

KONVOY İKİ HAFİF TİCARİ TAŞITIN ARASINDAKİ MESAFENİN YAKIT TÜKETİMİNE ETKİSİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

Ulaş Cankan ÇİLİNGİROĞLU *^{ID}
Muhammed DÖNMEZ **^{ID}
Mehmet İhsan KARAMANGİL ***^{ID}

Alınma: 25.07.2023 ; düzeltme: 13.01.2024 ; kabul: 15.01.2024

Öz: Dünyada enerji eldesi ve tüketimi günümüzün en önemli sorunlarından biridir. Taşıtlarda enerji tüketimi de otomotiv endüstrisinin başlıca odaklandığı konulardandır. Taşıt sayısının artışının ister istemez sebep olduğu konvoy sürüşle enerji tüketimi azaltılabilir. Bu çalışmada, tek hafif ticari taşıt ve farklı taşıtlar arası mesafelerde konvoy iki taşıt için sürüklenme ve kaldırma katsayıları sayısal olarak belirlenmiştir. Bu sayısal çalışma bire bir taşıt boyutlarında ve %2,6 blokaj oranında tasarlanan rüzgar tüneline 90 km/sa hava giriş hızında Realizable k-ε türbülans modeli kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodolojisi ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak taşıtlar arası mesafe arttıkça iki taşıtın ortalama sürüklenme ve kaldırma katsayıları arttı. Konvoy sürüşte taşıtlar arasında mesafe olmaması durumunda tek taşıta göre öndeki taşıtın yakıt tüketimi %26 düşerken arkadaki taşıtın %4 artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Konvoy, Sürüklenme katsayısı, Kaldırma katsayısı, Özgül yakıt tüketimi

Numerical investigation of the effect of inter-vehicle distance on fuel consumption between two light commercial vehicle in convoy

Abstract: Energy production and consumption in the world are one of the most important problems of today. Energy consumption in vehicles is also one of the main focuses of the automotive industry. Energy consumption can be reduced by convoy driving, which is inevitably caused by the increase in the number of vehicles. In this study, the drag and lift coefficients of the light commercial vehicle model are numerically determined for two vehicles at different inter-vehicle distances and isolated vehicle. The numerical simulations are conducted in a wind tunnel designed with the exact dimensions of a isolated light commercial vehicle, with a 2.6% blockage ratio, and a wind speed of 90 km/h, using the realizable k-ε turbulence model. As a result, as the inter-vehicle distance increased, the average drag and lift coefficients of the two vehicles increased. In the absence of inter-vehicle distance in convoy driving, the fuel consumption of the lead vehicle decreased by 26%, while the rear vehicle increased by 4% compared to isolated vehicle.

Keywords: Computational fluid dynamics, Convoy, Drag coefficient, Lift coefficient, Specific fuel consumption

* ulascankan@gmail.com, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., 16110 Demirtaş Dumlupınar Osb/Osmangazi/Bursa

** muhammeddonmez@uludag.edu.tr, Bursa Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü

İletişim Yazarı: Muhammed Dönmez (muhammeddonmez@uludag.edu.tr)

*** ihsan@uludag.edu.tr, Bursa Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlu taşıtların enerji tüketimi ve oluşturdukları emisyonlar günümüzdeki önemli sorunlardan biridir. Bu nedenle otomotiv endüstrisi, yakıt tüketimini ve emisyonları azaltmaya yönelik teknolojilere odaklanmaktadır. Taşıtların ağırlığı, yüzey alanı ve sürüklenme katsayısı, yakıt tüketimini etkileyen temel parametrelerdir. Bu parametrelerin iyileştirilmesi, enerji tüketimini ve küresel ısınmanın bir nedeni olan emisyonları azaltabilir.

Sürüklenme katsayısının düşürülmesi, enerji tüketimini ve dolayısıyla emisyonları azaltmanın etkili bir yoludur. Günümüzde, sayısal ve deneysel yöntemlerin gelişmesiyle taşıtların sürüklenme katsayısı önemli ölçüde azaltılmıştır. Azalan sürüklenme katsayısı, taşıtların karşılaştığı hava direncini azaltır ve bu da enerji tüketimini düşürür.

Ayrıca, taşıtların yakın gelecekte otonom hareket edebilme yeteneği, konvoy oluşturma kavramına olan ilgiyi artırmıştır. Bunun yanı sıra, taşıtların sayısındaki artışla birlikte taşıtların doğal olarak konvoy halinde hareket etmeleri kaçınılmazdır. Konvoy halinde hareket etme fikri, sadece karayolu taşıtları için değil, aynı zamanda bisiklet, drone gibi birçok uygulamada da kullanılmaktadır.

Zabat ve diğ. (1995), deneysel olarak iki minivan modelinin tek taşıta kıyasla ortalama sürüklenme katsayısında önemli bir düşüş olduğunu belirlemişlerdir. Pagliarella ve diğ. (2007), Ahmed gövdesi ile taşıtlar arasındaki farklı mesafeler için bir rüzgar tüneline farklı model arka yüzey eğiminin etkisini araştırmış ve öndeki modelin sürüklenme katsayısının tek modele göre daha düşük, arkadaki modelin ise bir model uzunluğundan kısa modeller arası mesafelerde daha yüksek olduğunu saptamışlardır. Gnatowska ve Sosnowski (2018), konvoydaki yakıt tüketiminin azaltılmasına odaklanan bir rüzgar tüneline bulunan iki taşıtların basitleştirilmiş bir modeli için deneysel ve sayısal araştırma sonuçlarını sunmuşlardır. Armagan ve diğ. (2015), farklı mesafeler için iki Fiat Linea taşıtlarının deneysel ve sayısal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Kaluva ve diğ. (2020), taşıtların sayısı ve geometrisinin konvoydaki aerodinamik sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Browand ve diğ. (2004), tam ölçekli modellerde iki taşıttan oluşan konvoy kamyonların yakıt tüketimini araştırdı. Sonuç olarak, ortalama yakıt tasarrufunun 3-4 m taşıtlar arası mesafe için yaklaşık %11 ve 8-10 m için yaklaşık %8 olduğunu belirlemişlerdir. Al Alam ve diğ. (2010), farklı mesafelerde 70 km/s hızla ilerleyen ikili kamyonlar için %4,7-7,7 oranında yakıt tasarrufu elde etmişlerdir. Ayrıca, çalışmalarında değişken taşıtların ağırlıklarının yakıt tüketimine etkisini de incelemişlerdir. Hong ve diğ. (1998), farklı mevsimlerde iki tam ölçekli Ford Windstar minibüs modelinde konvoyun yakıt tüketimine etkisini araştırmışlardır. Ayrıca, tam ölçekli taşıtların gözlenen sürüklenme katsayılarının rüzgar tüneline elde edilen sonuçlardan %5-10 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bonnet ve Fritz (2000) tarafından yapılan çalışmada, konvoy kamyon modeli, tek taşıta kıyasla ön ve arka kamyon için önemli bir yakıt tasarrufu göstermişlerdir. Watkins ve Vito (2008), öndeki taşıtların aerodinamik sürüklenme katsayısının, bir taşıtların uzunluğu mesafeden daha büyük mesafelerde azalmadığını, ancak arkadaki taşıtta ciddi bir düşüş olduğunu belirlemişlerdir. Törnell ve diğ. (2021) yakın mesafede seyreden tır-treyler kombinasyonlarının aerodinamik davranışını incelemişlerdir. Öndeki taşıtların sürüklenme katsayısı, kısa mesafelerde azaldığını ve sonra arttığını; arkadaki taşıtların ise mesafe azaldıkça sürüklenme katsayısı kademeli olarak azaldığını söylemişlerdir. Luo ve diğ. (2022), farklı taşıtlar arası mesafelerdeki aerodinamik özelliklerin etkisini iki ve üç taşıtlar üzerinde sayısal simülasyon yöntemiyle incelemişlerdir. İki gövdeden üç gövdeye geçişte, öndeki taşıtların etkilenmediğini orta ve arkadaki taşıtların sürüklenme katsayılarının azaldığını gözlemlemişlerdir. Taşıtların sayısı arttıkça, arkadaki taşıta uygulanan hava akışının azalmasıyla toplam sürüklenme azalmıştır. Takımdaki taşıtların sayısının artırılması, ortalama sürüklenme katsayısını düşürebilir ve böylece yakıt tüketiminde daha fazla tasarruf sağlanabileceği göstermişlerdir. He ve diğ. (2022) konvoy içindeki taşıtların sayısı, taşıtların şekli ve taşıtlar arası mesafe gibi faktörlerin konvoyun aerodinamik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İki ve üç taşıtlı konvoylarda, taşıtlar arası mesafe değişimlerinin öndeki taşıtların sürüklenme katsayısına hafif etkisi, ancak ikinci ve üçüncü taşıtların sürüklenme katsayısına büyük etkisi olduğunu göstermişlerdir. Konvoy içindeki taşıtların sayısı arttıkça,

