



Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.10.2025
Kabul Tarihi : 27.11.2025

Received Date : 03.10.2025
Accepted Date : 27.11.2025

KARAYOLU TÜNELLERİNDE KAVIS YARIÇAPININ TAŞITLARDAN YAYILAN KARBONMONOKSİT DAĞILIMLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CURVE RADIUS IN ROAD TUNNELS ON THE DISTRIBUTION OF CARBON MONOXIDE EMITTED BY VEHICLES

Kerim SÖNMEZ^{1*} (ORCID: 0000-0002-5110-3849)
Yücel ÖZMEN² (ORCID: 0000-0003-1127-1060)

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Teknoloji Transferi Uygulama ve Araştırma Merkezi, Trabzon, Türkiye

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Kerim SÖNMEZ, kerimsonmez@ktu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, içerisinde taşıt bulunan 500 m uzunluğundaki iki şeritli düz bir tünel ve R=950 m ve R=1900 m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçalarıyla oluşan iki farklı kavise sahip iki şeritli iki tünel içerisindeki üç boyutlu akış alanları zaman bağımlı olarak Standart k-ε türbülans modeli ile çözülmüştür. Taşıt hızının 70 km/saat değeri için (taşıt sayısının 26 değeri için) gerçekleştirilen sayısal çözümlerle, tünel içerisindeki hız dağılımları ve karbonmonoksit dağılımları elde edilmiştir. Taşıtlı kavisli tünellerde, dış bükey ve iç bükey bölgelerde hız değerlerindeki fark kavis yarıçapı arttıkça artmaktadır. Artan kavis yarıçapı ile birlikte karbonmonoksit değerleri azalmaktadır. Tünellerin iç bükey tarafında karbonmonoksit yoğunluğu daha fazla olmaktadır. Sayısal çalışmada kullanılan Standart k-ε modeli ile elde edilen sonuçlar deneysel verilerle iyi bir uyum göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kavisli tünel, taşıt hızı, karbonmonoksit dağılımı, standart k-ε türbülans modeli

ABSTRACT

In this study, the three-dimensional flow fields within two-lane tunnels, one consisting of a 500 m long straight tunnel containing vehicle and two different curves formed by 500 m long arc segments of two circles with radii R=950 m and R=1900 m, were solved time-dependently using the Standard k-ε turbulence model. Numerical solutions were performed for a vehicle speed of 70 km/h (19.4 m/s) (for a vehicle count of 26), yielding the velocity distributions and carbon monoxide distributions within the tunnel. In curved tunnels with vehicles, the difference in speed values between the convex and concave regions increases as the curve radius increases. Carbon monoxide values decrease as the curve radius increases. Carbon monoxide effect is concentrated on the concave side of the tunnels. The results obtained using the Standard k-ε model in the numerical study show good agreement with the experimental data.

Keywords: Curved tunnel, vehicle speed, carbon monoxide distribution, standard k-ε turbulence model

GİRİŞ

Karayolu tünellerinde taşıt egzozundan yayılan zararlı gazlar nedeniyle tünel içerisindeki ortam havası kirlenmektedir. Günümüzde şehirlerin büyümesiyle birlikte karayolu tünellerinde taşıt yoğunluğu artmakta ve bu durum tünel içerisindeki ortam havasını bozmaktadır. Bu nedenle, tünellerin içerisindeki hava kalitesini sağlamak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en yaygın olanı tünel içerisine aksel fan yerleştirilerek hava kalitesini sağlamaktır. Karbonmonoksit zehirli bir gaz olup, bulunduğu tehlike oluşturmaktadır. Bu zehirli gaz, karayolu tünellerinde taşıt yoğunluğuyla orantılı düzeyde birikmekte ve solunması ciddi sağlık sorunlarına yol

açmaktadır. Karayolu tünelleri her ne kadar dış ortam olarak kabul edilseler de tünelin boyu, eğimi ve yüksekliğine bağlı olarak iç ortam olarak da değerlendirilebilmektedirler. Taşıt trafiğinin yoğun olduğu karayolu tünellerinde, araçların egzozundan çıkan zararlı gazlar tünelde birikmektedir. Literatürde, kapalı otoparklarda, garajlarda ve tünellerde taşıt egzozundan kaynaklanan zararlı gazların düzeyini belirlemeye yönelik çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma mevcuttur.

Greiner ve Schwab (1998), müstakil bir evin kapalı garajında bulunan bir taşıtın çalıştırılmasıyla oluşan karbonmonoksit düzeyini deneysel olarak incelemiştir. Ölçümlerin karbonmonoksit dedektörü kullanılarak gerçekleştirildiği çalışmada, 2 dakika ölçüm süresi sonunda karbonmonoksit düzeyinin taşıt egzoz borusu içerisinde 76900 ppm, garaj içerisinde ise 500 ppm değerlerine ulaştığı belirtilmiştir. Taşıt garajdan çıkarıldıktan 10 saat sonra garaj içerisindeki karbonmonoksit düzeyinin 30 ppm değerine kadar düştüğü ifade edilmiştir. Chen vd. (2002), Tayvan'daki Cross-Harbor denizaltı tüneli içerisindeki hava akışını ve taşıt kaynaklı kirleticilerin dağılımını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Öncelikle saha çalışmasıyla tünel içerisinde karbonmonoksit, azot oksit ve toplam hidrokarbon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise tünel içerisindeki kirletici gaz dağılımları Standart k-ε türbülans modeli ile sayısal olarak elde edilmiştir. Tünel içerisindeki fanların çalıştırılmasıyla kirliliğin % 74'e kadar azalttığı belirtilmiştir. Chaloulakou vd. (2002), kapalı otoparklardaki karbonmonoksit düzeyini değerlendirmek amacıyla Yunanistan'ın başkenti Atina'da bulunan altı farklı kapalı otoparkta Solomat MPM4100 cihazı ile karbonmonoksit ölçümleri gerçekleştirmişler ve kapalı otoparklarda uzun süre zaman geçirmenin sağlık açısından olumsuz sonuçlar oluşturacağını ifade etmişlerdir. Kristensson vd. (2004), İsveç'in Stockholm şehrinde bir karayolu tünelindeki gaz ve parçacık emisyon faktörlerini deneysel olarak incelemiştir. Emisyon faktörlerinin taşıt hızına bağlı olarak değiştiğini ve ortalama karbonmonoksit ve azot oksit değerlerinin sırasıyla 5300 ve 1400 mg·araç⁻¹·km⁻¹ düzeyinde olduğunu belirtmişlerdir. Kara (2013), İzmir Karşıyaka'daki bir otoyol tüneline taşıt kaynaklı kirletici emisyon faktörlerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Hava kalitesi ölçüm istasyonundan aldığı saha verileri ve Motorlu Araç Emisyon Simülatorü ile gerçekleştirdiği sayısal analizler sonucunda tünel içerisindeki en yüksek emisyon faktörünün karbonmonoksit olduğunu ifade etmiştir. Shen vd. (2016), kömür madenlerindeki yer altı tünellerinde çalışan taşıtlardan kaynaklanan karbonmonoksit etkisini belirlemek amacıyla deneysel ve sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Öncelikle tünel içerisinde dört farklı noktada karbonmonoksit ölçümü gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra ise bir ticari yazılım kullanarak tünel içerisindeki karbonmonoksit dağılımlarını sayısal olarak elde etmişlerdir. Saha verilerinin sayısal çalışmanın sonuçlarıyla uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır. Li vd. (2017), çatallanan tünellerin içerisindeki taşıt kaynaklı kirleticilerin etkisini incelemek amacıyla içinde iki kola ayrılan Çin'deki Canghsa tünelinin 1:8 ölçekli modelinde karbonmonoksit ve karbondioksit ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Ayrılma kollarının ana tüneldeki kirletici konsantrasyonunu azaltmada önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır. Villanueva ve Chen (2020), kapalı otoparklardaki karbonmonoksit kirliliğini incelemek amacıyla Kanada'da bulunan Langara Koleji'nin altındaki kapalı otoparkta karbonmonoksit ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Hava koşullarının olumsuz ve taşıt sayısının fazla olduğu saatlerde otoparkın daha yoğun kullanılması nedeniyle karbonmonoksit miktarının arttığını belirtmişlerdir. Shi vd. (2019), taşıtların hareketiyle oluşan türbülansın egzoz gazlarının dağılımı üzerindeki etkisini RNG k-ε türbülans modeli ile sayısal olarak incelemişler ve türbülans etkisinin egzoz gazlarının yayılmasını zorlaştırdığını ortaya koymuşlardır. Al Mutairi vd. (2020), Kuveyt'te bulunan bir alışveriş merkezinin açık ve kapalı otoparklarında yaz ve kış dönemlerinde, hafta içi ve hafta sonu zamanlarda gerçekleştirdikleri karbonmonoksit ölçümleriyle otoparklardaki karbonmonoksit kirliliğini deneysel olarak incelemiştir. En yüksek karbonmonoksit değerinin kapalı otoparkta kış döneminde ve hafta sonunda 190 ppm, açık otoparkta ise yaz döneminde ve hafta sonunda 40 ppm olarak ölçüldüğünü belirtmişlerdir. Zamorategui-Molina vd. (2021), Meksika'nın Guanajuato şehrindeki karayolları tünellerinde karbonmonoksit ve partikül madde konsantrasyonlarını deneysel olarak incelemiştir. Karbonmonoksit ölçümlerinin taşınabilir kızılötesi sensör ile gerçekleştirildiği çalışmada, ortalama karbonmonoksit değerinin, Dünya Sağlık Örgütü tarafından 30 dakikalık maruziyet için belirlenen 50 ppm sınır değerinin üstünde olduğunu ve hava kalitesinin iyileştirilmesi için tünellere havalandırma sistemlerinin kurulması gerektiğini vurgulamışlardır. Sun vd. (2021), tek taşıttan kaynaklanan egzoz kirliliğini sayısal olarak incelemiştir. RNG k-ε türbülans modeli ile gerçekleştirdikleri çalışmada taşıt kaynaklı karbonmonoksit dağılımının, egzoz borusu çıkışında yoğunlaştığını ortaya koymuşlardır. Shi vd. (2020), kent merkezlerindeki sokak kanyonlarında oluşan kirletici konsantrasyonlarını rüzgar tüneli çalışmasıyla ve Standart k-ε türbülans modeli ile incelemişler ve sokak kanyonlarındaki karbonmonoksit seviyesinin çoğunlukla yerden itibaren 2 m yüksekliğe kadar olan bölgelerde daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Nie vd. (2022), maden tünellerinde çalışan taşıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarının hava kalitesi üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemiştir. RNG k-ε türbülans modelinin kullanıldığı çalışmada karbonmonoksit, azot oksit ve hidrokarbonların tünel içindeki konsantrasyonları hesaplanmıştır. Tünel içerisinde 140 ppm düzeyinde karbonmonoksit oluştuğu ifade edilmiştir. De Vito vd. (2023), İtalya'da bir karayolu tünelindeki taşıt kaynaklı hava

kirliliğini deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında karbonmonoksit, azot dioksit, ozon, partikül madde, bağıl nem ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirmişlerdir. Tüneldeki kirlilik seviyesinin dış çevreye kıyasla oldukça yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Bu çalışmada, tünel içerisinde biriken karbonmonoksit ve tünel içerisindeki hava hızı dağılımlarının incelenmesine odaklanılmıştır. Karayolları tünellerindeki taşıtların egzozlarından yayılan kirletici gazlardan karbonmonoksitin tünel içerisindeki dağılımları üzerinde tünel kavisi yarıçapının etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Düz tünelle birlikte kavisli tüneller içerisindeki hız ve karbonmonoksit dağılımının da belirlenmesi çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır.

SAYISAL ÇALIŞMA

Hareket Denklemleri

Akış problemlerinin sayısal çözümünde, akışkanlar mekaniğinin genel denklemleri olan Navier-Stokes denklemleri ve süreklilik denklemi kullanılmaktadır. İkinci mertebeden kısmi türevli ve lineer olmayan bu denklemler cebirsel denklemlere dönüştürülüp uygun başlangıç ve sınır şartları altında çözümlenerek, akış alanının yaklaşık çözümleri elde edilmektedir. Sıkıştırılmaz bir akışkanın zaman bağımlı hareketi, Kartezyen koordinatlarda,

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

şeklinde süreklilik denklemi ve

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_i \quad (2)$$

şeklinde Navier-Stokes denklemleri ile ifade edilmektedir. Navier-Stokes denklemleri, eşitliğin sol tarafında, atalet kuvvetleri ve eşitliğin sağ tarafında sırasıyla basınç kuvveti, sürtünme kuvveti ve kütle kuvvetleri bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu denklemler türbülanslı akış için hız ve basınç büyüklükleri zaman ortalamalı ve çalkantı terimleri cinsinden yazıldığında,

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho \bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \overline{\rho u_i' u_j'} + F_i \quad (3)$$

şeklindeki Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Denklemleri (RANS) olarak elde edilmektedir. Bu denklemlerde yer alan çalkantı terimlerinin hesaplanmasına yönelik çok sayıda türbülans modeli geliştirilmiştir.

