şerit modeli arka tavan kanadının hatchback araçların aerodinamik olarak performans değerlendirmesi yapmak için RANS tabanlı HAD metodu ile araştırma yaptılar. Sonuç olarak aerodinamik kaldırma kuvvetinin kanadın eğim açısı ile takribi olarak doğrusal azaldığını ve sürüklenme kuvvetindeki artışla birlikte eşlik ettiğini, tüm bu sonuçlarla birlikte kanadın tavan ile yaptığı 0°'lik bir açıda hem sürüklenme kuvvetinin hem de kaldırma kuvvetinin eş zamanlı olarak bir azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Tüm bu bahsedilen mevcut sonuçları Ahmed gövdesinin hareketsiz kabul edildiği simülasyonlar ile elde

edilmiştir. Altaf vd., (2014: 30-43) çalışmalarında HAD ortamında basitleştirilmiş MAN TGX modeli bir araç için sürüklenme katsayısı değerini düşürmek amaçlı eliptik şekle sahip birtakım kanatlar kullanmışlar. Kullanılan eliptik kanadın optimum açısını 50° olarak hesaplamışlar ve eliptik kanat modeli için sürüklenme katsayısında %11.1'lik oranda azalmayı elde etmişlerdir. Humenic vd., (2012: 15-32) yaptıkları çalışmada 35° arka eğim açısına sahip Ahmed gövdesinin arka alt kısmında yaptıkları 7° lik eğim sayesinde aracın arka kısmında venturi nozul şeklini kazandırmışlardır. Yapılan bu tasarımda alt ön kısımda aerodinamik değişiklik olmazken aracın kavisli ön alt kısmında basınç değişiklikleri saptanmıştır. Mohammadikalakoo vd., (2020: 104330) pasif akış kontrol tasarımı ile ele aldığı 25° , 30° ve 35° lik Ahmed gövdesi üzerinde uygulayarak aracın yan duvarlarındaki havayı borular vasıtasıyla aracın arka kısımlarına taşımışlar ve bu sayede aracın arka kısım ile ön kısım arasındaki akış ayrılmalarından doğan basınç farkını minimuma indirmeyi başarmışlardır. Deneylerde 10, 20 ve 30 m/s hızlar ile aldıkları farklı konfigürasyonlarda %2-5 arasında sürüklenme azalması elde etmişlerdir ve en iyi sürüklenme azalmasını 35° lik Ahmed gövdesi ile 30 m/s hızda %5.07 olarak tespit etmişlerdir. Buscariolo vd., (2021: 104411) çalışmalarında klasik Ahmed gövdesinde arka eğim açısı 25° ve 0° yani kare biçiminde olmak üzere iki modelde uygulanan aracın arka alt kısmına eğim verilmiş ve eğim açısı 0° ila 50° arasında test edilmişlerdir. 1.7×10^6 Reynolds sayısında yaptıkları çalışmalarda 25° Ahmed gövdesinde 10° lik difüzör açısı ile maksimum baskı kuvveti elde etmişlerdir. Kashyap vd., (2019) yaptıkları çalışmada Ahmed gövdesine benzer bir aracı bilgisayar destekli tasarım ortamında tasarlayarak araç kaputunda 60 mm çapında ve merkezden merkeze 90 mm mesafesi bulunan küresel çöküntüler oluşturarak bu çöküntülerin en-boy oranları arasındaki optimizasyon yardımı ile sürüklemeyi azaltmayı amaçlamışlardır. Mevcut araştırmada en-boy oranları 2 ile 8 arasında oranlarla dikkate alınmış 22 ile 30 m/s araç hızı ortamında simüle edilmişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda 28 m/s araç hızında ve 4 en-boy oranına sahip küresel çöküntü ile sürüklenme katsayısında maksimum %6'lık bir azalma elde etmişlerdir. Shadmani vd., (2018: 1267-1276) yaptıkları çalışmada 25° Ahmed gövdeli bir aracın arka eğim açısı ile arka eğimli kısımdaki akışı plazma aktüatörü yardımı ile kontrol etmek için aktif akış kontrol yöntemi kullanmışlardır. Çalışmada kararlı ve kararsız akış ortamında 10 ve 20 m/s hızlar kullanılmış oluşan basınç dağılımı 52 sensör ile ve sıcak telli anemometre yardımıyla ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuç

olarak 20 m/s hızında sürüklenme kuvvetinin yaklaşık %2 azaldığını tespit etmişlerdir. Bayındırlı vd., (2018: 785-795) Ahmed gövdeli bir araç modelinde 4 farklı Reynolds sayısında yaptıkları çalışmada sürüklenme kuvvetinin %13.38'i sürtünme kaynaklı olurken %86.42'si basınç kaynaklı olduğunu tespit etmişlerdir. Araç modelinin önüne ekledikleri pasif akış kontrol elemanı ile 173000-346000 aralığında 4 Reynolds sayısı ile yapılan hesaplarda aerodinamik olarak %5.37'lik bir iyileşme oranı sağlanmıştır. Zafer ve Haskaraman, (2017: 215-229) arka eğim açısı 25° ve 35° olmak üzere iki Ahmed gövdesi modeli üzerinde yaptıkları çalışmada önden ve yandan gelen rüzgâr şartları altında 2.8×10^6 Reynolds sayısı için Realiable k-epsilon türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirmişler. Sonuç olarak aracın iz bölgesinde iki adet birbirleri ile ters yönde döneme hareketi yapan ve simetrik olmayan iki vorteksin içinde yer aldığı iz alanı genişliğinin yanal rüzgâr durumu ile önden gelen rüzgâr durumu neticesinde %60-70 oranında küçülme olduğunu tespit etmişler. Bayındırlı ve Çelik, (2019: 470-479) Ahmed gövdesine benzer bir araç modeline ekledikleri bir iki farklı ölçüye sahip kanat modeli ile sürtünme kuvveti üzerindeki etkilerini beş farklı Reynolds sayısı için incelemişlerdir. Sonuç olarak her biri farklı yüksekliğe sahip kanat için sırasıyla %4.96 ve %5.27 oranında aerodinamik olarak iyileşme sağlamışlardır. Aider ve Beaudoin, (2008: 491-501) Ahmed gövdesinin üzerinde küçük değişiklikler yaparak ürettikleri modeli arka eğim ve arka yüzeyinin her kenarına yerleştirdikleri kanatları servo motor yardımıyla hareket ettirerek değişik açılarda ve farklı kanat konfigürasyonlarını rüzgâr türbininde 3 farklı rüzgar hızı ile test ettirmişlerdir. Sonuç olarak PIV ölçümlerinden elde ettikleri verilere göre en iyi verimi arka eğim yan kenarlarında bulunan kanat ve eğim üzerinde ki kanata elde edilmişlerdir. Bu arka eğimin yan kenarlarında bulunan kanatlar sayesinde araç arkasında akış ayrılmasından dolayı doğan ters girdaplar arka eğime doğru dikey hız oluşturarak arka eğim üzerindeki ayrılmaları geciktirdiğini tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada, özgün bir pasif akış kontrol yöntemi olarak, 25° ve 35° arka eğim açısına sahip orijinal Ahmed Gövdesinin arka eğik yüzeyinin hücum kenarı üzerine kanatların yerleştirildiği durumda aracın aerodinamik özelliklerindeki değişim sayısal olarak incelenmiştir.

II. SAYISAL YÖNTEMLER

A. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Akışkanlar mekaniğinde, bünyesinde kısmi türev içeren temel denklemlerin çözmesi ciddi dikkat ve sabır isteyen bir iştir. Akışkanların belirli koşullar altındaki davranışlarını tahmin etmek için, bu temel denklemlere bazı basitleştirilmiş varsayımlar yaparak teorik çözümler bulabiliriz. Ancak beklendiği gibi, bu gerçek durumla tam olarak uyuşmamaktadır. Bu durumda, akışkanlar mekaniği uygulamalarında ortaya çıkan problemleri analiz etmek için aynı anda iki yöntem yani deneysel ve teorik yol kullanılmaktaydı.

Akışkanlar dinamiğinde deneysel çalışmaların temeli 17. yüzyılda Avrupa'da atılmıştır. 18. ve 19. yüzyıllarda akışkanlar dinamiğinde teorik çalışmalar gelişti. Neticede, akışkanlar dinamiği alanında yapılan uygulamalar bir yandan teorik ve yandan deneysel sonuçların mukayesesiyle oluşuyordu. 1960'lara kadar bu iki ayrı ilke üzerinde araştırmalar yapıldı. Bununla birlikte, yüksek deneysel araştırma maliyetine ve zaman alıcı kurulumuna ek olarak, deney kurulumunda bazı ortam koşullarının sağlanması da imkansızdı (örneğin, yüksek sıcak ortam veya yüksek Mach sayıları içeren rüzgâr tünelleri gibi) (Tu vd., 2018: 3-4).

Günümüzde, yüksek işlem hızına ve işlem gücüne sahip bilgisayarların yanı sıra fizik problemlerini daha doğru çözen sayısal algoritmaların ortaya çıkışı, akışkanlar dinamiğinin çeşitli uygulamalarının nasıl inceleneceği konusunda yeni bir çağ açmıştır. Bu nedenle akışkanlar mekaniği, matematik ve bilgisayar programlama biliminin sunduğu imkanlara erişmesiyle hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) bir akışkanlar dinamiği alanı olarak ortaya çıkmıştır. HAD, akışkan hareketi ile ilgili problemleri çözmekle ilgilenir ve bunu yaparken çeşitli sayısal teknikler ve algoritmalar kullanır. Bu, akışkanlar dinamiği alanındaki araştırmalarımızda deneysel ve teorik yöntemlerden sonra üçüncü bir yaklaşım izlememizi sağladı.

Başlangıçta, HAD esas olarak havacılık ve uzay bilimlerinde araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde kullanıldı. Ancak bugün neredeyse tüm mühendislik disiplinlerinde karmaşık problemleri çözmek için güçlü bir araç olarak da kullanılıyorlar. HAD'nin kullanım alanları özetle çevre, inşaat, imalat, otomotiv ve gemi mühendislikleridir.

Genel olarak, bilimde sayısal çözümlerin geliştirilmesi, yönetici denklemlerinin kurulmasına ve çözümüne ve bu çözümlere farklı yaklaşımların geliştirilmesine bağlıdır. HAD, yönetici denkleminin bazı özel terimlerini daha ayrıntılı bir analizini yapmanızı sağlar. HAD; reel akışkan hareketinin simülasyonu yoluyla hem deneysel hem de teorik yöntemleri dahil ederek akışkanlar dinamiğine bir alternatif yol haline gelmiştir. Analitik yöntemlerle gerçekleştirilemeyen karmaşık akış problemlerini çözmek, deneysel yöntemlere göre daha kısa zaman da ve daha düşük bütçe ile araştırma ve geliştirme çalışması yapmak ve uygulanamayan veya tekrarlanamayan senaryoları (örneğin depremler, nükleer kazalar vb.) analiz etmek mümkün hale gelmiştir.

Bunlarla birlikte, HAD geleneksel deneysel yöntemlerin yerini almamıştır (Tu vd., 2018). Örneğin, rüzgâr tünelleri hala ekipman olarak kullanılmaktadır ve gerçek akış tipini simüle ederek çok doğru sonuçlar vermektedir. Çok fazlı akış, kaynama ve yoğunlaşma gibi HAD'nin hala yetersiz olduğu çalışmalarda deneysel yöntemler hala büyük önem taşımaktadır. Öte yandan, hesaplama hataları nedeniyle, gerçek durum ile bilgisayar simülasyonunun sonuçları arasında farklılıklar vardır. Sayısal sonuçların görsel olarak incelenmesi, doğru olmadıkları ancak gerçek durumla ilgili oldukları izlenimini sunabilir. Bu nedenle, doğruluğunu hakkında fikir edinmeden önce verileri ayrıntılı olarak incelemelisiniz.

1. Çözüm Adımları

Herhangi bir akış probleminin sayısal çözümü aşağıdaki adımlardan oluşur:

- İlk olarak, problemin akışkan hareketini cebirsel formda gösteren yönetici denklem belirlenir. Bu yolla çoğunlukla bir kısmi diferansiyel denklem sistemi oluşturulur.

- Daha sonra sayısal işlemleri gerçekleştirmek için bu denklemlere "ayrıklaştırma" adı verilen bir dönüşüm uygulanır.
- Ayrıklaştırma işleminin ardından; akış olayının gerçekleştiği yerde sonlu sayıda nokta/hacimden oluşan bir yüzey veya hacim oluşturulur. Bu, çözüm ağıdır.
- Son adım da ise başlangıç ve sınır koşulları belirlenir ve problemin çözüm aşamasına geçilir.
- Çözüm adımı mümkün mertebede yapıldıktan sonra, sonuçlar sayısal veya görsel olarak analiz edilir ve yorumlanır.

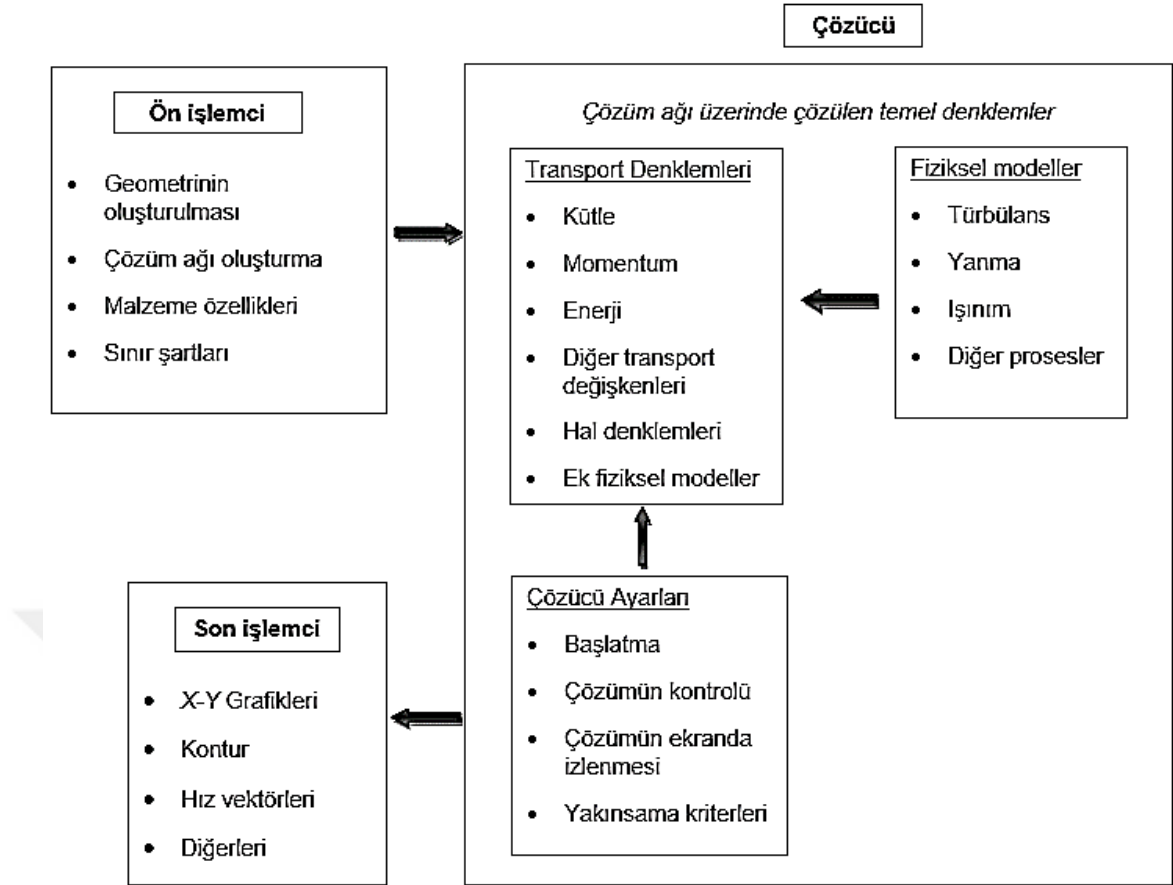
Yukarıdaki adımlar, günümüzde piyasada yer alan hazır program sayesinde ivedi bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu programların kullanıcıları çözümlerini 3. adımda başlatırlar çünkü bu programlar akışkanlar dinamiği ve ısı transferi denklemlerini farklı sayısal yöntemlere uygun bir biçimde temsil eden kodlar içerir.

Yukarıda bahsi geçen programlar üç elemandan oluşur:

Ön işlemci: Söz konusu geometriyi oluşturmak veya akış olaylarının meydana geldiği bu geometrinin etrafında çözüm ağı oluşturulması için mevcut geometriyi içe aktarmak ön işlemcinin görevidir. Sınır koşulları da belirlenerek ilgili problemin çözümüne zemin hazırlar.

Çözücü: Ön işlemci tarafından oluşturulan çözüm ağı, çözücüye aktarılır ve yönetici denklemlerin karşılığı olan nümerik kodlar bu ağ üzerinde yürütülür. İlk olarak, çözümü hangi akış modelinin çözeceğini belirlenir ve başlangıç kriterleri girilir.

Son işlemci: Son adımda yapılan çözümlerin sonuçları nümerik olarak veya görsel olarak yorumlanır.



Şekil 1 HAD analizinin üç ana elemanı arasındaki bağıntı yolları (Tu vd., 2018: 35)

2. Diferansiyel Hareket Denklemleri

Akışkanlar mekaniğinde bir akışkanın hareketini cebirsel olarak ifade eden diferansiyel hareket denkleminin temeli 3 yasaya dayanmaktadır (Tu vd., 2018; Anderson, 1995; Versteeg ve Malalasekera, 1995).

