



**TAŞITLARDA YAN AYNA ÜZERİNDEKİ
AERODİNAMİK ETKİLERİN
NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

Merve VATANSEVER ENSARIOĞLU



T.C.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TAŞITLARDA YAN AYNA ÜZERİNDEKİ
AERODİNAMİK ETKİLERİN
NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

Merve VATANSEVER ENSARİOĞLU

0000-0002-7711-4618

Dr. Öğr. Üyesi Onur YEMENİCİ

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TAŞITLARDA YAN AYNA ÜZERİNDEKİ AERODİNAMİK ETKİLERİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Merve VATANSEVER ENSARIOĞLU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Onur YEMENİCİ

Araç aerodinamiğinde sürüklenme katsayısının düşürülmesi amacıyla yapılan çalışmalar; yakıt tüketim miktarı, araç menzili, çevresel etki konularında iyileşme sağlamaktadır. Sürüklenme kaynakları arasında olan yan aynaların, toplam sürüklenme katsayısına etkisi %2 - %6 arasındadır.

Bu nümerik çalışmada, ilk olarak, 4 farklı yan ayna modelinde, farklı hızların ve sapma açılarının etkisi, tam faktöriyel bir deney planı ile analiz edilmiştir. İkinci olarak ise modellerin ikisi için bağlama kolu geometrisine ait 3 değişkenin (boyut oranı, yükseklik, uzunluk) etkileri kesirli faktöriyel Taguchi L9 deney planına göre incelenmiştir. İstatistiksel sonuçlar, akış karakteristikleri ile açıklanmıştır.

Hızın incelenen aralıkta sürüklenme katsayısı üzerine anlamlı bir etkisi olmadığı görülmüştür. Diğer yandan, yan kısımlarda boylamasına vortekslerin oluşmadığı Model 1 ve Model 3'te, sapma açısı ile sürüklenme katsayısı arasında birinci dereceden bir ilişki bulunmuştur. Sapma açısı arttıkça sürüklenme katsayısı doğrusal olarak düşmüştür. Model 2 ve Model 4'te ise sapma açısı ile sürüklenme katsayısı arasında ikinci dereceden bir ilişki bulunmuş ve değişim eğrisinin işaret de değiştirdiği görülmüştür. Sapma açısındaki artışla sürüklenme katsayısının artıp sonra azalması, negatif sapma açısında boylamasına vortekslerin oluşmamasına bağlanmıştır.

Model 1'de dengeli bir vorteks çifti oluşurken Model 2'de boylamasına vortekslerin etkisi ile aşağıya-sapma oluşmuştur. Model 3'te boylamasına vortekslerin oluşmadığı ve enlemesine vorteks çiftinin yukarıya-sapma oluşturduğu gözlenmiştir. Model 3'teki akış dik (squareback) otomobillerin arkasındaki ile benzerlik göstermiştir. Model 4'te, akım çizgilerinin kısa mesafede birleştiği, ancak diğer modellerden farklı olarak çapraz bir yol kat ederek araçtan uzaklaşan boylamasına vortekslerin, cisim-ardı bölgesinde belirleyici olduğu görülmüştür.

Dairesel / eliptik kesitli olan ve eğrisel olarak uzayan Model 1'e ait kolda en etkili parametre yükseklik olmuştur. Boyut oranındaki ve uzunluktaki artış sürüklenme katsayısını düşürürken, yükseklikteki artış sürüklenme katsayısını arttırmıştır. Dörtgen kesitli olan ve doğrusal uzayan Model 2'ye ait kolda en etkili parametre boyut oranı olmuştur. Boyut oranındaki artış sürüklenme katsayısını düşürürken, uzunluktaki ve yükseklikteki artış sürüklenme katsayısını arttırmıştır.

Anahtar kelimeler: Yan ayna, aerodinamik, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)
2020, xvii + 290 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

NUMERICAL INVESTIGATION of AERODYNAMIC EFFECTS ON AUTOMOTIVE REAR VIEW SIDE MIRRORS

Merve VATANSEVER ENSARIOGLU

Bursa Uludag University
Institute of Science and Technology
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Onur YEMENICI

Studies carried out to reduce drag coefficient in vehicle aerodynamics, provide improvements in fuel economy, vehicle range and environmental effects. Side mirrors, as a source of drag, have a 2% and 6% contribution to the total drag coefficient.

In this numerical study, firstly, the effects of different velocities and yaw angles in 4 different side mirror models were analyzed with a full factorial experimental design. Secondly, for 2 of the models, the effects of 3 variables (aspect ratio, height, length) of mirror arm geometry were examined according to the fractional factorial Taguchi L9 experimental design. The statistical results were explained by flow characteristics.

It has been observed that the velocity does not have a significant effect on the drag coefficient in the range studied. On the other hand, in Model 1 and Model 3, where longitudinal vortexes did not occur on the side regions, a first-order relationship was found between the yaw angle and the drag coefficient. As the yaw angle increased, the drag coefficient decreased linearly. In Model 2 and Model 4, a second-order relationship was found between the yaw angle and the drag coefficient and it was observed that also the curve changed sign. The drag coefficient increased and then decreased with the increase in yaw angle, due to the absence of longitudinal vortexes at negative yaw angle.

While a balanced vortex pair was formed in Model 1, downwash occurred in Model 2 by the effect of longitudinal vortexes. In Model 3, it has been observed that longitudinal vortexes did not occur and the transverse vortex pair caused upwash. The flow in Model 3 was similar to that behind the squareback cars. In Model 4, the streamlines closed at a short distance, but longitudinal vortexes, which travelled a cross path and moved away from the vehicle unlike in the other models, were determinative in the wake region.

The most effective parameter in the arm of Model 1, which has a circular / elliptical cross section and extends curvilinearly, was the height. While the increase in aspect ratio and length decreased the drag coefficient, the increase in height increased the drag coefficient. The most effective parameter in the arm of Model 2, which has a rectangular cross-section and extends linearly, was the aspect ratio. While the increase in the aspect ratio decreased the drag coefficient, the increase in length and height increased the drag coefficient.

Keywords: Rear view side mirror, aerodynamics, computational fluid dynamics (CFD)
2020, xvii + 290 pages.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Çevresel etki, yakıt maliyeti, araç menzili gibi baskılayıcı faktörlerden dolayı, araç sürüklenme katsayısının düşürülmesi konusu güncelliğini korumaktadır. Araçlarda bulunan ve arka görüşü sağlayan yan aynalar da bu katsayıyı etkilemektedir. Bu çalışmada, akış parametrelerinin ve ayna bağlama kolu geometrisinin, yan ayna aerodinamiğine etkisi nümerik olarak incelenmiştir.

Yüksek lisans eğitimim ve tez sürecim boyunca danışmanlığımı yapan Dr. Öğr. Üyesi Onur YEMENİCİ'ye, analiz çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Erhan PULAT'a ve YÖK 100/2000 araştırmacısı Ebubekir BEYAZOĞLU'ya, tüm eğitim hayatım boyunca yanımda olan canım ailem ve eşime teşekkürlerimi sunuyorum.

Merve VATANSEVER ENSARIOĞLU

25 / 08 / 2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Kuramsal Temeller.....	3
2.1.1. Daldırılmış cisimler üzerinden akış ve önemli karakteristikler.....	5
2.1.2. Otomobil aerodinamiği.....	17
2.1.3. Yan aynanın aerodinamiği.....	26
2.1.4. Daldırılmış cisimler üzerinden akış için korunum denklemleri.....	27
2.1.5. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği.....	28
2.1.6. Nümerik çalışmalarda doğrulama ve sağlama.....	40
2.1.7. Deney tasarımı ve istatistiksel analiz yöntemleri.....	45
2.2. Bilimsel Araştırmalar.....	50
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	61
3.1. Giriş.....	61
3.2. Literatür Çalışmalarıyla Sağlama.....	61
3.3. Ayna Geometrisi ve Akış Alanı.....	64
3.4. Başlangıç ve Sınır Şartları.....	70
3.5. Ayna Modelleri için Ağdan Bağımsızlık (Doğrulama) Çalışmaları.....	71
3.6. Deney Planları.....	75
3.6.1. Sapma açısı ve akış hızının etkisi.....	75
3.6.2. Bağlama kolu geometrisinin etkisi.....	76
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	78
4.1. Giriş.....	78
4.2. Model 1 – Hız ve Sapma Açısı Etkisi.....	78
4.3. Model 2 – Hız ve Sapma Açısı Etkisi.....	113
4.4. Model 3 – Hız ve Sapma Açısı Etkisi.....	147
4.5. Model 4 – Hız ve Sapma Açısı Etkisi.....	182
4.6. Ayna Geometrik Modellerinin Karşılaştırılması.....	241
4.7. Model 1 – Bağlama Kolu Geometrisi Etkisi.....	250
4.8. Model 2 – Bağlama Kolu Geometrisi Etkisi.....	259
4.9. Bağlama Kolu Geometrisi Etkilerinin Karşılaştırılması.....	270
5. SONUÇ.....	282
KAYNAKLAR.....	285
ÖZGEÇMİŞ.....	290

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

C_D	Sürüklenme Katsayısı
C_L	Kaldırma Katsayısı
C_M	Yunuslama Momenti
C_P	Basınç Katsayısı
C_P'	C_P Dalgalanması
F_D	Sürüklenme Kuvveti
F_L	Kaldırma Kuvveti
Ma	Mach Sayısı
Pa	Pascal
P_d	Dinamik Basınç
Re	Reynolds Sayısı
u	Akış Hızı
V	Hız
α	Hücum Açısı
β	Sapma Açısı
θ	Yunuslama Açısı
μ	Dinamik Viskozite
ρ	Yoğunluk

Kısaltmalar

Açıklama

DES	Detached Eddy Simulation
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES	Large Eddy Simulation
NS	Navier - Stokes
RANS	Reynolds-Averaged Navier Stokes (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes)
RMS	Root Mean Square (Kareler Ortalamasının Karekökü)
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SIMPLEC	Semi-Implicit with Splitting of Operators
SL	Smagorinsky-Lilly
SST	Shear Stress Transport
WALE	Wall-Adapting Local Eddy viscosity

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Bazı tipik akış olayları için, ilgili Re ve Ma değerleri.....	5
Şekil 2.2. Aerodinamik eksenler ve dönme yönleri.....	6
Şekil 2.3. Hücüm açısı ile yunuslama açısı arasındaki fark.....	7
Şekil 2.4. Cisimlere etki eden bileşke kuvvet ve bileşenleri.....	7
Şekil 2.5. Araç üzerine etki eden aerodinamik kuvvet ve momentler.....	8
Şekil 2.6. Örnek bir cisim için göreceli konum – basınç katsayısı grafiği.....	10
Şekil 2.7. Sınır tabakası akışının ayrılması.....	11
Şekil 2.8. Örnek bir akışta, akış mesafesine bağlı olarak duvar kayma gerilmesinin değişimi.....	12
Şekil 2.9. Akış ayrılması tipleri: (a) Ayrılma hattı akışa dik, (b) Ayrılma hattı akışa göre eğimli.....	13
Şekil 2.10. Sürüklenmenin sınıflandırılması.....	14
Şekil 2.11. Aynı sürüklenmeye sahip 2 cisim.....	14
Şekil 2.12. Re sayısına göre C_D değerinin logaritmik değişimi.....	16
Şekil 2.13. Bir otomobil için hıza bağlı olarak direnç kuvvetlerinin değişimi.....	18
Şekil 2.14. Otomobillerde aerodinamik sürüklenmenin tarihsel gelişimi	19
Şekil 2.15. Farklı arka profillere sahip araç tiplerinde cisim-ardı bölgesi: (a) Kademeli-eğimli (Sedan, gibi), (b) Direkt-eğimli (Heçbek, Kupe, gibi), (c) Dik (Steysin Vagon, gibi).....	20
Şekil 2.16. Ahmed ve ark. tarafından önerilmiş olan, arka yüzeyi eğimli bir araçta oluşabilecek vorteks sistemi.....	21
Şekil 2.17. Kademeli-eğimli bir otomobilde sandal-kuyruk uygulaması.....	22
Şekil 2.18. Akış yönü boyunca sirkülasyonun zayıflaması.....	23
Şekil 2.19. Arka yüzeyi eğimli bir araçta, eğim açısının (ϕ) A ve C vortekslerinin gücüne (Γ) etkisi.....	23
Şekil 2.20. Onorato sürüklenme denklemi için akış hacmi ve değişkenler....	24
Şekil 2.21. Genel bir otomobil profili üzerinde basınç katsayısı (C_P) dağılımı.....	25
Şekil 2.22. Arkası eğimli bir otomobil üzerinde eğim açısının (ϕ) etkisi.....	25
Şekil 2.23. Türbülanslı akış için çözüm yöntemleri.....	30
Şekil 2.24. Türbülanslı akış için çözüm yaklaşımları.....	31
Şekil 2.25. Çözüm yöntemlerinin türbülans ölçeğini çözümleme şekilleri....	31
Şekil 2.26. Tipik bir türbülanslı sınır tabaka ve bölümleri.....	37
Şekil 2.27. Duvar fonksiyonları ve geçerli olduğu bölgeler.....	39
Şekil 2.28. Modelleme–simülasyonun aşamaları ve doğrulama–sağlamanın rolü.....	40
Şekil 2.29. Sağlama süreçleri.....	44
Şekil 2.30. Deney tasarımının uygulanma süreci.....	46
Şekil 3.1. Sağlamada kullanılan referans model ve hesaplama hacmi.....	62
Şekil 3.2. Rüzgâr tüneli deneyleri ile nümerik hesaplamaların sonuçlarının karşılaştırılması.....	63
Şekil 3.3. Model 1'e ait geometrik model ve temel ölçüler.....	65
Şekil 3.4. Model 2'ye ait geometrik model ve temel ölçüler.....	66
Şekil 3.5. Model 3'e ait geometrik model ve temel ölçüler.....	67

Şekil 3.6.	Model 4'e ait geometrik model ve temel ölçüler.....	68
Şekil 3.7.	Analiz hacmi ve eksen takımı.....	69
Şekil 3.8.	Analiz hacminde oluşturulan kademeli ağ yapısının önden ve yandan görünüşü.....	70
Şekil 3.9.	Model 1 için ağ eleman sayısı ile sürüklenme katsayısı (C_D) değişim grafiği.....	72
Şekil 3.10.	Model 2 için ağ eleman sayısı ile sürüklenme katsayısı (C_D) değişim grafiği.....	73
Şekil 3.11.	Model 3 için ağ eleman sayısı ile sürüklenme katsayısı (C_D) değişim grafiği.....	74
Şekil 3.12.	Model 4 için ağ eleman sayısı ile sürüklenme katsayısı (C_D) değişim grafiği.....	75
Şekil 4.1.	20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	79
Şekil 4.2.	30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	80
Şekil 4.3.	40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	82
Şekil 4.4.	20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	84
Şekil 4.5.	30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	85
Şekil 4.6.	40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	87
Şekil 4.7.	20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	89
Şekil 4.8.	30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	90
Şekil 4.9.	40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	92
Şekil 4.10.	20 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	94
Şekil 4.11.	30 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	96
Şekil 4.12.	40 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	97
Şekil 4.13.	20 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	99

Şekil 4.14.	30 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	100
Şekil 4.15.	40 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	101
Şekil 4.16.	Ayna orta bölgesinden alınan eğride Y-ekseni boyunca oluşan basınç katsayıları: (a) 20 m/s, (b) 30 m/s, (c) 40 m/s.....	102
Şekil 4.17.	20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	103
Şekil 4.18.	30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	105
Şekil 4.19.	40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	106
Şekil 4.20.	20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	109
Şekil 4.21.	30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	110
Şekil 4.22.	40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	112
Şekil 4.23.	20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	114
Şekil 4.24.	30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	115
Şekil 4.25.	40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	117
Şekil 4.26.	20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	119
Şekil 4.27.	30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	120
Şekil 4.28.	40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	122
Şekil 4.29.	20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	124

Şekil 4.30.	30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	125
Şekil 4.31.	40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	127
Şekil 4.32.	20 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	129
Şekil 4.33.	30 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	130
Şekil 4.34.	40 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	132
Şekil 4.35.	20 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	134
Şekil 4.36.	30 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	135
Şekil 4.37.	40 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	135
Şekil 4.38.	Ayna orta bölgesinden alınan eğride Y-ekseni boyunca oluşan basınç katsayıları: (a) 20 m/s, (b) 30 m/s, (c) 40 m/s.....	137
Şekil 4.39.	20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	138
Şekil 4.40.	30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	140
Şekil 4.41.	40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	141
Şekil 4.42.	20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	143
Şekil 4.43.	30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	145
Şekil 4.44.	40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	146
Şekil 4.45.	20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	148
Şekil 4.46.	30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	150

Şekil 4.47.	40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	151
Şekil 4.48.	20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	153
Şekil 4.49.	30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	154
Şekil 4.50.	40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	156
Şekil 4.51.	20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	158
Şekil 4.52.	30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	159
Şekil 4.53.	40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	161
Şekil 4.54.	20 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	163
Şekil 4.55.	30 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	165
Şekil 4.56.	40 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	166
Şekil 4.57.	20 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	168
Şekil 4.58.	30 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	169
Şekil 4.59.	40 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	170
Şekil 4.60.	Ayna orta bölgesinden alınan eğride Y-ekseni boyunca oluşan basınç katsayıları: (a) 20 m/s, (b) 30 m/s, (c) 40 m/s.....	171
Şekil 4.61.	20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	173
Şekil 4.62.	30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	174
Şekil 4.63.	40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	176

Şekil 4.64.	20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	178
Şekil 4.65.	30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	179
Şekil 4.66.	40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	181
Şekil 4.67.	20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	183
Şekil 4.68.	20 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı	185
Şekil 4.69.	30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	186
Şekil 4.70.	30 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	188
Şekil 4.71.	40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	189
Şekil 4.72.	40 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	191
Şekil 4.73.	20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	193
Şekil 4.74.	20 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	194
Şekil 4.75.	30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	196
Şekil 4.76.	30 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	197
Şekil 4.77.	40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	199
Şekil 4.78.	40 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	200
Şekil 4.79.	20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	202

Şekil 4.80.	20 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	204
Şekil 4.81.	30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	205
Şekil 4.82.	30 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	207
Şekil 4.83.	40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	208
Şekil 4.84.	40 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	210
Şekil 4.85.	20 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	212
Şekil 4.86.	30 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	213
Şekil 4.87.	40 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	215
Şekil 4.88.	20 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	217
Şekil 4.89.	30 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	218
Şekil 4.90.	40 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	219
Şekil 4.91.	Ayna orta bölgesinden alınan eğride Y-ekseni boyunca oluşan basınç katsayıları: (a) 20 m/s, (b) 30 m/s, (c) 40 m/s.....	220
Şekil 4.92.	30 m/s hızda, ayna yan bölgesinde bulunan bir düzlem civarında oluşan akım çizgileri: (a) -10° sapma açısı, (b) $+10^\circ$ sapma açısı.....	222
Şekil 4.93.	20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	223
Şekil 4.94.	20 m/s hızda ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	225
Şekil 4.95.	30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	226
Şekil 4.96.	30 m/s hızda ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	228

Şekil 4.97.	40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	229
Şekil 4.98.	40 m/s hızda ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	231
Şekil 4.99.	20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	233
Şekil 4.100.	20 m/s hızda ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	234
Şekil 4.101.	30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	236
Şekil 4.102.	30 m/s hızda ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	237
Şekil 4.103.	40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	239
Şekil 4.104.	40 m/s hızda ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı.....	240
Şekil 4.105.	Her bir ayna modeli için, girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayabilen regresyon modellerine ait yüzey grafikleri: (a) Model 1, (b) Model 2, (c) Model 3, (d) Model 4....	243
Şekil 4.106.	Model 4'te, $V=30$ m/s ve $\beta=0^\circ$ 'de: (a) Aynanın yan kısmında oluşan boylamasına vorteksler, (b) Bu vortekslerin, ayna etrafındaki C_p dağılımına etkisi.....	245
Şekil 4.107.	Negatif, nötr ve pozitif β açılarında, vorteks oluşma durumu ($V=30$ m/s): (a) Model 1, (b) Model 2, (c) Model 3, (d) Model 4	246
Şekil 4.108.	Model 1 için cisim-ardı bölgesini gösteren akım çizgileri.....	248
Şekil 4.109.	Model 2 için cisim-ardı bölgesini gösteren akım çizgileri.....	248
Şekil 4.110.	Model 3 için cisim-ardı bölgesini gösteren akım çizgileri.....	249
Şekil 4.111.	Model 4 için cisim-ardı bölgesini gösteren akım çizgileri.....	249
Şekil 4.112.	Model 1 için ortalama C_D değerlerine ait ana etki grafiği.....	251
Şekil 4.113.	Model 1 için ortalama S/G değerlerine ait ana etki grafiği.....	251
Şekil 4.114.	Kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi, (b) En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T9 geometrisi...	253
Şekil 4.115.	Kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi, (b) En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T9 geometrisi.....	254

Şekil 4.116.	Kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi, (b) En düşük sürüklenme katsayısına sahip T9 geometrisi.....	255
Şekil 4.117.	Kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi, (b) En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T9 geometrisi.....	256
Şekil 4.118.	Kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi, (b) En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T9 geometrisi.....	257
Şekil 4.119.	Cisim-ardı bölgesi (toplam basınç=0) ve bu bölgedeki türbülans yoğunluğu dağılımı: (a) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi, (b) En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T9 geometrisi.....	258
Şekil 4.120.	Model 2 için ortalama C_D değerlerine ait ana etki grafiği.....	260
Şekil 4.121.	Model 2 için ortalama S/G değerlerine ait ana etki grafiği.....	260
Şekil 4.122.	Aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) Referans geometri, (b) T3 geometrisi (maks C_D), (c) T8 geometrisi (min C_D).....	261
Şekil 4.123.	Aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) Referans geometri, (b) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T3 geometrisi, (c) En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T8 geometrisi.....	263
Şekil 4.124.	Aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) Referans geometri, (b) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T3 geometrisi, (c) En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T8 geometrisi.....	264
Şekil 4.125.	Aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) Referans geometri, (b) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T3 geometrisi, (c) En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T8 geometrisi.....	266
Şekil 4.126.	Aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) Referans geometri, (b) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T3 geometrisi, (c) En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T8 geometrisi.....	267
Şekil 4.127.	Geometrik modeller için cisim-ardı bölgesi (toplam basınç=0) ve bu bölgedeki türbülans yoğunluğu dağılımı: (a) Referans geometri, (b) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T3 geometrisi, (c) En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T8 geometrisi.....	269
Şekil 4.128.	Model 1 için, sabit yükseklik değerinde, farklı uzunluktaki geometrilerde akım çizgilerinde meydana gelen değişimler: (a) Minimum uzunluk (T7), (b) Ortalama uzunluk (T5), (c) Maksimum uzunluk (T3).....	271

Şekil 4.129.	Model 2 için, sabit boyut oranı değerinde, farklı uzunluktaki geometrilerde akım çizgilerinde meydana gelen değişimler: (a) Minimum uzunluk (T8), (b) Maksimum uzunluk (T7).....	273
Şekil 4.130.	Model 1 için, sabit yükseklik değerinde, farklı boyut oranındaki geometrilerde akım çizgilerinde meydana gelen değişimler: (a) Minimum boyut oranı (T6), (b) Ortalama boyut oranı (T1), (c) Maksimum boyut oranı (T8).....	274
Şekil 4.131.	Model 2 için, sabit uzunluk değerinde, farklı boyut oranındaki geometrilerde akım çizgilerinde meydana gelen değişimler: (a) Minimum boyut oranı (T2), (b) Ortalama boyut oranı (T4), (c) Maksimum boyut oranı (T9).....	276
Şekil 4.132.	Model 1 için, 2,25 boyut oranında, farklı yükseklikteki geometrilerde 3B akım çizgilerindeki değişimler: (a) Minimum yükseklik (T9), (b) Ortalama yükseklik (T8).....	278
Şekil 4.133.	Model 1 için, 1 boyut oranında, farklı yükseklikteki geometrilerde 3B akım çizgilerindeki değişimler: (a) Minimum yükseklik (T4), (b) Maksimum yükseklik (T5).....	279
Şekil 4.134.	Model 2 için, 1 boyut oranında, farklı yükseklikteki geometrilerde 3B akım çizgilerindeki değişimler: (a) Minimum yükseklik (T7), (b) Maksimum yükseklik (T9).....	280

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Mach sayısına göre akışın sınıflandırılması.....	3
Çizelge 2.2. Farklı cisim şekilleri ve sürüklenme katsayıları.....	15
Çizelge 2.3. Boyut oranının artması ve C_D 'ye etkisi.....	16
Çizelge 2.4. Tipik bir sedan model araç için sürüklenme bileşenlerinin hesaplanmış dağılımı.....	26
Çizelge 2.5. Çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması.....	32
Çizelge 2.6. Realizable k- ϵ modelindeki türbülans viskozitesi terimleri.....	36
Çizelge 2.7. Yan aynanın aerodinamiği ile ilgili bilimsel çalışmalar.....	51
Çizelge 3.1. Analiz şartları ve yakınsama kriterleri.....	62
Çizelge 3.2. Deneysel sonuçlar ile çalışmada bunlara karşılık gelen nümerik sonuçlar ve sağlama ölçüsü (S).....	64
Çizelge 3.3. 3 ağ bölgesini oluşturmak için kullanılan mesafeler (mm).....	69
Çizelge 3.4. Model 1 için ağdan bağımsızlık çalışması.....	71
Çizelge 3.5. Model 2 için ağdan bağımsızlık çalışması.....	72
Çizelge 3.6. Model 3 için ağdan bağımsızlık çalışması.....	73
Çizelge 3.7. Model 4 için ağdan bağımsızlık çalışması.....	74
Çizelge 3.8. Sapma açısı (β) ve akış hızı (V) etkisi için kullanılan deney planı.....	75
Çizelge 3.9. Bağlama kolu geometrisi incelemesinde kullanılan Taguchi L9 deney planı.....	76
Çizelge 3.10. Model 1 için kullanılan parametre seviyeleri.....	77
Çizelge 3.11. Model 2 için kullanılan parametre seviyeleri.....	77
Çizelge 4.1. Tüm hız (V) ve sapma açıları (β) oluşan maksimum hız değerleri.....	78
Çizelge 4.2. Tüm hız (V) ve sapma açıları (β) ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri.....	88
Çizelge 4.3. Tüm hız (V) ve sapma açıları (β) ayna üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri.....	94
Çizelge 4.4. Tüm hız (V) ve sapma açıları (β) ayna yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç katsayısı değerleri.....	99
Çizelge 4.5. Tüm sapma açıları ve hızlardaki maksimum ve minimum kinetik enerji değerleri.....	108
Çizelge 4.6. Tüm sapma açıları ve hızlarda ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum hız değerleri.....	114
Çizelge 4.7. Tüm hız (V) ve sapma açıları (β) ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri.....	123
Çizelge 4.8. Tüm hız (V) ve sapma açıları (β) ayna üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri.....	128
Çizelge 4.9. Tüm hız (V) ve sapma açıları (β) ayna yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç katsayısı değerleri.....	133
Çizelge 4.10. Tüm hız (V) ve sapma açıları (β) aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan maksimum ve minimum türbülans kinetik enerjisi değerleri.....	143

Çizelge 4.11.	Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum hız değerleri.....	148
Çizelge 4.12.	Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri.....	157
Çizelge 4.13.	Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri.....	163
Çizelge 4.14.	Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç katsayısı değerleri.....	168
Çizelge 4.15.	Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan maksimum ve minimum türbülans kinetik enerjisi değerleri.....	178
Çizelge 4.16.	Tüm sapma açıları ve hızlarda ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum hız değerleri.....	183
Çizelge 4.17.	Tüm sapma açıları ve hızlarda aynanın kol kısmını içeren bölgeden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum hız değerleri.....	183
Çizelge 4.18.	Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri.....	202
Çizelge 4.19.	Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri.....	212
Çizelge 4.20.	Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç katsayısı değerleri.....	216
Çizelge 4.21.	Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan maksimum ve minimum türbülans kinetik enerjisi değerleri.....	233
Çizelge 4.22.	Her bir ayna modeli için, girdi değişkenlerinin farklı kombinasyonlarına ait sürüklenme katsayıları (C_D).....	242
Çizelge 4.23.	Her bir ayna modeli için, girdi değişkenlerinin farklı kombinasyonlarına ait kaldırma katsayıları (C_L).....	242
Çizelge 4.24.	Her bir ayna modeli için kurulan regresyon modellerine ait R^2 değerleri.....	244
Çizelge 4.25.	Her bir ayna modeli için, anlamlı olan terimler ve % katkı değerleri.....	244
Çizelge 4.26.	Model 1 için deney planı ve sonuçlar.....	250
Çizelge 4.27.	Model 1’de C_D için ANOVA sonuçları.....	252
Çizelge 4.28.	Model 2 için deney planı ve sonuçlar.....	259
Çizelge 4.29.	Model 2’de C_D için ANOVA sonuçları.....	261

1. GİRİŞ

Fosil yakıtlı taşıtlar, günümüzün hâlâ en yaygın kullanılan ulaşım araçlarıdır. Dünyadaki mevcut fosil yakıtların önümüzdeki birkaç yüzyıl içerisinde tükeneceği öngörülmektedir. Diğer yandan, gündemdeki yerini her geçen gün artıran elektrikli araçlarda, araç menzili, üzerinde çalışılan önemli bir kriterdir. Bu gelişmeler beraber değerlendirildiğinde; artan yakıt fiyatları, sıkılaştıran çevresel düzenlemeler, araç menziliyle ilgili beklentiler; araç tasarımında sürekli olarak iyileştirmelerin yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Bu kapsamda, motor verimliliğinin artırılması gibi iyileştirmeler, gerçekleştirilmesi ve uygulamaya konulması uzun ve zorlu süreçlerdir. Alternatif bir iyileştirme seçeneği, araç aerodinamiğini incelemek ve sürüklenme katsayısını düşürecek çalışmalar yapmaktır.

Otomotiv sektörü, müşterinin beklentisi olan; görsellik, konfor, dayanım ve maliyet gibi pek çok konuyu bir arada değerlendirerek, optimumu ortaya koymak zorunda kalır. Optimum durumun ortaya çıkarılmasında, araç aerodinamiği oldukça ön plana çıkmaktadır. Araç aerodinamiğinde, sürüklenme kaynakları arasında yer alan yan aynaları, toplam sürüklenme katsayısının %2 ila %6'sını oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, araç üzerinde sürücünün geri görüşünü sağlayan fakat aerodinamik olarak araç sürüklenmesini arttıran yan aynaların üzerindeki aerodinamik etkiler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerinden yararlanılarak incelenmiştir. Nümerik analizler; üç-boyutlu bir akış alanı içerisinde sürekli akış durumlu ve realizable k- ϵ türbülans modeli kullanılarak yürütülmüştür. Yapılan çalışma için 4 farklı binek araç ayna modeli seçilmiştir.

İlk olarak, seçilen modellerin $V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarındaki ve $\beta = -10^\circ, 0^\circ$ ve $+10^\circ$ 'lik sapma açılarındaki akış durumu ve aerodinamik karakteristikler incelenmiştir. Bu ilk çalışmada, tam faktöriyel bir deney planı uygulanmış ve tüm kombinasyonlar değerlendirilmiştir. 4 ayna için toplam 36 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Girdi değişkenlerinin, çıktı değişkeni C_D üzerinde oluşturduğu değişkenlik, varyans analizi (ANOVA) yardımıyla da değerlendirilmiştir.

İkinci olarak, bu ayna modelleri içerisinde bağlama kolu geometrisi ve bağlama yeri farklı olan iki model seçilmiş ve kesirli faktöriyel Taguchi ortogonal dizileri kullanılarak bağlama kolu geometrisinin değiştirildiği parametrik bir çalışma yapılmıştır. Bağlama kolu geometrisine ait üç farklı değişken (boyut oranı, yükseklik ve uzunluk) üçer seviyede ele alınmıştır. Bu analizlerde, $V=30$ m/s ve $\beta=0^\circ$ olarak sabit tutulmuştur. 2 ayna için toplam 18 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Girdi değişkenlerinin, çıktı değişkeni C_D üzerindeki etkileri, ANOVA yardımıyla da değerlendirilmiştir.

Tüm nümerik sonuçlar; hız vektörleri, akım çizgileri, basınç kontörleri, basınç katsayısı dağılımları ve türbülans kinetik enerjisi dağılımları açısından değerlendirilmiştir. Gerekli yerlerde, cisim-ardında türbülans yoğunlukları incelenmiştir. Böylece, sürüklenme katsayılarında oluşan değişimler aerodinamik karakteristiklerle ilişkilendirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kuramsal Temeller

Akışkan, üzerine kayma kuvvetleri uygulandığı sürece, sürekli olarak şekil değiştiren maddedir (Çengel ve Cimbala 2015). Bir başka deyişle, akabilen ve kondukları kabın şeklini alabilen maddelere akışkan denir. *Akışkanlar mekaniği* ise, durgun ve hareket halindeki akışkanlar ile bunların yakın çevresine (katı-sıvı) olan etkilerini inceleyen mekanik dalıdır (Umur 2001).

Akışkanlar mekaniğinin bir alt dalı olan *aerodinamik*, gazların (özellikle havanın) uçaklar, roketler ve otomobiller gibi cisimler etrafındaki yüksek/düşük hızlı akışı ve oluşan kuvvetler/momentler ile ilgilenir.

Aerodinamik alanında yapılacak bir çalışmada farklı tipte akışlar yer alabilir. Genel olarak akışlar, aşağıdaki özelliklerine göre sınıflandırılabilir (Çengel ve Cimbala 2015):

- Viskoz ve viskoz olmayan
- İç ve dış
- Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılmaz
- Laminer ve türbülanslı
- Doğal ve zorlanmış
- Sürekli ve süreksiz
- Bir/iki/üç-boyutlu

Doğada gerçekte var olmasa da sürtünmenin, kütle difüzyonunun ve ısı iletimin ihmal edilebildiği, yani Reynolds sayısının (Re) çok yüksek olduğu durumlarda akış, “viskoz olmayan” şeklinde tanımlanabilir. Böyle bir kabul, hesaplamaları kolaylaştırır. Diğer tüm akışlar ise “viskoz” olarak nitelenir. Reynolds sayısı, atalet kuvvetlerinin, viskoz kuvvetlere oranıdır. Reynolds sayısında (Denklem 2.1); ρ akışkanın yoğunluğunu, V hızını, L karakteristik uzunluğunu, μ dinamik viskozitesini temsil etmektedir.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (2.1)$$

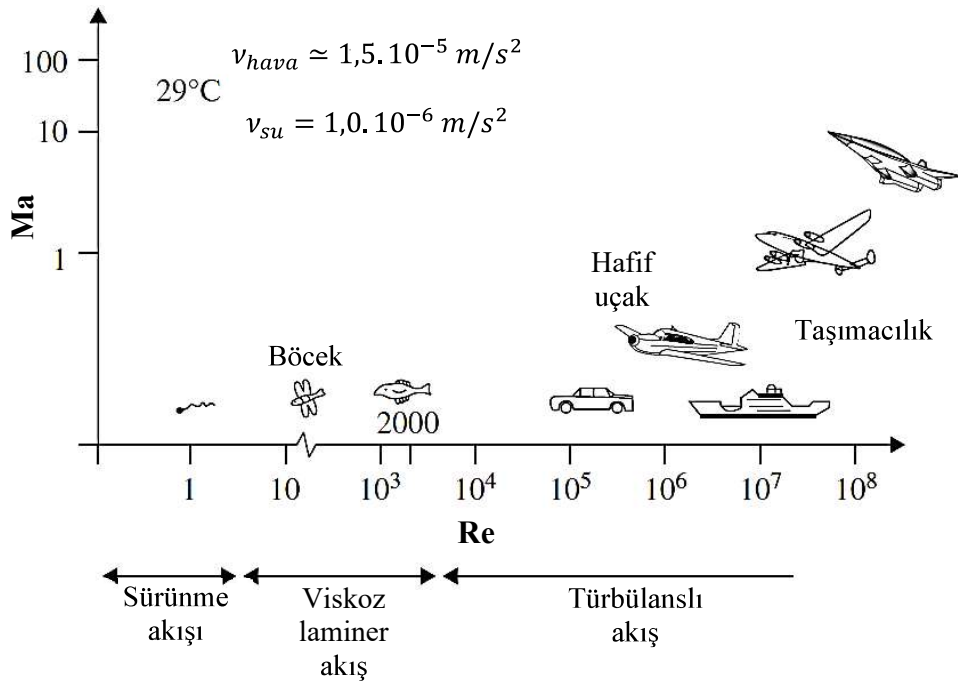
Doğada gerçekte var olmasa da akışkan yoğunluğundaki değişimin ihmal edilebildiği, Mach sayısının (Ma) yeterince düşük olduğu durumlarda akış, “sıkıştırılmaz” olarak tanımlanabilir. Mach sayısı akış hızının ses hızına oranıdır. Denklem 2.2 ve bu sayıya göre akış Çizelge 2.1’deki gibi sınıflandırılabilir (Rodriguez 2016).

$$Ma = \frac{V}{V_{ses}} \quad (2.2)$$

Çizelge 2.1. Mach sayısına göre akışın sınıflandırılması (Rodriguez 2016)

Mach Sayısı	Akış Tipi
Ma < 0,3	Sıkıştırılmaz
0,3 < Ma < 0,75	Subsonik
0,75 < Ma < 1,2	Transonik
Ma = 1	Sonik
1,2 < Ma < 5	Süpersonik
Ma > 5	Hipersonik

Hava ve su gibi tipik akışkanların viskoziteleri çok düşük olduğu için, gerçek mühendislik problemlerinin çoğu (otomobil ve uçak aerodinamiği, vb.) büyük Reynolds sayısına sahiptir. Bazı akış olayları için Re ve Ma sayıları Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Bazı tipik akış olayları için Re ve Ma değerleri (Katz 2016)

2.1.1. Daldırılmış cisimler üzerinden akış ve önemli karakteristikler

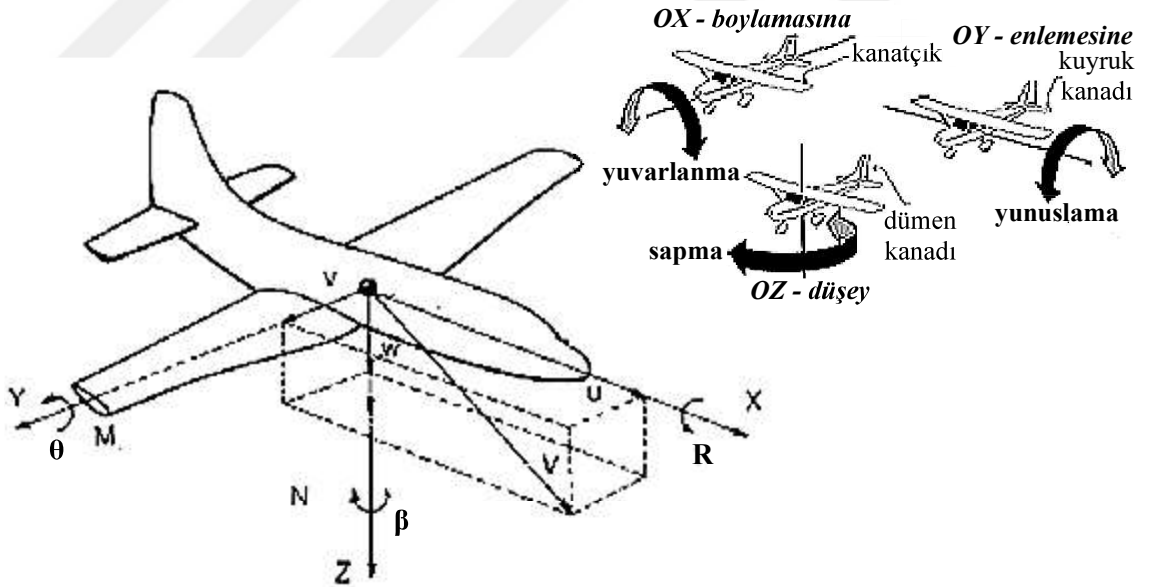
Bir akışkan içerisinde daldırılmış bulunan cisimler üzerindeki akış, birçok fiziksel olayın gerçekleşmesine yol açan etkiler oluşturur. Örnek olarak; otomobiller ve su altı boru hatları üzerine etki eden sürüklenme kuvveti, kuş ve uçak kanatlarının oluşturduğu kaldırma kuvveti, yağmur ve kar taneciklerini şiddetli rüzgarlarda yukarı sürükleyen kuvvet, rüzgâr türbinleri ile güç üretebilmeyi sağlayan kuvvet verilebilir.

Bu gibi akış olaylarında bazen akışkan durgun bir cisim üzerinden hareket ederken bazen de cisim durgun bir akışkan içerisinde hareket eder. Bu iki durum birbirine özdeştir; önemli olan akışkan ile cisim arasındaki bağıl harekettir (Çengel ve Cimbala 2015).

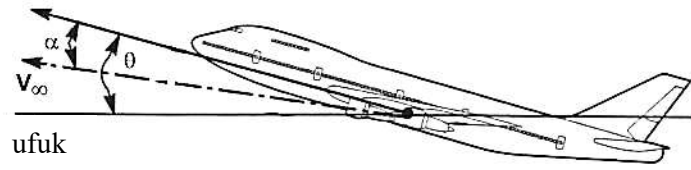
Örnekleri verilen fiziksel olayların gerçekleşmesine sebep olan, aerodinamik kuvvetler ve momentlerdir. Bunları tanımlamadan önce, aerodinamik eksenleri ve dönme yönlerini (Şekil 2.2) tanımlamak gerekmektedir.

Aerodinamik eksenlerin merkezi cismin ağırlık merkezidir. Bu eksenler; OX boylamasına eksen (akış eksen), OY enlemesine eksen (yanal kuvvet eksen) ve OZ düşey eksen (kaldırma eksen) olarak adlandırılır. Cismin yapacağı dönme hareketleri bu eksenlere göre tanımlanır. Bu dönme hareketlerinde geleneksel olarak saat yönünde/sağa dönüşler pozitifdir. OX eksen etrafında *yuvatlanma*, OY eksen etrafında *yunuslama*, OZ eksen etrafında *sapma*, hareketi gerçekleşir. Sapma hareketi yönünde *sapma açısı* (β) bulunur. Bu açı orijinal (olması gereken) uçuş yolu ile OX eksen arasındadır. Yunuslama hareketi yönünde ise *yunuslama açısı* (θ) bulunur. Bu açı ise yer yatayı ile cismin OX eksen arasındadır.

Hücum açısı da (α) yunuslama açısı ile aynı yönde ölçülür. Ancak, bağlı akış (cismin hareket yolu doğrultusundaki akış) ile OX eksen (cismin/kanadın OX eksen) arasındadır (Hitchens 2015). Bu açı aynı zamanda F_L ve N kuvvetleri ya da F_D ve A kuvvetleri arasındaki açıdır (Anonim 2019a). Hücum açısı ile yunuslama açısı arasındaki fark Şekil 2.3'te görülebilir.



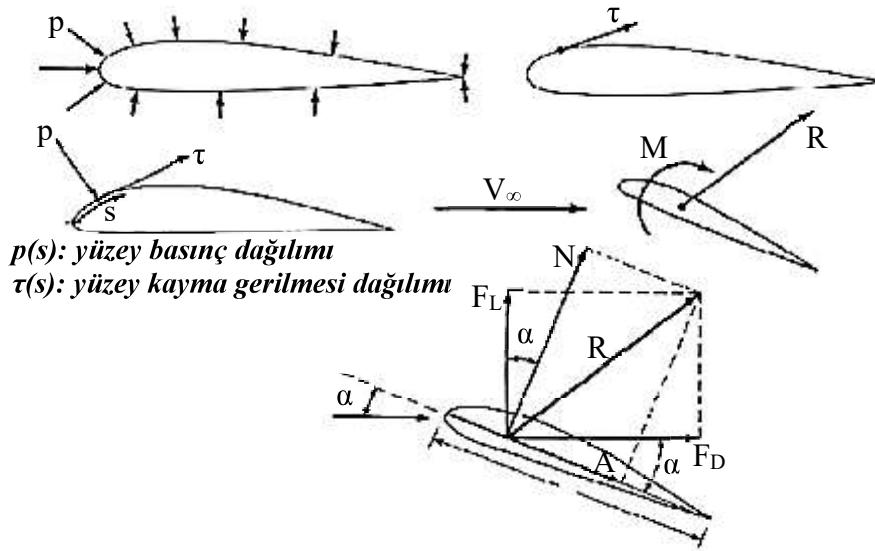
Şekil 2.2. Aerodinamik eksenler ve dönme yönleri (Akyazı 2012, Anonim 2019a)



Şekil 2.3. Hücüm açısı (α) ile yunuslama açısı (θ) arasındaki fark (<http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/angles/angle-pitch.jpg>)

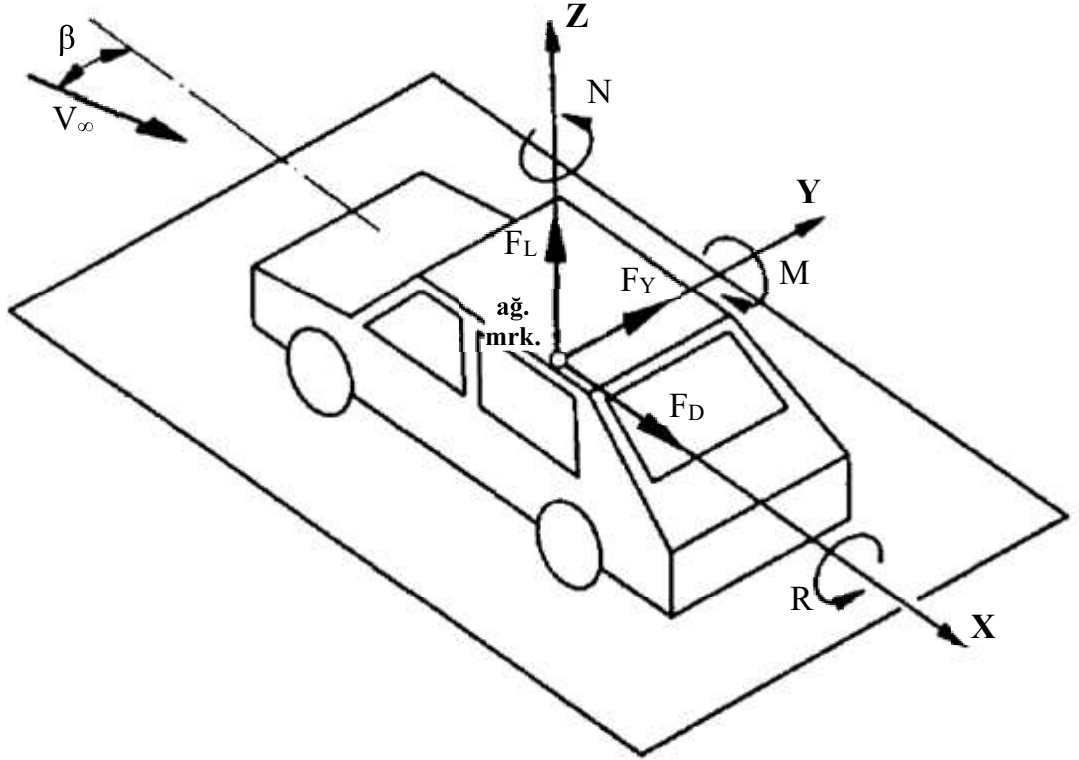
Aerodinamik kuvvetlerin ve momentlerin cisim yüzeyi üzerine gelen *basınç dağılımı* ve *kayma gerilmesi dağılımı* olmak üzere iki kaynağı vardır (Anderson 2017). Bu dağılımların tüm cisim yüzeyi üzerinde integralinin alınması ile bir bileşke kuvvet (R) ve moment (M) oluşur. *Yunuslama momenti* olarak adlandırılan M momenti cismin alt ve üst yüzeyleri arasındaki basınç farkından meydana gelir. Bileşke kuvvet R , 2 farklı şekilde (Şekil 2.4) bileşenlerine ayrılabilir (Anderson 2017).

- Cisim üzerine bağlı koordinat takımına göre *normal kuvvet* (N) ve *paralel kuvvet* (A)
- Akış yönüne bağlı koordinat takımına göre ise *kaldırma kuvveti* (F_L) ve *sürüklenme (direnç) kuvveti* (F_D)



Şekil 2.4. Cisimlere etki eden bileşke kuvvet ve bileşenleri (Anderson 2017)

Akışın doğrultusu cisim ile aynı hizada olduğunda (sapma açısı β , sıfır olduğunda) cisim üzerine etkiyen kuvvetleri ve momentleri tanımlamak için F_L , F_D ve M yeterli olur. Ancak akış doğrultusu ile cisim aynı hizada olmadığında ($\beta \neq 0$) (asimetrik akış alanı) ilave bir kuvvet ve buna bağlı momentler oluşur (Şekil 2.5). Söz konusu F_Y kuvveti OY eksenini yönündedir. Bu kuvvetin etkisinde OX eksenini etrafında yuvarlanma momenti (R) ve OZ eksenini etrafında sapma momenti (N) meydana gelir (Hucho 1987).



Şekil 2.5. Araç üzerine etki eden aerodinamik kuvvet ve momentler (Hucho 1987)

Aerodinamik çalışmalarda bazı nicelikler aerodinamik kuvvetlerden ve momentlerden bile daha temel nitelik taşır (Anderson 2017). Ayrıca cismin boyutu, şekli ve konumlanma açıları gibi pek çok parametreye bağlı olan aerodinamik kuvvetlerin ve momentlerin hesaplanması ve kullanılması pratik değildir. Bu sebeple hesaplanması daha kolay olan sürüklenme ve kaldırma karakteristiklerini temsil eden boyutsuz katsayılarla çalışılır (Çengel ve Cimbala 2015).

Aerodinamik katsayıları sıralamadan önce dinamik basıncı (P_d) tanımlamak yerinde olacaktır (Denklemler 2.3). Burada ρ akışkanın yoğunluğu, V ise akışkanın hızıdır.

$$P_d = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.3)$$

Dinamik basınç, cismin ön bakış alanı (A) ve referans uzunluk (l) kullanılarak kuvvet ve moment katsayıları (Denklem 2.4 – 2.6) hesaplanabilir (Anderson 2017).

$$\text{Kaldırma katsayısı:} \quad C_L = \frac{F_L}{P_d A} \quad (2.4)$$

$$\text{Sürüklenme katsayısı:} \quad C_D = \frac{F_D}{P_d A} \quad (2.5)$$

$$\text{Yunuslama momenti katsayısı:} \quad C_M = \frac{M}{P_d A l} \quad (2.6)$$

Kaldırma katsayısı (C_L) hücum açısının, Mach ve Reynolds sayılarının ve geometrik tasarımın bir fonksiyonudur. Hava araçları için düşünüldüğünde kanadın kaldırma kuvveti üretmede ne kadar verimli olduğunun bir ölçüsüdür. Daha yüksek C_L değerleri daha yüksek kaldırma anlamına gelir. Kaldırma katsayısı hücum açısı ile orantılı olarak artar. Hücum açısındaki her 1° 'lik artışla kaldırma katsayısı doğrusal olarak yaklaşık %0,1 artar. Ancak bir maksimum değer ardından kaldırma katsayısı düşmeye başlar ve aerodinamik stol / tutunma kaybı (stall) gerçekleşir (Hitchens 2015).

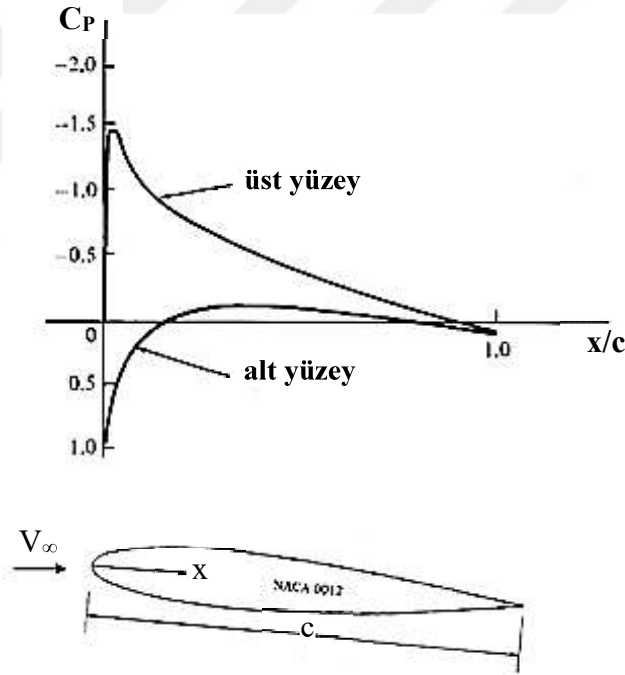
Sürüklenme katsayısı (C_D) toplam sürüklenme basıncının dinamik basınca oranı olarak tanımlanır ve hücum açısının, Mach ve Reynolds sayılarının ve geometrik tasarımın bir fonksiyonudur. Daha düşük C_D değerleri daha düşük sürüklenme anlamına gelir ve aerodinamik tasarımlarda büyük bir gerekliliktir. Referans sürüklenme katsayısı hücum açısı 0° olduğunda meydana gelir (Hitchens 2015).

Tıpkı bu katsayılarda olduğu gibi basınç da dinamik basınç kullanılarak boyutsuz hale getirilebilir ve **basınç katsayısı (C_p)** adını alır (Denklem 2.7). Denklemden de anlaşılacağı gibi, bu katsayı statik basınç farkının (belirli bir noktadaki statik basınç P ile referans basınç P_∞ arasındaki farkın) dinamik basınca oranıdır (Anderson 2017).

$$\text{Basınç katsayısı:} \quad C_p = \frac{P - P_\infty}{P_d} \quad (2.7)$$

Basınç katsayısı akış bölgeleri hakkında değerlendirme yapılmasını da sağlar. Düşük bir hücum açısına sahip bir uçak kanadı profili üzerinde gerçekleşen akışla ilgili, göreceli konum-basınç katsayısı grafiği (Şekil 2.6) incelenerek örnek bir değerlendirme yapılabilir.

- $C_p=1$ noktası hızın sıfır olduğu noktadır; yani *durma noktası*dır. C_p 'nin tanım olarak pozitif yönde 1'den büyük olması imkansızdır.
- $C_p=0$ noktası, statik basıncın serbest akım statik basınca eşit olduğu noktadır; genel olarak *statik giriş* olarak adlandırılır.
- $C_p<0$ olması yüzey basıncının serbest akım statik basıncından küçük olduğunu gösterir. Bu tip yüzeylere *emme yüzeyi* denir.
- $0<C_p<1$ olması yüzey basıncının serbest akım basıncından büyük olduğunu gösterir. Bu tip yüzeylere *basınç yüzeyi* denir (Anonim 2019b).



Şekil 2.6. Örnek bir cisimde konum – basınç katsayısı grafiği (Anonim 2019b)

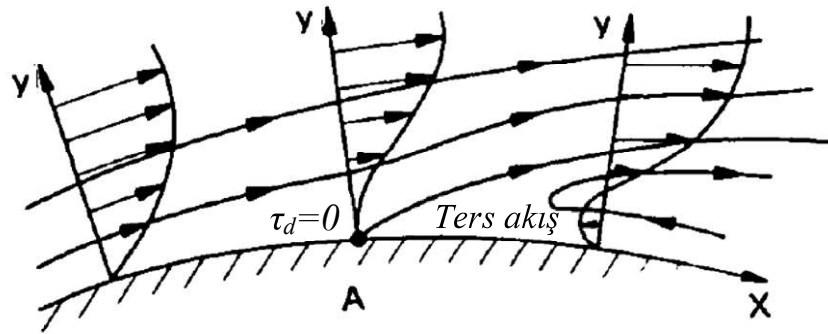
Çoğu pratik uygulamada, Şekil 2.6'da da olduğu gibi, akış yüzeyi düz değildir ve bir **basınç gradyanı** (dp/dx) (değişim eğilimi) meydana gelir. Tipik olarak çoğu akış bölgesi için basınç gradyanı yüzey şeklinin bir fonksiyonudur.

Sınır tabakanının dışında yüzey boyunca var olan basınç yüksek basınçtan düşüğe doğru değişiyorsa (düşen basınç ise) ($dp/dx < 0$ ise) buna elverişli basınç denir. Böyle bir basınç gradyanı sınır tabakayı enerjilendirir ve genellikle türbülanslı akışa geçişi geciktirir.

Tam aksi durumda ise (artan basınç durumunda ise) ters basınç gradyanı ($dp/dx > 0$) adı verilen durum söz konusudur. Bu durumda basınç, yüzey boyunca artar ve özellikle duvara yakın bölgelerde akışı yavaşlatır. İki boyutlu ele alınırsa bir noktada artık kayma gerilmesi sıfır değerine ulaşır ($\tau_{duvar}=0$) (Katz 2016).

Bu nokta genellikle akışın yüzeyden ayrıldığı sınırdır. Bu sınırdan sonra ters basınç, akışı geriye doğru zorlar ve akışın geri sirkülasyonu gerçekleşir (Katz 2016). İleri ve geri akış arasında akışı bölen bir akım çizgisi bulunur (Şekil 2.7). Bu sürece **akış ayrılması** adı verilir. Türbülanslı sınır tabakalar çok daha şiddetli basınç gradyanlarına ayrılma olmadan dayanabilirler. Bunun sebebi türbülans karışma sürecinin yukarıda bulunan akış bölgesinden duvara doğru yoğun bir momentum taşıma işlevi görmesidir.

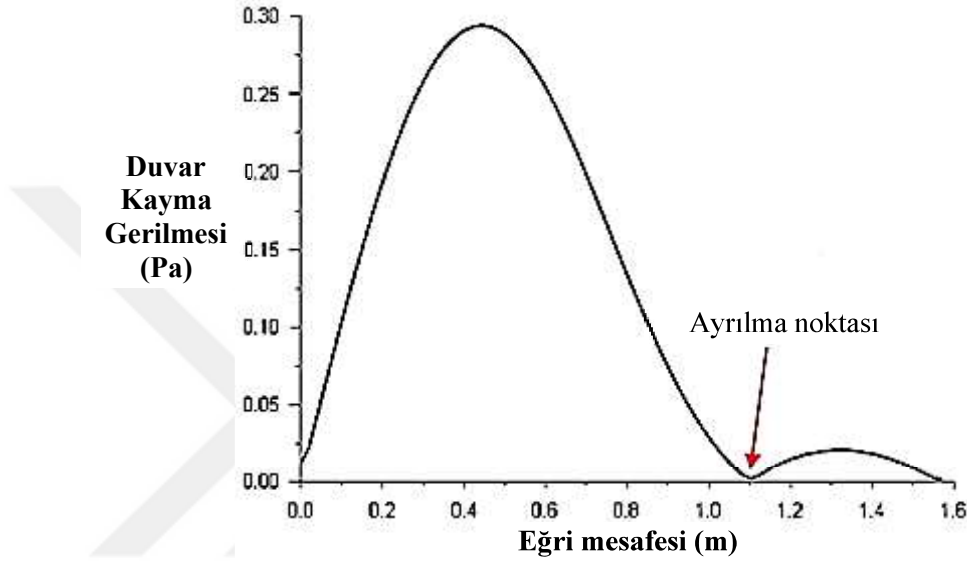
Yeniden bağlanma gerçekleşirse ayrılma noktası ile yeniden bağlanma noktası arasında düşük hızda geri sirkülasyonun yaşandığı “ayrılma baloncuğu” hacimleri oluşacaktır (Hucho 1987).



Şekil 2.7. Akış ayrılması (Hucho 1987)

Akış yönünde basıncın düşme halinde olduğu bölgelerde akış ayrılması beklenmez (Hucho 1987). Basıncın en düşük olduğu bölgeden sonra yüzey basıncı (ters basınç gradyanı ile) tekrar artmaya başlar. Ayrılma bu bölgede bir yerde meydana gelir. Duvar kayma gerilmesinin sıfır olduğu nokta (işaret değiştireceği nokta) ayrılma noktası olarak

alınabilir. Şekil 2.8’de bir duvar boyunca örnek bir akışın nümerik analizine ait akış mesafesine bağlı olarak duvar kayma gerilmesi değişimi görülmektedir. Grafikte kayma gerilmesi mutlak değer olarak verildiği için negatife düşmemiştir. Ancak grafikte sıfır değerine ulaştığı ve sonrasında işaret değiştirdiği nokta tespit edilebilir. Bu nokta ayrılma noktasıdır (Sert 2019). Duvar üzerindeki bu noktanın en doğru şekilde tespit edilebilmesi için Bölüm 2.1.5’te bahsedilecek türbülans modellerinden duvara yakın bölgeleri yüksek doğrulukta çözebilen biri tercih edilmelidir.

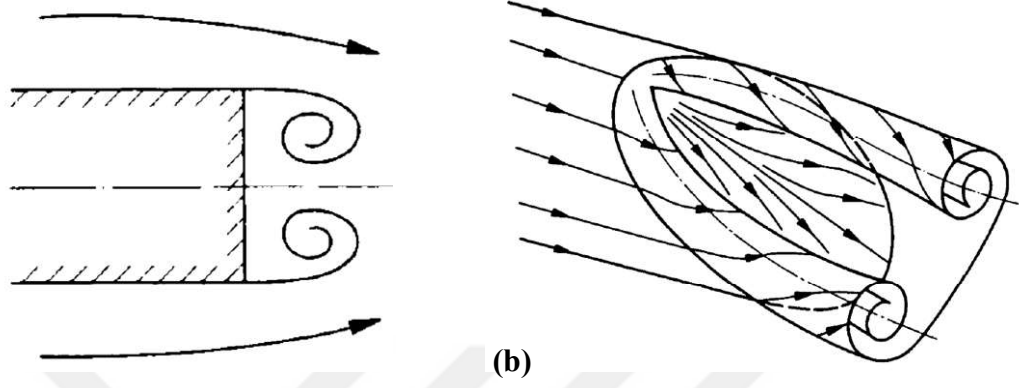


Şekil 2.8. Örnek bir akışta, akış mesafesine bağlı olarak duvar kayma gerilmesinin değişimi (Sert 2019)

Kaba cisimler çok farklı sürüklenme karakteristikleri gösterir. Bu tip cisimlerin arka kısmında şiddetli basınç gradyanları oluşur ve ayrılmalara sebep olur. Ayrılma sonrası oluşan vorteksler emme bölgeleri ve sürüklenme artışı meydana getirir. Bu şekilde oluşan sürüklenmeye “basınç sürüklenmesi” adı verilir. Ayrıca duvar kayma gerilmelerinden kaynaklanan “sürtünme sürüklenmesi” var olsa da kaba cisimler için basınç sürüklenmesi baskındır. Basınç sürüklenmesine sebep olan akış ayrılmaları, iki tipte ele alınabilir.

İlk tip akış ayrılması (Şekil 2.9a) ayrılma hattının akış yönüne dik olduğu durumdur. Bu durumda eksenleri yine akışa dik olan vorteksler oluşur. Akış ayrılmasının unsurları iki boyutta tarif edilebildiği için bu tip ayrılma sanki-iki-boyutlu (quasi-two-dimensional) olarak nitelendirilebilir. Vorteks alanındaki kinetik enerji türbülans karışmasıyla kısa sürede yitilir. Böylece kinetik enerji tersinmez şekilde sürtünme ısısına dönüşür. Bu durum cismin ardında toplam basınç kaybı değerinde önemli bir artışa sebep olur. Kinetik

enerjide gerçekleşen kayıp, basınç sürüklenmesini yenmek için harcanacak işe eşittir. Emme basıncı ve çok düşük akış hızları içeren bir cisim-ardı bölgesi oluşur. Buradaki basınç sürüklenmesine “şekil sürüklenmesi” (form drag) denir.



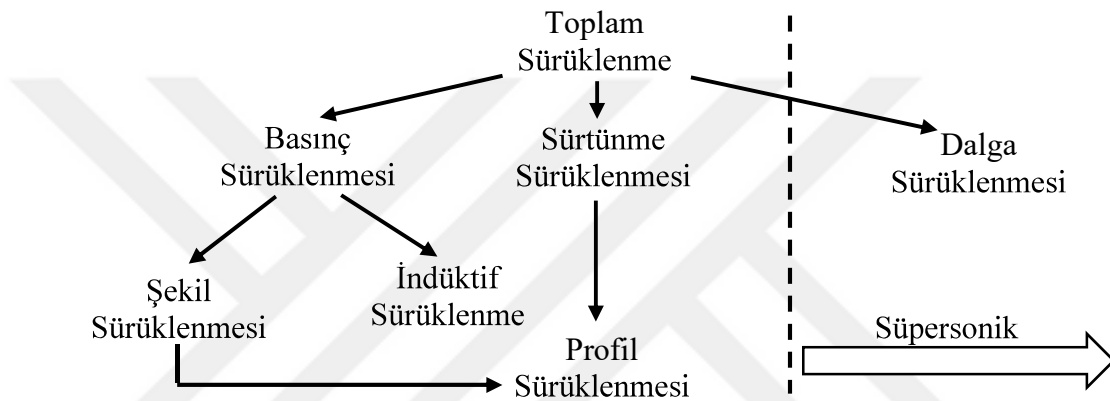
Şekil 2.9. Akış ayrılması tipleri: **(a)** Ayrılma hattı akışa dik, **(b)** Ayrılma hattı akışa göre eğimli (Hucho 1987)

İkinci tip ayrılma (Şekil 2.9b) eğik bir akış yüzeyi ve akışa göre belirli bir eğime sahip (akışa dik olmayan) bir ayrılma hattı ile karakterize edilir. Örnek olarak delta (üçgen) kanatlı uçaklarda meydana gelen bu tip ayrılmada üç-boyutlu bir akış ayrılması gerçekleşir. Ayrıca keskin kenar kısımların her birinde vorteks silsilesi (vortex train) adı verilen şiddetli bir vorteks çifti (vortex pair) meydana gelir ve cisim-ardı bölgesi ile etkileşime girer. Bu vorteksler kendi eksenleri arasında kalan hacimde akışın aşağıya doğru sapmasında (downwash) bir artışa sebep olur. Neticede meydana gelen aşağıya-sapma ayrılma hattını belirleyecektir. Cisim-ardı bölgesinde akış ayrılmasından dolayı bir emme etkisi ve bunun sonucunda sürüklenme, bu tip ayrılmada da meydana gelir. İlk tip ayrılmaya göre ayrılma geciktiği için cisim-ardı bölge küçülmekte ve dolayısıyla basınç kaybı ve sürüklenme azalmaktadır. Ancak vorteks çifti ciddi bir kinetik enerji barındırır ve sürüklenmenin artmasına sebep olur. Bu vorteks çiftinin oluşturduğu basınç sürüklenmesine “indüktif sürüklenme” veya “kaldırma kaynaklı sürüklenme” (induced drag / drag due to lift) adı verilir (Hucho 1987).

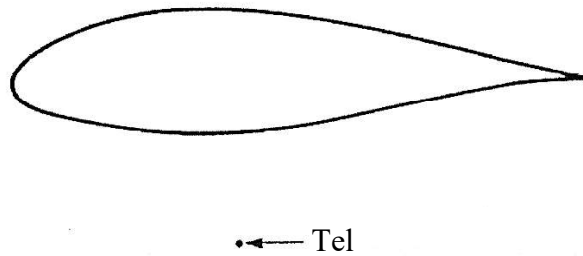
Sürüklenmenin azaltılması için cisim-ardı bölgesinin boyutu ve oluşan vortekslerin gücü düşürülmeye çalışılmalıdır (Kee ve ark. 2001). Cisim-ardı bölgesinde “toplam basıncın sıfır olduğu” kısımlarda; akış ayrılmaları ve cisim-ardı oluşumlar mevcuttur (Freeman ve Gaylard 2010), dolayısıyla enerji kaybı yüksektir (Cederlund ve Vikström 2010).

Daldırılmış cisme etki eden sürüklenme, Şekil 2.10'daki gibi sınıflandırılabilir. Akımçizgili, aerodinamik olarak temiz bir cisimde; indüktif sürüklenme yoksa ve subsonik bölgede çalışılıyorsa (şok dalgaları yoksa), sürüklenmenin büyük kısmı yüzey sürtünmesinden kaynaklanacaktır.

Basınç sürüklenmesine ayrılma bölgeleri sebep olur. Akımçizgili bir geometri ile ayrılmanın önüne geçilmesi gerekliliği Şekil 2.11'de verilen iki şeklin karşılaştırılması ile daha net anlaşılmaktadır. Şekilde görülen modern bir uçak kanadı ve bir tel aynı sürüklenmeye sahiptir (Anonim 2020a).



Şekil 2.10. Sürüklenmenin sınıflandırılması (Anonim 2020a)



Şekil 2.11. Aynı sürüklenmeye sahip iki cisim (Anonim 2020a)

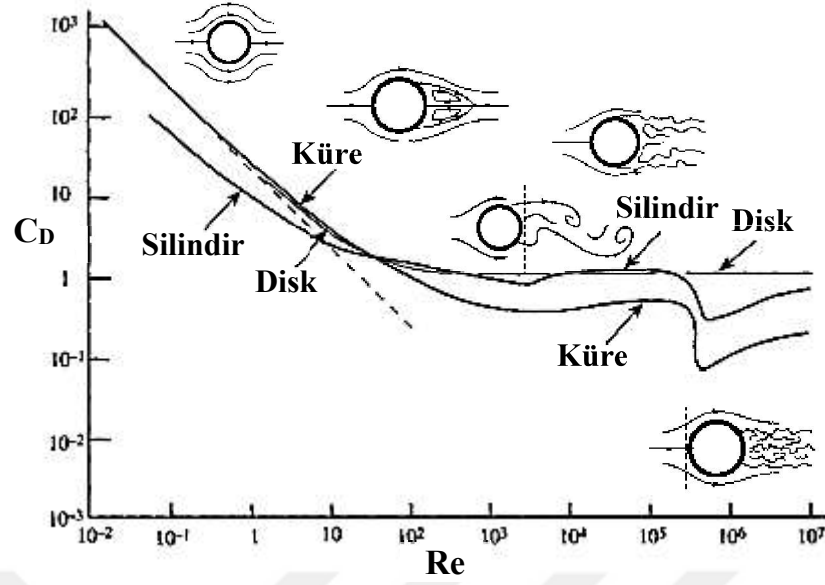
Sürüklenme problemi incelendiğinde akışın önünde kalan kesitin çok küçük bir etkisi olduğu söylenebilir. Sürüklenmeye asıl katkı cismin arka kısmından kaynaklanacaktır. Cisme doğru gelen akışı bölecek uygun bir şekil bulmak çok önemli bir faaliyet değildir. Ancak bölünmüş olan akım çizgilerini düzgün bir şekilde bir araya getirecek bir arka yüzey tasarlamak oldukça önemlidir. Bu anlamda optimum şekiller arka kısmında profilin bir hayli incelmesi akımçizgili olanlardır. Çizelge 2.2 farklı cisim şekilleri için sürüklenme katsayılarını göstermektedir (Hucho 1987).

Çizelge 2.2. Farklı cisim şekilleri ve sürüklenme katsayıları (Hucho 1987)

Cisim	Şekil ve Akış	C_D
Dairesel levha		1,17
Küre		0,47*
Yarım küre		0,42*
60° koni		0,50
Küp		1,05*
Küp		0,80*
Dairesel silindir (l/D>2)		0,82
Dairesel silindir (l/D<1)		1,15
Akımçizgili cisim (l/D=2,5)		0,04
Dairesel yarım levha (zeminde)		1,19
Akımçizgili yarım cisim (zeminde)		0,09

* Kritik-altı akış

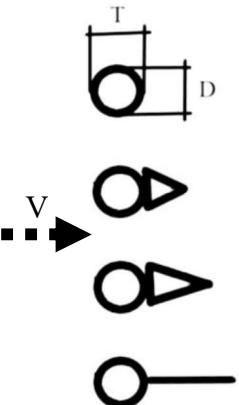
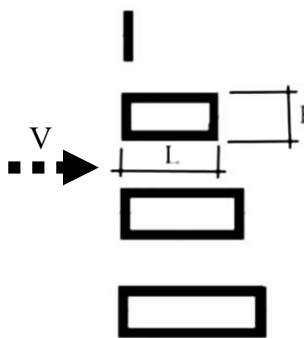
Cisim üzerinden akışta Re sayısı C_D üzerinde etkili olmaktadır. Örneğin, küre üzerinden akışta Re 'nin artması ile türbülanslı akışın ayrılması daha zor gerçekleştiği için C_D düşecektir (Şekil 2.12). Benzer bir gelişim yine dairesel kesitli olan silindir ve disk için de görülmektedir. Re 'yi artıracak şekilde çapın artması da bu etkiye sebep olacaktır.



Şekil 2.12. Re sayısına göre C_D değerinin logaritmik değişimi (Caballero ve ark. 2014)

Boyut oranı da C_D üzerinde etkili olan bir parametredir. Boyut oranının artması genel olarak sürüklenme katsayısını düşürmektedir. Buna göre; akış genişliği akış yüksekliğine oranla yüksek olan cisimlerde sürüklenme azalmaktadır. Bu ilişki uzunluğu sonsuz olan levha ve silindir için Çizelge 2.3'te görülmektedir. Çizelgede silindirik şekil için genişlik artırılırken yüksekliğin giderek azaltıldığına dikkat edilmelidir.

Çizelge 2.3. Boyut oranının artması ve C_D 'ye etkisi (Meyer ve Erland 2019)

	T/D	C_D		L/H	C_D
	1	1,2		1	2,1
	2	0,88		2	1,8
	2,5	0,80		2,5	1,4
	3	0,84		3	1,3

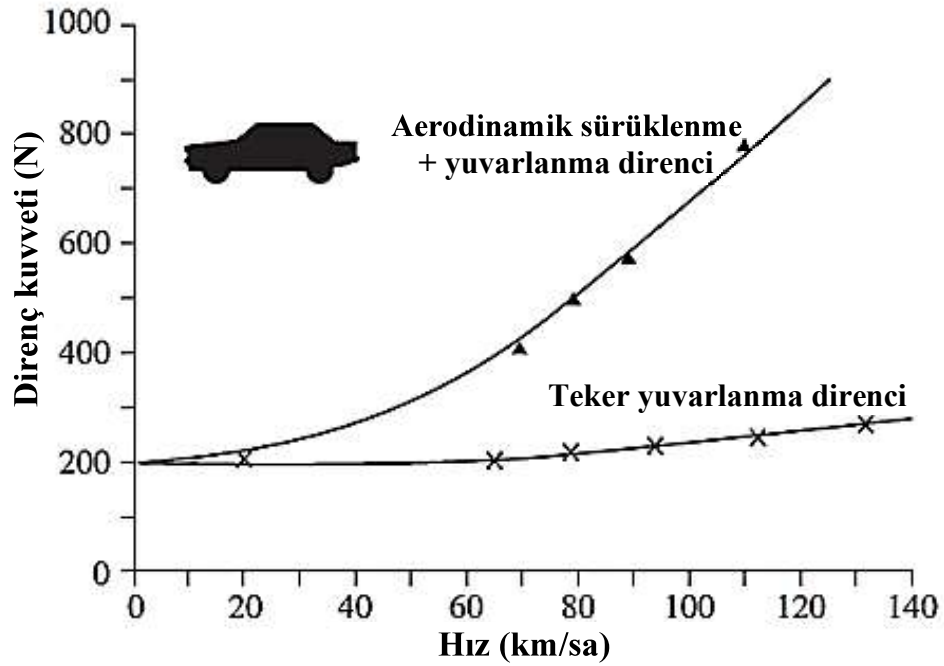
2.1.2. Otomobil aerodinamiği

Sanayi devriminin başlamasından sonra 19. yy'da motorize araçlar ortaya çıkmıştır. Bu alanda verimliliği artırma düşünceleri akışkanlar mekaniğini daha iyi anlama ihtiyacını doğurmuştur. Bu gelişmelere paralel olarak konunun matematiksel boyutları ve Navier-Stokes (NS) adı verilen denklemler (1800'lerin ortalarında) elde edilmiştir. Ancak bu denklemlerin analitik çözümleri hemen elde edilememiştir. Bunun sebebi bahsi geçen doğrusal-olmayan kısmî diferansiyel denklemlerin karmaşıklığı ve kapalı formda analitik çözümlerinin olmayışıdır. Sonuç olarak akışkanlar mekaniği bilimi bu karmaşık matematiksel modeli basitleştirmeye ve sınırlı şartlarda kısmî çözümler bulmaya odaklanmıştır. Karmaşık NS denklemlerindeki düşük-mertebe terimlerin ihmal edilmesi bu denklemlerin baskın fiziksel etkileri temsil etmesini engellemiştir. Böylelikle basitleştirilmiş çözümler elde edilmiştir.

Sonuç olarak aerodinamik, basit modeller yoluyla faydalı mühendislik çözümleri üretmenin çok iyi bir somut örneğidir. Otomobil aerodinamiğinde ise problem daha basitleşebilmektedir. Çünkü burada hava, süpersonik hızlarda uçan uçaklardakinin aksine sıkıştırılmaz (bkz. Çizelge 2.1) olarak düşünülebilmektedir (Katz 2016).

Bir otomobilin performansı, yol tutuşu ve konforu aerodinamik özellikleri ile yakından ilgilidir. Düşük sürüklenme düşük yakıt tüketimi için mutlak bir ön-koşuldur. Yakıt fiyatları arttıkça ve yasal düzenlemeler/regülasyonlar sıkılaştıkça bu ilişki daha da önem kazanmaktadır (Hucho 1987). Bu sebeple günümüz otomobil endüstrisinde yakıt tüketimini azaltmak ve yasal düzenlemelerce belirlenen karbondioksit salınımı sınırlarını sağlayabilmek en önemli hedefler arasındadır (Murukesavan ve ark. 2013). Ancak otomobil aerodinamiğinin diğer boyutları da kaliteli bir otomobil için en az bunun kadar önemlidir. Yan rüzgâr kararlılığı, rüzgâr gürültüsü, gövdenin/farların-lambaların/pencerelerin kirlenmesi, motorun/vites kutusunun/frenlerin soğutulması, yolcu kabininin ısıtma ve havalandırması konularının tümü otomobil etrafındaki ve otomobil içinden geçen akış alanından etkilenir (Hucho 1987).

Aerodinamik kuvvetlerin otomobil üzerine olan etkisinin önemi Şekil 2.13'te görülmektedir. Şekilde otomobil hızı arttıkça teker yuvarlanma direnci sadece marjinal seviyede artarken, aerodinamik sürüklenme dahil olduğunda toplam direnç kuvvetinin önemli seviyede arttığı görülmektedir (Katz 2016). Özellikle 60 km/sa hızın üzerine çıkıldığında aerodinamik sürüklenme çok daha ön plana çıkmaktadır.

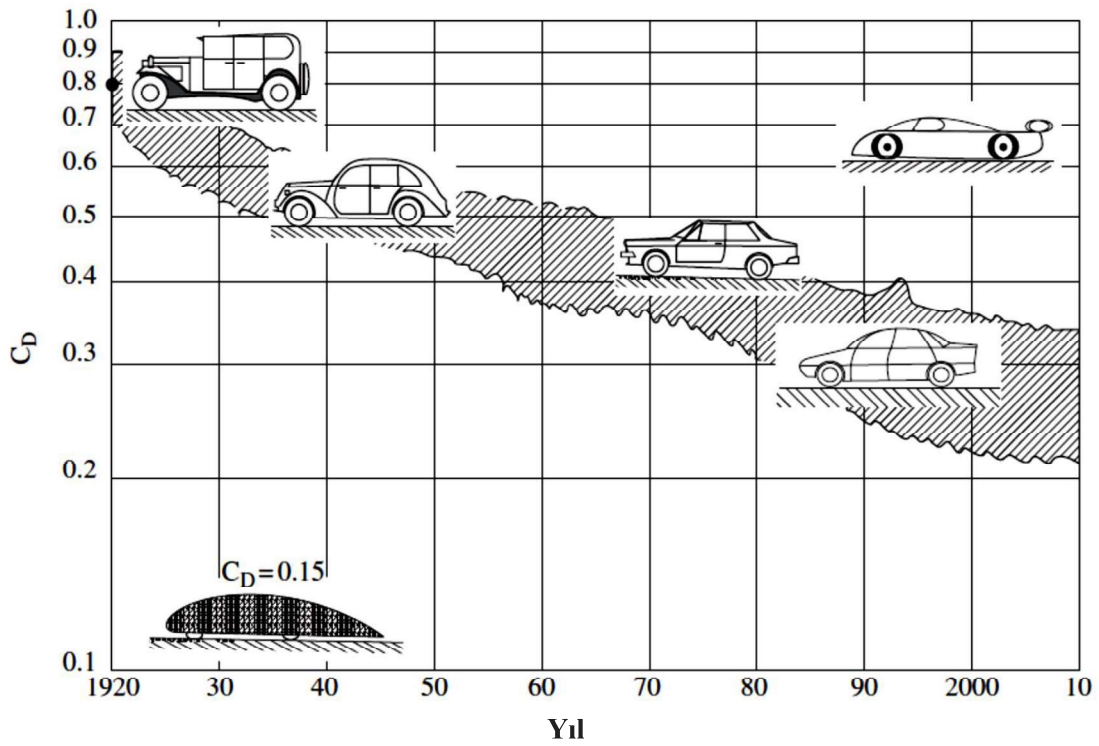


Şekil 2.13. Bir otomobil için hızla ilişkili olarak direnç kuvvetlerinin değişimi (Katz 2016)

Araç hızları giderek artınca aerodinamik sürüklenmenin düşürülmesi daha da önem kazanmıştır. Ancak araç tasarımlarında sürüklenme yerine kullanılmak üzere boyutsuz bir sayı olan **sürüklenme katsayısı (C_D)** fikri ortaya atılmıştır. Bir önceki bölümde bahsedilen bu katsayı araç konfigürasyonunun aerodinamik performansını nicilemektedir. Bu yaklaşım sayesinde tasarım aşaması için büyük avantajlar sağlanmıştır. Örneğin, ölçekleme ya da boyutsal değişim çok daha kolay hale gelmiştir (Katz 2016).

Şekil 2.14'te gerçek otomobillere ait sürüklenme katsayıları görülmektedir. $C_D=1$ gibi yüksek değerlerle başlayan süreç günümüzde $C_D=0,3$ sınırının aşılma çalışıldığı noktaya kadar ulaşmıştır. Modern otomobiller düzgün yüzeylere sahiptir ve sürüklenmeyi azaltmak için uygulanabilir/gerçekçi tüm yöntemleri kullanır. Şeklin sol alt kısmında

$C_D=0,15$ değerine sahip akım-çizgili bir tasarım verilmiştir. Ancak, otomobil tasarımlarında estetik kaygılarında var olması bu tip tasarımların uygulanabilirliğini mümkün kılmamıştır. Şeklin sağ üst kısmında ise çoğu modern yarış aracındaki gibi yüksek sürüklenmeyi temsil eden bir tasarım bulunmaktadır. Böyle bir tasarım, yarışlardaki yüksek hızlarla çelişkili dursa da aerodinamik bastırma kuvveti oluşturmak için gereklidir. Böylece, yarış otomobili zemine doğru bastırılarak yol tutuşu artırılmakta, yüksek hızlarda viraj alınabilmekte, ivmelenme ve frenleme iyileşmektedir. Azami hız azalsa da ortalama hız ve araç kararlılığı artmaktadır (Katz 2016).

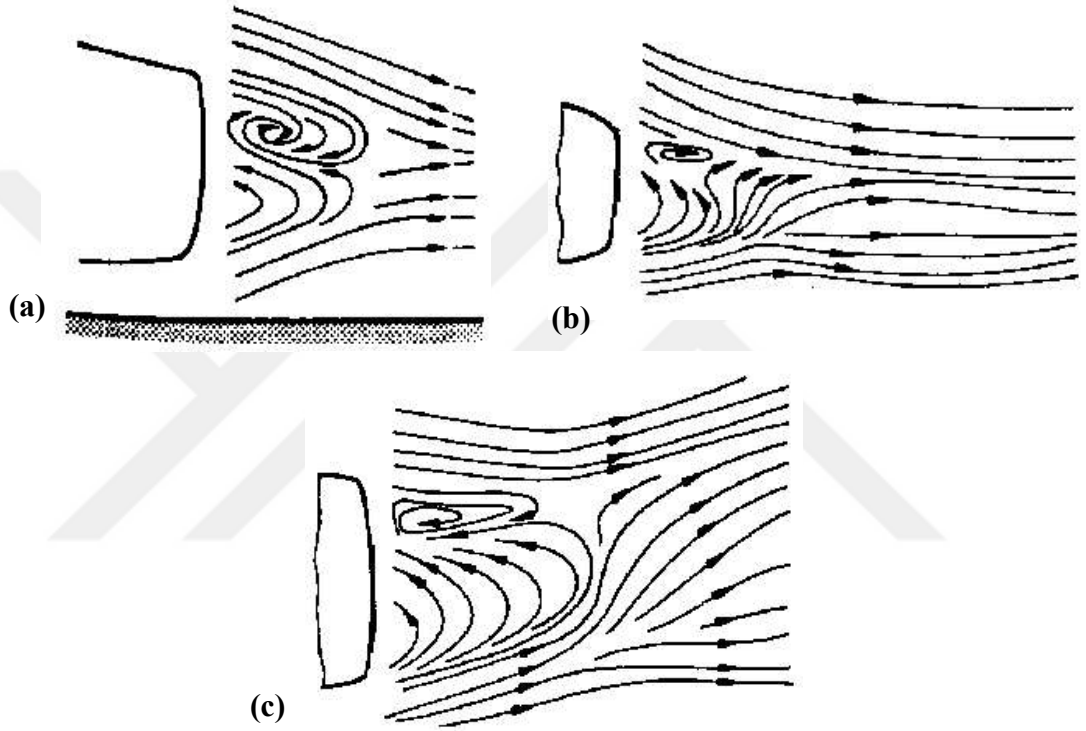


Şekil 2.14. Otomobillerde aerodinamik sürüklenmenin tarihsel gelişimi (Katz 2016)

Bir otomobilin etrafındaki akış ayrılmalarıyla karakterize edilir. Oluşan sürüklenme ise temel olarak basınç sürüklenmesidir.

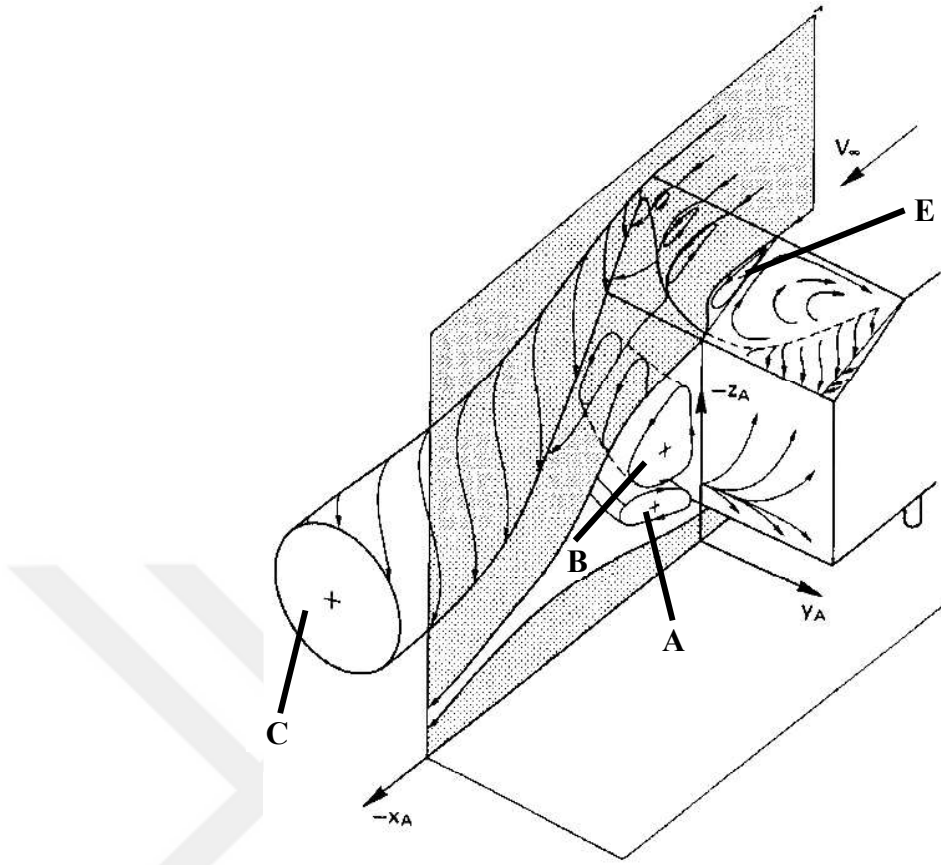
Otomobilin arka kısmında ayrılan akış temelde ana akışa dik ayrılma hattına ise paralel olan eksenler etrafında dönen bir vorteks çifti oluşturur. Bu vortekslerin ters yönde dönecek şekilde nasıl sırt sırta verdiği ve at nalı vorteksi oluşturduğu tam olarak açıklanamamıştır. Akış eni boyunca dönen bu vorteksler, Ahmed ve Baumert tarafından gözlemlenmiştir.

Şekil 2.15 kademeli-eğimli (notchback), direkt-eğimli (fastback) ve dik (squareback) otomobillerde oluşan vorteks çiftlerini göstermektedir. Alttaki vorteks saat yönünün tersine döner ve yoldaki kirliliğin aracın arka kısmına taşınmasından sorumludur. Üstteki vorteks ters yönde döner. Cisim-ardında oluşan bu vorteks çifti dik otomobillerde yukarıya-sapmaya (upwash), kademeli-eğimli ve direkt-eğimli otomobillerde ise aşağıya-sapmaya (downwash) sebep olur (Hucho 1987).



Şekil 2.15. Farklı arka profillere sahip araç tiplerinde cisim-ardı bölgesi: **(a)** Kademeli-eğimli, **(b)** Direkt-eğimli, **(c)** Dik (Hucho 1987)

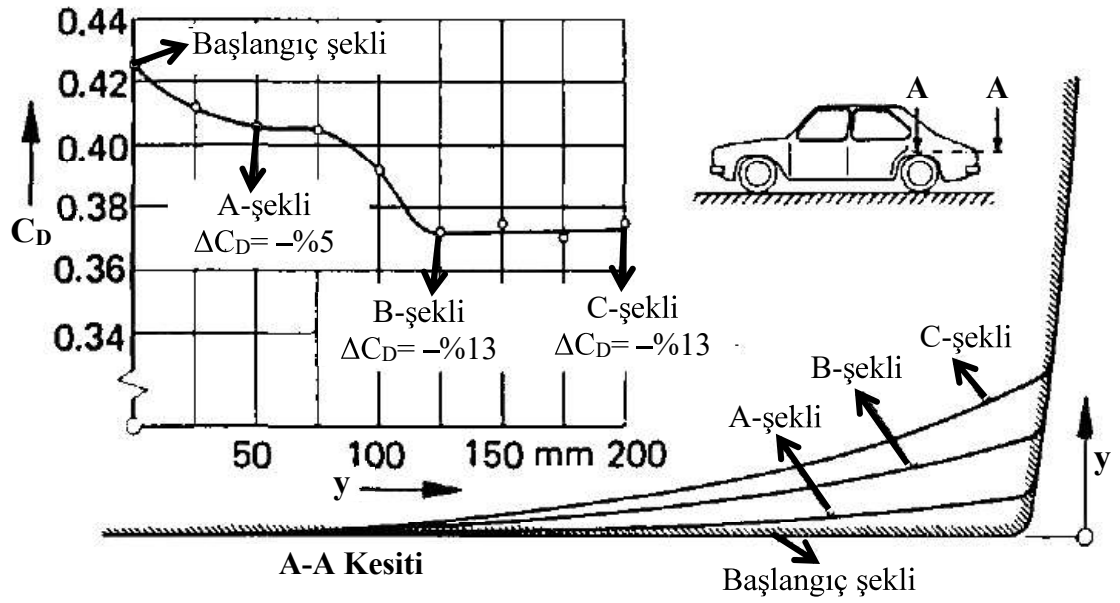
Arka yüzeyi eğimli olan otomobil tiplerinde, cisim-ardındaki vortekslere (Şekil 2.16'daki A-ve-B-vortekslerine) ek olarak keskin kenar kısımlarda (A-direği, C-direği, gibi) vorteks silsilesi (Şekil 2.16'daki C-vorteksi) oluşur. Delta kanatlı uçaklardakine benzer olan bu vorteksler vorteks çifti şeklinde meydana gelir (Şekil 2.16). Bu vorteksler öyle şiddetlidir ki, bu vortekslerin etkisiyle arka yüzeyde kullanılacak yüksek eğim açılarında dahi akış ayrılmadan yüzeyi uzun mesafe takip edebilir. A-ve-B-vorteksleri ise düşük şiddetlidir. Arka yüzeyin eğim açısı yüksek olduğunda arka yüzey ile aşağıya-sapma arasında bir vorteks daha (Şekil 2.16'daki E-vorteksi) oluşur.



Şekil 2.16. Ahmed ve ark. tarafından önerilmiş olan arka yüzeyi eğimli bir araçta oluşabilecek vorteks sistemi (Hucho 1987)

Otomobilin arkasında kenarlarda oluşan boylamasına vorteks çifti aşağıya-sapmaya sebep olurken, cisim-ardı bölgesindeki enlemesine vorteks çifti yukarıya-sapmaya sebep olur. Bu iki vorteks grubu birbirine ters etki edecek şekilde etkileşime girdiğinde uygun bir akış koşulu oluşmakta ve sürüklenme düşmektedir. Bu durumun oluşumunda en önemli belirleyici arka yüzeyin eğim açısıdır.

Otomobil arkasındaki bir diğer önemli etki ise arka kutu kısmının yanlardan daralarak gelmesini sağlayan sandal-kuyruk (boat-tailing) uygulamasıdır. Bu uygulamayla sürüklenmenin düşürülmesine bir örnek Şekil 2.17’de görülmektedir. Arka kutunun yüksekliği sabit tutularak yan kısımlar giderek konikleştirilmiştir. Buna göre B-şekline kadar akış ayrılmadan konikliği takip etmiş, B-şeklinden sonraki konikleştirmelerde ise akış ayrılmaları başlamış ve sürüklenmede iyileştirme sağlanamamıştır. Bu şekilde sürüklenmenin düşürülmesi basınç kazanımı ile açıklanmıştır. Sandal-kuyruk uygulaması C-direğinde direğin yuvarlatılması ile de gerçekleştirilebilir.

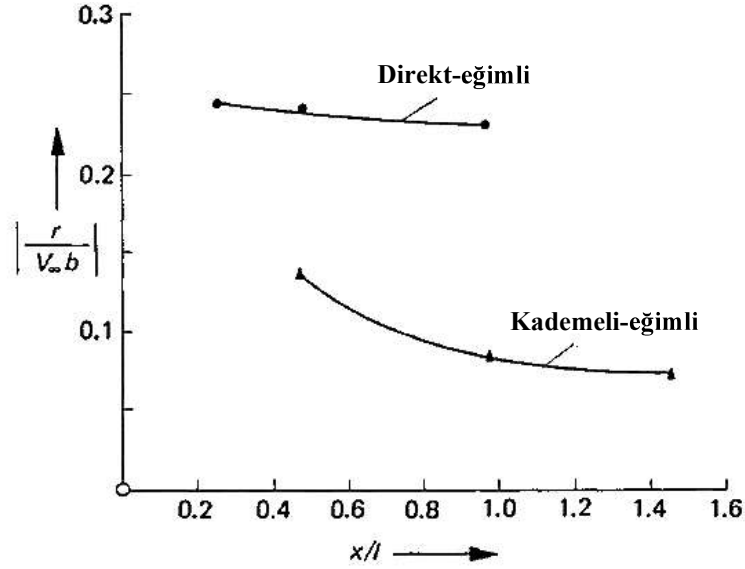


Şekil 2.17. Kademeli-eğimli bir otomobilde sandal-kuyruk uygulaması (Hucho 1987)

Vorteks gücü (Γ) (vortex strength) bir vorteks ipliği için Denklem 2.8'deki gibi ifade edilebilir ve sabittir. Burada; r vorteksin çapı, V ise vorteksin çevresel hızıdır.

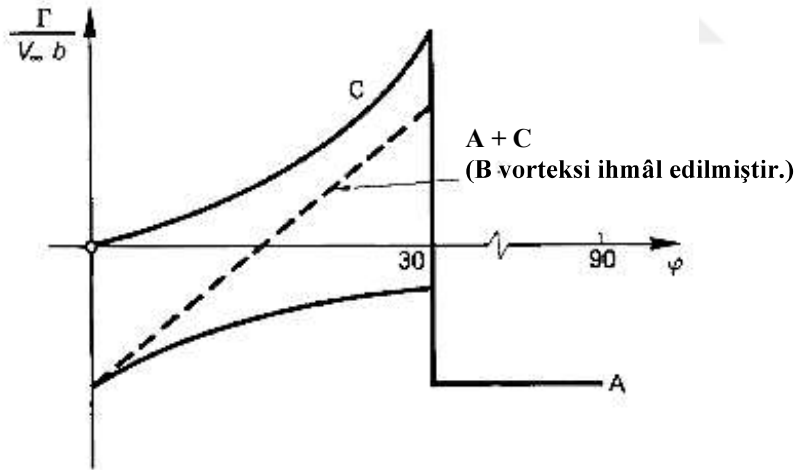
$$\Gamma = 2\pi rV \quad (2.8)$$

Vorteks gücü direkt-eğimli (fastback) bir otomobilin arkasında kademeli-eğimli (notchback) bir otomobildekenden çok daha yüksektir. Aşağı-akım bölgesinde boylamasına vorteksler yitim mekanizması ile yavaş yavaş tükenir. Vorteks gücünün zayıflaması direkt-eğimli bir otomobilin arkasında daha zor olur (Şekil 2.18).



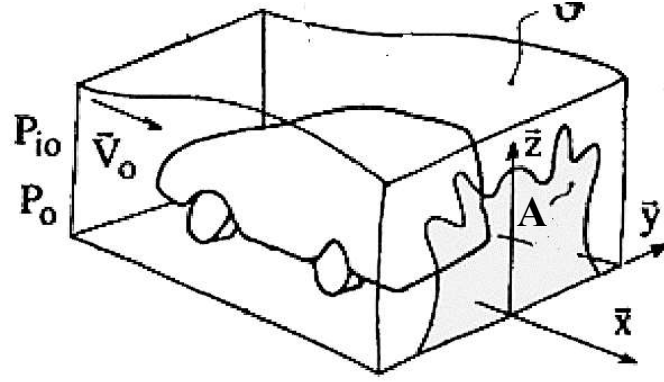
Şekil 2.18. Akış yönü boyunca sirkülasyonun zayıflaması (Γ , vorteks gücü - x/l , mesafe ilişkisi) (Hucho 1987)

A ve özellikle C vortekslerinin gücü arka yüzeyin eğim açısı ile artar (Şekil 2.19). Eğim açısı 30° 'yi geçtiğinde ise vorteks patlar ve akış deseni arkası dik olan (squareback) otomobillerdekine benzer (Hucho 1987).



Şekil 2.19. Arka yüzeyi eğimli bir araçta eğim açısının (ϕ) A ve C vortekslerinin gücüne (Γ) etkisi (Hucho 1987)

Onorato ve ark., bir aracı çevreleyen bir akım tüpündeki havaya (Şekil 2.20) uyguladıkları momentum denkleminde dayalı basitleştirilmiş analitik bir denklem önermişlerdir. Akış sürekli ve sıkıştırılmaz kabul edilmiş, yerçekimi ve türbülans etkileri basınç etkisine göre ihmal edilebilir seviyede düşünülmüştür. Bu basitleştirmeler neticesinde Denklem 2.9'daki Onorato sürüklenme denklemi elde edilmiştir (Rouméas ve ark. 2009).



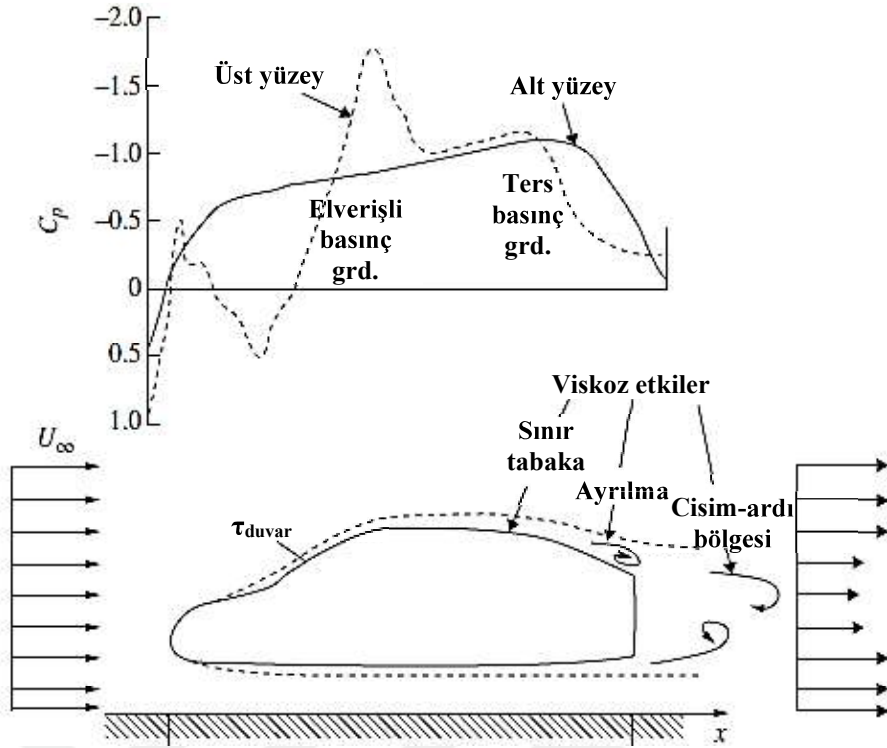
Şekil 2.20. Onorato sürüklenme denklemi için akış hacmi ve değişkenler (Rouméas ve ark. 2009)

$$\begin{aligned}
 F_x = & -\frac{\rho V_0^2}{2} \int_A \left(1 - \frac{V_x}{V_0}\right)^2 dydz \\
 & + \frac{\rho V_0^2}{2} \int_A \left(\frac{V_y^2}{V_0^2} + \frac{V_z^2}{V_0^2}\right) dydz \\
 & + \int_A (P_{i0} - P_i) dydz
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Denklemdaki *ilk terim*, boylamasına yöndeki hız kaybı ile ilgili olan sürüklenmeyi temsil eder. Arka kısımda enlemesine vortekslerin gelişimi ile ilişkilendirilir. *İkinci terim* vorteks sürüklenmesi ile ilgilidir. Geometri üzerinde boylamasına vortekslerin gelişimi ile ilişkilendirilir. *Üçüncü terim* ise yukarı-akım ile aşağı-akım arasındaki toplam basınç kaybıyla ilgili olan sürüklenmeyi temsil etmektedir. Cisim-ardında bulunan ayrılmış ve dönen yapıların oluşumu ve devamlılığı ile ilişkilendirilir.

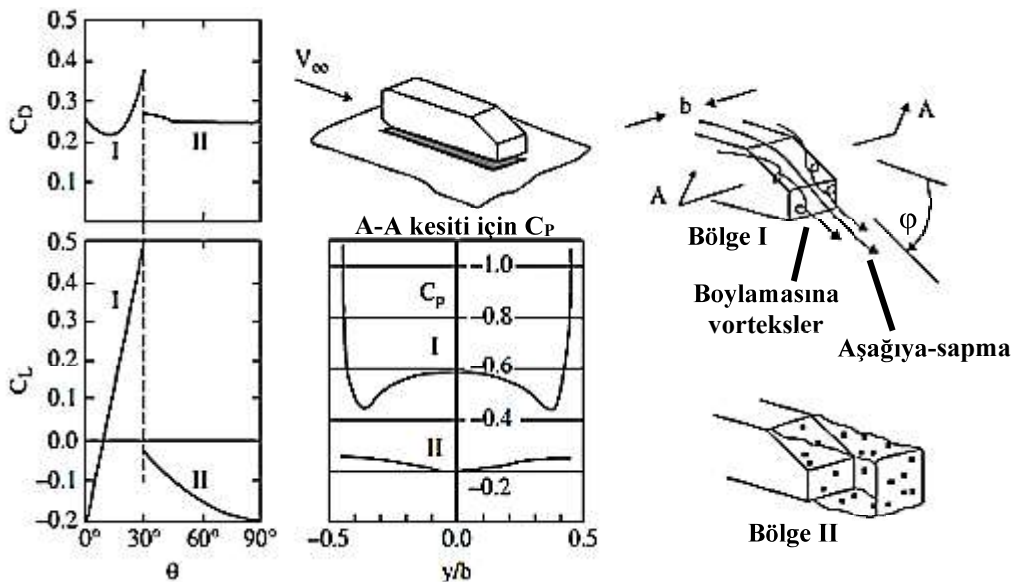
Onorato sürüklenme denklemine göre bir aracın aerodinamik sürüklenmesi temelde geometri üzerinde ayrılmış akışın oluşması ve cisim-ardında enlemesine ve boylamasına vortekslerin meydana gelmesinden kaynaklanır. Sonuç olarak sürüklenmenin düşürülmesi boylamasına vortekslerin (ikinci terimin) azaltılması, cisim-ardı kesit alanının (tüm terimlerin) küçültülmesi ve/veya toplam basınç kaybının (üçüncü terimin) düşürülmesi ile gerçekleştirilebilir (Rouméas ve ark. 2009).

Genel bir otomobil profili üzerinde basınç katsayısı (C_p) dağılımı ve akış alanında oluşabilecek olaylar Şekil 2.21’de görülmektedir.



Şekil 2.21. Genel bir otomobil profili üzerinde basınç katsayısı (C_p) dağılımı (Katz 2016)

Otomobil profilindeki değişim C_p , C_L ve C_D üzerinde etkili olacaktır. Şekil 2.22’de arka eğim açısının etkisi görülmektedir. C_L artışından dolayı arka yüzeyin kenarlarında boylamasına vortekslerin oluştuğu, bu vortekslerin cisim-ardında oluşan vorteksleri bir yere kadar dengelediği ve sürüklenmeyi düşürdüğü, C_L ’nin daha da artmasıyla, boylamasına vortekslerin baskın gelerek sürüklenmeyi (indüktif sürüklenme ile) artırdığı şekil üzerinde takip edilebilir.



Şekil 2.22. Arkası eğimli bir otomobil üzerinde eğim açısının (ϕ) etkisi (Katz 2016)

2.1.3. Yan aynanın aerodinamiği

Aracın hangi kısmının toplam aerodinamik sürüklenmeye ne kadarlık bir katkısı olduğunu bulmak kolay değildir. Toplam aerodinamik sürüklenme dağılımının deneysel olarak ölçülmesi zordur. Bu değerlendirme nümerik olarak yapıldığıdaysa, kullanılan HAD metodu belirleyici olmaktadır. Hesaplamalara dayalı bazı tahminî sayılar Çizelge 2.4'te sunulmuştur. En çok artışa sebep olanların gövde altı ve arka yüzeyler (arka cam ve bagaj) olduğu görülmektedir (Katz 2016).

Çizelge 2.4. Tipik bir sedan model araç için sürüklenme bileşenlerinin hesaplanmış dağılımı (Katz 2016)

Sürüklenme Kaynakları	ΔC_D
Gövde	0,050
Yan aynalar	0,015
Yan yüzeyler	0,085
Motor bölmesi	0,024
Motor soğutma	0,048
Gövde altı + Şasi	0,085
Ön tekerlek + Süspansiyon	0,025
Arka tekerlek + Süspansiyon	0,023
Toplam Sürüklenme Katsayısı	0,355

Yan ayna gibi eklentilerde yapılan aerodinamik incelemelerde testlerden doğru sonuçlar elde edebilmek için bazı hususlara dikkat etmek gerekir. Ayna karakteristik boyutu, ayna civarındaki lokal akış hızı (serbest akım hızından genellikle farklı değerlerde bir hız) ve dolayısıyla bu civardaki yerel Reynolds sayısı kullanılmalıdır. Söz konusu akış hızı, ölçüm yapılarak tespit edilmelidir. Ancak, Denklem 2.10 iyi bir yaklaşım olarak kabul edilebilir. Burada; V araç hızı, V_A ise aynaya gelen akış hızıdır (Hucho 1987).

$$V_A = 1,3V \quad (2.10)$$

Aynanın ön alanı ve aynaya gelen akış hızı kullanıldığında ayna özelinde C_D sayısı yüksek çıkar ve $C_D=1$ değerinin üzerinde dahi değer alabilir. Ancak ayna ön alanının araç ön alanına oranı yaklaşık %0,5'idir. Bu sebeple aynanın C_D değerinden bu değer aracın toplam C_D değerine katkı oranı dikkate alınmalıdır (Hucho 1987).

Yukarıda verilen Çizelge 2.4'teki örnek dağılımda da bu oranın yaklaşık %4,2 olduğu hesaplanabilir. Genel olarak yan aynaların toplam sürüklenmeye katkısı %2-7 arasındadır (Olsson 2011).

Aynanın akış alanı ile aracın akış alanı etkileşime girer. Yan aynalar, uzun ve geniş cisim-ardı bölgeler oluşturur; bu sebeple aracın yan yüzeylerindeki akışın düzenini bozar. Bu etki düzgün yüzeylere ve düşük sürüklenmeye sahip otomobillerde daha belirgin olur (Hucho 1987).

Gövde bileşenleri üzerine etkiyen kararsız kuvvetlerin incelenmesi, yan aynaları da içermelidir. Ayrılma bölgesinde yan aynanın arka kısmına gelen periyodik hava akışı ayna üzerinde kararsız bir yük meydana getirir. Fonksiyonel açıdan ayna hareketli bir bileşen olması gerektiğinden aynada tekrarlı bir hareket başlayabilir. Buna karşı ayna geometrisi titreşime eğilimi önleyecek bir şekilde modifiye edilebilir. Tabii ayna geometrisi için tek faktör bu değildir.

Yan aynalar yan camlarda ilave su birikmesine sebep olur. Aynanın cisim-ardı bölgesi sadece camları değil aynayı da ıslatır. Bu anlamda optimum bir ayna tasarımında aynanın cisim-ardı bölgesi ile yan cam arasında mümkün olduğunca temas olmamalı ve ayna yüzeyi temiz kalmalıdır (Hucho 1987).

2.1.4. Daldırılmış cisimler üzerinden akış için korunum denklemleri

Bir cisim etrafında zamana bağlı üç-boyutlu akış ve ısı transferi için korunum denklemleri; süreklilik denklemi, momentum denklemleri ve enerji denklemidir. Yol araçlarının dış aerodinamiğine genel yaklaşım sıkıştırılamaz ve izotermal akış kabulü yapmaktır. $Ma < 0,3$ şartı (sıkıştırılamaz akış sınırı) deniz seviyesinde 100 m/s civarlarına karşılık gelmektedir. Yol araçları için inceleme hacminin herhangi bir yerinde bu hıza ulaşılması beklenmez. Bu hususlar beraber düşünüldüğünde enerji denklemi ihmal edilir, süreklilik ve momentum denklemleri ise sıkıştırılamaz formda (yoğunluk terimi ihmal edilerek) yazılabilir (Cederlund ve Vikström 2010).

Viskoz olmayan akışlar Euler denklemleriyle ve viskoz akışlar Navier-Stokes denklemleriyle tanımlanır. Navier - Stokes denklemleri hareketli bir akışkan için hız, basınç, sıcaklık ve yoğunluk arasındaki ilişkiyi açıklar (Rodriguez 2016).

Sıkıştırılamaz akış Navier–Stokes denklemleri 2. dereceden non-lineer kısmî diferansiyel denklemlerdir.

Söz konusu korunum denklemleri, Denklem 2.11 – 2.14’te verilmiştir. Bu denklemlerde u hız, t zaman, x-y-z konum, P basınç, ρ yoğundur.

Süreklilik denklemi:
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.11)$$

Sıkıştırılamaz akış Navier - Stokes denklemleri:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.12)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.13)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.14)$$

Genel olarak bu denklemler nümerik yöntemlerle çözülür. Sadece birkaç tip akış problemi için, analitik çözümün bulunduğu bir seviyeye kadar basitleştirilebilirler (Rodriguez 2016).

2.1.5. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Akışkanlar mekaniğinde deney yapmanın genel olarak 3 yolu vardır. İlki teorik yani analitik yoldur. Bu yöntem, teori oluşturma ve denklemleri kâğıt üzerinde çözmeye dayanır. Sıkıştırılamaz akışların korunum denklemi olan Navier- Stokes denklemleri buna örnek olarak verilebilir. İkinci yol, birçok mühendis ve fizikçinin tercih ettiği deneysel çalışmadır. Örnek olarak rüzgâr tünellerinde yapılan çalışmalar verilebilir. Üçüncü yol

ise, deneylerin nümerik çözümlerle bilgisayar üzerinde yapıldığı hesaplamalı akışkanlar dinamiğidir (HAD) (Oh 2012).

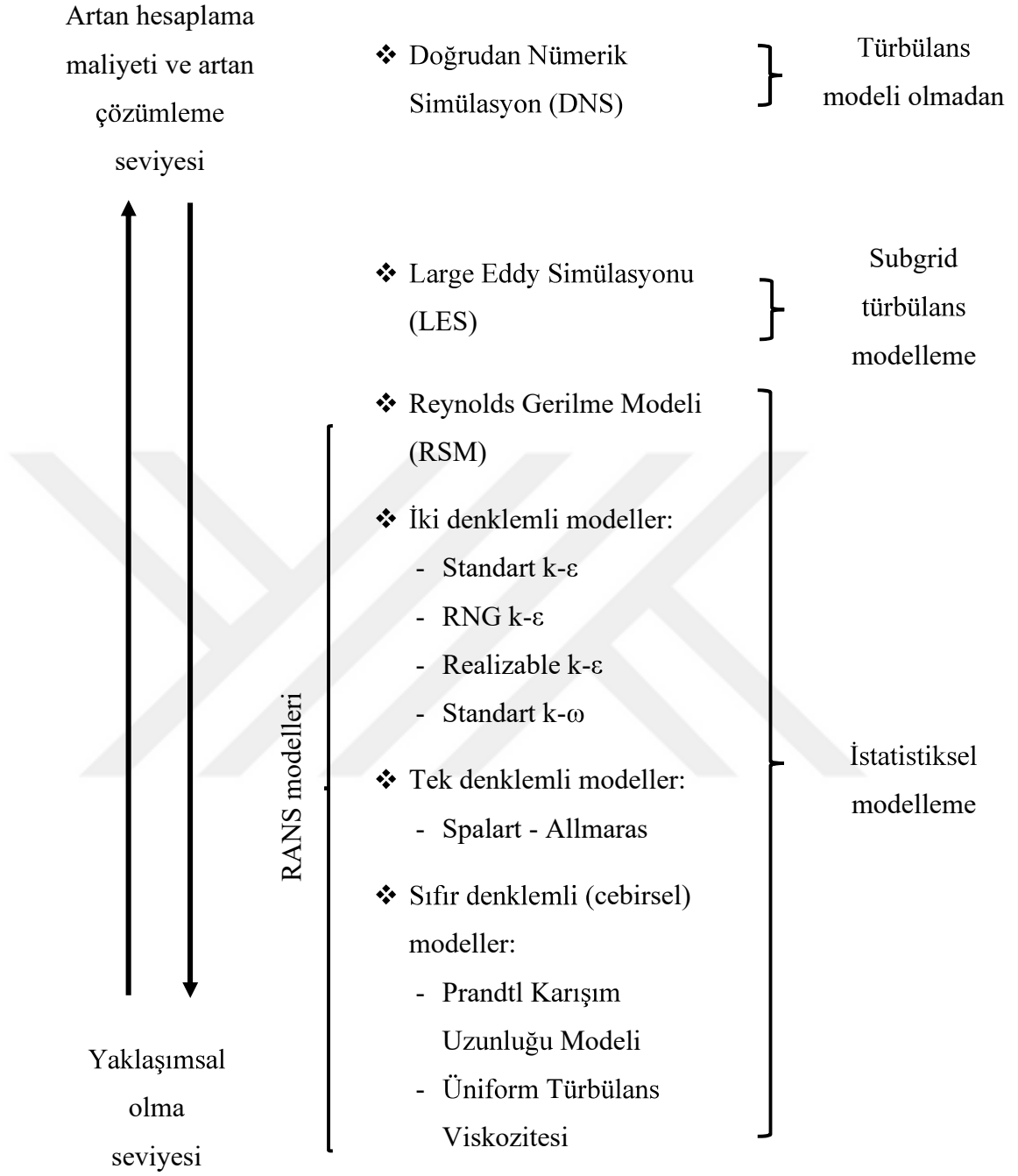
Günümüzde HAD, deneysel çalışmalarla iç içe kullanılır. HAD çözümlerinin sağlamasını (validation) yapmak için seçilen büyüklüklerin deneysel sonuçlarından faydalanılır. HAD yardımıyla parametrik ön çalışmalar yapılarak deneysel çalışmadaki deney sayıları önemli ölçüde düşürülebilir. Ayrıca, kayma gerilmeleri, hız ve basınç profilleri, akım çizgileri gibi ayrıntılı sonuçlar ancak HAD kullanılarak elde edilebilir (Çengel ve Cimbala 2015).

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği iteratif bir yöntem kullanarak akış problemlerindeki korunum denklemleri nümerik olarak çözmek için tasarlanmış bir araçtır. Çözüm sonlu sayıda elemanlar için yapılır (Cederlund ve Vikström 2010). Daha güçlü bilgisayarların ve daha verimli algoritmalara sahip yazılımların ortaya çıkmasıyla HAD analizlerinin sonuçlanma süresi sürekli olarak düşmektedir (Andersson ve ark. 2012).

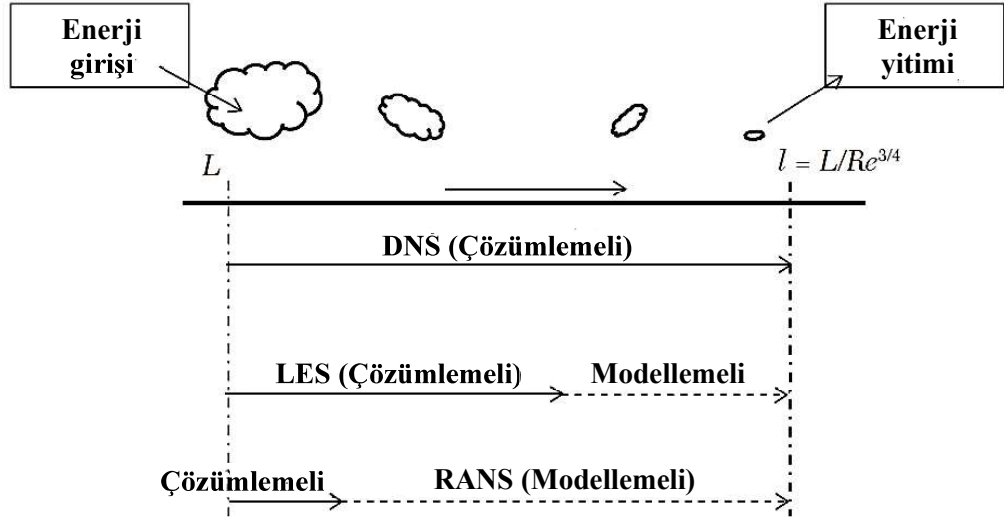
Navier–Stokes denklemlerini çözmedeki temel zorluk gerçek akışla eşleştirme yapabilmek için türbülansın hesaba katılması gerekliliğidir (Cederlund ve Vikström 2010). Bu zorluğu aşmak için bir kısım basitleştirmeleri içeren **türbülans modellerinden** faydalanılır (Cavusoglu 2017).

Başarılı bir simülasyon için türbülans modelinin seçimi kritik öneme sahiptir. Akış karakteri hakkında bilgi sahibi olmak (ayrılma olup olmadığı vb.) eldeki hesaplama kaynaklarının sınırı ve istenilen doğruluk seviyesi bu seçim seçimi belirleyen etkenlerdir. Modellerin doğruluğu ile hesaplama maliyeti arasında ters orantı vardır (Şekil 2.23) (Andersson ve ark. 2012).

Günümüzde akış denklemlerini çözmek için 3 temel yöntem kullanılır: DNS, LES ve RANS. Bu yöntemlerin modifiye versiyonları ve varyasyonları da geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde türbülans ölçeği ya tamamen çözümlenir (modellenmez) ya da kısmen çözümlenir (Şekil 2.24) (Tabatabaian 2015).



Şekil 2.23. Türbülanslı akış için çözüm yöntemleri (Andersson ve ark. 2012)

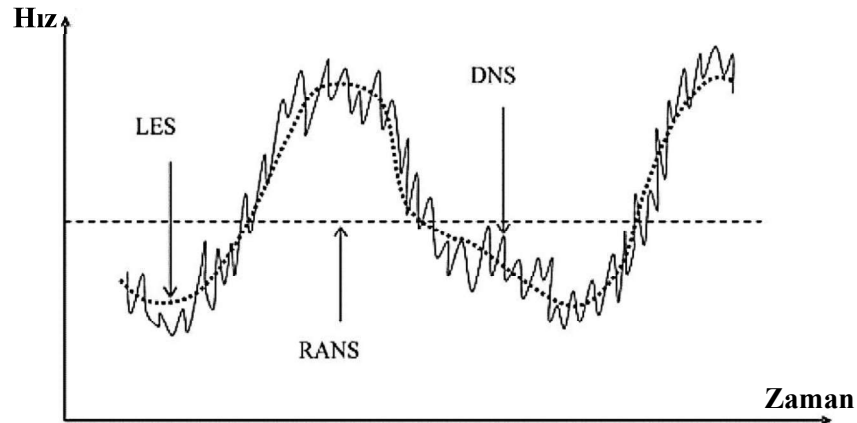


Şekil 2.24. Türbülanslı akış için çözüm yaklaşımları (Tabatabaian 2015)

Doğrudan nümerik simülasyon (DNS) tüm türbülans ölçeğini çözümler. Çözüm çok ince bir ağ yapısı ve yeterli küçüklükte zaman adımları ister. Çok yüksek eleman ve zaman adımı sayısı sebebiyle özellikle yüksek Reynolds sayıları için günümüzde henüz bu yaklaşım tercih edilmez.

Reynolds ortalımalı Navier-Stokes (RANS) yaklaşık, zaman ortalımalı bir çözüm sunar ve ortalama akış özelliklerine odaklanır. Dalgalı hız bölgesi (Reynolds gerilmesi) modellenmelidir. Bu türbülans modeli tüm türbülans ölçeklerini çözemez.

Large eddy simülasyonu (LES) daha büyük eddyleri zamana bağlı simülasyonla hesaplarırken daha küçük eddylerin genel davranışı ise modellenir. LES, büyük ve küçük eddyleri ayırmak için filtreleme işlemi kullanır (Şekil 2.25) (Olsson 2011).



Şekil 2.25. Çözüm yöntemlerinin türbülans ölçeğini çözümleme şekilleri (Andersson ve ark. 2012)

Türbülanslı akış çözüm yöntemlerinin ve kullanılan modellerin genel değerlendirmesi Çizelge 2.5’te verilmiştir.

Çizelge 2.5. Çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması (Andersson ve ark. 2012, Anonim 2020d)

Çözüm Yöntemi	Avantajlar	Sınırlamalar
Sıfır denklemliler modeller (Prandtl karışım uzunluğu modeli gibi)	- Uygun maliyetlidir.	- Karışım uzunluğunun tahmini zordur. - Genel bir türbülans modeli olarak kullanılamaz.
Tek denklemliler modeller (Spalart – Allmaras gibi)	- Uygun maliyetlidir.	- Uzunluk ölçeği için cebirsel bir denklem kullanmak çok sınırlayıcıdır.
İki denklemliler modeller (k-ε, k-ω modelleri gibi)	- Hız ve uzunluk ölçeklerinin transport denklemleriyle tahmin edilebildiği tam modellerdir. - Çoğu mühendislik uygulamaları için iyi sonuçlar verir. - Sağlam (robust), ekonomik ve kolay uygulanabilir.	- Eddy viskozite kabulü ile sınırlıdır. - Türbülans viskozitesi izotropik kabul edilir. - Kayma gerilmelerinin taşınım ve difüzyonu ihmal edilir.
Standart k-ε	- En yaygın kullanılan ve sağlaması yapılan modeldir. - Başlangıç iterasyonları, alternatif tasarımlar için eleme uygulamaları ve parametrik çalışmalar için uygundur.*	- Dairesel jetler (round jets), yüksek eğrilikler, girdaplar, ani ivmelenmeler, ayrılmalar ve düşük Reynolds bölgeleri için uygun değildir.
RNG k-ε	- Standart k-ε modelinin modifiye edilmiş halidir. Girdaplı akışlar ve akış ayrılmaları iyileştirilmiştir. - Realizable k-ε yakın faydalar sunar.*	- Standart k-ε modeli kadar kararlı değildir. - Dairesel jetler için uygun değildir. - Realizable k-ε’den daha zor yakınsaması muhtemeldir.*

* Anonim 2020d

Çizelge 2.5. Çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması (Andersson ve ark. 2012, Anonim 2020d) (devam)

Realizable k- ϵ	- Standart k-ϵ modelinin modifiye edilmiş halidir. - Girdaplı akışlar ve akış ayrılmaları iyileştirilmiştir. - Dairesel jetleri de çözebilir. - Ani gerinme, vorteks, bölgesel geçişli akışlar (sınır tabaka ayrılması, kaba cisimler ardında vorteks saçınımı, geniş açılı difüzörlerde stol, oda havalandırma vb.) içeren karmaşık akışlara uygundur.*	- Standart k-ϵ modeli kadar kararlı değildir.
k- ω	- Düşük Reynolds sayılarında iyi çalışır. - Duvar fonksiyonlarına ihtiyaç duymaz. - Ters basınç gradyanları ve ayrılmış akışlarda (dış aerodinamik akışlar ve turbo makineler) iyi sonuç verir.	- Duvara yakın bölgelerde ince ağ yapısına ve ilk elemanda $y^+ < 5$ değerine ihtiyaç duyar. - Akış ayrılmasını daha büyük ve erken olacak şekilde tahmin edebilir.*
SST (Shear-Stress Transport)	- Serbest akım bölgesinde k-ϵ, duvar bölgesinde k-ω kullanır. - Ters basınç gradyanı ve ayrılmış akışlarda iyi çalışır. - k-ω 'ya benzer faydalar sunar.* - Diğer RANS modellerine göre ayrılmayı daha doğru tahmin eder.*	- Duvara yakın bölgede ince ağ yapısı gerektirir. - Yüksek normal gerinme bölgelerinde (durma bölgeleri gibi) türbülansı yüksek tahmin eder. (Yine de bu bölgelerde k-ϵ'dan iyidir.)

* Anonim 2020d

Çizelge 2.5. Çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması (Andersson ve ark. 2012, Anonim 2020d) (devam)

Reynolds Gerilme Modeli (RSM)	- Türbülans viskozitesi modellerinin sonuç vermediği karmaşık akışlara uygulanabilir. - Anizotropiyi hesaba katar. - Girdap, akış ayrılması, yüzeysel jetler gibi pek çok karmaşık akışta (dönen akış kanalları, girdaplı yanma odaları, siklonlar vb.) iyi performans gösterir.	- 11 transport denklemi sebebiyle hesaplama maliyeti yüksektir.
LES	- Karmaşık akışlara uygulanabilir. - Diğer yöntemlerle elde edilemeyen bilgileri sunar.	- Hesaplama maliyeti yüksektir. - Yüksek veri depolaması gerektirir.
DNS	- Türbülans modeli kullanmaz. - Özellikle gaz akışlarında düşük Reynolds sayıları için kullanışlıdır. - Türbülans modellerinin geliştirilmesi ve sağlanması için kullanılabilir.	- Pratik mühendislik uygulamaları için hesaplama maliyeti çok yüksektir. - Çok fazla veri oluşturur.

Türbülans modelleme pek çok farklı yaklaşımla yapılabilir. Yaygın metotlardan biri en büyük eddy viskozite modelini kullanmaktır. Bu modelde, türbülans viskozitesi (μ_t) isimli ilave bir viskozite eklenir. k- ϵ modeli de bir eddy viskozite modelidir (Cederlund ve Vikström 2010).

k- ϵ modeli tam türbülanslı akışlar için geçerlidir. İki denklemlili olan bu model türbülans kinetik enerjisi (k) ve yitim oranı (ϵ) transport denklemlerini çözer ve türbülans viskozitesini belirler (Cavusoglu 2017). k- ϵ modelinde çözülen k ve ϵ transport denklemleri gerçek k ve ϵ transport denklemlerinin basitleştirilmiş halidir (Andersson ve ark. 2012).

Türbülans kinetik enerjisi ve yitim oranı için transport denklemleri sırasıyla Denklem 2.15 ve Denklem 2.16’da verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho\varepsilon \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (2.16)$$

Bu modelde difüzyon terimleri Denklem 2.17 hız gradiyentinden kaynaklanan türbülans kinetik enerjisi üretimini ifade eden terim Denklem 2.18 ve türbülans viskozitesi de Denklem 2.19’da verilmiştir.

$$\Gamma_k = \mu + \mu_t / \sigma_k \quad \Gamma_\varepsilon = \mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon \quad (2.17)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.18)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.19)$$

Standart k-ε modelinde C_μ türbülans modeli sabitidir. Bu modelde $R=0$ olup, deneysel sabitleri $C_{1\varepsilon}=1,44$, $C_{2\varepsilon}=1,92$, $C_\mu=0,09$, k ve ε için türbülans Prandtl sayıları $\sigma_k=1,0$, $\sigma_\varepsilon=1,3$ ’tür (Kaya ve Karagöz 2007).

Ani gerinme, vorteks, girdaplı akışlar ve akış ayrılmaları ve bölgesel geçişli akışlar gibi karmaşık akış durumlarında standart k-ε modeli üzerinde, performans artırıcı olarak realizable k-ε modeli adı altında bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Türbülans viskozitesi, μ_t , ifadesinde, sabit bir değer yerine değişken C_μ terimi kullanılarak standart k-ε modelindeki katı yüzeye dik şekil değiştirme bileşenlerinin değeri küçültülmüştür. Ayrıca, ε transport denkleminde yerel şekil değiştirme hızını esas alan farklı bir kaynak terimi kullanılmıştır. C_μ^* için yeni bir denklem tanımlanmış olup Denklem 2.20’de verilmiştir.

$$C_\mu^* = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}} \quad (2.20)$$

Buradaki terimlerin elde edilişleri Çizelge 2.6'daki gibidir.

Çizelge 2.6. Realizable k-ε modelindeki türbülans viskozitesi (C_μ^*) terimleri

$$A_0 = 4$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad \phi = \frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6}W) \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad \tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k^* \quad \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k^*$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2}(\bar{u}_{i,j} - \bar{u}_{j,i})$$

$\bar{\Omega}_{ij}, \omega_k^*$ açısal hızı ile dönen eksen takımına göre ölçülen ortalama rotasyon hızı tansörüdür.

