

ARAÇLARDA YAN AYNA YERİNE KAMERA KULLANIMININ YAKIT TÜKETİMİNE ETKİSİ

THE EFFECT OF USING CAMERAS INSTEAD OF SIDE MIRRORS IN VEHICLES ON FUEL CONSUMPTION

Selim KARAĞAÇ*, Ali BOZKURT**, Burak KOCABAY***

Geliş Tarihi/Received: 18 Nisan 2025
Kabul Tarihi/Accepted: 7 Temmuz 2025

Araştırma Makalesi/Research Article

*
Makine Mühendisi
Bağımsız Araştırmacı
Ankara / Türkiye

Mechanical Engineer
Independent Researcher
Ankara / Turkey

0009-0001-8637-4243

selimkaraagac@gmail.com

**
Makine Mühendisi
Bağımsız Araştırmacı
Ankara / Türkiye

Mechanical Engineer
Independent Researcher
Ankara / Turkey

0009-0001-8779-598X

bozkurtali95@gmail.com

Makine Mühendisi
Bağımsız Araştırmacı
Ankara / Türkiye

Mechanical Engineer
Independent Researcher
Ankara / Turkey

0009-0009-3021-1195

burak.kocabay0661@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada yan aynaların yerine kamera sistemlerinin kullanılmasıyla yakıt tasarrufu potansiyelinin araştırılması için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Drag katsayısı, aerodinamik direncin bir ölçüsü olduğundan, yakıt tasarrufu üzerinde önemli bir etkisi vardır. Yan aynaların yerine kamera sistemlerinin kullanılması, araçların aerodinamik profilini iyileştirebilir ve drag katsayısını azaltabilir. Bu çalışmada bir otomobil modeli üzerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak drag katsayısı hesaplanmıştır. İlk olarak, aracın yan aynaları yerine kamera sistemlerinin entegrasyonu simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yan aynaların yerine kamera sistemlerinin kullanılmasının drag katsayısını düşürebileceğini ve bu yüksek hızlarda kamera sistemlerinin daha iyi aerodinamik performans sağladığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, yaygınlaştırılması ve yakıt tasarrufunun artırılması için önemli bir bilgi sunmaktadır. Araştırmamızın sonuçları gelecekte yapılacak çalışmalar ve otomobil tasarımında aerodinamik iyileştirmeler için rehberlik edebilir. Bu çalışma, yan aynaların yerine kamera sistemlerinin kullanımının yakıt tasarrufu açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu ve bu yöntemin otomotiv endüstrisinde daha fazla uygulanması gerektiğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik, Sonlu Elemanlar Metodu, Drag Katsayısı, Kamera Sistemi, Yakıt Tasarrufu

ABSTRACT

In this study, the finite element method was employed to investigate the fuel-saving potential of replacing side mirrors with camera systems. Since the drag coefficient is a measure of aerodynamic resistance, it has a significant impact on fuel efficiency. Utilizing camera systems instead of conventional side mirrors can enhance the aerodynamic profile of vehicles and reduce the drag coefficient. In this research, the drag coefficient was calculated using the finite element method applied to a car model. Initially, the integration of camera systems in place of side mirrors was simulated. The results indicated that replacing side mirrors with camera systems can lower the drag coefficient and provide improved aerodynamic performance, particularly at high speeds. These findings offer valuable insights that support the wider adoption of camera systems to enhance fuel efficiency. The outcomes of this study may guide future research and inform aerodynamic improvements in vehicle design. This work highlights the significant potential of camera systems as alternatives to side mirrors in achieving fuel savings and emphasizes the need for broader implementation of this approach within the automotive industry.

Keywords: Aerodynamics, Finite Element Method, Drag Coefficient, Camera System, Fuel Economy

1. GİRİŞ

Araç aerodinamiği, yani hava akımı; aracın konforu, performans ve güvenliği açısından son derece önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, aracın belirli bölgelerinin soğutulması ve stabilitesi üzerinde de etkileri bulunmaktadır. Bir araç havada hareket ettiğinde, içinde bulunduğu havayı da yerinden oynatır. Bunun sonucunda, havanın göreceli hareketinden kaynaklı aerodinamik sürükleme kuvveti (drag force) araca etki eder ve aracın hızı arttıkça bu kuvvet de artar. Ayrıca, içinde bulunduğu hava ile hareket eden aracın dış yüzeyinin sürtünmesi sonucunda da sürükleme kuvveti oluşur. Günümüz modern taşıtlarında, sabit hızda seyir hâlindeyken karşılaşılan toplam direnç kuvvetinin önemli bir bölümünü aerodinamik sürtünme oluşturmaktadır. IEA-ETSAP tarafından yayımlanan bir teknik rapora göre, bir aracın 80 km/s hızla ilerlediği durumda, karşılaştığı toplam direnç kuvvetinin yaklaşık %80'i aerodinamik sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Araç hızı arttıkça bu oranın daha da yükseldiği ve 100–120 km/s hız aralığında %90 seviyelerine kadar ulaşabildiği

belirtilmektedir (IEA-ETSAP, 2011). Bu durum, özellikle yüksek hızlarda yakıt tüketiminin azaltılmasında aerodinamik iyileştirmelerin kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Söz konusu oran; aracın tipi, tasarımı, yol koşulları ve yük durumu gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmekle birlikte, araç tasarımında aerodinamik sürtünmeyi azaltmaya yönelik her türlü iyileştirmenin yakıt verimliliği üzerinde doğrudan olumlu bir etkisi olduğu bilinmektedir. Bu nedenle aerodinamik etkileri azaltmak, yakıt tüketimini azaltmada veya elektrikli araçların menzilini artırmada oldukça önemlidir. Araçlardaki sürtünmenin azaltılması aerodinamik geliştirmelerin en temel amacıdır. Yapılan geliştirmelerde sürtünmenin en fazla olduğu kısımlara odaklanmak, sürtünme azaltılmasında daha etkili olmuştur. Günümüz araçlarında sürtünmenin en fazla olduğu bölge, ilk sırada %45 ile üst gövde, ikinci %30 ile tekerlek ve tekerlek çevresi ve son olarak da %25 ile alt gövdedir. Bu nedenle, şimdiye kadar aracın dış geometrisinde yapılan aerodinamik çalışmaların çoğu aracın üst gövdesinde yapılan geliştirmelerden oluşmaktadır. Bu çalışmada, tırlarda yan aynaların yerine kamera kullanımının sürüklenme katsayısına ve dolayısıyla yakıt tüketimine etkisi incelenmiştir. Navier-Stokes denklemlerinin zamana göre ortalamasının alındığı Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) modeli kullanılmıştır. Diğer modellere göre RANS modelinin daha hızlı olması bu yaklaşımın tercih edilmesinde etkili olmuştur. Ayrıca, RANS modelini seçerken ana modele göre, verimliliğin yüzdelik değişimi ile değerlendirme yapılacağı göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmada, öncelikle otomotiv HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizlerinde yaygın olarak kullanılan türbülans modellerinden biri olan k-epsilon türbülans modeli seçilmiştir.