konvoyun ortalama sürüklenme katsayısı tek taşıta göre daha da düştüğünü söylemişlerdir. Ancak taşıt sayısı dörtten sonra düşüş miktarının azaldığını belirlemişlerdir. Cerutti ve diğ. (2021) parçacık görüntü hızı ölçüm tekniğine dayalı bir rüzgar tüneline yaptıkları çalışmada iki taşıtlı konvoyda, taşıt uzunluğunun yarısı kadar taşıtlar arası mesafede, önde ve arkadaki taşıtlar için sırasıyla %30 ve %43 sürüklenme katsayısında azalma olduğunu söylemişlerdir. Çalışmalarında ayrıca üç ve dört taşıttan oluşan konvoyun aerodinamik özelliklerini belirleyerek istenilen sayıda taşıttan oluşturulacak konvoyun ortalama sürüklenme katsayısı için basit bir model sunmuşlardır.

Literatürde konvoy taşıtlarının, özellikle konvoy hafif ticari taşıtların aerodinamik özellikleri üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca, her taşıtın kendine özgü aerodinamik tasarımı, konvoyun aerodinamik özelliklerini etkileyerek bu alandaki araştırmaları daha da önemli hale getirmektedir. Bu çalışmada, şehiriçi ve şehirlerarası taşımacılıkta yaygın olarak kullanılan hafif ticari iki taşıtın konvoy durumunda sürüklenme ve kaldırma katsayıları farklı taşıtlar arası mesafeler için belirlenmiştir. Daha sonra, sürüklenme ve kaldırma katsayılarını temsil eden metamodel kullanılarak, taşıtlara etki eden toplam direnç kuvvetinin minimum olduğu taşıtlar arası mesafe belirlenmiştir. Ayrıca direnç kuvvetlerinin minimum olduğu taşıtlar arası mesafe için yakıt tüketimleri hesaplanarak literatüre katkı sağlanmıştır.

2. METODOLOJİ

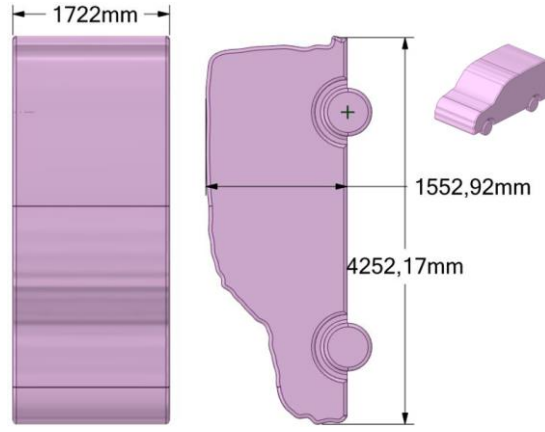
Bu çalışmada, hafif ticari taşıtların konvoy durumunda sürüklenme ve kaldırma katsayıları belirlenmiştir. Tek taşıtın ve konvoy durumundaki taşıtların farklı taşıt boyu/taşıtlar arası mesafelerde (x/L) sürüklenme, kaldırma katsayıları, tünel içi basınç ve hız dağılımları elde edilmiştir. Analizler, 0-2 arasında olmak üzere altı farklı x/L oranlarında gerçekleştirilmiştir. Hareket halindeki taşıta etki eden kuvvetler, tahrik kuvveti ve direnç kuvvetleridir. Tahrik kuvveti, motor vasıtasıyla iletilmiş olup, yol ile tekerlek arasındaki etkileşime dayalı olarak ortaya çıkmaktadır. Direnç kuvvetleri aerodinamik, yuvarlanma ve ivmedir; bu kuvvetlerin içine yol şartlarına bağlı olarak eğim direnci eklenecektir. Bu kuvvetler eşitlik 1'de sunulmuştur.

$$F_{TAHRİK} = F_{AERODİNAMİK} + F_{YUVARLANMA} + F_{İVMELENME} \quad (1)$$

Aerodinamik direnç kuvveti, taşıt hareketine ters yönde etki etmektedir. Taşıtın hızı arttıkça bu kuvvet artar ve özellikle yüksek hızlarda oldukça yüksek değerlere ulaşabilir. Aerodinamik direnç kuvveti aşağıdaki eşitlik 2'de görülmektedir. Burada ρ yoğunluğu, A taşıtın ön yüzey alanını, C_D sürüklenme katsayısını, C_L kaldırma katsayısını ve V taşıt hızını temsil etmektedir.