Doğadaki akışların neredeyse tamamının türbülanslı karakterde olması nedeniyle, türbülanslı akışlar pratikte büyük öneme sahiptir. Üç boyutluluk, zaman bağımlılık ve çalkantı hali gibi özellikleri nedeniyle oldukça karmaşık bir yapıda olan türbülanslı akışların sayısal olarak incelenmesi için akış alanını çözmeyi amaçlayan modeller geliştirilmiş ve "türbülans modeli" kavramı bu şekilde ortaya çıkmıştır (Launder ve Spalding, 1974). Son yıllarda teknolojinin gelişimine paralel olarak bilgisayarların hız ve kapasitesindeki iyileşme sayesinde, türbülanslı akışların sayısal incelenmesine yönelik çalışmalar son derece yaygınlaşmıştır. Farklı türbülans modelleriyle hesaplanan akış alanları, türbülans modellerinin hassasiyetlerine yönelik bilgiler de sunmaktadır. Birçok türbülans modelinin bazı akış alanlarındaki deneysel verilerle uyumlu sonuçlarına rağmen, yine de bütün türbülanslı akışları yüksek doğrulukta çözen genel bir model üretilememiştir. Türbülans modelleri, gerçek türbülanslı akış karakteristiklerini hesaplayabilmek için, RANS Denklemleri ile birlikte çözümlen bir dizi diferansiyel transport denklemleri ve cebirsel sabitleri içermektedir. Literatürde yaygın olarak bilinen k-ε türbülans modeli, Standard, RNG ve Realizable şeklinde üç farklı formda kullanılmaktadır. k-ε türbülans modelinin bu üç farklı formu, k ve ε'u hesaplamak için aynı yapıdaki denklemleri kullanmaktadır. Aralarındaki belirleyici farklar, türbülans viskozitesini hesaplama yöntemi, türbülanslı Prandtl sayısı ve ε denklemindeki terimlerde ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında, kirletici gaz dağılımlarının incelenmesinde yaygın olarak kullanılan Standart k-ε, türbülans modeliyle çözümler gerçekleştirilmiştir.

Standard k-ε Türbülans Modeli

Lauder ve Spalding (1974), tarafından önerilen Standart k-ε türbülans modeli, kolay uygulanması nedeniyle, günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yarı ampirik bir model olan Standart k-ε türbülans modeli, türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yutulma oranı (ε),

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

şeklinde iki adet transport denklemden oluşmaktadır. Burada; G_k , ortalama hız gradyanına bağlı oluşan türbülans kinetik enerjisini, G_b , kaldırma kuvvetine bağlı oluşan türbülans kinetik enerjisini, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$, model sabitlerini, σ_k ve σ_ε , k ve ε için türbülans Prandtl sayılarını, S_k ve S_ε , kaynak terimlerini ve Y_M , sıkıştırılabilir türbülanslı bölge içindeki türbülans hacim değişiminin toplam yayılım oranına katkısını ifade etmektedir. Denklemlerde yer alan ' μ_t ', türbülans viskozitesi,

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

şeklinde tanımlanmaktadır. Model sabitleri $C_\varepsilon = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ şeklindedir.

Konsantrasyon Denklemleri

Karbonmonoksit gazının hesaplanmasında, konsantrasyon modeli etkinleştirilmekte ve transfer denklemleri çözülmektedir. Aşağıda verilen konveksiyon-difüzyon denkleminin çözümü ile her bir gazın yerel kütle oranı tahmin edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (7)$$

Burada Y_i , i konsantrasyonunun kütle kesrini, J_i , i konsantrasyonunun difüzyon akısını, R_i kimyasal reaksiyonla i konsantrasyonunun net üretim hızını ve S_i , dağılmış fazdan ve kullanıcı tanımlı herhangi bir kaynaktan ekleme yoluyla oluşturma oranını ifade etmektedir. (Dong vd. 2017).

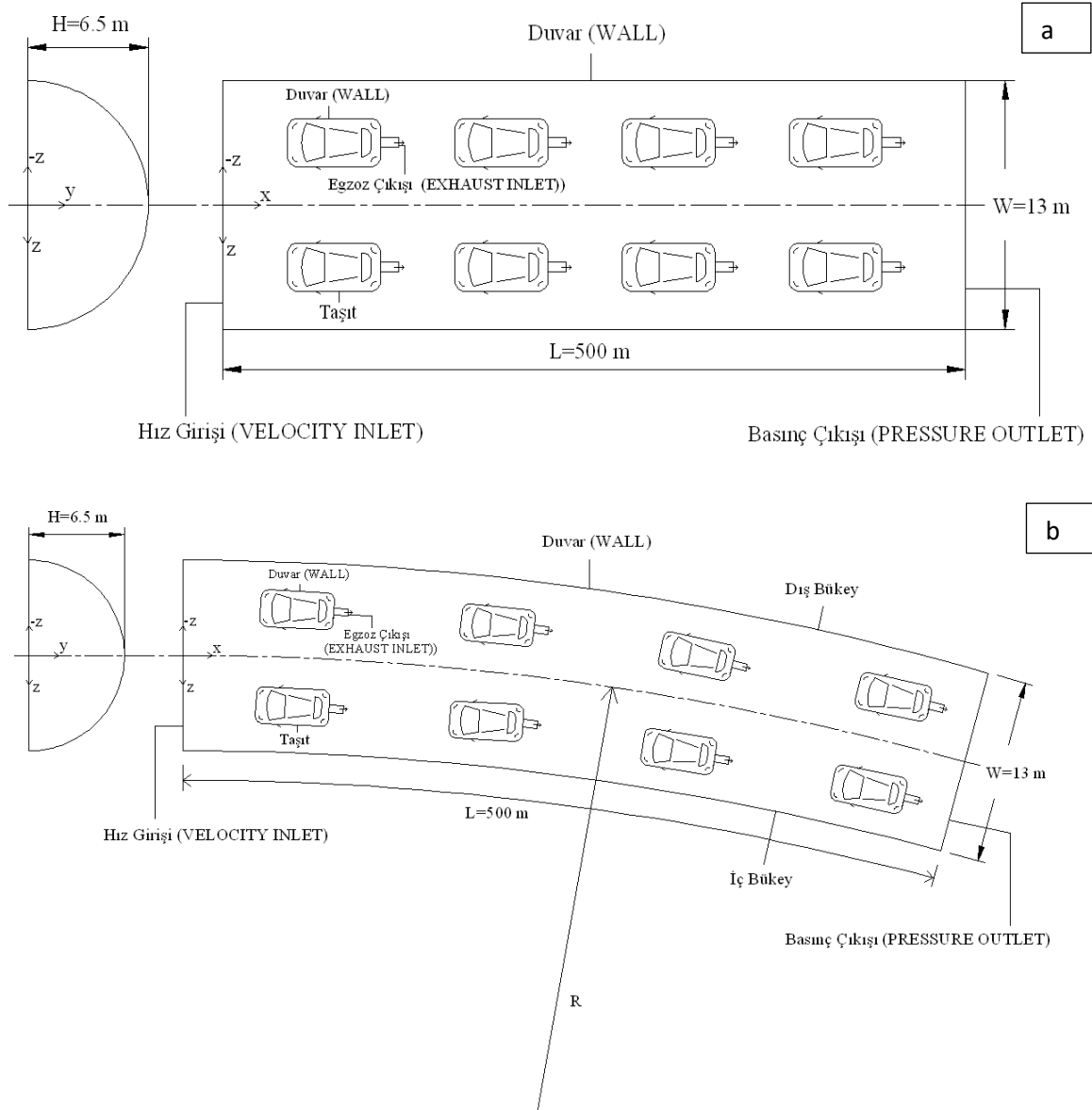
Türbülanslı akışlarda, kütle difüzyon akısı,

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \cdot Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (8)$$

şeklinde. Burada, Sc_t türbülanslı Schmidt sayısını göstermekte ve 0.7 olarak alınmaktadır. μ_t ve D_T ise sırasıyla türbülans viskozitesini ve türbülans difüzyonunu ifade etmektedir.

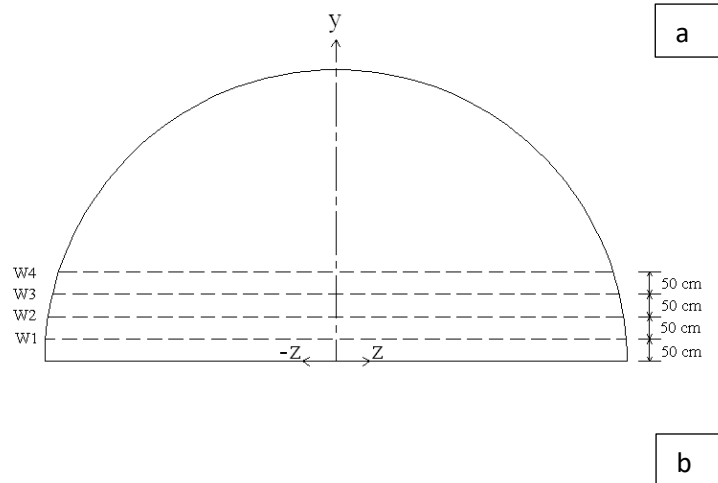
Akış Alanı ve Sınır Şartları

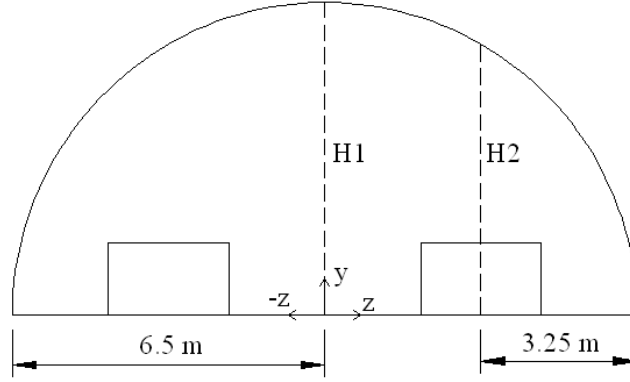
Bu çalışmada, içerisinde taşıt bulunan 500 m uzunluğundaki iki şeritli düz bir tünel ve R=950 m ve R=1900 m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçalarıyla oluşan iki farklı kavise sahip iki şeritli iki tünel içerisindeki üç boyutlu akış alanları taşıt hızının 70 km/saat değeri için (taşıt sayısının 26 değeri için) zaman bağımlı olarak çözülmüştür. Sayısal çalışmaların tamamında L=500 m uzunluğa, W=13 m genişliğe ve H=6.5 m yüksekliğe sahip iki şeritli tünel modelleri incelenmiştir. Taşıt hızının 19.4 m/s olarak dikkate alındığı çözümlerde iki taşıt arası mesafe 35 m olarak oluşmuştur. Zaman adımının 0.5 s olduğu çözümlerde toplam çözüm süresi 26 s olarak gerçekleşmiştir. Şekil 1'de taşıtlı tünellere ait örnek akış alanı görüntüleri verilmektedir. Hem düz tünelde hem de kavisli tünellerde sınır şartları sırasıyla tünel girişinde "Hız Girişi", tünel çıkışında "Basınç Çıkışı", duvarlarda "Duvar" ve egzozlarda "Egzoz Çıkışı" şeklindedir. Akış alanına yerleştirilmiş taşıtlar 4 m uzunluğa, 1.625 m genişliğe ve 1.28 m yüksekliğe sahiptir. Taşıtların egzoz çıkış çapı 6 cm, egzoz çıkış hızı ise 3 m/s olarak dikkate alınmıştır. Türbülans yoğunluğu giriş ve çıkışlar için % 5, viskozite oranı ise 10 olarak seçilmiştir.



