

# Karayolu Tünellerinde Kavis Geometrisinin Taşıt Egzozundan Yayılan Karbondioksit Dağılımları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

## Investigation of The Effect of Curve Geometry in Road Tunnels on The Distribution of Carbon Dioxide Emitted from Vehicle Exhausts

Kerim Sönmez<sup>1\*</sup> , Yücel Özmen<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Teknoloji Transferi Uygulama ve Araştırma Merkezi, Trabzon, Türkiye

<sup>2</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

### Öz

Bu çalışmada, karayolları tünellerinde taşıtların egzozlarından yayılan kirlenici gazlardan karbondioksitin tünel içerisindeki dağılımları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. İlk önce Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan Akyazı Tüneli'nde karbondioksit ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise, 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 karbondioksit dağılımları elde edilmiştir. Taşıtlı kavisli tünellerde, dış bükey ve iç bükey bölgelerde hız değerlerindeki fark kavis yarıçapı arttıkça artmaktadır. Kavis yarıçapı arttıkça karbondioksit değerleri azalmaktadır. Tünellerin iç bükey tarafında karbondioksit yoğunluğu daha fazla olmaktadır. Sayısal çalışmada kullanılan Standart k-ε modeli deneysel verilerle iyi bir uyum göstermektedir.

### Abstract

In this study, the distribution of carbon dioxide, one of the pollutant gases emitted from vehicle exhausts in road tunnels, within the tunnel was investigated experimentally and numerically. Carbon dioxide measurements were first carried out in the Akyazı Tunnel located in the Ortahisar district of Trabzon province. Subsequently, 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 (for a vehicle count of 26), yielding the velocity distributions and carbon dioxide 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 dioxide values decrease as the curve radius increases. Carbon monoxide concentrations are higher on the concave side of tunnels. The Standard k-ε model used in the numerical study shows good agreement with experimental data.

**Anahtar Kelimeler:** Kavisli tünel, Taşıt hızı, Karbondioksit dağılımı, Standart k-ε türbülans modeli

**Keywords:** Curved tunnel, Vehicle speed, Carbon dioxide distribution, Standard k-ε turbulence model

\* Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): [kerimsonmez@ktu.edu.tr](mailto:kerimsonmez@ktu.edu.tr)

Geliş Tarihi (Received):03.10.2025, Kabul Tarihi (Accepted): 28.01.2026

## 1. Giriş

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. Karbondioksit zehirli bir gaz olup, solunduğunda 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.

Fre vd. [1], Belçika'nın Antwerp kentindeki Craeybeckx karayolu tüneline gerçekleştirdikleri saha çalışmasında azotoksit, kükürtdioksit, karbonmonoksit, karbondioksit, metan dışı hidrokarbonlar, uçucu organik bileşikler, poliaromatik hidrokarbonlar ve kurşun ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Tünel içerisinde havalandırma çalışırken 30 dakika boyunca yaptıkları ölçümler sonucunda ortalama karbonmonoksit değerinin 2.9 ppm ve ortalama karbondioksit değerinin 543.8 ppm düzeyinde olduğunu belirtmişlerdir. Luther vd. [2], okul dersliklerindeki karbondioksit konsantrasyonlarını dersliklerin doluluk oranına göre deneysel olarak incelemişlerdir. Avustralya'da bulunan 6 farklı okuldaki 24 derslikte karbondioksit ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Dersliklerdeki karbondioksit konsantrasyonunu etkileyen en önemli parametrelerin sırasıyla hava değişim oranı, karbondioksit nefes verme oranı ve öğrenci sayısı olduğunu ifade etmişlerdir. Wei ve Wang [3], Şanghay'daki bazı karayolu tünellerinde mobil taşıt kullanarak karbondioksit ve metan konsantrasyonlarını deneysel olarak incelemişler ve ortalama karbondioksit ve metan konsantrasyonlarını sırasıyla  $1308.92 \pm 767.48$  ppm ve  $2182 \pm 112$  ppb olarak elde etmişlerdir. Trafik yoğunluğu olan karayolları tünellerinde hem sürücüler hem de yolcular için sağlıksız koşullar oluşturabilecek kirletici gazların yüksek konsantrasyonda birikebileceğini ifade etmişlerdir. Ren vd. [4], metro vagonlarındaki hava kalitesini değerlendirmek amacıyla Çin'in Şanghay şehrindeki iki farklı metro hattında karbondioksit ve partikül madde ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Üç hafta boyunca, sabah, öğle ve akşam saatlerinde yer altı ve yer üstü metro istasyonlarında ve metro vagonlarında gerçekleştirdikleri ölçümler sonucunda vagonlardaki karbondioksit konsantrasyonlarının artan yolcu sayısı ile doğrusal olarak arttığını ifade etmişlerdir. Havalandırma sisteminin çalışmadığı durumda yolcu sayısının yüksek olduğu sabah ve akşam saatlerinde sırasıyla  $2016 \pm 567$  ppm ve  $1534 \pm 498$  ppm düzeyinde olan vagonlardaki karbondioksit konsantrasyonlarının havalandırma sisteminin çalışmasıyla %21 ve %27 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Yang vd. [5], metro vagonlarında karbondioksit konsantrasyonunun dinamik özelliklerini deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında, vagonlara yerleştirdikleri sensörlerle karbondioksit ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Karbondioksit değerlerinin, metronun ilk vagonundan son vagonuna doğru ilerledikçe arttığını ve yolcu sayısından büyük ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Yolcu sayısının fazla olduğu sabah saatlerinde karbondioksit konsantrasyonunun normal saatlerdeki değerin 2,3 katına çıktığını ifade etmişlerdir. Tao vd. [6], orta bölümü atmosfere açık ardışık iki karayolu tünelineki hava akışını ve taşıt kaynaklı kirleticilerin tüneller içindeki dağılımlarını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Model ölçeğinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada, tünel modeli içerisinde boş, akan trafik ve yoğun trafik şeklinde üç farklı trafik koşulu incelenmiştir. Standart k-ε türbülans modeli kullanılarak boş trafik durumu için elde edilen sayısal sonuçların kirletici konsantrasyon oranları açısından deneysel verilerle uyumlu olduğu belirtilmiştir. Sun vd. [7], doğal olarak havalandırılan avluya sahip 12 odalı bir bina içerisindeki karbondioksit dağılımını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmada, rüzgâr tüneli test bölgesine yerleştirilmiş 1/50 ölçekli bina modelinin içerisinde yüzey basınçları ve karbondioksit değerleri ölçülmüştür. Sayısal çalışmada ise bina iç bölümlerindeki karbondioksit dağılımları farklı türbülans modelleri ile hesaplanmıştır. Doğal havalandırmanın iç ortam

hava kalitesini artırdığını ancak değişen rüzgâr koşullarına bağlı olarak kirleticilerin bina içerisinde farklı bölümlere geçişine de neden olduğunu belirtmişlerdir. Kim vd. [8], bir tırın egzozundan salınan gazdaki karbondioksit konsantrasyonunu belirlemek amacıyla Standart k-ε türbülans modelini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmadan elde edilen karbondioksit değerlerinin literatürde mevcut verilerle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Papakonstantinou vd. [9], bir oditoryumda insanların solunumu sonucu ortamda oluşan karbondioksit dağılımını sayısal olarak inceledikleri çalışmalarında elde ettikleri sonuçların literatürdeki verilerle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Bari vd. [10], Avustralya'nın Melbourne kentindeki Burnley karayolu tüneline trafiğin yoğun olduğu durumlarda taşıt emisyonlarından kaynaklanan kirlilik seviyelerini sayısal olarak incelemişlerdir. Standart k-ε türbülans modeli kullanarak gerçekleştirilen çözümlerde karbonmonoksit, karbondioksit ve oksijen için konsantrasyonlar sırasıyla 200 ppm, 1400 ppm ve 1600 ppm olarak elde edilmiştir. Hooff ve Blocken [11], yarı kapalı bir stadyum içerisindeki karbondioksit dağılımlarını Realizable k-ε türbülans modeli ile hesaplamışlardır. Stadyumun kuzey ve güney bölümlerindeki karbondioksit değerleri arasında 700 ppm'e varan farkların oluştuğunu belirtmişlerdir. Ning vd. [12] bir yatak odası içerisindeki karbondioksit konsantrasyonunu Standart k-ε ve SST k-ω türbülans modelleriyle yerden 5 farklı yükseklikteki havalandırma menfezi konumu için sayısal olarak elde etmişlerdir. İçerideki kirli havanın tahliyesini sağlayan menfezin konumunun zemine yakın olmasının solunan kirli havanın nefes alma bölgesinden uzaklaştırılmasında etkili olduğunu belirtmişlerdir. Dong vd. [13], karayolu tünellerinde oluşan taşıt kaynaklı karbondioksit dağılımını Standart k-ε türbülans modeli ile sayısal olarak incelemişlerdir. Üç farklı taşıt hızında yapılan çözümlerde, karbondioksit düzeyinin yüksek olduğu bölgelerin, zemine ve tünel çıkışına yakın bölgeler olduğunu ifade etmişlerdir. Tan vd. [14], belediyeye ait bir boru hattı tünelineki karbondioksit ve metan dağılımlarını Standart k-ε türbülans modeli ile sayısal olarak elde etmişlerdir. Boru hattı tüneline, havalandırma shaftı olmadığı durumda kirletici gaz dağılımında belirgin bir katmanlaşma oluştuğunu havalandırma shaftıyla sağlanan doğal havalandırma durumunda ise tüneli içerisindeki zararlı gaz içeriğinin ciddi oranda azaldığını belirtmişlerdir. Babadi vd. [15], tavuk kümeslerinin bulunduğu havalandırma sistemine sahip kapalı bir çiftlik içerisindeki karbondioksit, amonyak konsantrasyonlarını ve nem dağılımını Standart k-ε türbülans modeli ile sayısal olarak incelemişlerdir. Üç farklı havalandırma modelini denedikleri çalışmalarında, karbondioksit ve amonyak seviyelerindeki en büyük azalmanın 15 adet fan kullanılması durumunda oluştuğunu ifade etmişlerdir. Canitz vd. [16], bir vaka çalışması olarak Alabama'da bulunan George C. Wallace tünelineki karbon yakalama sisteminin etkinliğini inceledikleri çalışmalarında, tünel içerisinde oluşan karbondioksitin %25'inin karbon yakalama sistemi tarafından yakalandığını belirtmişlerdir.

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

## 2. Deneysel Çalışma

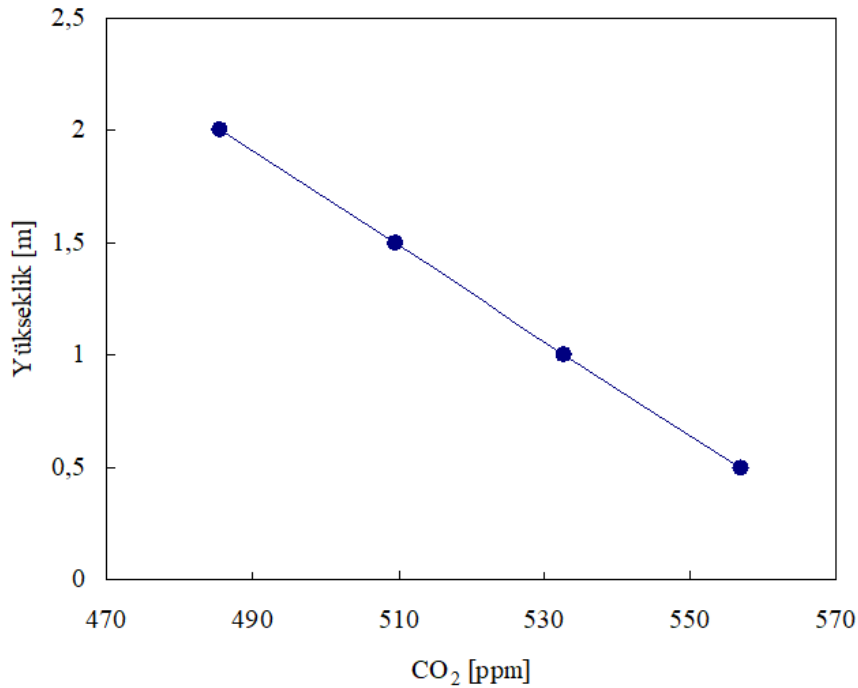
Saha çalışması şeklinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada, Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan Akyazı Tüneli'nde karbondioksit ölçümleri yapılmıştır. 2480 metre uzunluğa sahip Akyazı Tüneli biri dağ tarafında diğeri ise deniz tarafında olmak üzere üç şeritli iki tüpten oluşmaktadır. Her iki tüpte de genişlik 16 metre ve yükseklik 8.5 m şeklindedir. Karbondioksit ölçümleri tünel içerisinde bulunan duraklama ceplerinde sabit konumlarda ve dağ ve deniz tüplerinde taşıt hareketiyle kat edilen tünel uzunluğu boyunca gerçekleştirilmiştir. Duraklama ceplerindeki ölçümler, ceplerin orta konumunda ölçüm probunun düşey yönde yerden sırasıyla 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerinde birer dakika sabit tutulmasıyla elde edilmiştir. Ceplerdeki ölçümlerde tünel içerisindeki taşıtların ortalama hızları saatte 70 km olarak gerçekleşmiştir. Dağ ve tünel tüplerinde tünel uzunluğu boyunca gerçekleştirilen ölçümler ise sabit hızda hareket eden bir taşıtın arka camından dışarıya uzatılmış ve 150 cm yükseklikte

konumlandırılmış ölçüm probuyla sağlanmıştır. Tünel uzunluğu boyunca karbondioksit ölçümünde, ölçüm probunun bulunduğu taşıt tünel içerisinde yaklaşık 35 km/saat sabit hızda hareket ettirilmiştir.