Realizable k-ε modelinde yeni ε transport denklemi Denklem 2.21'de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (2.21)$$

Bu modeldeki sabitler;

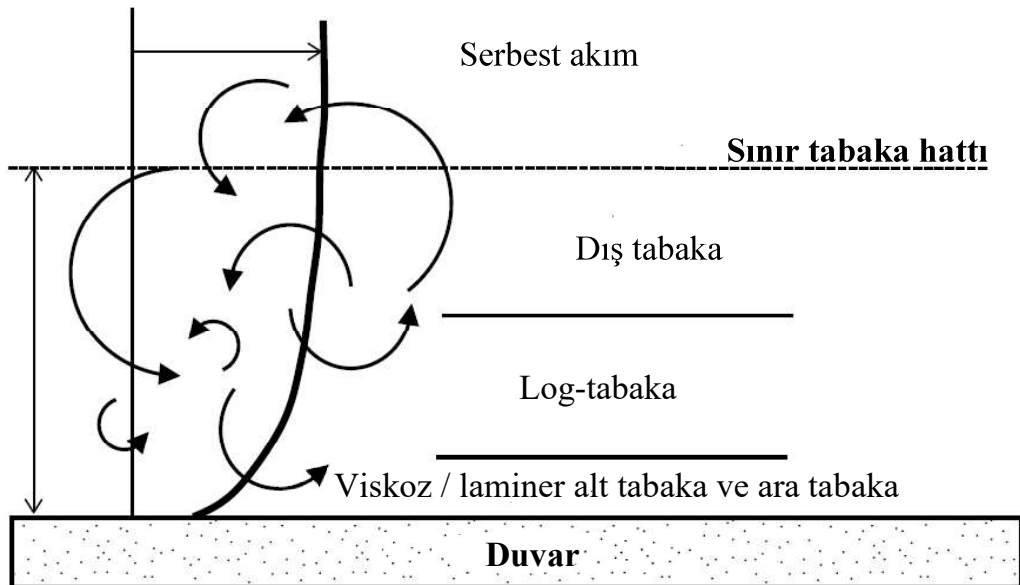
$$C_1 = \max \left[0,43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad S = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$$

$$C_2 = 1,9, \quad \sigma_k = 1,0, \quad \sigma_\varepsilon = 1,2 \quad (\text{Soydan ve ark. 2018}).$$

k-ε türbülans modelleri duvardan belirli bir mesafeden itibaren geçerli olduğundan, duvara yakın bölgelerde akışı doğru bir şekilde belirlemek için **duvar fonksiyonlarına** (duvar yasalarına) ihtiyaç duyar (Cederlund ve Vikström 2010). Çünkü hız profilinin değişim göstermesi türbülans modellerinin ortalama hız profili için mantıklı bir çözüm bulmasını zorlaştırır. Duvar fonksiyonları sınır tabaka içerisinde yaklaşık bir hız profili oluşturur ve sınır tabakanın dışında daha üniform olan hız profili ile çakıştırır. Böylece duvar ile ana akış arasında bir köprü görevi görür. Aksi takdirde, türbülans modelini değiştirip düşük Reynolds modellerine geçmek gerekir (Tabatabaian 2015).

Duvar fonksiyonları deneylerden türetilen yarı ampirik fonksiyonlardır (Cederlund ve Vikström 2010). Bu fonksiyonlar; HAD simülasyonlarında çok yoğun ağ oluşmasını engellemek için ya da bazı türbülans modelleri viskozitenin etkili olduğu duvara yakın bölgelerde geçerli olmadığı için kullanılır (Andersson ve ark. 2012). Yoğun ağ yapısı gerektirmediği için hesaplama maliyeti ve zamanından tasarruf sağlanır (Tabatabaian 2015). Duvar fonksiyonu yaklaşımı pek çok uygulamada yeterli doğruluğu sağlar. Ancak, akış çarpıklığı yüksekse ya da akış laminerse duvar fonksiyonu yerine duvara yakın bölgelerde geçerli olan türbülans modelleri kullanılabilir (Cederlund ve Vikström 2010). Yüksek derecede basınç gradyanları büyük ayrılmalar ya da çarpan akışlar da duvar fonksiyonlarının doğru sonuçlar vermesini zorlaştırır (Andersson ve ark. 2012).

Sınır tabaka kalınlığı, duvardan itibaren ana akım hız değerinin %99'una ulaşıldığı mesafe olarak tanımlanır. Türbülanslı bir akış için duvara yakın bölgede genel olarak 4 akış rejimi bulunur. Duvara komşu bölgede viskoz alt tabaka (laminer alt tabaka), bunun üzerinde ise ara tabaka bulunur. Ara tabakada akış türbülansa doğru bir geçişe başlar. Ara tabakanın üzerinde hızın duvardan olan mesafenin logaritması ile orantılı olduğu tam türbülanslı logaritmik tabaka (log-tabaka) yer alır. Log-tabakanın kalınlığı viskoz ve ara tabakaların toplam kalınlığından çok daha fazladır. Şekil 2.26'da türbülanslı sınır tabaka içindeki farklı tabakalar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Tipik bir türbülanslı sınır tabaka ve bölümleri (Tabatabaian 2015)

Hız ve uzunluk için ölçekler tanımlamak fayda sağlamaktadır. $\bar{u}$ dış bölgedeki, u_w viskoz alt tabakadaki hız olmak üzere boyutsuz hız (Denklem 2.22):

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_w} \quad (2.22)$$

ve duvardan itibaren boyutsuz mesafe (Denklem 2.23):

$$y^+ = \frac{yu_w}{\nu} \quad (2.23)$$

olarak tanımlanabilir. y^+ yerel Reynolds sayısı olarak da bilinir. Bu boyutsuz iki sayıyı içeren Denklem 2.24 logaritmik duvar yasası olarak bilinir.

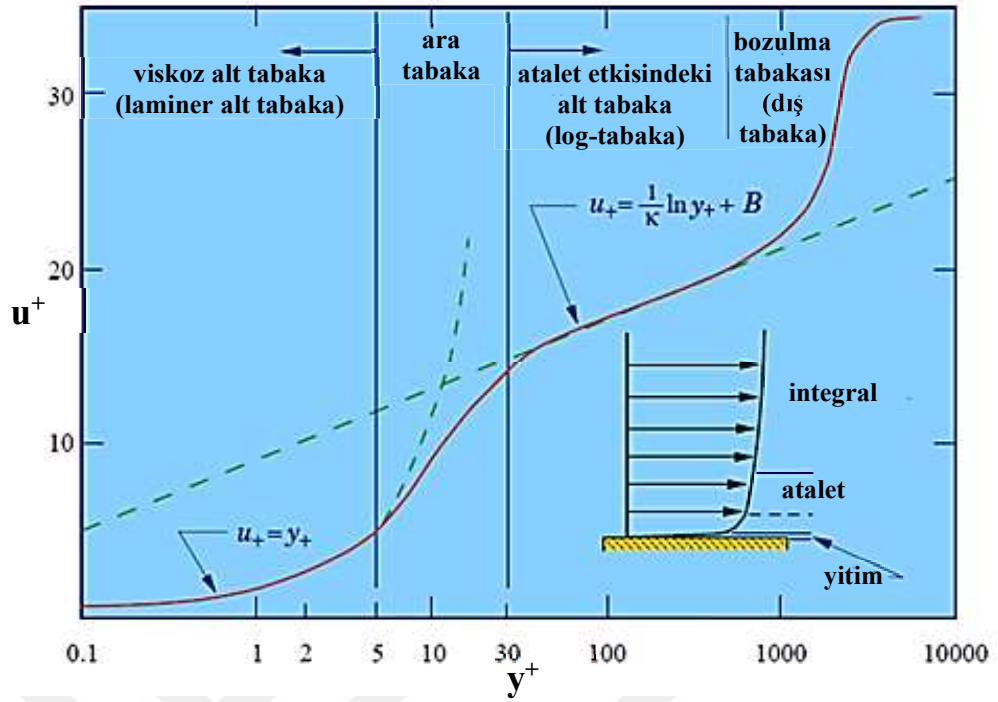
$$u^+ = C \ln y^+ + B \quad (2.24)$$

Bu denklemin deneysel olarak çok defa sağlaması yapılmıştır. Burada $C = 1/\kappa$ ($\kappa \approx 0,41$, Karman sabitidir.) ve $B = 4,9 - 5,5$ olarak verilir. Bu fonksiyonun logaritmik formundan dolayı geçerli olduğu bölgeye logaritmik tabaka (log-tabaka) adı verilir (Tabatabaian 2015).

Sınır tabaka içindeki tabakalar, y^+ değerlerine göre şu şekilde sınıflandırılabilir;

- $0 < y^+ < 5$ viskoz (laminer) alt tabaka
- $5 < y^+ < 30$ ara tabaka
- $30 < y^+ < 400$ logaritmik tabaka (tam türbülanslı)

Viskoz alt tabakada hız y^+ ile lineer olarak değişirken, ara tabakada farklılaşır ve logaritmik yasaya doğru yaklaşır (Şekil 2.27) (Andersson ve ark. 2012). Ara bölgede her iki duvar fonksiyonu da tam sonuç vermez.



Şekil 2.27. Duvar fonksiyonları ve geçerli olduğu bölgeler (Anonim 2020b)

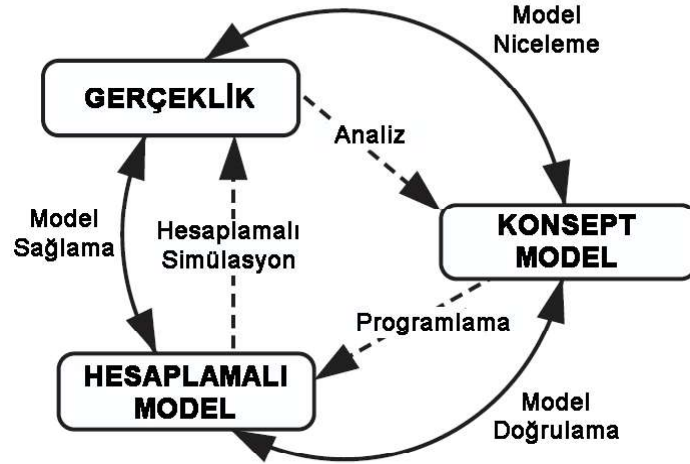
Duvar fonksiyonu kullanıldığında duvara komşu olan ilk ağ elemanına ait noktanın log-tabakada yer alması gerekmektedir. İdeal olarak bu nokta log-tabakanın en alt kısmına denk gelmelidir. Böylece sınır tabakada mümkün olan en fazla sayıda eleman bulunacaktır. Bu şartı sağlayabilmek için y^+ değeri 30-100 aralığında olmalıdır. Ağ yapısı ayarlarının hatalı girilmesi sonucu $y^+ < 30$ çıkabilir. Ancak çoğu HAD kodu duvar fonksiyonları çalışırken çok küçük y^+ değerleri için düzeltme yapar. $y^+ > 300$ ile yapılan hesaplamalardan ise kaçınılmalıdır (Andersson ve ark. 2012).

HAD uygulaması birkaç adımdan oluşur. İlk adım geometrik modelin oluşturulmasıdır. Sıfırdan bir geometri oluşturulabilir, hazır bir geometri kullanılabilir ya da fiziksel bir model taranarak geometri verisi elde edilebilir. Geometrik model kapalı, hava geçirmez olmalıdır. Ayrıca; akışı etkilemeyen ancak hesaplamayı zorlaştıracak gereksiz detaylar ortadan kaldırılmalıdır. Bu işleme geometrik model temizleme adı verilir. İkinci adım, modelin elemanlara ayrıldığı ağ oluşturma adımındır. Üçüncü adımda, çözüm işlemi gerçekleştirilerek akış simülasyonu yapılmış olur. Çözüm öncesinde kullanılacak sınır şartları, türbülans modeli, varsa duvar fonksiyonu, çözüm algoritması, yakınsama kriterleri vb. belirlenir. Son adımda ise son-işlem (post-processing) faaliyetleri ile akış analiz edilir (Olsson 2011).

2.1.6. Nümerik çalışmalarda doğrulama ve sağlama

Doğrulama (verification) ve sağlama (validation), hesaplamalı simülasyonlarda doğruluğu ve güvenilirliği değerlendirmek için temel araçlardır. Kısaca doğrulama hesaplamalı çözümün doğruluğunu bilinen çözümlerle kıyaslayarak değerlendirmektir. Sağlama ise hesaplamalı çözümün doğruluğunu deneysel verilerle kıyaslayarak değerlendirmektir. Doğrulamada simülasyonun gerçek dünya ile ilişkisi ele alınmaz. Sağlamada ise bu ilişki üzerinde durulur. Bir başka deyişle; doğrulama temelde matematiksel bir faaliyet iken, sağlama bir fiziksel faaliyettir.

Bilgisayar Simülasyonu Topluluğu (Society for Computer Simulation – SCS) tarafından kabul edilen, modelleme ve simülasyonun aşamalarını, doğrulama ve sağlamanın rolünü gösteren şema Şekil 2.28’de görülmektedir.



Şekil 2.28. Modelleme-simülasyonun aşamaları ve doğrulama-sağlamanın rolü (Oberkampff ve Trucano 2002)

Konsept model fiziksel sistemi ya da süreci tanımlayan tüm bilgi ve matematiksel modeli içerir ve fiziksel sistemin analiz edilmesi ve gözlemlenmesi ile oluşturulur. HAD için konsept modelde kütle korunumu, momentum ve enerji ile ilgili kısmi diferansiyel denklemler hakimdir. Ek olarak HAD modeli türbülans modelleri, kimyasal reaksiyon modelleri ve sınır şartları gibi yardımcı denklemleri de içerir.

Hesaplamalı model konsept modeli uygulayan bilgisayar programıdır. Bu modele bilgisayar modeli de denebilir (Oberkampf ve Trucano 2002).

Doğrulamanın temel stratejisi hesaplamalı modeldeki ve çözümündeki hataları tanımlama ve ölçmedir. Doğrulama faaliyetlerinde hesaplamalı çözümün doğruluğu yüksek iki tip çözümle karşılaştırılarak ölçülür; analitik çözüm ve doğruluk seviyesi üst düzeyde olan sayısal çözüm.

Doğrulama faaliyetleri öncelikle hesaplama kodunun geliştirme aşamasında gerçekleştirilir. Doğrulama faaliyetlerindeki doğruluk gereksinimleri sağlama faaliyetlerindeki genel olarak daha sıklıdır.

Roache, kod doğrulaması ile hesaplama doğrulaması arasındaki ayrımı vurgular. Hesaplama doğrulaması belirli bir hesaplamanın doğruluğunu delillendirme üzerine odaklanır. Örneğin, hesaplama doğrulaması ağ yakınsamasının tasdik edilmesini gerektirir (Oberkampf ve Trucano 2002).

Richardson extrapolasyonuna dayalı Ağ Yakınsama Endeksi (Grid Convergence Index – GCI) ağ yakınsama hatasını tahmin etmek için geliştirilmiştir. GCI herhangi bir ağ eleman sıklıştırma oranı kullanılarak elde edilen hata tahminlerini ona denk olan çift kat eleman sayısına ait tahmine dönüştürür (Oberkampf ve Trucano 2002).

GCI hesaplanan değerin asimptotik nümerik değerden ne kadar uzak olduğunu gösteren yüzdesel bir ölçüdür. GCI bir hata bandını gösterir. Daha sık bir ağ yapısına geçildiğinde çözüm değeri ne kadarlık bir değışim olacağını belirtir. GCI değeri küçük olması hesaplamanın asimptotik aralıkta olduğuna işaret eder (Anonim 2019c).

Ağ eleman sayısı arttıkça (akış hacmindeki ağ elemanları küçüldükçe) ve zaman adımı küçüldükçe konuma ve zamana bağılı ayrıklaştırma hataları asimptotik olarak sıfıra yaklaşmalıdır. Bu sına her hangi bir ağ noktasındaki çözüm için uygulanabileceğı gibi çözüm fonksiyonlarına da (sürüklenme, vb.) uygulanabilir (Anonim 2019c).

Ağ yakınsamasının kontrolü nümerik çalışmalar için bir gerekliliktir. Denklemlerin doğru bir şekilde çözülüp çözülmediği ve çözümün ağ çözünürlüğünden bağımsız olup olmadığı kontrol edilir. Ağ yakınsama kontrolü aşağıdaki adımlar takip edilerek yapılabilir.

1. Sabit bir sıklaştırma oranı (r) kullanılarak en az üç simülasyon (kaba, orta, sık) gerçekleştirilir.
2. Ağ yakınsamasının göstergesi olacak bir akış parametresi seçilir. Genellikle bu parametre ilgili çalışmada incelenen parametrelerden biri olur.
3. Yakınsama derecesi (p) hesaplanır (Denklem 2.25).

$$p = \ln\left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}\right) / \ln(r) \quad (2.25)$$

Burada;

f_1 , sık ağ yapısını,
 f_2 , orta ağ yapısını,
 f_3 , kaba ağ yapısını,

temsil etmektedir.

4. $h=0$ değerini tahmin etmek için Richardson ekstrapolasyonu uygulanır. $f_{h=0}$, sıfır ağ boşluğu için hesaplanan (Denklem 2.26) değerdir.

$$f_{h=0} = f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r^p - 1} \quad (2.26)$$

5. $GCI_{1,2}$ ve $GCI_{2,3}$ değerleri hesaplanır (Denklem 2.27).

$$GCI = \frac{F_s |\varepsilon|}{r^p - 1} \quad (2.27)$$

Burada F_s güvenlik katsayısıdır. İki ağ yapısı incelendiğinde F_s değerinin 3 alınması, üç ve daha fazla ağ yapısı incelendiğinde F_s değerinin 1,25 alınması tavsiye edilir. ε ise, iki ağ yapısı için hesaplanan değerleri (f_i , f_{ii}) kıyaslamakta kullanılan bağıl hatadır (Denklem 2.28).

$$\varepsilon = \frac{f_{ii} - f_i}{f_i} \quad (2.28)$$

6. Kullanılan ağların asimptotik yakınsama aralığında olup olmadığı (Asimptotik Yakınsama Kriteri, $AYK \approx 1$) kontrol edilir (Denklem 2.29).

$$AYK = \frac{GCI_{2,3}}{r^p GCI_{1,2}} \cong 1 \quad (2.29)$$

Çalışma sonunda incelenen parametrenin tahmin değeri $f_{h=0}$ olarak kabul edilebilir. Sık ağ yapısı kullanıldığında GCI değeri, daha önce verilen Denklem 2.27’le hesaplanabileceken, kaba ağ yapısı tercih edildiğinde GCI değeri Denklem 2.30’la hesaplanabilir (Anonim 2019c).

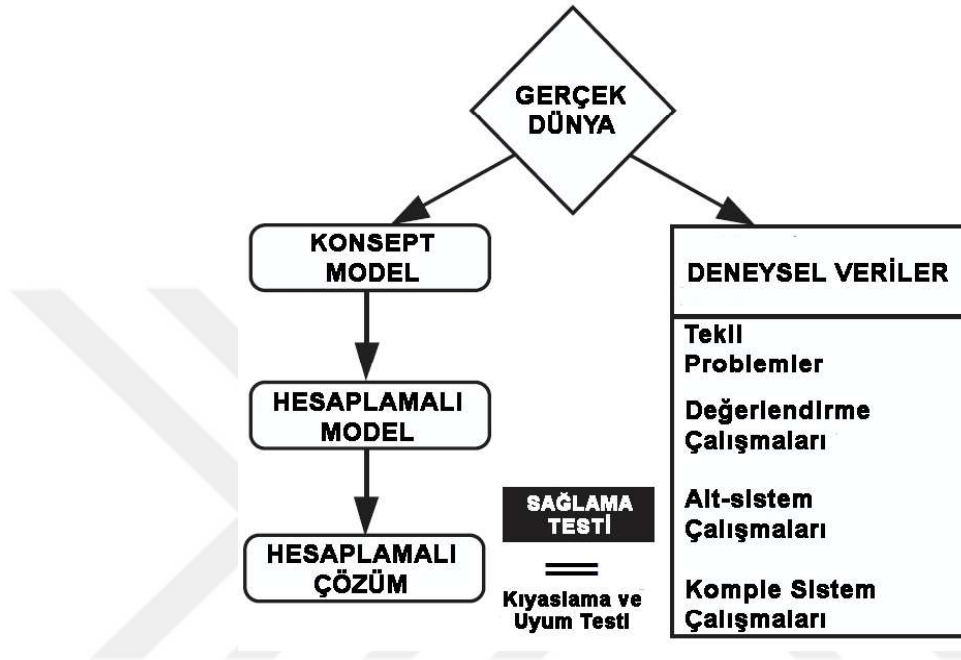
$$GCI = \frac{F_s |\varepsilon| r^p}{r^p - 1} \quad (2.30)$$

Roache, GCI’nın hesaplama doğrulaması ile ilgili tüm sorulara cevap vermese de HAD çalışmaları için hazırlanan sonuç raporlarında belirli bir düzen getirmesi anlamında fayda sağladığını belirtmiştir. Ferziger; “Herhangi bir çözüm, olmayan çözümden iyidir.” görüşünün tehlikeli olduğunu bildirmiştir. Hesaplamalı bir çalışmada en büyük sorunun inanılacak kadar iyi sorun çıkaracak kadar kötü hesaplama sonuçları olduğunu ifade etmiştir (Roache 1994).

Sağlamanın temel stratejisi hesaplamalı sonuçların deneysel verilerle hangi doğruluk seviyesinde uyduğunu değerlendirmektir. Bu strateji konsept ve hesaplamalı modellerdeki hata ve belirsizliğin tanımlanması ve ölçülmesini, hesaplamalı çözümdeki nümerik hatanın ölçülmesini, deneysel belirsizliğin tahmin edilmesini ve hesaplamalı sonuçlarla deneysel verilerin karşılaştırılmasını içerir.

Bu kısaca doğruluğun deneysel verilere nispeten ölçüldüğü anlamına gelir. Sonuçta deneysel veriler gerçekliğin elimizdeki en iyi ölçüsüdür. Böyle bir metot deneysel ölçümlerin hesaplamalı sonuçlara göre daha doğru olduğunu varsaymaz. Sadece deneysel ölçümlerin gerçekliğin en güvenilir yansıması olduğunu kabul eder.

Şekil 2.29 modelleme ve simülasyon sürecine ait hesaplamalı sonuçlarla deneysel sonuçların karşılaştırılmasını göstermektedir. Karmaşık sistemlerde sağlama deneylerinin yapılması elverişsiz olduğu için öbek yapı yaklaşımının kullanılması tavsiye edilir. Bu yaklaşım karmaşık mühendislik sistemini üç veya daha fazla kademeye böler: alt-sistem, değerlendirme, tekil problem.



Şekil 2.29. Sağlama süreçleri (Oberkampff ve Trucano 2002)

Komple sistem deneylerinde veriler gerçek işletme koşullarında ölçülür. Ancak ölçüm kalitesi karmaşık sistemlerde genel olarak sınırlıdır. Bu deneysel verilere karşılık olarak güvenilir bir hesaplamalı çözüm aracına ihtiyaç duyulur. Ancak hesaplamalı modelin ihtiyaç duyduğu deney şartlarını (akış hızı, çoklu akışkanların termo-fiziksel özellikleri, gibi) ölçmek zor hatta bazen imkansızdır. Bazen gerekli çoğu modelle parametresi ölçülmeden kalır ve deneysel belirsizlik analizi gerçekleştirilmez (Oberkampff ve Trucano 2002).

Hesaplamalı çözüm için ağ yakınsaması hatası tahmin edilemezse sağlama aşaması ile ilgili bir sonuca ulaşamayacağı söylenebilir. Aynı tez sadece bir adet deneysel ölçüm yapıldığı durumda da geçerlidir. Geleneksel mühendislik ve bilimde ağ yakınsaması hatasını hesaplamamaya göre tek bir deneysel ölçüme güvenmek daha kabul edilebilir görülür.

İncelenen sisteme ve beklentilere bağılı olarak farklı doğruluk kriterleri belirlenebilir. Örneğin; %10'luk bir hata doğruluk kriteri olarak seçilebilir.

Deneysel ölçümlerde sıfır hatanın olduğu kabul edilirse sağlama ölçüsü (S) aşağıdaki denklemle (Denklem 2.31) bulunabilir. N adet konum olduğunda; $y(x_i)$ her bir konum için hesaplamalı çözüm değeri, $Y(x_i)$ her bir konum için deneysel ölçüm değeridir. Bu durumda sağlama ölçüsünün $S=1$ 'e yakın olması istenecektir.

$$S = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tanh \left| \frac{y(x_i) - Y(x_i)}{Y(x_i)} \right| \quad (2.31)$$

Deneysel ölçümlerde hata öngörerek Z adet ölçümün yapıldığı durumda ise $Y(x_i)$ yerine ortalama değer olan $\bar{Y}(x_i)$ (Denklem 2.32) kullanılacaktır. Z değeri arttıkça sonuç gerçek değere yaklaşacaktır.

$$\bar{Y}(x_i) = \frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z Y_z(x_i) \quad (2.32)$$

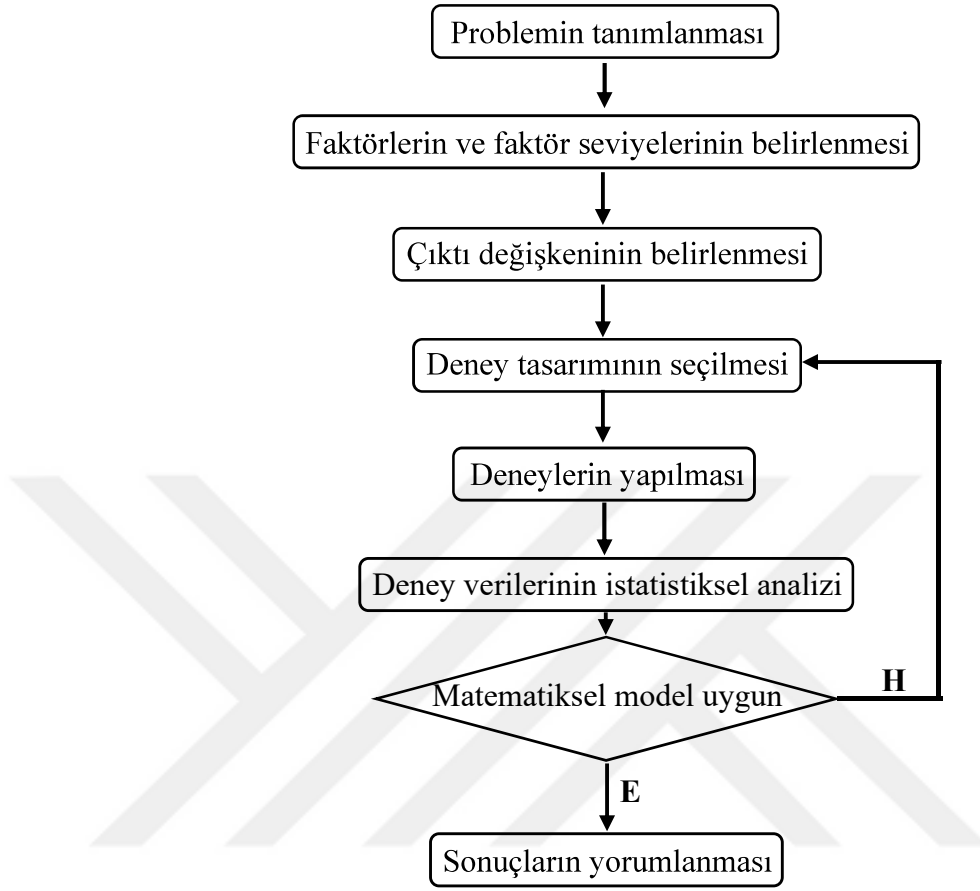
Sağlama aşamasından sonra ise sağlaması yapılmış durumdan farklı olan başka durumlar için, sağlaması yapılmış hesaplamalı model yardımıyla sonuçların tahmin edilmesi (prediction) gerçekleştirilir (Oberkampf ve Trucano 2002).

2.1.7. Deney tasarımı ve istatistiksel analiz yöntemleri

Ürün/süreç tasarımında kararların verilmesi için gerekli olan güvenilir bilginin elde edilmesi deneyler yardımıyla yapılmaktadır. Bu deneyler ciddi bir mühendislik çalışması gerektirir (Mistree ve ark. 1993).

Deney tasarımı ve analizi, bir ürün veya prosesin performansını geliştirmek ya da iyileştirmek amacıyla, ürün veya prosesi dolaylı ve/veya direkt olarak etkileyebilecek olan faktörlerde değişiklik yapılması, yapılan değişikliklerin gözlenmesi ve değerlendirilmesidir.

Deney tasarımı yapılırken takip edilen prosedür Şekil 2.30’da gösterilmiştir.



Şekil 2.30. Deney tasarımının uygulanma süreci (Demir 2004)

Deney tasarımının son aşamasında elde edilen verilerden bir sonuca ulaşmak için istatistik biliminden yararlanılır. İstatistiksel bir yorum yapılabilmesi için, elde edilen verilerin birbirinden bağımsız olması gerekir. Sağlıklı sonuçlar için, doğruluğuna güvenilebilir verilere ve bu veriler için de daha deney tasarımı aşamasında verilerin sayısı ve nasıl toplanacağı iyi değerlendirilmelidir (Demir 2004).

Deney Tasarımı, ilk olarak 1920’lerde ünlü İngiliz istatistikçi R.A. Fisher ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Fisher aynı zamanda, **varyans analizi (ANOVA)** tekniğini de geliştirmiştir. Fisher, aritmetik düzenlemenin en uygun yolunun ANOVA olduğunu söylemiştir (Gökçe ve Taşgetiren 2009). ANOVA, iki veya daha fazla örnekten elde edilen ortalamaların birbirinden farklılıklarını test etmeyi sağlayan analiz yöntemidir (İzgiz 1999).

Klasik ya da geleneksel yöntem ile yapılan deney çalışlarında her seferinde bir parametre değiştirilir ve diğer bağımsız parametreler sabit tutulur. Bir-seferde-bir-faktör (one-factor-at-a-time, OFAT) adı verilen bu yöntemde sistemin parametrelerinin arasında o anda değiştirilen parametrenin sisteme etkisinin araştırılması yapılır.

Geleneksel yöntemler ile yapılan deneysel çalışmalarda parametreler arasındaki etkileşim göz ardı edilmektedir. Ayrıca zaman ve maliyet anlamında kayıp yaşanmaktadır. İstatistiksel olmayan deney tasarımı yöntemleri kullanıldığında varyasyon ve regresyon analizi sonuçları bazen etkin süreci ya da işlemi belirleyemeyebilir.

İstatistiksel deney tasarımının amacı, minimum zaman ve maliyetle maksimum anlamlı verileri toplamaktır. Bundan dolayı deney tasarımı geleneksel yöntemlerden uzak ve yeni bir yaklaşım getirir.

İstatistiksel deney tasarımında tam faktöriyel, kesirli faktöriyel veya faktöriyel tasarımların özel bir uygulaması olan Taguchi metodu kullanılabilir.

Tam faktöriyel deney tasarımı en az iki veya daha fazla parametre ve bu parametrelere ait en az iki veya daha fazla seviyenin bulunduğu deneylerde seviyelerin tüm kombinasyonlarını içerir. Tam faktöriyel deneylerin analizinde ANOVA ve regresyon analizi kullanılmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak bir parametrenin deney üzerindeki etkisi hesaplanabilir. ANOVA ve regresyon analizi teknikleri işlem sırasında bir değişiklik yapmadan farklılıkların kaynağının belirlenmesine yardımcı olur.

Tam faktöriyel deney tasarımında parametrelerin bütün seviyelerinin kombinasyonları tek tek denendiğinden, deney maliyeti artmakta ve deneyler çok zaman almaktadır. Yani tam faktöriyel deney tasarımında maksimum zaman ve maliyet söz konusudur. Maliyetten ve zamandan kazanmak için deney sayısı orantılı olarak azaltılarak *kesirli faktöriyel* deney tasarımı elde edilir.

Taguchi yöntemi; çoğu zaman kesirli faktöriyel deney planlarının kullanıldığı bir deney tasarımı ve optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem parametre seviyelerinin optimum kombinasyonunu saptamak için oldukça yararlıdır (Gökçe ve Taşgetiren 2009).

Pazarın takip edilebilmesi, Ar-Ge ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve yüksek kaliteli ürün elde edilmesi için bilginin verimli bir şekilde üretilmesi şarttır. Taguchi yönteminde kullanılan Taguchi ortogonal dizileri minimum zaman ve kaynak kullanarak bu verimliliğe katkıda bulunur (Mistree ve ark. 1993). Ortogonallık bir parametrenin seviyelerinin diğer parametrelerin seviyeleri ile aynı sayıda eşleştirilmesi (dengeleme) olarak tanımlanabilir (İzgiz 1999).

Taguchi yöntemi sayesinde deneyler öncesinde yapılan ayrıntılı analiz ve değerlendirmeler ışığında gereken deney sayısını önemli şekilde düşürmek mümkün olmuştur. Diğer taraftan deney sayısında elde edilen azalma, faktörler arasındaki etkileşimlerin belirli ölçüde göz ardı edilmesinden kaynaklanmaktadır (Savaşkan ve ark. 2004).

Taguchi deney tasarımı yönteminde elde edilen deney sonuçları sinyal/gürültü (S/G) değerine çevrilerek değerlendirilmektedir. Taguchi varyasyonu azaltacak şekilde hedefe ulaşmak için farklı hedefler için farklı S/G hesaplamaları tanımlamıştır.

S/G değeri; “daha küçük daha iyi”, “daha büyük daha iyi”, “nominal değer en iyi” olarak kalite değişkeninin (çıktı değişkeninin) hedef türüne göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir. Bu ifadeler Denklem 2.33-2.35’te verilmiştir. Burada; n deney sayısını, Y çıktı değişkenini, $\bar{Y}$ çıktı değişkenine ait ortalama değeri ve σ standart sapmayı temsil etmektedir (Şirvancı 1997).

$$\text{Daha küçük daha iyi} \quad S/G = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (2.33)$$

$$\text{Daha büyük daha iyi} \quad S/G = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (2.34)$$

$$\text{Nominal değer en iyi} \quad S/G = 10 \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{\sigma^2} \right) \quad (2.35)$$

Değerlendirmede hangi S/G tipi kullanılırsa kullanılsın daha büyük S/G değeri daha iyi deney sonucunu ifade eder. Böylelikle ele alınan durumlar içerisinde en yüksek S/G'yi veren seviye kombinasyonu en iyi performansı verecektir.

Bir parametrenin belirli bir seviyesini içeren deney kombinasyonlarına (örneğin, A parametresinin 1. seviyede olduğu kombinasyonlara) ait çıktı değişkeni değerlerinin ortalaması her deneysel metotta elde edilebilir. İlaveten Taguchi metodunda, S/G'lerin ortalamaları da benzer şekilde hesaplanabilir. Bu iki tip ortalama değeri incelenerek,

- parametrenin, çıktı değişkenini ve S/G'yi ne yönde etkilediği,
- parametrenin, çıktı değişkenini ve S/G'yi ne kadar etkilediği,

kabaca değerlendirilebilir.

İlave olarak ANOVA ile de hangi faktörlerin ne derecede önemli oldukları istatistiksel olarak ortaya konulabilir.

Sonuç olarak hem ortalama değerlerle (çıktı değişkeni ve S/G'ye ait ortalama değerlerle) hem de ANOVA - Regresyon yardımıyla sistemi optimum performansa ulaştıracak faktör kombinasyonu tespit edilebilir (Savaşkan ve ark. 2004). Bu kombinasyon deney planında denenmiş değilse bu kombinasyon da denenerek **sağlama deneyi** yapılabilir (Mistree ve ark. 1993).

ANOVA ve regresyon analizi sonucunda elde edilen verilerin yorumlanması için bazı **gösterge değerler** mevcuttur.

Bu göstergelerden p-değeri, “istatistiksel olarak anlamlı bir fark oluşturmaz” hipotezinin (farksızlık hipotezi – null hypothesis) reddedilmesi durumunda hata yapmış olma olasılığını verir. Bir başka bakış açısıyla, p-değeri gözlemlenen anlamlılık düzeyi hakkında bilgi verir (Montgomery ve Runger 2014). Fisher, bu değerin maksimum kabul edilebilir düzeyini 0,05 olarak önermiştir ve bu düzey yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kriter kullanıldığında bir test sonucunda bulunan p-değeri 0,05'in altında ise yapılmış olan karşılaştırma sonucunda anlamlı bir farklılık bulunduğu anlaşılmış olur (Anonim 2020c).

Yüzdesel katkı (YK) modeldeki her bir terimin toplam kareler toplamına (total sum of squares) yüzdesel olarak ne kadar katkı sağladığını ölçer. Bu değer modeldeki her bir terimin göreceli olarak önemini göstermede kaba ancak işlevselliği yüksek bir göstergedir (Montgomery 2017). YK değerinin hesabı Denklem 2.36'da görülmektedir. Burada SS_T toplam kareler toplamını ve SS_i ilgili terime ait kareler toplamını temsil etmektedir.

$$\% Katkı (YK) = \frac{SS_i}{SS_T} \quad (2.36)$$

Matematiksel bir model için düşünüldüğünde, p-değeri oluşturulan modelin farksızlık hipotezini destekleyecek bir modelle karşılaştırıldığında anlamlılığını gösterir. Yani bir modelin p-değeri, girdi değişkenleri ile çıktı değişkeni arasında model tarafından açıklanabilen önemli bir ilişki olup olmadığını bildirir (Belazi ve ark. 2019).

Belirtme katsayısı (R^2) bir regresyon modeli için yaygın olarak kullanılan bir değerlendirme kriteridir. Kareler toplamı değerlerinin (SS) oranlanması ile elde edilir. R^2 deney verilerinde bulunan değişkenliğin (varyasyonun) oluşturulan regresyon modeli tarafından açıklanabilen miktarıdır. Regresyon modelinin yeterliğine karar vermekte sıklıkla kullanılır. R^2 değerinin hesabı Denklem 2.37'de görülmektedir. Burada; SS_R regresyona ait kareler toplamını ve SS_T toplam kareler toplamını temsil etmektedir (Montgomery ve Runger 2014).

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} \quad (2.37)$$

2.2. Bilimsel Araştırmalar

Yan aynanın aerodinamiği ile ilgili yapılmış olan bilimsel çalışmalardan bazıları Çizelge 2.7'de listelenmiştir. Çizelgede, çalışma nümerik ise kullanılan çözüm metoduna ait konfigürasyon (ağ / meş parametreleri, analiz modeli, vb.), çalışma deneysel ise kullanılan deneysel metoda ait konfigürasyon (rüzgâr tüneli tipi, analiz hacmi, vb.), incelenen girdi/çıktı parametreleri ve çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Çizelge 2.7. Yan aynanın aerodinamiği ile ilgili bilimsel çalışmalar

Yazar (Yıl)	Akış Konfigürasyonu	Temel Sonuçlar
Yu ve Liu (2011)	- Sayısal analizler için kullanılan akış hacmi 800 mm genişlik, 800 mm yükseklik ve 1600 mm uzunluktadır. Ayna analiz alanının orta noktasına yerleştirilmiştir. - 2,17 milyon tetrahedral ağ oluşturulmuştur. 30 m/s hız ve realizable k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. - 14 farklı ayna köşe ve sırt profili incelenmiştir. 3000. iterasyondaki sonuçlar alınarak karşılaştırılmıştır.	- Dolgun yüzey daha düşük katsayı değeri verebilir ve akım yönlendirme etkisi daha iyidir. Dikiz ayna gibi küt şekilleri, yumuşak geçişli dış büyük halde tasarlamak daha iyidir. - Aynanın arka kısmında silindirik bölgeden küresel bölgeye geçiş (dönüm yeri) şekli, basınç katsayısı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Eğrisel sürekli bir yüzey aynanın ön ve arka yüzeyleri arasındaki basınç farkını ve sürüklenme katsayısını düşürebilir. - Yan ve arka yüzey arasındaki dönüm yerinin kenarı akış hızına paralel tasarlanmalıdır. Diğer bir yöntem akışı aşağı yöne yönlendirmek olacaktır. Böylece geri sirkülasyon (spot) bölgesi küçülecek, yitim enerjisi düşecek ve basınç sürüklenme farkı (differential pressure drag) azalacaktır.
Khalilghı ve ark. (2013)	- Deneyler 2 m yüksekliğinde, 3 m genişliğinde ve 4 m uzunluğunda açık rüzgâr tüneline yapılmıştır. - Çalışmada binek araç ve kamyon olmak üzere farklı 2 ayna modeli, 30 m/s sabit hızda -10°, 0°, $+10^\circ$ olmak üzere 3 farklı sapma açısında incelenmiştir. - Nümerik analizler 7 milyon ve 17 milyon olarak 2 farklı ağ yapısında LES-SL türbülans modeli ile 10^{-5} s zaman adımı çözülmüştür.	- Çalışmada denenen ağ eleman sayıları için, C_p değerlerindeki değişim, daha ince ağ kullanıldığında daha hassas yakalanmıştır. - GMT 360 model ayna için, yüzey basınç salınımlarının lokal maksimumları, akışın ayrıldığı (üst kısım) ve birleştiği (alt kısım) bölgelerde oluşmuştur. - LES modeli, geri sirkülasyon bölgesi büyüklüğünü ve şeklini hassas bir şekilde tahmin etmiştir. - Akış ayrılması; GMT360 modelde tepe noktasında; GMX320 modelde ise, tepe noktasına ulaşmadan gerçekleşmiştir. - Anlık akış alanları ile ortalama akış alanları ciddi değişiklik göstermiştir. - GMT360 model ayna için, $+10^\circ$ sapma açısında, basınç kareler ortalamasının karekökleri (rms) çok daha yüksek çıkmıştır.

Çizelge 2.7. Yan aynanın aerodinamiği ile ilgili bilimsel çalışmalar (devam)

Yazar (Yıl)	Akış Konfigürasyonu	Temel Sonuçlar
Afğan ve ark. (2008)	- Nümerik analizler 26 m/s hızda ve $3,2 \cdot 10^5$ Reynolds sayısında LES – Standart Smagorinsky türbülans modeli ile $2,5 \cdot 10^{-4}$ s zaman adımı çözödürölmüştür. - Analizlerde 3,1 milyon ayna gövdesine doğru incelecek şekilde tetrahedral ve polyhedral olarak 2 farklı ağ yapısı kullanılmıştır.	- Yapılandırılmamış ağ kullanımı, yapılandırılmış uyarlanmış (conforming) ağ kullanımına göre; daha kolay, daha esnek, çok daha az zaman alıcıdır. - Ancak, polyhedral ağ hücreleri üzerinde, uyarlanmamış (non-conforming) tetrahedral ağ hücreleri üzerindeki göre, kinetik enerjinin korunumu özellikleri daha iyi sağlanmaktadır. - Akış; ayna arka yüzeyindeki yukarı akımda (0,1525.D mesafede) laminar ayrılmalı olarak, tamamen üç-boyutlu çıkmıştır. - Ayna üzerindeki C_p profili incelendiğinde, durma noktasının (stagnation point), silindiri için de küre için de sıfır derecede yer aldığı görölmüştür. - Akışta, çok küçük boyut oranı (aspect ratio) sebebiyle, klasik Karman girdap saçılması (Karman vortex shedding), neredeyse hiç rastlanmamıştır. - Aynanın ucuna yakın bölgelerde, akış hızı yaklaşık %30-40 artmıştır. - Akış birleşme noktası, aynanın cisim-ardı (wake) bölgesinde, yaklaşık 2,75.D mesafesinde oluşmuştur.
Alam ve ark. (2007)	- Deneyler 3 m genişliğinde, 2 m yüksekliğinde ve 9 m uzunluğundaki kapalı rüzgâr tüneline yapılmıştır. - Yarım araç modeli üzerinde çalışmalar yapılmıştır. - Analizlerde 60, 80, 100 ve 120 km/sa olmak üzere 4 farklı hız ve ayna üzerine 24, 34 ve 44 mm ek kaplama yapılmış aynalar kullanılmıştır.	- Salınlı basınç, tüm gömölme mesafeleri için ayna yüzeyi merkezinin üst kısmında en yüksek büyüklüğe ulaşmıştır. Ancak gömölme mesafesi artıkça değeri düşmüştür. - Tipik bir yan aynanın dış çevresini uzatmak, genel olarak temel basınç salınlılarını azaltmış ve ayna yüzeyi boyunca dağılımını değiştirmiştir.

Çizelge 2.7. Yan aynanın aerodinamiği ile ilgili bilimsel çalışmalar (devam)

Yazar (Yıl)	Akış Konfigürasyonu	Temel Sonuçlar
Jaitlee ve ark. (2004)	- Deneyler; yarım araç modeli ile 3 m genişliğinde, 2 m yüksekliğinde ve 9 m uzunluğundaki kapalı rüzgâr tüneline 60, 80, 100 ve 120 km/sa olmak üzere 4 farklı hızda yapılmıştır.	- En düşük yüzey ortalama basınç, 80 km/sa hız hariç tüm hızlarda aynanın sağ alt köşesinde bulunmuştur. - Maksimum salımlı basınç da tüm hız testlerinde ayna yüzeyinin merkezinin alt kısmında, kenara yakın yerlerde ölçülmüştür. - 3B ve kontur grafikler, salımlı basıncın ayna yüzeyi üzerinde düzgün şekilde dağılmaktansa, merkezin alt kısmında yoğunlaştığını açıkça göstermiştir. Bunun, köşelerdeki güçlü akış ayrılması nedeniyle olduğu inanılır. - Genel olarak, salımlı basıncın büyüklüğü arttıkça kesikli kuvvet ve aerodinamik ses oluşma ihtimali de artar. - Hızın artmasıyla, etkilenen alan ve salımlı basıncın büyüklüğü artar. - Ortalama basınç için oluşturulan 3B grafikler ve konturlar sağ alt köşede önemli bir basınç düşüşü göstermiştir. (60 km/sa hızda hariç.) (Bunun muhtemel sebebi A-direğinin vorteksi ile olan etkileşim olarak belirtilmiştir.) - Ortalama basınç düşük olduğunda salımlı basınç yüksek olmaktadır. Ancak bu, maksimum salımlı basıncın, en düşük ortalama basınçta gerçekleşeceği anlamına gelmemektedir.
Xiaohui ve ark. (2010)	- Nümerik analizler 1,6 m genişliğinde ve yüksekliğinde, 2,4 m uzunluğundaki analiz hacminde ayna zemine yerleştirilerek yapılmıştır. - Analizler 38,9 m/s hız ve 0,11 Mach sayısında 3,2 milyon ağ sayısında LES-SL ve LES-WALE türbülans modelleri kullanılarak yapılmıştır.	- Ortalama basınç salımlarının tahminindeki eğilim, deneyle karşılaştırıldığında az farklılık göstermiştir. LES-SL model, geçişli akış alanı tahmini için daha mantıklı olmuştur. - Aerodinamik ses yayınının mekanizması ortaya çıkarılmıştır. Bu sesin esas olarak aynadan dökülen güçlü vortekslerin saçılmasıyla olduğu saptanmıştır. - Duvar basınç salımları ve ses yayını iki modelle karşılaştırılırken, deneysel sonuçlarla her iki modelde de uyumsuzluklar görülmüştür. Ancak LES-SL modeli ayna tahminleri için daha uygun bulunmuştur.

Çizelge 2.7. Yan aynanın aerodinamiği ile ilgili bilimsel çalışmalar (devam)

Yazar (Yıl)	Akış Konfigürasyonu	Temel Sonuçlar
Yemenici (2017)	- Deneyler 0,3 m yüksekliğinde, 0,7 m genişliğinde ve 2 m uzunluğundaki açık rüzgâr tüneline yapılmıştır. Ayna, giriş alanından 1 m uzağa zemine bir plaka vastasıyla sabitlenmiştir. Tünelin model blokaj oranı %2,9'dur. - Deneylerde 25 m/s ve 35 m/s hızlar ve bunlara karşılık gelen $8 \cdot 10^4$ ve $1,1 \cdot 10^5$ Reynolds sayıları kullanılmıştır.	- Statik basınç katsayısı dağılımı dikiz aynası üzerinde düzgün bir şekilde gerçekleşmiştir. - Yan aynanın maksimum ve minimum basınç katsayıları sırasıyla ayna yüzeyinin merkez alt bölümünde ve ayna yüzeyinden sınır tabaka ayrılma noktasında bulunmuştur. - Ayna ön yüzeyinin statik basıncı yüksek Reynolds sayılarında daha düşük değerler almıştır.
Su ve Yu (2012)	- Nümerik analizler 1,6 m genişliğinde, 1 m yüksekliğinde ve 2,4 m uzunluğundaki analiz hacminde gerçekleştirilmiştir. Ayna hava girişinden 1 m ileriye zemine yerleştirilmiştir. - Analiz 38,5 m/s hız, $7,7 \cdot 10^5$ Reynolds ve 0,11 Mach sayısında yaklaşık 2 milyon tetrahedral ağ yapısı oluşturularak kendi geliştirdikleri paralel LES türbülans modeli ile yapılmıştır.	- Çalışmadaki nümerik örnek; küçük ölçekli, paralel sonlu hacim LES'in (SSS-modeli) başarılı olduğunu göstermiştir. SSS-modeli, herhangi bir eddy viskoz katsayısına ihtiyaç duymamıştır. - Analiz modelinde bantlı ve aralıklı olan ters filtreleme operatörünün yalnızca ağ sistemine bağlı olduğu bildirilmiştir. - Ağ yapısı sabitlendiği sürece, filtrelenmemiş büyüklüklerin her bir zaman adımında hesaplanması için gerekli olan iterasyon sayısının da sabit olacağı belirtilmiştir. - Nodların, hücrelerin ve ara yüzeylerin sırasının ayarlanması, paralel işlemenin verimliliğini sağlamıştır.

Çizelge 2.7. Yan aynanın aerodinamiği ile ilgili bilimsel çalışmalar (devam)

Yazar (Yıl)	Akış Konfigürasyonu	Temel Sonuçlar
Murukesava ve ark. (2013)	- Nümerik analizlerde 3 farklı ayna modeli, 17 m/s ve 33 m/s olmak üzere 2 farklı hız kullanılmıştır. - Analizler standart k-ε modeli ile yapılmıştır.	- Aerodinamik basınçtaki salınım, otomobil ayna yüzeyinde düzgün olarak dağılmamıştır. - Basınç katsayısındaki salınım, en yüksek büyüklüğe, aynanın ön yüzeyinin merkezinde ulaşmıştır. - Basınç katsayısındaki salınım, en düşük büyüklüğe, aynanın arka yüzeyinin keskin kenarlarında ulaşmıştır. - Yarım silindir ve çeyrek küreden oluşan ayna modeli, en düşük sürüklenme katsayısı ile en küçük kaldırma katsayısını vermiştir. - Araç etrafında negatif basınç katsayısı varken, ayna etrafında pozitif basınç katsayısı (0,4 ila 0,6) görülmüştür. - Kaldırma katsayısı tüm durumlarda -0,05 ile 0,3 arasında değerler almıştır.
Ask ve Davidson (2009)	- Nümerik çalışmalar 2,4 m uzunluk, 1,6 m yükseklik ve genişlikteki analiz hacminde yapılmıştır. Ayna hava girişinden 0,9 m ileriye yerleştirilmiştir. - Analizlerde 5,83, 11,8 ve 31,1 milyon olmak üzere 3 farklı ağ yapısı DES (S-A), dinamik SL ve SL model olmak üzere 3 farklı türbülans modeli ile çözülmüştür.	- Adveksiyon şemalarının seçimi, DES modelinden kaçınıldığı sürece alt akış basınç salınımları üzerinde küçük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. - Dinamik SL modelinin bir dezavantajı, her 1000 Hz’te gerçekleşen salınımlar olmuştur. - Dinamik SL ve SL modelleri geniş türbülans skalalarını temsil etmede önemli iyileştirmeler göstermiştir. - Ayrıca bu iki modelin hem laminar ayrılma noktasını hem de laminardan türbülanslı sınır tabakaya geçiş noktasını yakalama potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. - Ancak dinamik modelde salınımlar beklendiği için aynı zamanda daha basit (CPU işlem zamanı açısından) daha basit bir model olan SL tavsiye edilmiştir. - Aynanın laminar ayrılma çizgisi yakınında, deneysel ve hesaplamalı ortalama basınç değerleri (bu değerler aynanın sınır tabakasında duvar fonksiyonu kullanımından bağımsız) tam örtüşmemiştir.

Çizelge 2.7. Yan aynanın aerodinamiği ile ilgili bilimsel çalışmalar (devam)

Yazar (Yıl)	Akış Konfigürasyonu	Temel Sonuçlar
Igali ve ark. (2019)	Nümerik analizler; 1 m genişlik, 1,87 m yükseklik ve 9 m uzunluğundaki analiz hacminde yaklaşık 1,7 milyon ağ sayısında, 40 m/s hızda ve standart k-ε, k-ω ve SST (kayma gerilmesi taşınımı) türbülans modelleri kullanılarak yapılmıştır.	- Karşılaştırma, tüm incelenen modeller arasında en iyi sonuçları şaşırtıcı şekilde SST modelin ürettiğini göstermiştir. - Durma noktasına karşılık gelen en yüksek basınç, aracın ön tarafında olmuştur. - Aracın ön kısmında hız, statik basıncın artışına götürerek, durma noktasına yakın değerlere düşer. Ayrıca, uygun basınç gradyanları sayesinde köşeler etrafında hızın artmaya başladığı görülebilir. Bu basınçta düşüşe göttür. - Cisim-ardı bölgesi yakınlarında ve eğim üzerindeki sınır tabakada türbülans kinetik enerjisinin üretildiği görülmüştür. - İki denklemlilik üç RANS modeli sonuçları, deneysel sonuçlar ve literatürdeki diğer LES modeli sonuçları ile iyi korelasyon göstermiştir. En iyi sonuçlar SST model tarafından üretilmiştir. - Zaman ortalamalı akış şartları için daha iyi sonuçlar vermese de kullanılan RANS modelleri uygun ağ yapısı ve sayısal şemalarla gerçekte pek çok LES modeli kadar iyi performans göstermiştir.
Olsson (2011)	- Hem nümerik analiz hem deneysel çalışmalar yapılarak karşılaştırılmıştır. - Çalışmalarda 140, 160, 180, 200 ve 220 km/sa hızlar; -15°, -10°, -5°, 0°, +5°, +10°, +15° sapma açıları; 1, 4, 7 ve 10 mm ayna iç yarı çapı; düz ve orta ayna gövde eğrilğine bakılmıştır. - Ayrıca aynanın 3, 5, 7 ve 9 mm bağlama yüksekliği; 4, 7, 10, 13, 16 ve 19 mm bağlama mesafesi incelenmiştir. - Çalışmalar da parametreler tekil olarak kullanılmış ve hız 50 m/s alınmıştır.	- Ayna tasarımındaki küçük değişiklikler dahi, ayna etrafındaki ve araç arkasındaki akışı etkilemektedir. - Sürtüklenmede etkili düşüş, şişkin gövde tasarımından yassı olana geçişte yaşanmıştır. Bu düşüş standart bir aynaya sahip tasarımdan aynasız olana geçişte benzer seviyede olmuştur. - Sürtüklenmede değişimin var olduğu sonucu, en azından $\Delta C_D=0,003$ kadarlık bir değişim varsa güvenilir sayılabilir. Bunun sebebi HAD simülasyonlarındaki belirsizliktir. - İyi bir ayna tasarımı gerçekleştirebilmek için tam ölçekli bir rüzgâr tüneli testi ve HAD simülasyonları beraber kullanılmalıdır.

Çizelge 2.7. Yan aynanın aerodinamiği ile ilgili bilimsel çalışmalar (devam)

Yazar (Yıl)	Akış Konfigürasyonu	Temel Sonuçlar
Kim ve ark. (2008)	- Deneyler; 0,7 m yüksekliğe, 0,9 m genişliğe ve 2 m uzunluğa sahip boşaltmalı tip (blow down) rüzgâr tünelinde 25 m/s hızda yapılmıştır. - Çalışmada ayna aparat ve araç üzerine montajlı olmak üzere 2 farklı şekilde yerleştirilerek karşılaştırılmıştır.	- Ayna gövdesi girdap gücünü düşürecek şekilde tasarlanmalıdır. - Girdap yolu gövdeden mümkün olduğunca uzak olmalıdır. - Ayna tarafından oluşturulan girdap tabaka sarmalı araç gövde yüzeyi ile buluşma eğiliminde çıkmıştır. Böylece girdap-gövde etkileşimi ihtimali oluşmuştur. Bu sebeple girdap yolu kontrolü daha da önem kazanmıştır. Bahsedilen etkileşim dikkate alınmazsa (ayna araca monte edilmezse) akış yapısı hatalı analiz edilmiş olabilecektir. - Araca montajlı ayna modeli etrafındaki akış, aparata montajlıdakine göre büyük farklılık göstermiştir. (Özellikle minimum basınç konumunda ve ayrılma odağında) - Araca montajlı modelde minimum basınç alt köşe bölgesinde oluşurken, aparata bağlı modelde üst bağlantı bölgesinde oluşmuştur. - Araca bağlı modelde ayrılma odağı daha zayıf çıkmıştır ve dikey uçta yer almıştır. Diğer modelde ise üst köşede görülmüştür. - Giriş hızı arttığında, vorteks tabaka sarmalı gövde çerçevesine yaklaşmıştır. Bu bir etkileşime ve ses artışına neden olmuştur. - Girdap merkezinin izi, gövde yüzeyine beklenenden daha yapışık çıkmıştır. - Dikey hız vektör alanlarına göre, 2,0 d' deki girdap gücü, 0,5 d' dekinin yarisına kadar azalmıştır.

Çizelge 2.7. Yan aynanın aerodinamiği ile ilgili bilimsel çalışmalar (devam)

Yazar (Yıl)	Akış Konfigürasyonu	Temel Sonuçlar
Thor ve ark. (2015)	- Nümerik çalışmada, analiz hacmi; ayna boyutunun 10 katı yükseklikte, 5 katı genişlikte ve 12 katı uzunlukta tasarlanmıştır. Ayna, girişten, aynanın 2 katı uzunluktaki bir mesafeye ortalanarak yerleştirilmiştir. - Analizlerde k-ε türbülans modeli ve 100 bin ağ eleman sayısı kullanılmıştır. - 0°, 10°, 20°, 30° ve 40° sapma açısı; 20, 30, 40 ve 50 mm bağlama kolu mesafesi ve 60, 70, 80, 90, 100, 110 ve 120 km/sa hız kullanılarak analizler yapılmıştır.	- Hız arttıkça aynaya gelen sürüklenme kuvveti artmıştır. - 30 mm bağlama mesafesinde sürüklenme kuvveti minimum olmuştur. - Daha düşük mesafelerde ayrılma olgusu baskın olmuş, daha yüksek mesafelerde ise izdüşümü alanı daha yüksek olmuştur. (Minimum sürüklenme kuvveti için akış ayrılmasının gecikmesi, izdüşümü alanının minimum olması gerekir.) - Sapma açısı düştükçe izdüşümü alanı artmış böylece sürüklenme kuvveti de artmıştır. - Sapma açısı arttıkça sürüklenme kuvveti azalmakta ancak sürücü görüş alanı daralmaktadır. 20°'lik bir sapma açısının, düşük bir sürüklenme kuvveti ve uygun bir görüş açısı sağlayabileceği belirtilmiştir.
Kato ve ark. (2007)	- Deneyler 1760 mm uzunluk, 500 mm genişlik ve yüksekliğe sahip yarı açık Göttingen tipi rüzgâr tünelinde yapılmıştır. Model blokaj oranı %2,9'dur. Ayna hız giriş alanından 250 mm ileriye yere sabitlenmiştir. - Çalışmalarda 30, 40, 50 m/s olmak üzere 3 farklı hız ve 0°, 15° olmak üzere 2 farklı sapma açısı kullanılmıştır. Referans hız olarak 40 m/s alınmıştır.	ÖN AKIŞ YÜZEYİ - Modelin zaman ortalamalı C_p değerleri (aynanın orta kısmı 0° olmak üzere) $\pm 60^\circ$'de (yaklaşık ayrılma noktasında) minimum olmuştur. - Yağ akış metodu kullanılarak sınır tabakanın yaklaşık 70°'de ayrıldığı gözlemlenmiştir. - C_p' (basınç katsayısı salınımı) yaklaşık $\pm 75^\circ$ de (ayrılma noktasının aşağı-akım bölgesinde) maksimum olmuştur. - Modelin ön yüzeyindeki zaman ortalamalı ve dalgalı basınç dağılımları, Re sayısına önemli bir bağımlılık göstermemiştir. - Zaman ortalamalı C_p dağılımları, sapma açısından neredeyse etkilenmemiştir. ARKA AKIŞ YÜZEYİ - Zaman ortalamalı basınç, Re sayısına çok az bağımlıdır. - Üç Reynolds sayısı için de ayrılma hızları neredeyse aynıdır.

Çizelge 2.7. Yan aynanın aerodinamiği ile ilgili bilimsel çalışmalar (devam)

Yazar (Yıl)	Akış Konfigürasyonu	Temel Sonuçlar
Rodriguez (2016)	- Nümerik çalışmada; 41 m uzunluk, 10 m genişlik ve 12 m yüksekliğe sahip analiz hacmi kullanılmıştır. Analizlerde Audi R8 model araç, hız girişinden 2,75 araç boyu uzunluğa yerleştirilmiştir. - Sınır tabakaya yakın kısımlarda hegzahedral, analiz alanının genelinde ise tetrahedral ağ yapısı kullanılmıştır. Toplam ağ eleman sayısı, yaklaşık olarak 5,5 milyondur. - Analizler 30 m/s hızda, SST türbülans modeli kullanılarak yapılmıştır. - Aynalı tam araç modeli ile aynasız tam araç modeli karşılaştırılmıştır.	- Aynasız modelde, sürüklenme katsayısında %1,4'lük bir düşüş ($\Delta C_D = - \%1,4$) olduğu görülmüştür. - Kaldırma katsayısının ise, aynasız modelde %7,7 arttığı görülmüştür.
Li ve Yang (2011)	- Nümerik çalışmada 1,44 m yüksek, 1,6 m genişlik ve 3 m uzunluğundaki analiz hacmi kullanılmıştır. Ayna girişten itibaren 1,05 m uzaklığa zemine konumlandırılmıştır. - Analizlerde yaklaşık 2,7 milyon hegzahedral ağ yapısı ile DES ve LES-SL türbülans modelleri kullanılmıştır. - $5.2.10^5$ ve $7.4.10^5$ olmak üzere 2 farklı Reynolds sayısı ve 0° ile 15° olmak üzere 2 farklı sapma açısı kullanılarak analizler yapılmıştır.	- LES ve DES, aynanın ortalama akış alanını tahmin etmede kullanılabilir. Ancak LES, deneysel veriye (C_p) daha yakındır. - Ayrılmış akış bölgeleri dışında, C_p dağılımı Reynolds sayılarına bağlı ciddi bir değişim göstermemiştir. - Sapma açısı 0° olduğunda ayna yüzeyindeki ve cisim-ardı bölgesindeki C_p dağılımı simetrik. Arka yüzeydeki C_p, üst akıştakinden büyüktür. (Arka yüzeydeki akış ayrılmasından dolayı) - Sapma açısı 15° olduğunda dağılım simetrik olmamaktadır.

Aerodinamikle ilgili deneysel ve nümerik bazı çalışmalarda deney tasarımı ve analizi yöntemlerinden faydalanılmıştır.

Beigmoradi (2015) Taguchi metodunu uygulayarak nümerik bir çalışma gerçekleştirmiştir. C-direği açısı (arka eğim açısı), bagaj açısı, kuyruk açısı ve arka kutu uzunluğunun aerodinamik ve akustik açıdan en uygun seviyelerini araştırmıştır. Kuyruk açısının ve arka kutu uzunluğunun, aerodinamik sürüklenmeyi düşürdüğünü; arka eğim açısının ise, yükselttiğini gözlemlemiştir. Çalışmasında, kuyruk açısı, incelenen parametreler arasında aerodinamik açıdan en etkili parametre olmuştur.

Moussa ve ark. (2014) şekillerinden dolayı sürüklenme katsayıları yüksek olan SUV tipi araçlarda aracın arka kısmına bir emme yarığı (suction slit) yerleştirerek sürüklenme katsayısını düşürmeyi amaçlamıştır. Çalışmalarında Taguchi optimizasyonunu da içeren bir tasarım otomasyonu geliştirmişlerdir. Programlama dili (VBA) kullanılarak; bilgisayar destekli tasarım (BDT) yazılımı, HAD yazılımı ve Taguchi optimizasyon yazılımı arasında bir arayüz oluşturulmuştur. İncelenen parametreler yarık genişliği, yarık uzunluğu, yarık düşey konumu ve akış hızıdır. ANOVA sonucuna göre en etkili parametreler akış hızı, sonrasında ise düşey konum olmuştur. Maksimum 30 adımla sınırlanan tasarım otomasyonu sonucunda, incelenen 4 parametrenin optimum değerlerine ulaşılmıştır.

Witcher ve ark. (2017) Taguchi L9 dizisini kullanarak çift kanatlı uçaklarda bazı tasarım parametrelerinin (kanatlar arası mesafe, üst kanadın kaydırma mesafesi, akış hızı, uçuş irtifası) düşük hız ve yüksek irtifada etkisini nümerik olarak incelemiştir. Kanatlar arası mesafe ve kaydırma mesafesi en etkili parametreler olarak tespit edilmiştir.

Wang ve ark. (2018) HAD ve Taguchi metodunu beraber kullanarak üç kanatlı düşey eksenli rüzgâr türbininin aerodinamik performansını iyileştirmeyi amaçlamıştır. Elde edilen optimum seviyeleriyle referans modelinkine göre, %18,3 enerji artışı sağlanmıştır.

Zhang ve ark. (2016) HAD ve Taguchi metodunu birlikte kullanan bir optimizasyon yaklaşımıyla biyo-benzetimli bir mikro hava aracı (MHA) tasarlamışlardır.

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu çalışmada taşıtlardaki yan ayna üzerine etki eden aerodinamik yükler farklı ayna modellerinde, sapma açılarında ve hızlarda nümerik olarak incelenmiştir. Ayrıca ayna modelleri içinden farklı bağlama kolu geometrisine sahip modeller seçilerek bağlama kolu geometrisinin yan ayna sürüklenme katsayısına etkisine de bakılmıştır.

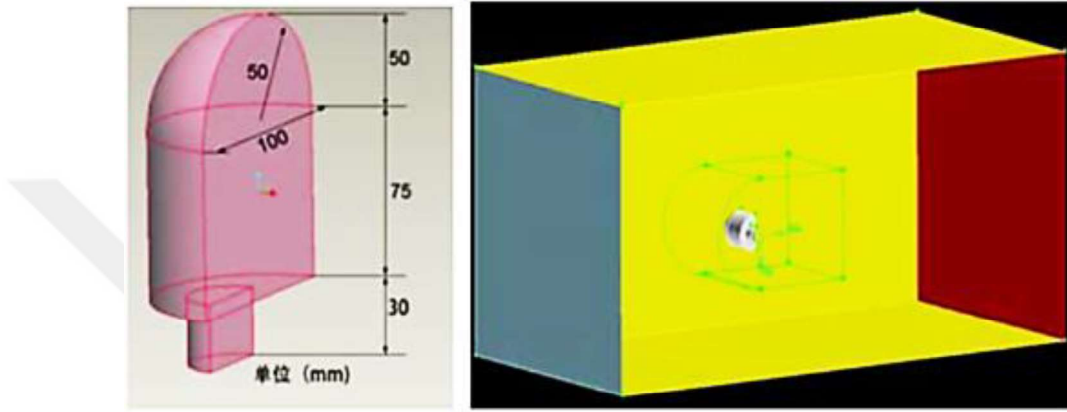
Bunun için öncelikle literatür araştırmalarında bulunan sonuçlarla sağlama çalışmaları yapılmıştır. Ardından sağlaması yapılmış modellerle nümerik analizlere başlamadan önce ağıdan bağımsızlık sağlamak için doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

İncelenen ayna modellerinin geometrileri ve kullanılan nümerik yöntemler hakkında bilgi verildikten sonra uygulanan deney planları sunulmuştur. Ayna modelleri için sapma açısı ve akış hızının; bağlama kolu için ise geometrik faktörlerin (boyut oranı, uzunluk ve yükseklik) etkisi araştırılmıştır. Tüm faktörler 3 seviyede incelenmiştir. Ayna modellerinin karşılaştırılmasında, tam faktöriyel deney planları kullanılmıştır. Bağlama kolu geometrisinin incelenme çalışmasında ise, deney planlarının oluşturulması için Taguchi ortogonal dizilerinden faydalanılmıştır. Sonuçların değerlendirilmesinde; C_D 'den, sinyal/ gürültü (S/G) değerinden (Taguchi metodu için) ve varyans analizinden (ANOVA) yararlanılmıştır.

3.2. Literatür Çalışmalarıyla Sağlama

Nümerik çalışmalarda kullanılacak modelin doğru sonuçlar verip vermeyeceğini kıyaslayabilmek için literatüre geçmiş çalışmalarla doğruluğunun sınanması gereklidir. Bu çalışmada, Yu ve Liu'nun (2011) nümerik çalışmaları ve onların sağlama aşamasında bir başka yayından (Kato ve ark. (2007)'den) aldıkları veriler kullanılmıştır. Bu veriler, standart ayna profili üzerinde rüzgâr tüneli içerisinde yapılmış bir gerçek deneye aittir.

Yu ve Liu'nun (2011) çalışmasında kullandığı ayna modeli birebir modellenerek sağlamaya yapılmıştır. Şekil 3.1'de Yu ve Liu'nun (2011) çalışmalarında kullandığı ayna geometrik modeli ve hesaplama hacmi yer almaktadır. Referans alınan modelin hesaplama hacmi 800 mm genişlik, 800 mm yükseklik ve 1600 mm uzunluk olup ayna tam orta kısma yerleştirilmiştir. Sağlama çalışmasında; analizlerde kullanılacak olan 800 mm genişlik, 800 mm yükseklik ve 1200 mm uzunluktaki hesaplama hacmi kullanılmış ve ayna girişten 400 mm ileriye yerleştirilmiştir.

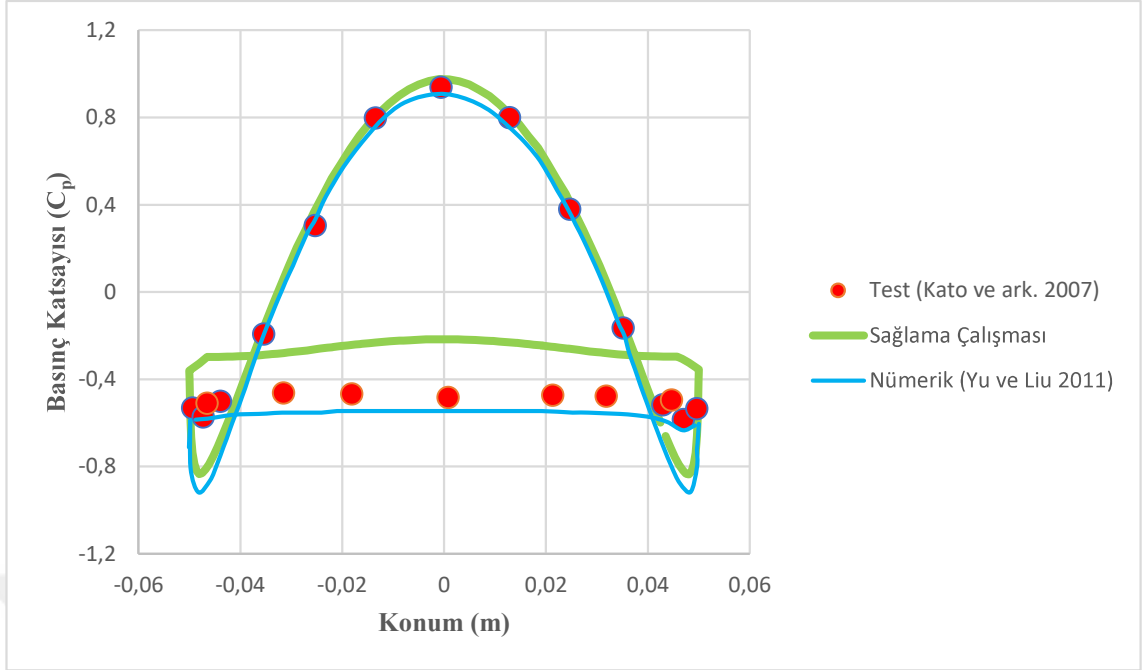


Şekil 3.1. Sağlamada kullanılan referans model ve hesaplama hacmi (Yu ve Liu 2011)

Yu ve Liu'nun çalışmalarında kullandığı ağ yapısına yakın bir ağ yapısı oluşturulmuş olup analizlerinde kullandıkları; giriş sınır şartı olarak 30 m/s hız, çıkış sınır şartı olarak sıfır basınç gradyanı ve realizable k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Ayna yüzeyi ve oluşturulan analiz hacmi duvarları pürüzsüz yüzey olarak değerlendirilmiştir. Çözüm algoritması olarak SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) kullanılmıştır. Analiz şartları ve yakınsama kriterleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Analiz şartları ve yakınsama kriterleri

Parametre	Değer
Analiz Şartları	
Hava akış hızı	30 m/s
Hava çıkış basıncı	0 kPa
Türbülans modeli	Realizable k-ε
Duvar modeli	Scalable
Yakınsama Kriterleri	
Süreklilik	10^{-4}
Hız (x-y-z)	10^{-6}
k	10^{-5}
ε	10^{-5}



Şekil 3.2. Rüzgâr tüneli deneyleri ile nümerik hesaplamaların sonuçlarının karşılaştırılması (Re=1,64 10⁵)

Sağlama çalışması ile Yu ve Liu'nun (2011) yapmış olduğu nümerik çalışma ve Kato ve ark. (2007) yapmış olduğu deneysel çalışma, benzer bir grafik sergilemektedir. Şekil 3.2'de de bu durum görülmektedir. Özellikle ayna ön yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı test verileri ile çok uyumludur. Ayna arkasında meydana gelen girdaplı yapı ve vorteks oluşumu nedeniyle birebir sonuçlar elde edilemese de grafiği paralel olarak takip eden bir sonuç elde edilmiştir.

Ayrıca, Yu ve Liu'nun çalışmasında ayna sürüklenme katsayısı $C_D = 0,452$ olarak tespit edilirken, yapılan doğrulama çalışmasında $C_D = 0,455$ olarak bulunmuştur. Grafik üzerinde verilen basınç katsayıları ve sürüklenme katsayısı uyumlu çıkmıştır.

Sağlama çalışmasının başarısını niceliksel olarak ifade edebilmek için sağlama ölçüsü (S) (Denklem 2.31) hesaplanmıştır. Kato ve ark.'ın (2007) deneysel sonuçları mevcut çalışmada bunlara karşılık gelen nümerik sonuçlar (Şekil 3.2) ve hesaplanan S değeri Çizelge 3.2'de görülmektedir. Tüm ayna için S=0,74, havanın çarptığı ön kısım için ise S=0,82 olarak elde edilmiştir.

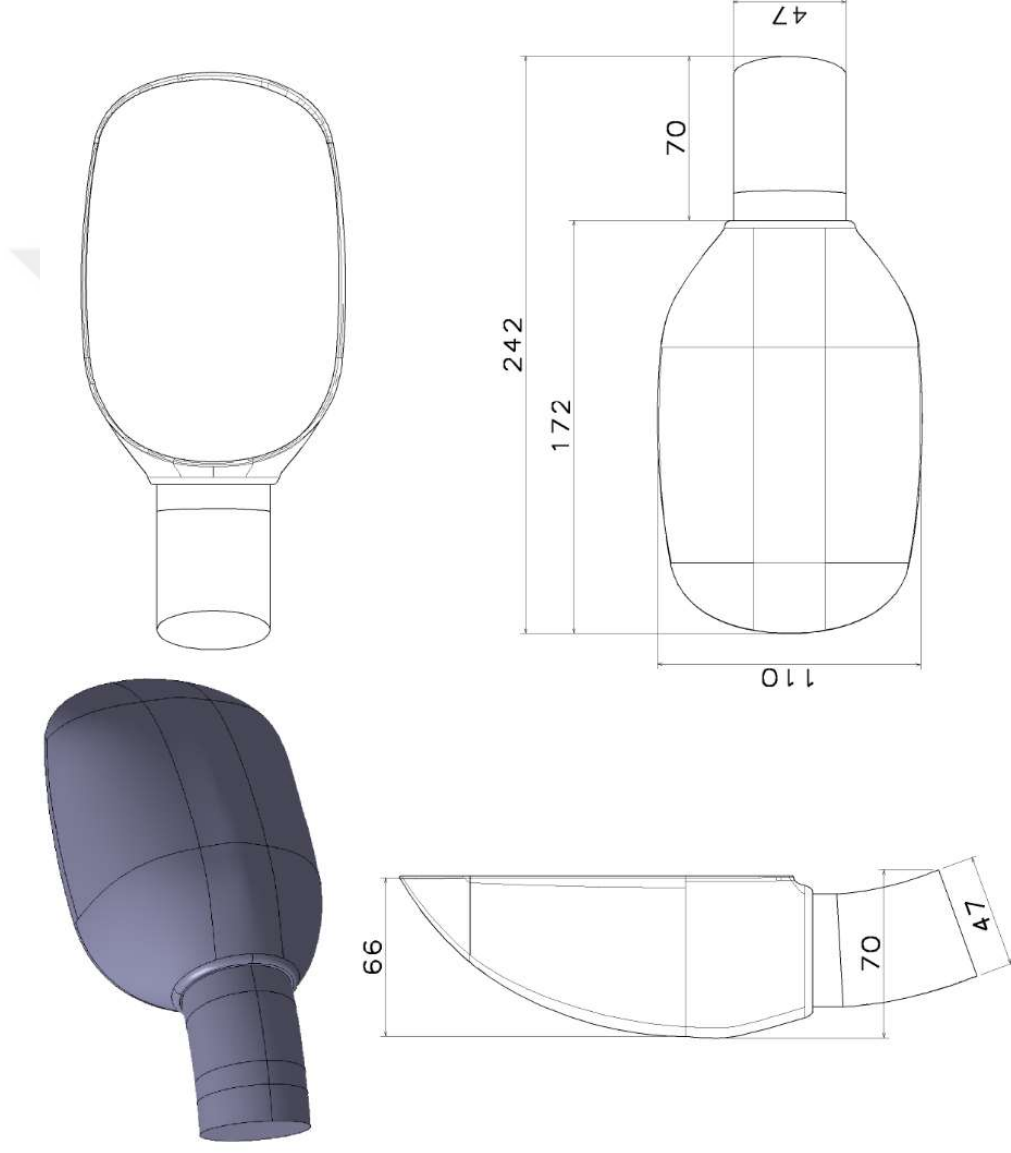
Çizelge 3.2. Deneyisel sonuçlar (Kato ve ark. 2007) ile çalışmada bunlara karşılık gelen nümerik sonuçlar ve sağlama ölçüsü (S)

	Y	C _p (Deneyisel) (Kato ve ark. 2007)	C _p (Nümerik) (Sağlama Çalışması)
ÖN	-0,049425347	-0,531546149	-0,736633539
	-0,047310698	-0,572054881	-0,830978632
	-0,043907078	-0,499577228	-0,656292021
	-0,035449711	-0,191934818	-0,139949664
	-0,025353291	0,305490758	0,363918543
	-0,013538449	0,79851107	0,820653081
	-0,000625983	0,939344133	0,976085484
	0,012782382	0,800209188	0,817755699
	0,024588611	0,380970881	0,367081761
	0,035111406	-0,164801842	-0,139384568
	0,042884604	-0,51655841	-0,533796012
	0,046917634	-0,58404015	-0,817608774
	0,04956756	-0,534191768	-0,563667893
ARKA	-0,046573616	-0,508781521	-0,29708913
	-0,031524351	-0,46264931	-0,278521806
	-0,018171359	-0,466303956	-0,243241429
	0,00071836	-0,483149781	-0,216675699
	0,021313581	-0,472788799	-0,250450969
	0,031805613	-0,476628022	-0,278925836
	0,044591951	-0,493867614	-0,296427488
Sağlama Ölçüsü		S (Ön)	0,82342
		S (Arka)	0,58155
		S (Tüm)	0,73876

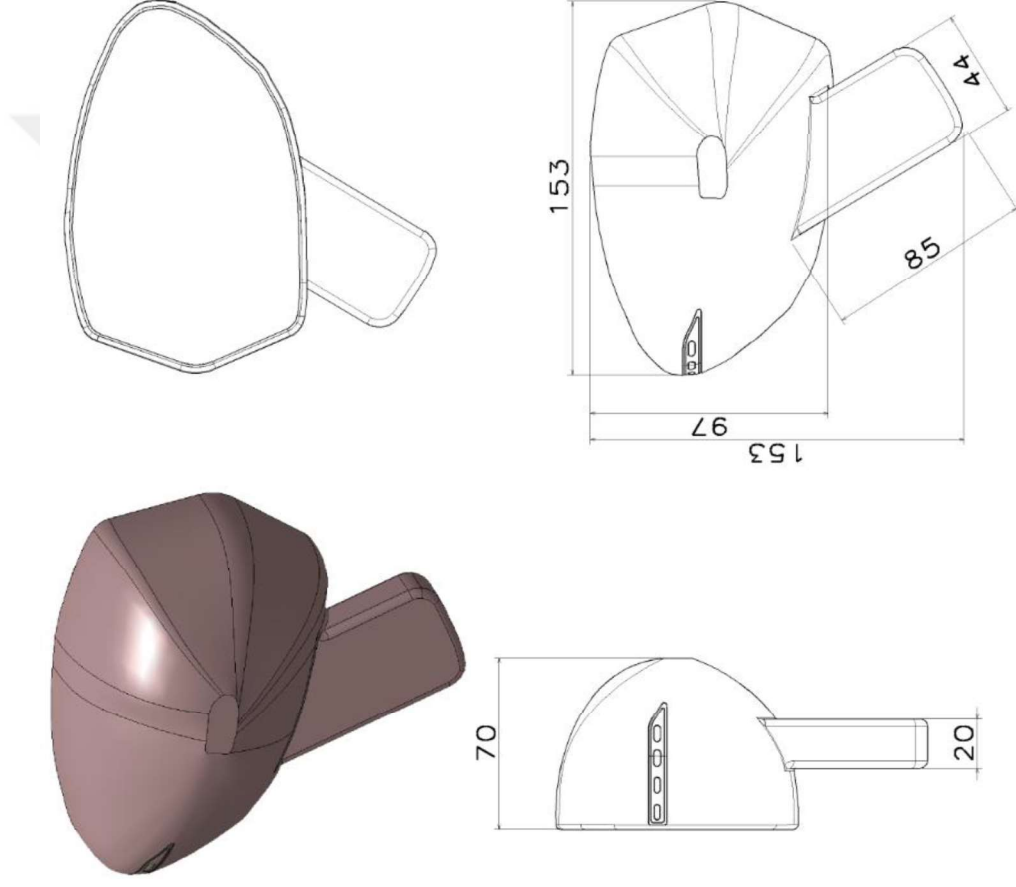
3.3. Ayna Geometrisi ve Akış Alanı

Dört farklı geometriye sahip ayna modeli üzerine etkiyen aerodinamik yükler; $V = 20, 30, 40$ m/s araç hızlarında ve $\beta = -10^\circ, 0^\circ$ ve 10° sapma açılarında incelenmiştir. Ayrıca yan ayna bağlama kolu geometrisi de boyut oranı, uzunluk ve yükseklik değişkenleri açısından değerlendirilmiştir.

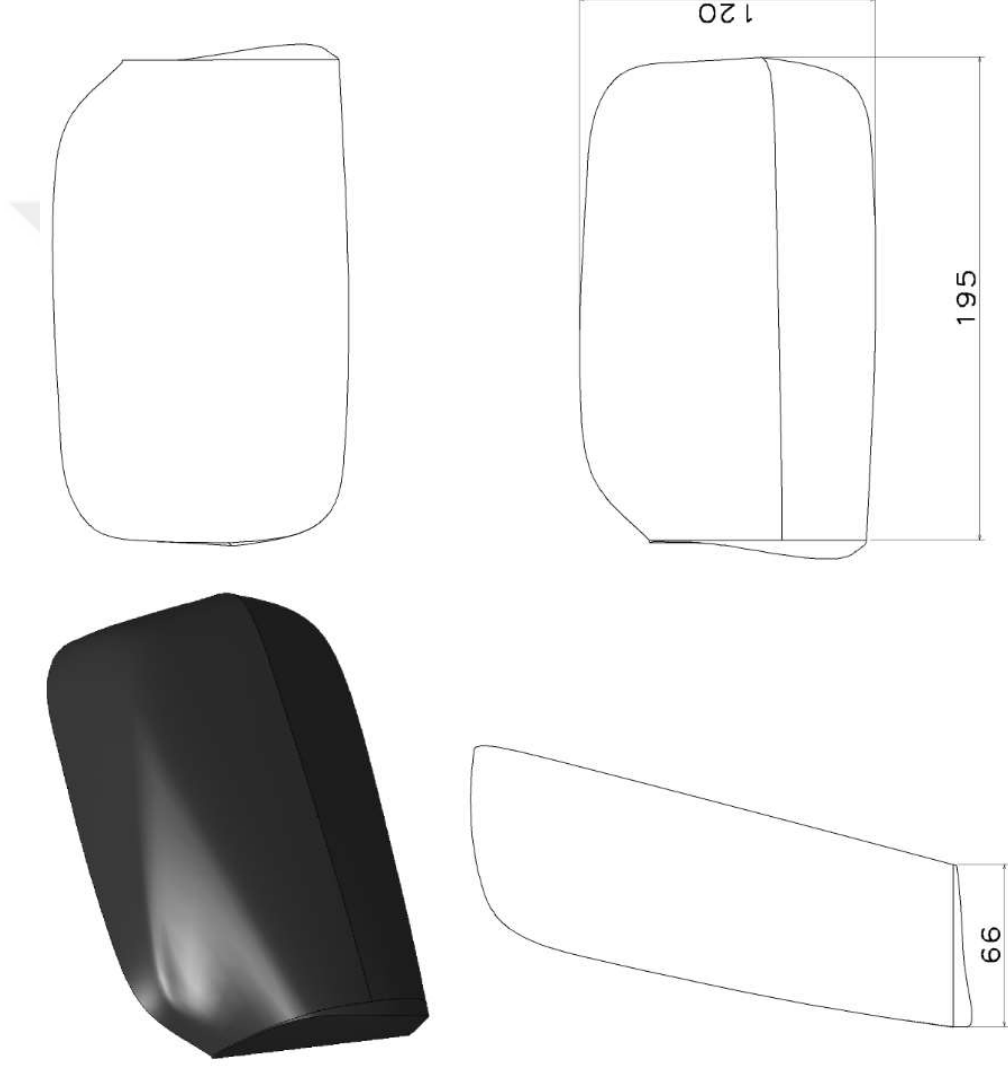
Kullanılan ayna modellerinin standart versiyonlarına ait geometrik modeller ve temel ölçüler Şekil 3.3-3.6'da sunulmuştur.



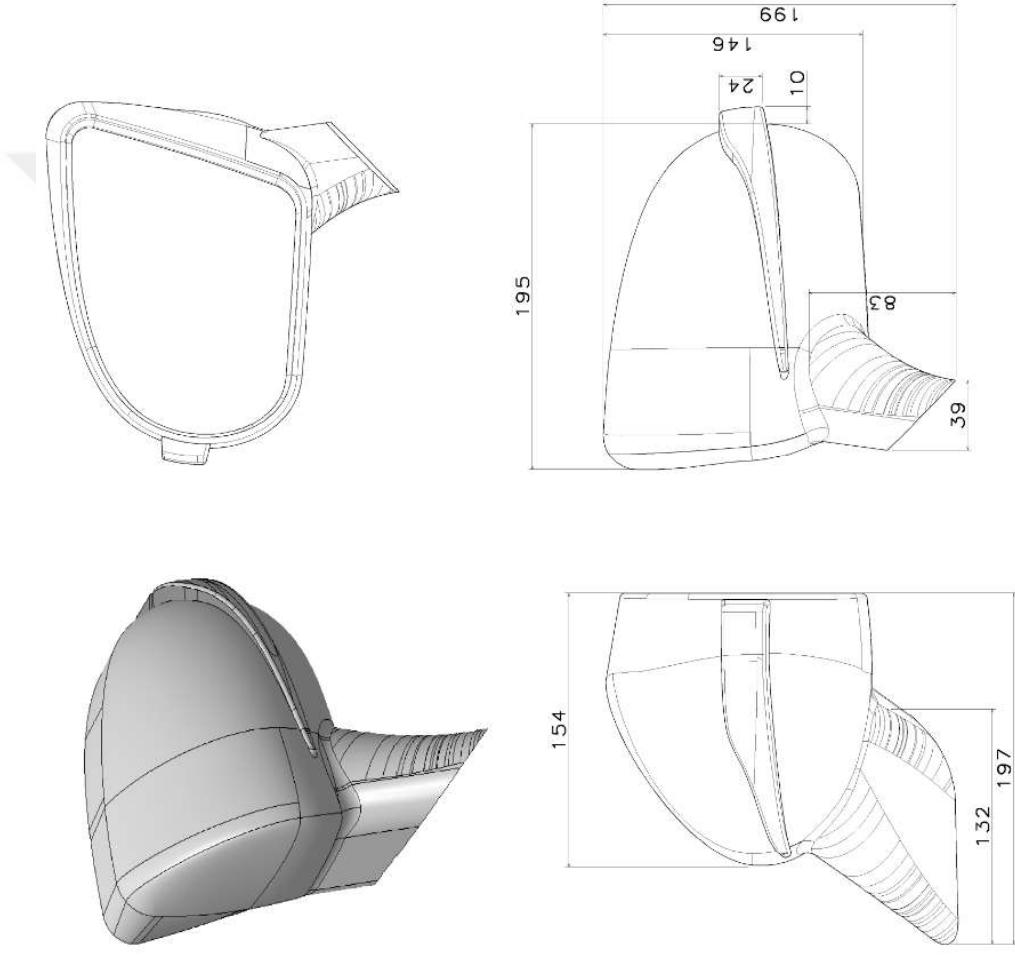
Şekil 3.3. Model 1'e ait geometrik model ve temel ölçüler



Şekil 3.4. Model 2'ye ait geometrik model ve temel ölçüler

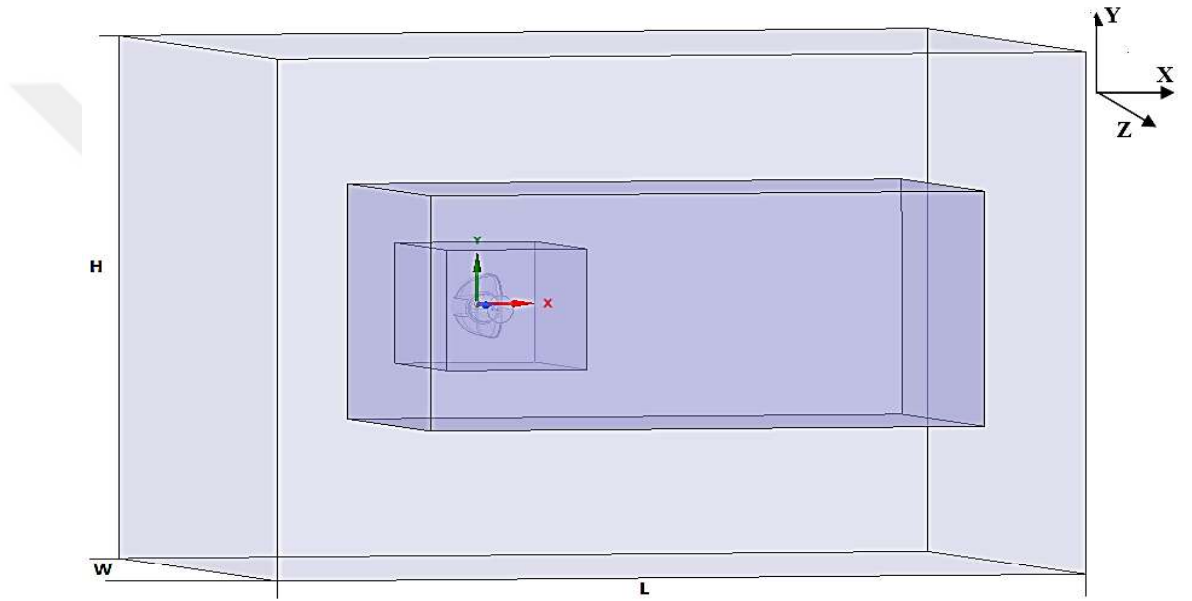


Şekil 3.5. Model 3'e ait geometrik model ve temel ölçüler



Şekil 3.6. Model 4'e ait geometrik model ve temel ölçüler

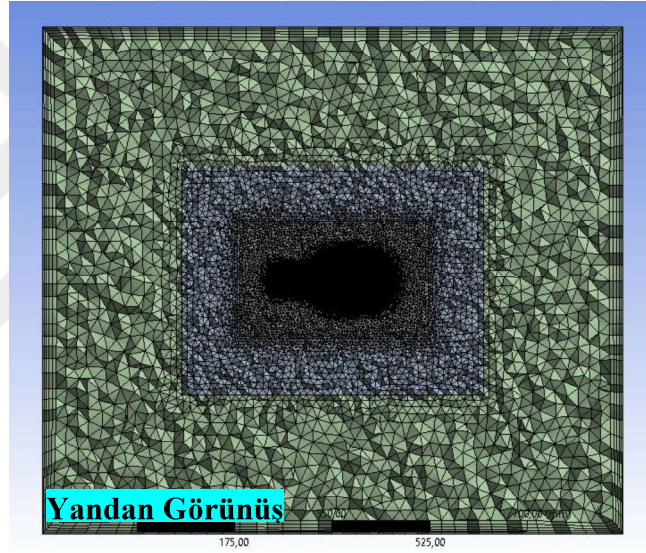
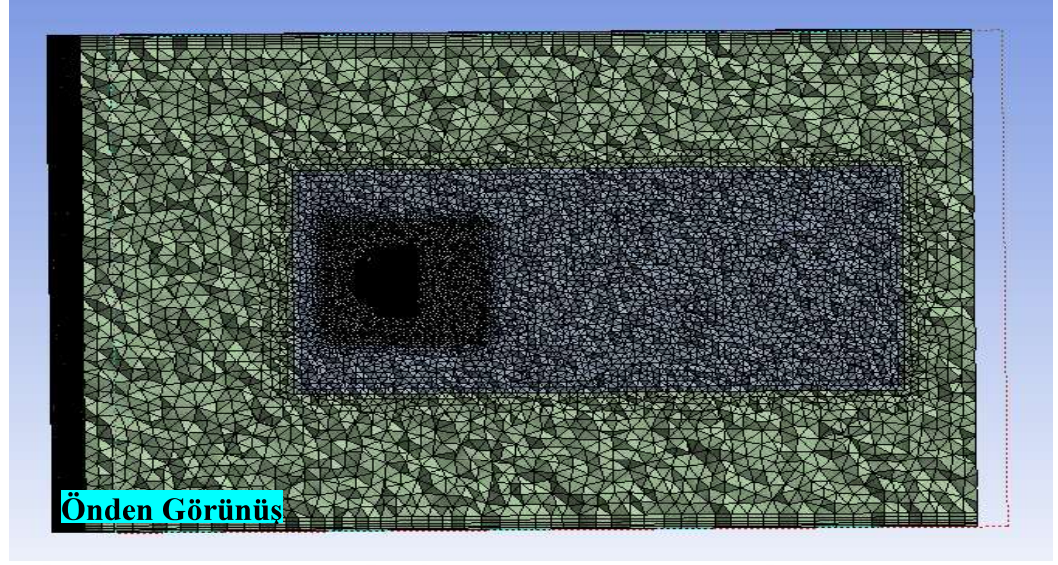
Modellemenin yapıldığı kontrol hacmi, $800 \times 800 \times 1200 \text{ mm}^3$ olarak alınmış olup analiz çalışmalarında ayna modelleri giriş kısmından 400 mm ileriye yerleştirilmiştir. Analiz hacmi (Şekil 3.7) 3 bölgeye ayrılmıştır. Aynaya en yakın bölgede sık ağ yapısı kullanılırken, aynadan uzaklaştıkça daha kaba ağ yapısı oluşturulmuştur (Şekil 3.8). Buna göre, ilgili bölgeleri oluşturmak için aynadan itibaren eklemeli olarak Çizelge 3.3'te verilen mesafeler kullanılmıştır. Cisim öncesinde sık ağ yapısı kısa tutulurken cisim-ardı kısımlarında uzun tutulmuştur. Böylece, cisim yakınında ve cisim-ardında oluşabilecek ayrılmaların ve girdapların hassas bir şekilde tespit edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3.7. Analiz hacmi ve eksen takımı

Çizelge 3.3. 3 ağ bölgesini oluşturmak için kullanılan mesafeler (mm)

	-x	+x	-y	+y	-z	+z
Ayna – İç bölge arası	50	100	50	50	50	50
İç bölge – Orta bölge arası	50	600	100	100	100	100
Orta bölge – Dış bölge arası	300	100	250	250	250	250
TOPLAM	400	800	400	400	400	400



Şekil 3.8. Analiz hacminde oluşturulan kademeli ağ yapısının önden ve yandan görünüşü

3.4. Başlangıç ve Sınır Şartları

Yan ayna aerodinamiği; akış ayrılmaları, vorteks ve bölgesel geçişli akışlar gibi karmaşık akış durumlarını içerebilir. Bu sebeple, bu çalışmadaki analizlerde bu tip akışların çözümü için uygun olan realizable k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Bu türbülans modeli bir duvar fonksiyonu kullanımına ihtiyaç duyar. Ayna geometrileri karmaşıklığı çok değişken y^+ değerlerini ortaya çıkarabilir. Karşılaşılabilecek düşük y^+ değerlerini (hatalı çözümleri engellemek amacıyla) yukarı çeken Scalable duvar fonksiyonu tercih edilmiştir.

Akış alanının üst, alt ve yan yüzeyleri çeper duvar olarak tanımlanmış ve pürüzsüz yüzey olarak kabul edilmiştir. Bu kabulle kayma gerilmesi oluşumu engellenmiştir. Ayna yüzeyi de pürüzsüz kabul edilmiş fakat kaymama koşulu uygulanmıştır.

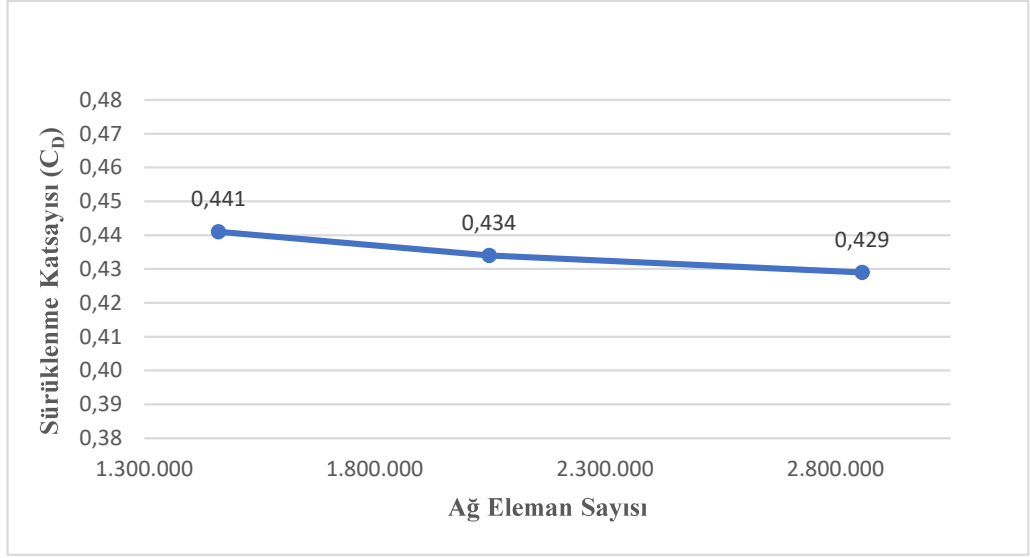
Akış alanı giriş yüzeyi hız girişi olarak alınmıştır. Akış alanı çıkış yüzeyi basınç çıkışı olarak tanımlanmış ve çıkış basıncı 0 Pa olarak alınmıştır. Hız giriş ve basınç çıkış yüzeylerinde türbülans yoğunluğu %5 ve türbülans viskozite oranı %10 olarak alınmıştır. Ayrıca analizlerde türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılım oranı için ikinci dereceden denklemler seçilmiştir.

3.5. Ayna Modelleri için Ağdan Bağımsızlık (Doğrulama) Çalışmaları

Geometrik modeller için ağdan bağımsızlık çalışması yapılmış ve kriter olarak C_D alınmıştır. Kullanılan ağ eleman sayıları ve ilgili sonuçlar Çizelge 3.4- 3.7 ve Şekil 3.9- 3.12’de verilmiştir. Asimptotik yakınsama kriteri $AYK \approx 1$ değerine ulaşılmıştır. Model 1 için sık ağ yapısı (1) kullanıldığında (Çizelge 3.4) hesaplama hata bandı $GCI_{1,2} = 0,038$ (%3,8) olacaktır.

Çizelge 3.4. Model 1 için ağdan bağımsızlık çalışması

	Ağ Eleman Sayısı	Sıklaştırma Oranı	C_D
3	1 461 387		0,44149277
2	2 048 881	1,40	0,43448064
1	2 858 411	1,40	0,4294271
			$GCI_{1,2}$ 0,038
			$GCI_{2,3}$ 0,052
AYK			0,98836878

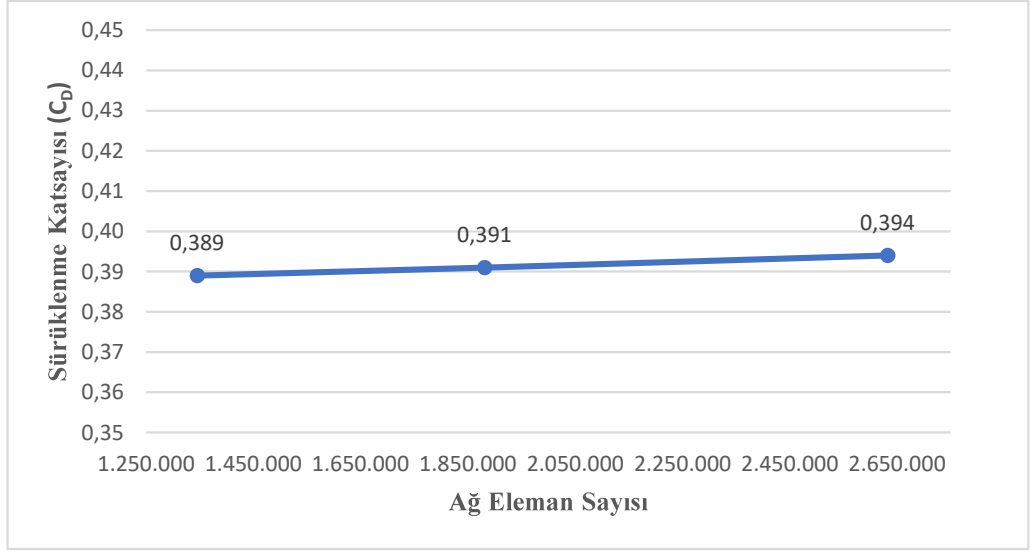


Şekil 3.9. Model 1 için ağ eleman sayısı ile sürüklenme katsayısı (C_D) değişim grafiği

Model 2 için sık ağ yapısı (1) kullanıldığında (Çizelge 3.5) hesaplama hata bandı $GCI_{1,2} = -0,018$ (%1,8) olacaktır.

Çizelge 3.5. Model 2 için ağdan bağımsızlık çalışması

	Ağ Eleman Sayısı	Sıklaştırma Oranı	C_D
3	1 345 482		0,38948083
2	1 881 583	1,40	0,39084625
1	2 632 998	1,40	0,3939301
			$GCI_{1,2}$ -0,018
			$GCI_{2,3}$ -0,008
AYK			1,007890187

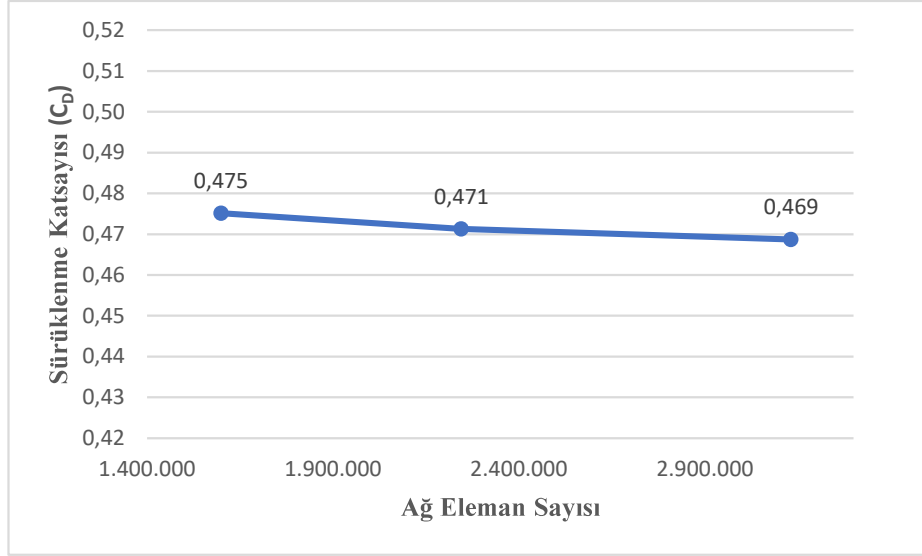


Şekil 3.10. Model 2 için ağ eleman sayısı ile sürüklenme katsayısı (C_D) değişim grafiği

Model 3 için sık ağ yapısı (1) kullanıldığında (Çizelge 3.6) hesaplama hata bandı $GCI_{1,2}$ = 0,014 (%1,4) olacaktır.

Çizelge 3.6. Model 3 için ağdan bağımsızlık çalışması

	Ağ Eleman Sayısı	Sıklaştırma Oranı	C_D
3	1 599 178		0,47513155
2	2 244 957	1,40	0,47125732
1	3 131 895	1,40	0,46866897
			$GCI_{1,2}$ 0,014
			$GCI_{2,3}$ 0,021
AYK			0,994507565

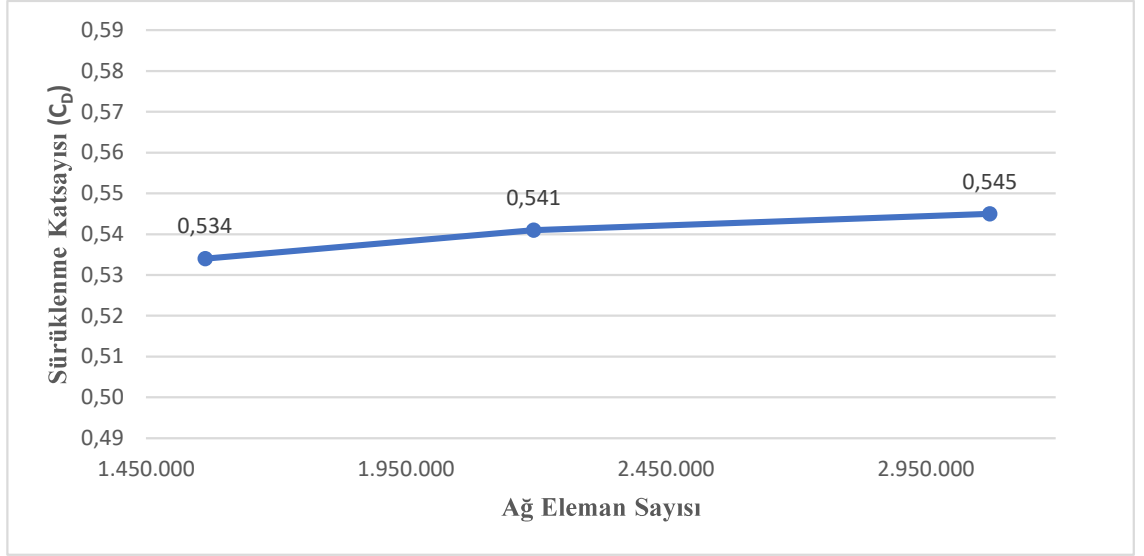


Şekil 3.11. Model 3 için ağ eleman sayısı ile sürüklenme katsayısı (C_D) değişim grafiği

Model 4 için sık ağ yapısı (1) kullanıldığında (Çizelge 3.7) hesaplama hata bandı $GCI_{1,2} = 0,013$ (%1,3) olacaktır.

Çizelge 3.7. Model 4 için ağdan bağımsızlık çalışması

	Ağ Eleman Sayısı	Sıklaştırma Oranı	C_D
3	1 563 460		0,534
2	2 195 807	1,40	0,541
1	3 073 461	1,40	0,545
			$GCI_{1,2}$
			0,013
			$GCI_{2,3}$
			0,023
AYK			1,007672296



Şekil 3.12. Model 4 için ağ eleman sayısı ile sürüklenme katsayısı (C_D) değişim grafiği

3.6. Deney Planları

3.6.1. Sapma açısı ve akış hızının etkisi

Her bir ayna (toplam 4 ayna modeli) için sapma açısının (β) ve akış hızının (V), akış karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Bu iki parametre üçer seviyede tam faktöriyel olarak ele alınmıştır. Çizelge 3.8’deki deney planı 4 ayna için de uygulanmıştır.

Çizelge 3.8. Sapma açısı (β) ve akış hızı (V) etkisi için kullanılan deney planı

	β (°)	V (m/s)
1	10	20
2	10	30
3	10	40
4	0	20
5	0	30
6	0	40
7	-10	20
8	-10	30
9	-10	40

3.6.2. Bağlama kolu geometrisinin etkisi

Yan ayna bağlama kolu geometrisi üzerinde parametrik çalışma için, bağlama kolu geometrisi ve araç üzerinde bağlanma konumu birbirinden farklı olan Model 1 (A-sütunundan bağlama) ve Model 2 (kapı gövdesinden bağlama) seçilmiştir. İlgili modeller için, 3 parametrenin 3 seviyede incelenmesi amacıyla tam faktöriyel bir deney planı kullanılırsa, her bir ayna modeli için $3^3 = 27$ adet analiz yapmak gerekecektir. Ancak bu çalışmada Taguchi L9 ortogonal dizisi kullanılarak gerekli analiz sayısı 1/3 oranına indirilmiştir. İncelenen parametreler ve bunların kodlanmış seviyeleriyle hazırlanmış deney planı Çizelge 3.9’da görülmektedir. Bu deney planı her iki model için de kullanılmıştır.

Çizelge 3.9. Bağlama kolu geometrisi incelemesinde kullanılan Taguchi L9 deney planı

	Parametrelerin Kodlanmış Seviyeleri		
	Boyut Oranı	Uzunluk	Yükseklik
T1	1	1	1
T2	1	2	2
T3	1	3	3
T4	2	1	2
T5	2	2	3
T6	2	3	1
T7	3	1	3
T8	3	2	1
T9	3	3	2

İncelen 3 parametrenin Model 1 ve Model 2 de kullanılan seviyeleri, sırasıyla, Çizelge 3.10 ve Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.10. Model 1 için kullanılan parametre seviyeleri

Seviyeler	Boyut Oranı () Uzunluk (mm) Yükseklik (mm)			
	1	1,5	47	31
	2	1	70	21
	3	2,25	105	47

Çizelge 3.11. Model 2 için kullanılan parametre seviyeleri

Seviyeler	Boyut Oranı () Uzunluk (mm) Yükseklik (mm)			
	1	0,45	57	29
	2	0,68	85	44
	3	1	128	66

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Giriş

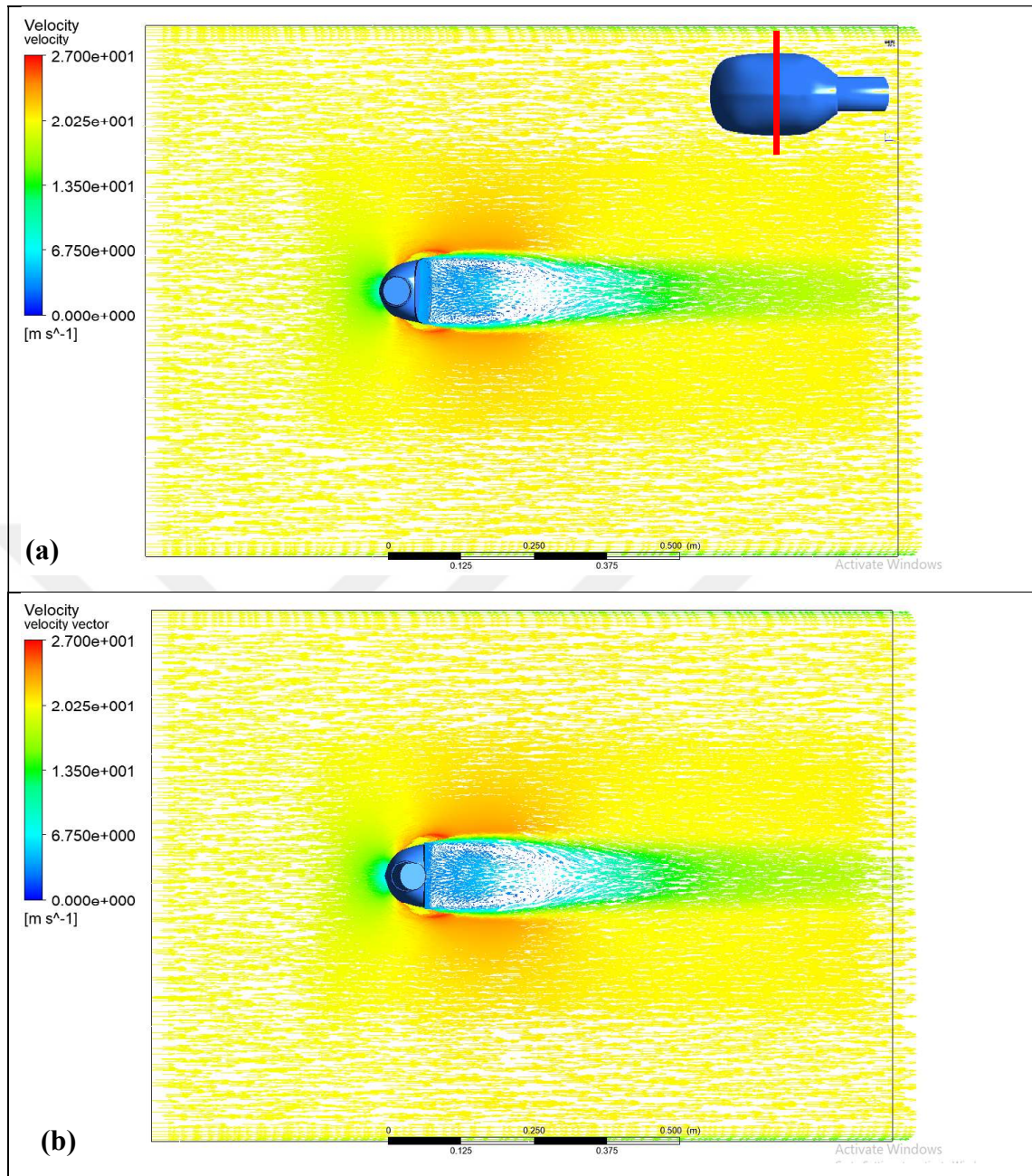
Bu bölümde, farklı boyut ve tasarımlarda 4 binek araç ayna modeline $V = 20,30$ ve 40 m/s hızlar ve $\beta = -10^\circ, 0^\circ$ ve $+10^\circ$ sapma açılarında yan aynaya etkiyen aerodinamik kuvvetler ve akış yapısı incelenmiştir. Ayrıca bu ayna modelleri içerisinde bağlama kolu geometrisi ve yeri farklı olan iki model seçilerek bağlama kolu geometrisi üzerinde boyut oranı, yükseklik ve uzunluk parametreleri 3 farklı seviyede Taguchi ortogonal dizilerinden yararlanarak çalışmalar yapılmıştır. Bağlama kolu geometrisi nümerik analizlerinde, $\beta=0^\circ$ ve $V=30$ m/s olarak sabit alınmıştır.

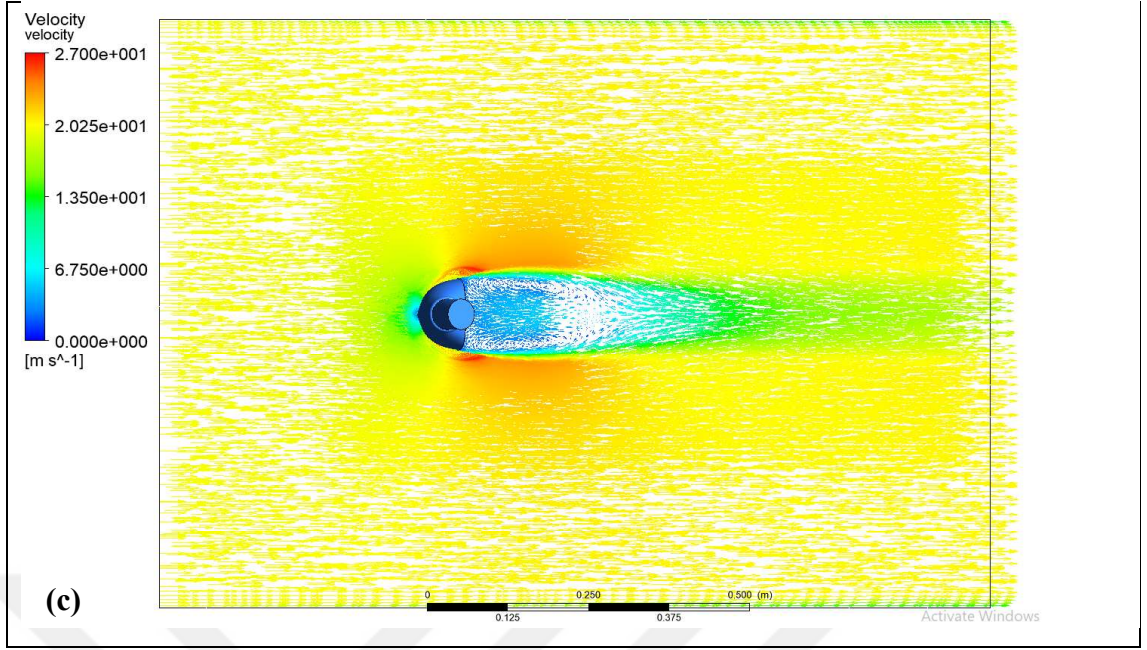
4.2. Model 1 – Hız ve Sapma Açısı Etkisi

$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = -10^\circ, 0^\circ$ ve $+10^\circ$ sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan hız vektörleri Şekil 4.1 – 4.3'te verilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarında oluşan maksimum hız değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Ayna arkası hız dağılımları, benzer profiller göstermiştir. Akışın ilk çarptığı ayna orta noktası etrafında hız 0 olmaktadır. -10° sapma açısında daha geniş bir alanda durmanın olduğu görülmüştür. Ayna kenarlarında hız maksimum olmuştur. Ayna arkası alanda hız oldukça düşmüş ve vorteks oluşumu gözlenmiştir. -10° sapma açısında diğer sapma açılarındakine göre aynadan ayrılma bölgelerinde hızların daha yüksek olduğu fark edilmektedir.

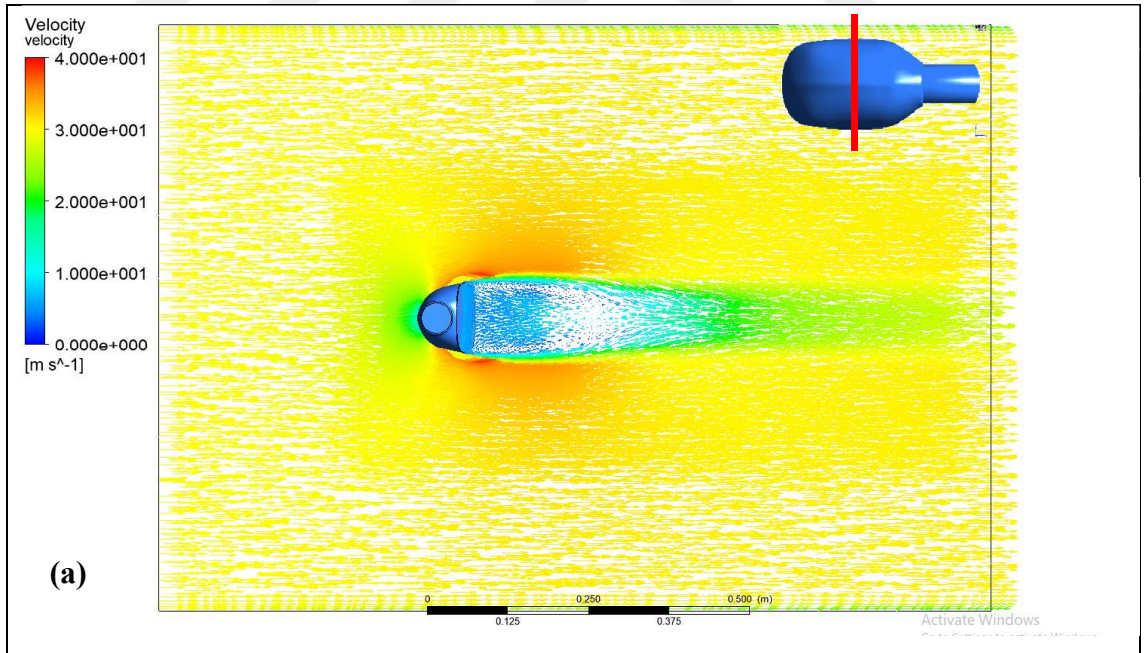
Çizelge 4.1. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) oluşan maksimum hız değerleri

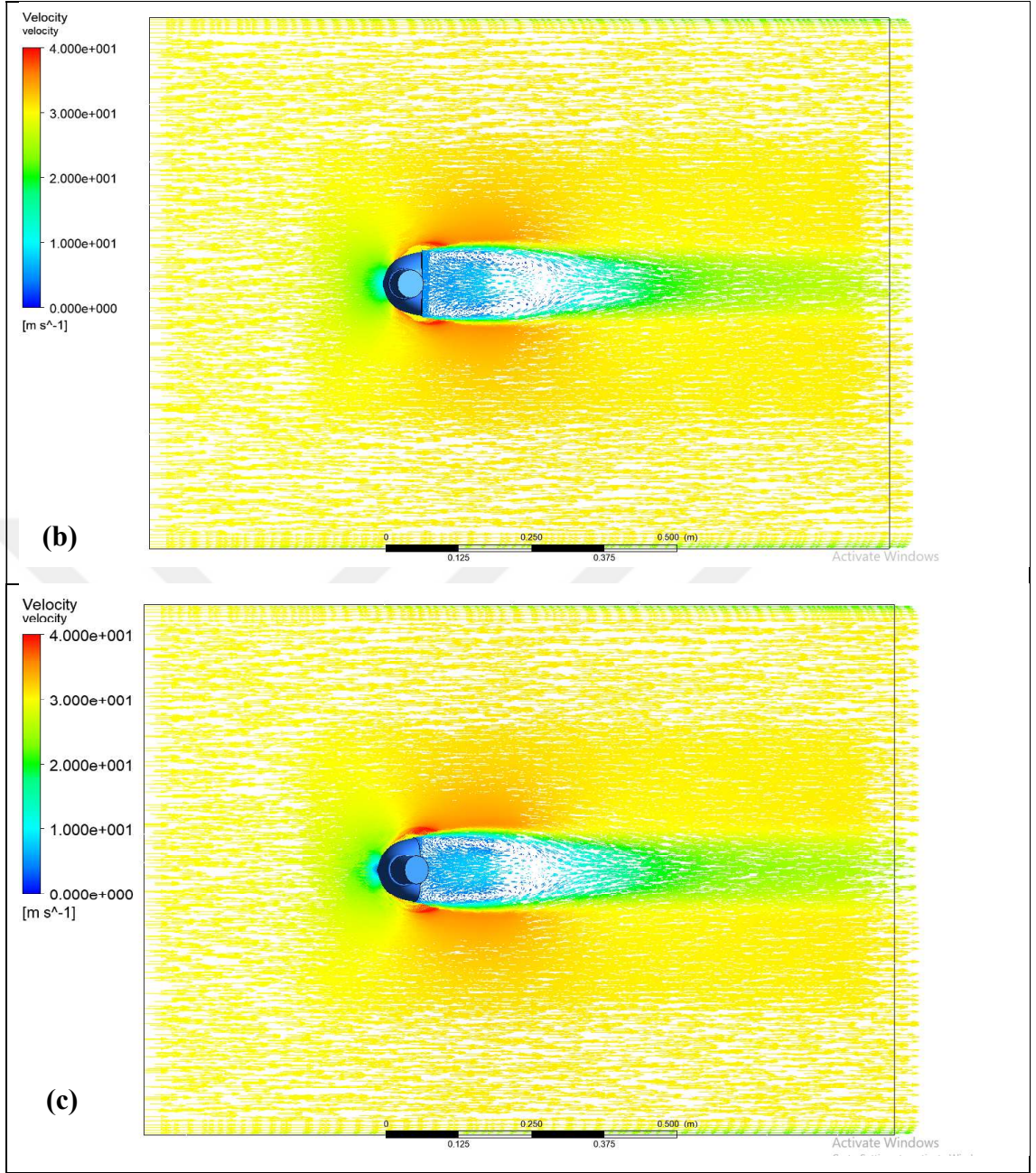
V (m/s) β (°)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (m/s)	25,59	26,11	26,41	38,5	39,34	39,73	51,46	52,5	53,09
Min (m/s)	0								



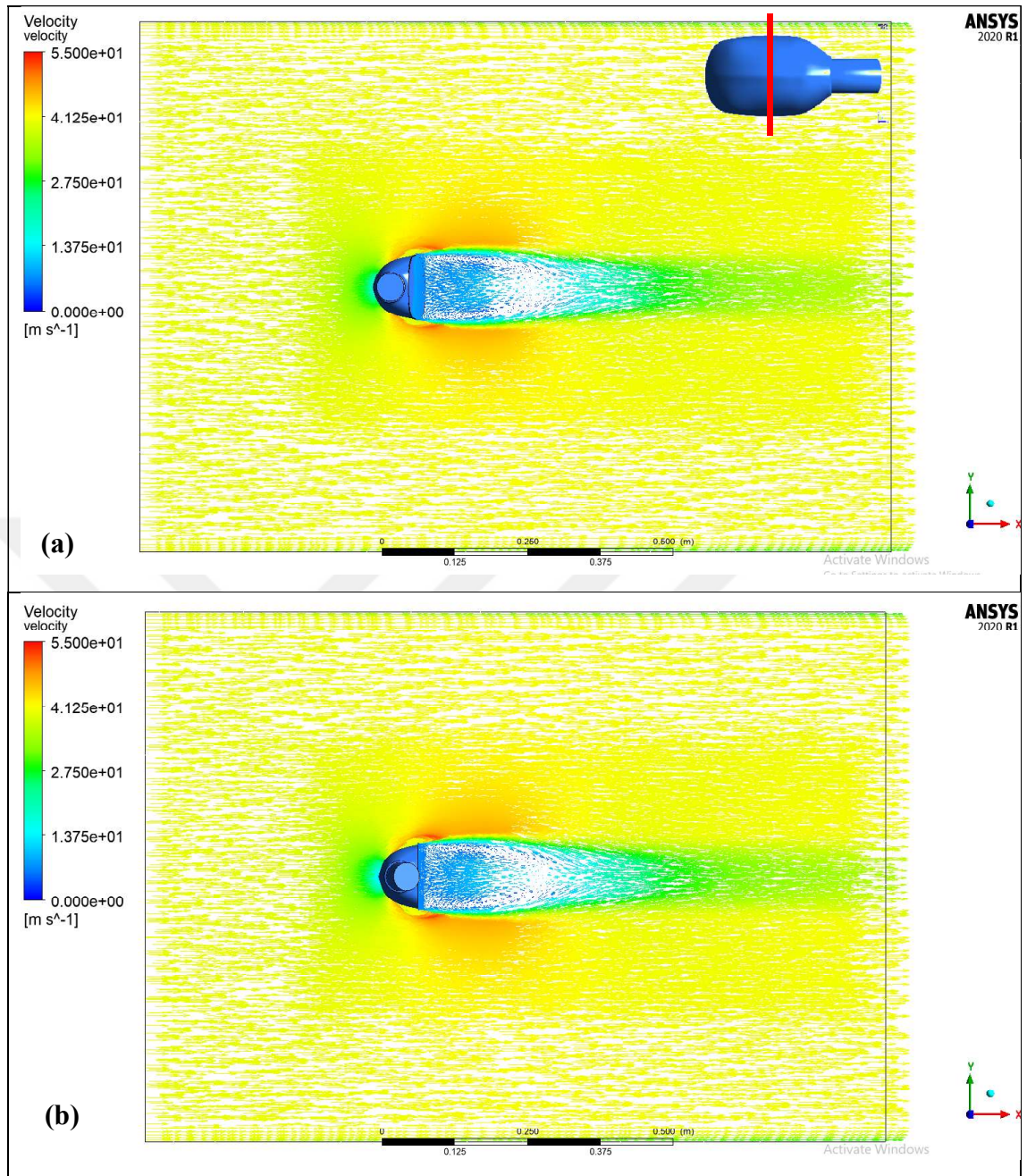


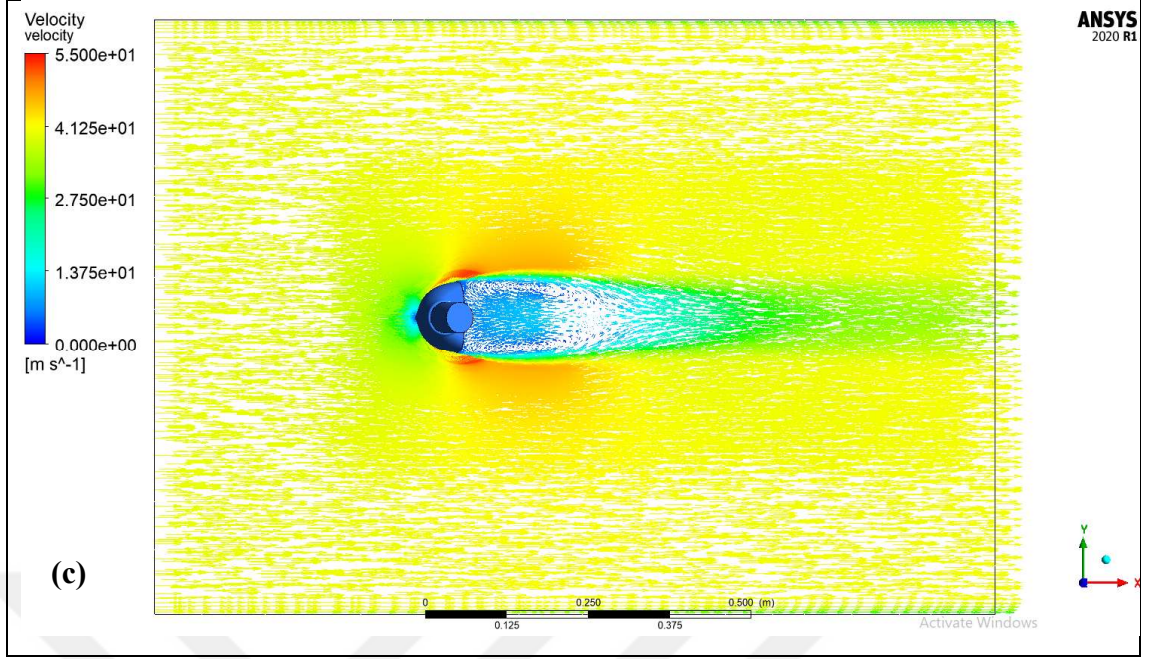
Şekil 4.1. 20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





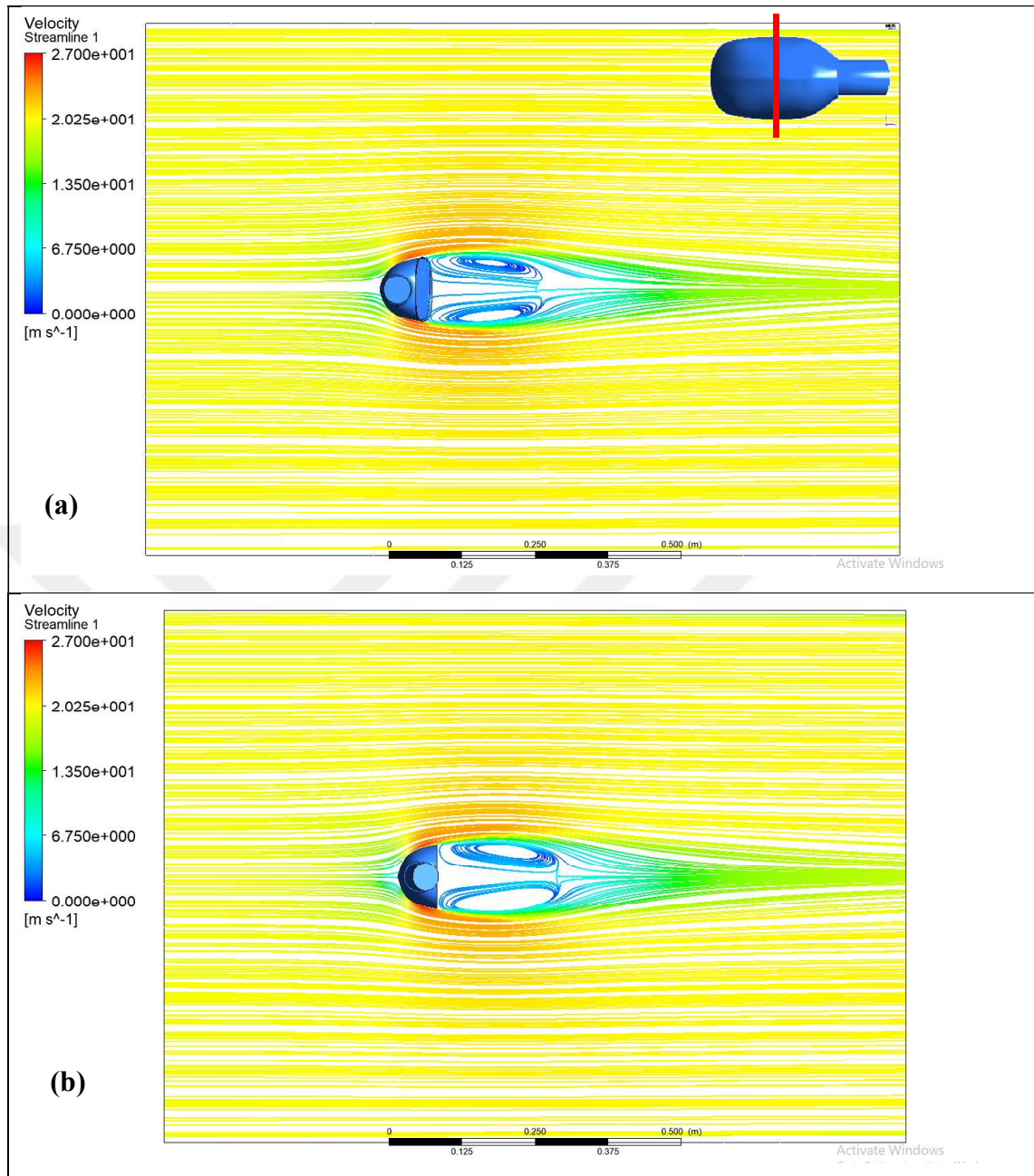
Şekil 4.2. 30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

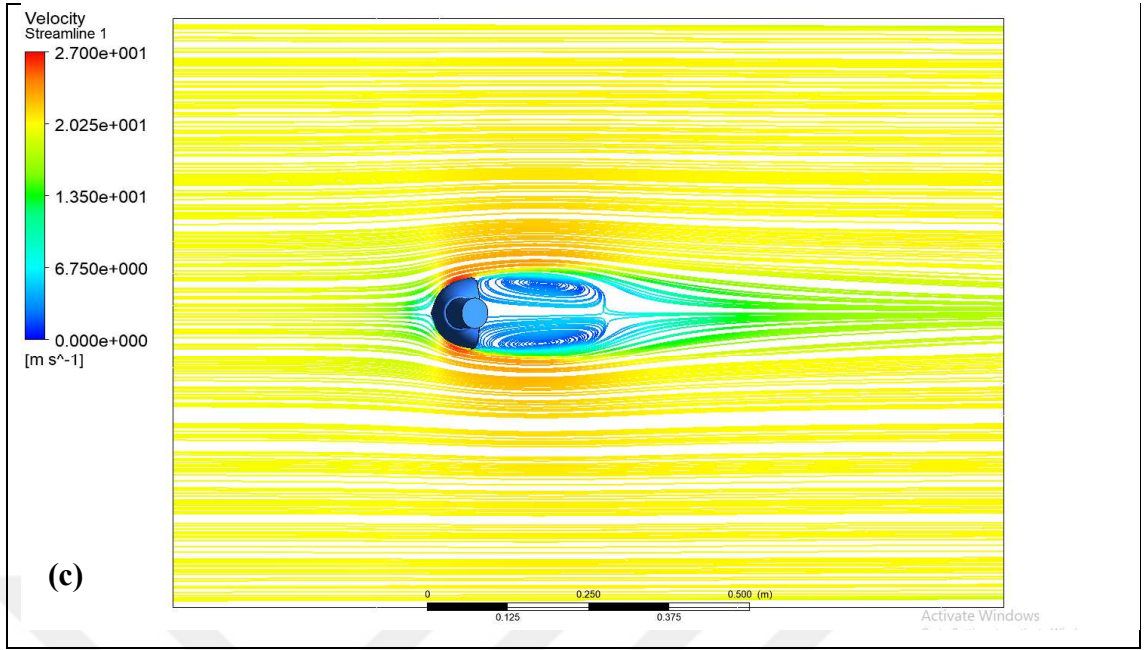




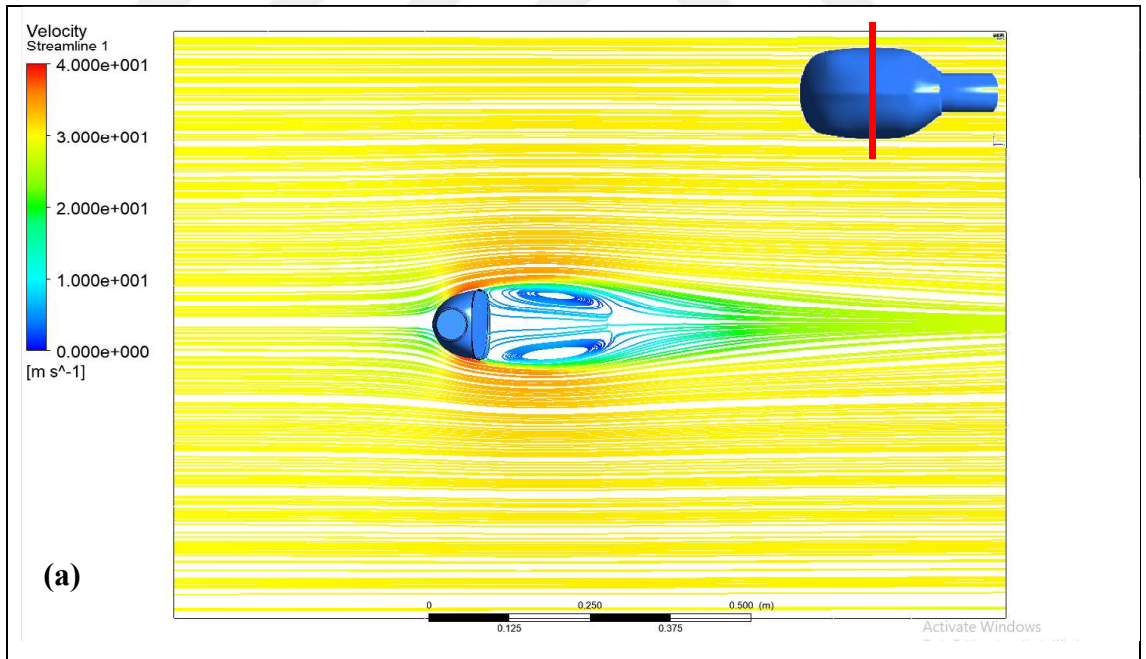
Şekil 4.3. 40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

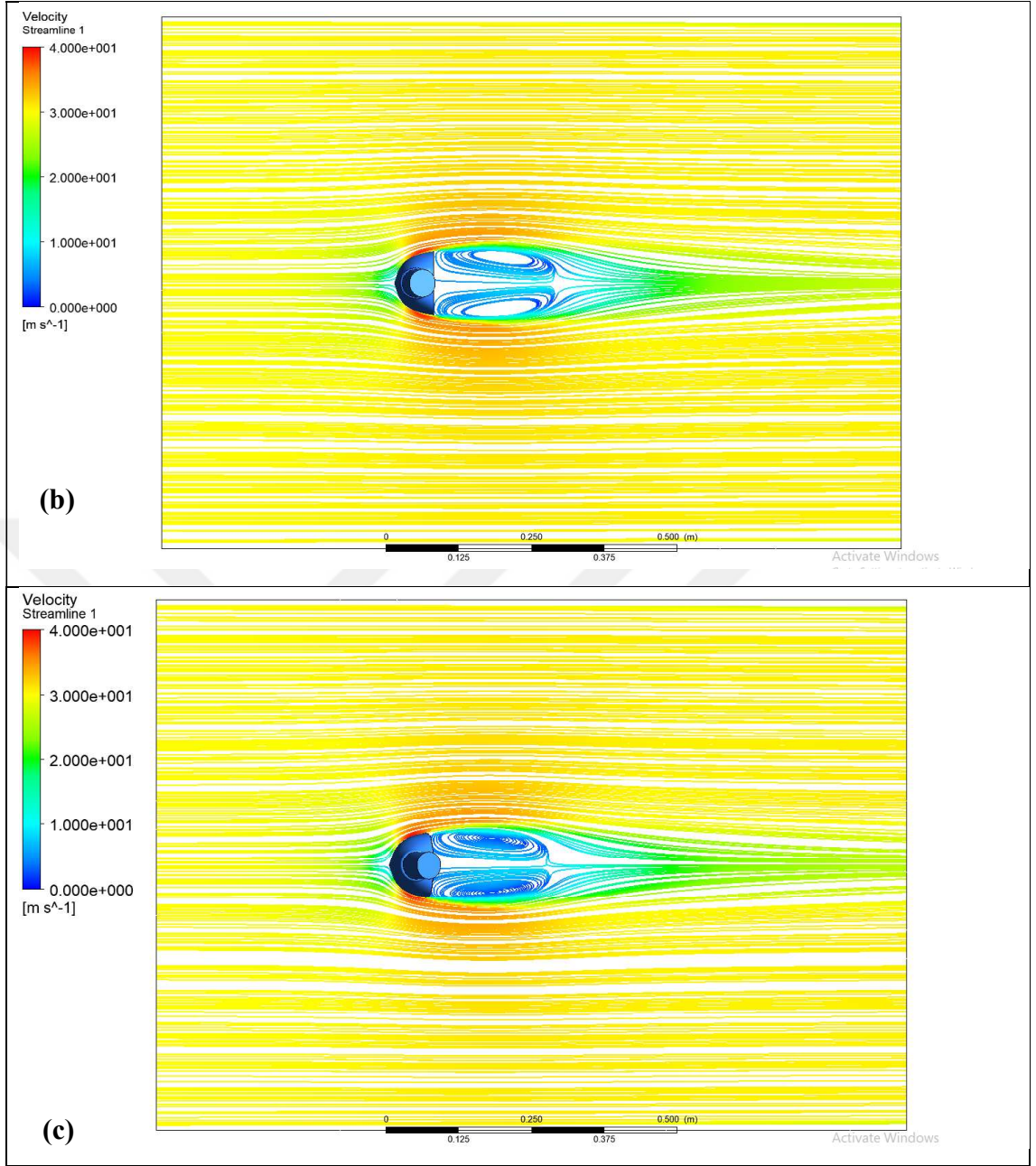
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan akım çizgileri Şekil 4.4 – 4.6’da verilmiştir. Tüm hızlarda cisim-ardı bölgede bir vorteks çifti oluşumu gözlemlenmiştir. +10° sapma açısında ayna arkasında oluşan vorteks bölgelerinin daha küçük olduğu görülmüştür. Cisim-ardındaki en geniş vorteks bölgeleri 0° sapma açısında oluşmasına karşın vorteks yoğunluğunun -10° sapma açısında en yüksek olduğu tespit edilmiştir.