Şekil 1. Taşıtlı Tünelde Örnek Akış Alanı Görüntüleri a) Düz Tünel, b) Kavisli Tünel

Sayısal çözümler sonucunda akış alanlarında hesaplanan büyüklükler, tünel içerisinde farklı istasyonlarda tanımlanmış yatay ve düşey hatlardaki çizgisel değişimler ve tünel en kesitlerindeki dağılımlar şeklinde verilmiştir. En kesitlerde tanımlanmış yatay ve düşey hatların konumu Şekil 2’de verilmiştir. W1, W2, W3 ve W4 olarak adlandırılan yatay hatlar tünel tabanından itibaren düşey doğrultuda 50 cm’lik mesafelerle oluşturulmuştur (Şekil 2a). Düşey hatlar ise, tünel yüksekliğine karşılık gelen H1 hattı ve taşıt kesitinin orta konumundaki düşey hattı temsil eden H2 hattıdır (Şekil 2b).

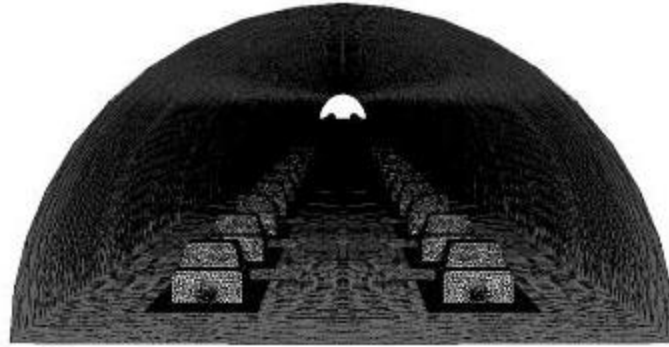




Şekil 2. Tünel En Kesitinde Tanımlanmış Çizgisel Hatlar a) Yatay Hatlar , b) Düşey Hatlar

Ağ Yapısı ve Ağdan Bağımsızlık

Sayısal çözümlerde akış alanlarındaki ağ yapıları, ANSYS FLUENT ticari yazılımı içerisindeki ağ modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada yapılandırılmamış ağ yapısı kullanılmıştır. Akış alanında taşıtların egzoz çıkışında, taşıt etrafında ve akış alanının diğer bölgelerindeki ağ yoğunluğu taşıt boyuna göre belirlenmiştir. Ağ metodu olarak “Curvature ve Proximity” yaklaşımı esas alınmış ve ağ büyüme oranı 1.1 olarak dikkate alınmıştır. Maksimum çarpıklık oranının 0.85’den küçük olması sağlanmıştır. Şekil 3’de taşıtlı düz tünele ait örnek ağ yapısı görülmektedir. Egzoz ve araç etrafında yoğun olan ağ yapısı tünel duvarlarına doğru seyrekleşmektedir.



Şekil 3. Taşıtlı Düz Tünelde Ait Örnek Ağ Yapısı

Sayısal çözümlerden elde edilecek sonuçlarının ağ yoğunluğundan etkilenmemesi için öncelikle ağdan bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümlerin zaman bağımlı olarak gerçekleştirilmesi nedeniyle, öncelikle zaman adımının ve her bir zaman adımındaki iterasyon sayısının çözümler üzerindeki etkisi daha sonra ise ağ sayısının etkisi incelenmiştir. Her üç parametrenin etkisi de tünel içerisindeki karbonmonoksit dağılımları açısından değerlendirilmiştir. İterasyon sayısının 20, 40 ve 80 değerleri için tekrarlanan çözümlerde, 40 değerinden itibaren sonuçların değişmemesi nedeniyle tüm çözümlerde iterasyon sayısı olarak 40 dikkate alınmıştır. Zaman adımının 0.1 s, 0.5 s ve 1 s değerleri için yapılan çözümlerde zaman adımı değerlerinin çözüm üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüş ve tüm çözümlerde zaman adımı olarak 0.5 s seçilmiştir. Belirlenen iterasyon sayısı ve zaman adımı değeri dikkate alınarak, egzoz çıkışında ve taşıt etrafında üç farklı ağ yoğunluğu denenmiştir. Her üç ağ yoğunluğu durumunda da H2 hattındaki karbonmonoksit değerlerinin benzer olması çözümlerin ağdan bağımsız olduğunu göstermiştir. 70 km/saat taşıt hızı için ağ yoğunluğu düz tünelerde 8.2 milyon kavisli tünelerde ise yaklaşık 16 milyon olarak dikkate alınmıştır. Taşıt yüzeylerinde $y^+ \approx 35$ olarak gerçekleştirilmiştir.

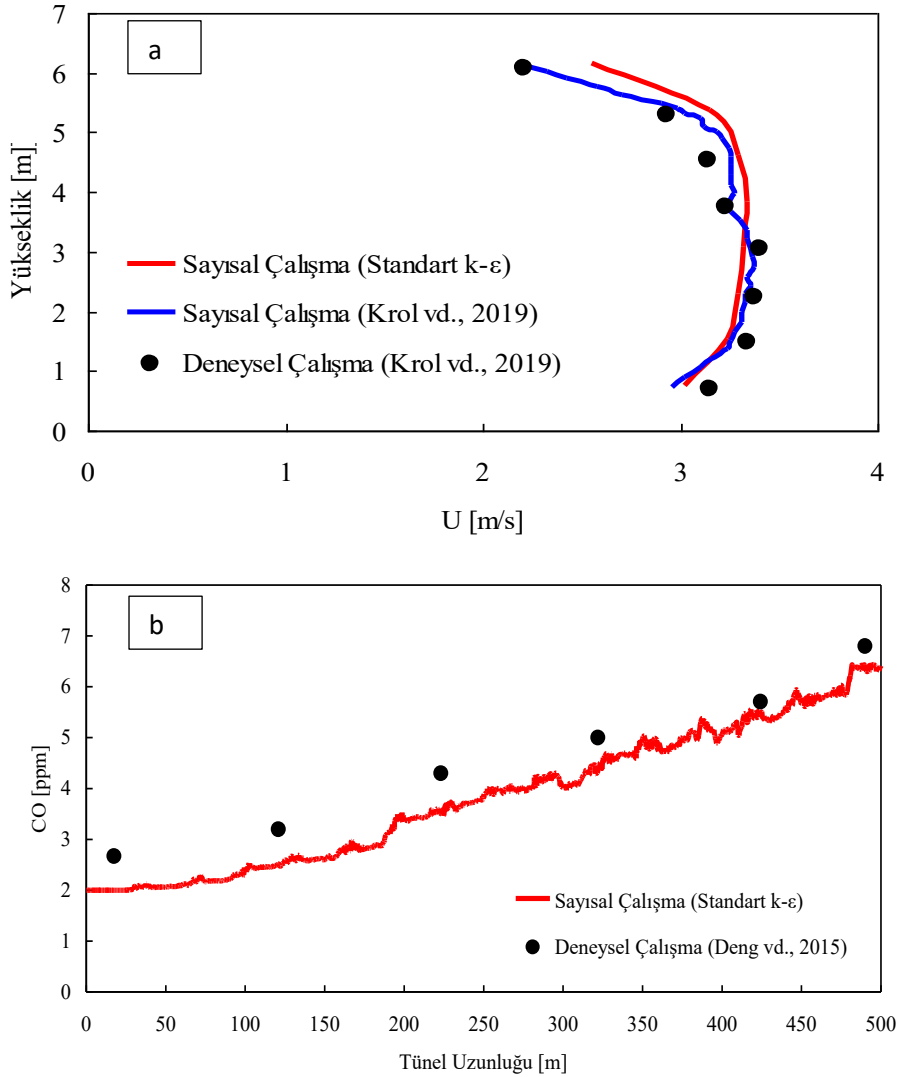
Çözüm Yöntemi

Sayısal çözümlerde, duvar yaklaşımı olarak, daha kısa sürede yakınsama sağlaması nedeniyle iyileştirilmiş duvar yaklaşımı (Enhanced Wall Treatment) kullanılmıştır. İteratif çözücü olarak literatürde yaygın olarak kullanılan SIMPLE algoritması esas alınmıştır. Basınç interpolasyonu için ‘Standard’, diğer değişkenlerin ayrıklaştırılmasında

ise “Second Order Upwind” yöntemi kullanılmıştır. Çözümlerde yakınsama kriteri 10^{-5} olarak dikkate alınmıştır. Karbonmonoksit konsantrasyon denkleminde “Diffusion Energy Source” yaklaşımı esas alınmıştır.

Sayısal Çözümün Doğrulanması

Şekil 4’de mevcut çalışmada sayısal çözümlerden elde edilen hız ve karbonmonoksit dağılımlarının literatürdeki dağılımlarla karşılaştırması verilmektedir. Hem hız dağılımının hem de karbonmonoksit dağılımının literatür sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum çalışma kapsamında kullanılan sayısal yaklaşımın incelenen problem açısından doğru ve yeterli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması a) Hız Dağılımı b) Karbonmonoksit Dağılımı

BULGULAR VE TARTIŞMA

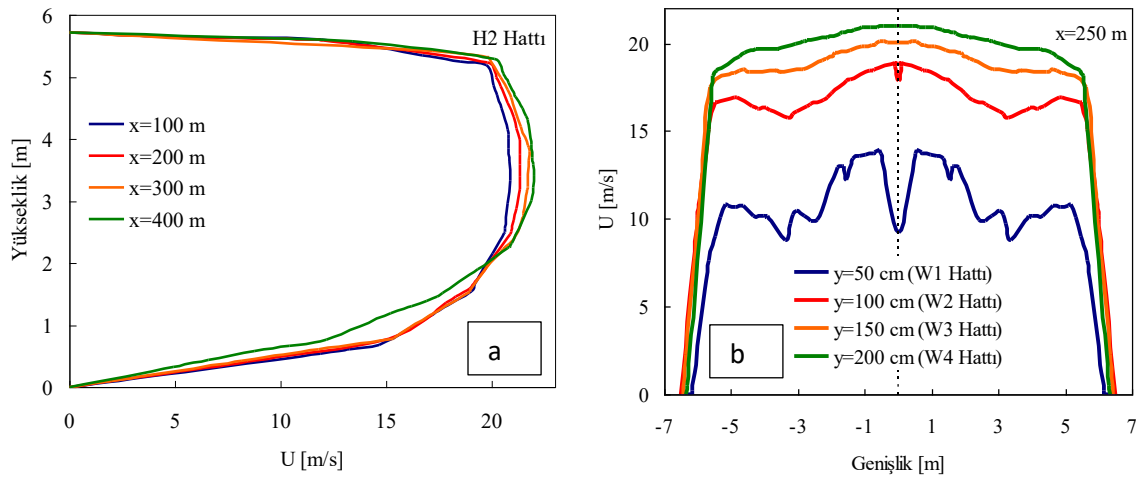
Bu çalışmada, içerisinde taşıt bulunan 500 m uzunluğundaki iki şeritli düz bir tünel ve R=950 m ve R=1900 m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçalarıyla oluşan iki farklı kavise sahip iki şeritli iki tünel içerisindeki üç boyutlu akış alanları taşıt hızının 70 km/saat değeri için (taşıt sayısının 26 değeri için) zaman bağımlı olarak sayısal çözülmüştür. Sayısal çalışmadan elde edilen bulgular; hız dağılımları ve karbonmonoksit dağılımları şeklinde iki ana başlık altında sunulmuştur. Karbonmonoksit dağılımları “ppm (part per million, milyonda kısım)” şeklinde ifade edilen kütleli konsantrasyon cinsinden verilmiştir.

Hız Dağılımları

Sayısal çözümler sonucunda akış alanlarında hesaplanan hız değerleri, tünel içerisinde farklı istasyonlarda tanımlanmış yatay ve düşey hatlardaki çizgisel değişimler ve tünel en kesitlerindeki dağılımlar şeklinde verilmiştir.

Taşıtlı Düz Tünel

Şekil 5a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hattında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Parabolik görüntüdeki hız değerleri dört istasyonda da birbirine benzer şekilde zemin itibaren artarak orta bölgede maksimum olmakta ve tavana yaklaştıkça tekrar azalmaktadır. Taşıtların oluşturduğu pürüzlülük etkisi nedeniyle zeminden itibaren artan yerel hız değerleri yaklaşık $y=3$ m seviyesinde maksimum olmaktadır. Şekil 5b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde $x=250$ m istasyonunda enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde sırasıyla W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış hız değerleri verilmiştir. $Y=50$ cm yüksekliğindeki W1 hattında en düşük olan hız değerlerinin artan yükseklikle arttığı ve $y=200$ cm yüksekliğindeki W4 hattında en büyük olduğu görülmektedir.