- Uzak zamanda rastgele ele alınan kütle hacmi içerisinde meydana gelen kütle değişim hızının ilgili kontrol hacminin yüzeyinden geçen net kütle akısına eşit olmasına “kütlenin korunumu yasası” denir.
- Rastgele ele alınan ilgili uzay hacminin momentum değişim hızının aynı kontrol hacminin yüzeyden akan net momentum akısına eşit olmasına “momentumun korunumu yasası” denir.
- Ele alınan ilgili hacimsel elemanın enerjisindeki net değişim, birim zamanda harcanan net ısı ile aynı hacimsel elemana birim zamanda yapılan net iş toplamına eşittir. Bu, “enerjinin korunumu” yasasıdır.

Yukarıda bahsedilen üç ilkenin en yaygın formu; Sıkıştırılabilir, zamana bağlı ve viskoz akışı bir arada ifade edebilmeyi Navier-Stokes denklemleri bünyesinde zaman göre kısmi türev ve yoğunluğun kısmi türev terimlerinin ayıklanması ile elde edilir.

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

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \quad (3)$$

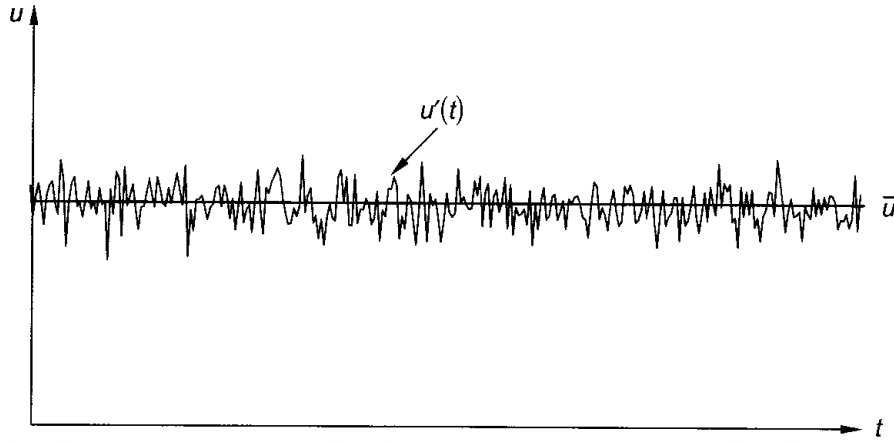
$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \quad (4)$$

İfade edilen denklemlerde ρ yoğunluk; u , v ve w hız; ν kinematik viskozite, p basınçtır. Denklem 1 “süreklilik”, Denklem 2-3-4 “momentum korunumu” denklemleridir. Bu çalışmada adyabatik akış kabulü yapıldığı için enerji korunumu denklemi burada ifade edilmemiştir. Bu sayede problemdeki dört bilinmeyeni (u , v , w , p) çözecek dört denklem elde edilmiştir.

3. Türbülans Modelleri

Mühendislerin ele aldığı birçok akış problemi doğası gereği türbülanslı davranış sergiler. Laminer akış problemleri tümüyle süreklilik ve momentum denklemleri ile ifade edilir. İlgili denklemler daha basit hallerde analitik yollar ile çözülebilir. Diğer taraftan daha komplike akışlar HAD yöntemleri ile nümerik olarak incelenmelidir. Herhangi bir laminer akış özelliği gösteren akım çizgisinde meydana gelen küçük bir çalkantı sonucunda düzensiz ve geliş güzel bir hareket olarak da bilinen türbülansa yol açar. Atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere oranı yani Reynolds sayısı türbülansı belirlemenin yoludur. Düşük Reynolds sayılarında yani atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlerden daha düşük olduğu durumda akış içinde kendiliğinden meydana gelen düzensizlikler sönmülenerak akış laminer olarak devam eder. Viskoz kuvvete oranla daha büyük atalet kuvvetleri, yüksek Reynolds sayıları, akışta meydana gelen çalkantıları şiddetlendirerek akışı türbülanslı hale getirir. Şekil 2’de türbülanslı akış içerisinde rast gele bir noktasında zamana bağlı hızın çalkantıları gösterilmiştir. Çalkantı hızlarının zamanla geliş güzel değişimini konum denklemleri ile tahmin

edilmesi zordur. Çünkü Navier-Stokes denklemlerinde yer alan hız ve basınç ölçümleri anlıktır ve denklemlere bağlı hesaplamayı neredeyse olanaksız kılar.



Şekil 2 Türbülanslı akışa ait geliş güzel bir konumda meydana gelen hızın zamana bağlı çalkantıları (Tu vd., 2018: 99)

Bu sebepten ötürü anlık hız $u(t)$ hız, \bar{u} zaman ortalamalı hız ile $u'(t)$ çalkantı hızının toplamı şeklinde ifade edilir:

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (5)$$

RANS tabanlı bir model olan Spalart-Allmaras, Boussinesq yaklaşımı kullanılarak Reynolds gerilimleri, K- ϵ ve k- ω modelleri elde edildiğinde, gerilme denklemleri doğrudan RSM modelinde çözülür. RSM modeli, Navier-Stokes denklemlerinden ek denklem içerdiğinden dolayı daha fazla hesaplama gücü gerektirir. DNS modeli ise türbülanslı akımların diğer yöntemlere kıyasla en doğru biçimde çözüldüğü modeldir. Bu model, Navier-Stokes denklemlerini türbülans modelleri olmadan doğrudan çözer. Ancak oldukça yüksek bir CPU kapasitesi gerektirir.

Çözünürlük süresi $Re^{9/4}$ ile doğru orantılı olarak artar. LES modelinde büyük girdaplar çözülür, ancak nispeten küçük ve kaybolmaya meyilli küçük girdaplar modellenir. Tipik olarak, RANS tabanlı bir modelden daha ince bir çözüm ağına ihtiyacınız vardır. Bununla birlikte, bu model büyük miktarda bilgi işlem kaynağı gerektirir, bu nedenle uygulama kapsamı henüz geniş değildir. DES modeli ise RANS modeli ile LES modelini birleştiren hibrit bir modeldir. Bu modelde, duvara yakın

alanlar RANS benzeri bir yaklaşımla çözülrken, serbest akışlı alanın geri kalanı LES yaklaşımıyla çözülr.

k - ϵ modeli en sık kullanılan türbülans modellerinden biridir. Biri türbülans kinetik enerjisi k ve diğeri türbülans sönümlleme faktörü ϵ için olmak üzere iki taşıma denklemi içerir. k - ϵ modeli *Standard*, *Realizable* ve *RNG* dahil olmak üzere farklı formülasyonlara sahiptir.

Bu çalışmada k -epsilon Realizable türbülans modeli ile birlikte Menter-Lechner duvar fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanılan bu türbülans modeline karar verilirken de literatürde mevcut olan ve daha önceden yapılmış deneysel çalışmadan faydalanılarak, bu modele karar verilmiştir. Bununla ilgili çalışmalar Bölüm III'de detaylı olarak açıklanmıştır.

III. SAYISAL MODEL VE DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, Aider ve Beaudoin, (2008: 491-501) yaptıkları deneysel çalışmada kullanılan Ahmed gövdesi modelini esas alınarak oluşturulan 2.4, 4.6 ve 8.3 milyon adet eleman sayısına sahip çözüm ağları ile ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Sonrasında ise, ağdan bağımsızlığın sağlandığı 4.6 milyon adet eleman sayısına sahip çözüm ağı kullanılarak farklı türbülans modelleri ve duvar fonksiyonları için sayısal çözümler yapılmış ve deneysel çalışmaya en yakın sonucu veren türbülans modelinin k-epsilon Realizable türbülans modeli, duvar fonksiyonunun ise Menter-Lechner olduğu tespit edilmiştir.

Bu bölümde yapılan doğrulama çalışmaları sonucunda kararlaştırılmış olan sayısal model, bir sonraki bölümde (Bölüm IV) arka eğik yüzeyine parçalı kanat yerleştirilmiş orijinal Ahmed gövdesi (25° ve 35° arka eğim açısı) için yapılan sayısal çözümlerde de kullanılmıştır.

A. Parametrik Çözümler

Bu bölümde, Aider ve Beaudoin, (2008: 491-501) tarafından yapılan deneysel bir çalışma esas alınarak doğrulama çalışmaları yapıldı. Orijinal Ahmed gövdesinin (Ahmed, 1984: 473-503) arka eğik yüzeyinin uzunluğu toplam gövde uzunluğunun %21.2' si kadar iken esas alınan çalışmada kullanılan modelde bu oran yaklaşık %30'u kadardır. Buna göre model uzunluğu 900 mm, genişliği 340 mm ve yüksekliği ise 290 mm'dir. Arka eğim açısı $\alpha = 30^\circ$ dir. Model, dört adet 40 mm yüksekliğinde olan ayak üzerine oturtulmuştur. Aracın arka kısmı ve arka eğik yüzeyini çevreleyen bütün kenarlar hareketli kanatlarla donatılmıştır. Model araç bir rüzgâr tüneline test edilmiş ve kanatlar bir servomotor yardımıyla hareket ettirilerek farklı kanat açıları için deneysel veriler elde edilmiştir. Bu çalışmada Ahmed gövdesinin üst tavan ile arka eğik yüzeyin kesiştiği kenar boyunca bir kanat yerleştirildiği duruma ait katı model sanal ortamda oluşturulmuş ve oluşturulan bu model etrafındaki üç boyutlu, daimî

türbülanslı akış ticari bir HAD yazılımı olan ANSYS Fluent, Sürüm 19.2 ile incelenmiştir.

1. Ağdan Bağımsızlık

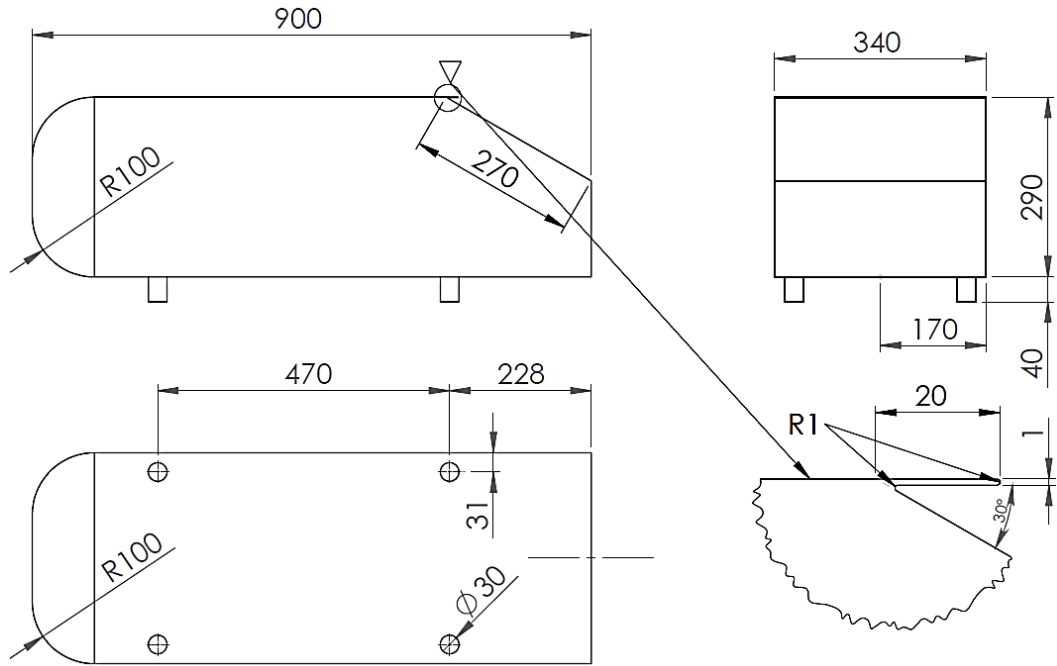
Bu bölümde incelemeye aldığımız Ahmed gövdesinin aşağıda verdiğimiz kriterler doğrultusunda elde ettiğimiz sayısal sonuçların, geometrinin üzerine uygulanan mesh sayısından bağımsız olduğunu yani yaklaşık 2.4, 4.6 ve 8.3 milyon adet mesh uygulanarak öncelikle k-epsilon Realizable türbülans modeli ve duvar fonksiyonu olarak Menter-Lechner için hesaplandı. Çalışma koşulları aşağıdaki gibidir:

Serbest akış hızı $V = 40\text{m/s}$

$$\text{Reynolds sayısı } Re = \frac{VL}{\nu} = 2.6 \times 10^6$$

Türbülans yoğunluğu = %1.3

a. Geometri



Şekil 3 Kanat eklenmiş Ahmed gövdesine ait detaylı teknik çizim (Aider ve Beaudoin, 2008: 491-501)

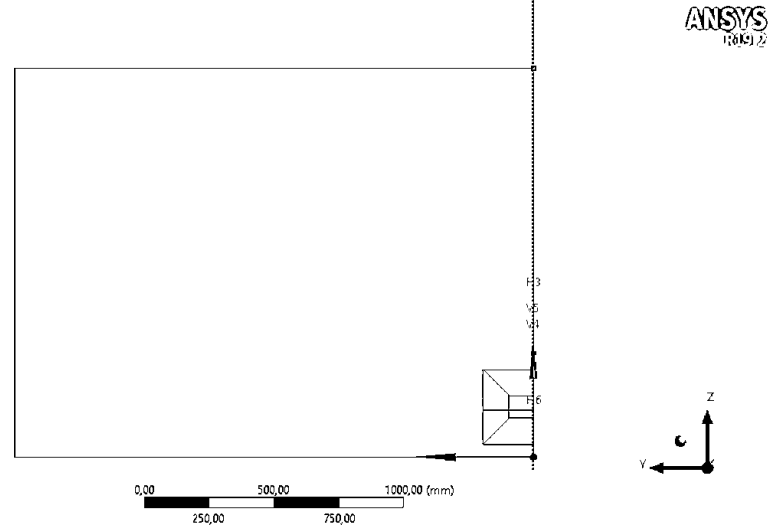
Ahmed gövdesine eklenen kanadın özellikleri:

Genişlik: 20 mm

Uzunluk: Üzerinde bulunduğu kenarın uzunluğuna bağlı.

Kalınlık: 1 mm

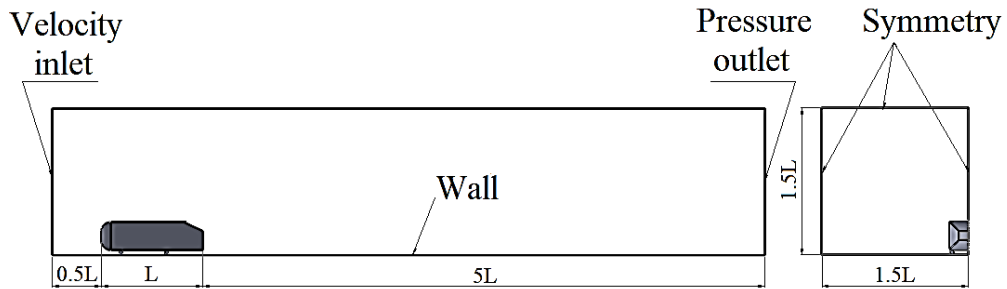
- ANSYS *Workbench* çalıştırıldı, yeni bir *Fluid Flow* (FLUENT) analiz sistemi oluşturuldu ve *Geometry* modülünü sağ tuşa tıklayıp (*import* → *browse*) seçeneğini seçerek daha önceden Şekil 5'te belirtilen ölçülerde hazırlanmış Ahmet Gövdesini yükleyerek (*Design Modeler*) çalıştırıldı. Çalışma birimi olarak *milimetre* seçildi.
- XY düzleminde yeni bir çizim (*Sketch 1*) oluşturuldu ve Ahmed gövdesini çevreleyen, 6.5L x 1.5L ölçülere sahip bir dikdörtgen çizildi. Dikdörtgenin konumunu, sol kenar ile Y eksenini arasındaki mesafe 1.5L olacak şekilde ayarlandı. Ardından, bu dikdörtgen profile pozitif z yönünde 1.5L kalınlık verildi (*Extrude* → *Add Frozen*). Araç gövdesini çevreleyen bu dikdörtgen prizma şeklindeki hacim, araç çevresinde ve özellikle araç arka bölgesinde daha ince bir ağ oluşturmak için hazırlandı.
- XY düzleminde bir çizim daha (*Sketch 2*) oluşturunuz ve bir önceki adımda oluşturulmuş olan dikdörtgen prizmanın içine Ahmed gövdesinin arka eğik kısmını çevreleyen, 1000 mm uzunluk x 400 mm yüksekliğe sahip bir dikdörtgen profil çizildi. Dikdörtgenin konumunu, sağ kenar ile Y eksenini arasındaki mesafe 300 mm olacak şekilde ayarlandı. Ardından, bu dikdörtgen profile pozitif z yönünde 200 mm kadar kalınlık verildi (*Extrude* → *Add Frozen*).
- *Create* → *Slice* seçeneklerini sırasıyla seçtikten sonra seçerek *Baseplane* kısmında *Apply* seçilecek *Generate* yapıldı. Daha sonra ikiye kestiğimiz Ahmed gövdesinin kullanılmayan kısmını monitör ekranından işaretçi ile üzerine sağa işaretlendi ve *Suppress Body* seçildi (Şekil 4).
- *Create* → *Boolean* → *Subtract* seçildi ve *Tool bodys* için Ahmed gövdesini, *Target body* için en dıştaki büyük dikdörtgen prizmatik hacmi seçildi. *Preserve Tool Bodies* seçeneğinin *No* olmasına dikkat ediniz ve *Generate* komutu seçildi.



