

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KARAYOLLARI TÜNELLERİNDE TAŞIT EGZOZUNDAN**  
**KAYNAKLANAN CO VE CO<sub>2</sub> DAĞILIMLARININ İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Kerim SÖNMEZ**

**ŞUBAT 2025**  
**TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KARAYOLLARI TÜNELLERİNDE TAŞIT EGZOZUNDAN**  
**KAYNAKLANAN CO VE CO<sub>2</sub> DAĞILIMLARININ İNCELENMESİ**

**Kerim SÖNMEZ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 / 02/ 2025**

**Tezin Savunma Tarih : 28 / 02/ 2025**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yücel ÖZMEN**

**Trabzon 2025**

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada, Karayolları tünellerinde taşıt egzozundan kaynaklanan CO ve CO<sub>2</sub> dağılımları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Tez çalışmam boyunca beni destekleyen, bilgi ve tecrübesini esirgemeyerek bana yol gösteren, çalışmamın her anında bir eli üzerimde olan, akademik yaşantımda rol model edindiğim saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Yücel ÖZMEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez izleme komitesinde yer alan bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren saygıdeğer Prof. Dr. Ertan BAYDAR'a ve Dr. Öğr. Üyesi Erhan AKSU'ya da teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması sürecinde saha çalışmalarımda sürekli yanımda olan ve veri almama yardımcı olan Karayolları 10.Bölge Müdürlüğü Tünel Bakım İşletme mühendisi Kutluhan ALTUNKAYA'ya, değerli önerileri ve yönlendirmeleriyle destek olan Arş. Gör. Dr. Tekmile CÜREBAL ve Arş. Gör. Aleyna AĞIRMAN KALÇA'ya, çok kıymetli çalışma arkadaşlarım KTÜ TTM ekibine teşekkürlerimi bir borç biririm.

Tez çalışmam sırasında beni daima motive eden ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli büyüğüm Prof. Dr. Osman BEKTAŞ'a, kayın annem ve babam Ayla-Şevki KOCABAŞ'a, annem ve babam Nuran-Kemal SÖNMEZ'e sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman enerjisiyle ve güler yüzüyle yanımda olan, sevgisini ve desteğini esirgemeyen, çalışmalarım boyunca sabırla beni destekleyen ve motive eden sevgili eşim Merve SÖNMEZ'e sonsuz teşekkür ederim.

Kerim SÖNMEZ

Trabzon 2025

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Karayolları Tünellerinde Taşıt Egzozundan Kaynaklanan CO ve CO<sub>2</sub> Dağılımlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Yücel ÖZMEN’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/02/2025