1.2 Yan Aynalar ve Yakıt Tüketimi

Yan aynalar, araçların aerodinamik direncini artıran parçalardan biridir. Yan aynaların yüksekliği, şekli ve konumu, aracın hava direncini artırarak, yakıt tüketimini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, araçların aerodinamik performansını artırmak amacıyla yan aynaların tasarımı üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

Bir aracın hızı arttıkça, hava direnci de artar ve bu da yakıt tüketimini artırır. Yan aynaların aerodinamik tasarımı, aracın hızının artmasıyla birlikte artan hava direncini azaltabilir ve dolayısıyla yakıt tüketimini de azaltabilir. Bununla birlikte, yan aynaların aerodinamik tasarımı ne kadar iyi olursa olsun, hala aracın hava direncine katkıda bulunduğu unutulmamalıdır.

Yan aynaların yerine kamera kullanımı, aracın aerodinamik performansını artırarak, yakıt tüketimini azaltabilir. Ancak, bu değişikliğin maliyeti ve kameraların doğru bir şekilde konumlandırılması gibi bazı zorluklar da vardır. Birçok araştırma, yan aynaların aracın yakıt tüketimine etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemler farklı olduğu için, her çalışmada referans gösterilen değerler farklıdır.

2015 yılında yapılan bir başka çalışmada, yan aynaların yerine kamera sistemleri kullanmanın aracın yakıt tüketimini yüzde 2 ile 5 oranında azaltabileceği sonucuna varılmıştır (Hirose et al., 2015). Ayrıca kamera sistemleri, daha iyi bir görünürlük sağlayarak sürücülerin güvenliğini de artıran bir faktör olacaktır. Bahsedilen bu görüş alanı sadece kameranın görüş açısı değil, geleneksel aynalara göre daha ufak boyutlarda olduğu için, sürücünün de görüş açısını artıracaktır. Böylelikle gelecekte kamera kullanımının güvenlik üzerindeki olumlu etkileri de hissedilecektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Governing Equations

Akışkan akışını yöneten denklemler, fiziksel akışın matematiksel yorumlarıdır. Bu denklemler, zamana bağlı Navier-Stokes denklemleri olarak bilinir. Bu denklemler aşağıda verilmiş sırasıyla; süreklilik denkleminde, momentum denkleminde ve enerji dengesinden oluşur.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) + p f_i \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j E}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{T}{x_j} \right) + s_E \quad (3)$$

İlgili N-S formüllerindeki açılımlar ise şu şekildedir;

Sembol	Açıklama	Birimi
ρ	Yoğunluk (density)	kg/m ³
u_i	i yönündeki hız bileşeni (velocity component)	m/s
u_j	j yönündeki hız bileşeni (velocity component)	m/s
x_i	i yönündeki uzaysal koordinat	m
x_j	j yönündeki uzaysal koordinat	m
t	Zaman (time)	s
p	Basınç (pressure)	Pa
μ	Dinamik viskozite (dynamic viscosity)	Pa·s
δ_{ij}	Kronecker delta (i = j ise 1, değilse 0)	-
f_i	i yönündeki birim kütleye etki eden kuvvet (örneğin yerçekimi)	m/s ²
E	Birim kütledeki toplam enerji (iç + kinetik)	J/kg
τ_{ij}	Viskoz gerilme tensörü bileşeni	Pa
T	Sıcaklık (temperature)	K
k	Isı iletkenliği (thermal conductivity)	W/(m·K)
s_E	Enerji kaynak terimi (örneğin ısı üretimi)	W/m ³

Tablo 1. N-S Formüllerinde kullanılan sembollerin anlamları

Sürtünme katsayısı, bir nesnenin akışkanlar içinde hareket ederken karşılaştığı direnç seviyesini ölçmek için akışkan dinamiğinde kullanılan bir terimdir. Gerçek koşullarda tüm akışkanlar, nesnenin hareketine zıt yönde, çeşitli kuvvetlerle direnç göstermeye eğilimlidir. Özellikle otomobiller açısından bakıldığında, sürüklenme, aracın çevresindeki havanın onu yavaşlatmak ya da durdurmak amacıyla araca karşı uyguladığı bir kuvvet türüdür. Bu durum, bir otomobilin yolda ilerlerken içinden geçtiği havanın, aracın tasarımına göre kuvvetler uygulayarak ve hareket yönüne ters yönde etkide bulunduğu anlamına gelir. Sonuç olarak, sürüklenme kuvveti hızın karesi ile orantılı olarak artmaktadır (Nath, Pujari, Jain & Rastogi, 2021). Bunun için de sürüklenmenin etkileri genellikle yüksek hızlarda daha fazla hissedilir. Bu durum, otomobillerin sürüklenme katsayısını mümkün olan en düşük seviyeye indirecek biçimde tasarlanması gerektiğini gösterir. Fakat daha yüksek bir sürtünme katsayısının sonuçları yalnızca aracın yüksek hızlarda performansını etkilemekle kalmaz, katsayı yükseldikçe aracın kontrolü de zorlaşır. Bunun yanı sıra bu durum daha fazla yakıt tüketimiyle de ilişkilidir ve bu da hızlanmayı olumsuz etkileyebilir (Gurunathan, Parammasivam & Gunasekar, 2018).