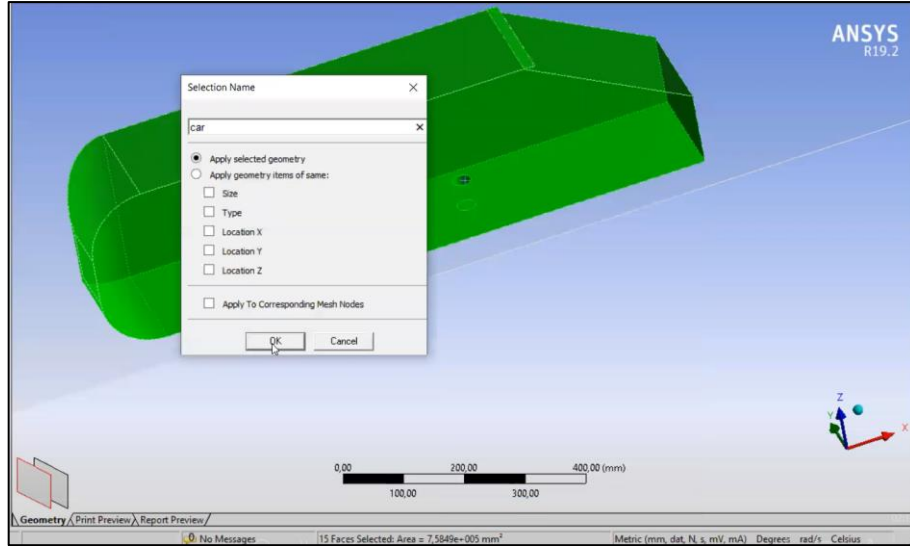
Şekil 4 XZ düzlemi boyunca kesilmiş Ahmed gövdesinin YZ düzleminde görünüşü

b. Çözüm ağı

- Mesh seçeneğine çift tıklayarak mesh penceresi açıldı.
- Sınır şartlarına uygun olacak şekilde *Named Selections* öğeleri oluşturuldu:
 - Akımın giriş yaptığı yüzeyi *inlet*,
 - Akımın çıkış yaptığı yüzeyi *outlet*,
 - Araç gövdesini ve eklenen kanat yüzeylerini seçerek temsil eden 15 adet yüzeyi *car*, (Şekil 6).
 - Orta düzlemi *symmetry*,
 - Zemini *ground*,
 - Üst ve yan yüzeylerin tamamını *symmetry2*, olarak adlandırıldı (Şekil 5).



Şekil 5 Ahmed gövdesinin çözüm alanı içerisindeki konumu ve sınır şartları



Şekil 6 Ahmed gövdesi yüzeylerinin isimlendirilmesi

- *Meshing* penceresinin *outline* bölümünde *mesh control* → *Sizing* seçerek en dıştaki hacim seçildi. Element size parametresi 2.4, 4.6 ve 8.3 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağları için sırasıyla 25, 20 ve 8 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 7).

Details of "Body Sizing" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Body of Influence
Bodies of Influence	1 Body
<input type="checkbox"/> Element Size	25, mm
[-] Advanced	
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)

Şekil 7 2.4 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı için seçilen en dıştaki hacime ait boyutlandırma detayları

- *Mesh control* → *Inflation* seçilip açılan *Details of Inflation* menüsünden *Scoping* Metod seçeneğini *Geometry Selection* olarak ayarlandı. *Geometry* sekmesi işaretlenerek Ahmed gövdesini çevreleyen büyük hacim seçildi. *Boundary Scoping Method* sekmesi *Named Selections* seçildikten sonra *Boundary* olarak daha önce Ahmed gövdesini kanat alt yüzeyi, kanat ucu ve radüsleri ile birlikte aracın arka eğik yüzeyi hariç geriye kalan tüm araç yüzeyleri seçildi (10 Faces), *Inflation Option* → *First Layer Thickness* ve *First Layer Height* 0.05 mm olarak 4.6 ve 8.3 milyon adet

mesh modelleri için ise *First Layer Height* sırasıyla 0.025 mm ve 0.008 mm olarak yazıldı (Şekil 8).

Details of "Inflation" - Inflation	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	10 Faces
Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> First Layer Height	5,e-002 mm
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	10
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre

Şekil 8 2.4 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı için Ahmed gövdesinin seçilen alt, üst ve yan yüzelerindeki prizmatik elemanlara ait detaylar

- *Mesh control* → *Sizing* ve *Details of Sizing* menüsünden *Scoping Method* seçeneğini *Named Selections* seçildikten sonra *Named Selections* → *Car* seçildi ve *Element Size* 16 mm olarak 4.6 ve 8.3 milyon adet mesh modelleri için ise *Element Size* sırasıyla 10 mm ve 4 mm, *Capture Curvature* ve *Capture Proximity* seçeneklerini *Yes* olarak ayarlandı (Şekil 9).

Details of "Face Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	car
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	16, mm
Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (0,5 mm)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
<input checked="" type="checkbox"/> Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,°)
<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (1, mm)
<input checked="" type="checkbox"/> Capture Proximity	Yes
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (1, mm)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges

Şekil 9 2.4 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı için seçilen tüm araç yüzelerine uygulanan boyutlandırma detayları

- *Mesh control* → *Inflation* seçilip açılan *Details of Inflation* menüsünden *Scoping Method* seçeneğini *Geometry Selection* olarak ayarlandı. *Geometry* sekmesi işaretlenerek Ahmed Gövdesini çevreleyen büyük hacim seçildi. *Boundary Scoping Method* sekmesi *Geometry Selection* seçildikten sonra *Geometry* sekmesi işaretlenerek Ahmed Gövdesinin kanat kısmının alt yüzeyi, uç kısmı ve radüsler, iç radüs ve aracın arka eğik yüzeyi olmak üzere 4 *faces* (ilk *Inflation* ayarında seçilmeyen yüzeyler *Inflation 2* de seçildi) olarak ayarlandı. *Inflation Option* → *First Layer Thickness* ve *First Layer Height* 0.01 mm olarak 4.6 ve 8.3 milyon için ise *First Layer Height* sırasıyla 0.01 mm ve 0.005 olarak alınmıştır (Şekil 10).

Details of "Inflation 2" - Inflation	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	4 Faces
Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> First Layer Height	1,e-002 mm
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	10
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre

Şekil 10 2.4 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı için seçilen Ahmed gövdesinin kanat yüzeylerine ve arka eğim yüzeyindeki prizmatik elemanlara ait detaylar

- *Mesh control* → *Sizing* ve *Details of Sizing* menüsünden *Scoping Method* seçeneğini *Geometry Selection* olarak ayarlandı. *Geometry* sekmesi işaretlenerek Ahmed gövdesinin sadece CTRL'ye basılıp arka eğik yüzeyi ile kanadın alt yüzeyi olmak üzere iki *faces* seçilecek. *Element Size* 3,15mm olarak 4.6 ve 8.3 milyon adet mesh modelleri için ise *Element Size* 2 mm, *Behavior* → *Hard*, *Capture Curvature* ve *Capture Proximity* seçeneklerini *No* olarak ayarlanır (Şekil 11).

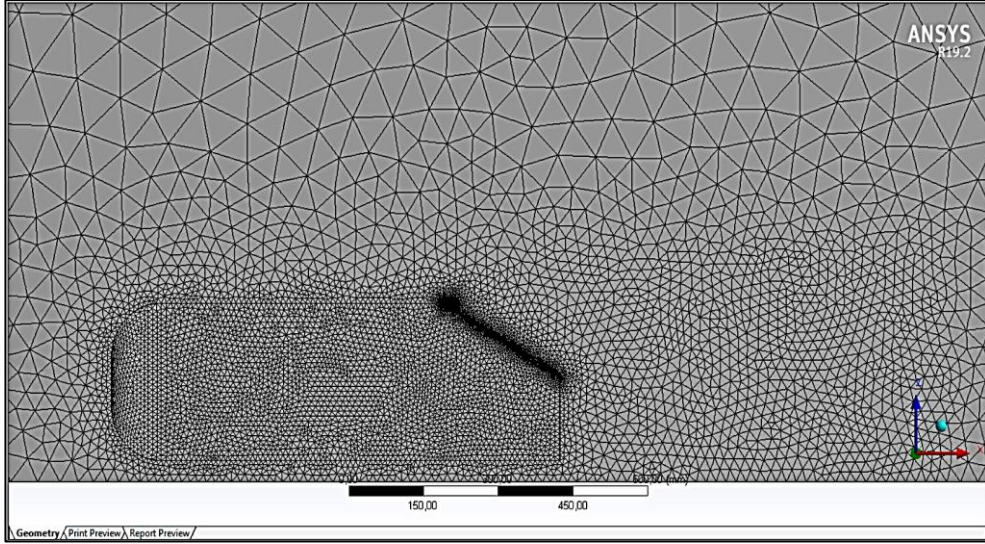
Details of "Face Sizing 2" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	3,15 mm
[-] Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (0,5 mm)
Behavior	Hard
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

Şekil 11 2.4 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı için seçilen Ahmed gövdesinin arka eğik yüzeyine ve kanadın alt yüzeyine ait uygulanan boyutlandırma detayları

- *Mesh control* → *Sizing* ve *Details of Sizing* menüsünden *Scoping Method* seçeneğini *Geometry Selection* olarak ayarlandı. *Geometry* sekmesi işaretlenerek Ahmed gövdesinin sadece CTRL'ye basılıp arka eğik yüzeyi ile kanadın arasındaki radüs ve kanat ucundaki radüs ile beraber toplam 2 faces seçildi. *Element Size* 0.16 mm olarak 4.6 ve 8.3 milyon adet mesh modelleri için ise *Element Size* 0.1 mm, *Behavior* → *Hard* olarak ayarlandı (Şekil 12).

Details of "Face Sizing 3" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	0,16 mm
[-] Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (8,e-002 mm)
Behavior	Hard
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

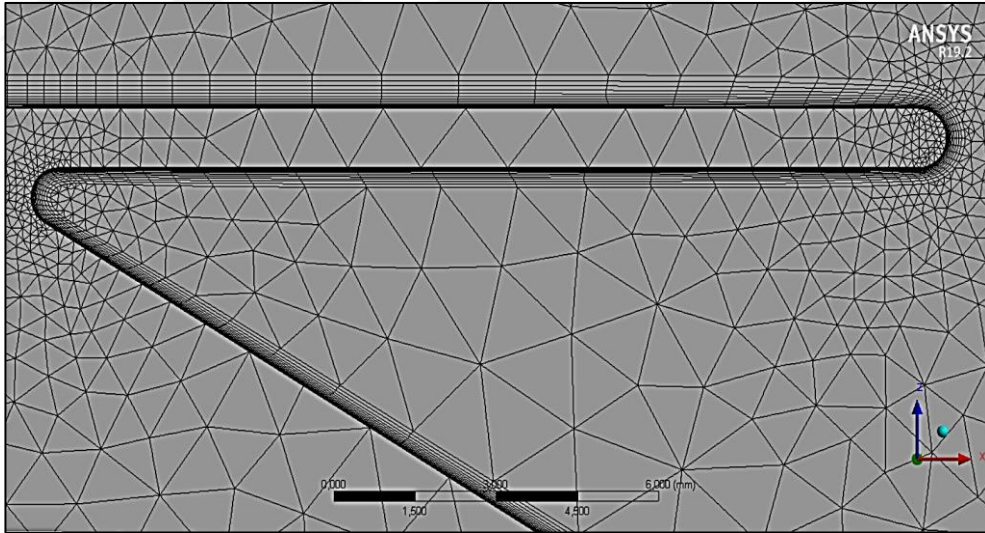
Şekil 12 2.4 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı için Ahmed gövdesine ait kanadın iç bükey ve dış bükey radüslerine ait uygulanan boyutlandırma detayları



Şekil 13 Araç çevresindeki çözüm ağının genel görünüşü

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	808874
<input type="checkbox"/> Elements	2400447

Şekil 14 Yapılan işlem sonunda toplam eleman sayısı 2 400 447



Şekil 15 Kanat çevresindeki ağın inceltilmesi

c. Problem kurulumu ve çözümü

- *Setup* modülünü çift tıklayarak Fluent programı çalıştırıldı. Açılan pencerede *double precision* seçeneğini aktifleştirildi.
- *Models panelinde Viscous* → *k-epsilon* türbülans modelini seçildi *k-epsilon model* kısmını da *Realizable* olarak ayarlandı ve *Near-Wall Treatment* → *Menter-Lechner* olarak seçildi.
- *Material* → *Fluid* → *air* olarak seçildi.
- *Boundary conditions* → *inlet*, *velocity magnitude* 40 m/s, *Specificatin Method* → *Intensity and Scale*, *Turbulent Intensity* %1.3 ve *Turbulent Length Scale* 0.290 m olarak ayarlandı.
- *Referance Values*, *Area* 0.0493 m², *Velocity* 40 m/s olarak ayarlandı.
- *Solution* → *Methods* kısmına çift tıklanarak açılan pencerede *Gradient* → *Green-Gauss Node Base* olarak ayarlandı.
- *Report Definitions* sağ tıklanıp *New* → *Force Report* → *Drag* seçilip isim *C_D* verildi. *Create* → *Report* ve *Print to Console* olarak seçilip, *Wall Zone* → *Car* olarak ayarlandı.
- *Report Definitions* sağ tıklanıp *New* → *Surface Report* → *Facet Maximum* seçilip isim *yplus* verildi. *Fied Variable* → *Turbulance* ve *Wall Yplus* olarak seçilip, *Surfaces* → *Car* olarak ayarlandı. *Create* → *Report File*, *Report plot* ve *Print to Console* seçenekleri sırasıyla seçilip ardından ok işaretlendi.
- *Monitors* → *Residual* penceresi açılıp *Convergence Criterion* → *None* olarak ayarlandı.
- *Initialization* çift tıklanıp açılan pencerede *Solution Initialization* → *Standart Initialization* seçilip, *Compute from* → *inlet* seçildikten sonra *Initialize* seçildi.
- *Run Calculation* seçilip ve *Number of Iterations* 5000 olarak ayarlandı. Buradaki amaç iterasyon sayısını ayarlamaktır ve bundan sonraki her çözüm için toplamda 5000 iterasyon olarak çözüldü.
- *Calculate* seçilerek çözüm başlatıldı.

$k-\varepsilon$ Realizable türbülans modeli ve duvar fonksiyonu olarak Menter-Lechner için sırasıyla 2.4, 4.6 ve 8.3 milyon adet mesh ve 5000 iterasyon sonucunda hesaplanan sonuçlar Çizelge 1’de verilmiştir. Bu kısımda yukarıda anlatılan sayısal model ile mesh sayısını 2.4 milyon ile 8.3 milyon arasında aldığımız ve hesaplarımızda bize kolaylık sağlaması açısından, bizim için de makul olan 4.6 milyon adet mesh ile hesap yaptık. Burada ve sonraki ele alacağımız türbülans ve duvar modellerini 4.6 milyon elemana sahip çözüm ağı kullanılarak hesaplandı.

Sürüklenme katsayısı C_D aşağıdaki Denklem (6) ile hesaplanır:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A_D V^2} \quad (6)$$

Burada F_D cisme etkiyen net sürüklenme kuvvetini (N), ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), A_D cismin akıma dik düzlem üzerindeki iz düşüm alanını (m^2) ve V serbest akım hızını (m) belirtmektedir.

Kaldırma katsayısı C_L ise aşağıdaki Denklem (7) ile hesaplanır:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho A_L V^2} \quad (7)$$

Burada F_L cisme etkiyen net kaldırma kuvvetini (N), A_L ise cismin akıma paralel düzlem üzerindeki iz düşüm alanını (m^2) belirtmektedir. Sürüklenme kuvveti F_D ve kaldırma kuvveti F_L her zaman birbirlerine dik doğrultuda etkirler.

Sürüklenme (F_D) ve kaldırma (F_L) kuvvetleri gibi direnç kuvvetlerinin iki temel bileşeni vardır: i) Şekil (basınç) direnci, ii) sürtünme (viskoz) direnci. Şekil direnci, üzerinden akım geçen bir cismin etrafında oluşan basınç farklılıklarından kaynaklanan basınç kuvvetidir. Sürtünme direnci ise akışkanın üzerinden geçtiği katı yüzeylerdeki kaymama koşulundan kaynaklanan ve sınır tabaka oluşumunun bir sonucu olan yüzey sürtünme kuvvetidir. Genelde şekil direnci, sürtünme direncinden çok daha büyüktür.

Çizelge 1 Ağdan bağımsızlık çalışmasına ait sonuçlar

Eleman Sayısı	Sürükleme katsayısı, C_D	% Değişim	y^+
2.4 M	0.342	-	8.29
4.6 M	0.322	6.21	4.46
8.3 M	0.305	5.57	1.71

2. Farklı Türbülans Modellerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde farklı türbülans modellerinin sürükleme katsayısına etkisini incelemek için beş farklı türbülans modeli – duvar fonksiyonu çifti için çözümler yapılmış, Aider ve Beaudoin, (2018: 491-501) tarafından yürütülmüş olan deneysel çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çözümlere ait sonuçlar Çizelge 2’de verilmiştir. Sonuç olarak deneysel çalışma sonuçlarına en yakın sonuç k-epsilon Realizable türbülans modeli ve Menter-Lechner duvar fonksiyonu ile alınmıştır.

