



Araştırma Makalesi – Research Article

Geliş Tarihi / Received: 12/12/2025

Kabul Tarihi / Accepted: 19/01/2026

Yayın Tarihi / Published: 31/05/2026

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

Investigation of the Effect of Curve Geometry on Carbon Dioxide Distributions Emitted from Vehicle Exhausts in Single-Fan Road Tunnels

Kerim Sönmez^{1*}, Yücel Özmen²

^{1*}Karadeniz Teknik Üniversitesi, Teknoloji Transferi Uygulama ve Araştırma Merkezi, Trabzon, Türkiye, kerimsonmez@ktu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-5110-3849>

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği, Trabzon, Türkiye, yozen@ktu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-1127-1060>

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

Etik Beyan: Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

Yapay Zeka Etik Beyanı: Yazarlar bu makalenin hazırlanma sürecinin hiç bir aşamasında yapay zekadan faydalanılmadığını; bu konuda tüm sorumluluğun kendilerine ait olduğunu beyan etmektedir.

Çıkar Çatışması: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Finansman: Bu araştırmayı desteklemek için dış fon kullanılmamıştır.

Lisans: CC BY-NC 4.0

Acknowledgements: This article is derived from the doctoral thesis titled “Investigation of CO and CO₂ Distribution from Vehicle Exhaust in Highway Tunnels.”

Ethical Statement: It is declared that scientific and ethical principles were followed during the preparation of this study and that all studies used are stated in the bibliography.

Artificial Intelligence Ethical Statement: The author declares that artificial intelligence was not utilized at any stage of the preparation process of this article and accepts full responsibility in this regard.

Conflicts of Interest: The author(s) has no conflict of interest to declare.

Grant Support: The author(s) acknowledge that they received no external funding to support this research.

License: CC BY-NC 4.0

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

ÖZ

Bu çalışmada, karayolları tünellerinde taşıtların egzozlarından yayılan kirletici 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, karayolları tünellerinde biriken karbondioksitin fan etkisiyle dağılımları sayısal olarak incelenmiştir. Tünel içerisinde taşıtların olmadığı ve tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konuma yerleştirilmiş tek fan durumu için, 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. Tünel içerisindeki karbondioksit düzeylerinin çalışan fan etkisiyle zamana göre değişimlerinin incelendiği çalışmada, başlangıçtaki karbondioksit seviyesi 25000 ppm olarak dikkate alınmıştır. Zaman adımı 1 dakika seçilerek 60 dakikalık çözümler gerçekleştirilmiştir. Ağdan bağımsız çözümler, düz tünelde 8,5 milyon ve kavisli tünellerde 16 milyon ağ yoğunluğu değerlerinde sağlanmıştır. Fan itme kuvvetinin 950 N olduğu çalışmada, fan çalışma süresinin sonunda tünel içerisindeki hız ve karbondioksit değerleri grafiklere yansıtılmıştır. Kavis etkisi nedeniyle, karbondioksit değerleri tünel kesitinin dış bükey tarafındaki sol bölgesinde düşük, iç bükey tarafındaki sağ bölgesinde büyük olmaktadır. Tünel hacmi içerisinde karbondioksit seviyelerindeki azalmada kavis yarıçapındaki değişim etkili olmamakta, hem düz tünelde hem de kavisli tünellerde 60 dakika sonunda karbondioksit seviyeleri yaklaşık 5000 ppm düzeyine düşmektedir. Sayısal çalışmada kullanılan Standart k-ε modeli ile elde edilen sonuçlar deneysel verilerle iyi bir uyum göstermektedir.

Anahtar Kelimeler - Fan itme kuvveti, Karbondioksit dağılımı, Düz tünel, Kavisli tünel, Standart k-ε türbülans modeli

Öne Çıkanlar

- Kavisli tünellerdeki hız değerleri tünel kesitinin iç bükey tarafında daha yüksek, dış bükey tarafında ise daha düşük olmaktadır.
- Kavisli tünellerdeki karbondioksit değerleri tünel kesitinin dış bükey tarafında düşük, iç bükey tarafında yüksek olmaktadır.
- Tünel hacmi içerisinde karbondioksit seviyelerindeki azalmada kavis yarıçapındaki değişim belirgin bir etki oluşturmamaktadır.
- Hem düz tünelde hem de kavisli tünellerde başlangıçta 25000 ppm düzeyinde olan karbondioksit seviyeleri 60 dakika sonunda yaklaşık 5000 ppm düzeyine düşmektedir.

Investigation of the Effect of Curve Geometry on Carbon Dioxide Distributions Emitted from Vehicle Exhausts in Single-Fan Road Tunnels

ABSTRACT

In this study, the distributions of carbon dioxide, one of the pollutant gases emitted from vehicle exhausts in road tunnels, were investigated experimentally and numerically. Initially, carbon dioxide measurements were conducted in the Akyazı Tunnel located in the Ortahisar district of Trabzon province. Subsequently, the fan-induced distributions of carbon dioxide accumulated in road tunnels were numerically investigated. For the case of a single fan positioned near the tunnel ceiling 100 m ahead of the tunnel entrance, with no vehicles present in

the tunnel, the three-dimensional flow fields within two-lane tunnels, one consisting of a 500 m long straight tunnel 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 $k-\epsilon$ turbulence model. In the study, which examined the time-dependent changes in carbon dioxide levels inside the tunnel under the effect of the operating fan, the initial carbon dioxide level was considered to be 25000 ppm. Solutions were performed for 60 minutes with a time step of 1 minute. Grid independence was achieved at mesh densities of 8.5 million for the straight tunnel and 16 million for the curved tunnels. In the study, where the fan thrust force was 950 N, the velocity and carbon dioxide values inside the tunnel at the end of the fan operating time were reflected in the graphs. Due to the curvature effect, carbon dioxide values are low in the left region on the convex side of the tunnel cross-section and high in the right region on the concave side. Changes in the radius of curvature do not affect the decrease in carbon dioxide levels within the tunnel volume; in both straight and curved tunnels, carbon dioxide levels drop to approximately 5000 ppm after 60 minutes. The results obtained using the Standard $k-\epsilon$ model in numerical study showed good agreement with the experimental data.

Keywords - Fan thrust force, Carbon dioxide distribution, Straight tunnel, Curved tunnel, Standard $k-\epsilon$ turbulence model

Highlights

- Velocity values in curved tunnels are higher on the concave side of the tunnel cross-section and lower on the convex side.
- Carbon dioxide levels in curved tunnels are lower on the convex side of the tunnel cross-section and higher on the concave side.
- Changes in the radius of curvature do not have a significant effect on the reduction of carbon dioxide levels within the tunnel volume.
- In both straight and curved tunnels, carbon dioxide levels-which are initially at 25000 ppm drop to approximately 5000 ppm after 60 minutes.

I. GİRİŞ

Karayolu ve tünellerinde taşıtların egzozlarından 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 içerisinde eksenel fan kullanılarak hava kalitesini sağlamaktır. Karbondioksit solunan zehirli gaz olarak bilinmektedir. Bu zehirli gaz, karayolu tünellerinde taşıt yoğunluğuyla orantılı düzeyde birikmekte ve solunması ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Karayolu tünelleri her ne kadar dış ortam olarak ifade edilseler de tünelin boyu, eğimi ve yüksekliğine bağlı olarak iç ortam gibi değerlendirilebilmektedirler. Özellikle taşıt trafiğinin yoğun olduğu karayolu tünellerinde, araçların egzozundan çıkan zararlı gazlar tünelde birikebilmektedir. Tünel içerisinde biriken zararlı gazların tünelde uzaklaştırılmasına yönelik uygulanan en yaygın yöntem, tünel içerisinde eksenel fanların kullanılmasıdır. Tünel içerisinde zararlı gazların birikmesi veya yayılması durumunda eksenel fanların devreye girmesiyle hava sirkülasyonu sağlanabilmektedir. Ancak tünel içerisinde kullanılan fanların konumu ve sayısı kirli havayı uzaklaştırma sürelerini değiştirmektedir.

Sekularac ve Jankovic [1], eksenel fanlarla havalandırılan iki şeritli bir karayolu tüneline akış yapısını ve fanların etkinliğini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmanın deneysel kısmında 1/20 oranında küçültülmüş tünel modelinde kızgın tel anemometresi kullanılarak ortalama hız ve türbülans dağılımları elde etmişlerdir. Sayısal çalışma kısmında ise Standart $k-\epsilon$ ve SST $k-\omega$ türbülans modelleri ile hız değerlerini hesaplamışlardır. Sayısal çözümlerden elde edilen hız profillerinin ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Chen vd. [2], karayolları tünellerinde kullanılan eksenel fanlarda fanın eğim açısının hız dağılımına etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Yangtze tüneline kızgın tel anemometresi ile ölçtükleri hız değerlerinin Realizable $k-\epsilon$ türbülans modeli ile hesaplanan hız değerleri ile uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Myrvang ve Khwaja [3], karayolları tünellerinde havalandırma amaçlı kullanılan fanların sayısının havalandırma performansına etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Tünel modeli içerisine yerleştirdikleri farklı sayıdaki fanlarla gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada hız dağılımlarını elde edilmiştir. Realizable $k-\epsilon$ türbülans modeli ile hesapladıkları hız değerlerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Zhao