## 2.1. Karbondioksit Ölçümü

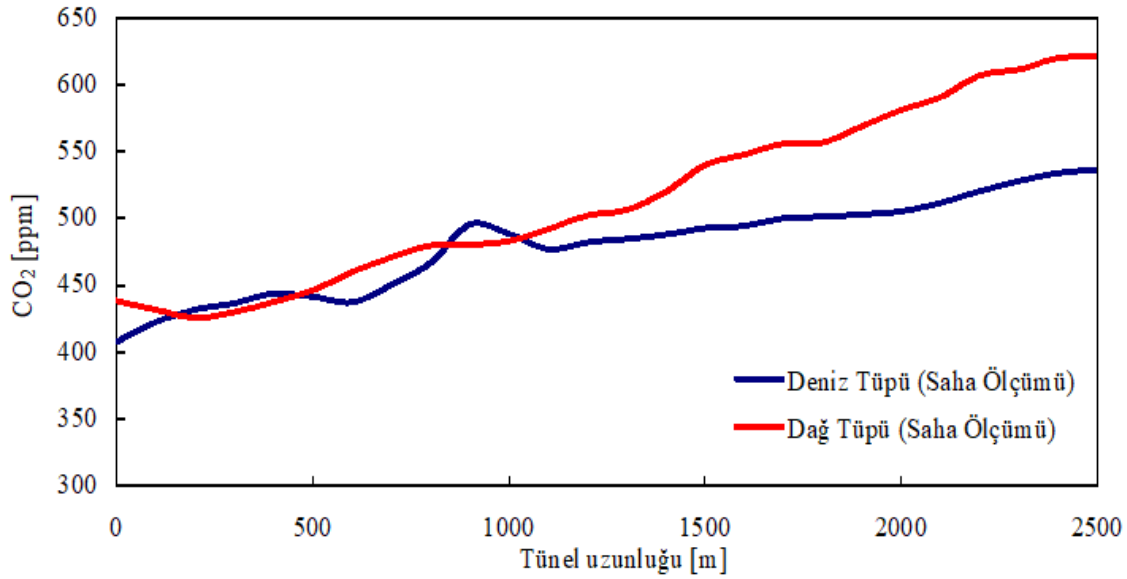
Tünel içerisindeki karbondioksit ölçümleri TESTO-480 model çok fonksiyonlu dijital ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Tünel içerisindeki karbondioksit konsantrasyonunu belirlemek amacıyla iç hava kalitesi ölçüm probu ölçüm cihazına bağlanarak ölçme sistemi oluşturulmuştur. Tünel içerisindeki duraklama ceplerinde yapılan ölçümlerde ölçüm süresi 60 s olarak gerçekleşmiştir. Tünel uzunluğu boyunca gerçekleştirilen ölçümlerde ise ölçüm süresi probun bulunduğu taşıtın tünel girişi ile tünel çıkışı arasında geçirdiği süre olan 255 s değerindedir. Ölçüm sonuçlarının analizi Testo Easy Climate yazılımı ile yapılmıştır. 0 ile 10000 ppm aralığında karbondioksit ölçüm skalasına sahip iç hava kalitesi probunda çözünürlük 1 ppm ve doğruluk  $\pm 50$  ppm düzeyindedir.

Şekil 1’de, Akyazı Tüneli’nin deniz tüpünde tünel boyunun orta konumundaki duraklama cebinde tünel duvarından 1 metre açıklıkta düşey doğrultuda yerden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde ölçülmüş zaman ortalamalı karbondioksit değerleri görülmektedir. Ölçüm süresince 1 s aralıklarla kaydedilen verilerin ortalaması alınarak tünel cebinde ilgili konuma ait karbondioksit değeri elde edilmiştir. Taşıtların egzoz seviyesine karşılık gelen 50 cm yüksekliğinde en büyük olan karbondioksit değeri yükseklik arttıkça doğrusal olarak azalmaktadır.



Şekil 1. Duraklama cebinde karbondioksit değerlerinin yükseklikle değişimi

Şekil 2’de, Akyazı Tüneli’nin deniz ve dağ tüplerinde saatte yaklaşık 35 km hızla hareket eden bir taşıtın arka camından çıkarılarak 150 cm yükseklikte konumlandırılmış ölçüm probuyla tünel uzunluğu boyunca ölçülmüş karbondioksit değerleri görülmektedir. Hem deniz hem de dağ tüpündeki karbondioksit değerlerinin benzer bir değişim gösterdiği ve ölçüm probunun tünel içerisinde ilerlemesiyle birlikte arttığı görülmektedir.



Şekil 2. Tünel boyunca karbondioksit değerleri

### 3. Sayısal Çalışma

#### 3.1. 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 çözülerek, 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

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

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 kütlelesel kuvvetler bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu denklemler türbülanslı akış için hız ve basınç büyüklükleri zaman ortalamalı ve çalkantı terimleri cinsinden yazıldığında,

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

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 incelenbilmesi için akış alanını çözmeyi amaçlayan modeller geliştirilmiş ve "türbülans modeli" kavramı bu şekilde ortaya çıkmıştır [17].

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 çözülen 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.

### 3.2. Standard k-ε Türbülans Modeli

Lauder ve Spalding [17], 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,  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$ , k ve ε için türbülans Prandtl sayılarını,  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$ , kaynak terimlerini ve  $Y_M$ , sıkıştırılabilir türbülanslı bölge içindeki türbülans hacim değişiminin toplam yayılım oranına katkısını ifade etmektedir. Denklemlerde yer alan ' $\mu_t$ ', 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.

### 3.3. 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 [13].

Türbülanslı akışlarda, kütle difüzyon akısı,

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

şeklinindedir. Burada,  $Sc_t$  türbülanslı Schmidt sayısını göstermekte ve 0.7 olarak alınmaktadır.  $\mu_t$  ve  $D_T$  ise sırasıyla türbülans viskozitesini ve türbülans difüzyonunu ifade etmektedir.

### 3.4. 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. Tünel içerisindeki azami hız sınırının 70 km/saat olması nedeniyle, taşıt hızı 70 km/saat olarak belirlenmiştir. 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 3'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.

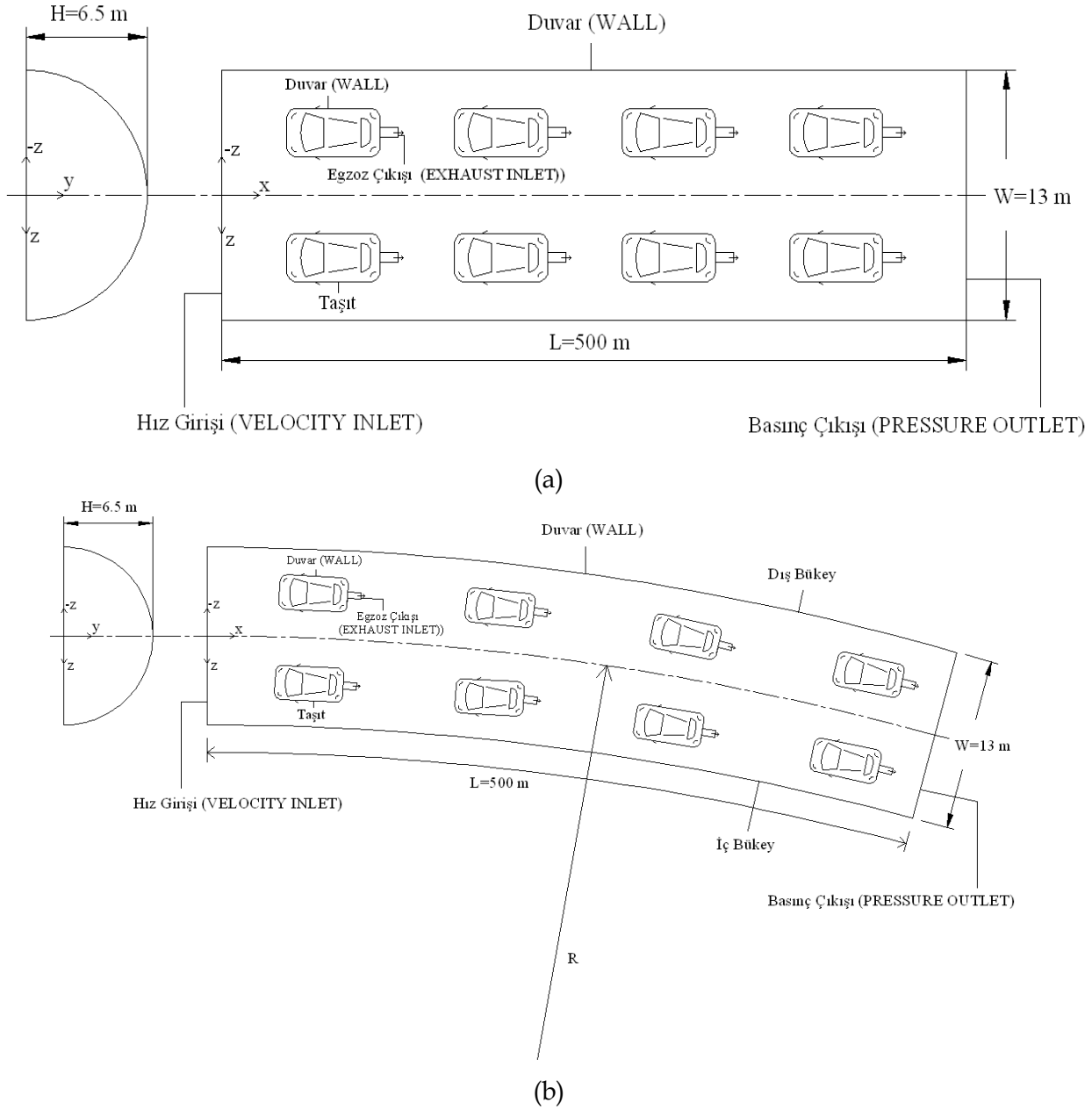
Sayısal çözümler sonucunda akış alanlarında hesaplanan büyüklükler, tünel içerisinde farklı istasyonlarda tanımlanmış yatay ve düşey hatlardaki çizgisel değişimler ve tünel en kesitlerindeki dağılımlar şeklinde verilmiştir. En kesitlerde tanımlanmış yatay ve düşey hatların konumu Şekil 4'de verilmiştir. W1, W2, W3 ve W4 olarak adlandırılan yatay hatlar tünel tabanından itibaren düşey doğrultuda 50 cm'lik mesafelerle oluşturulmuştur (Şekil 4a). Düşey hatlar ise, tünel yüksekliğine karşılık gelen H1 hattı ve taşıt kesitinin orta konumundaki düşey hattı temsil eden H2 hattıdır (Şekil 4b).

### 3.5. Ağ Yapısı ve Ağdan Bağımsızlık

Sayısal çözümlerde akış alanlarındaki ağ yapıları, ANSYS FLUENT 18.1 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'ten küçük olması sağlanmıştır. Şekil 5'te taşıtlı düz tünelde ait örnek ağ yapısı görülmektedir. Egzoz ve araç etrafında yoğun olan ağ yapısı tünel duvarlarına doğru seyrekleşmektedir.

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 karbondioksit değerlerinin benzer olması çözümlerin ağdan bağımsız olduğunu göstermiştir. 70 km/saat taşıt hızı için ağ yoğunluğu düz tünelde 8.2 milyon kavisli

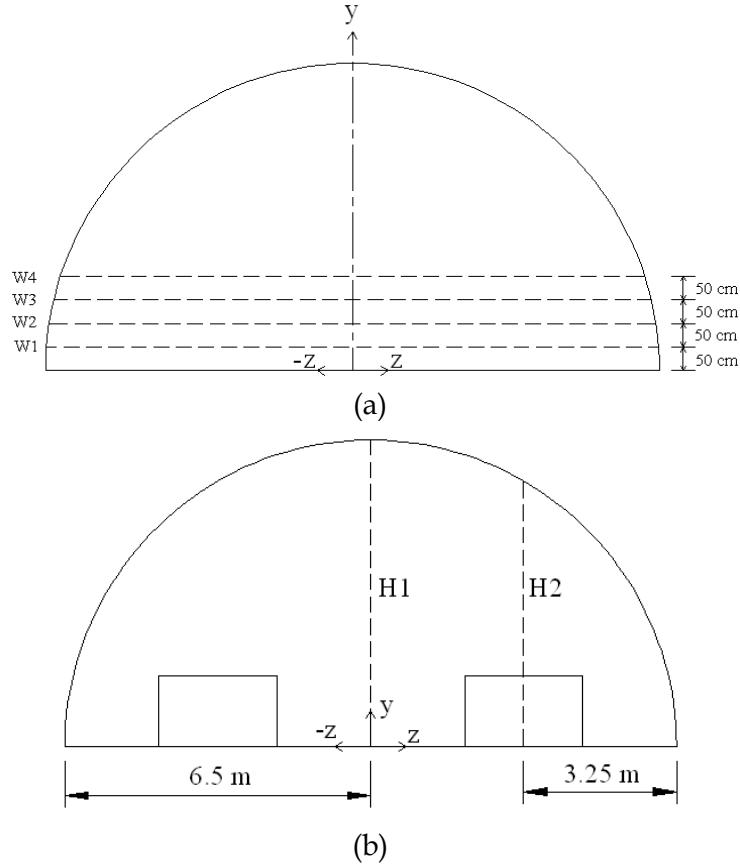
tünellerde ise yaklaşık 16 milyon olarak dikkate alınmıştır. Taşıt yüzeylerinde  $y^+ \approx 35$  olarak gerçekleştirilmiştir.