Kerim SÖNMEZ

## İÇİNDEKİLER

|                                                          | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|----------------------------------------------------------|------------------------|
| ÖNSÖZ.....                                               | III                    |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....                                | IV                     |
| İÇİNDEKİLER.....                                         | V                      |
| ÖZET .....                                               | VIII                   |
| SUMMARY .....                                            | IX                     |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                     | X                      |
| TABLolar DİZİNİ.....                                     | XXI                    |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                    | XXII                   |
| 1. GENEL BİLGİLER.....                                   | 1                      |
| 1.1. Giriş.....                                          | 1                      |
| 1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı .....                        | 2                      |
| 1.2.1. Amaç .....                                        | 2                      |
| 1.2.2. Kapsam.....                                       | 3                      |
| 1.3. Çalışmanın Bilimsel Önemi .....                     | 4                      |
| 1.4. Literatür Araştırması .....                         | 4                      |
| 1.4.1. Tünel İçerisinde Karbonmonoksit Dağılımları ..... | 5                      |
| 1.4.2. Tünel İçerisinde Karbondioksit Dağılımları .....  | 7                      |
| 1.4.3. Tünel İçerisinde Fan ile Havalandırma .....       | 10                     |
| 1.4.4. Tünel İçerisinde Yangın.....                      | 12                     |
| 1.5. Karayolu Tünelleri .....                            | 13                     |
| 1.6. Hava Kalitesi Parametreleri.....                    | 16                     |
| 1.6.1. İç Ortam Hava Kalitesi .....                      | 16                     |
| 1.6.2. Dış Ortam Hava Kalitesi .....                     | 17                     |
| 1.7. Hava Kirliliği.....                                 | 20                     |
| 1.7.1. Kirletici Gazlar.....                             | 21                     |
| 1.8. Havalandırma Sistemleri .....                       | 26                     |
| 1.8.1. Doğal Havalandırma Sistemleri .....               | 27                     |
| 1.8.2. Mekanik Havalandırma Sistemleri.....              | 27                     |
| 1.8.3. Hibrit Havalandırma Sistemleri .....              | 29                     |
| 1.8.4. Karayolu Tünel Havalandırma Sistemleri.....       | 30                     |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....                                               | 31  |
| 2.1. Deneysel Çalışma .....                                              | 31  |
| 2.1.1. Karbondioksit Ölçümü .....                                        | 31  |
| 2.2. Sayısal Çalışma .....                                               | 33  |
| 2.2.1. Hareket Denklemleri .....                                         | 33  |
| 2.2.2. Türbülans Modelleri.....                                          | 34  |
| 2.2.3. Konsantrasyon Denklemleri.....                                    | 38  |
| 2.2.4. Akış Alanı .....                                                  | 38  |
| 2.2.5. Ağ Yapısı .....                                                   | 44  |
| 2.2.6. Çözüm Metodu.....                                                 | 48  |
| 2.2.7. Türbülans Modeli Etkisi.....                                      | 48  |
| 2.2.8. Sayısal Modelin Doğrulanması .....                                | 49  |
| 3. BULGULAR.....                                                         | 53  |
| 3.1. Tünel İçerisinde Hız Dağılımları.....                               | 54  |
| 3.1.1. Taşıtlı Düz Tünel .....                                           | 54  |
| 3.1.2. Taşıtlı Kavisli Tünel.....                                        | 64  |
| 3.1.3. Taşıtsız Fanlı Düz Tünel .....                                    | 69  |
| 3.1.4. Taşıtsız Fanlı Kavisli Tünel .....                                | 79  |
| 3.1.5. Taşıtsız Fanlı ve Difüzörlü Düz Tünel.....                        | 82  |
| 3.2. Tünel İçerisinde Karbonmonoksit (CO) Dağılımları .....              | 86  |
| 3.2.1. Taşıtlı Düz Tünel .....                                           | 87  |
| 3.2.2. Taşıtlı Kavisli Tünel.....                                        | 96  |
| 3.2.3. Taşıtsız Fanlı Düz Tünel .....                                    | 101 |
| 3.2.4. Taşıtsız Fanlı Kavisli Tünel .....                                | 111 |
| 3.2.5. Taşıtsız Fanlı ve Difüzörlü Düz Tünel.....                        | 115 |
| 3.3. Tünel İçerisinde Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) Dağılımları ..... | 120 |
| 3.3.1. Taşıtlı Düz Tünel .....                                           | 120 |
| 3.3.2. Taşıtlı Kavisli Tünel.....                                        | 129 |
| 3.3.3. Taşıtsız Fanlı Düz Tünel .....                                    | 134 |
| 3.3.4. Taşıtsız Fanlı Kavisli Tünel .....                                | 144 |
| 3.3.5. Taşıtsız Fanlı ve Difüzörlü Düz Tünel.....                        | 148 |
| 4. İRDELEME .....                                                        | 153 |
| 4.1. Tünel İçerisindeki Hız Dağılımları.....                             | 153 |
| 4.1.1. Düz Tünelde Taşıt Hızı Etkisi.....                                | 153 |