vd. [4], karayolları tünellerinde havalandırma amaçlı kullanılan eksenel fanlarda fan eğim açısının hız dağılımına etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişler ve en etkili sirkülasyonun 7°'lik eğim açısında gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Wang vd. [5], kavisli bir karayolu tüneline eksenel fan kullanımının tünel havalandırması üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Standart k-ε türbülans modeli ile gerçekleştirdikleri çalışmada, eksenel fan kullanımının tünel içerisindeki kirletici gazların seviyesinin azaltılması ve tünel güvenliği için son derece önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Pei ve Pan [6], karayolları tünellerinde havalandırma amacıyla kullanılan eksenel fanların optimum sayısını ve konumlarını belirlemek amacıyla Standart k-ε türbülans modelini kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada, fanların tünel içerisindeki hız ve basınç dağılımlarına etkilerini incelemişlerdir. Çift paralel fan ve tek fan kombinasyonunun tünel içerisinde havalandırma açısından en uygun düzenleme olduğunu ifade etmişlerdir. Eftekharian vd. [7], yoğun taşıt trafiğinin olduğu bir karayolu tüneline tünelin havalandırılması amacıyla kullanılan iki farklı tipteki eksenel fanın havalandırma performanslarını sayısal olarak incelemişlerdir. Muz tipi ve geleneksel tip şeklinde iki farklı eksenel fan durumunun Standart k-ε türbülans modeli ile incelendiği çalışmada, her iki fan tipinde de tünel içerisindeki hız dağılımının benzer olduğunu ancak muz tipi eksenel fanın karbonmonoksit düzeyini daha fazla azalttığını belirtmişlerdir. Li vd. [8], eğimli karayolu tünellerinde eksenel fan kullanımının tünel içerisindeki akış dağılımına etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Realizable k-ε türbülans modelini kullandıkları çalışmalarında eğimli tünellerde düşük basınç ve düşük hız bölgelerinin oluştuğunu ve bu durumun ters akış bölgeleri oluşturabileceğini ifade etmişlerdir. Zarnaghsh vd. [9], bir demiryolu tüneline tren hareketinden kaynaklanan hava etkisinin tünelde havalandırma amaçlı bulunan eksenel fanların performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Sekiz adet eksenel fanın bulunduğu tünel içinde dinamik ağ yapısı kullanılarak farklı tren hızları için gerçekleştirilen çalışmada, trenin eksenel fanların akış yönünün tersine hareketi durumunda trenin baş ve kuyruk kısmının eksenel fanların havalandırma performansını iyileştirdiğini belirtmişlerdir. De Fre vd. [10], 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 oluştuğunu belirtmişlerdir. Luther vd. [11], 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 [12], Çin'in Şangay kentindeki bazı karayolu tünellerinde mobil taşıt kullanarak karbondioksit ve metan konsantrasyonlarını ölçmüşler ve ortalama karbondioksit ve metan konsantrasyonlarını sırasıyla $1308,92 \pm 767,48$ ppm ve 2182 ± 112 ppb olarak elde etmişlerdir. Trafik yoğunluğu olan karayolları tünellerinde hem sürücüler hem de yolcular için sağlıklı koşullar oluşturabilecek kirletici gazların yüksek konsantrasyonda birikebileceğini ifade etmişlerdir. Ren vd. [13], metro vagonlarındaki hava kalitesini değerlendirmek amacıyla Çin'in Şangay 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 ± 567 ppm ve 1534 ± 498 ppm düzeyinde olan vagonlardaki karbondioksit konsantrasyonlarının havalandırma sisteminin çalışmasıyla sırasıyla %21 ve %27 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Yang vd. [14], 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. [15], orta bölümü atmosfere açık ardışık iki karayolu tünelineki hava akışını ve taşıt kaynaklı kirleticilerin tüneller içindeki dağılımlarını deneysel ve sayısal 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 çözümlerin kirletici konsantrasyon oranları açısından deneysel verilerle uyumlu olduğu belirtilmiştir. Sun vd. [16], doğal olarak havalandırılan avluya sahip 12 odalı bir bina içerisindeki karbondioksit dağılımını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Deneysel çalışmada, rüzgâr tüneli test bölgesine yerleştirilmiş 1/50 ölçekli bina modelinde 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. [17], 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. Bari vd. [18], 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 karbondioksit, karbondioksit ve oksijen için konsantrasyonlar sırasıyla 200 ppm, 1400 ppm ve 1600 ppm olarak elde edilmiştir. Dong vd. [19], 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. [20], belediye ait bir boru hattı tüneline karbondioksit ve metan dağılımlarını Standart k-ε türbülans modeli ile sayısal olarak incelemişlerdir. Boru hattı tüneline, havalandırma şaftı olmadığı durumda kirletici gaz dağılımında belirgin bir katmanlaşma oluştuğunu havalandırma şaftıyla sağlanan doğal havalandırma durumunda ise tüneli içerisindeki zararlı gaz içeriğinin önemli oranda azaldığını belirtmişlerdir. Canitz vd. [21], bir vaka çalışması olarak Amerika Birleşik Devletleri'nin Alabama eyaletinde bulunan George C. Wallace tüneline karbondioksit sisteminin etkinliğini inceledikleri çalışmalarında, tünel içerisinde oluşan karbondioksitin %25'inin karbon yakalama sistemi tarafından yakalandığını belirtmişlerdir. Chen vd. [22], kavisli karayolu tünellerinde alternatif jet fanların etkisini inceledikleri sayısal çalışmalarında, alternatif jet fanların performansının geleneksel jet fanlardan daha iyi olduğunu ve bu iyileşmenin artan kavis yarıçapıyla birlikte arttığını belirtmişlerdir. Yin vd. [23], uzun bir karayolu tüneline jet fanların trafik üzerindeki etkisini jet hızı, araç hızı ve tünel havalandırma hızı ile parametrik olarak incelemişlerdir. Yan vd. [24], bir karayolu tüneline tek yönlü çift şeritli ve çift yönlü tek şeritli durumlarda saha ölçümleriyle taşıt kirliliğini inceledikleri çalışmalarında, hava hızının çift yönlü tek şeritli durumda daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Song vd. [25], kavisli bir karayolu tüneline kavis yarıçapının ve jet fan eğim açısının taşıt egzozlarından yayılan kirletici gazlar üzerindeki etkisini sayısal olarak inceledikleri çalışmalarında, kirleticilerin yayılımının artan jet fan eğim açısı ve kavis yarıçapı ile ters orantılı olduğunu ifade etmişlerdir.

Son yıllarda, karayolu tünellerinde oluşan zararlı gazların dağılımı ve tahliyesi popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir. Literatürdeki bu konudaki çalışmalar ağırlıklı olarak tünel yangınları üzerine yoğunlaşmaktadır. Tünel yangınlarına yönelik çalışmalarda genellikle yangının tünel içerisindeki hava hareketine etkisi, duman özellikleri ve farklı duman giderme senaryoları incelenmektedir. Tünel içerisinde taşıt kaynaklı zararlı gazların dağılımında tünel geometrisi etkisini inceleyen çalışmalar oldukça azdır. Bu durum, düz tünel dışındaki tünel geometrilerinde zararlı gazların dağılımını inceleyen çalışmalara olan ihtiyacı göstermektedir. Bu çalışmada, tünel içerisinde birikmiş karbondioksitin bir fan etkisiyle zamanla değişiminin incelenmesine odaklanılmıştır. Karayolu tünellerinde birikmiş karbondioksitin tünel içerisinde çalıştırılan bir fan yardımıyla zamanla değişimi üzerinde tünel kavis yarıçapının etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Düz tünel ve iki farklı eğrilik yarıçapına sahip kavisli tüneller içerisinde fan etkisiyle hız ve karbondioksit dağılımlarında sağlanan zamana göre değişimin belirlenmesi çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır.

II. DENEYSEL ÇALIŞMA

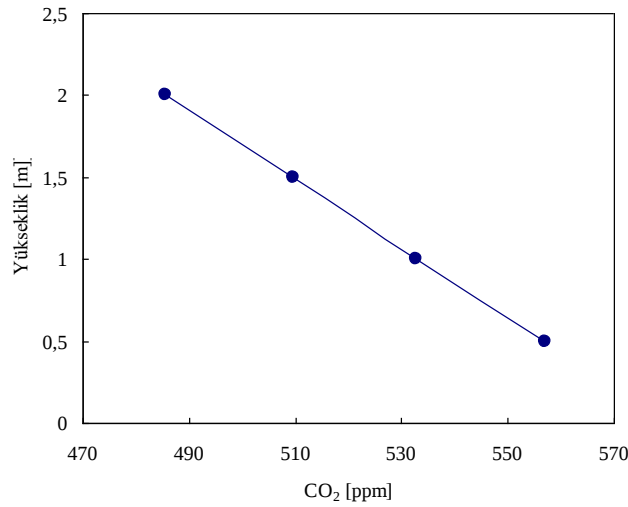
Saha çalışması şeklinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada, Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan Akyazı Tüneli'nde karbondioksit ölçümleri yapılmıştır. 2480 metre uzunluğa sahip Akyazı Tüneli biri dağ tarafında diğeri ise deniz tarafında olmak üzere üç şeritli iki tüpten oluşmaktadır. Her iki tüpte 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.

A. 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 ± 50 ppm düzeyindedir.

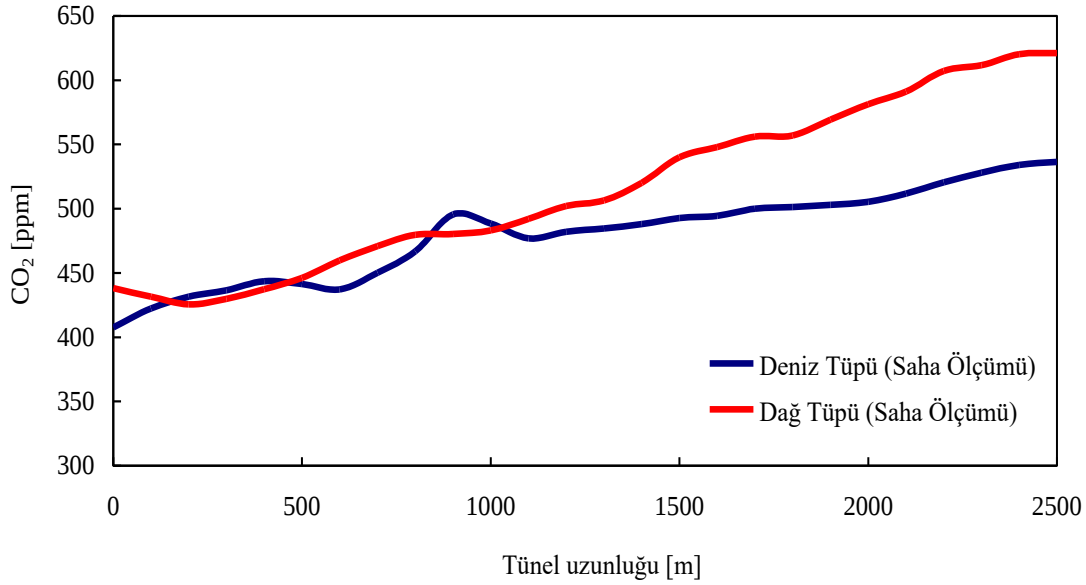
Şekil 1'de, Akyazı Tüneli'nin deniz tüpünde tünel boyunun orta konumundaki duraklama cebinde tünel duvarından 1 metre açıklıkta düşey doğrultuda yerden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde ölçülmüş zaman ortalamalı karbondioksit değerleri görülmektedir. Ölçüm süresince 1 s aralıklarla 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

III. SAYISAL ÇALIŞMA

A. 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 kütleli kuvvetler bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu denklemler türbülanslı akış için hız ve basınç büyüklükleri zaman ortalamalı ve çalkantı terimleri cinsinden yazıldığına,

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

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 incelenmesi için akış alanını çözmeyi amaçlayan modeller geliştirilmiş ve “türbülans modeli” kavramı bu şekilde ortaya çıkmıştır [26]. 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.

B. Standard k- ε Türbülans Modeli

Laundier ve Spalding [26], 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 ’, dinamik 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.

C. Konsantrasyon Denklemleri

Karbondiyoksit 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 [19].

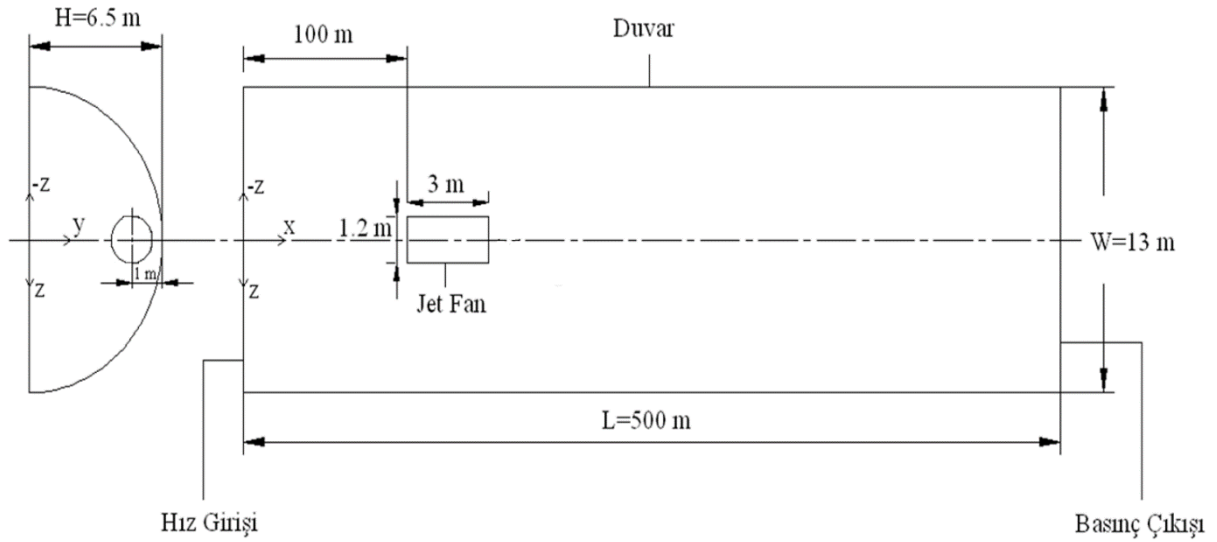
Türbülanslı akışlarda, kütle difüzyon akısı,