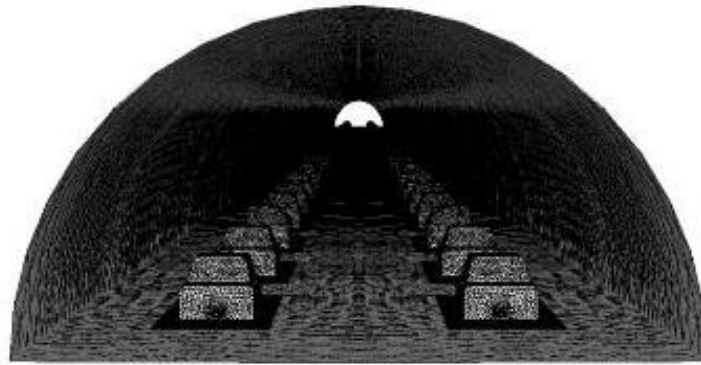
Şekil 3. Taşıtlı tünellerde örnek akış alanı görüntüleri (a) Düz tünel (b) Kavisli tünel

### 3.6. 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 ayrıştırılmasında ise "Second Order Upwind" yöntemi kullanılmıştır. Çözümlerde yakınsama kriteri  $10^{-5}$  olarak dikkate alınmıştır. Karbondioksit konsantrasyon denkleminde "Diffusion Energy Source" yaklaşımı esas alınmıştır.



Şekil 4. Tünel en kesitinde tanımlanmış çizgisel hatlar  
(a) Yatay hatlar (b) Düşey hatlar

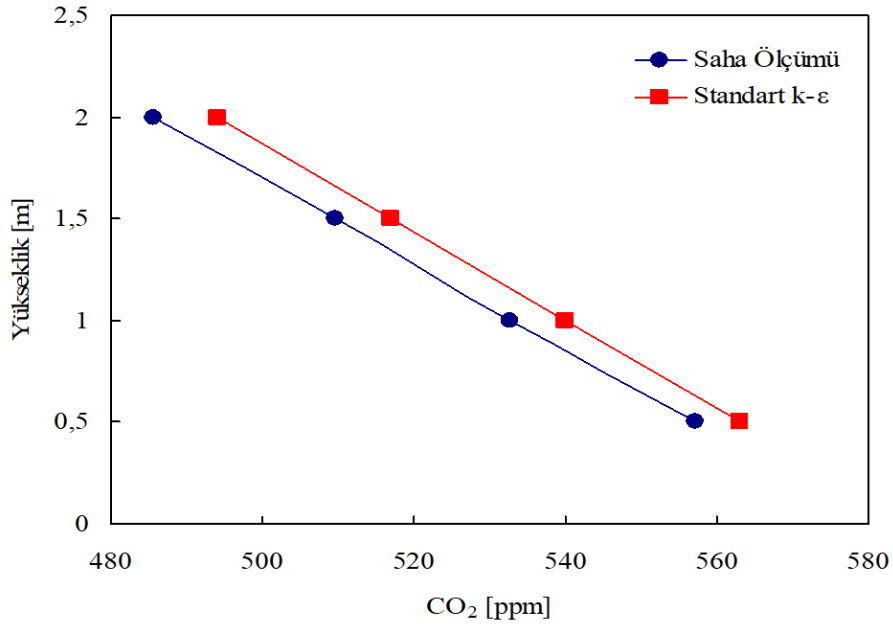


Şekil 5. Taşıtlı düz tünele ait örnek ağ yapısı

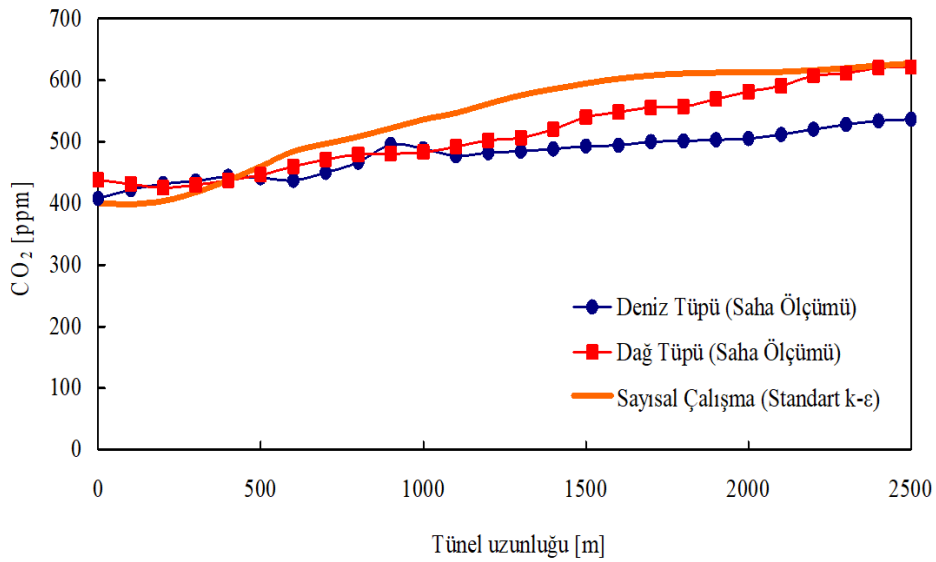
### 3.7. Sayısal Çözümün Doğrulanması

#### 3.7.1. Saha Ölçümleri İle Doğrulama

Saha çalışmasında, Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan üç şeritli Akyazı Tüneli'nde, tünel içerisindeki orta cepte sabit konumda ve ölçüm probunun hareket ettiği tünel uzunluğu boyunca karbondioksit ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin gerçekleştirildiği tünel geometrisini esas alan sayısal çalışmada Standart k-ε türbülans modeli ile hesaplanan karbondioksit değerleri ölçüm verileriyle birlikte Şekil 6'da görülmektedir. Tünel içerisindeki orta cepte düşey doğrultuda deneysel ve sayısal olarak elde edilen karbondioksit değerleri oldukça uyumludur (Şekil 6a). Şekil 6b'de Standart k-ε türbülans modeli ile hesaplanan karbondioksit değerleri, deniz ve dağ tüplerinde tünel uzunluğu boyunca ölçülen karbondioksit değerleriyle birlikte verilmiştir. Sayısal çözümden hesaplanan karbondioksit değerlerinin saha ölçümleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



(a)

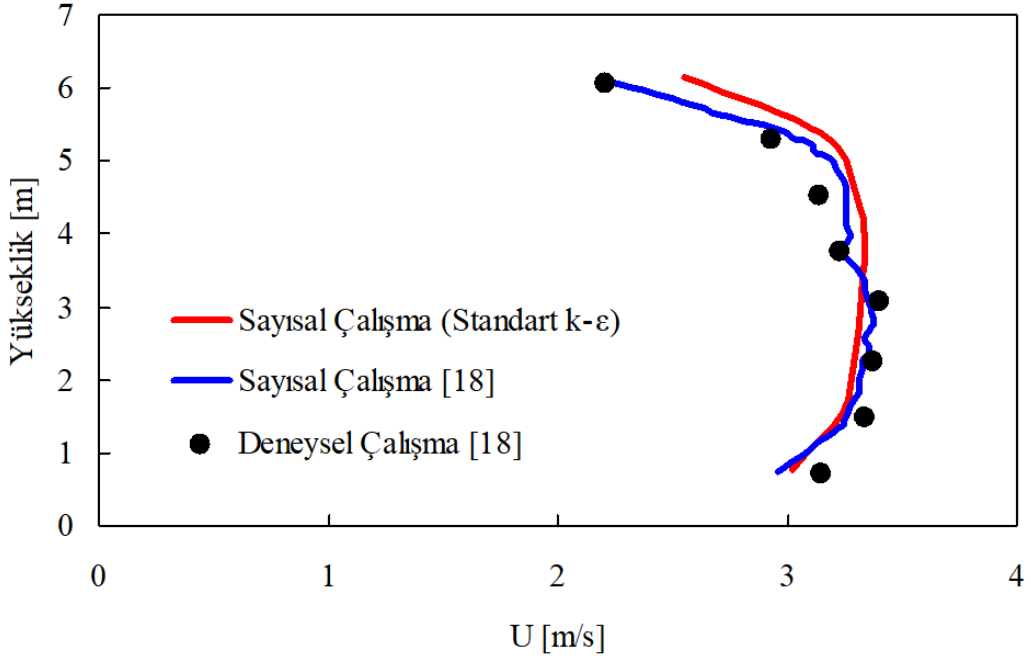


(b)

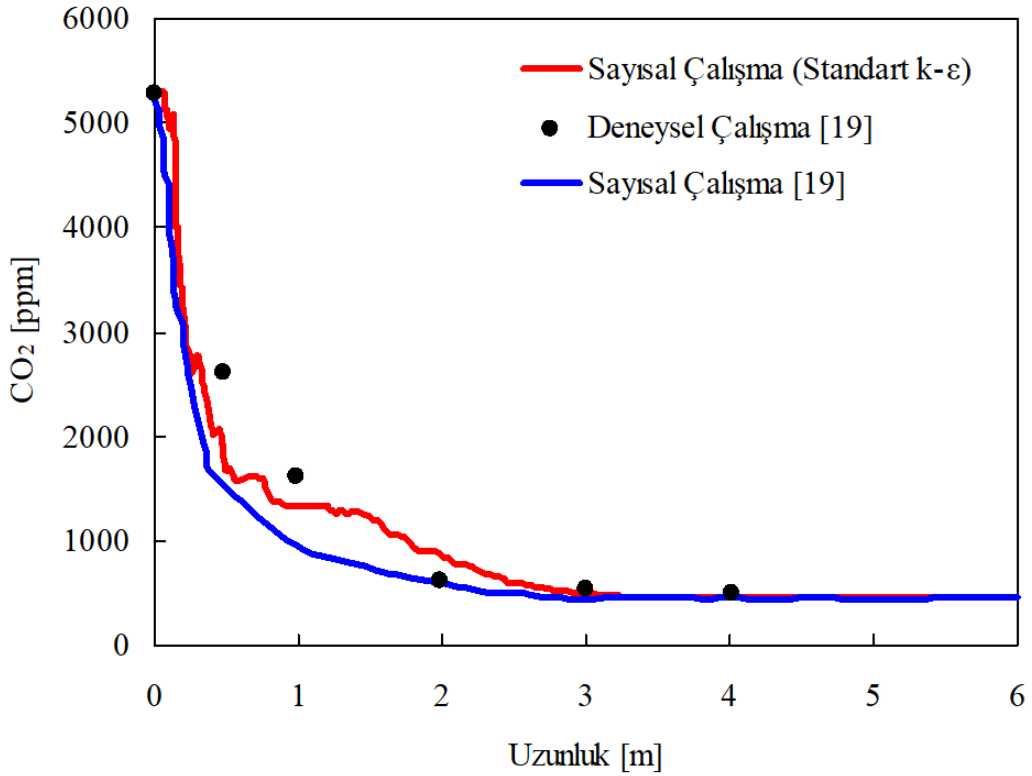
**Şekil 6.** Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması (a) Düşey doğrultu (b) Yatay doğrultu

### 3.7.2. Literatür Verileri İle Doğrulama

Şekil 7'de mevcut çalışmada sayısal çözümlerden elde edilen hız ve karbondioksit dağılımlarının literatürdeki dağılımlarla karşılaştırması verilmektedir. Hem hız dağılımının hem de karbondioksit dağılımının literatür sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum çalışma kapsamında kullanılan sayısal yaklaşımın incelenen problem açısından doğru ve yeterli olduğunu göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 7. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması (a) Hız dağılımı (b) Karbondioksit dağılımı

#### 4. Bulgular ve Tartışma

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 karbondioksit dağılımları şeklinde iki ana başlık altında sunulmuştur.

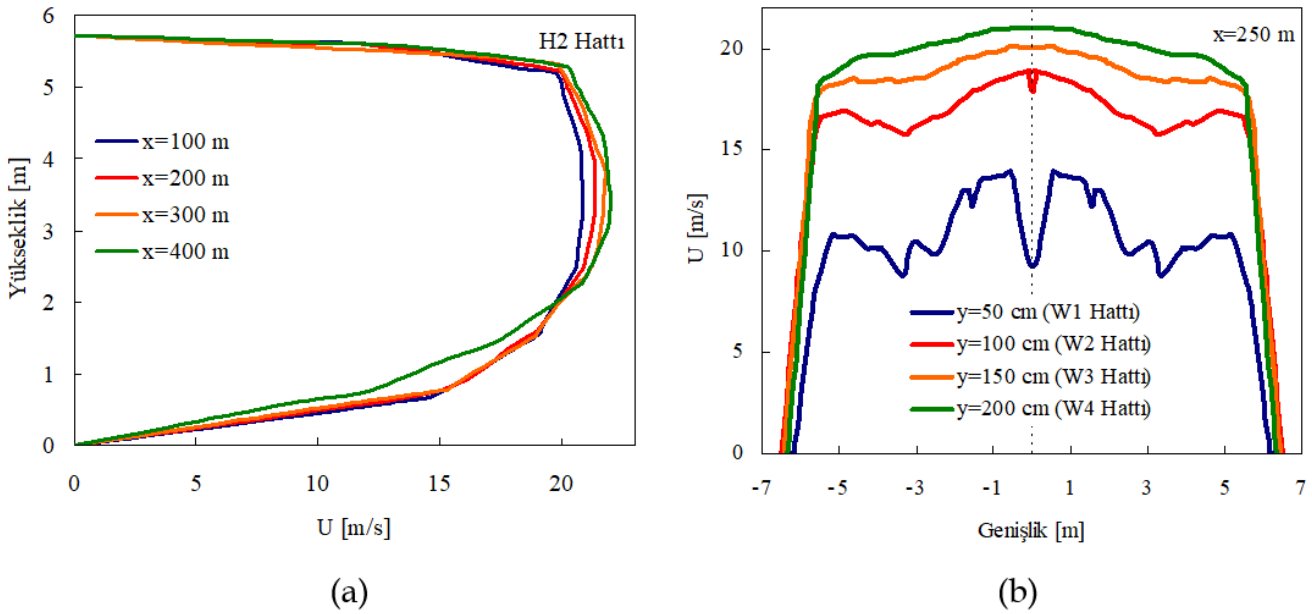
Karbondioksit dağılımları “ppm (part per million, milyonda kısım)” şeklinde ifade edilen kütleli konsantrasyon cinsinden verilmiştir.