|        |                                                                             |     |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.2. | Taşıtlı Kavisli Tünellerde Kavis Etkisi .....                               | 155 |
| 4.1.3. | Taşıtsız Fanlı Düz Tünelde İtme Kuvveti Etkisi.....                         | 157 |
| 4.1.4. | Taşıtsız Fanlı Düz Tünelde Fan Sayısı Etkisi .....                          | 159 |
| 4.1.5. | Taşıtsız Fanlı Kavisli Tünelde Kavis Etkisi.....                            | 161 |
| 4.1.6. | Taşıtsız Fanlı ve Difüzörlü Düz Tünelde Difüzör Kanat Açısı<br>Etkisi ..... | 163 |
| 4.2.   | Tünel İçerisindeki Karbonmonoksit Dağılımları .....                         | 165 |
| 4.2.1. | Düz Tünelde Taşıt Hızı Etkisi.....                                          | 165 |
| 4.2.2. | Taşıtlı Kavisli Tünellerde Kavis Etkisi .....                               | 167 |
| 4.2.3. | Taşıtsız Fanlı Düz Tünelde İtme Kuvveti Etkisi.....                         | 169 |
| 4.2.4. | Taşıtsız Fanlı Düz Tünelde Fan Sayısı Etkisi .....                          | 171 |
| 4.2.5. | Taşıtsız Fanlı Kavisli Tünelde Kavis Etkisi.....                            | 174 |
| 4.2.6. | Taşıtsız Fanlı ve Difüzörlü Düz Tünelde Difüzör Kanat Açısı<br>Etkisi ..... | 177 |
| 4.3.   | Tünel İçerisindeki Karbondioksit Dağılımları .....                          | 179 |
| 4.3.1. | Düz Tünelde Taşıt Hızı Etkisi.....                                          | 179 |
| 4.3.2. | Taşıtlı Kavisli Tünellerde Kavis Etkisi.....                                | 182 |
| 4.3.3. | Taşıtsız Fanlı Düz Tünelde İtme Kuvveti Etkisi.....                         | 183 |
| 4.3.4. | Taşıtsız Fanlı Düz Tünelde Fan Sayısı Etkisi .....                          | 186 |
| 4.3.5. | Taşıtsız Fanlı Kavisli Tünelde Kavis Etkisi.....                            | 188 |
| 4.3.6. | Taşıtsız Fanlı ve Difüzörlü Düz Tünelde Difüzör Kanat Açısı<br>Etkisi ..... | 191 |
| 5.     | SONUÇLAR.....                                                               | 194 |
| 6.     | ÖNERİLER.....                                                               | 196 |
| 7.     | KAYNAKLAR .....                                                             | 197 |
|        | ÖZGEÇMİŞ.....                                                               | 204 |

Doktora Tezi

## ÖZET

### KARAYOLLARI TÜNELLERİNDE TAŞIT EGZOZUNDAN KAYNAKLANAN CO VE CO<sub>2</sub> DAĞILIMLARININ İNCELENMESİ

Kerim SÖZMEZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Yücel ÖZMEN  
2025, 228 Sayfa

Bu çalışmada, karayolları tünellerindeki taşıtların egzozlarından yayılan kirletici gazlardan CO'nun ve CO<sub>2</sub>'nin tünel içerisindeki dağılımları incelenmiştir. İlk önce Akyazı Tüneli'nde CO ölçümleri ile sınırlı tutulan deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, 500 m uzunluğundaki iki şeritli tünellerde, taşıtlı ve taşıtsız durumlar için tünel içerisindeki üç boyutlu akış alanları zaman bağımlı olarak Standart k-ε türbülans modeli ile çözülmüştür. Sayısal çalışmaların ilk aşamasında, içerisinde taşıt bulunan düz tünelde farklı taşıt hızları için ve R=950 m ve R=1900 m yarıçaplarına sahip kavisli tünellerde taşıt hızının 70 km/saat değeri için tünel içerisindeki CO ve CO<sub>2</sub> dağılımları elde edilmiştir. Sayısal çalışmaların taşıtsız durumları içeren ikinci aşamasında ise, tünel girişinden 100 m ileriye yerleştirilmiş fan durumunda, fan itme kuvvetinin, tünel kavis durumunun, fan sayısının ve fana eklenmiş difüzör durumunda difüzör kanat açısının tünel içerisindeki CO ve CO<sub>2</sub> düzeylerine etkisi incelenmiştir. Taşıtsız fanlı düz tünelde, fan itme kuvveti ve fan sayısı arttıkça CO ve CO<sub>2</sub> değerleri azalmaktadır. Taşıtsız fanlı düz tünelde, tek fanlı durumda 2035 N itme kuvvetinde ve üç özdeş fanlı durumda 950 N itme kuvvetinde tünel hacmindeki CO ve CO<sub>2</sub> seviyeleri yaklaşık aynı oranlarda azalmaktadır. Sayısal çalışmada kullanılan Standart k-ε modeli deneysel verilerle iyi bir uyum göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Düz tünel, Kavisli tünel, Taşıt hızı, Fan itme kuvveti, Difüzör kanat açısı, Karbonmonoksit dağılımı, Karbondioksit dağılımı, Standart k-ε türbülans modeli