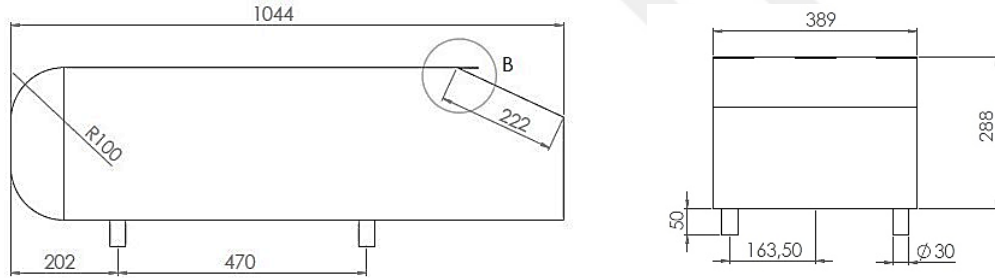
Çizelge 2 Farklı türbülans modellerinin karşılaştırılmasına ait sonuçlar

Türbülans modeli	Duvar Fonksiyonu	C_D	% Hata	y^+
$k-\omega$ SST	-	0.353	19.3	3.78
Spalart-Almaras	-	0.508	71.6	4.08
$k-\varepsilon$ Realizable	Enhanced Wall Treatment	0.338	14.2	5.51
$k-\varepsilon$ Realizable	Menter-Lechner	0.322	8.8	3.78
$k-\varepsilon$ RNG	Enhanced Wall Treatment	0.330	11.5	4.14
Deneysel (Aider ve Beaudoin, 2008: 491-501)		0.296	-	-

IV. FARKLI ARKA YÜZEY KONFIGÜRASYONLARININ SAYISAL ÇÖZÜMÜ

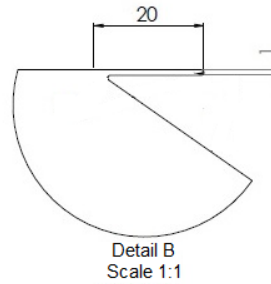
A. Sayısal Model

Taşıt aerodinamiği konuların yapılan birçok çalışmada Ahmed gövdesi kabul edilmiş, sade ve basit bir modeldir. Modelin arka eğim açısı ayarlanabilen yaygın bir araç gövdesidir. Ahmed gövdesi oldukça basit olmasına karşın gündelik hayatta kullanılan standart bir aracın geometrik karmaşıklığından arınmış bir şekilde aracın gövdesi etrafındaki aerodinamik olayların analizini mümkün kılar (Geoffrey vd., 2004: 1308). HAD modelleri daha az hesaplama ve basitliğe ihtiyaç duyar ve tüm bu nedenlerden ötürü Ahmed gövdesi HAD için uygun görülen bir modeldir.



a.

b.

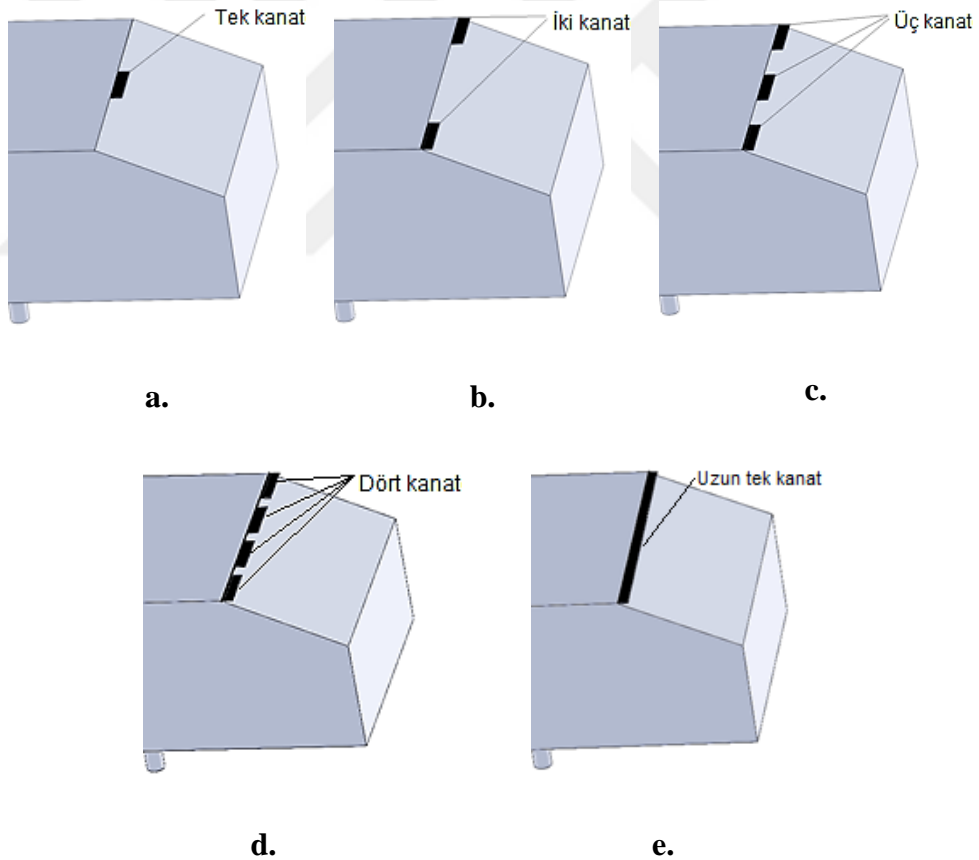


c.

Şekil 16 Sayısal çözümlerde kullanılan Ahmed gövdesinin a) yan görünüş, b) arka görünüş ve c) parçalı kanat detay görünüşü (Uzunluk ölçü birimleri mm cinsindedir.)

Ahmed tarafından araştırılan aerodinamik analizlerde farklı 0° ve 40° arasında 5° lik artımlarla nümerik sonuçlar elde etmiştir ve direnç kuvvetinin 30° lik arka eğim açısında en yüksek değere ulaştığını görmüştür (Ahmed, 1984: 473-503). Bu çalışmada kritik nokta olarak değerlendirilen 30° 'nin 5° alt açı değeri ve 5° üst açı değeri incelenmiştir.

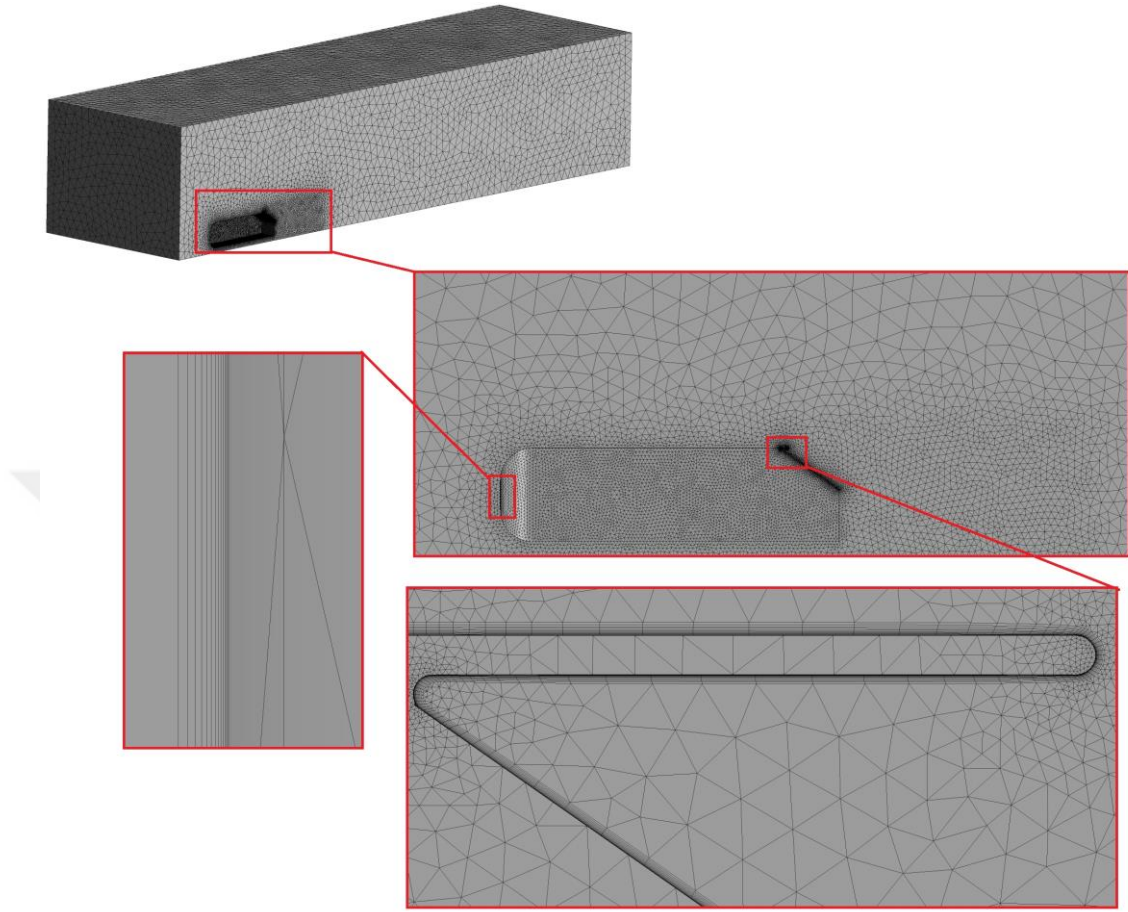
Bu bölümde arka eğim açısı 25° ve 35° olan orijinal Ahmed gövdesi üzerine eklenen farklı geometriye sahip kanatların sürükleme katsayısı üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Eğik arka yüzey üzerine eklenen bu kanatların zemin düzlemi ile yaptığı açı 0° 'dir. Ele alınan Ahmed gövdesine eklenmiş olan kanatlar zemine paralel olup arka eğim açısı 25° ve 35° 'lik Ahmed gövdesi üzerine kanatlar 5 farklı şekilde uygulanmıştır. İncelenen kanatlı Ahmed gövdesi geometrileri aşağıda Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17 Ahmed gövdesi için uygulanan farklı arka eğimli yüzey konfigürasyonları

Bu bölümde sonuçları sunulan sayısal çözümlerde Bölüm 3'te doğrulaması yapılmış olan çözüm ağı ve türbülans modeli kullanılmıştır. Kullanılan çözüm

ağlarındaki eleman sayısı 2.8 ile 6.6 milyon arasında değişmekte olup, kanat civarında oluşturulan çözüm ağı Şekil 18’de görülmektedir.



Şekil 18 Oluşturulan çözüm ağının genel ve detay görüntüleri

B. Kanatlı Model İçin Sayısal Çözüm Sonuçları

Kanatsız ve kanatlı modeller için sayısal çözümlerden elde edilen sürüklenme katsayısı değerleri ve kanatsız modelinkine göre yüzdelik değişim oranları Çizelge 3’te sunulmuştur. Buna göre, 25° arka eğim açısı için, sürüklenme katsayısı, yaklaşık %2.6 oranında bir azalma ile üç kanatlı model için en küçük değere sahiptir. Genel olarak, 25° arka eğim açısı olan Ahmed gövdesine kanat eklendiğinde sürüklenme katsayısı değeri 35° arka eğim açılı Ahmed gövdesindeki değerlere yaklaşırken; 25° arka eğim açılı modelde üç kanattan sonra sürüklenme katsayısının artmaya başladığı, dört kanat ve uzun tek kanat eklendiğinde ise kanatsız modele yaklaşıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, 35° arka eğim açısı için, sürüklenme katsayısındaki

değişim ihmal edilebilirken; iki, üç ve dört kanatlı modeller için sürüklenme katsayısında %1' den daha az bir artış vardır.

Çizelge 3 Sayısal çözümlerden elde edilen sürüklenme katsayısı değerleri

Model	Sürüklenme katsayısı, C_D			
	25°	Değişim [%]	35°	Değişim [%]
Referans (kanatsız)	0.351	-	0.341	-
Tek kanat	0.346	-1.4	0.340	-0.3
İki kanat	0.348	-0.9	0.342	+0.3
Üç kanat	0.342	-2.6	0.343	+0.6
Dört kanat	0.343	-2.3	0.342	+0.3
Uzun tek kanat	0.349	-0.6	0.340	-0.3

Çizelge 4' te 25° arka eğim açılı Ahmed gövdesinin Şekil 19' da gösterilen yüzeyleri üzerine etkiyen basınç ve viskoz (sürtünme) direnç kuvveti değerleri sunulmuştur. Şekil 20' de ise tüm kanat konfigürasyonlarında araç üzerine etkiyen toplam sürüklenme kuvvetinin yüzeylere göre dağılımı ortalama değerlerle verilmiştir. Buna göre, toplam sürüklenme kuvvetinin yaklaşık ortalama %38' lik bir kısmı arka dik yüzey, %25' lik bir kısmı arka eğimli yüzey, %25' lik kısmı da ön yüzey üzerine etkimektedir. Tüm modeller için toplam sürüklenme kuvvetinin yaklaşık %94'ünü şekil direnci, geri kalan %6'sını ise sürtünme direnci oluşturmaktadır (Çizelge 4). Yan, üst ve alt yüzeyler Şekil 19' da ok ile gösterilen akıma paralel olduklarından akım doğrultusunda basınç direnç kuvveti oluşturmamaktadır. Benzer şekilde, arka dik yüzey akıma dik olduğundan akım doğrultusunda sürtünme direnci oluşturmamaktadır. Çizelge 4' te verilen kuvvet değerlerinin pozitif olması bu kuvvetlerin aracın hareket yönüne zıt yönde olduğunu belirtmektedir.

25° eğim açısı için arka eğimli yüzeyin hücum kenarı üzerine kanat eklenmesinin yarattığı etkiyi incelemek ve sürüklenme katsayısını azaltan mekanizmayı açıklamak amacıyla aşağıdaki Şekil 21' de kanatsız ve kanatlı modellerde simetri düzlemi ($y/W = 0$) üzerindeki akım çizgileri ve hız vektörleri, Şekil 22' de ise arka eğimli yüzey üzerindeki basınç kontürleri karşılaştırılmıştır.

Kanatsız modelde arka eğimli yüzey üzerinde akım ayrılması ve buna bağlı olarak oluşan ikincil girdap açıkça görülmektedir (Şekil 21a). Buna karşılık tek kanatlı modelde ayrılma noktası eğimli yüzeyin hücum kenarı yönüne doğru yer değiştirerek kanat civarına taşınmış, ikincil girdap ise yok olmuştur (Şekil 21b). Kanatsız model

için arka eğimli yüzey üzerindeki basınç dağılımı incelendiğinde hücum kenarı ve bunun altında kalan belli bir alan boyunca düşük basınç bölgesi olduğu görülebilir (Şekil 22a). Bununla birlikte, hücum kenarının orta noktasına yerleştirilen tek bir kanadın arka eğimli yüzeyin orta bölgesindeki basıncı yükselttiği, fakat, yan kenarlarına yakın bölgelerde ise basıncın nispeten düşük kaldığı görülmektedir (Şekil 21b). Bu durumda, kanatsız modelde hücum kenarı boyunca devam eden düşük basınç hattı, kanat eklendiğinde kesintiye uğramaktadır. 25° arka eğim açısı için tek kanatlı modelin sürüklenme katsayısındaki yaklaşık % 1.4 oranındaki azalma (Çizelge 3) büyük ölçüde arka eğimli yüzey üzerindeki ortalama basıncın artırılması (Çizelge 5), dolayısıyla bu yüzeye etkiyen harekete ters yönlü kuvvetin azaltılması ile açıklanabilir (Çizelge 4). Kanatsız ve tek kanatlı modellerde arka dik yüzey üzerindeki ortalama basınç ve sürüklenme kuvveti değerleri arasındaki fark ihmal edilebilir (Çizelge 4 ve 5).

25° arka eğim açısındaki iki kanatlı modelde (Şekil 21c) ise simetri düzlemindeki akım çizgileri ve hız vektör alanı, kanatsız modelinki (Şekil 21a) ile benzerlik göstermektedir. Bunun nedeni iki kanatlı modelde kanatların iki uca yerleştirilmiş olmasından dolayı, simetri düzlemine karşılık gelen bir kanadın bulunmamasıdır (Şekil 17b). Buna bağlı olarak, arka eğimli yüzeyin simetri düzlemine yakın bölgelerinde, kanatsız modelde olduğu gibi, basıncın düşük değerlerde kaldığı görülebilir (Şekil 22c). Buna rağmen iki kanatlı modelde özellikle arka eğimli yüzey üzerindeki ortalama basınç değeri kanatsız modeldekine göre daha yüksek olmaktadır (Çizelge 5), dolayısıyla bu yüzeye etkiyen harekete ters yöndeki net kuvvet daha düşük olmaktadır (Çizelge 4). Arka dik yüzey üzerine etkiyen ters yönlü kuvvetin kanatsız modeldekine göre fazla olmasına rağmen (Çizelge 4), arka eğimli yüzey üzerindeki net kuvvetin azalması ile sürüklenme katsayısında yaklaşık %0.9 oranında bir düşüş sağlanmaktadır (Çizelge 3). Bu sonuç, arka eğimli yüzeyin hücum kenarı üzerinde simetri düzlemi civarına yerleştirilen tek bir kanadın, uçlara yerleştirilen iki kanattan daha etkin olduğunu; arka eğimli yüzey üzerinde simetri düzlemi civarında oluşan ikincil girdabın yok edilmesinin sürüklenme kuvvetinde nispeten daha büyük bir düşüş yarattığını göstermektedir.