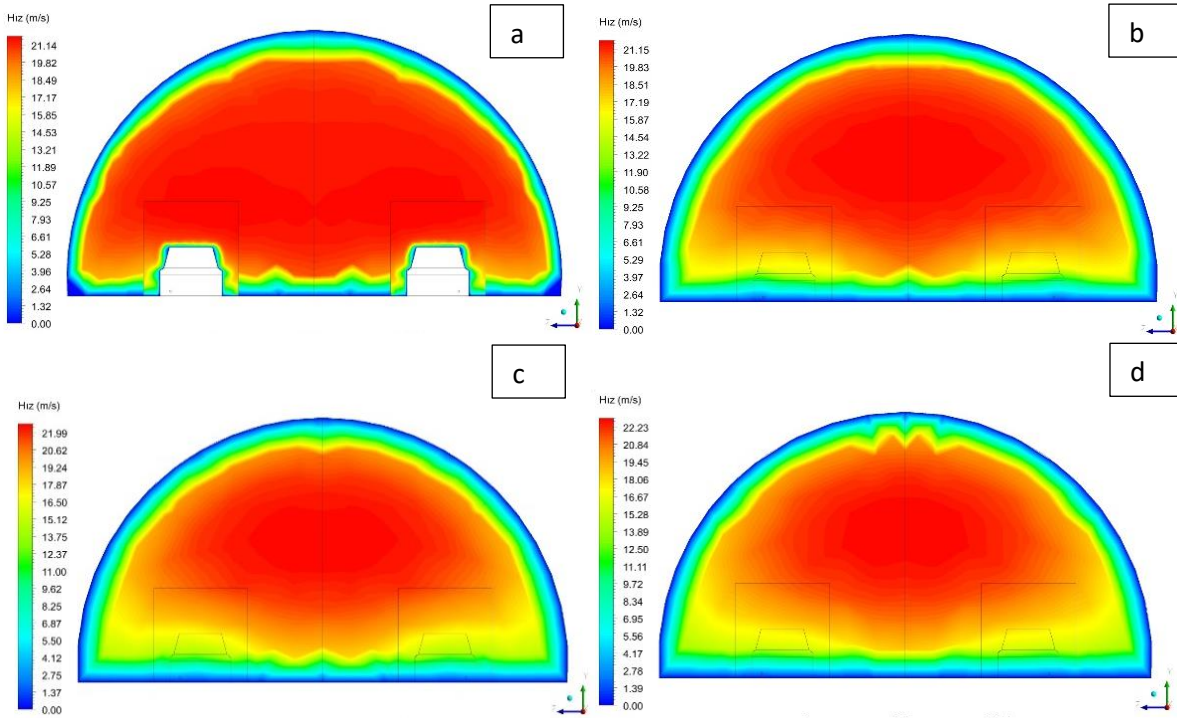


Şekil 5. 70 km/saat Taşıtlı Hızda Tünel İçerisinde Hız Profilleri a) H2 Hattında Hız Değerleri b) W1, W2, W3 ve W4 Hatlarında Hız Değerleri

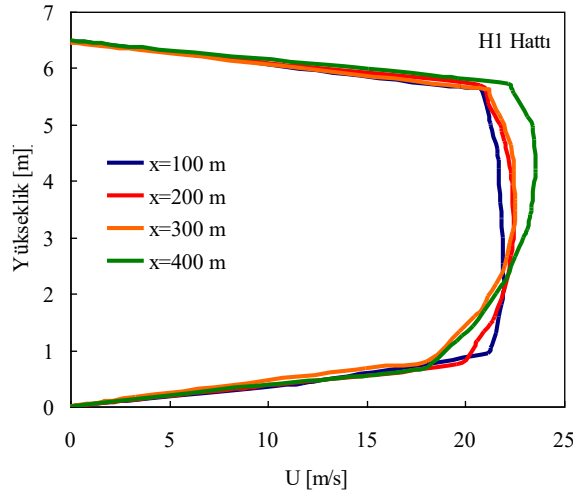
Şekil 6'da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla $x=100$ m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe en kesitlerdeki homojen hız dağılımları bozulmakta ve daha fazla sayıda taşıtların egzozu en kesit hız dağılımlarını etkilemektedir.

R=950 m Yarıçaplı Taşıtlı Kavisli Tünel

Şekil 7'de, 950 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisinde taşıt hareket hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Parabolik görüntüdeki hız değerleri dört istasyonda da birbirine benzer şekilde zemin itibaren artarak orta bölgede maksimum olmakta ve tavana yaklaştıkça tekrar azalmaktadır. Taşıtların oluşturduğu pürüzlülük etkisi nedeniyle zeminden itibaren artan yerel hız değerleri yaklaşık $y=2$ m seviyesinde eşit olmaktadır. $x=400$ m istasyonunda kavis etkisi nedeniyle orta bölgedeki hız değerleri daha büyük olmaktadır. Şekil 8'de, 950 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisinde taşıt hareket hızının 70 km/saat değerinde enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış hız değerleri tünel boyunca sırasıyla 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında verilmiştir. $y=50$ cm yüksekliğindeki W1 hattında en düşük olan hız değerlerinin artan yükseklikle arttığı ve $y=200$ cm yüksekliğindeki W4 hattında en büyük olduğu görülmektedir. Yatay doğrultulardaki hız değerleri kavis etkisi nedeniyle dış bükey tarafta daha yüksek olmaktadır.



Şekil 6. 70 km/saat Taşıt Hızında Tünel İçerisinde Hız Dağılımları a) x=100 m b) x=200 m c) x=300 m d) x=400 m

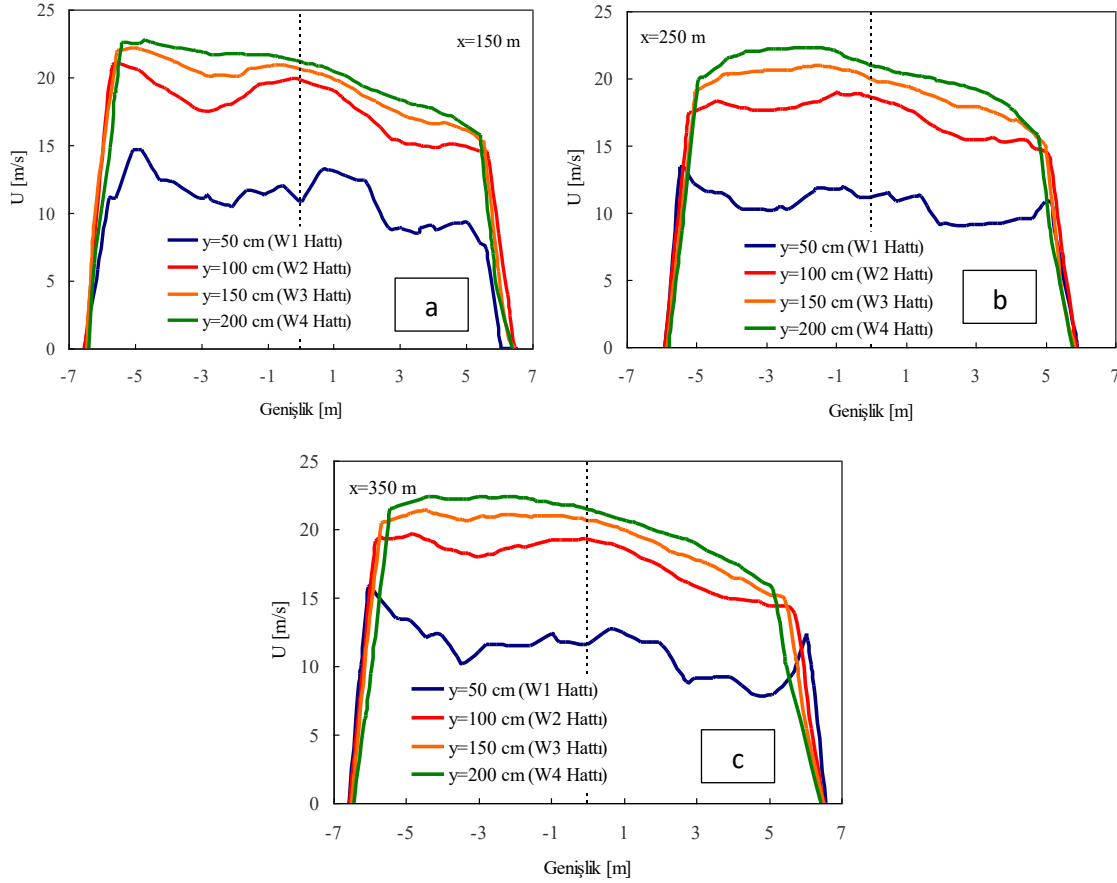


Şekil 7. R=950 m'de ve 70 km/saat Taşıt Hızında H1 Hattında Tünel İçerisinde Hız Profilleri

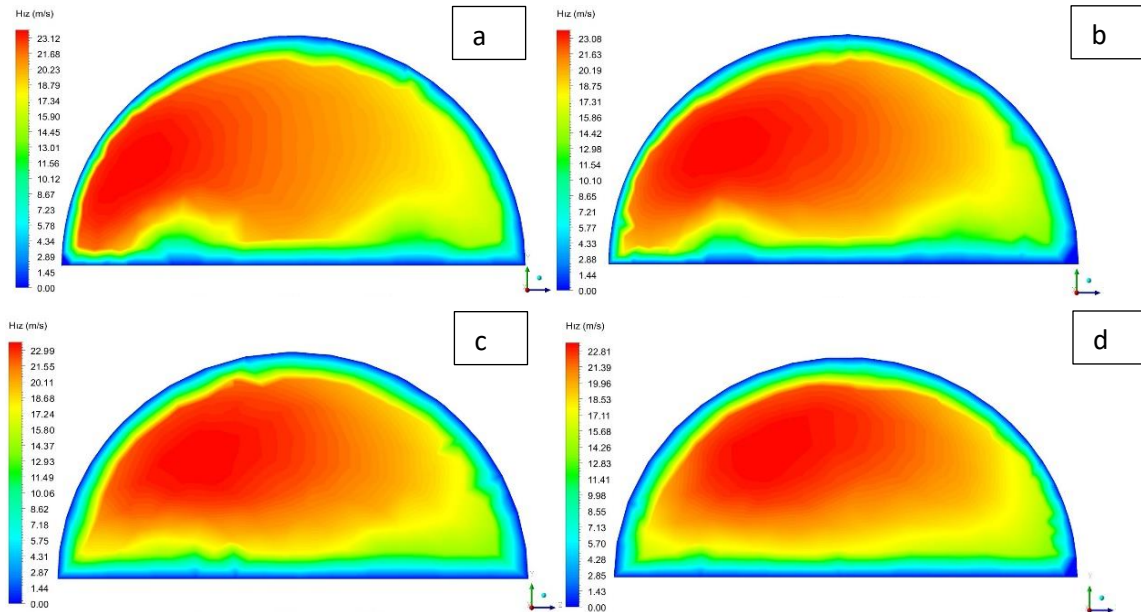
Şekil 9'da, 950 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisinde taşıt hareket hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe kavis etkisi nedeniyle en kesitlerdeki hız değerleri dış büyük tarafta daha büyük olmaktadır.