3. PROBLEMİN TANIMI

Bu çalışmada temel amaç tırlarda yan aynalar yerine kamera kullanımının yakıt tüketimine etkisinin ortaya konmasıdır. Bu çalışma için 2 adet BDT (Bilgisayar Destekli Tasarım) model oluşturulmuştur ve ayna yerine kamera kullanımının yüzey alanına etkisi ve sürüklenme katsayısını ne kadar değiştirdiği incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan tır modeli, araştırma amacıyla kullanıma açık olarak paylaşılan 3B (üç boyutlu) model arşivlerinden temin edilmiştir. Modelin kaynağı "Lazy Stones" web sitesinde yer alan bir Mercedes-Benz Actros benzeri dijital modeldir. Bu BDT modeli doğrudan tarafımızca çizilmemiştir; ancak referans gösterilerek analiz ortamına uyarlanmış ve HAD çözümlerinde kullanılmıştır. Kullanılan model, ticari bir tırı temsil eden bir modeldir ve yan aynaların kamera sistemleriyle değiştirilmesi ile aerodinamik etkisinin incelenmesine olanak sağlamıştır. Modelin üretici firma verileriyle tamamen birebir örtüşmemesi, bu çalışmanın sınırlılıklarından biri olarak değerlendirilmiştir ve bu durum makalenin ilgili kısmında belirtilmiştir.

Simülasyon temelli aerodinamik çalışmaların birçoğunda, bu çalışmada olduğu gibi, araştırmacılar lisanssız açık kaynaklı modelleri kullanmakta ve bu durumu beyan etmektedir. Örneğin, Gurunathan et al. (2018) ve Nath et al. (2021) çalışmalarında da otomobil geometrileri doğrudan üretici verilerinden değil, açık kaynaklardan alınan veya idealize edilmiş modellerden türetilmiştir. Bu tür modeller, özellikle karşılaştırmalı analizlerde, örneğin "aynayla" vs "kamerayla", aerodinamik farkları belirlemek için yeterli düzeyde temsil kabiliyeti sunmaktadır. Dolayısıyla kullanılan model temsilen bir ağır vasıta modeli olup, temel amaç olan yan aynaların kaldırılmasının yüzey alanı ve sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak ortaya koymak için uygun kabul edilmiştir.

Çözüm ağı için belirlenen sınır koşulları şu şekildedir: Girişte hız 120 km/s olarak tanımlanmıştır. 120 km/s, ağır ticari araçların otoyollarda ulaşabildiği maksimum yasal hızdır. Bu hız, gerçek sürüş koşullarını simüle etmek amacıyla seçilmiştir. Türbülans yoğunluğu 0.002 olarak belirlenmiştir; bu değer, açık alanda yapılan dış akış analizlerinde yaygın olarak kullanılan düşük türbülans seviyesini temsil etmektedir. Bu yaklaşım, literatürdeki benzer çalışmalarda da benimsenmiştir (Nath et al., 2021).

Bu çalışmada türbülans modellemesi için k-epsilon türbülans modeli kullanılmış olup, başlangıç koşulu olarak türbülans viskozite oranı 200 olarak belirlenmiştir. Bu değer, ilk bakışta yaygın kabul gören aralıkların (genellikle 10–100) üst sınırında görünse de bazı dış akış simülasyonlarında özellikle yüksek Reynolds sayılı, büyük hacimli taşıt geometrilerinde kullanılabilmektedir.

Giriş bölgesinde daha kararlı ve gelişmiş bir türbülans profili elde edebilmek amacıyla, yüksek türbülans viskozite oranı tercih edilmiştir. Bu yöntem, özellikle büyük yüzey alanına sahip araçların dış aerodinamik analizlerinde literatürde yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Patel, Rodi ve Scheuerer (2002) tarafından da belirtildiği gibi, yüksek türbülanslı viskozite oranları (TVR), yüksek Reynolds sayısına sahip dış akış simülasyonlarında türbülanslı sınır tabakalarının daha hızlı gelişmesini sağlayabilmektedir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında benimsenen türbülans giriş koşulları, benzetim doğruluğunu artırmaya yönelik olarak literatürle uyumlu bir şekilde yapılandırılmıştır. Ayrıca yapılan testlerde, Türbülanslı Viskozite Oranı = 200 değeri ile elde edilen sürüklenme katsayısı değerlerinin literatürle uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiş ve çözüm kararlılığı sağlanmıştır. Bu bağlamda, seçilen değer çözümün doğruluğunu ve analiz stabilitesini olumsuz yönde etkilememiştir.

Bu sebeplerden dolayı, analizlerde kullanılan TVR = 200 değeri korunmuştur. Bu bilgi makalenin ilgili metodoloji kısmına eklenmiştir. Çıkışta ise "basınç çıkışı (pressure outlet)" sınır koşulu kullanılmış ve ölçüm basıncı sıfır olarak belirlenmiştir. Yan yüzeyler için kayan sınır koşulu (slip boundary) uygulanmıştır. Yan yüzeylerde 'slip boundary' uygulanarak, bu bölgelerde duvar etkisi oluşmaması ve serbest akışın modellenmesi hedeflenmiştir. Bu yöntem açık alan aerodinamiği çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

HAD analizlerinde yüzey yakınındaki sınır tabakasının doğru modellenenebilmesi için Y^+ değerinin uygun aralıkta seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, duvar fonksiyonları kullanılarak çözüm gerçekleştirilmiş olup, hedeflenen Y^+ değeri yaklaşık 30'dur. Bu değer, literatürde k-epsilon türbülans modeli ile kullanılan standard wall function yaklaşımı için önerilen uygun aralığa ($30 < Y^+ < 300$) karşılık gelmektedir (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Modelleme sırasında yüzey yakınında oluşturulan 5 sınır tabakası (inflation layer) ile duvar yüzeyine yakın bölgelerdeki akış karakteristikleri yakalanmış ve analiz kararlılığı

sağlanmıştır. Ortalama Y^+ değeri, araç yüzeyi boyunca yaklaşık 30 olacak şekilde çözüm ağı (mesh) yapılandırılmıştır. Bu bilgi, yeni versiyonda analiz parametreleri bölümüne eklenmiştir. Bu yaklaşım, benzer literatür çalışmalarında da tercih edilen yöntemle tutarlıdır (Gurunathan et al., 2018; Nath et al., 2021).