Üç kanatlı modele ait, simetri düzlemi üzerinde gösterilen akım çizgileri ve hız vektörlerinin (Şekil 21d), simetri düzlemi etrafına yerleştirilen kanadın buradaki akım

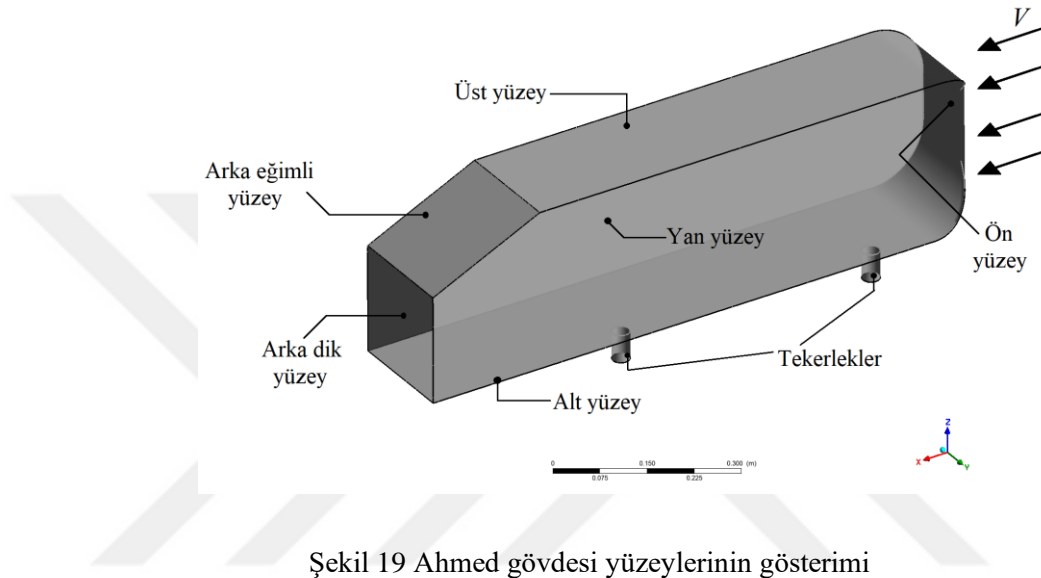
ayrılmasını ortadan kaldırması bakımından tek kanatlı modelinkilere (Şekil 21b) benzerlik gösterdiği görülmektedir. Tek kanatlı modeldeki basınç dağılımı ile karşılaştırıldığında (Şekil 22b), üç kanatlı modelde arka eğimli yüzeyin yan kenarlarına yakın bölgelerde de basıncın yükseldiği görülebilir (Şekil 22d). Arka eğimli yüzeyin genelinde sağlanan bu basınç artışı sürükleme kuvvetinde %2.6 oranında bir düşüş sağlamaktadır (Çizelge 3). Üç kanatlı modelde hem arka eğimli yüzey hem de arka dik yüzey üzerindeki ortalama basıncın en yüksek olduğu (Çizelge 5), net kuvvetin ise, dört kanatlı model ile birlikte, en küçük olduğu görülmektedir (Çizelge 4).

Dört kanatlı modelde de kanatsız model ve iki kanatlı modeldekine benzer bir şekilde, simetri düzlemi üzerindeki akım ayrılması belirgindir (Şekil 21e). Dört ve iki kanatlı modeller için arka eğimli yüzey üzerindeki basınç dağılımları karşılaştırıldığında, dört kanatlı modelde iç kısımdaki iki ek kanadın simetri düzlemi civarındaki basınç değerlerini yükselttiği görülebilir (Şekil 22c ve 22e). Sonuç olarak dört kanatlı modelin sürükleme katsayısında, %2.3 kadar bir oran ile, iki kanatlı modeldekine göre daha iyi, üç kanatlı modelinkine ise yakın oranda bir düşüş sağlanmıştır (Çizelge 3). Dört kanatlı modelde arka yüzeyler üzerindeki sürükleme kuvveti ve ortalama basınç değerleri hemen hemen aynı iken, tekerlekler üzerinde daha yüksek bir şekil direnci hesaplanmıştır (Çizelge 4), bu da sonuç olarak sürükleme katsayısındaki azalmanın üç kanatlı modeldekine göre daha az olmasına sebep olmaktadır. Burada baskın faktörün simetri düzlemi etrafındaki akım ayrılmasının yok edilememesi olduğu düşünülmektedir.

Uzun tek kanatlı modelde simetri düzlemi üzerindeki akım çizgileri ve hız vektörleri (Şekil 21f), tek ve üç kanatlı modellerinki (Şekil 21b ve 21d) ile benzerlik göstermektedir. Burada arka yüzeyler üzerinde dört kanatlı modeldekine göre daha düşük bir ortalama basınç ve daha yüksek sürükleme kuvveti oluşmaktadır (Çizelge 4 ve 5). Arka eğimli yüzeyin hücum kenarı boyunca tek parça halinde bir kanat yerleştirilmesinin, %0.6 gibi bir azalma oranıyla (Çizelge 3), sürükleme katsayısının azaltılmasında en az etkiyi yarattığı görülmüştür.

Tüm 25° arka eğim açılı modellere ilişkin genel bir sonuç da tekerlekler üzerine etkiyen net sürükleme kuvveti değerlerinde kanat konfigürasyonlarına bağlı olarak yaklaşık %12' ye kadar çıkabilen oranlarda değişim olmasıdır.

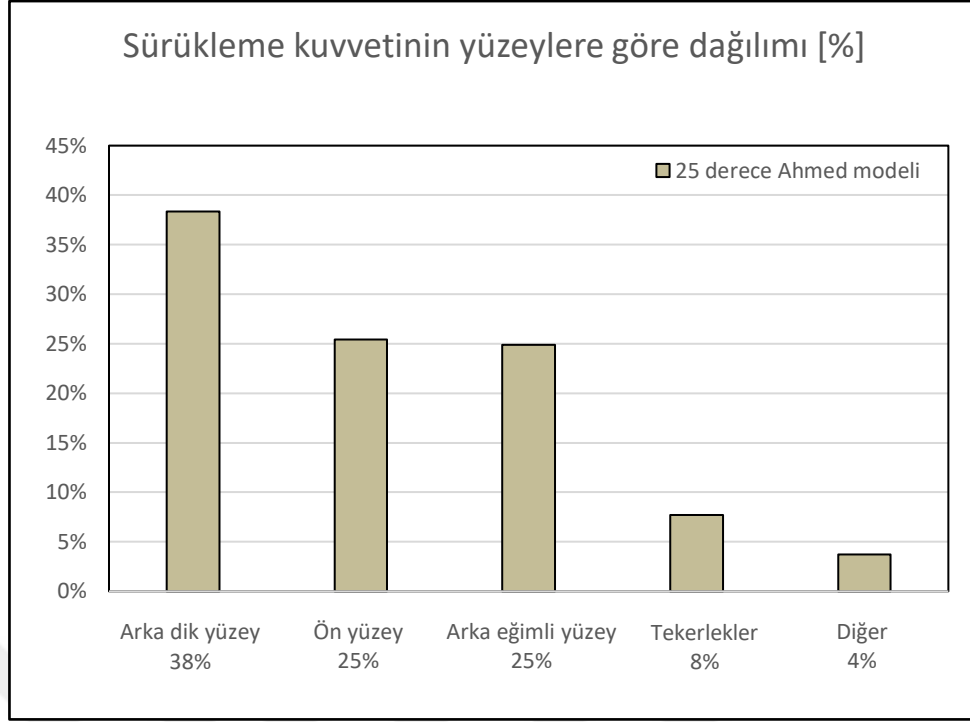
Şekil 23 ve 24 Ahmed gövdesinin arka bölgesinde arka eğimli yüzeyi tam ortasından kesen $x/L = -0.08$ düzlemi ile arka dik yüzeye çakışık $x/L = 0$ düzlemi üzerindeki vektörler ve akım çizgilerini göstermektedir. İki ve üç kanatlı modellerde arka eğik yüzeyin yan kenarları civarında oluşan vorteksin aşağıya doğru kaydığı görülmüştür. Bunun da sürüklenme kuvvetini azaltan bir başka faktör olduğu söylenebilir. Bu durumda iki kanatlı modelin sürüklenme katsayısında kanatsız modelinkine göre %0.9 oranında bir düşüş olduğu görülmüştür (Çizelge 3).



Şekil 19 Ahmed gövdesi yüzeylerinin gösterimi

Çizelge 4 25° arka eğim açılı Ahmed gövdesinin yüzeyleri üzerine etkiyen sürüklenme kuvveti değerleri

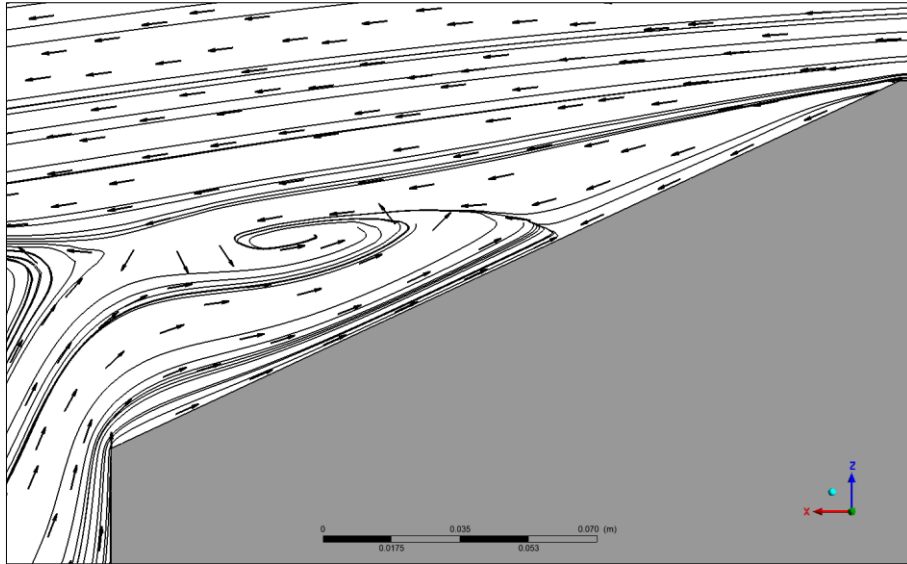
			Model					
			Referans (kanatsız)	Tek kanat	İki kanat	Üç kanat	Dört kanat	Uzun tek kanat
Sürüklenme kuvveti [N]	Arka eğimli yüzey	Basınç	5.04	4.83	4.77	4.61	4.61	4.69
		Sürtünme	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01
	Arka dik yüzey	Basınç	7.27	7.28	7.33	7.25	7.21	7.40
		Sürtünme	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Yan yüzey	Basınç	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Sürtünme	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27	0.27
	Alt yüzey	Basınç	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Sürtünme	0.26	0.24	0.26	0.25	0.26	0.24
	Üst yüzey	Basınç	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Sürtünme	0.18	0.17	0.17	0.16	0.16	0.17
	Ön yüzey	Basınç	4.36	4.31	4.35	4.38	4.35	4.32
		Sürtünme	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.53
	Tekerlekler	Basınç	1.37	1.39	1.42	1.35	1.45	1.53
		Sürtünme	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05



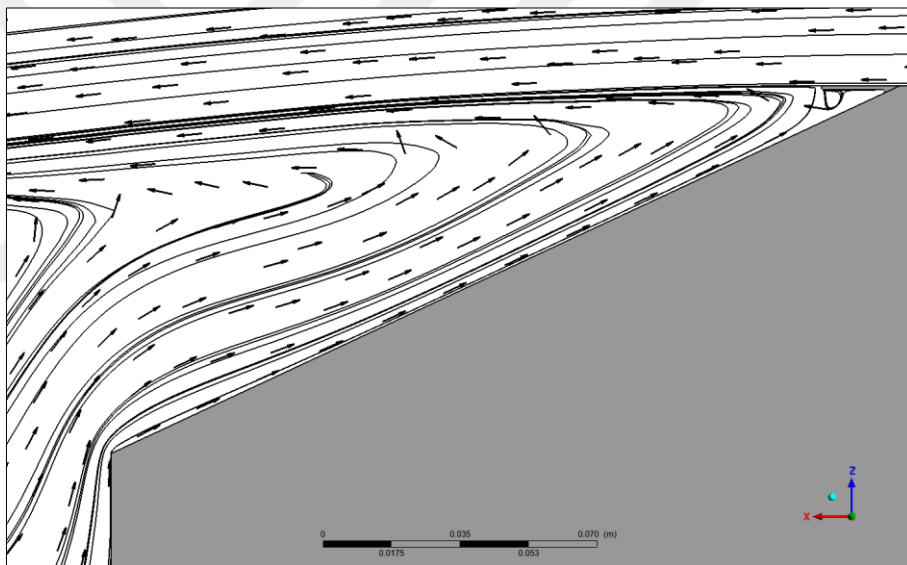
Şekil 20 25° Ahmed gövdesi için net sürüklenme kuvvetinin yüzeylere göre dağılımı

Çizelge 5 Arka yüzeyler üzerindeki ortalama basınç değerleri

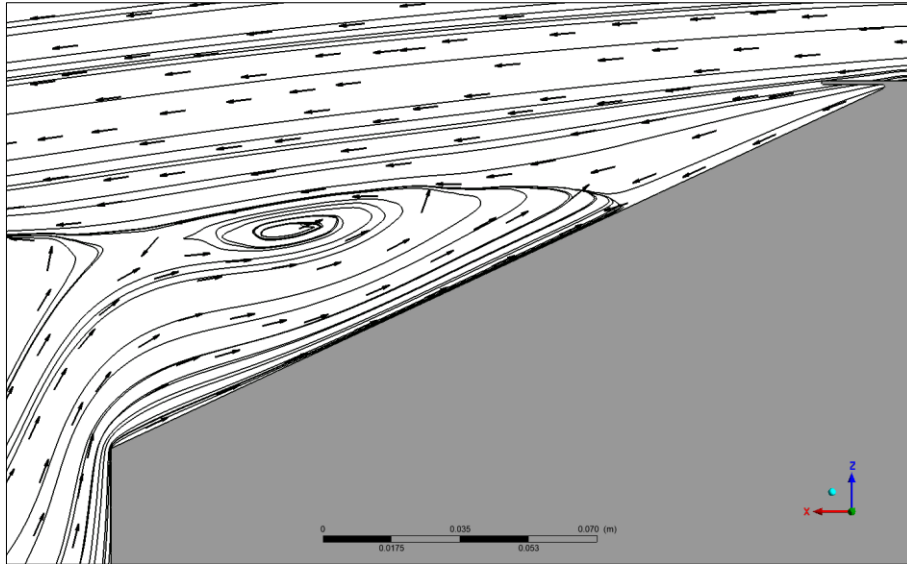
Model	Ortalama basınç [Pa]			
	25°		35°	
	Arka eğimli yüzey	Arka dik yüzey	Arka eğimli yüzey	Arka dik yüzey
Referans (kanatsız)	-276.18	-192.50	-232.52	-189.67
Tek kanat	-264.13	-192.80	-228.35	-190.40
İki kanat	-260.44	-194.09	-232.71	-192.65
Üç kanat	-251.51	-192.05	-230.39	-192.93
Dört kanat	-251.74	-190.84	-230.14	-191.93
Uzun tek kanat	-255.02	-195.83	-227.46	-192.29



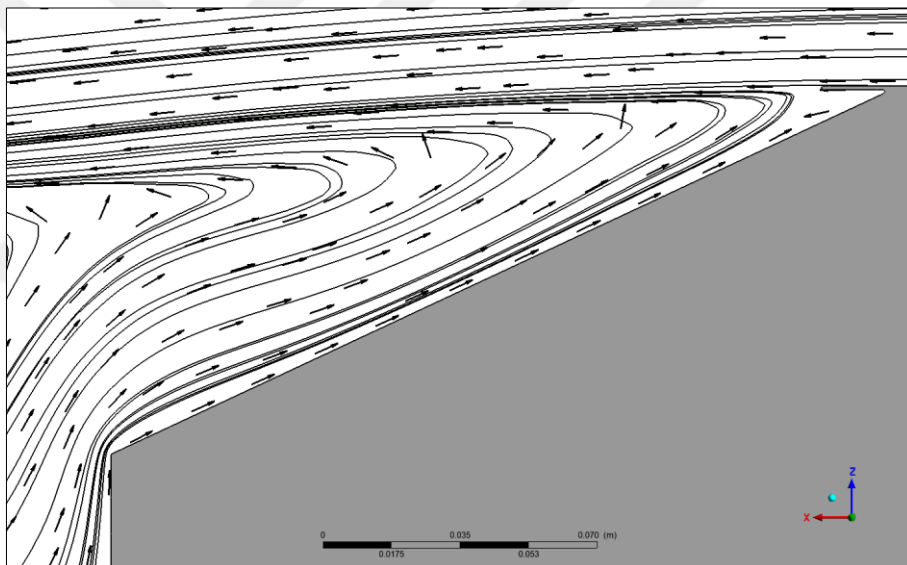
a.



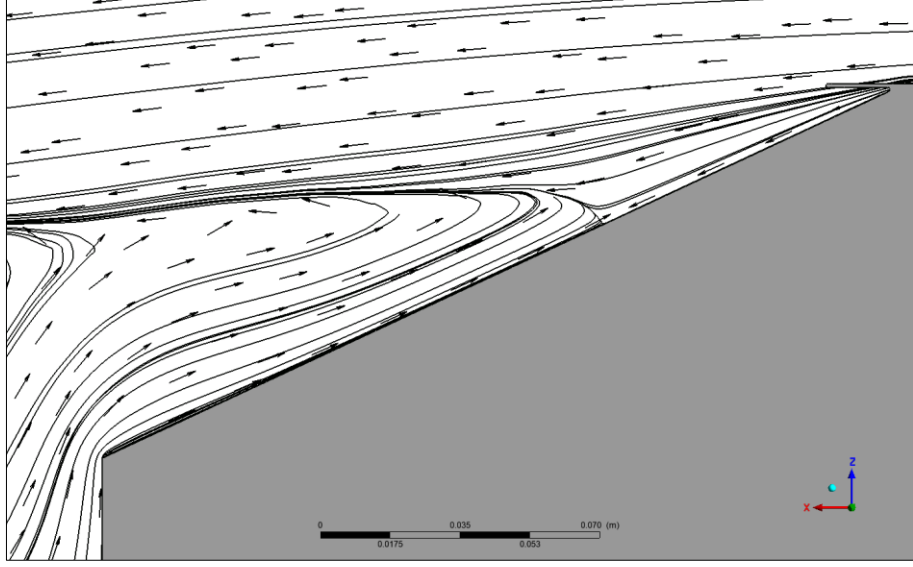
b.