PhD. Thesis

## SUMMARY

### INVESTIGATION OF CO AND CO<sub>2</sub> DISTRIBUTIONS FROM VEHICLE EXHAUST IN HIGHWAY TUNNELS

Kerim SÖNMEZ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program

Supervisor: Prof. Yücel ÖZMEN

2025, 228 Pages

In this study, the distribution of CO and CO<sub>2</sub>, which are pollutant gases emitted from the exhausts of vehicles in highway tunnels, in the tunnel was investigated. Firstly, an experimental study limited to CO<sub>2</sub> measurements was carried out in Akyazı Tunnel. Then, three-dimensional unsteady flow fields in 500 m long two-lane tunnels with and without vehicles were solved with the Standard k- $\epsilon$  turbulence model. In the first stage of the numerical studies, CO and CO<sub>2</sub> distributions inside the tunnel were obtained for different vehicle speeds in straight tunnels with vehicles and curved tunnels with radius of R=950 m and R=1900 m for a vehicle speed of 70 km/h. In the second stage of the numerical studies, the effects of fan thrust, tunnel curvature, number of fans and diffuser blade angle on CO and CO<sub>2</sub> levels in the tunnel were investigated in the case of a fan placed 100 m from the tunnel entrance. In the straight tunnel with vehicles, CO and CO<sub>2</sub> values decrease as the vehicle speed increases, and in the curved tunnels with vehicles, CO and CO<sub>2</sub> values decrease with the effect of curvature. CO and CO<sub>2</sub> values decrease as the fan thrust force and number of fans increase in the straight tunnel with fan without vehicles. In the straight tunnel with a single fan at a thrust force of 2035 N and with three identical fans at a thrust force of 950 N, CO and CO<sub>2</sub> levels in the tunnel volume decrease at approximately the same rates. The Standard k- $\epsilon$  model used in numerical study shows a good agreement with the experimental data.

**Key Words:** Straight tunnel, Curved tunnel, Vehicle speed, Fan thrust, Diffuser blade angle, Carbon monoxide distribution, Carbon dioxide distribution, Standard k- $\epsilon$  turbulence model

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                               | <u>Sayfa No</u> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 1. Karayolu tünellerinin tipik geometrik yapıları (a) Dikdörtgen kesit (b) Dairesel kesit (c) Kemerli kesit .....                                       | 14              |
| Şekil 2. CO <sub>2</sub> seviyesi ile havalandırma arasındaki ilişki.....                                                                                     | 24              |
| Şekil 3. CO <sub>2</sub> gazının farklı konsantrasyonlardaki zarar düzeyleri.....                                                                             | 25              |
| Şekil 4. Enine havalandırma sistemi .....                                                                                                                     | 28              |
| Şekil 5. Yarı enine havalandırma sistemi (a) Besleme (b) Egzoz.....                                                                                           | 29              |
| Şekil 6. İç hava kalitesi ölçüm cihazı ve probu.....                                                                                                          | 32              |
| Şekil 7. Duraklama cebinde karbondioksit değerlerinin yükseklikle değişimi...                                                                                 | 32              |
| Şekil 8. Tünel boyunca karbondioksit değerleri.....                                                                                                           | 33              |
| Şekil 9. Taşıtlı tünellerde örnek akış alanı görüntüleri (a) Düz tünel (b) Kavisli tünel.....                                                                 | 39              |
| Şekil 10. Taşıtsız fanlı tünellerde örnek akış alanı görüntüleri (a) Düz tünel (b) Kavisli tünel.....                                                         | 41              |
| Şekil 11. Şekil 11. Özdeş fanların konumu ve difüzör kesit görüntüsü (a) Tek Fan (b) İki Özdeş Fan (c) Üç Özdeş Fan (d) Difüzör.....                          | 42              |
| Şekil 12. Tünel en kesitinde tanımlanmış çizgisel hatlar (a) Yatay hatlar (b) Düşey hatlar.....                                                               | 43              |
| Şekil 13. Örnek ağ yapısı görüntüleri (a, b) Taşıtlı tünel (c) Fanlı tünel.....                                                                               | 44              |
| Şekil 14. İterasyon sayısı etkisi.....                                                                                                                        | 46              |
| Şekil 15. Zaman adımı etkisi.....                                                                                                                             | 47              |
| Şekil 16. Ağ yoğunluğunun çözüm üzerindeki etkisi.....                                                                                                        | 48              |
| Şekil.17. Türbülans modeli etkisi.....                                                                                                                        | 49              |
| Şekil 18. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması (a) Düşey doğrultu (b) Yatay doğrultu.....                                                         | 50              |
| Şekil 19. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması (a) Hız dağılımı (b) Karbonmonoksit dağılımı (c) Karbondioksit dağılımı.....                       | 51              |
| Şekil 20. 0 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız profilleri (a) H2 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri ..... | 55              |