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

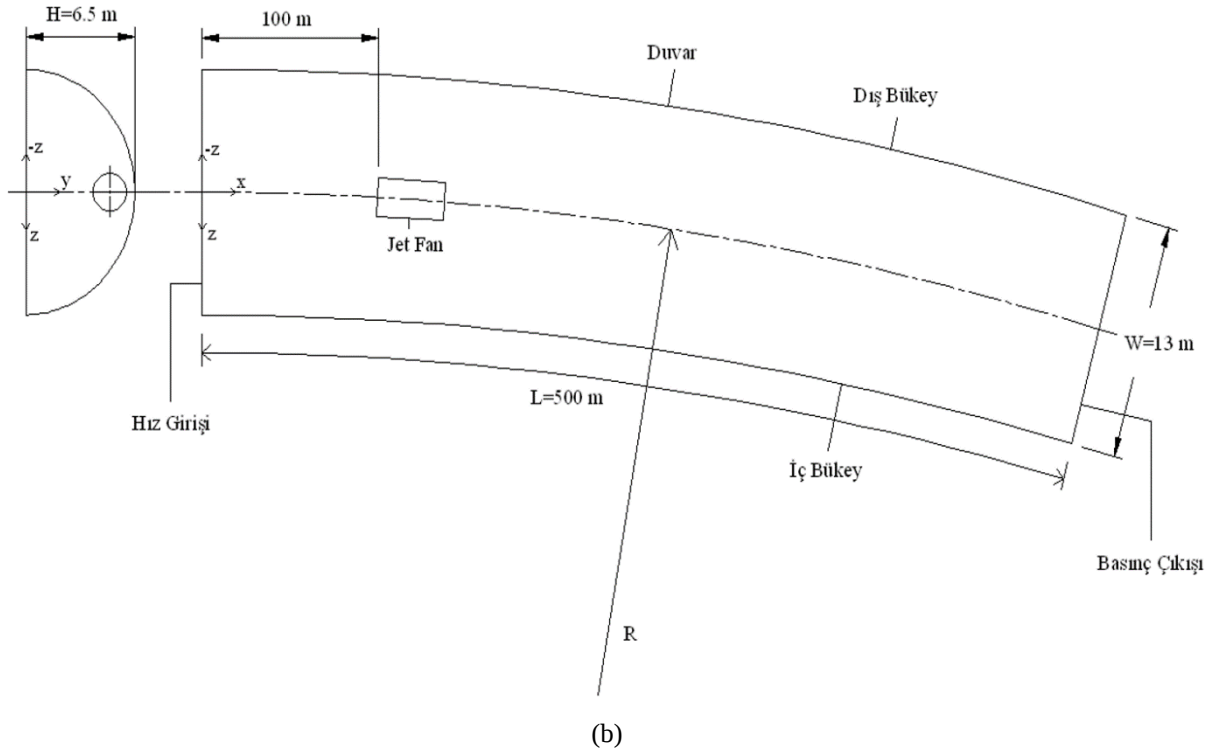
şeklinde. Burada, Sc_t türbülanslı Schmidt sayısını göstermekte ve 0,7 olarak alınmaktadır. μ_t ve D_T ise sırasıyla türbülans viskozitesini ve türbülans difüzyonunu ifade etmektedir.

D. Akış Alanı ve Sınır Şartları

Bu çalışmada, tünel içerisinde taşıtların olmadığı tek fanlı durumda, 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 fan itme kuvvetinin 950 N değeri için zaman bağımlı olarak çözülmüştür. Tünel içerisinde fan etkisini incelemek amacıyla tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konuma fan yerleştirilmiştir. Sayısal çalışmaların tamamında $L=500$ m uzunluğa, $W=13$ m genişliğe ve $H=6,5$ m yüksekliğe sahip iki şeritli tünel modelleri incelenmiştir. Şekil 3'te taşıtsız fanlı 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" ve duvarlarda "Duvar" şeklindedir. Her iki tünel geometrisinde de 1,2 m çapa ve 3 m uzunluğa sahip eksenel fan kullanılmıştır. Taşıtsız fanlı tünellerde, karbondioksit dağılımlarının zamana göre değişimlerinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen zaman bağımlı çözümlerde, kirliliğin en üst düzeye ulaştığı kritik düzeyler başlangıç durumundaki karbondioksit seviyesi olarak 25000 ppm şeklinde dikkate alınmıştır. Tünel içerisinde kirliliğin en üst değere ulaştığı kritik düzeyler başlangıç durumu olarak dikkate alınmış ve taşıtsız durumda fan itme kuvvetinin 950 N değeri için tünel kavis durumunun karbondioksit dağılımları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Taşıtsız fanlı tünellerdeki tüm sayısal çözümlerde durumda zaman adımı 1 dakika alınarak 60 dakikalık çözüm elde edilmiştir. Tünel içerisindeki hız değerleri çözüm süresinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

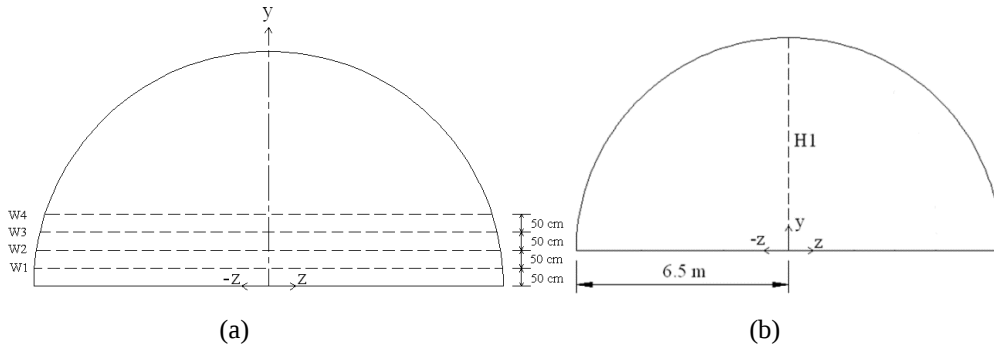


(a)



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

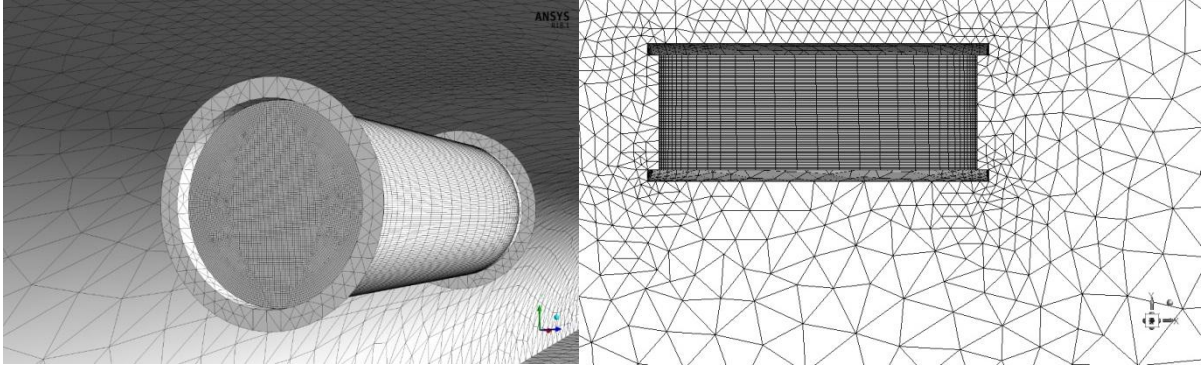
Sayısal çözümler sonucunda akış alanlarında hesaplanan büyüklükler, tünel içerisinde farklı istasyonlarda tanımlanmış yatay ve düşey hatlardaki çizgisel değişimler ve tünel en kesitlerindeki dağılımlar şeklinde verilmiştir. En kesitlerde tanımlanmış yatay ve düşey hatların konumu Şekil 4' de verilmiştir.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



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

E. Ağ Yapısı ve Ağdan Bağımsızlık

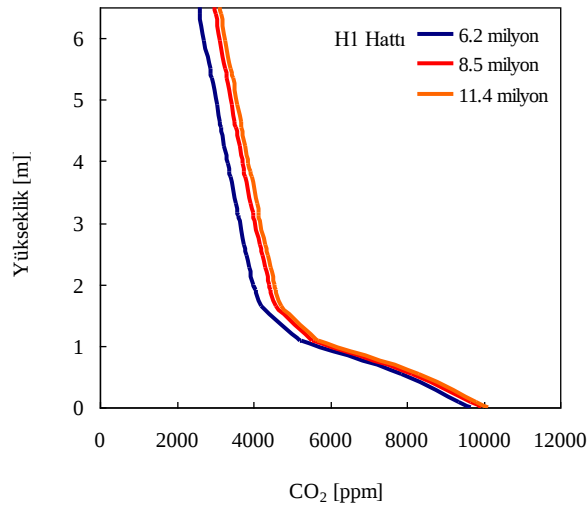
Sayısal çözümlerde akış alanlarındaki ağ yapıları, ANSYS FLUENT 18.1 ticari yazılımı içerisindeki ağ modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada yapılandırılmamış tetrahedral ağ yapısı kullanılmıştır. Akış alanında taşıtların egzoz çıkışında, taşıt etrafında ve akış alanının diğer bölgelerindeki ağ 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 taşıtsız fanlı düz tünele ait örnek ağ yapısı görülmektedir. Fan etrafında daha yoğun olan ağ yapısı akış alanının diğer bölgelerinde seyrekleşmektedir.



Şekil 5. Örnek ağ yapısı görüntüleri

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 karbondioksit 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 30 s, 60 s ve 120 s değerleri için yapılan çözümlerde zaman adımı değerlerinin çözüm üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüş ve tüm çözümlerde zaman adımı olarak 60 s seçilmiştir. Belirlenen iterasyon sayısı ve zaman adımı değeri dikkate alınarak, akış alanında üç farklı ağ yoğunluğu denenmiştir.

Şekil 6' da, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda $x=250$ m'de düşey doğrultudaki H1 hattında 6,2 milyon, 8,5 milyon ve 11,4 milyon şeklinde üç farklı ağ yoğunluğu için hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Her üç ağ yoğunluğu durumunda da H1 hattındaki karbondioksit değerlerinin benzer olması çözümlerin ağdan bağımsız olduğunu göstermektedir. Her üç ağ yoğunluğu durumunda da H1 hattındaki karbondioksit değerlerinin benzer olması çözümlerin ağdan bağımsız olduğunu göstermiştir. Ağ yoğunluğu düz tünelde 8,5 milyon kavisli tünellerde ise yaklaşık 16 milyon olarak dikkate alınmıştır. $y+ \approx 5$ olarak gerçekleştirilmiştir.



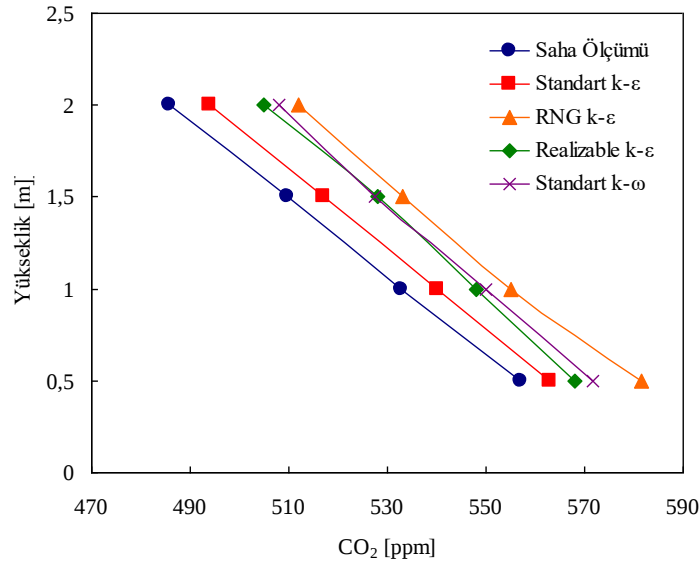
Şekil 6. Ağ yoğunluğunun çözüm üzerindeki etkisi

F. 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.

G. Türbülans Modeli Etkisi

Sayısal çözümlerde, türbülans modellerinin hassasiyetini incelemek amacıyla Standart k- ϵ , RNG k- ϵ , Realizable k- ϵ ve Standart k- ω şeklinde dört farklı türbülans modeli ile sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 7’de, Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan üç şeritli Akyazı Tüneli’nde orta cepte düşey doğrultuda ölçülmüş karbondioksit değerleri, dört farklı türbülans modeli ile hesaplanmış karbondioksit değerleri ile birlikte verilmiştir. İncelenen tüm türbülans modellerinde hesaplanan ve yükseklikle değişen karbondioksit değerlerinin genel olarak deneysel verilerle uyumlu olduğu ancak, Standart k- ϵ türbülans modeli ile hesaplanan değerlerin deneysel verilere daha yakın olduğu görülmüştür. Bu nedenle, çalışma kapsamındaki tüm sayısal çözümlerde Standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır.