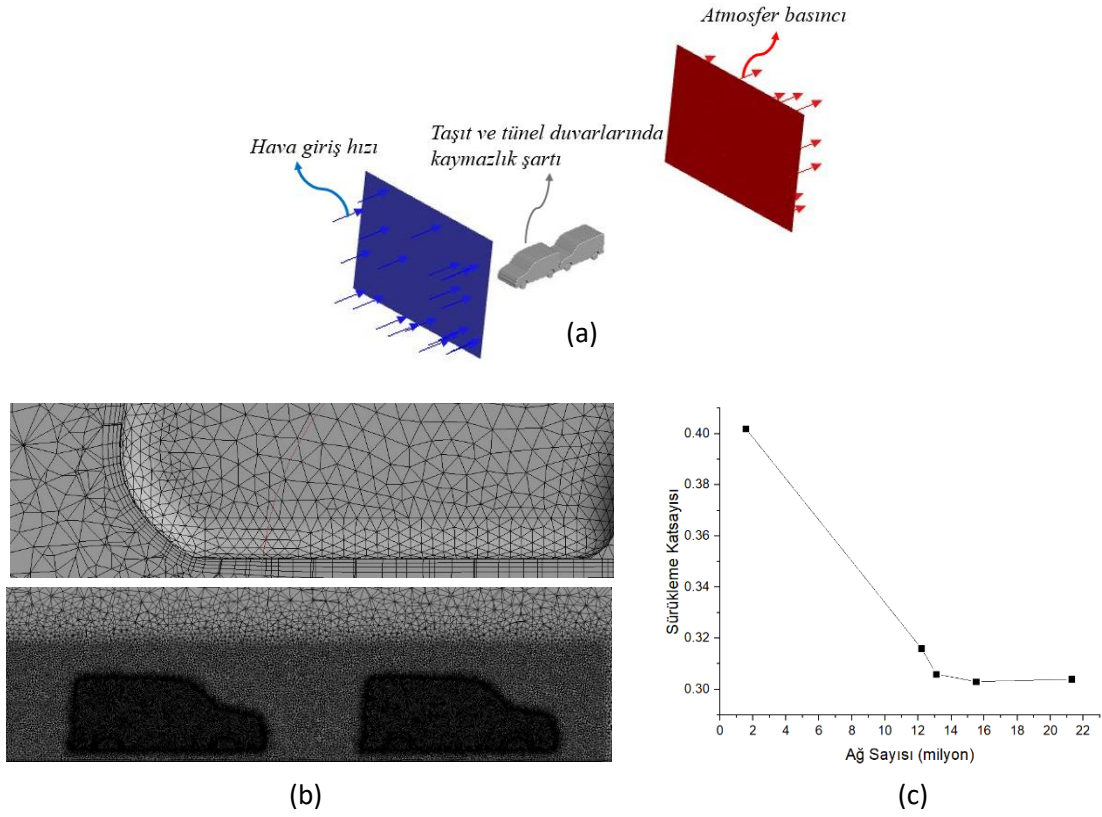
$$F_{AERODİNAMİK} = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_D (V)^2 + 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_L (V)^2 \quad (2)$$

Aerodinamik direnç kuvveti üç ana nedenden kaynaklanmaktadır. İlk olarak, taşıtın arkasında oluşan türbülans kaynaklıdır. Bu kuvvet özellikle taşıtın şekline bağlıdır. Taşıtın şekline bağlı direnç kuvveti, aerodinamik direnç kuvvetinin en önemli bileşenidir ve taşıttaki toplam aerodinamik kuvvetin yaklaşık %80'ini oluşturur. Aerodinamik direnç kuvvetinin diğer bir bileşeni, taşıtın dış yüzeyinde akan havanın oluşturduğu yüzey sürüklenmeleridir. Bu kuvvet, toplam aerodinamik direnç kuvvetinin yaklaşık %10'u kadardır. Son olarak, taşıtın radyatör sisteminden veya taşıt içinden geçen hava akışının soğutma ve havalandırma için neden olduğu direnç kuvvetidir. Bu direnç kuvveti, toplam aerodinamik kuvvetin yaklaşık %10'unu oluşturur.



Şekil 1:
Hafif ticari taşıt ölçüleri

Analizler geometrik, kinematik ve dinamik olmak üzere üç benzerlik şartına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Taşıt geometrisi tam ölçekli olarak tasarlanmıştır. Kinematik benzerlik için yaklaşık %2,6 blokaj oranı sağlanmıştır. Burada taşıtın ön alanı 2,81 m², tünelin ön alanı ise 108 m²'dir. Şekil 2a'da görüldüğü üzere tünel giriş hız şartı 90 km/sa uygulanmıştır. Tünel duvarlarında ve taşıt yüzeylerinde kaymazlık şartı uygulanırken, tünel çıkışında atmosfer basıncı uygulanmıştır.



Şekil 2:
a. Sınır Koşulları b. Ağ yapısı c. Ağdan bağımsızlık çalışması

Şekil 2b'de, tünel içindeki ağ yapısı ve ağ yoğunluğunun dağılımı gösterilmiştir. Tünel akış hacminde tetrahedron hacim elemanları, tünel duvarları ve taşıt yüzeylerinde daha sık bir yapıya sahip hexahedron ağ hacimleri, kaymazlık şartını sağlayarak oluşacak akışı daha doğru modellemek amacıyla kullanılmıştır. Hexahedron elemanları, tünel duvarları ve taşıt yüzeylerinde cidara yakın bölgelerde daha sık, daha sonra ise %120 oranında büyütülerek daha az elemanla modelleme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, taşıt etrafında ek bir tünel davranışı sergileyen bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu oluşturulan ağ yapısıyla taşıt etrafındaki ağ yoğunluğu, tünel içinde genel yoğunluktan daha fazla olacak şekilde düzenlenmiştir. Bu sayede, taşıt etrafında oluşan çalkantı ve akış ayrılmaları daha doğru bir şekilde belirlenerek aerodinamik direnç kuvvetleri ve katsayıları doğru bir şekilde elde edilmiştir.

Ağ bağımsızlığı çalışmasının amacı, bir HAD çalışmasında akış yapısını doğru elde etmek için gereken minimum ağ boyutunu belirlemektir. Çözümün doğruluğu büyük ölçüde kullanılan ağın kalitesine ve boyutuna bağlıdır. Daha kaba bir ağ, hatalı veya yanıltıcı sonuçlara yol açabilirken, daha sık ağ, daha uzun hesaplama süresi ve daha yüksek hesaplama maliyeti doğurmaktadır. Şekil 2c'de 13 milyon ağ sayısının uygun olduğu belirlenmiştir.