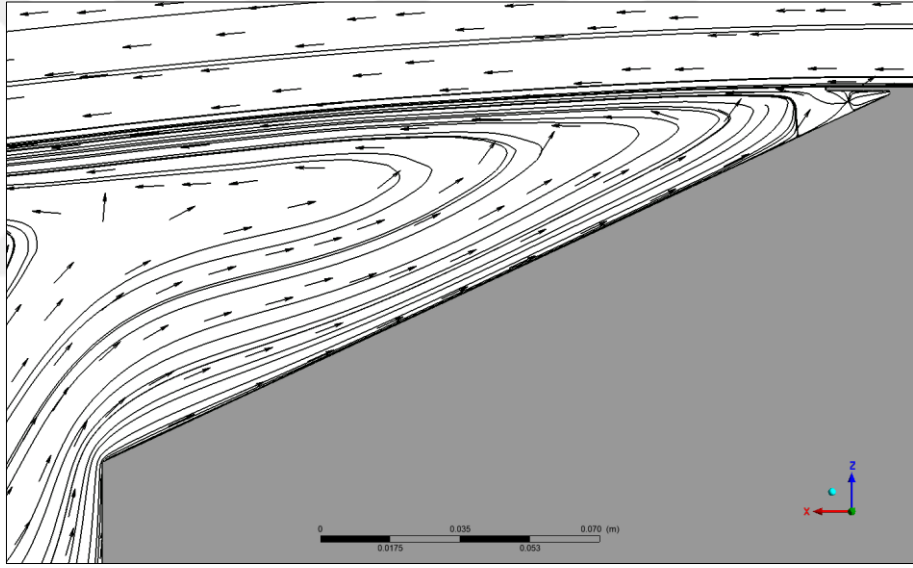
c.



d.

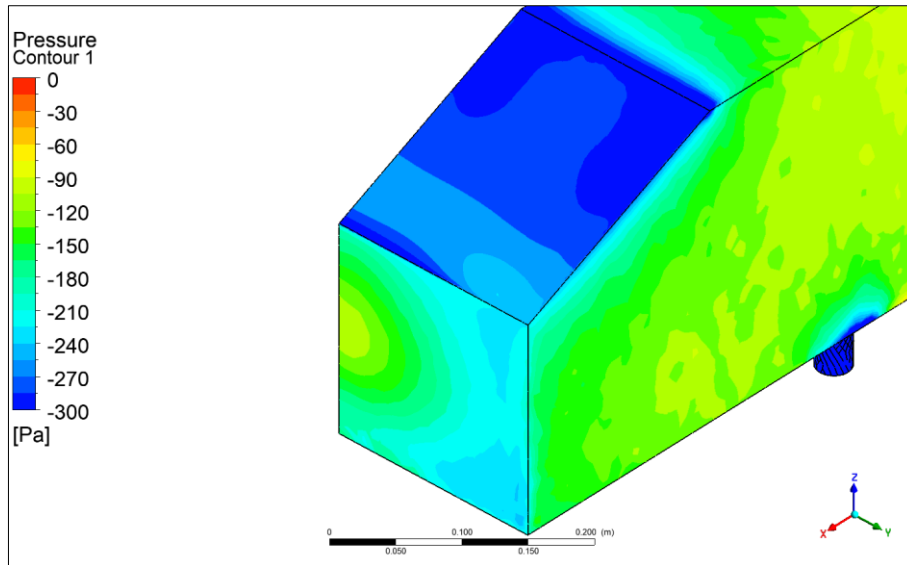


e.

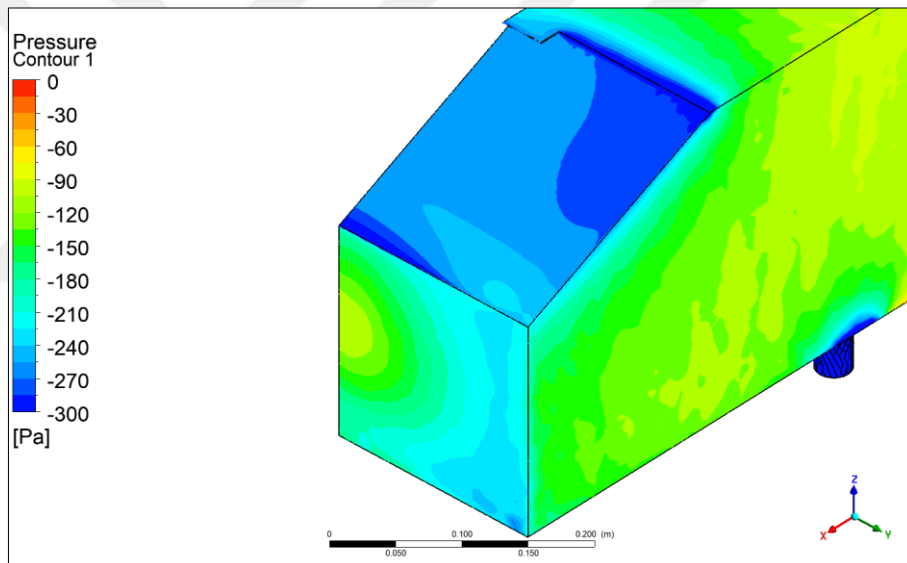


f.

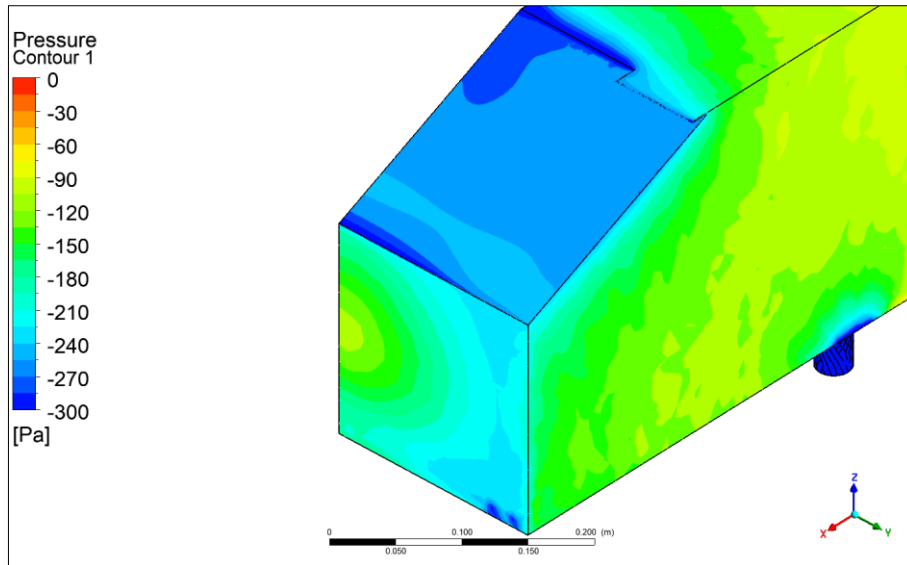
Şekil 21 Simetri düzlemindeki ($y/W = 0$) akım çizgileri ve vektörler a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (25° arka eğim açısı)



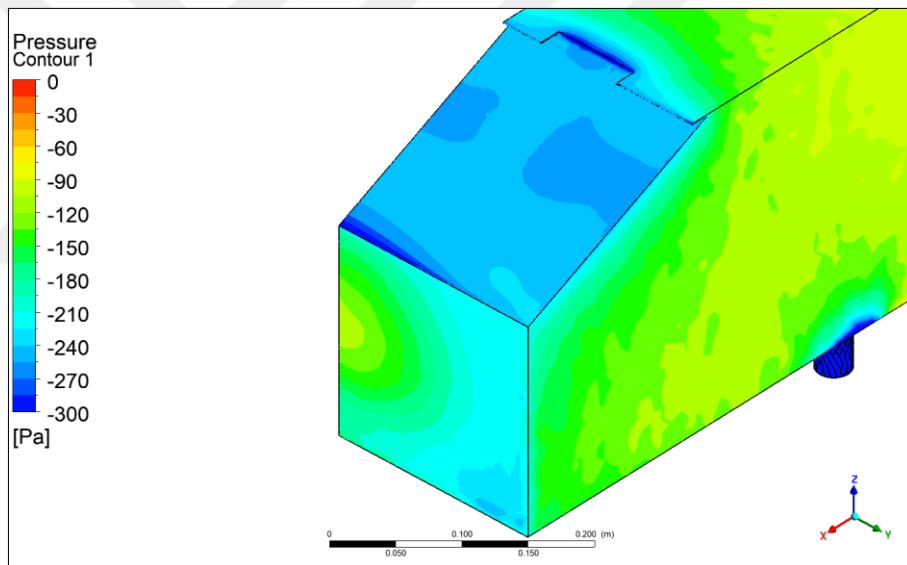
a.



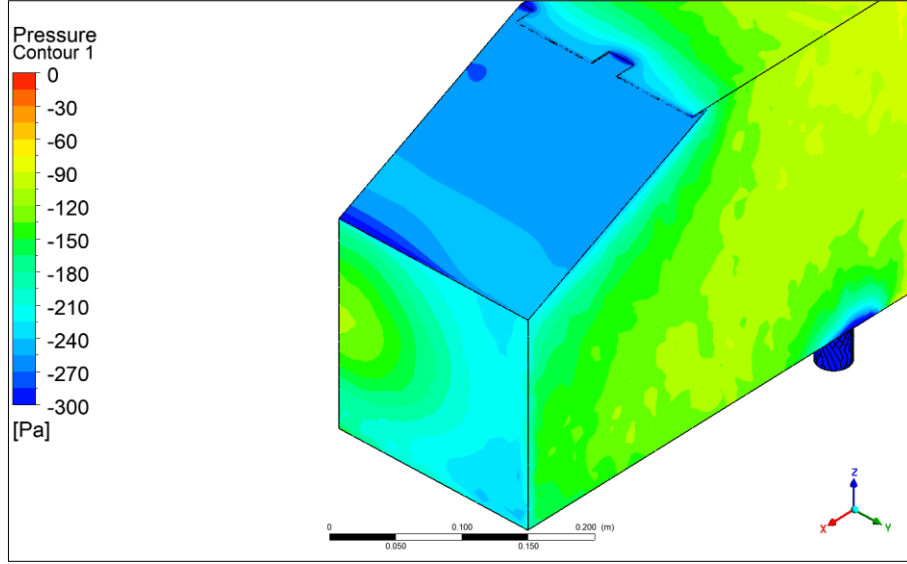
b.



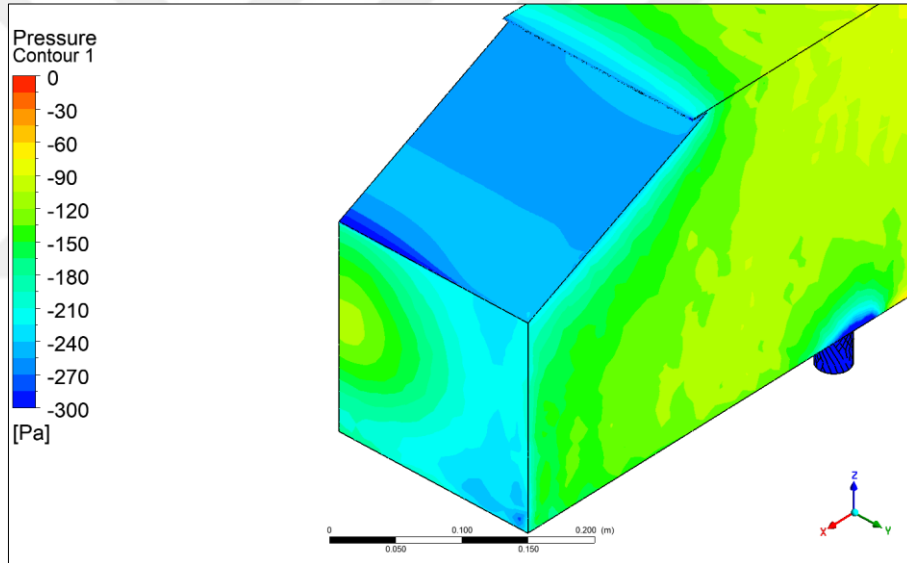
c.



d.

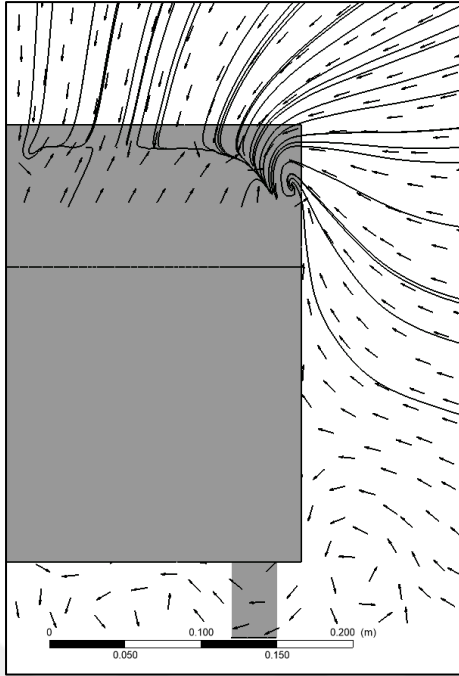


e.

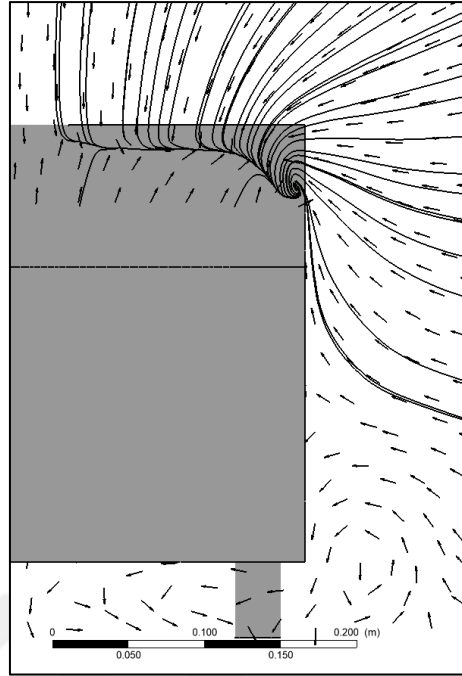


f.

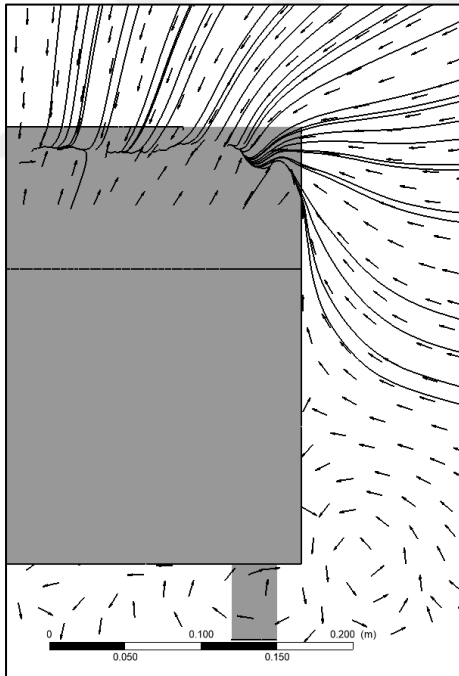
Şekil 22 Ahmed gövdesi üzerindeki basınç konturları a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (25° arka eğim açısı)



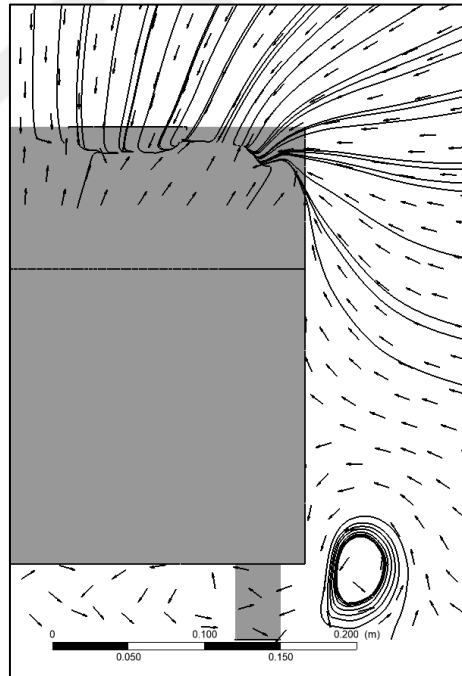
a.



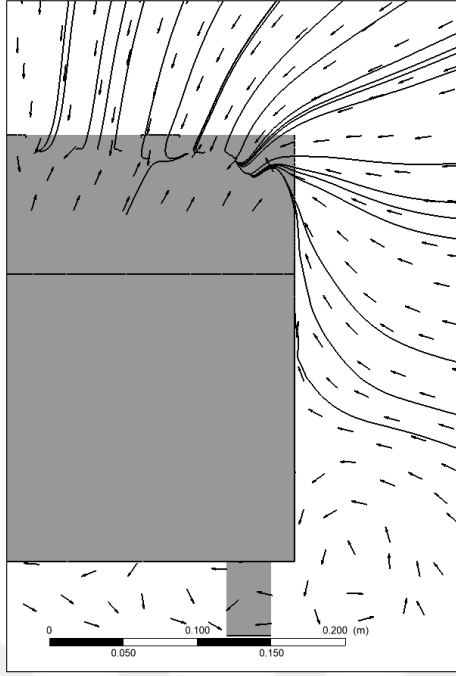
b.



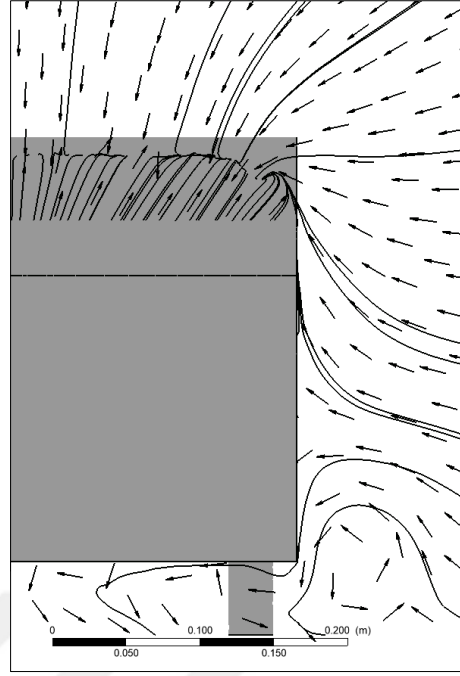
c.



d.