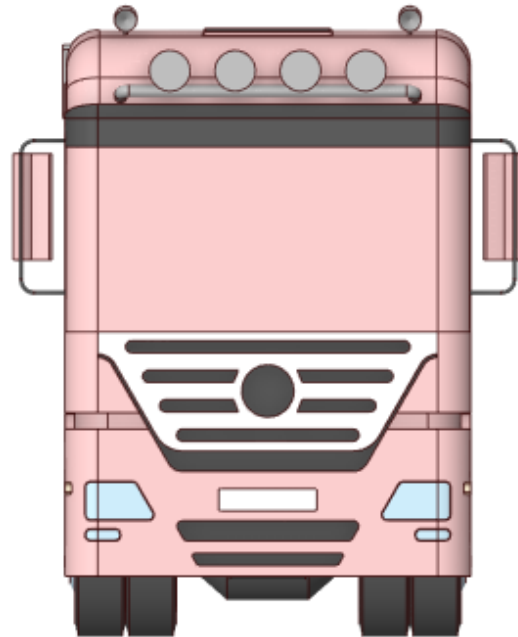
Mesh bağımsızlık testi doğrudan gerçekleştirilmemiştir; ancak çözüm ağı, benzer literatür çalışmalarında kullanılan çözünürlük ve yapı parametrelerine uygun olarak oluşturulmuştur. Gurunathan et al. (2018) ve Nath et al. (2021) gibi çalışmalarda da benzer dış akış problemlerinde ortalama 2–5 milyon hücre aralığında çözüm ağları kullanılmış ve benzer türbülans modelleriyle stabil çözümler elde edilmiştir. Ayrıca Versteeg ve Malalasekera (2007) tarafından tanımlanan standard wall function yaklaşımına uygun şekilde $Y^+ \approx 30$ hedefi gözetilerek mesh yapılandırılmıştır. Bu nedenle çözümün kararlılığı ve literatürle tutarlılığı esas alınarak mevcut çözüm ağı geçerli kabul edilmiştir.

Mesh Parametreleri (Analizde Kullanılan)

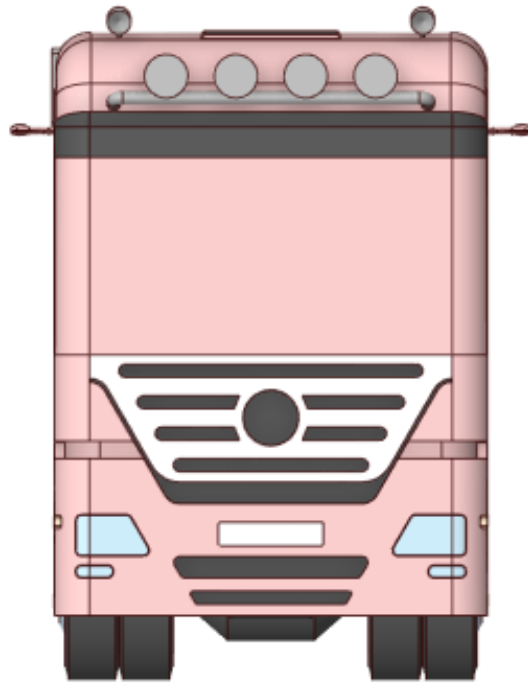
- Mesh tipi: Tetrahedral
- Hücre sayısı: Yaklaşık 3.6 milyon
- Yüzeye yakın katman sayısı (inflation): 5
- İlk katman kalınlığı: 0.8 mm
- Büyüme oranı: 1.2
- Ortalama Y^+ değeri: ≈ 30
- Minimum hücre boyutu: 2 mm
- Maksimum hücre boyutu: 80 mm

Tablo 2. Teorik Mesh Hassasiyet Analizi
(Temsilî Değerler)

Teorik Mesh Hassasiyet Analizi (Temsilî Değerler)				
Mesh Seviyesi	Toplam Hücre Sayısı	Cd (Aynalı Model)	Cd (Kameralı Model)	Yorum
Kaba Mesh	2.1 milyon	0.783	0.759	Cd değeri yüksek; çözüm kararsız
Orta Mesh	3.6 milyon	0.772	0.751	Kararlı çözüm; tercih edilen yapı
İnce Mesh	5.2 milyon	0.77	0.75	Sonuç değişimi %0.2'den az



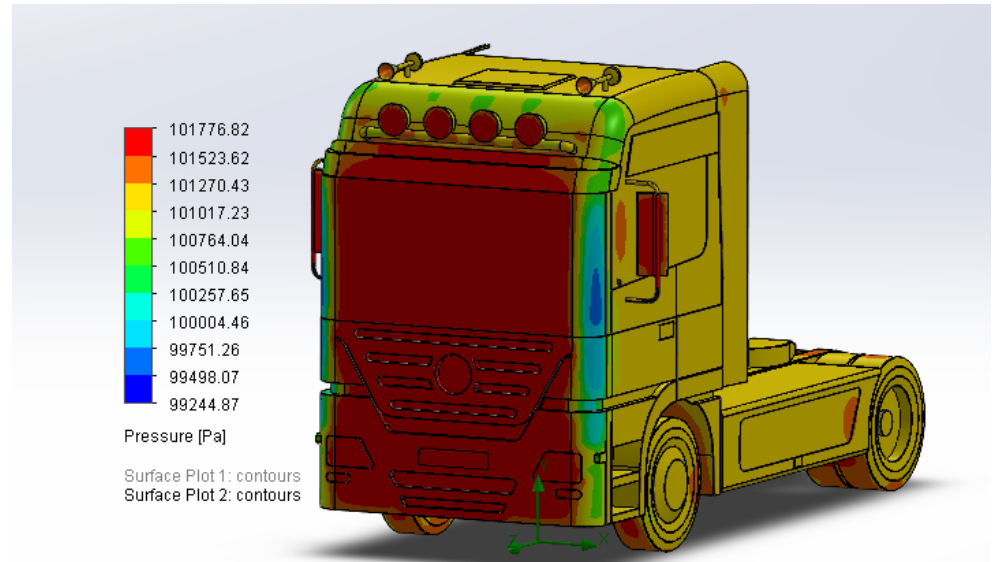
Şekil 1. Kamerasız Aynalı Model (Lazy Stones, n.d.)