Zamandan bağımsız, Newton tipi akışkanlı (hava) ve üç boyutlu sıkıştırılamaz akışlar için süreklilik ve momentum eşitlikleri sırasıyla eşitlik 3 ve eşitlik 4'te gösterilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{u_i u_j} \right) \quad (4)$$

Burada τ_{ij} , ρ ve P sırasıyla gerilim tensörü, sıvı yoğunluğu ve statik basınçtır. u_i ve u_j tensör biçiminde sıvı hızları gösterilmektedir. Literatürde Realizable k - ϵ sayısal çalışmalarla uyumlu olduğu için bu çalışmada da kullanılmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

Taşıma eşitliklerinde türbülans viskozitesi $\mu_t = \rho C_\mu \left(\frac{k^2}{\epsilon} \right)$, ile tanımlanır. Non-equilibrium Reynolds stres terimi için eşitlik 5'te Boussinesq girdap viskozitesi kullanılır. G_k ve G_b , sırasıyla ortalama hız gradyanı ve kaldırma kuvveti nedeniyle türbülanslı kinetik oluşumunu temsil eder. Model sabitleri $C_{1\epsilon}=1.44$, $C_{2\epsilon}=1.92$, ve $C_\mu=0.09$, ve türbülanslı Prandtl sayıları $\sigma_k=1.0$ and $\sigma_\epsilon=1.3$ 'tür.

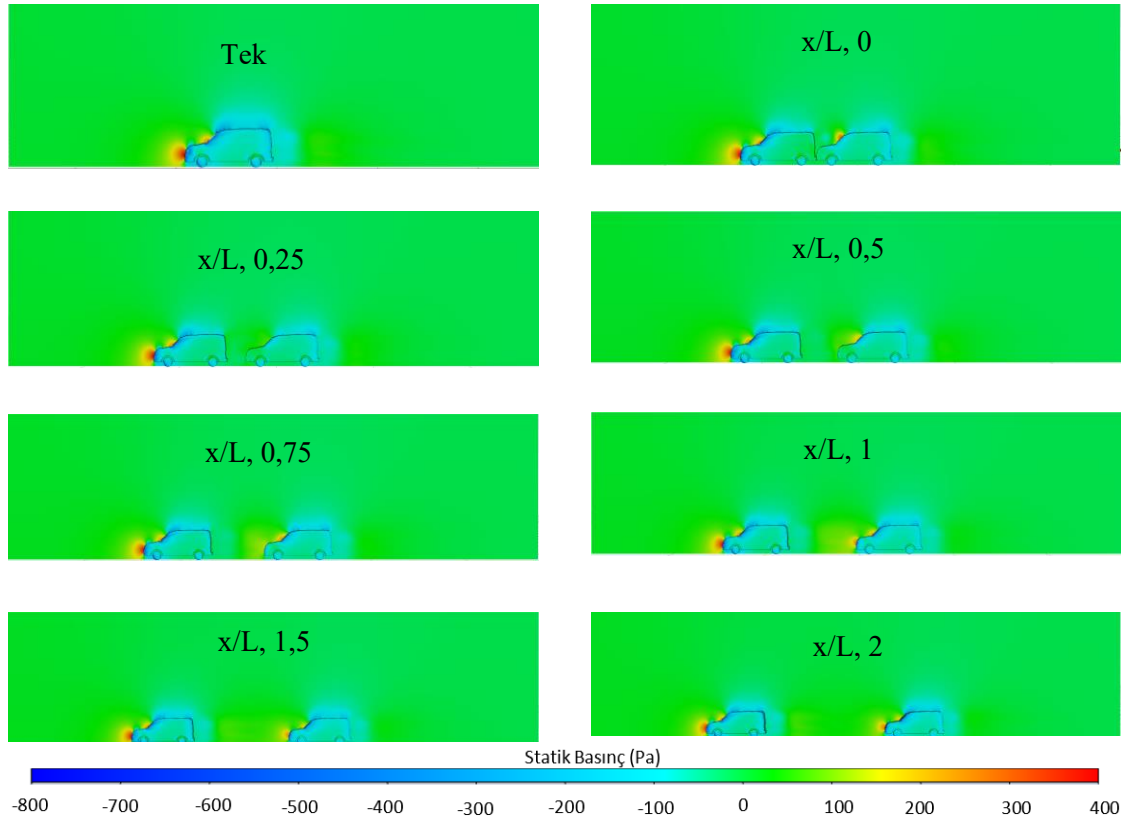
$$-\overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

Denklemlerin çözümlenmesinde basınç-tabanlı bir çözücü kullanılmıştır. Bu çalışma Fluent yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Fluent yazılımında denklemlerin çözümleri iki şekilde gerçekleştirilebilir: ayrık veya coupled. Ayrık çözümlerde basınç ve hız sırayla güncellenir. Öncelikle basınç güncellenir sonra hız güncellenmiş basınca bağılı olarak güncellenir. Bağılantılı çözümlerde ise basınç ve hız eş zamanlı olarak güncellenir. Yani, basınç ve hız birbirine bağılı olarak güncellenir ve etkiler. Coupled çözümlerle ile konvoy taşıtların sayısal modellemesi çözümlendirilmiştir.

Sayısal hesaplamalı yöntemin doğruluğu, Ahmed modeli kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışma ile teyit edilmiştir. Bu doğrulama, Meile ve diğ. (2011) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma kullanılarak yapılmıştır. Meile ve diğ. (2011) çalışmalarını rüzgar tüneline deneysel olarak ve Fluent yazılımında sayısal olarak yürütmüşlerdir. Doğrulama çalışması, 25° eğim açısına sahip Ahmed gövdesi ile 40 m/s hava giriş hızına karşılık gelen 2,78.106 Reynolds sayısında gerçekleştirilmiştir. Meile ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmada C_D (sürüklenme katsayısı) deneysel olarak 0,299 olarak elde edilmiştir. Bu çalışmanın sayısal kısmında elde ettikleri C_D ise 0,295 iken, bu çalışmada oluşturulan modelle elde edilen C_D katsayısı 0,305 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmanın modeli, simülasyon ve deneysel sonuçlarla uyum göstermiştir.