R=1900 m Yarıçaplı Taşıtlı Kavisli Tünel

Şekil 10'da, 1900 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisinde taşıt hareket hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Parabolik görüntüdeki hız değerleri dört istasyonda da birbirine benzer şekilde zemin itibaren artarak orta bölgede maksimum olmakta ve tavana yaklaştıkça tekrar azalmaktadır. Taşıtların oluşturduğu pürüzlülük etkisi nedeniyle zeminden itibaren artan yerel hız değerleri yaklaşık $y=2$ m seviyesinde eşit olmaktadır. $x=400$ m istasyonunda kavis etkisi nedeniyle orta bölgedeki hız değerleri daha büyük olmaktadır. Şekil 11'de, 1900 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisinde taşıt hareket hızının 70 km/saat değerinde enine yatay



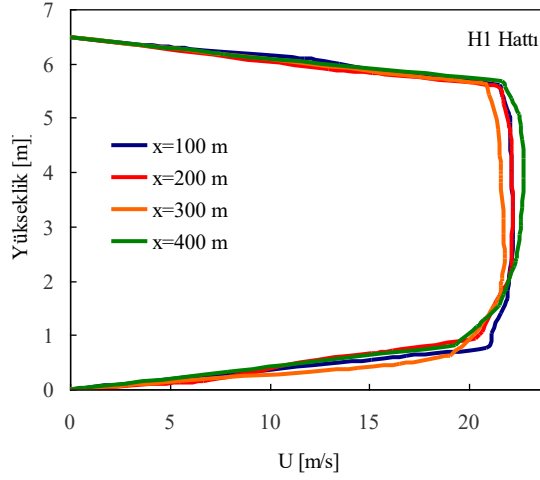
Şekil 8. $R=950$ m’de ve 70 km/saat Taşıt Hızında W1, W2, W3 Ve W4 Hatlarında Tünel İçerisinde Hız profilleri a) $x=150$ m b) $x=250$ m c) $x=350$ m



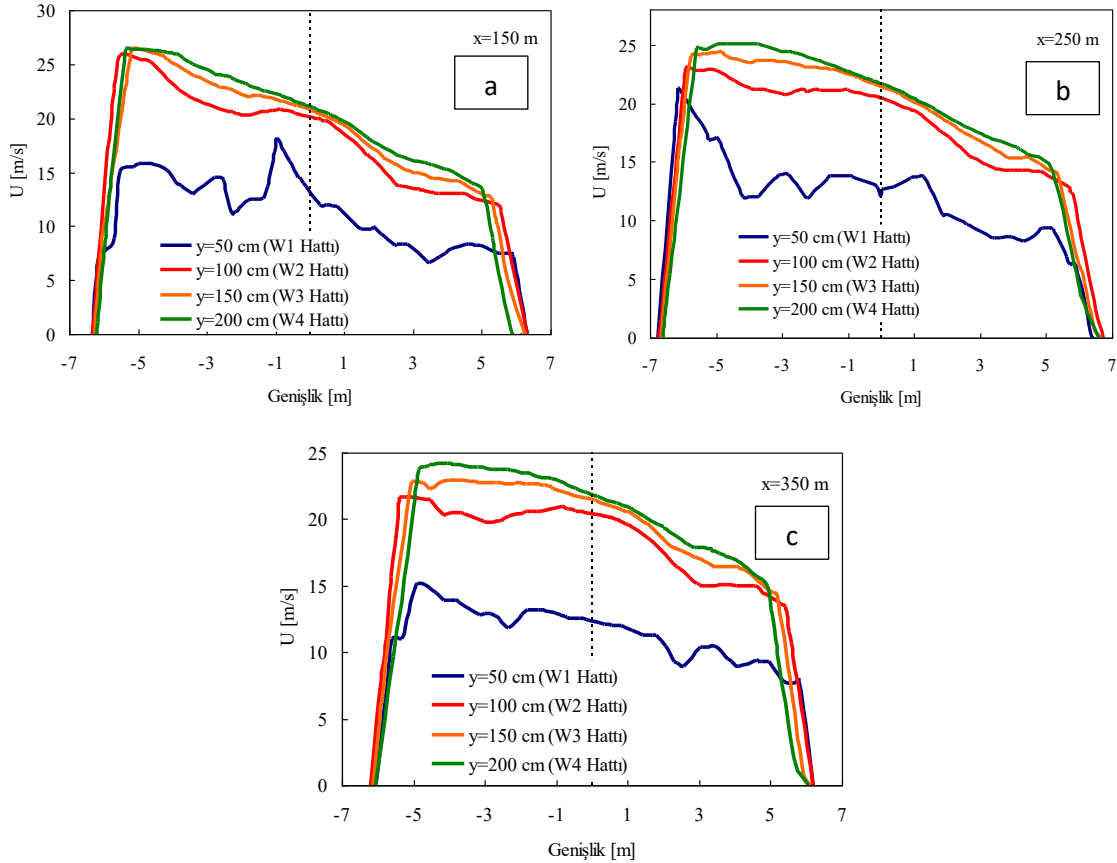
Şekil 9. $R=950$ m’de ve 70 km/saat Taşıt Hızında Tünel İçerisinde Hız Dağılımları a) $x=100$ m b) $x=200$ m c) $x=300$ m d) $x=400$ m

doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış hız değerleri tünel boyunca sırasıyla 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında verilmiştir. $y=50$ cm yüksekliğindeki W1 hattında en düşük olan hız değerlerinin artan yükseklikle arttığı ve $y=200$ cm yüksekliğindeki W4 hattında en büyük olduğu görülmektedir. Yatay doğrultulardaki hız değerleri kavis etkisi nedeniyle dış bükey

tarafıta daha yüksek olmaktadır.

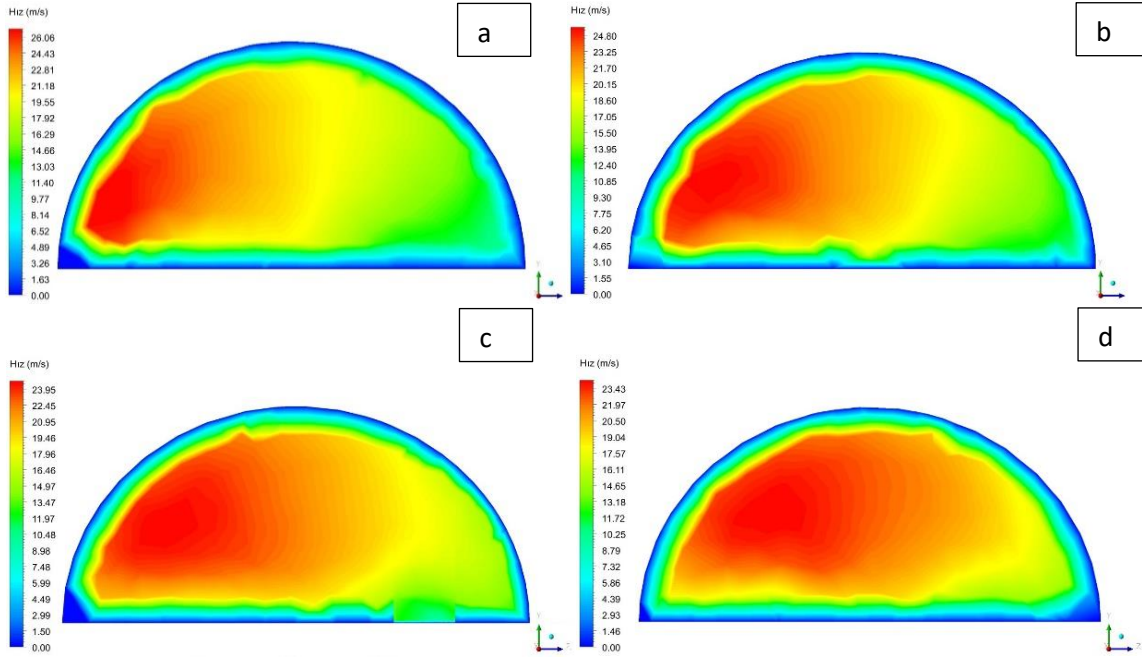


Şekil 10. R=1900 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hattında tünel içerisinde hız profilleri



Şekil 11. R=1900 m'de ve 70 km/saat Taşıt Hızında W1, W2, W3 Ve W4 Hatlarında Tünel İçerisinde Hız Profilleri
a) x=150 m b) x=250 m c) x=350 m

Şekil 12'de, 1900 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisinde taşıt hareket hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe kavis etkisi nedeniyle en kesitlerdeki hız değerleri dış büyük tarafta daha büyük olmaktadır.



Şekil 12. R=1900 m’de ve 70 km/saat Taşıt Hızında Tünel İçerisinde Hız Dağılımları a) x=100 m b) x=200 m c) x=300 m d) x=400 m

Taşıtlı tünelde iki farklı kavis durumuna ait hız dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, incelenen her iki kavis durumunda da tüm yatay hatlardaki hız değerlerinin dış bükey tarafta en büyük olduğu ve yatay doğrultulardaki en büyük hızların W4 hattında olduğu görülmektedir.

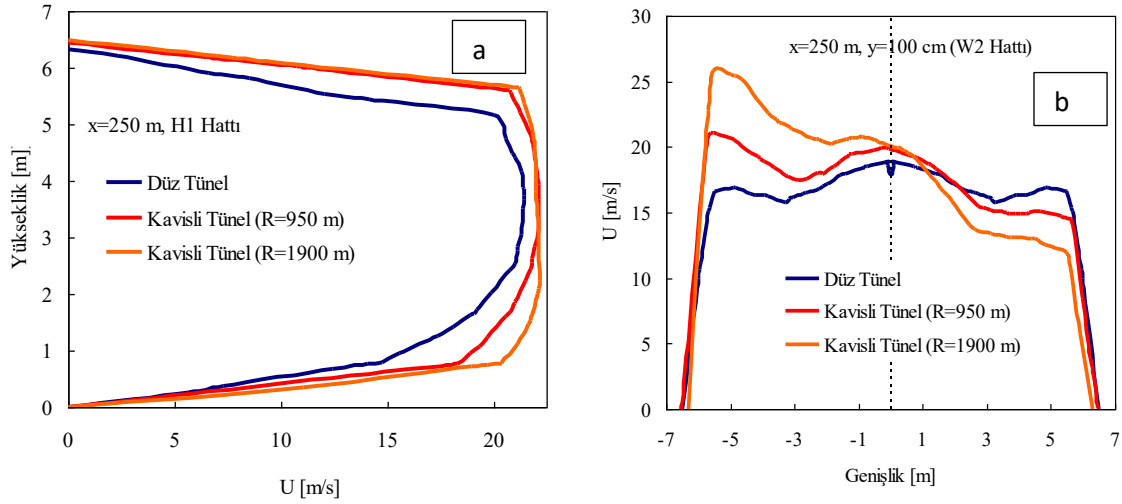
Kavis Yarıçapının Hız Dağılımına Etkisi

Şekil 13a’da, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde x=250 m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Parabolik görüntüdeki hız değerleri her üç durumda da birbirine benzer şekilde zemin itibaren artarak orta bölgede maksimum olmakta ve tavana yaklaştıkça tekrar azalmaktadır. Düz tünel durumuna göre kavisli durumlarda hız değerleri daha büyük olmakta ve kavis yarıçapının büyük değerinde taban yakınındaki hız değerleri artmaktadır. Şekil 13b’de 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde x=250 m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hattında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. 950 m kavis yarıçapına sahip tünelde, dış bükey ve iç bükey bölgeler arasındaki hız farkı yaklaşık 5 m/s iken 1900 m kavis yarıçapına sahip tünelde dış bükey ve iç bükey bölgeler arasındaki hız farkı yaklaşık 10 m/s olmaktadır. Dış bükey ve iç bükey bölgelerdeki hız değerlerindeki arasındaki fark kavis yarıçapı arttıkça artmaktadır.

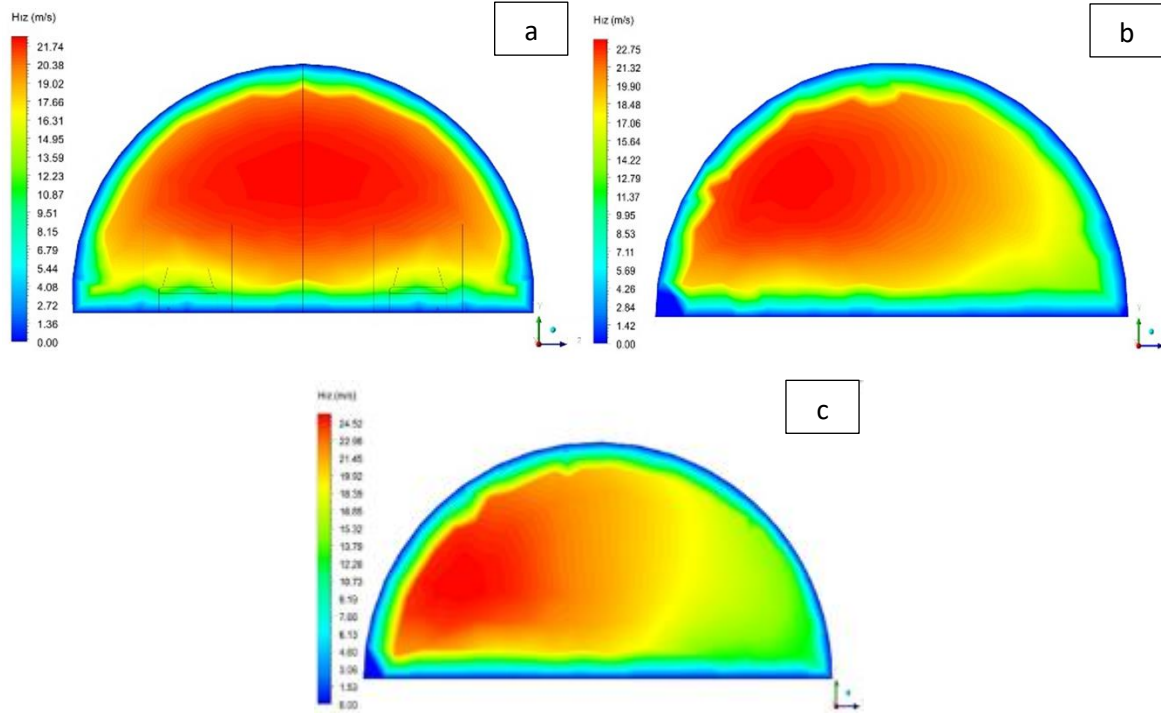
Şekil 14’de, taşıt hızının 70 km/saat değerinde 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde x=250 m istasyonunda en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Üç farklı tünel geometrisine ait hız dağılımları bir arada değerlendirildiğinde, kavis etkisiyle tünelin dış bükey tarafındaki hız değerlerinin arttığı iç bükey tarafındaki hız değerlerinin ise azaldığı görülmektedir. Dış bükey ve iç bükey bölgelerde hız değerlerindeki değişiklik kavis yarıçapı arttıkça daha fazla olmaktadır.