#### 4.1. 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.

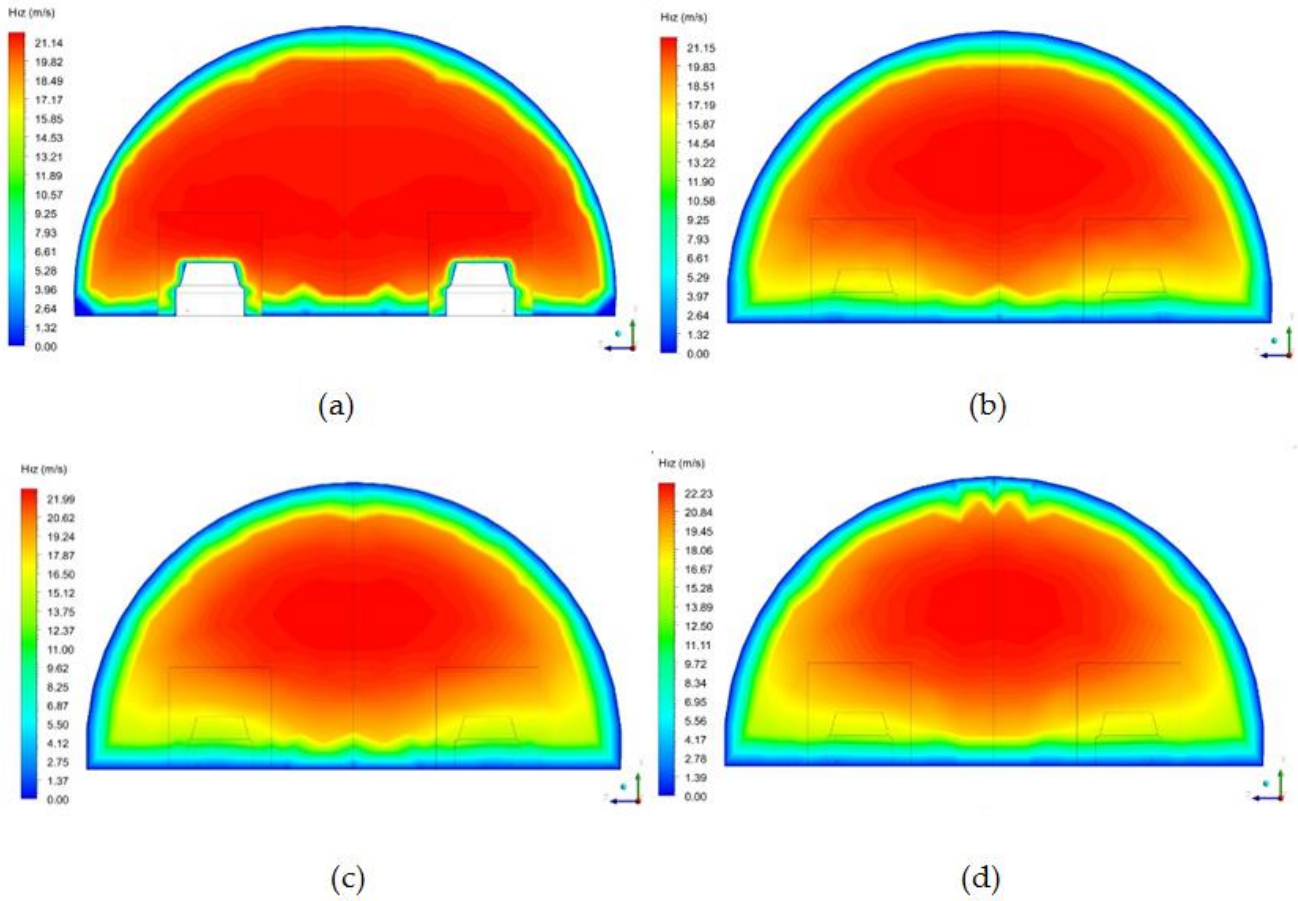
##### 4.1.1. Taşıtlı Düz Tünel

Şekil 8a’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 8b’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 8. 70 km/saat taşıt hızında tünel içerisinde hız profilleri (a) H2 hattında hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hız değerleri

Şekil 9’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 taşıtın egzozu en kesit hız dağılımlarını etkilemektedir.

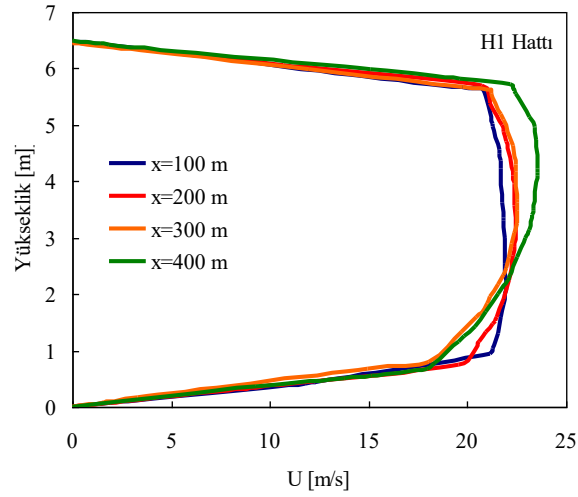


Şekil 9. 70 km/saat taşıt hızında tünel içerisinde hız dağılımları (a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

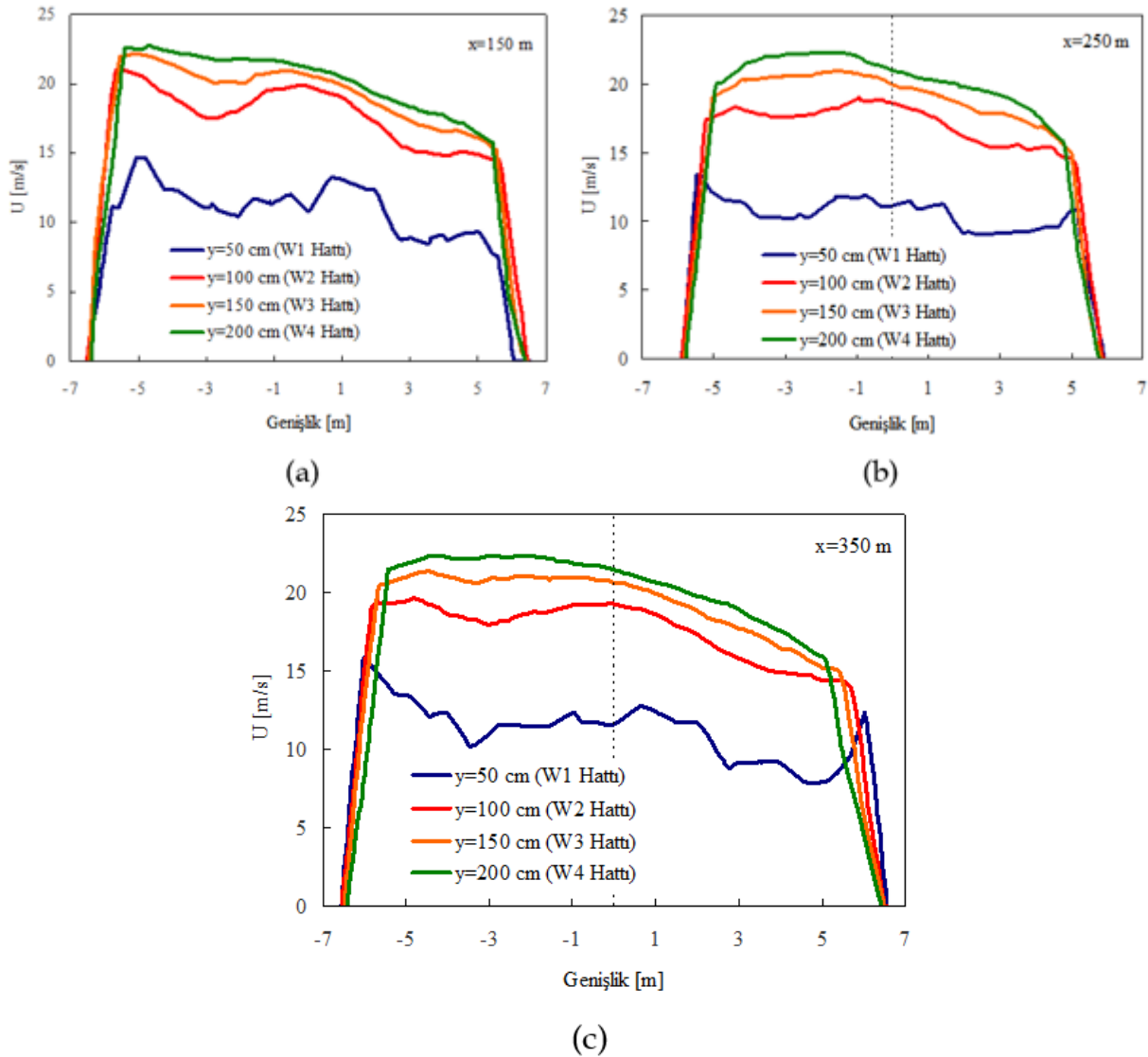
#### 4.1.2. $R=950$ m Yarıçaplı Taşıtlı Kavisli Tünel

Şekil 10'da, 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 zeminden 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, 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.

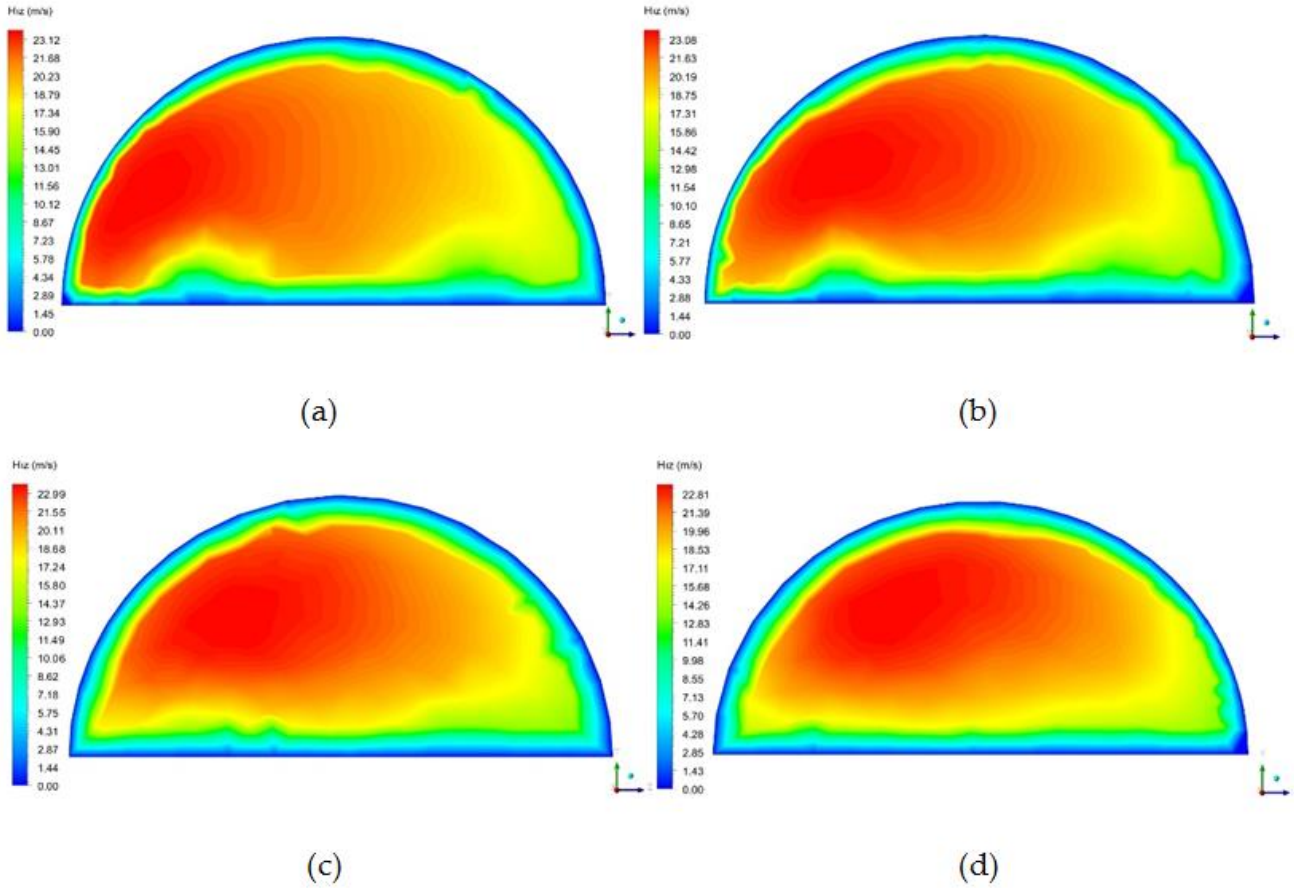
Şekil 12'de, 950 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisinde taşıt hareket hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe kavis etkisi nedeniyle en kesitlerdeki hız değerleri dış bükey tarafta daha büyük olmaktadır.