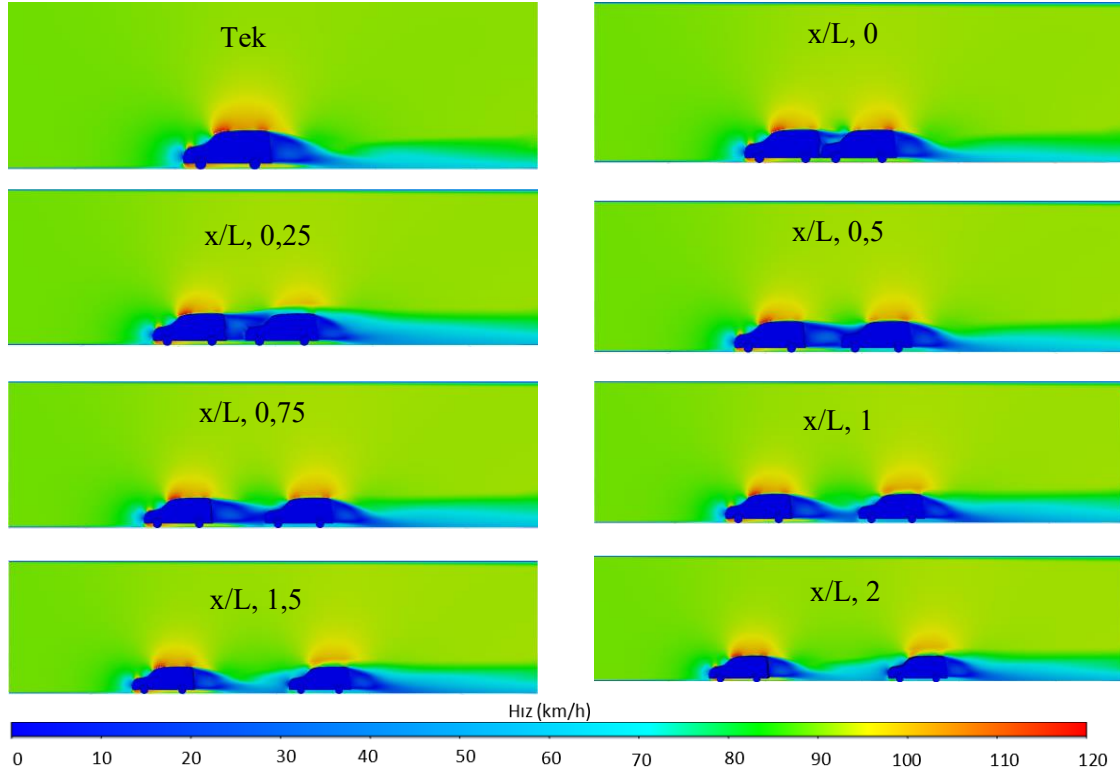
3. BULGULAR

Bu çalışmada, hafif ticari taşıtların sürüklenme ve kaldırma katsayıları, hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodolojisi kullanılarak hesaplanmıştır. Sayısal analizler, taşıtlara etki eden minimum direnç kuvvetini belirleyerek maksimum enerji tasarrufu sağlayacak taşıtlar arası mesafeyi ortaya koymayı amaçlamaktadır. İki taşıtların sürüklenme ve kaldırma katsayıları, farklı taşıtlar arası mesafelerde, 90 km/sa hızında incelenmiştir.



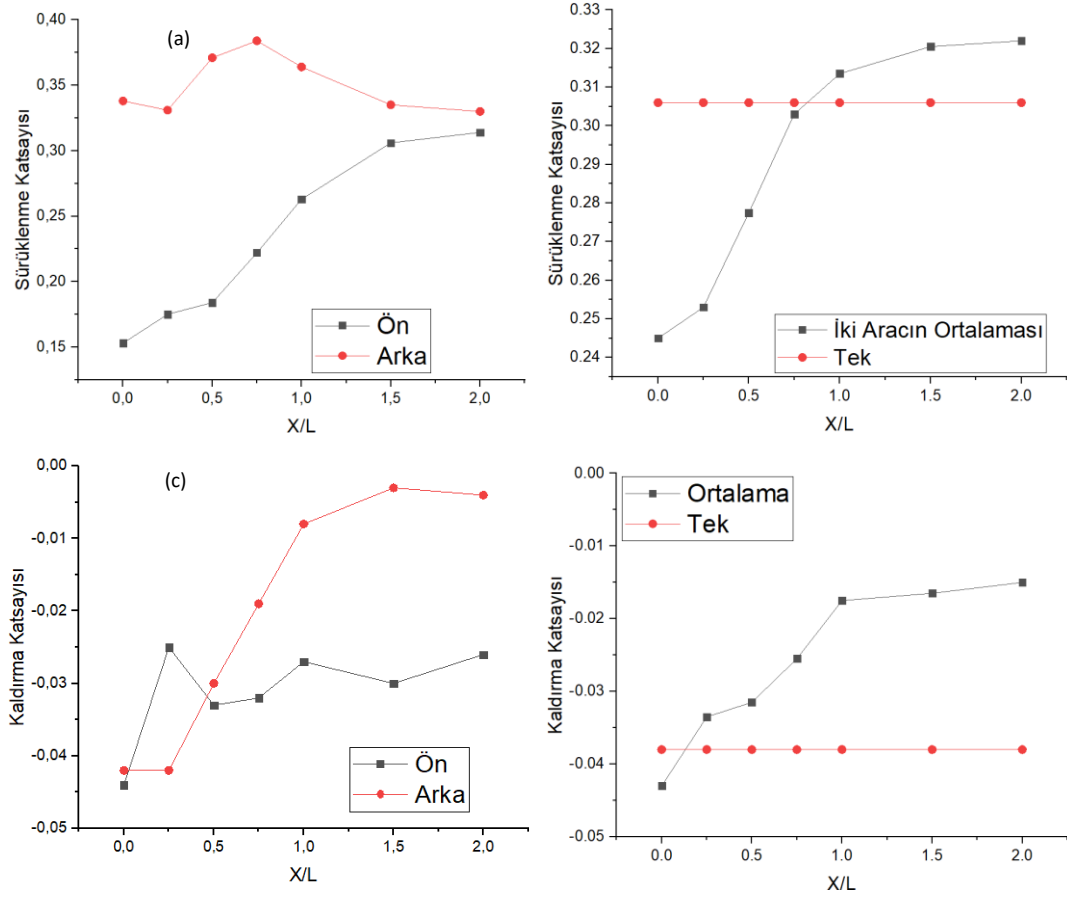
Şekil 3:
Farklı taşıtlar arası mesafeler için tünel içi ve taşıtlar üzeri basınç dağılımı

Hafif ticari için değişen x/L oranlarına göre elde edilen basınç konturları şekil 3'te verilmiştir. Şekiller tünelin yatay uzunluğunun orta düzleminden alınmıştır. Taşıtların yüzeylerindeki basınç dağılımı çeşitli x/L için elde edilmiştir. Öndeki taşıtın vakum bölgesinde oluşan basınç değeri, arkadaki taşıtın öndeki taşıta yaklaşmasıyla artar. Böylece öndeki taşıtın sürüklenme katsayısı azalır. Ayrıca arka taşıtın ön yüzey alanında azalan basınç, arka taşıtın sürüklenme katsayısının azalmasına neden olur. Konvoy sürüşünde, farklı taşıtlar arası mesafelerde, benzer aerodinamik yapıya sahip taşıtların ön ve arka yüzeylerinde basınç farklılıkları oluşur. Farklı mesafelerde önde gelen taşıtın ön yüzey alanına yaptığı basınç ve tek taşıtın ön yüzeyindeki basınçla benzerlik göstermektedir.



Şekil 4:
Farklı taşıtlar arası mesafeler için tünel içi ve taşıtlar üzeri hız dağılımı

Öndeki ve arkadaki taşıtın etrafındaki havanın hızı tek taşıta göre x/L 'ye bağlı olarak farklılık göstermektedir. Tünel içindeki havanın hız dağılımı şekil 4'te sunulmuştur. En yüksek hava hızı öndeki ve tek taşıtın ön yüzey alanının üst kısmında görülmektedir. Taşıtlar arası mesafenin artmasıyla arkadaki taşıtın önündeki havanın hızı artmaktadır. Ayrıca bu mesafenin artışıyla arkadaki taşıtın üstündeki havanın hızı ise düşmektedir.