Karbonmonoksit Dağılımları

Sayısal çözümler sonucunda akış alanlarında hesaplanan karbonmonoksit değerleri, tünel içerisinde farklı istasyonlarda tanımlanmış yatay ve düşey hatlardaki çizgisel değişimler ve tünel en kesitlerindeki dağılımlar şeklinde verilmiştir. Tünel içerisindeki karbonmonoksit değerleri çözüm sürelerinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.



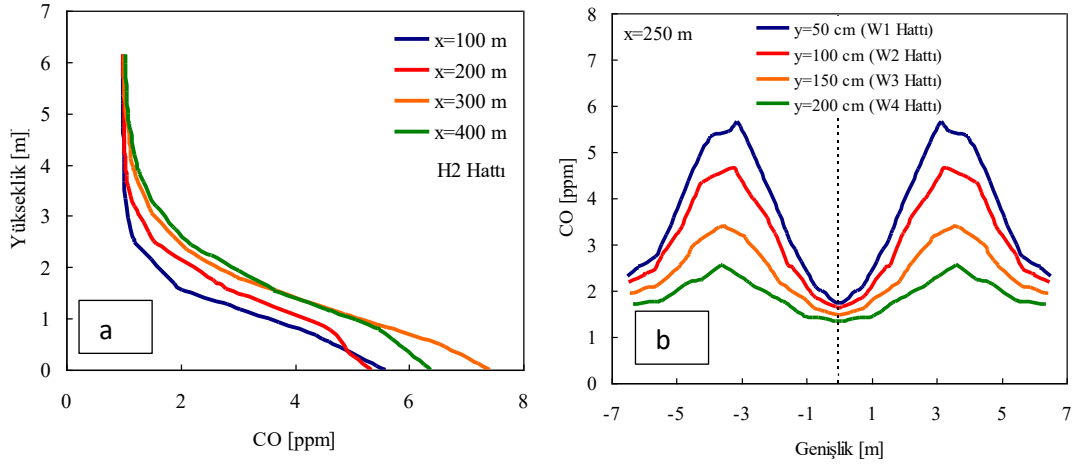
Şekil 13. 70 km/saat Taşıt Hızında Düz ve Kavisli Tünelde Hız Profilleri a) H1 Hattında Hız Değerleri b) W2 Hattında Hız Değerleri



Şekil 14. x=250 m'de ve 70 km/saat Taşıt Hızında Hız Dağılımları a) Düz Tünel b) R=950 m Yarıçapında Kavisli Tünel c) R=1900 m Yarıçapında Kavisli Tünel

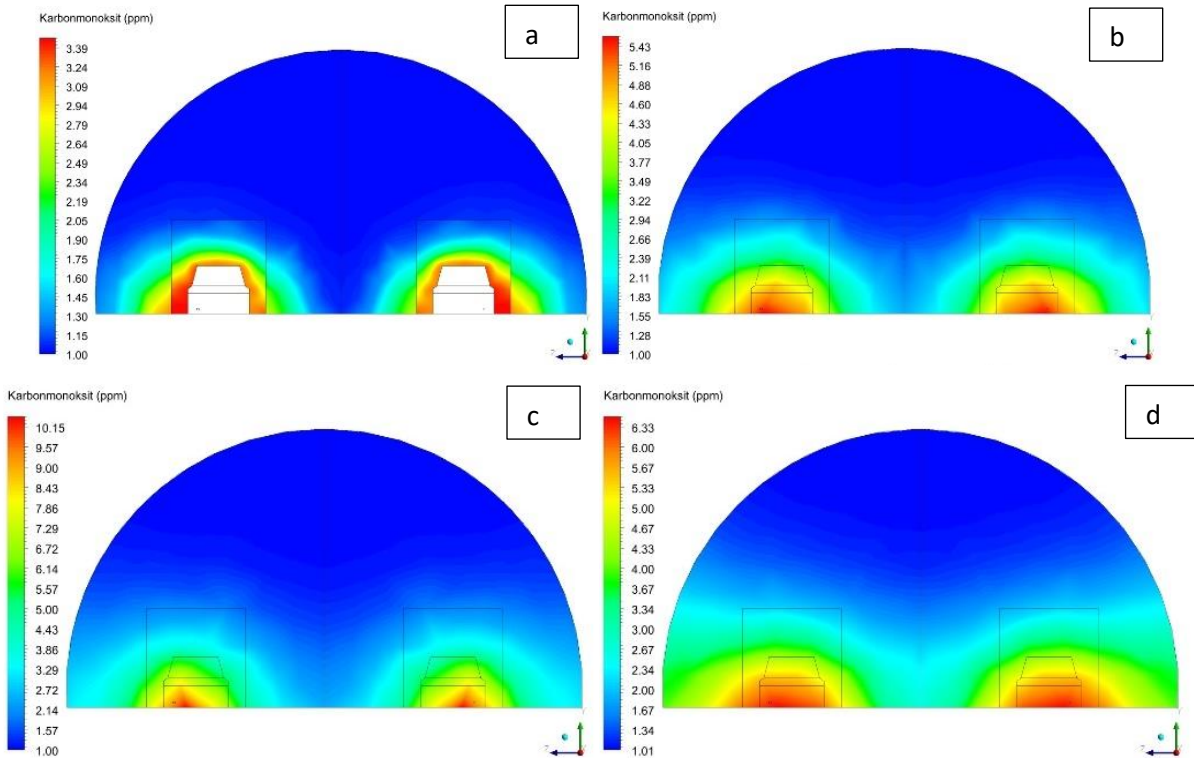
Taşıtlı Düz Tünel

Şekil 15a'da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hattında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değerleri, y=3 m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Tünel boyunca ilerledikçe artış gösteren karbonmonoksit değerleri, tünel çıkışı etkisiyle x=400 m'de x=300 m'deki değerlerden daha düşük olmaktadır. Şekil 15b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde x=250 m istasyonunda enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde sırasıyla W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri verilmiştir. W1 hattında en yüksek, W4 hattında en düşük olacak şekilde taşıt arkasına karşılık gelen dört konumda da karbonmonoksit değerleri artmaktadır.



Şekil 15. 70 km/saat Taşıt Hızında Karbonmonoksit Profilleri a) H2 Hattında Karbonmonoksit Değerleri b) W1, W2, W3 Ve W4 Hatlarında Karbonmonoksit Değerleri

Şekil 16’da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla $x=100$ m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış Karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbonmonoksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı ancak, bu yayılmanın taşıt hızının etkisiyle daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Taşıtların egzoz bölgelerinde en kritik değerlere ulaşan karbonmonoksit düzeyleri tünel içerisinde ilerledikçe artmakta, $x=400$ m’de tünel çıkışı etkisiyle $x=300$ m’deki değerlerden daha düşük olmaktadır.

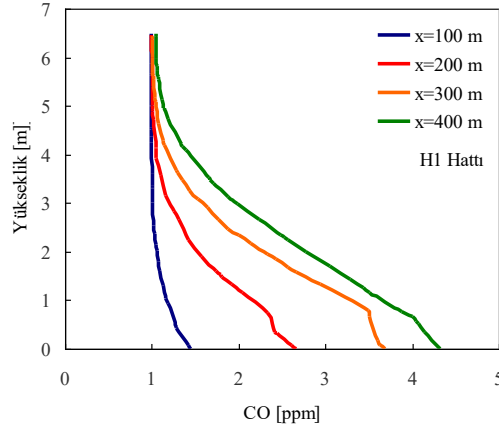


Şekil 16. 70 km/saat Taşıt Hızında Karbonmonoksit Dağılımları a) $x=100$ m b) $x=200$ m c) $x=300$ m d) $x=400$ m

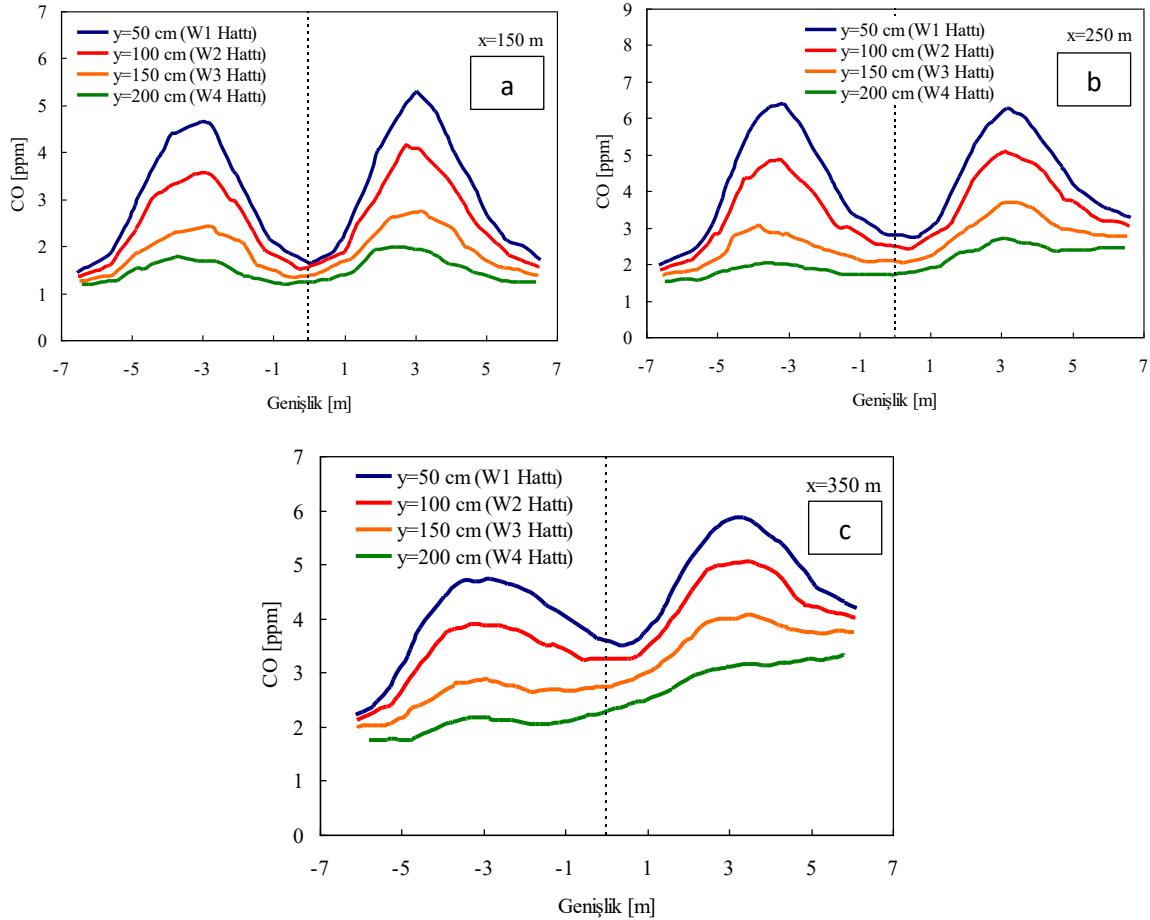
R=950 m Yarıçaplı Taşıtlı Kavisli Tünel

Şekil 17’de iki şeritli 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değerleri, $y=4$ seviyesine

kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Tünel boyunca ilerledikçe karbonmonoksit değerleri artmaktadır. Şekil 18'de, iki şeritli 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde $x=150$, 250 ve 350 m istasyonlarında enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde sırasıyla W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri verilmiştir. $x=150$ m'de, taşıtların arkasına karşılık gelen dört konumda da karbonmonoksit değerleri W1 hattında en yüksek, W4 hattında en düşük olacak şekilde artmakta, ancak kavis etkisiyle bu artış iç bükey tarafta daha fazla olmaktadır (Şekil 18a). Tünel boyunca ilerledikçe kavis etkisiyle iç bükey taraftaki karbonmonoksit değerlerindeki artış daha belirgin olmaktadır (Şekil 18b, c).