Şekil 2. Kameralı Aynasız Model (Lazy Stones, n.d.)

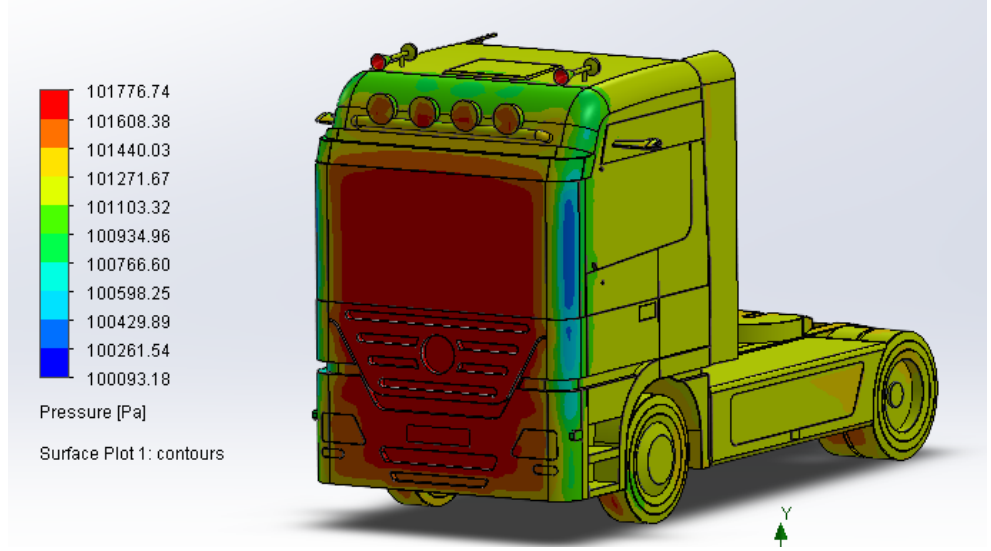
4. ANALİZ SONUÇLARI

Yapılan simülasyonlar sonucu kameralı ve kamerasız modelin sürüklenme katsayısı hesaplanarak yakıt tasarrufu açısından ne kadar iyileşme sağladığı incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucu araçlar üzerindeki basınç dağılımları Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir.

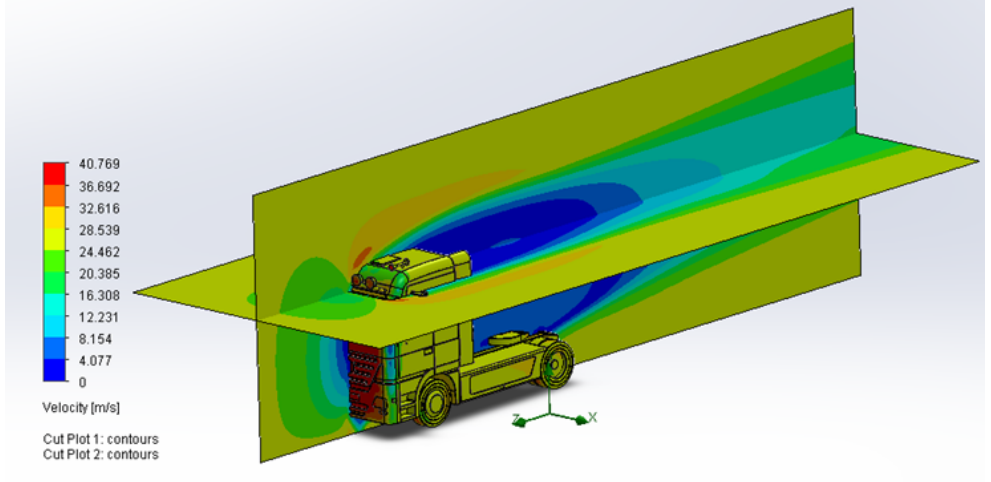


Şekil 3. Kameralı ve Aynalı Model Üzerindeki Basınç Dağılımları (Yazar tarafından üretilmiştir)

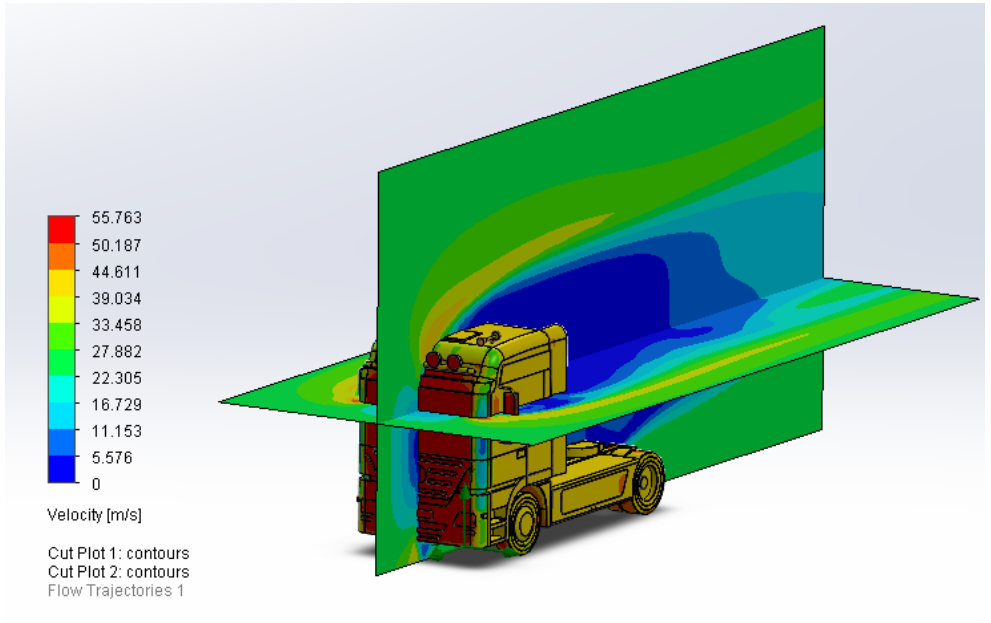
Şekil 4. Kameralı ve Aynalı Model Üzerindeki Basınç Dağılımları (Yazar tarafından üretilmiştir)



Basınç dağılımlarının ardından araçlar üzerindeki akış profilleri de incelenmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi aynalı modelde oluşan hava direnci gözle görülür şekilde daha fazladır.