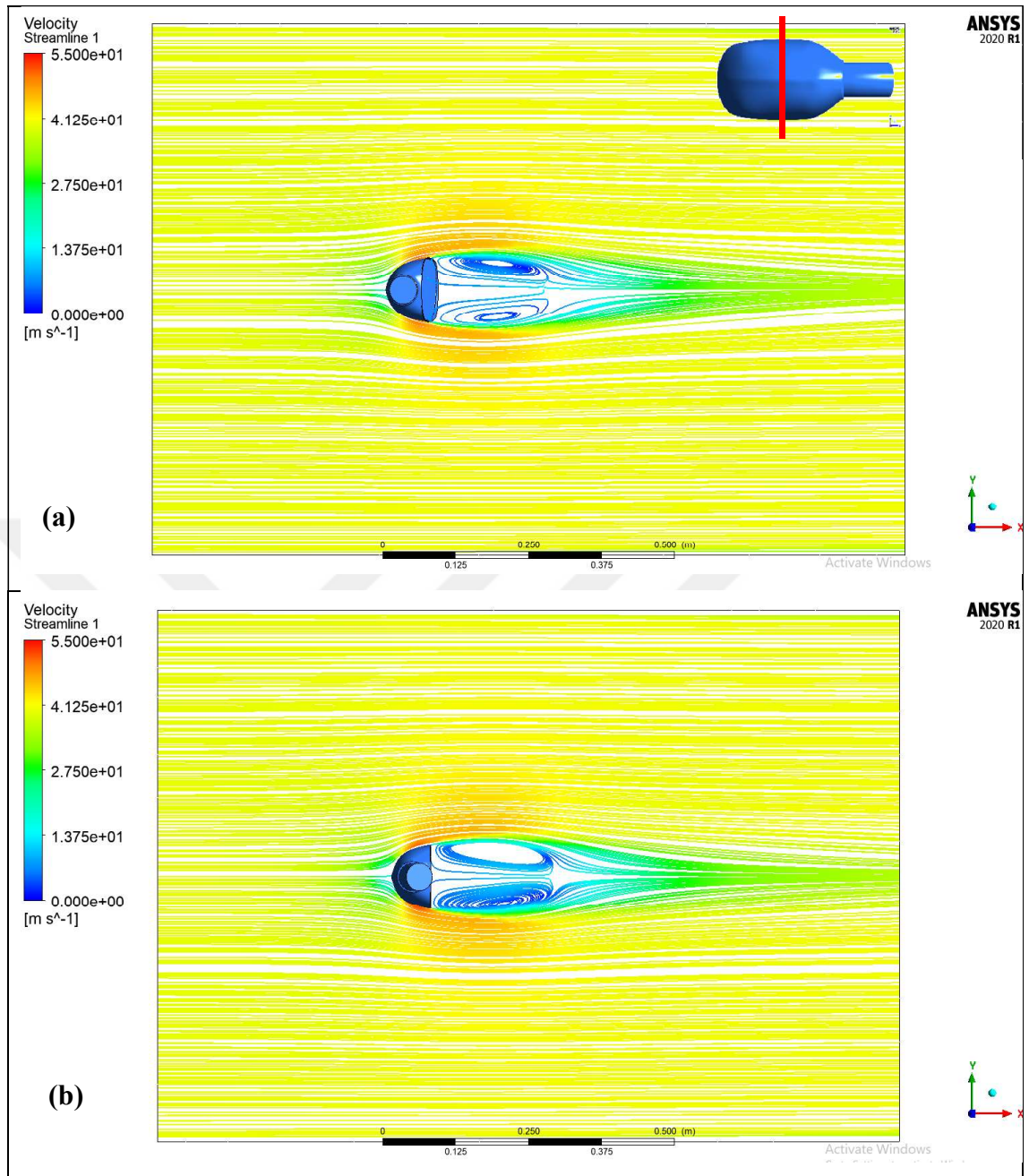


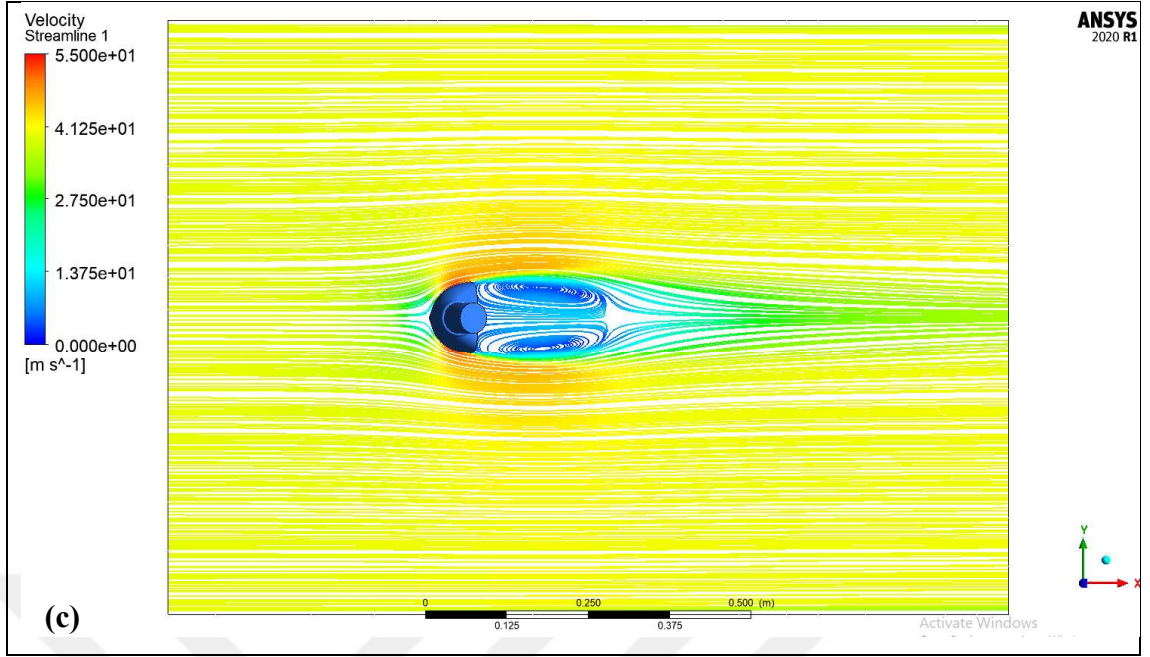
Şekil 4.4. 20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) +10° sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.5. 30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



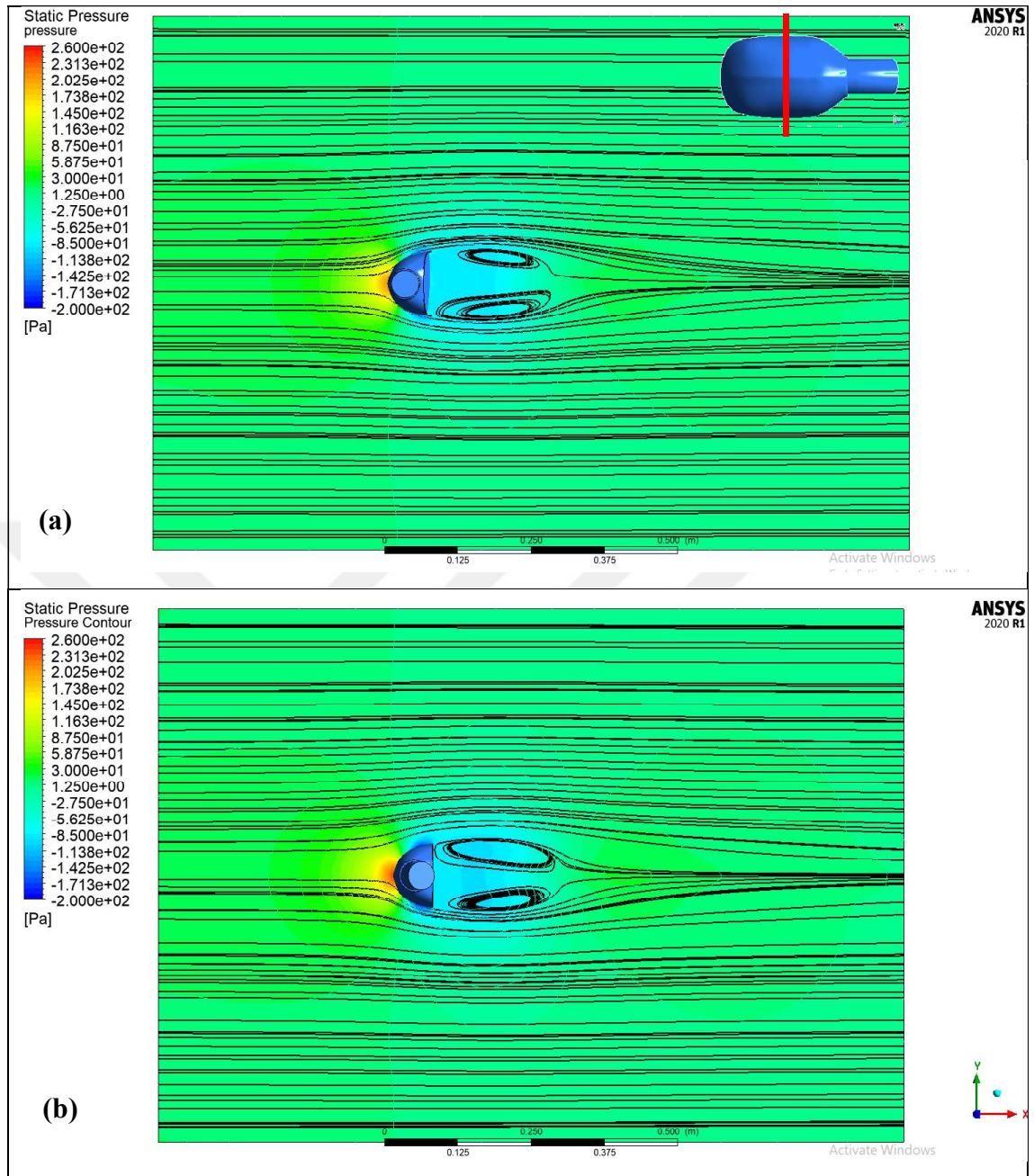


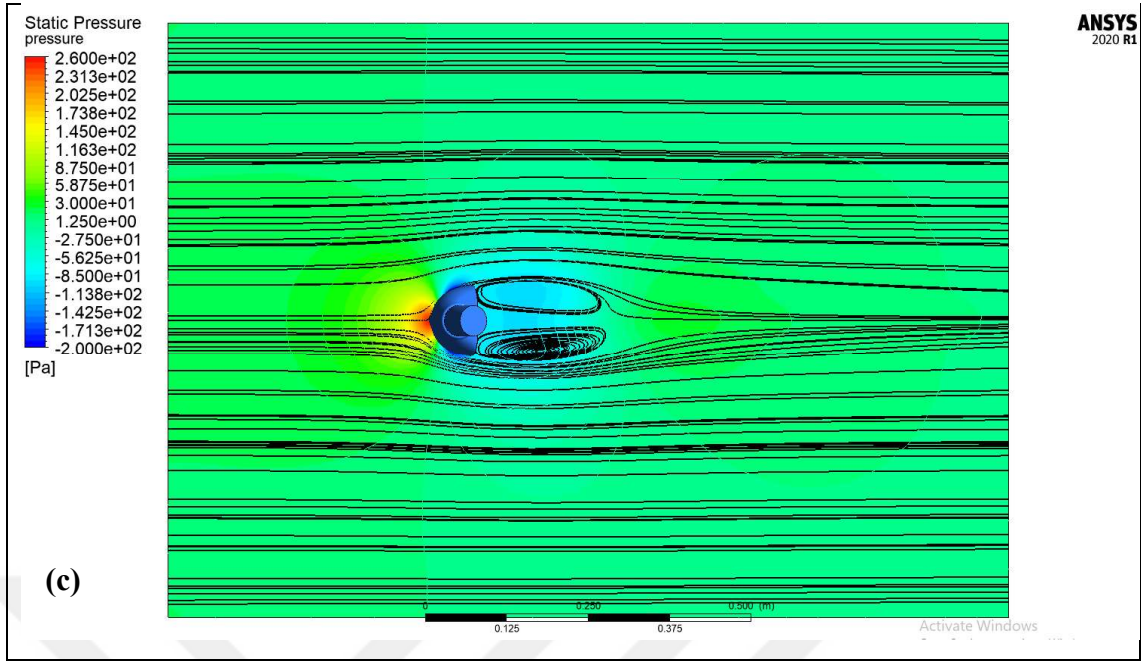
Şekil 4.6. 40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı

$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarındaki ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan basınç dağılımları Şekil 4.7 – 4.9’da verilmiştir. Tüm hız ve sapmalarda ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Maksimum basınç minimum hızın olduğu yani hızın sıfırlandığı ayna ön orta bölgesinde oluşmuştur. Ayna arkasında ise ayrılma sonrası basıncın düşmesi ve ayrıca oluşan vortekslerin sebep olduğu basınç kaybının etkisiyle minimum basınç değerlerinin oluştuğu görülmüştür. Akım çizgilerinin birleştiği noktada bir miktar basınç artışı tespit edilmiştir. -10° sapma açısına sahip aynanın ön yüzeyinde oluşan yüksek basınçlar diğerlerinden daha şiddetli ve geniş bir alanda meydana gelmiştir.

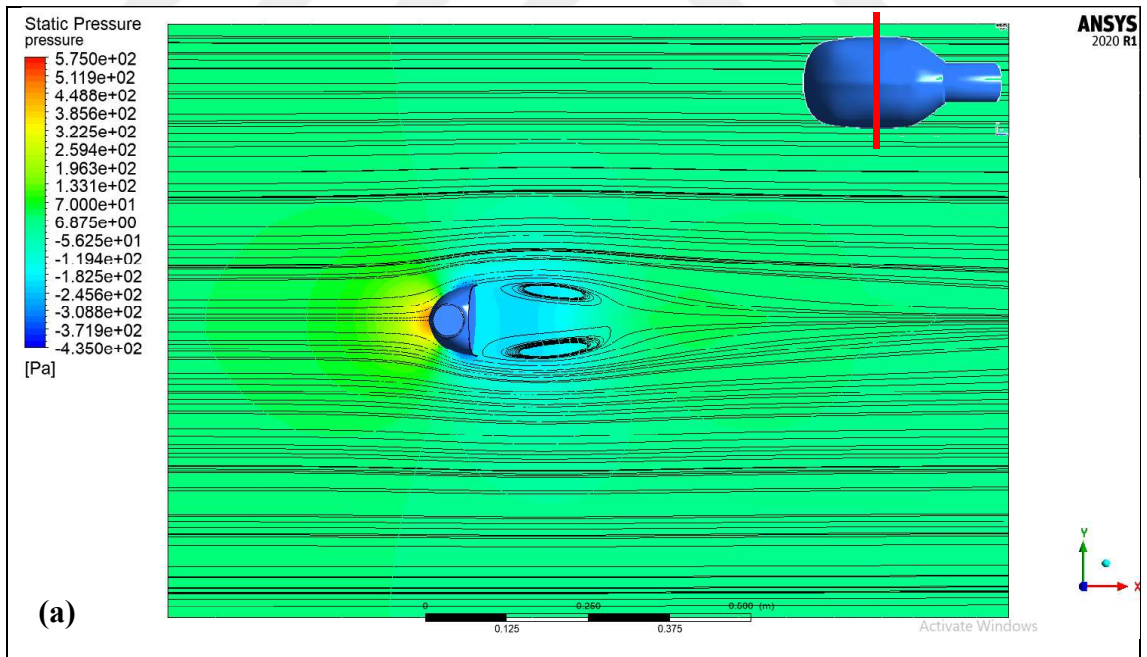
Çizelge 4.2. Tüm hız (V) ve sapma açılarındaki (β) ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri

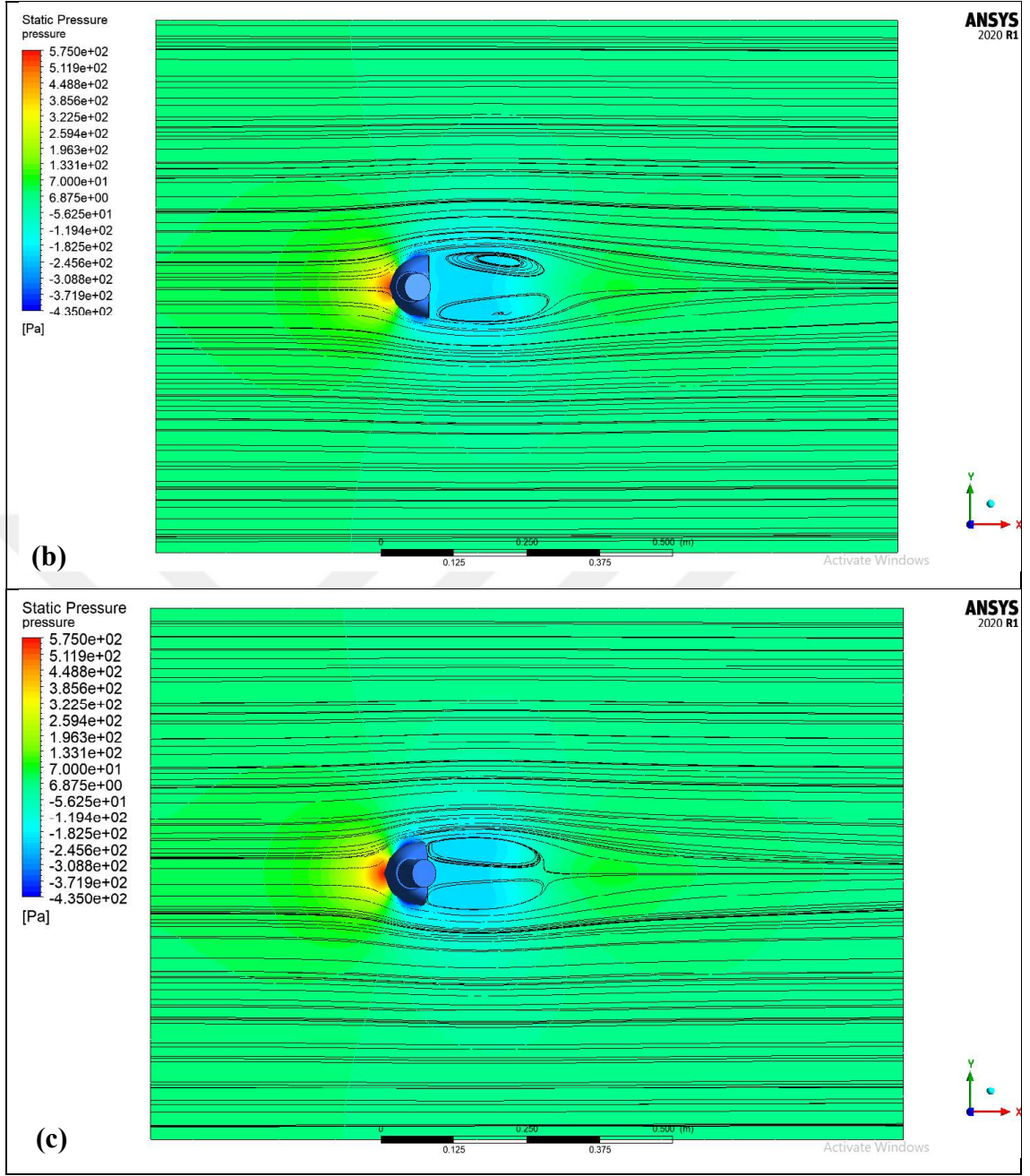
V (m/s)	20			30			40		
β ($^\circ$)	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (Pa)	224,36	245,3	254,47	503,36	551,4	571,23	893,71	977,4	1014
Min (Pa)	-163	-180,5	-191,95	-336,48	-406,6	-431,84	-652,75	-724,22	-769,9



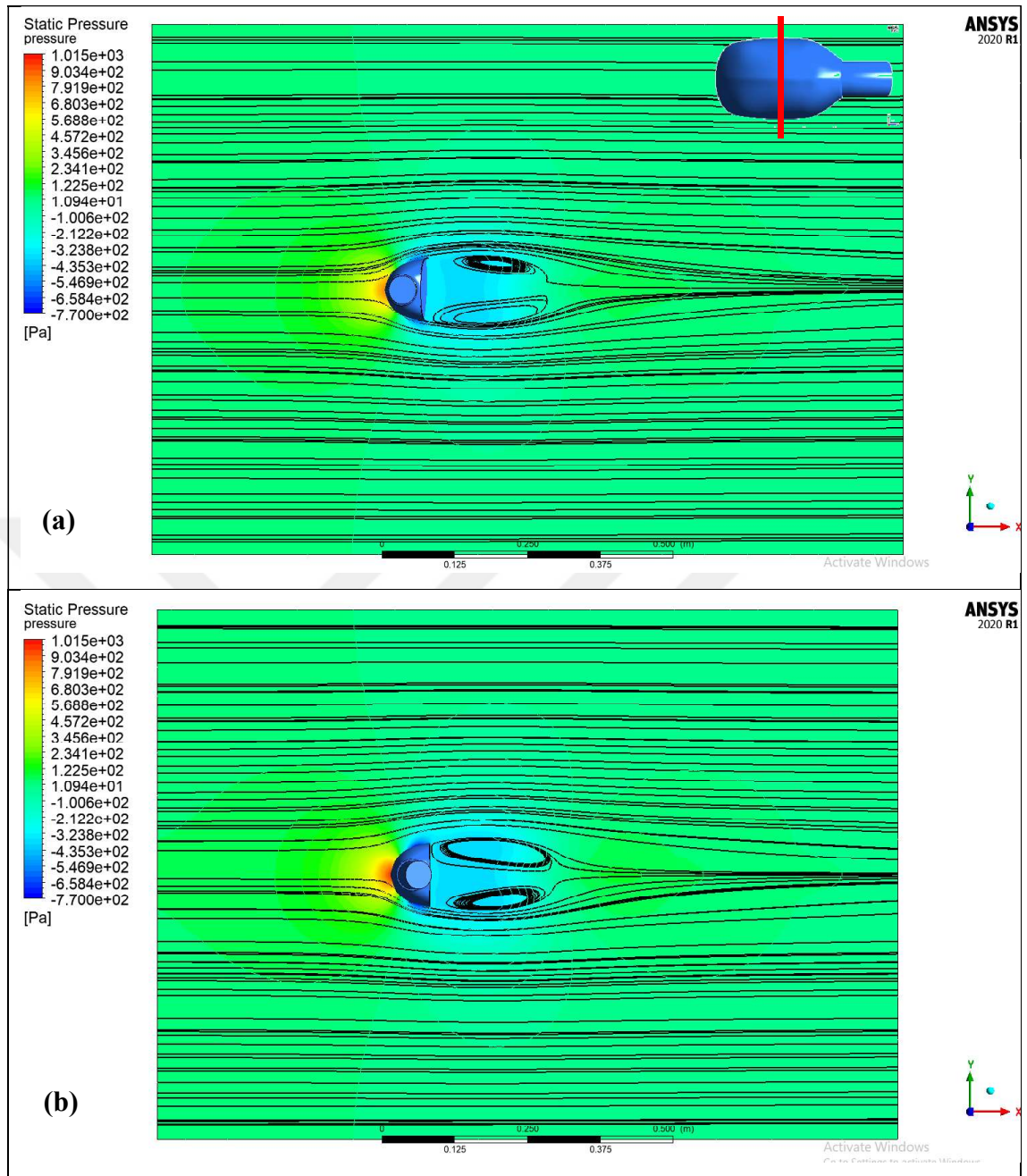


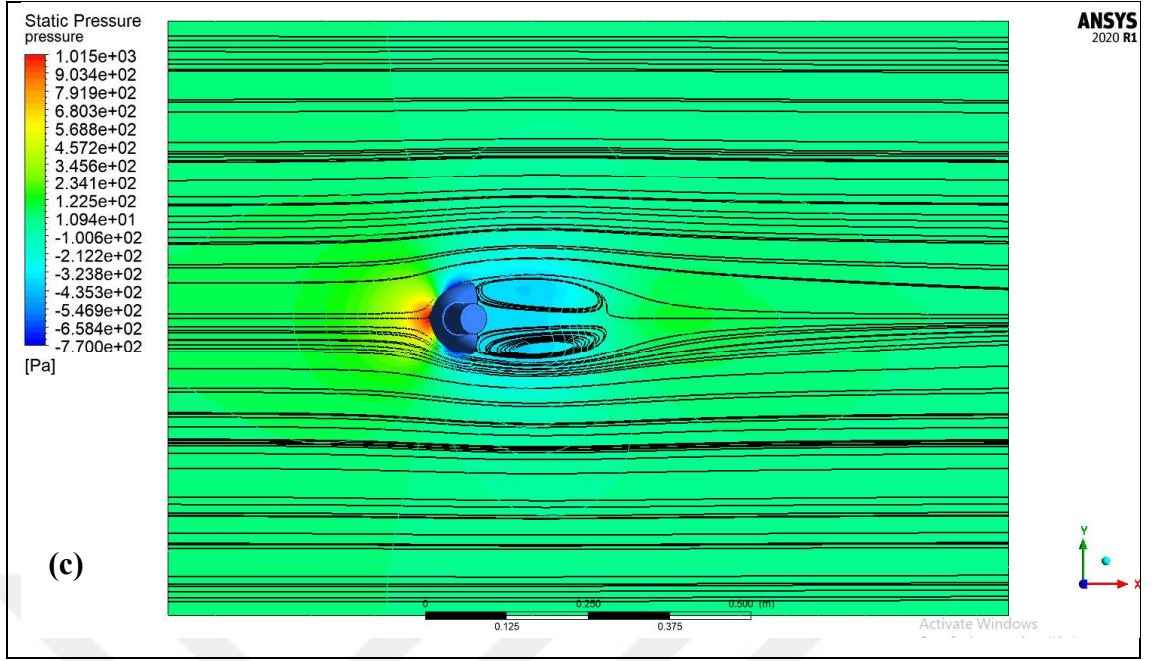
Şekil 4.7. 20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





Şekil 4.8. 30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





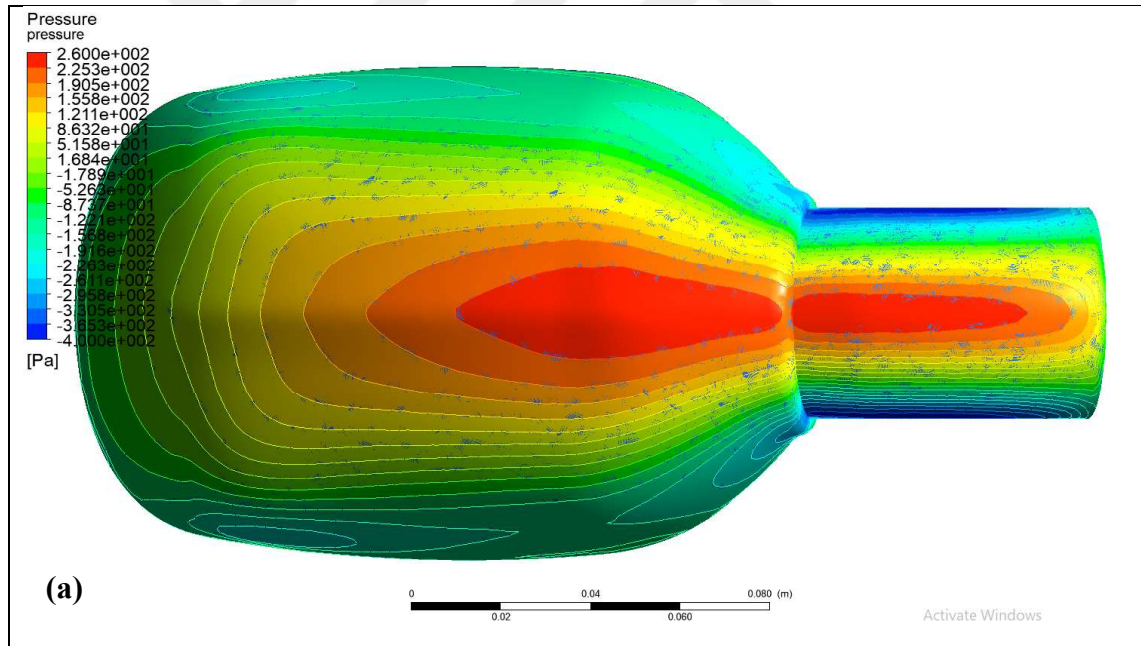
Şekil 4.9. 40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

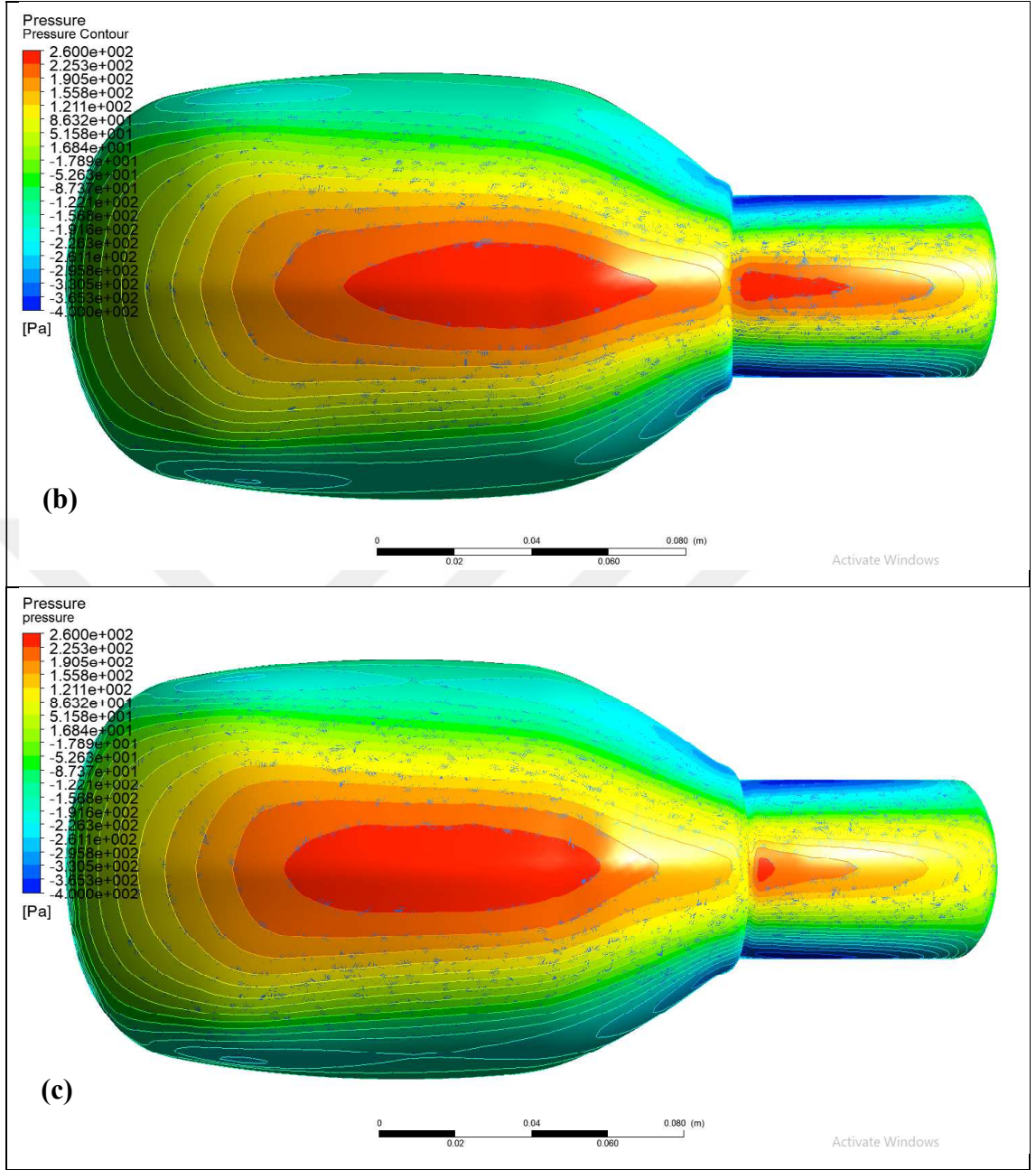
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna üzerinde oluşan basınç dağılımları Şekil 4.10 – 4.12’de verilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarında ayna ön yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri Çizelge 4.3’te sunulmuştur. Ayna ön yüzeyinde oluşan basınç dağılımı hemen hemen her hızda benzer özellik göstermesine rağmen sapma açılarındaki değişim ayna üzerindeki basınç dağılımını değiştirmektedir. Durma noktası ve civarında maksimum değerler görülürken ayrılanın beklendiği bölgelerde minimum basınç değerleri ölçülmüştür. 10° sapma açısında maksimum basınç ayna gövdesi ile ayna bağlama kolu birleşim noktası civarında oluşurken, minimum basınç ayna bağlama kolu karşılıklı uç bölgelerinde oluşmuştur. 0° sapma açısında ise, maksimum basınç ayna orta kısmında ve ayna bağlama kolunun gövdeye bağlandığı kısım civarından çok uzaklaşmadığı ve yine minimum basıncın bağlama kolunun karşılıklı uç yüzeylerinde oluştuğu görülmüştür. -10° lik sapma açısında ise, maksimum basıncın ayna gövdesinin tam orta noktasında oluştuğu ve minimum basıncın ise ayna bağlama kolunun karşılıklı uç yüzeylerinde oluştuğu görülmüştür.

+10°'den -10°'lik sapma açısına doğru maksimum basıncın ayna orta bölgesine doğru kaydığı ve ayna bağlama kolu üzerinde oluşan maksimum basınç alanının azaldığı gözlenmiştir.

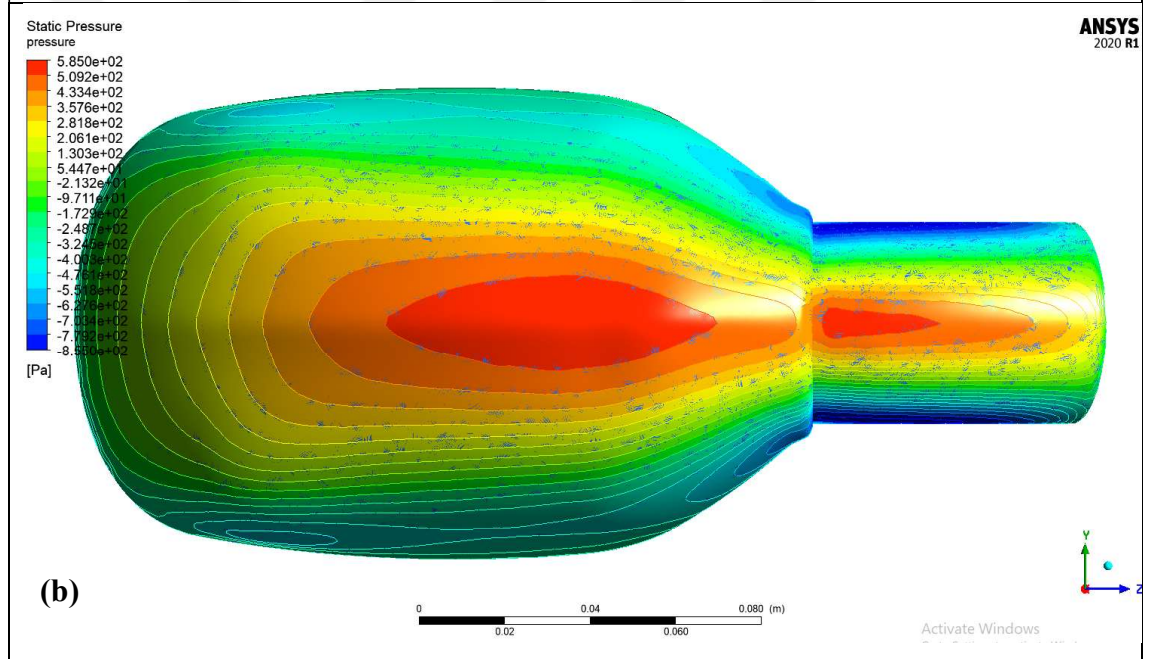
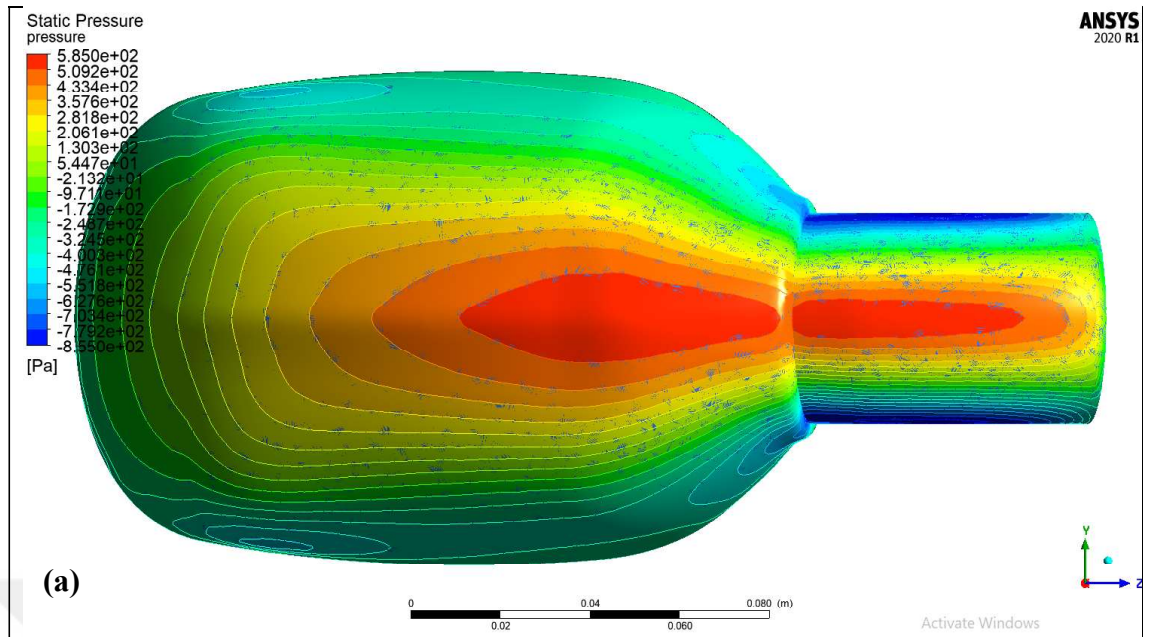
Çizelge 4.3. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri

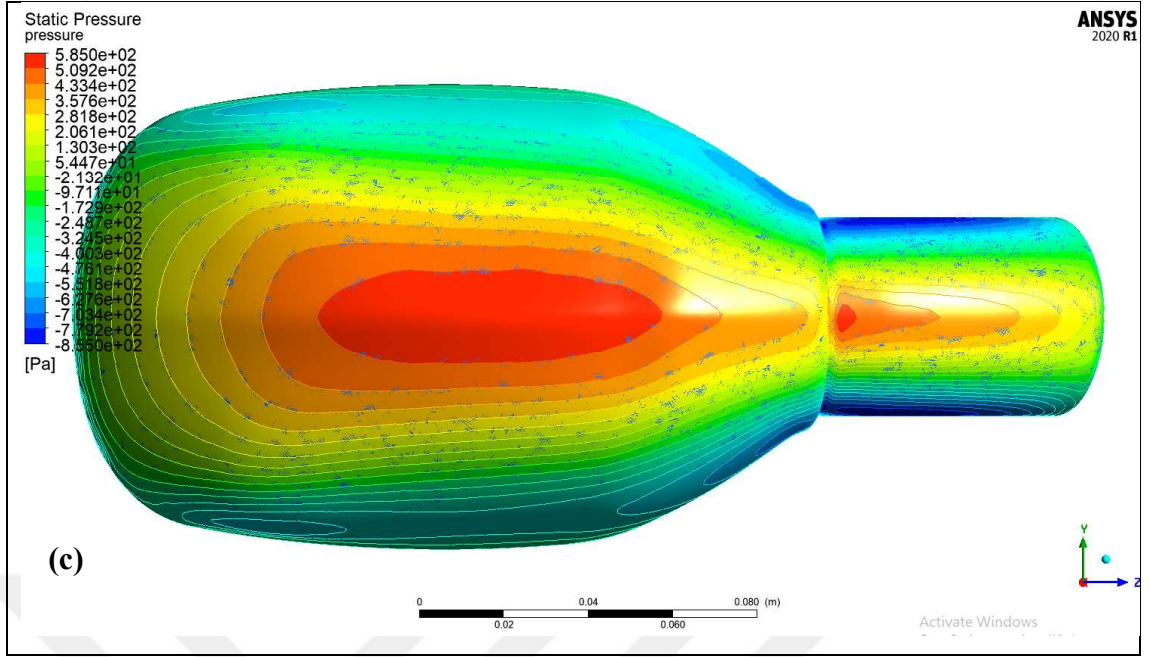
V (m/s) β (°)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (Pa)	257,11	255,99	259,24	577,33	582,76	582,1	1024,97	1020,64	1033,54
Min (Pa)	-392,51	-392,82	-383,98	-887,74	-893,94	-851,01	-1601,94	-1585,35	-1529,34



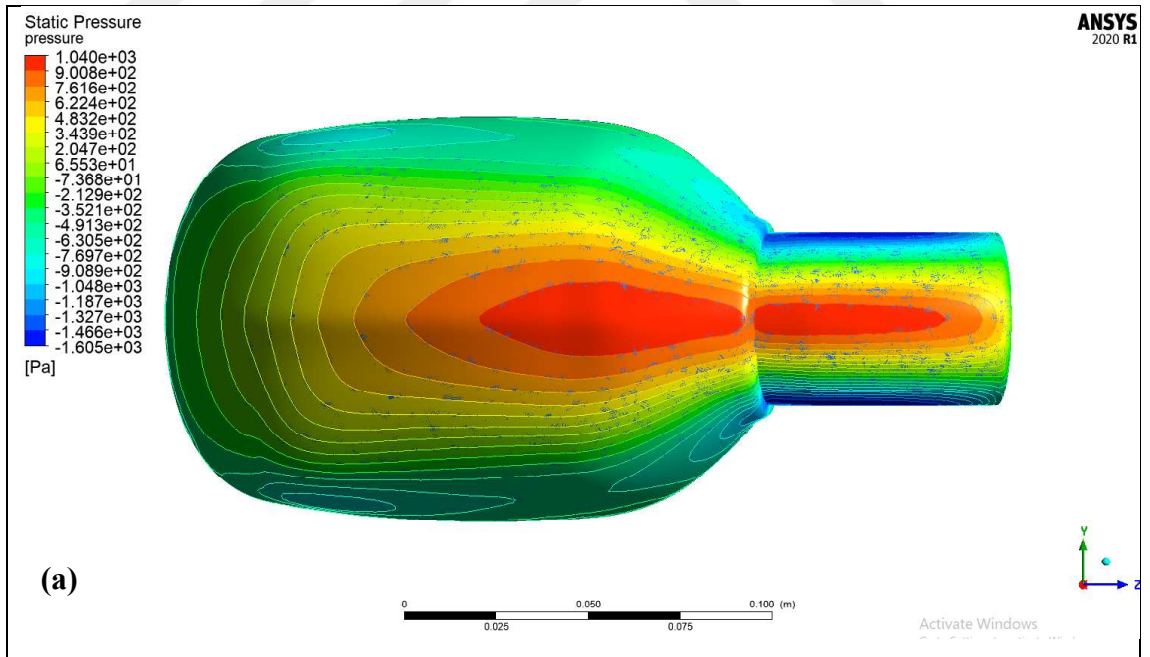


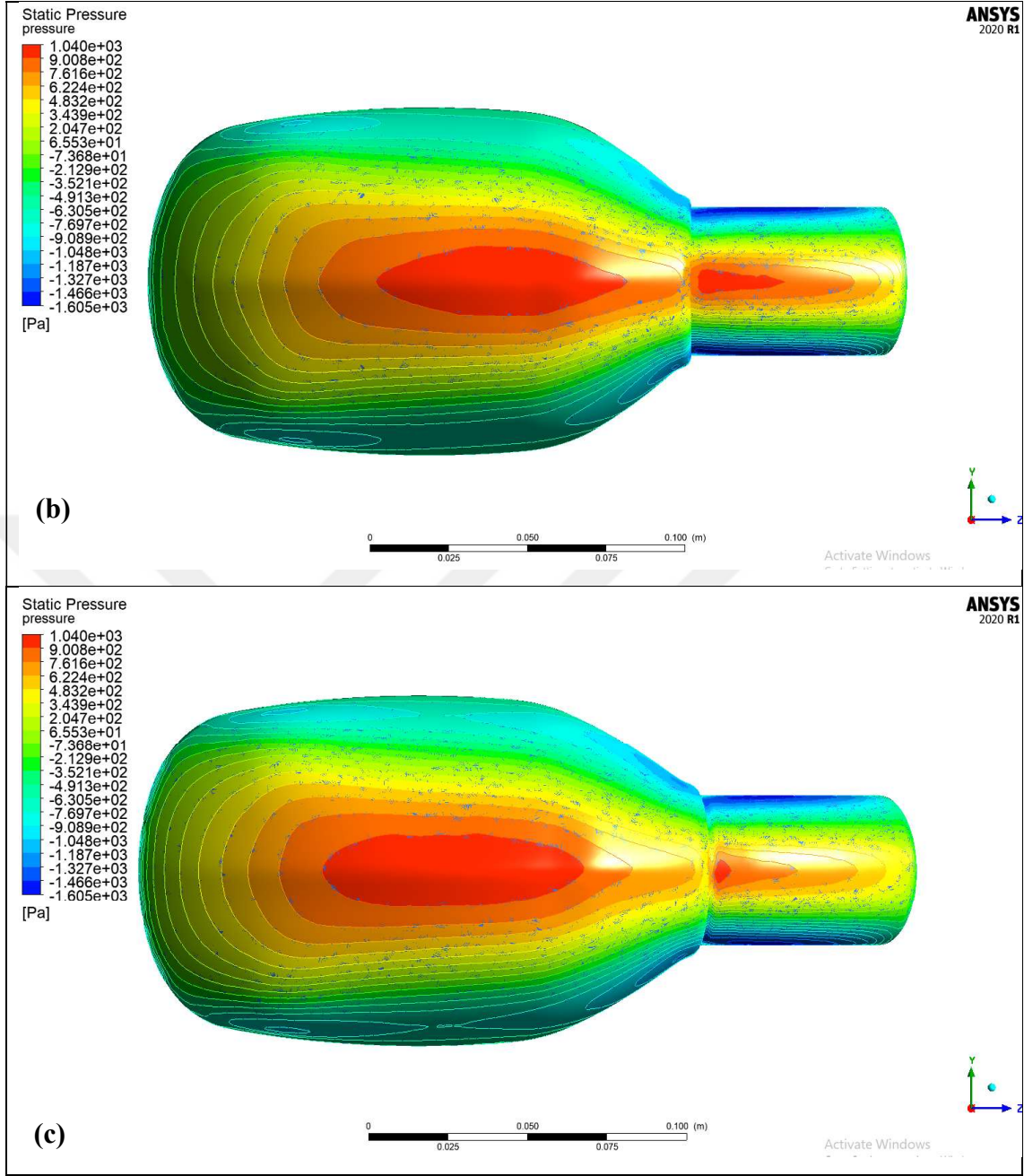
Şekil 4.10. 20 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





Şekil 4.11. 30 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



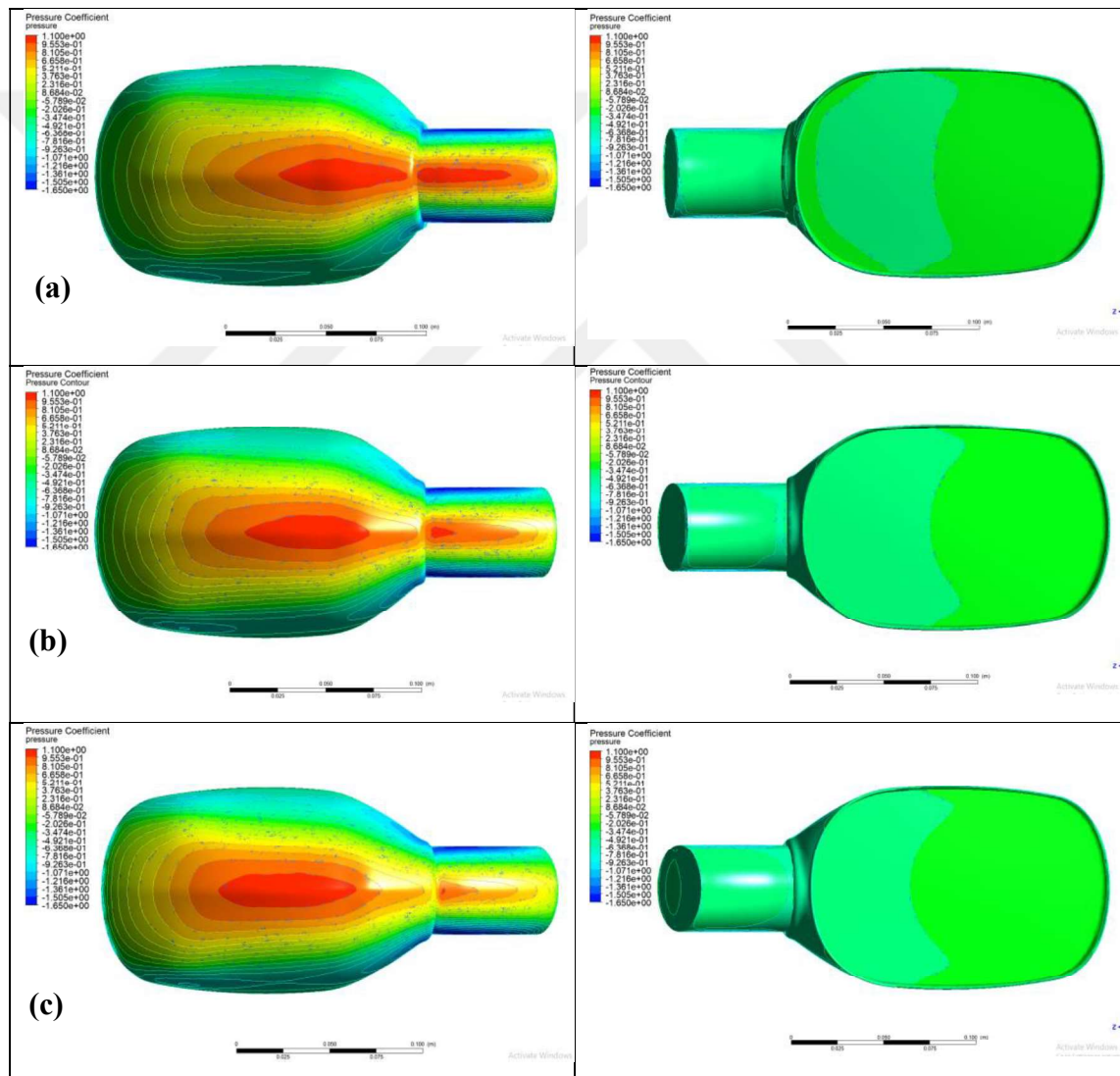


Şekil 4.12. 40 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

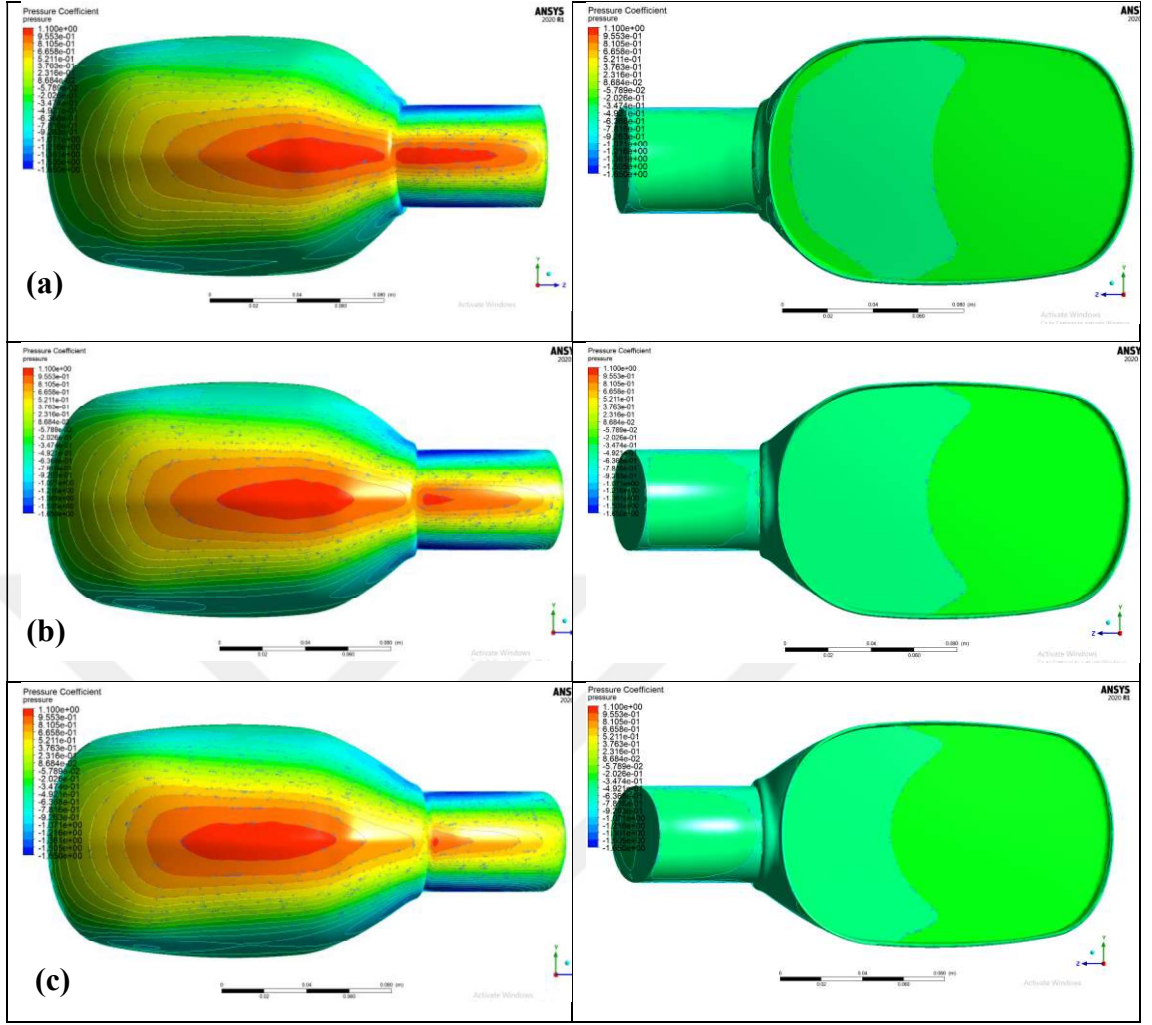
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna üzerinde oluşan basınç katsayısı dağılımları Şekil 4.13 – 4.15’te verilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarında ayna yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç katsayısı değerleri Çizelge 4.4’te verilmiştir. Ayna ön yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımları basınç dağılımlarıyla örtüşmektedir. Ayna arka yüzeyinde ise minimum basınç katsayısı değerlerinin oluştuğu görülmüştür.

Çizelge 4.4. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç katsayısı değerleri

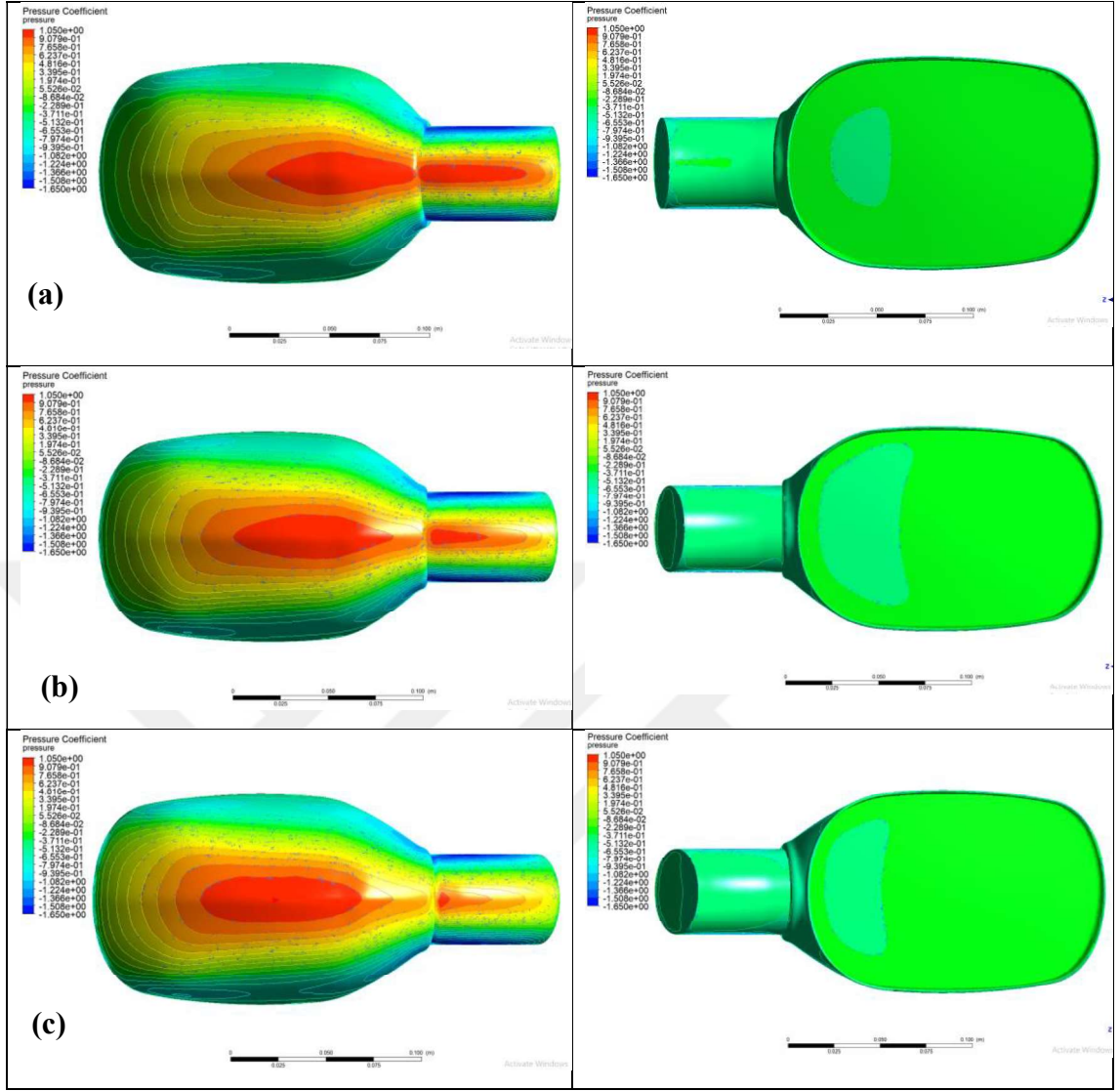
V (m/s) β (°)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks ()	1,05	1,05	1,06	1,05	1,06	1,06	1,05	1,04	1,05
Min ()	-1,6	-1,60	-1,57	-1,62	-1,62	-1,54	-1,64	-1,62	-1,56



Şekil 4.13. 20 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: (a) +10° sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı

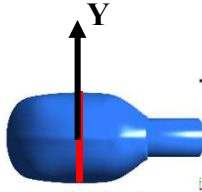


Şekil 4.14. 30 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

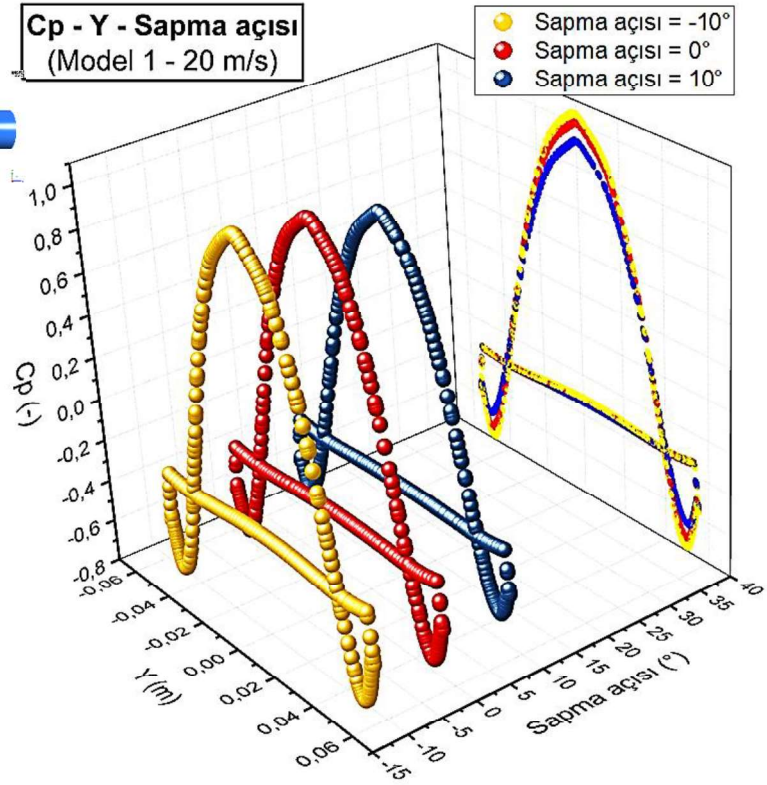


Şekil 4.15. 40 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

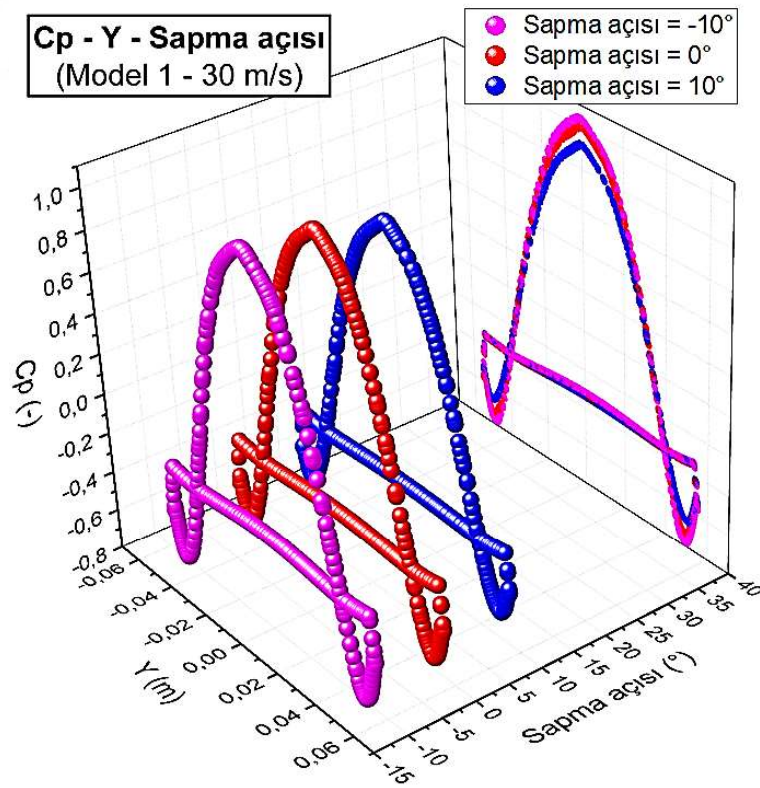
$\beta = 10^\circ$, 0° ve -10° sapma açılarındaki ayna orta bölgesinden alınan eğride Y-ekseni boyunca oluşan basınç katsayıları; 20, 30 ve 40 m/s hızlar için, sırasıyla, Şekil 4.16’da verilmiştir. Grafiklerde en sağdaki eğriler 3 eğrinin izdüşümleridir. Farklı sapma açılarındaki C_p dağılımı büyük farklılıklar göstermemiştir. Ancak -10° sapma açısında diğer sapma açılarındakine göre maksimum C_p değeri artmış, minimum C_p değeri ise azalmıştır. Maksimum C_p değerine aynanın ön yüzeyindeki durma noktasında rastlanmıştır. Bu sonuçlar C_p eğrilerinin bulunduğu düzlemlerdeki C_p dağılımını gösteren Şekil 4.17- 4.19’den de takip edilebilir.

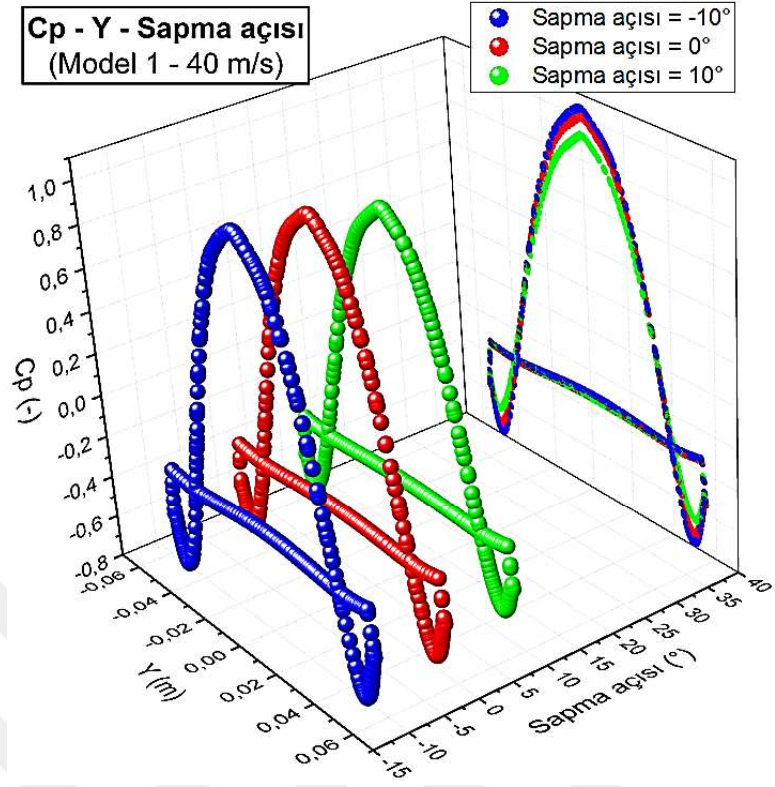


Cp - Y - Sapma açısı
(Model 1 - 20 m/s)

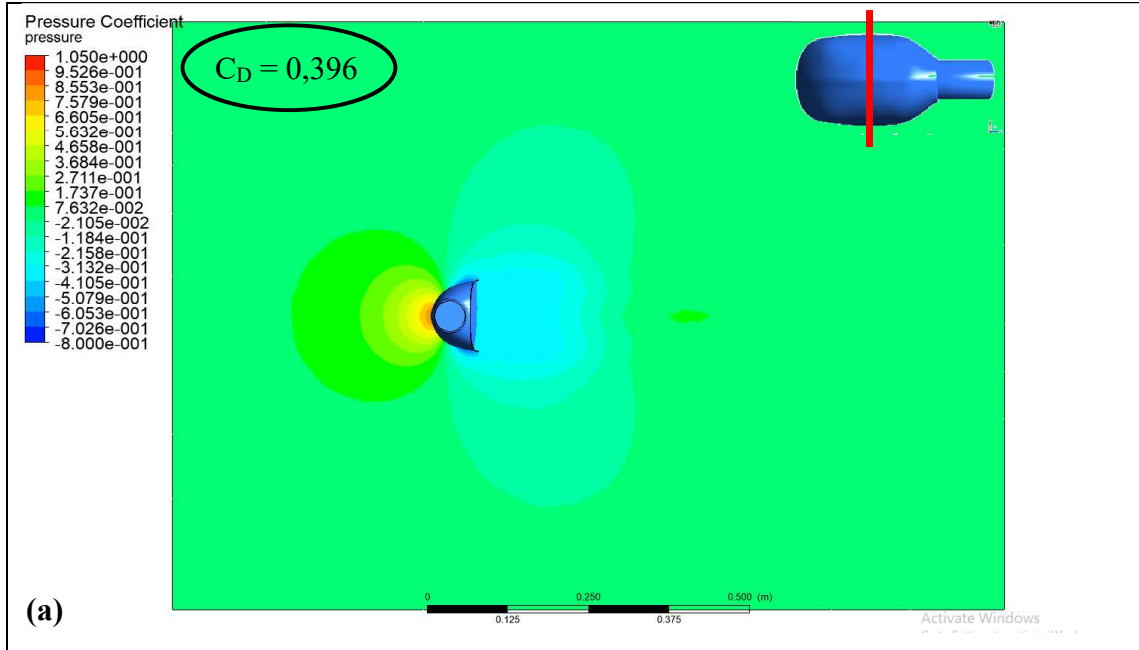


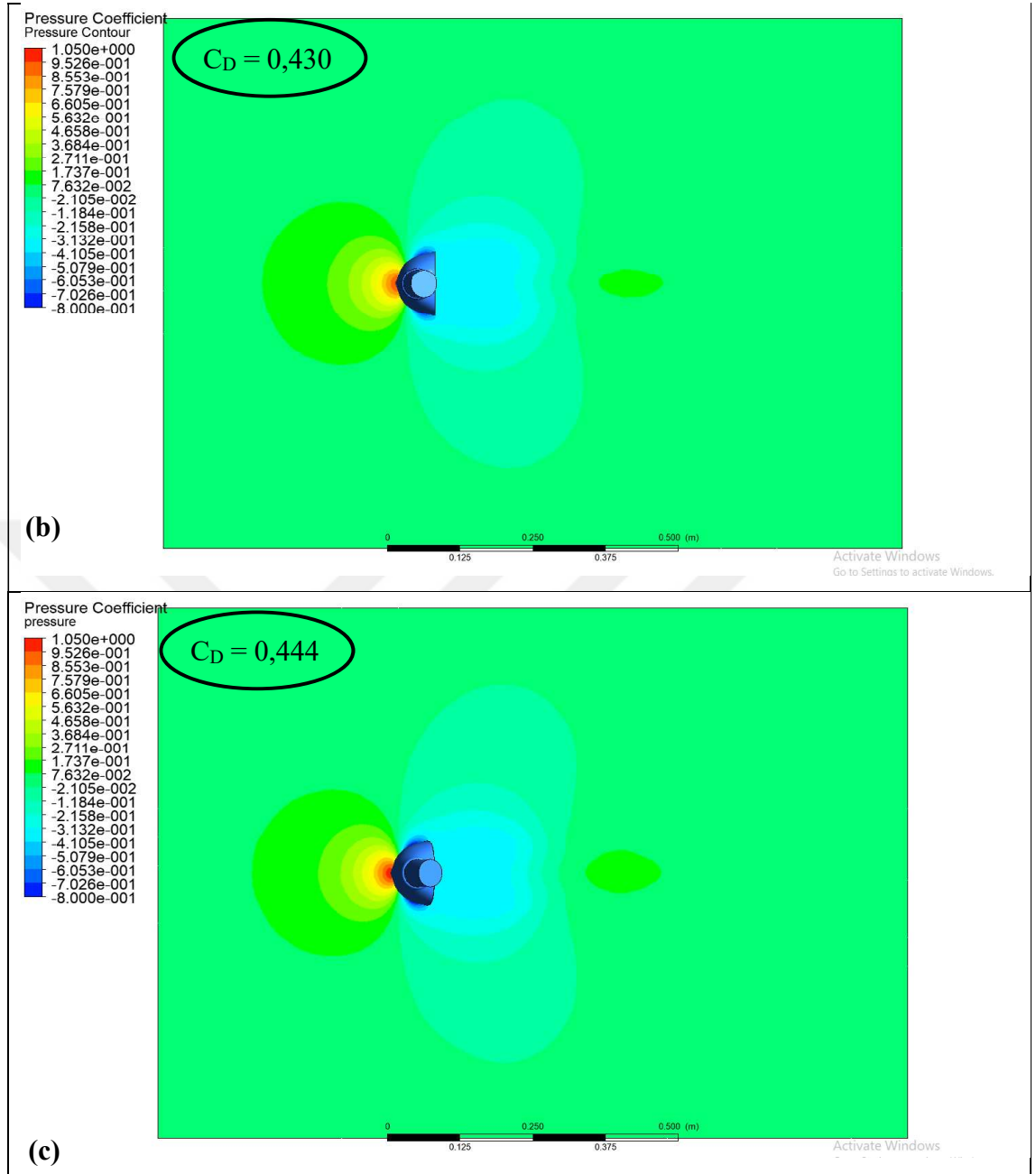
Cp - Y - Sapma açısı
(Model 1 - 30 m/s)



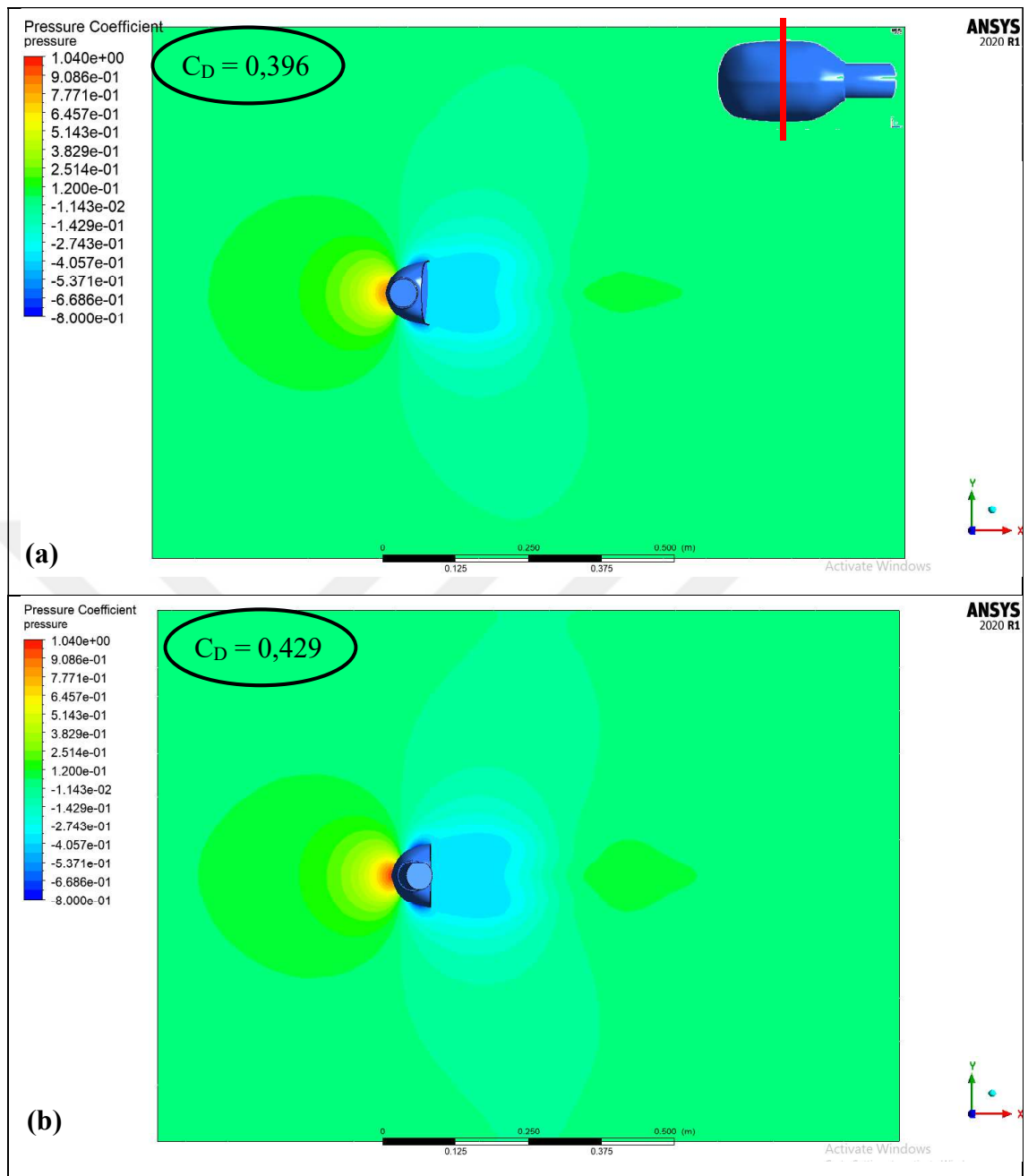


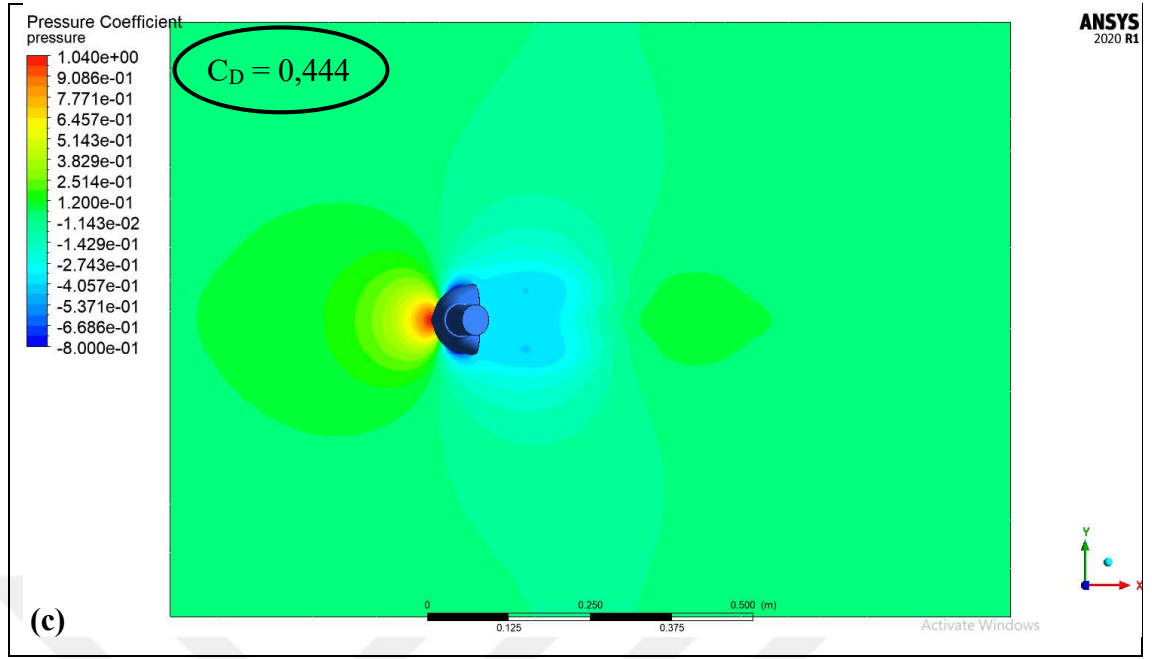
Şekil 4.16. Ayna orta bölgesinden alınan eğride Y-ekseni boyunca oluşan basınç katsayıları: (a) 20 m/s, (b) 30 m/s, (c) 40 m/s (En sağdaki eğriler, 3 eğrinin izdüşümleridir.)



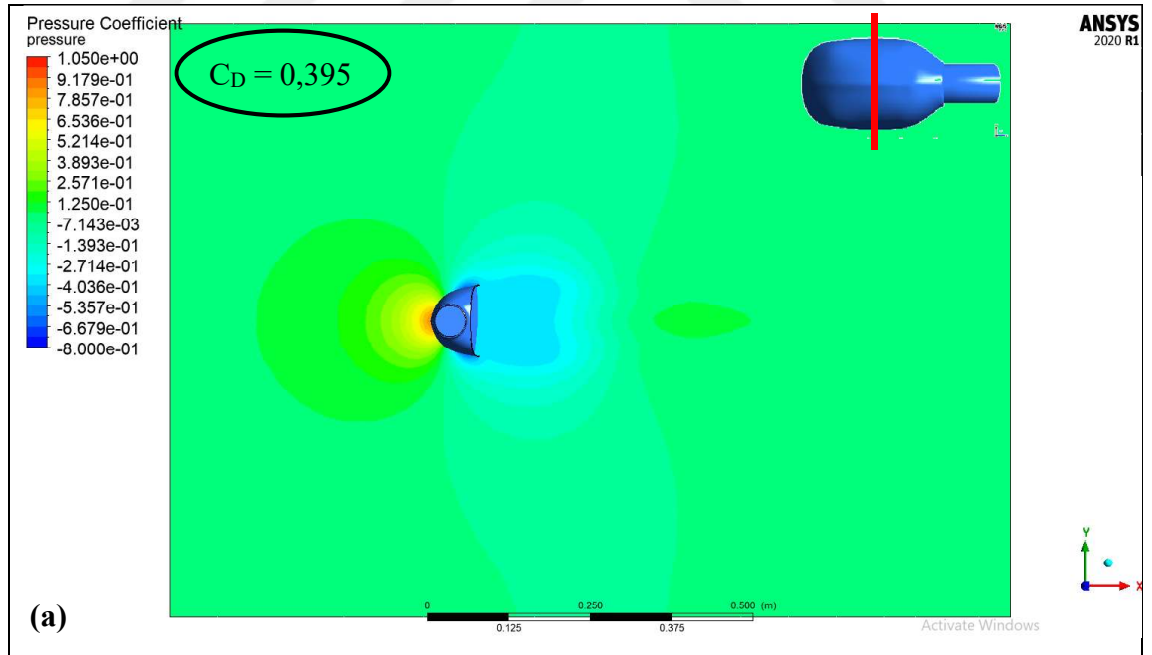


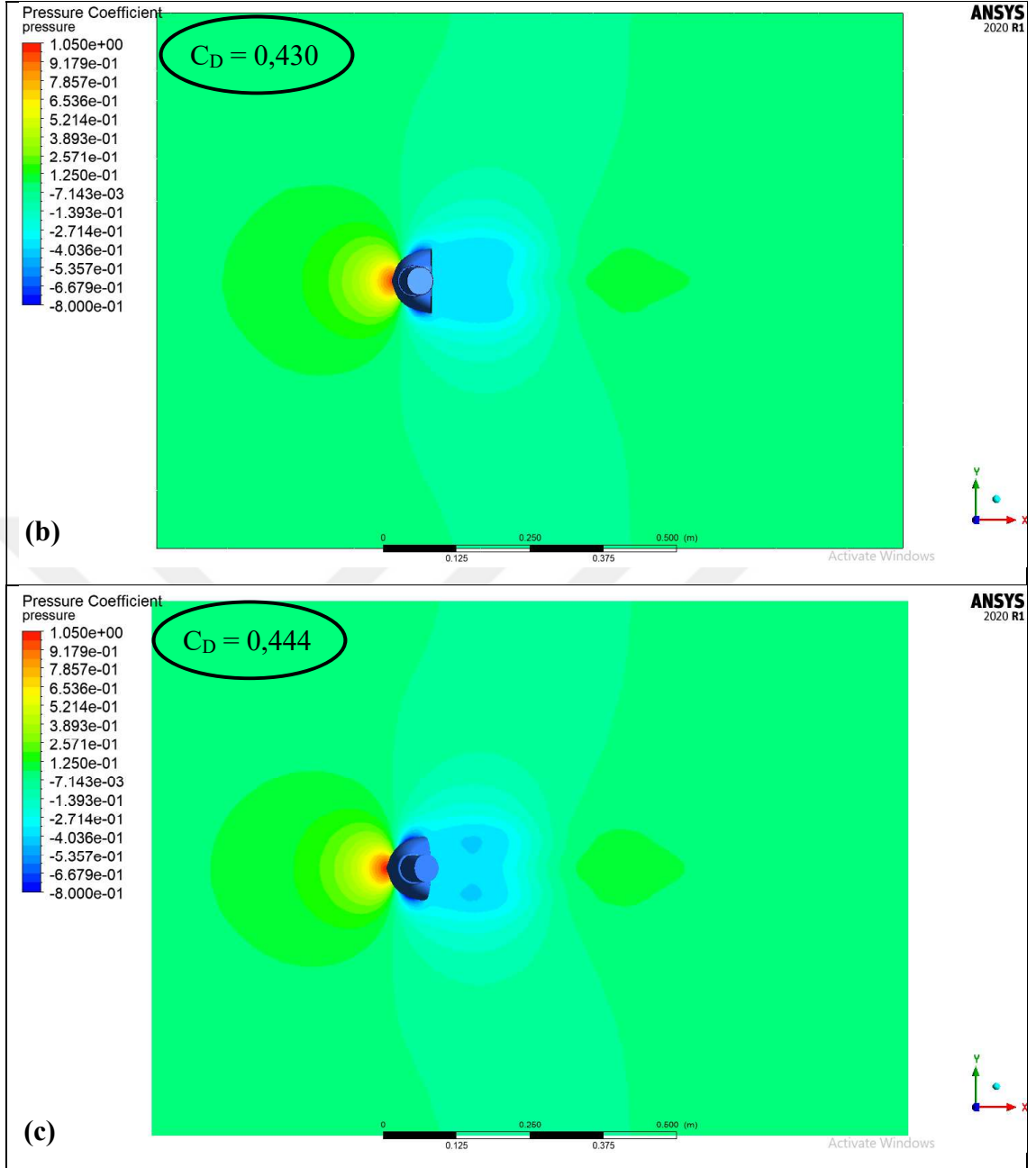
Şekil 4.17. 20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.18. 30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



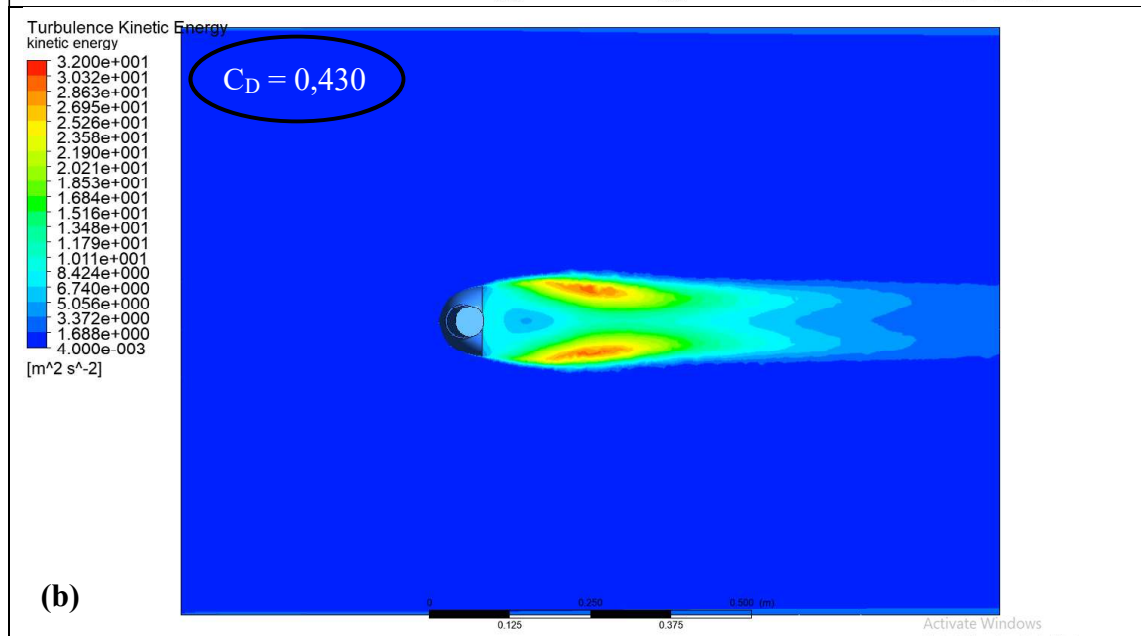
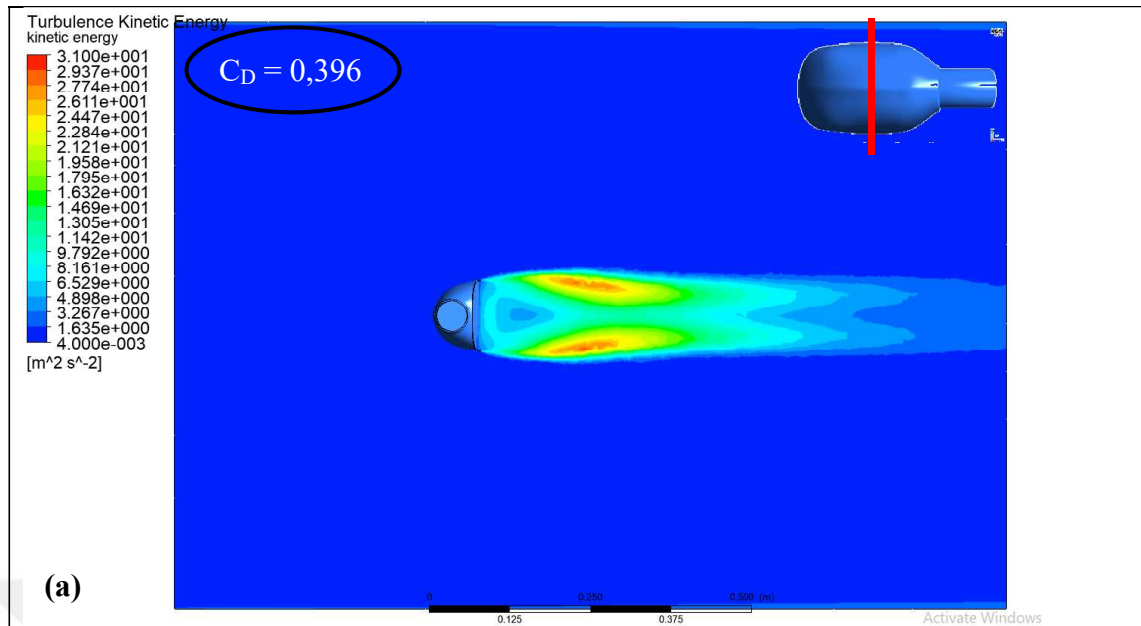


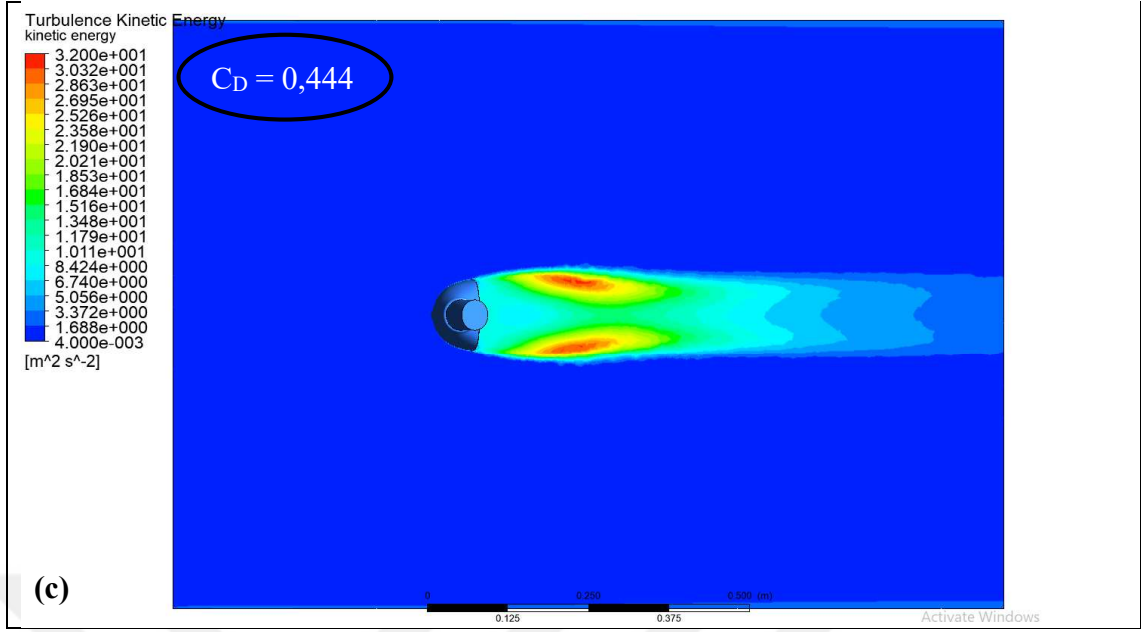
Şekil 4.19. 40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) +10° sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı

$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımları Şekil 4.20-4.22 arasında gösterilmiştir. Tüm sapma açıları ve hızlarda oluşan maksimum ve minimum kinetik enerji değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Hız arttıkça hıza bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi de artmaktadır. Sapma açılarındaki türbülans kinetik enerjisi dağılımları benzerlik göstermektedir. $+10^\circ$ sapma açısında ayna arkasında oluşan vortekslerin ayna arka yüzeyinden bir miktar uzakta ve şiddetinin daha az olduğu görülmüştür. 0° sapma açısında vorteksler ayna arka yüzeyinin hemen ön kısmındadır ve $+10^\circ$ sapma açısında oluşan vorteks bölgelerinden daha büyüktür. -10° sapma açısında ise ayna arka yüzeyine yakın bölgelerde dahi yüksek enerji değerlerine ulaşır şekilde en geniş vorteks yapıları oluşmuştur. Buna bağlı olarak vortekslerde tükenen enerji araç tarafından telafi edilmek durumunda olacağı için C_D de en yüksek değerine -10° sapma açısında ulaşmıştır. Türbülans kinetik enerjisinin büyüklüğü kısmen de olsa oluşan gürültünün şiddeti hakkında bilgi vermektedir. Bu durumda en fazla gürültü -10° sapma açılarındaki görülecektir ve gürültü şiddeti hıza bağlı olarak artacaktır.

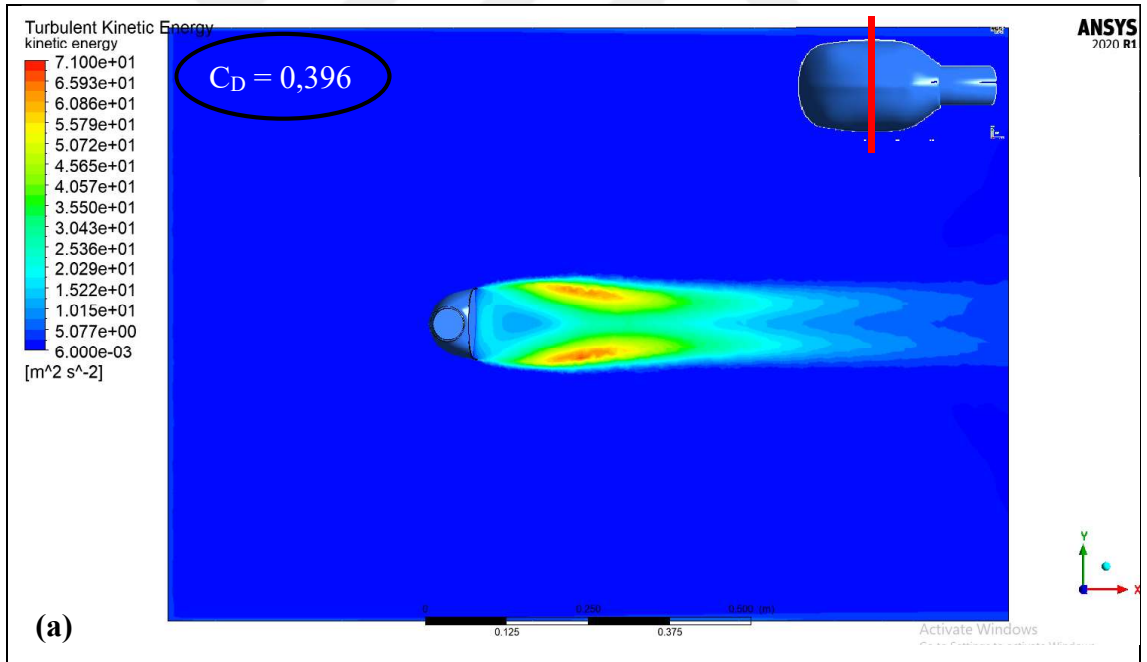
Çizelge 4.5. Tüm sapma açıları ve hızlardaki maksimum ve minimum kinetik enerji değerleri

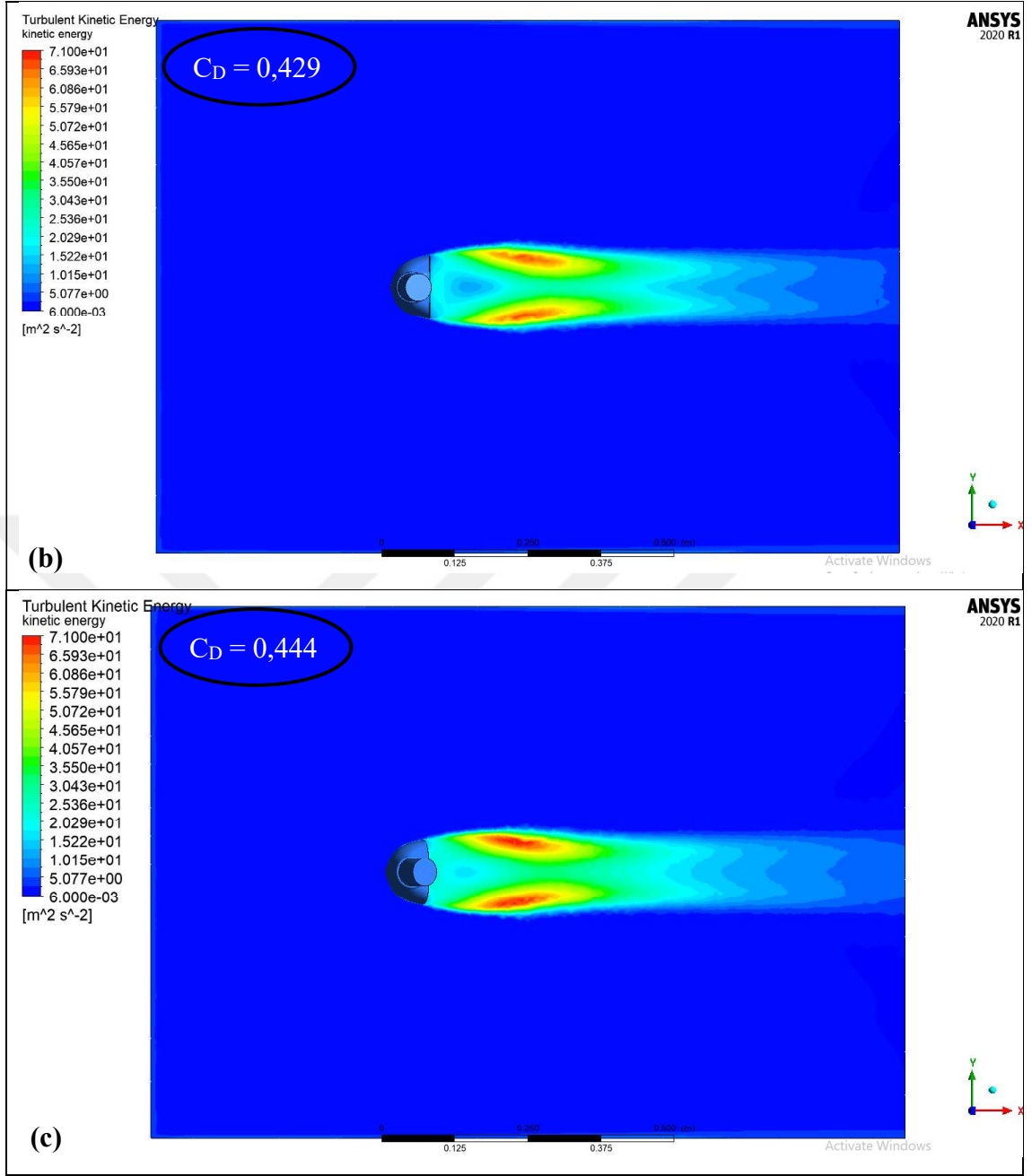
Hız (m/s) β (°)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (m ² /s ²)	29,32	30,26	30,9	67,42	68,7	70,41	120,03	124,13	125,6
Min (m ² /s ²)	0,0048	0,0049	0,0047	0,0051	0,0053	0,005	0,0051	0,0052	0,0049



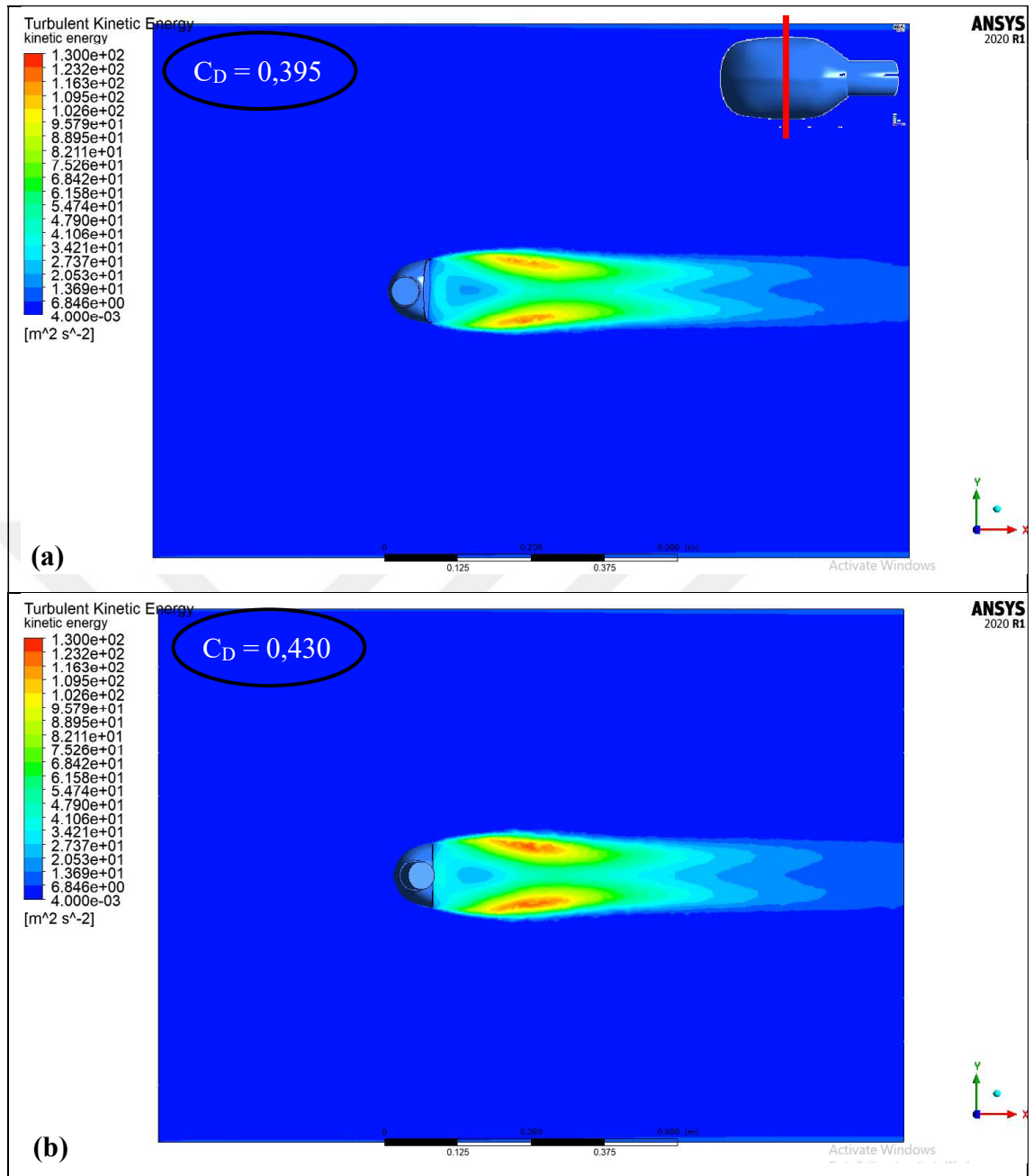


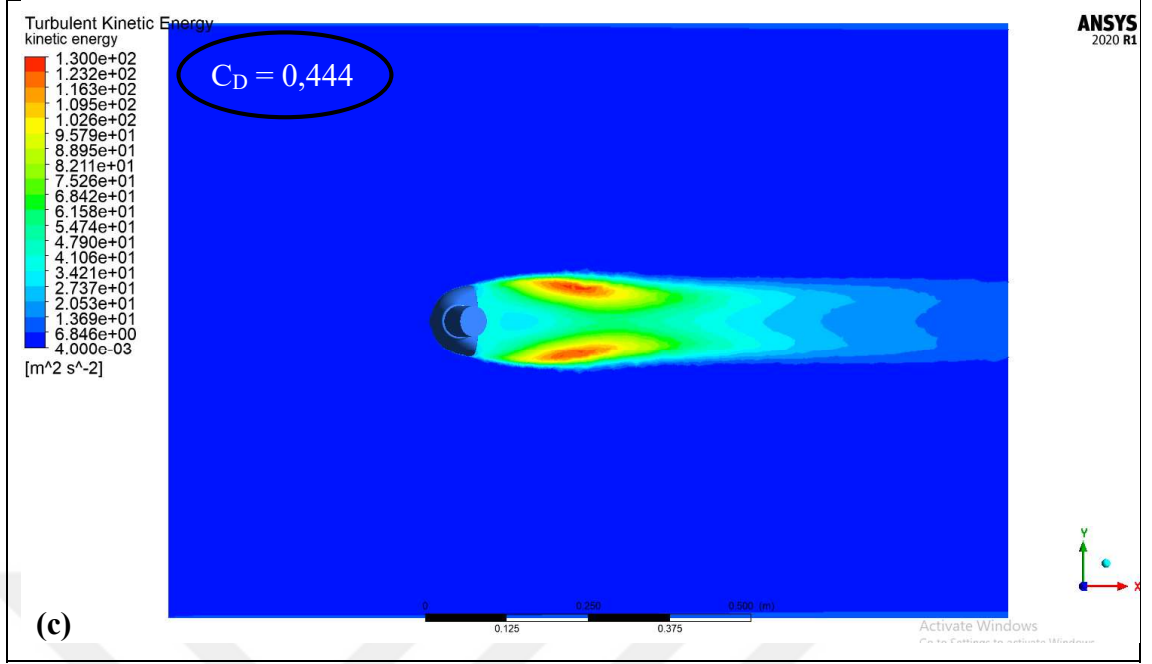
Şekil 4.20. 20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





Şekil 4.21. 30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





Şekil 4.22. 40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

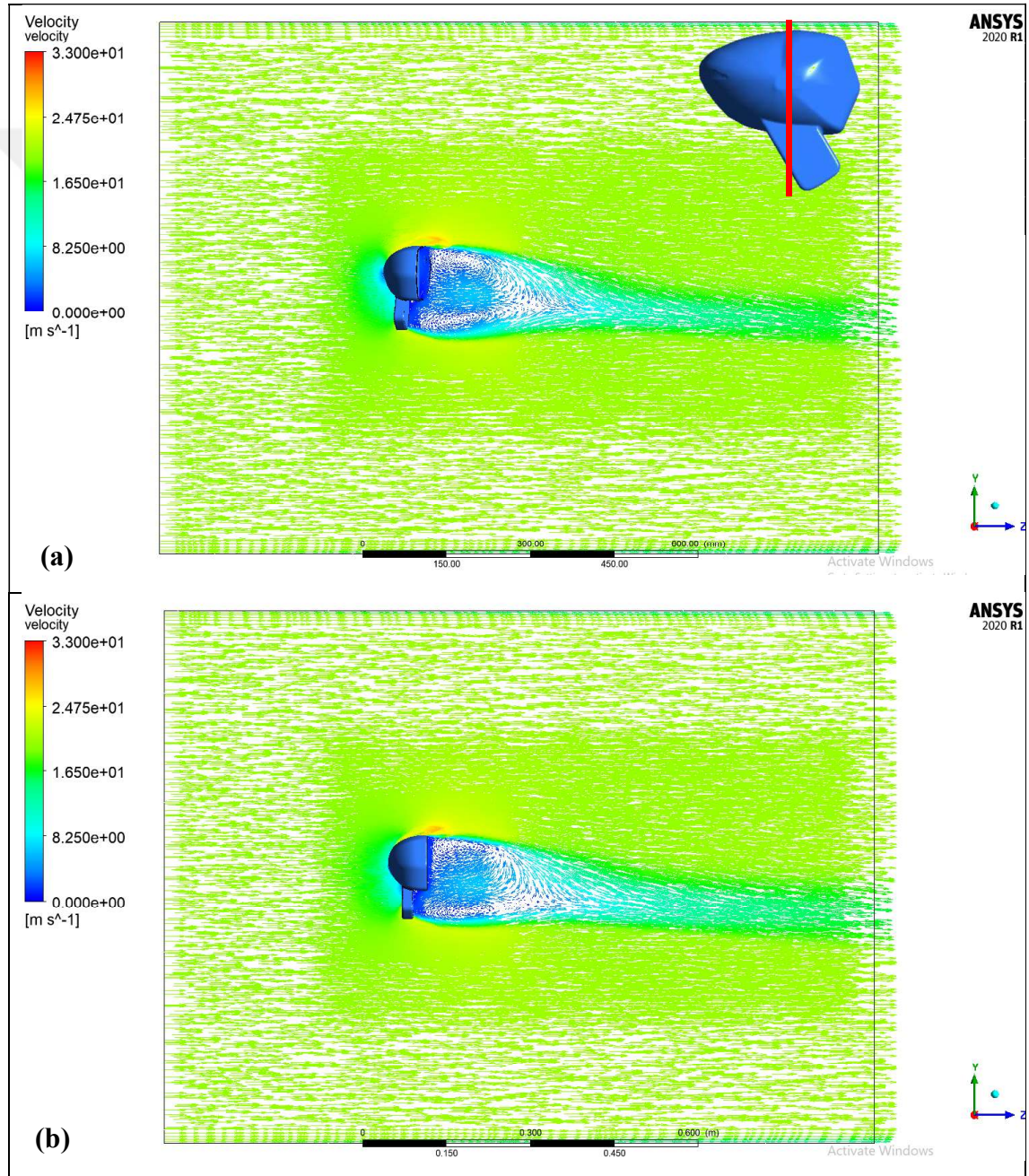
4.3. Model 2 – Hız ve Sapma Açısı Etkisi

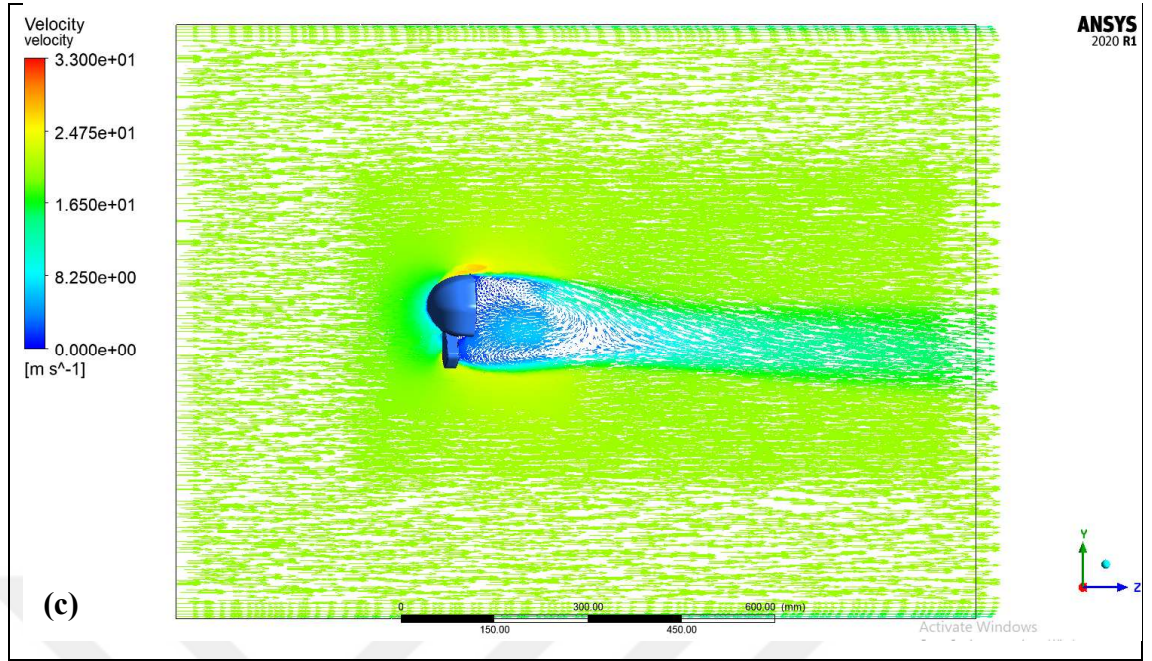
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan hız vektörleri Şekil 4.23 – 4.25’te verilmiştir. Tüm sapma açıları ve hızlarda ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum hız değerleri Çizelge 4.6’da sunulmuştur.

Ayna arkası hız dağılımı benzer profil göstermektedir. Akışın ilk çarptığı ayna orta noktası ile ayna bağlama kolu arasındaki alanda ve ayna arkası bölgede minimum hız değerleri görülmüştür. Maksimum hız değerleri ise ayna üst kısmında oluşmuştur ve ayna sapma açısına bağlı olarak oluşum bölgeleri değişiklik göstermiştir. +10° sapma açısında maksimum hız vektörleri ayna üst uç kısmı ile ayna arkasına doğru bir alanda oluşurken -10° sapmaya doğru gidildiğinde maksimum hız vektörlerinin ayna ön yüzeyine doğru geri geçildiği görülmüştür. Bunun muhtemel sebebi ayrılmanın daha erken gerçekleşmesidir. Ayrılma basınç değerlerinin en düşük hız değerlerinin en yüksek olduğu hat aşıldıktan sonra basıncın en düşük seviyeden tekrar arttığı, hızın ise en yüksek seviyelerden düşmeye başladığı kısımda meydana gelmektedir.