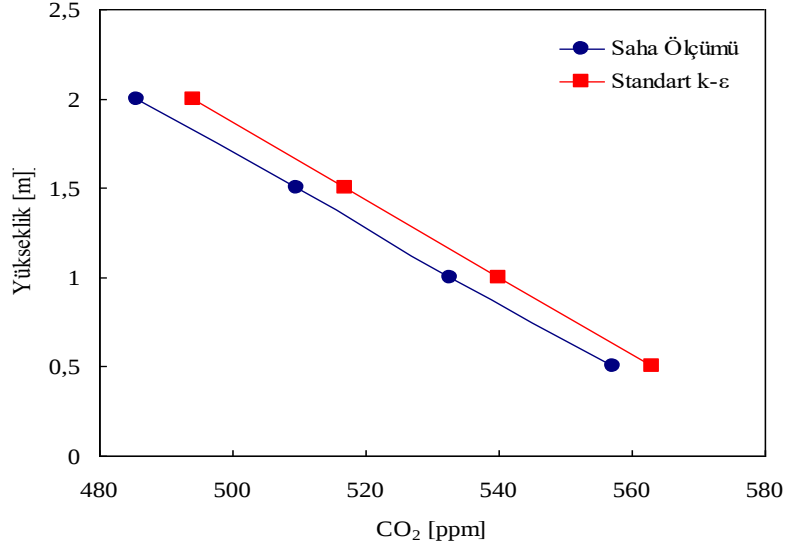


Şekil 7. Türbülans modeli etkisi

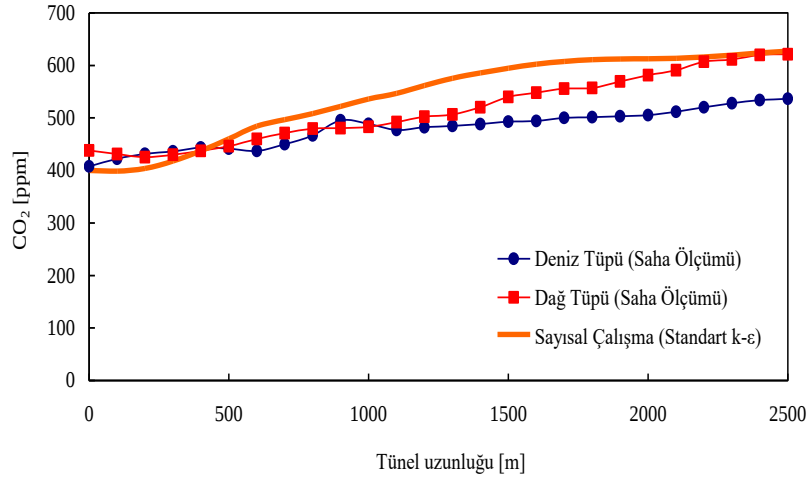
H. Sayısal Çözümün Doğrulanması

1) Saha Ölçümleri ile 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 8’de görülmektedir. Tünel içerisindeki orta cepte düşey doğrultuda deneysel ve sayısal olarak elde edilen karbondioksit değerleri oldukça uyumludur (Şekil 8a). Şekil 8b’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)

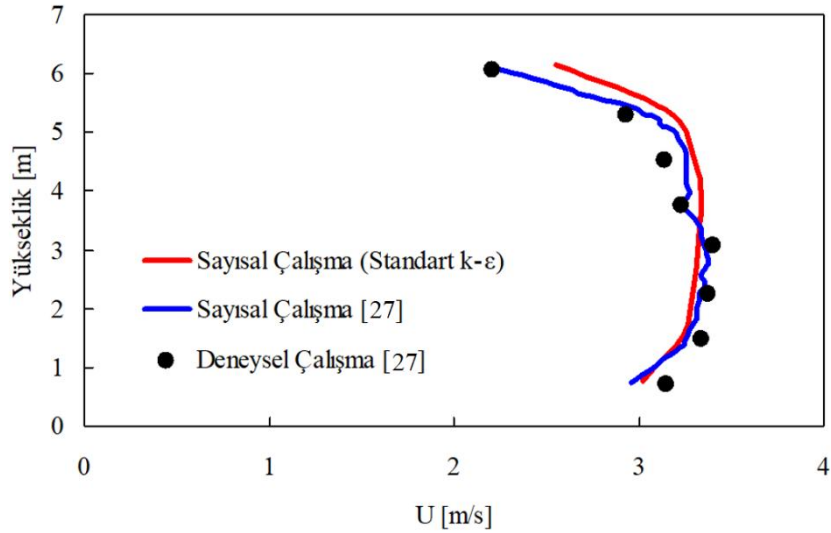


(b)

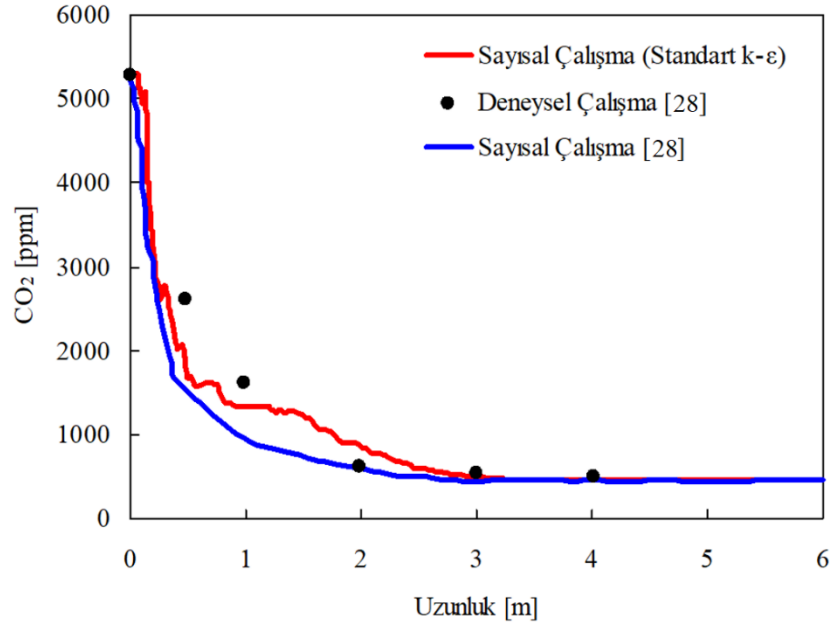
Şekil 8. DeneySEL ve sayısal sonuçların karşılaştırılması (a) Düşey doğrultu (b) Yatay doğrultu

2) Literatür Verileri ile Doğrulama

Şekil 9'da 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 9. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması (a) Hız dağılımı (b) Karbondioksit dağılımı

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

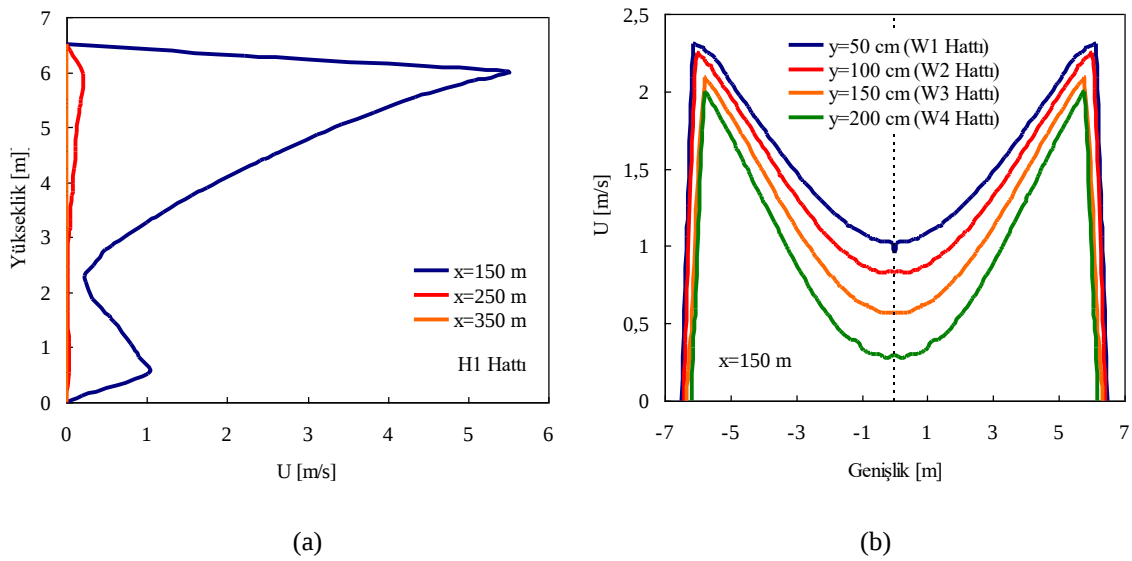
Bu çalışmada, tünel içerisinde taşıtların olmadığı tek fanlı durumda, 500 m uzunluğundaki iki şeritli düz bir tünel ve $R=950$ m ve $R=1900$ m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçalarıyla oluşan iki farklı kavise sahip iki şeritli iki tünel içerisindeki üç boyutlu akış alanları fan itme kuvvetinin 950 N değeri için zaman bağımlı olarak çözülmüştür. Tünel içerisinde fan etkisini incelemek amacıyla tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konuma fan yerleştirilmiştir. Tünel içerisinde taşıtların olmadığı fanlı durumda, fan itme kuvvetinin 950 N değerinde tek fanlı iki şeritli düz tünelde ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerleri ile temsil edilen iki şeritli tek fanlı iki farklı kavisli tünelde akış alanları sayısal olarak incelenmiştir. 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.

A. 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.

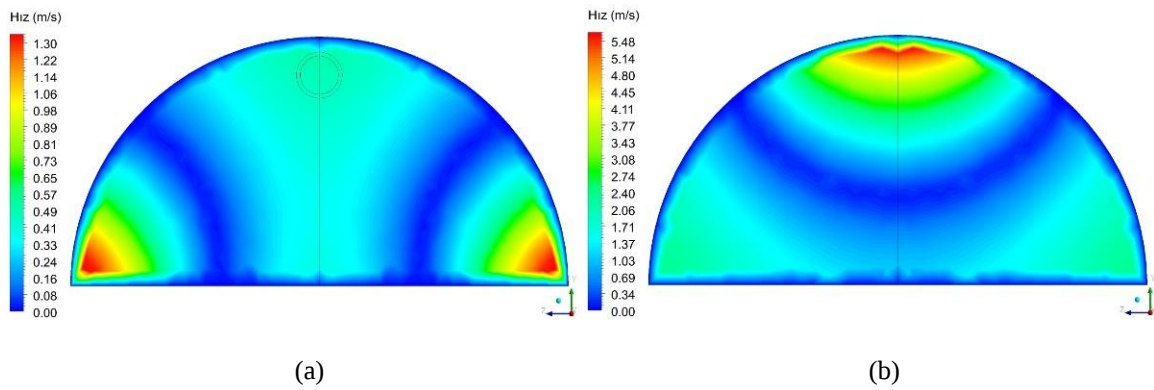
1) Taşıtız Tek Fanlı Düz Tünel

Şekil 10a'da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. $x=150$ m'de fan etkisiyle düşey doğrultudaki hız değerleri $y=2,5$ m'den itibaren artmakta ve fan doğrultusunda yaklaşık 5,5 m/s şeklinde en yüksek değerini almaktadır. İlerleyen istasyonlarda fanın hız değerleri üzerindeki etkisi azalarak kaybolmaktadır. Şekil 10b'de iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, $x=150$ 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. Tünel yan duvarları yakınında yüksek olan hız değerleri orta bölgede azalmaktadır. $y=50$ cm yüksekliğindeki W1 hattında en büyük olan hız değerlerinin artan yükseklikle azaldığı ve $y=200$ cm yüksekliğindeki W4 hattında en küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 10. 950 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hattında hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hız değerleri