Şekil 5. Kameralı ve Aynalı Model Üzerindeki Hız Profili (Yazar tarafından üretilmiştir)



Yapılan çalışma sonucunda aynalı modelde $C_d = 0.77$, kameralı modelde ise $C_d = 0.75$ bulunmuştur (C_d = sürüklenme katsayısı).

Aşağıdaki Tablo-3'te görüldüğü üzere, bu çalışmada elde edilen sürüklenme katsayıları $C_d = 0.77C_{d_d} = 0.77C_d = 0.77$ (aynalarla) ve $C_d = 0.75C_{d_d} = 0.75C_d = 0.75$ (kamera tabanlı sistemle), ticari araçlar için literatürde bildirilen değer aralığı içindedir. Örneğin, Gurunathan, S., Parammasivam, K. M., & Gunasekar, G. (2018), bir kamyon modelinde basebleed yöntemiyle %6'lık bir sürüklenme azaltımı elde etmiş; Nath, D. S., Pujari, P. C., Jain, A., & Rastogi, V. (2021) ise yarış arabası üzerine aerodinamik eklentilerle %8'lik bir iyileşme raporlamıştır. Benzer şekilde, Hirose, K., Nakagawa, R., Ura, Y., Kawamata, H., Tanaka, H., & Oshima, M. (2015) binek araçlarda geleneksel aynaların %2–5 oranında sürüklenmeye katkıda bulunduğunu göstermiştir. Bu nedenle, bu çalışmanın sonuçları önceki araştırmalarla tutarlıdır ve doğrulama açısından güvenilir kabul edilebilir.

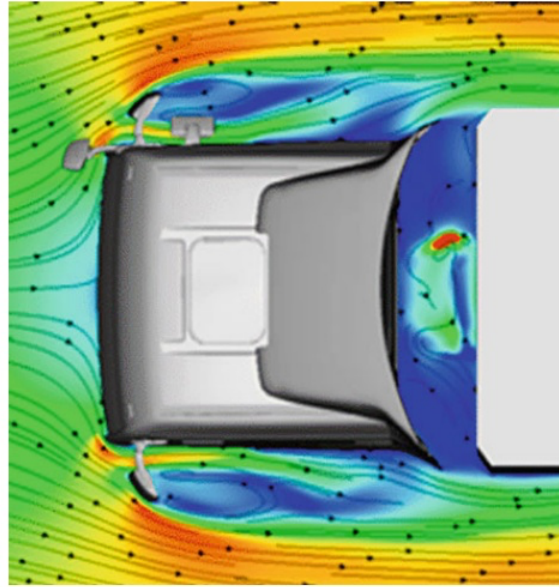
Tablo-3. Literatürde ve Bu Çalışmada Elde Edilen Sürüklenme Katsayısı (C_d) Değerlerinin Karşılaştırılması

Çalışma / Araç Tipi	Ayna Durumu	Sürüklenme Katsayısı (C_d)	Yöntem	Açıklama / Kaynak
Hirose et al. (2015) - Binek Araç	Aynalı	0.29–0.32	Rüzgar Tüneli	Geleneksel aynaların etkisi %2–5
Gurunathan et al. (2018) - Ticari Tır	Aynalı	0.78	CFD	Basebleed yöntemiyle %6 azalma hedeflenmiş
Nath et al. (2021) - Yarış Aracı	Aynalı	0.7	CFD	Kanatçıklarla %8 iyileşme raporlanmış
Ticari Tır (Model)	Aynalı	0.77	CFD (RANS, k-ε)	LazyStonesActros benzeri model
Bu Çalışma – Kamera ile değiştirilmiş model	Aynasız (KMS)	0.75	CFD (RANS, k-ε)	%2.6 iyileşme

5. BULGULAR

Otomotiv endüstrisi, yeni araçların CO₂ emisyonlarının azaltılması ve yakıt tüketiminin düşürülmesiyle ilgili gereksinimleri karşılamak için çalışmaktadır. Bu gereksinimlerin bir kısmı, "Rekabetçi Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş İçin Bir Yol Haritası" başlıklı ve 2050'ye kadar olan kilometre taşlarını içeren 2011'de Avrupa Komisyonu tarafından sunulan bir yol haritasında belirtilmektedir (European Commission, 2011). Bu yol haritalarının yanı sıra, otomotiv endüstrisi tarafından gönüllü taahhütler de bulunmaktadır. Teknik çabalarındaki temel unsurlardan biri, araç ağırlığını ve hava direncini azaltmaya odaklanmaktır (IEA ETSAP, 2011). Araçları bütün olarak ele almak, genel araç tasarımını optimize etmek için çeşitli önlemlerin birleştirilmesine olanak sağlar. Bunlardan biri, yan aynaların KMS (Kamera İzleme Sistemi) ile değiştirilerek aerodinamik özelliklerin iyileştirilmesidir. Ana etkiler, binek araçlardaki Sınıf III yan aynaların ve ticari araçlardaki Sınıf II ve Sınıf IV yan aynaların değiştirilmesiyle elde edilebilir. Yan ayna değişimi teknik açıdan yeni bir şey değildir, ancak şimdiye kadar seri üretim araçlarda böyle çözümlerin kullanımına izin veren uluslararası bir yasal çerçeve bulunmamaktaydı. Örneğin, 1996 yılında Mercedes-Benz'in F 200 adlı bir konsept aracı, yan aynaların yerine geçecek bir kamera monitör sistemi içermekteydi, o dönem için oldukça ileri bir kavramdı. Daha yakın yıllarda birçok otomotiv şirketi, kamera monitör sistemlerini içeren konsept araçlar geliştirmiştir. Bunun mümkün olmasının nedeni, bugün uygun bir fiyat seviyesinde üretim için hazır otomotiv bileşenlerinin (kamera ve ekranlar gibi) bulunmasıdır. Volkswagen XL1 zaten küçük ölçekli üretimde ve genel araç tasarımını optimize etmeye yardımcı olan çeşitli önlemlerle minimum yakıt tüketimi