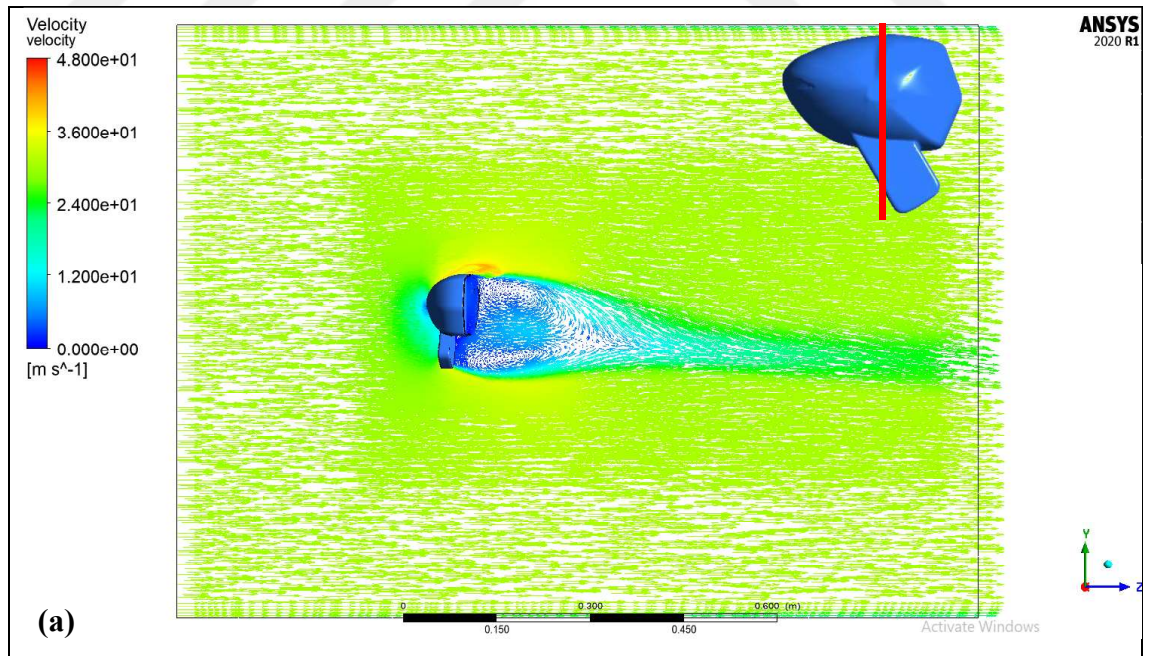
Çizelge 4.6. Tüm sapma açıları ve hızlarda ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum hız değerleri

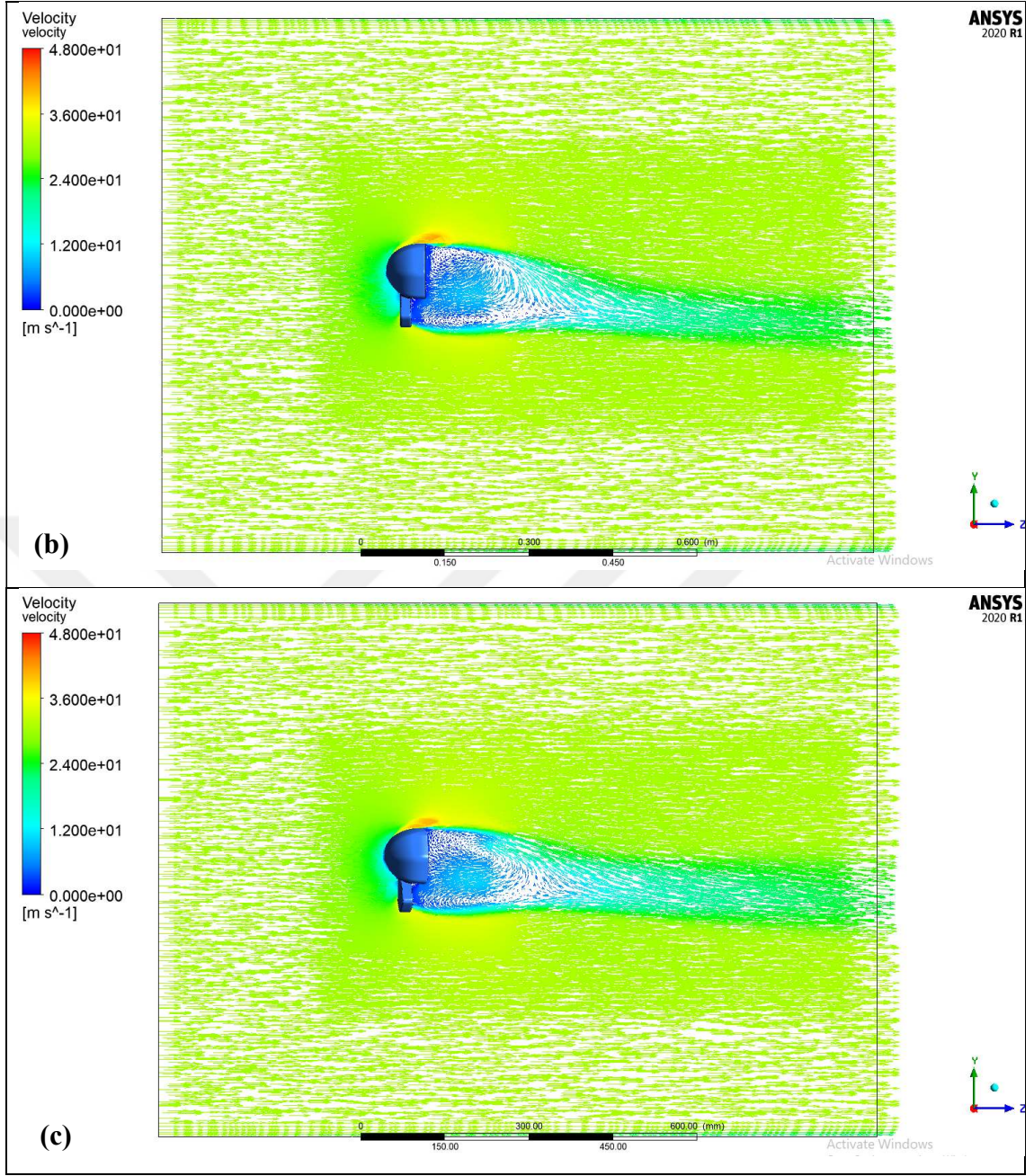
Hız (m/s) β (°)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (m/s)	29,43	29,23	32,03	44,36	43,94	47,99	59,35	58,68	63,88
Min (m/s)	0								



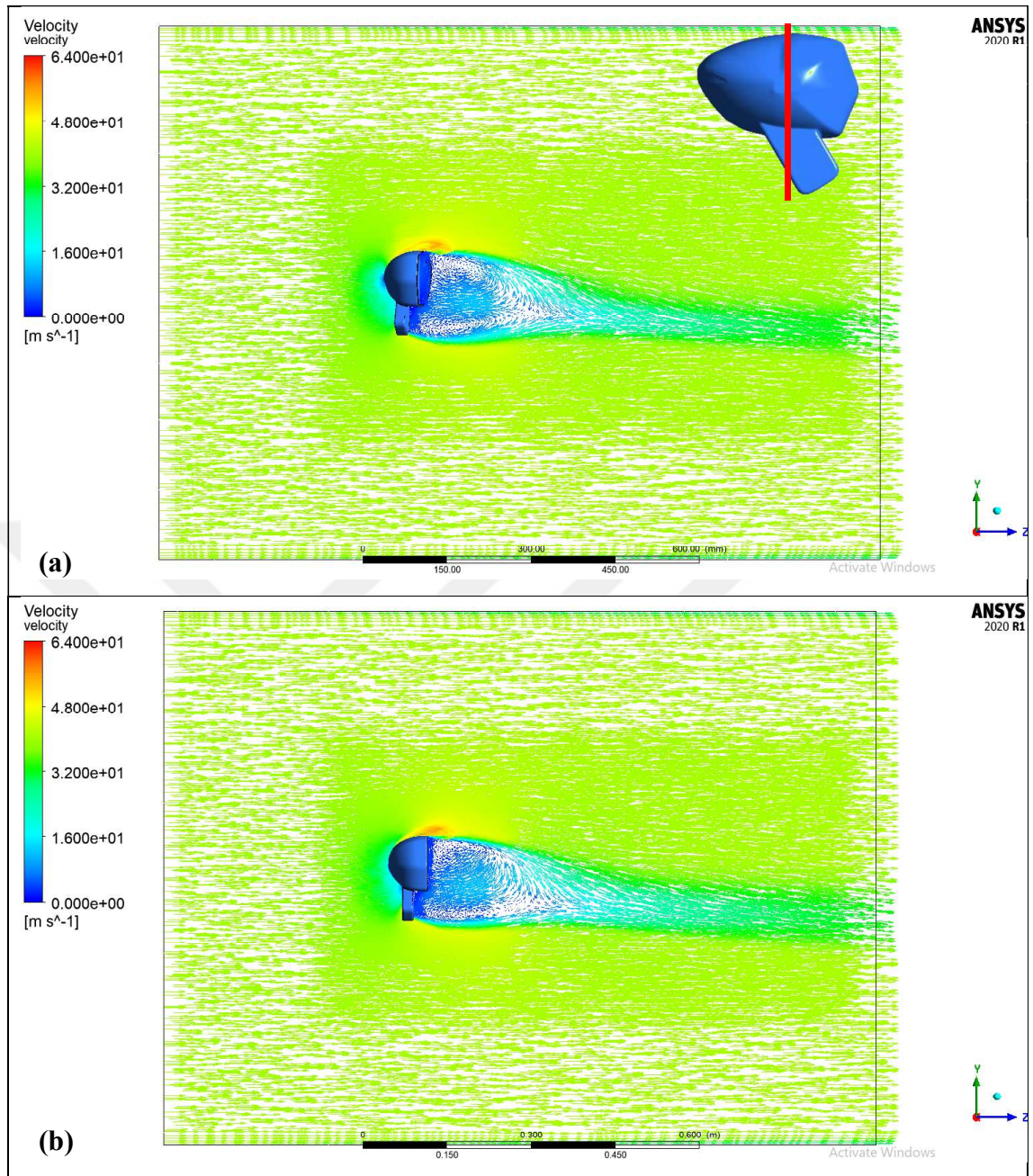


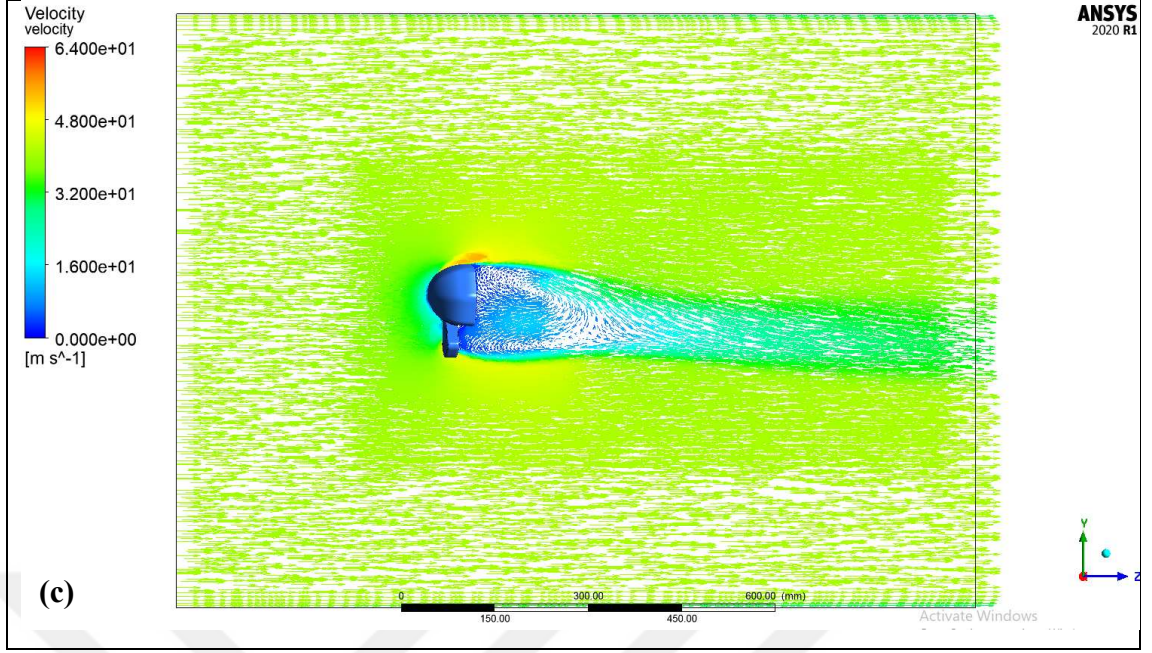
Şekil 4.23. 20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





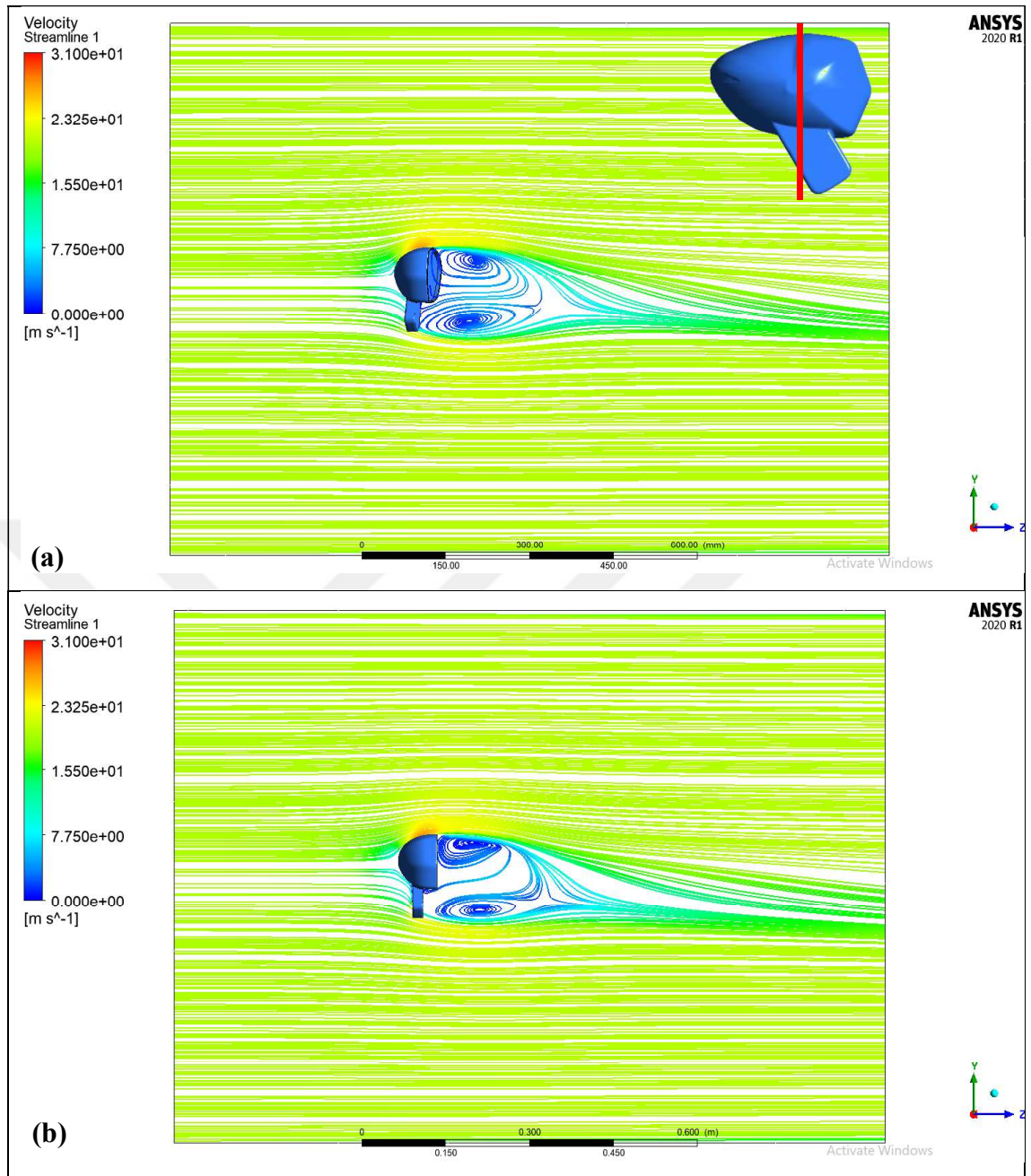
Şekil 4.24. 30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı

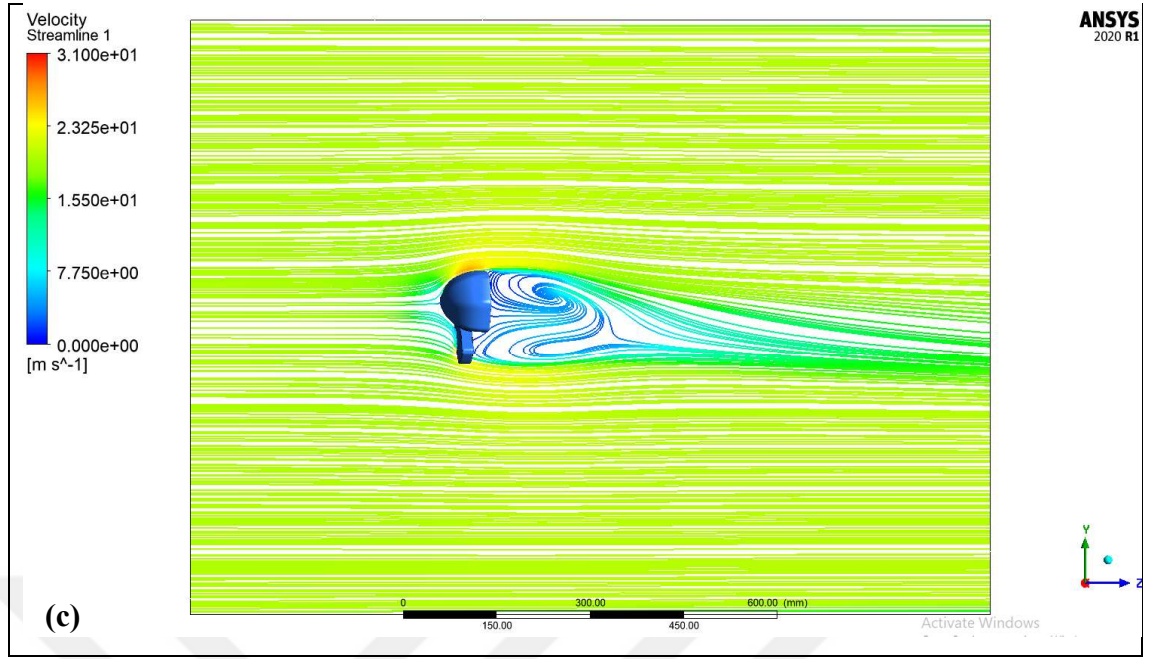




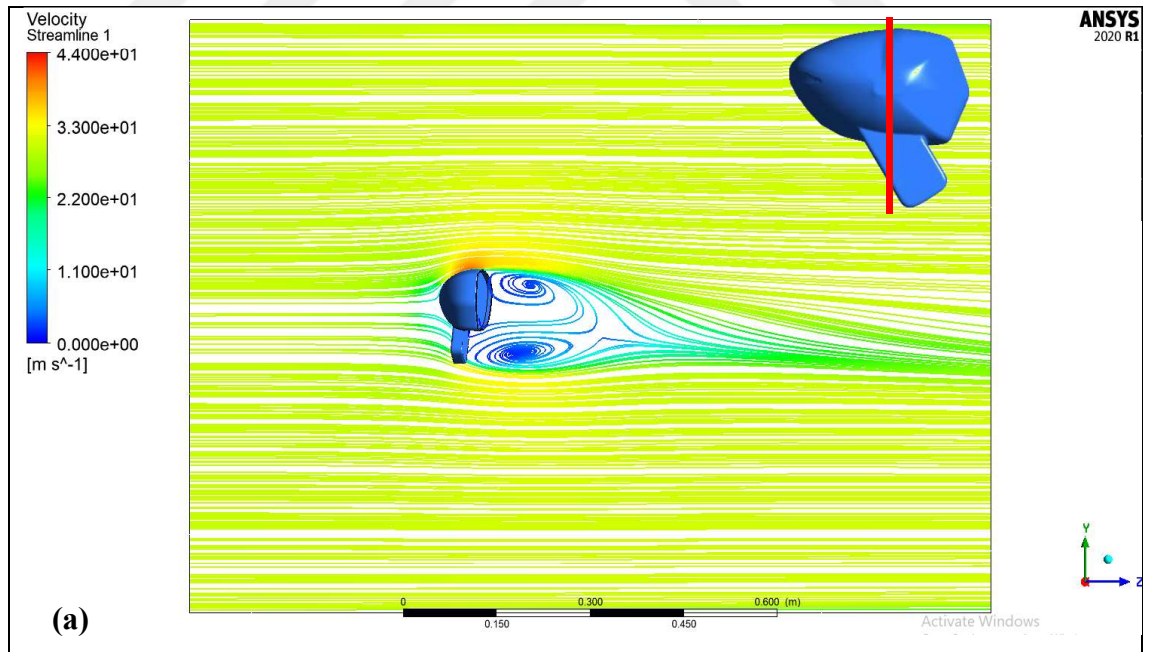
Şekil 4.25. 40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

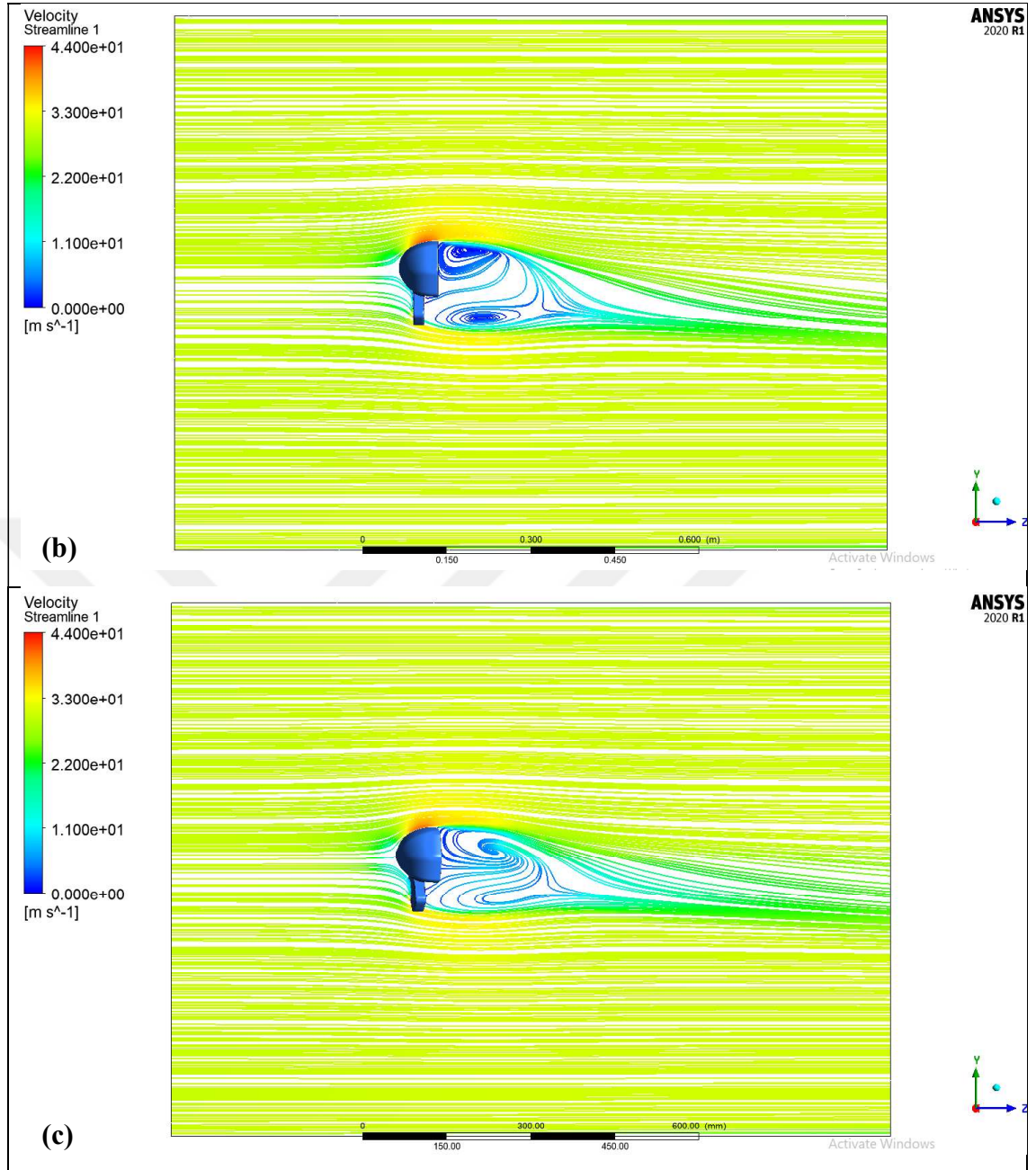
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan akım çizgileri Şekil 4.26 – 4.28’de verilmiştir. Tüm hızlarda ayna ardında ayna ve bağlama kolunu kapsayacak şekilde birbiriyle etkileşimli bir vorteks çifti oluşumu gözlenmiştir. $+10^\circ$ sapma açısına sahip aynanın arkasında vorteksler neredeyse simetriktir ve akış birleşmesi daha kısa bir mesafede gerçekleşmiştir.



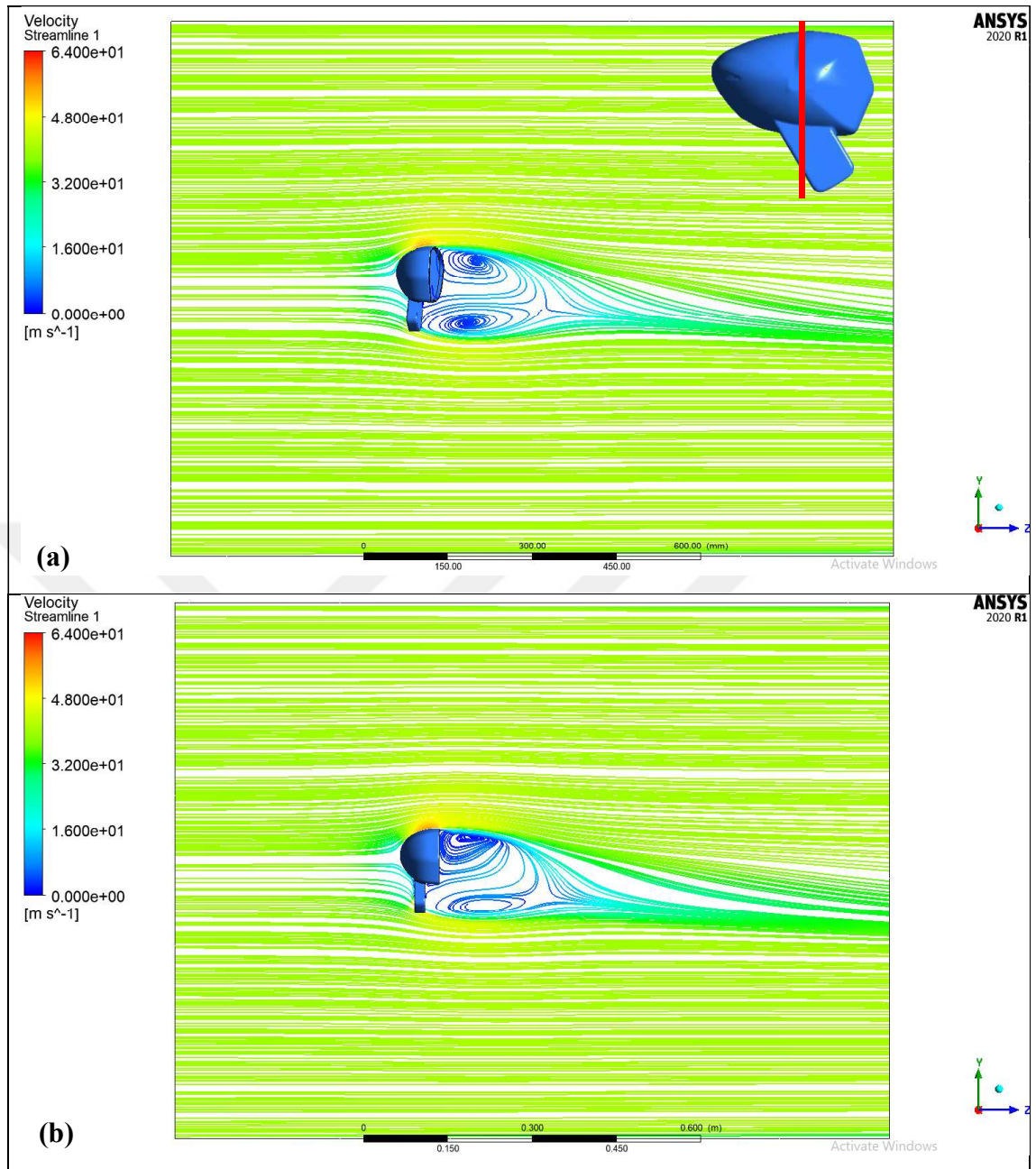


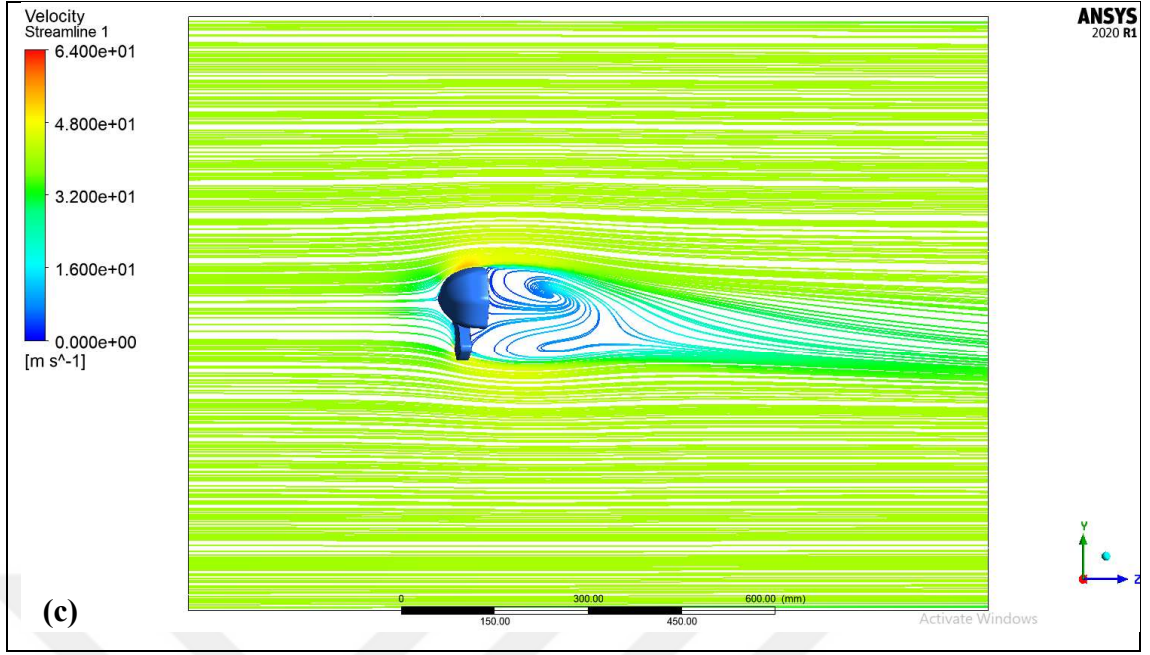
Şekil 4.26. 20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





Şekil 4.27. 30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) +10° sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı



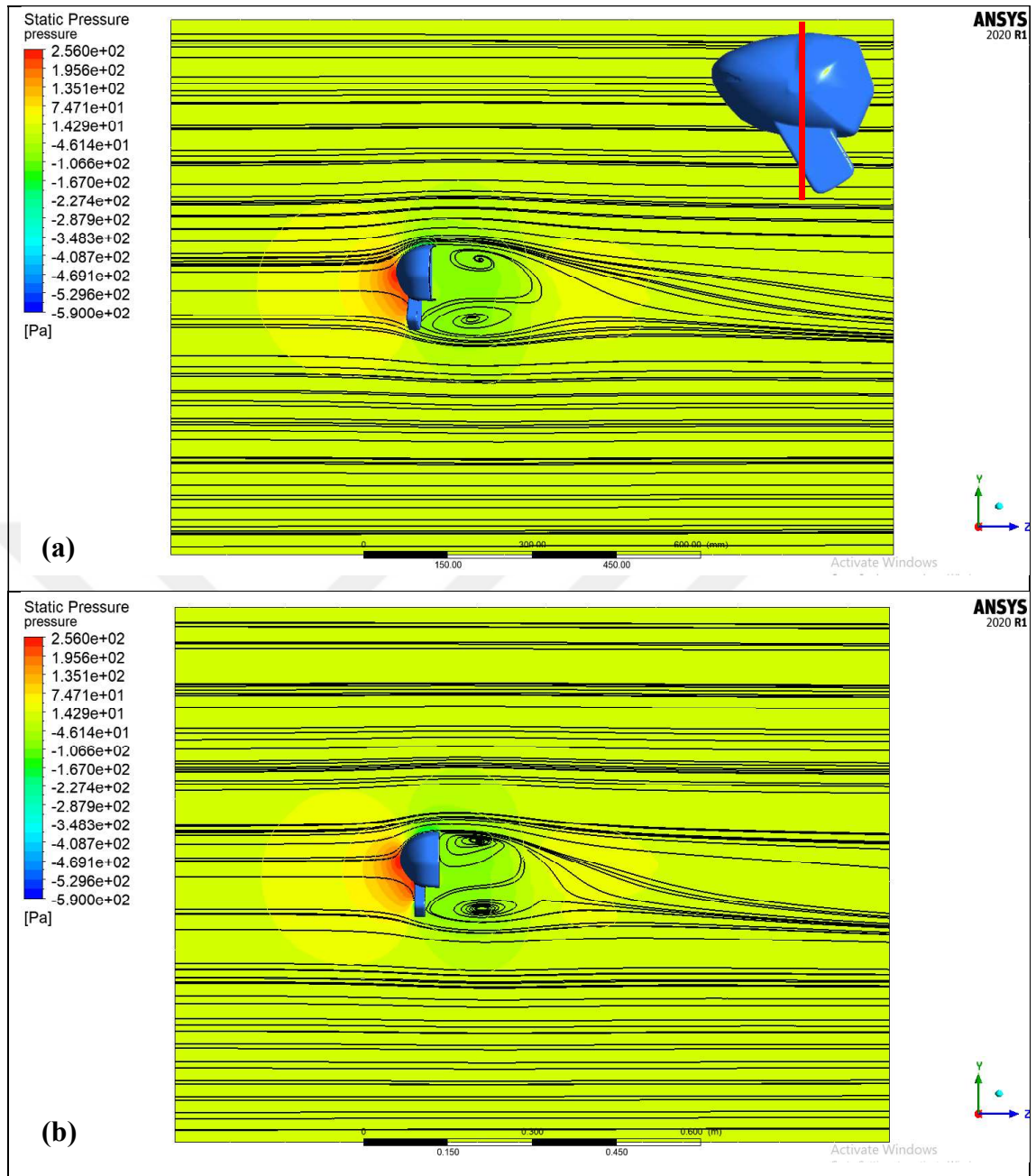


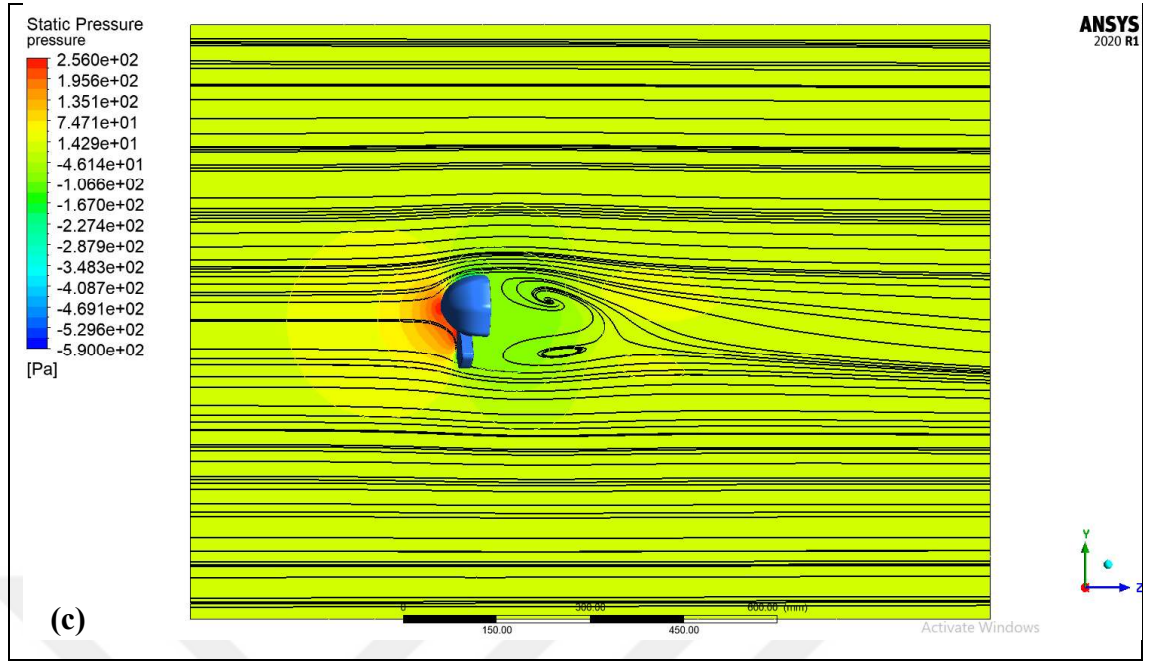
Şekil 4.28. 40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan basınç dağılımları Şekil 4.29 – 4.31’de verilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Maksimum basınç minimum hızın olduğu (hızın durduğu) ayna ön orta ile bağlama kolu arasındaki bölgede oluşmuştur. Ayna arkasındaki vorteksli bölgelerde ise minimum değerlerin olduğu görülmüştür. Akım çizgilerinin birleşme bölgesi önündeki alanda bir basınç artışı tespit edilmiştir. Ayna arkasında en düşük basınç değerleri $+10^\circ$ sapma açısında görülmüştür. Hız artışına bağlı olarak maksimum ve minimum basınçlar artış göstermiştir.

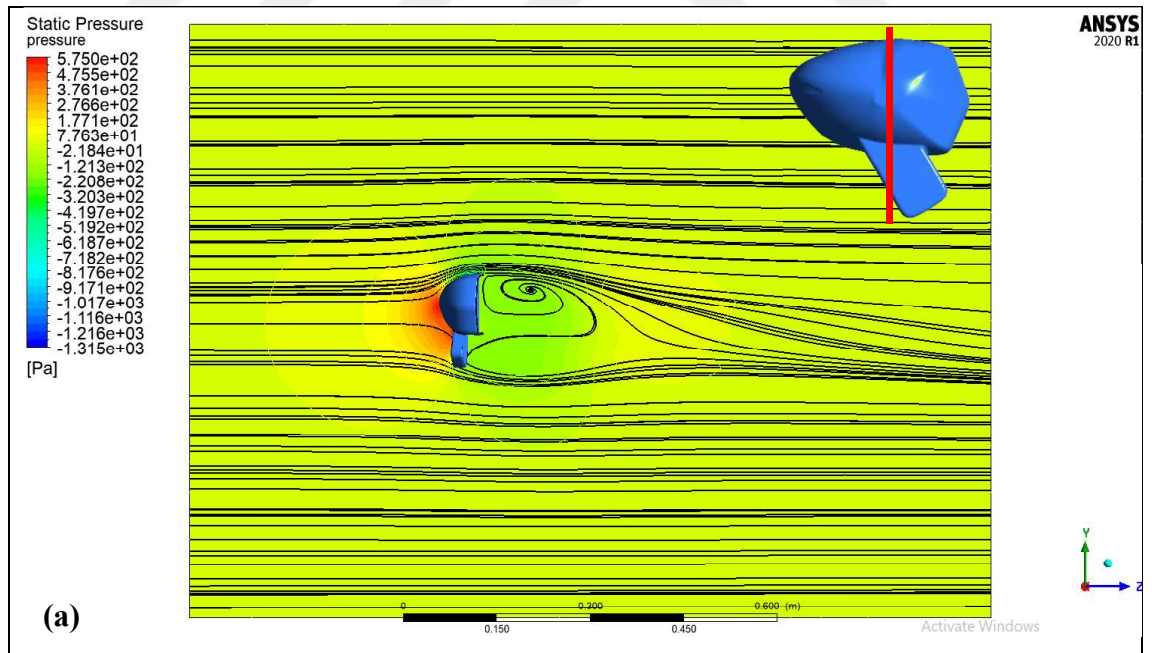
Çizelge 4.7. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri

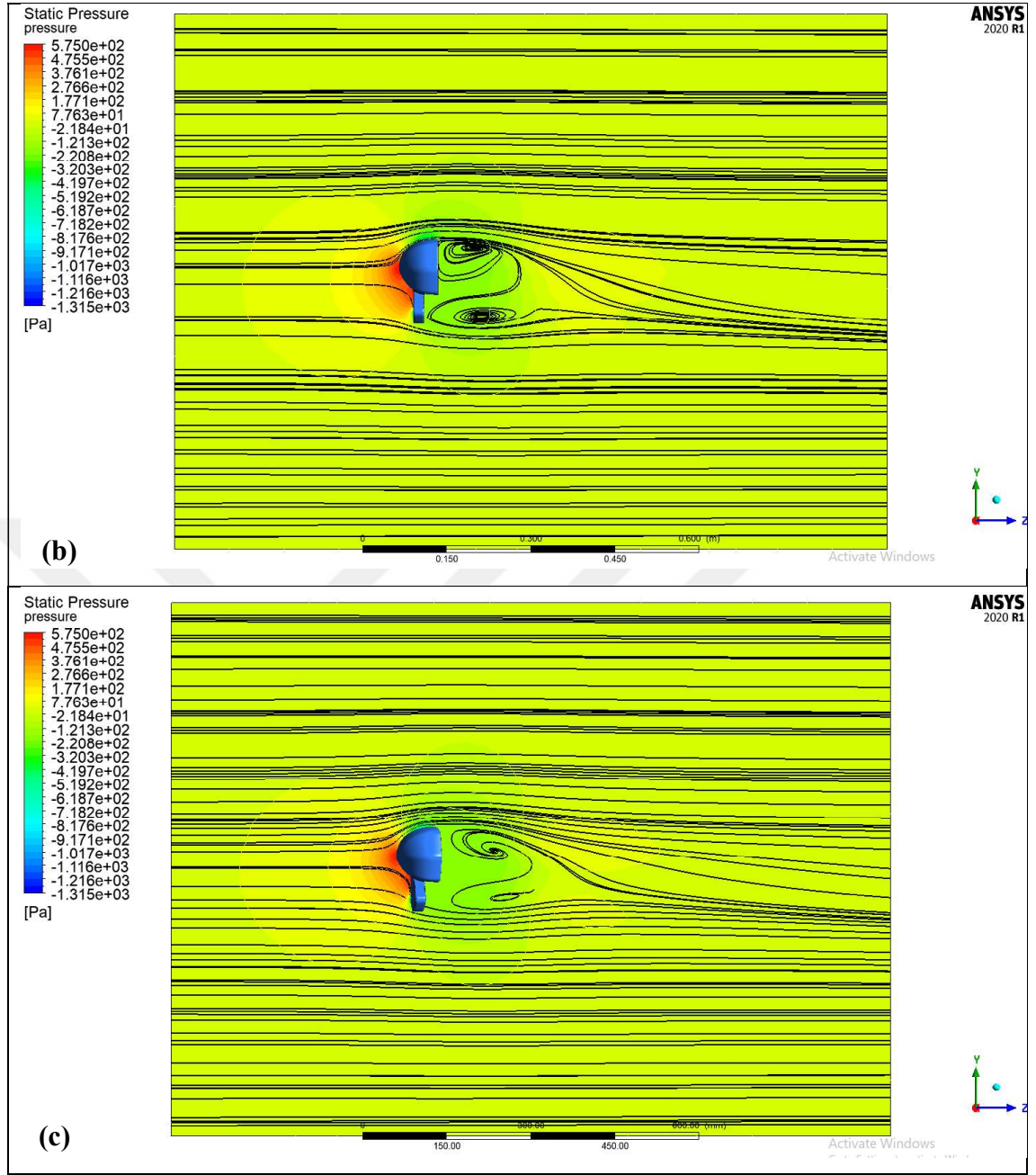
V (m/s)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
β ($^\circ$)									
Maks (Pa)	255,35	255,77	250,5	573,18	574,13	562,45	1017,18	1019,19	998,86
Min (Pa)	-447,56	-462,44	-589,84	-1016,64	-1041,58	-1313,09	-1822,99	-1857,71	-2315,54



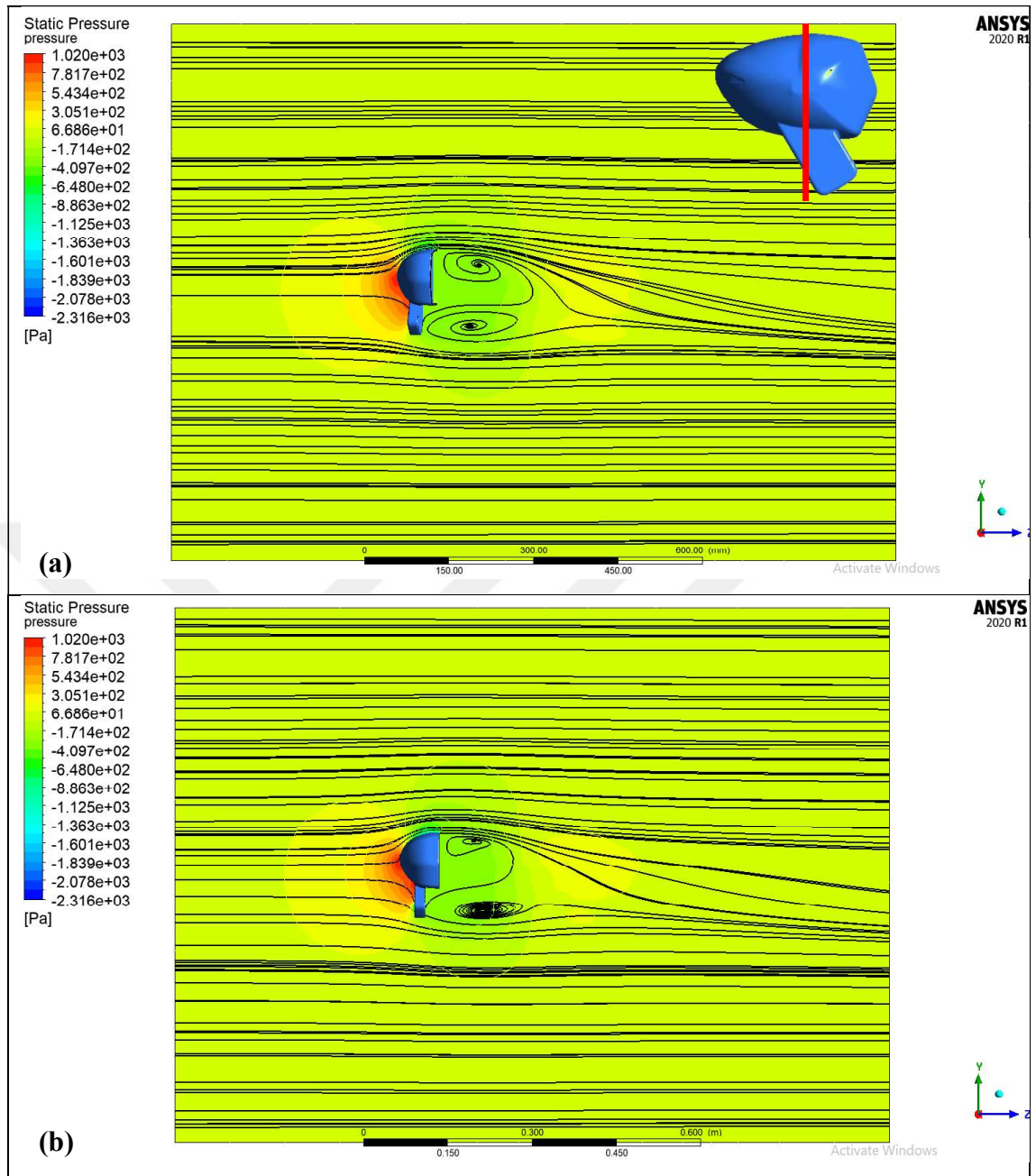


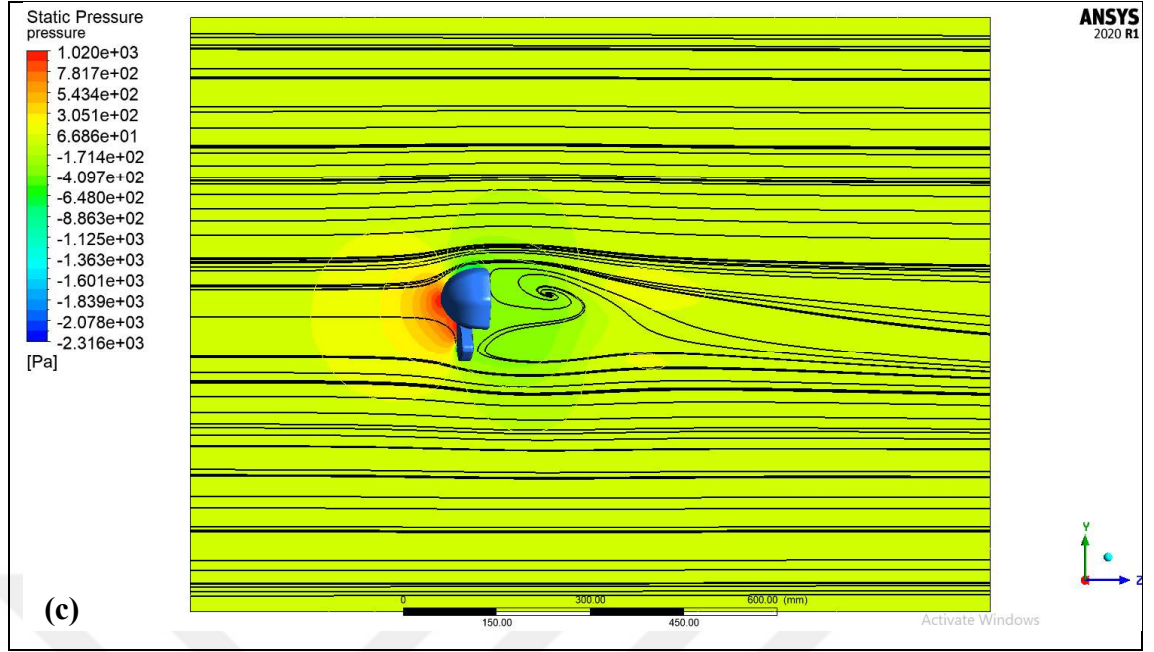
Şekil 4.29. 20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





Şekil 4.30. 30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı



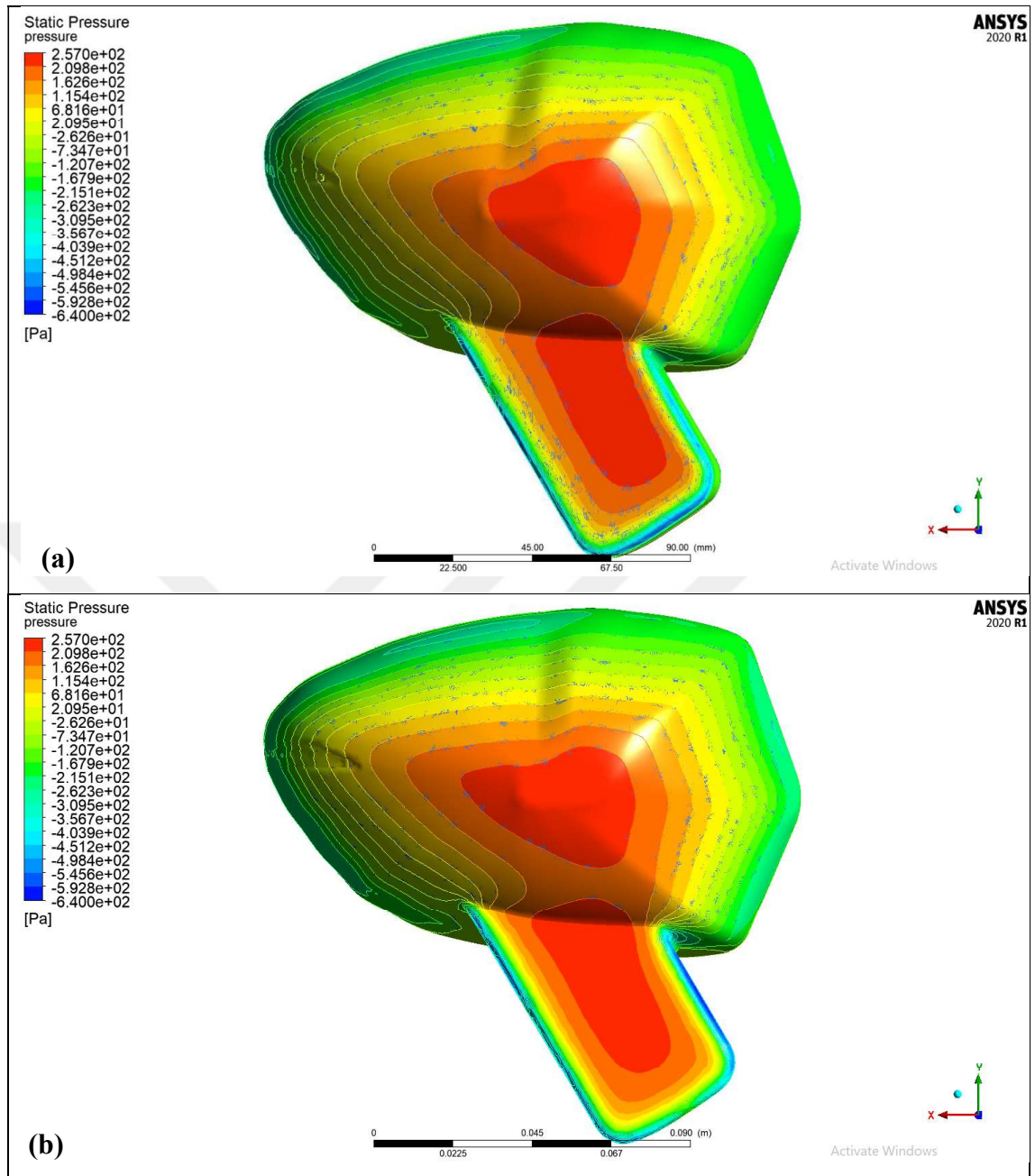


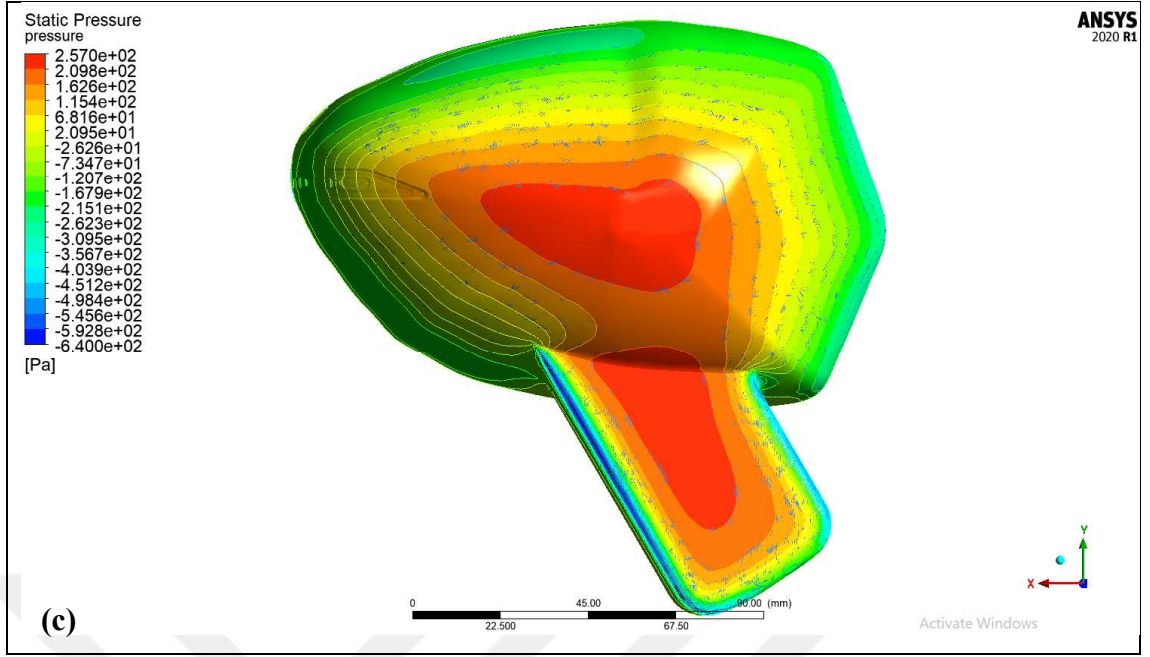
Şekil 4.31. 40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı

$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna üzerinde oluşan basınç dağılımları Şekil 4.32 – 4.34’te verilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarında ayna üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri Çizelge 4.8’de verilmiştir. Ayna ön yüzeyinde basınç dağılımı hemen hemen her hızda benzer özellik göstermesine rağmen sapma açılarındaki değişim ayna üzerindeki basınç dağılımını değiştirmektedir. Durma noktası ve civarında maksimum değerler görülürken, ayrılmanın görüldüğü bölgelerde minimum basınç değerleri ölçülmüştür. Maksimum basınç değerleri 10° sapma açısından -10° sapma açısına doğru ayna gövde ve bağla kolu üzerinde sola doğru bir kayma yaşarken, minimum basınç değerleri bağlama kolu çevresinde gerçekleşmiştir.

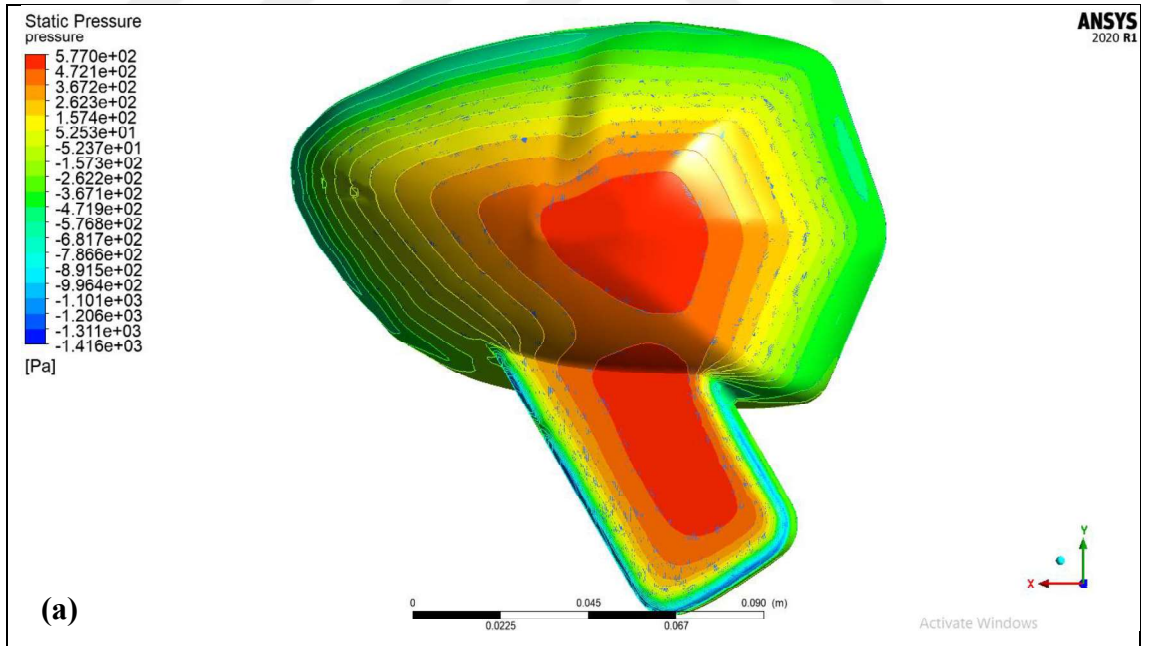
Çizelge 4.8. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri

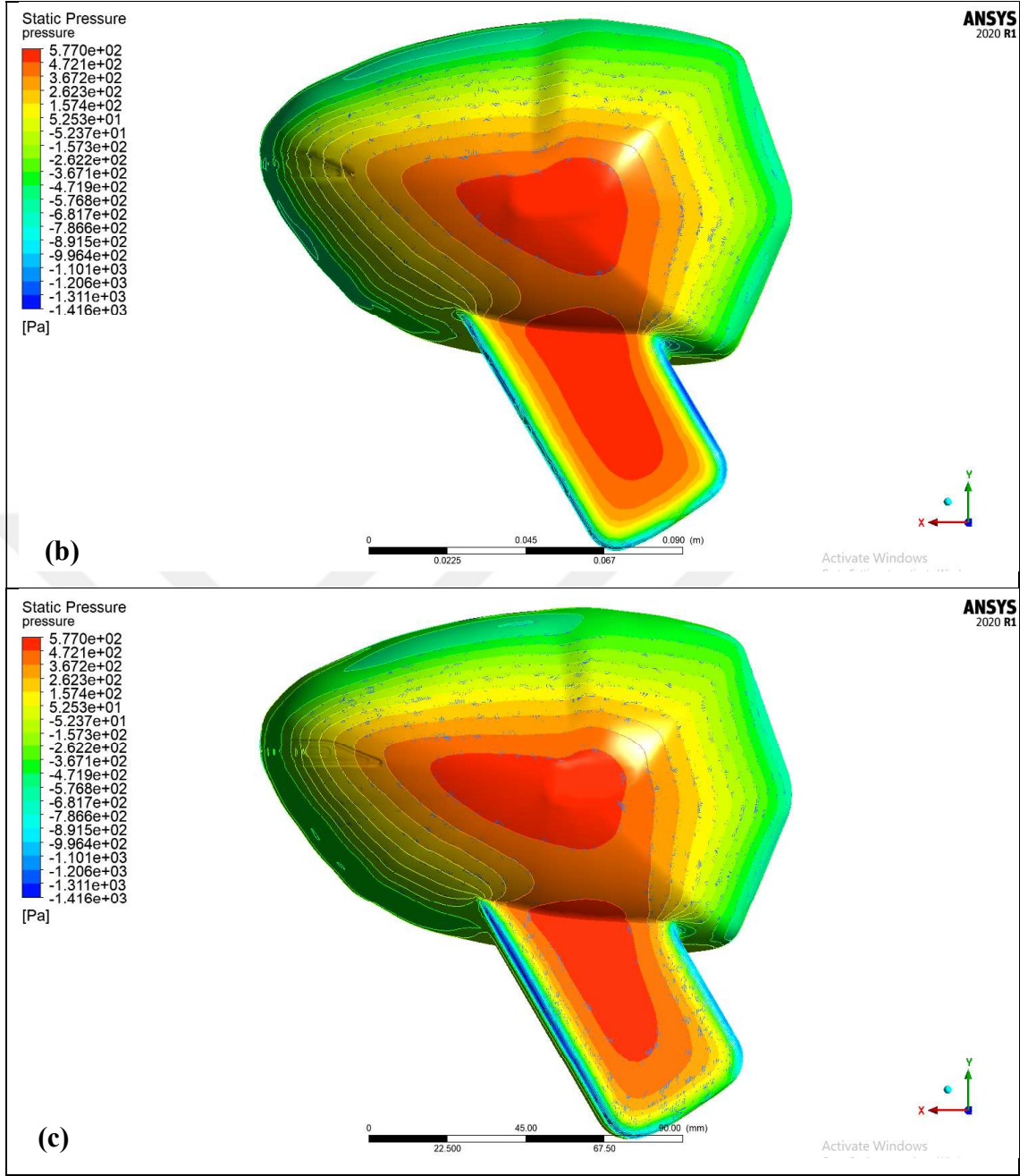
V (m/s)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (Pa)	256,25	256,71	256,14	575,16	576,9	575,18	1021,05	1024,76	1021,43
Min (Pa)	-539,92	-632,13	-638,72	-1195,97	-1391,8	-1415,62	-2118,73	-2423,06	-2488,77



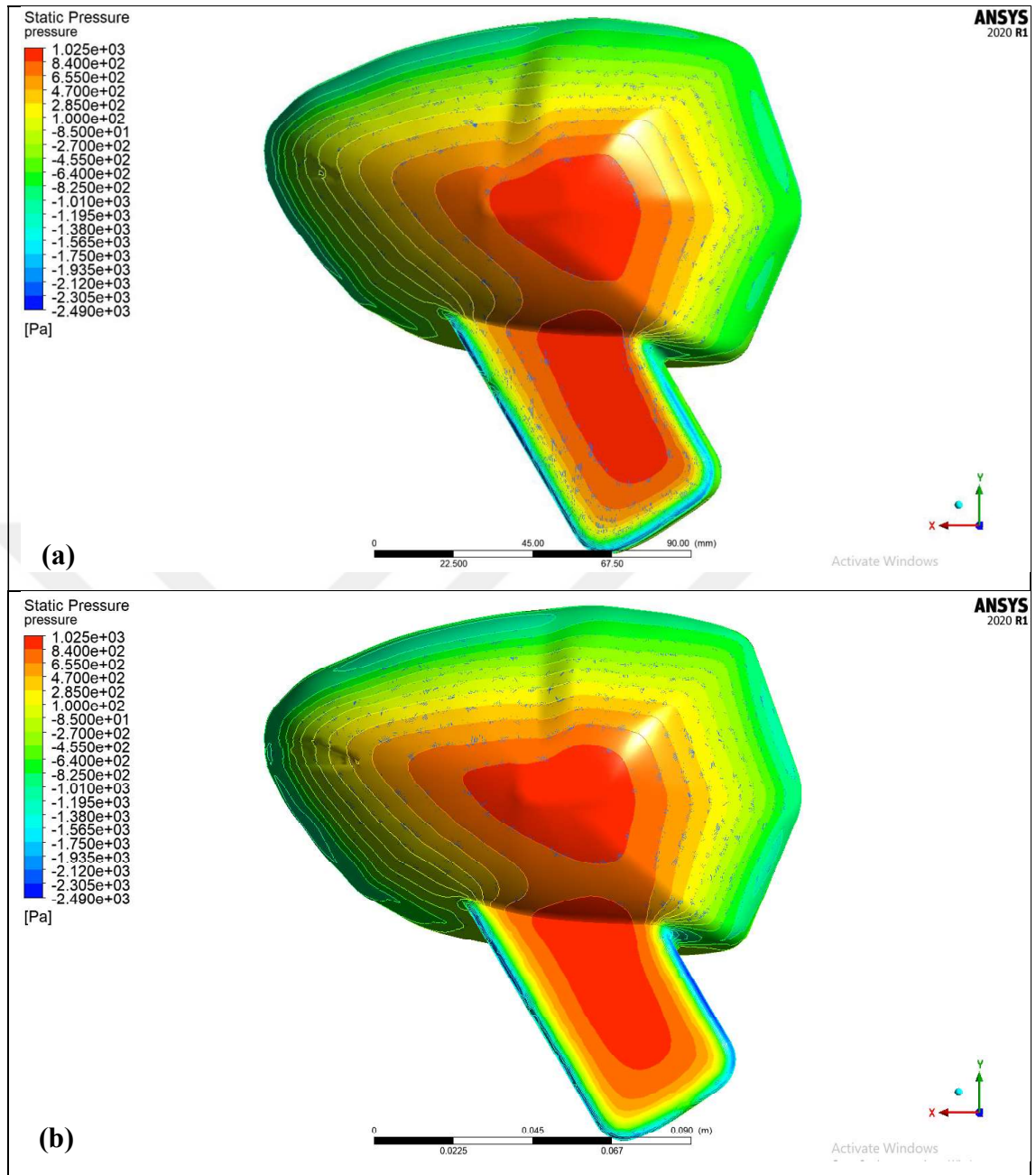


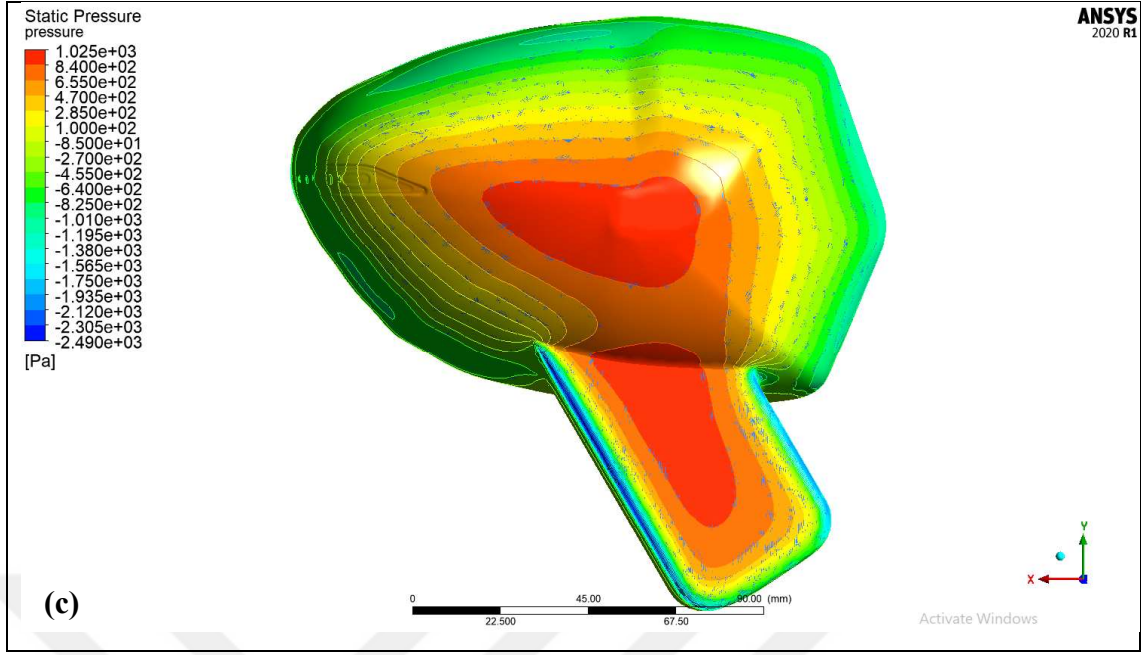
Şekil 4.32. 20 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





Şekil 4.33. 30 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



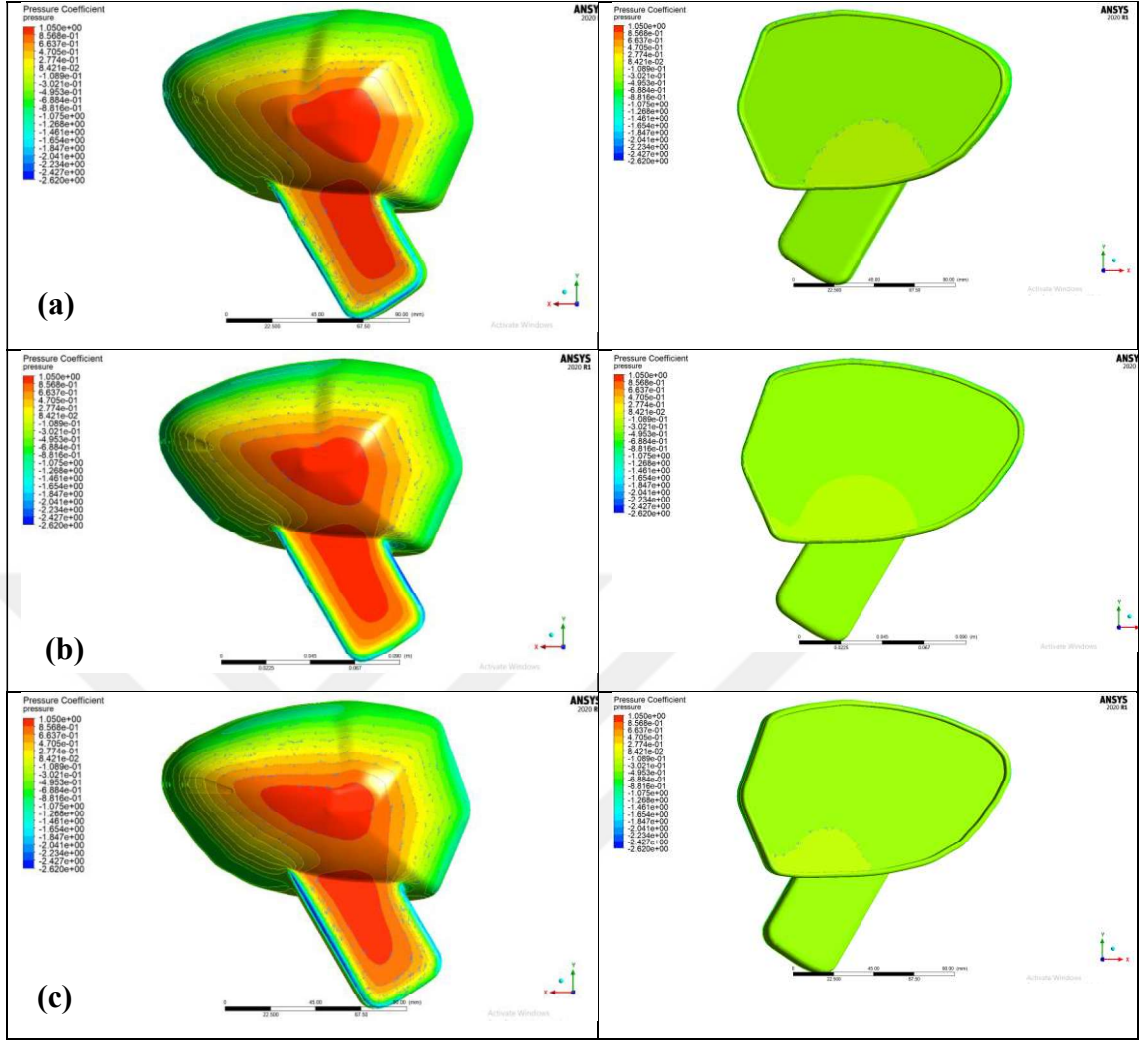


Şekil 4.34. 40 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) +10° sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı

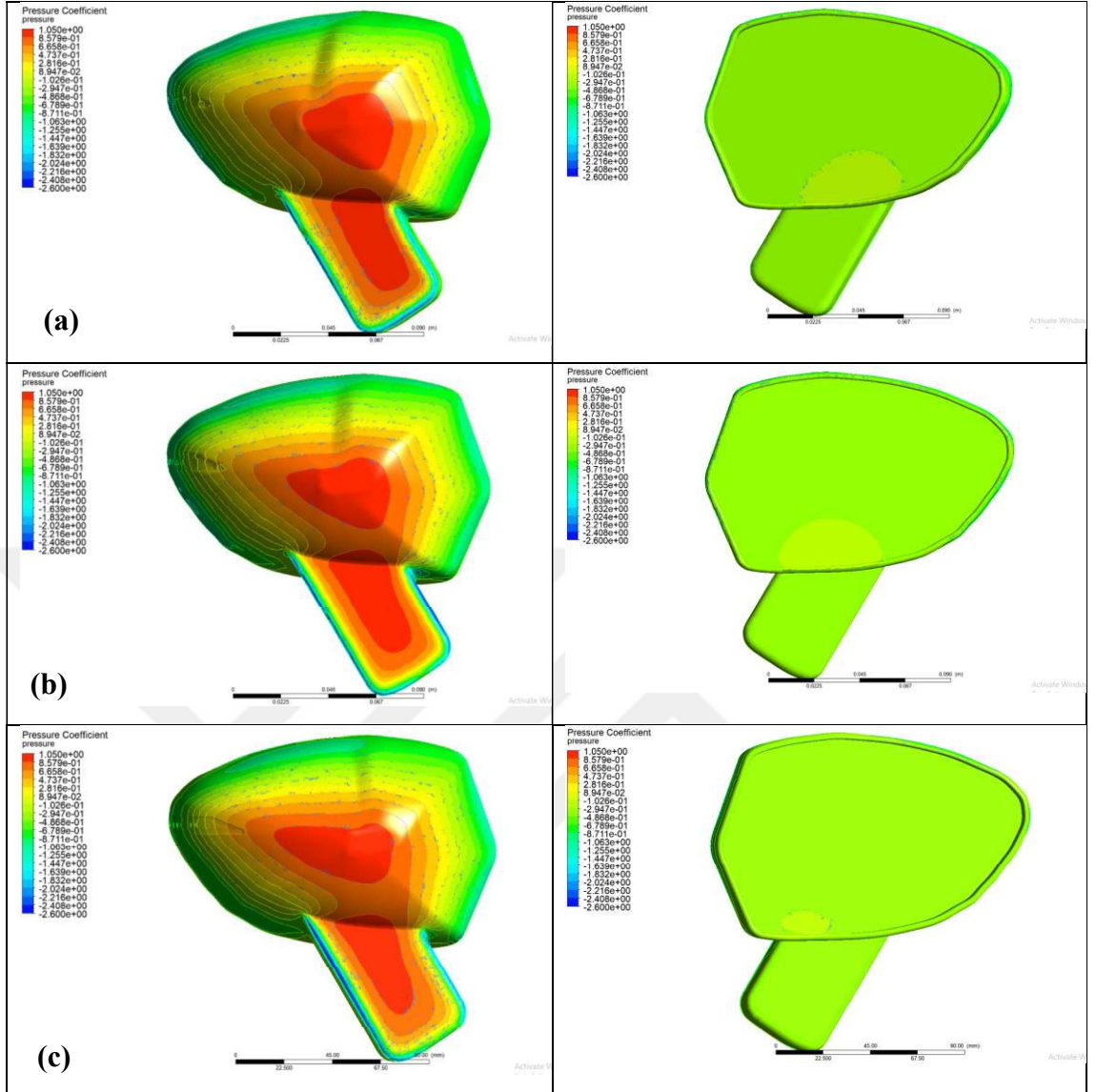
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna üzerinde oluşan basınç katsayısı dağılımları Şekil 4.35 – 4.37’de verilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarında ayna yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç katsayısı değerleri Çizelge 4.9’da sunulmuştur. Ayna ön yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımları basınç dağılımlarıyla benzerlik göstermektedir. Ayna arka yüzeyinde ise minimum basınç katsayısı değerlerinin oluştuğu görülmüştür. Minimum basınç katsayısı değerlerinde hız arttıkça bir miktar düşüş görülmüştür.

Çizelge 4.9. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç katsayısı değerleri

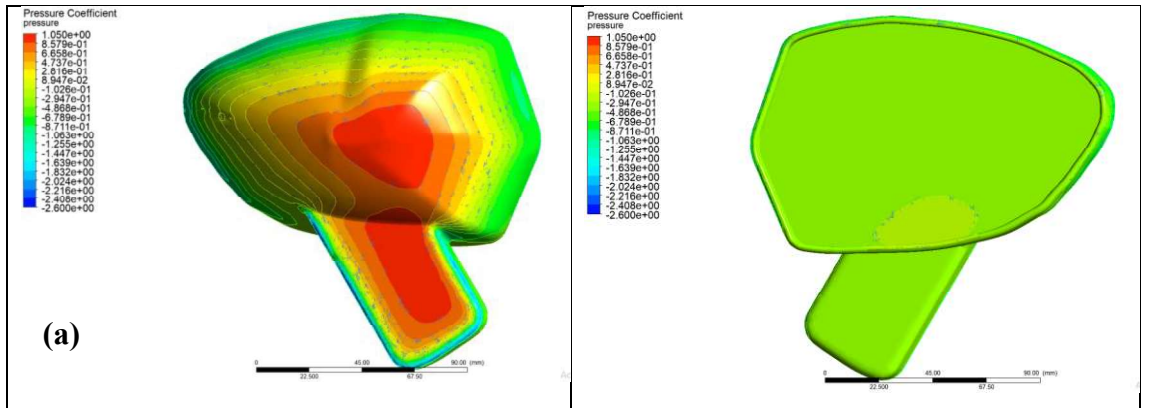
V (m/s)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks ()	1,05	1,05	1,05	1,04	1,05	1,04	1,04	1,05	1,04
Min ()	-2,2	-2,58	-2,61	-2,17	-2,53	-2,58	-2,17	-2,47	-2,55

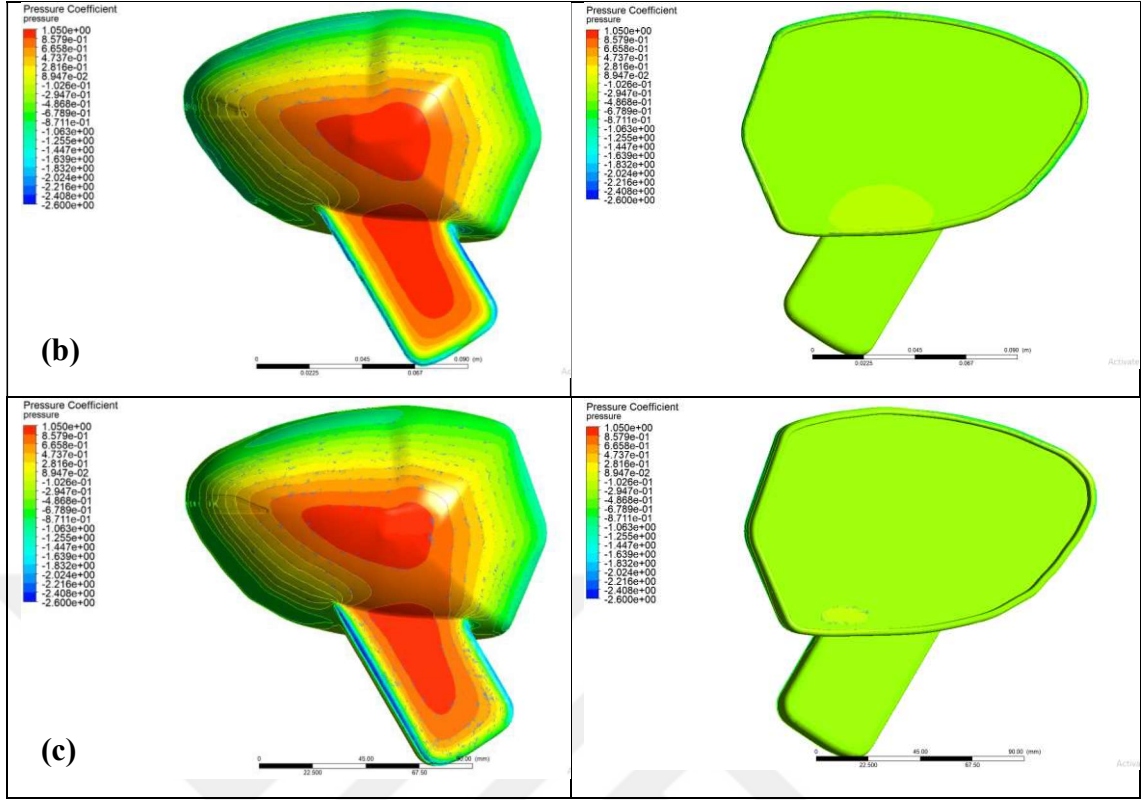


Şekil 4.35. 20 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



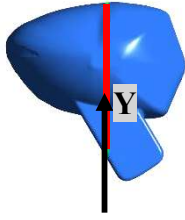
Şekil 4.36. 30 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



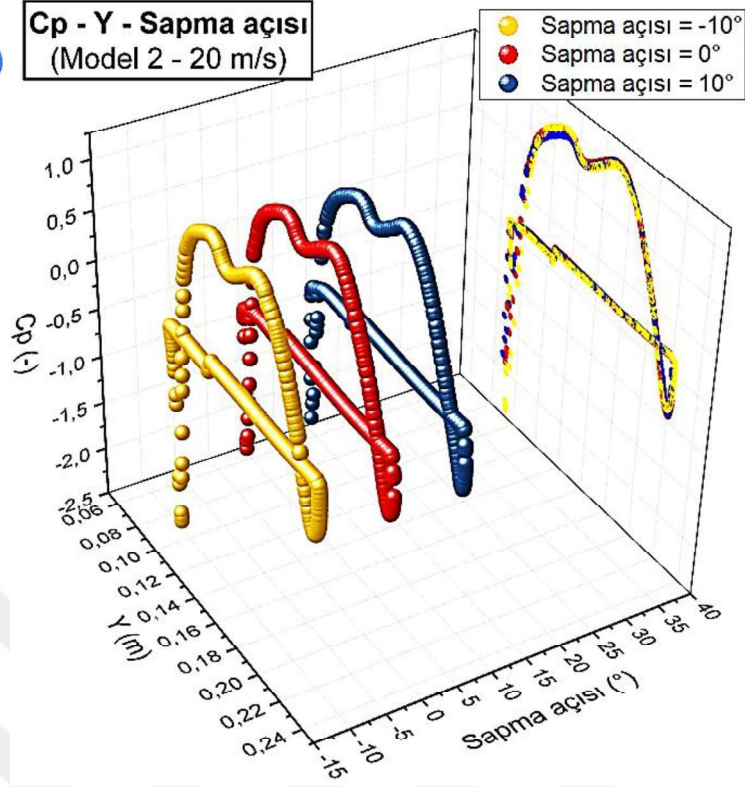


Şekil 4.37. 40 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

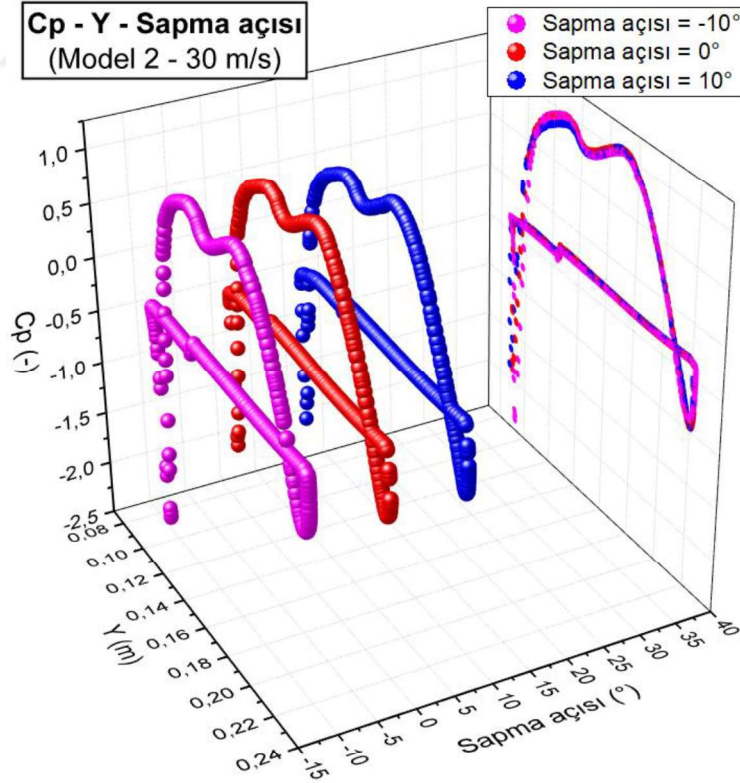
$\beta = 10^\circ$, 0° ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan eğride Y-ekseni boyunca oluşan basınç katsayıları 20, 30 ve 40 m/s hızlar için sırasıyla Şekil 4.38’de verilmiştir. Grafiklerde en sağdaki eğriler 3 eğrinin izdüşümleridir. Farklı sapma açılarında C_p dağılımı büyük farklılıklar göstermemiştir. Ancak değişen sapma açılarında eğrinin sol kısmı değişikliğe uğramaktadır. Bu kısımda -10° sapma açısında, diğer sapma açılarındakine göre maksimum C_p değeri artmış, minimum C_p değeri ise azalmıştır. Bu kısım bağlama kolunun olduğu kısımdır. Ayna gövdesiyle karşılaştırıldığında prizmatik şekle yakın olan bu bölge, sapma açısındaki değişiklikten etkilenmiştir. C_p eğrisinde 2 adet maksimum C_p değeri görülmektedir. İlki kolun ön yüzeyinde ikincisi ise gövdenin ön orta kısmındaki durma noktasındadır. En düşük C_p değerlerine ise, bağlama kolunun arka yüzeyinde rastlanmıştır. Bu bölge cisim-ardı bölgesinin en geniş olduğu bölgelerdir. Bu sonuçlar C_p eğrilerinin bulunduğu düzlemlerdeki C_p dağılımını gösteren Şekil 4.39-4.41’den de takip edilebilir.

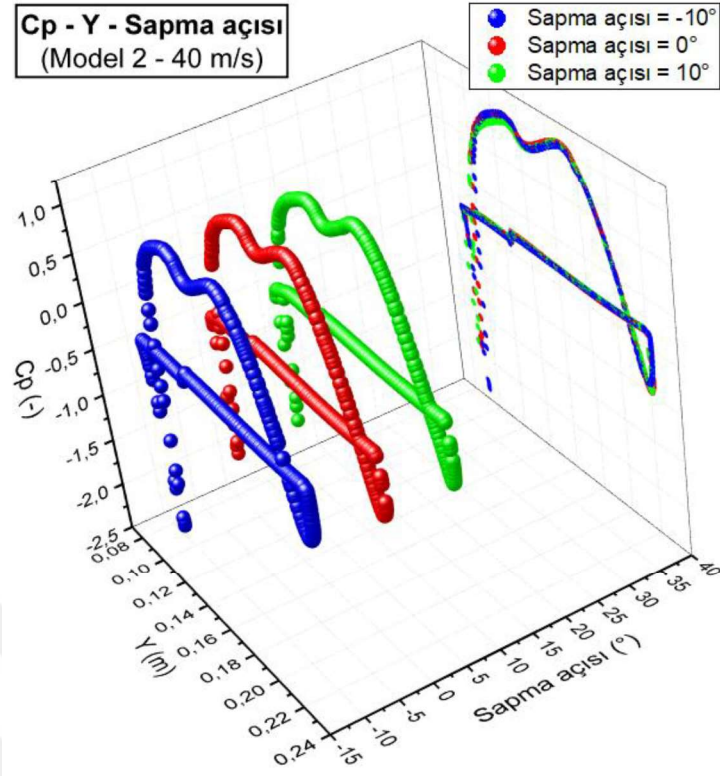


Cp - Y - Sapma açısı
(Model 2 - 20 m/s)



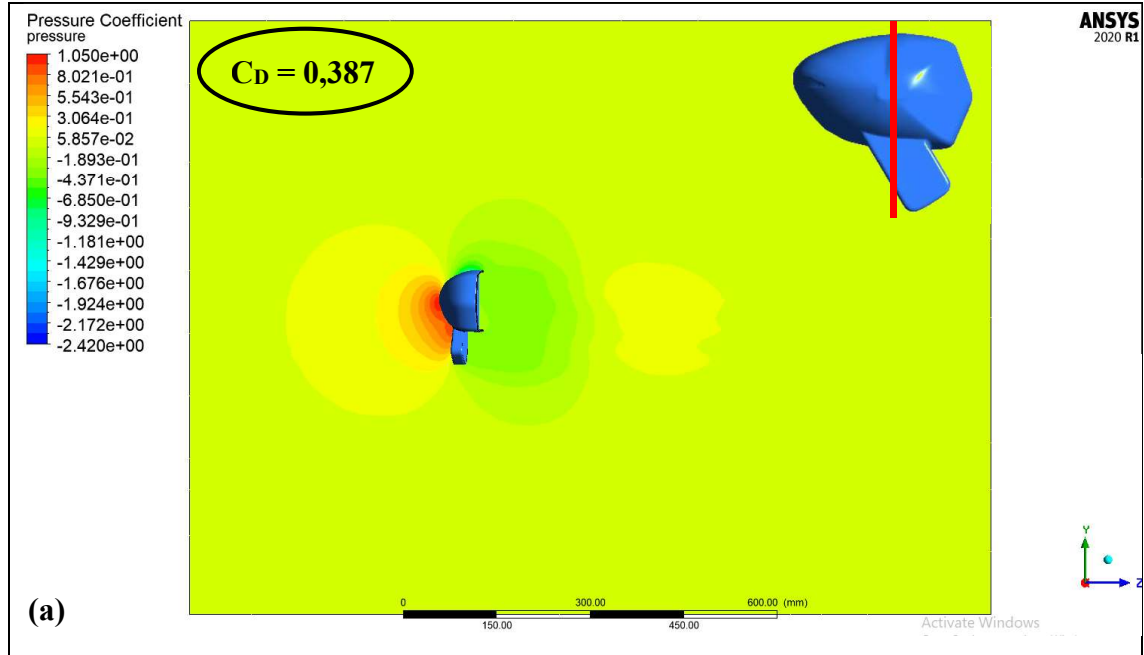
Cp - Y - Sapma açısı
(Model 2 - 30 m/s)

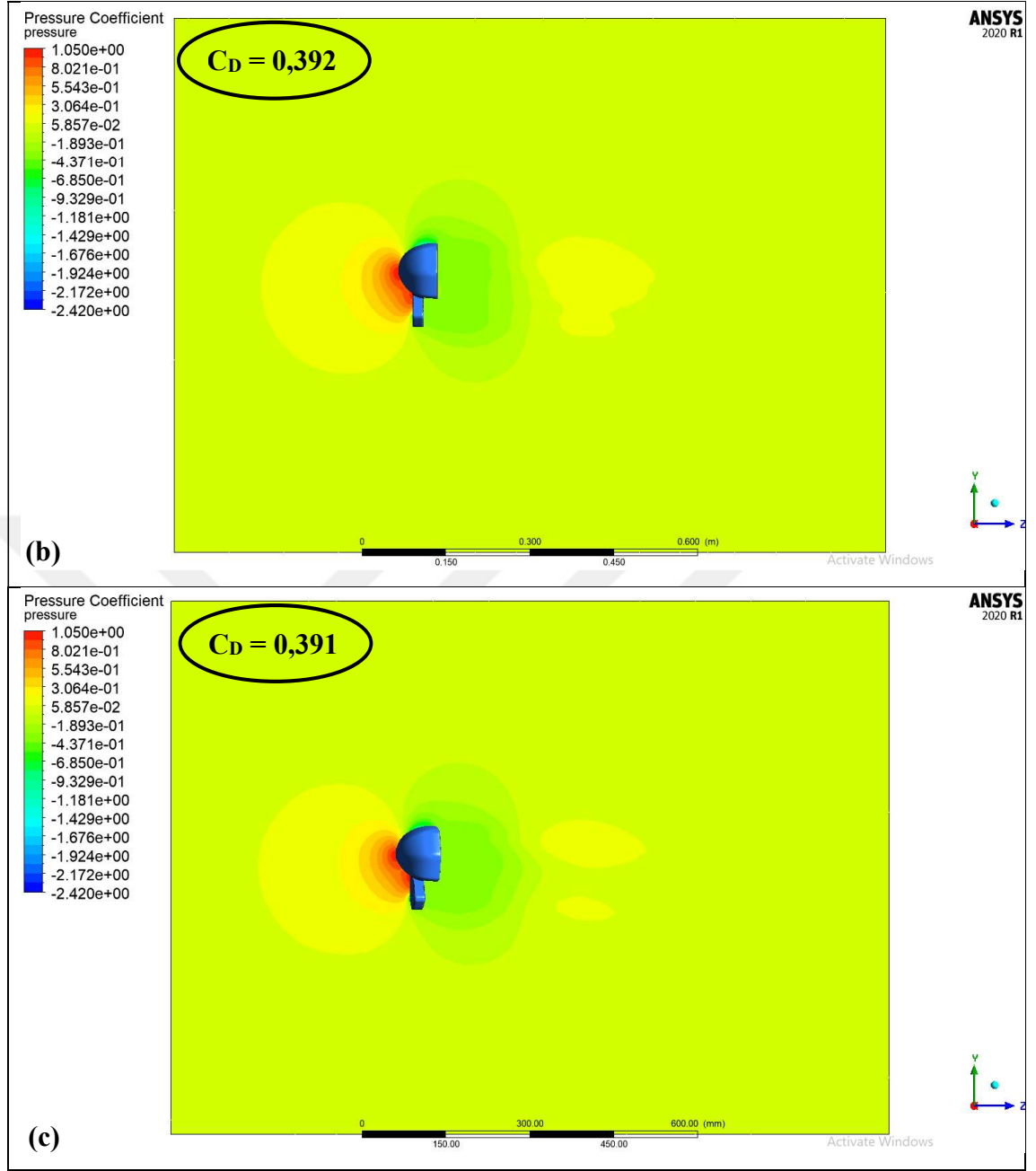




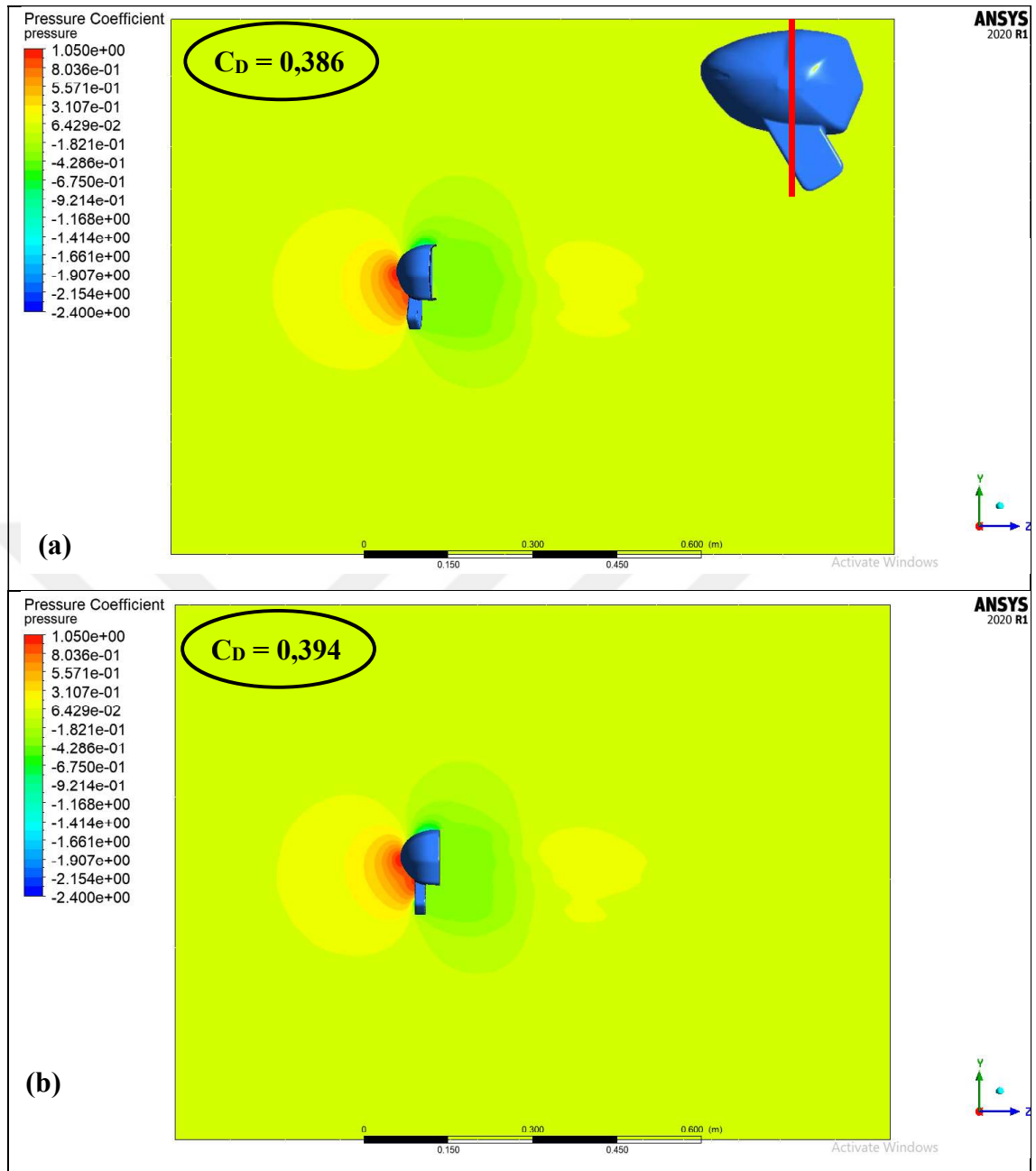
Şekil 4.38. Ayna orta bölgesinden alınan eğride Y-ekseni boyunca oluşan basınç katsayıları: (a) 20 m/s, (b) 30 m/s, (c) 40 m/s (En sağdaki eğriler, 3 eğrinin izdüşümleridir.)

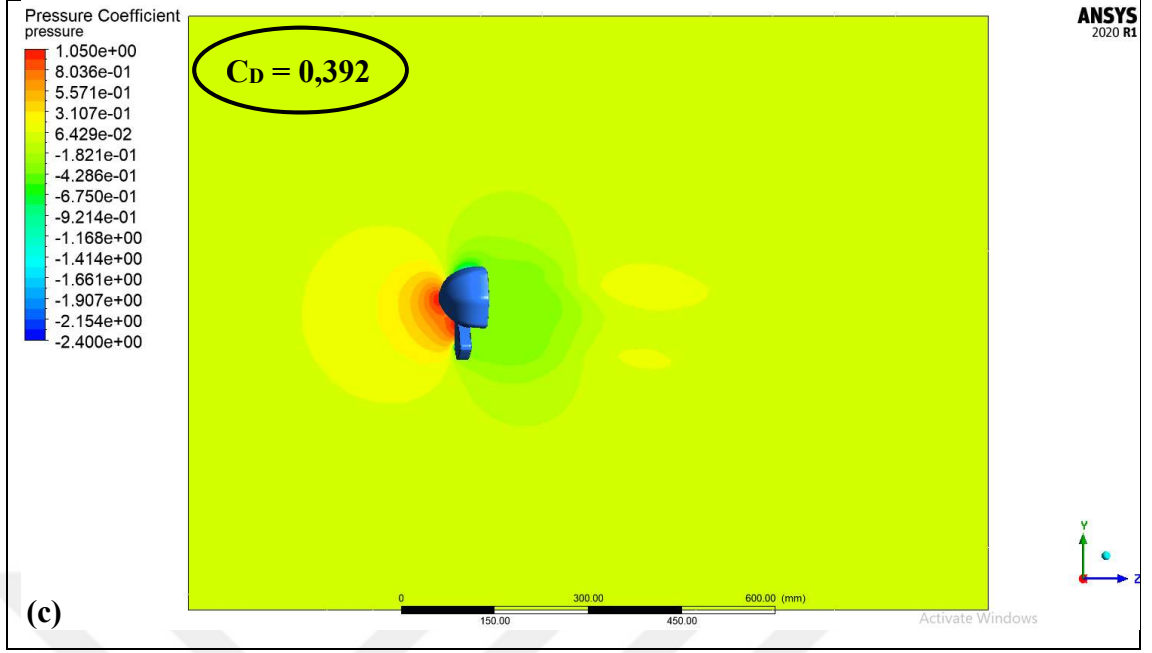
Şekil 4.39-4.41'de tüm hızlar için -10° sapa açısında akış birleşmesinin diğer sapa açılarına göre daha ileride oluşmasından kaynaklı ayna arkasında oluşan düşük basınç katsayılı bölgede bir miktar uzama meydana geldiği görülmektedir.



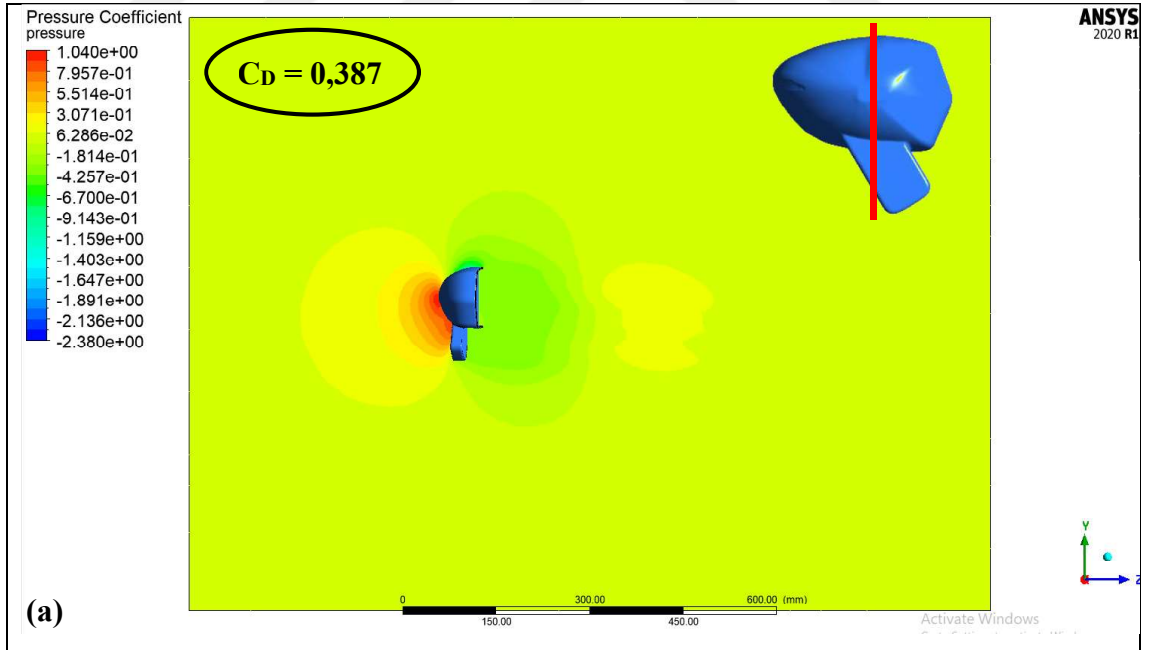


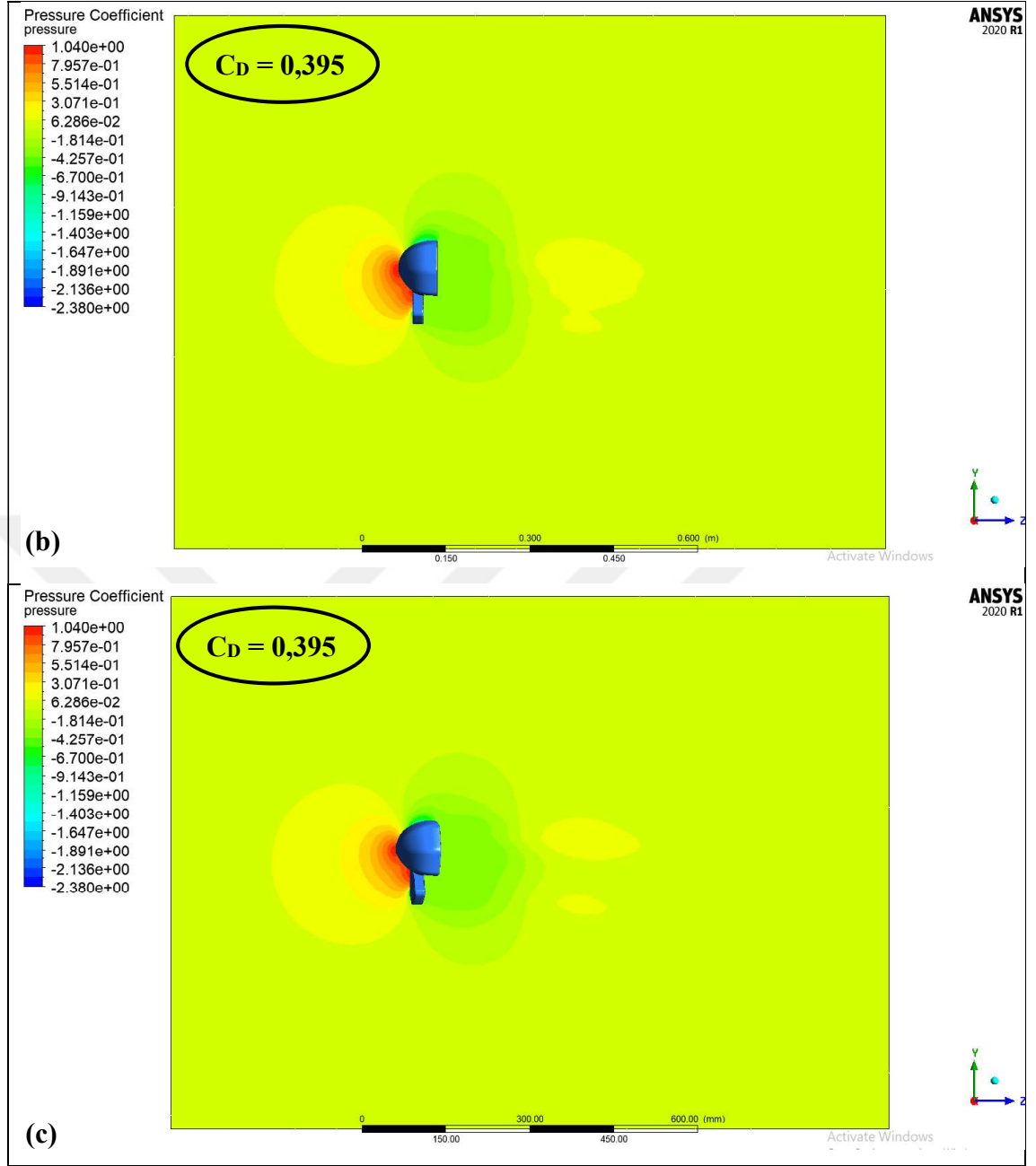
Şekil 4.39. 20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.40. 30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





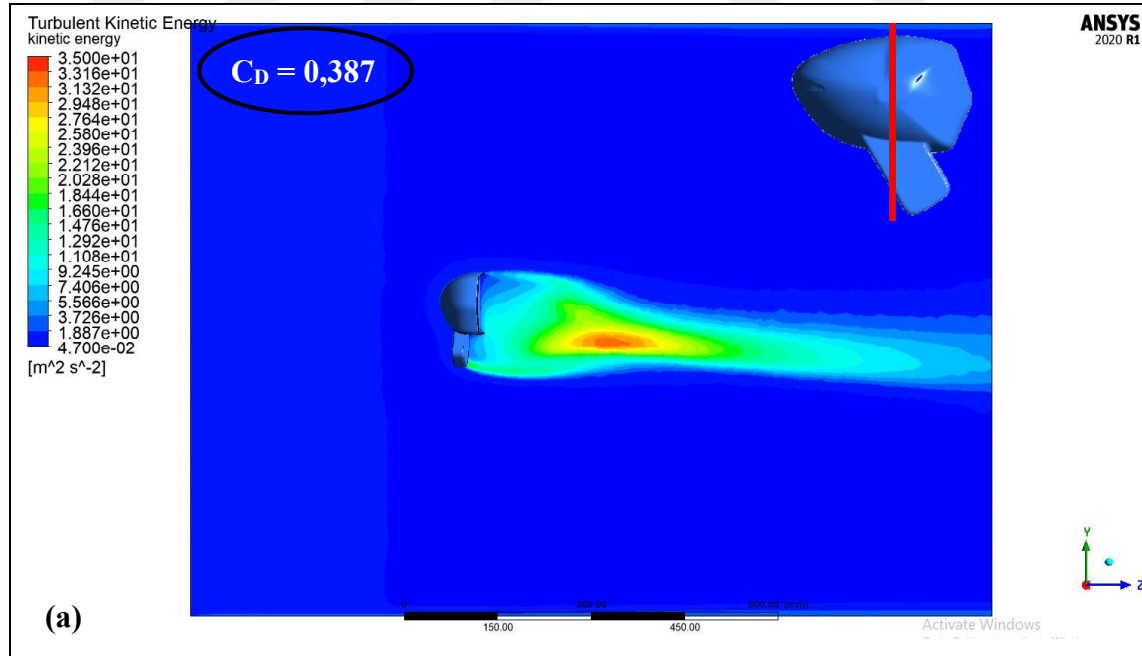
Şekil 4.41. 40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı

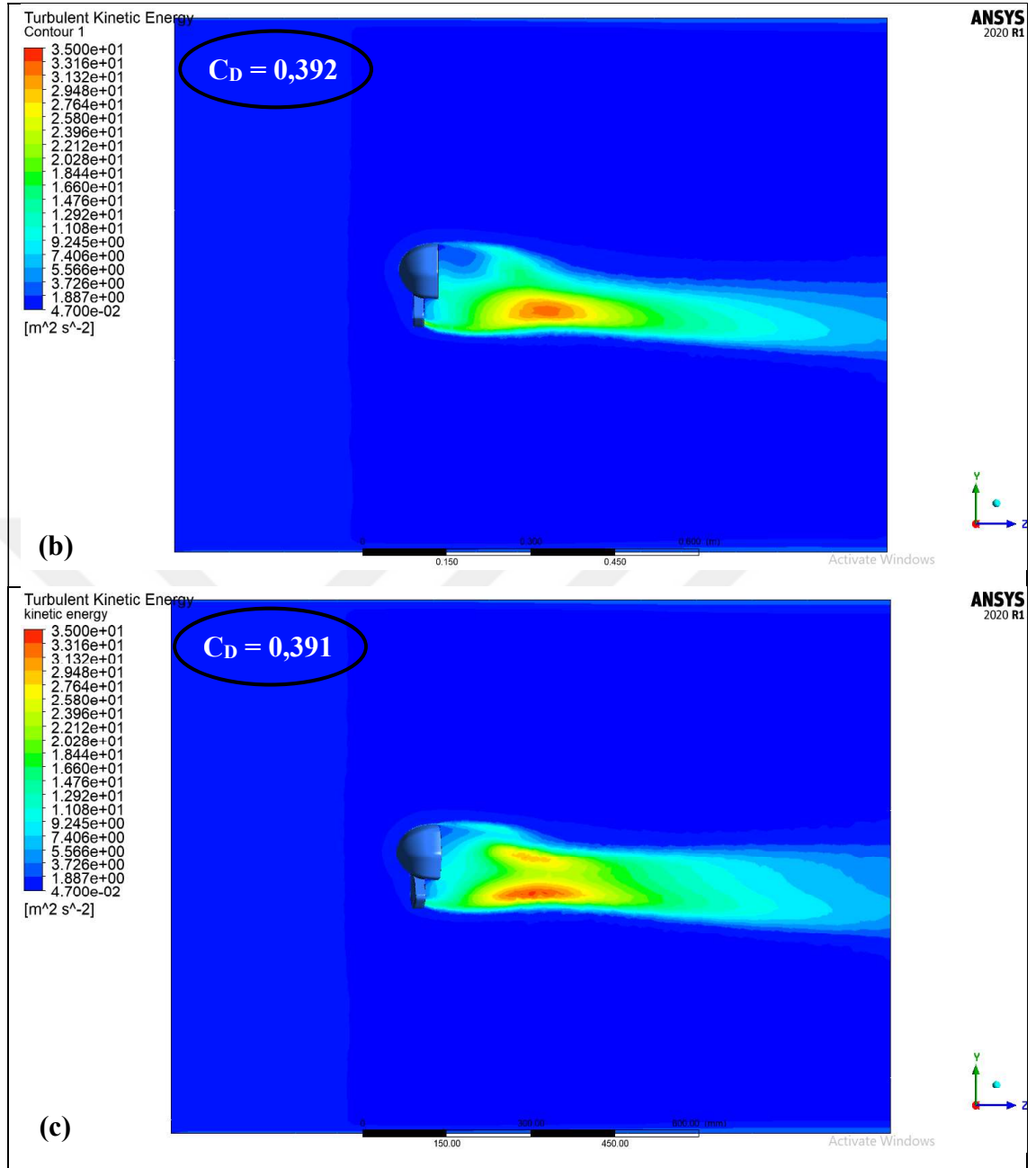
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımları Şekil 4.42-4.44 arasında gösterilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarındaki maksimum ve minimum değerler Çizelge 4.10'da verilmiştir. Hız arttıkça hıza bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi de artmaktadır. Sapma açılarındaki türbülans kinetik enerjisi dağılımları benzerlik göstermektedir. 10° sapma açısında nispeten yüksek şiddetli ama düşük alanlı tek bir

türbülans bölgesi 0° sapma açısında nispeten düşük şiddetli ama yüksek alanlı tek bir türbülans bölgesi mevcuttur. -10° sapma açısında ise nispeten düşük şiddetli ve yüksek alanlı iki türbülans bölgesi olduğu görülmüştür. Bu değişik türbülans kinetik enerjisi dağılımları toplamda ele alındığında denk bir etki ortaya çıkarmıştır ve sürüklenme katsayıları yakındır. Türbülans kinetik enerjisinin büyüklüğü, kısmen de olsa, oluşan gürültünün şiddeti hakkında bilgi vermektedir. Gürültü ve enerji kaybı açısından, 10° , 0° ve -10° sapma açılarında benzer sonuçların çıkacağı söylenebilir.

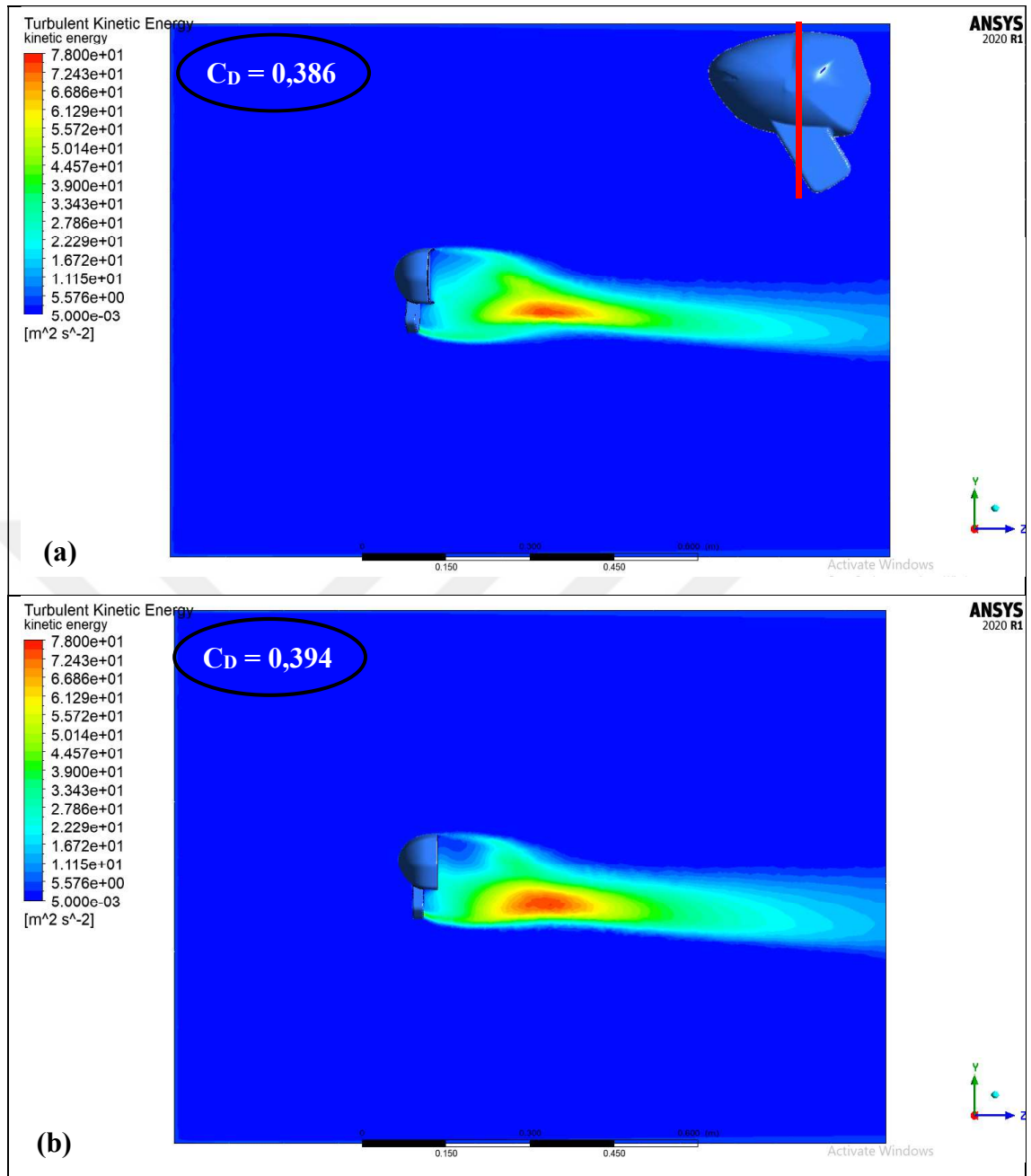
Çizelge 4.10. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan maksimum ve minimum türbülans kinetik enerjisi değerleri

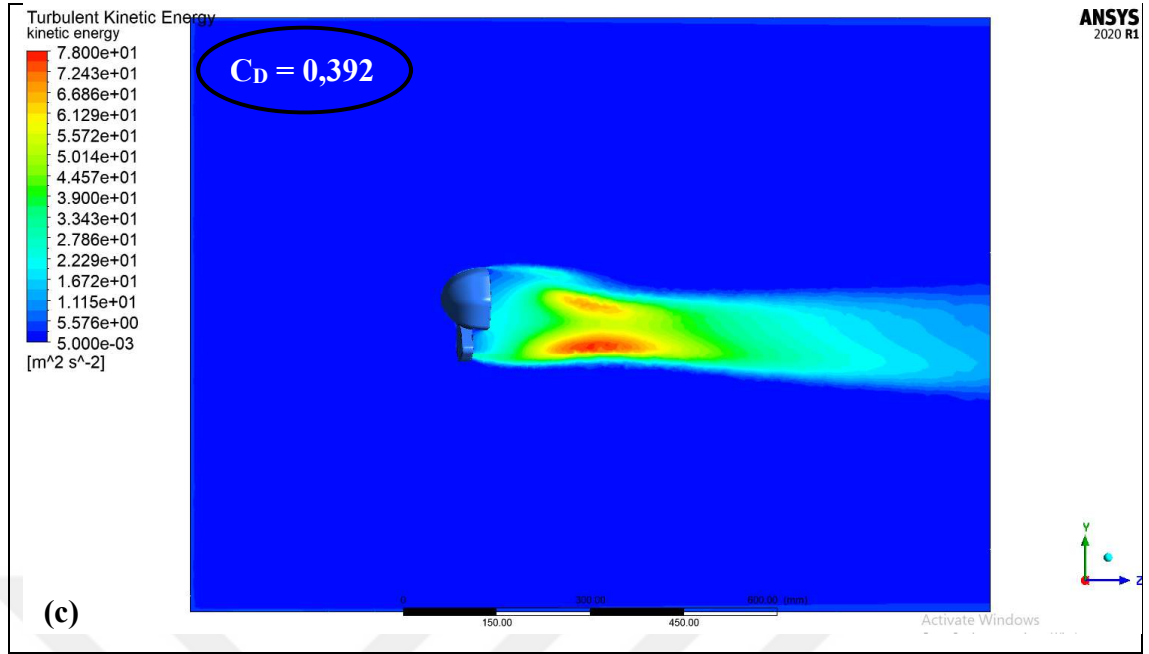
V (m/s) β ($^\circ$)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (m^2/s^2)	32,97	32,31	34,06	75,36	75,36	77,09	134,53	137,77	137
Min (m^2/s^2)	0,0048	0,0049	0,0048	0,0051	0,0053	0,0052	0,005	0,0054	0,0051



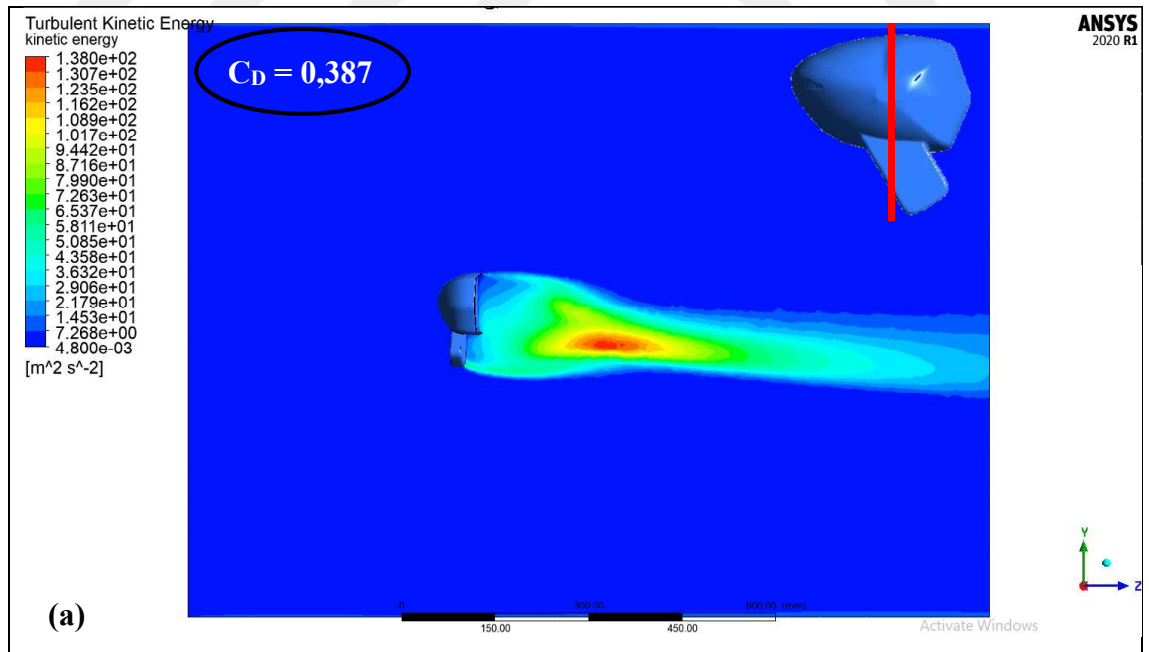


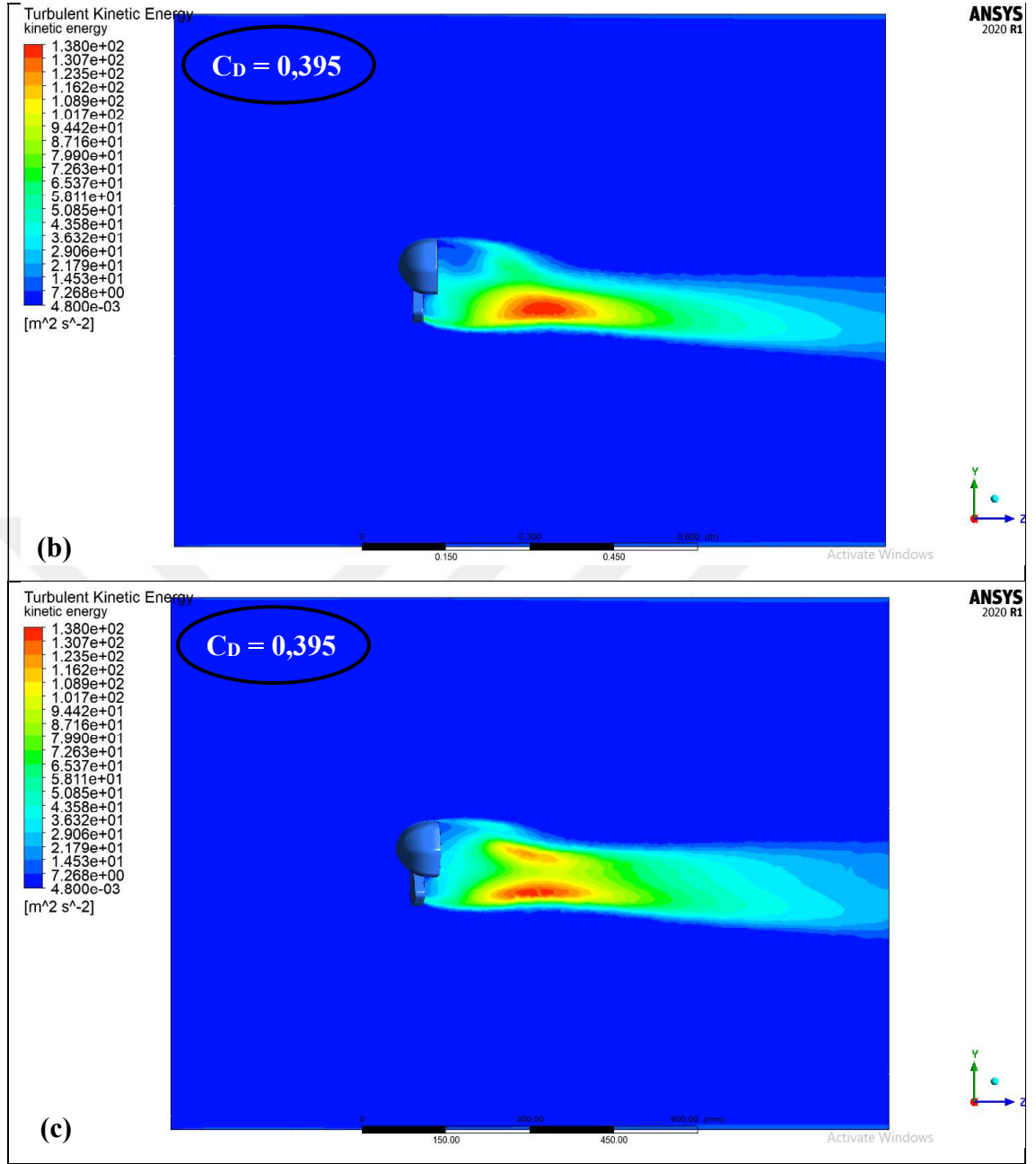
Şekil 4.42. 20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.43. 30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) +10° sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.44. 40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

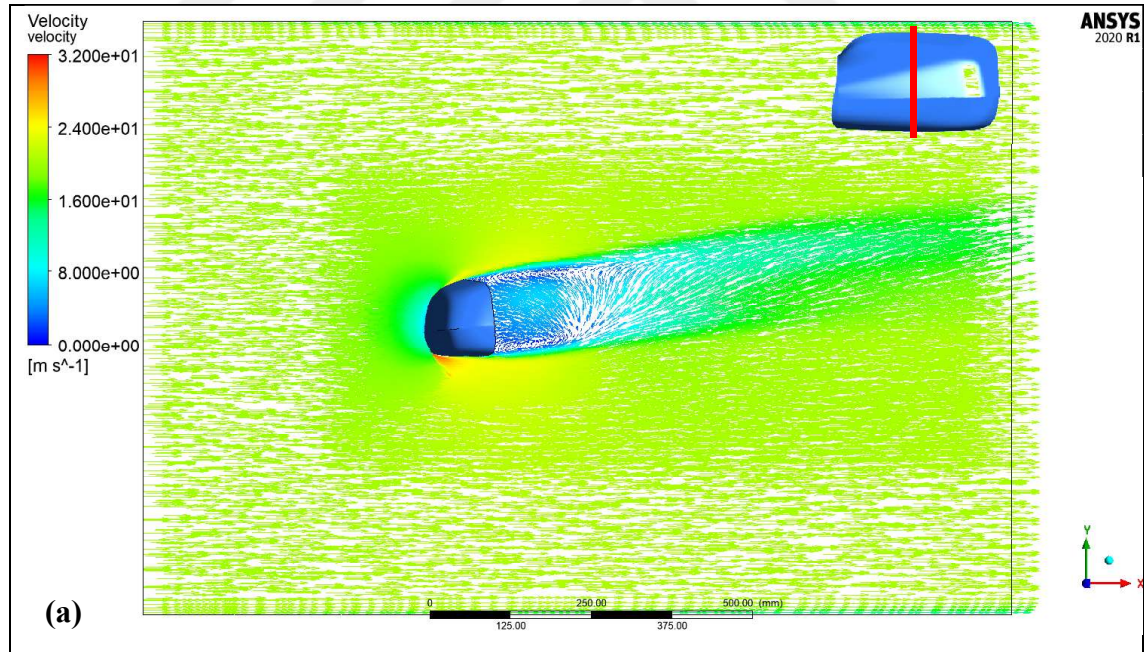
4.4. Model 3 – Hız ve Sapma Açısı Etkisi

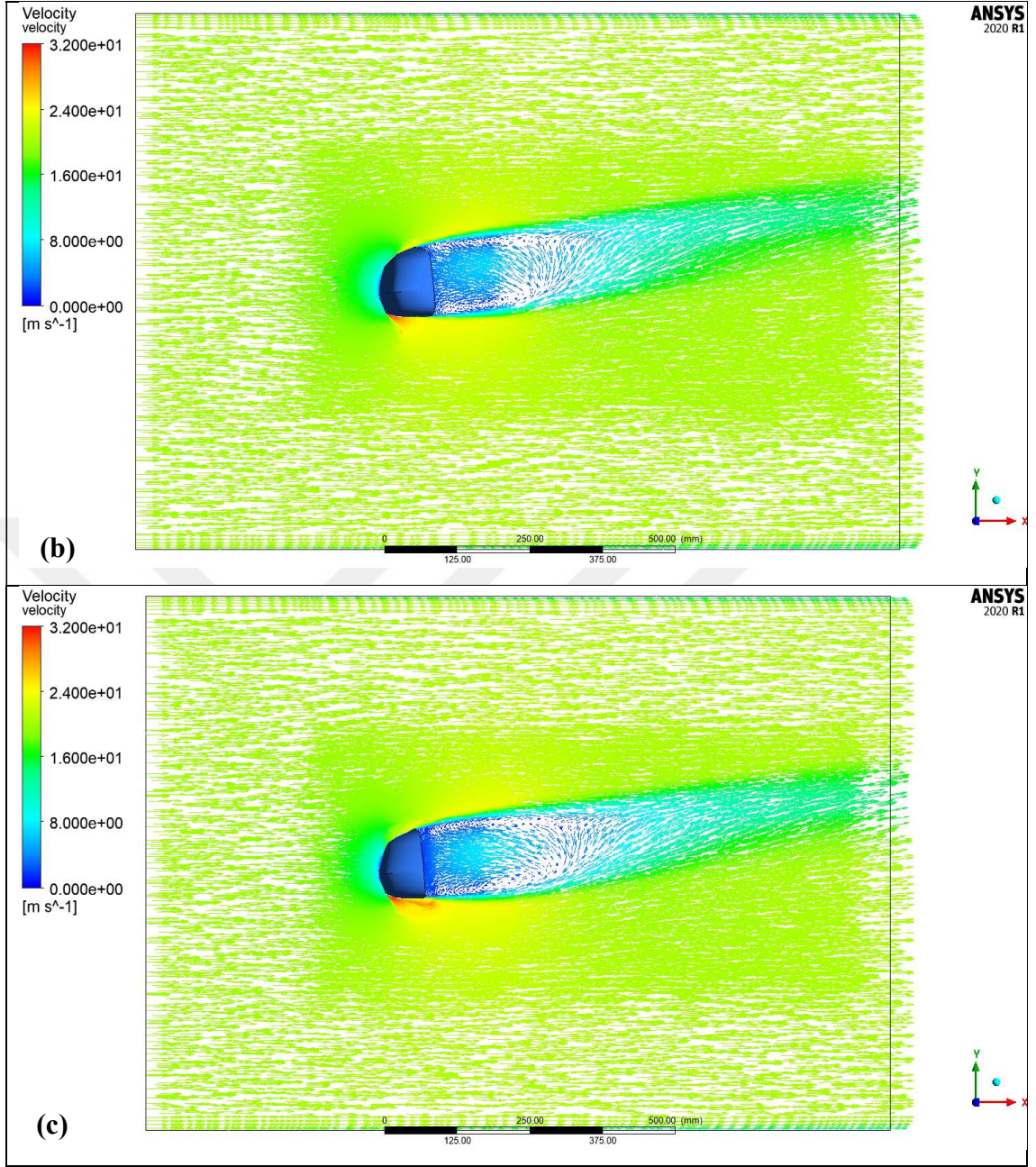
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan hız vektörleri Şekil 4.45 – 4.47’de verilmiştir. Tüm sapma açıları ve hızlarda ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan

maksimum hız değerleri Çizelge 4.11’de sunulmuştur. Ayna orta bölgesinde alınan düzlem üzerinde tüm hızlarda minimum hız aynanın ön kısmında ve maksimum hızlar da aynanın daha keskin hatlı olan alt kenar kısmında görülmüştür. Ayna arkasında özellikle de alt bölgede yoğun bir türbülans oluşumu gözlenmiştir. 10° sapma açısından -10° sapma açısına doğru, oluşan vorteks bölgesinin büyüklüğünün arttığı fark edilmiştir. Cisim-ardı bölgesinde yukarıya-sapma (upwash) meydana gelmiştir.