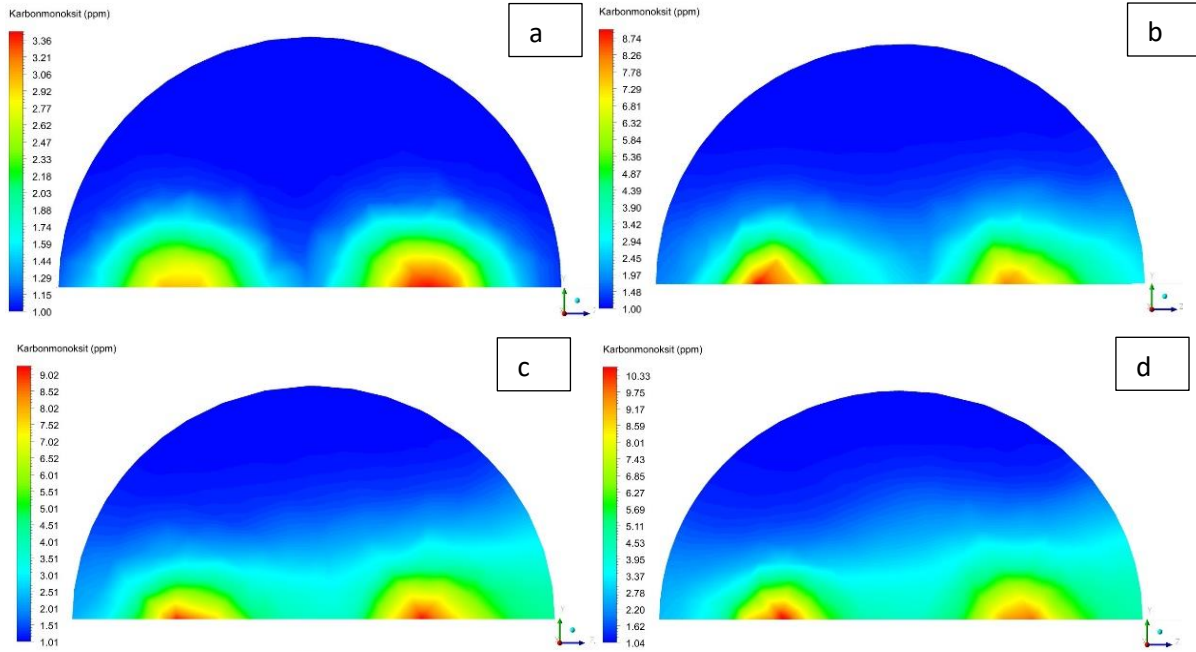


Şekil 17. R=950 m'de ve 70 km/saat Taşıt Hızında H1 Hattında Karbonmonoksit Profilleri



Şekil 18. R=950 m'de ve 70 km/saat Taşıt Hızında W1, W2, W3 ve W4 Hatlarında Karbonmonoksit Profilleri a) $x=150$ m b) $x=250$ m c) $x=350$ m

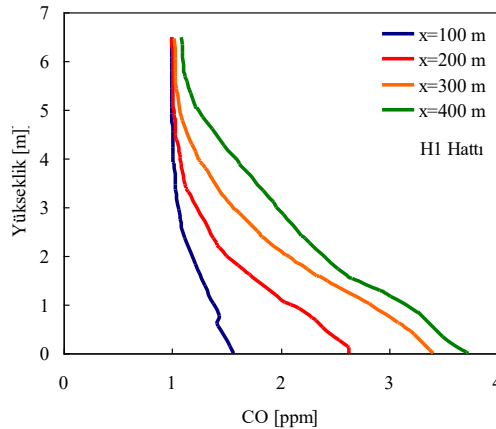
Şekil 19’da iki şeritli 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla $x=100$ m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbonmonoksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı ancak, bu yayılmanın kavis etkisiyle iç bükey tarafta daha etkili olduğu görülmektedir.



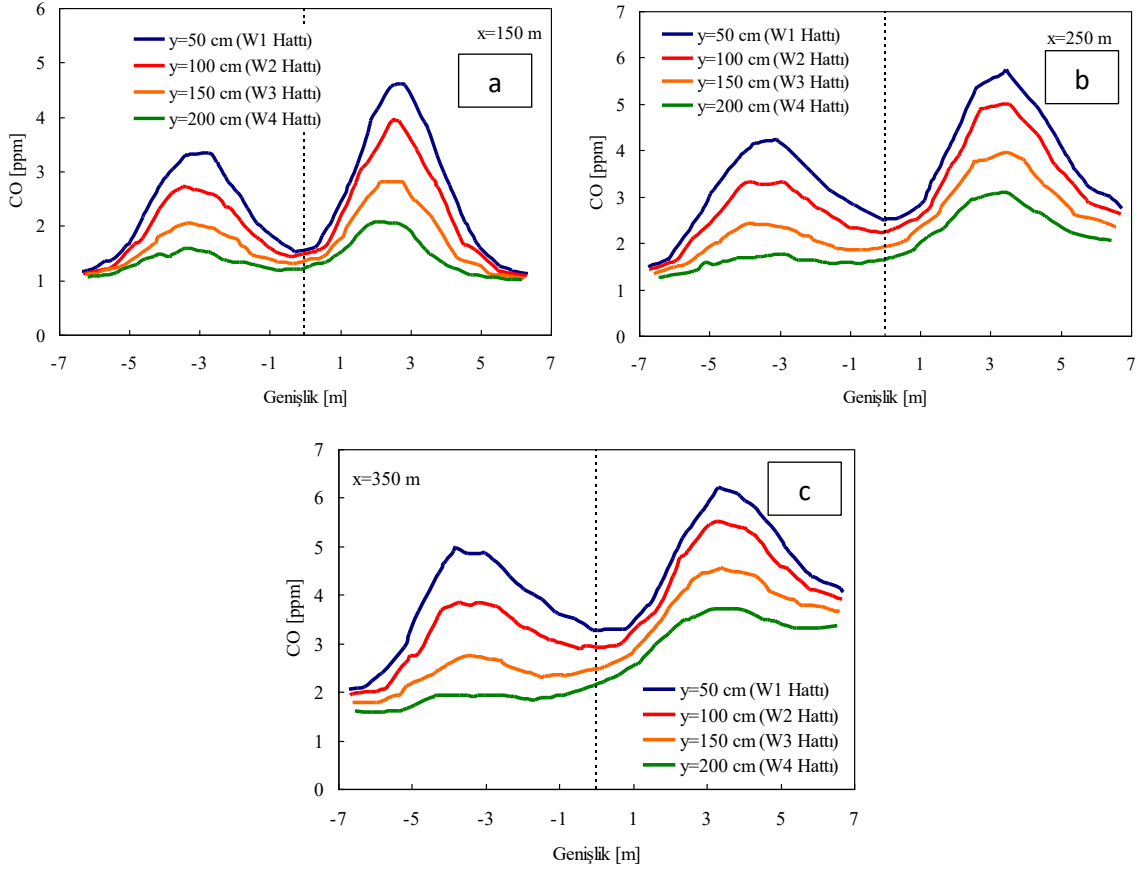
Şekil 19. 950 m Yarıçapa Sahip Kavisli Tünelde 70 km/saat Taşıt Hızında Karbonmonoksit Dağılımları a) $x=100$ m b) $x=200$ m c) $x=300$ m d) $x=400$ m

R=1900 m Yarıçaplı Taşıtlı Kavisli Tünel

Şekil 20’de iki şeritli 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değerleri, $y=4$ m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Tünel boyunca ilerledikçe karbonmonoksit değerleri artmaktadır. Şekil 21’de, iki şeritli 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde $x=150$, 250 ve 350 m istasyonlarında enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde sırasıyla W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri verilmiştir. $x=150$ m’de, taşıtların arkasına karşılık gelen dört konumda da karbonmonoksit değerleri W1 hattında en yüksek, W4 hattında en düşük olacak şekilde artmakta, ancak kavis etkisiyle bu artış iç bükey tarafta daha fazla olmaktadır (Şekil 21a). Tünel boyunca ilerledikçe kavis etkisiyle iç bükey taraftaki karbonmonoksit değerlerindeki artış daha belirgin olmaktadır (Şekil 21b, c).

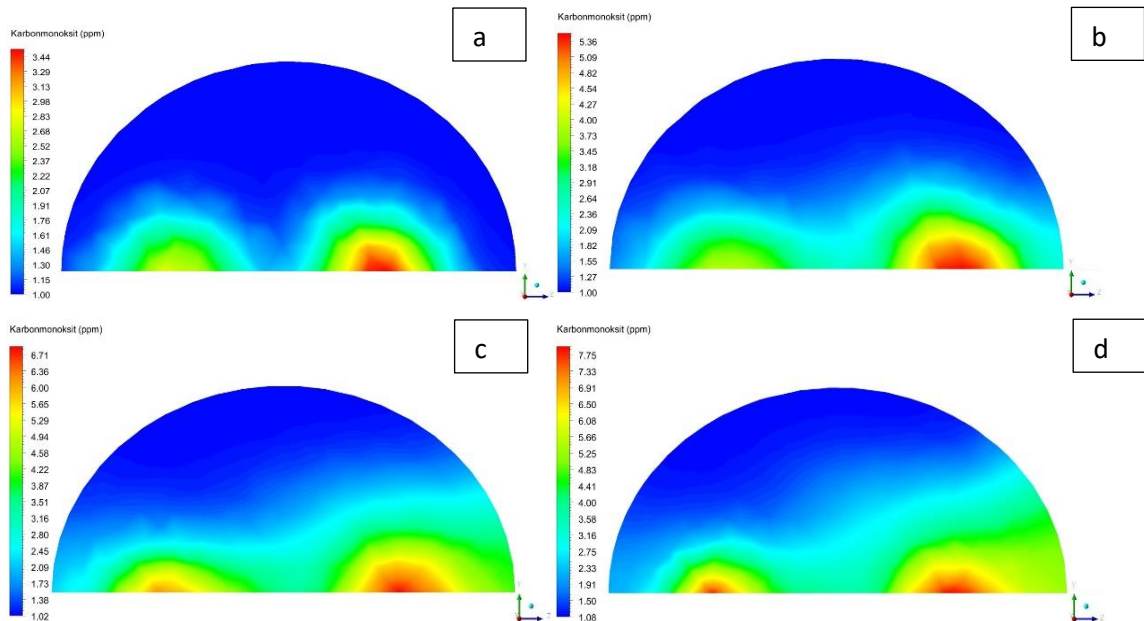


Şekil 20. R=1900 m’de ve 70 km/saat Taşıt Hızında H1 Hattında Karbonmonoksit Profilleri



Şekil 21. R=1900 m’de ve 70 km/saat Taşıt Hızında W1, W2, W3 ve W4 Hatlarında Karbonmonoksit Profilleri a) x=150 m b) x=250 m c) x=350 m

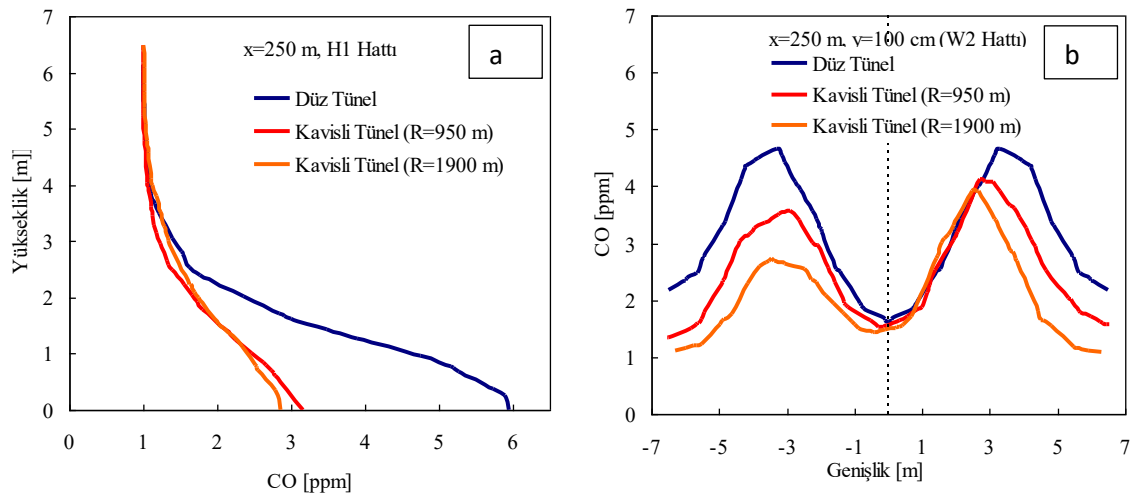
Şekil 22’de iki şeritli 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla x=100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbonmonoksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı ancak, bu yayılmanın kavis etkisiyle iç bükey tarafta daha etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 22. 1900 m Yarıçapa Sahip Kavisli Tünelde 70 km/saat Taşıt Hızında Karbonmonoksit Dağılımları a) $x=100$ m b) $x=200$ m c) $x=300$ m d) $x=400$ m