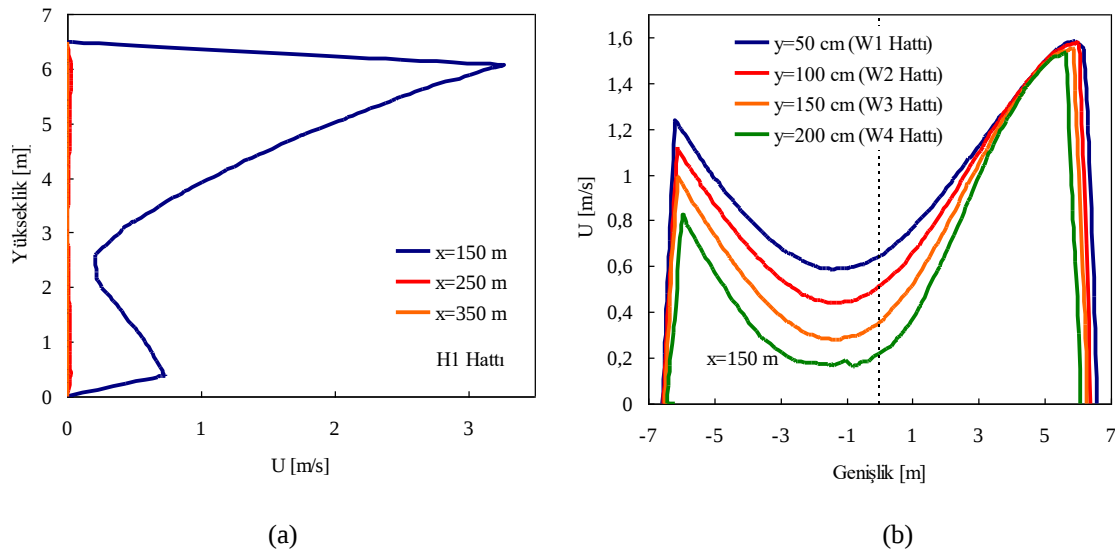
Şekil 11'de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel boyunca $x=50$ m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Fanın emme etkisinin gözlemlendiği $x=50$ m istasyonunda hız değerleri tünelin taban seviyesine yakın yan duvarları civarında maksimum olmaktadır. $x=150$ m istasyonunda ise fanın üfleme etkisiyle fan doğrultusundaki bölgede hız değerleri artmaktadır.



Şekil 11. 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m

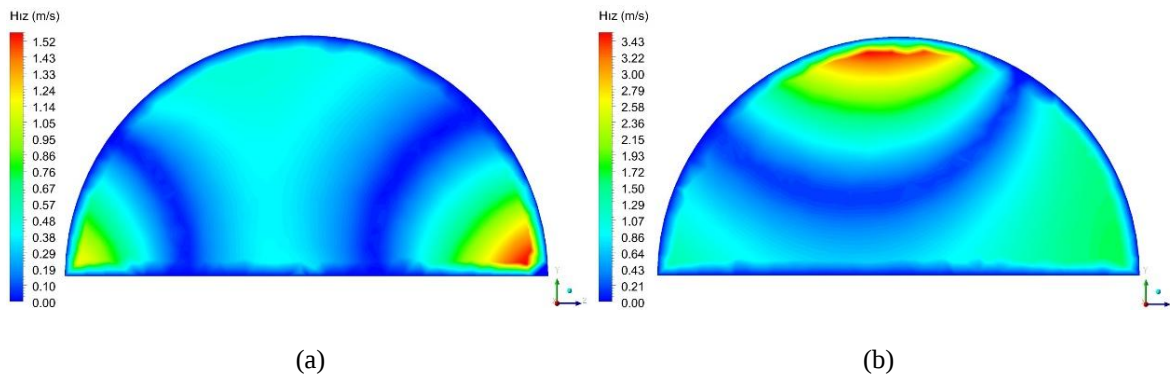
2) $R=950$ m Yarıçaplı Taşıtsız Tek Fanlı Kavisli Tünel

Şekil 12a'da 950 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. $x=150$ m'de fan etkisiyle düşey doğrultudaki hız değerleri $y=2,5$ m'den itibaren artmakta ve fan doğrultusunda yaklaşık 3,3 m/s şeklinde en yüksek değerini almaktadır. İlerleyen istasyonlarda fanın hız değerleri üzerindeki etkisi azalarak kaybolmaktadır. Şekil 12b'de 950 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, $x=150$ 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. Tünel yan duvarları yakınında yüksek olan hız değerleri orta bölgede azalmaktadır. $y=50$ cm yüksekliğindeki W1 hattında en büyük olan hız değerlerinin artan yükseklikle azaldığı ve $y=200$ cm yüksekliğindeki W4 hattında en küçük olduğu görülmektedir. Yatay doğrultulardaki hız değerleri kavis etkisi nedeniyle iç bükey tarafta daha yüksek olmaktadır.



Şekil 12. $R=950$ m'de ve 950 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hattında hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hız değerleri

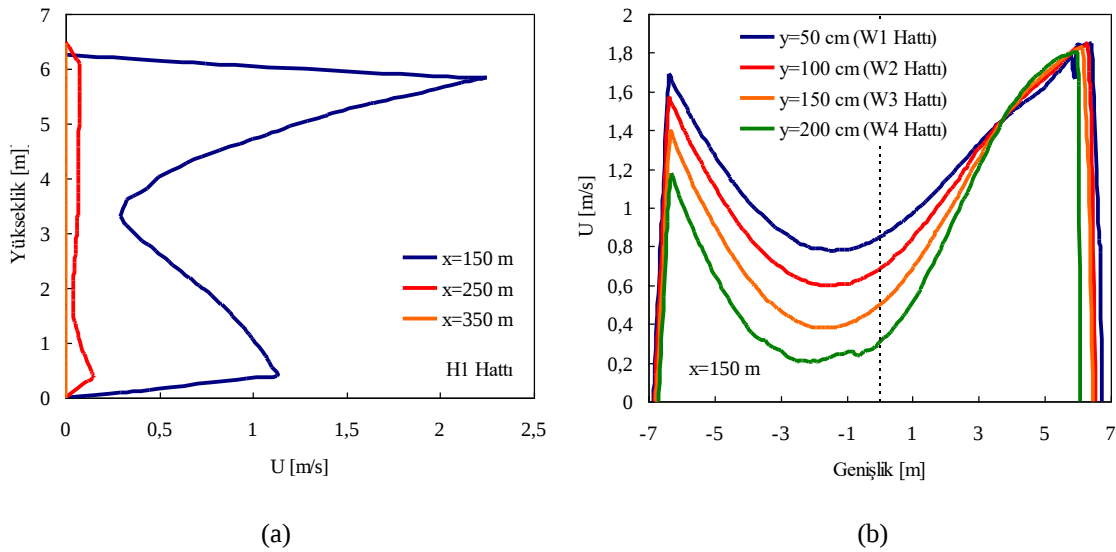
Şekil 13'te, 950 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel boyunca $x=50$ m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Fanın emme etkisinin gözlemlendiği $x=50$ m istasyonunda hız değerleri tünelin taban seviyesine yakın yan duvarları civarında maksimum olmaktadır. $x=150$ m istasyonunda ise fanın üfleme etkisiyle fan doğrultusundaki bölgede hız değerleri artmaktadır. Kavis etkisi nedeniyle tünel en kesitinin iç bükey tarafında hız değerleri daha yüksek olmaktadır.



Şekil 13. $R=950$ m'de ve 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m

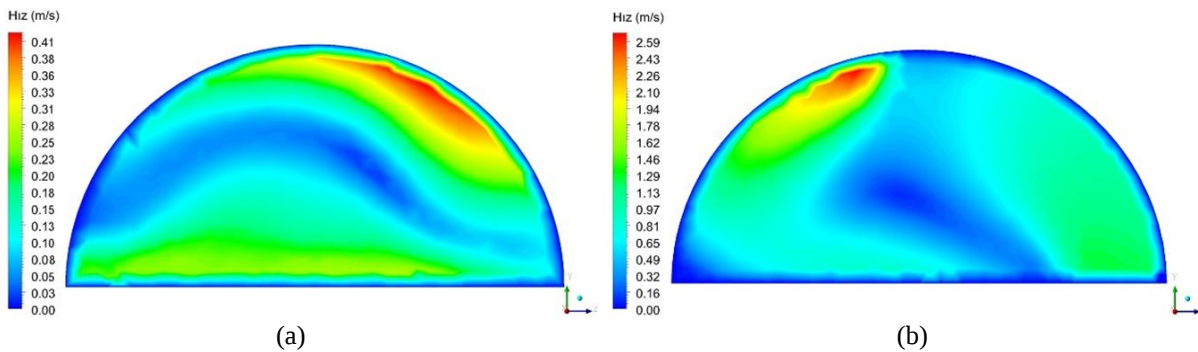
3) $R=1900$ m Yarıçaplı Taşıtsız Tek Fanlı Kavisli Tünel

Şekil 14a'da 1900 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. $x=150$ m'de fan etkisiyle düşey doğrultudaki hız değerleri $y=3,5$ m'den itibaren artmakta ve fan doğrultusunda yaklaşık 2,5 m/s şeklinde en yüksek değerini almaktadır. İlerleyen istasyonlarda fanın hız değerleri üzerindeki etkisi azalarak kaybolmaktadır. Şekil 14b'de 1900 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, $x=150$ 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. Tünel yan duvarları yakınında yüksek olan hız değerleri orta bölgede azalmaktadır. $y=50$ cm yüksekliğindeki W1 hattında en büyük olan hız değerlerinin artan yükseklikle azaldığı ve $y=200$ cm yüksekliğindeki W4 hattında en küçük olduğu görülmektedir. Yatay doğrultulardaki hız değerleri kavis etkisi nedeniyle iç bükey tarafta daha yüksek olmaktadır.



Şekil 14. $R=1900$ m'de ve 950 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hattında hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hız değerleri

Şekil 15'te, 1900 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel boyunca $x=50$ m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Fanın emme etkisinin gözlemlendiği $x=50$ m istasyonunda hız değerleri tünelin tavan bölgesinin sağ tarafında maksimum olmaktadır. $x=150$ m istasyonunda ise kavis etkisi nedeniyle tünel tavan bölgesinin sol tarafında hız değerleri artmaktadır. Yaya seviyesindeki hız değerleri iç bükey tarafta daha büyük olmaktadır.

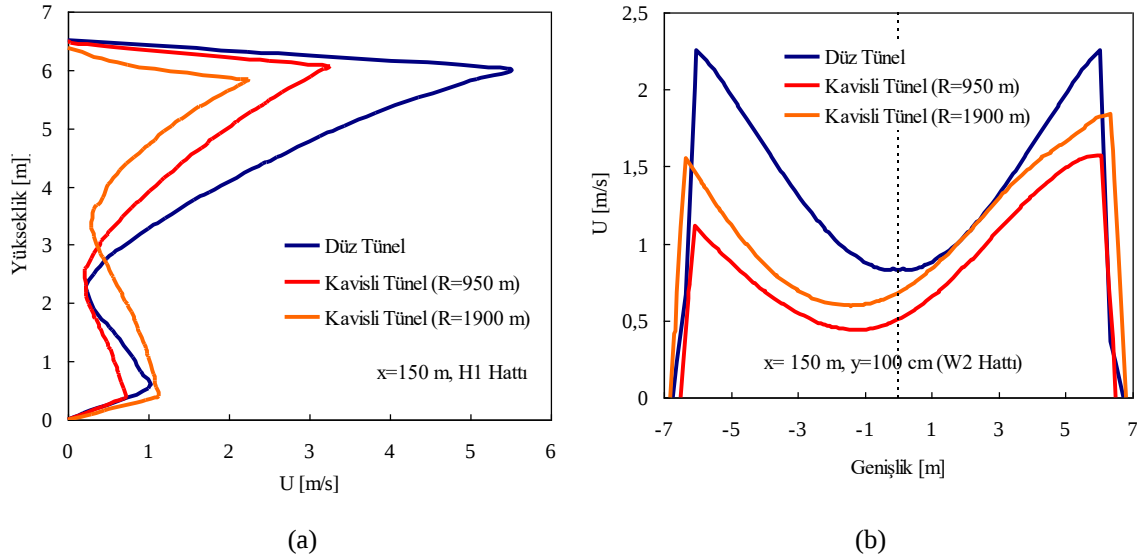


Şekil 15. $R=1900$ m'de ve 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m