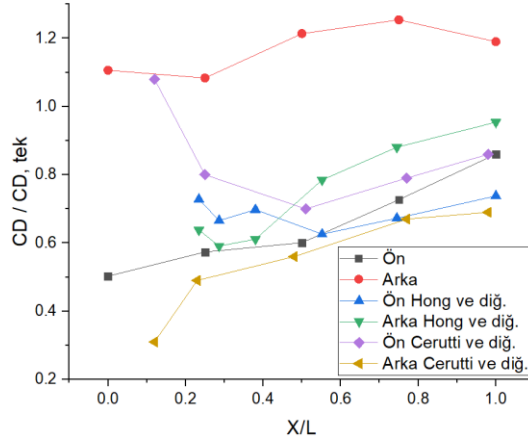


Şekil 5:

a. Ön ve arka taşıtın sürüklenme **c.** ve kaldırma katsayıları **b.** **d.** ve ortalama değerlerinin tek taşıtla karşılaştırılması

Birbirini takip eden taşıtlar arasında x/L oranı azaldıkça öndeki taşıtın sürüklenme katsayısının, kademeli olarak azalmakta aynı zamanda bu öndeki taşıtın düşük x/L oranlarında sürüklenme katsayısının, tek başına sahip olduğu sürüklenme katsayısından da daha düşük çıkması gerekir. Arkadaki taşıtın da sürüklenme katsayısı x/L 'ye bağlı bir eğilim sergilememektedir, şekil 5a. Şekil 5b'de iki hafif ticari taşıtın ortalama sürüklenme katsayısının tek taşıtla karşılaştırılması sunulmuştur.

Arkadaki taşıtın kaldırma katsayısı x/L 'nin artmasıyla birlikte artmaktadır. Tıpkı sürüklenme katsayısında olduğu gibi kaldırma katsayısının düşük olması istenmektedir. Bu yüzden 0 ve 0,25 x/L 'de arkadaki taşıtın kaldırma katsayısının minimum olması iyi bir durumdur, şekil 5c. Şekil 5d'de iki hafif ticari taşıtın ortalama kaldırma katsayısının tek taşıtla karşılaştırılması sunulmuştur.

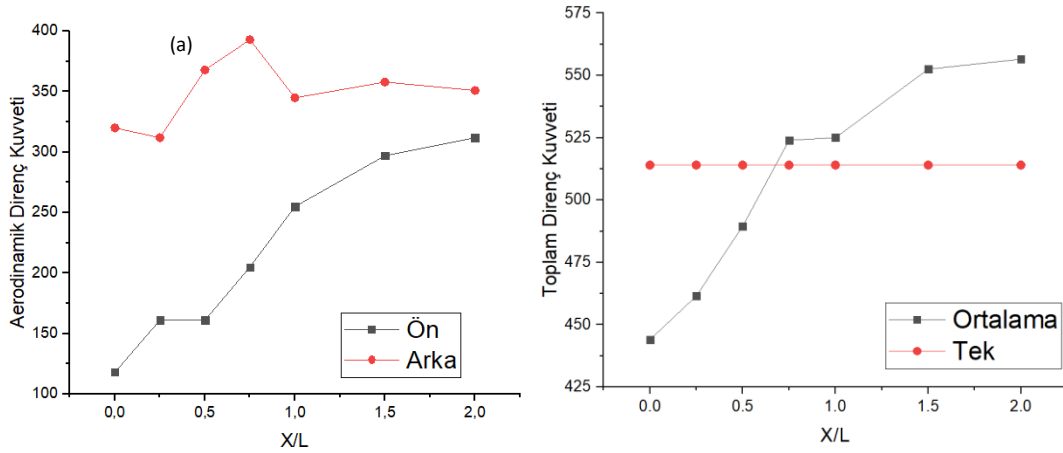


Şekil 6:

$C_D/C_{D,tek}$ karşılaştırılması

Hong ve diğ.(1998) ve Cerutti ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmalarla bu çalışma kapsamında elde edilen ön ve arka taşıtların sürüklenme katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır. Ön ve arka taşıtların sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması Şekil 6'da görüldüğü üzere, tek taşıtın sürüklenme katsayısına bölünmesiyle elde edilen boyutsuz bir sayı üzerinden yapılmıştır. Taşıt geometrisine bağlı olarak değerlerde farklılıklar görülmesine rağmen, ortalama C_D katsayısında bir taşıt boyundan kısa mesafelerde konvoyun, tek taşıta göre daha düşük sürüklenme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yani taşıtlar arası mesafenin bir taşıt mesafesine yaklaştığında her üç çalışma içinde konvoyun ortalama sürüklenme katsayısının artacağıdır. Öndeki taşıt için en düşük sürüklenme katsayısı Cerutti ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışma görülürken en yüksek sürüklenme katsayısı Hong ve diğ.(1998) tarafından yapılan çalışmadır. Ayrıca x/L 'nin 0,4'den küçük olduğu durumda sadece Hong ve diğ.(1998) tarafından yapılan çalışmada arkadaki taşıtın sürüklenme katsayısı öndeki taşıtın katsayısından yüksektir. Bu çalışma ve Cerutti ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmalarda x/L 'nin 1'den küçük olması durumunda öndeki taşıtın sürüklenme katsayısı arkadaki taşıtın sürüklenme katsayısından daima büyüktür. Literatürde rüzgar tüneline deneysel ve nümerik olarak yapılan çalışmalarda, bir taşıt boyundan kısa taşıtlar arası mesafelerde arkadaki taşıtın sürüklenme katsayısının, tek taşıtın sürüklenme katsayısından daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, yapılan çalışmanın sonuçlarıyla uyum göstermiştir (Armagan ve diğ., 2015; Ebrahim ve Dominy, 2020; Pagliarella ve diğ., 2007).

Literatürde ve bu çalışmada elde edilen sonuçlar, geometriye bağlı sürüklenme katsayısının değişiklik göstermesinin, farklı geometrilere sahip taşıtların oluşturduğu konvoylar için uygun taşıtlar arası mesafeyi belirlemede zorluk çıkarabileceğini göstermiştir.