|           |                                                                                                                                                               |    |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 21. | 0 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                             | 56 |
| Şekil 22. | 30 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız profilleri (a) H2 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri .....          | 57 |
| Şekil 23. | 30 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                            | 57 |
| Şekil 24. | 50 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız profilleri (a) H2 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri.....           | 59 |
| Şekil 25. | 50 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                            | 59 |
| Şekil 26. | 70 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız profilleri (a) H2 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri.....           | 61 |
| Şekil 27. | 70 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                            | 61 |
| Şekil 28. | 90 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız profilleri (a) H2 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri.....           | 62 |
| Şekil 29. | 90 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                            | 63 |
| Şekil 30. | R=950 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında hatlarındaki tünel içerisindeki H1 hatlarındaki hız profilleri.....                                                    | 65 |
| Şekil 31. | R=950 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında hatlarındaki tünel içerisindeki W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız profilleri (a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m.....  | 65 |
| Şekil 32. | R=950 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında tünel içerisindeki hız dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                | 66 |
| Şekil 33. | R=1900 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında tünel içerisindeki H1 hatlarındaki hız profilleri.....                                                                | 67 |
| Şekil 34. | R=1900 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında hatlarındaki tünel içerisindeki W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız profilleri (a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m..... | 68 |
| Şekil 35. | R=1900 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında hatlarındaki tünel içerisindeki hız dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m....                   | 69 |
| Şekil 36. | 296 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri.....                                   | 71 |
| Şekil 37. | 296 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                                                             | 71 |
| Şekil 38. | 525 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri.....                                   | 72 |

|           |                                                                                                                                                                  |    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 39. | 525 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                                            | 73 |
| Şekil 40. | 950 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri.....                                      | 74 |
| Şekil 41. | 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                                            | 74 |
| Şekil 42. | 2035 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri.....                                     | 75 |
| Şekil 43. | 2035 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                                           | 76 |
| Şekil 44. | 950 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri .....                                     | 77 |
| Şekil 45. | 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                                            | 77 |
| Şekil 46. | 950 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri.....                                      | 78 |
| Şekil 47. | 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                                            | 79 |
| Şekil 48. | $R=950$ m'de ve 950 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri.....                      | 80 |
| Şekil 49. | $R=950$ m'de ve 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                            | 80 |
| Şekil 50. | $R=1900$ m'de ve 950 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri.....                     | 81 |
| Şekil 51. | $R=1900$ m'de ve 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                           | 82 |
| Şekil 52. | $10^\circ$ difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri..... | 83 |
| Şekil 53. | $10^\circ$ difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                       | 83 |
| Şekil 54. | $20^\circ$ difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri..... | 84 |
| Şekil 55. | $20^\circ$ difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                       | 85 |
| Şekil 56. | $30^\circ$ difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri..... | 86 |
| Şekil 57. | $30^\circ$ difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                       | 86 |