4) Taşıtsız Tek Fanlı Tünellerde Kavis Yarıçapının Hız Dağılımına Etkisi

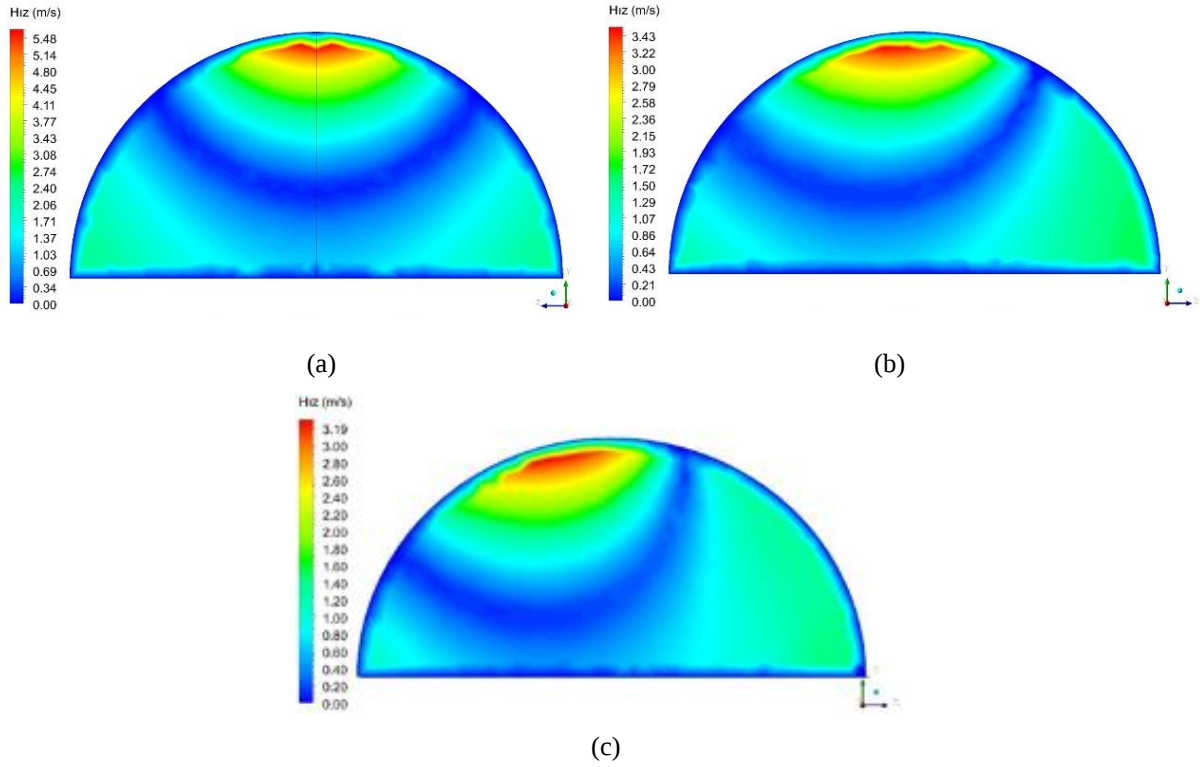
Şekil 16a'da, 950 N fan itme kuvvetinde, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde, $x=150$ m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Düşey doğrultudaki hız değerleri, tünel tabanından itibaren artarak $y=0,5$

m yüksekliğinde küçük ölçekli pikler oluşturmakta, daha sonra azalarak yaklaşık $y=2,5$ m-3,5 m'de minimum olmaktadır. İncelenen tüm tünel geometrilerinde tekrar artan hız değerleri fan doğrultusunda maksimum olmaktadır. Kavis etkisi fan doğrultusundaki hız değerlerini azaltmaktadır. Düz tünelde fan doğrultusunda 5,5 m/s olan hız değeri $R=1900$ m yarıçapa sahip kavisli durumda 2,2 m/s olmaktadır. Şekil 16b'de, 950 N fan itme kuvvetinde, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde, $x=150$ m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hattında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Fan etkisiyle tünel yan duvarları yakınında yüksek olan hız değerleri orta bölgede azalmaktadır. Düz tünelde duvar yakınında aynı düzeyde oluşan maksimum hız değerleri, kavisli tünellerde iç bükey tarafta daha yüksek dış bükey tarafta ise daha düşük olacak şekilde değişmektedir. Li vd. [8] tarafından gerçekleştirilen çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 16. 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki hız profilleri (a) H1 hattında hız değerleri (b) W2 hattında hız değerleri

Şekil 17'de, 950 N fan itme kuvvetinde, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde, $x=150$ m istasyonunda en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Her üç tünel geometrisi durumunda da fanın üfleme etkisiyle fan doğrultusundaki bölgelerde hız değerleri artmaktadır. Kavisli tünellerde fan doğrultusundaki yüksek hız değerleri bölgesi tünel düşey orta ekseninin sol tarafına kaymaktadır. Düz tünelde maksimum hız değeri 5,48 m/s iken, $R=1900$ m yarıçapa sahip kavisli tünelde bu değer 3,19 m/s olmaktadır.



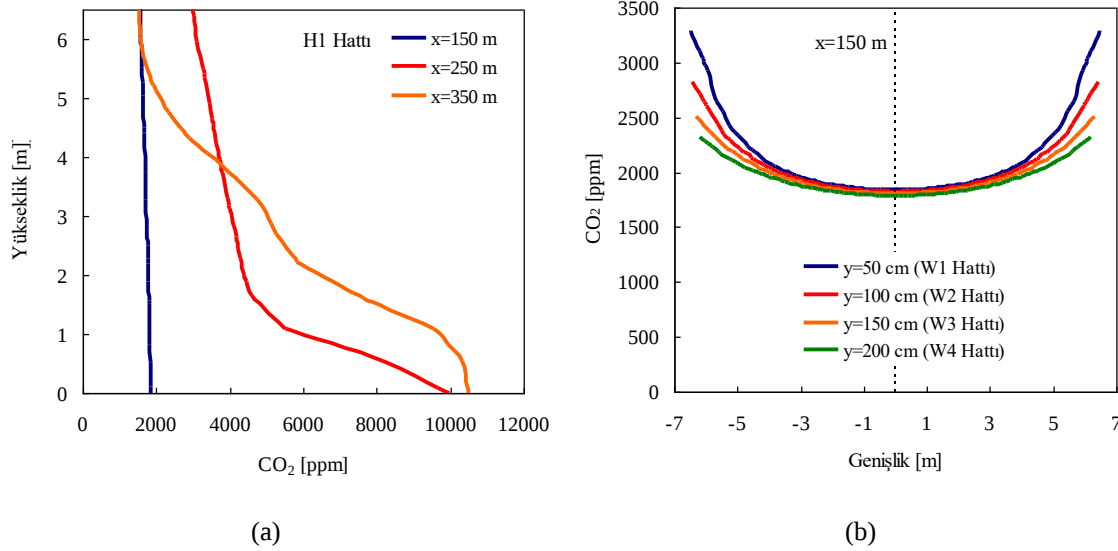
Şekil 17. $x=150$ m’de 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerde hız dağılımları (a) Düz tünel (b) $R=950$ m yarıçapa sahip kavisli tünel (c) $R=1900$ m yarıçapa sahip kavisli tünel

B. 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. Taşıtsız tek fanlı tünellerde, karbondioksit dağılımlarının zamana göre değişimlerinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen zaman bağımlı çözümlerde, kirliliğin en üst düzeye ulaştığı kritik düzey başlangıç durumundaki karbondioksit seviyesi olarak 25000 ppm şeklinde dikkate alınmıştır. Tünel içerisindeki karbondioksit değerleri çözüm sürelerinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

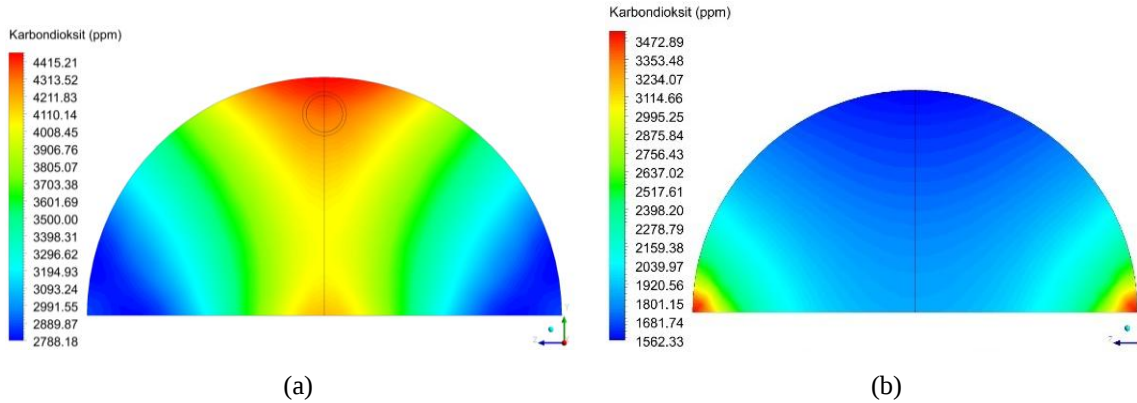
1) Taşıtsız Tek Fanlı Düz Tünel

Şekil 18a’da, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki $x=150$ m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 25000 ppm olan karbondioksit seviyesinin 60 dakika sonunda yaklaşık 1600 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe düşüş etkisi azalmaktadır. Şekil 18b’de, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için $x=150$ 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. Tünelin orta bölgesinde fan etkisiyle azalan karbondioksit değerleri, tünel yan duvarlarında W1 hattında en yüksek olacak şekilde artmaktadır.



Şekil 18. 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hattında karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarında karbondioksit değerleri

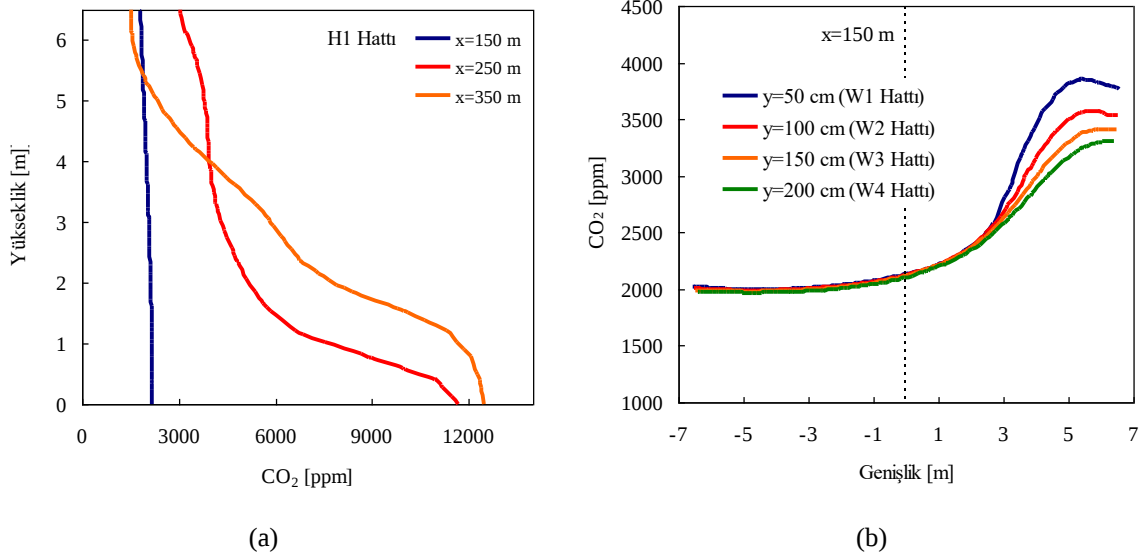
Şekil 19'da iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca sırasıyla $x=50$ m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir. $x=50$ m'deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbondioksit değerleri tünel duvar bölgeleri hariç yüksek olmaktadır. $x=150$ m'de ise, fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır.