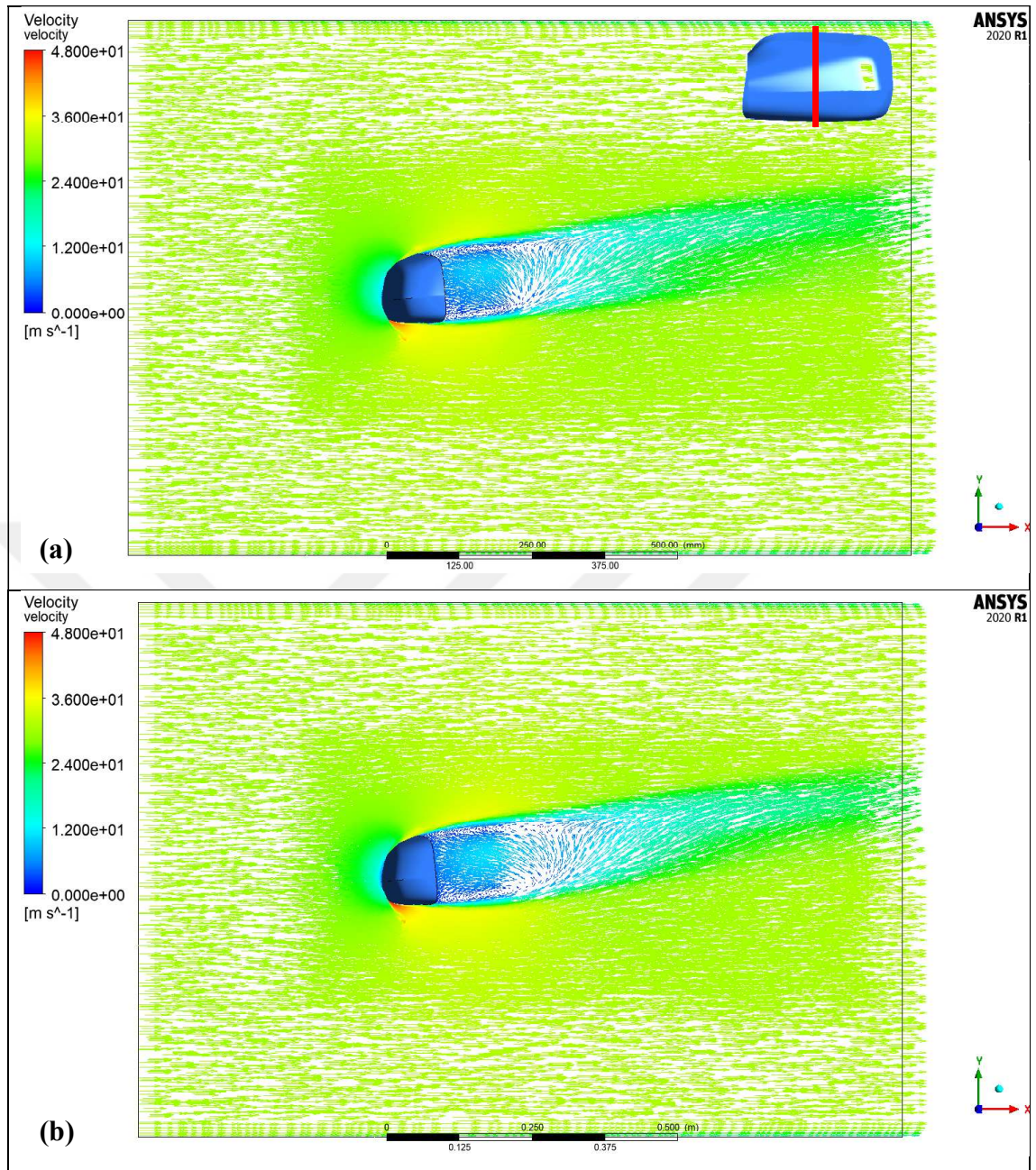
Çizelge 4.11. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum hız değerleri

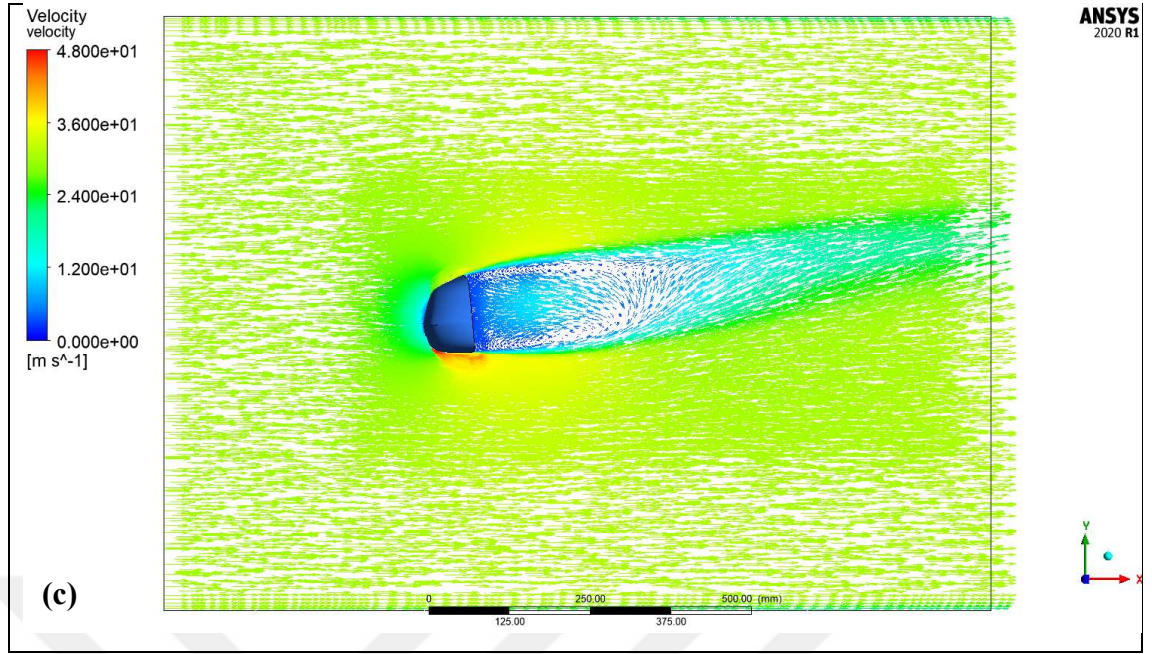
V (m/s) β ($^\circ$)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (m/s)	29,6	30,68	31,22	45,11	46,74	47,55	60,93	63,11	64,14
Min (m/s)	0								



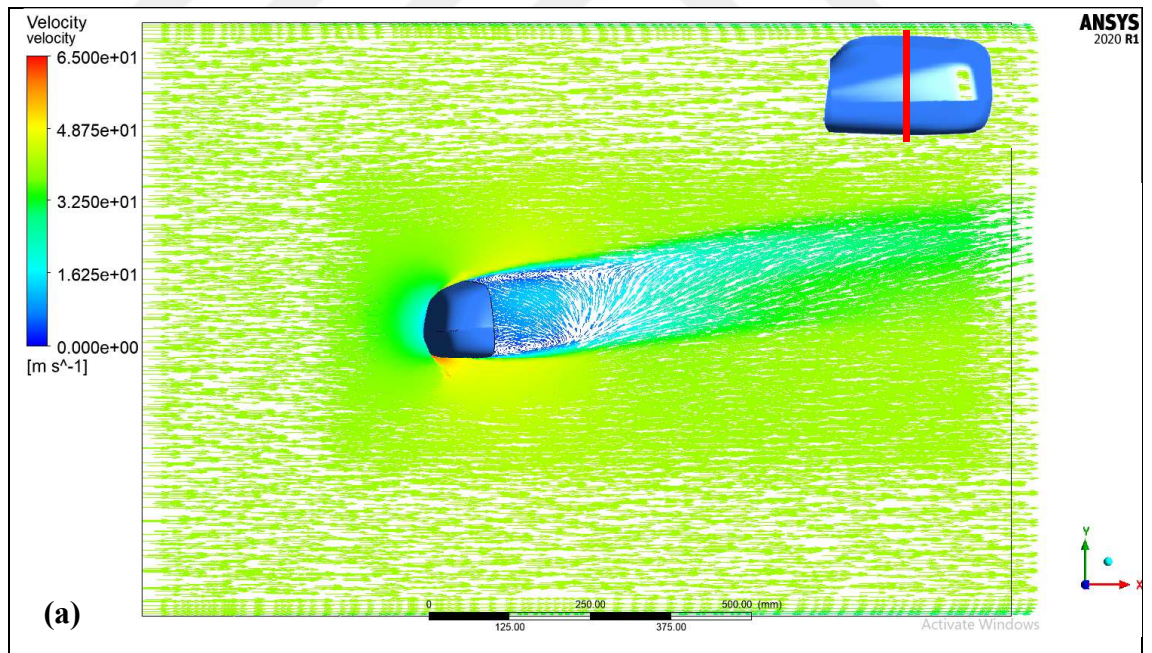


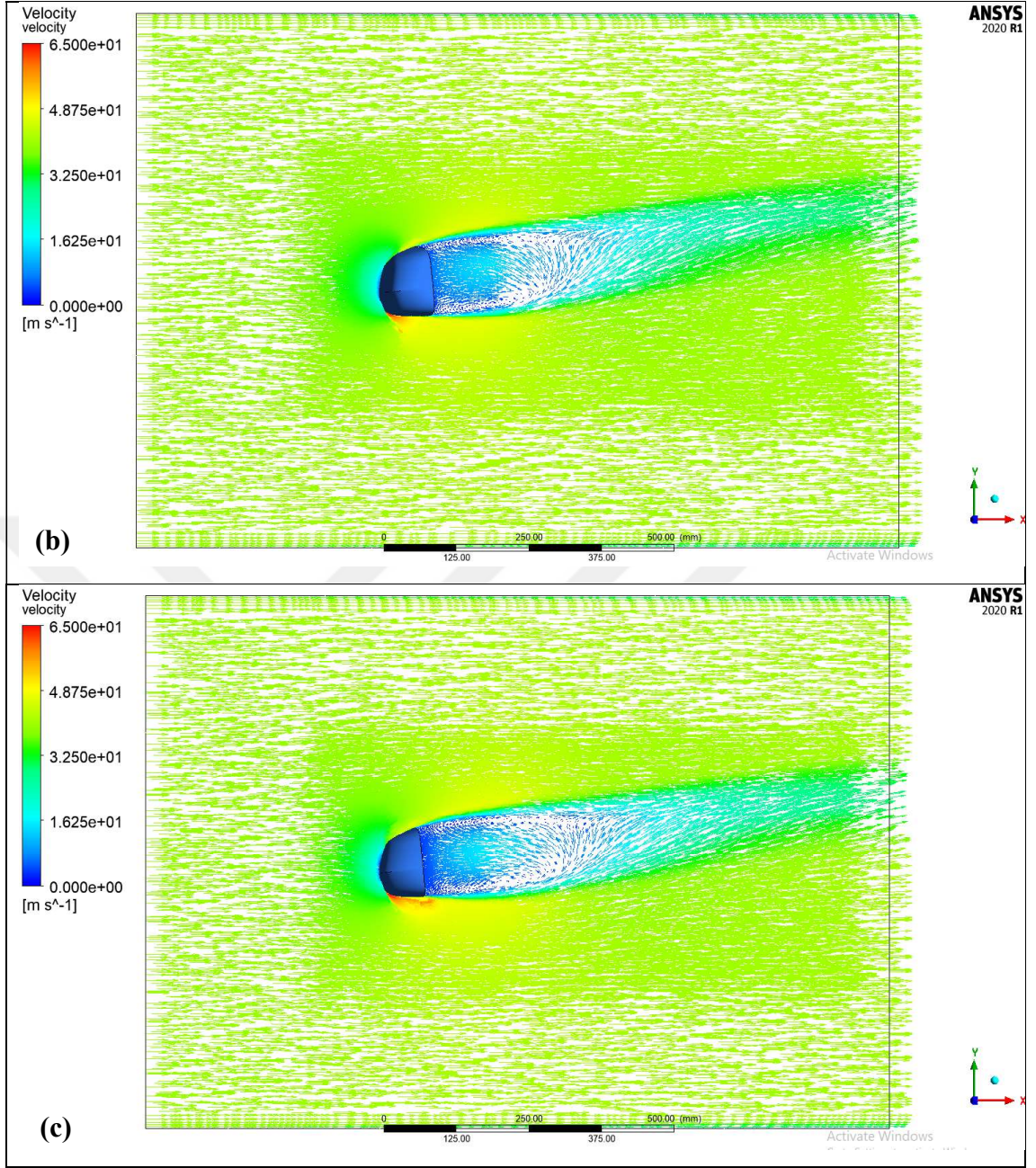
Şekil 4.45. 20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





Şekil 4.46. 30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) +10° sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı

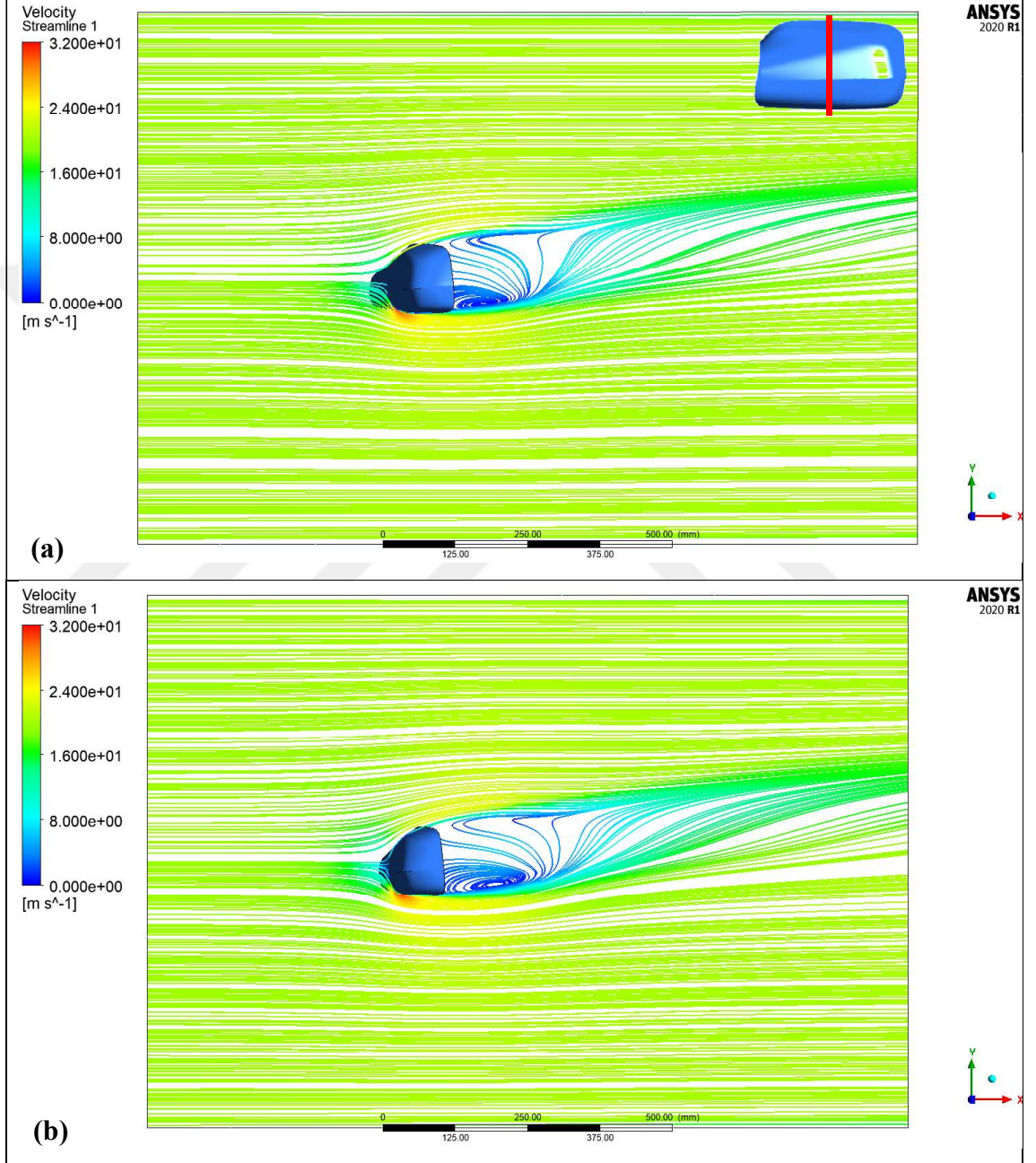


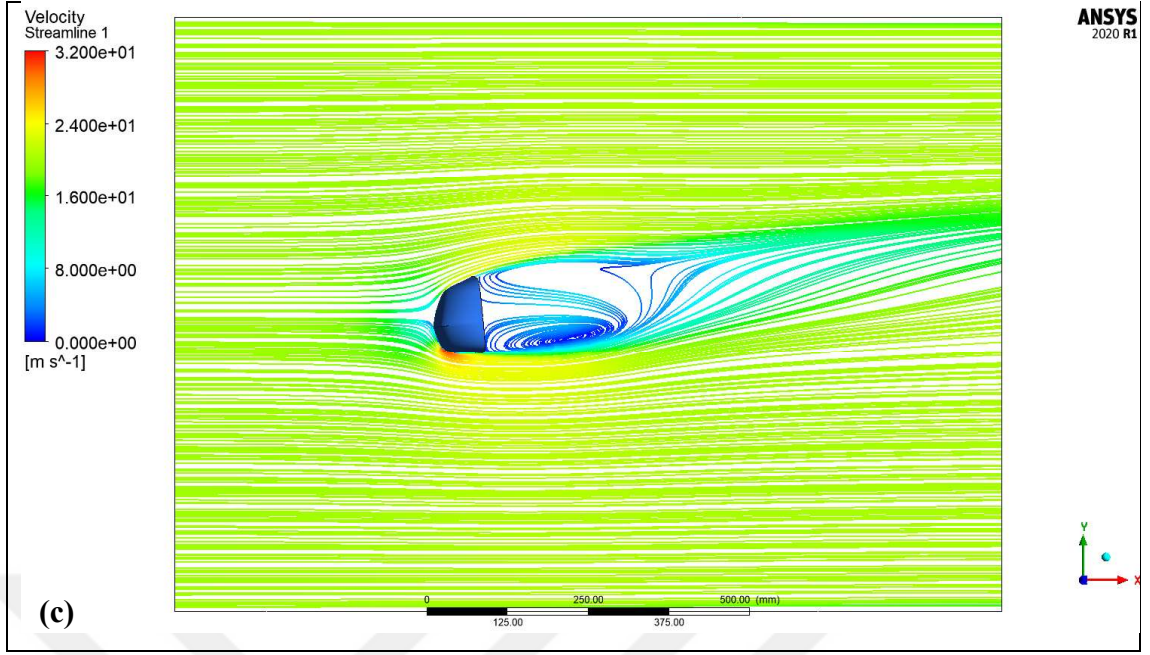


Şekil 4.47. 40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

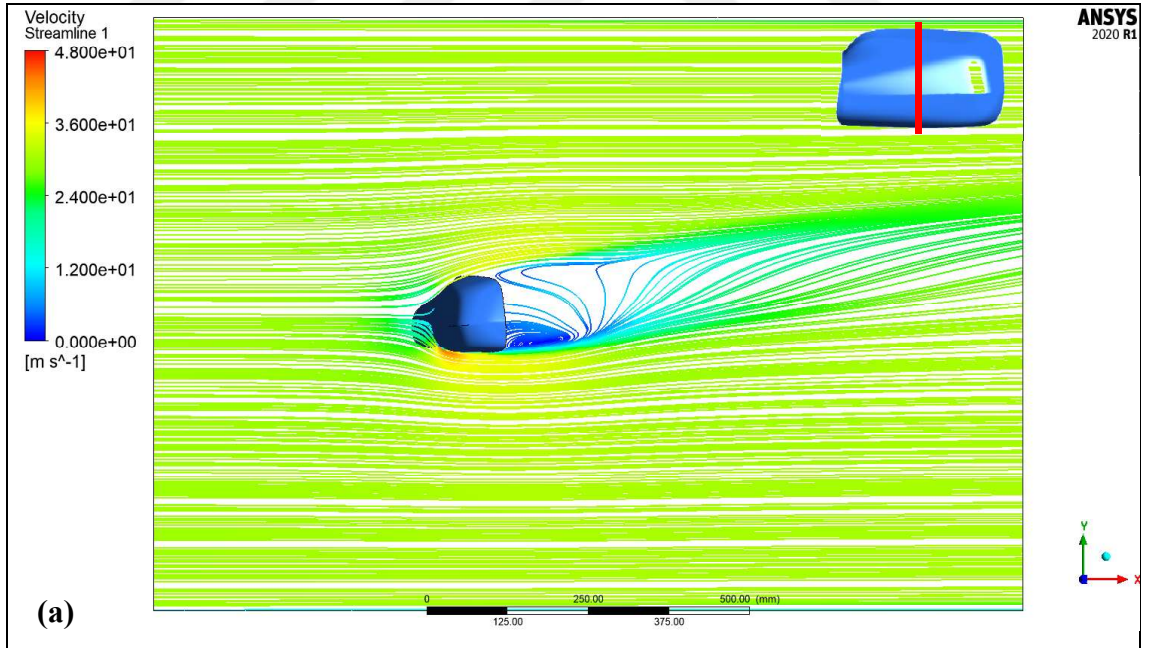
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan akım çizgileri Şekil 4.48 – 4.50’de verilmiştir. Tüm hızlarda cisim-ardı bölgesinde yukarıya-sapma (upwash) meydana gelmiştir. Bunun sebebi alttaki vorteksin daha şiddetli olması ve üst kısımdaki akışta yukarıya sapan akışı dengeleyecek herhangi bir aşağıya-sapmanın (downwash) bulunmamasıdır. Bu akış şekline dik (squareback) otomobillerin arka kısmında da rastlanmaktadır.

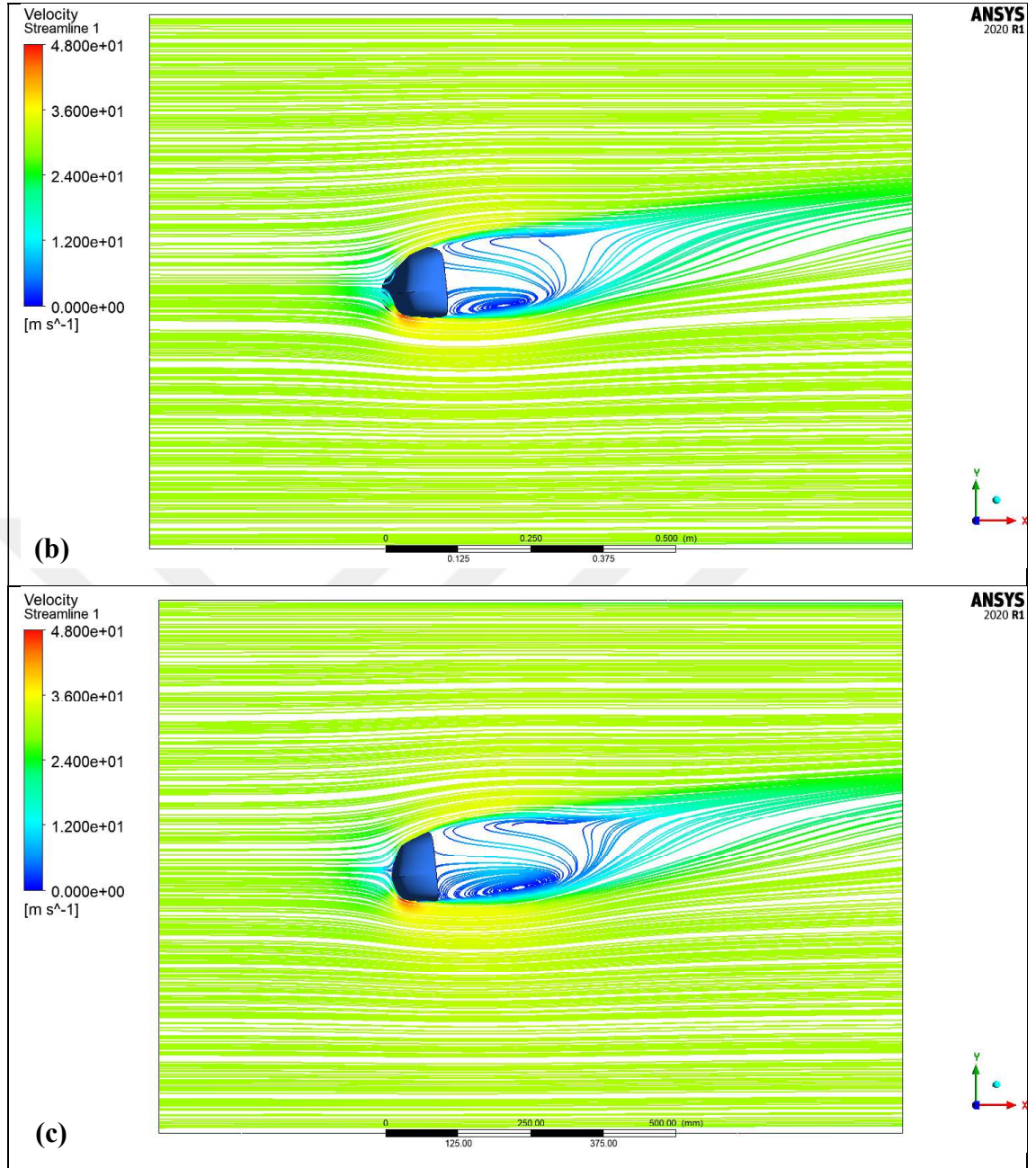
+10° sapma açısında ayna arkasında oluşan vorteks bölgelerinin daha küçük olduğu görülmektedir. Cisim-ardındaki en geniş vorteks bölgeleri -10° sapma açısında oluşmuştur. +10°'den -10°'ye doğru açı boyunca cisim-ardı vorteks alanı artmakta ve akış birleşmesi aynadan daha uzak bir mesafeye taşınmaktadır.



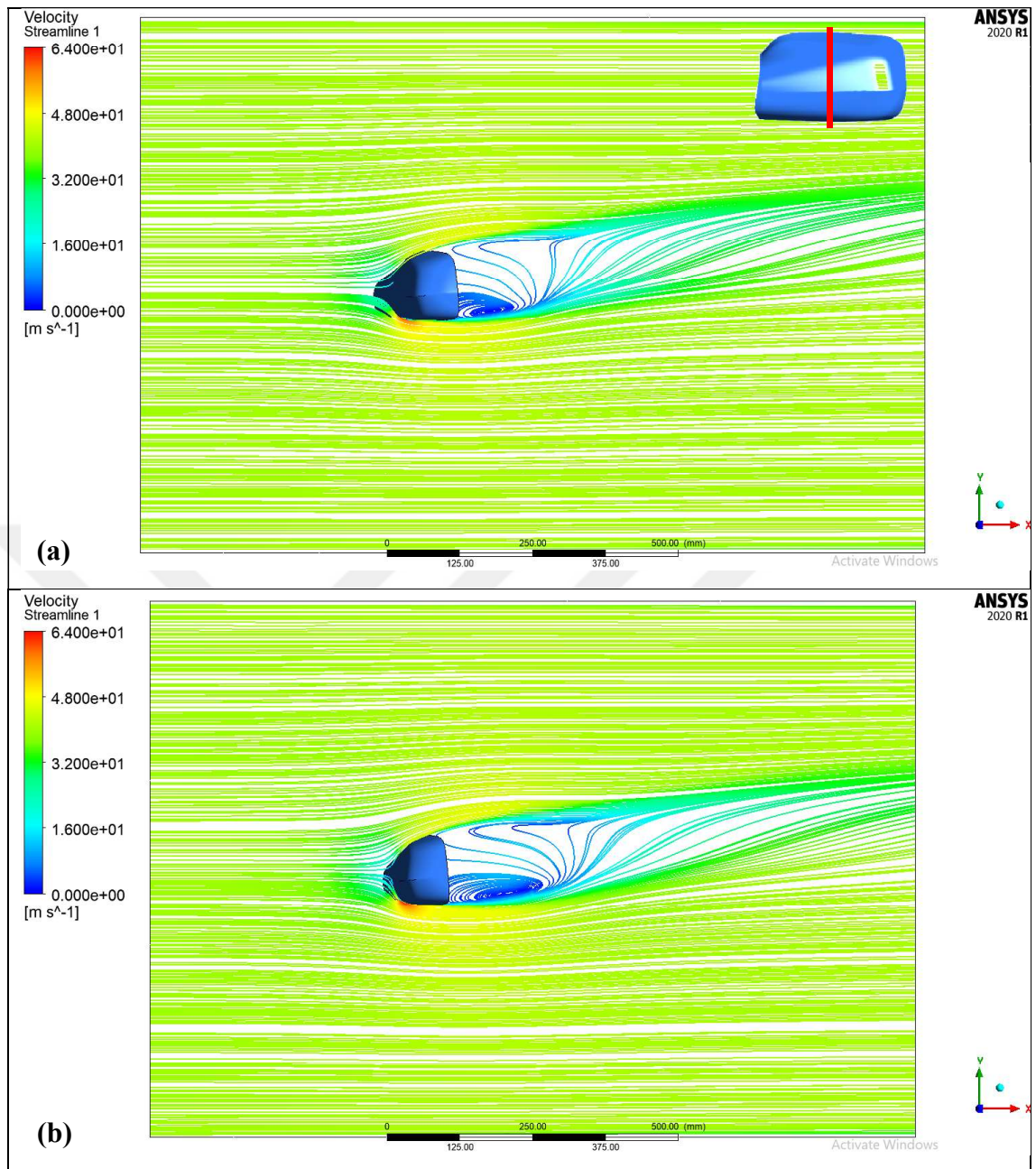


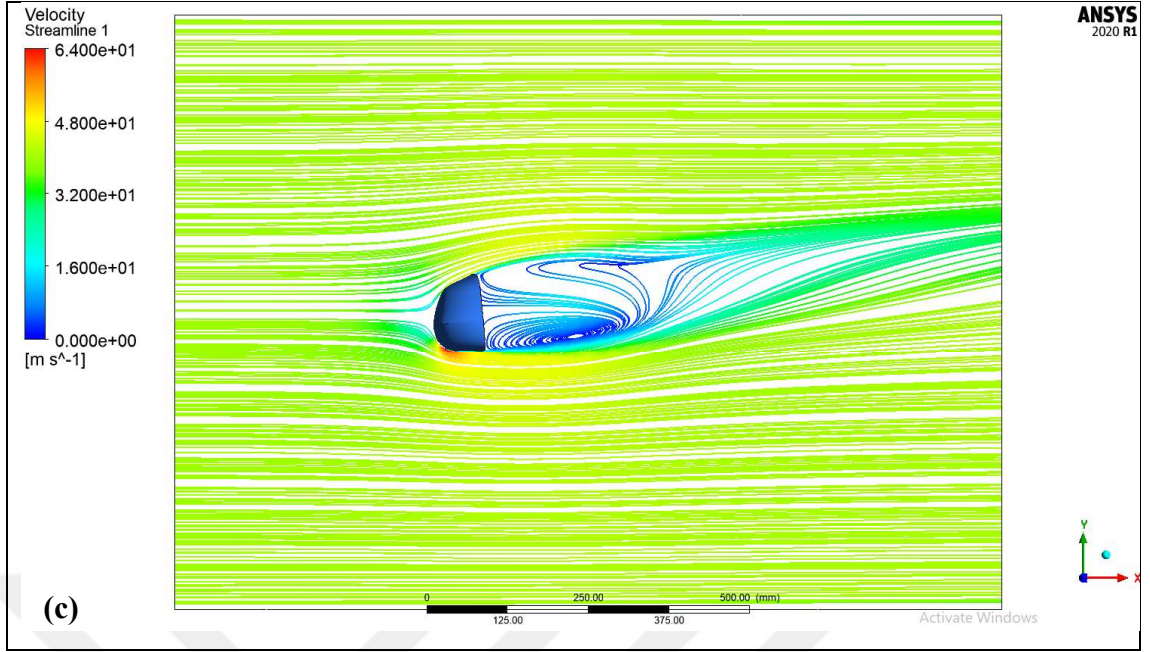
Şekil 4.48. 20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) +10° sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.49. 30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



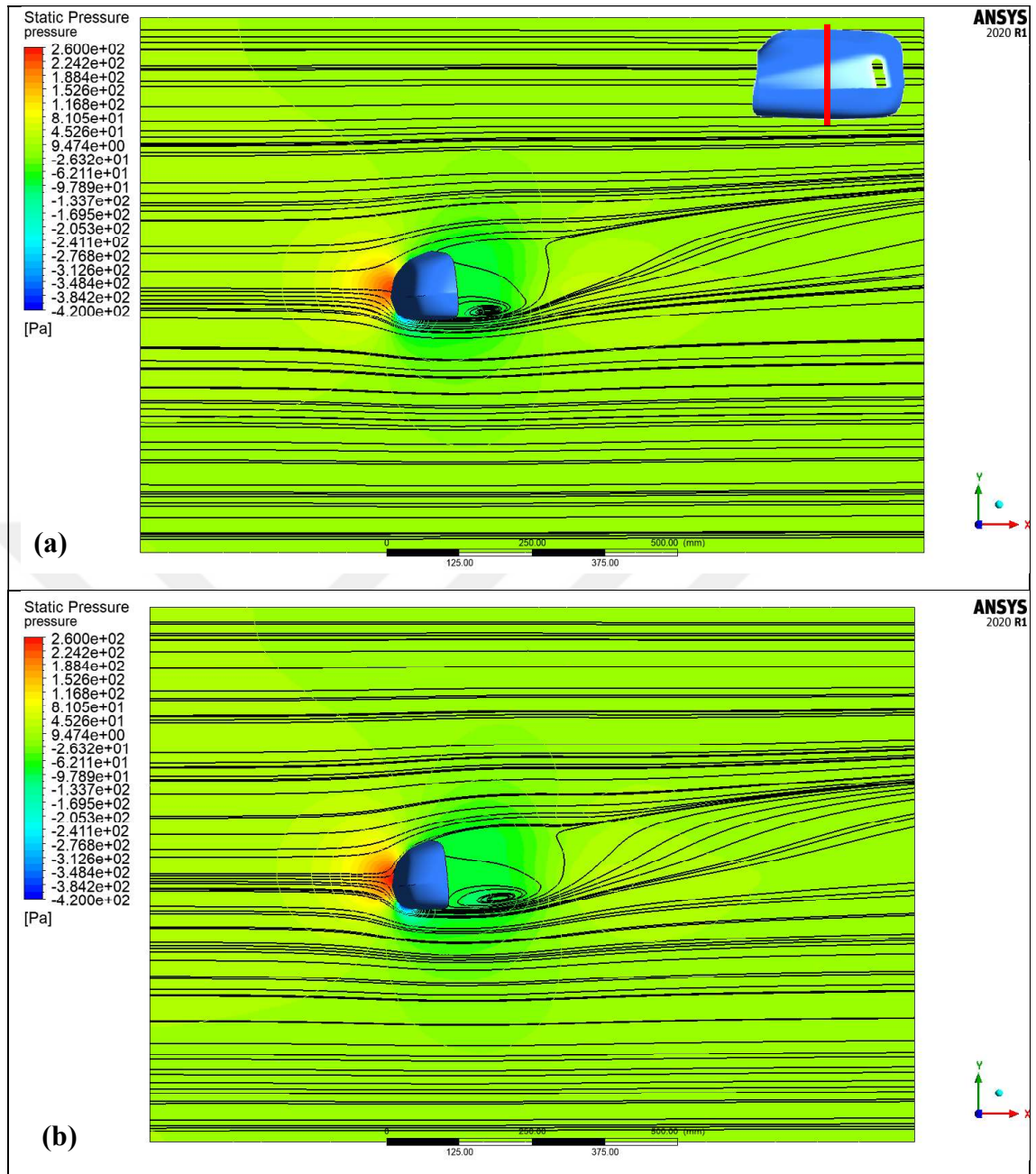


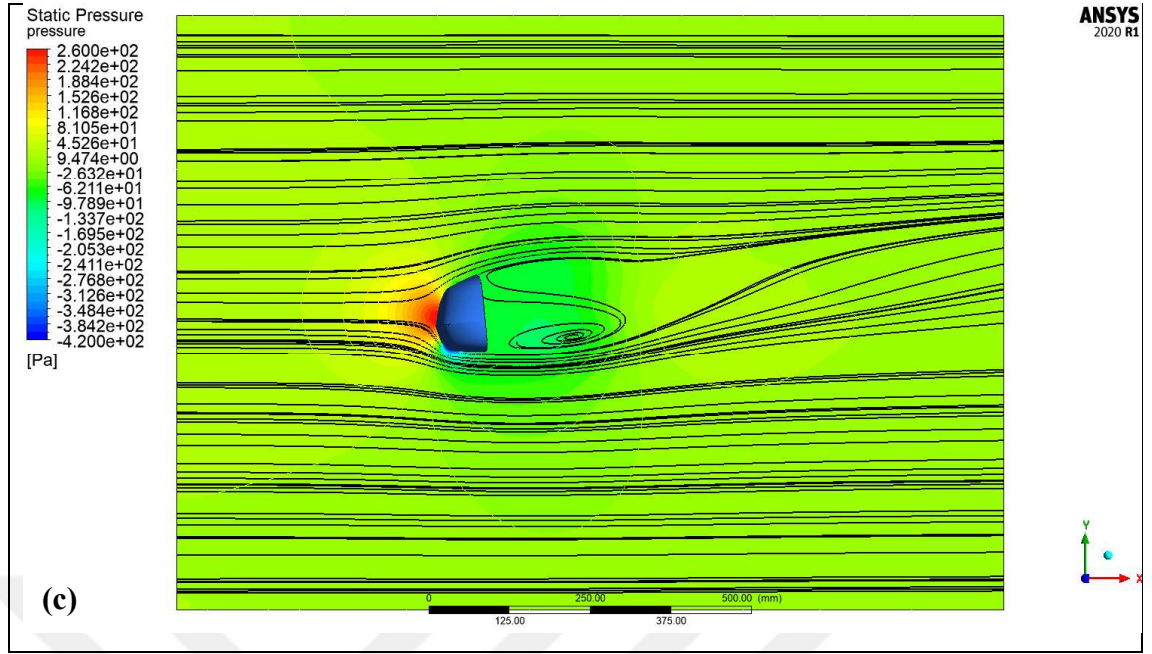
Şekil 4.50. 40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan basınç dağılımları Şekil 4.51 – 4.53’te verilmiştir. Tüm hız ve sapmalarda ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri Çizelge 4.12’de sunulmuştur. Maksimum basınç; minimum hızın olduğu (yani hızın durduğu) aynanın ön orta kısmındaki bölgede oluşmuştur. Aynanın keskin olan alt köşesinde minimum basınç gözlenmiştir ve vorteks oluşumu bu bölgede gerçekleşmiştir. Vorteksin olduğu bölgede negatif basınç değerlerinin olduğu görülmüştür.

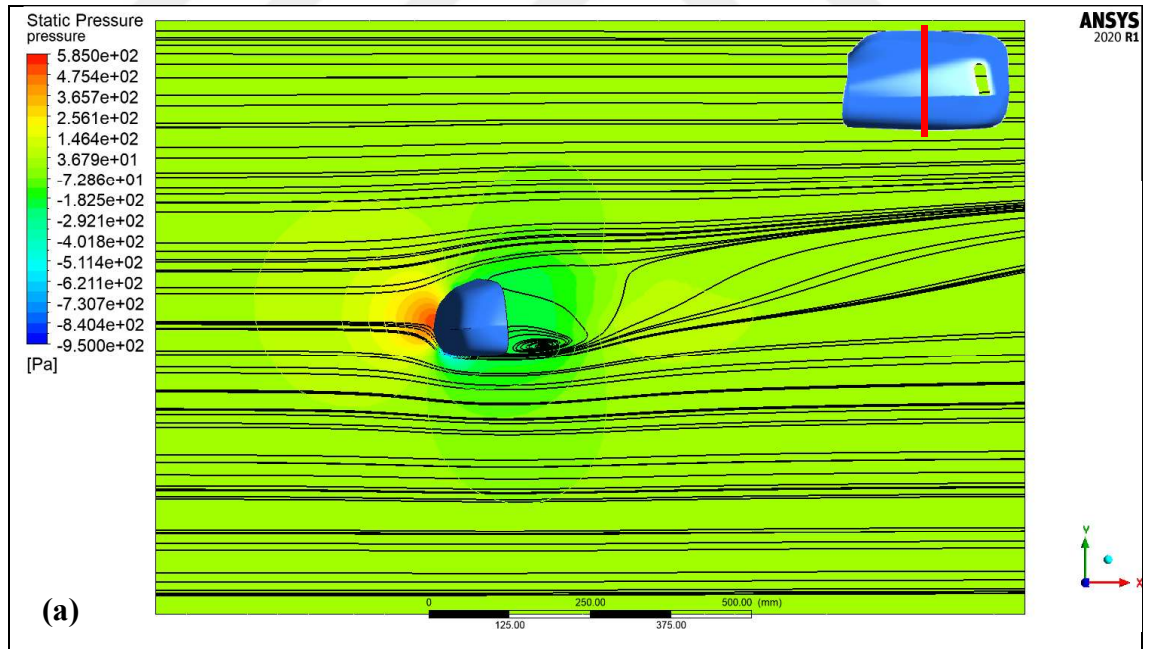
Çizelge 4.12. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri

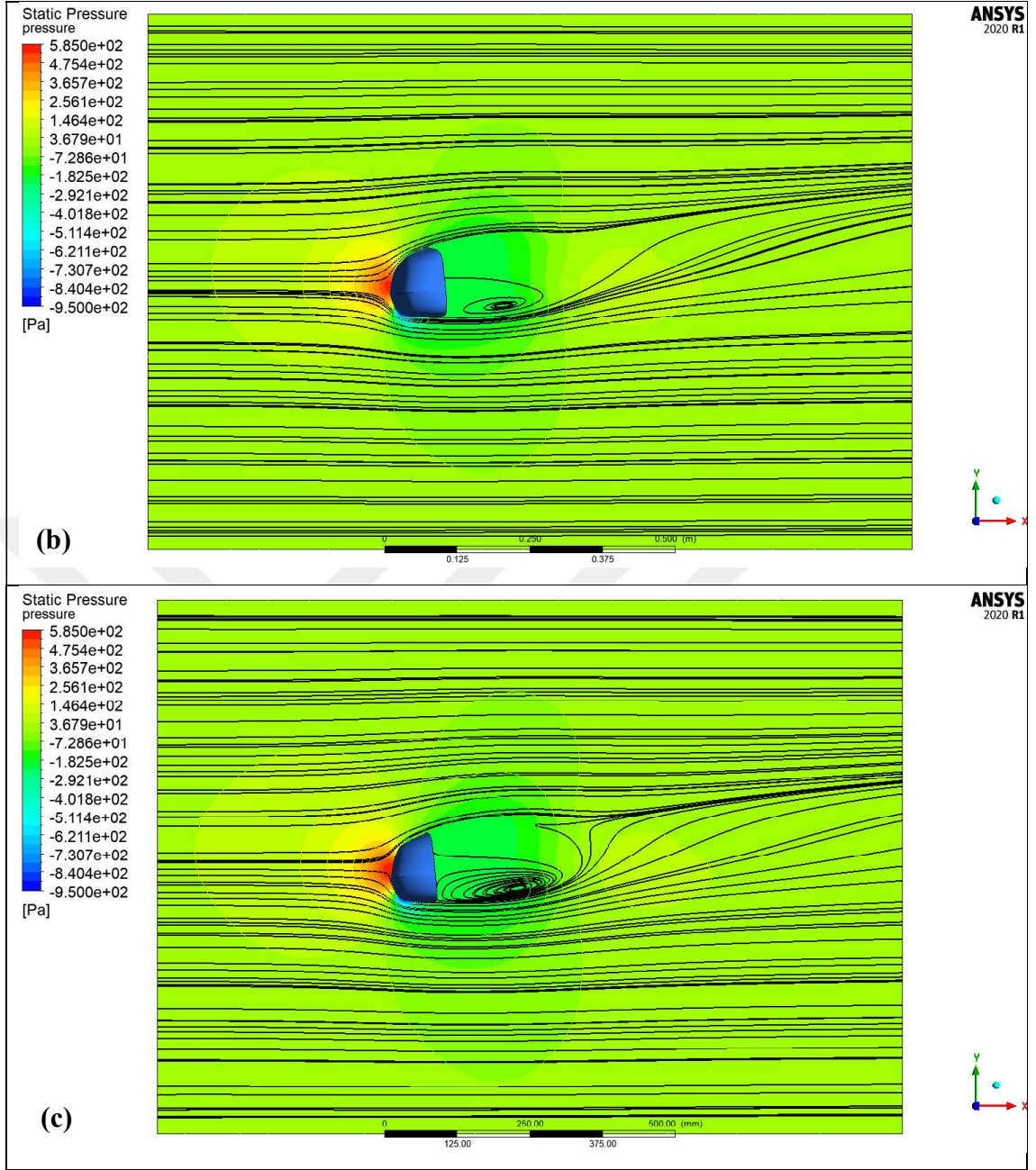
V (m/s) β (°)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (Pa)	227,09	249,3	259,73	509,88	559,27	584,36	904,78	994,46	1038,13
Min (Pa)	-352,36	-397,21	-418,46	-794,03	-899,03	-948,85	-1425,3	1608,26	-1698,7



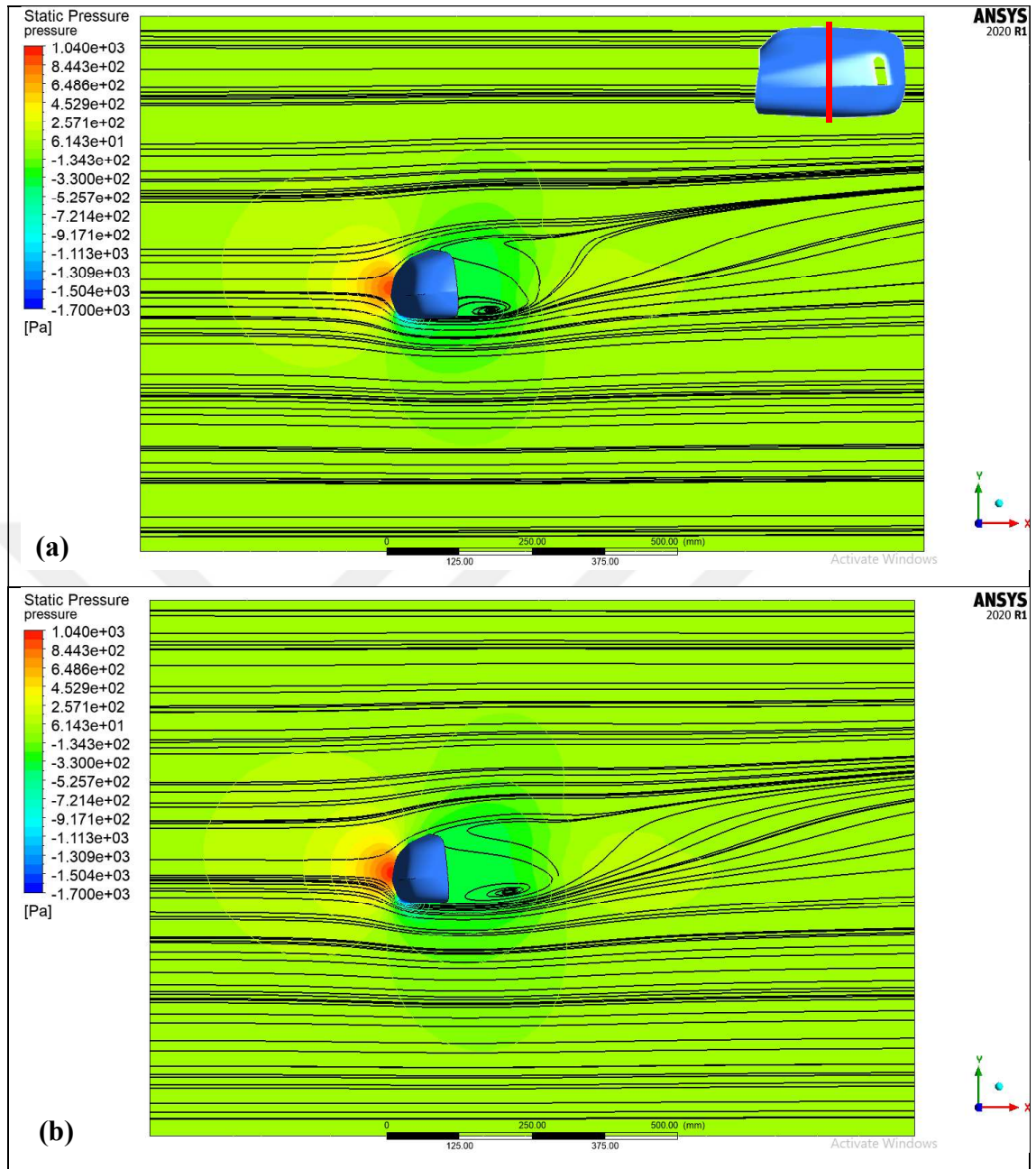


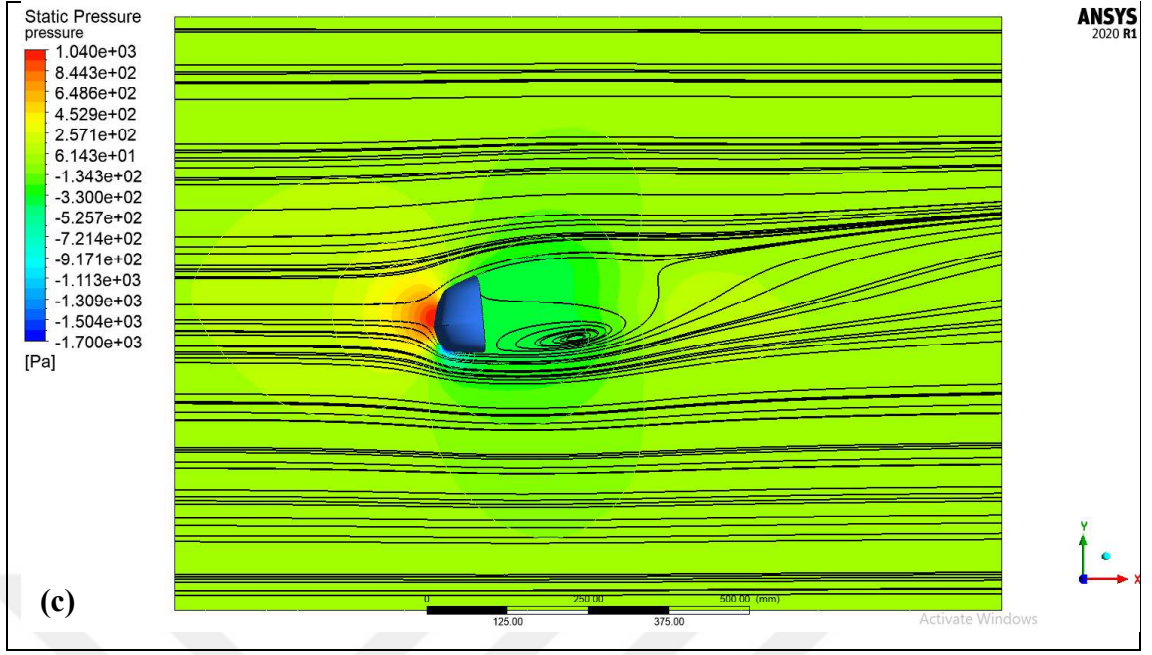
Şekil 4.51. 20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





Şekil 4.52. 30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





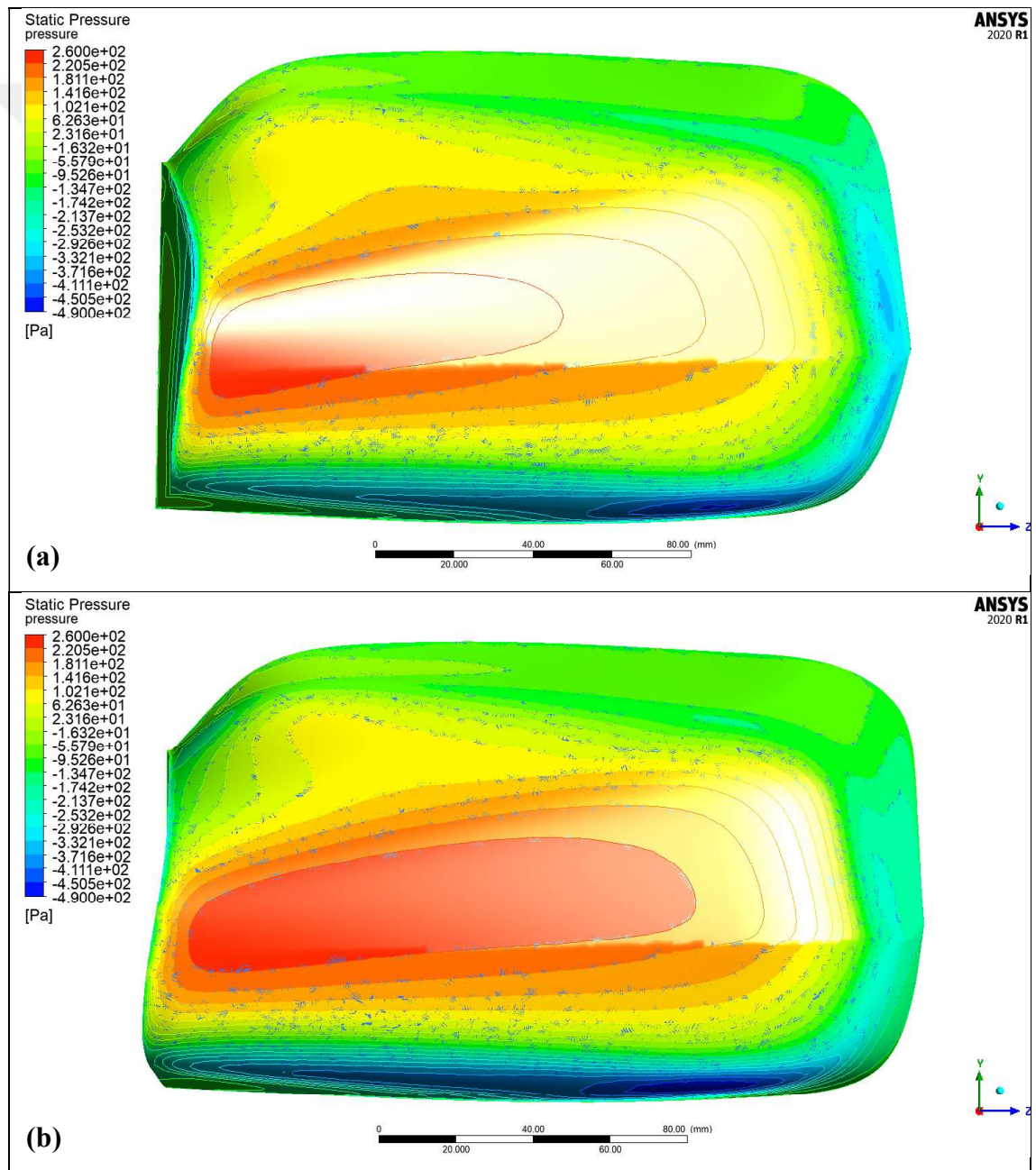
Şekil 4.53. 40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı

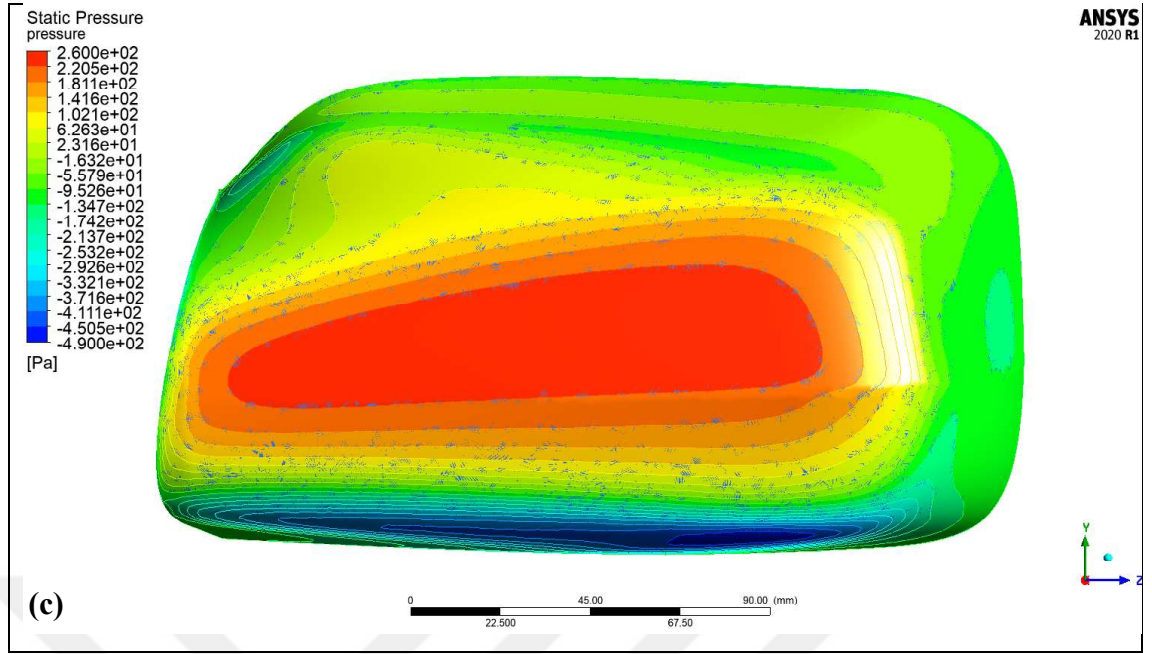
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna üzerinde oluşan basınç dağılımları Şekil 4.54 – 4.56’da gösterilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarında ayna ön yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri Çizelge 4.13’te verilmiştir. Ayna ön yüzeyinde oluşan basınç dağılımı hemen hemen her hızda benzer özellik göstermesine rağmen, sapma açılarındaki değişim, ayna üzerindeki basınç dağılımını değiştirmektedir. Durma noktası ve civarında maksimum değerler görülürken, ayrılmanın görüldüğü bölgelerde minimum basınç değerleri ölçülmüştür. $+10^\circ$ sapma açısında ayna ön yüzeyinde oluşan maksimum basınç bölgesinin en küçük olduğu, minimum basınç değerlerinin ise ayna alt yüzeyi ve ayna sağ kenarında olduğu görülmüştür. 0° sapma açısında maksimum basınç alanın genişlediği gözlemlenmiştir. -10° sapma açısında, maksimum basınç alanın en büyük boyuta ulaştığı, minimum basınç oluşumunun ise ayna alt kenarı ile sınırlı kaldığı tespit edilmiştir.

$+10^\circ$ ’den -10° ’lik sapma açısına doğru ayna üzerinde oluşan maksimum basınç bölgesinin arttığı ve minimum basınç bölgelerinde ise azalma olduğu görülmüştür.

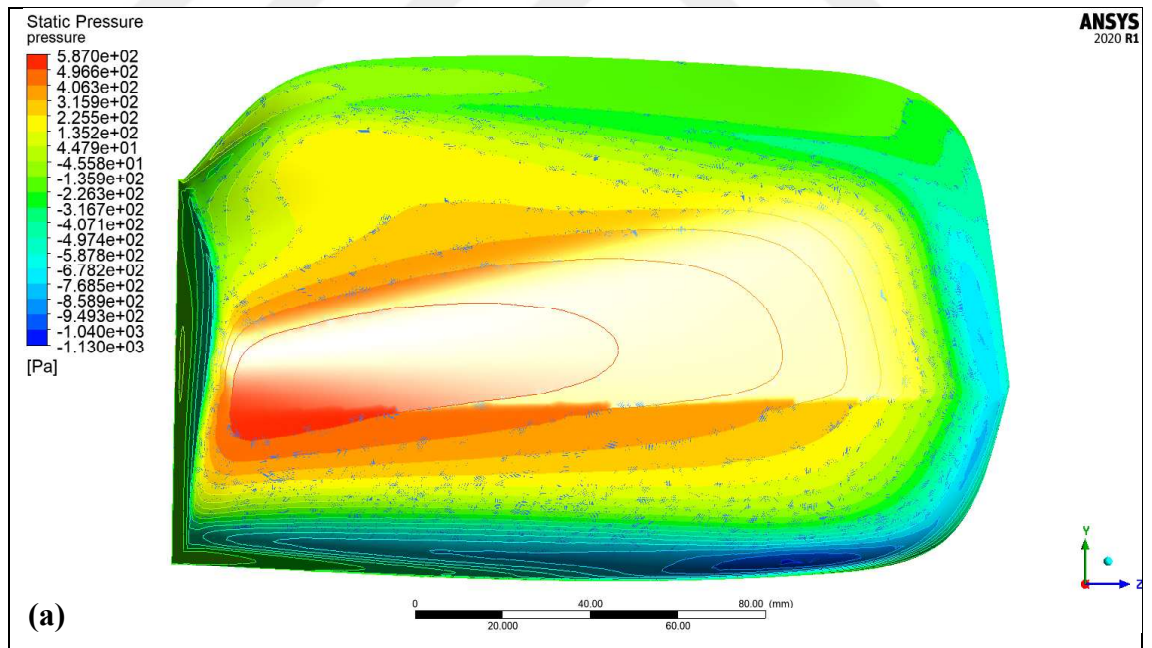
Çizelge 4.13. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri

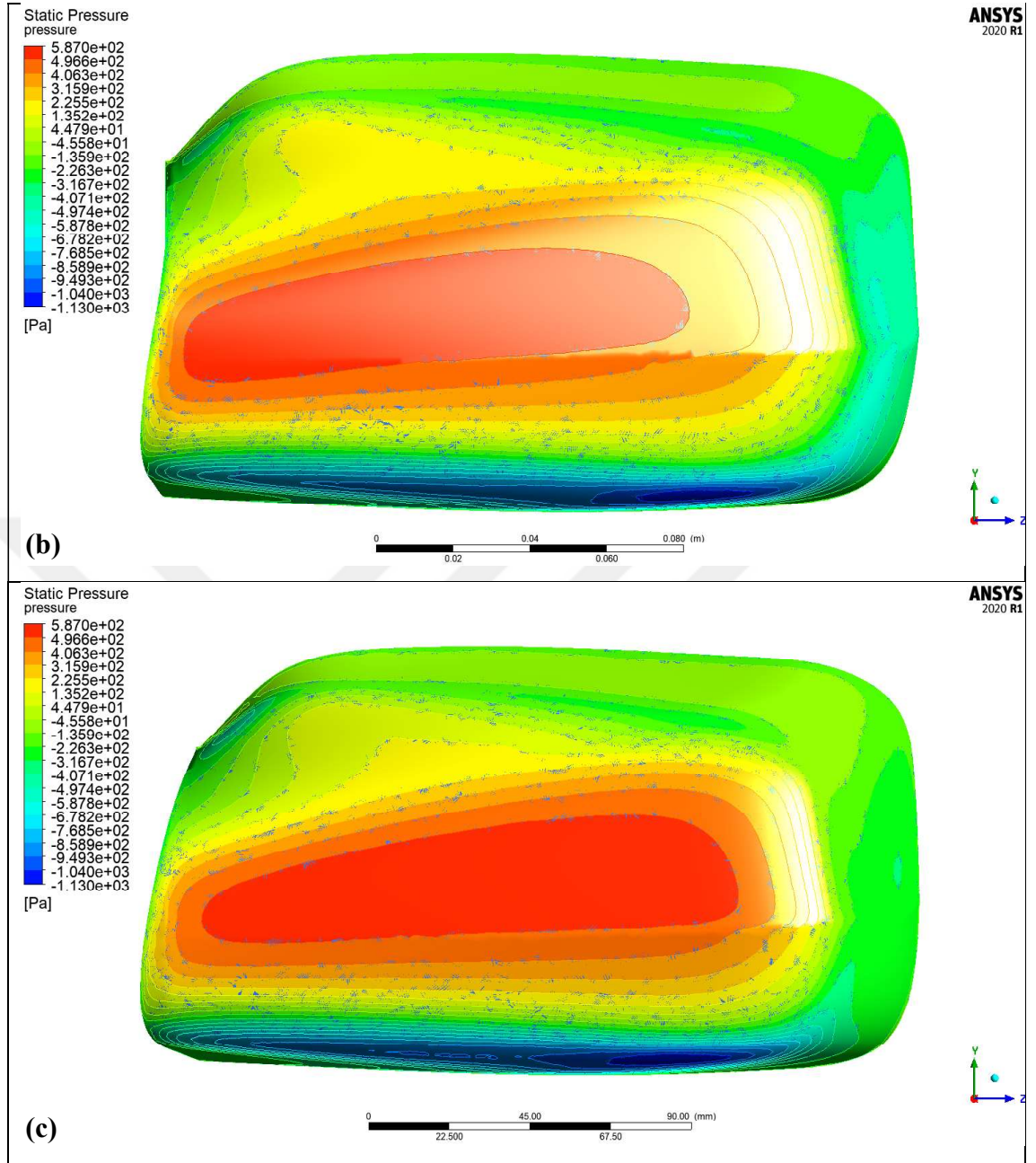
V (m/s) β (°)	20 m/s			30 m/s			40 m/s		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (Pa)	257	258,55	259,85	578,42	581,55	586,03	1027,46	1033,81	1039,19
Min (Pa)	-457,13	-484,02	-489,73	-1047,5	-1121,5	-1129,1	-1903,5	-2029,4	-2045,5



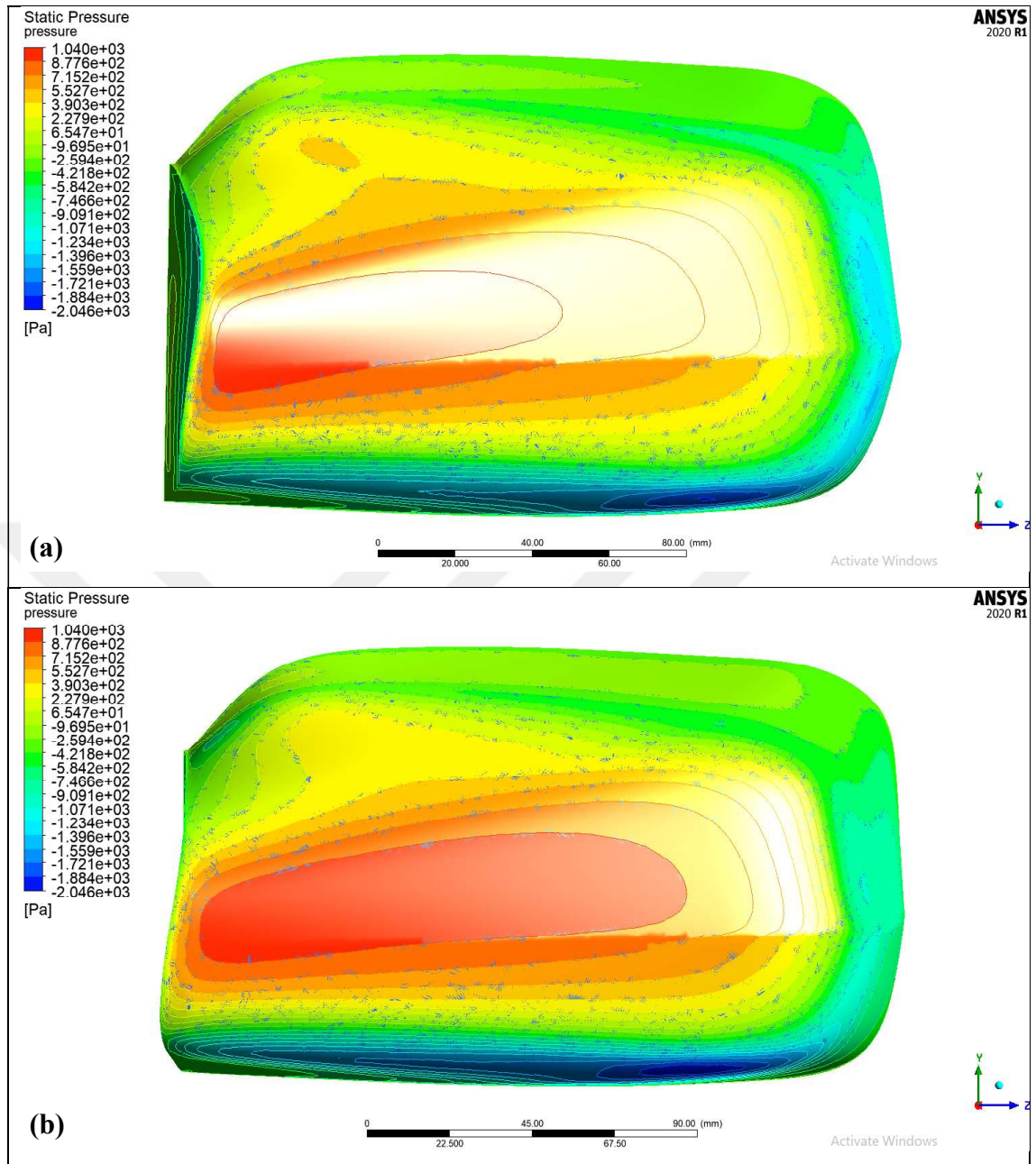


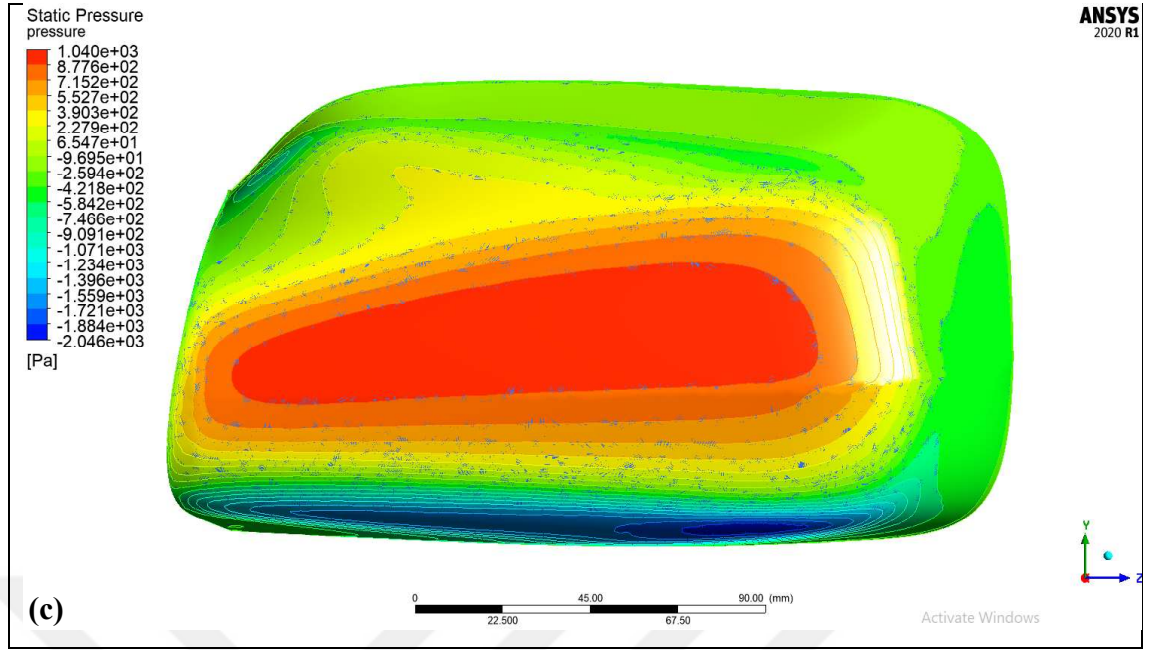
Şekil 4.54. 20 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.55. 30 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



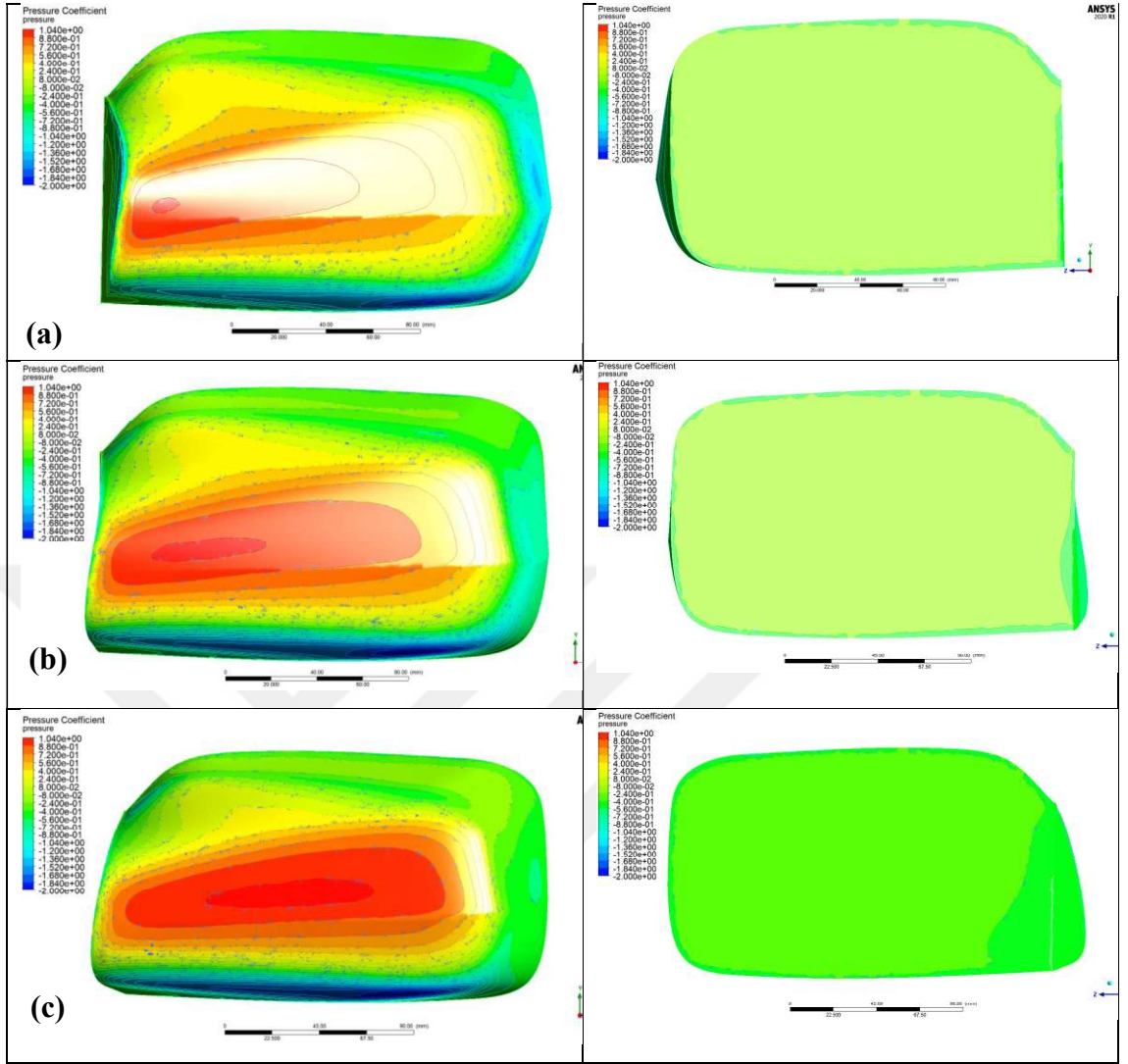


Şekil 4.56. 40 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı

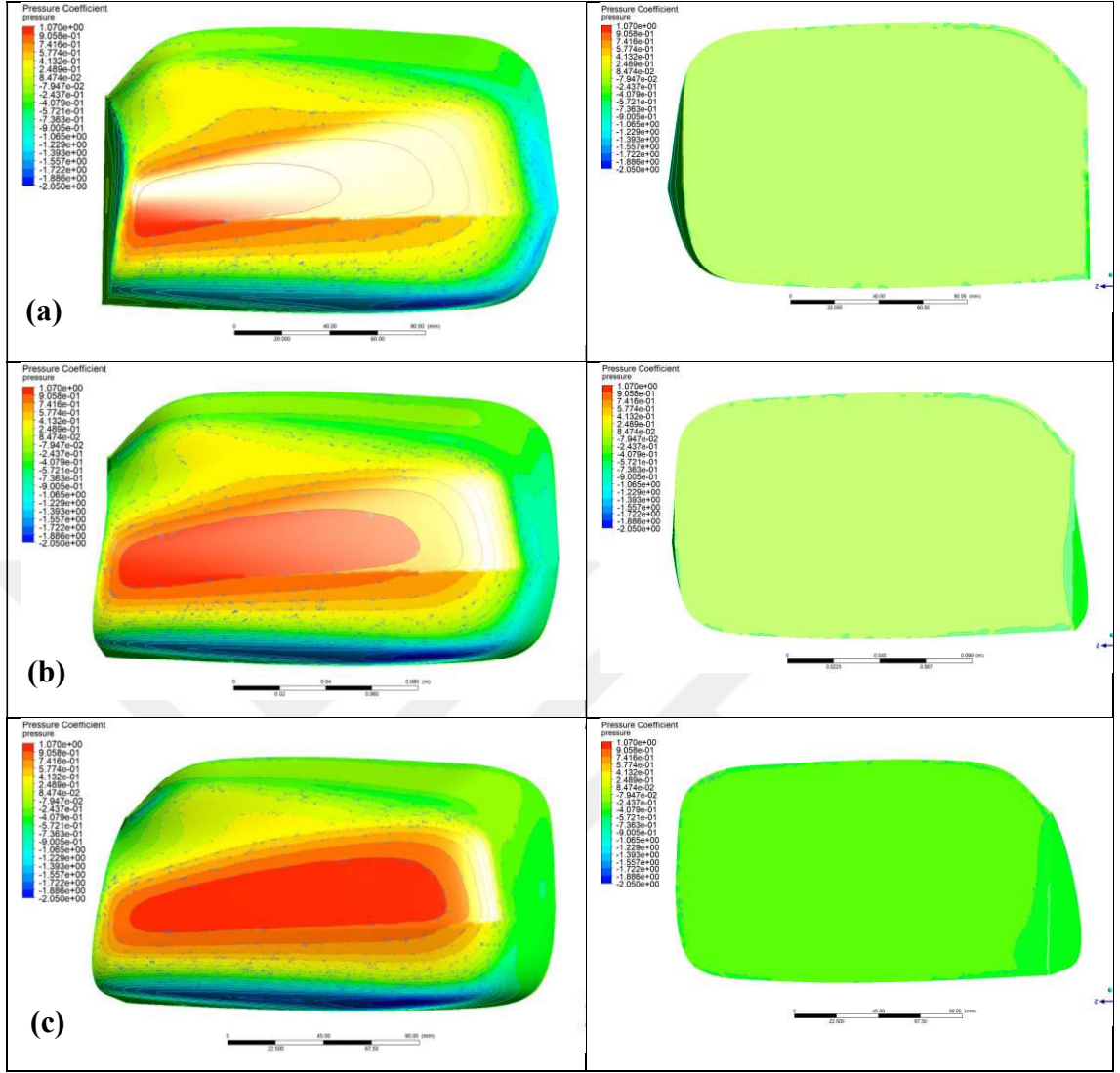
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna üzerinde oluşan basınç katsayısı dağılımları Şekil 4.57 – 4.59’da gösterilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarında ayna yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç katsayısı değerleri Çizelge 4.14’te verilmiştir. Ayna ön yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımları basınç dağılımlarıyla benzerlik göstermektedir. Ayna arka yüzeyinde minimum basınç katsayısı değerlerinin oluştuğu görülmektedir. Özellikle -10° sapma açılarında ayna arkasında oluşan basınç katsayısı değeri diğer sapma açılarındaki basınç katsayısı değerlerinden daha düşüktür.

Çizelge 4.14. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç katsayısı değerleri

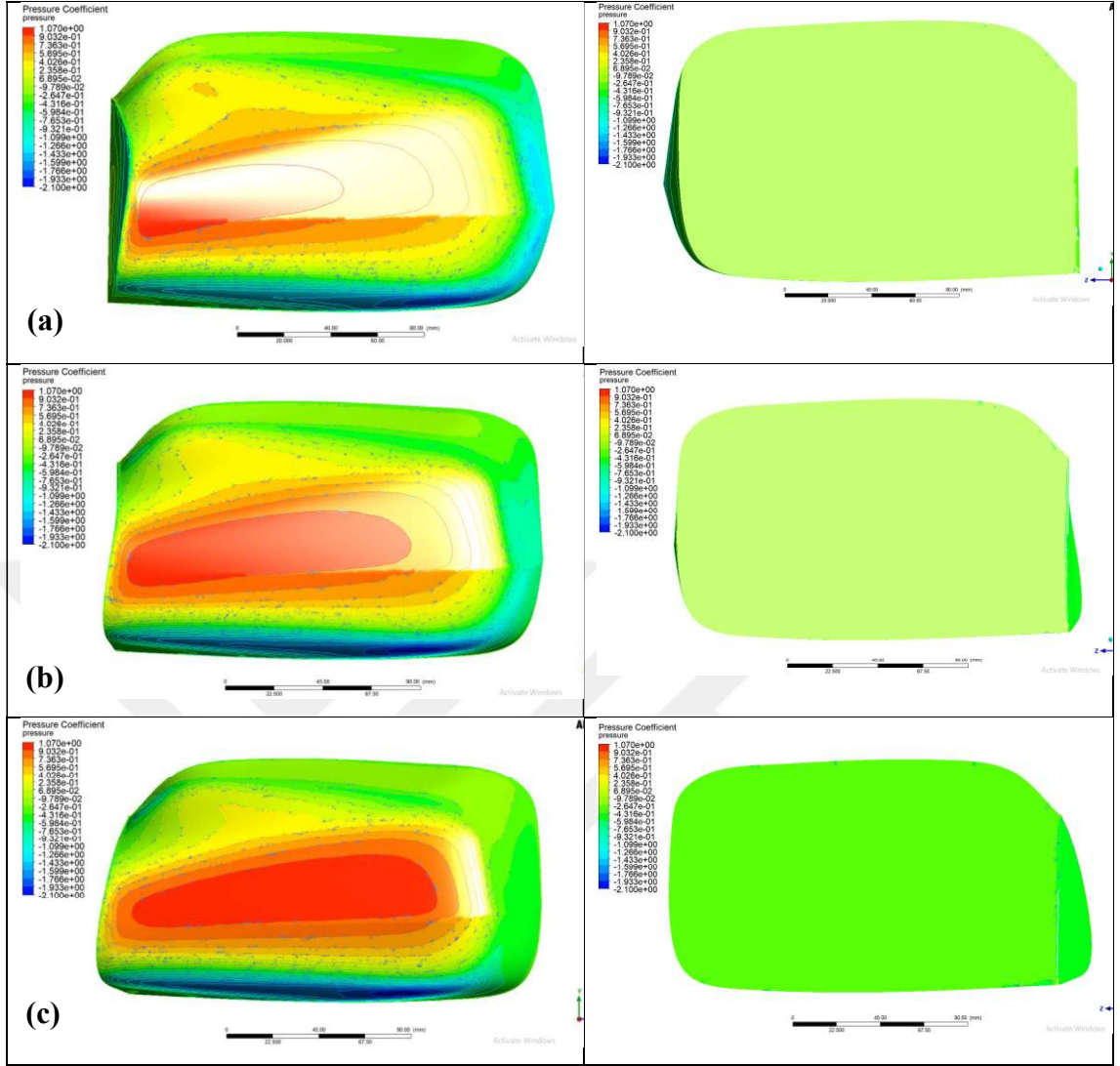
V (m/s)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks ()	1,05	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06	1,05	1,05	1,06
Min ()	-1,87	-1,98	-2	-1,09	-2,03	-2,05	-1,94	-2,07	-2,09



Şekil 4.57. 20 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

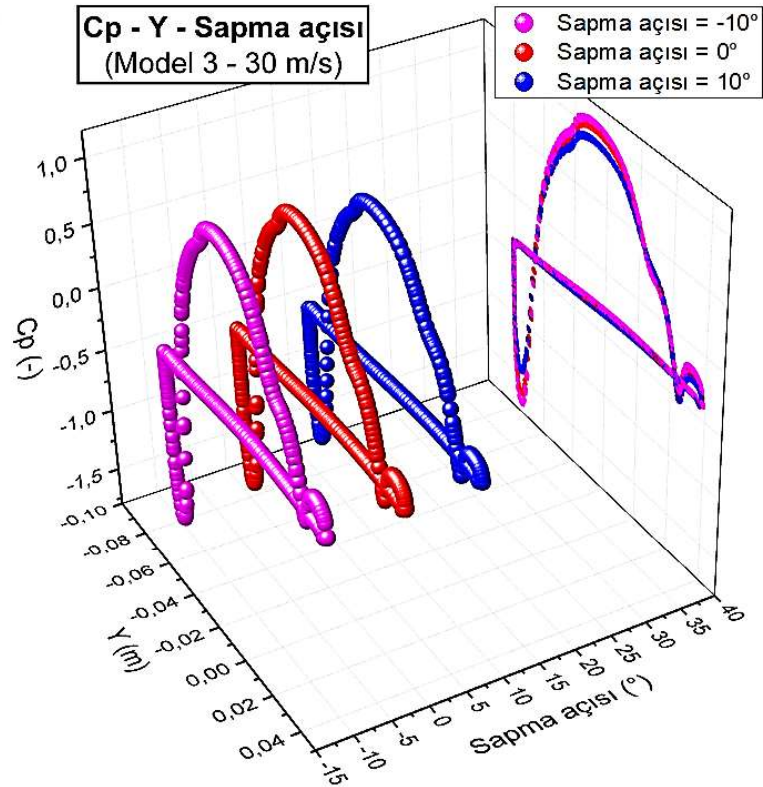
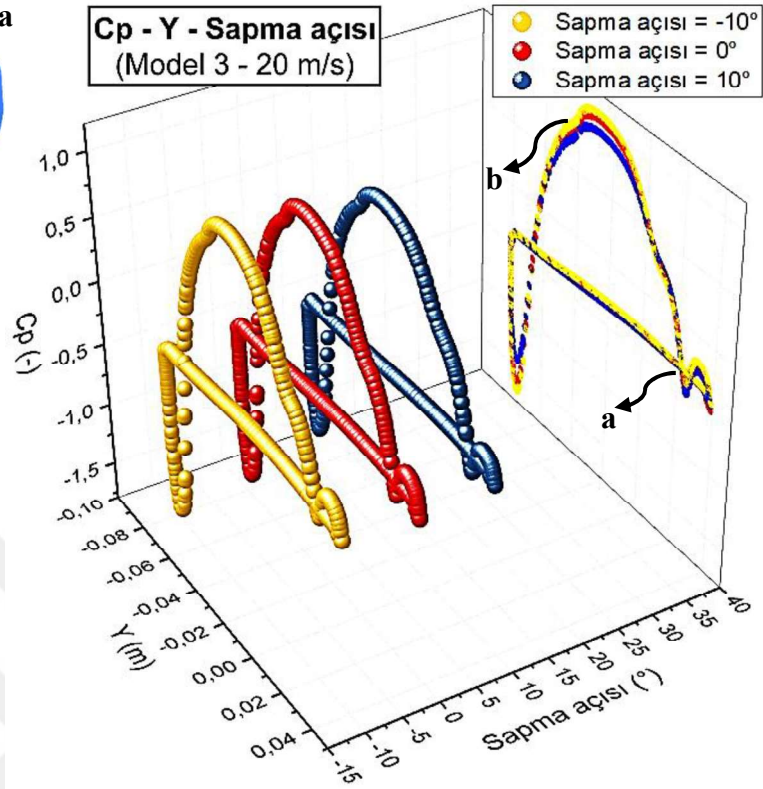
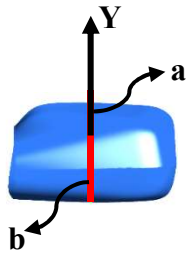


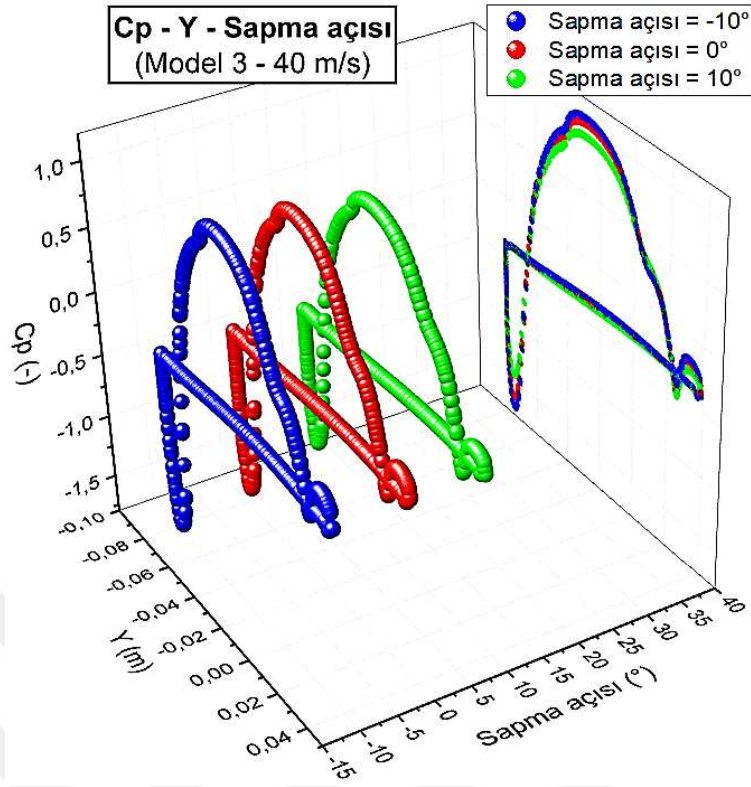
Şekil 4.58. 30 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



Şekil 4.59. 40 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

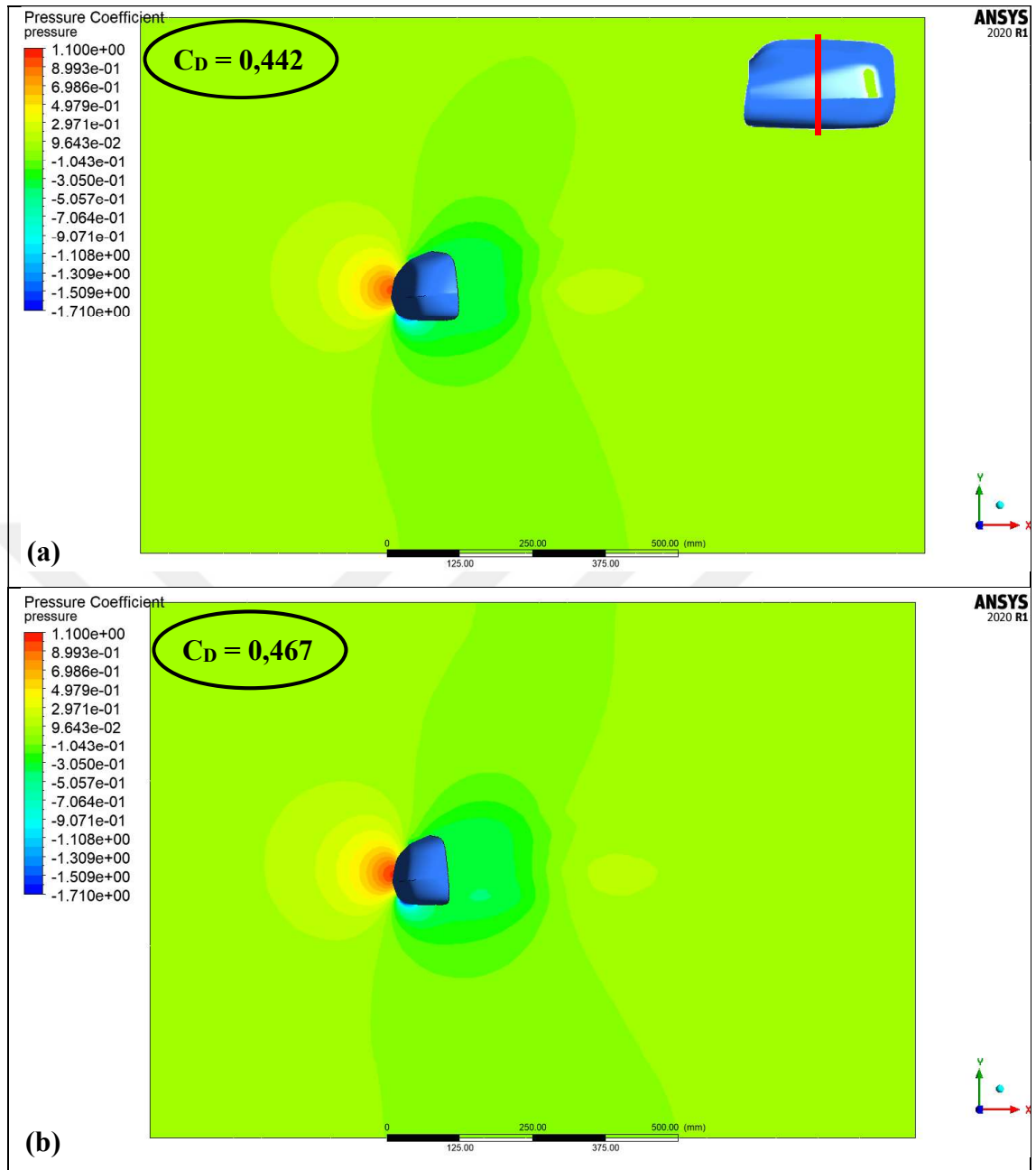
$\beta = 10^\circ$, 0° ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan eğride Y-ekseni boyunca oluşan basınç katsayıları 20, 30 ve 40 m/s hızlar için sırasıyla Şekil 4.60'ta verilmiştir. Grafiklerde en sağdaki eğriler 3 eğrinin izdüşümleridir. Farklı sapma açılarında C_p dağılımı büyük farklılıklar göstermemiştir. Beklendiği gibi, maksimum C_p değerine aynanın ön yüzeyindeki durma noktasında (yaklaşık olarak $Y = -0,04$ m, alt kısımdan itibaren aynanın yaklaşık 1/3 yüksekliğinde) rastlanmıştır. Aynanın ön yüzey profilini oluşturan eğri bazı bölgelerde ters açılar içerdiği için basınç katsayısı değerlerinde de salınımlar meydana gelmiştir. Salınımların olduğu bu bölgeler şekil üzerinde “a” ve “b” harfleri ile gösterilmiştir.

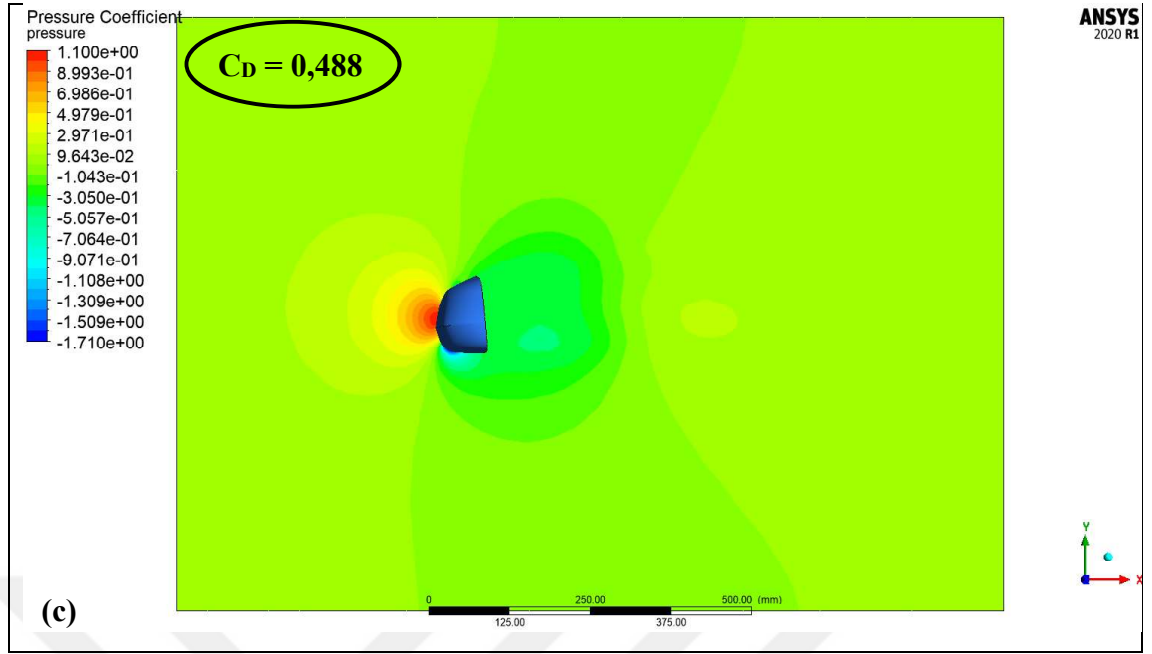




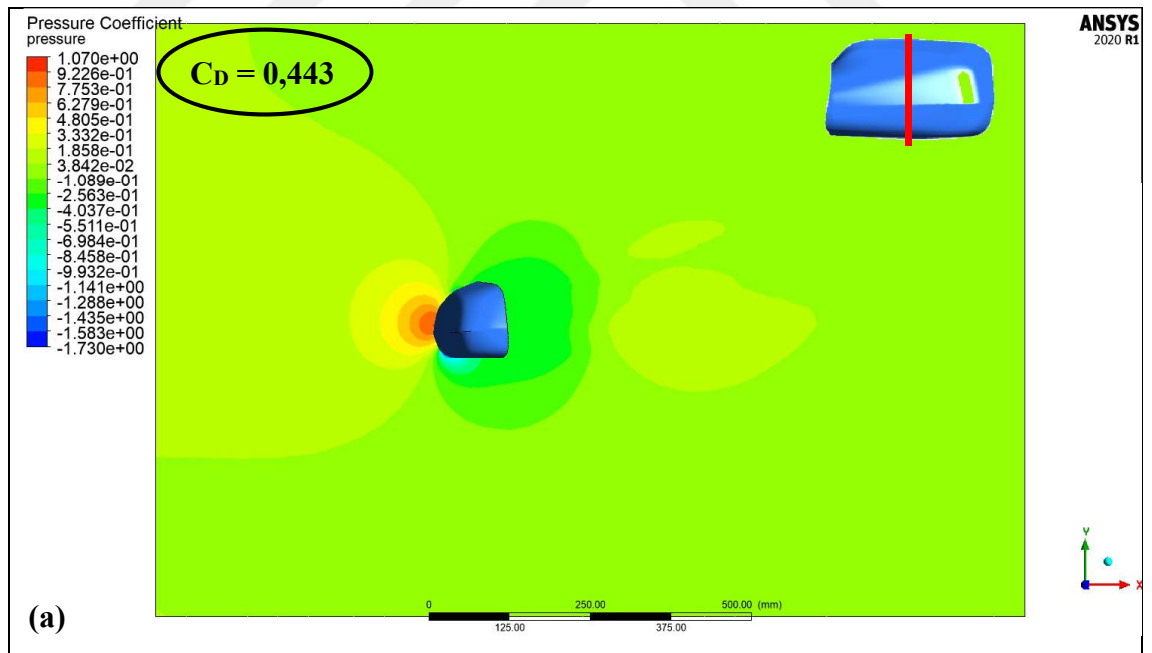
Şekil 4.60. Ayna orta bölgesinden alınan eğride Y-ekseni boyunca oluşan basınç katsayıları: (a) 20 m/s, (b) 30 m/s, (c) 40 m/s (En sağdaki eğriler, 3 eğrinin izdüşümleridir.)

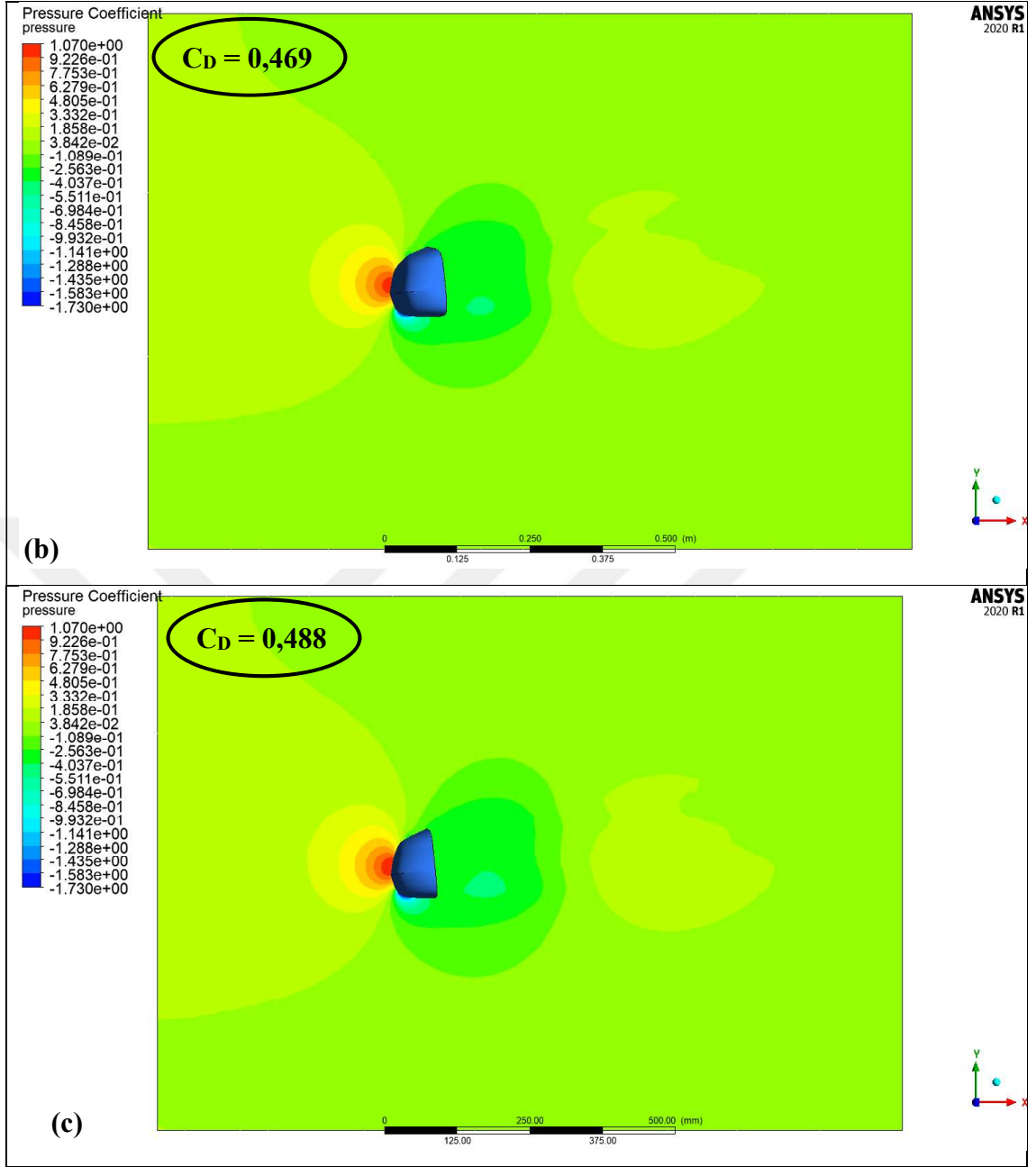
En düşük basınç katsayısı değerlerine ise aynanın arka yüzeyinde alt kısımda rastlanmıştır. Bu bölgeler vortekslerin en yoğun olduğu (bkz. örneğin Şekil 4.52) bölgelerdir. Ayrıca -10° sapma açısında diğer sapma açılarındakine göre maksimum C_p değeri artmış, minimum C_p değeri ise azalmıştır. Bu sonuçlar C_p eğrilerinin bulunduğu düzlemlerdeki C_p dağılımını gösteren Şekil 4.61-4.63'ten de takip edilebilir.



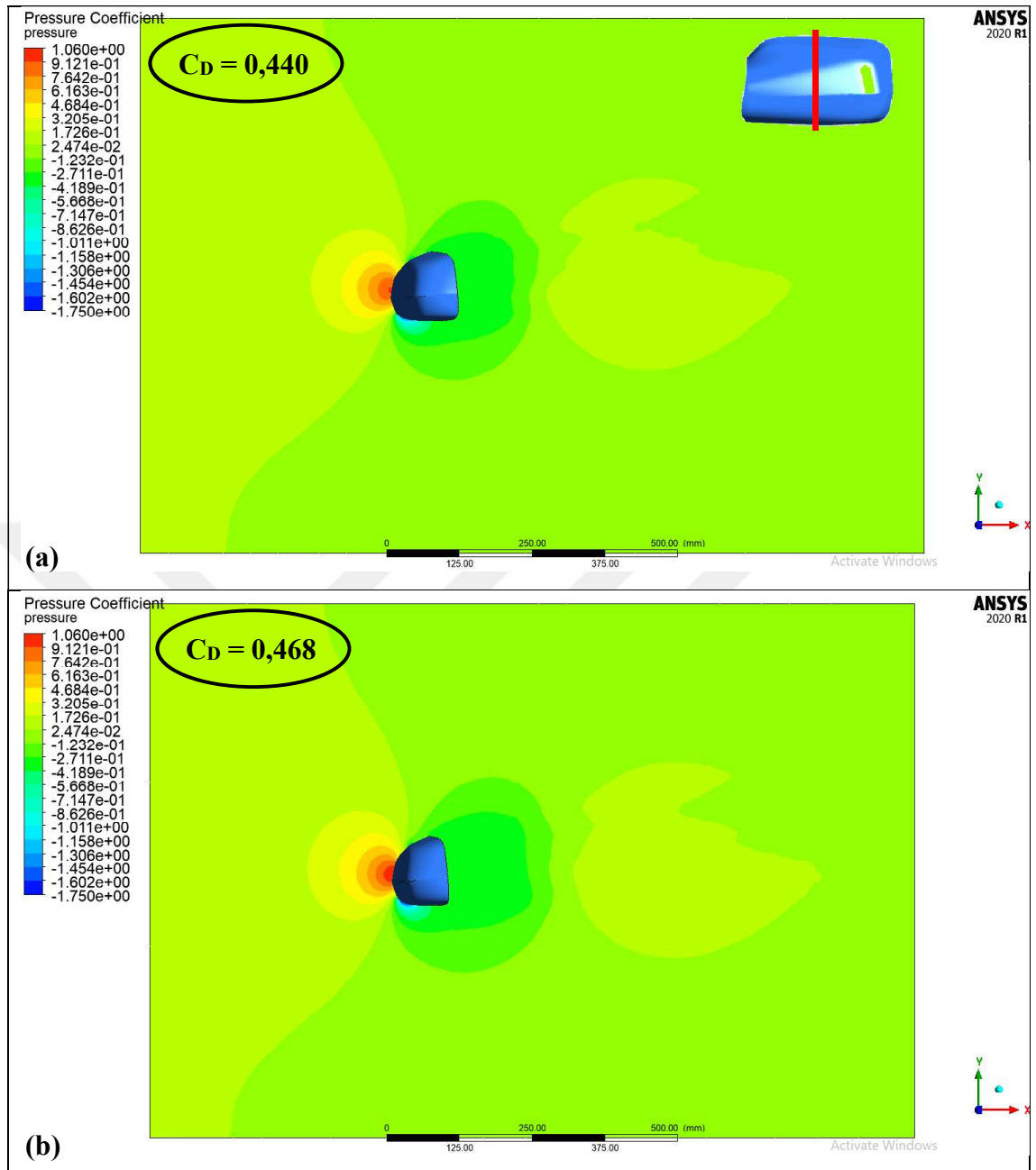


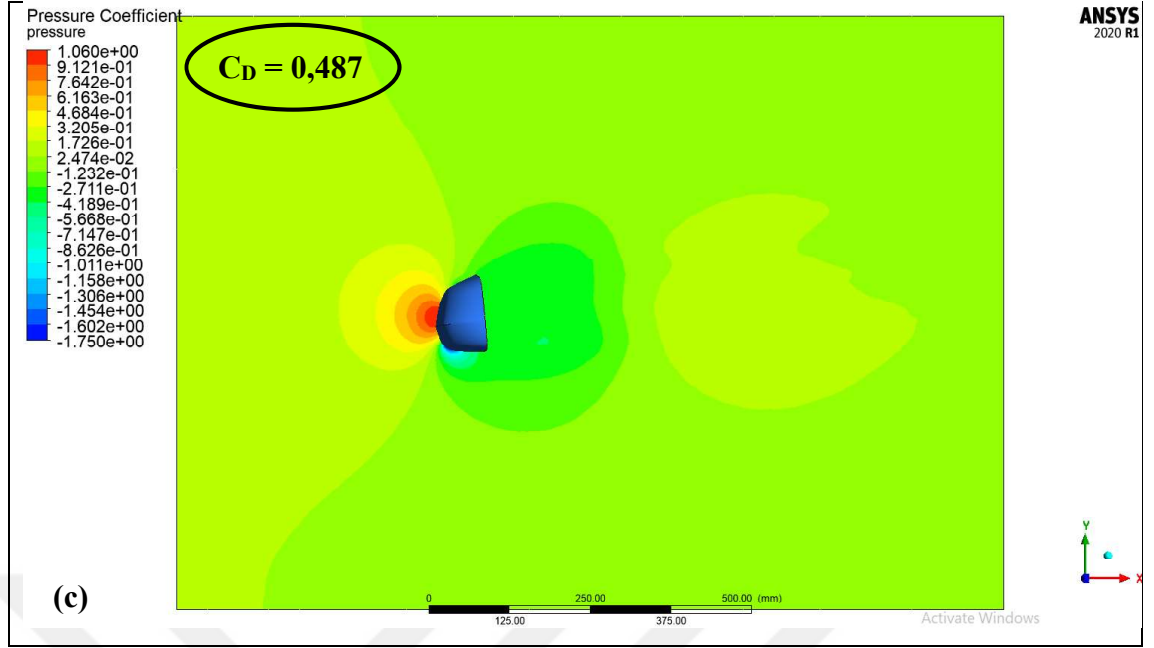
Şekil 4.61. 20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.62. 30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





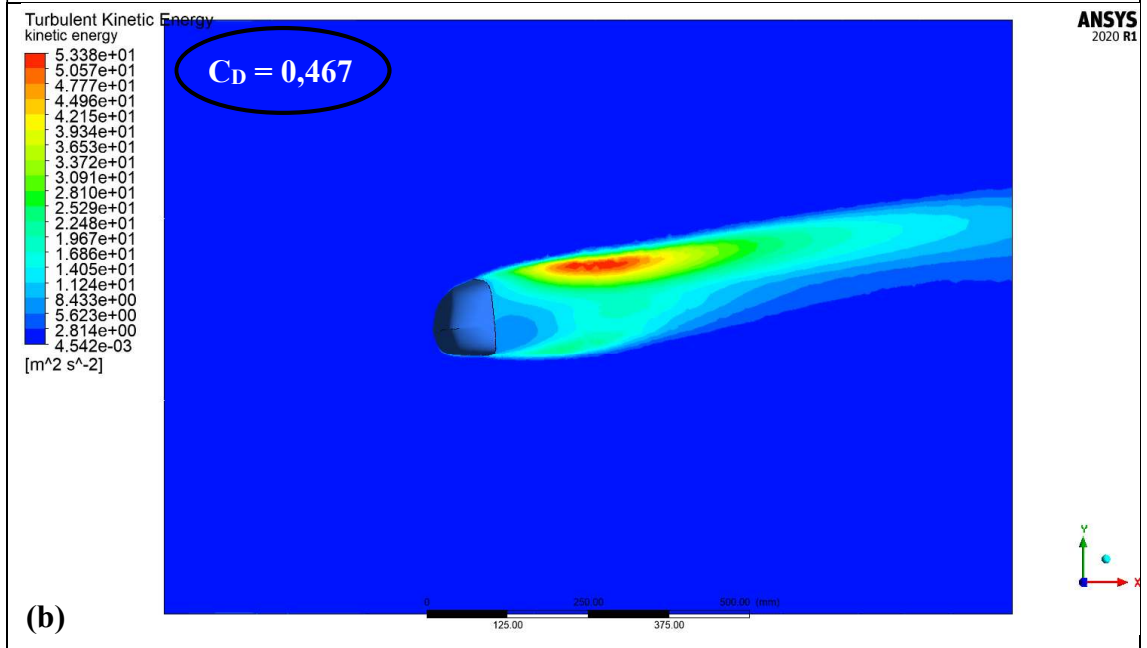
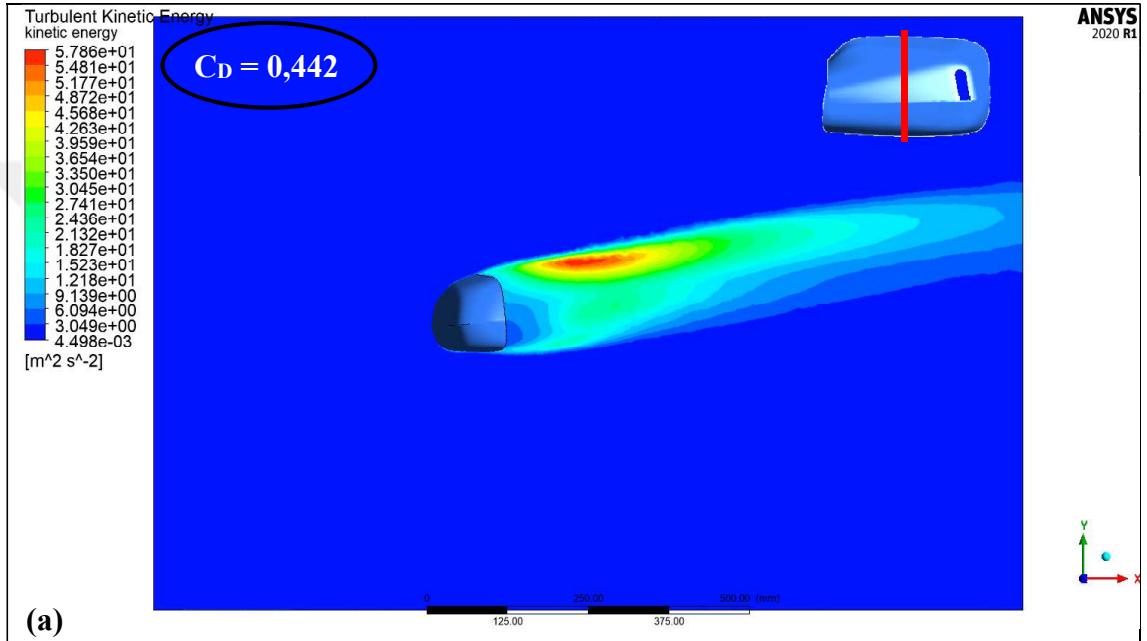
Şekil 4.63. 40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

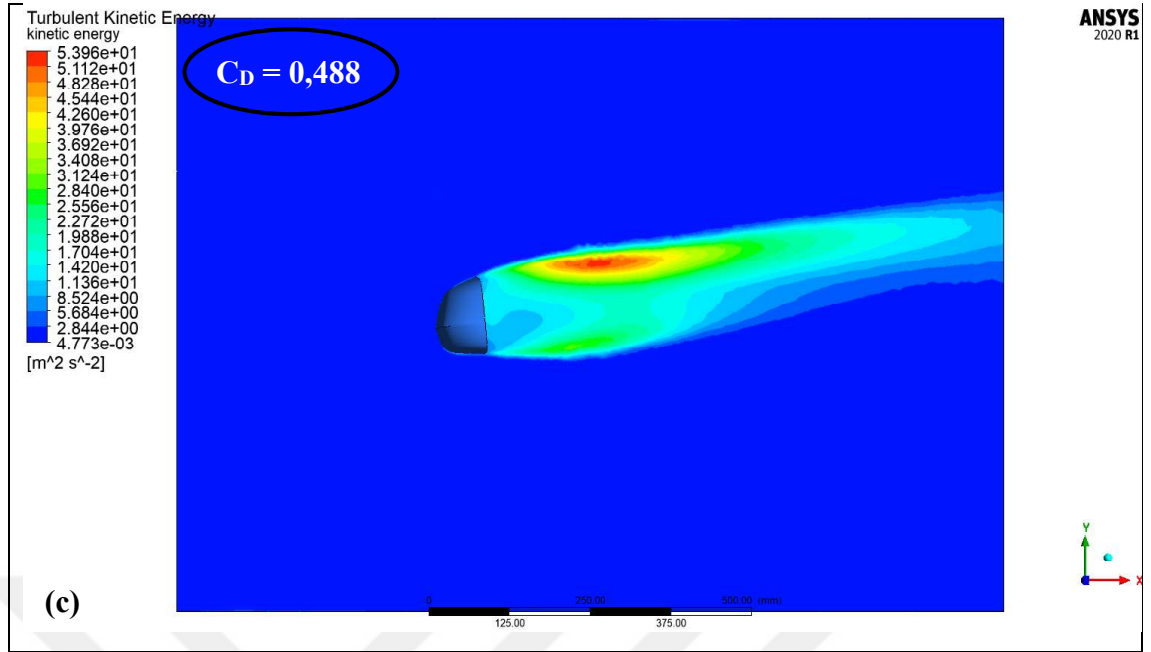
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan kinetik enerji dağılımları Şekil 4.64 – 4.66 arasında gösterilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarındaki maksimum ve minimum değerler Çizelge 4.15’te verilmiştir. Hız artıkça hıza bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi de artmaktadır. Sapma açılarındaki türbülans kinetik enerjisi dağılımları benzerlik göstermektedir. Tüm grafiklerde maksimum türbülans kinetik enerjisinin olduğu bir bölge mevcuttur. Vorteks çapının en yüksek olduğu (bkz. örneğin Şekil 4.52) bu bölge ayna arkasında ve üst kısımdadır. Ancak -10° sapma açısına bakıldığında ayna arkasında ve bu defa alt kısımda üsttekine göre şiddeti düşük olan ikinci bir türbülans bölgesi oluşumu gözlenmiştir.

Türbülans kinetik enerjinin büyüklüğü kısmen de olsa oluşan gürültünün şiddeti hakkında bilgi vermektedir. Minimum gürültü ve enerji kaybının 10° sapma açısında, maksimum gürültü ve enerji kaybının ise -10° sapma açısında görülmesi beklenir.

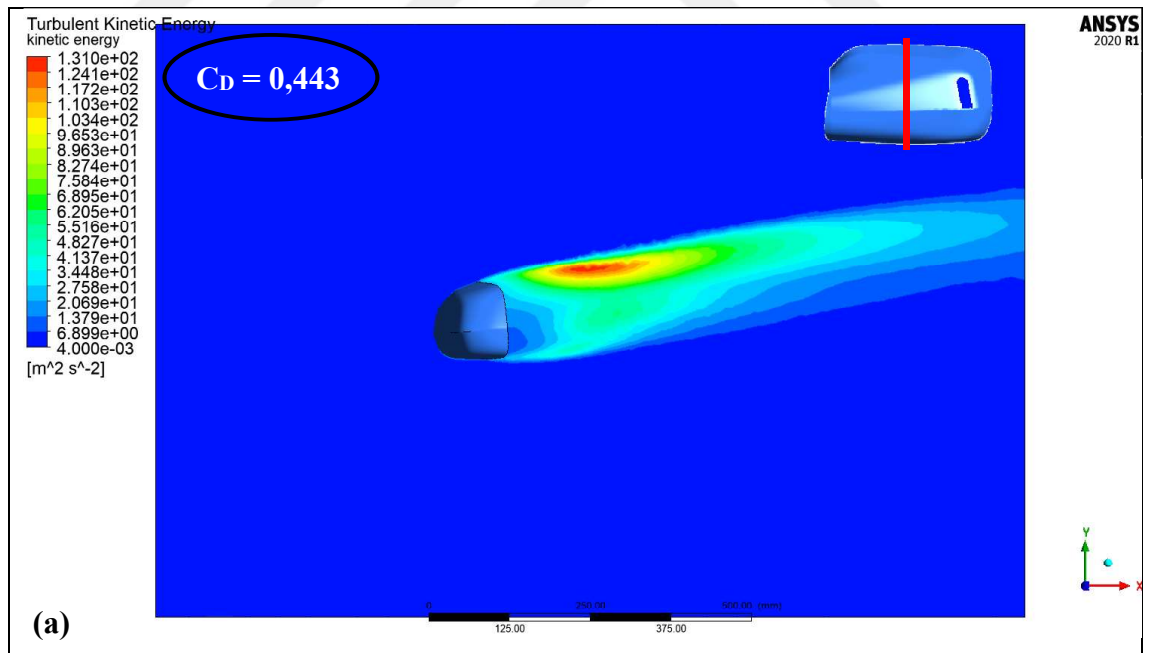
Çizelge 4.15. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan maksimum ve minimum türbülans kinetik enerjisi değerleri

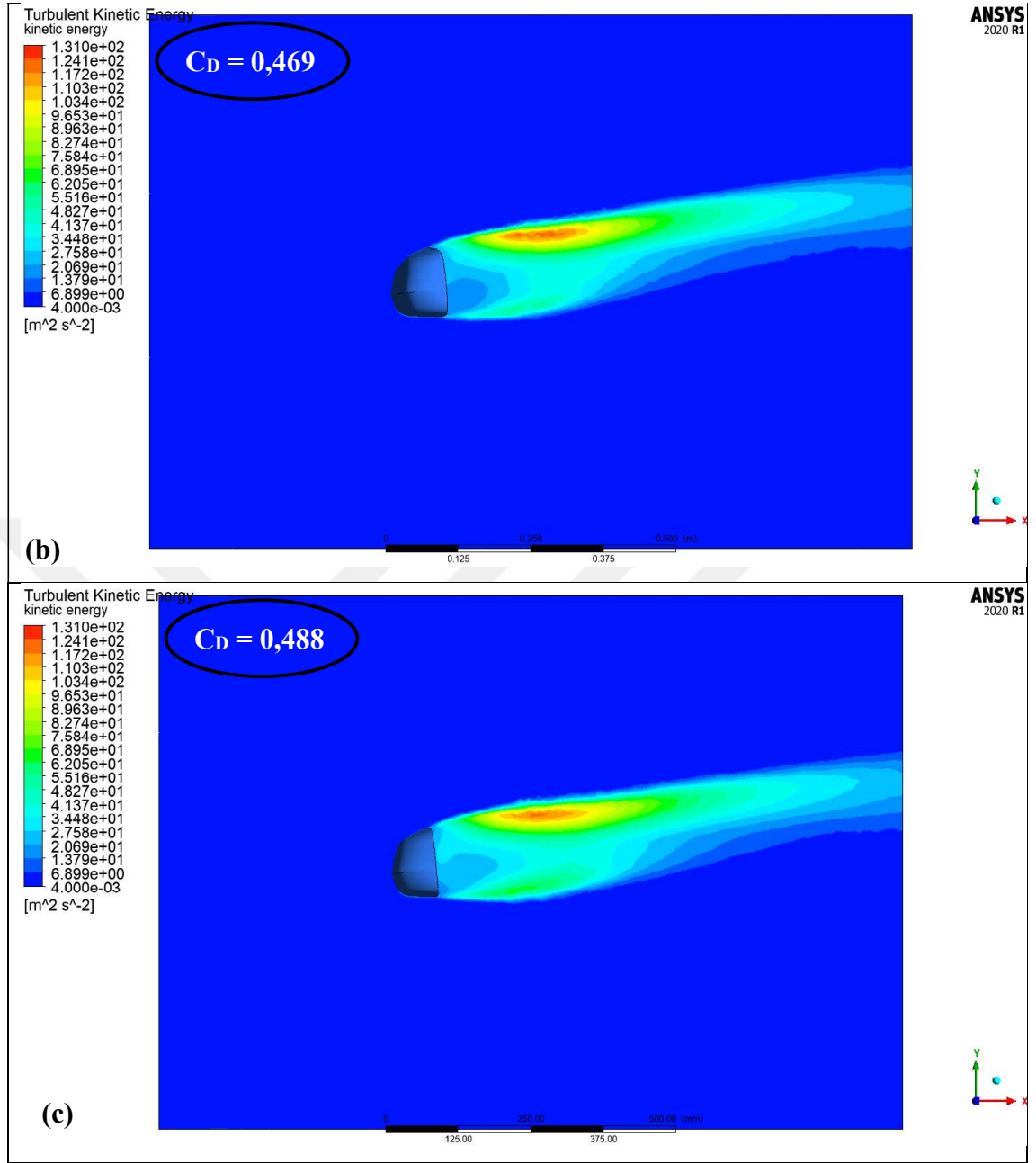
V (m/s) β (°)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (m^2/s^2)	57,86	53,38	53,96	130,18	121,2	121,17	232,8	217,5	215,16
Min (m^2/s^2)	0,0045	0,0045	0,0048	0,0048	0,0048	0,005	0,0049	0,0047	0,005



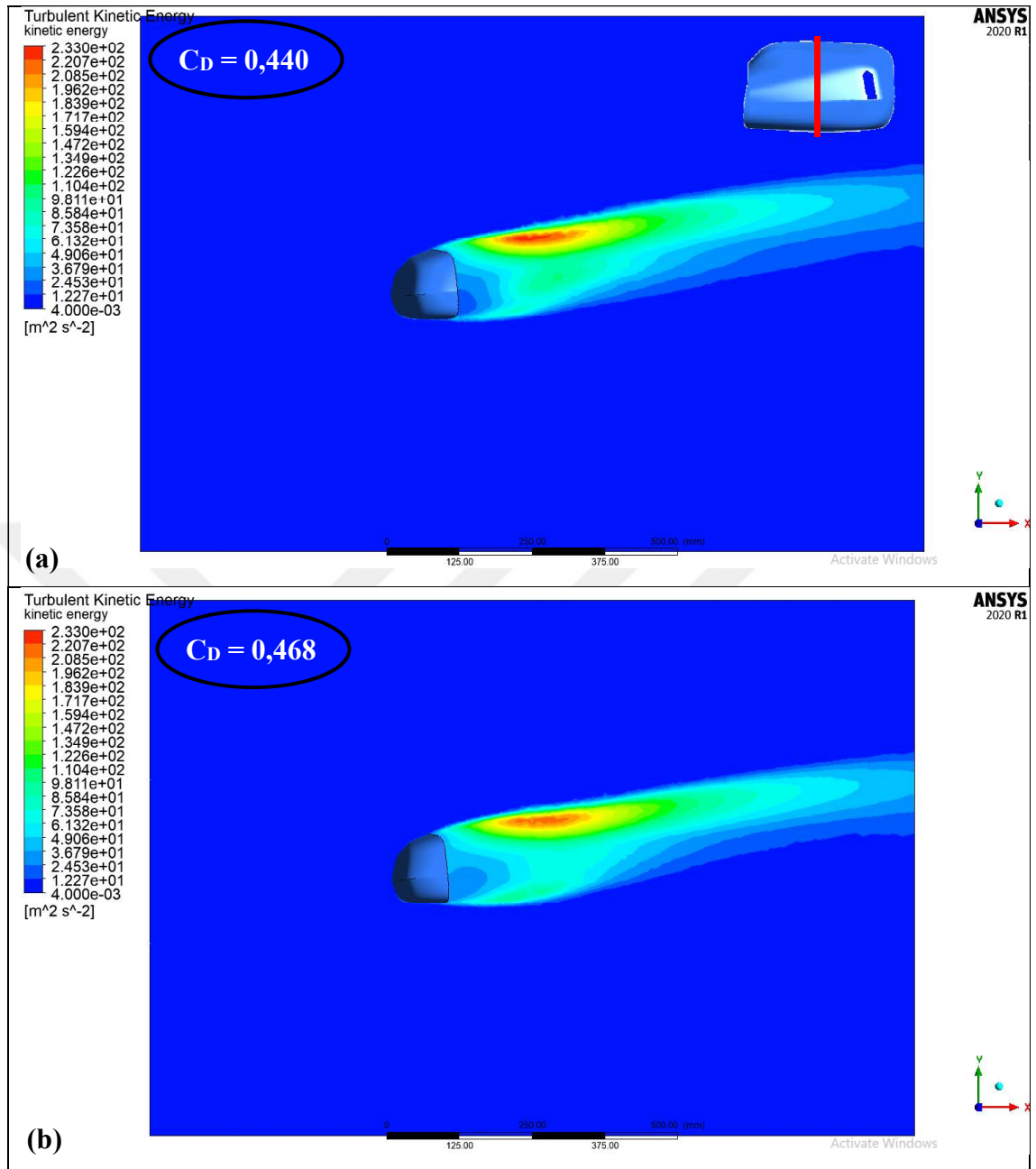


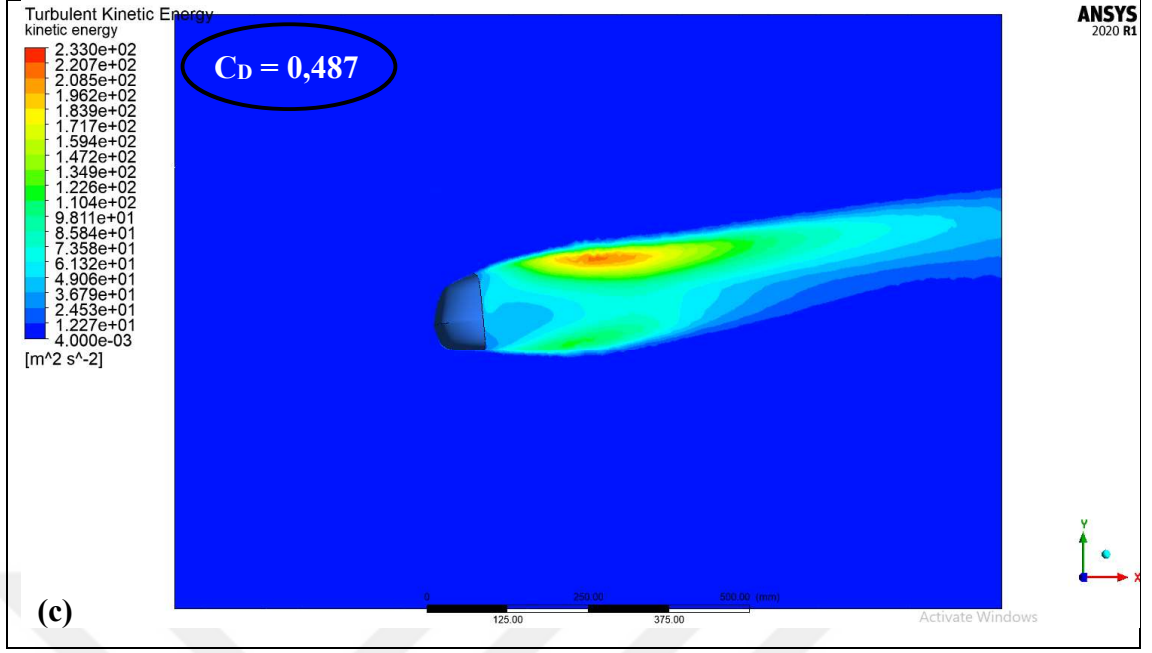
Şekil 4.64. 20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





Şekil 4.65. 30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.66. 40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

4.5. Model 4 – Hız ve Sapma Açısı Etkisi

$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan hız vektörleri Şekil 4.67 – 4.69’da verilmiştir. Tüm sapma açıları ve hızlarda ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum hız değerleri Çizelge 4.16’da sunulmuştur. Ayna orta bölgesinde alınan düzlem üzerinde minimum hızlar aynanın sırt kısmında, maksimum hızlar ise aynanın alt ve üst kenarlarında oluşmuştur. Ayna arkasında ayna kenarlarında ayrılan akışkanın oluşturduğu vorteksler görülmektedir. Özellikle -10° sapma açısında daha geniş ve yoğun bir vorteks bölgesi oluşmuştur.

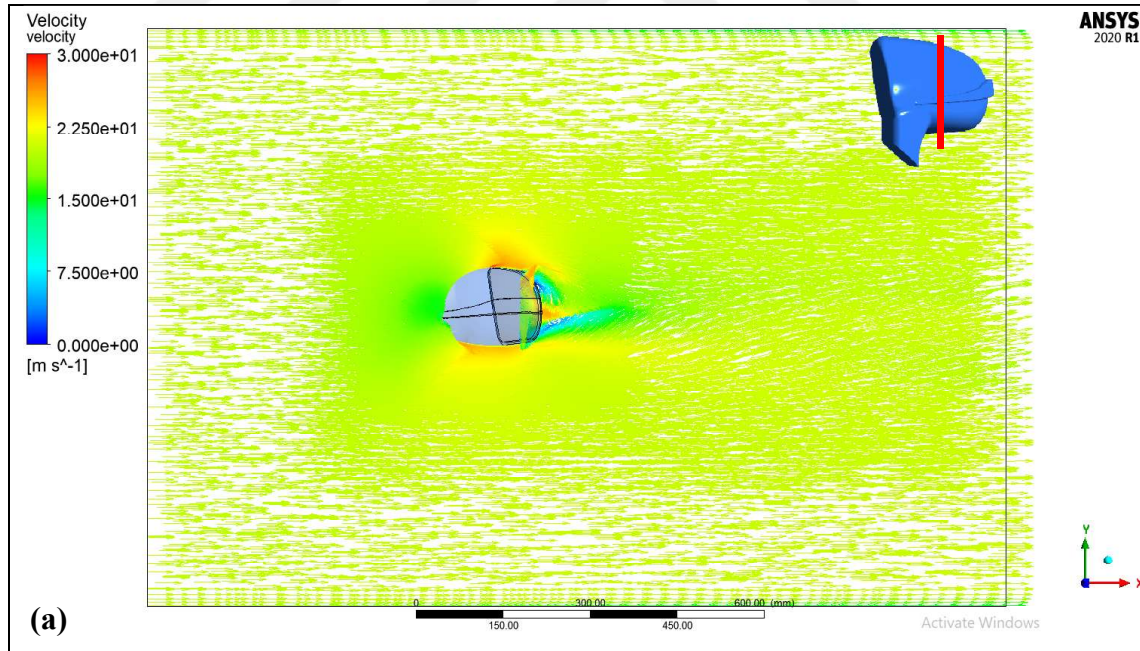
Ayrıca ayna orta bölgesi yerine aynanın kol kısmını içeren bölgeden alınan düzlemde oluşan hız vektörleri Şekil 4.70 – 4.72’de gösterilmiştir. Bu düzlemde oluşan maksimum hız değerleri ise Çizelge 4.17’de sunulmuştur. Kol bölgesinden alınan düzlemlerde yüksek hızlara aynanın üst kısmında rastlanmıştır.