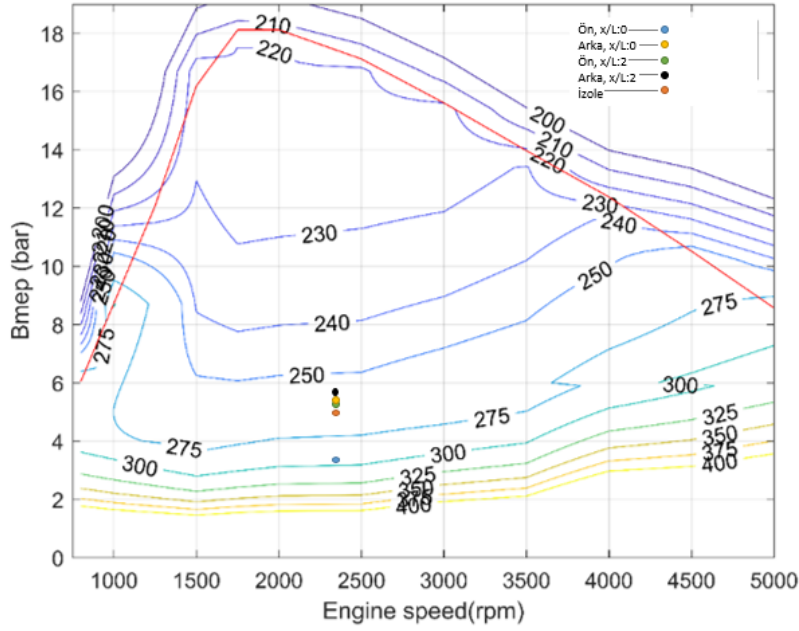


Şekil 7:

a. Ön ve arka taşıtın aerodinamik direnç kuvveti b. toplam direnç kuvvetinin tek taşıtla karşılaştırılması

Yakıt tüketiminin minimum olduğu taşıtlar arası mesafe belirlemek amacıyla toplam direnç kuvvetleri belirlenmiştir. Literatürde özellikle kaldırma katsayısının konvoy sürüşte nasıl bir değişim göstereceği yeterince incelenmemiştir. Şekil 7a'da sürüklenme ve kaldırma katsayısına bağlı toplam aerodinamik direnç kuvveti değerleri x/L 'ye bağlı olarak ön ve arka taşıtlar için verilmiştir. Asfalt yolda, 0,015 yuvarlanma katsayısı, etkin kütlesi 1500 kg olan taşıtın yuvarlanma ve aerodinamik direnç kuvvetlerinin toplamı tek taşıtla karşılaştırmalı olarak şekil 7b'de verilmiştir. 0,75 x/L 'den daha düşük x/L 'lerde konvoyu etki eden toplam direnç kuvvetinin iki taşıt için ortalaması tek taşıta etkiyen kuvvetten düşükken, 0,75'ten büyük x/L 'ler için tek taşıta etkiyenden büyüktür. Sonuçta konvoy iki taşıta etkiyen aerodinamik direnç kuvveti taşıtlar arası mesafeye bağlı olarak elde edilmiştir.

Taşıta etkiyen direnç kuvvetleri konvoy sürüşle beraber değişmiştir. Bu direnç kuvvetleri ve taşıttan talep edilen hız yakıt tüketimini belirleyen unsurlardır. Ancak bu unsurların yanında motor tasarımında önemlidir. Yani motor tasarımına bağlı olarak yakıt tüketimi, motor devri ve taşıta etkiyen direnç kuvvetlerine göre yakıt tüketimi değişir, Şekil 8'de motor tarafından üretilen güç birimi başına tüketilen yakıt miktarını ifade eden özgül yakıt tüketim haritası sunulmuştur. Direnç kuvvetlerinin artması durumunda üretilen birim güç başına daha fazla yakıt tüketilir. Bu da taşıtın özgül yakıt tüketiminin artması anlamına gelmektedir.



Şekil 8:
Özgül yakıt tüketim haritası

Motor torku ve direnç kuvvetleri arasındaki ilişki, bir aracın hareketini belirleyen temel fiziksel faktörleri içerir. Motor torku, bir motordan çıkan döndürme kuvvetini ifade eder ve genellikle Newton-metre cinsinden ölçülür. Araç hareket halindeyken, motor torku ile karşılaştığı direnç kuvvetleri arasında bir denge kurulmalıdır. Hava direnci, yokuş direnci ve sürtünme direnci gibi faktörler, aracın ileri gitmesini zorlaştırır. Bu denge, aracın hızlanmasını veya sabit bir hızda ilerlemesini sağlar. Motor torku, direnç kuvvetlerini aşabilirse, araç hareket eder ve performansını gösterir. Bu fiziksel denge, araç tasarımı ve enerji verimliliği gibi mühendislik uygulamalarında önemli bir rol oynar.

Özgül yakıt tüketim haritası ile yakıt tüketim hesabı için bazı kabuller yapılmıştır. Aktarma organı verimi 0,95, 5.vites aktarma oranı 0,8 ve diferansiyelin aktarma oranı 3,8 alınarak hesaplamalarda kullanılmıştır. 4. silindirli 1,25 L motor hacmine sahip taşıtın tekerlek yarıçapı ise 0,31 m kabul edilmiştir. torku, aktarma oranı ve tekerlek yarıçapı tahrik kuvvetiyle ilişkilidir. Direnç kuvvetlerinin düşmesiyle beraber gerekli tahrik kuvveti azalır dolayısıyla gerekli motor torku da azalır. Eşitlik 8'de Bmep (ortalama efektif basınç) ve tork arasındaki ilişki tanımlanmıştır. Bu eşitlikle ortalama efektif basınç değeri hesaplanmıştır.

$$\text{Tork} = \frac{\text{Bmep} \cdot V_{\text{motor}}}{2 \cdot \pi \cdot n_r} \quad (8)$$

Hesaplanan ortalama efektif basınç ve 90 km/sa sabit hızda hareket eden konvoy iki taşıtın ve tek taşıtın özgül yakıt tüketim değerleri özgül yakıt tüketimi haritasında belirlenmiştir. Haritada x/L:0 için konvoydaki taşıtların yakıt tüketiminde değerleri öndeki ve arkadaki taşıtların özgül yakıt tüketim değerleri sırasıyla 294,8 ve 261 g/kWh'dir. x/L:2 için özgül yakıt tüketim değerleri öndeki taşıt için 262,5 g/kWh iken arkadaki taşıt için bu değer 257 g/kWh olmuştur. Tek taşıtın özgül yakıt tüketim (ÖYT) değeri ise 266 g/kWh'dir.

$$\text{ÖYT} = \frac{\dot{m}_{\text{YAKIT}}}{P_{\text{MOTOR}}} \quad (9)$$

Eşitlik 9'a göre özgül yakıt tüketimi ve motor gücüne bağlı taşıtların yakıt tüketimleri belirlenmiştir. $x/L:0$ için öndeki taşıtın yakıt tüketim değeri 2,40 kg/s iken bu değer arkadaki taşıt için 3,37 kg/s'dir. $x/L:0$ için iki taşıtlı konvoyun ortalama yakıt tüketim değeri 2,88 kg/s'dir. $x/L:2$ için öndeki ve arkadaki taşıtların yakıt tüketim değerleri sırasıyla 3,34 ve 3,5 kg/s'dir. $x/L:2$ için ortalama yakıt tüketim değeri 3,42 kg/s'dir. Tek taşıtın yakıt tüketimi 3,24 kg/s'dir. İki taşıtlı konvoyun iki adet tek taşıta göre $x/L:0$ 'da yakıt tüketiminde %11.11 düşüş olurken, $x/L:2$ 'de tüketimi %5,55 daha fazladır. Taşıtlar arasındaki mesafelere bağlı olarak yakıt tüketim değeri tek taşıta göre daha yüksek ve düşük çıkabilmektedir. Bu yüzden konvoy hareketlerde taşıtlar arası mesafenin belirlenmesi gerekmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, konvoy sürüşte hafif ticari taşıtların aerodinamik özellikleri üzerine odaklanmıştır. Sayısal analizlerle aerodinamik katsayıların hesaplanması, taşıtlar arası mesafelerin enerji verimliliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek adına bir perspektif sunmaktadır.