Şekil 19. 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbondioksit dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m

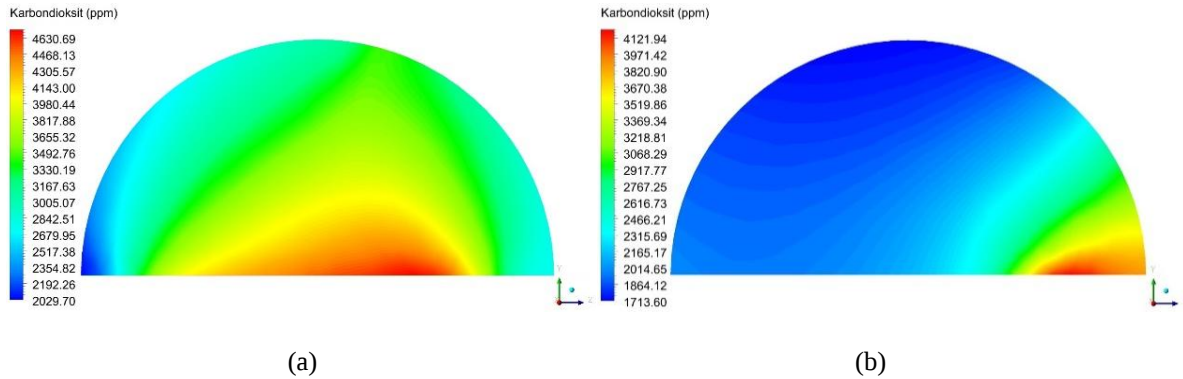
2) $R=950$ m Yarıçaplı Taşıtsız Tek Fanlı Kavisli Tünel

Şekil 20a'da iki şeritli 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki $x=150$ m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 25000 ppm olan karbondioksit seviyesinin 60 dakika sonunda yaklaşık 1900 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe düşüş etkisi azalmaktadır. Şekil 20b'de, iki şeritli 950 m yarıçaplı kavisli tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için $x=150$ 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. Kavis etkisi nedeniyle, tüm hatlarda karbondioksit değerleri tünel kesitinin dış bükey tarafındaki sol bölgesinde düşük olmakta, iç bükey taraftaki sağ bölgesinde ise tünel duvarında en büyük değerlere ulaşacak şekilde artmaktadır.



Şekil 20. R=950 m'de 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hattında karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarında karbondioksit değerleri

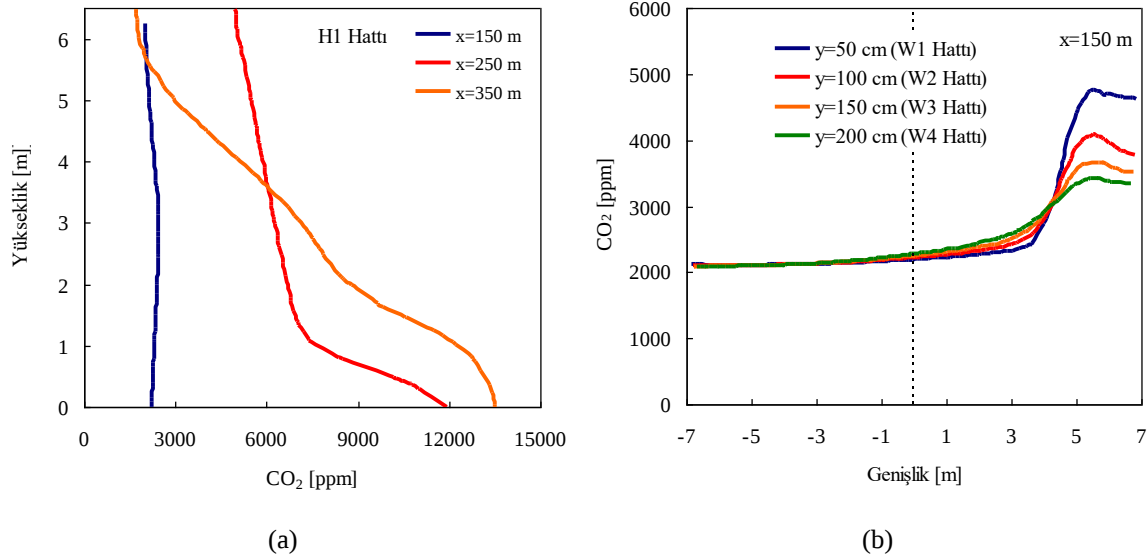
Şekil 21'de iki şeritli 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde çalışan tek fanın 950 N itme kuvvetinde tünel boyunca sırasıyla $x=50$ m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir. $x=50$ m'deki emme bölgesinde, fan ve kavis etkisiyle karbondioksit değerleri tünel en kesitinin orta bölgesinde daha yüksek olmaktadır. $x=150$ m'de, fan ve kavis etkisiyle yaya seviyesinin iç bükey tarafındaki tünel duvarına yakın bölge hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır.



Şekil 21. R=950 m'de 950 N itme kuvveti kuvvetinde karbondioksit dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m

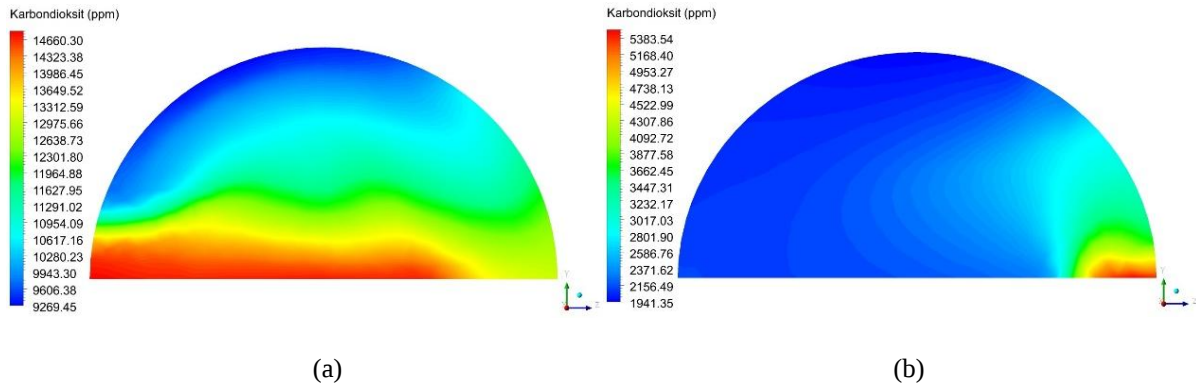
3) R=1900 m Yarıçaplı Taşıtsız Tek Fanlı Kavisli Tünel

Şekil 22a'da iki şeritli 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki $x=150$ m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 25000 ppm olan karbondioksit seviyesinin 60 dakika sonunda yaklaşık 2200 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe düşüş etkisi azalmaktadır. Şekil 22b'de, iki şeritli 1900 m yarıçaplı kavisli tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için $x=150$ 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. Kavis etkisi nedeniyle, tüm hatlarda karbondioksit değerleri tünel kesitinin dış bükey tarafındaki sol bölgesinde düşük olmakta, iç bükey taraftaki sağ bölgesinde ise tünel duvarında en büyük değerlere ulaşacak şekilde artmaktadır.



Şekil 22. R=1900 m’de 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hattında karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarında karbondioksit değerleri

Şekil 23’de iki şeritli 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde çalışan tek fanın 950 N itme kuvvetinde tünel boyunca sırasıyla $x=50$ m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir. $x=50$ m’deki emme bölgesinde, fan ve kavis etkisiyle karbondioksit değerleri tünel en kesitinin yaya seviyesi bölgesinde daha yüksek olmaktadır. $x=150$ m’de, fan ve kavis etkisiyle yaya seviyesinin iç bükey tarafındaki tünel duvarına yakın bölge hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır.

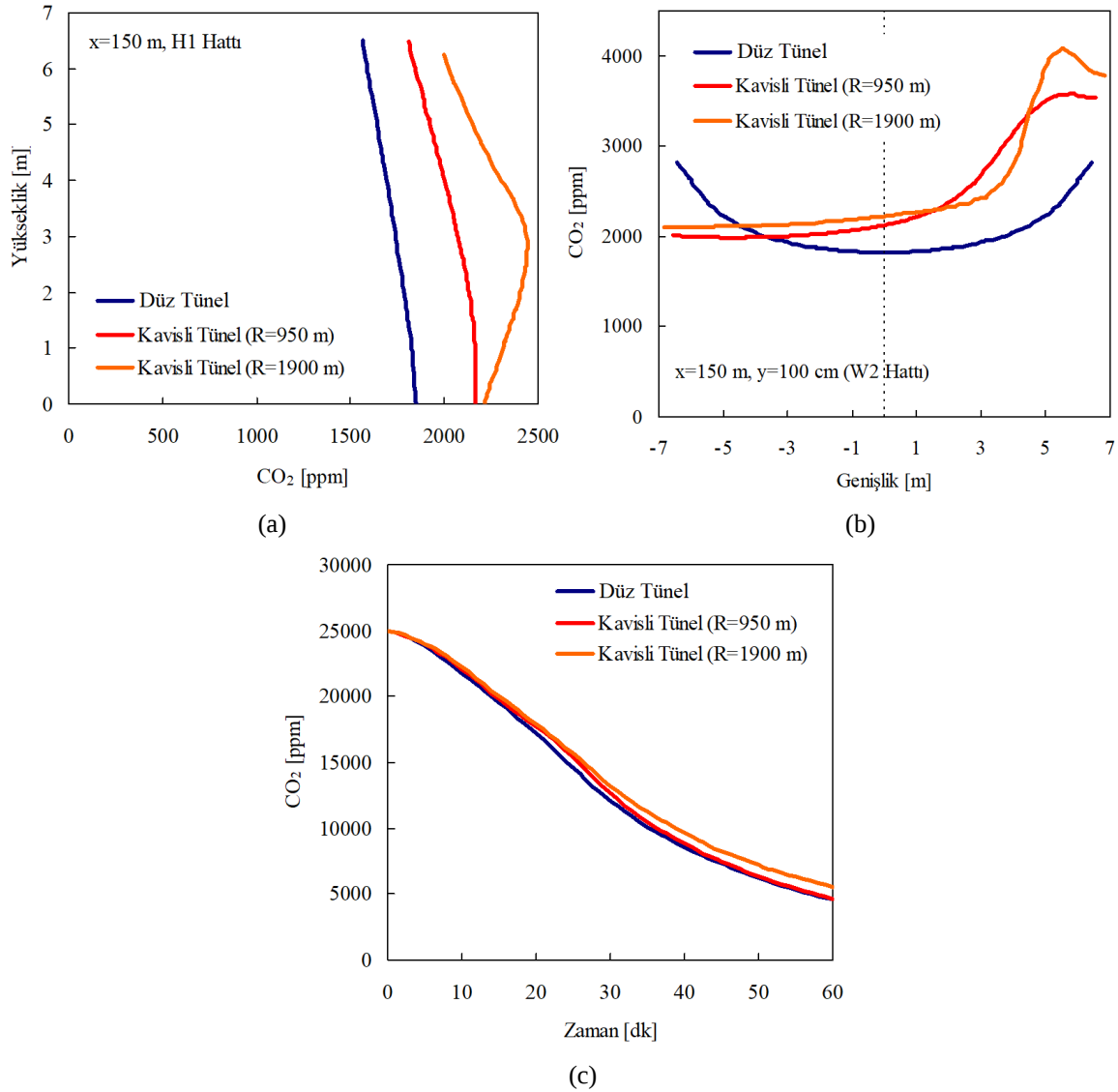


Şekil 23. R=1900 m’de 950 N itme kuvvetinde karbondioksit dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m

4) Taşıtsız Tek Fanlı Tünellerde Kavis Yarıçapının Karbondioksit Dağılımına Etkisi