|           |                                                                                                                                                                   |     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 58. | 0 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit profilleri (a) H2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri.....  | 88  |
| Şekil 59. | 0 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                                         | 88  |
| Şekil 60. | 30 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit profilleri (a) H2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri..... | 90  |
| Şekil 61. | 30 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                                        | 90  |
| Şekil 62. | 50 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit profilleri (a) H2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri..... | 92  |
| Şekil 63. | 50 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                                        | 92  |
| Şekil 64. | 70 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit profilleri (a) H2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri..... | 93  |
| Şekil 65. | 70 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                                        | 94  |
| Şekil 66. | 90 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit profilleri (a) H2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri..... | 95  |
| Şekil 67. | 90 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                                        | 96  |
| Şekil 68. | R=950 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hatlarındaki karbonmonoksit profilleri.....                                                                             | 97  |
| Şekil 69. | R=950 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit profilleri (a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m.....                           | 98  |
| Şekil 70. | 950 m yarıçapa sahip kavisli tünelde 70 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                   | 99  |
| Şekil 71. | R=1900 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hatlarındaki karbonmonoksit profilleri.....                                                                            | 100 |
| Şekil 72. | R=1900 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit profilleri (a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m. ....                         | 100 |
| Şekil 73. | 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünelde 70 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                  | 101 |

|           |                                                                                                                                                                             |     |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 74. | 296 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri.....                | 103 |
| Şekil 75. | 296 N itme kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                                                                | 103 |
| Şekil 76. | 525 N/m <sup>3</sup> itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri..... | 104 |
| Şekil 77. | 525 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbonmonoksit dağılımları(a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                                   | 105 |
| Şekil 78. | 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri.....                | 106 |
| Şekil 79. | 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                                                                | 106 |
| Şekil 80. | 2035 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri.....               | 107 |
| Şekil 81. | 2035 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbonmonoksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                                 | 108 |
| Şekil 82. | 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri.....                | 109 |
| Şekil 83. | 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                                                                | 109 |
| Şekil 84. | 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri.....                | 110 |
| Şekil 85. | 950 N itki kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                                                                | 111 |
| Şekil 86. | R=950 m’de 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri.....     | 112 |
| Şekil 87. | 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde çalışan 950 N itme kuvveti kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbonmonoksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....    | 113 |
| Şekil 88. | R=1900 m’de 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri.....    | 114 |
| Şekil 89. | 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde çalışan 950 N itme kuvveti kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbonmonoksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....   | 114 |

|            |                                                                                                                                                                                             |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 90.  | 10° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri.....  | 116 |
| Şekil 91.  | 10° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                                                  | 116 |
| Şekil 92.  | 20° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri.....  | 117 |
| Şekil 93.  | 20° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                                                  | 118 |
| Şekil 94.  | 30° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri ..... | 119 |
| Şekil 95.  | 30° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                                                  | 119 |
| Şekil 96.  | 0 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit profilleri (a) H2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....                               | 121 |
| Şekil 97.  | 0 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları(a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                                                                     | 122 |
| Şekil 98.  | 30 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit profilleri (a) H2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....                              | 123 |
| Şekil 99.  | 30 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                                                                   | 123 |
| Şekil 100. | 50 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit profilleri (a) H2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....                              | 124 |
| Şekil 101. | 50 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                                                                   | 125 |
| Şekil 102. | 70 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit profilleri (a) H2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....                              | 126 |
| Şekil 103. | 70 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                                                                   | 127 |
| Şekil 104. | 90 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit profilleri (a) H2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....                              | 128 |
| Şekil 105. | 90 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....                                                                                   | 129 |

|            |                                                                                                                                                            |     |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 106. | R=950 m’de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hatlarındaki karbondioksit profilleri.....                                                                       | 130 |
| Şekil 107. | R=950 m’de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit profilleri (a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m.....                     | 130 |
| Şekil 108. | 950 m yarıçapa sahip kavisli tünelde 70 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....             | 131 |
| Şekil 109. | R=1900 m’de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hatlarındaki karbondioksit profilleri.....                                                                      | 133 |
| Şekil 110. | R=1900 m’de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit profilleri (a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m.....                    | 133 |
| Şekil 111. | 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünelde 70 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları (a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m.....            | 134 |
| Şekil 112. | 296 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....  | 136 |
| Şekil 113. | 296 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbondioksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                  | 136 |
| Şekil 114. | 525 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....  | 137 |
| Şekil 115. | 525 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbondioksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                  | 138 |
| Şekil 116. | 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....  | 139 |
| Şekil 117. | 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbondioksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                  | 139 |
| Şekil 118. | 2035 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri..... | 140 |
| Şekil 119. | 2035 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbondioksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                                 | 141 |
| Şekil 120. | 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....  | 142 |
| Şekil 121. | 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş fanın oluşturduğu karbondioksit dağılımları (a) x=50 m (b) x=150 m.....                                            | 142 |