Şekil 10. R=950 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hattında tünel içerisinde hız profilleri



Şekil 11. R=950 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarında tünel içerisinde hız profilleri (a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m

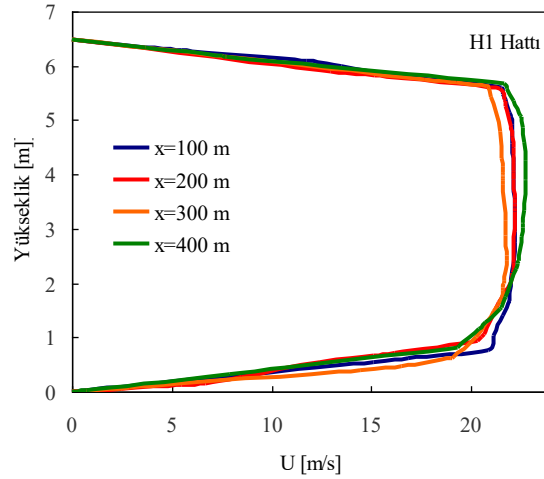


**Şekil 12.** R=950 m' de ve 70 km/saat taşıt hızında tünel içerisinde hız dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m

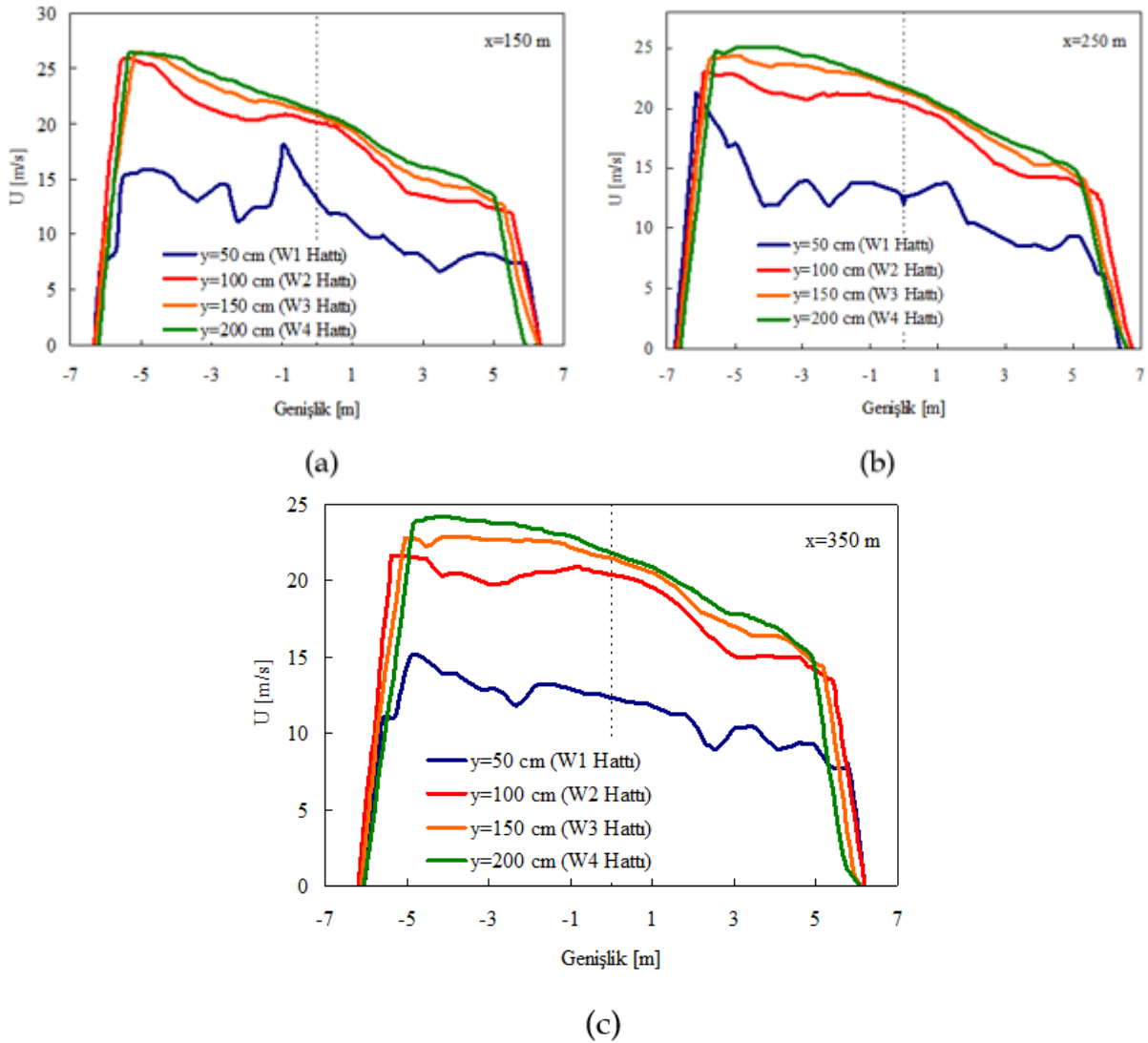
#### 4.1.3. R=1900 m Yarıçaplı Taşıtlı Kavisli Tünel

Şekil 13' de, 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 14' de, 1900 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.

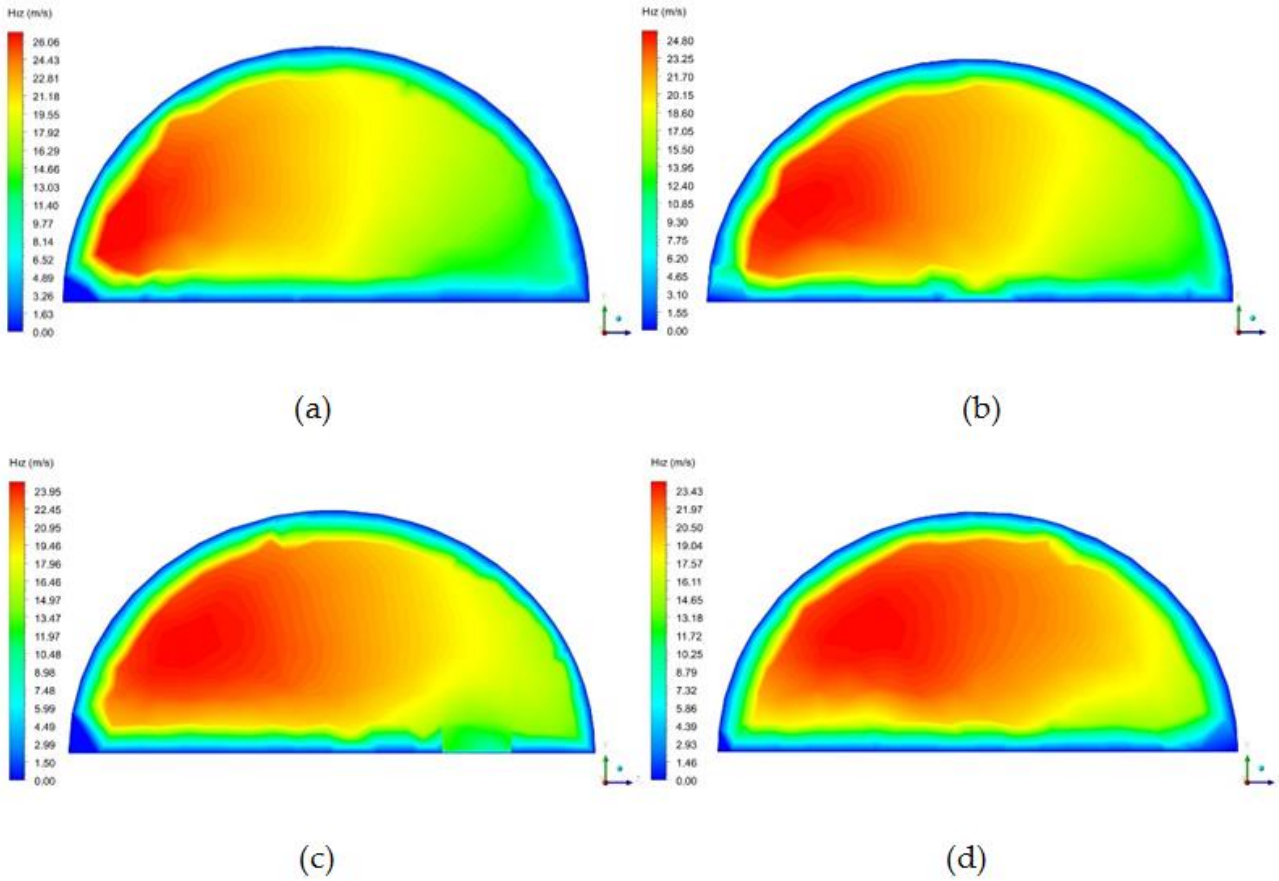
Şekil 15' de, 1900 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisinde taşıt hareket hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe kavis etkisi nedeniyle en kesitlerdeki hız değerleri dış bükey tarafta daha büyük olmaktadır.



Şekil 13. R=1900 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hattında tünel içerisinde hız profilleri



Şekil 14. R=1900 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarında tünel içerisinde hız profilleri (a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m



Şekil

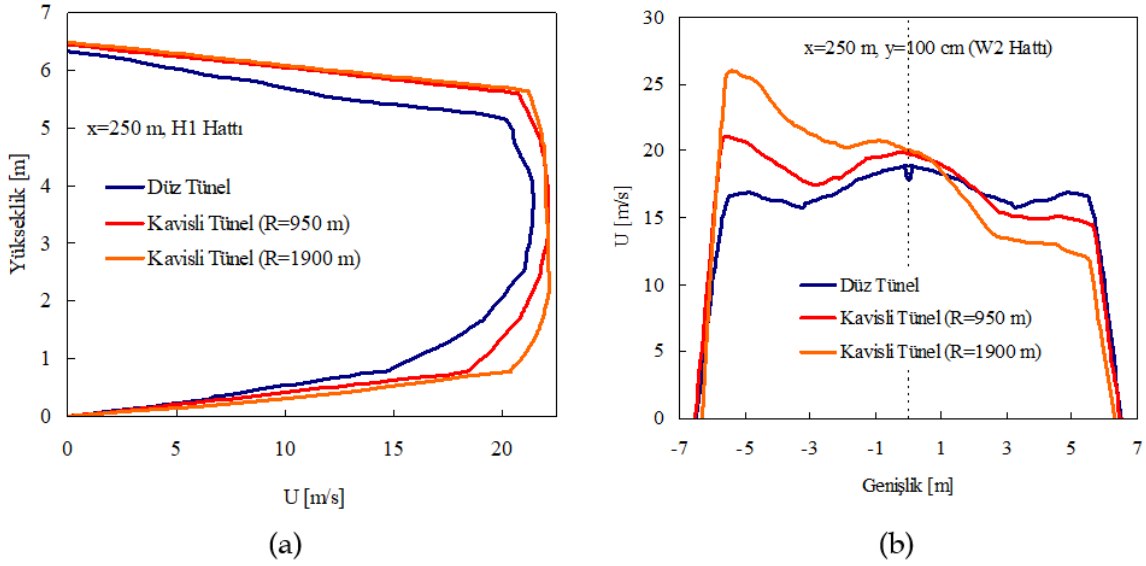
15. R=1900 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında tünel içerisinde hız dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m

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.