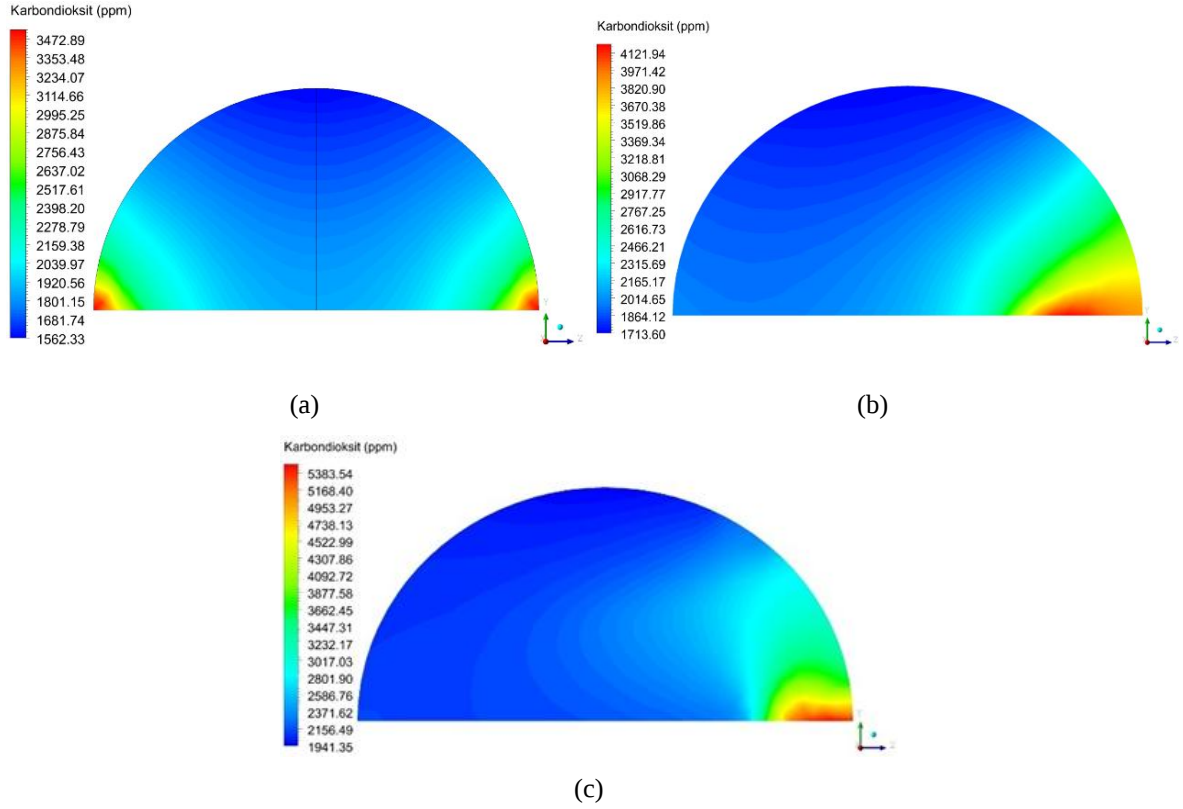
Şekil 24a’da, 950 N fan itme kuvvetinde, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde, $x=150$ m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hattında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki $x=150$ m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 25000 ppm olan karbondioksit seviyeleri 60 dakika sonunda düz tünel, R=950 m yarıçapındaki kavisli tünel ve R=1900 m yarıçapındaki kavisli tünel durumlarında sırasıyla 1800 ppm, 2100 ppm ve 2400 ppm düzeylerine düşmektedir. Şekil 24b’de, 950 N fan itme kuvvetinde, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde, $x=150$ m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hattında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Düz tünel durumunda, karbondioksit seviyesi, tünel orta bölgesinde düşük ve tünel duvarlarında yüksek değerler alarak simetrik bir görüntü oluşturmaktadır. Kavis etkisi nedeniyle, karbondioksit değerleri tünel kesitinin dış bükey tarafındaki sol bölgesinde düşük olmakta, iç bükey taraftaki sağ bölgesinde ise tünel duvarında en büyük değerlere ulaşacak şekilde artmaktadır. Maksimum karbondioksit değeri tünelin iç bükey tarafındaki duvarında R=1900 m yarıçapındaki kavis durumunda 4000 ppm olarak hesaplanmaktadır. Şekil 24c’de, 950 N fan itme kuvvetinde, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde, $x=150$ m istasyonunda başlangıçta 25000 ppm düzeyinde olan karbondioksit seviyelerinin 60 dakika boyunca tünel hacmi içerisindeki değişimleri görülmektedir. 60 dakika sonunda karbondioksit düzeyleri, düz tünel, 950 m yarıçap değerlerine sahip kavisli tünel ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli tünel durumlarında sırasıyla 4600 ppm,

4700 ppm ve 5600 ppm olmaktadır. Tünel hacmi içerisinde karbondioksit seviyesindeki azalmada kavis yarıçapındaki değişimin etkili olmadığı görülmektedir. Tünel geometrileri karşılaştırıldığında tünel hacminde oluşan karbondioksit seviyesini azaltmada düz tüneldeki fan kullanımının biraz daha etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 24. 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerde karbondioksit profilleri (a) H1 hattında karbondioksit değerleri (b) W2 hattında karbondioksit değerleri (c) Karbondioksit değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 25’de, 950 N fan itme kuvvetinde, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde, x=150 m istasyonunda tünel en kesitlerinde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir. Düz tünel durumunda fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır. Fan ve kavis etkisiyle yaya seviyesinin iç bükey tarafındaki tünel duvarına yakın bölge hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır. Maksimum karbondioksit değeri tünelin iç bükey tarafındaki duvarında R=1900 m yarıçapındaki kavis durumunda 5400 ppm olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 25. $x=150$ m’de 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerde karbondioksit dağılımları (a) Düz tünel (b) $R=950$ m yarıçapa sahip kavisli tünel (c) $R=1900$ m yarıçapa sahip kavisli tünel

V. 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, tünel içerisinde taşıtların olmadığı tek fanlı durumda, 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 fan itme kuvvetinin 950 N değeri için zaman bağımlı sayısal çözümlerle incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Taşıtsız fanlı kavisli tünellerde hız değerleri iç bükey tarafta daha yüksek, dış bükey tarafta ise daha düşük olmaktadır.
- Taşıtsız fanlı kavisli tünellerde, kavis etkisi nedeniyle, karbondioksit değerleri tünel kesitinin dış bükey tarafındaki sol bölgesinde düşük, iç bükey tarafındaki sağ bölgesinde büyük olmaktadır.
- Hem düz tünelde hem de kavisli tünellerde 60 dakika sonunda karbondioksit seviyeleri yaklaşık 5000 ppm düzeyine düşmektedir.
- Tünel hacmi içerisinde karbondioksit seviyelerindeki azalmada kavis yarıçapındaki değişim belirgin bir etki oluşturmamakta ancak 1900 m kavis yarıçapına sahip tünel durumunda karbondioksit değerleri daha yüksek olmaktadır.
- Sayısal çalışmada kullanılan türbülans modelleri değerlendirildiğinde Standart k- ϵ modeli ile elde edilen sonuçlar deneysel verilerle iyi bir uyum göstermektedir.
- Kavis yarıçapı etkisinin yeni çalışmalarla daha fazla kavis yarıçapı değeri için kapsamlı incelenmesi, karbondioksitin tünelden uzaklaştırılması açısından en uygun kavis yarıçapının belirlenmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Sekularac M., & Janković N. (2018). Experimental and numerical analysis of flow field and ventilation performance in a traffic tunnel ventilated by axial fans. *Theoretical and Applied Mechanics*, 45(2), 151-165.
- [2] Chen T., Li Y., Xu Z., Kong J., Liang Y., Wang B. & Fan C. (2019). Study of the optimal pitch angle of jet fans in road tunnels based on turbulent jet theory and numerical simulation. *Building and Environment*, 165, 106390.
- [3] Myrvang T., & Khawaja H. (2018). Validation of air ventilation in tunnels, using experiments and computational fluid dynamics, *Int. Jnl. Of Multiphysics*, 12(3), 295-311.
- [4] Zhao S., Xue P., Xie J., Wang Y., Jiang Z., & Liu J. (2022). Optimal pitch angle of jet fans based on air age evaluation for highway tunnel ventilation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 228, 105088.
- [5] Wang F., Wang M., He S., Zhang J., & Deng Y. (2010). Computational study of effects of jet fans on the ventilation of a highway curved tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 382-390.
- [6] Pei G., & Pan J. (2014). Numerical study on different series modes of jet fan in a longitudinal tunnel ventilation system. *Mathematical Problems In Engineering*, 2014(1), 194125.
- [7] Eftekharian E., Dastan A., Abouali O., Meigolinedjad J., & Ahmadi G. (2014). A numerical investigation into the performance of two types of jet fans in ventilation of an urban tunnel under traffic jam condition. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44, 56-67.
- [8] 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.
- [9] Zarnaghsh A., Abouali O., Emdad H., & Ahmadi G. (2019). A numerical study of the train-induced unsteady airflow in a tunnel and its effects on the performance of jet fans. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 187, 1-14.
- [10] De Fré R., Bruynseraede P., & Kretschmar J.G. (1994). Air pollution measurements in traffic tunnels. *Environmental Health Perspectives*, 102(4), 31-37.
- [11] Luther M.B., Horan P., & Tokede O. (2018). Investigating CO₂ concentration and occupancy in school classrooms at different stages in their life cycle. *Architectural Science Review*, 61(1-2), 83-95.
- [12] Wei C., & Wang M. (2020). Spatial distribution of greenhouse gases (CO₂ and CH₄) on expressways in the megacity Shanghai, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 31143-31152.
- [13] Ren J., He J., Kong X., Xu W., Kang Y., Yu Z., & H. Li, (2022). A field study of CO₂ and particulate matter characteristics during the transition season in the subway system in Tianjin, China. *Energy and Buildings*, 254, 111620.
- [14] Yang H., Wang H., & Wu Y. (2022). Analysis of Dynamic Characteristics of CO₂ Concentration in Subway Cars. In *E3S Web of Conferences EDP Science*, 16-9 September, China, 356.
- [15] Tao Y., Dong J., Pan X., Xiao Y., & Tu J. (2017). Investigation of the channelling effect on pollutants dispersion between adjacent roadway tunnels, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14, 2733-2744.
- [16] Sun H., Owen J.S., Almazmumi S., Liu C., Mohammadi M., Dik A., & Calautit J. K. (2024). Pollutant cross-transmission in courtyard buildings: wind tunnel experiments and computational fluid dynamics (CFD) evaluation. *Building and Environment*, 264, 111919.
- [17] Kim D. H., Gautam M., & Gera D. (2001). On the prediction of concentration variations in a dispersing heavy duty truck exhaust plume using k-ε turbulent closure. *Atmospheric Environment*, 35(31), 5267-5275.
- [18] Bari S., & Naser J. (2010). Simulation of airflow and pollution levels caused by severe traffic jam in a road tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(1), 70-77.
- [19] 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.
- [20] Tan C., Liu Y., & Wang T. (2017). 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*, 24-25 May, Thailand.
- [21] Canitz G., Ciesta C., Green K., Sanders J., Valencia J., Willingham J., & Fonseca D. (2024). Capturing CO₂ emissions in The George C. Wallace Tunnel: a case study. *Intelligent Control and Automation*, 15(3), 83-94.
- [22] Chen T., Zhou D., Lu Z., Li Y., Xu Z., Wang B. & Fan C. (2021). Study of the applicability and optimal arrangement of alternative jet fans in curved road tunnel complexes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108, 103721.
- [23] Yin M., Hu H., Wu K., Wei Y., Zhang X., Zhu K. & Yan X. (2021). Computational study on effects of jet fans to traffic force in highway tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 118, 104155.
- [24] Yan G., Wang M., Yan T. & Qin P. (2022). Effects of traffic patterns on vehicle pollutant emission factors in road tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 130, 104740.

- [25] Song Y., Sun M. & Tao C. (2025). Numerical study on the vehicle exhaust dispersion in a curved tunnel: Effects of the tunnel radius and tilt angle of jet fan. *Indoor and Built Environment*, 34 (3), 104740.
- [26] Launder B.E., & Spalding D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269-289.
- [27] 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.
- [28] He H. D., Shi W., & Lu W. Z. (2017). Investigation of exhaust gas dispersion in the near-wake region of a light-duty vehicle. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31, 775-783.