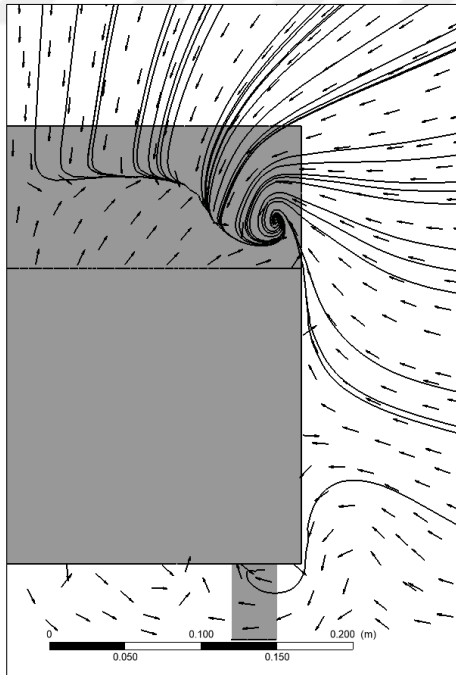


e.

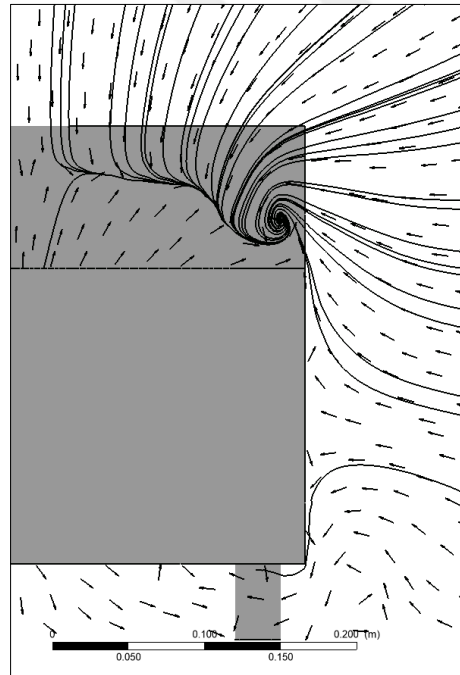


f.

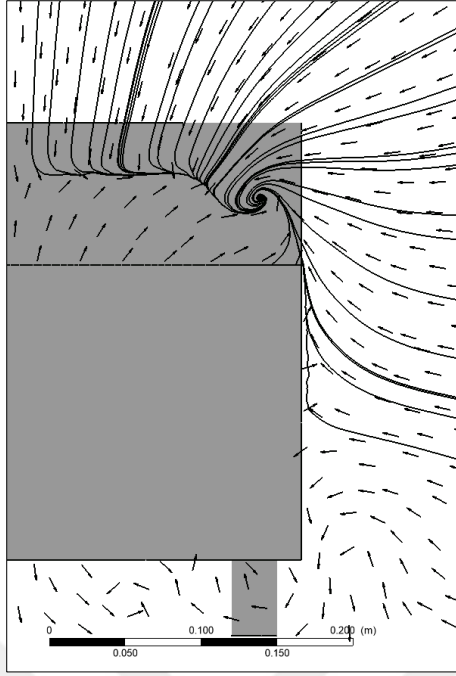
Şekil 23 $x/L = -0.08$ düzlemindeki akım çizgileri ve vektörler: a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (25° arka eğim açısı)



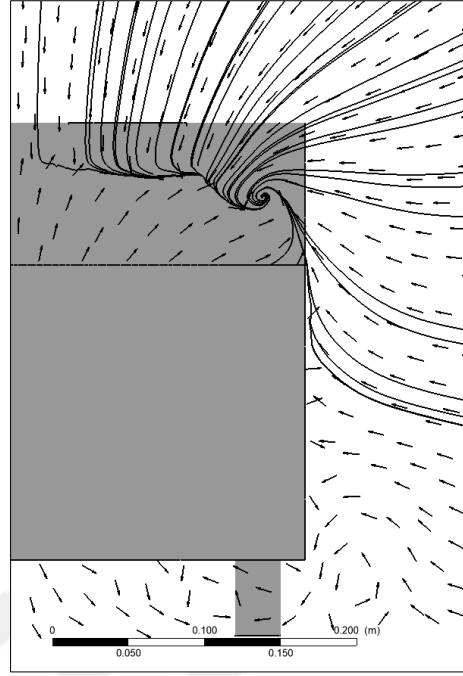
a.



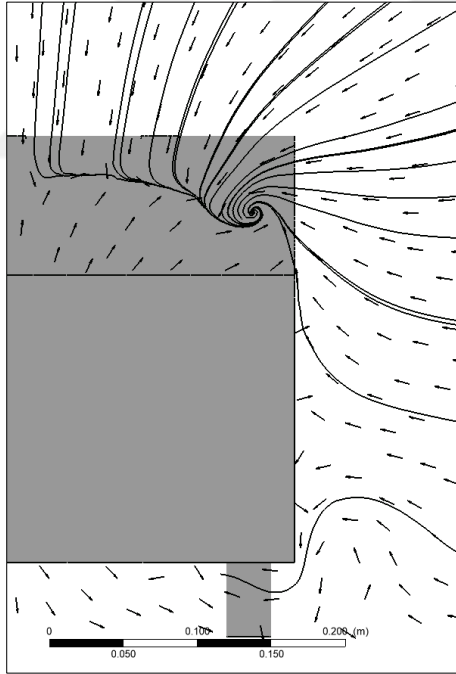
b.



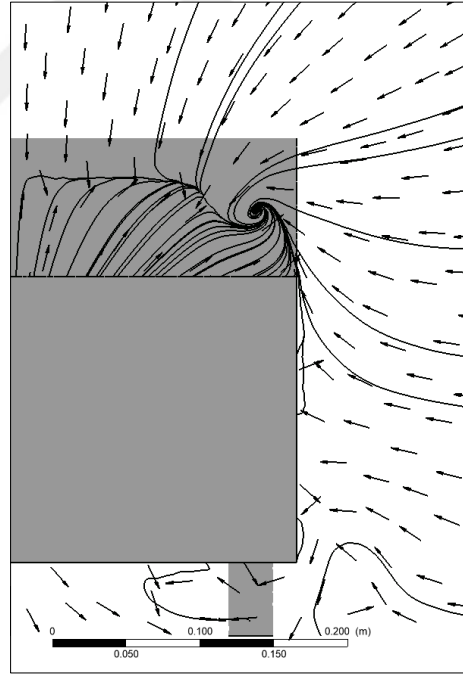
c.



d.



e.



f.

Şekil 24 $x/L = 0$ düzlemindeki akım çizgileri ve vektörler: a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (25° arka eğim açısı)

35° arka eğim açılı Ahmed gövdesinin tüm yüzeyleri üzerine etkiyen basınç ve viskoz (sürtünme) direnç kuvveti değerleri Çizelge 6' da sunulmuştur. Şekil 25' te ise tüm kanat konfigürasyonlarında araç üzerine etkiyen toplam sürüklenme kuvvetinin yüzeylere göre dağılımı ortalama değerlerle verilmiştir. Buna göre, toplam sürüklenme kuvvetinin yaklaşık ortalama %32' lik bir kısmı arka dik yüzey, %30' luk bir kısmı ön yüzey, %26'lık bir kısmı ise arka eğimli yüzey üzerine etkimektedir. 25° arka eğim açılı model ile karşılaştırıldığında, arka dik yüzeyin sürüklenme kuvvetindeki payının azaldığı, buna karşılık ön yüzeyin katkısının arttığı; geri kalan yüzeylerin ise etkisinin neredeyse aynı kaldığı görülmektedir. Burada da tüm 35° arka eğim açılı modeller için toplam sürüklenme kuvvetinin yaklaşık %94' ünü şekil direnci, geri kalan %6' sını ise sürtünme direnci oluşturmaktadır.

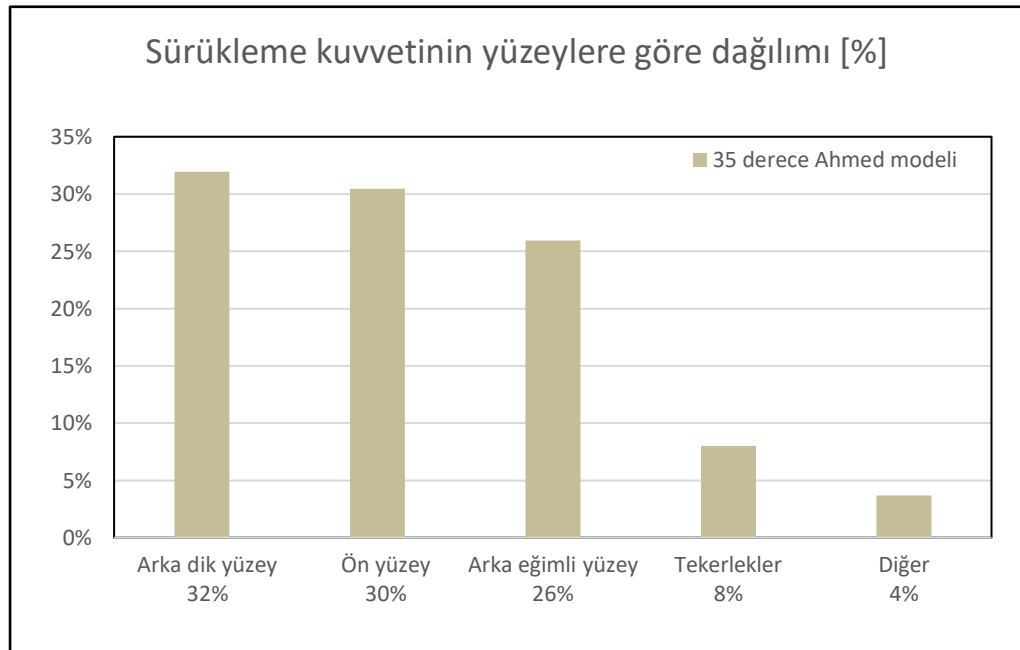
Çizelge 6' da verilen sürüklenme kuvveti değerlerine göre, arka eğimli yüzey ve arka dik yüzey üzerindeki toplam etki dikkate alındığında, arka eğimli yüzeyin hücum kenarının iki ucuna birer kanat eklenmesinin 35° arka eğim açılı Ahmed gövdesi üzerinde aerodinamik açıdan olumsuz bir etki yarattığı görülebilir. Buna karşılık, simetri düzlemi etrafına yerleştirilen tek kanadın arka eğimli yüzey üzerindeki sürüklenme kuvvetini azaltma etkisi ise en fazladır.

35° arka eğim açılı Ahmed gövdesinde eğimli yüzeyin hücum kenarına kanat eklenmesi, akış alanında kayda değer bir fark oluşturmamıştır; çünkü, 25 ° arka eğim açısının aksine, eğimli yüzeydeki ters akış zaten yüzeye tutunmaktadır ve eğimli yüzeyin üzerinde ikincil bir girdap oluşmamaktadır (Şekil 26 ve 27). Bunun bir sonucu olarak sürüklenme katsayısındaki düşüş en fazla %0.3 oranında tek kanatlı ve uzun tek kanatlı modellerde olmaktadır (Çizelge 3). Genel olarak, eğimli yüzeyin hücum kenarına kanat eklenmesi, 35° arka eğim açılı modeller için sürüklenme katsayısı açısından olumsuz bir etki yaratmakta olup; iki, üç ve dört kanatlı modellerde sürüklenme katsayısı artmıştır (Çizelge 3). Eğimli yüzey üzerindeki ortalama basınç değerleri kanatlı modellerde genel olarak düşmekle birlikte (Çizelge 5), özellikle simetri düzleminin etrafında ortalanmış olan kanadın altında oluşan nispeten yüksek basınç bölgeleri dikkat çekmektedir (Şekil 28b ve 28d). Öte yandan, 35° arka eğim açılı kanatlı modellerin tümünde arka dik yüzey üzerindeki ortalama basınç değeri düşmüştür (Çizelge 5); bu da iki, üç ve dört kanatlı modellerde sürüklenme katsayısındaki küçük oranda artışın nedeni olarak gösterilebilir (Çizelge 3).

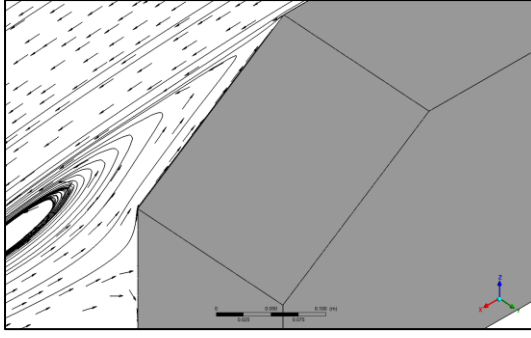
Ayrıca, sürükleme katsayısı değerleri karşılaştırıldığında, 25° arka eğim açısındaki kanatlı Ahmed modellerinde sürükleme katsayısının giderek 35° arka eğim açılı modellerinkine yaklaştığı görülebilir (Çizelge 3).

Çizelge 6 35° arka eğim açılı Ahmed gövdesinin yüzeyleri üzerine etkiyen sürükleme kuvveti değerleri

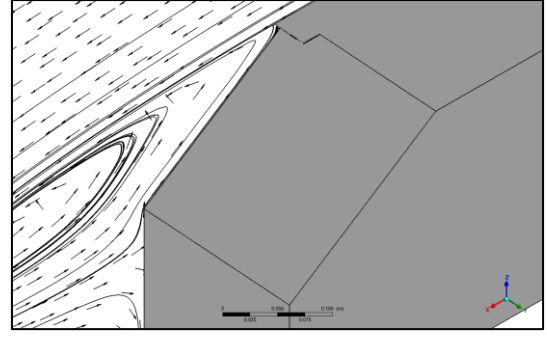
		Model					
		Referans (kanatsız)	Tek kanat	İki kanat	Üç kanat	Dört kanat	Uzun tek kanat
Arka eğimli yüzey	Basınç	5.76	5.67	5.79	5.74	5.74	5.69
	Sürtünme	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
Arka dik yüzey	Basınç	5.93	5.95	6.02	6.03	6.00	6.01
	Sürtünme	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Yan yüzey	Basınç	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Sürtünme	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
Alt yüzey	Basınç	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Sürtünme	0.24	0.24	0.26	0.24	0.24	0.25
Üst yüzey	Basınç	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Sürtünme	0.17	0.16	0.17	0.18	0.17	0.16
Ön yüzey	Basınç	4.38	4.35	4.38	4.35	4.38	4.39
	Sürtünme	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
Tekerlekler	Basınç	1.48	1.53	1.36	1.51	1.48	1.36
	Sürtünme	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05



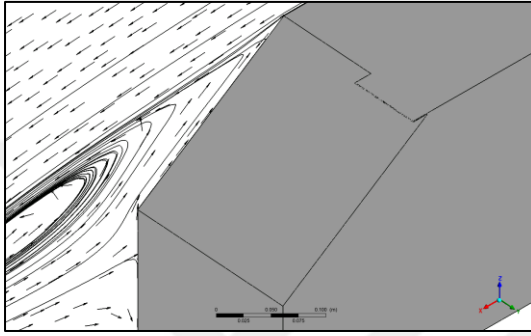
Şekil 25 35° Ahmed gövdesi için net sürükleme kuvvetinin yüzeylere göre dağılımı



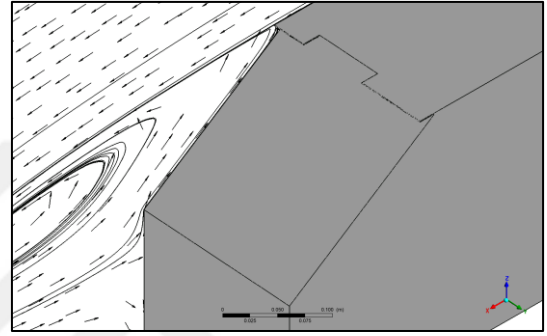
a.



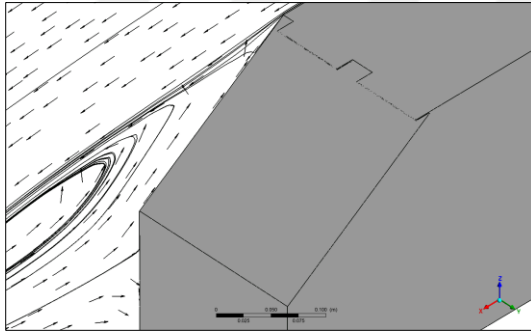
b.



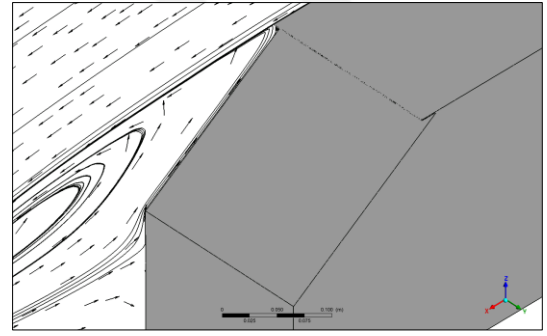
c.



d.

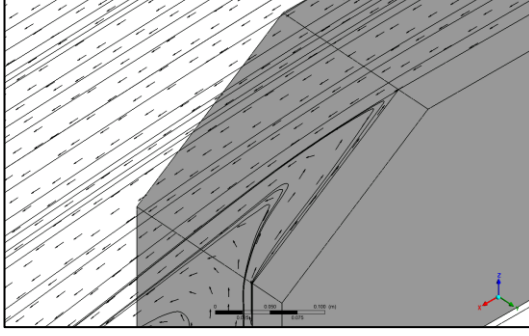


e.