Kavis Yarıçapının Karbonmonoksit Dağılımına Etkisi

Şekil 23a'da, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde $x=250$ m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Düz tünelde, tünel tabanında 6 ppm şeklinde en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değeri, $y=3$ m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Kavis etkisiyle aynı hattaki karbonmonoksit değerleri tünel tabanında 3 ppm düzeyine inmektedir. Şekil 23b'de, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde $x=250$ m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hattında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Her üç tünel geometrisinde de taşıtların arkasına karşılık gelen bölgelerde karbonmonoksit değerleri yüksek olmaktadır. Düz tünelde 5 ppm olan bu maksimum değer kavis etkisiyle azalmakta ve $R=1900$ m yarıçaplı kavis durumunda tünel kesitinin sol kısmında 2.5 ppm, sağ kısmında ise 4 ppm olmaktadır.



Şekil 23. 70 km/saat Taşıt Hızında Düz Ve Kavisli Tünellerde Karbonmonoksit Profilleri a) H1 Hattında Karbonmonoksit Değerleri b) W2 Hattında Karbonmonoksit Değerleri

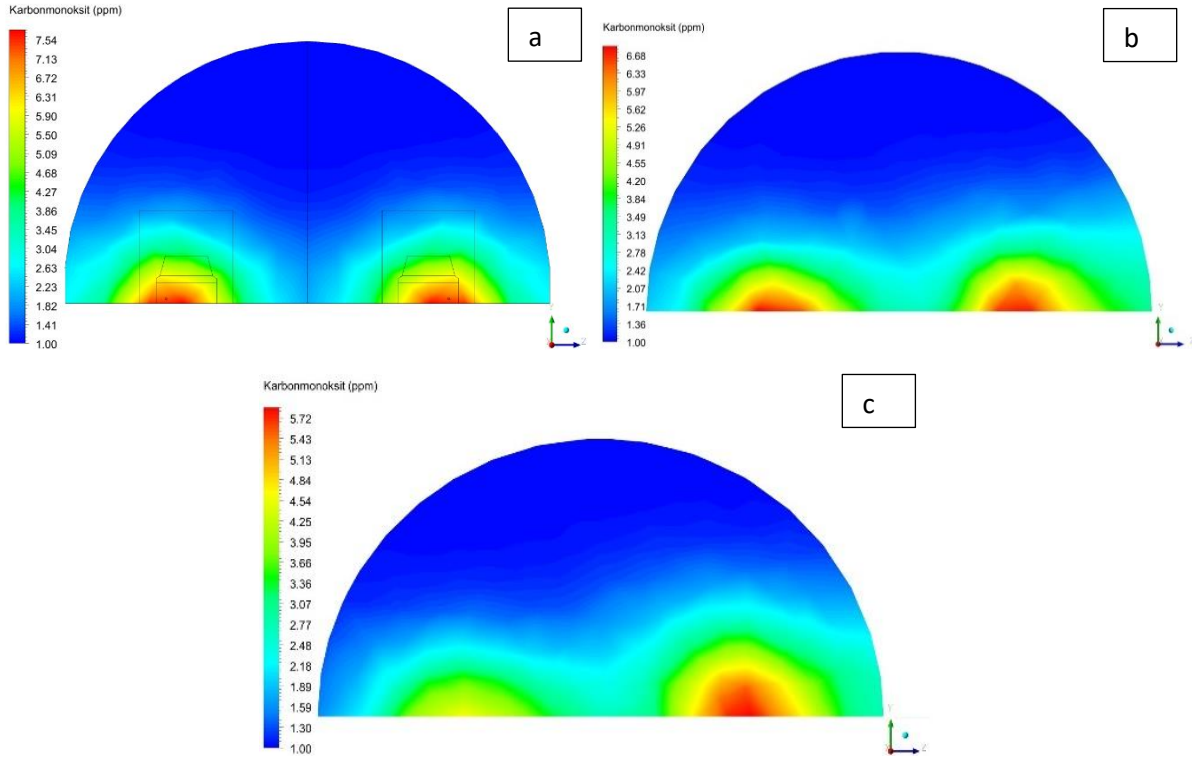
Şekil 24'de, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde $x=250$ m istasyonunda tünel en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Düz tünelde, karbonmonoksit etkisi taşıtların etrafında daha fazla olacak şekilde simetrik bir görüntüde iken, kavisli tünellerde bu simetrik etki bozularak iç bükey bölgelerde daha belirgin olmaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, karayolları tünellerindeki taşıtların egzozlarından yayılan kirletici gazlardan karbonmonoksitin tünel içerisindeki dağılımlarının sayısal olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, içerisinde taşıt bulunan 500 m uzunluğundaki iki şeritli düz bir tünel ve $R=950$ m ve $R=1900$ m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçalarıyla oluşan iki farklı kavise sahip iki şeritli iki tünel içerisindeki üç boyutlu akış alanları taşıt hızının 70 km/saat (taşıt sayısının 26 değeri için) değeri için zaman bağımlı sayısal çözümlerle incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Taşıtlı düz tünelde, tünel boyunca ilerledikçe en kesitlerdeki homojen hız dağılımları bozulmakta ve daha fazla sayıda taşıtın egzozu en kesit hız dağılımlarını etkilemektedir.
2. Taşıtlı kavisli tünellerde, kavis etkisiyle tünelin dış bükey tarafındaki hız değerleri artmakta, iç bükey tarafındaki hız değerleri ise azalmaktadır.
3. Taşıtlı kavisli tünellerde, dış bükey ve iç bükey bölgelerde hız değerlerindeki fark kavis yarıçapı arttıkça artmaktadır.

4. Taşıtlı kavisli tünellerde, kavis etkisiyle yatay ve düşey doğrultudaki karbonmonoksit değerleri azalmaktadır.
5. Taşıtlı kavisli tünellerde, karbonmonoksit dağılımları tünellerin iç bükey tarafında yoğun olmaktadır.
6. Taşıtlı kavisli tünellerde, kavis yarıçapı arttıkça karbonmonoksit değerleri azalmaktadır.
7. Düz tünelle karşılaştırıldığında kavisli tüneller insan sağlığı açısından daha uygun olmaktadır.



Şekil 24. $x=250$ m'de 70 km/saat Taşıtlı Hızında Karbonmonoksit Dağılımları a) Düz tünel b) $R=950$ m Yarıçapında Kavisli Tünel c) $R=1900$ m Yarıçapında Kavisli Tünel

Yapay Zeka Katkı Beyanı

Bu makale tamamen herhangi bir yapay zeka aracının yardımı olmadan yazılmış, düzenlenmiş, analiz edilmiş ve hazırlanmıştır. Metin, veri analizi ve şekiller dahil tüm içeriğin yalnızca yazarlar tarafından oluşturulduğunu beyan ederim.

Teşekkürler

Bu makale “Karayolları Tünellerinde Taşıtlı Egzozundan Kaynaklanan CO ve CO₂ Dağılımlarının İncelenmesi” başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

Al-Mutairi, N. Z., Almutairi, T., & Matar, H. B. (2020). Concentration of carbon monoxide in an enclosed parking garage. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(3), 402-408. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2020.402.408>

Chaloulakou, A., Duci, A., & Spyrellis, N. (2002). Exposure to carbon monoxide in enclosed multi-level parking garages in the central athens urban area. *Indoor and Built Environment*, 11(4), 191-201. <https://doi.org/10.1177/1420326X02011004>

Chen, K. S., Chung, C. Y., & Wang, S. (2002). Measurement and three-dimensional modeling of airflow and pollutant dispersion in an undersea traffic tunnel. *Journal of The Air & Waste Management Association*, 52(3), 349-363. <https://doi.org/10.1080/10473289.2002.10470783>

- Deng, Y., Chen, C., Li, Q., Hu, Q., Yuan, H., Li, J., & Li, Y., (2015), Measurements of real-world vehicle CO and NO_x fleet average emissions in urban tunnels of two cities in China. *Atmospheric Environment*, 122, 417-426. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.036>
- De Vito, S., Del Giudice, A., D'Elia, G., Esposito, E., Fattoruso, G., Ferlito, S., & Di Francia, G. (2023). Correlating air pollution concentrations and vehicular emissions in an Italian Roadway Tunnel by means of low cost sensors. *Atmosphere*, 14(4), 679. <https://doi.org/10.3390/atmos14040679>
- Dong, J., Tao, Y., Xiao, Y., & Tu, J. (2017). Numerical simulation of pollutant dispersion in urban roadway tunnels. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 9(1), 26-31. <https://doi.org/10.1177/1757482X17694041>
- Greiner, T. H., & Schwab, C. V. (1998). Carbon monoxide exposure from a vehicle in a garage. *Thermal Envelopes VII, Indoor Air Quality and Sustainability*, 209-216. <https://doi.org/10.3390/app15031146>
- Kara, N. (2019). Bir otoyol tüneline kullanarak emisyon faktörlerinin belirlenmesi ve modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir 72s.
- Kristensson, A., Johansson, C., Westerholm, R., Swietlicki, E., Gidhagen, L., Wideqvist, U., & Vesely, V. (2004). Real-world traffic emission factors of gases and particles measured in a road tunnel in Stockholm, Sweden. *Atmospheric Environment*, 38(5), 657-673. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.10.030>
- Król, A., Król, M., Koper, P., & Wrona, P. (2019). Numerical modeling of air velocity distribution in a road tunnel with a longitudinal ventilation system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 91, 103003. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103003>
- Lauder, B.E., & Spalding D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269-289. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- Li, Y., Chen, T., Xu, Z., Kong, J., Wang, M., & Fan, C. (2019). Influence of winding wall on the entrainment characteristics of air jet in curved road tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, 90, 330-339. <https://doi.org/10.1016/J.TUST.2019.05.012>
- Nie, W., Liu, X., Liu, C., Guo, L., & Hua, Y. (2022). Prediction of dispersion behavior of typical exhaust pollutants from hydraulic support transporters based on numerical simulation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(25), 38110-38125. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17959-5>
- Shen, J., Zhu, H., Luo, M., & Liu, D. (2016). Numerical simulation of CO distribution discharged by flame-proof vehicle in underground tunnel of coal mine. *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*, 40, 117-121. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.12.009>
- Shi, X., Sun, D., Fu, S., Zhao, Z., & Liu, J. (2019). Assessing on-road emission flow pattern under car-following induced turbulence using computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation. *Sustainability*, 11(23), 6705. <https://doi.org/10.3390/su11236705>
- Shi, X., Sun, D., Zhang, Y., Xiong, J., & Zhao, Z. (2020). Modeling emission flow pattern of a single cruising vehicle on urban streets with CFD simulation and wind tunnel validation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 4557. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124557>
- Sun, D. J., Shi, X., Zhang, Y., & Zhang, L. (2021). Spatiotemporal distribution of traffic emission based on wind tunnel experiment and computational fluid dynamics (CFD) simulation. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124495>
- Villanueva, J., & Chen, D. (2020). Measurement of Carbon Monoxide concentration levels within an underground parking lot throughout the day. *BCIT Environmental Public Health Journal*. 1-14. <https://doi.org/10.47339/ephj.2020.30>
- Zamorategui-Molina, A., Gutiérrez-Ortega, N. L., Baltazar-Vera, J. C., Del Ángel-Soto, J., & Tirado-Torres, D. (2021). Carbon Monoxide and particulate matter concentrations inside the road tunnels of Guanajuato City, Mexico. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(10), 210039. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210039>