Konvoy sürüşünde öndeki taşıtın arka yüzeyinde oluşan basıncın arttığı gözlemlenmiştir. Öndeki taşıtın ön yüzey alanındaki basıncın tek taşıta benzer olacağından sürüklenme katsayısı $x/L: 0$ için minimum değeri almıştır. Arkadaki taşıt için basınç dağılımı öndeki taşıta göre daha karmaşıktır, çünkü taşıt ön yüzey alanındaki basıncın da değiştii görülmüştür. Yapılan analizlerde taşıtlar arası mesafenin yaklaşık bir taşıt boyu olduğu durum, kritik taşıt boyunu temsil etmektedir. Bu boyuttan daha düşük mesafelerde konvoyun sürüklenme katsayısı tek taşıta göre daha düşükkken, bu mesafeden sonra tek taşıta göre sürüklenme katsayısı daha yüksek çıkmıştır. Taşıtlar arası mesafenin iki taşıt boyu olduğu durumda konvoyun sürüklenme katsayısının tek taşıta göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. İki hafif ticari taşıtlı konvoyun kaldırma katsayısı $x/L: 0,25$ 'den daha büyük taşıtlar arası mesafelerde tek taşıttan daha yüksektir. Taşıtlar arasında boşluk olmaması durumunda konvoyun kaldırma katsayısı tek taşıta göre daha yüksektir. Öndeki taşıt için maksimum kaldırma katsayısı $x/L: 0,25$ 'de iken, arkadaki taşıt için bu değer $x/L: 2$ 'de bulunmuştur. Konvoy taşıtların yakıt tüketimleri taşıtlar arası mesafeye bağlı olarak değişmektedir. $x/L: 0$ için konvoydaki taşıtların ortalama yakıt tüketim değeri iki adet tek taşıta göre %11.11 daha düşük çıkarken, $x/L: 2$ 'de %5.55 daha yüksek çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürle de karşılaştırıldığında konvoy sürüşte yakıt tüketiminin taşıt geometrisine ve taşıtlar arası mesafeye bağlı olarak değiştiiğini göstermektedir. Bu nedenle konvoy olması planlanan taşıtların uygun taşıtlar arası mesafede konvoy oluşturulması gerekmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Ulaş Cankan Çilingiroğlu çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, Muhammed Dönmez çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, Mehmet İhsan Karamangil çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, son onay ve tam sorumluluk konularında katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. A. Al Alam, A. Gattami, K.H. Johansson, An experimental study on the fuel reduction potential of heavy duty vehicle platooning, *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC*. (2010) 306–311. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2010.5625054>.
2. Armagan, A., Onur, Y., Habib, U., 2015. Aerodynamic Analysis of a Passenger Car at Yaw Angle and Two-Vehicle Platoon. *J. Fluids Eng. Trans. ASME* 137, 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.4030869>
3. C. Bonnet, H. Fritz, Fuel consumption reduction in a platoon: Experimental results with two electronically coupled trucks at close spacing, *SAE Tech. Pap.* (2000). <https://doi.org/10.4271/2000-01-3056>.
4. Cerutti, J. J., G. Cafiero, and G. Iuso. 2021. “Aerodynamic Drag Reduction by Means of Platooning Configurations of Light Commercial Vehicles: A Flow Field Analysis.” *International Journal of Heat and Fluid Flow* 90. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108823>.
5. Ebrahim, H., Dominy, R., 2020. Wake and surface pressure analysis of vehicles in platoon. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 201, 104144. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104144>
6. F. Browand, J. McArthur, C. Radovich, UC Berkeley Research Reports Title Fuel Saving Achieved in the Field Test of Two Tandem Trucks, (2004). <https://escholarship.org/uc/item/29v570mm>.
7. He, Y., Gao, W., Deng, Z., Feng, Y., 2022. On aerodynamic drag reduction of road vehicles in platoon. *Int. J. Veh. Syst. Model. Test.* 16, 1. <https://doi.org/10.1504/ijvsmt.2022.10051896>
8. Luo, J., Mi, K., Tan, D., Zhang, Z., Li, M., Qing, J., Huang, H., 2022. Investigation of the Aerodynamic Characteristics of Platoon Vehicles Based on Ahmed Body. *Shock Vib.* 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3269604>
9. M. Zabat, N. Stabile, S. Frascaroli, F. Browand, Drag forces experienced by 2, 3 and 4-vehicle platoons at close spacings, *SAE Tech. Pap.* (1995). <https://doi.org/10.4271/950632>.
10. Meile, W. ., Brenn, G. ., Reppenhagen, A. ., Lechner, B. ., Fuchs, A. . 2021. Experiments and Numerical Simulations on the Aerodynamics of the Ahmed Body. *CFD Letters*.
11. P. Hong, B. Marcu, F. Browand, A. Tucker, Drag forces experienced by two, full-scale vehicles at close spacing, *SAE Tech. Pap.* (1998). <https://doi.org/10.4271/980396>.
12. R. Gnatowska, M. Sosnowski, The influence of distance between vehicles in platoon on aerodynamic parameters, *EPJ Web Conf.* 180 (2018) 1–5. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818002030>.
13. R.M. Pagliarella, S. Watkins, A. Tempia, Aerodynamic performance of vehicles in platoons: The influence of backlight angles, *SAE Tech. Pap.* 2007 (2007). <https://doi.org/10.4271/2007-01-1547>.
14. S.T. Kaluva, A. Pathak, A. Ongel, Aerodynamic drag analysis of autonomous electric vehicle platoons, *Energies.* 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/en13154028>.
15. S. Watkins, G. Vano, The effect of vehicle spacing on the aerodynamics of a representative car shape, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96 (2008) 1232–1239. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.06.042>.

16. Törnell, J., Sebben, S., Elofsson, P., 2021. Experimental investigation of a two-truck platoon considering inter-vehicle distance, lateral offset and yaw. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 213. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104596>