|            |                                                                                                                                                                                                |     |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 122. | 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....                                      | 143 |
| Şekil 123. | 950 N itki kuvvetinde karbondioksit dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                                                                | 144 |
| Şekil 124. | $R=950$ m’de 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....                         | 145 |
| Şekil 125. | $R=950$ m’de 950 N itme kuvveti kuvvetinde karbondioksit dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                                           | 146 |
| Şekil 126. | $R=1900$ m’de 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....                        | 147 |
| Şekil 127. | $R=1900$ m’de 950 N itme kuvvetinde karbondioksit dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                                                  | 147 |
| Şekil 128. | $10^\circ$ difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri..... | 149 |
| Şekil 129. | $10^\circ$ difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbondioksit dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                           | 149 |
| Şekil 130. | $20^\circ$ difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri..... | 150 |
| Şekil 131. | $20^\circ$ difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbondioksit dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                           | 151 |
| Şekil 132. | $30^\circ$ difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri..... | 152 |
| Şekil 133. | $30^\circ$ difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbondioksit dağılımları (a) $x=50$ m (b) $x=150$ m.....                                                                           | 152 |
| Şekil 134. | Farklı taşıt hızlarındaki tünel içerisindeki hız profilleri (a) H2 hatlarındaki hız değerleri (b) W2 hatlarındaki hız değerleri.....                                                           | 154 |
| Şekil 135. | $x=250$ m’de farklı taşıt hızlarında tünel içerisindeki hız dağılımları (a) 0 km/saat (b) 30 km/saat (c) 50 km/saat (d) 70 km/saat (e) 90 km/saat .....                                        | 154 |
| Şekil 136. | 70 km/saat taşıt hızında düz ve kavisli tünellerdeki tünel içerisindeki hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W2 hatlarındaki hız değerleri.....                                | 156 |
| Şekil 137. | $x=250$ m’de 70 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız dağılımları (a) Düz tünel (b) $R=950$ m yarıçapındaki kavisli tünel (c) $R=1900$ m yarıçapındaki kavisli tünel.....             | 156 |

|            |                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 138. | Farklı fan itme kuvvetlerinde hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W2 hatlarındaki hız değerleri .....                                                                                                                                    | 158 |
| Şekil 139. | $x=150$ m’de farklı fan itme kuvvetlerinde hız dağılımları (a) 296 N (b) 525 N (c) 950 N (d) 2035 N.....                                                                                                                                                  | 158 |
| Şekil 140. | Farklı fan sayılarında hız profilleri (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W2 hatlarındaki hız değerleri.....                                                                                                                                            | 160 |
| Şekil 141. | $x=150$ m’ farklı fan sayılarında hız dağılımları (a) Tek fan (b) iki özdeş fan (c) üç özdeş fan.....                                                                                                                                                     | 160 |
| Şekil 142. | 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki hız profilleri H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W2 hatlarındaki hız değerleri.....                                                                                                                 | 162 |
| Şekil 143. | $x=150$ m’de 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki hız dağılımları (a) Düz tünel (b) $R=950$ m yarıçapa sahip kavisli tünel (c) $R=1900$ m yarıçapa sahip kavisli tünel.....                                                              | 162 |
| Şekil 144. | 950 N fan itme kuvvetinde difüzörsüz ve difüzörlü fanlı tünellerdeki hız dağılımları (a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W2 hatlarındaki hız değerleri .....                                                                                            | 164 |
| Şekil 145. | $x = 150$ m mesafede 950 N fan itme kuvvetinde difüzörsüz ve farklı difüzör açısına sahip fanlı tünellerdeki hız dağılımları (a) Difüzörsüz fanlı (b) $10^0$ kanat açılı difüzörlü (c) $20^0$ kanat açılı difüzörlü (d) $30^0$ kanat açılı difüzörlü..... | 164 |
| Şekil 146. | Farklı taşıt hızlarındaki karbonmonoksit profilleri (a) H2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri.....                                                                                                        | 166 |
| Şekil 147. | $x=250$ m’de farklı taşıt hızlarındaki karbonmonoksit dağılımları (a) 0 km/saat (b) 30 km/saat (c) 50 km/saat (d) 70 km/saat (e) 90 km/saat.....                                                                                                          | 166 |
| Şekil 148. | 70 km/saat taşıt hızlarındaki düz ve kavisli tünellerdeki Karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri.....                                                                        | 168 |
| Şekil 149. | $x=250$ m’de 70 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları a) Düz tünel (b) $R=950$ m yarıçapındaki kavisli tünel (c) $R=1900$ m yarıçapındaki kavisli tünel.....                                                                                 | 168 |
| Şekil 150. | Farklı fan itme kuvvetlerinde karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (c) Karbonmonoksit değerlerinin zamanla değişimi.....                                                   | 170 |
| Şekil 151  | $x=150$ m’de farklı fan itme kuvvetlerinde karbonmonoksit dağılımları (a) 296 N (b) 525 N (c) 950 N (d) 2035 N.....                                                                                                                                       | 171 |
| Şekil 152. | Farklı fan sayılarında karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (c) Karbonmonoksit değerlerinin zamanla değişimi.....                                                          | 172 |
| Şekil 153. | $x=150$ m’ farklı fan sayılarında karbonmonoksit dağılımları (a) Tek fan (b) iki özdeş fan (c) üç özdeş fan.....                                                                                                                                          | 174 |