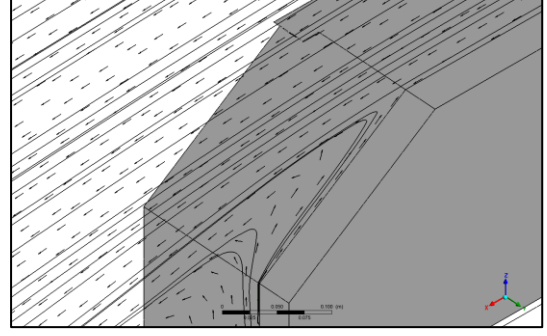


f.

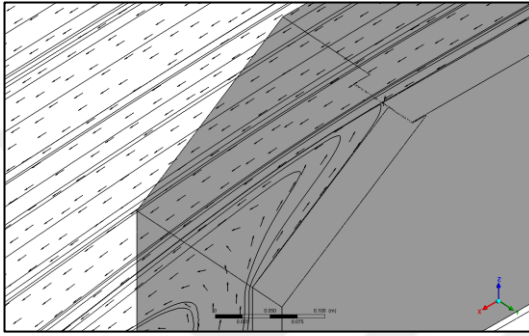
Şekil 26 Simetri düzleminde çizilen akım çizgileri ve vektörler ($y/W=0$) a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (35° arka eğim açısı)



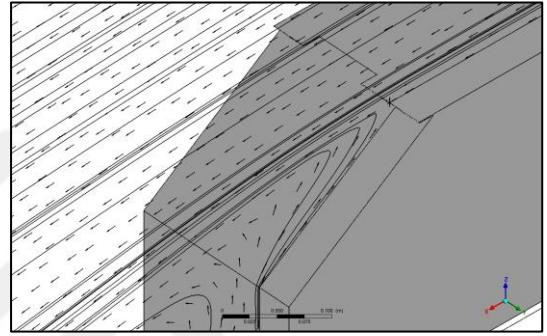
a.



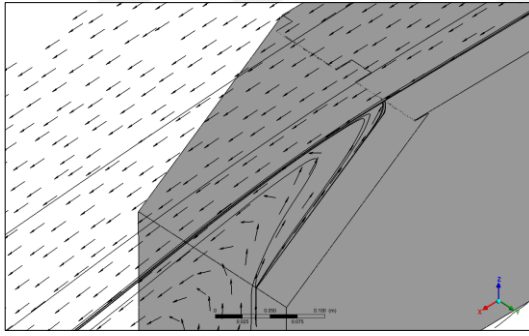
b.



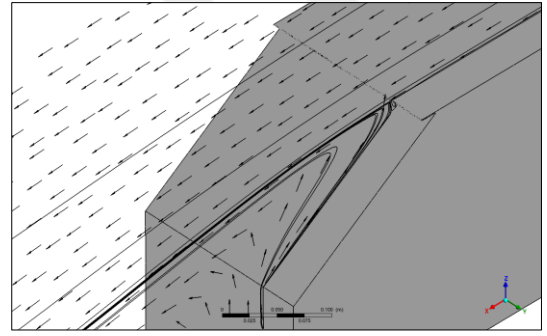
c.



d.

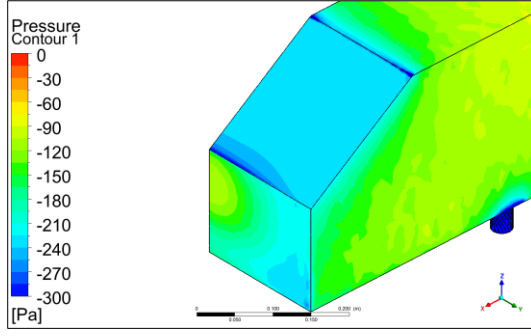


e.

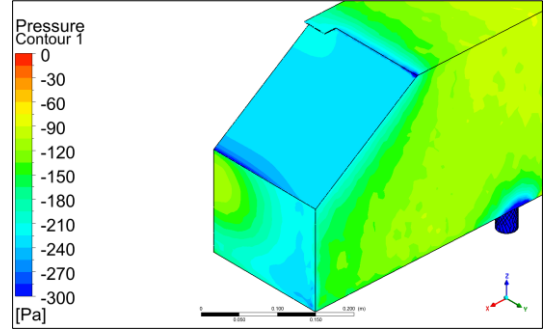


f.

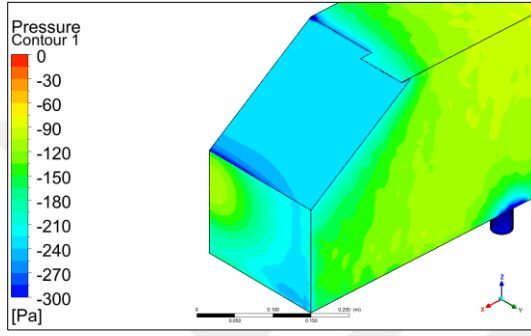
Şekil 27 $y/W=0.4$ düzleminde çizilen akım çizgileri ve vektörler a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (35° arka eğim açısı)



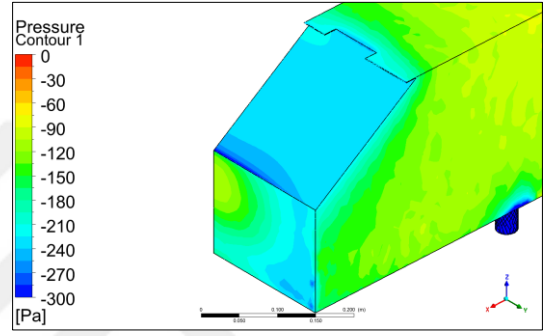
a.



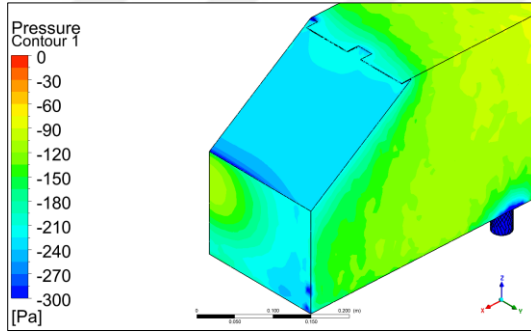
b.



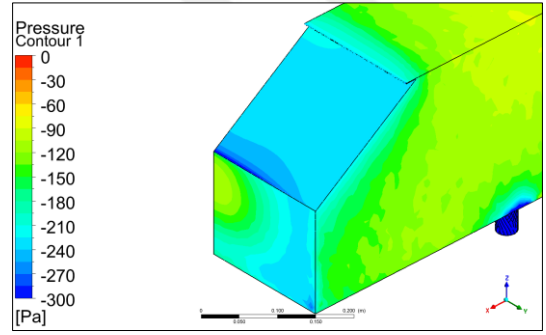
c.



d.



e.



f.

Şekil 28 Ahmed gövdesi üzerindeki basınç konturları a) referans (kanatsız), b) tek kanatlı, c) iki kanatlı, d) üç kanatlı, e) dört kanatlı ve f) uzun tek kanatlı modeller (35° arka eğim açısı)

Aşağıdaki Çizelge 7' de 25° ve 35° arka eğim açılı modeller için kaldırma katsayısı (C_L) değerleri verilmiştir. Buna göre kanatsız 25° arka eğim açılı model dışında, diğer tüm modellerde net kaldırma kuvvetinin yönü aşağı doğrudur. Genel olarak, 35° arka eğim açılı modellerin kaldırma katsayısı mutlak değer olarak 25° arka eğim açılı modellerinkinden daha büyük olup, 35° arka eğim açılı modelin aracın zemine tutunması bakımından daha avantajlı olduğu söylenebilir. Çizelge 5' te

verilmiş olan, arka eğimli yüzey üzerindeki ortalama basınç değerleri göz önünde bulundurulduğunda, 25° arka eğim açılı modellerde vakum etkisinin daha fazla olması da bu durumu açıklamaktadır.

Çizelge 7 25° ve 35° arka eğim açılı Ahmed modelleri için elde edilen kaldırma katsayısı değerleri

Model	C_L	
	25°	35°
Referans (kanatsız)	0.004	-0.020
Tek kanat	-0.002	-0.023
İki kanat	-0.007	-0.013
Üç kanat	-0.007	-0.026
Dört kanat	-0.012	-0.021
Uzun tek kanat	-0.016	-0.021

V. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında arka eğimli yüzeyin hücum kenarına tutturulmuş kanatlar ile Ahmed gövdesi etrafındaki üç boyutlu sıkıştırılamaz, daimî, türbülanslı hava akımı sayısal olarak incelenmiştir. 25° ve 35° arka eğim açılarında tek, iki, üç, dört kanatlı ve uzun tek kanatlı konfigürasyonlar için sayısal çözümler elde edilmiştir ve sürtünme katsayısı değerleri ile hız ve basınç alanları sunulmuştur.

Sürüklenme kuvvetinin Ahmed gövdesinin tüm yüzeyleri üzerinde nasıl bir dağılım gösterdiği incelendiğinde, 25° arka eğim açılı Ahmed gövdesi için toplam sürüklenme kuvvetinin yaklaşık ortalama %38' lik bir kısmının arka dik yüzey, %25' lik bir kısmının arka eğimli yüzey, %25' lik kısmının da ön yüzey üzerine etki ettiği görülmüştür. Tüm 25° arka eğim açılı modeller için toplam sürüklenme kuvvetinin yaklaşık %94' ünü şekil direnci, geri kalan %6'sını ise sürtünme direnci oluşturmaktadır.

Sayısal çözüm sonuçlarına göre arka eğimli yüzeyin hücum kenarı üzerine kanat eklenmesinin sürüklenme katsayısını sadece 25° arka eğim açısı için azalttığı görülmüştür. Buna göre, sürüklenme kuvvetini azaltmak için arka eğimli yüzeyin üzerinde oluşan ikincil girdabın ortadan kaldırılmasının önemli bir faktör olduğu söylenebilir. Sürtünme katsayısındaki maksimum azalma, yaklaşık %2.6'lık bir oranla, 25° arka eğim açısı için üç kanatlı model ile elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri karşılaştırıldığında, arka eğimli yüzeyin hücum kenarına kanat yerleştirilmesinin, 25° arka eğim açılı modeli aerodinamik olarak 35° arka eğim açılı modele yaklaştırdığı söylenebilir.

35° arka eğim açısına sahip modellerin sürüklenme katsayısında ise dikkate değer bir değişim olmadığı görülmüştür. Bunun temel sebebi olarak arka eğimli yüzeydeki akımın genellikle yüzeye tutunmuş olmasının bu çalışmada ele alınan pasif akış kontrol yöntemini işlevsiz bırakması gösterilebilir. 35° arka eğim açısına sahip iki, üç ve dört kanatlı modellerde, kanatların varlığı gövdenin arka dik yüzey üzerinde

ortalama basıncın düşmesine neden olmakta, aerodinamik olarak olumsuz etki meydana getirmektedir.

Kaldırma katsayısı değerleri incelendiğinde, hemen hemen tüm modellerde net kaldırma kuvvetinin aşağı yönde olduğu ve 35° arka eğim açılı modellerin zemine daha iyi tutunduğu görülmüştür. Burada 25° arka eğim açılı modellerde arka eğimli yüzey üzerindeki ortalama basınç değerlerinin 35° arka eğim açılı modellerdekine göre daha düşük olmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

Gelecek çalışmalarda 35° arka eğim açısı için arka eğimli yüzeyin farklı kenarlarına kanat yerleştirilmesinin sürüklenme katsayısını düşürüp düşürmeyeceğinin incelenmesi faydalı olacaktır. Ayrıca, hem 25° hem de 35° arka eğim açısı için farklı kanat boyutları ve geometrisi de incelenebilecek diğer parametrelerdir.

VI. KAYNAKÇA

KİTAPLAR

ANDERSON, J. D., (1995), **Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications**, New York, McGraw Hill.

ÇENGEL, Y. A., CİMBALA, J. M., & ENGİN, T. (2008). **Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları**, İzmir, Güven Kitabevi, 5. Baskıdan çeviri.

TU, J., YEOH, G. H., & LIU, C. (2018). **Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach**, Oxford, Butterworth-Heinemann.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W., (1995), **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**, Harlow, Longman Scientific & Technical.

MAKALELER

AHMED, S. R., RAMM, G., & FALTIN, G. (1984). “Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake”. **SAE Transactions**, 473-503.

AIDER, J. L., & BEAUDOIN, J. F. (2008). “Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps”. **Experiments In Fluids**, 44(4), 491-501.

ALTAF, A., OMAR, A. A., & ASRAR, W. (2014). “Passive drag reduction of square back road vehicles”. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 134, 30-43.

BAYINDIRLI, C., & ÇELİK, M. (2019). “Bir Taşıta Etki Eden Aerodinamik Direnç Kuvvetinin Bagaj Üstü Spoiler İle İyileştirilmesi”. **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 19(2), 470-479.

- BAYINDIRLI, C., ÇELİK, M., & DEMİRALP, M. (2018). “Bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısının CFD yöntemi ile incelenmesi ve sürüklenme kuvvetinin pasif akış kontrol yöntemi ile iyileştirilmesi”. **Politeknik Dergisi**, 21(4), 785-795.
- BUSCARIOLO, F. F., ASSI, G. R., & SHERWIN, S. J. (2021). “Computational study on an Ahmed Body equipped with simplified underbody diffuser”. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 209, 104411.
- BYRNE, C. E. I. (1999). “Aerodynamics of Road Vehicles—4th edition”. Edited by WH. Hucho. SAE International, Warrendale, PA, USA. Materials Park, OH 44073-0002, USA 1998. 918 pp. Illustrated. **The Aeronautical Journal**, 103(1026), 398-398.
- DELISSAUX, F., MORTAZAVI, I., ITAM, E., HERBERT, V., & RIBES, C. (2021). “Sensitivity analysis of hybrid methods for the flow around the ahmed body with application to passive control with rounded edges”. **Computers & Fluids**, 214, 104757.
- GEOFFREY, M., GOOD, L., & GARRY, K. P. (2004). “On the use of reference models in automotive aerodynamics”. **SAE Technical Paper Series. USA: SAE Publication Group, Paper**, (2004-01), 1308.
- HAN, M. W., RODRIGUE, H., CHO, S., SONG, S. H., WANG, W., CHU, W. S., & AHN, S. H. (2016). “Woven type smart soft composite for soft morphing car spoiler”. **Composites Part B: Engineering**, 86, 285-298.
- HANFENG, W., YU, Z., CHAO, Z., & XUHUI, H. (2016). “Aerodynamic drag reduction of an Ahmed body based on deflectors”. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 148, 34-44.
- HUMINIC, A., HUMINIC, G., & SOICA, A. (2012). “Study of aerodynamics for a simplified car model with the underbody shaped as a Venturi nozzle”. **International Journal of Vehicle Design**, 58(1), 15-32.

- KASHYAP, V., ARORA, B. B., BHATTACHARJEE, S., & MITTAL, P. (2019). "Aerodynamic Effect of Aspect Ratio of Spherical Depressions on the Bonnet of Hatchback Cars" (No. 2019-01-5096). **SAE Technical Paper**.
- KUREC, K., REMER, M., & PIECHNA, J. (2019). "The influence of different aerodynamic setups on enhancing a sports car's braking". **International Journal of Mechanical Sciences**, 164, 105140.
- MCNALLY, J. W., ALVI, F. S., MAZELLIER, N., & KOURTA, A. (2015). "Active flow control on an ahmed body-an experimental study". In **53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting** (p. 0825).
- MCCALLEN, R., SALARI, K., ORTEGA, J., CASTELLUCCI, P., BROWAND, F., HAMMACHE, M., ... & POINTER, D. (2004, June). "DOE's effort to reduce truck aerodynamic drag-joint experiments and computations lead to smart design". In **34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit** (p. 2249).
- MOHAMMADIKALAKOO, B., SCHITO, P., & MÂNI, M. (2020). "Passive flow control on Ahmed body by rear linking tunnels". **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 205, 104330.
- SHADMANI, S., MOJTABA, M., MOJTABA MOUSAVI NAINIYAN, S., MIRZAEI, M., GHASEMIASL, R., & POURYOUSSEFI, S. G. (2018). "Experimental investigation of flow control over an Ahmed body using DBD plasma actuator". **Journal of Applied Fluid Mechanics**, 11(5), 1267-1276.
- SIDDIQUI, N. A., & CHAAB, M. A. (2021). "A Simple Passive Device for the Drag Reduction of an Ahmed Body". **Journal of Applied Fluid Mechanics**, 14(1), 147-164.
- TSAI, C. H., FU, L. M., TAI, C. H., HUANG, Y. L., & LEONG, J. C. (2009). "Computational aero-acoustic analysis of a passenger car with a rear spoiler". **Applied Mathematical Modelling**, 33(9), 3661-3673.

YUAN, C. S., MANSOR, S., & ABDULLAH, M. A. (2017). "Effect of spoiler angle on the aerodynamic performance of hatchback model". **International Journal Of Applied Engineering Research**. 12(22), 12927-12933.

ZAFER, B., & HASKARAMAN, F. (2017). "Önden ve yanal rüzgâr şartı altında Ahmed cisminin sayısal incelenmesi". **Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University**, 32(1), 215-229.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Cafer KAMACI

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2015, Atatürk üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Y. Lisans:** 2022, İstanbul Aydın Üniversitesi, Yüksek Lisans Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- KAMACI, C., & KAYA, K., (2021). “Numerical Investigation of Aerodynamic Properties of Ahmed Body for Different Rear Slanted Surface Configurations”. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 469-475.