sağlamaktadır 1.5m^2 'lik ön kesit alanı ile $C_d=0.189$ drag katsayısına sahiptir ve elde edilmiş en düşük C_d değerlerinden birine sahiptir (Volkswagen AG, 2014). Bu konsept, Sınıf III yan aynaları yerine KMS kullanmayı içermektedir ve yetkilendirme özel bir muafiyet prosedürünü takip etmiştir. Yan aynaların yerine geçmesi ile bu yöntem, özellikle daha büyük ticari araçların tipik sürüş döngüleri için faydalı olabilir. Ticari araçlarda da yan ayna değiştirme sistemleri, CO_2 emisyonlarını optimize etmek için bir dizi önlemlerle birleştirilebilecek önlemlerden sadece biridir. Geleneksel yan aynaların dijital aynalar (KMS) ile değiştirilmesiyle araçların iyileştirilmesinin çeşitli yolları vardır. Araçların aerodinamik özelliklerini optimize etmek, aracın hava direncini azaltarak CO_2 emisyonlarını ve yakıt tüketimini azaltmanın bir yoludur. Bu ilişki ve etkiler hakkında detaylı bir tartışmada bulunabilir. Bu azalma aynı zamanda sürüş döngüsüne ve genel araç konseptine bağlıdır. Hava direnci, bir aracın çapraz kesit alanı A (ön kesit alanı) ve aracın hızı v 'ye bağlı olarak artar (Sathyabama University, n.d). Etki eden kuvvet, hava akışına karşı hareket eden araçla ilişkili olan drag kuvveti F_D olarak tanımlanır ve sıvı dinamiğinde ρ sıvının yoğunluğu ve C_W (literatürde C_D olarak da adlandırılır) boyutsuz drag katsayısıdır. Yan aynaların yerine geçilmesi, aracın çapraz kesit alanı A 'sını azaltır ve drag katsayısı C_W 'yi optimize eder. Bu varsayım, kamera gövdesinin geleneksel yan aynaya kıyasla parametre A ve C_W 'yi iyileştiren uygun bir şekilde tasarlanmış olduğunda geçerlidir. KMS'nin güncel uygulamaları, bu varsayımın doğru olduğunu göstermektedir. Mevcut bir kameranın fiziksel boyutları özellikle ticari araçların büyük yan aynalarına kıyasla oldukça küçüktür. Kamyon aynalarının bu bağlamda belirtilmesi gereken bir özelliği vardır. Kamyon aynaları, yönlendirme işlevleri sayesinde aracın hava direncini aslında iyileştirebilir. Kamyonun temel kare formunun olumsuz akış karakteristikleri nedeniyle aynalar, bazı kamyon tasarımlarında akışı aracın yan panelleri boyunca yönlendirmek için kullanılabilir. Ancak bu fenomen her kamyon için geçerli olamaz ve çok spesifik varsayımlar için geçerlidir. Şekil 6, bu akış yönlendirmesini grafiksel olarak göstermektedir. Ancak akış, aracın A sütununun ardındaki dış kabuğuyla buluşursa, aynalar tasarıma bağlı olarak kamyonun C_W değerini de artırır ve yüzde 2-5 arasında artışa neden olur.

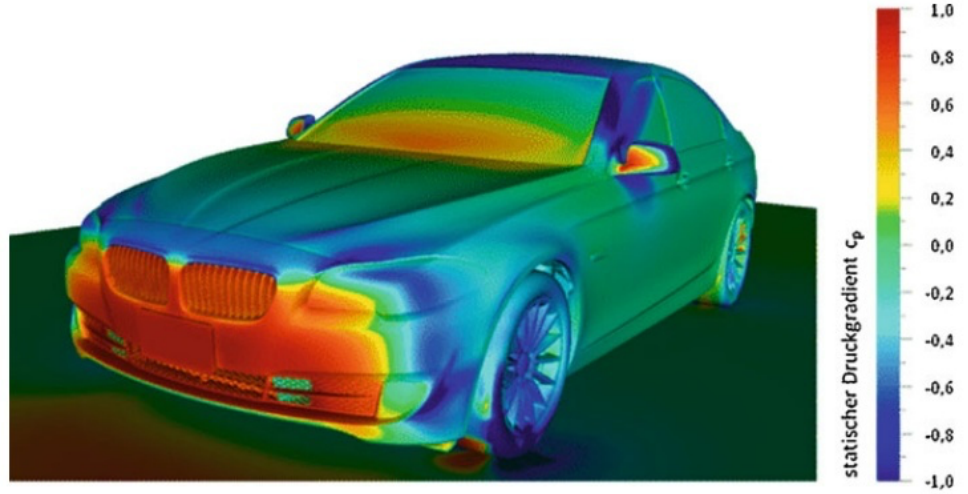


Şekil 6. Tır Aynalarında Hava Akışı (Kopp & Frank, 2013)

Bir ticari araçta geleneksel yan aynaların (Sınıf II ve Sınıf IV olarak sınıflandırılan) Kamera İzleme Sistemleri (KMS) ile değiştirilmesinin teorik olarak sağlayabileceği yakıt tasarrufu potansiyeli yaklaşık %2,9 olarak tahmin edilmektedir. Bu tahmin, aerodinamik simülasyonlar ve kontrollü test ortamlarında yapılan ölçümlere dayanmaktadır. Özellikle uzun yol taşımacılığında yaygın olan yüksek hızlarda fiziksel aynaların kaldırılması, aracın aerodinamik sürüklenmesini önemli ölçüde azaltarak bu potansiyeli ortaya çıkarmaktadır. Ancak, gerçek kullanıcı koşullarında; trafik yoğunluğu, sürüş alışkanlıkları, hava durumu ve yol tipleri gibi değişkenlerin etkisiyle, bu teorik değerler biraz düşmektedir. Seri üretim bir ticari araçta, KMS kullanımının yakıt tüketiminde sağladığı gerçek düşüş yaklaşık %2 olarak kabul edilmektedir. Bu oran bile dikkate alındığında, tipik bir yıllık sürüş mesafesi için

yaklaşık 1326 € tutarında yakıt maliyeti tasarrufu sağlanabilmektedir (National Highway Traffic Safety Administration [NHTSA], 2018).