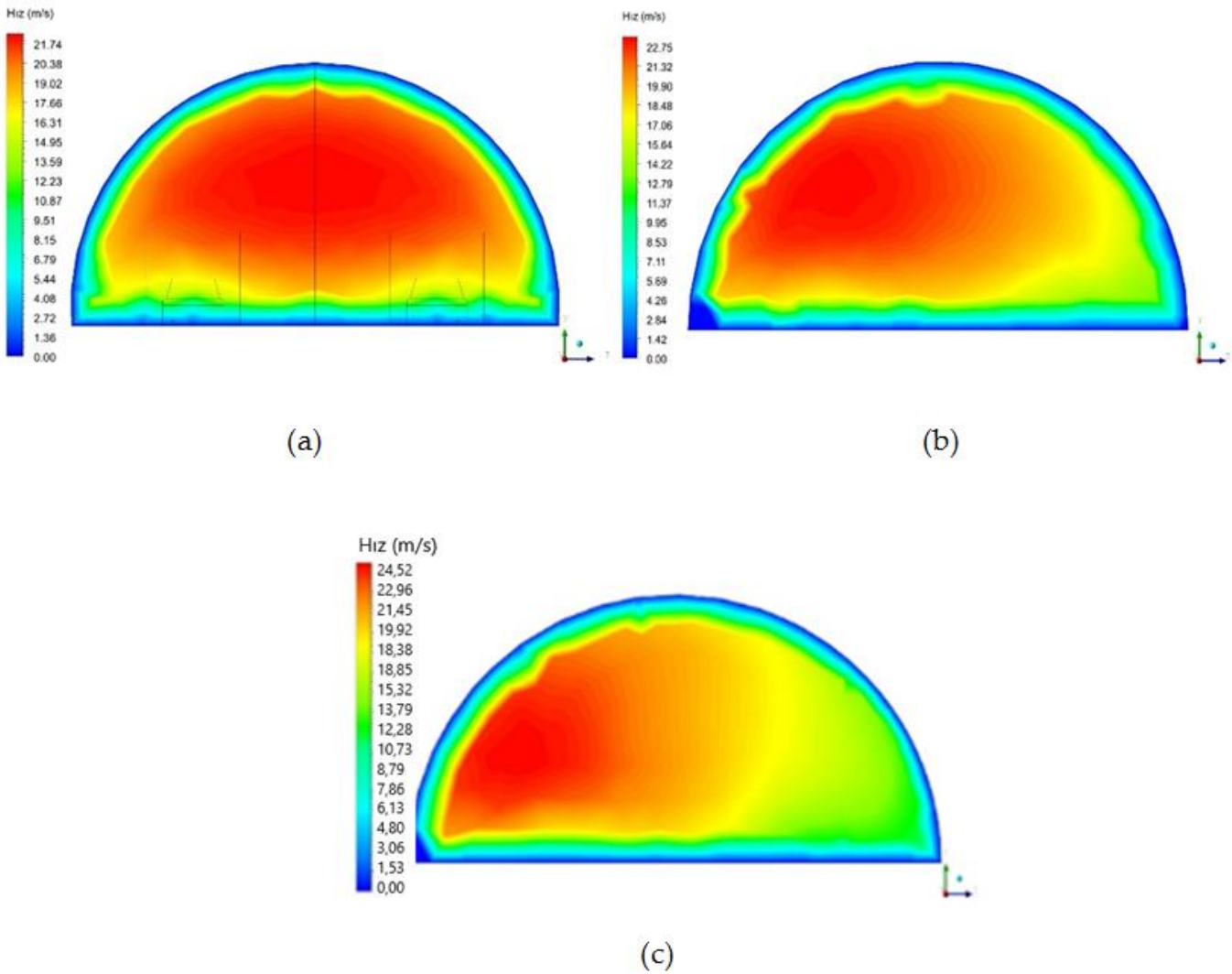
#### 4.1.4. Kavis Yarıçapının Hız Dağılımına Etkisi

Şekil 16a'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 16b'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. Üç farklı tünel geometrisine ait hız profilleri 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.

Şekil 17'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.



Şekil 16. 70 km/saat taşıt hızında düz ve kavisli tünellerde hız profilleri (a) H1 hattında hız değerleri (b) W2 hattında hız değerleri



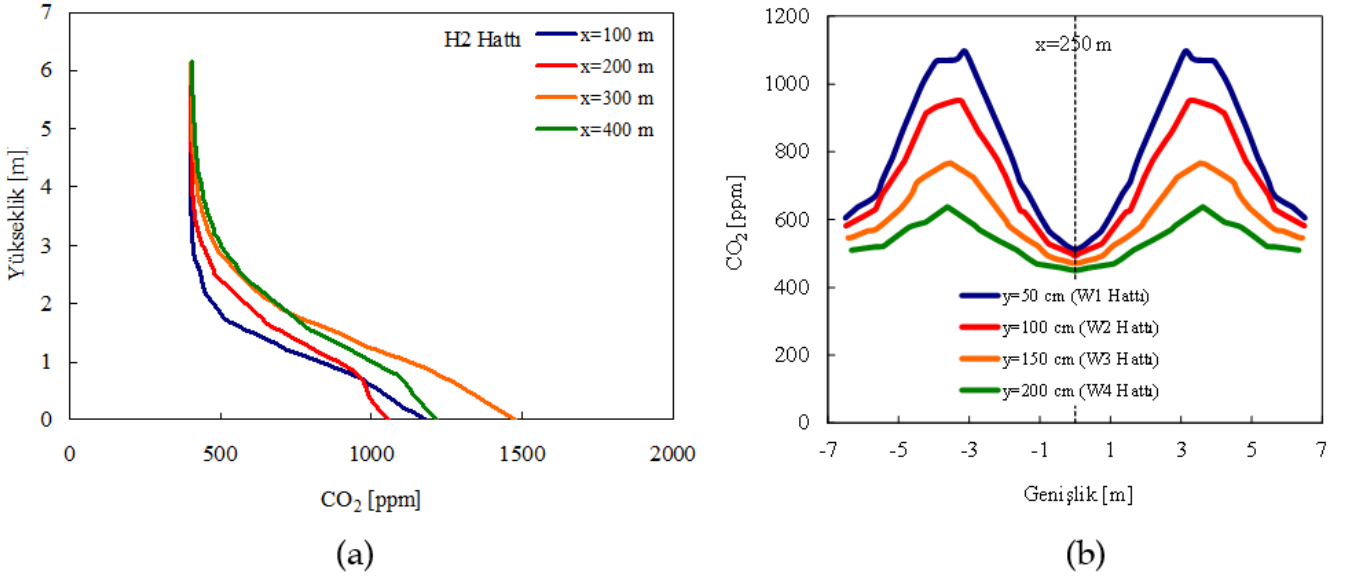
Şekil 17.  $x=250$  m' de ve 70 km/saat taşıt hızında hız dağılımları (a) Düz tünel (b) R=950 m yarıçapında kavisli tünel (c) R=1900 m yarıçapında kavisli tünel

## 4.2. Karbondioksit Dağılımları

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

### 4.2.1. Taşıtlı Düz Tünel

Şekil 18a'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 karbondioksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbondioksit 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 karbondioksit değerleri, tünel çıkışı etkisiyle  $x=400$  m'de  $x=300$  m'deki değerlerden daha düşük olmaktadır. Şekil 18b'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 karbondioksit değerleri verilmiştir. W1 hattında en yüksek, W4 hattında en düşük olacak şekilde taşıt arkasına karşılık gelen dört konumda da karbondioksit değerleri artmaktadır.



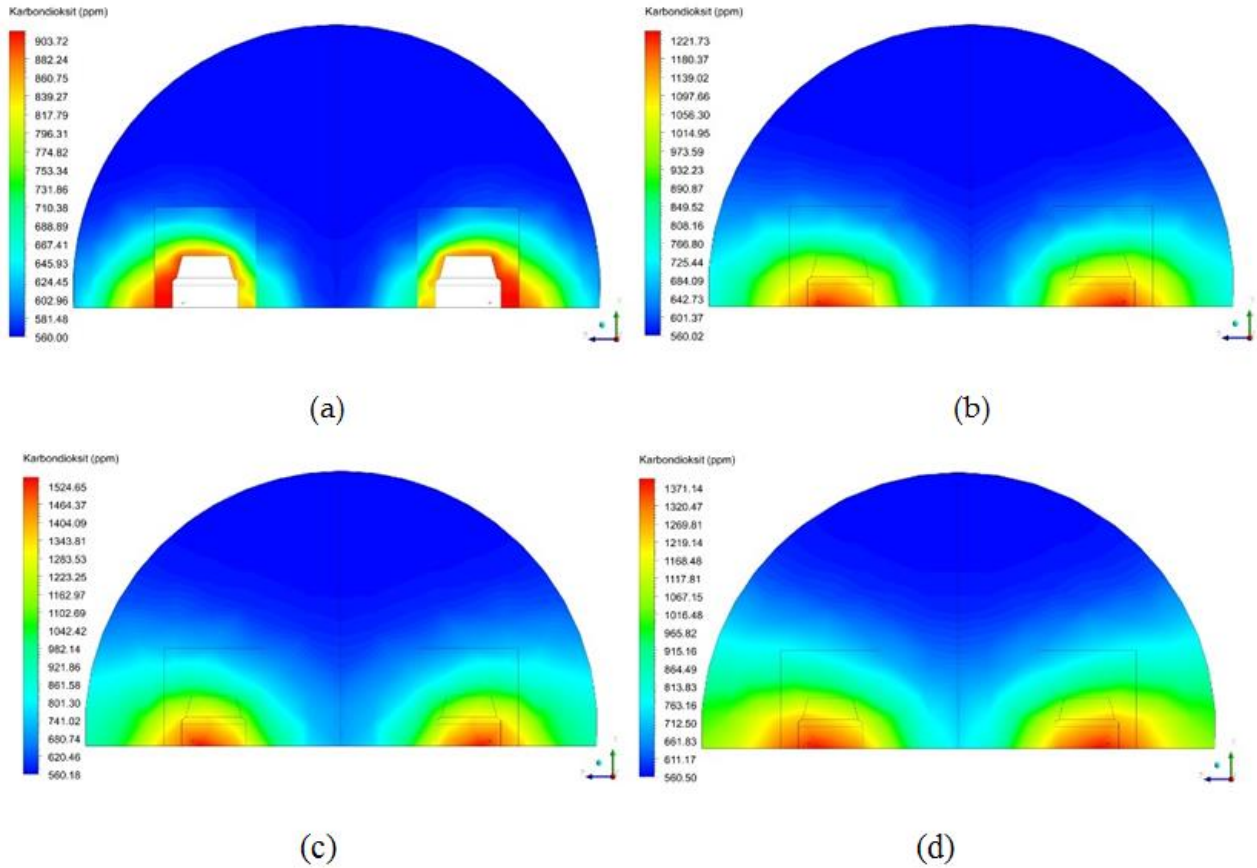
Şekil 18. 70 km/saat taşıt hızında karbondioksit profilleri (a) H2 hattında karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarında karbondioksit değerleri

Şekil 19'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 karbondioksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbondioksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı görülmektedir. Taşıtların egzoz bölgelerinde en kritik değerlere ulaşan karbondioksit düzeyleri tünel içerisinde ilerledikçe artmakta,  $x=400$  m'de tünel çıkışı etkisiyle  $x=300$  m'deki değerlerden daha düşük olmaktadır.

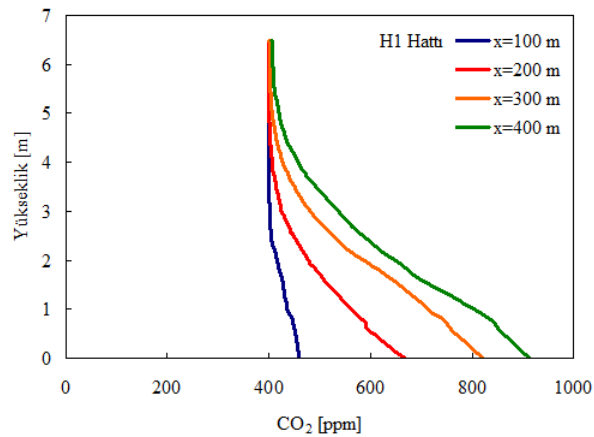
### 4.2.2. $R=950$ m Yarıçaplı Taşıtlı Kavisli Tünel

Şekil 20'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 karbondioksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbondioksit değerleri,  $y=4$  m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı

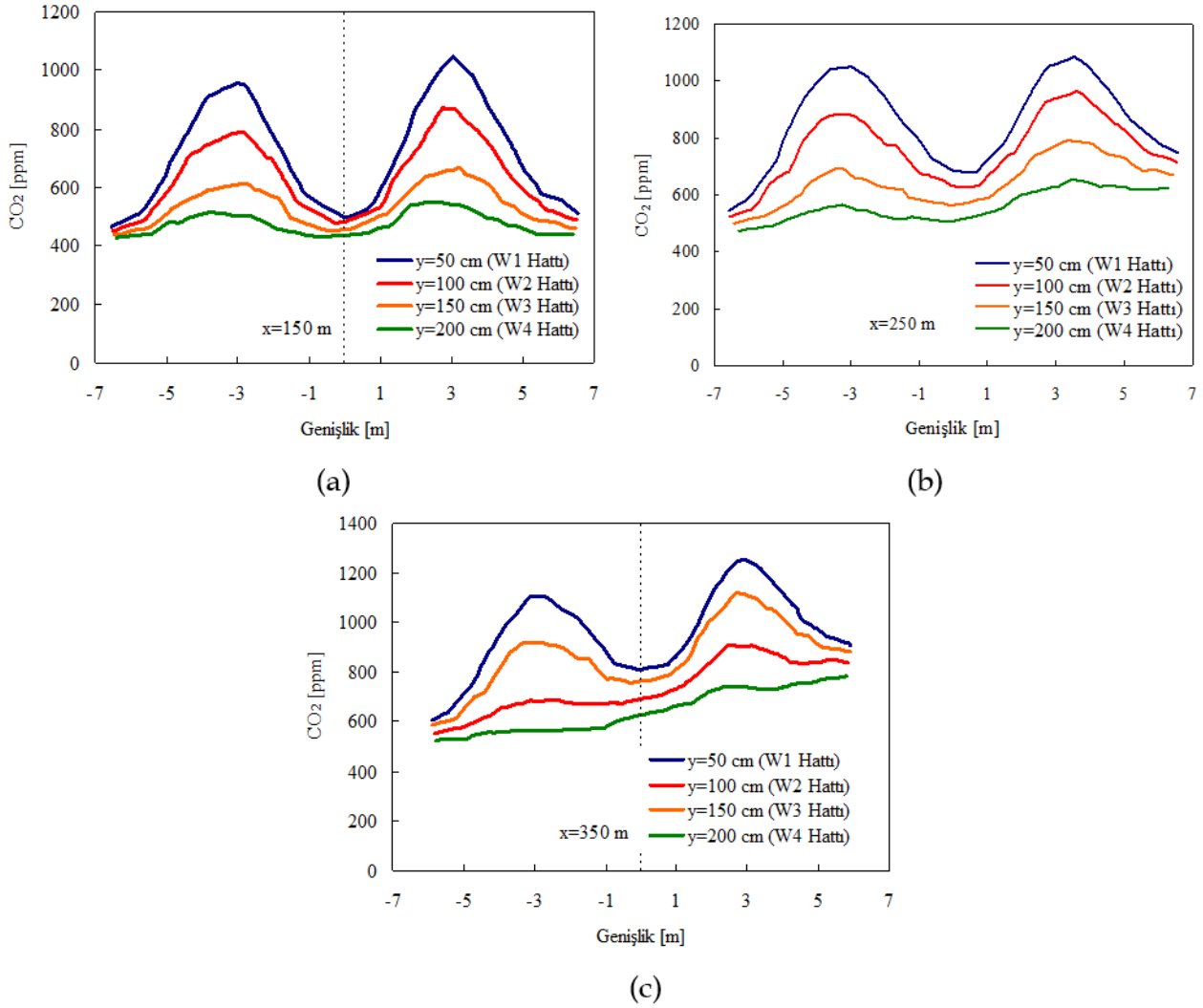
değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Tünel boyunca ilerledikçe karbondioksit değerleri artmaktadır. Şekil 21’de, iki şeritli 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde  $x=150$  m, 250 m ve 350 m istasyonlarında enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde sırasıyla W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri verilmiştir.  $x=150$  m’de, taşıtların arkasına karşılık gelen dört konumda da karbondioksit 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 karbondioksit değerlerindeki artış daha belirgin olmaktadır (Şekil 21b, c).