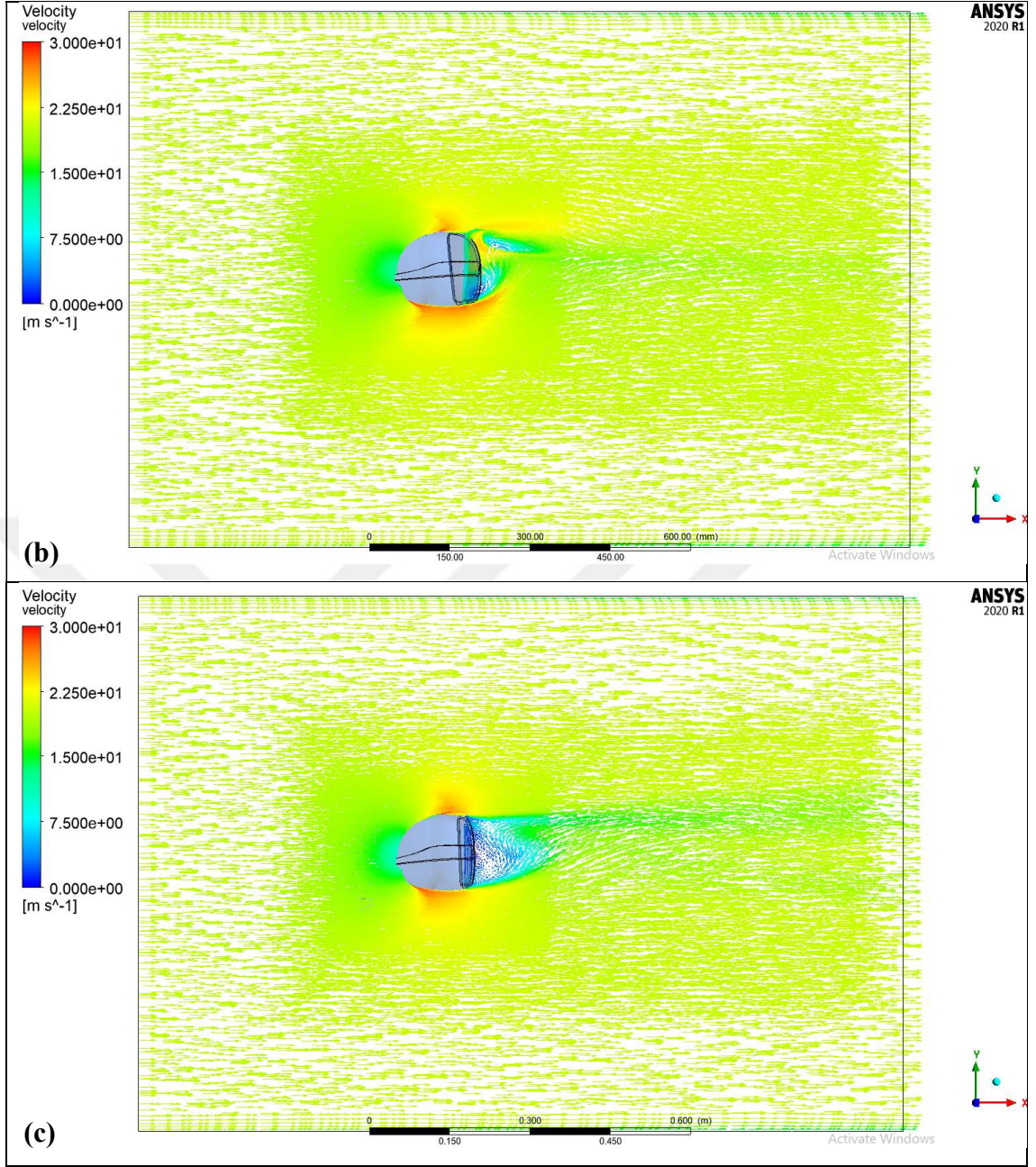
Çizelge 4.16. Tüm sapma açıları ve hızlarda ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum hız değerleri

Hız (m/s)	20			30			40		
β (°)	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (m/s)	28,75	28,71	29,64	43,63	44,29	45,33	58,61	59,51	60,78
Min (m/s)	0								

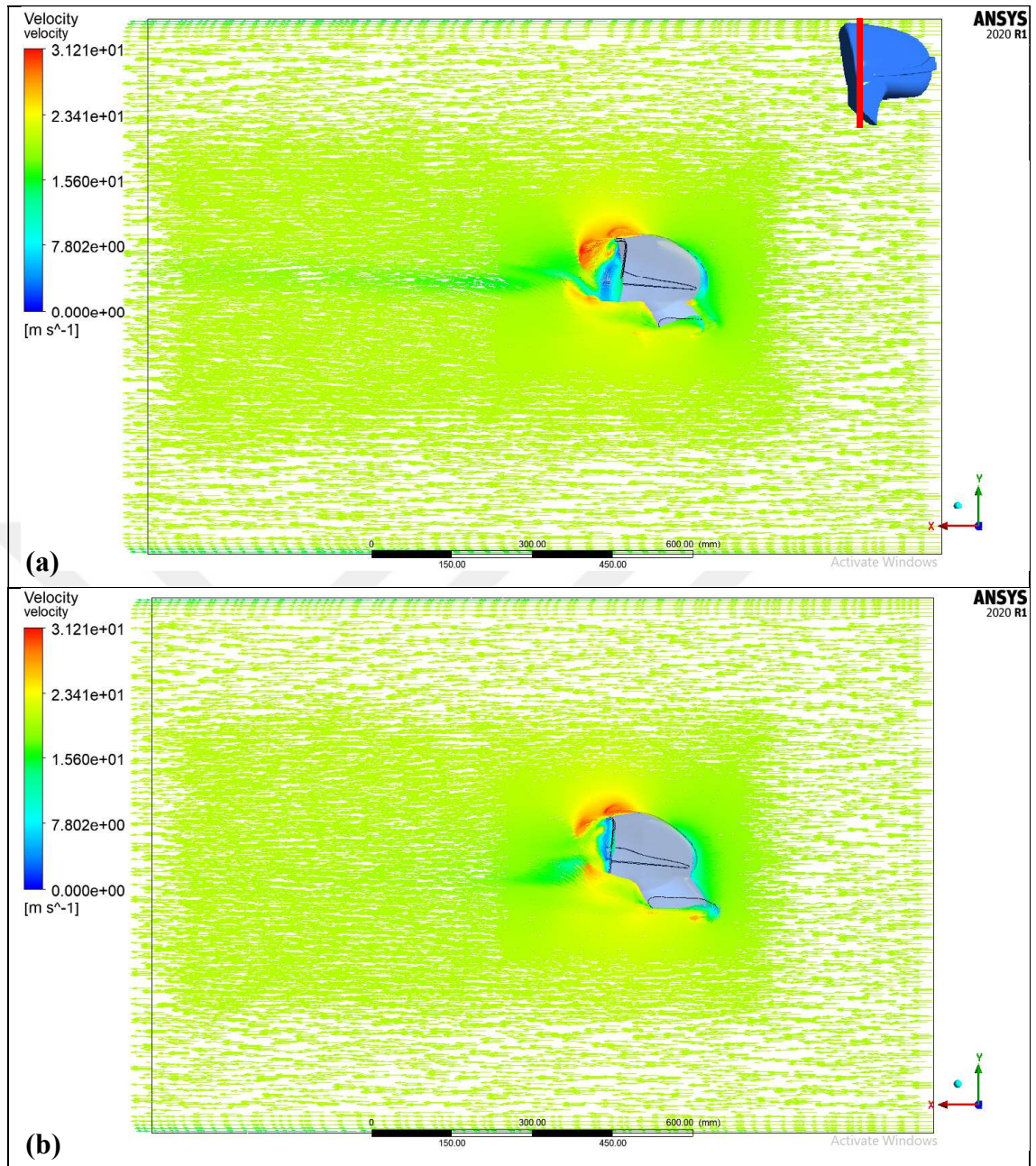
Çizelge 4.17. Tüm sapma açıları ve hızlarda aynanın kol kısmını içeren bölgeden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum hız değerleri

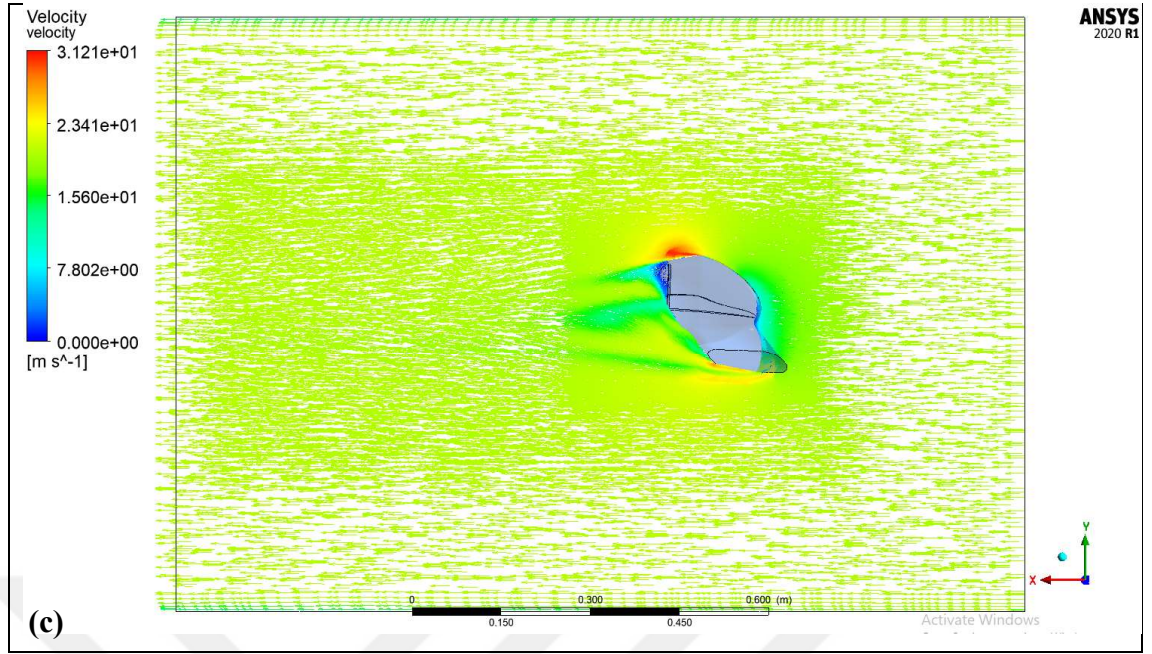
Hız (m/s)	20			30			40		
β (°)	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (m/s)	31,21	30,67	30,42	47,2	47,5	46,78	63,48	63,62	62,94
Min (m/s)	0								



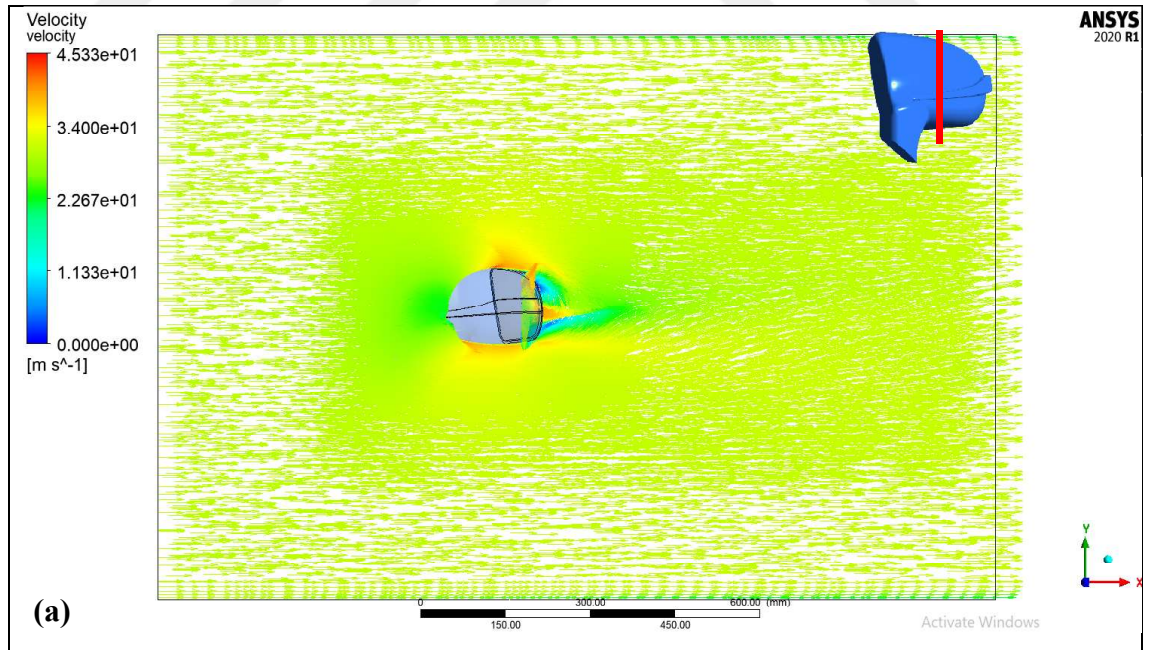


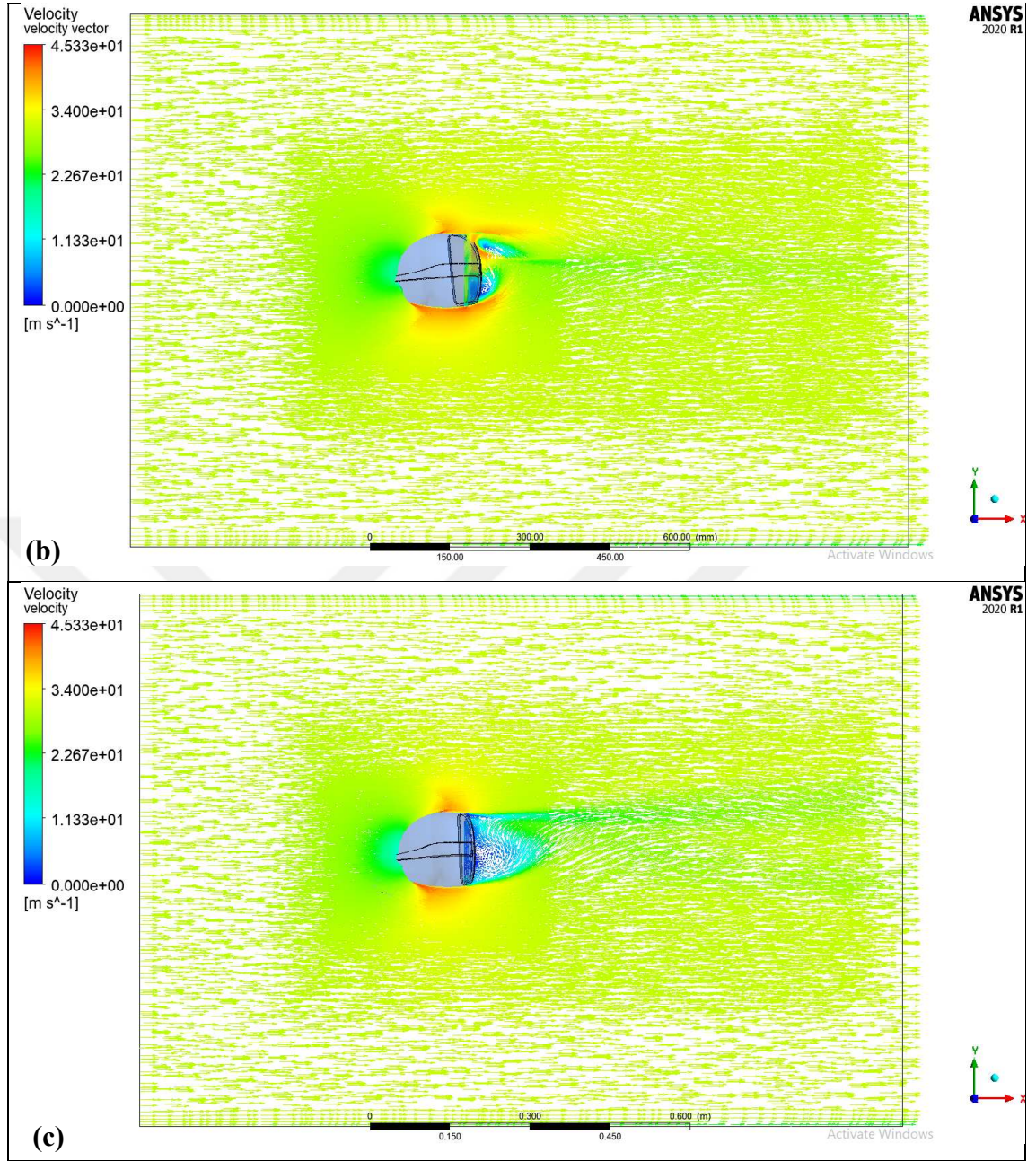
Şekil 4.67. 20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



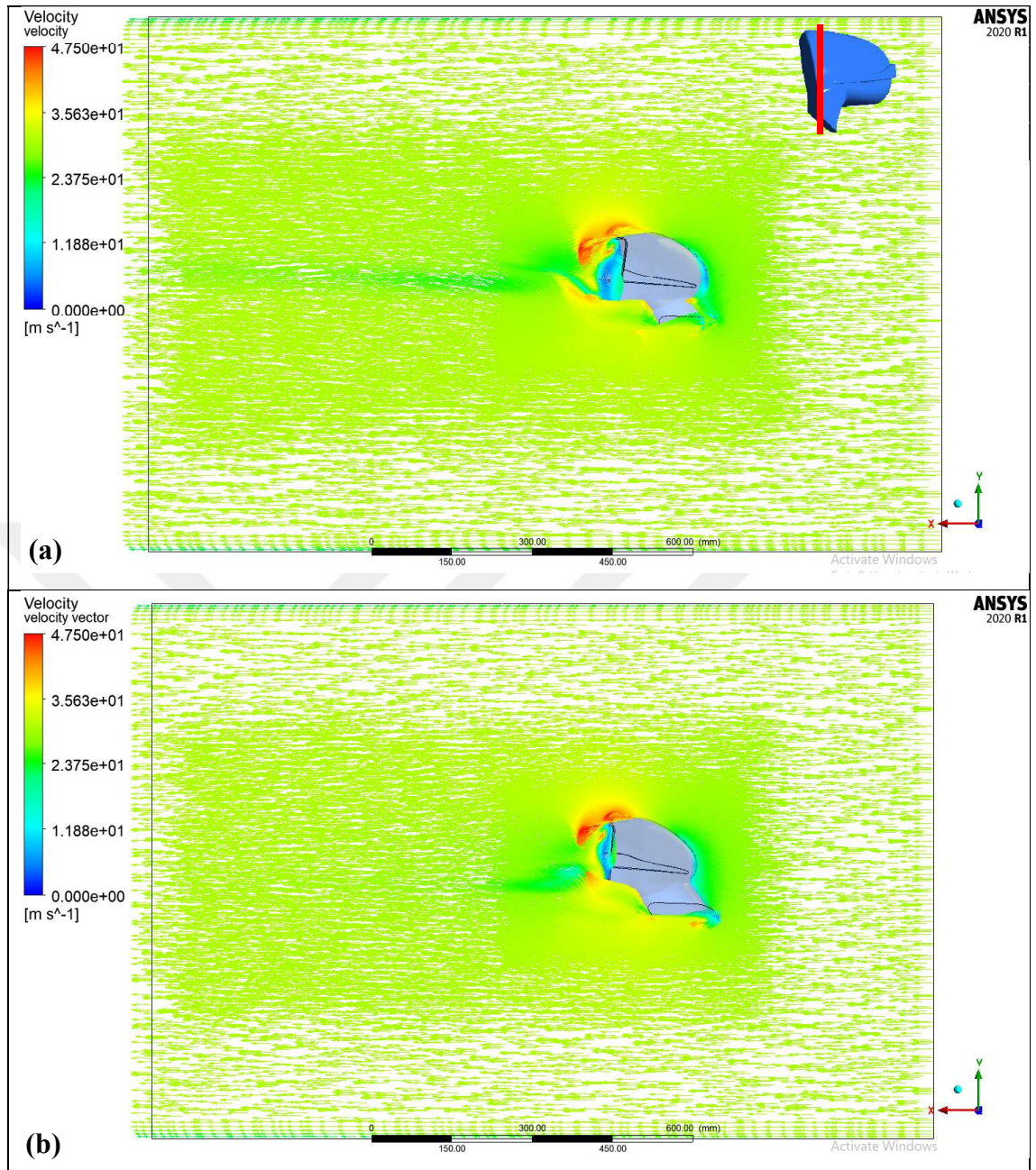


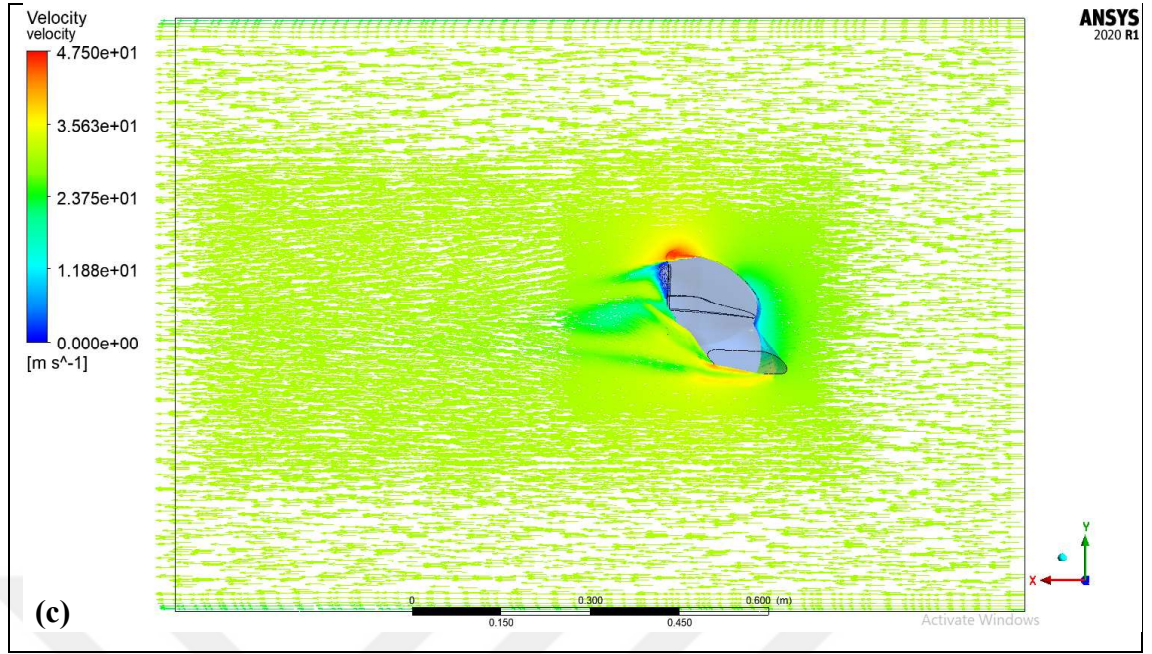
Şekil 4.68. 20 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı



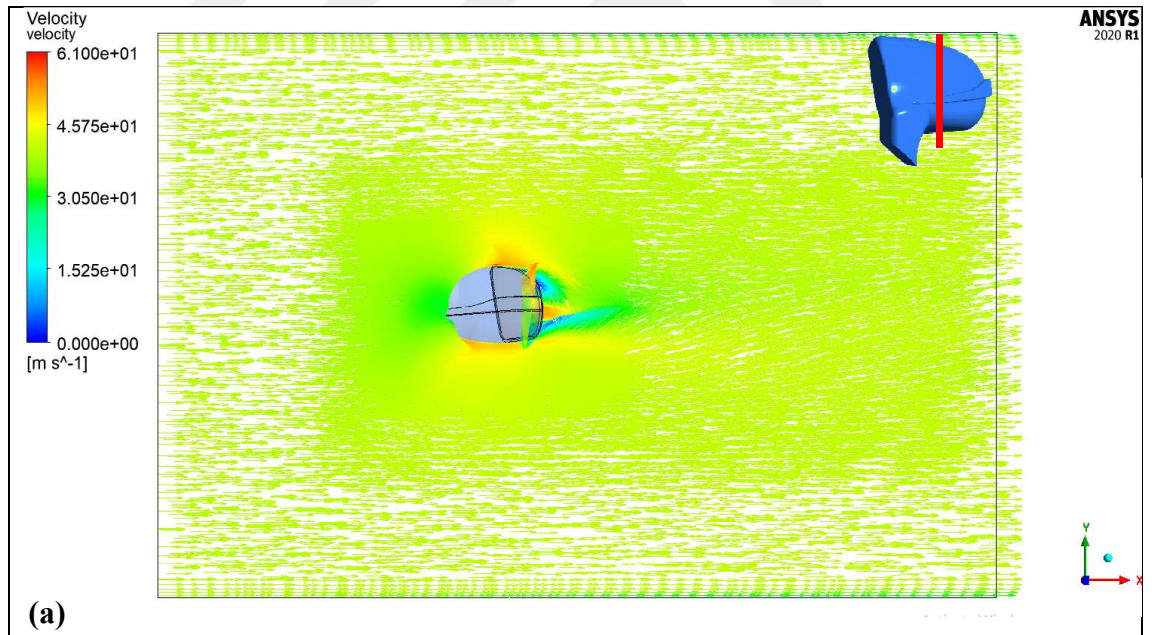


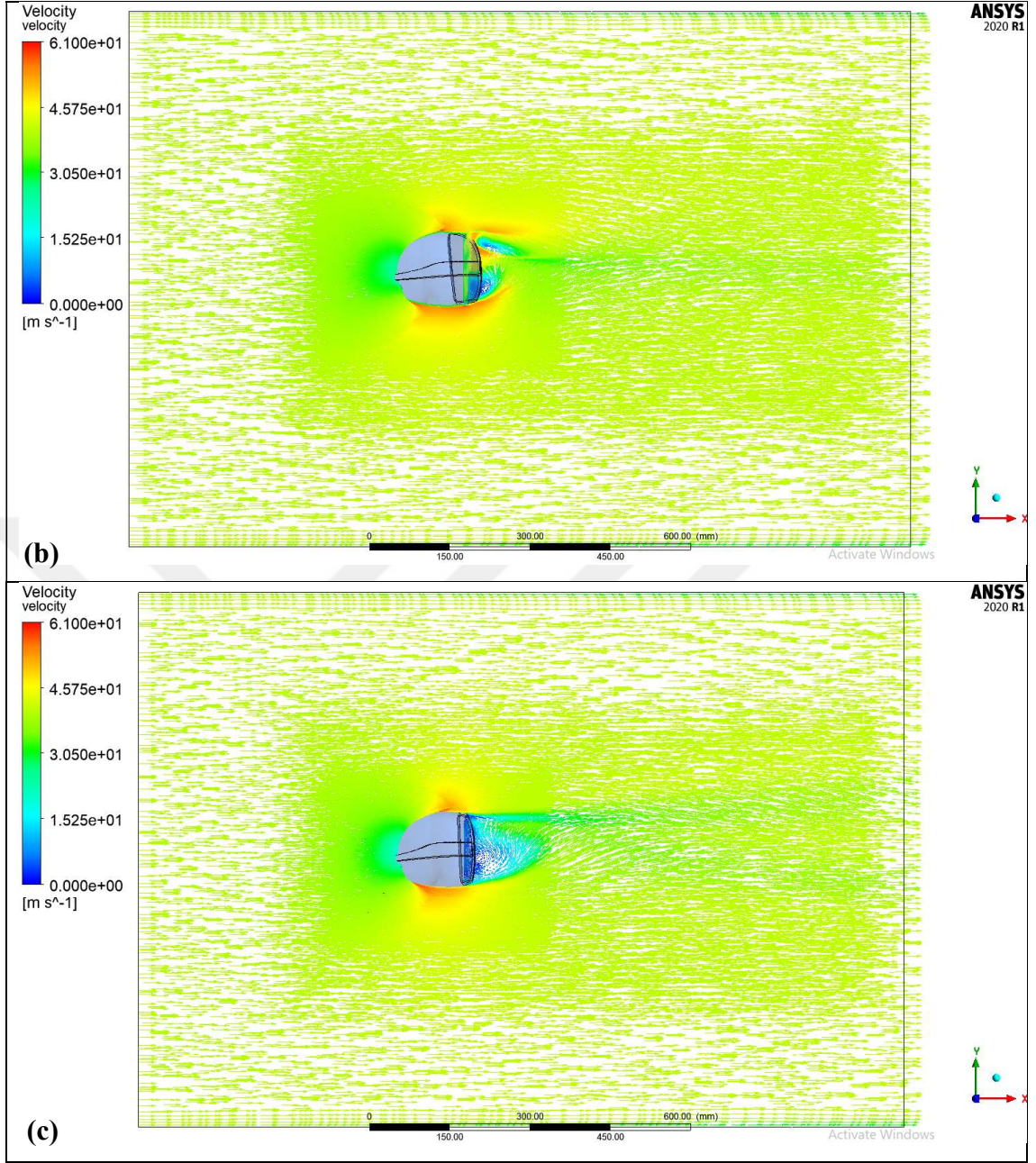
Şekil 4.69. 30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



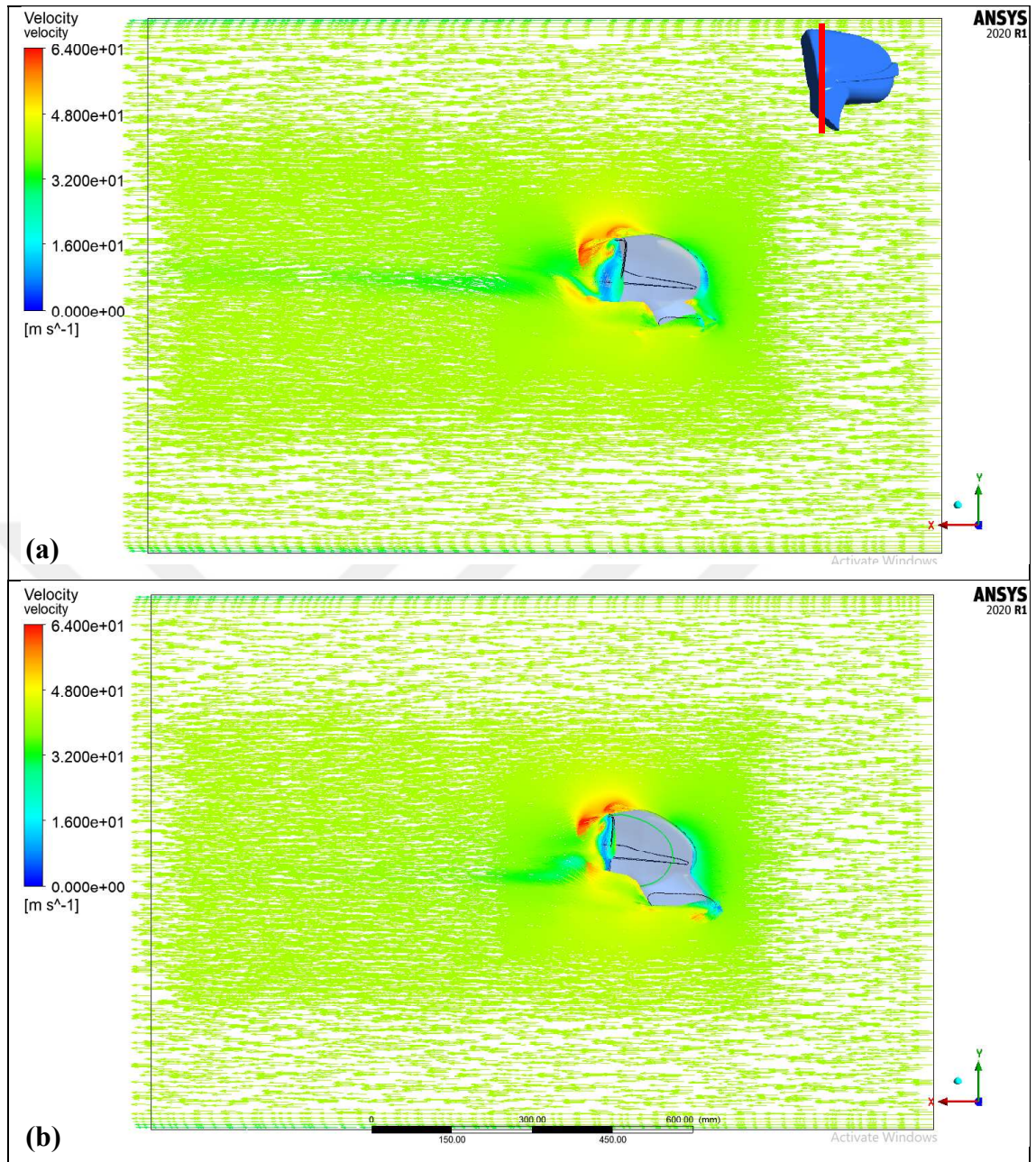


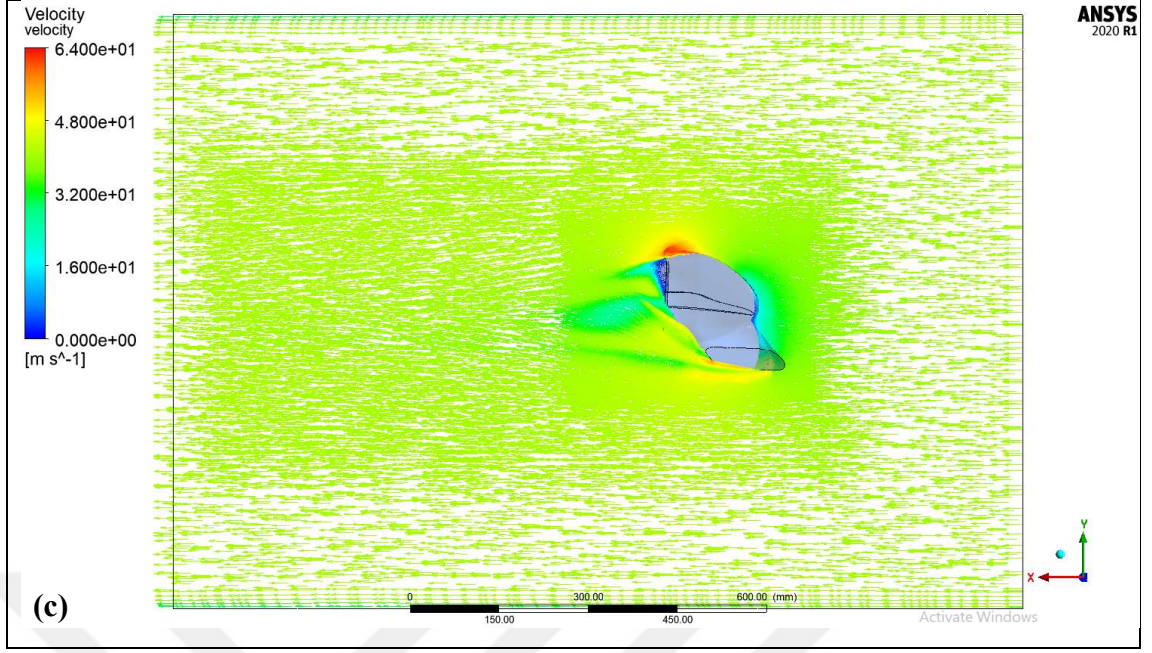
Şekil 4.70. 30 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) +10° sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.71. 40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı

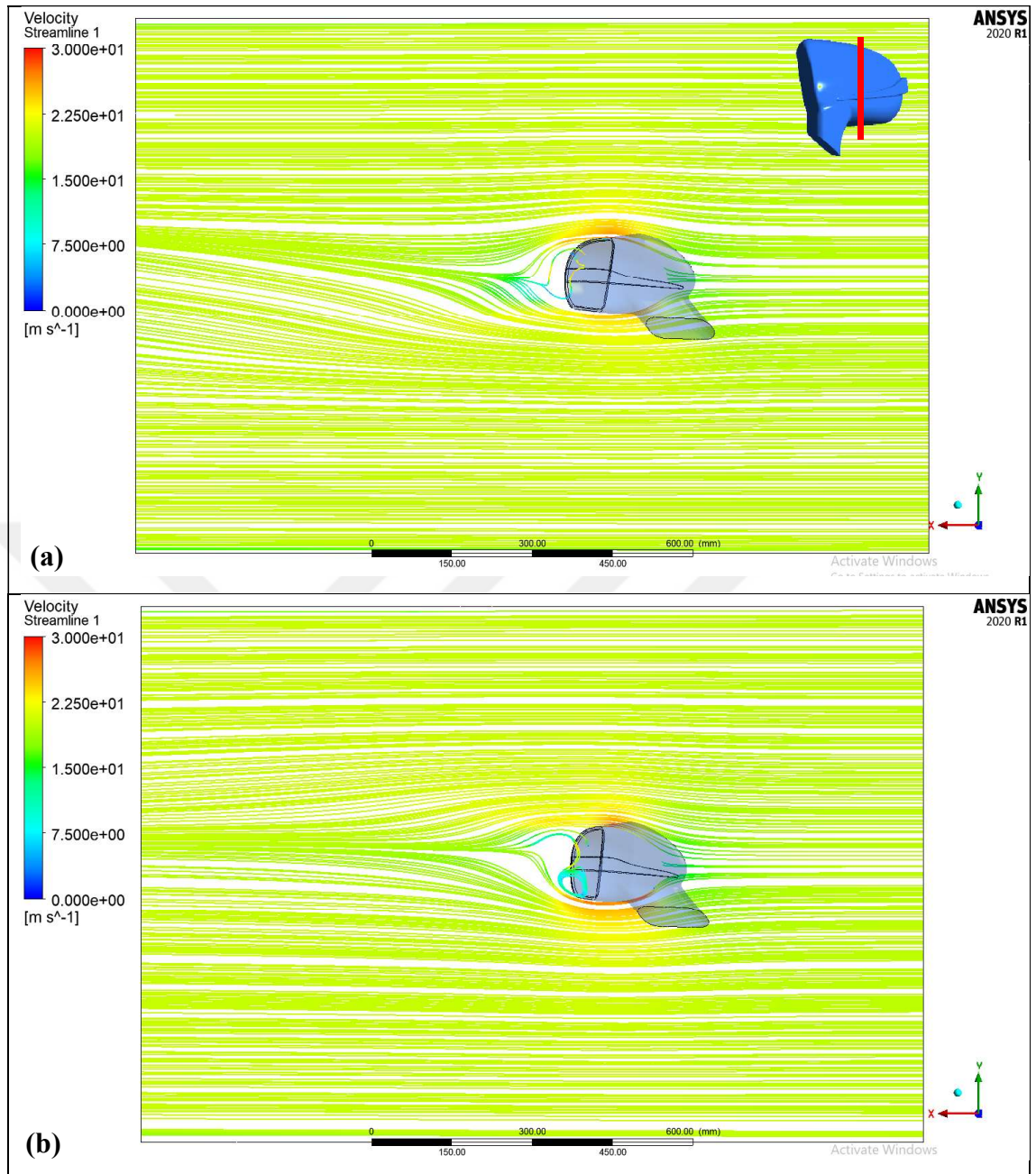


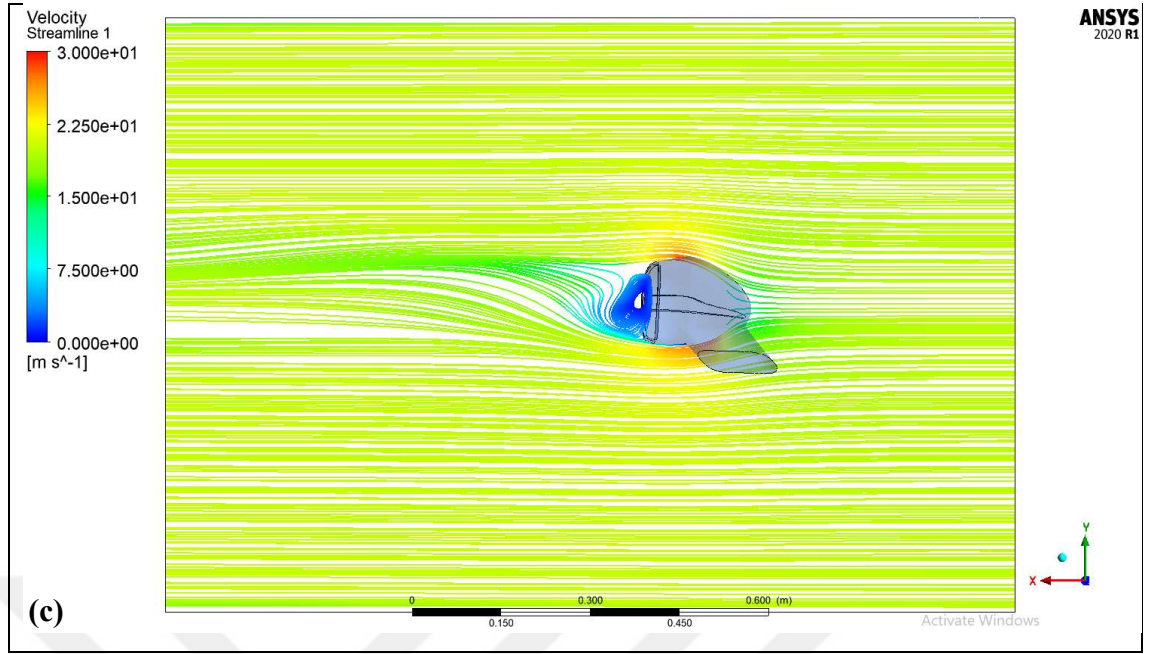


Şekil 4.72. 40 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

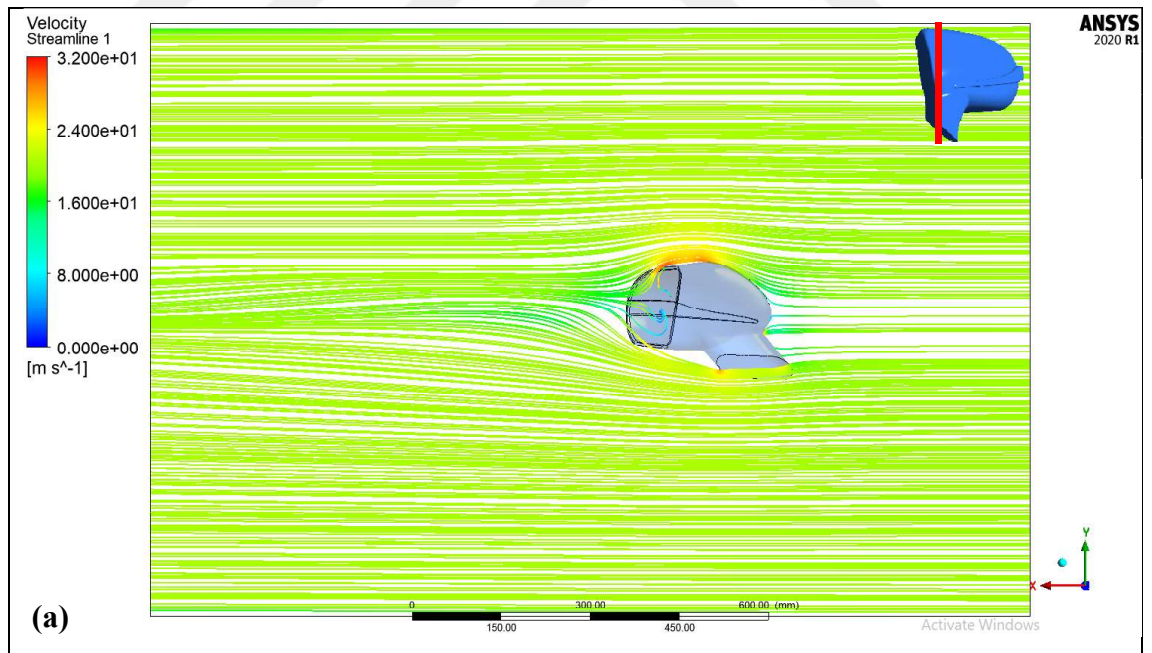
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden ve ayna kol bölgesinden geçen düzlem üzerinde oluşan akım çizgileri Şekil 4.73 – 4.75 – 4.77’de verilmiştir. Tüm hız ve açılarda aynanın üst ve alt kenarlarında akışın hızlandığı görülmüştür. +10° sapma açısında ayna arkasında akış birleşim mesafesinin daha kısa olduğu ve ayna arkasında akışın ortada birleştiği gözlenmiştir. 10° sapma açısından -10°’ye doğru ayna arkasında akış giderek daha üst kısımlarda birleşmeye başlamıştır. Ayrıca ayna arkasında arka alt kısımdaki vorteks bölgesi giderek daha geniş bir alanda görülmeye başlamıştır. -10° sapma açısında akış birleşmesi oldukça uzakta gerçekleşmiştir. Ayrıca ayna arkası alt kısımda oluşan vorteksin ayna arkasını tamamen kapladığı görülmüştür.

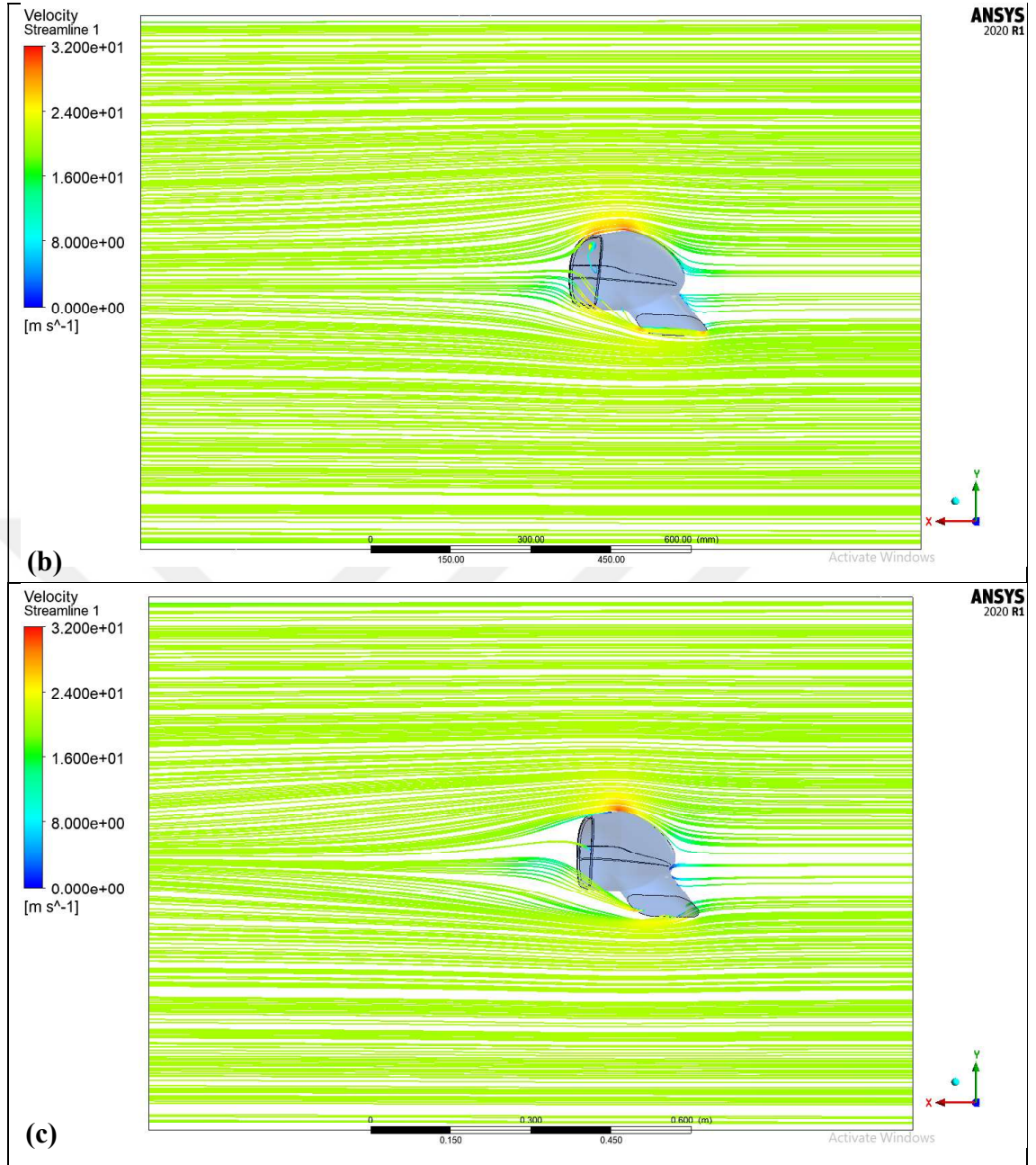
Ayrıca ayna orta bölgesi yerine aynanın kol kısmını içeren bölgeden alınan düzlemde oluşan akım çizgileri Şekil 4.74 - 4.76 – 4.78’de gösterilmiştir. Kol bölgesinin ardında geometriden dolayı akım çizgileri düzgün bir şekilde birleşmiş ve vorteks oluşumu neredeyse gözlenmemiştir.



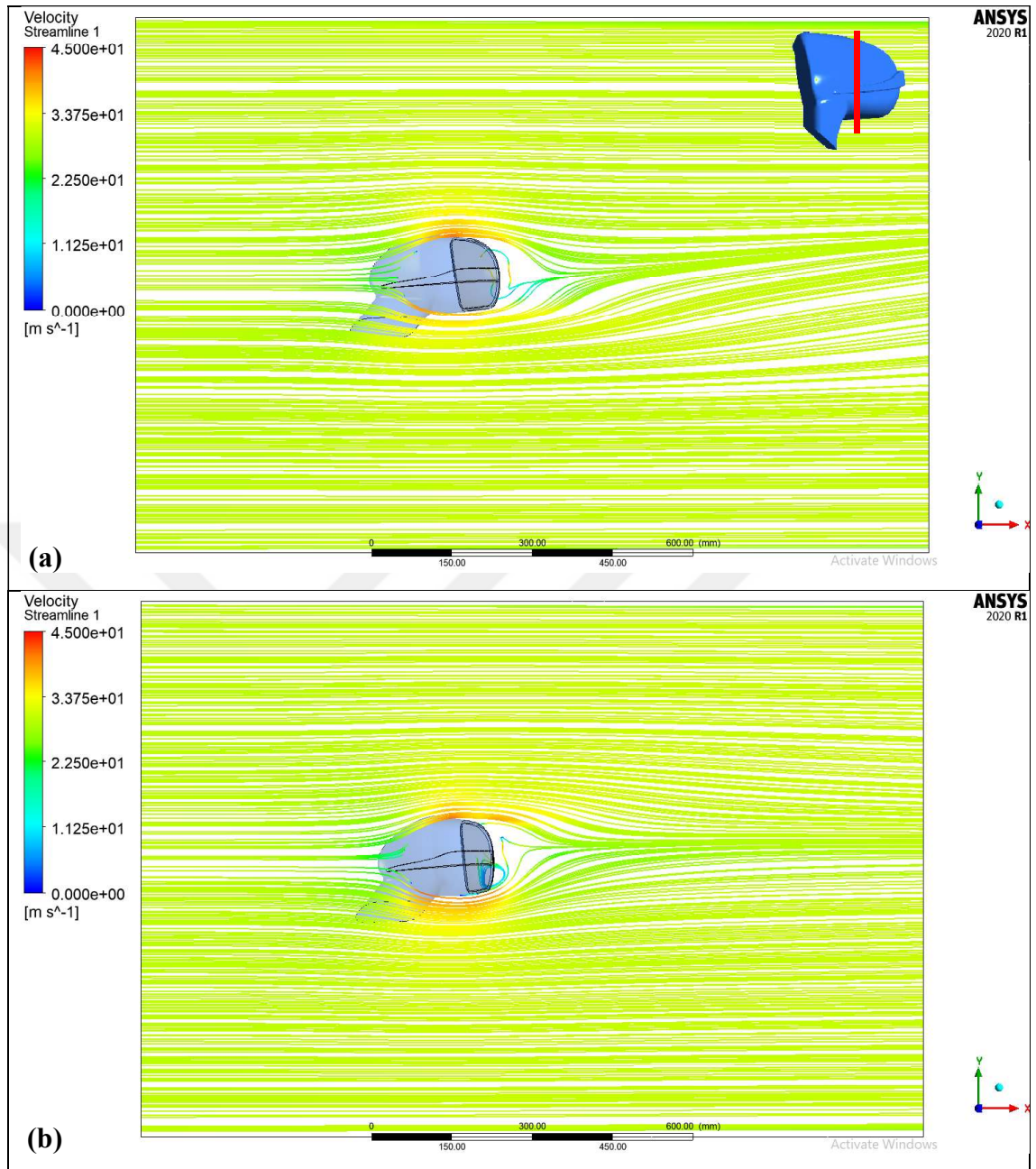


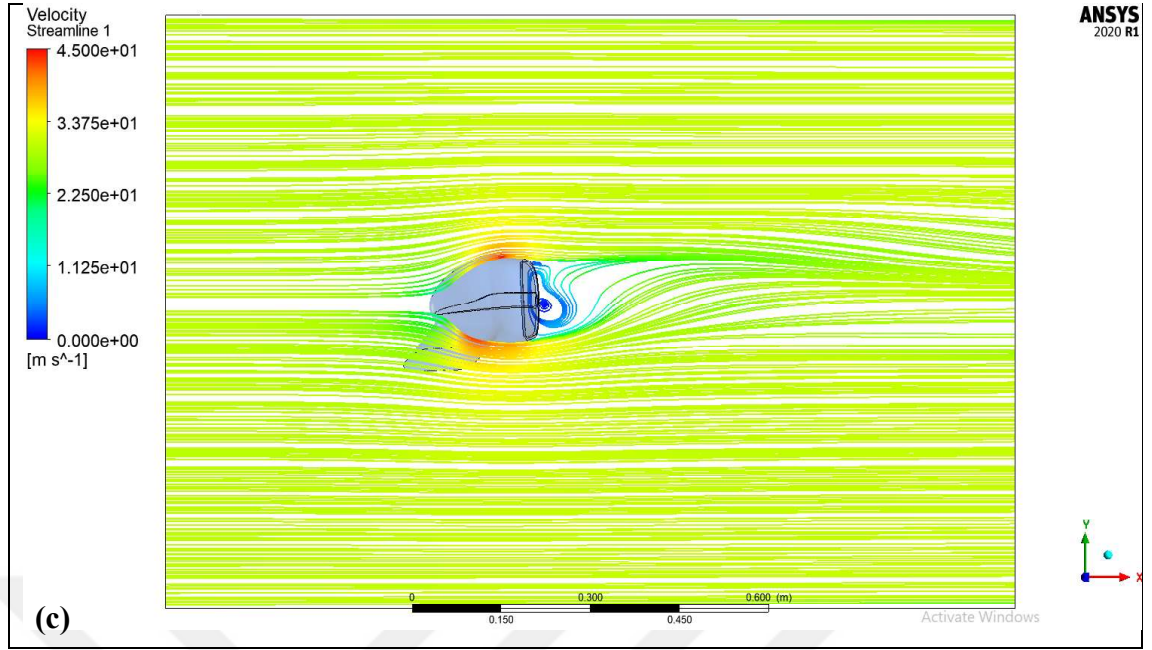
Şekil 4.73. 20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



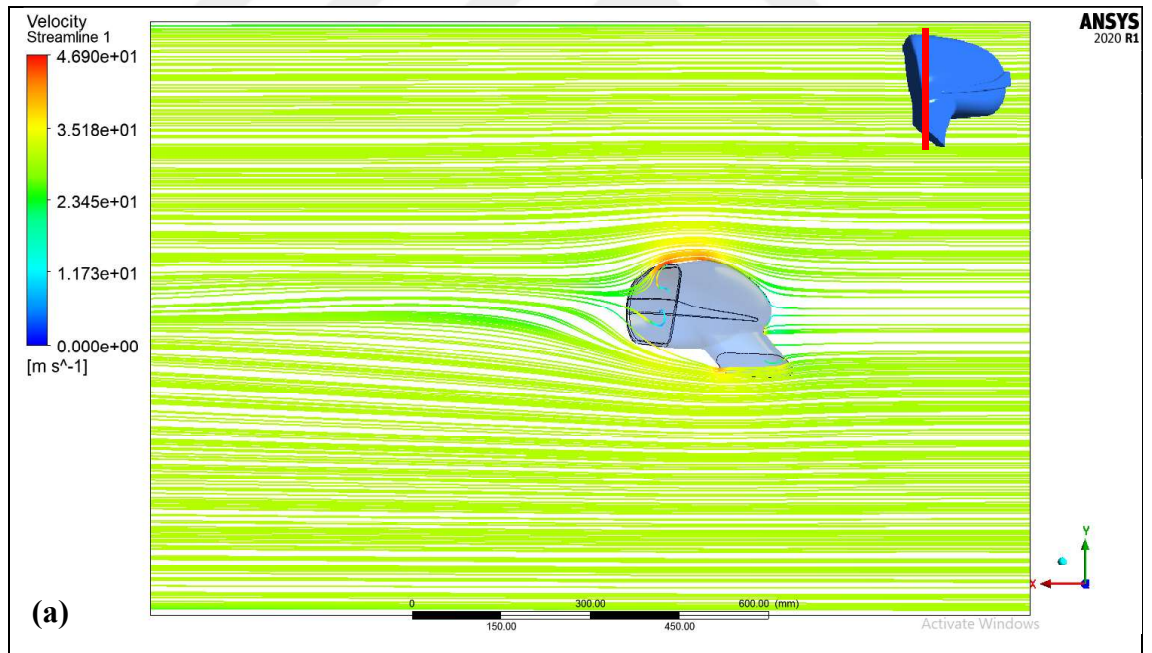


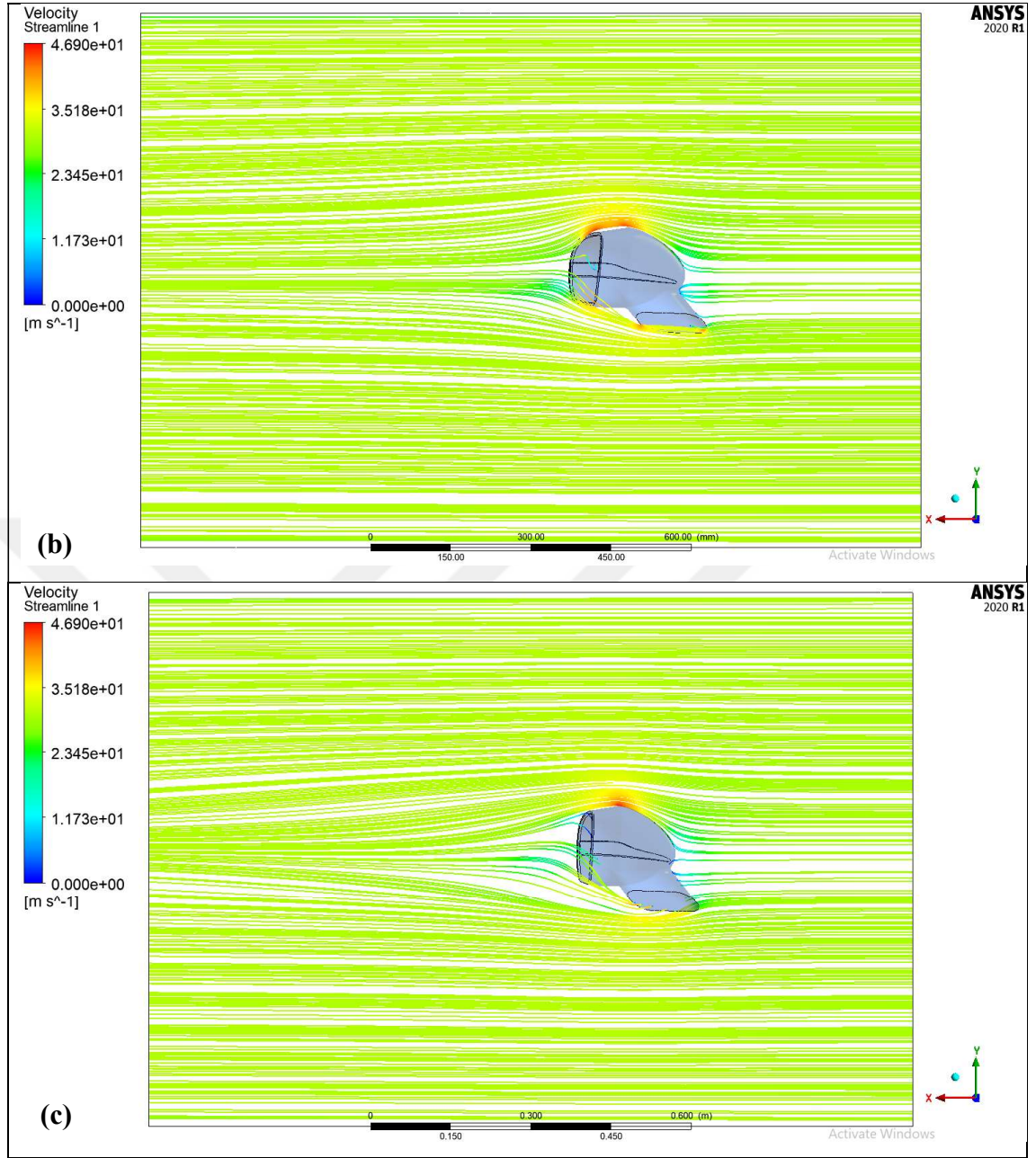
Şekil 4.74. 20 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



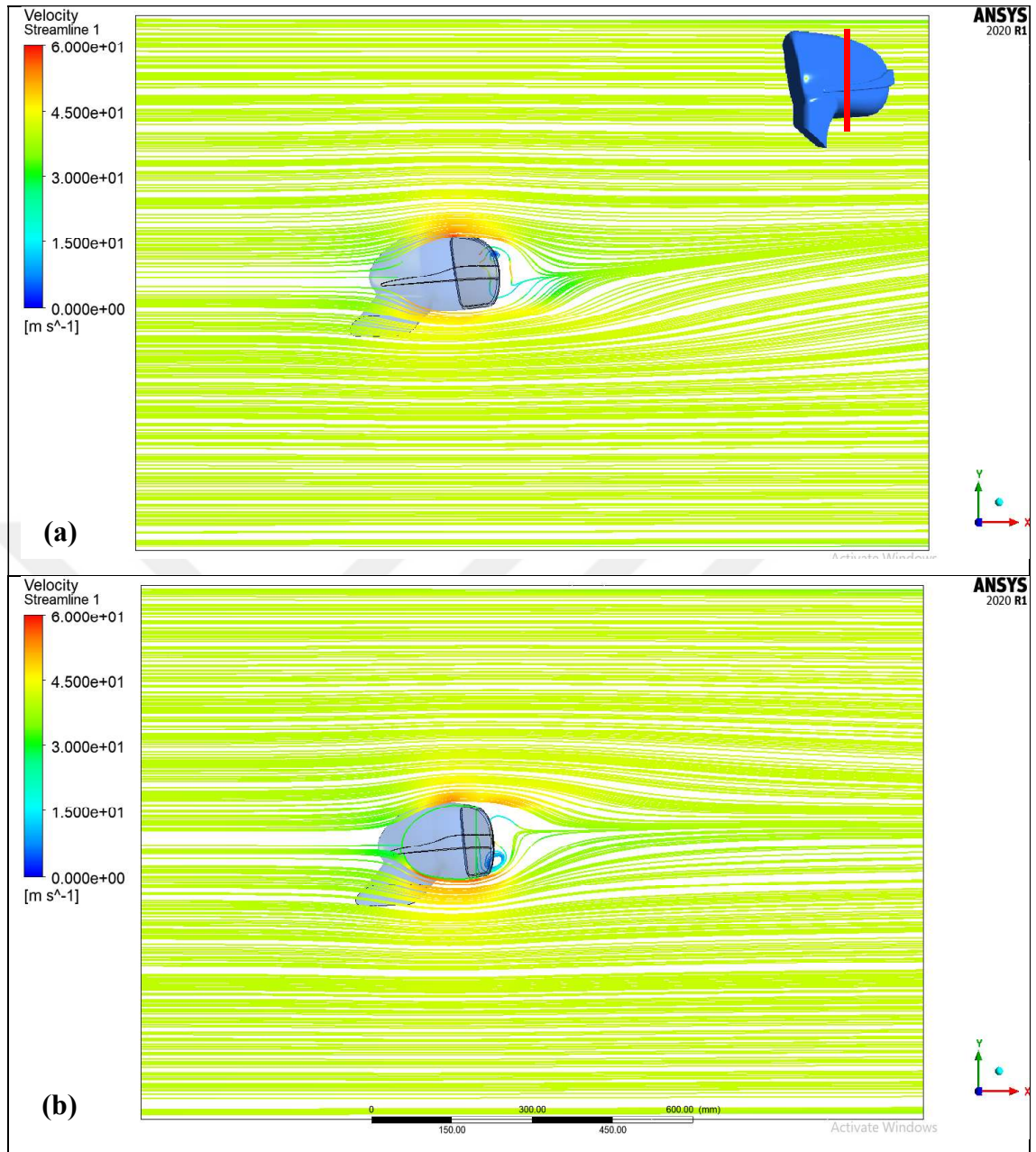


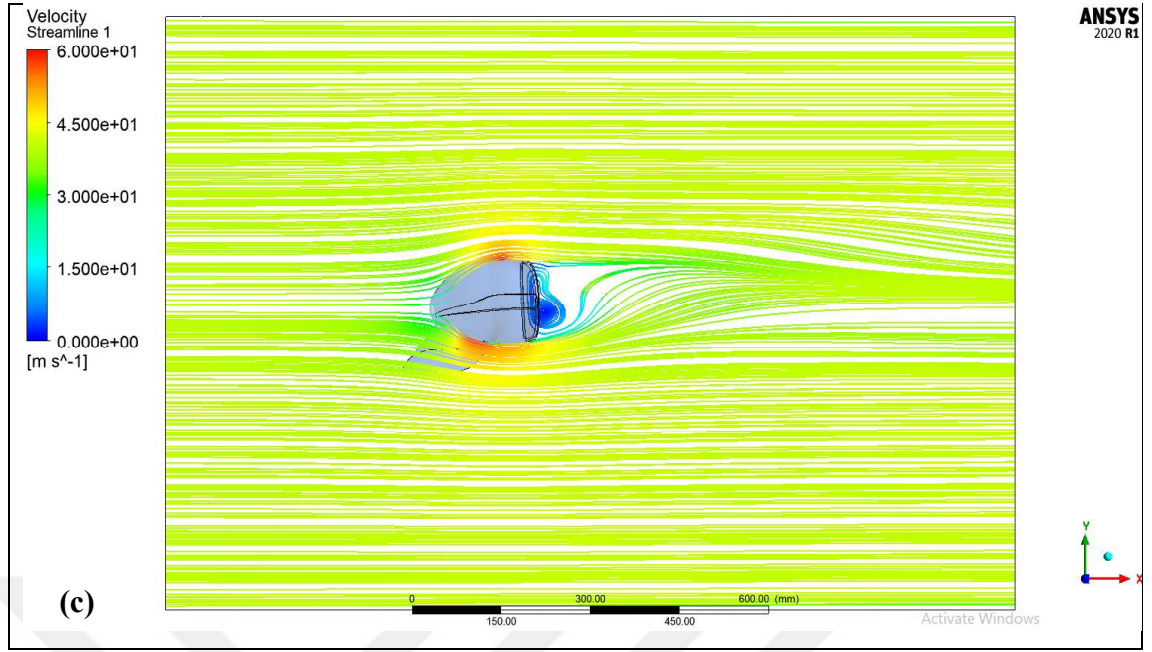
Şekil 4.75. 30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



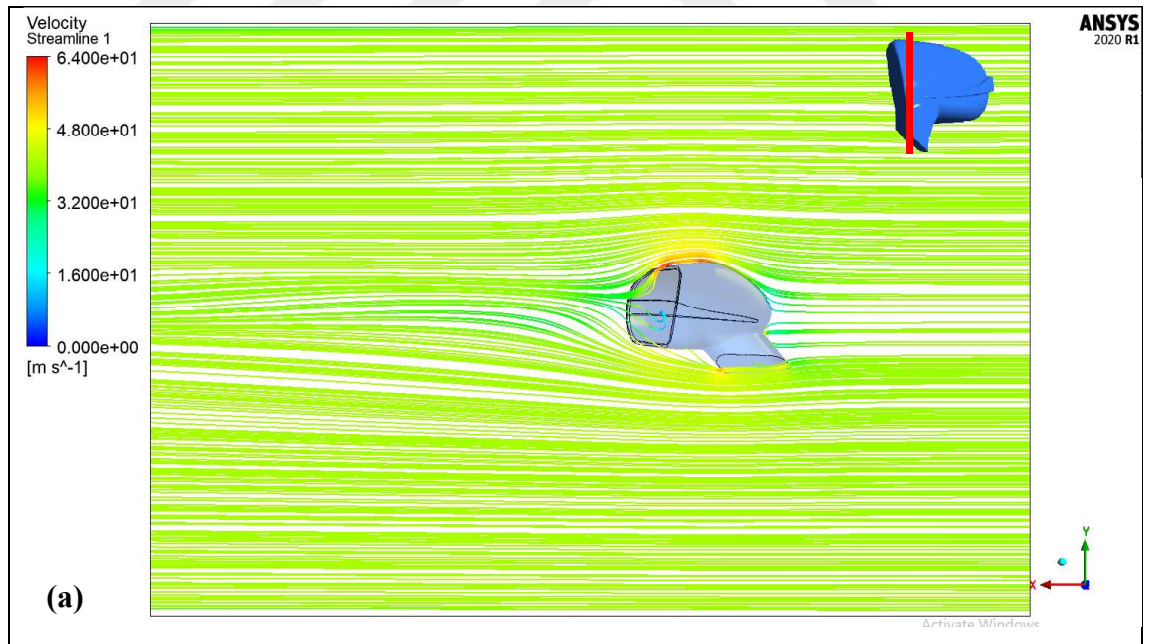


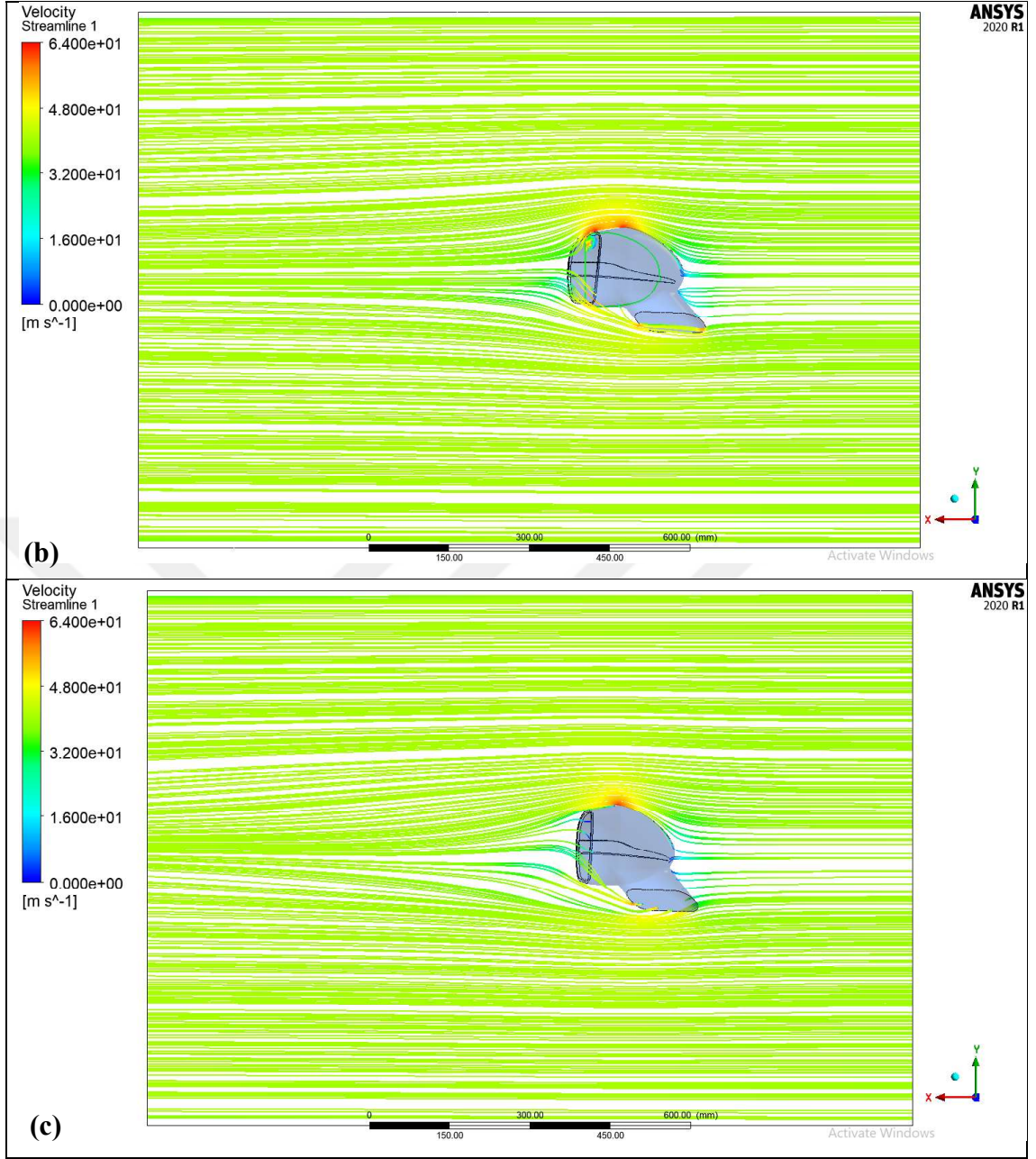
Şekil 4.76. 30 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.77. 40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





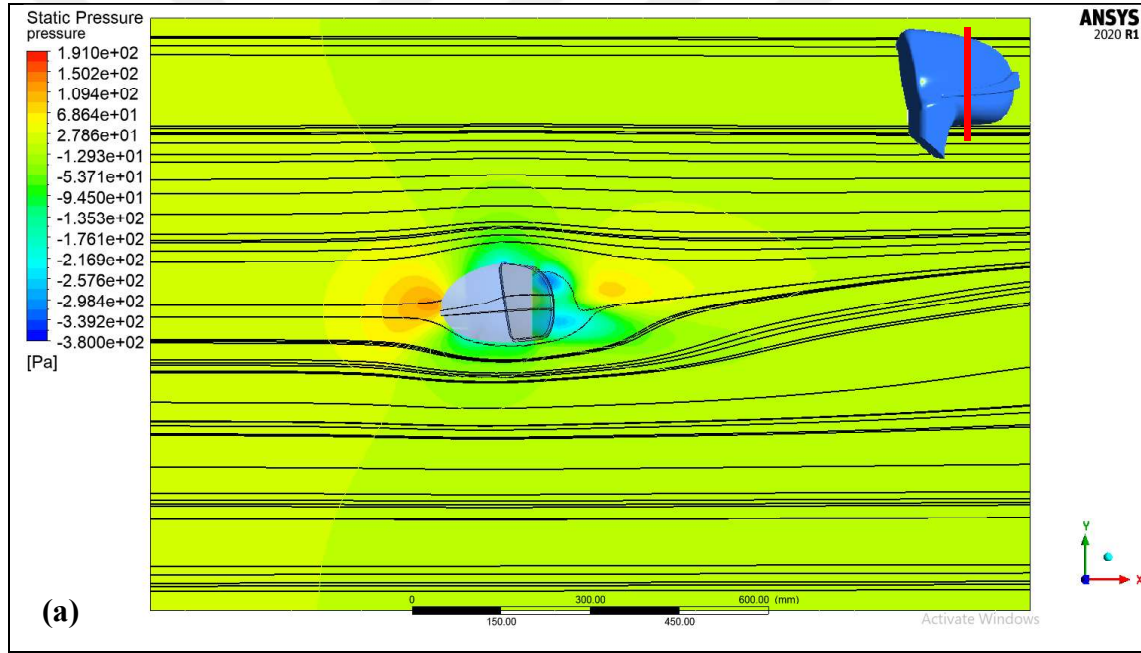
Şekil 4.78. 40 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

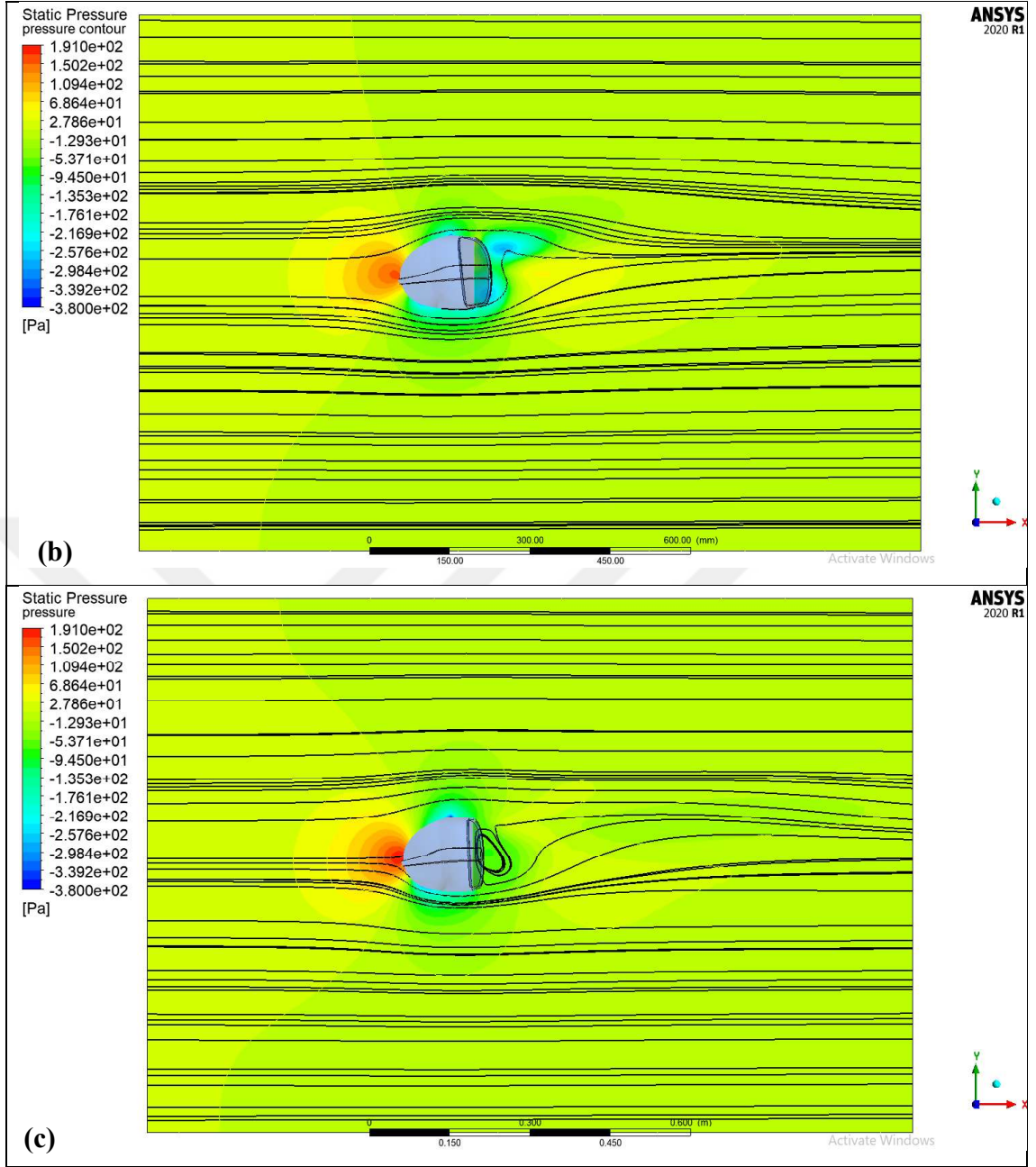
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden ve ardından ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç dağılımları Şekil 4.79 – 4.84’te verilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri Çizelge 4.18’de sunulmuştur. Havanın aynaya ilk çarptığı kısımlarda (ayna ön yüzeyinin orta kısmında) basıncın yüksek olduğu görülürken akışkan hızının arttığı ayna uç kısımlarında ve ayna

arkası vorteks bölgelerinde ise basıncın negatif olduğu görülmüştür. Akış birleşmesinin gerçekleştiği kısımlarda basınç değerinin bir miktar arttığı fark edilmiştir. Tüm hızlar için maksimum ve minimum basınç değerleri -10° sapma açısında görülmüştür.

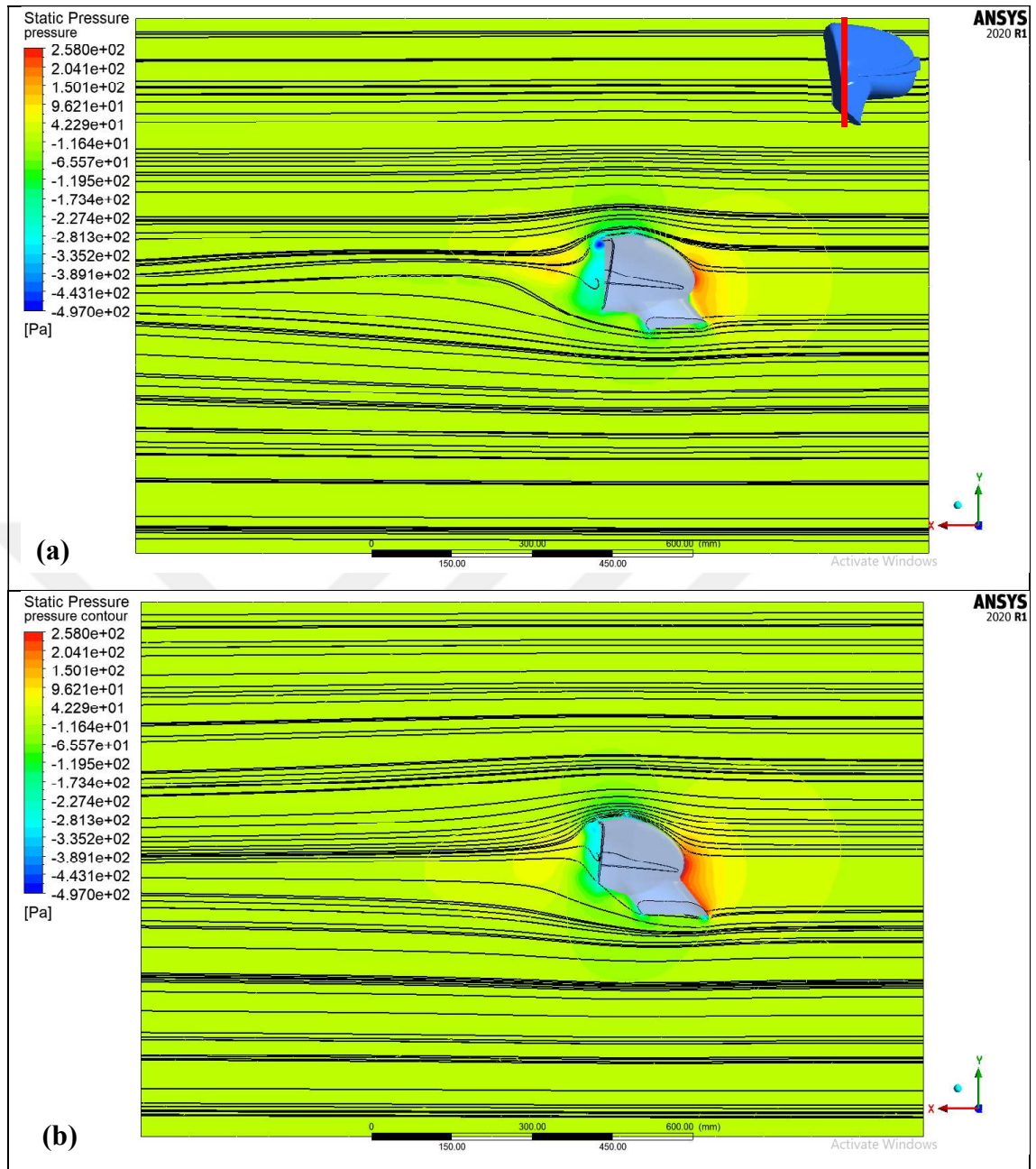
Çizelge 4.18. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna orta bölgesinden alınan düzlem üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri

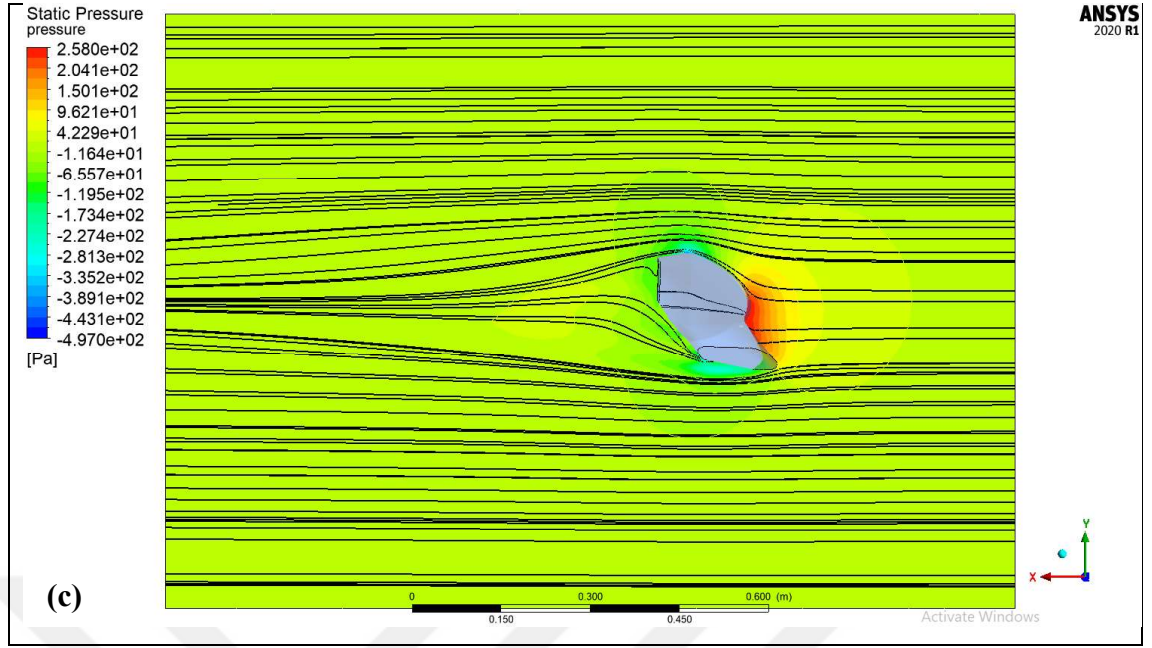
V (m/s) β ($^\circ$)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (Pa)	115,63	155,82	190,97	259,41	352,7	410,14	459,78	625,66	767,02
Min (Pa)	-315,05	-321,34	-379,98	-723,15	-772,46	-872,81	-1295,9	-1388	-1568,3



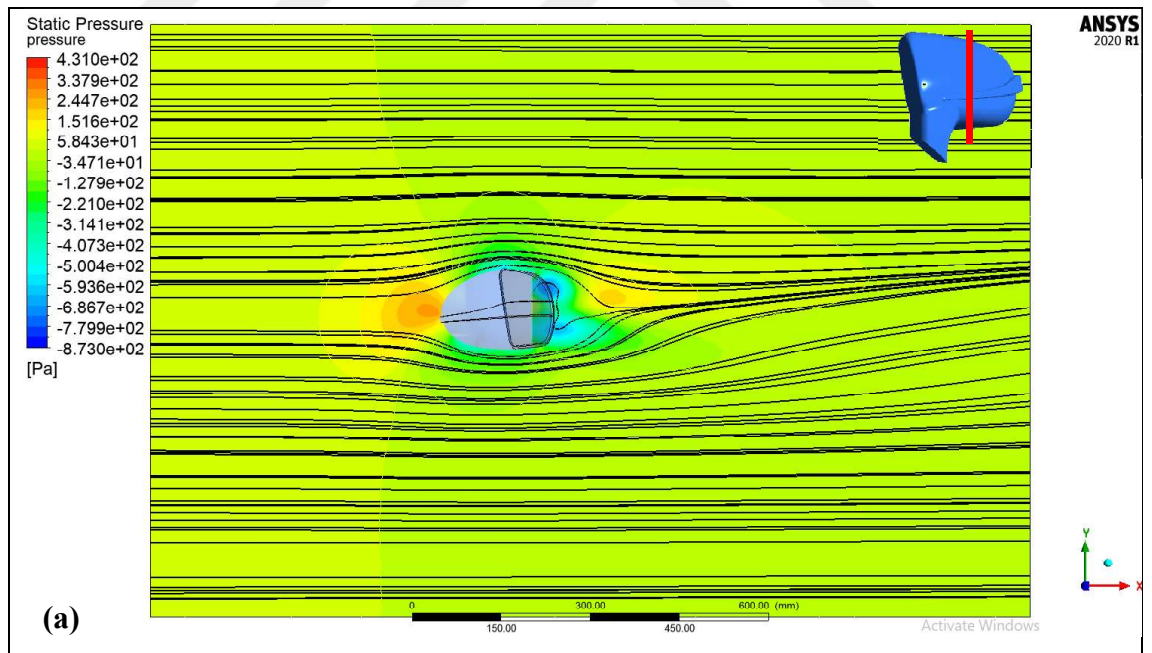


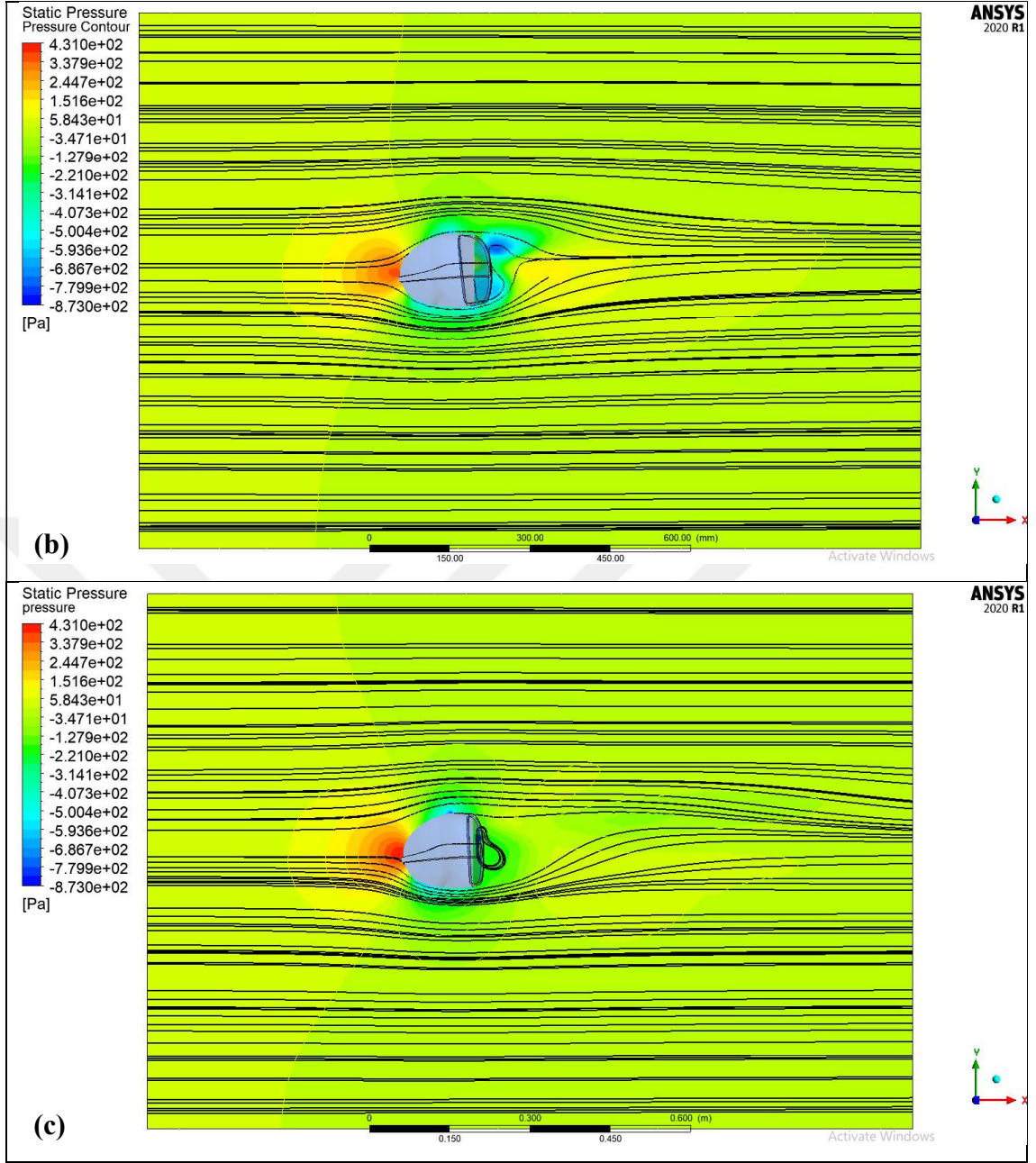
Şekil 4.79. 20 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı



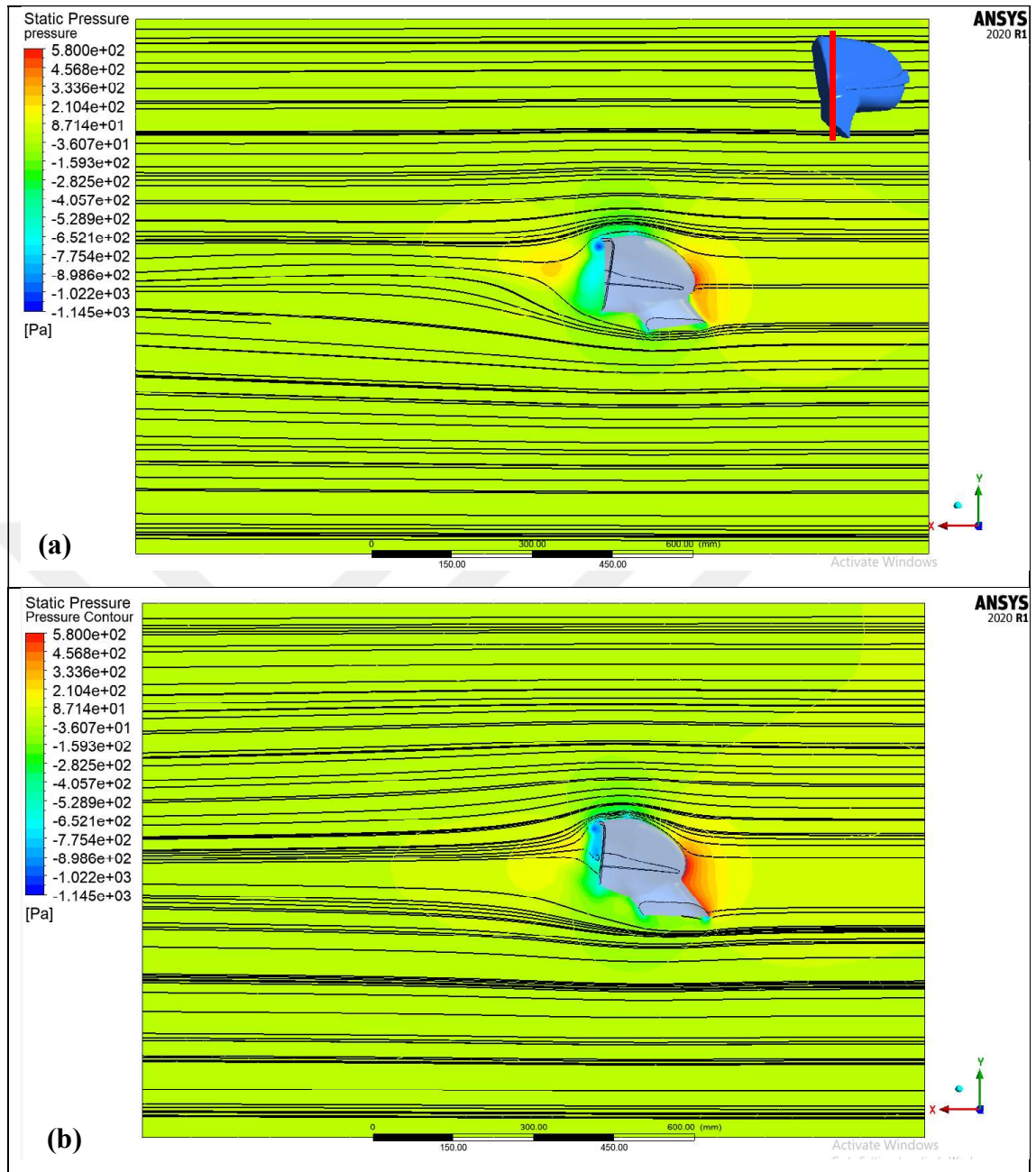


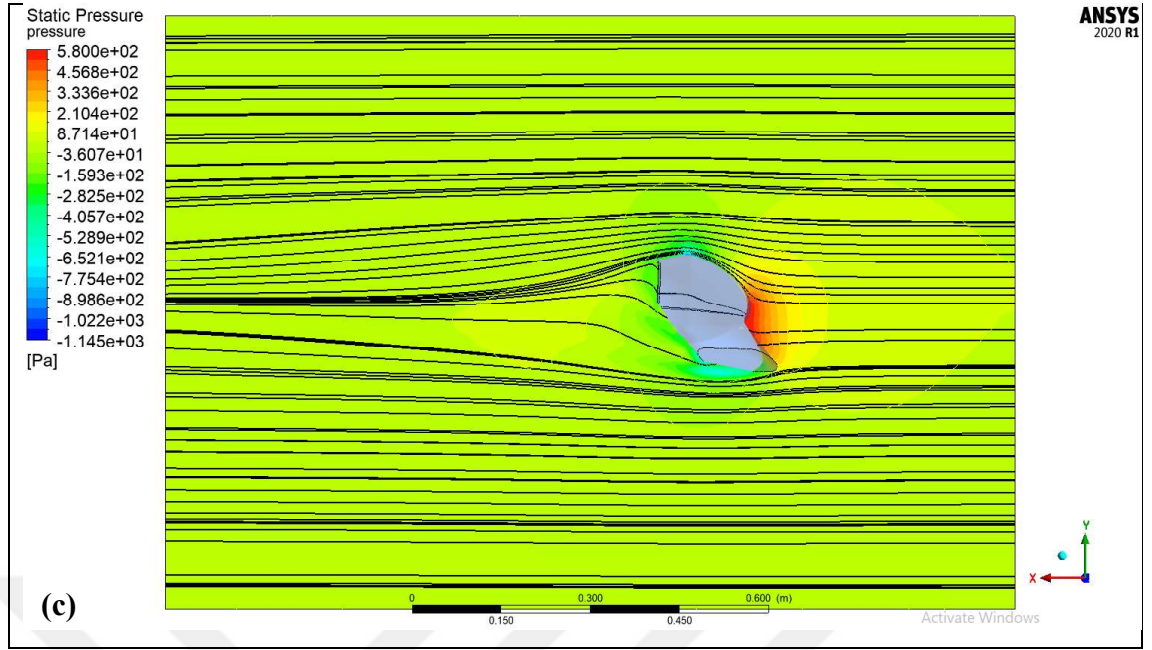
Şekil 4.80. 20 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı



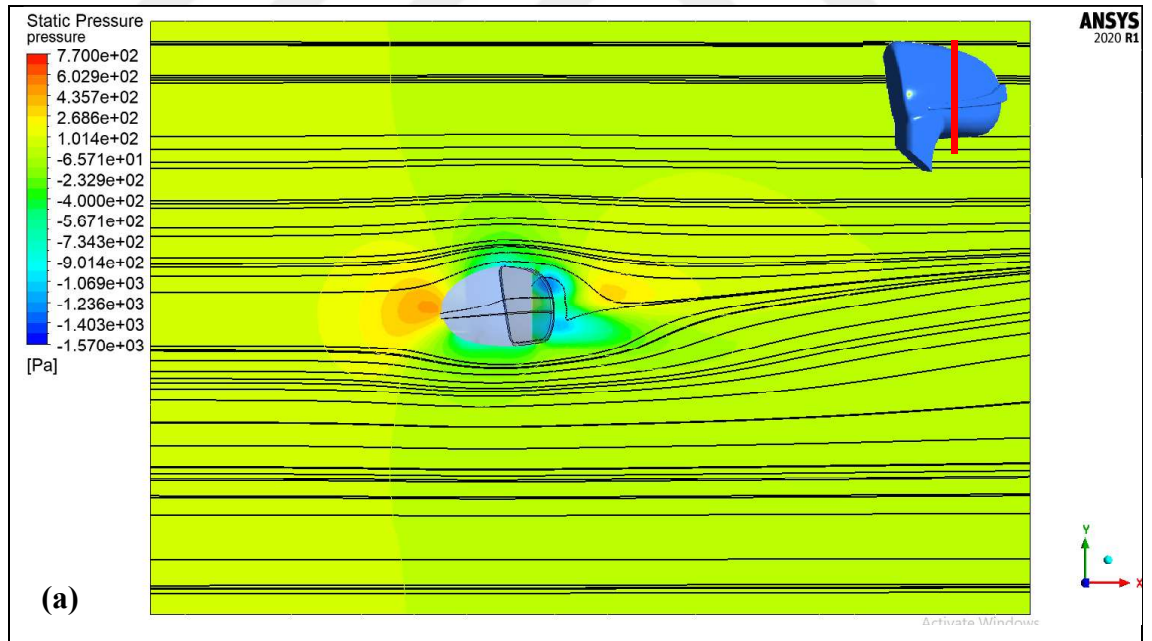


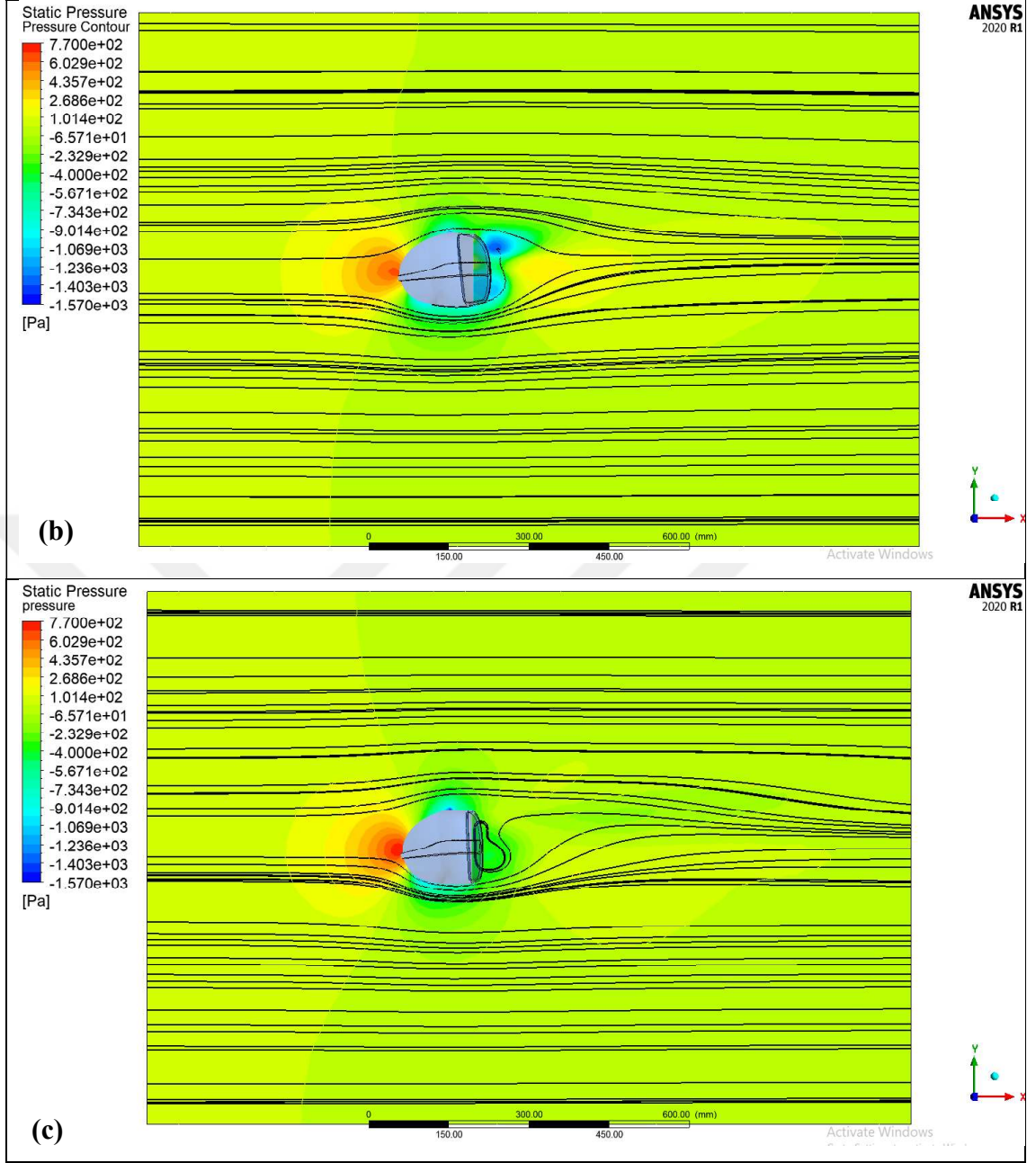
Şekil 4.81. 30 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı



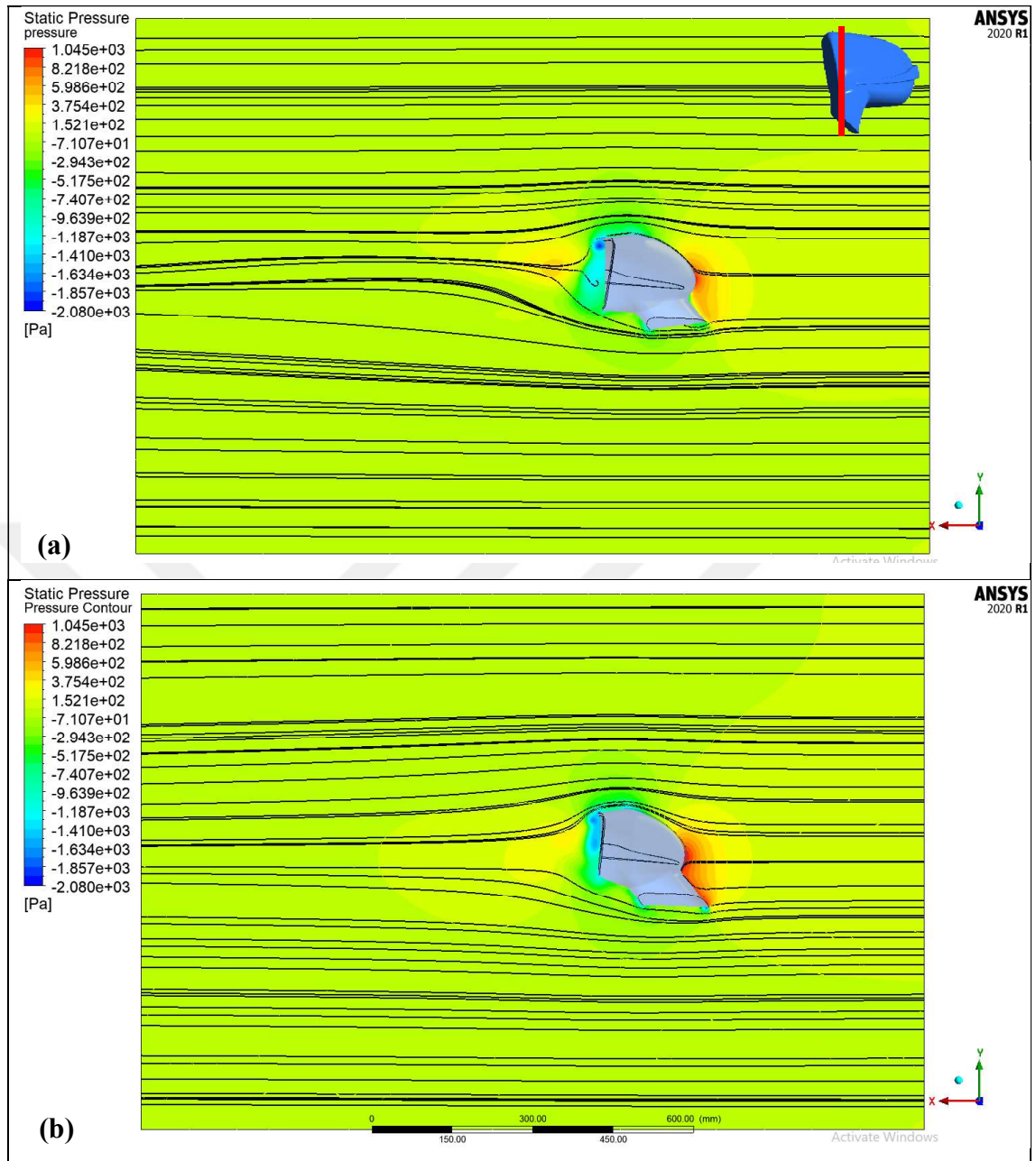


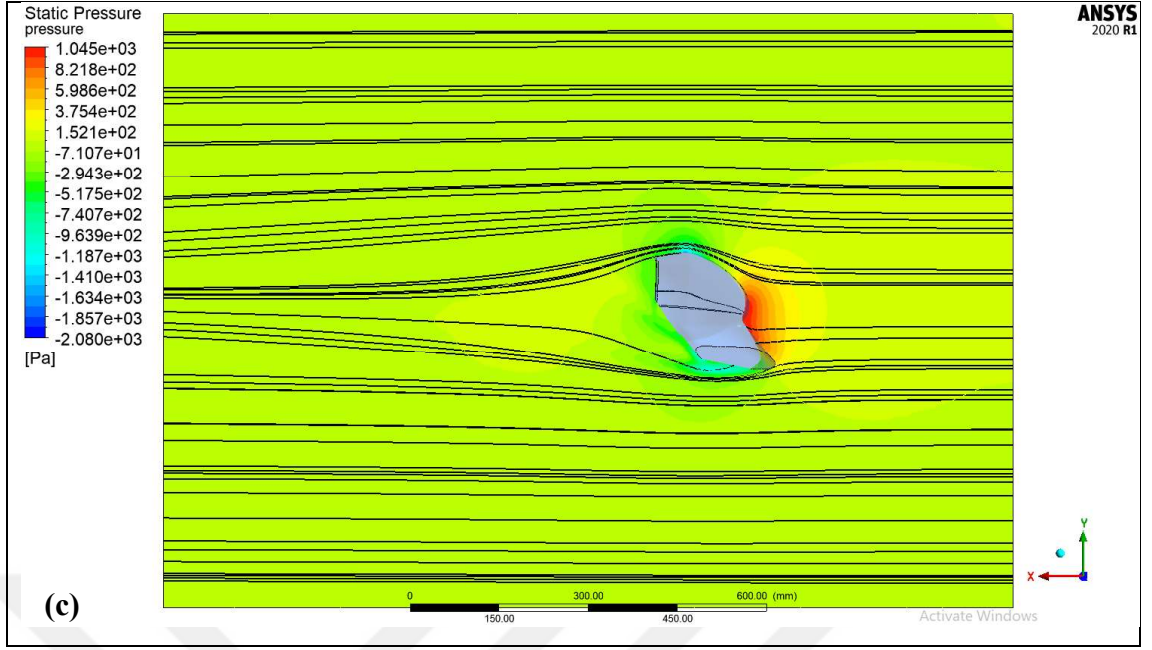
Şekil 4.82. 30 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.83. 40 m/s hız için aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı



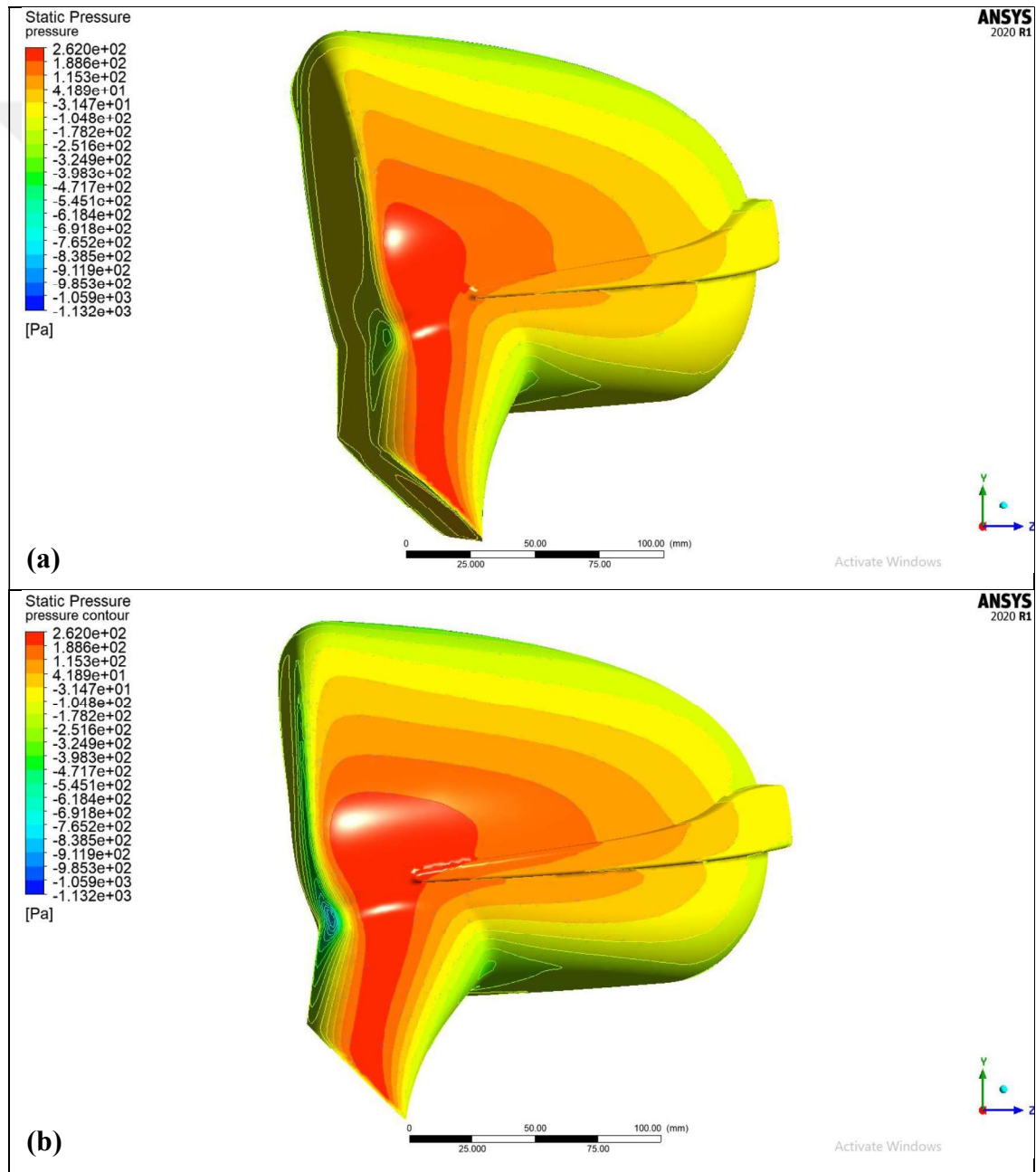


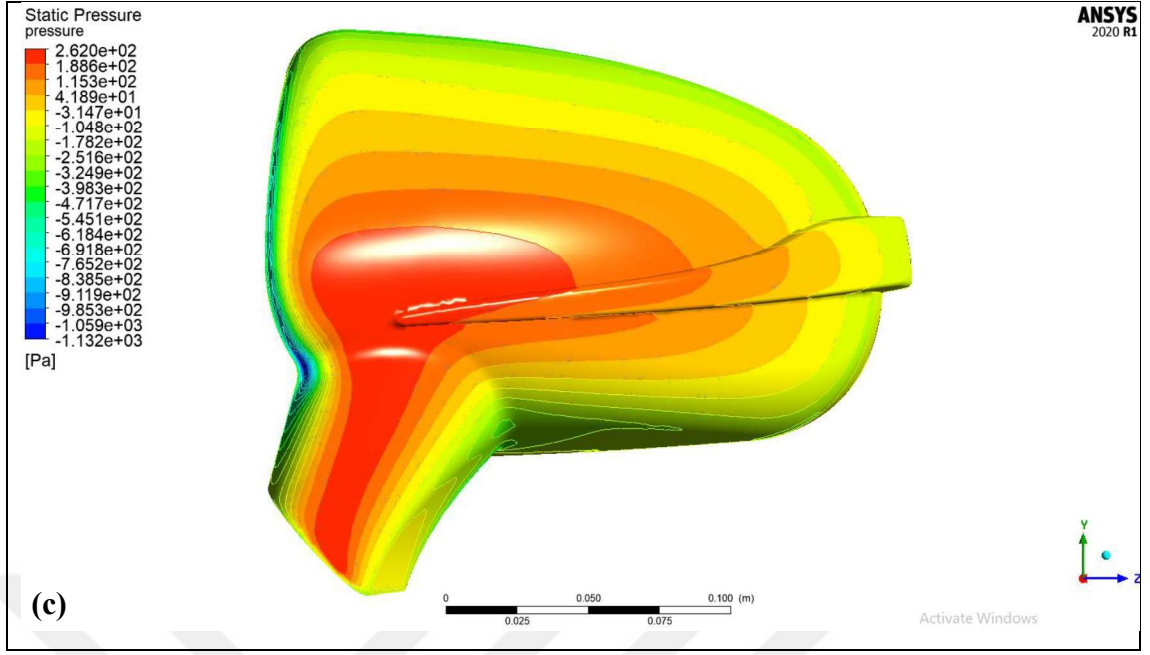
Şekil 4.84. 40 m/s hız için ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna üzerinde oluşan basınç dağılımları Şekil 4.85 – 4.87’de sunulmuştur. Tüm hız ve sapma açılarında ayna üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri Çizelge 4.19’da verilmiştir. Ayna ön yüzeyinde oluşan basınç dağılımı hemen hemen her hızda benzer özellik göstermesine rağmen, sapma açılarındaki değişim ayna üzerindeki basınç dağılımını değiştirmektedir. Durma noktası ve civarında maksimum değerler görülürken, ayrılmanın beklendiği kenara yakın bölgelerde minimum basınç değerleri ölçülmüştür. Maksimum basınç değerlerinin ayna gövdesi ile bağlama kolunun birleştiği bölgede ve ayna kolu üzerinde olduğu gözlenmiştir. 10° sapma açısında yüksek basınç alanının daha küçük olduğu, sapma açısındaki değişimle beraber ayna gövdesi üzerindeki alanın yatay olarak genişlediği görülmüştür. Minimum basınç ayna gövdesi ile ayna bağlama kolunun birleştiği sol dış kenarda gerçekleşmiştir. Tüm hızlarda en yüksek basınç değerleri birbirlerine yakın çıkmıştır. En yüksek değer 0° sapma açısında gerçekleşmiştir. En düşük basınç değerleri ise birbirlerinden uzak çıkmıştır. En düşük değer -10° sapma açısında ölçülmüştür.

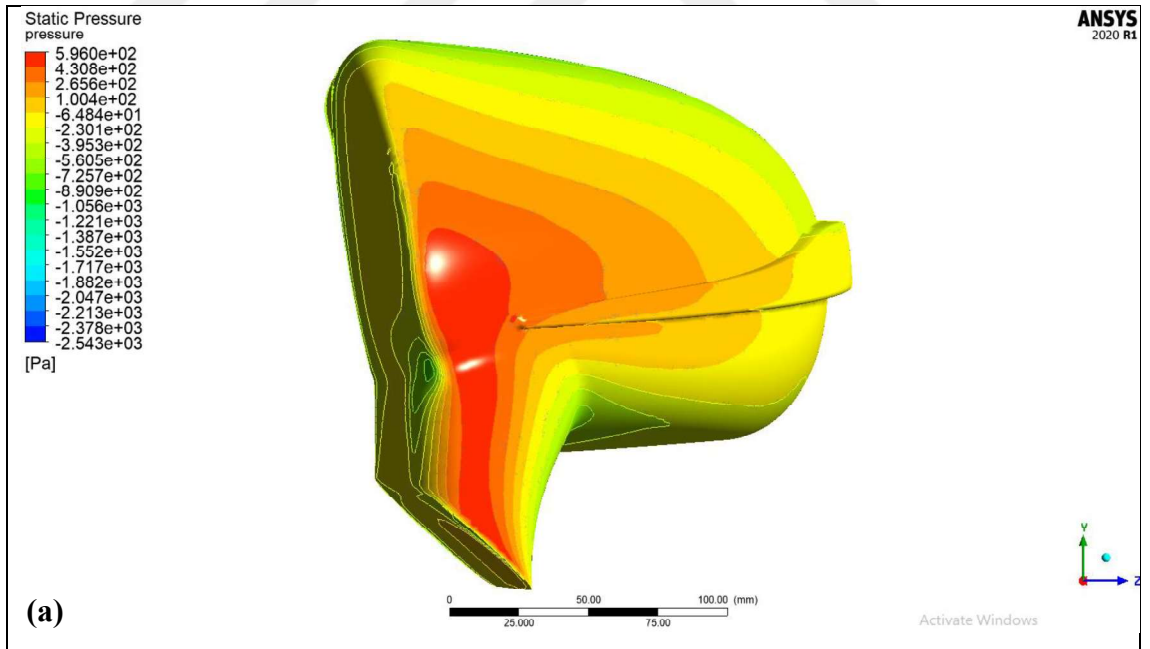
Çizelge 4.19. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna üzerinde oluşan maksimum ve minimum basınç değerleri

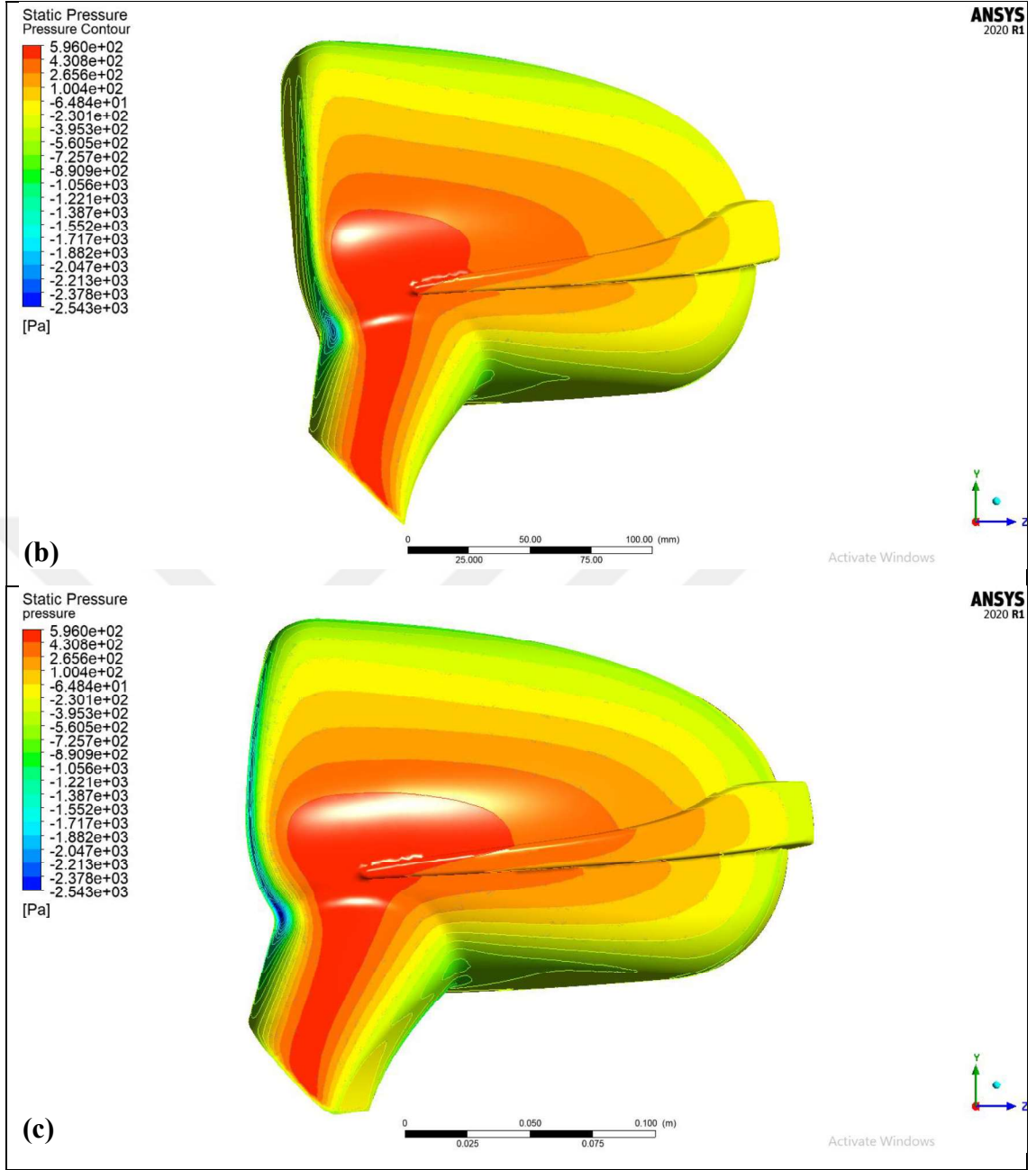
V (m/s) β (°)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (Pa)	257,11	261,62	256,93	589,04	595,03	575,02	1063,44	1056,07	1024,06
Min (Pa)	-621,46	-838,99	-1132	-1146,1	-1980,6	-2542,2	-2263,9	-3557	-4526,8



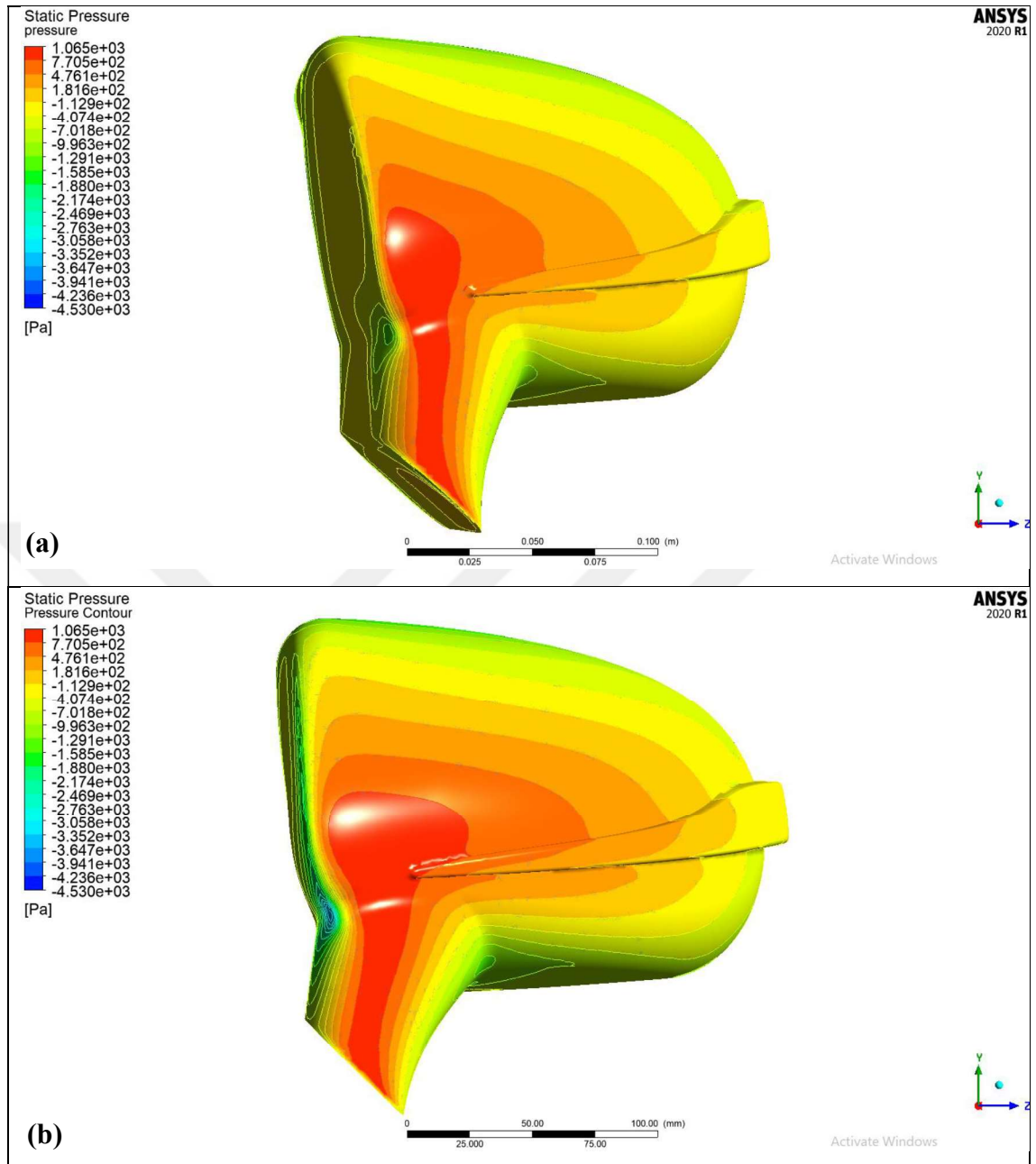


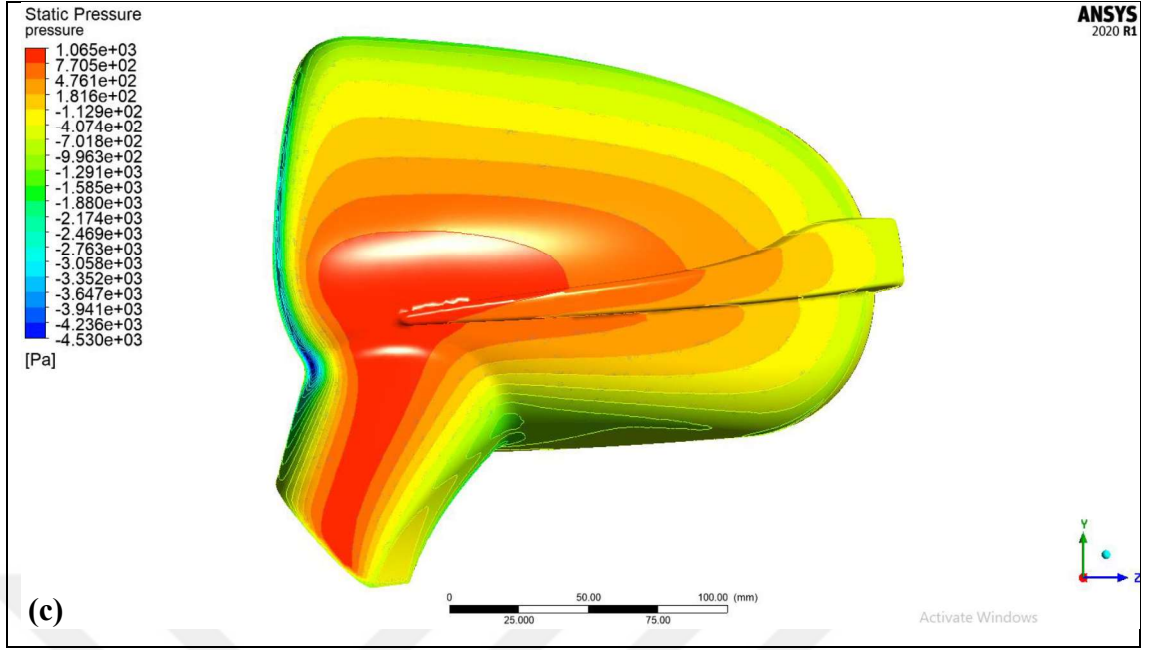
Şekil 4.85. 20 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.86. 30 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





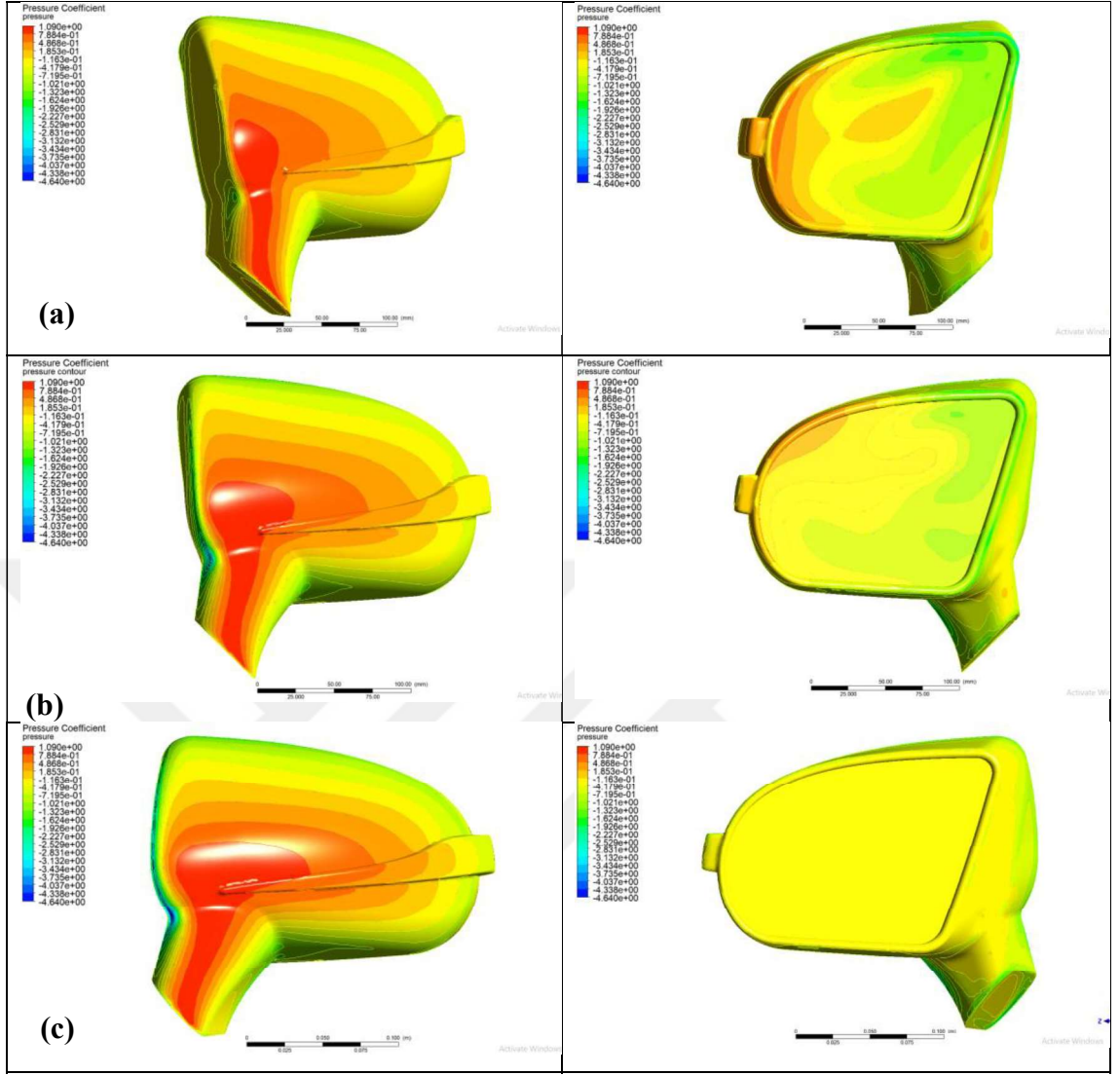
Şekil 4.87. 40 m/s hızda ayna üzerinde oluşan basınç dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna üzerinde oluşan basınç katsayısı dağılımları Şekil 4.88 – 4.90’da verilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarında ayna yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç katsayısı değerleri Çizelge 4.20’de sunulmuştur. Ayna ön yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımları basınç dağılımlarıyla benzerlik göstermektedir. Ayna arka yüzeyinde ise minimum basınç katsayısı değerlerinin yer aldığı görülmüştür.