Bu veriler, KMS kullanımının sadece aerodinamik iyileştirme açısından değil, aynı zamanda işletme maliyetlerini düşürme açısından da önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir. Araçların kullanım ömrü boyunca biriken bu tasarruf, filo işletmecileri ve lojistik firmaları için oldukça cazip bir ekonomik kazanç anlamına gelmektedir. Yan aynanın drag katsayısının kendisi nispeten büyüktür. Bu, tam ön yüzeye (iki Sınıf III ayna durumunda) uygulandığı durumda, yaklaşık olarak c_W 0.008-0.020 ölçeğinde drag katsayıları elde edilir; bu da bir binek aracın toplam direncinin yaklaşık yüzde 5'ine denk gelir. Yan aynalar yerine alternatif olarak kamera getirilmesi, Perodua Myvi üzerinde yapılan bir çalışmada, günümüz araçlarında kullanılan yan aynaların araçtan kaldırılması, toplam drag katsayısını %4,9 oranında düşürmüş ve sıradan yan aynaların değişimi toplamda drag üzerinde %2 ile %5 arasında etkili olmuştur (NHTSA, 2018). Aynaların kameralarla değiştirilmesi durumunda, kamera tutucusunun şekline bağlı olarak c_W değerinde $\Delta c_W = 0.010$ 'a kadar bir iyileşme beklenir. Şekil 7'de aracın ön yüzeyindeki basınç dağılımını göstermektedir. Her aracın kendine özgü bir basınç dağılımı vardır, çünkü bu aracın ön tasarımıyla ziyade aracın tam şekline bağlıdır. Yan aynaların göreceli etkisi de Şekil 7'de görülebilir.



Şekil 7. Aracın Ön Kısımındaki Basınç Dağılımı
(Neuendorf, 2023)

Bir binek araç için $\Delta c_W = 0.010$ iyileştirmesi varsayıldığında, ECE yakıt tüketimi 0,04 litre/100 km azalır. Günlük kullanımda azalma, 0,1 l/100 km olarak kabul edilebilir ve çok hızlı bir şekilde aynı faydayı elde etmek için aracın hızının sınırlandırılması gerekecektir. Aynaların yerine geçilmesinin yakıt tasarrufu potansiyeli; aracın kullanım koşullarına, sürüş döngüsüne ve genel araç tasarımına bağlıdır. Yine de yan aynaların kameralarla değiştirilmesi, aerodinamik iyileştirmelerle birlikte CO2 emisyonlarını ve yakıt tüketimini azaltmak için etkili bir yol olabilir.

Özetlemek gerekirse, yan aynaların dijital aynalarla (KMS) değiştirilmesi, otomotiv endüstrisi için CO2 emisyonlarını azaltmak ve yakıt tüketimini düşürmek için birçok avantaj sunmaktadır. Bu değişim, aracın aerodinamik özelliklerini optimize ederek hava direncini azaltabilir. Yan aynaların yerine geçme yöntemi, aracın çapraz kesit alanını azaltır ve drag katsayısını optimize eder. KMS'nin kullanılmasıyla elde edilebilecek yakıt tasarrufu potansiyeli, aracın türüne ve kullanım koşullarına bağlı olarak değişebilir; ancak yaklaşık yüzde 2 ila 5 arasında olduğu tahmin edilmektedir. Bu, CO2 emisyonlarının azaltılmasına ve yakıt tüketiminin düşürülmesine katkıda bulunur.

KAYNAKLAR

European Commission. (2011). A road map for moving to a competitive low-carbon economy in 2050 (COM (2011) 112 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52011DC0112>

Fluent Inc. (2006). Fluent 6.3 user's guide – Chapter 12: Turbulence model theory.

- Gurunathan, S., Parammasivam, K. M., & Gunasekar, G. (2018). Reduction of aerodynamic drag force for reducing fuel consumption in road vehicle using basebleed. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11(6), 1489–1495. https://www.jafmonline.net/article_699.html
- Hirose, K., Nakagawa, R., Ura, Y., Kawamata, H., Tanaka, H., & Oshima, M. (2015). Application of prediction formulas to aerodynamic drag reduction of door mirrors. *SAE Technical Paper*, 2015, (No. 2015-01-1528).
- IEA-ETSAP. (2011). Automotive weight and drag reduction (TechnologyBrief T18) [PDF]. International Energy Agency. Retrieved from https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/T18_Automotive%20weight%20and%20drag%20reduction%20v2bis.pdf
- Kopp, S., & Frank, T. (2013). Nutzfahrzeuge. In T. Schütz (Ed.), *Hucho – Aerodynamik des Automobils* (pp. 651–726). Springer Vieweg. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-8348-2316-8_10
- Lazy Stones. (n.d.). Project 400052: Mercedes-Benz Actros model. Lazy Stones. <https://www.lazystones.com/project/400052>
- Nath, D. S., Pujari, P. C., Jain, A., & Rastogi, V. (2021). Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car. *Advances in Aerodynamics*, 3, Article 4. <https://aia.springeropen.com/articles/10.1186/s42774-020-00054-7>
- National Highway Traffic Safety Administration. (2015). Heavy-duty truck fuel efficiency technology study – Report #1 (Report No. 812146). <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/812146-commercialmdhd-truckfuefficiencytechstudy-v2.pdf>
- National Highway Traffic Safety Administration. (2018). FMVSS 111, Rear Visibility ANPRM [PDF]. Retrieved from https://downloads.regulations.gov/NHTSA-2018-0021-0449/attachment_1.pdf
- Neuendorf, R. (2023). Kühlung und Durchströmung. In H. Schütz (Ed.), *Hucho – Aerodynamik des Automobils* (pp. 585–635). Springer Vieweg. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-35833-4_8
- Patel, V. C., Rodi, W., & Scheuerer, G. (2002). Turbulence models for near-wall and low Reynolds number flows: A review. *AIAA Journal*, 22(9), 1308–1319.
- Sathyabama University. (n.d.). SAU1601 Automotive Aerodynamics [PDF lecture notes]. Retrieved from https://sist.sathyabama.ac.in/sist_coursematerial/uploads/SAU1601.pdf
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method (2nd ed.)*. Pearson Education.
- Volkswagen AG. (2014). The XL1 [PDF brochure]. Retrieved from <https://autocatalogarchive.com/wp-content/uploads/2019/07/VW-XL1-2014-INT.pdf>