Şekil 19. 70 km/saat taşıt hızında karbondioksit dağılımları (a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m



Şekil 20. R=950 m’de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hattında karbondioksit profilleri

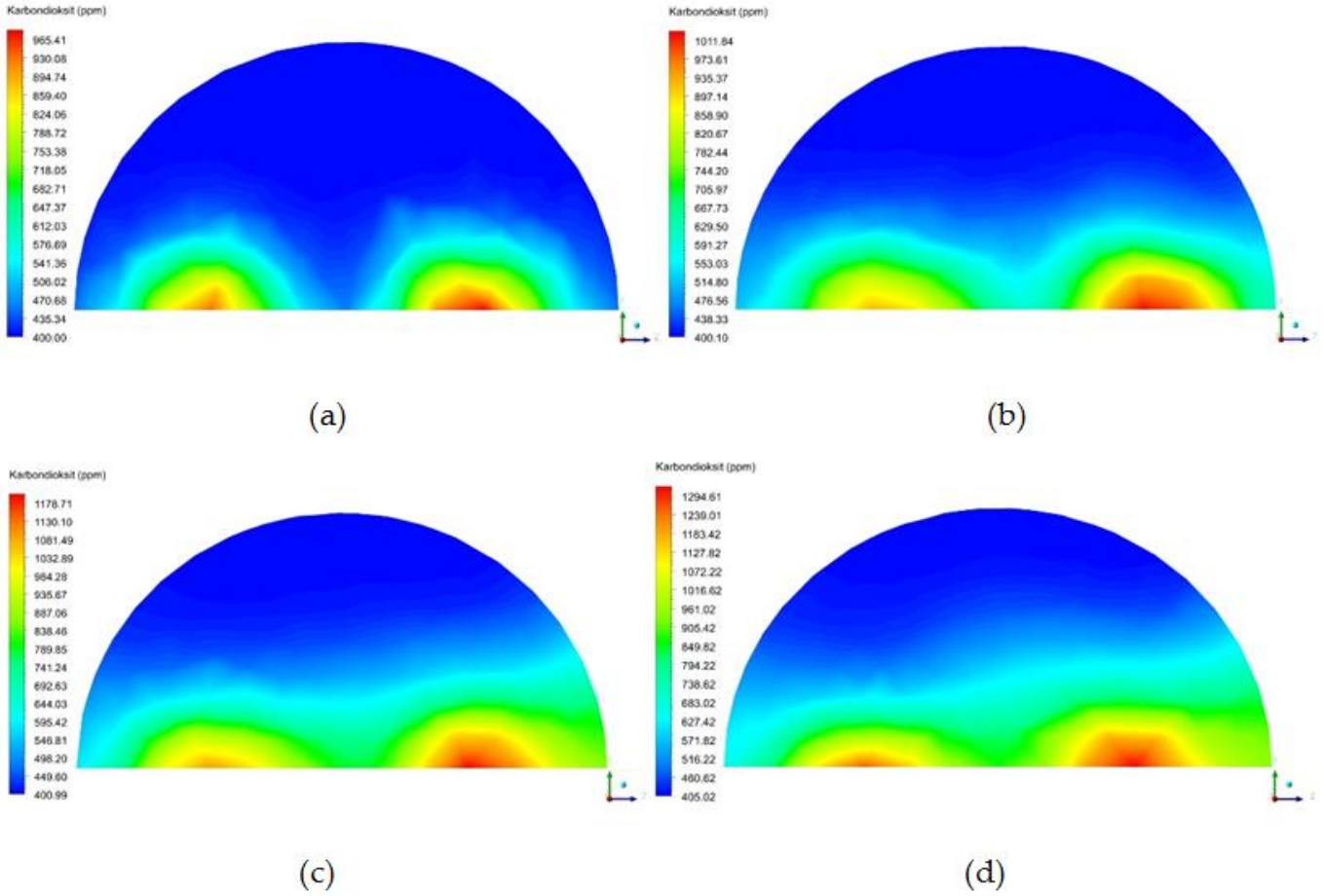


**Şekil 21.** R=950 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarında karbondioksit profilleri (a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m

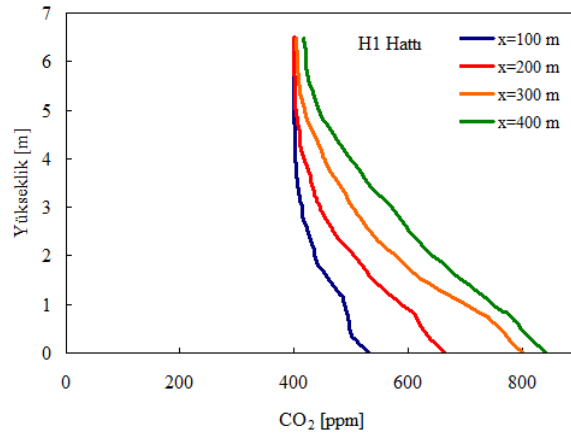
Şekil 22'de iki şeritli 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla x=100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbondioksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı ancak, bu yayılmanın kavis etkisiyle iç bükey tarafta daha etkili olduğu görülmektedir.

#### 4.2.3. R=1900 m Yarıçaplı Taşıtlı Kavisli Tünel

Şekil 23'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 karbondioksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbondioksit değerleri, y=4 m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Tünel boyunca ilerledikçe karbondioksit değerleri artmaktadır. Şekil 24'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 karbondioksit değerleri verilmiştir. x=150 m'de, taşıtların arkasına karşılık gelen dört konumda da karbondioksit değerleri W1 hattında en yüksek, W4 hattında en düşük olacak şekilde artmakta, ancak kavis etkisiyle bu artış iç bükey tarafta daha fazla olmaktadır (Şekil 24a). Tünel boyunca ilerledikçe kavis etkisiyle iç bükey taraftaki karbondioksit değerlerindeki artış daha belirgin olmaktadır (Şekil 24b, c).

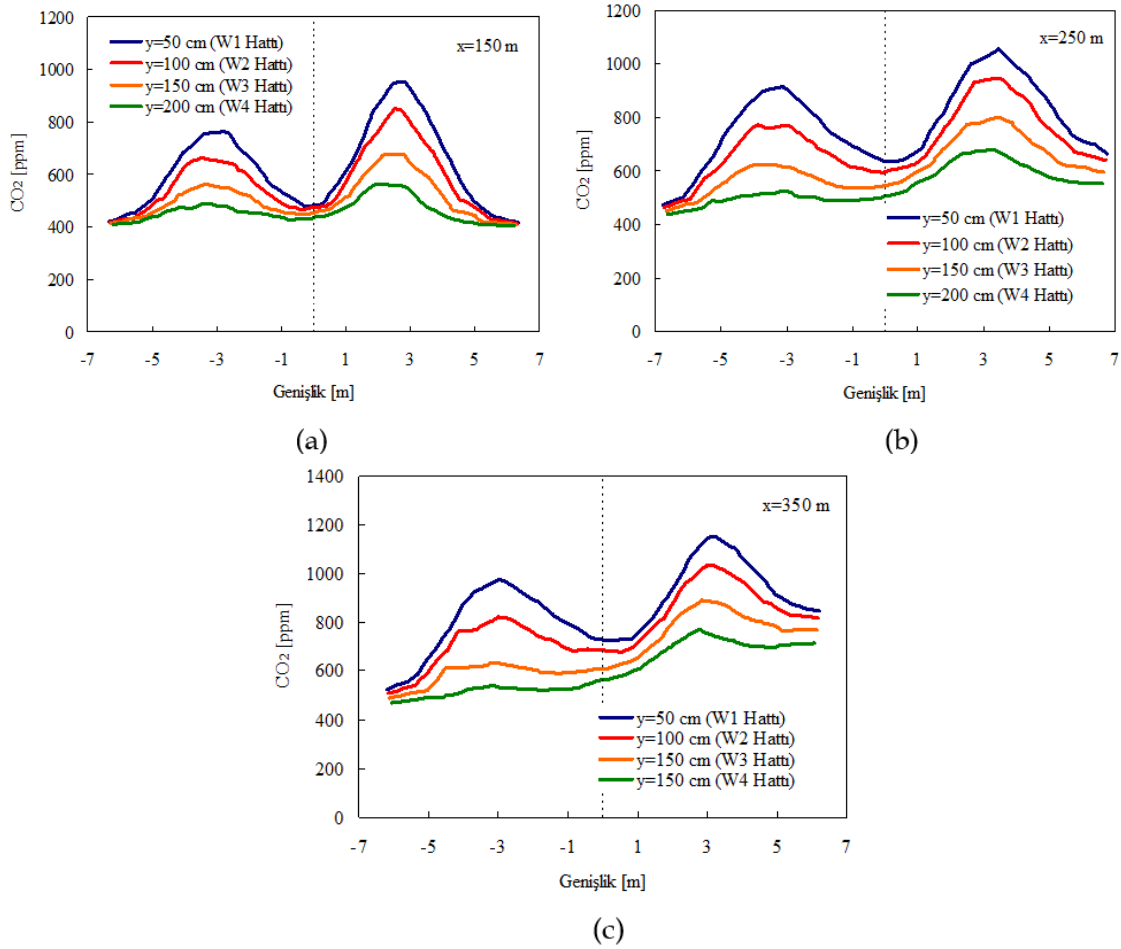


Şekil 22. 950 m yarıçapa sahip kavisli tünelde 70 km/saat taşıt hızında karbondioksit dağılımları (a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

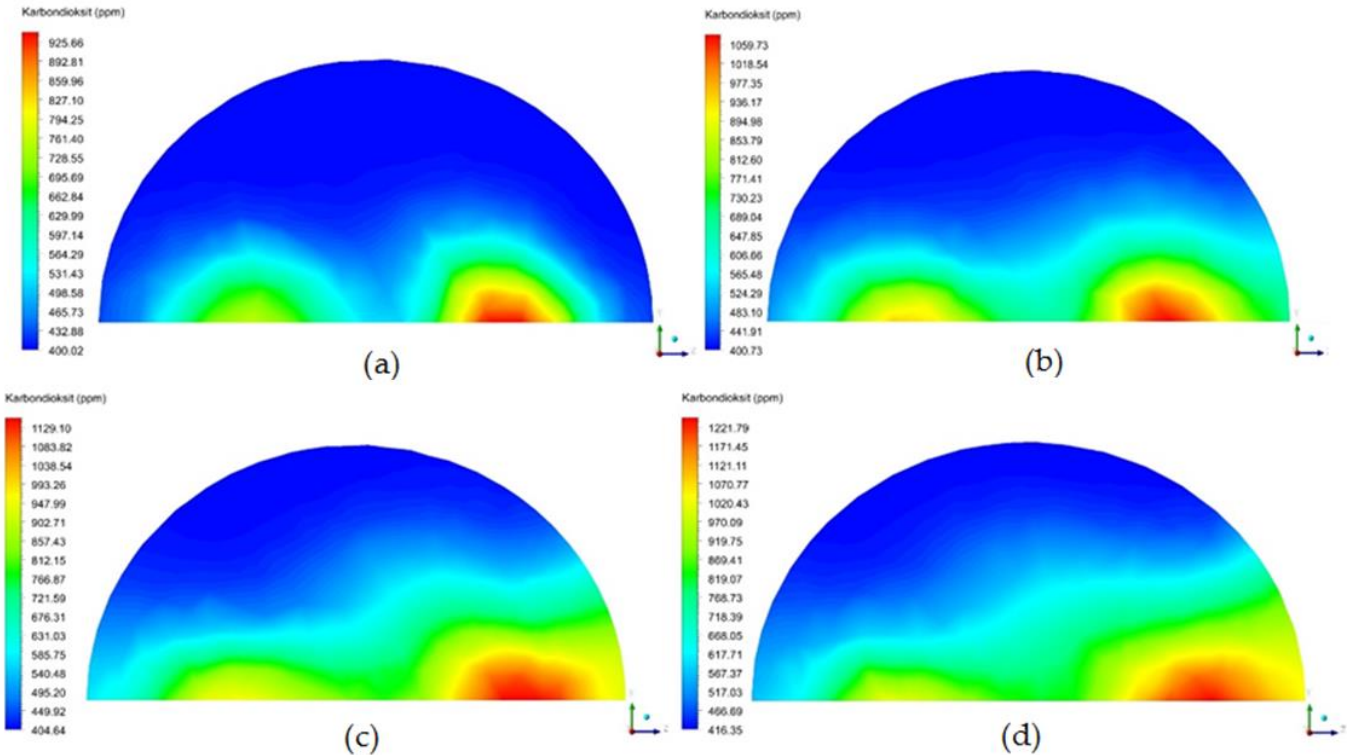


Şekil 23.  $R=1900$  m' de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hattında karbondioksit profilleri

Şekil 25' 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 karbondioksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbondioksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı ancak, bu yayılmanın kavis etkisiyle iç bükey tarafta daha etkili olduğu görülmektedir.