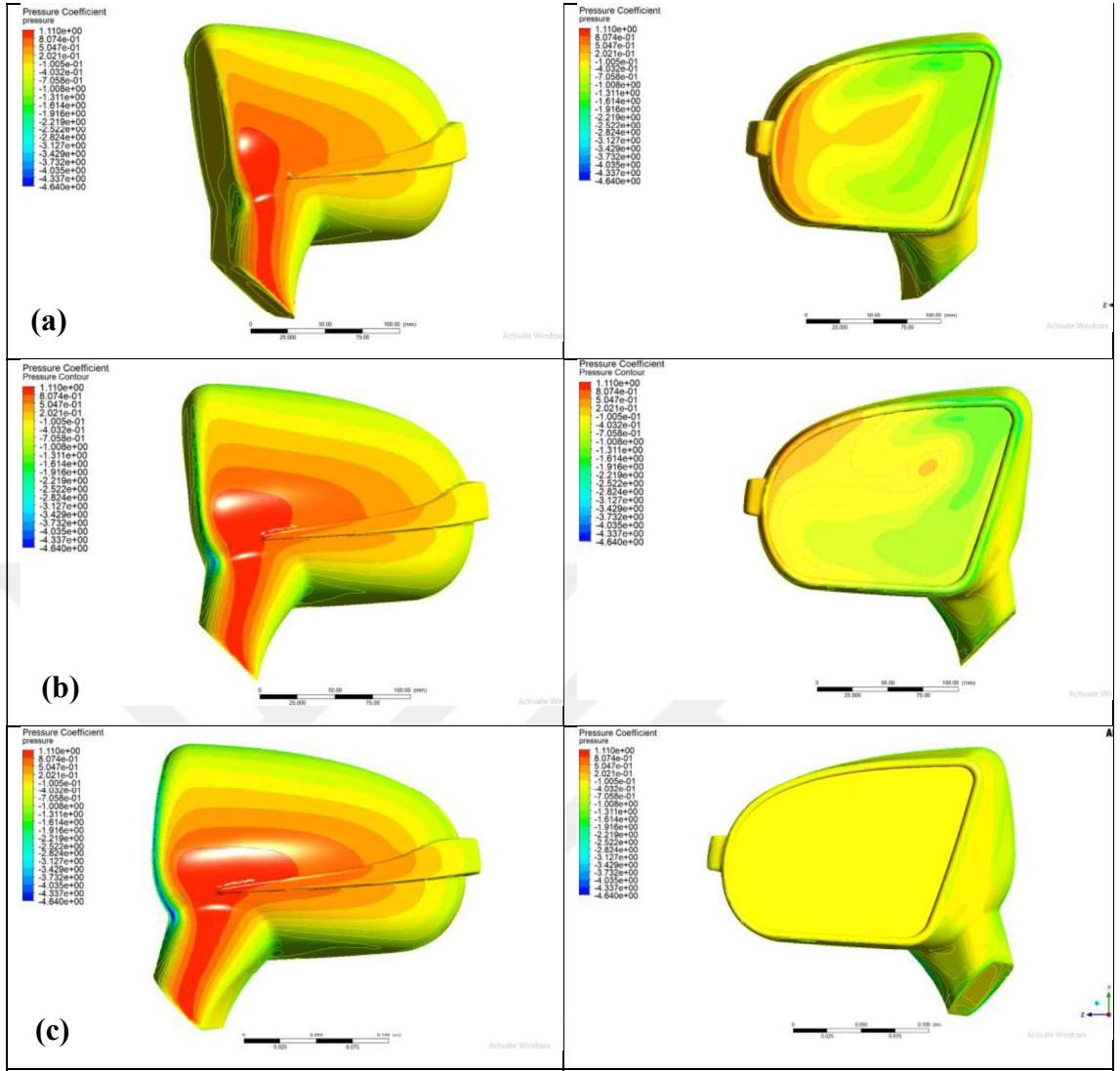
Ancak sapma açısındaki değişime bağlı olarak ayna arkasının sol üst kısmında görülen düşük basınç katsayılı alanda küçülme gözlenmiştir.

Çizelge 4.20. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) ayna yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum basınç katsayısı değerleri

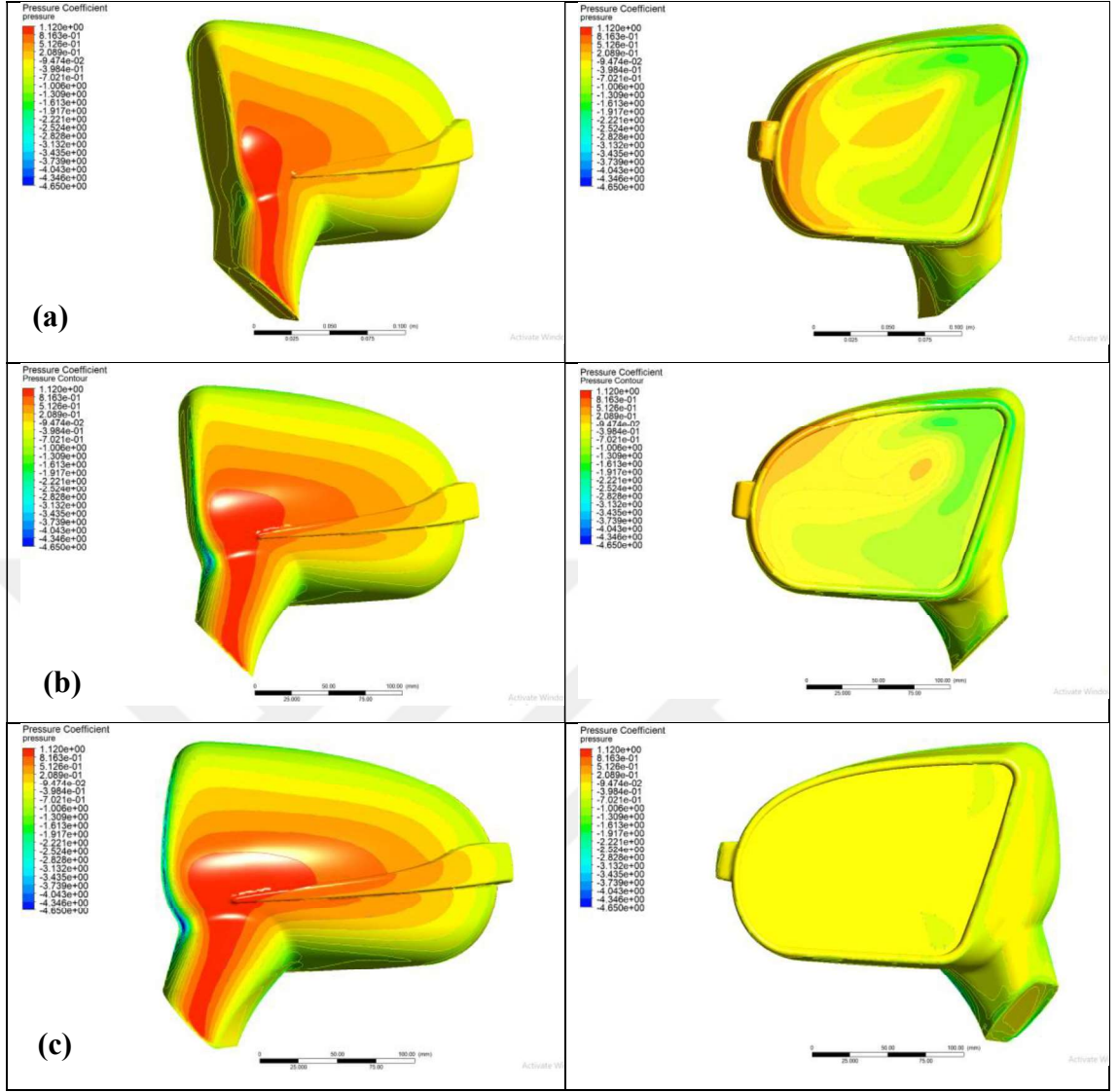
V (m/s)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks ()	1,05	1,08	1,05	1,09	1,1	1,04	1,11	1,12	1,04
Min ()	2,54	-3,42	-4,63	-2,06	-3,61	-4,63	-2,3	-3,65	-4,64



Şekil 4.88. 20 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



Şekil 4.89. 30 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

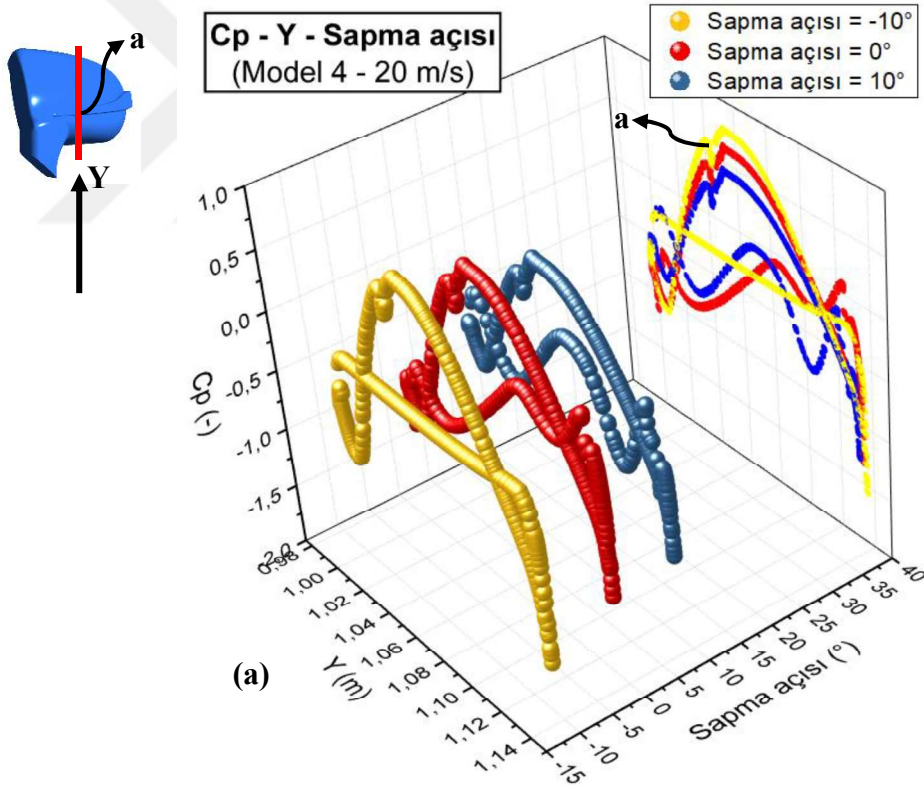


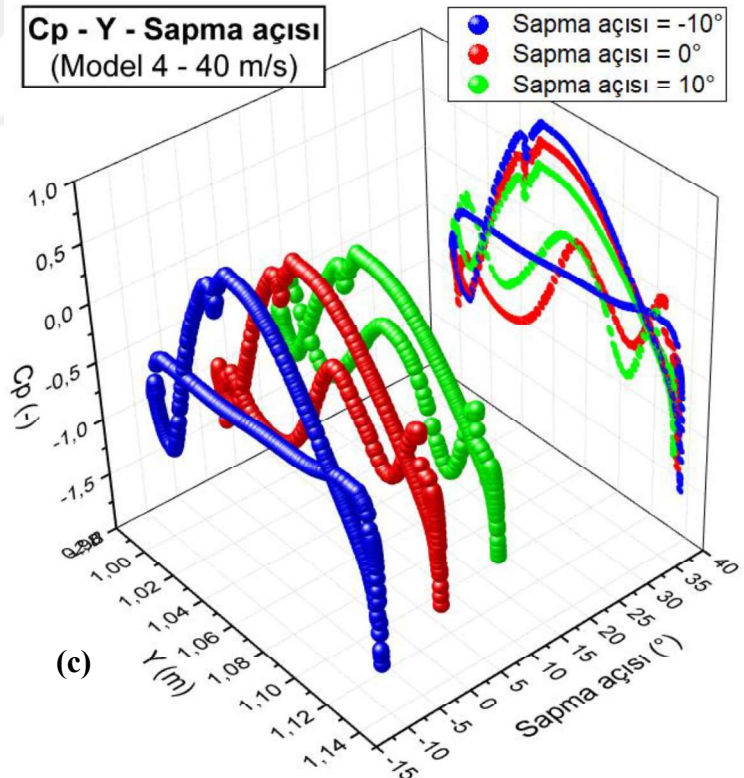
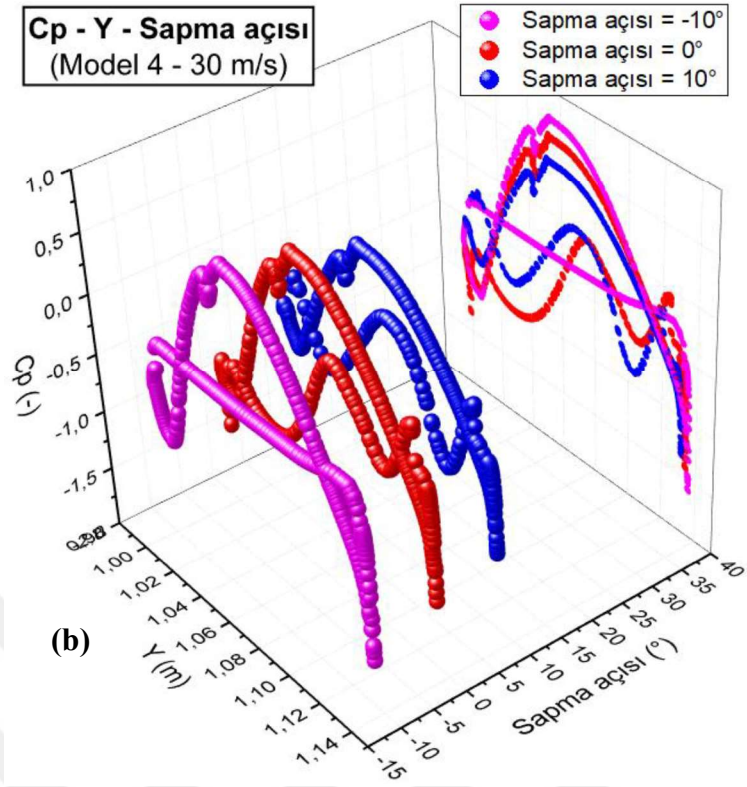
Şekil 4.90. 40 m/s hızda ayna ön ve arka yüzeyinde oluşan basınç katsayısı dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

$\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinden alınan eğride Y-ekseni boyunca oluşan basınç katsayıları 20, 30 ve 40 m/s hızlar için sırasıyla Şekil 4.91’de verilmiştir. Grafiklerde en sağdaki eğriler 3 eğrinin izdüşümleridir. Farklı sapma açılarında C_p dağılımı ayna ön yüzeyinde büyük farklılıklar göstermemiş, ayna arka yüzeyinde ise sapma açısının değişimiyle C_p dağılımında ciddi değişimler gözlenmiştir.

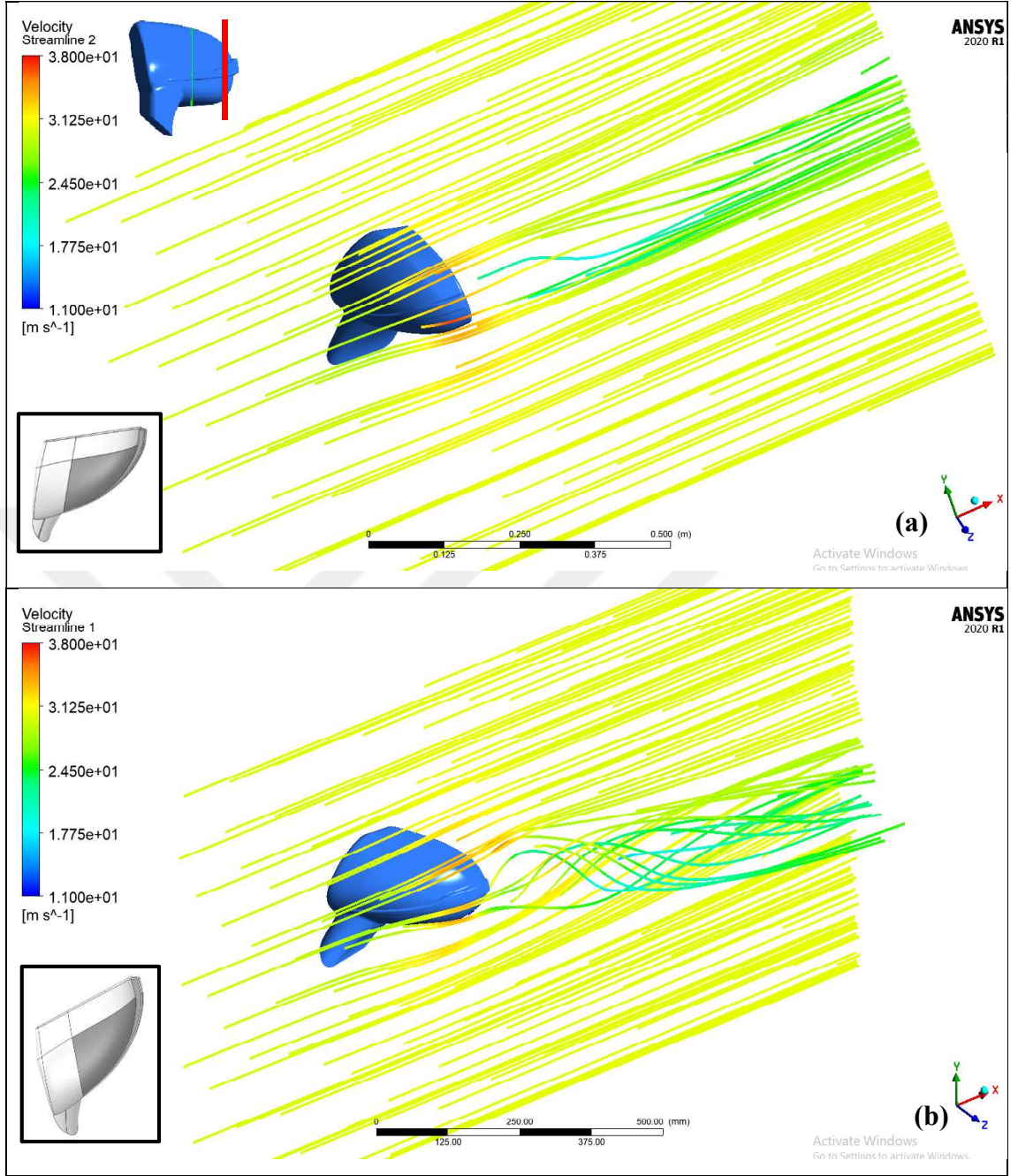
Buna göre; -10° sapma açısında diğer ayna modellerinde olduğu gibi C_p değeri yatay seyretmekte, 0° ve 10° sapma açılarında ise C_p değeri salınım göstermektedir.

Bu değişimlerin sebebi ayna yan kısmında oluşan boylamasına vortekslerdir. Şayet 10° sapma açısında -10° sapma açısındakiyle karşılaştırıldığında boylamasına vortekslerin oluştuğu (Şekil 4.92) fark edilmektedir.





Şekil 4.91. Ayna orta bölgesinden alınan eğride Y-ekseni boyunca oluşan basınç katsayıları: (a) 20 m/s, (b) 30 m/s, (c) 40 m/s (En sağdaki eğriler, 3 eğrinin izdüşümleridir.)

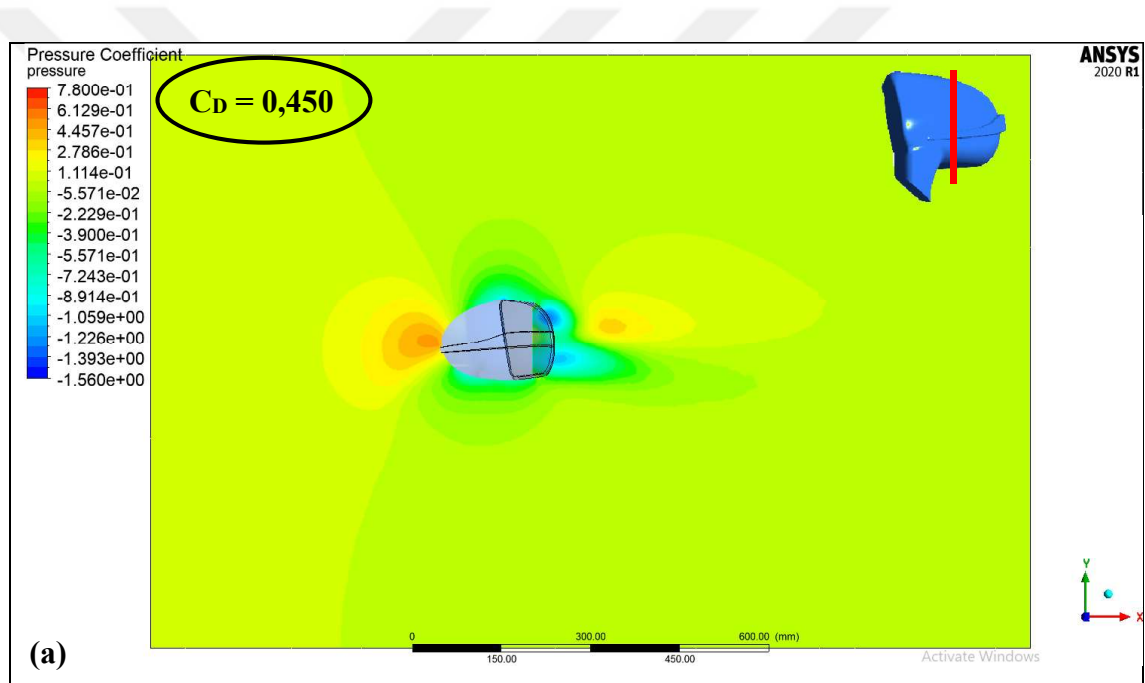


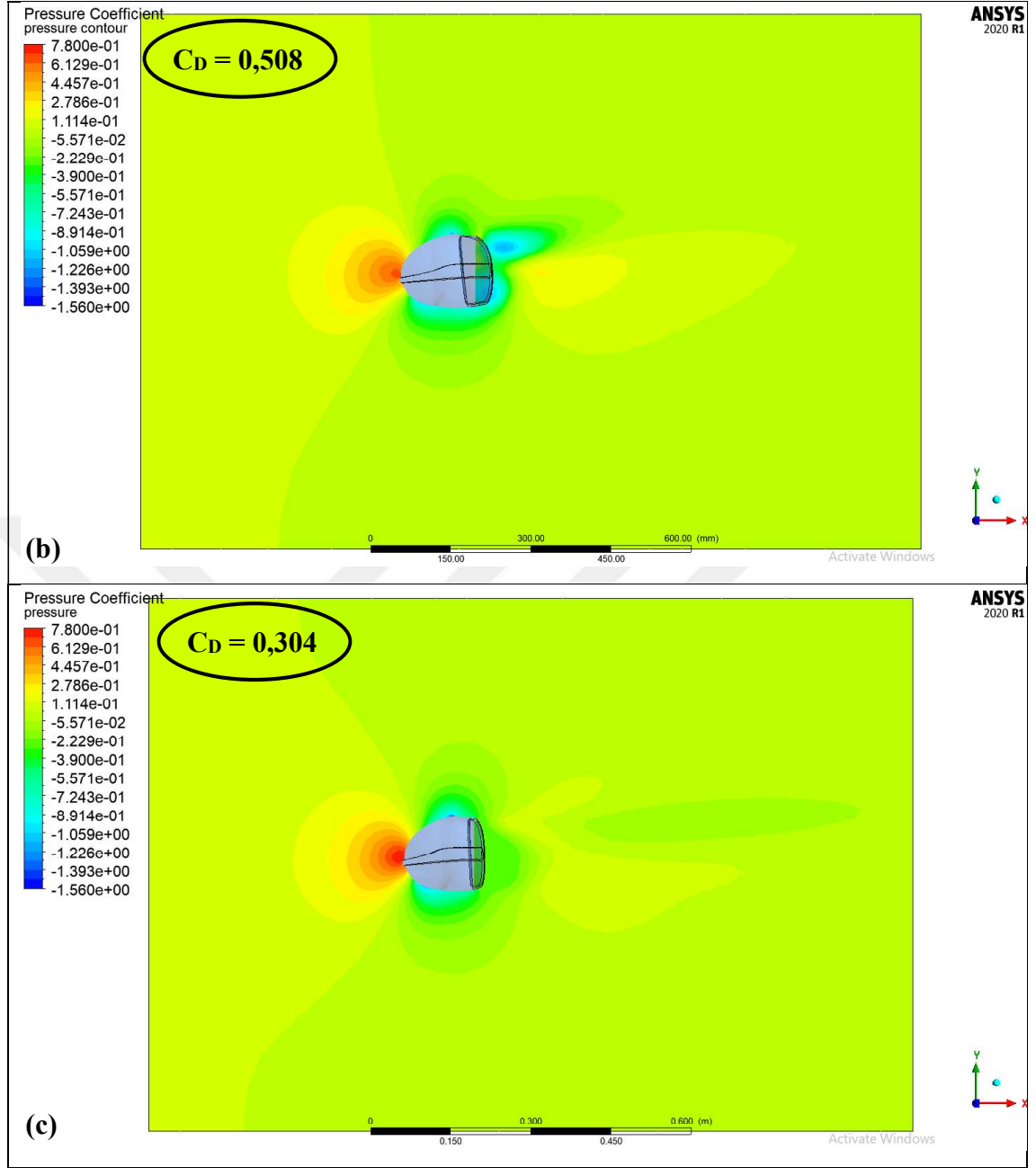
Şekil 4.92. 30 m/s hızda, ayna yan bölgesinde bulunan bir düzlem civarında oluşan akım çizgileri: **(a)** -10° sapma açısı, **(b)** $+10^\circ$ sapma açısı

Maksimum C_p değerine aynanın ön yüzeyindeki durma noktasında (yaklaşık olarak $Y=1,05$ m, alt kısımdan itibaren aynanın yaklaşık 1/3 yüksekliğinde) rastlanmıştır. Aynanın ön yüzey profilini oluşturan eğri sinyal elemanından dolayı ters açılar içerdiği için basınç katsayısı değerlerinde de salınım meydana gelmiştir. Salınımın olduğu bu bölge şekil üzerinde “a” harfi ile gösterilmiştir.

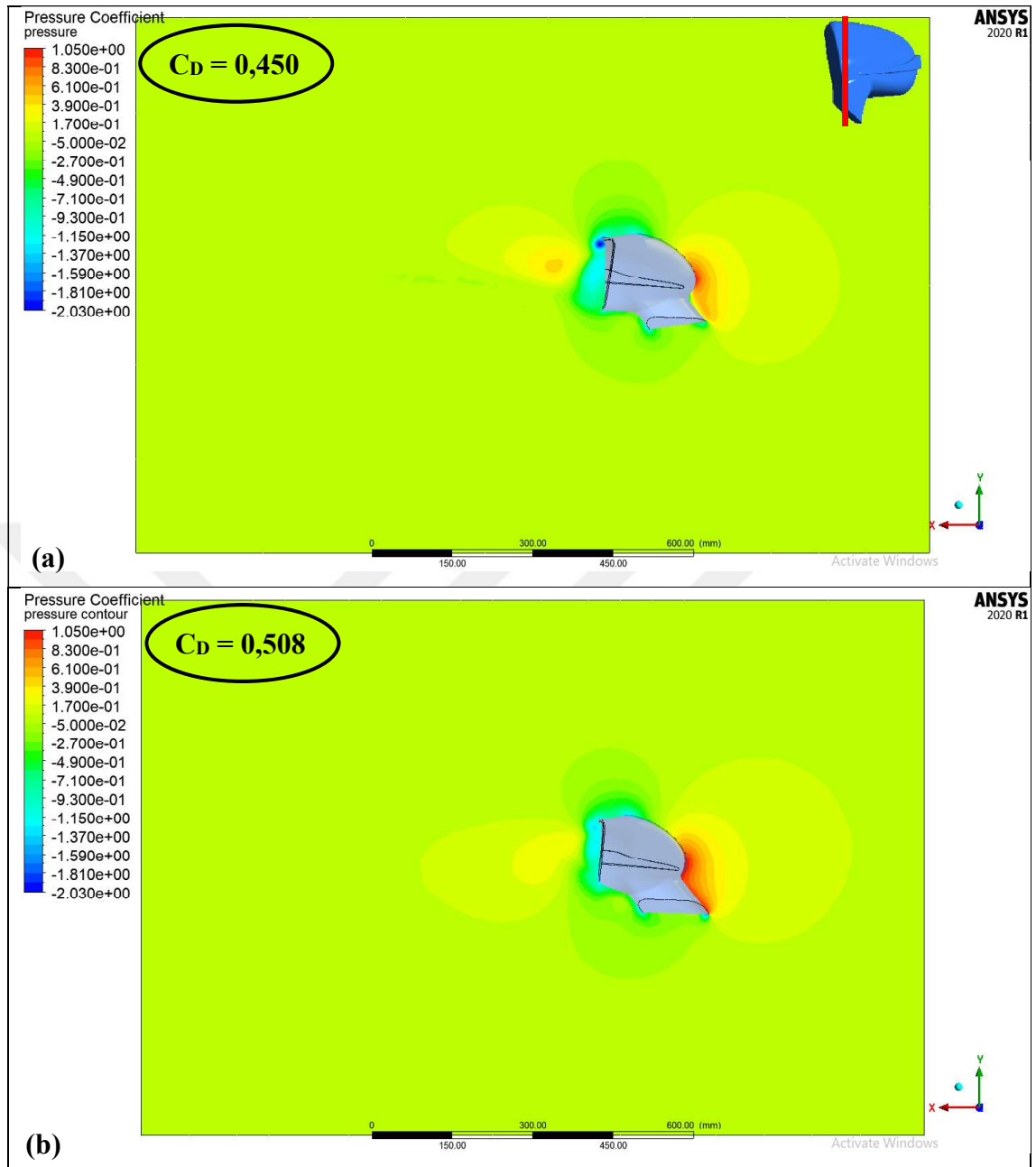
En düşük basınç katsayısı değerlerine ise aynanın arka yüzeyinde üst kısımda rastlanmıştır. Bu bölgeler vortekslerin en geniş olduğu (bkz. örneğin Şekil 4.79) bölgelerdir. Ayrıca -10° sapma açısında diğer sapma açılarındakine göre maksimum C_p değeri artmış, minimum C_p değeri ise azalmıştır. Bu sonuçlar C_p eğrilerinin bulunduğu düzlemlerdeki C_p dağılımını gösteren Şekil 4.93-4.98'den de takip edilebilir.

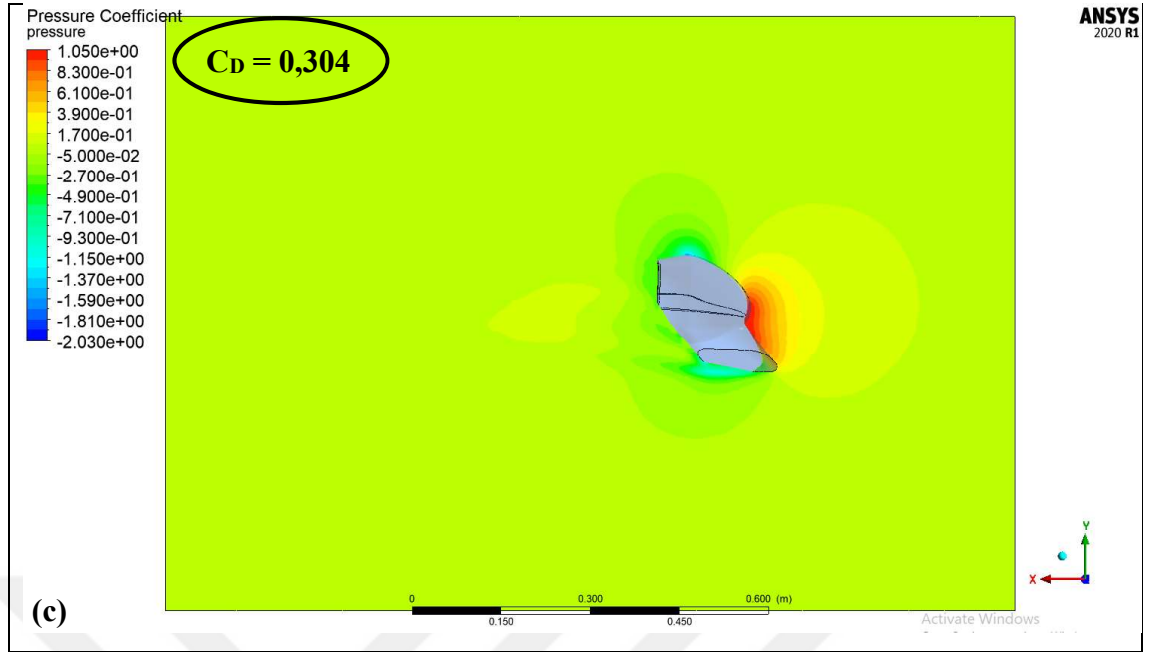
$+10^\circ$ ve 0° sapma açılarında ayna arkasında düşük basınç katsayısına sahip iki alanın oluştuğu görülmüştür. -10° sapma açısında ayna arkasında minimum basınç katsayılı bölge ikiye ayrılmamış ve basınç değerleri $+10^\circ$ ve 0° 'dekilere göre daha yüksek değerler almıştır.



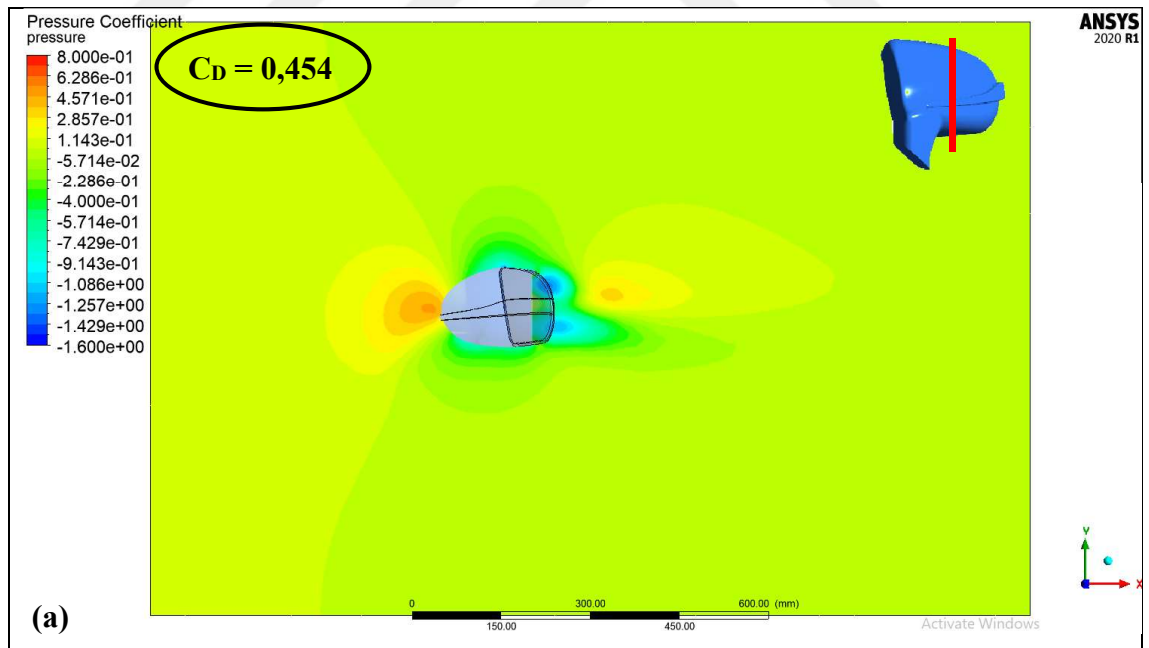


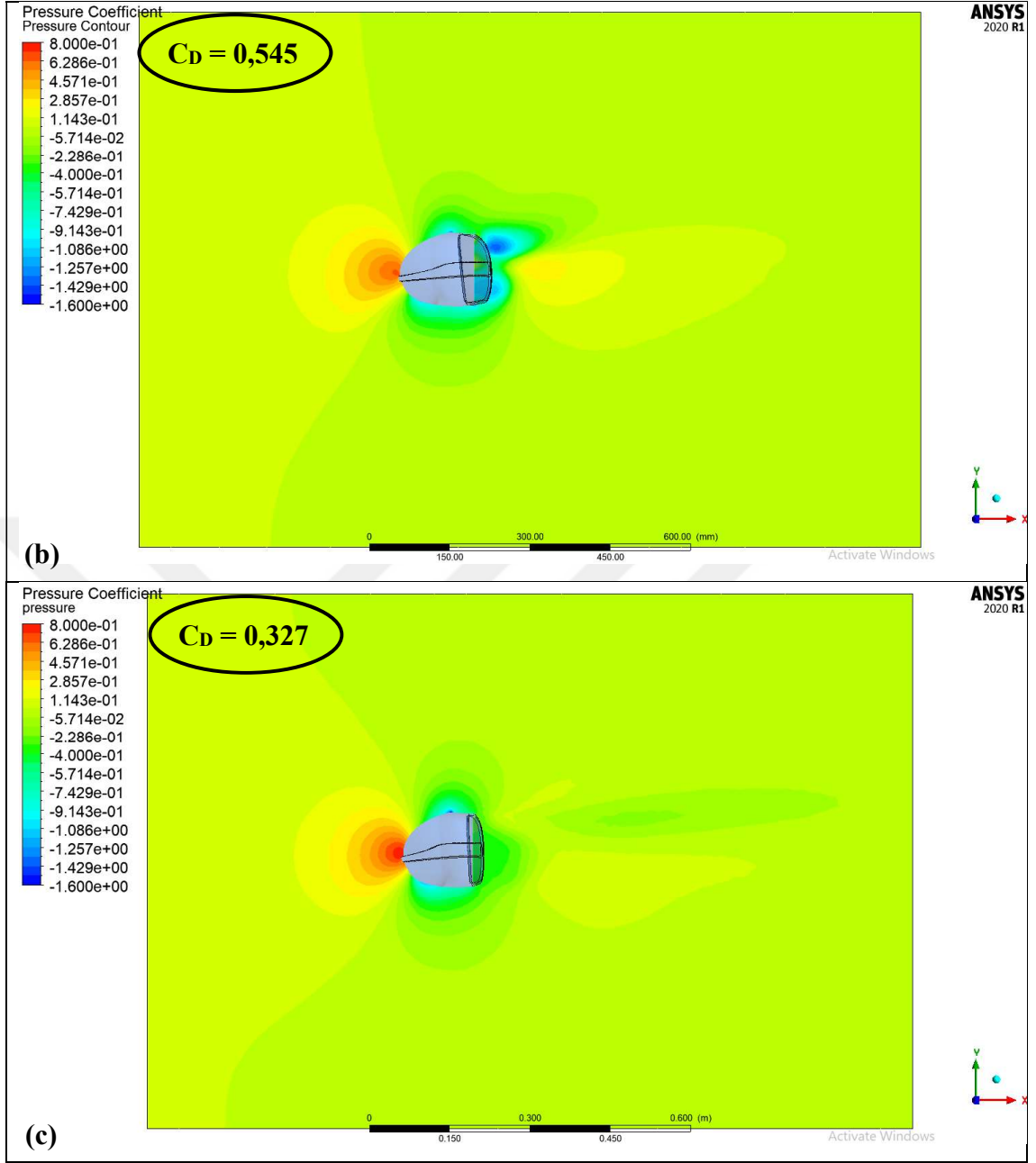
Şekil 4.93. 20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) +10° sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı



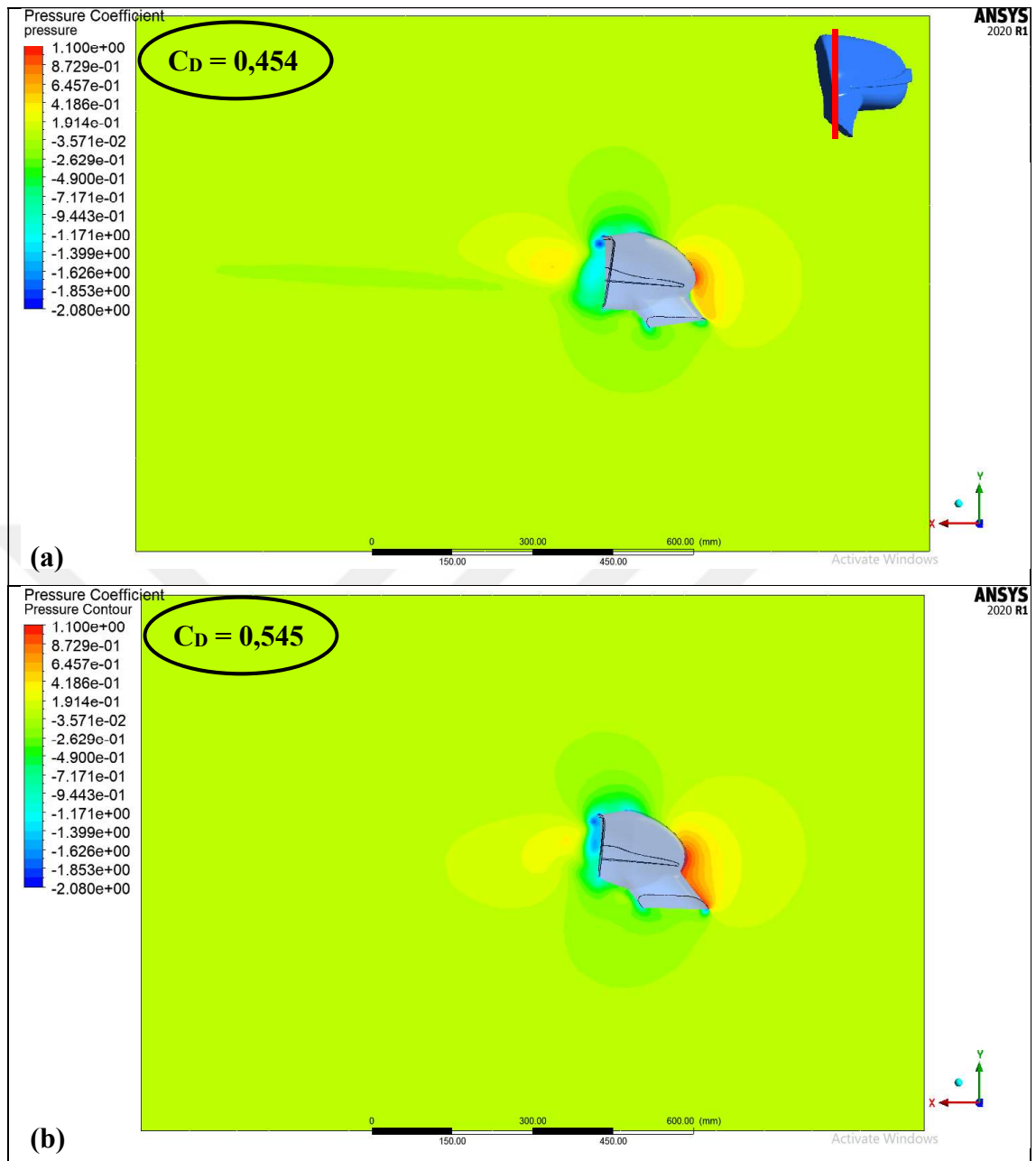


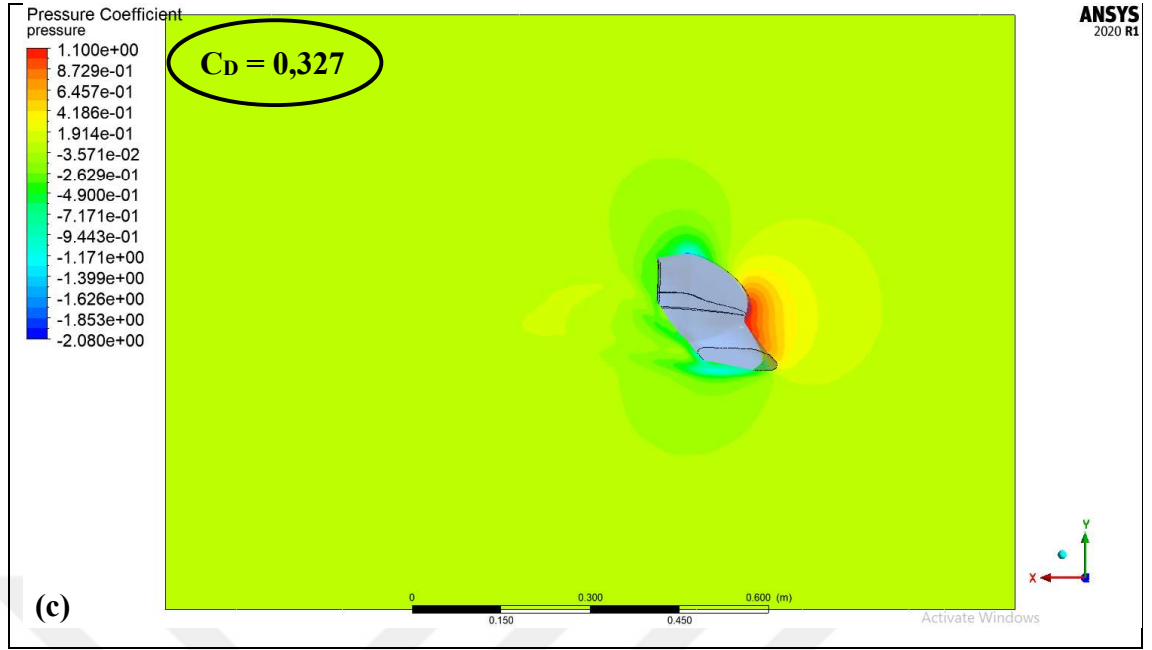
Şekil 4.94. 20 m/s hızda ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı



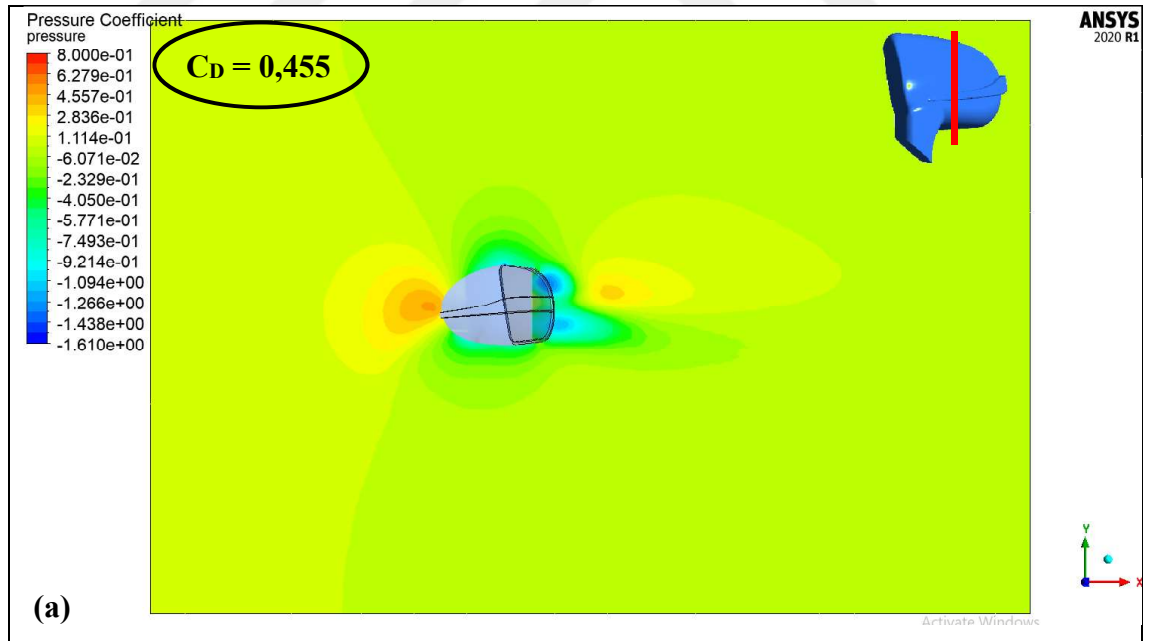


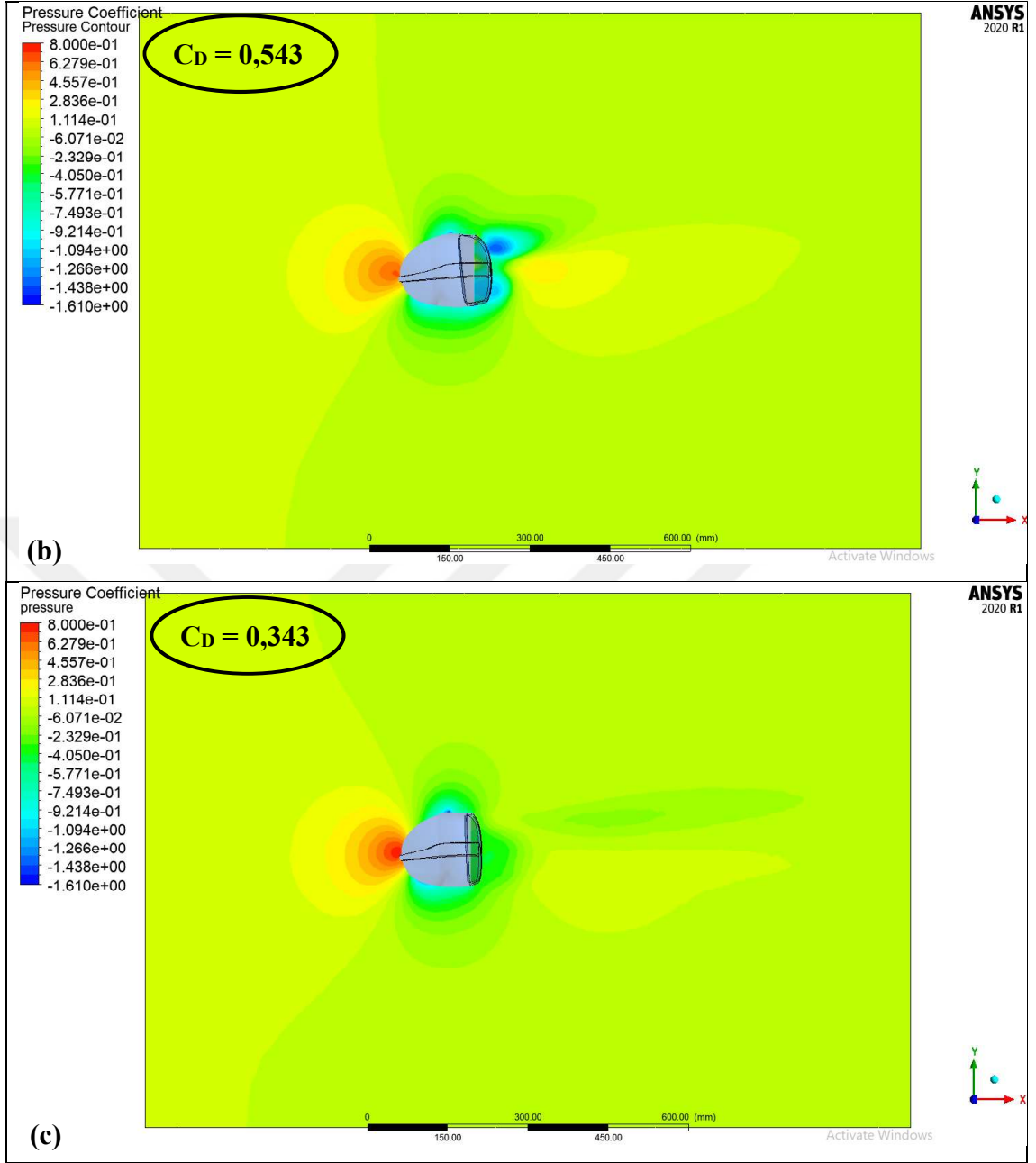
Şekil 4.95. 30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



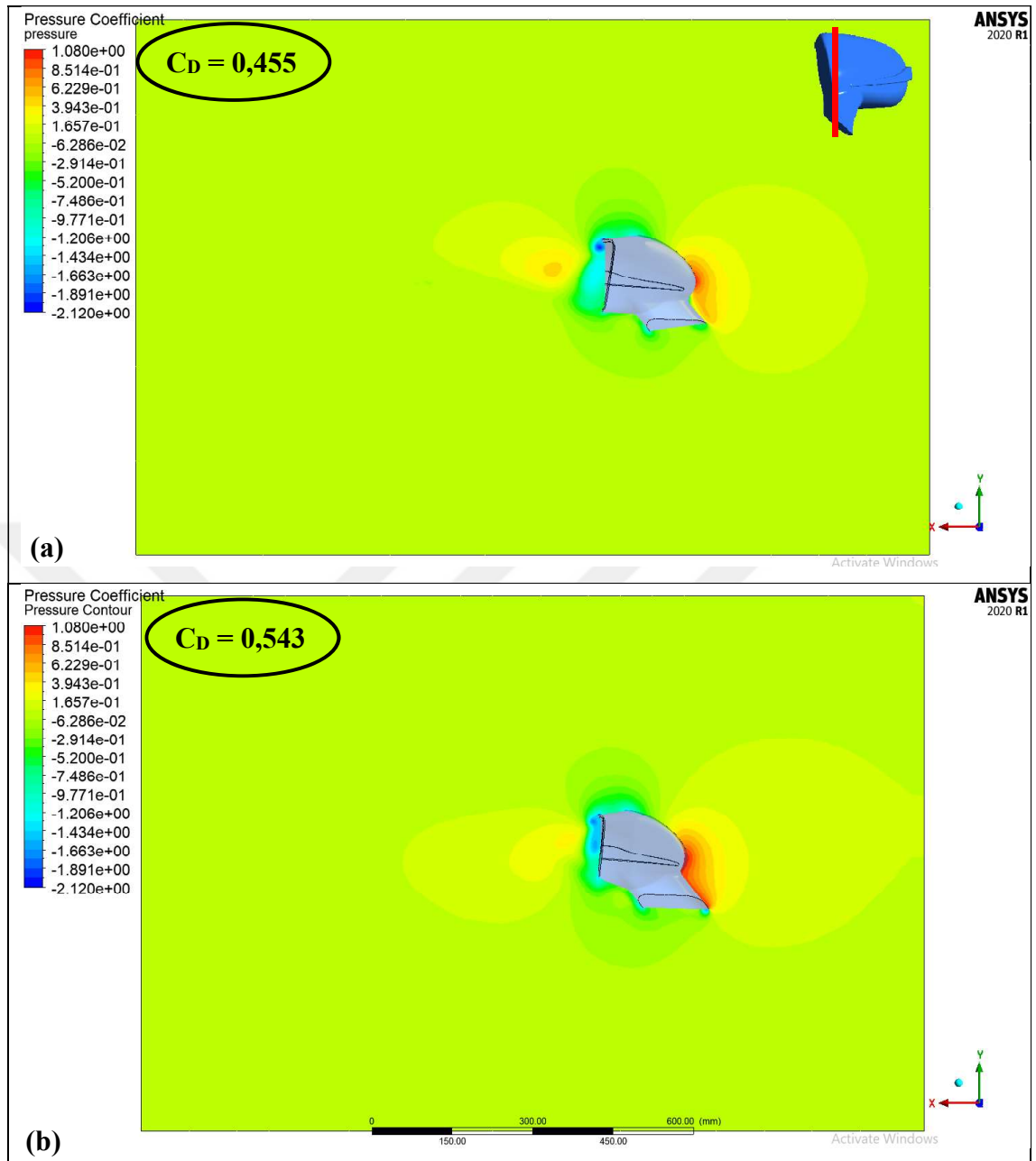


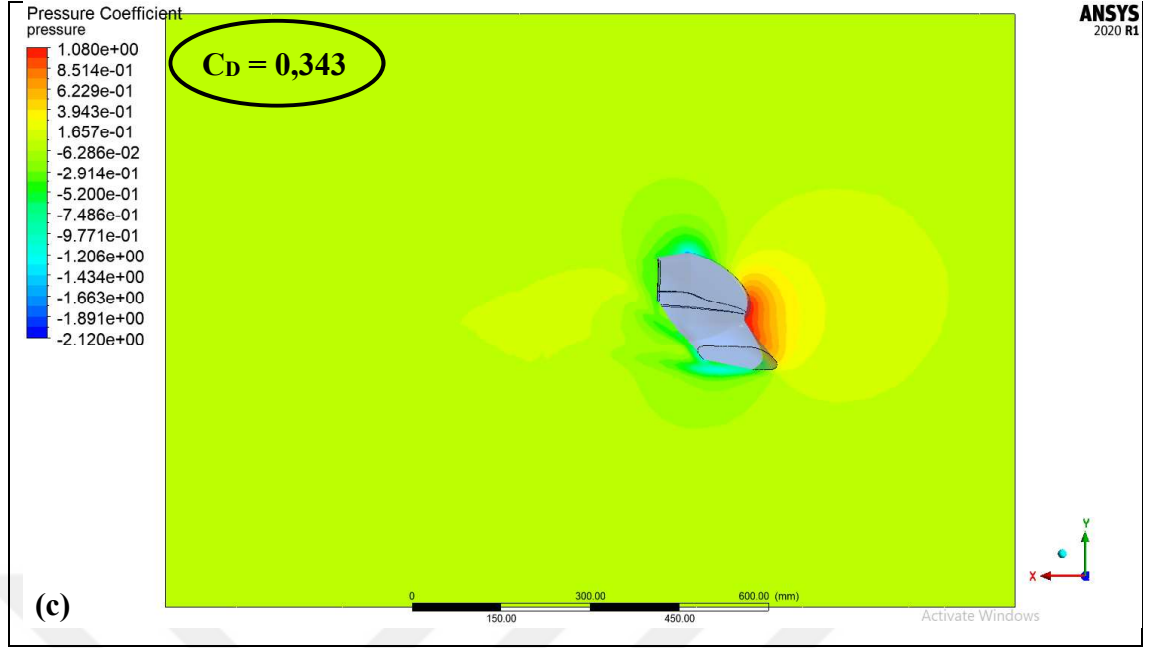
Şekil 4.96. 30 m/s hızda ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) $+10^\circ$ sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.97. 40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) +10° sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.98. 40 m/s hızda ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

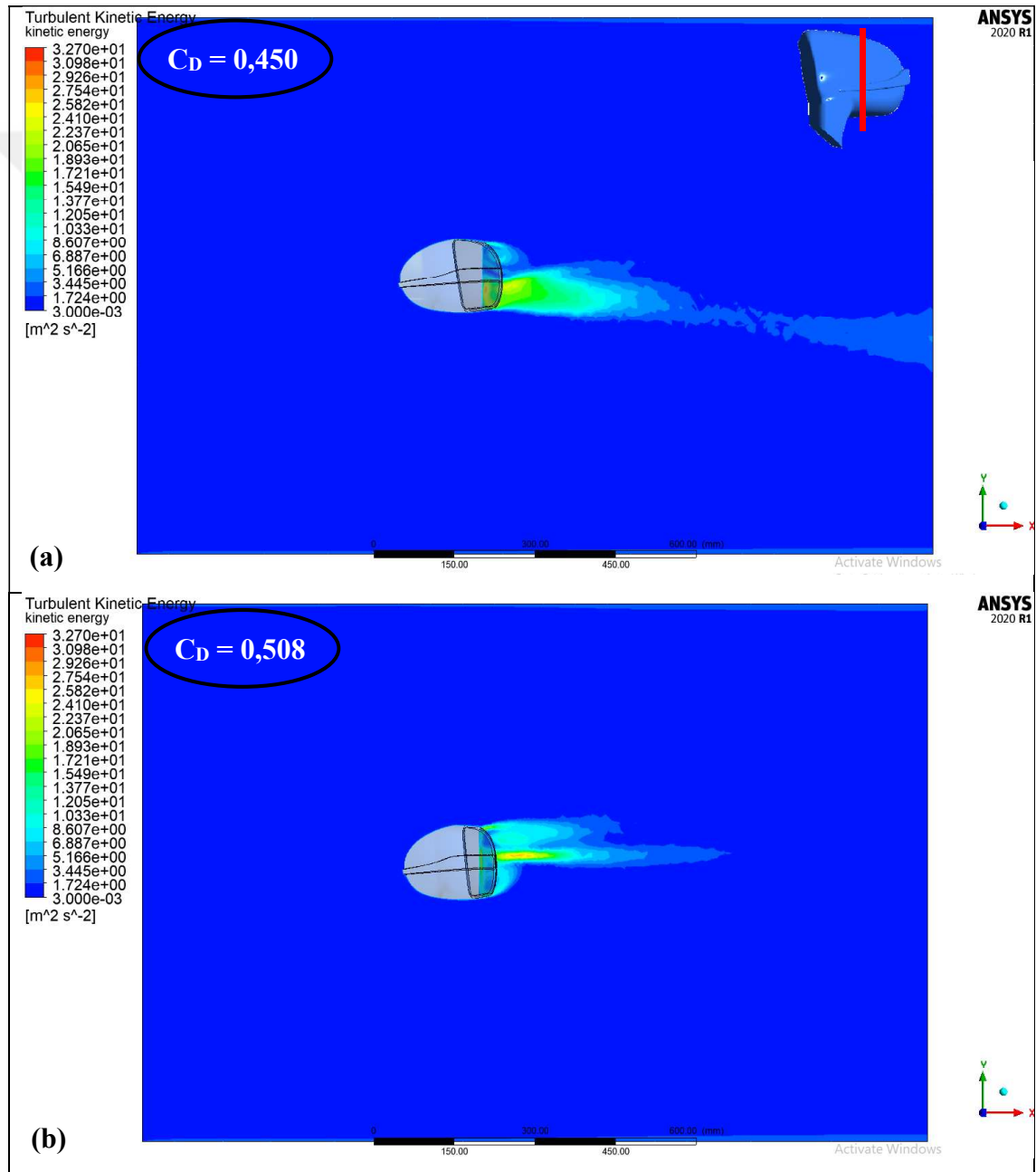
$V = 20, 30$ ve 40 m/s hızlarda ve $\beta = 10^\circ, 0^\circ$ ve -10° sapma açılarında ayna orta bölgesinde ve ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan kinetik enerji dağılımları Şekil 4.99 – 4.104 arasında gösterilmiştir. Tüm hız ve sapma açılarında ayna orta bölgesinden de geçen düzlemde oluşan maksimum ve minimum değerler Çizelge 4.21’de verilmiştir. Hız arttıkça hıza bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi de artmaktadır. Aynı sapma açılarındaki türbülans kinetik enerjisi dağılımları benzerlik göstermektedir.

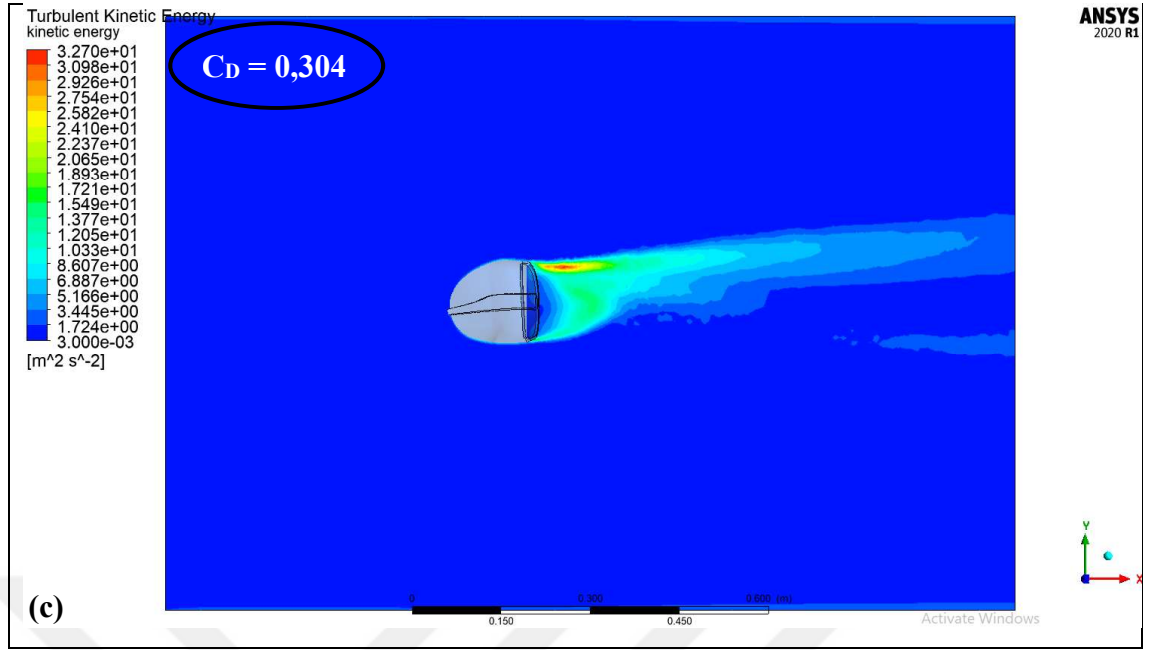
10° sapma açısında türbülans kinetik enerjisi, ayna arkasının alt kısmında görülmüştür. 0° sapma açısında türbülans kinetik enerjisi ayna arkasının orta kısmında en yüksek değerlere ulaşmıştır. -10° sapma açısında türbülanslı bölge aynanın arkasında daha geniş bir alanda yukarı yönlü bir saçılmaya sahiptir ve türbülans kinetik enerjisinin yoğun olduğu bölge aynanın üst kısmındadır. Aynanın hemen arkasında türbülans kinetik enerjisi değerleri düşük kalmıştır.

Türbülans kinetik enerjisinin büyüklüğü kısmen de olsa oluşan gürültünün şiddeti hakkında bilgi vermektedir. Minimum gürültü ve enerji kaybı 0° sapma açısında, maksimum gürültü ve enerji kaybı ise -10° sapma açısında görülmüştür.

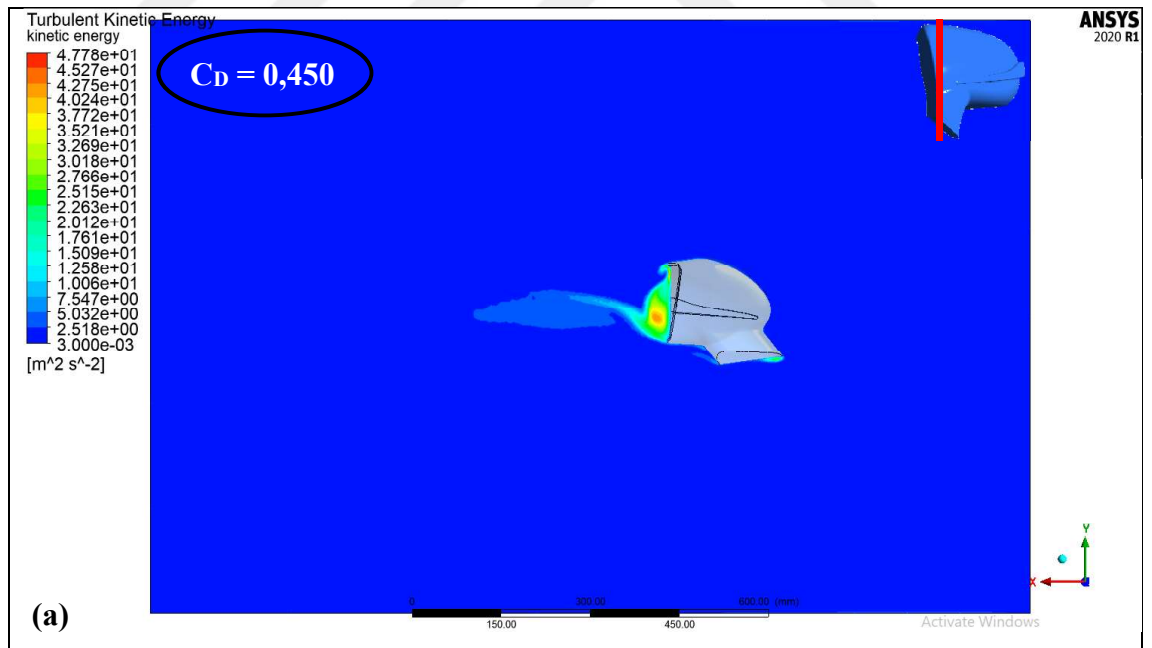
Çizelge 4.21. Tüm hız (V) ve sapma açılarında (β) aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan maksimum ve minimum türbülans kinetik enerjisi değerleri

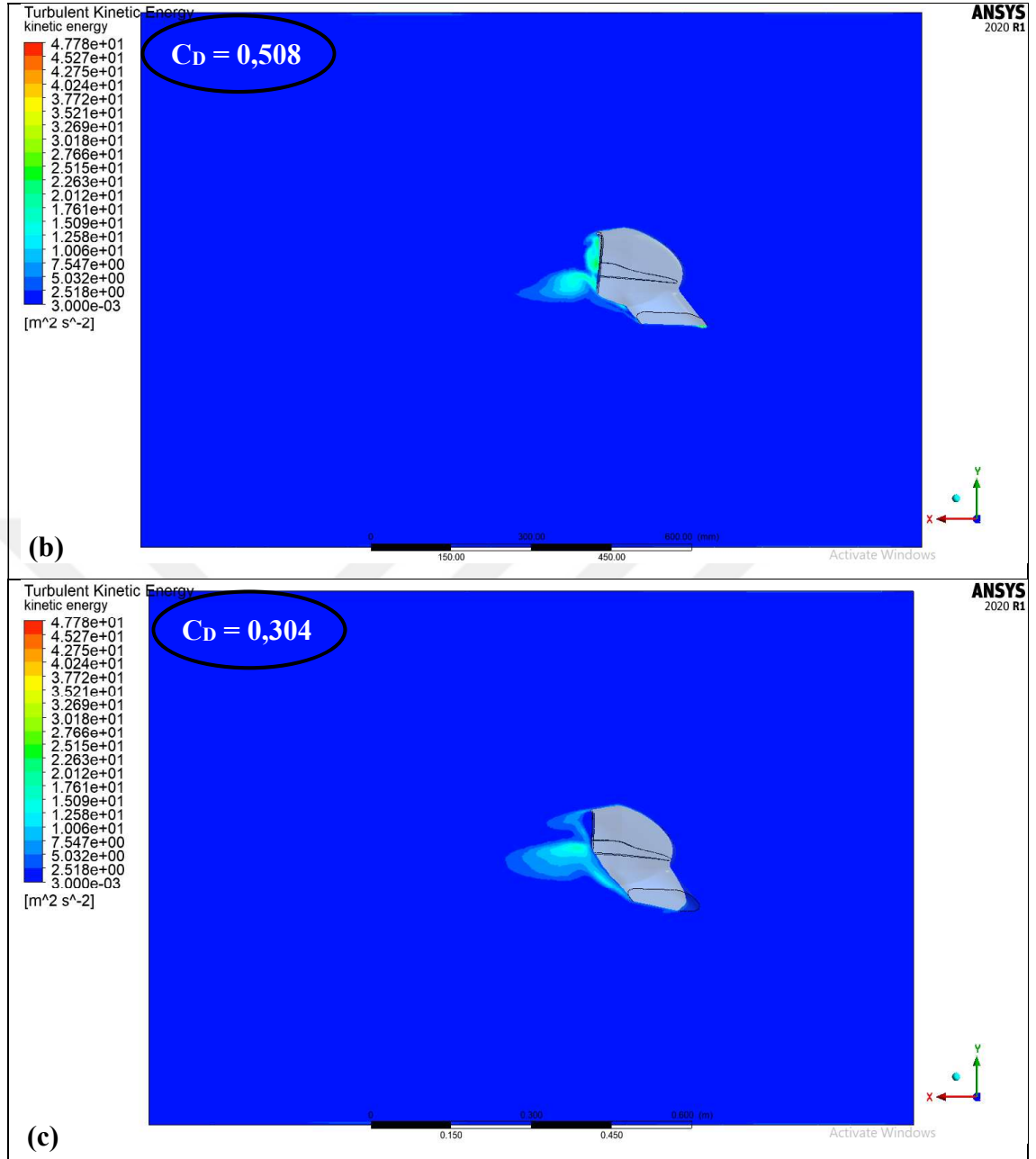
V (m/s) β (°)	20			30			40		
	10	0	-10	10	0	-10	10	0	-10
Maks (m ² /s ²)	27,75	27,75	32,69	70,03	64,02	84,68	125,63	110,14	171,44
Min (m ² /s ²)	0,0039	0,004	0,004	0,0042	0,0043	0,0043	0,004	0,0043	0,0042



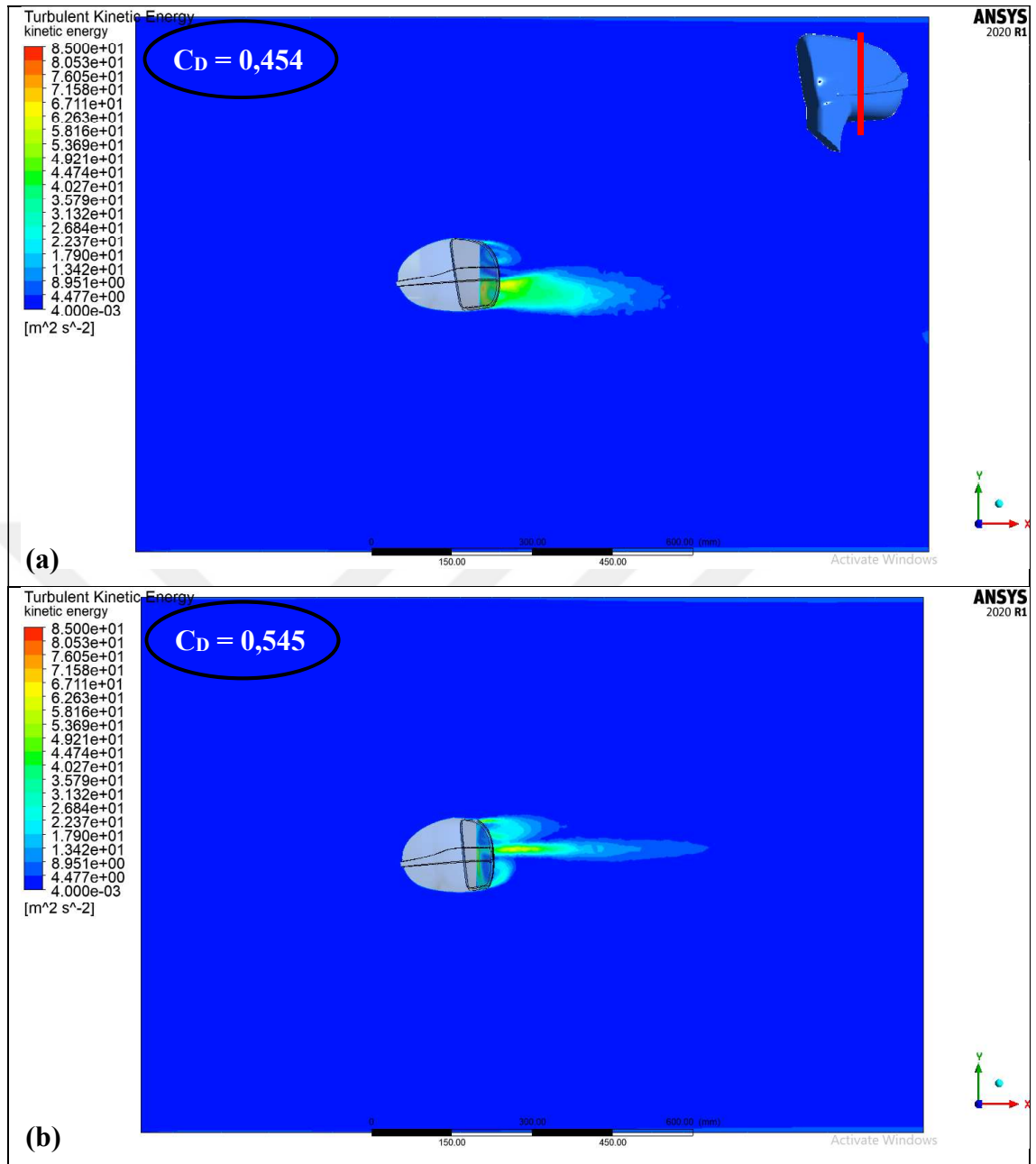


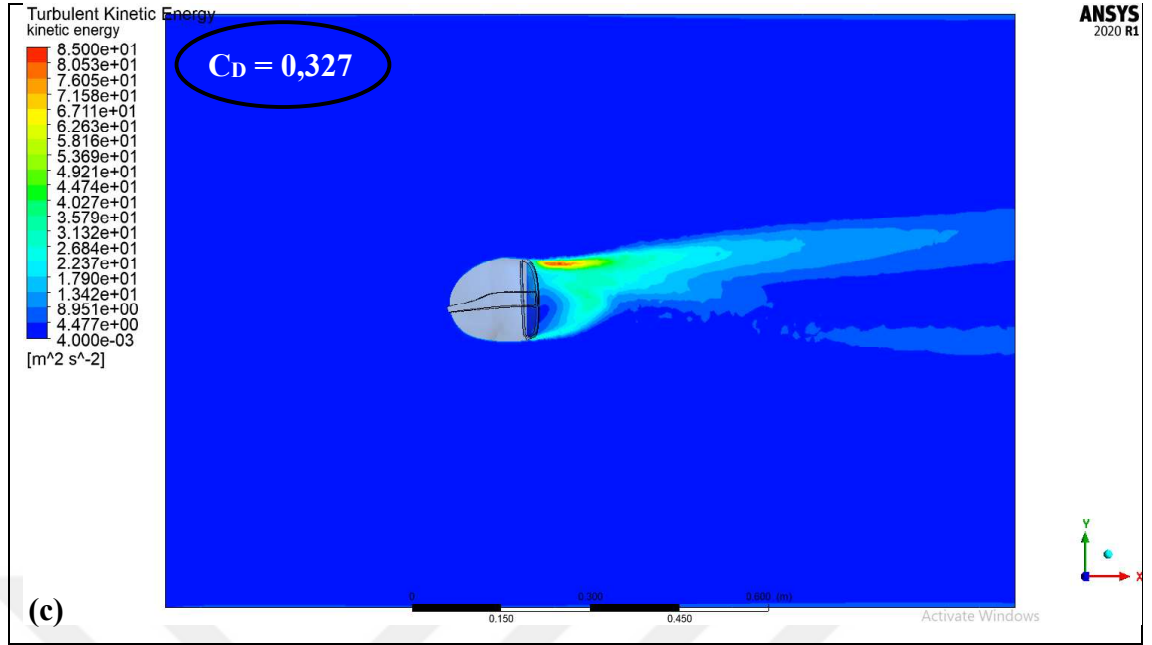
Şekil 4.99. 20 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



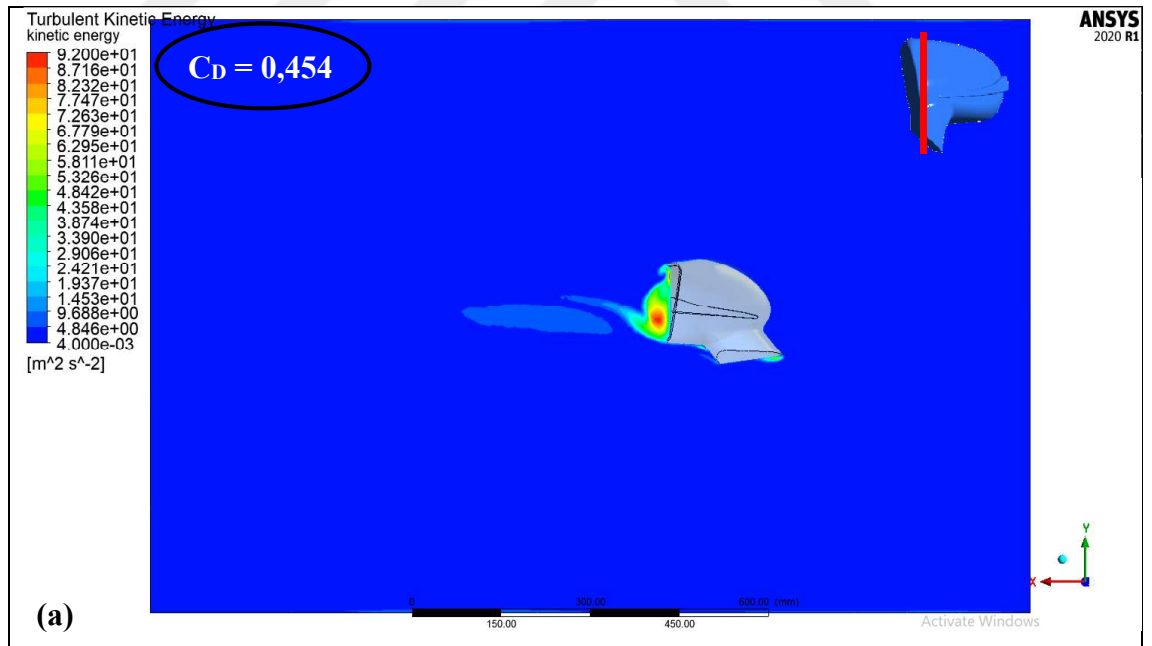


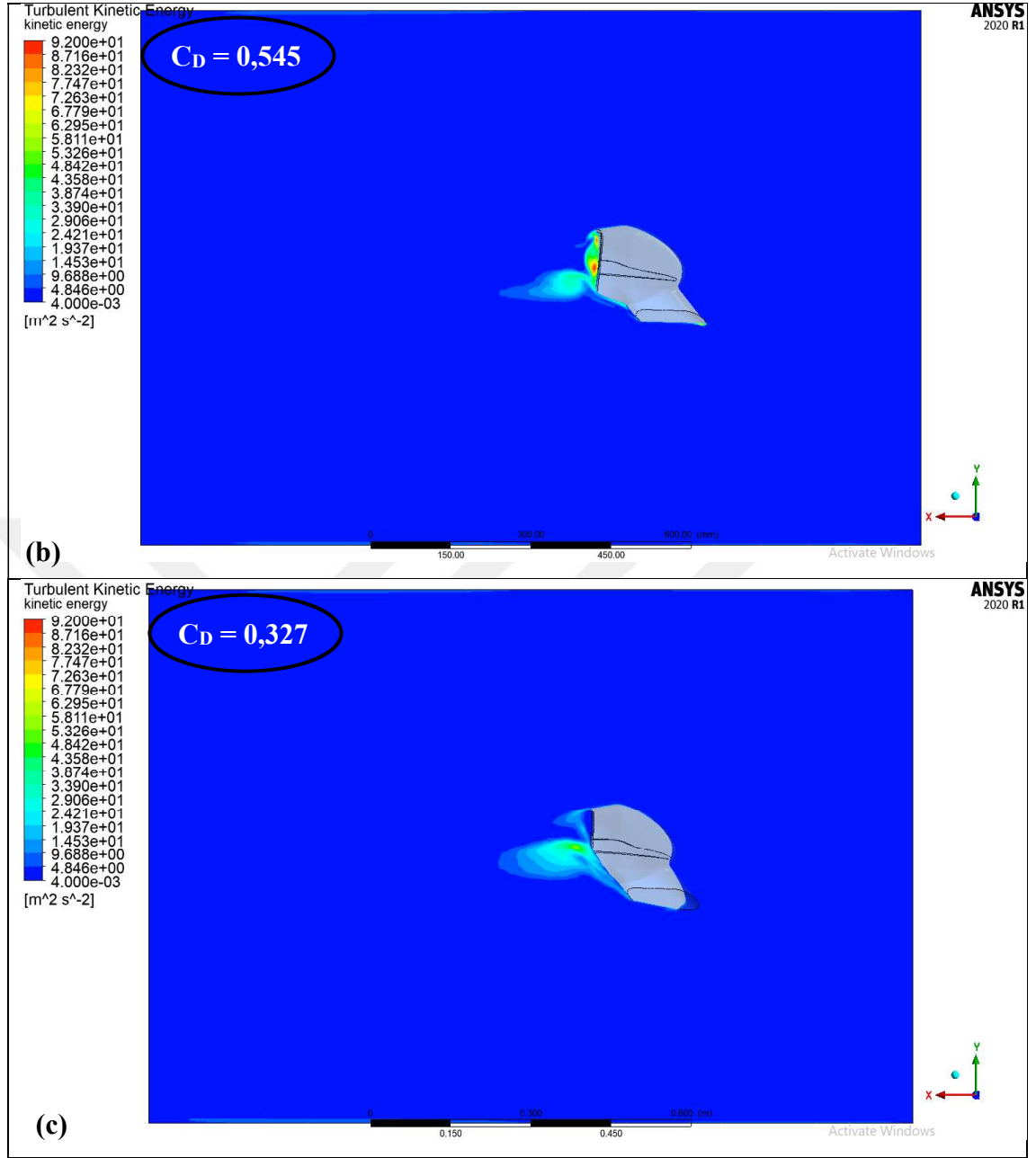
Şekil 4.100. 20 m/s hızda ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



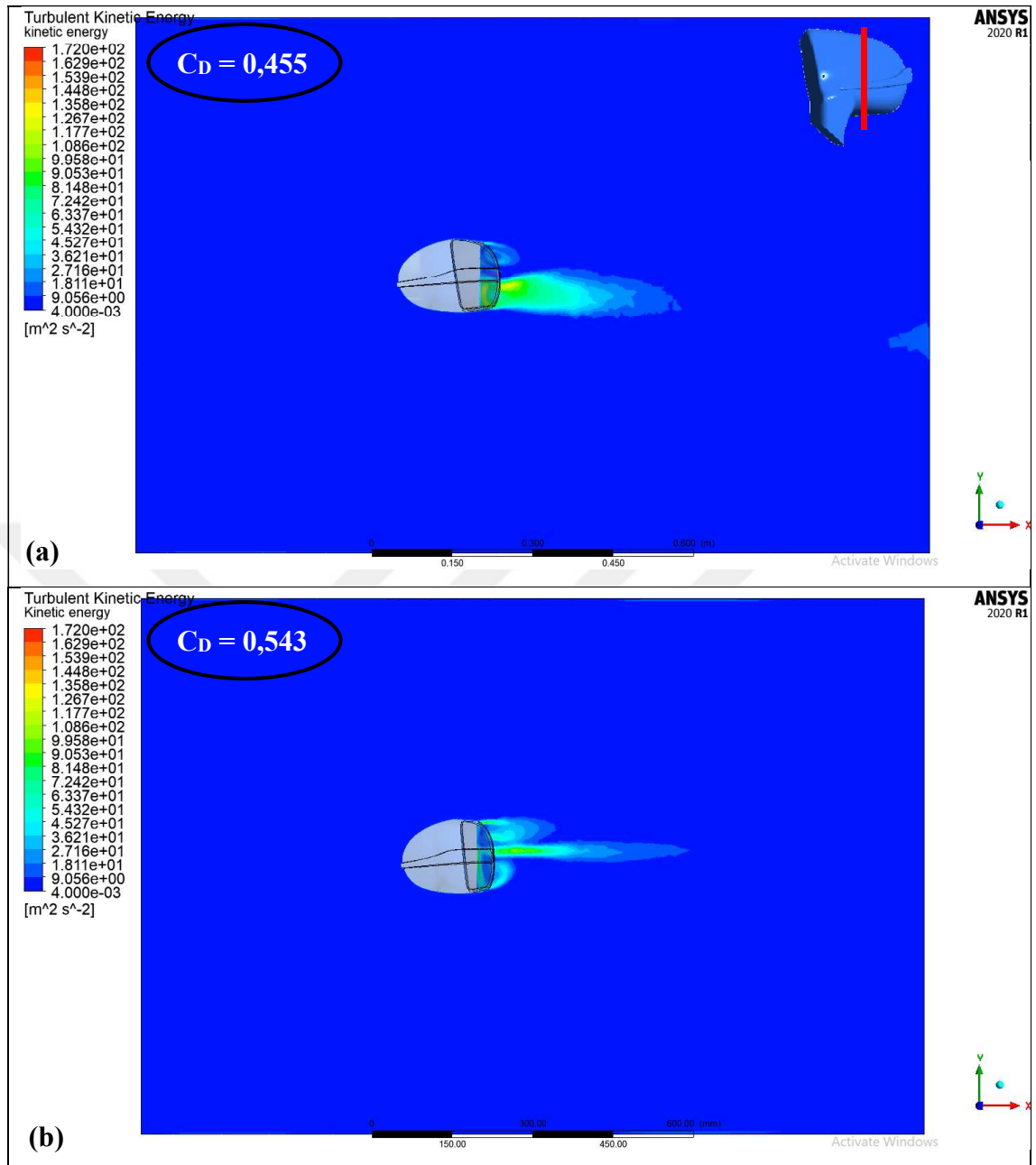


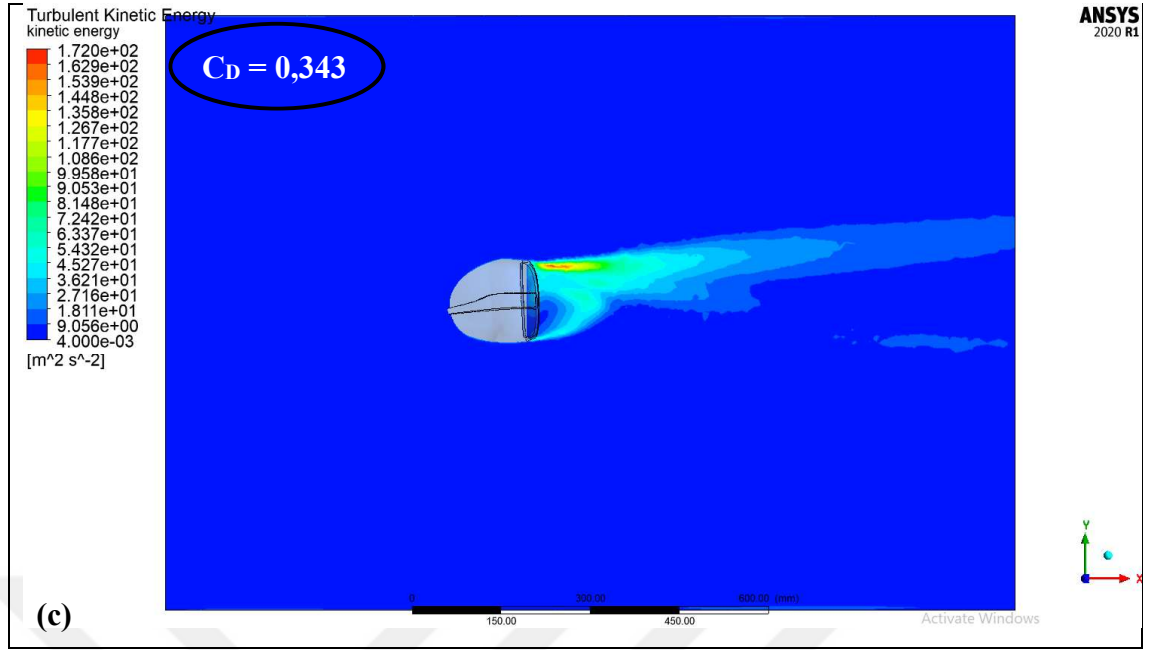
Şekil 4.101. 30 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı



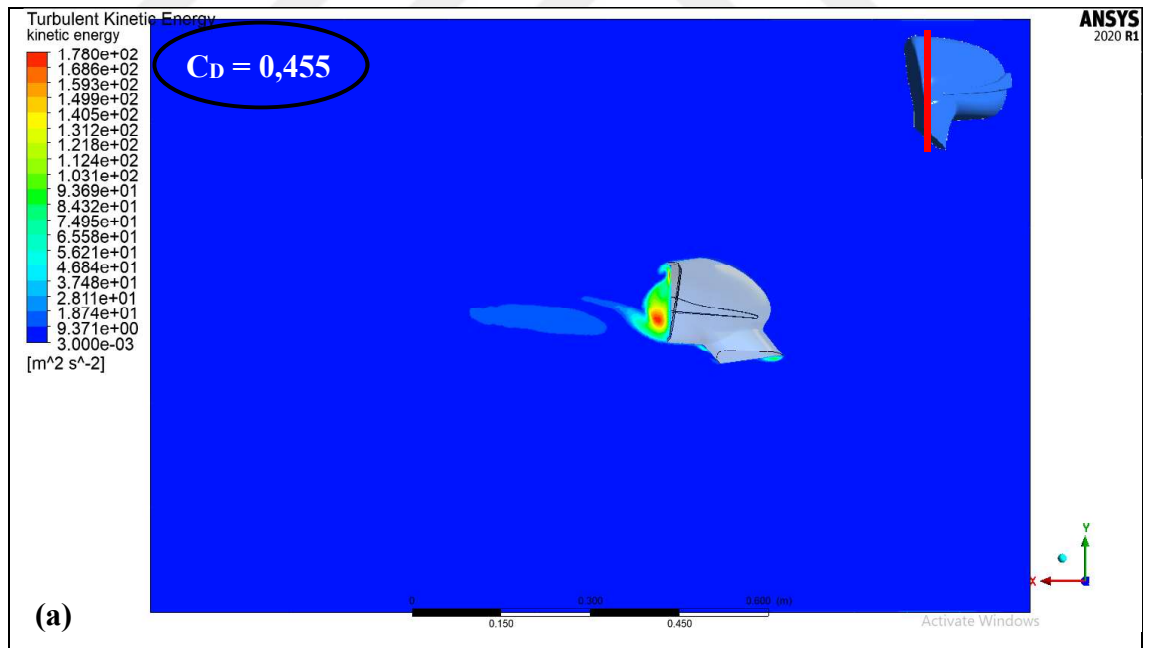


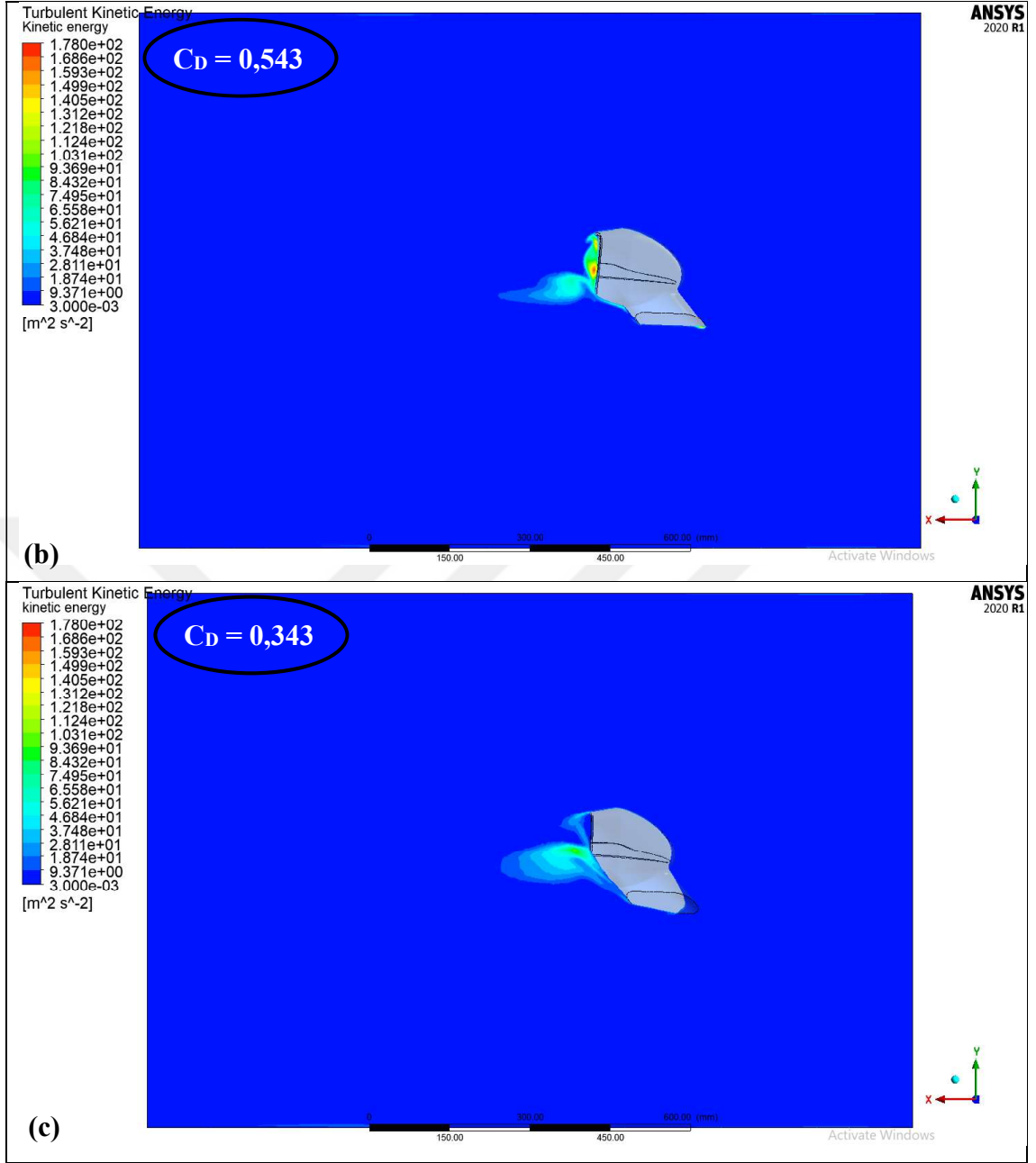
Şekil 4.102. 30 m/s hızda ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: **(a)** $+10^\circ$ sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı





Şekil 4.103. 40 m/s hızda aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) +10° sapma açısı, (b) 0° sapma açısı, (c) -10° sapma açısı





Şekil 4.104. 40 m/s hızda ayna kol bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: **(a)** +10° sapma açısı, **(b)** 0° sapma açısı, **(c)** -10° sapma açısı

4.6. Ayna Geometrik Modellerinin Karşılaştırılması

Her bir ayna modeli için, üçer seviyede ele alınan sapma açısı ve hız değerlerinin her bir kombinasyonu ile elde edilen C_D ve C_L değerleri sırasıyla Çizelge 4.22 ve Çizelge 4.23'te özetlenmiştir.

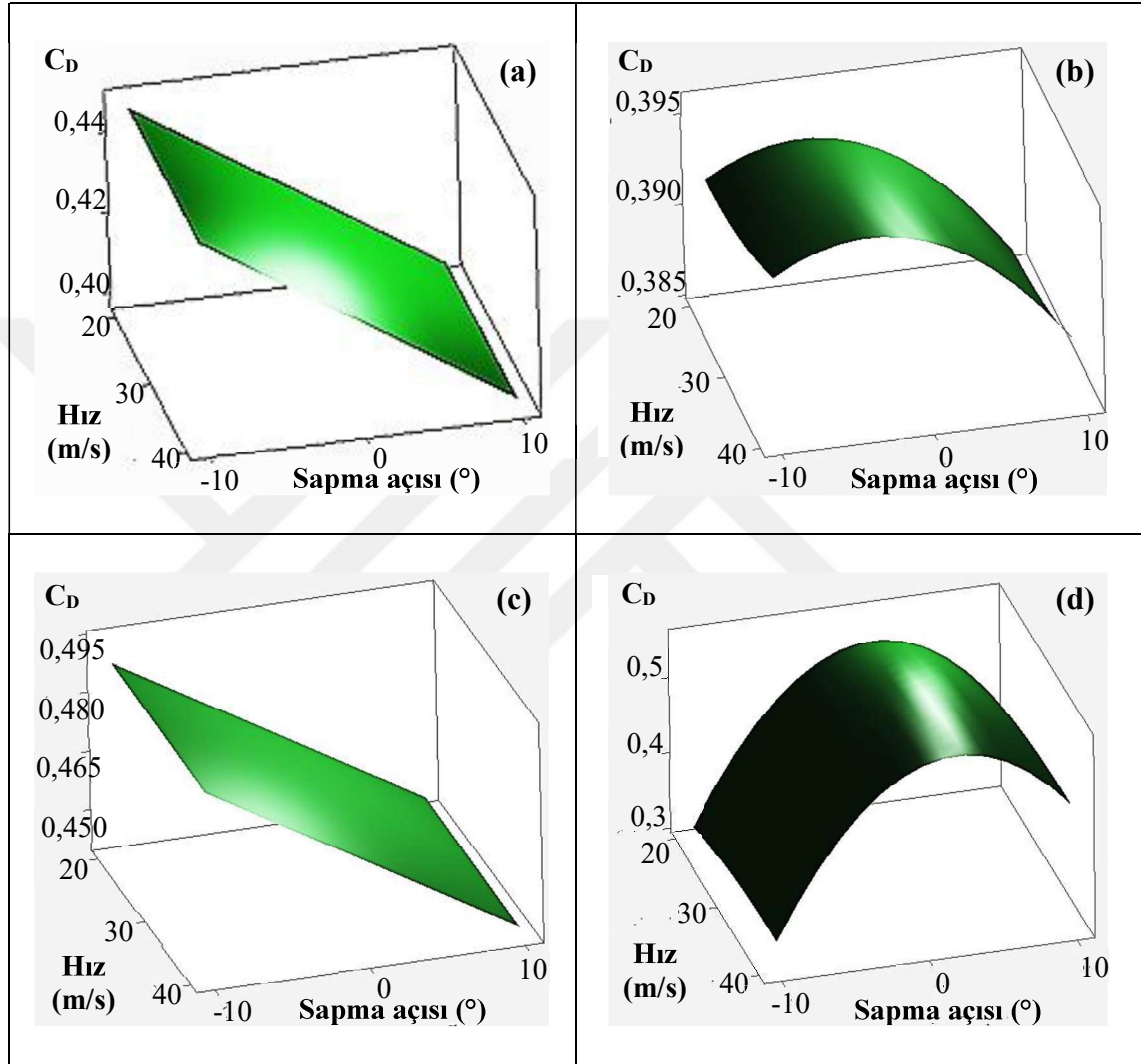
Çizelge 4.22. Her bir ayna modeli için, girdi değişkenlerinin farklı kombinasyonlarına ait sürüklenme katsayıları (C_D)

Ayna Modeli														
			Model 1			Model 2			Model 3			Model 4		
	β (°)	V (m/s)	-10	0	10	-10	0	10	-10	0	10	-10	0	10
			0,444	0,430	0,396	0,391	0,392	0,387	0,488	0,467	0,442	0,304	0,508	0,450
	20		0,444	0,429	0,396	0,392	0,394	0,386	0,488	0,469	0,443	0,327	0,545	0,454
	30		0,444	0,430	0,395	0,395	0,395	0,387	0,487	0,468	0,440	0,343	0,543	0,455

Çizelge 4.23. Her bir ayna modeli için, girdi değişkenlerinin farklı kombinasyonlarına ait kaldırma katsayıları (C_L)

Ayna Modeli														
Model 1			Model 2			Model 3			Model 4					
V (m/s)	β (°)		-10	0	10	-10	0	10	-10	0	10	-10	0	10
	20	0	-0,001	-0,001	-0,001	0,128	0,161	0,162	-0,341	-0,346	-0,331	-0,113	-0,239	-0,024
30	0	-0,001	-0,003	-0,003	-0,003	0,134	0,170	0,172	-0,336	-0,349	-0,335	-0,127	-0,230	-0,026
40	0	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	0,141	0,176	0,176	-0,343	-0,351	-0,338	-0,133	-0,227	-0,023

Girdi (β ve V) ve çıktı (C_D) değişkenleri arasındaki ilişki, Model 1 ve Model 3 için 1. dereceden matematiksel modelle (regresyon modeliyle), Model 2 ve Model 4 için ise ancak ikinci dereceden modelle tanımlanabilmektedir. Bu modellere ait yüzey grafikleri, Şekil 4.105'te görülmektedir.



Şekil 4.105. Her bir ayna modeli için girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayabilen regresyon modellerine ait yüzey grafikleri: **(a)** Model 1, **(b)** Model 2, **(c)** Model 3, **(d)** Model 4

Ayrıca kurulan matematiksel modelin oluşan varyansı açıklayabilme yeteneği olarak görülen belirtme katsayısı (R^2) değerleri Çizelge 4.24'te sunulmuştur. R^2 değerleri her bir ayna modelinde birinci ve ikinci derece modeller için hesaplanmıştır. Matematiksel modellerde değişkenler arasındaki etkileşim dikkate alınmamıştır.

Çizelge 4.24. Her bir ayna modeli için kurulan regresyon modellerine ait R^2 değerleri

Ayna Modeli	Matematiksel Modele ait R^2 Değeri	
	1. Dereceden Model	2. Dereceden Model
Model 1	%94,74*	%99,97
Model 2	%62,17	%94,67*
Model 3	%99,10*	%99,90
Model 4	%38,23	%99,29*

* Tercih edilen matematiksel model

İncelenen 4 ayna modelinde değişkenlerin farklı seviyeleri uygulandığında değişkenlerle ilgili terimlerin C_D üzerinde oluşan varyansa olan etkileri ANOVA yardımıyla analiz edilmiştir. Her bir ayna modeli için anlamlı olan değişkenler ($p < 0,05$) ve % katkı değerleri Çizelge 4.25'te verilmiştir.

Buna göre hiçbir ayna modelinde hızın C_D üzerinde anlamlı bir etkisi görülmemiştir. Sapma açısı ise her ayna modelinde C_D üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olmuştur. Model 2 ve Model 4 için sapma açısının C_D ile ikinci dereceden olan matematiksel ilişkisinde; Model 2'de birinci dereceden terim daha etkiliyken, Model 4'te ikinci dereceden terim daha etkilidir.

Çizelge 4.25. Her bir ayna modeli için, anlamlı olan terimler ve % katkı değerleri

Ayna Modeli	Matematiksel Model Derecesi	Anlamlı Terimler	% Katkı
Model 1	1. derece	β	95
Model 2	2. derece	β	54
		β^2	32
Model 3	1. derece	β	96
Model 4	2. derece	β	37
		β^2	61

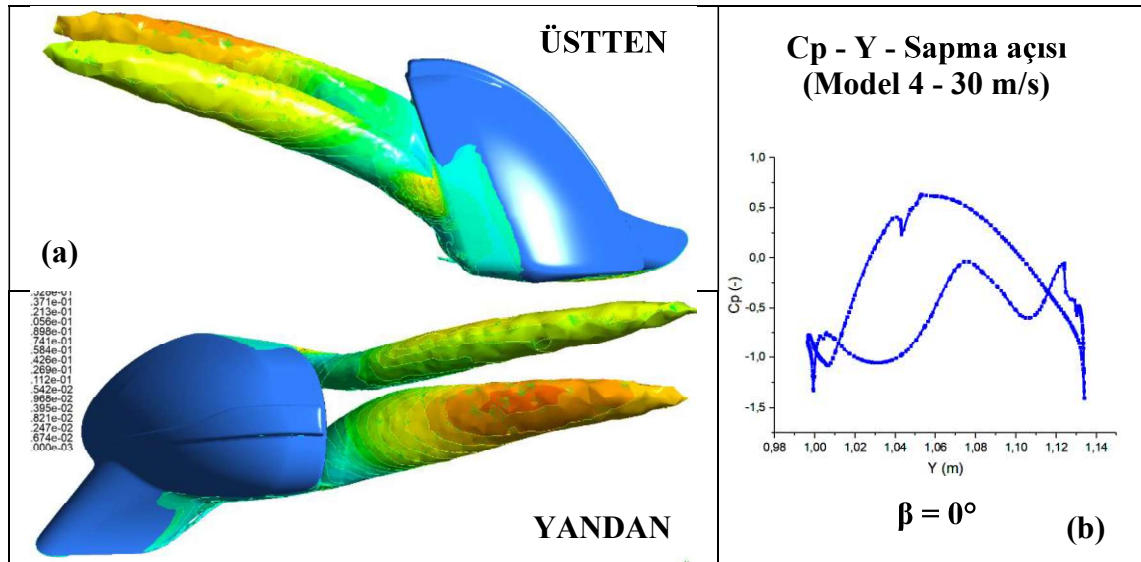
Model 2 ve Model 4 için sapma açısı ile C_D arasındaki ilişkinin ikinci dereceden olması ve ayrıca işaret değiştirmesi; bu ayna modellerinde negatif sapma açılarında boylamasına vortekslerin etkili olmamasına bağlanmıştır.

Bunun için 3 sapma açısı için boylamasına vorteks oluşma durumları (Şekil 4.107) incelenmiştir. Şekilde ayna yan kısmından alınan düzlem etrafındaki 3B akım çizgileri görülmektedir. Akım çizgileri hızın büyüklüğüne göre renklendirilmiştir. Grafikler, her bir ayna modeli kendi içinde aynı hız ölçeğinde olacak şekilde çizdirilmiştir.

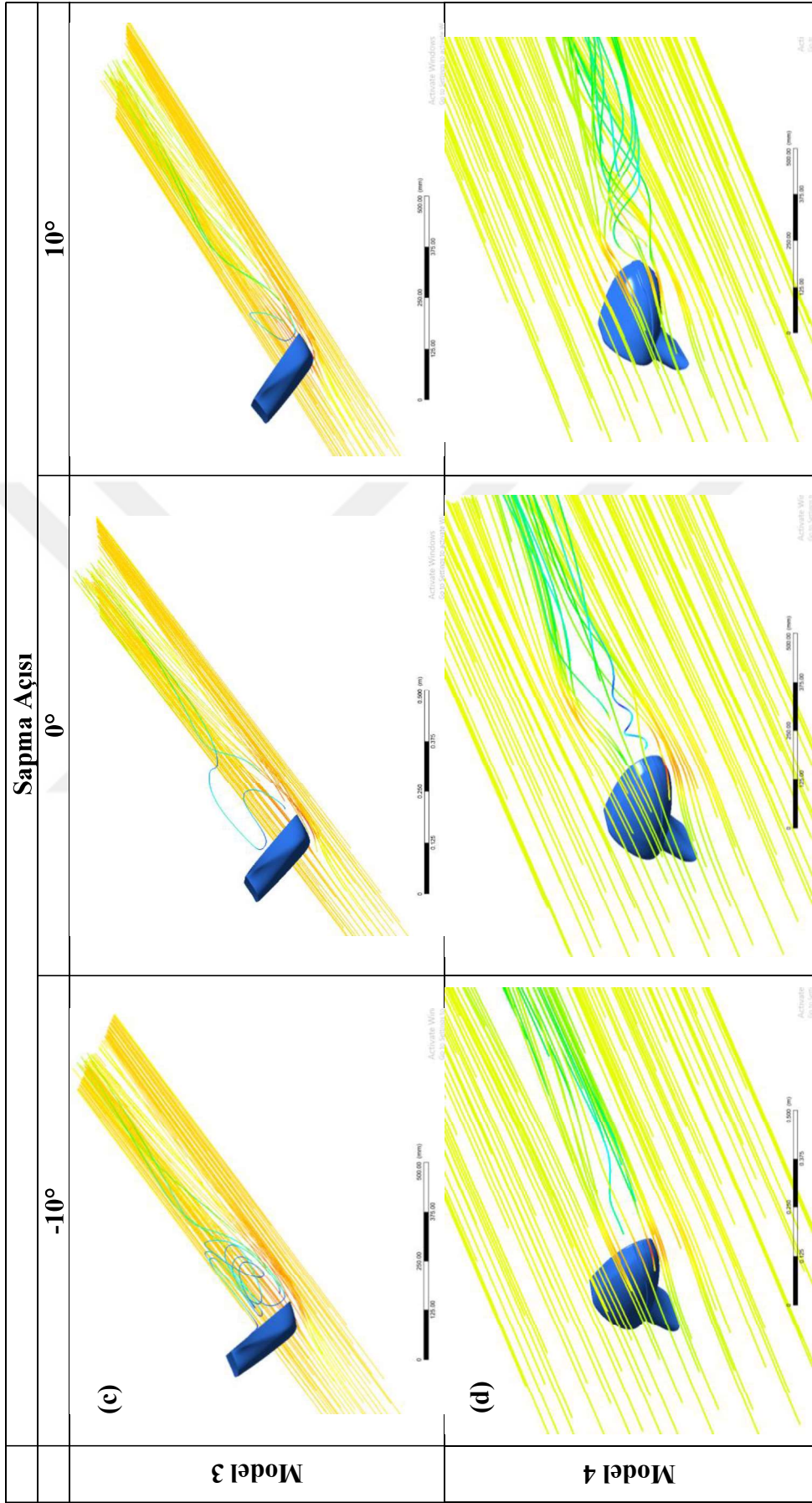
Model 2 ve Model 4'te (özellikle Model 4'te) negatif sapma açılarında boylamasına vorteksler (Şekil 4.107b, Şekil 4.107d) ve dolayısıyla indüktif sürüklenme minimum düzeydedir. Böylece boylamasına vortekslerdeki kinetik enerji kaybı da minimumdur. Sonuçta diğer iki ayna modelindeki aksine negatif sapma açısında C_D düşmektedir.

Model 1 ve Model 3'te negatif sapma açısında yan düzlemdeki akım ayna arkasında enlemesine vorteksler oluşturmuş (Şekil 4.107a, Şekil 4.107c) ve C_D 'deki artışa katkıda bulunmuştur.

Model 4'te aynanın yan kısmında oluşan boylamasına vorteksler, sıfır toplam basınca sahip cisim-ardı bölgesini (türbülans yoğunluğuna göre) gösteren Şekil 4.106a'da görüldüğü gibi, diğer ayna modellerinden farklı olarak ayna arkasında çapraz bir yol kat ederek araçtan uzaklaşmaktadır. Böylece araca kirlilik taşınmasını engellemekte ve araca ulaşan aerodinamik gürültünün azalmasını sağlamaktadır. Bu vortekslerin, arka yüzeydeki C_p dağılımında oluşturduğu salınım Şekil 4.106b'den takip edilebilir.



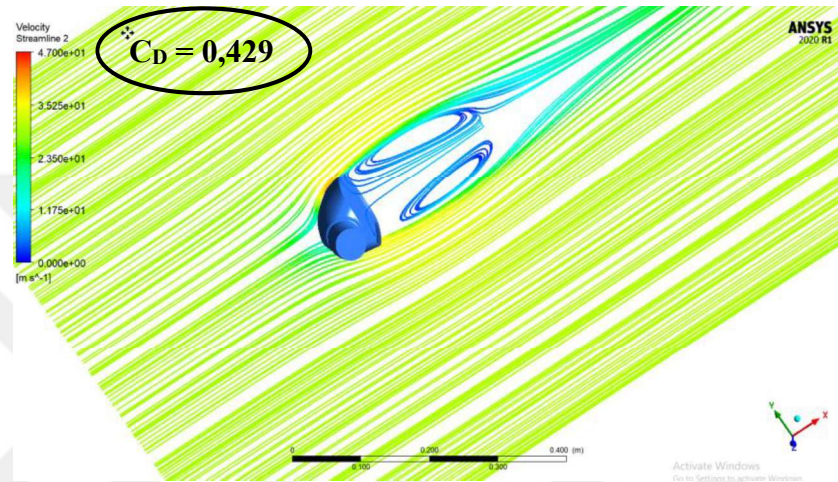
Şekil 4.106. Model 4'te, $V=30$ m/s ve $\beta=0^\circ$ 'de: (a) Aynanın yan kısmında oluşan boylamasına vorteksler, (b) Bu vortekslerin, ayna etrafındaki C_p dağılımına etkisi



Şekil 4.107. Negatif, nötr ve pozitif β açılarında vorteks oluşma durumu ($V=30$ m/s): (a) Model 1, (b) Model 2, (c) Model 3, (d) Model 4

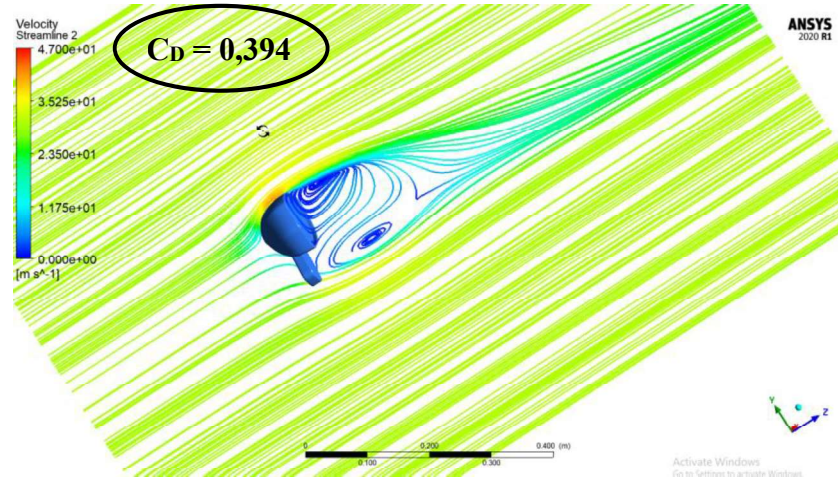
Her bir aynanın cisim-ardı bölgesini değerlendirmek için aynaların orta kısmından alınan düzlemlerdeki akım çizgileri $V=30$ m/s ve $\beta=0^\circ$ için çizdirilerek Şekil 4.108-4.111’de sunulmuştur. Ayna modellerinin cisim-ardı bölgesi incelendiğinde:

- Model 1 ardında (Şekil 4.108) enlemesine vortekslerin dengeli oluştuğu, belirgin bir aşağıya-sapmanın veya yukarıya-sapmanın gerçekleşmediği görülmüştür. Buna göre akım çizgileri simetrik bir şekilde orta bölgelerde birleşmiştir.



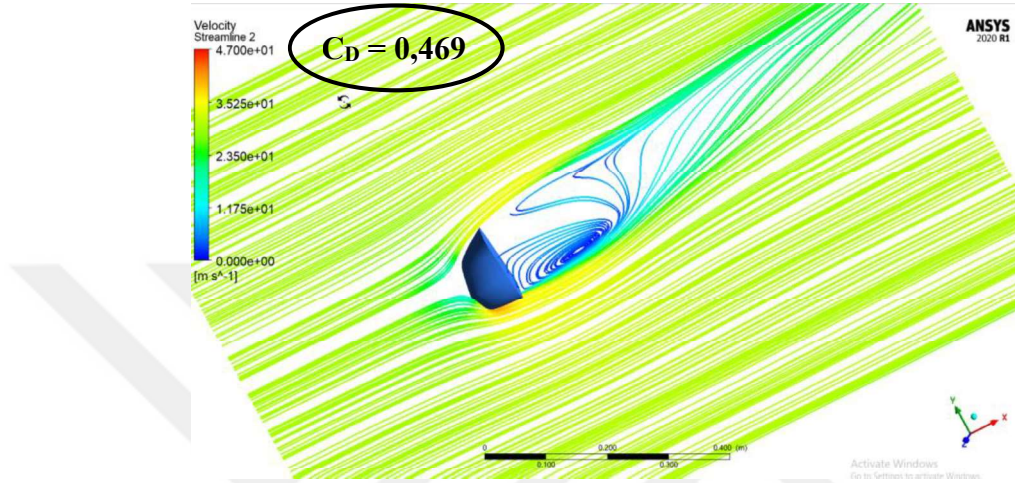
Şekil 4.108. Model 1 için cisim-ardı bölgesini gösteren akım çizgileri ($V=30$ m/s, $\beta=0^\circ$)

- Model 2 ardında (Şekil 4.109) enlemesine vorteks çiftinden üstteki vorteks daha büyük olmasına rağmen, Şekil 4.107’de görülen boylamasına vortekslerin etkisiyle aşağı-sapma olmuştur. Buna göre akım çizgileri alt bölgelerde birleşmiştir.



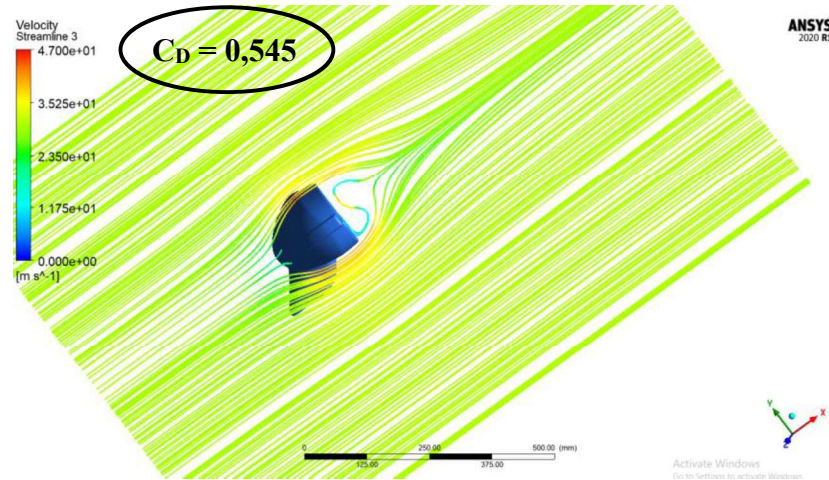
Şekil 4.109. Model 2 için cisim-ardı bölgesini gösteren akım çizgileri ($V=30$ m/s, $\beta=0^\circ$)

- Model 3 ardında (Şekil 4.110) enlemesine vorteks çiftinden alttaki vorteks daha büyüktür. Boylamasına vorteks oluşumu olmadığı için (Şekil 4.107), alttaki vorteksin akışı yukarıya doğru saptırması herhangi bir engelle karşılaşmamıştır. Buna göre akım çizgileri üst bölgelerde birleşmiştir. Bu anlamda akışın dik (squareback) otomobillerin arkasındaki akışla benzeştiği söylenebilir.



Şekil 4.110. Model 3 için cisim-ardı bölgesini gösteren akım çizgileri ($V=30$ m/s, $\beta=0^\circ$)

- Model 4 ardında (Şekil 4.111) akışın kısa mesafede birleştiği görülmektedir. Diğer ayna modellerine göre akımçizgili bir geometri olduğu söylenebilir. Ancak Şekil 4.106’da görülen ve ayna arka yüzeyini çapraz olarak kat eden boylamasına vorteksler akımçizgili bu geometride yüksek sürüklenmeye sebep olmuştur. Akım çizgileri orta bölgelerde birleşmiştir.



Şekil 4.111. Model 4 için cisim-ardı bölgesini gösteren akım çizgileri ($V=30$ m/s, $\beta=0^\circ$)

4.7. Model 1 – Bağlama Kolu Geometrisi Etkisi

Bağlama kolu geometrisiyle ilgili yapılan nümerik analizlerde $\beta=0^\circ$ sapma açısı ve $V=30$ m/s hız kullanılmıştır. Model 1 için oluşturulan Taguchi deney planı ve sonuçları Çizelge 4.26’da sunulmuştur. Minimum C_D istendiği için, S/G denklemi olarak “en küçük en iyi” seçilmiştir. Verilen C_D değerleri ayrı olarak kol bölgesi için değil tüm ayna içindir.

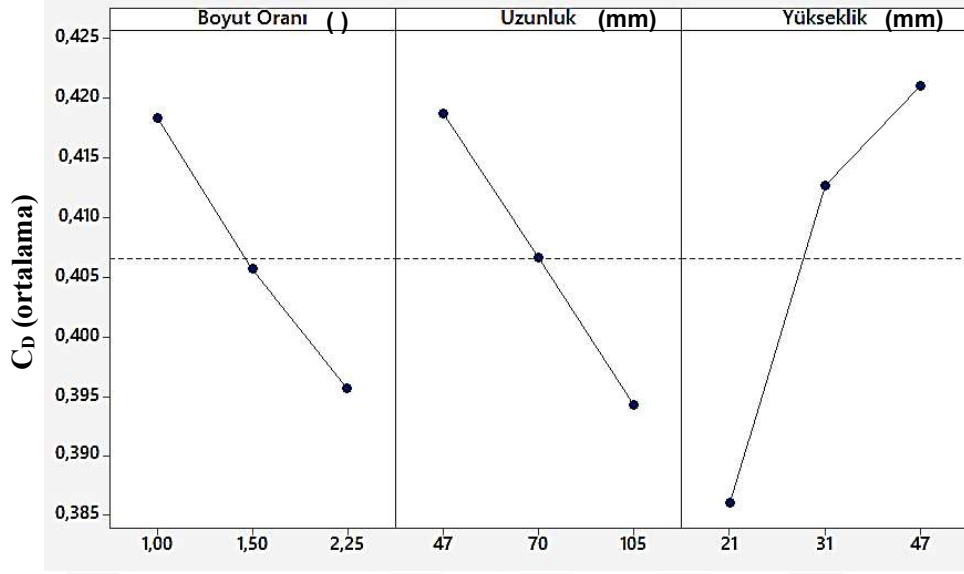
Çizelge 4.26. Model 1 için deney planı ve sonuçlar

Analiz No	Boyut Oranı ()	Uzunluk (mm)	Yükseklik (mm)	C_D ()	S/G Değeri ()
T1	1,5	47	31	0,420	7,53501
T2	1,5	70	21	0,389	8,20101
T3	1,5	105	47	0,408	7,78680
T4	1	47	21	0,410	7,74432
T5*	1	70	47	0,429	7,35085
T6	1	105	31	0,416	7,61813
T7	2,25	47	47	0,426	7,41181
T8	2,25	70	31	0,402	7,91548
T9	2,25	105	21	0,359	8,89811

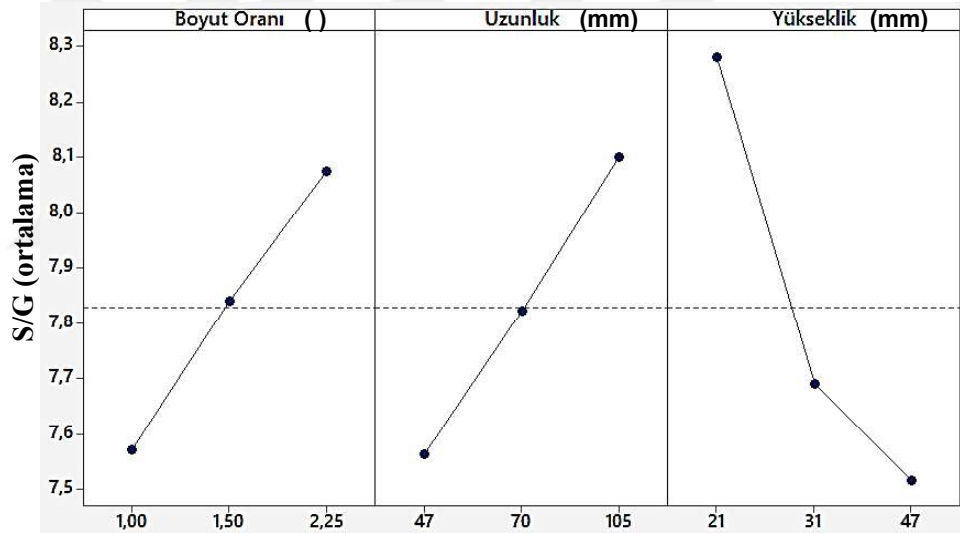
* Referans geometri

T5 geometrisi (Bölüm 4.2’de incelenen, Model 1 için referans geometri) en yüksek sürüklenme katsayısına, T9 geometrisi ise en düşük sürüklenme katsayısına sahip olmuştur.

Şekil 4.112 ve 4.113’te yer alan ortalama C_D ve S/G değerleri için ana etki grafikleri incelendiğinde, boyut oranı ve uzunluk arttıkça C_D değerinin düştüğü, yükseklik arttıkça ise C_D değerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca değişim eğimlerine bakıldığında bu ayna profili için boyut oranı ve uzunluğa nispeten, yükseklik parametresinin C_D üzerinde daha etkili olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.112. Model 1 için ortalama C_D değerlerine ait ana etki grafiği



Şekil 4.113. Model 1 için ortalama S/G değerlerine ait ana etki grafiği

Analizlerden elden edilen sürüklenme katsayısı değerleri varyans analizi yapılarak değerlendirilmiş ve Çizelge 4.27’de matematiksel modelin güvenilirliği ve seçilen faktörlerin % katkı değerleri sunulmuştur. Elde edilen p-değerleri incelendiğinde C_D değişiminde her 3 faktörün de anlamlı olduğu ($p < 0,05$) görülmektedir. Ayrıca belirleme katsayısının değeri ($R^2 \approx 0,88$) bu 3 faktörle oluşturulan matematiksel modelin, bu 3 faktörün C_D üzerinde meydana getirdiği değişkenliği büyük oranda açıklayabildiğini göstermektedir. Faktörlerin toplam değişime % katkı değerlerine bakıldığında %44,28 ile yüksekliğin incelenen faktörler arasında en etkili faktör olduğu anlaşılmaktadır.