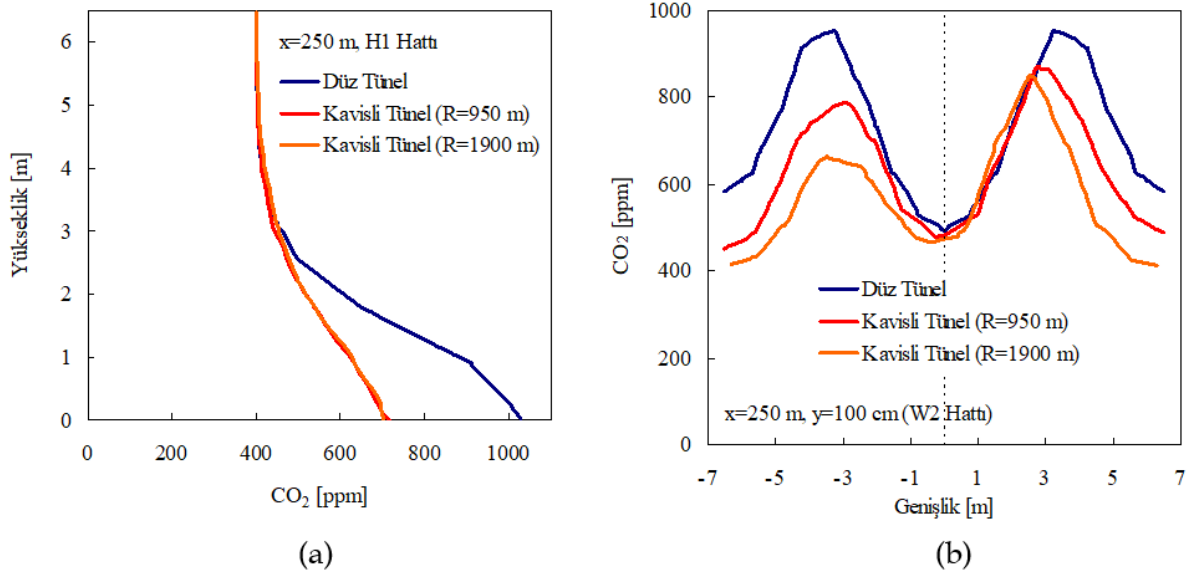
Şekil 24.  $R=1900$  m' de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarında karbondioksit profilleri (a)  $x=150$  m (b)  $x=250$  m (c)  $x=350$  m



Şekil 25. 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünelde 70 km/saat taşıt hızında karbondioksit dağılımları (a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

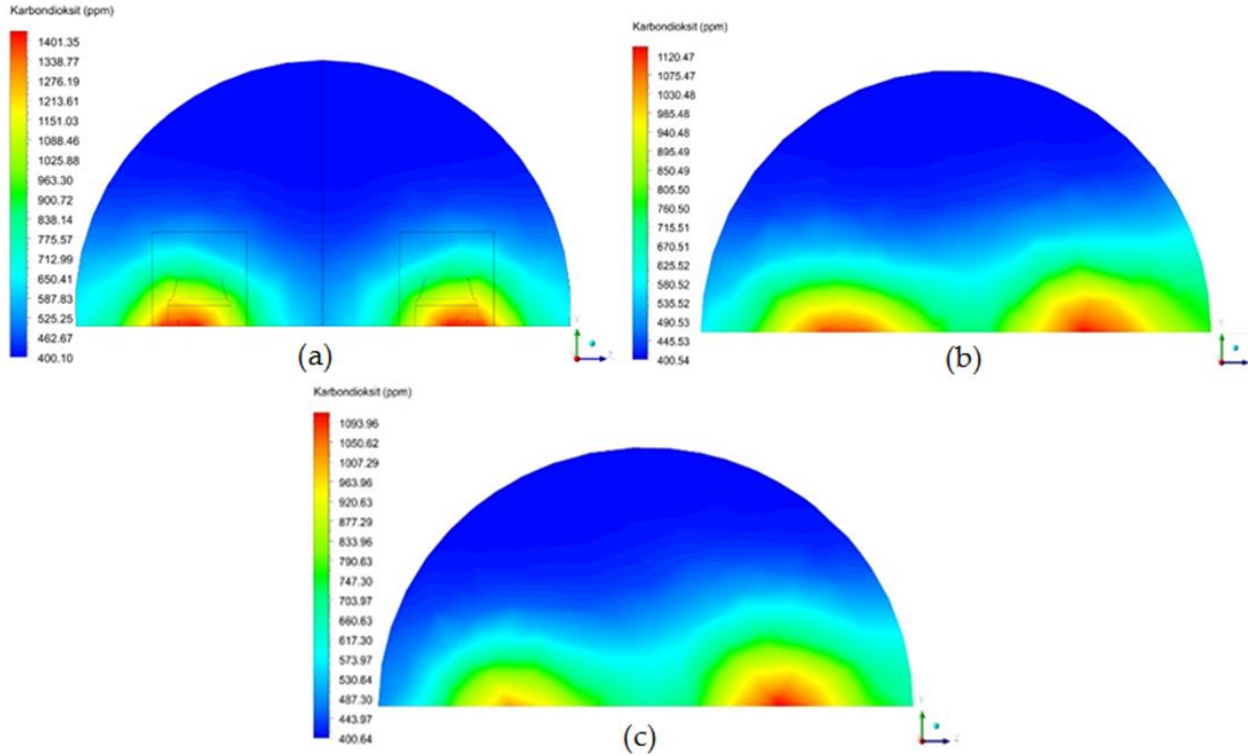
#### 4.2.4. Kavis Yarıçapının Karbondioksit Dağılımına Etkisi

Şekil 26a'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 karbondioksit değerleri görülmektedir. Düz tünelde, tünel tabanında 1050 ppm şeklinde en yüksek düzeyine ulaşan karbondioksit 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 karbondioksit değerleri tünel tabanında 700 ppm düzeyine inmektedir. Şekil 26b'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 karbondioksit değerleri görülmektedir. Her üç tünel geometrisinde de taşıtların arkasına karşılık gelen bölgelerde karbondioksit değerleri yüksek olmaktadır. Düz tünelde 950 ppm olan bu maksimum değer kavis etkisiyle azalmakta ve  $R=1900$  m yarıçaplı kavis durumunda tünel kesitinin sol kısmında 660 ppm, sağ kısmında ise 850 ppm olmaktadır.



**Şekil 26.** 70 km/saat taşıt hızlarında düz ve kavisli tünellerde karbondioksit profilleri (a) H1 hattında karbondioksit değerleri (b) W2 hattında karbondioksit değerleri

Şekil 27'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 karbondioksit dağılımları görülmektedir. Düz tünelde, karbondioksit etkisi taşıtların etrafında daha fazla olacak şekilde simetrik bir görüntüde iken, kavisli tünellerde bu simetrik etki bozularak iç bükey bölgelerde daha belirgin olmaktadır.



Şekil 27.  $x=250$  m’de 70 km/saat taşıt hızında karbondioksit dağılımları (a) Düz tünel (b)  $R=950$  m yarıçapında kavisli tünel (c)  $R=1900$  m yarıçapında kavisli tünel

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, karayolları tünellerindeki taşıtların egzozlarından yayılan kirletici gazlardan karbondioksitin tünel içerisindeki dağılımları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla, ilk önce Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan Akyazı Tüneli’nde karbondioksit ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise, 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 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 düz tünelde, en yüksek karbondioksit değeri  $x=300$  m’de zemine yakın seviyede 1524 ppm olarak hesaplanmıştır.
- 4) Taşıtlı kavisli tünellerde, kavis etkisiyle yatay ve düşey doğrultudaki karbondioksit değerleri azalmaktadır.
- 5) Taşıtlı kavisli tünellerde, karbondioksit dağılımları tünellerin iç bükey tarafında yoğun olmaktadır.
- 6) Taşıtlı kavisli tünellerde, en yüksek karbondioksit değerleri  $x=400$  m’de zemine yakın iç bükey taraflarda sırasıyla 950 m yarı çapa sahip kavisli tünel durumunda 1294 ppm ve 1900 m yarı çapa sahip kavisli tünel durumunda 1221 ppm olarak hesaplanmıştır.
- 7) Kavisli tünellerde en yüksek karbondioksit değerleri düz tünelde göre yaklaşık % 20 oranında azalmaktadır.

Farklı taşıt tipleri için yeni çalışmalar gerçekleştirilerek, taşıt tipinin karayolu tünellerindeki kirletici dağılımına etkisi ileri turbülans modelleri ile sayısal olarak incelenebilir. Böylece, uygulamaya yönelik daha ayrıntılı sonuçlara ulaşılabilir.

## Katkı Beyanı

Literatür Taraması, veri Toplama ve verilerin analizi, analizlerin doğrulanması, bulguların yorumlanması:  
Tüm yazarlar

## Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

## Kaynaklar

- [1] De Fré R, Bruynseraede P, Kretzschmar JG. Air pollution measurements in traffic tunnels. *Environmental Health Perspectives* 1994; 102(4), 31-37.
- [2] Luther MB, Horan P, Tokede O. Investigating CO<sub>2</sub> concentration and occupancy in school classrooms at different stages in their life cycle. *Architectural Science Review* 2018; 61(1-2), 83-95.
- [3] Wei C, Wang M. Spatial distribution of greenhouse gases (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) on expressways in the megacity Shanghai, China. *Environmental Science and Pollution Research* 2020; 27, 31143-31152.
- [4] Ren J, He J, Kong X, Xu W, Kang Y, Yu Z, Li H. A field study of CO<sub>2</sub> and particulate matter characteristics during the transition season in the subway system in Tianjin, China. *Energy and Buildings* 2022; 254, 111620.
- [5] Yang H, Wang H, Wu Y. Analysis of dynamic characteristics of CO<sub>2</sub> concentration in subway cars. In *E3S Web of Conferences EDP Science* 2022; 56, 02019.
- [6] Tao Y, Dong J, Pan X, Xiao Y, Tu J. investigation of the channelling effect on pollutants dispersion between adjacent roadway tunnels. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2017; 14, 2733-2744.
- [7] Sun H, Owen JS, Almazmumi S, Liu C, Mohammadi M, Dik A, Calautit JK. Pollutant cross-transmission in courtyard buildings: wind tunnel experiments and computational fluid dynamics (cfd) evaluation. *Building and Environment* 2024; 264, 111919.
- [8] Kim DH, Gautam M, Gera D. On the prediction of concentration variations in a dispersing heavy-duty truck exhaust plume using k-ε turbulent closure. *Atmospheric Environment* 2001; 35(31), 5267-5275.
- [9] Papakonstantinou, KA, Kiranoudis CT, Markatos NC. Numerical simulation of CO<sub>2</sub> dispersion in an auditorium. *Energy and Buildings* 2002; 34(3), 245-250.
- [10] Bari S, Naser J. Simulation of airflow and pollution levels caused by severe traffic jam in a road tunnel. *Tunnelling And Underground Space Technology* 2010; 25(1), 70-77.
- [11] Van Hooff T, Blocken B. CFD evaluation of natural ventilation of indoor environments by the concentration decay method: CO<sub>2</sub> gas dispersion from a semi-enclosed stadium. *Building and Environment* 2013; 61, 1-17.
- [12] Ning M, Mengjie S, Mingyin C, Dongmei P, Shiming D. computational fluid dynamics (cfd) modelling of air flow field, mean age of air and CO<sub>2</sub> distributions inside a bedroom with different heights of conditioned air supply outlet. *Applied Energy* 2016; 164, 906-915.
- [13] Dong J, Tao Y, Xiao Y, Tu J. Numerical simulation of pollutant dispersion in urban roadway tunnels. *The Journal of Computational Multiphase Flows* 2017; 9(1), 26-31.
- [14] Tan C, Liu Y, Wang T. CFD analysis of gas diffusion and ventilation protection in municipal pipe tunnel. In *Proceedings of The 2017 International Conference On Data Mining, Communications and Information Technology* 2017; 1-6.
- [15] Babadi KA, Khorasanizadeh H, Aghaei A. CFD modeling of air flow, humidity, CO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> distributions in a caged laying hen house with tunnel ventilation system. *Computers and Electronics in Agriculture* 2022; 193, 106677.
- [16] Canitz G, Ciesta C, Green K, Sanders J, Valencia J, Willingham J, Fonseca D. Capturing CO<sub>2</sub> emissions in the George C. Wallace tunnel: a case study. *Intelligent Control and Automation* 2024; 15(3), 83-94.
- [17] Launder BE, Spalding DB. The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1974; 3, 269-289.
- [18] Król A, Król M, Koper P, Wrona P. Numerical modeling of air velocity distribution in a road tunnel with a longitudinal ventilation system. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2019; 91, 103003.
- [19] He HD, Shi W, Lu WZ. Investigation of exhaust gas dispersion in the near-wake region of a light-duty vehicle. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 2017; 31, 775-783