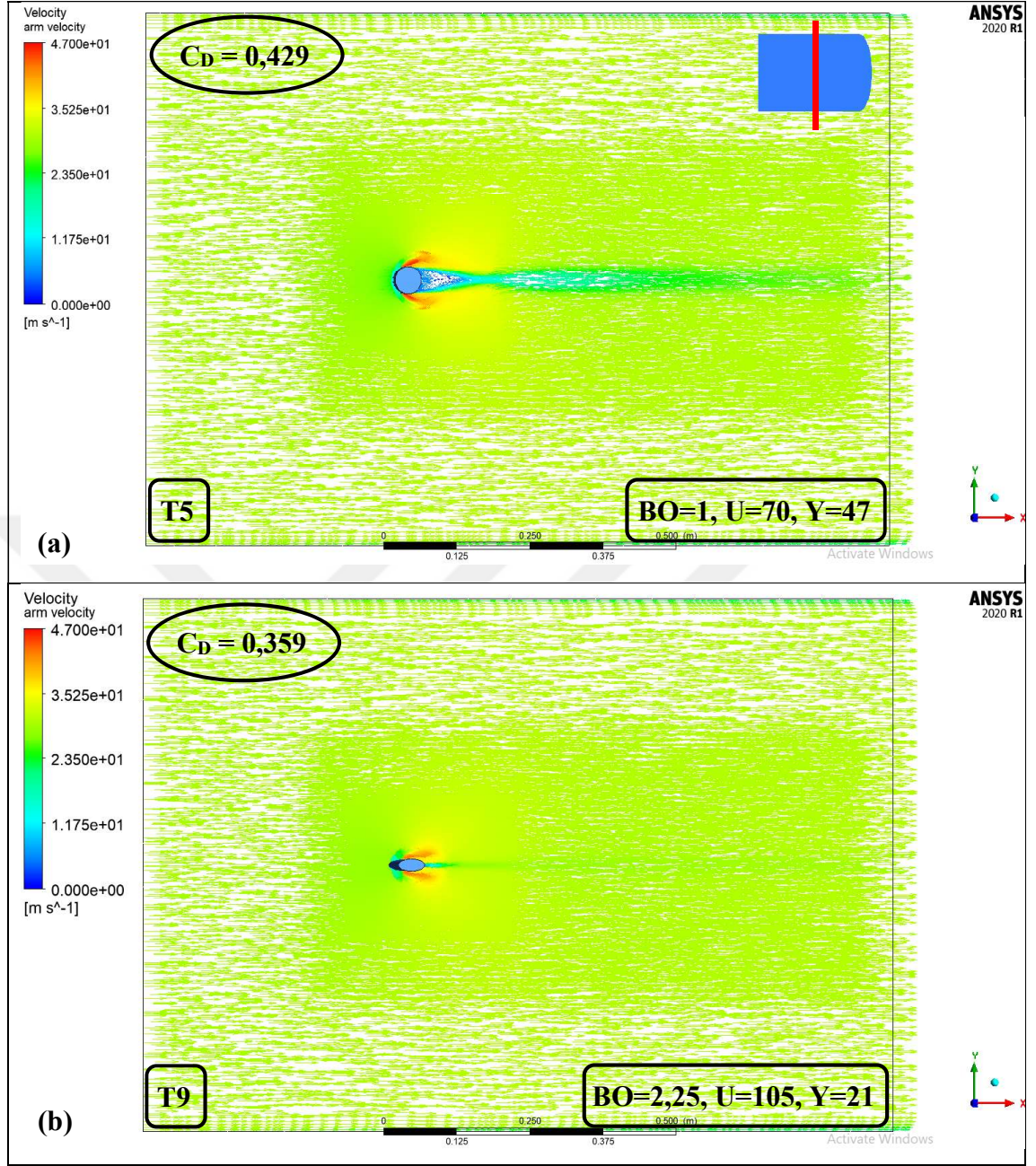
Çizelge 4.27. Model 1’de C_D için ANOVA sonuçları

Değişim Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	p	% Katkı
Regresyon	3	0,003289	0,001096	11,73	0,011	
Boyut Oranı	1	0,000749	0,000749	8,01	0,037	19,94
Uzunluk	1	0,000877	0,000877	9,39	0,028	23,35
Yükseklik	1	0,001663	0,001663	17,79	0,008	44,28
Hata	5	0,000467	0,000093			12,43
Toplam	8	0,003756				

Matematiksel Modelin Özeti		
S	R ²	R ² (düzelt.)
0,0096681	%87,56	%80,09

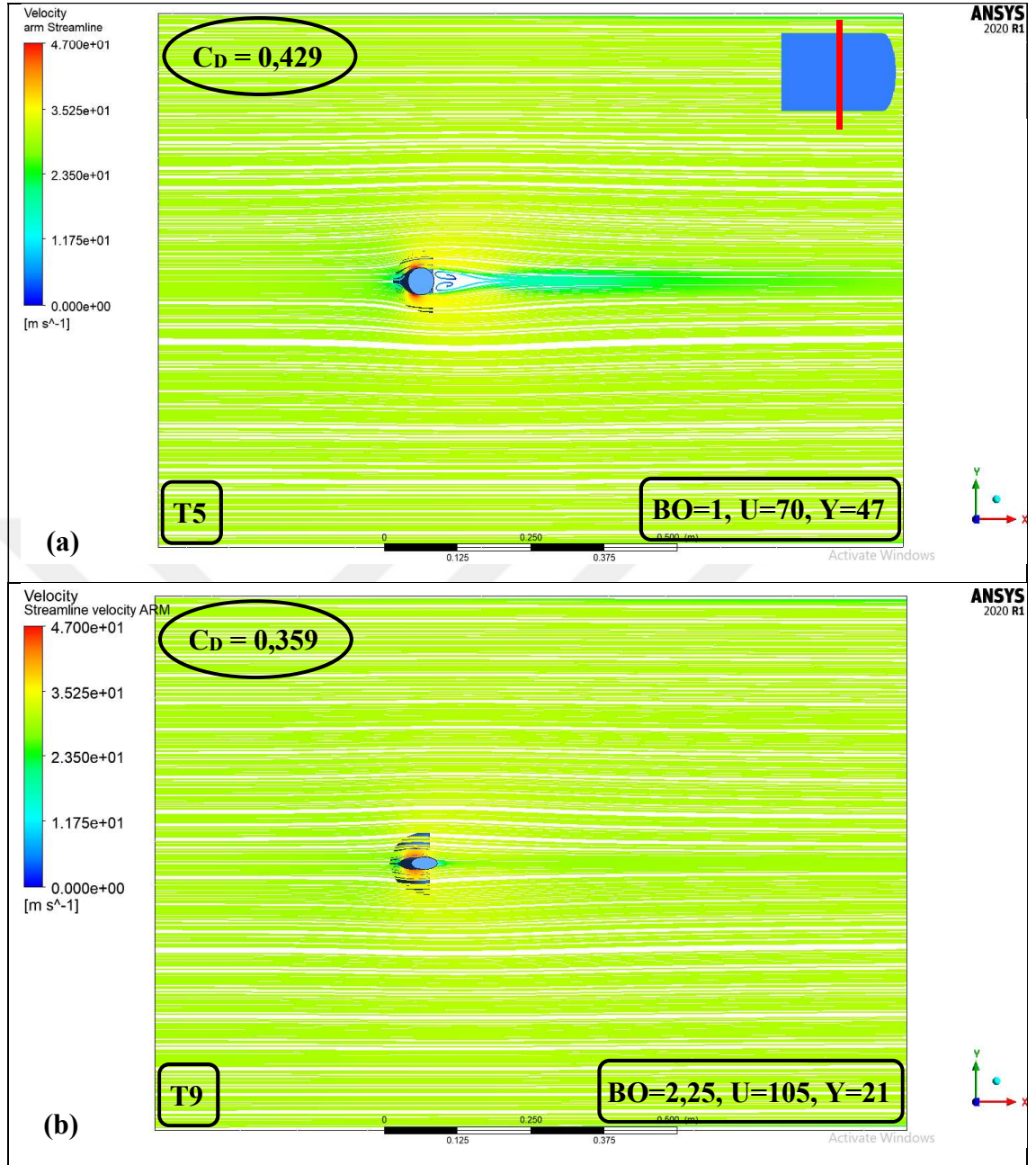
Nümerik analizlere ait hız vektörleri, akım çizgileri, basınç ve türbülans kinetik enerjisi dağılımları ve cisim-ardında (toplam basınç = 0 bölgesinde) türbülans yoğunlukları incelenmiştir. Analiz sonuçlarıyla elde edilen istatistiksel çıkarımlar aerodinamik açıdan açıklanmaya çalışılmıştır.

Şekil 4.114’te ayna bağlama kolunun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri gösterilmiştir. Akışın ilk çarptığı noktada hızın durduğu kolun alt ve üst kısımlarında ise hızın maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Şekil 4.114a’ya (T5 geometrisine) bakıldığında akışın erken ayrıldığı ve kolun arka kısmında diğer geometriye göre geniş vortekslerin oluştuğu fark edilmektedir. Yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisinde oluşan maksimum hız 46,28 m/s iken, düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T9 geometrisinde oluşan maksimum hız 43,63 m/s’dir.



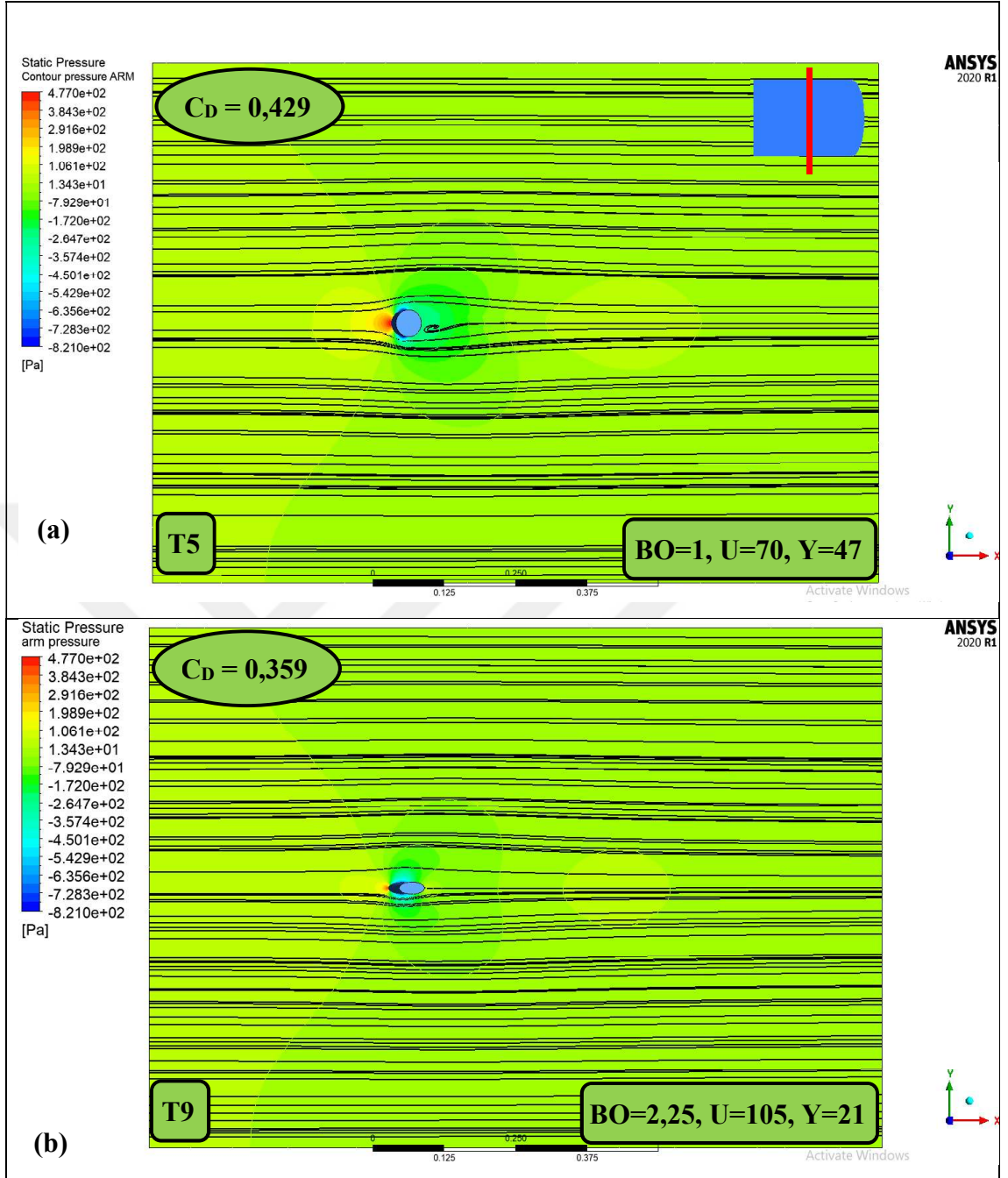
Şekil 4.114. Kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: **(a)** En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi, **(b)** En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T9 geometrisi

Şekil 4.115'te yüksek ve düşük sürüklenme katsayısına sahip geometrik modellerin hız akım çizgileri sunulmuştur. T5 geometrisinde (Şekil 4.114a) ayna kolu arkasında birbirine ters yönlü hız vektörlerinin oluşturduğu vorteks çifti sürüklenme katsayısının artmasına neden olmaktadır.



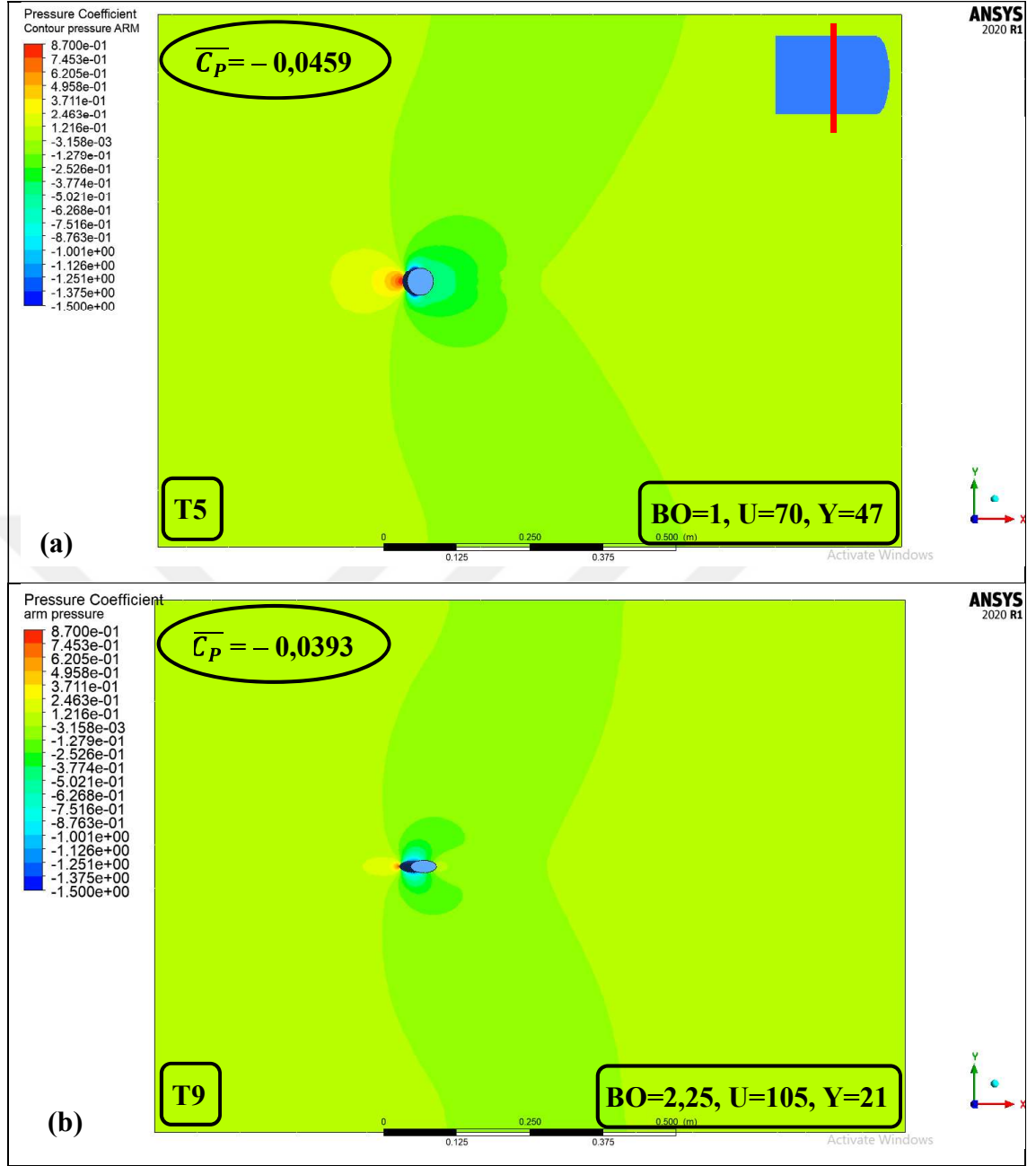
Şekil 4.115. Kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: **(a)** En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi, **(b)** En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T9 geometrisi

Şekil 4.116’da kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları verilmiştir. Maksimum basıncın hızın durduğu noktada oluştuğu, minimum basıncın ise hızın maksimum olduğu alt ve üst kısımlarda akışın doğası gereği oluştuğu görülmektedir. Fakat yüksek sürüklenme katsayısına sahip geometrik modelin arkasında oluşan vorteks bölgelerinde daha düşük basınçların oluştuğu görülmüştür.



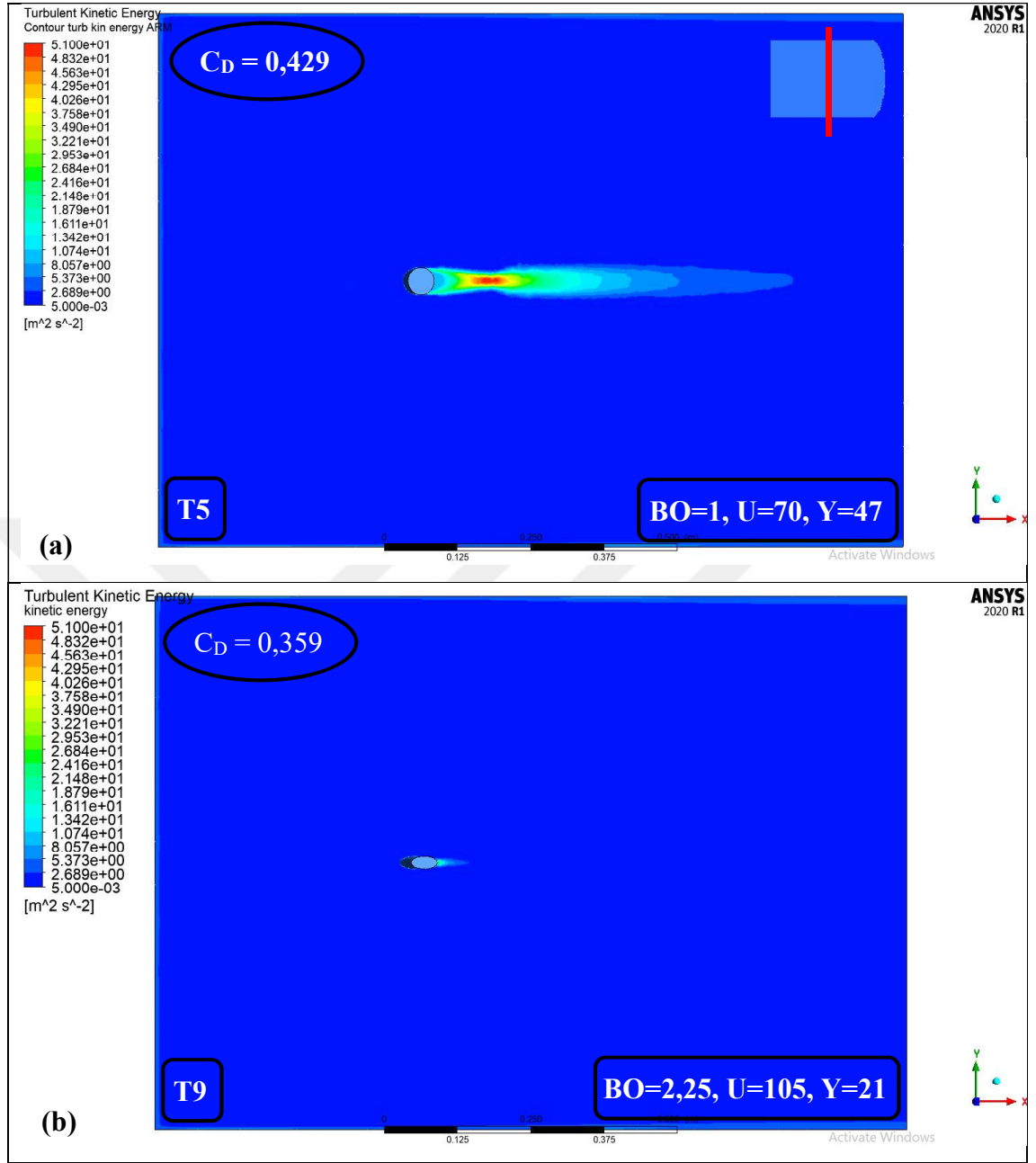
Şekil 4.116. Kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: **(a)** En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi, **(b)** En düşük sürüklenme katsayısına sahip T9 geometrisi

Şekil 4.117’de kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımları ve bulunulan düzlemdeki ortalama basınç katsayısı değerleri verilmiştir. Yüksek sürüklenme katsayısına sahip T5 modelinin ortalama basınç katsayısı değeri, düşük sürüklenme katsayısına sahip T9 modelinin ortalama basınç katsayısı değerinden daha düşük çıkmıştır.



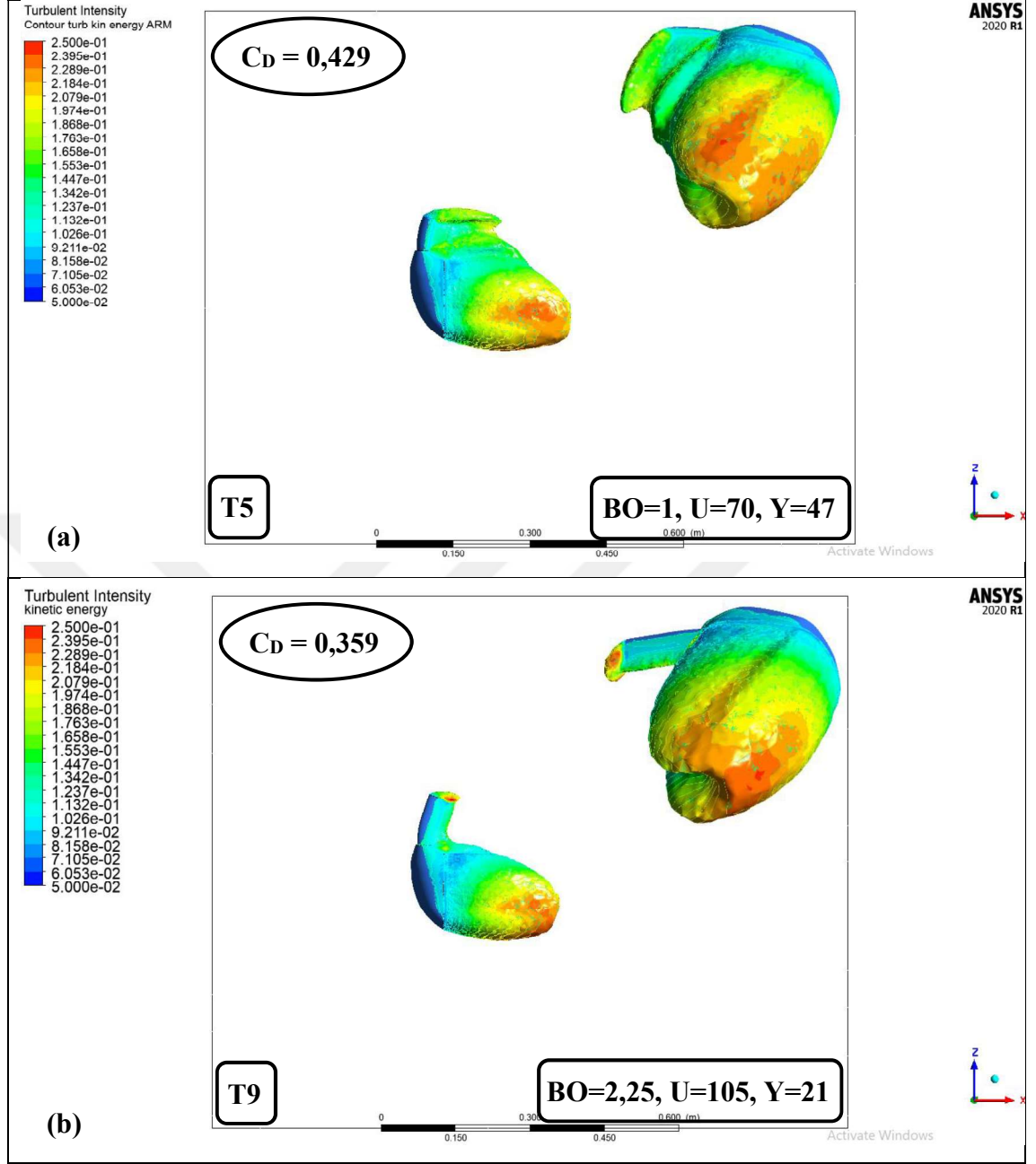
Şekil 4.117. Kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: **(a)** En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi, **(b)** En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T9 geometrisi

Şekil 4.118’de kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımları gösterilmiştir. Kol arkası alanda en yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi için maksimum türbülans kinetik enerjisi $50,67 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olarak ölçülürken, en düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T9 geometrisi için bu değer $38,86 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olmuştur.



Şekil 4.118. Kolun orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: **(a)** En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi, **(b)** En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T9 geometrisi

Şekil 4.119’da geometrik modellere ait cisim-ardı bölgesi (toplam basınç = 0) ve bu bölgedeki türbülans yoğunluğu dağılımı verilmiştir. En kötü sonucu veren T5 geometrisinde özellikle kol bölgesinde cisim-ardı bölgesinin büyüdüğü görülmektedir. Ayrıca ayna gövdesi kısmında kola yakın bölgelerde türbülans yoğunluğunun arttığı fark edilmektedir.



Şekil 4.119. Cisim-ardı bölgesi (toplam basınç = 0) ve bu bölgedeki türbülans yoğunluğu dağılımı: **(a)** En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T5 geometrisi, **(b)** En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T9 geometrisi

4.8. Model 2 – Bağlama Kolu Geometrisi Etkisi

Bağlama kolu geometrisiyle ilgili yapılan nümerik analizlerde $\beta=0^\circ$ sapma açısı ve $V=30$ m/s hız kullanılmıştır. Model 2 için oluşturulan Taguchi deney planı ve sonuçları Çizelge 4.28’de sunulmuştur. Minimum C_D istendiği için S/G denklemi olarak “en küçük en iyi” seçilmiştir. Verilen C_D değerleri ayrı olarak kol bölgesi için değil tüm ayna içindir.

Çizelge 4.28. Model 2 için deney planı ve sonuçlar

Analiz No	Boyut Oranı ()	Uzunluk (mm)	Yükseklik (mm)	C_D ()	S/G Değeri ()
T1	0,45	57	29	0,318	9,9515
T2*	0,45	85	44	0,394	8,0901
T3	0,45	128	66	0,483	6,3211
T4	0,68	85	29	0,324	9,7891
T5	0,68	128	44	0,378	8,4502
T6	0,68	57	66	0,360	8,8739
T7	1	128	29	0,308	10,2290
T8	1	57	44	0,255	11,8692
T9	1	85	66	0,285	10,9031

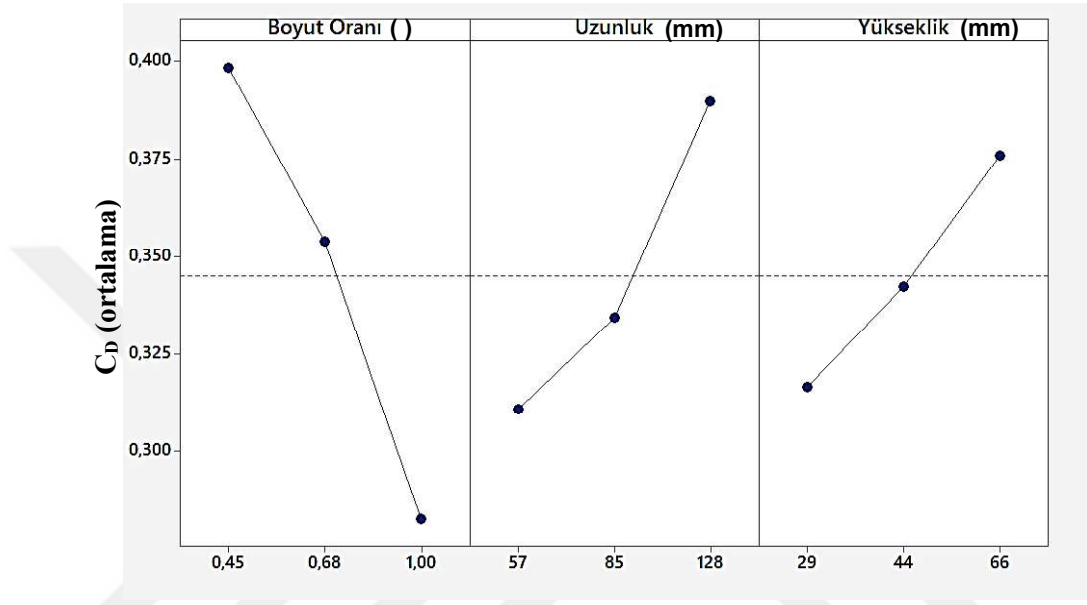
* Referans geometri

T2 geometrisi Bölüm 4.3’te incelenen Model 2 için referans geometridir. T3 geometrisi en yüksek sürüklenme katsayısına, T8 geometrisi ise en düşük sürüklenme katsayısına sahip olmuştur.

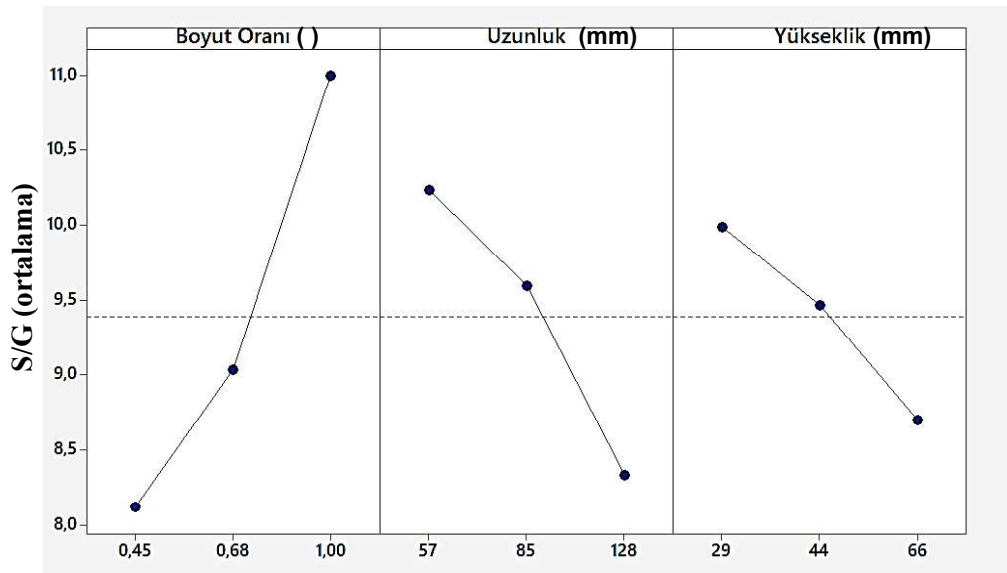
Şekil 4.120 ve 4.121’de yer alan ortalama C_D ve S/G değerleri için ana etki grafikleri incelendiğinde; boyut oranı arttıkça C_D değerinin düştüğü, uzunluk ve yükseklik arttıkça ise C_D değerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca değişim eğimlerine bakıldığında bu ayna profili için uzunluğa ve yüksekliğe nispeten, boyut oranı parametresinin C_D üzerinde daha etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Analizlerden elde edilen sürüklenme katsayısı değerleri varyans analizi yapılarak değerlendirilmiş ve Çizelge 4.29’da matematiksel modelin güvenilirliği ve seçilen faktörlerin % katkı değerleri sunulmuştur. Elde edilen p-değerleri incelendiğinde C_D

değişiminde her 3 faktörün de anlamlı olduğu ($p<0,05$) görülmektedir. Ayrıca belirleme katsayısını değeri ($R^2\approx 0,96$) bu 3 faktörle oluşturulan matematiksel modelin, bu 3 faktörün C_D üzerinde meydana getirdiği değişkenliği büyük oranda açıklayabildiğini göstermektedir. Faktörlerin toplam değişime % katkı değerlerine bakıldığında %55,14 ile boyut oranının incelenen faktörler arasında en etkili faktör olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.120. Model 2 için ortalama C_D değerlerine ait ana etki grafiği



Şekil 4.121. Model 2 için ortalama S/G değerlerine ait ana etki grafiği

Çizelge 4.29. Model 2’de C_D için ANOVA sonuçları

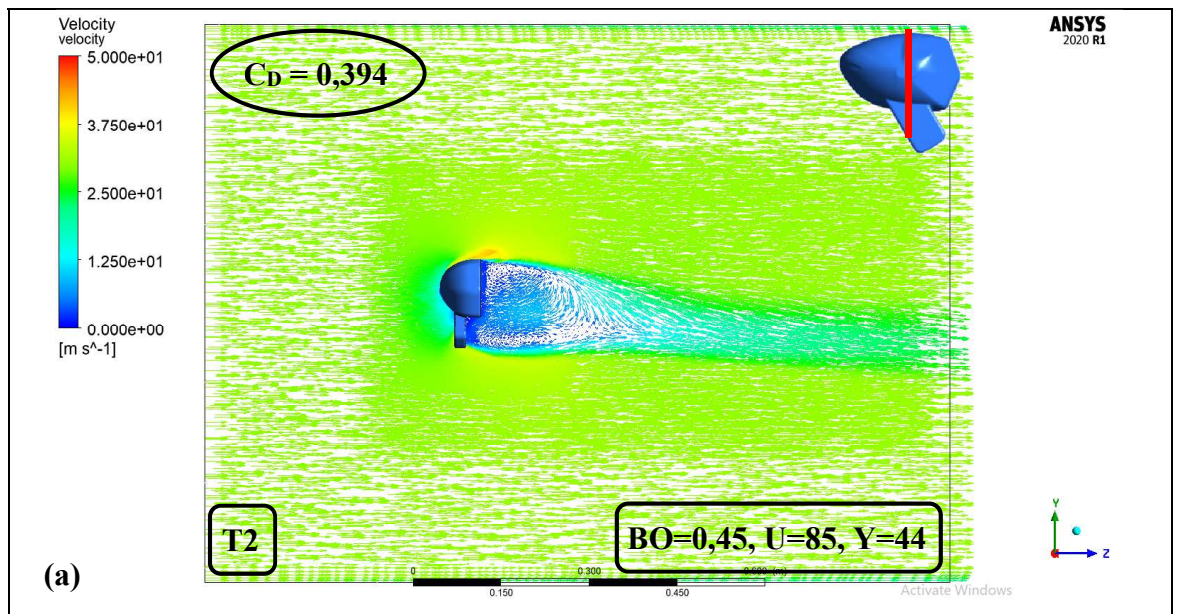
Değişim Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	p	% Katkı
Regresyon	3	0,035386	0,011795	36,59	0,001	
Boyut Oranı	1	0,020400	0,020400	63,28	0,001	55,14
Uzunluk	1	0,009678	0,009678	30,02	0,003	26,16
Yükseklik	1	0,005308	0,005308	16,46	0,010	14,35
Hata	5	0,001612	0,000322			4,36
Toplam	8	0,036998				

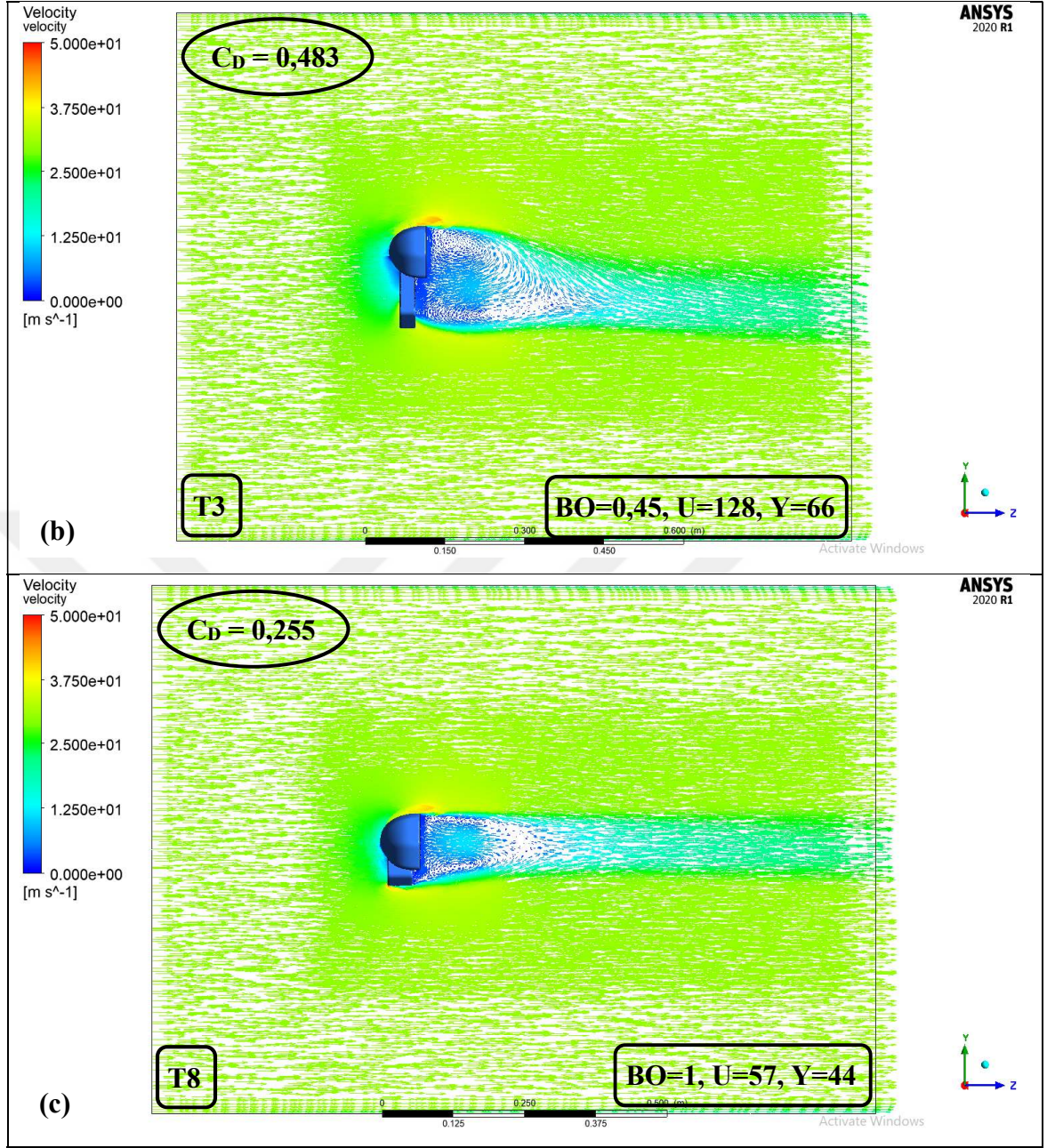
Matematiksel Modelin Özeti

S	R ²	R ² (düzelt.)
0,0179554	%95,64	%93,03

Nümerik analizlere ait hız vektörleri, akım çizgileri, basınç ve türbülans kinetik enerjisi dağılımları ve cisim-ardında (toplam basınç = 0 bölgesinde) türbülans yoğunlukları incelenmiştir. Elde edilen istatistiksel çıkarımlar aerodinamik açıdan açıklanmaya çalışılmıştır.

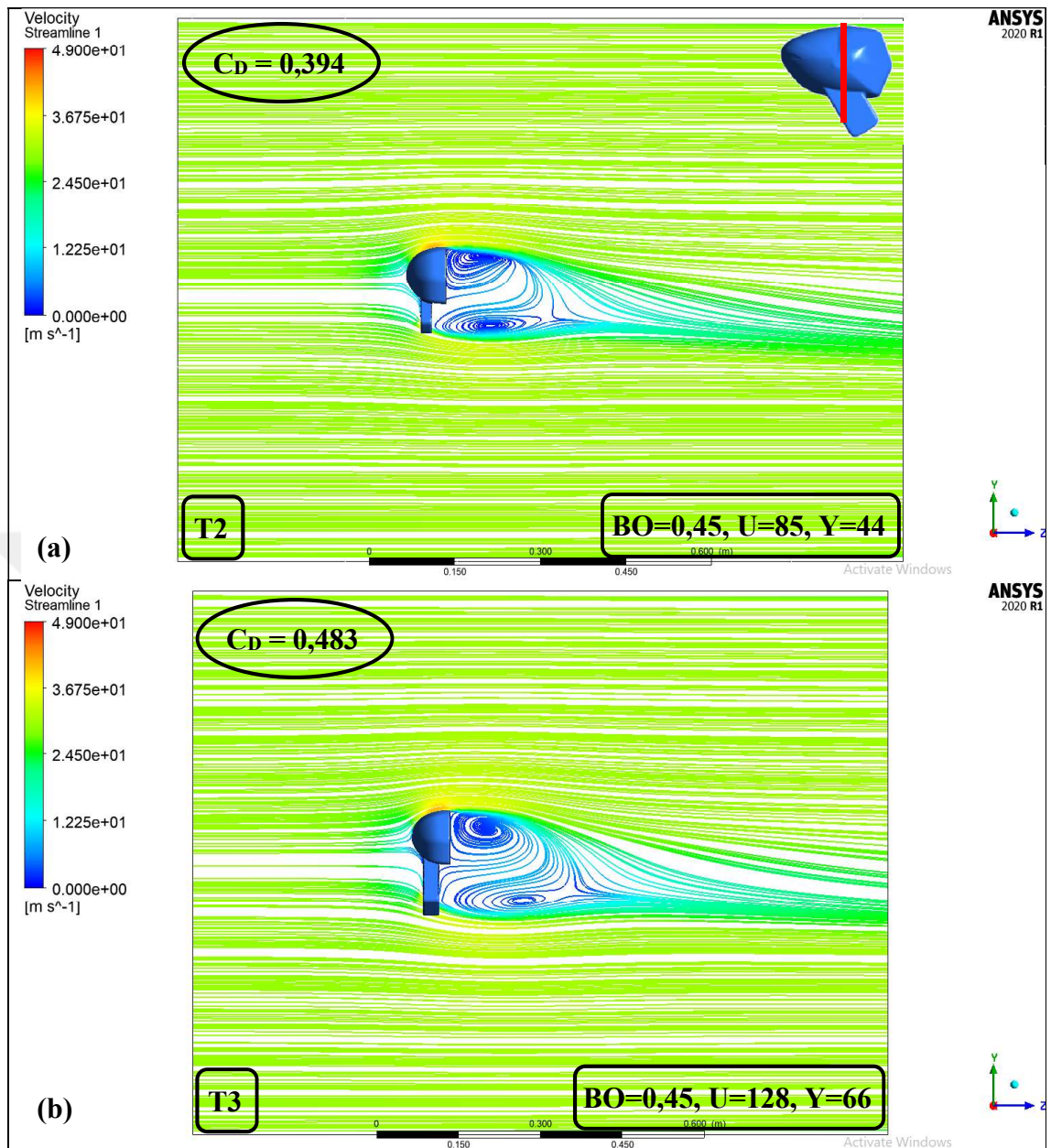
Şekil 4.122’de aynanın orta bölgesinden geçen düzlemdeki hız vektörleri verilmiştir. Akışın ilk çarptığı ayna orta bölgesi ve bağlama kolu yüzeyinde hızın durduğu, ayna üst kısmında ise akışın hızlandığı görülmüştür. Ayna arkasında zıt yönlü vorteksler oluşmuştur. Özellikle Şekil 4.122b’de bu bölgenin oldukça geniş olduğu görülmektedir.

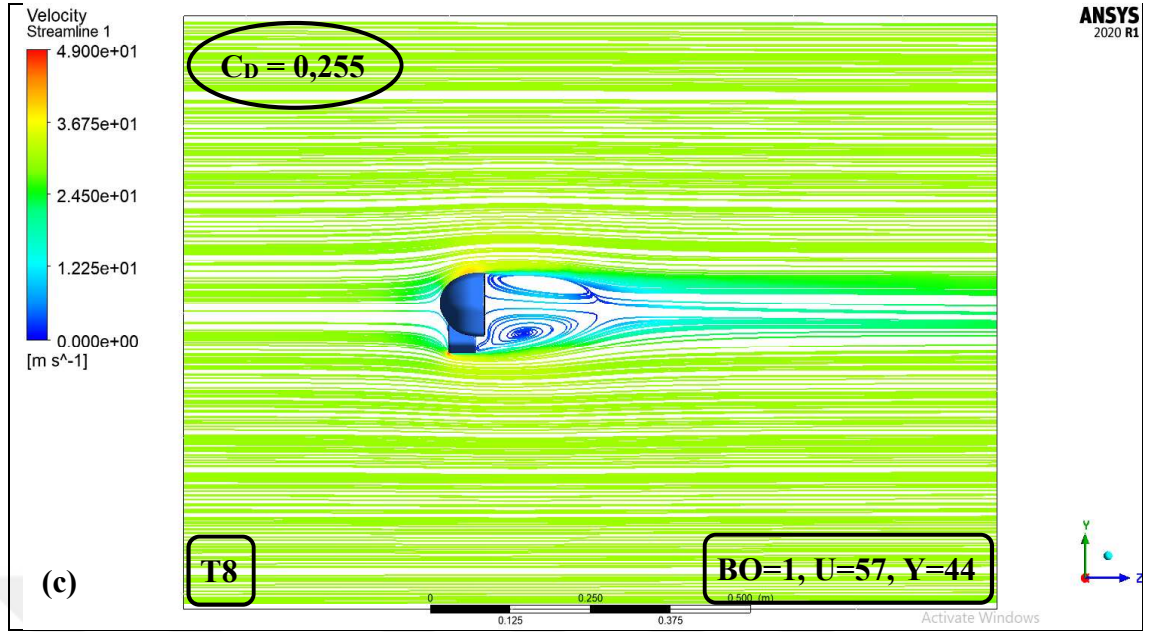




Şekil 4.122. Aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız vektörleri: (a) Referans geometri, (b) T3 geometrisi (maks C_D), (c) T8 geometrisi (min C_D)

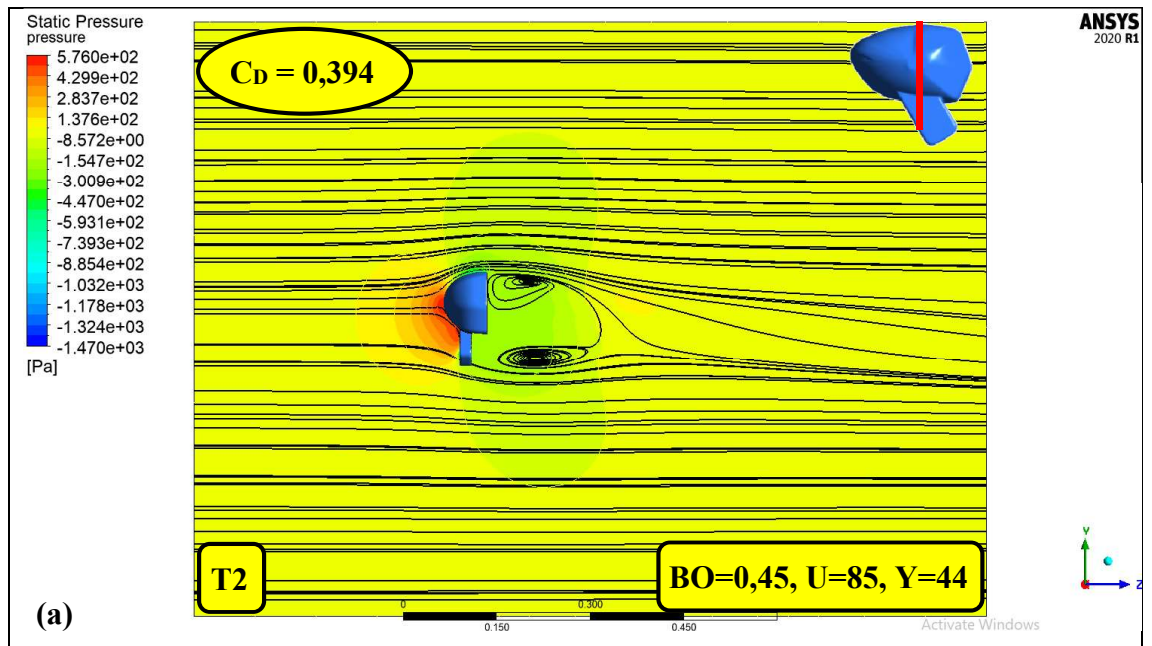
Şekil 4.123'te aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri gösterilmiştir. Ayna arkasında zıt yönlü vorteks bölgeleri görülmüştür. Ayna arkasında en büyük vorteks bölgesi yüksek sürüklenme katsayısına sahip T3 geometrisinde oluşmuştur.

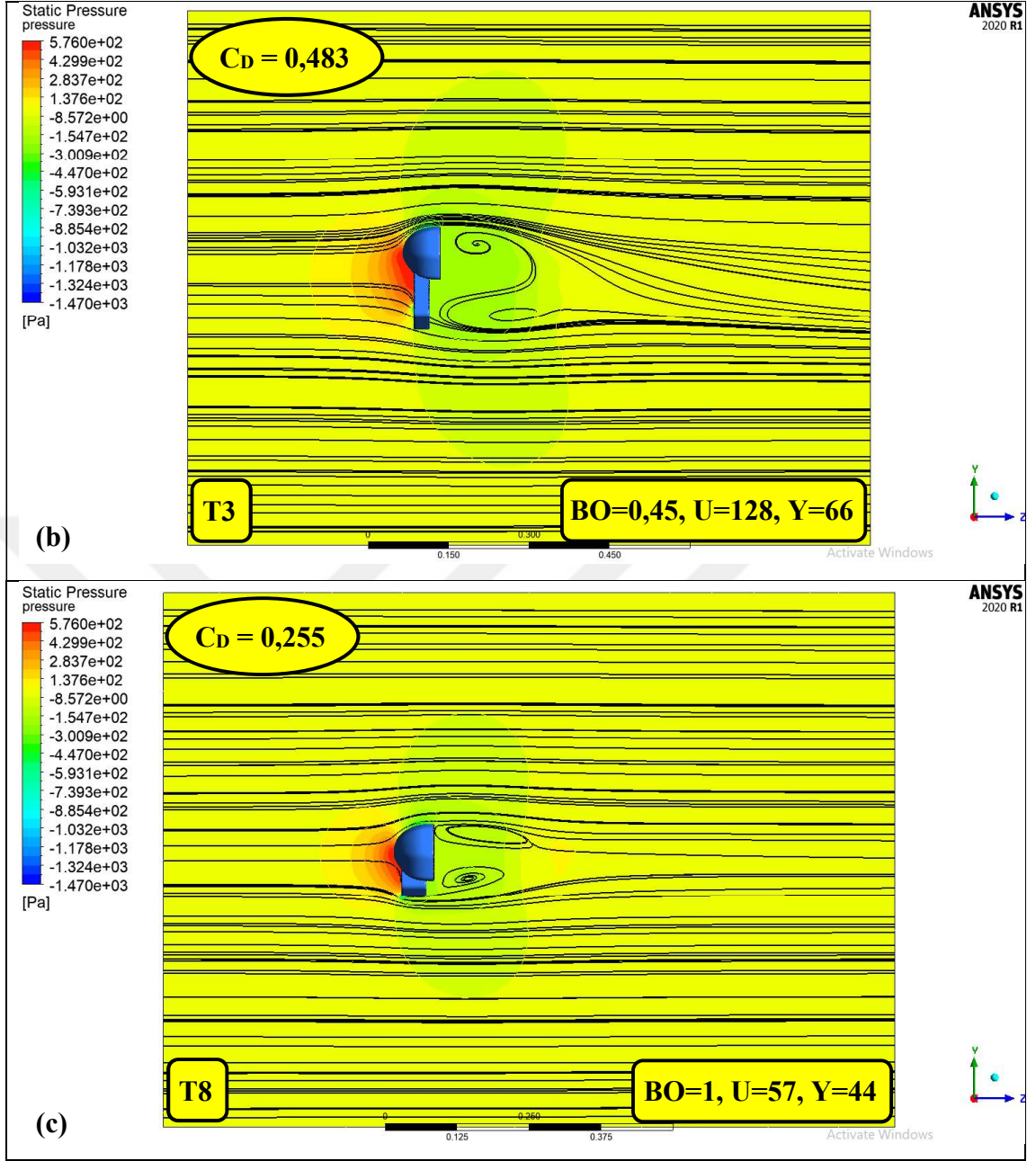




Şekil 4.123. Aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan hız akım çizgileri: **(a)** Referans geometri, **(b)** En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T3 geometrisi, **(c)** En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T8 geometrisi

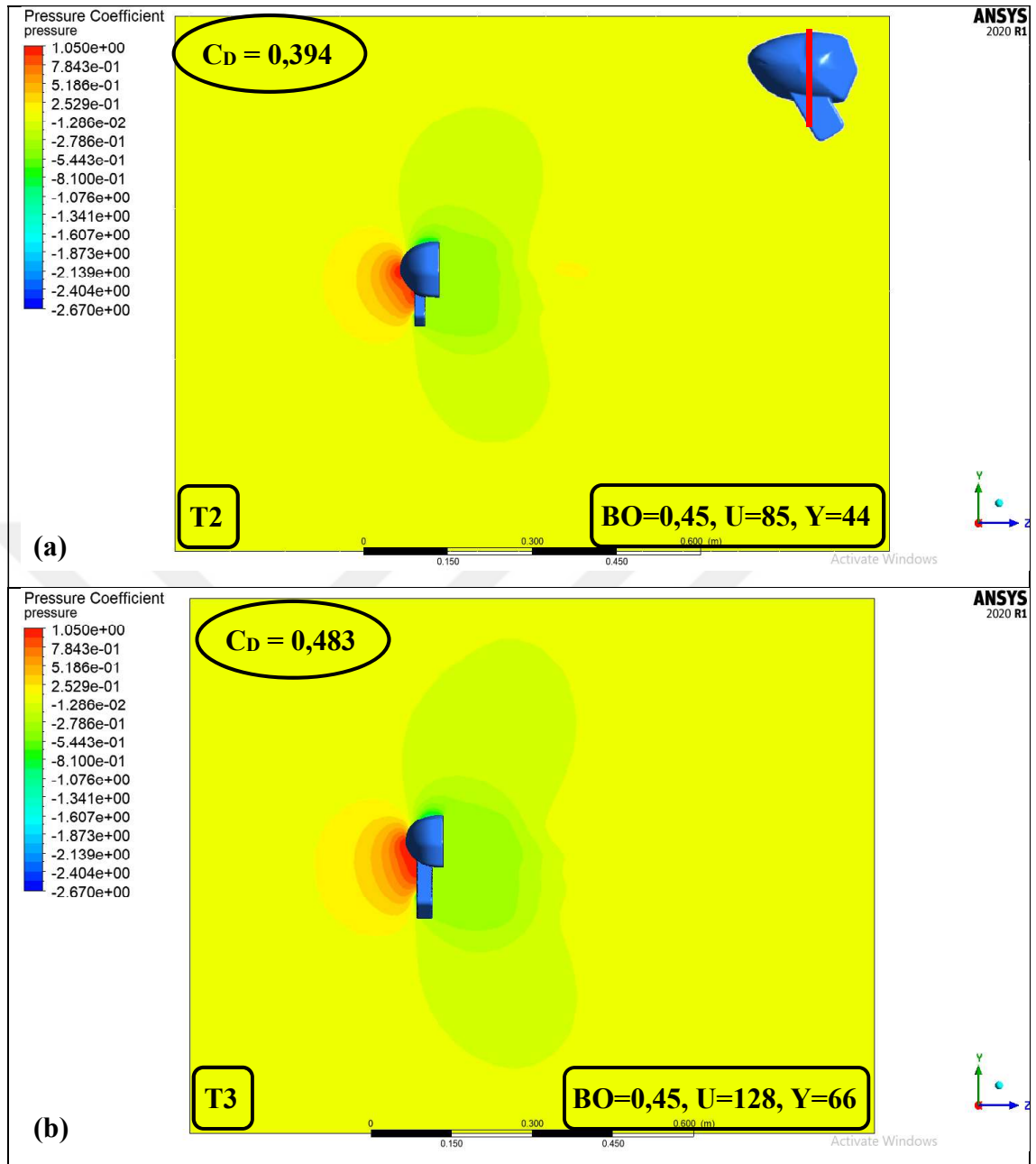
Şekil 4.124'te aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları sunulmuştur. Akışın ilk çarptığı ayna ortası ve bağlama kolu üstünde maksimum basınç oluşmuştur. Ayna arkasında vortekslerin olduğu bölgelerde düşük basınçlar görülmüştür. T3 geometrisinde diğer geometrilere göre durma noktası basınçlarının daha yüksek, cisim-ardı basınçlarının ise daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.

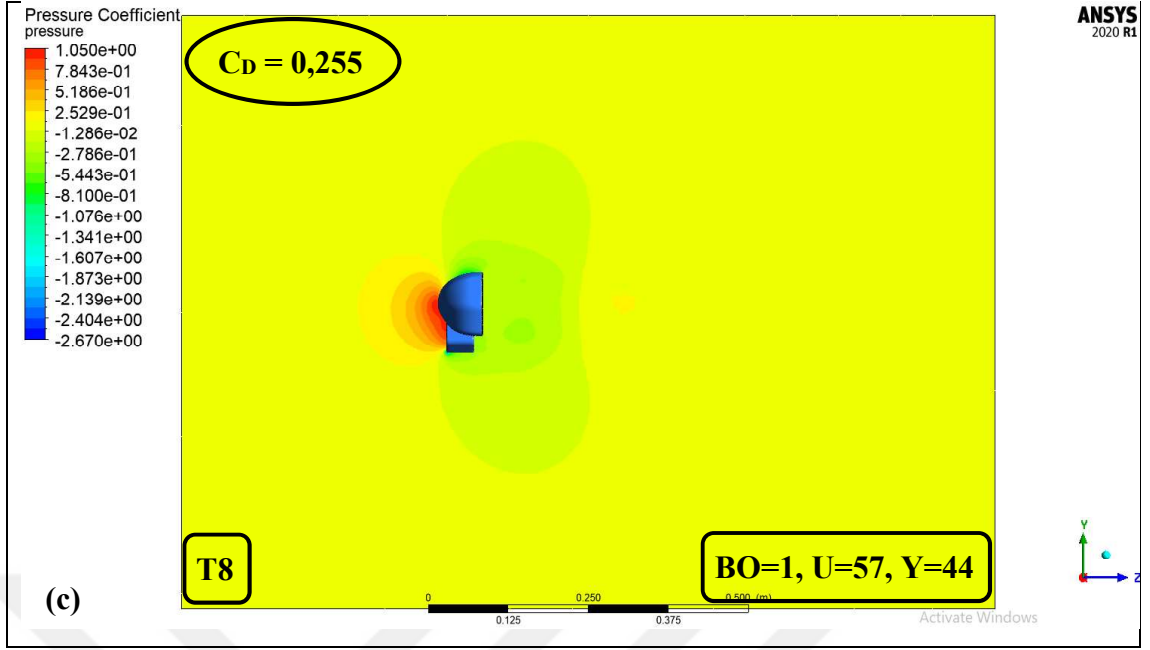




Şekil 4.124. Aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç konturları: **(a)** Referans geometri, **(b)** En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T3 geometrisi, **(c)** En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T8 geometrisi

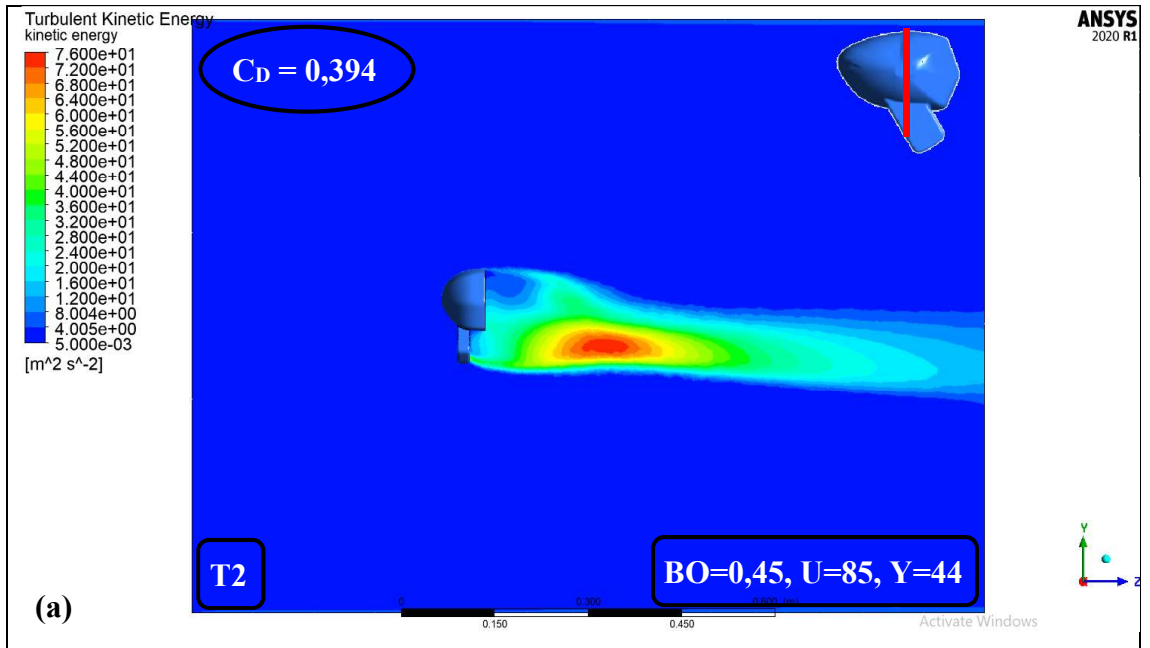
Şekil 4.125'te geometrik modellere ait basınç katsayısı dağılımları verilmiştir. Basınç katsayısı dağılımı ile yukarıda sıralanmış olan basınç dağılımları arasında benzerlik mevcuttur.

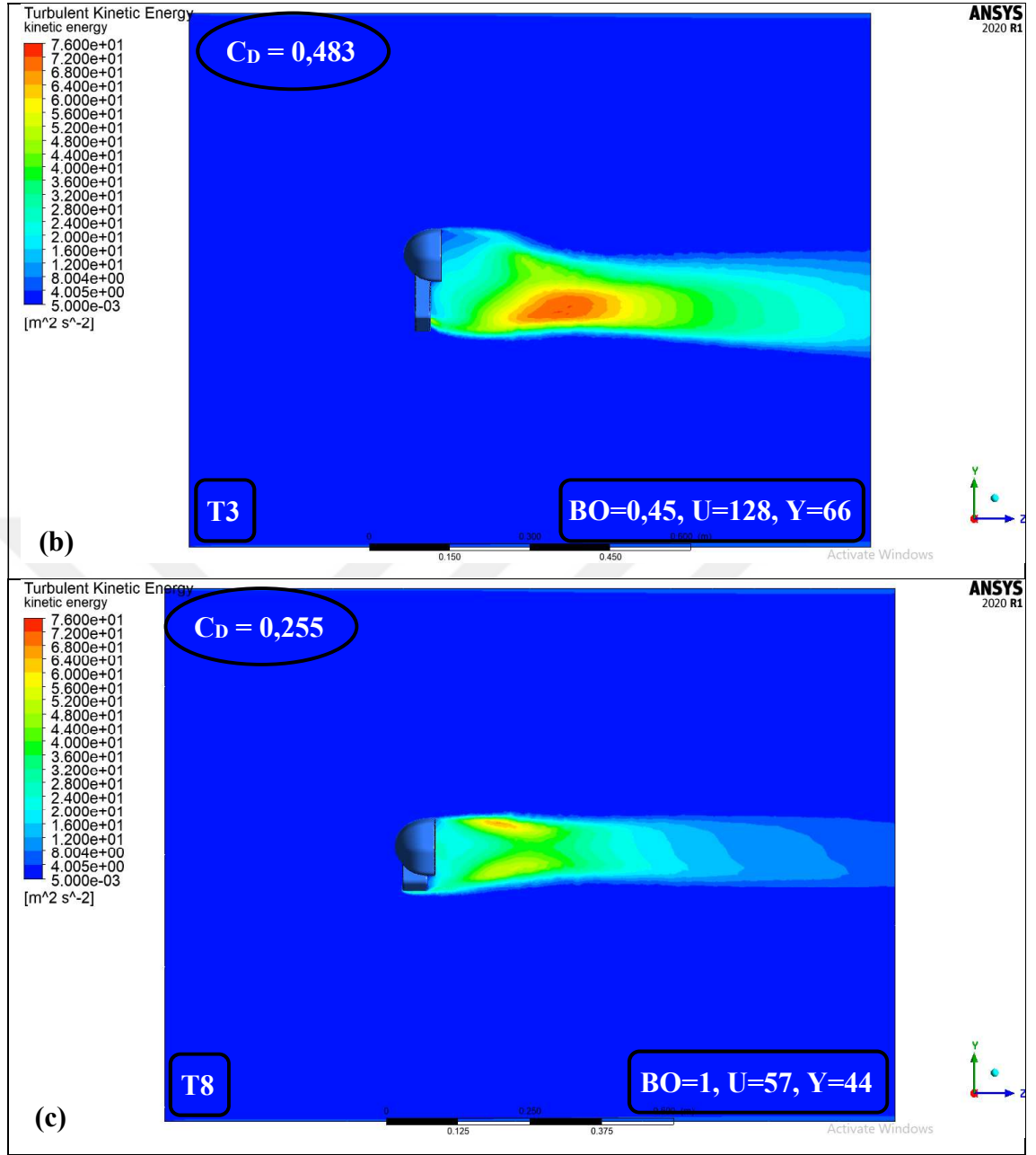




Şekil 4.125. Aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan basınç katsayıları dağılımı: (a) Referans geometri, (b) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T3 geometrisi, (c) En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T8 geometrisi

Şekil 4.126’da aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımları gösterilmiştir. Ayna ardında oluşan türbülans bölgeleri karşılaştırıldığında, Şekil 4.126 b’deki T3 geometrisinin arkasında diğer geometrilere kıyasla oldukça geniş bir türbülanslı bölge oluştuğu görülmüştür.

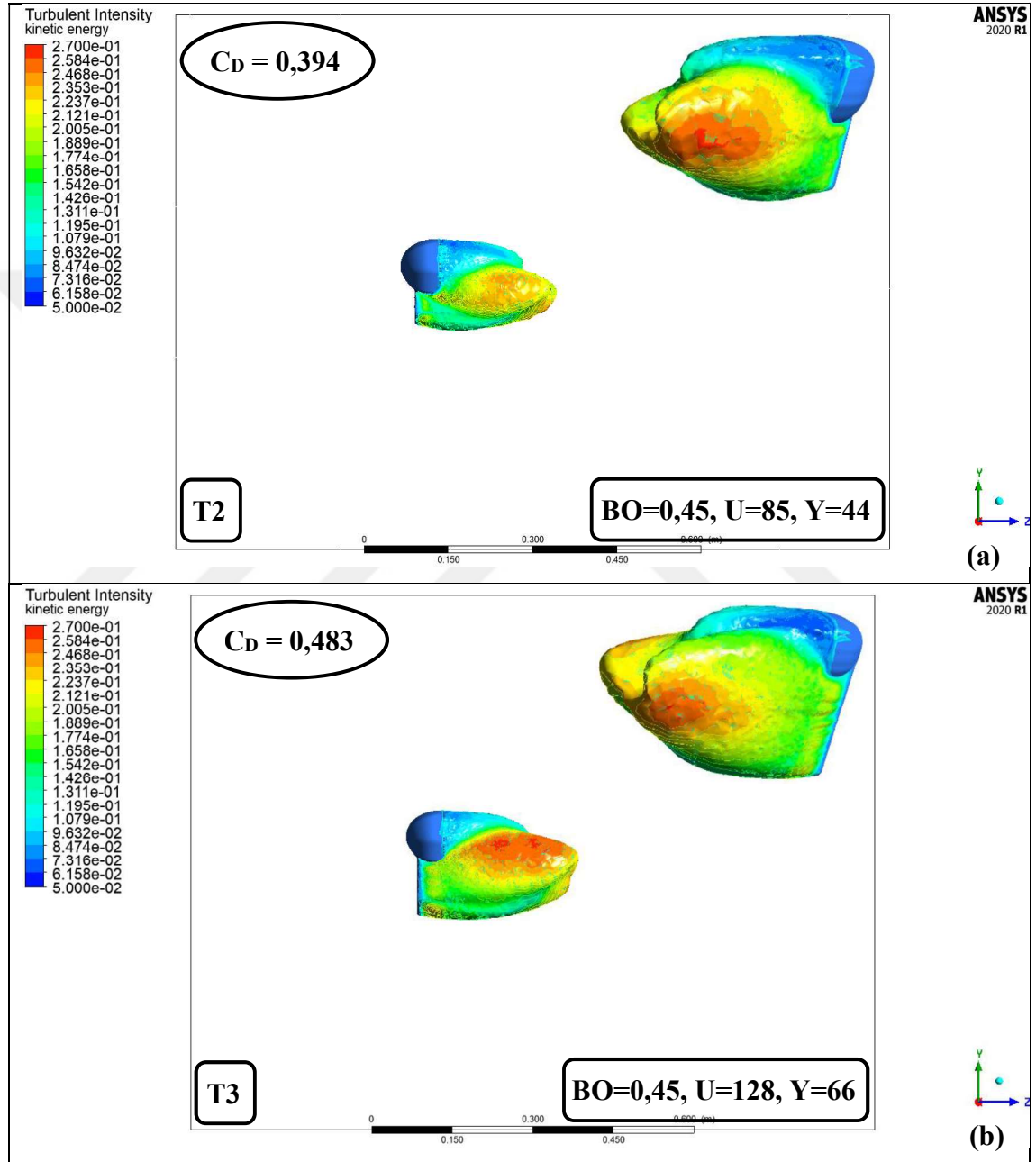


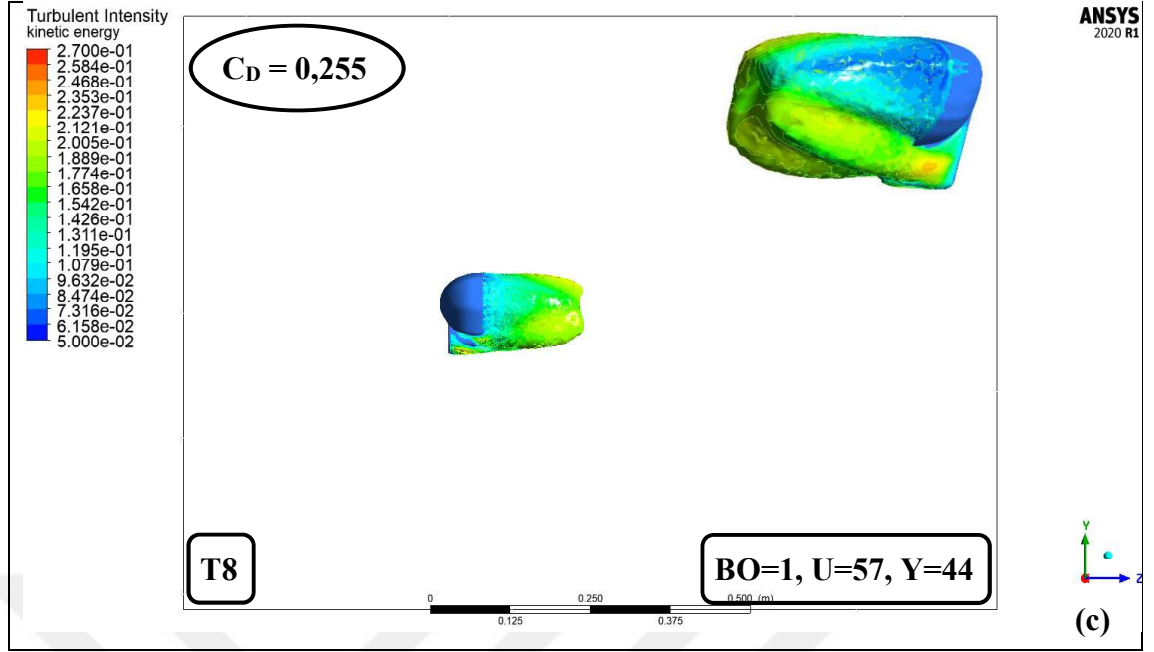


Şekil 4.126. Aynanın orta bölgesinden geçen düzlemde oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı: (a) Referans geometri, (b) En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T3 geometrisi, (c) En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T8 geometrisi

Şekil 4.127’de geometrik modellere ait cisim-ardı bölgesi (toplam basınç = 0) ve bu bölgedeki türbülans yoğunluğu dağılımı verilmiştir. En kötü sonucu veren T3 geometrisinde kol kısmında cisim-ardı bölgesinin büyüdüğü görülmektedir. Ayrıca ayna gövdesi kısmında kol bölgesindeki aerodinamik değişimlerin etkisiyle cisim-ardı bölgesinin hem akış yönünde ve hem aynanın üst kısmına doğru büyüdüğü

anlaşılmaktadır. En iyi sonucu veren T8 geometrisinde ise kol kısmında cisim-ardı bölgesinin küçüldüğü görülmektedir. Akış yönünde de küçülme oluşmuştur. Cisim-ardı bölgesinin üst kısmı diğer iki geometridekinin aksine yatayla neredeyse paralel bir şekilde gelişmiştir. Ayrıca türbülans yoğunluğu tüm bölgelerde belirgin şekilde düşmüştür.





Şekil 4.127. Geometrik modeller için cisim-ardı bölgesi (toplam basınç = 0) ve bu bölgedeki türbülans yoğunluğu dağılımı: **(a)** Referans geometri, **(b)** En yüksek sürüklenme katsayısına sahip olan T3 geometrisi, **(c)** En düşük sürüklenme katsayısına sahip olan T8 geometrisi

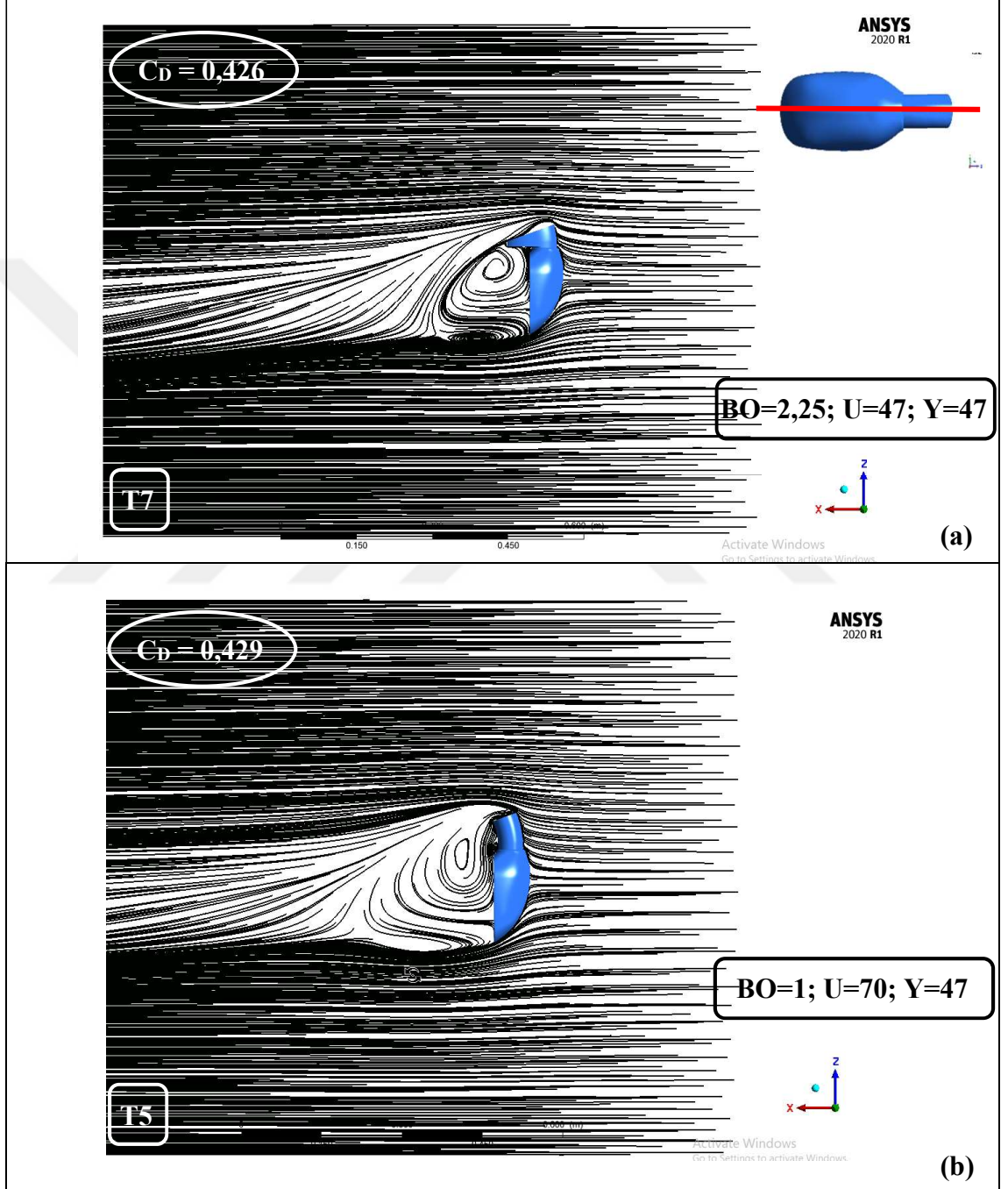
4.9. Bağlama Kolu Geometrisi Etkilerinin Karşılaştırılması

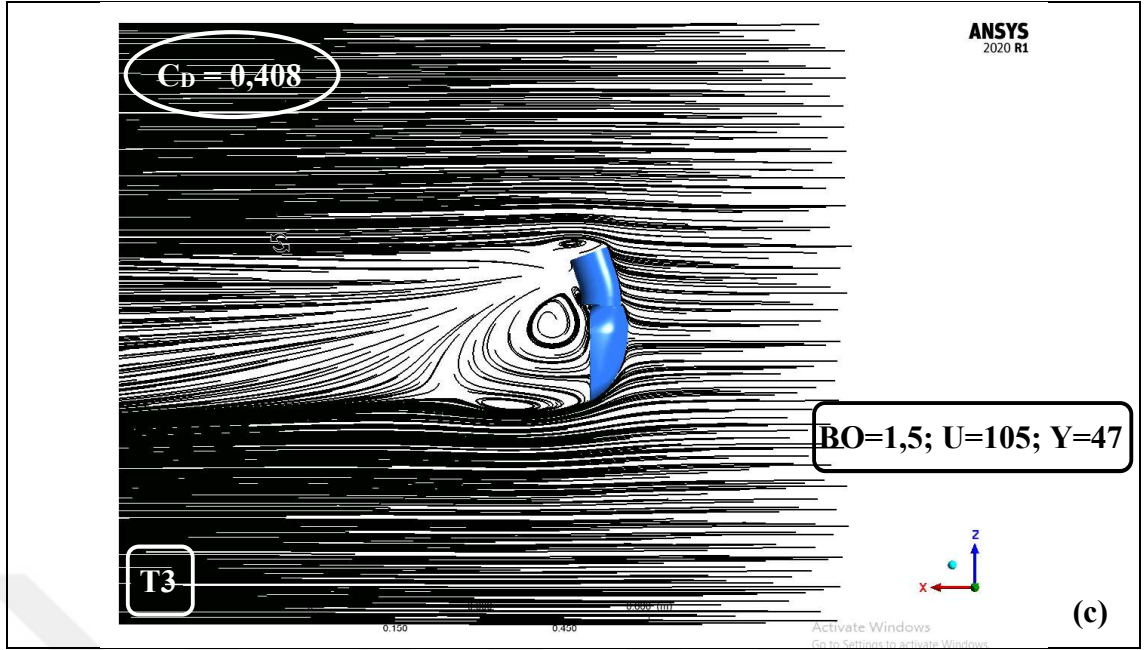
Uzunluk değişkeni, Model 1’de C_D ’yi düşürürken Model 2’de arttırmıştır. Uzunluk değişkeninin etkisini örneklendirmek için:

- Model 1’de en yüksek etkiye sahip olduğu görülen yükseklik değişkeni sabit tutulmuş ve farklı uzunluklara sahip geometrilerde akış karakteristikleri karşılaştırılmıştır.
- Model 2’de en yüksek etkiye sahip olduğu görülen boyut oranı değişkeni sabit tutulmuş ve farklı uzunluklara sahip geometrilerde akış karakteristikleri karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.128’de Model 1 için farklı uzunluktaki geometrilerde akım çizgilerinde meydana gelen değişimler görülmektedir. Kesit alınan düzlem uzunluktaki değişimin etkisini gösterecek şekilde ayna kolunu yatayda ikiye bölen düzlemdir.

Uzunluk arttığında kol kısmındaki akım çizgilerinin ayna gövdesi ile olan etkileşimi önemli oranda düşmüştür. Uzunluk düştüğünde ise kol kısmındaki akım çizgileri geniş vorteksler oluşturarak ayna gövdesinin arka yüzeyini etkilemiştir. Böylece kinetik enerji kaybı ve dolayısıyla sürüklenme artışı oluşmuştur.





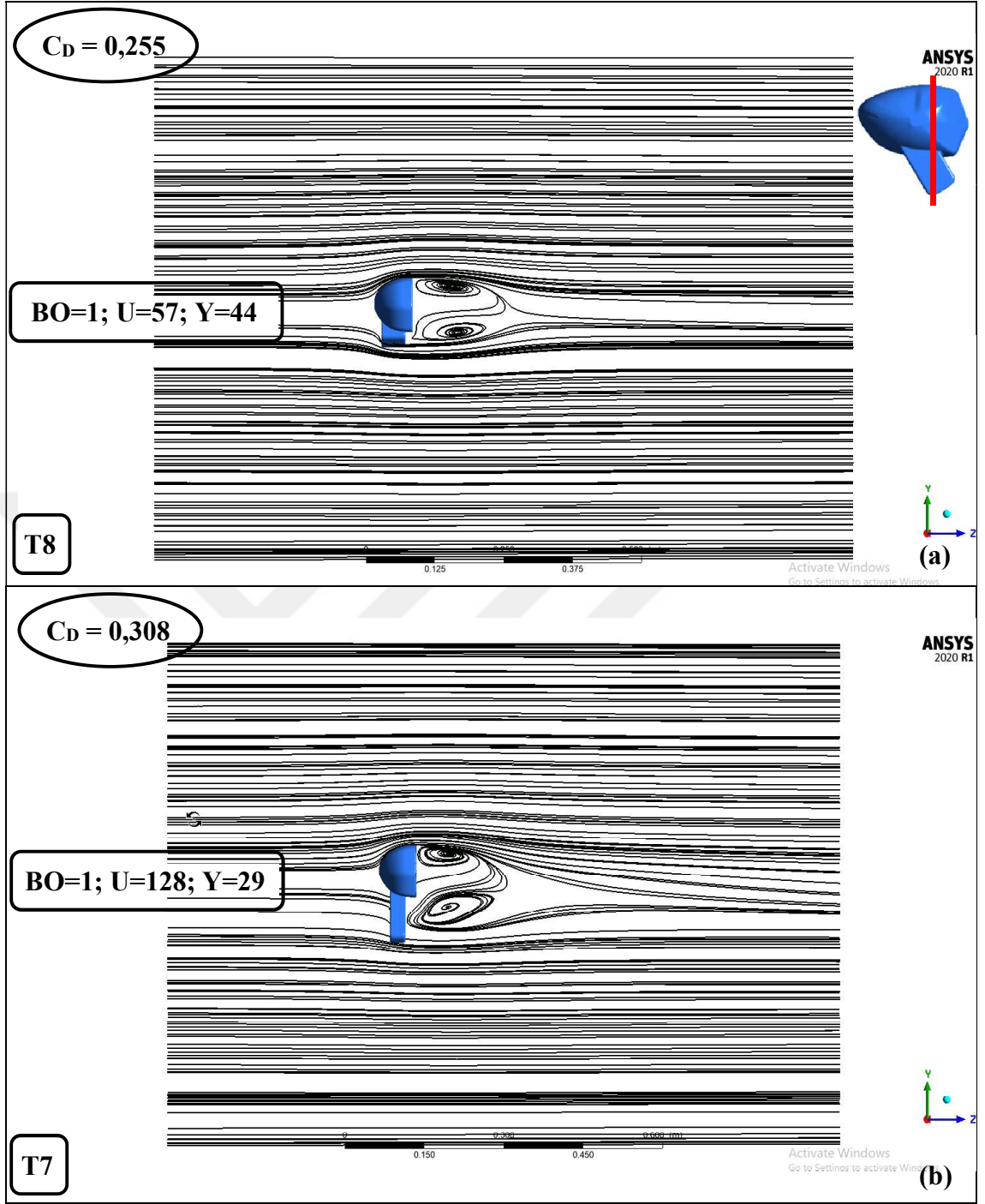
Şekil 4.128. Model 1 için sabit yükseklik değerinde farklı uzunluktaki geometrilerde akım çizgilerinde meydana gelen değişimler: (a) Minimum uzunluk (T7), (b) Ortalama uzunluk (T5), (c) Maksimum uzunluk (T3)

Şekil 4.129’da Model 2 için farklı uzunluktaki geometrilerde akım çizgilerinde meydana gelen değişimler görülmektedir. Kesit alınan düzlem uzunluktaki değişimin etkisini gösterecek şekilde ayna kolunu düşeyde ikiye bölen düzlemdir.

Uzunluk değişimi kol kısmındaki akım çizgilerinin ayna gövdesi ile olan etkileşimini değiştirecek ve ayna arkasında ilave vorteksler oluşturacak bir etkiye sahip değildir. Ancak uzunluğun artması cisim-ardı bölgesinin büyümesine ve dolayısıyla sürüklenmenin artmasına sebep olmaktadır.

Boyut oranı değişkeni her iki ayna modelinde de C_D ’yi düşürmüştür. Ancak Model 2’de en etkili değişken olarak ön plana çıkmıştır. Boyut oranı değişkeninin etkisini örneklendirmek için:

- Model 1’de en yüksek etkiye sahip olan yükseklik değişkeni sabit tutulmuş ve farklı boyut oranlarındaki geometrilerde akış karakteristikleri karşılaştırılmıştır.
- Model 2’de boyut oranından sonra en yüksek ikinci etkiye sahip olduğu görülen uzunluk değişkeni sabit tutulmuş ve farklı boyut oranlarına sahip geometrilerde akış karakteristikleri karşılaştırılmıştır.

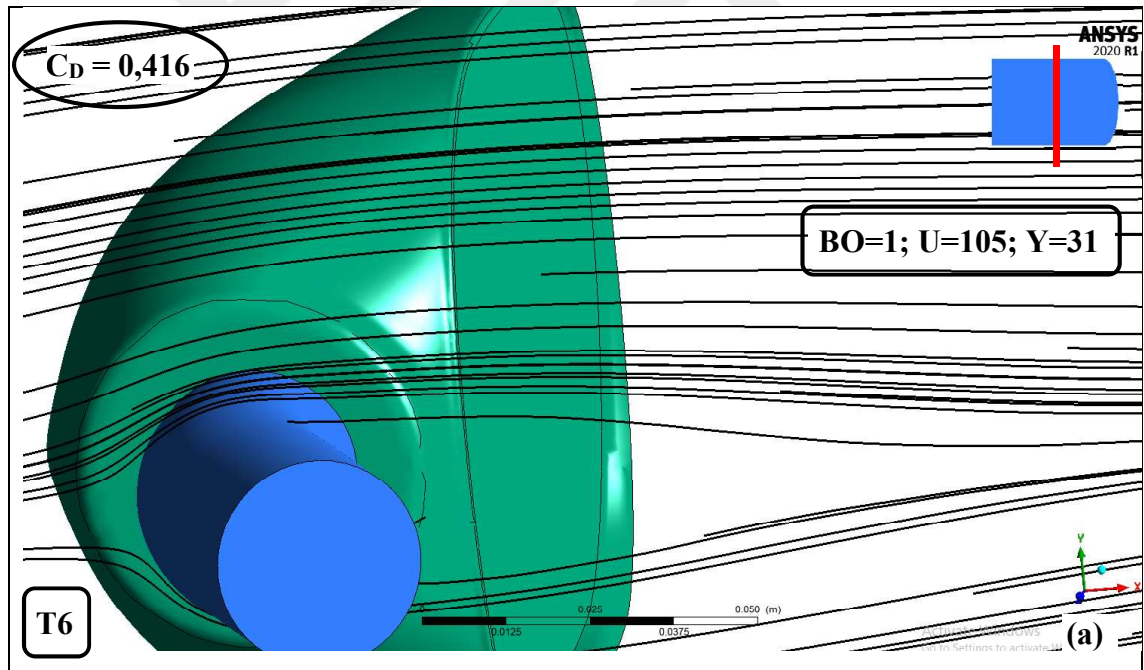


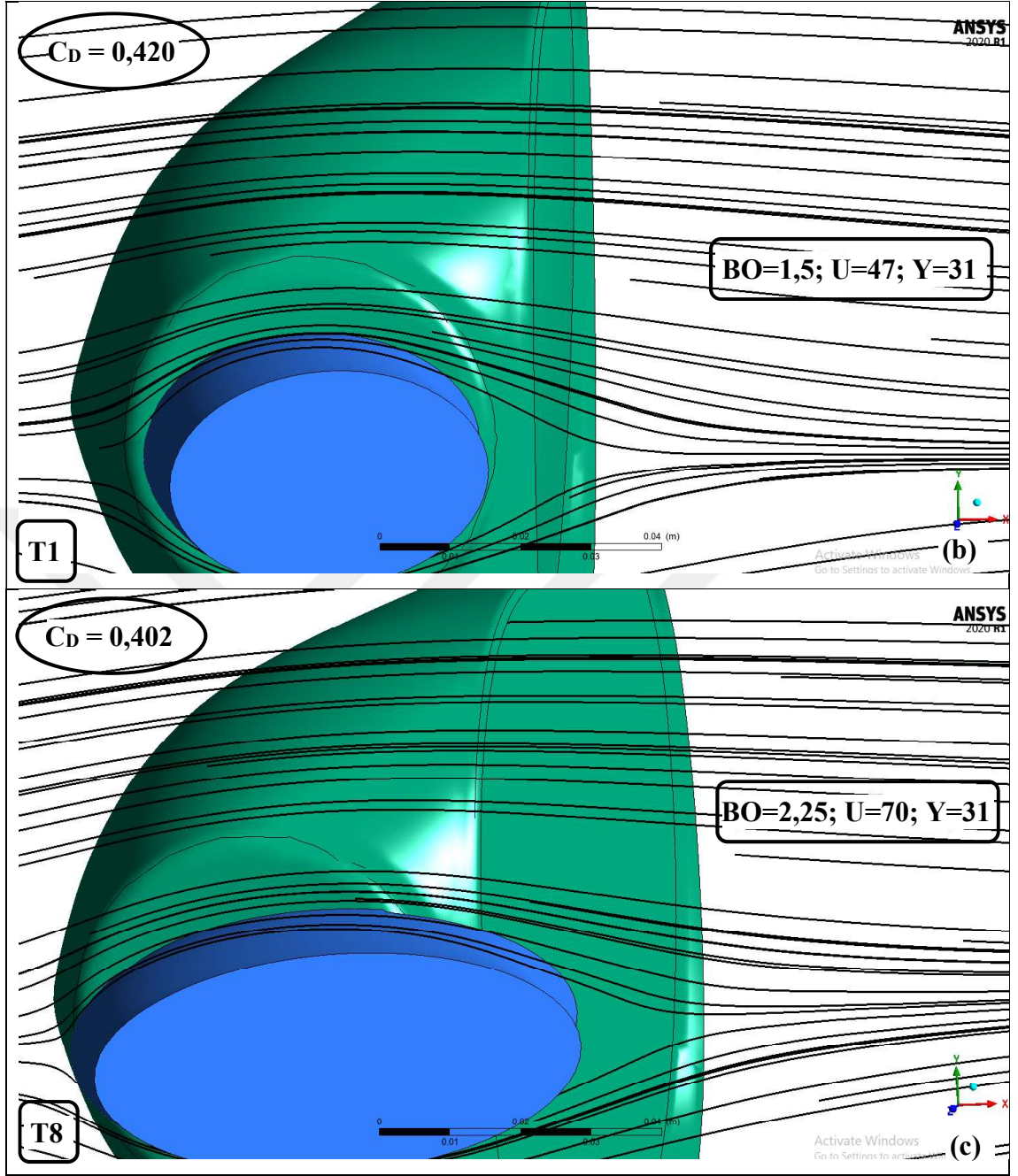
Şekil 4.129. Model 2 için sabit boyut oranı değerinde farklı uzunluktaki geometrilerde akım çizgilerinde meydana gelen değişimler: **(a)** Minimum uzunluk (T8), **(b)** Maksimum uzunluk (T7)

Şekil 4.130'da Model 1 için farklı boyut oranlarındaki geometrilerde akım çizgilerinde meydana gelen değişimler görülmektedir. Kesit alınan düzlem boyut oranındaki değişimin etkisini gösterecek şekilde ayna kolunu düşeyde ikiye bölen düzlemdir.

Boyut oranının artması ve böylece dairesel kesitten eliptik kesite geçilmesi (Şekil 4.130 a-b), kol kısmında akış ayrılmasını ötelemiş ve ayrılan akım çizgilerinin daha rahat birleşmesini sağlamıştır. Ancak dairesel kesitten eliptik kesite geçildikten sonra boyut oranındaki ilave artış (Şekil 4.130 b-c), geometrinin akımçizgililik özelliğinde aynı oranda iyileşmeye sebep olmamaktadır.

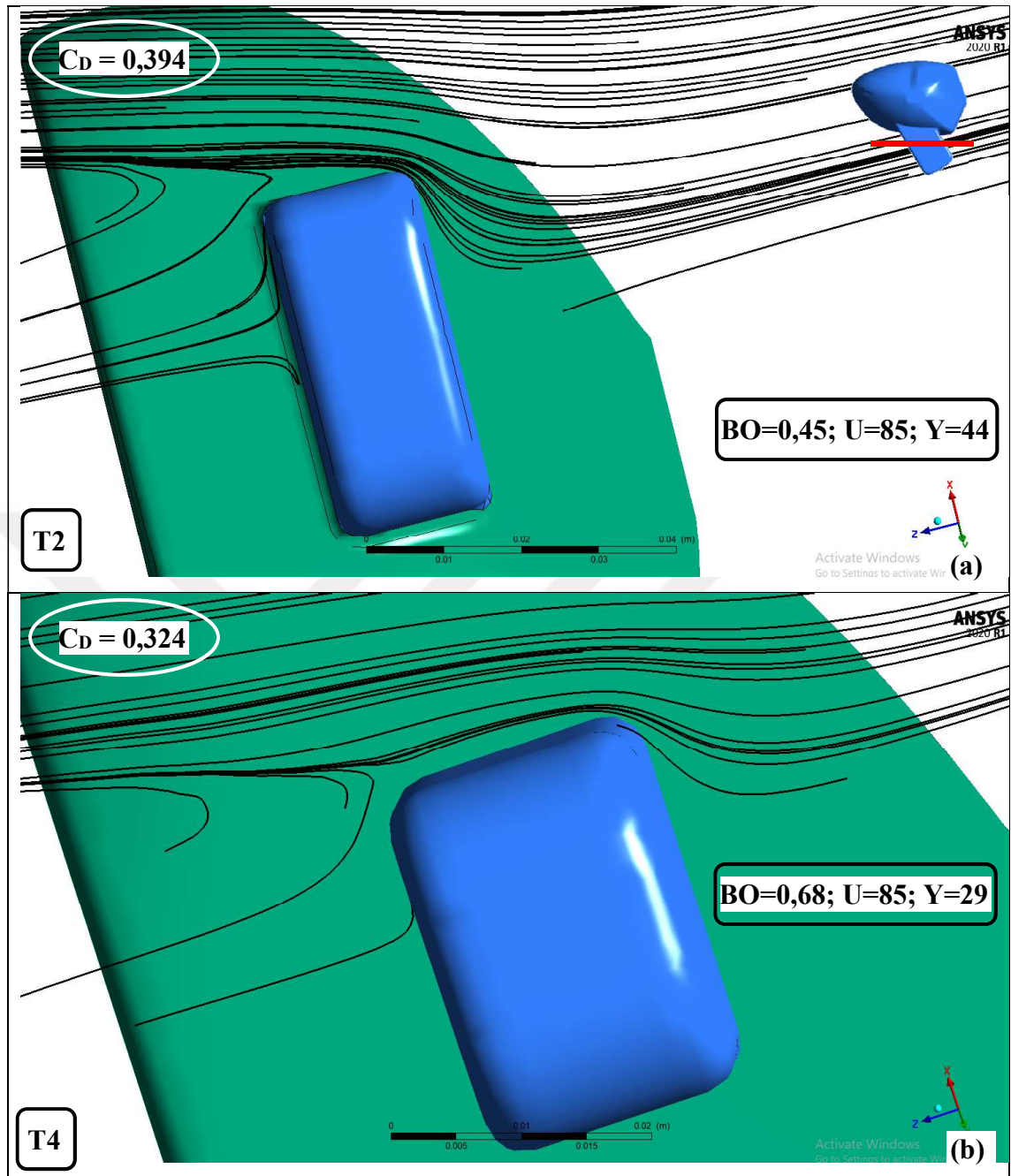
T6 (Şekil 4.130a) ve T1 (Şekil 4.130b) geometrilerinin C_D değerlerinin yakın olması, T6 geometrisinin boyut oranındaki dezavantajına karşın, uzunluk değerinin oldukça yüksek olmasından dolayı sahip olduğu avantajdan kaynaklanmaktadır.

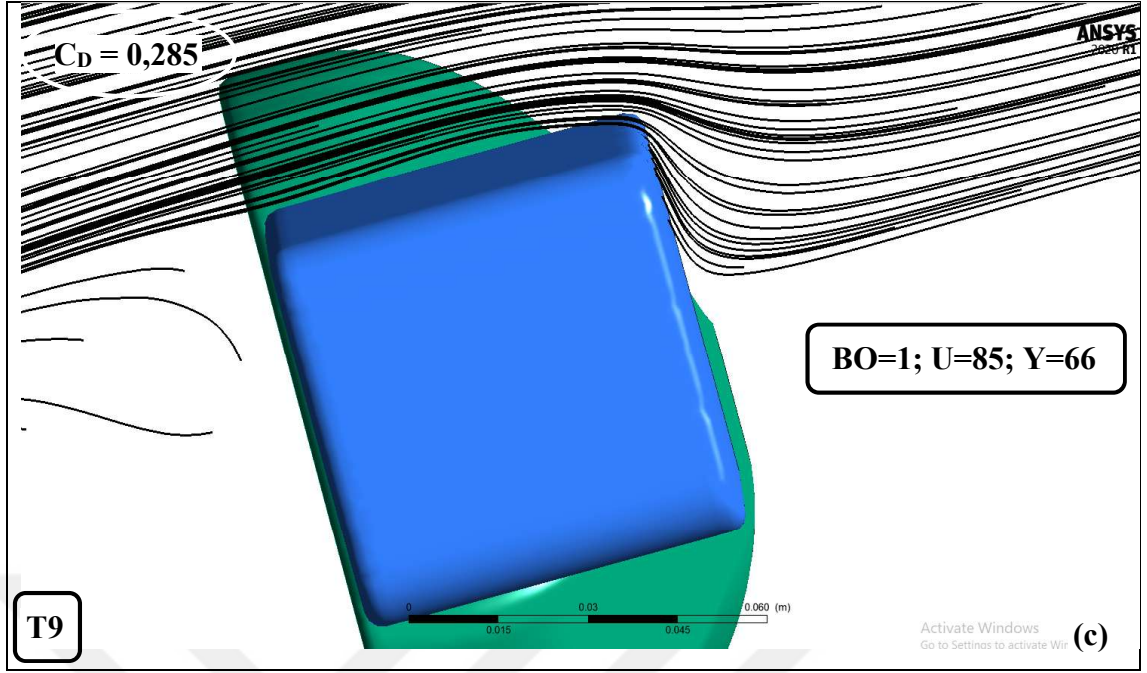




Şekil 4.130. Model 1 için sabit yükseklik değerinde farklı boyut oranındaki geometrilerde akım çizgilerinde meydana gelen değişimler: **(a)** Minimum boyut oranı (T6), **(b)** Ortalama boyut oranı (T1), **(c)** Maksimum boyut oranı (T8)

Şekil 4.131’de Model 2 için farklı boyut oranlarındaki geometrilerde akım çizgilerinde meydana gelen değişimler görülmektedir. Kesit alınan düzlem boyut oranındaki değişimin etkisini gösterecek şekilde ayna kolunu yatayda ikiye bölen düzlemdir.





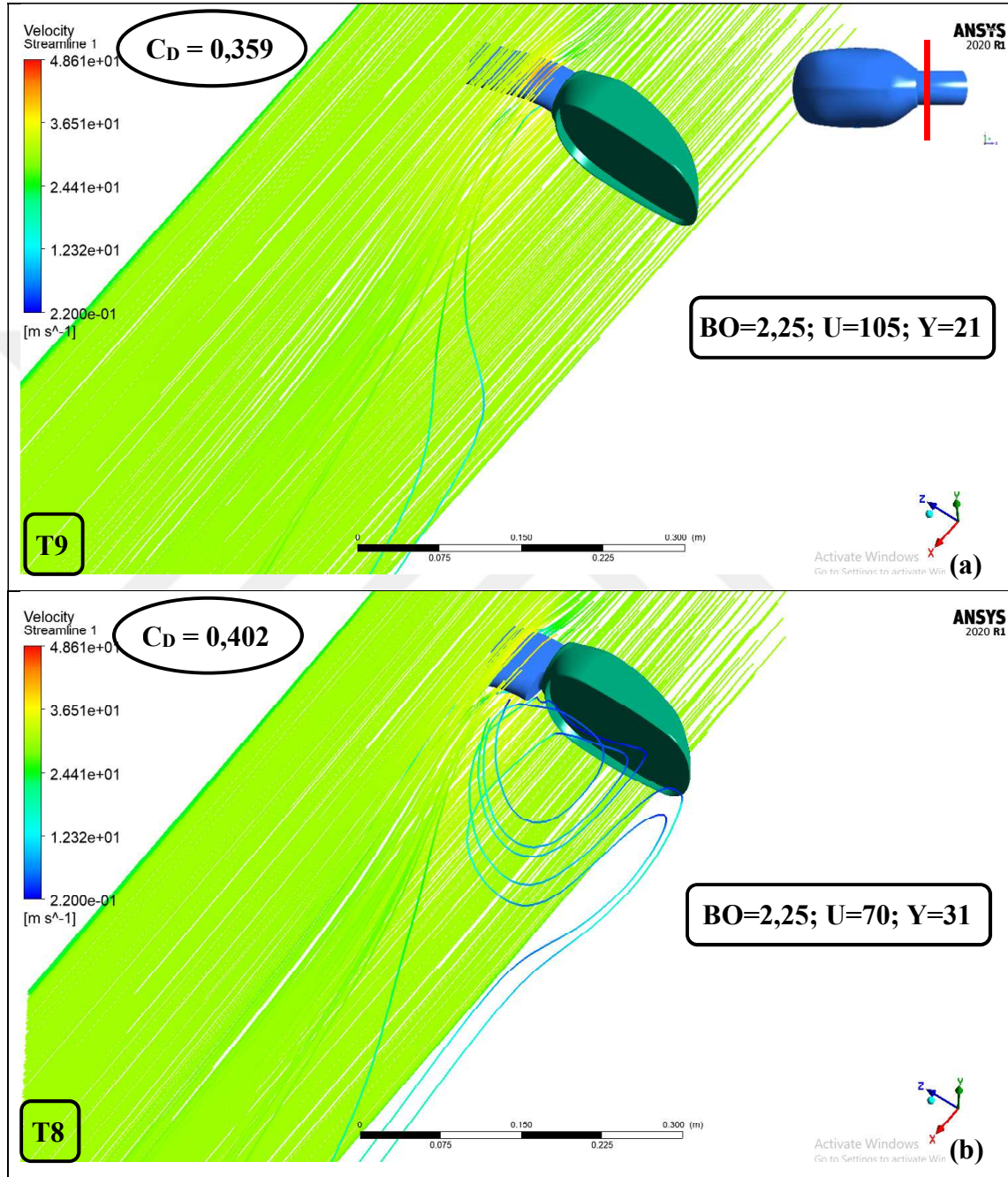
Şekil 4.131. Model 2 için sabit uzunluk değerinde farklı boyut oranındaki geometrilerde akım çizgilerinde meydana gelen değişimler: **(a)** Minimum boyut oranı (T2), **(b)** Ortalama boyut oranı (T4), **(c)** Maksimum boyut oranı (T9)

Boyut oranının artması (Şekil 4.132 a-c) kol kısmında akış ayrılmasını büyük oranda ötelemiş ve böylece cisim-ardı bölgesinin küçülmesini sağlamıştır. Boyut oranının akım çizgileri üzerinde Model 1 geometrisinde olduğundan daha etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Yükseklik değişkeni her iki ayna modelinde de C_D 'yi arttırmıştır. Ancak Model 1'de en etkili değişken olarak ön plana çıkmıştır. Yükseklik değişkeninin etkisini örneklendirmek için:

- Model 1'de farklı yükseklikteki geometrilerde akış karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma iki farklı boyut oranı için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.
- Model 2'de en yüksek etkiye sahip olan boyut oranı değişkeni sabit tutulmuş ve benzer uzunluğa ancak maksimum yükseklik farkına sahip olan geometrilerde akış karakteristikleri karşılaştırılmıştır.

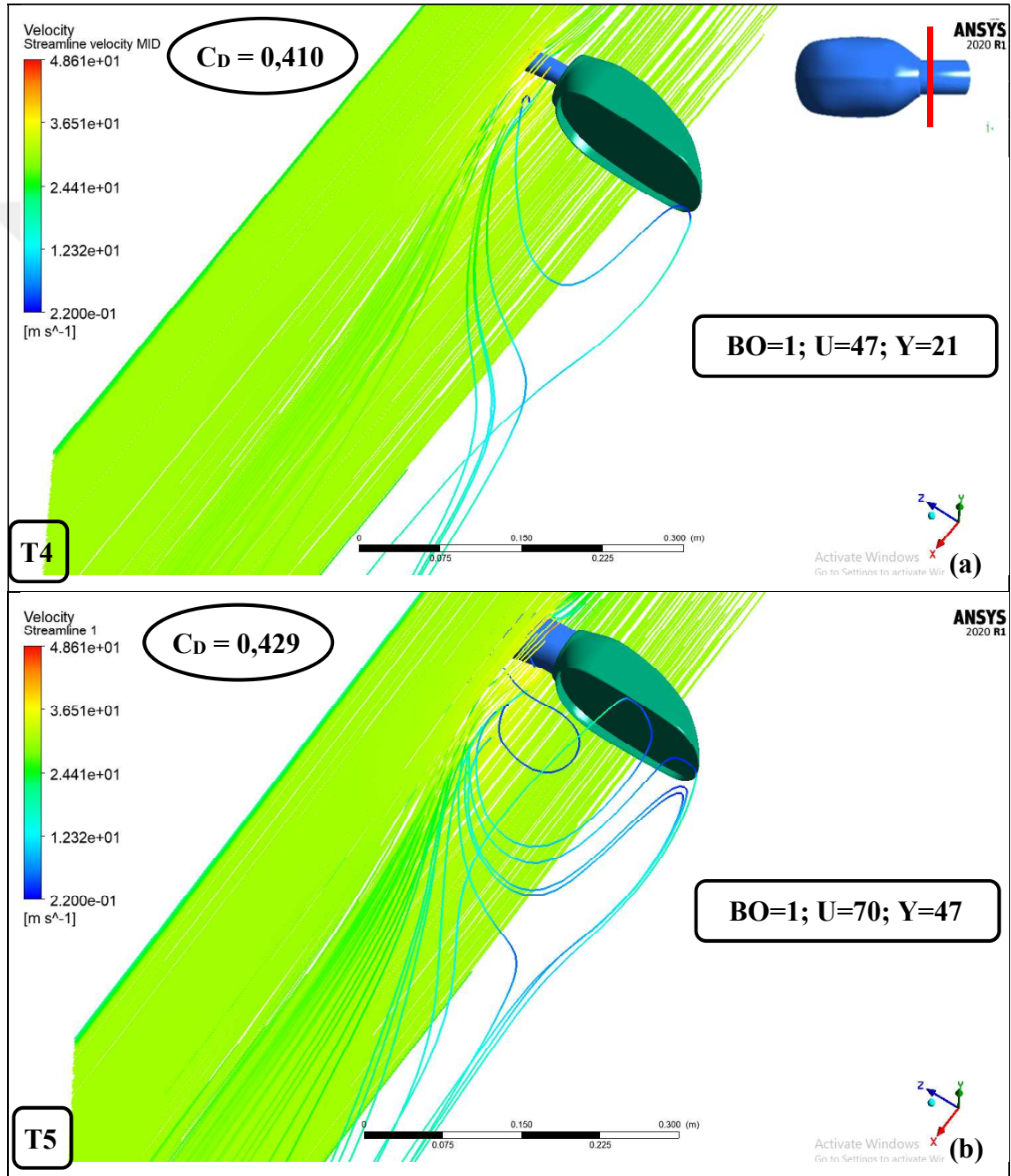
Şekil 4.132’de Model 1 için 2,25 boyut oranında farklı yükseklikteki geometrilerde 3B akım çizgilerindeki değişimler görülmektedir. Kesit düzlemi yükseklikteki değişimin etkisini gösterecek olan ayna kolunu düşeyde gövdeye yakın kısımda bölen düzlemdir.



Şekil 4.132. Model 1 için 2,25 boyut oranında farklı yükseklikteki geometrilerde 3B akım çizgilerindeki değişimler: (a) Minimum yükseklik (T9), (b) Ortalama yükseklik (T8)

Yüksekliğin artması (Şekil 4.133b) kol kısmından gövdenin arkasına doğru vorteksler oluşturmuştur. Bu vorteksler kinetik enerji kaybına ve C_D artışına sebep olacaktır.

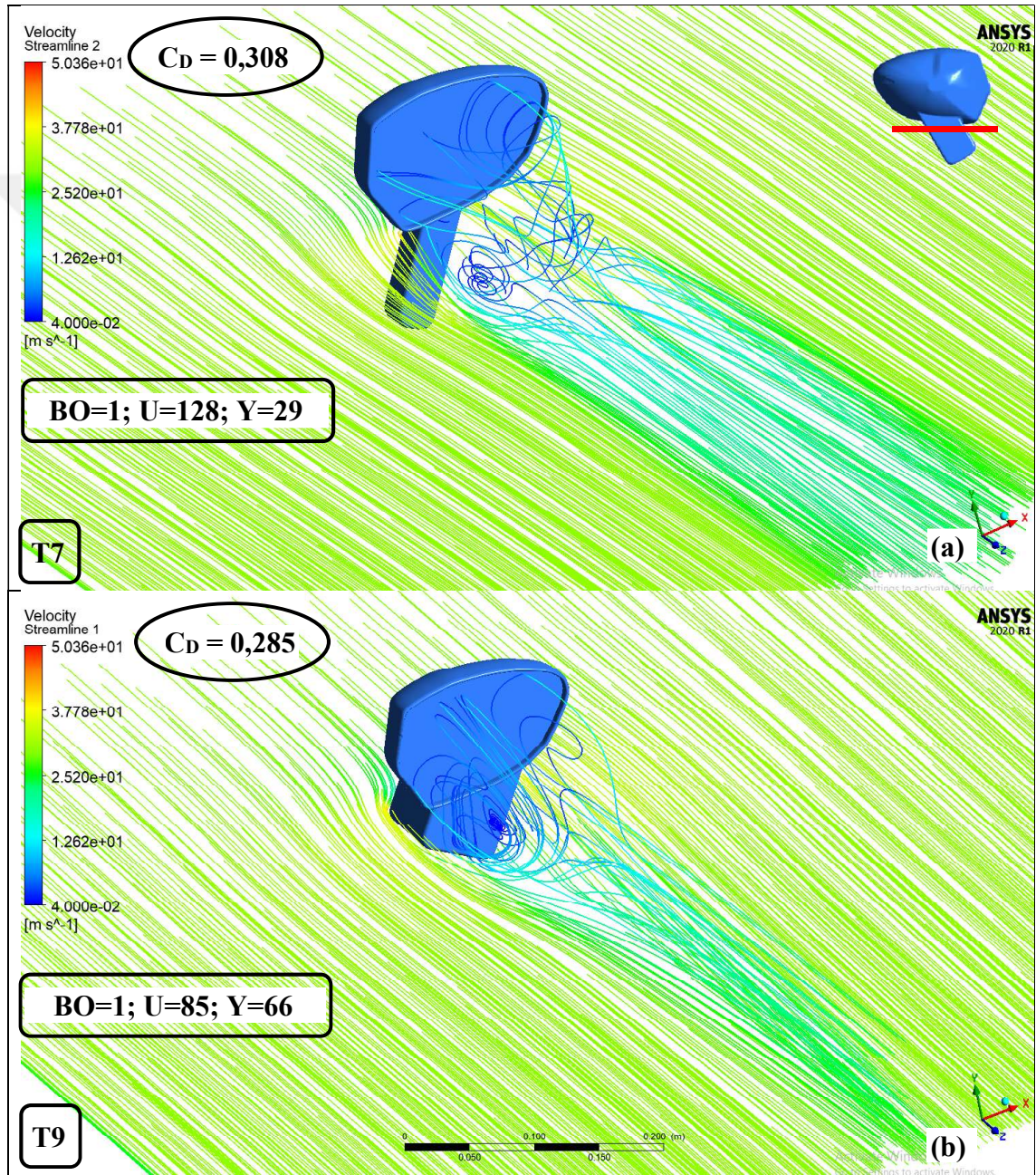
Şekil 4.133'te Model 1 için 1 boyut oranında farklı yükseklikteki geometrilerde 3B akım çizgilerindeki değişimler görülmektedir. Kesit düzlemi yükseklikteki değişimin etkisini gösterecek olan ayna kolunu düşeyde gövdeye yakın kısımda bölen düzlemdir.



Şekil 4.133. Model 1 için 1 boyut oranında farklı yükseklikteki geometrilerde 3B akım çizgilerindeki değişimler: **(a)** Minimum yükseklik (T4), **(b)** Maksimum yükseklik (T5)

Yüksekliğin artması (Şekil 4.133b) kol kısmından ayna gövdesinin arkasına doğru giden vortekslerin artmasına sebep olmuştur. Vortekslerin artması kinetik enerji kaybına ve C_D artışına sebep olacaktır.

Şekil 4.134'te Model 2 için 1 boyut oranında farklı yükseklikteki geometrilerde 3B akım çizgilerindeki değişimler görülmektedir. Kesit düzlemi yükseklikteki değişimin etkisini gösterecek olan ayna kolunu yatayda gövdeye yakın kısımda bölen düzlemdir.



Şekil 4.134. Model 2 için 1 boyut oranında farklı yükseklikteki geometrilerde 3B akım çizgilerindeki değişimler: **(a)** Minimum yükseklik (T7), **(b)** Maksimum yükseklik (T9)

Yüksekliğin artması (Şekil 4.134b) akışın birleşmesinde ve oluşan vortekslerde önemli bir değişiklik oluşturmamıştır. İki ayna geometrisinin C_D değerleri de birbirine yakındır.

T9 (Şekil 4.134b) geometrisi yükseklik anlamında dezavantajlı olmasına karşın, T7 (Şekil 4.134a) geometrisine göre az da olsa daha düşük bir C_D değerine sahiptir. Bu durum T7 geometrisinde (C_D 'yi artıracak şekilde) uzunluğun daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Model 2 için, uzunluk, yüksekliğe göre daha etkili bir değişken (Çizelge 4.29) olarak çıkmıştır.



5. SONUÇ

Bu çalışmada ilk olarak farklı tasarımlara sahip 4 binek araç yan ayna profili $V = 20, 30, 40$ m/s hızlarda ve $\beta = +10^\circ, 0^\circ, -10^\circ$ sapma açılarında nümerik olarak analiz edilerek C_D ve diğer aerodinamik karakteristiklerde oluşan değişimler değerlendirilmiştir. Bu ilk çalışmada tam faktöriyel bir deney planı uygulanarak tüm kombinasyonlar incelenmiş ve 4 ayna için toplam 36 adet analiz gerçekleştirilmiştir.

İkinci olarak, bağlama kolu geometrisine ait 3 değişkenin (boyut oranı, yükseklik ve uzunluk) aynanın C_D değerine etkisini incelemek için kesirli faktöriyel Taguchi L9 ortogonal bir deney planı hazırlanarak nümerik bir çalışma daha yapılmıştır. Bu ikinci çalışma için birinci çalışmadaki modellerden araca monte edilme yeri (A-sütunu veya kapı gövdesi) ve ayna bağlama kolu geometrisi farklı olacak şekilde iki model seçilmiştir. Bu analizlerde $V=30$ m/s ve $\beta=0^\circ$ olarak sabit tutulmuştur. Bağlama kolu geometrisiyle ilgili değişkenlerin C_D üzerine etkisi üçer seviyede incelenmiş ve 2 ayna için toplam 18 adet analiz gerçekleştirilmiştir.

Nümerik analizler değerlendirildiğinde elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Hızın hiçbir ayna modeli için C_D üzerinde anlamlı bir etkisi olmamıştır.
- C_D değerleri, farklı β ve V değerleri için;

Model 1’de 0,395 (pozitif β ’da) ve 0,444 (negatif β ’da) arasında,
Model 2’de 0,386 (pozitif β ’da) ve 0,395 (negatif β ’da) arasında,
Model 3’te 0,440 (pozitif β ’da) ve 0,488 (negatif β ’da) arasında,
Model 4’te 0,304 (negatif β ’da) ve 0,545 (nötr β ’da) arasında elde edilmiştir.

- Ayna geometrisinin yan kısımlarında boylamasına vortekslerin oluşmadığı (indüktif sürüklenmeye eğilimi düşük olan) ayna modellerinde (Model 1 ve Model 3), β ile C_D arasında birinci dereceden bir ilişki tespit edilmiştir. Buna göre, β açısı arttıkça C_D değeri doğrusal olarak düşmüştür.

- Ayna geometrisinin yan kısımlarında boylamasına vortekslerin oluştuğu ayna modellerinde (Model 2 ve Model 4), β ile C_D arasındaki ilişki birinci dereceden bir matematiksel modelle açıklanamamıştır. Kurulan ikinci dereceden regresyon modellerinin grafikleri çizdirildiğinde değişim eğrilerinin işaret de değiştirdiği görülmüştür. β açısındaki artışla C_D 'nin önce artıp ardından azalması, negatif β 'da boylamasına vortekslerin oluşmamasına bağlanmıştır. Negatiften nötr β 'ya geçildiğinde bu vorteksler oluşmuş ve C_D 'yi arttırmıştır. Nötrden pozitif β değerine doğru ise diğer aynalarda olduğu gibi C_D değeri düşmüştür.
- Model 4'ün iki yan kısmından araca yakın olanı; dışa doğru eğimli, eğrisel bir yüzeye sahiptir. Bu şeklin etkisiyle, diğer ayna modellerinden farklı olarak, yan kısımda yoğun şekilde oluşan boylamasına vortekslerin, ayna arkasında çapraz bir yol kat ederek araçtan uzaklaştığı fark edilmiştir. Ayna arkasında akışın bu şekilde gelişmesi araca kirlilik taşınmasını engelleyecek ve araca ulaşan aerodinamik gürültünün azalmasını sağlayacaktır. Bu vorteksler arka yüzeydeki C_p dağılımında salınımına sebep olmuştur.
- Model 4 akımçizgili bir model olsa da güçlü boylamasına vortekslerin etkisiyle en yüksek C_D değerini veren ayna modeli olmuştur.
- Cisim-ardı bölgeleri incelendiğinde;

Model 1'de dengeli bir vorteks çiftinin oluştuğu,

Model 2'de boylamasına vortekslerin etkisi ile aşağıya-sapmanın gerçekleştiği,

Model 3'te boylamasına vortekslerin olmaması ve enlemesine vorteks çiftinde aşağıdaki vorteksin daha güçlü olması sonucunda yukarıya-sapma meydana geldiği gözlenmiştir. Model 3'teki bu akış şekli dik (squareback) otomobillerin arkasında oluşan akıştakiyle benzerlik göstermiştir.

Model 4'te, akım çizgilerinin kısa mesafede birleştiği, ancak çapraz yönlü boylamasına vortekslerin, cisim-ardı bölgesinde belirleyici olduğu görülmüştür.

- Aynalara ait C_D değerleri bağlama kolunun, farklı boyut oranı, uzunluk ve yükseklik değerleri için;

Model 1’de 0,359 ve 0,429 arasında,

Model 2’de 0,255 ve 0,483 arasında elde edilmiştir.

- Dairesel / eliptik kesitli olan ve eğrisel bir şekilde uzayan Model 1’e ait kolda en etkili parametre yükseklik olmuştur. Boyut oranındaki ve uzunluktaki artış C_D değerini düşürürken, yükseklikteki artış C_D değerini arttırmıştır. Model 1’de yükseklik değerinin artması ile kol kısmının arkasından ayna gövdesinin arkasına doğru giden vortekslerin oluştuğu görülmüştür. Ayrıca uzunluktaki artış ayna arkasındaki bölgede vorteks oluşmasını engellemiştir. Boyut oranındaki artış ise geometrik şeklin akımçizgili olmasını sağlamıştır.
- Dörtgen kesitli olan ve doğrusal bir şekilde uzayan Model 2’ye ait kolda en etkili parametrenin boyut oranı olduğu tespit edilmiştir. Boyut oranındaki artış C_D değerini düşürürken, uzunluktaki ve yükseklikteki artış C_D değerini arttırmıştır. Model 2’de, boyut oranındaki artış geometrik şeklin akımçizgili olma özelliğini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ayrıca uzunluk değerinin artması ile cisim-ardı bölgesi önemli derecede büyümüş ve C_D ’yi arttırmıştır. Yüksekliğin ise akışta dikkate değer bir değişiklik oluşturmadığı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

Afgan, I., Moulinec, C., Laurence, D. 2008. Numerical simulation of generic side mirror of a car using large eddy simulation with polyhedral meshes. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 56: 1107-1113.

Akyazi, O., Usta, M.A., Akpınar, A.S. 2012. A self-tuning fuzzy logic controller for aircraft roll control system. *International Journal of Control Science and Engineering*, 2(6):181-188.

Alam, F., Jaitlee, R., Watkins, S. 2007. Aerodynamic effects on an automotive side view mirror. 16 th Australasian Fluid Mechanics Conference, 2-7 December 2007, Gold Coast, Australia.

Anderson, J. 2017. Fundamentals of aerodynamics. McGraw-Hill Education, New York, USA, 1130 pp.

Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., Van Wachem, B. 2012. Computational Fluid Dynamics for Engineers, Cambridge University Press, 189 pp.

Anonim, 2019a. Aerodynamics 1: Fundamental concepts. http://mercury.pr.erau.edu/~hayasd87/AE301/AE301_Notes_A-5.pdf -(Erişim tarihi: 05.09.2019)

Anonim, 2019b. Aerodynamics 1: 2-D Airfoils. http://mercury.pr.erau.edu/~hayasd87/AE301/AE301_Notes_C-2.pdf -(Erişim tarihi: 05.09.2019)

Anonim, 2019c. Examining spatial (Grid) convergence. <https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html> - (Erişim tarihi: 01.09.2019)

Anonim, 2020a. 5. Drag: An introduction. http://www.dept.aoe.vt.edu/~mason/Mason_f/CAtxtChap5.pdf -(Erişim tarihi: 10.01.2020)

Anonim, 2020b. Turbulence modelling. <https://allaboutcfd-tomersblog.com/2019/03/25/advanced-ansys-fluent-course-turbulence-modeling/> - (Erişim tarihi: 10.01.2020)

Anonim, 2020c. P değeri nedir? Nasıl yorumlanır?. <http://www.p005.net/pdegerinedir> -(Erişim tarihi: 12.01.2020)

Anonim, 2020d. Lecture 7: Turbulence modeling introduction to ANSYS fluent. https://www.academia.edu/36090206/Lecture_7_Turbulence_Modeling_Introduction_to_ANSYS_Fluent -(Erişim tarihi: 05.01.2020)

Ask, J., Davidson, L. 2009. A numerical investigation of the flow past a generic side mirror and its impact on sound generation. *Journal of Fluids Engineering*, 131(6): (061102) 01-12.

Beigmoradi, S. 2015. Aerodynamic drag and noise minimization of rear end parameters in a simplified car model utilizing robust parameter design method. *SAE Technical Paper*, 01-1360: 1-10.

Belazi, W., Ouldboukhitine, S.E., Chateauneuf, A., Bouchair, A. 2019. Experimental and numerical study to evaluate the effect of thermostat settings on building energetic demands during the heating and transition seasons. *Applied Thermal Engineering*, 152: 35-51.

Caballero, R., Vega, A., Berbey, A., Armada, M. 2014. Six degree of freedom underwater vehicle for culvert inspection. Proceedings of the 17th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 21 – 23 July 2014, Poznan, Poland.

Cavusoglu, Ö.F. 2017. Aerodynamics around wheels and wheel-houses. *MSc Thesis*, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics, Gothenburg, Sweden.

Cederlund, J., Vikström, J. 2010. The aerodynamic influence of rim design on a sports car and its interaction with the wing and diffuser flow. *MSc Thesis*, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics, Division of Vehicle Engineering and Autonomous Systems, Gothenburg, Sweden.

Çengel, Y.A., Cimbala, J.M., 2015. Akışkanlar mekaniği: Temelleri ve uygulamaları (3. baskı), Palme Yayıncılık, Ankara, 984 s.

Demir, L. 2004. İstatistiksel deney tasarımı yöntemi ve bir tekstil işletmesinde uygulanması. *Yüksek Lisans Tezi*, PAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.

Freeman C.M., Gaylard, A.P. 2010. Correlation of CFD simulation for front side glass wall pressure fluctuations at yaw. 8th MIRA International Conference on Vehicle Aerodynamics, 13-14 October 2010, Grove, United Kingdom.

Gökçe, B., Taşgetiren, S. 2009. Kalite için deney tasarımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6 (1): 71-83.

Hitchens, F., 2015. The encyclopedia of aerodynamics, Andrews UK Limited, UK, 877 pp.

<http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/angles/angle-pitch.jpg>

Hucho, W-H., 1987. Aerodynamics of road vehicles, Butterworth-Heinemann, Cambridge, 576 pp.

Igali, D., Mukhmetov, O., Zhao, Y., Fok, S.C., Teh, S.L. 2019. Comparative analysis of turbulence models for automotive aerodynamic simulation and design, *International Journal of Automotive Technology*, 20(6): 1145-1152.

İzgiz, S. 2001. Deney tasarımı ve Taguchi metodu. Federal Mogul, İstanbul, 355 s.

Jaitlee, R., Alam, F., Watkins, S. 2004. Pressure measurements on an automobile side view mirror. 15 th Australasian Fluid Mechanics Conference, 13-17 December 2004, Sydney, Australia.

Kato, C., Murata, O., Kokubo, A., Ichinose, K., Kijima, T., Horinouchi, N., Iida, A. 2007. Measurements of aeroacoustic noise and pressure fluctuation generated by a door – mirror model placed on a flat plate. *Journal of Environment an Engineering*, 2(2): 278-292.

Katz, J., 2016. Automotive aerodynamics. John Wiley & Sons, United Kingdom, 680 pp.

Kaya, F., Karagöz, İ. 2007. Girdaplı Akışlarda türbülans modellerinin uygunluğunun incelenmesi. *UÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 12 (1): 85-96.

Kee, J.D., Kim, M.S., Lee, B.C. 2001. The COANDA flow control and Newtonian concept approach to achieve drag reduction of passenger vehicle. *SAE Transactions*, 110 (6): 1383-1400.

Khalighi, B., Chen, K.H., Johnson, J.P., Snegirev, A., Shinder, J., Lupuleac, S. 2013. Computational and experimental investigation of the unsteady flow structures around automotive outside rear-view mirrors. *International Journal of Automotive Technology*, 14(1): 143-150.

Kim, J.-H., Han, Y.O., Lee, M.H., Hwang I.H., Jung, U.H. 2008. Surface flow and wake structure of a rear view mirror of the passenger car. BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications Milano, Italy, 1-12 p.

Li, Q., Yang, Z. 2011. Transient flow over generic rear view mirror using computational fluid dynamics. 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 10-12 June 2011, Shanghai, China.

Meyer, R.W., Erland, S. 2019. Induced drag in two dimensions in ideal fluids. *Journal of Physics Communications*, 3 (11): 1-19.

Mistree, F., Lautenschlager, U., Erikstad, S.O., Allen, J.K. 1993. Simulation reduction using the Taguchi method. NASA Contractor Report 4542, Texas, USA.

Montgomery, D.C. 2017. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons Inc., USA, 640 pp.

Montgomery, D.C., Runger, G.C. 2014. Applied statistics and probability for engineers. John Wiley & Sons Inc., USA, 836 pp.

Moussa, A.A., Yadav, R., Fischer, J. 2014. Aerodynamic drag reduction for a generic sport utility vehicle using rear suction. *Journal of Engineering Research and Applications*, 4 (8): 101-107.

Murukesavan, P., Mu'tasim, M.A.N., Sahat, I.M. 2013. Computational analysis of an effect of aerodynamic pressure on the side view mirror geometry. 2nd International Conference on Mechanical Engineering Research, 01-03 July 2013, Kuantan, Pahang, Malaysia.

Oberkampf, W. L., Trucano, T.G., 2002. Verification and validation in computational fluid dynamics. *Prog. Aerospace Sci.*, 38: 209–272.

Oh, H. W. 2012. Applied computational fluid dynamics. Intech, Rijeka, Croatia, 344 pp.

Olsson, M. 2011. Designing and optimizing side – view mirrors. *MSc Thesis*, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics, Sweden.

Roache, P.J. 1994. Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies. *Journal of Fluids Engineering*, 116(3): 405-413.

Rodriguez, N.P. 2016. Computational fluid dynamics analysis of a lateral mirror and introduction to digital implementation, *BSc. Thesis*, Polytechnic University of Catalonia, Telecommunications and Aerospace Engineering, Barcelona.

Rouméas, M., Gilliéron, P., Kourta, A. 2009. Drag reduction by flow separation control on a car after body. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 60: 1222-1240.

Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M. 2004. Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *İTÜ Mühendislik dergisi*, 3 (6): 117-128.

Sert, C., 2019. ANSYS Fluent tutorial – Flow over a 2D cylinder. <http://courses.me.metu.edu.tr/courses/me485/files/ME%20485%20Fluent%20Tutorial%202.pdf> -(Erişim tarihi: 08.01.2020)

Su, M., Yu, J. 2012. A parallel large eddy simulation with unstructured meshes applied to turbulent flow around car side mirror. *Computers and Fluids*, 55: 24-28.

Şirvancı, M. 1996. Kalite için deney tasarımı “Taguchi yaklaşımı”. Literatür Yayıncılık, Milwaukee, ABD, 110 s.

Tabatabaian, M. 2015. CFD module: Turbulent flow modeling. Mercury Learning and Information, Dulles, 217 pp.

Thor, W.S., Chippa, S., Majage, A. 2015. Dynamic analysis of outside rear view mirror. *SAE Technical Paper*, 26-0220: 1-8.

Umur, H. 2001. Akışkanlar mekaniği (3. baskı). Vipaş AŞ., İstanbul, 482 s.

Wang, Z., Wang, Y., Zhuang, M. 2018. Improvement of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines with leading-edge serrations and helical blades using CFD and Taguchi method. *Energy Convers Manage*, 177: 107–121.

Witcher, K., Mcandrew, I., Vishnevskaya, E. 2018. Aerodynamic analysis of low speed wing design using Taguchi L₉ orthogonal array. 2017 Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ACMAE 2017), 29-31 Dec. 2017, Yokohama, Japan.

Xiaohui, L., Yiping, W., Zhifu, C., Guangping, D., Zhengqi, G. 2010. The flow and aerodynamic noise calculation of a generic side mirror. 2010 IEEE 11th International Conference on Computer-Aided Industrial Desing & Conceptual Desing 1, 17-19 Nov. 2010, Yiwu, China.

Yemenici, O. 2017. An experimental investigation of the flow over an automobile side rear view mirror. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5(9): 52-54.

Yu, G., Liu, D. 2011. Numerical analysis on the relationship between aerodynamic drag coefficient and 3D molding of rear view mirror. 2011 IEEE 2nd International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering, 20-21 Aug. 2011, Wuhan, China.

Zhang, H., Wen, C., Yang, A. 2016. Optimization of lift force for a bio-inspired flapping wing model in hovering flight. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 8(2): 92-108.