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 154. | 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki karbonmonoksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (c) Karbonmonoksit değerlerinin zamanla değişimi.....                                      | 175 |
| Şekil 155. | $x=150$ m’de 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki karbonmonoksit dağılımları (a) Düz tünel (b) $R=950$ m yarıçapa sahip kavisli tünel (c) $R=1900$ m yarıçapa sahip kavisli tünel.....                                                              | 176 |
| Şekil 156. | 950 N fan itme kuvvetinde difüzörsüz ve farklı difüzör açısına sahip fanlı tünellerdeki karbonmonoksit dağılımları (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (c) Karbonmonoksit değerlerinin zamanla değişimi.....   | 178 |
| Şekil 157. | $x = 150$ m mesafede 950 N fan itme kuvvetinde difüzörsüz ve farklı difüzör açısına sahip fanlı tünellerdeki karbonmonoksit dağılımları (a) Difüzörsüz fanlı (b) $10^0$ kanat açılı difüzörlü (c) $20^0$ kanat açılı difüzörlü (d) $30^0$ kanat açılı difüzörlü..... | 179 |
| Şekil 158. | Farklı taşıt hızlarındaki karbondioksit profilleri (a) H2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbondioksit değerleri.....                                                                                                                      | 180 |
| Şekil 159. | $x=250$ m’de farklı taşıt hızlarındaki karbondioksit dağılımları (a) 0 km/saat (b) 30 km/saat (c) 50 km/saat (d) 70 km/saat (e) 90 km/saat.....                                                                                                                      | 181 |
| Şekil 160. | 70 km/saat taşıt hızlarındaki düz ve kavisli tünellerdeki karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbondioksit değerleri .....                                                                                     | 182 |
| Şekil 161. | $x=250$ m’de 70 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları (a) Düz tünel (b) $R=950$ m yarıçapındaki kavisli tünel (c) $R=1900$ m yarıçapındaki kavisli tünel.....                                                                                            | 183 |
| Şekil 162. | Farklı fan itme kuvvetlerinde karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (c) Karbondioksit değerlerinin zamanla değişimi.....                                                                  | 184 |
| Şekil 163. | $x=150$ m’de farklı fan itme kuvvetlerinde karbondioksit dağılımları (a) 296 N (b) 525 N (c) 950 N (d) 2035 N.....                                                                                                                                                   | 185 |
| Şekil 164. | Farklı fan sayılarında karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (c) Karbondioksit değerlerinin zamanla değişimi.....                                                                         | 187 |
| Şekil 165. | $x=150$ m’ farklı fan sayılarında karbondioksit dağılımları (a) Tek fan (b) İki özdeş fan (c) Üç özdeş fan.....                                                                                                                                                      | 188 |
| Şekil 166. | 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (c) Karbondioksit değerlerinin zamanla değişimi.....                                          | 189 |

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 167. | x=150 m'de 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki karbondioksit dağılımları (a) Düz tünel (b) R=950 m yarıçapa sahip kavisli tünel (c) R=1900 m yarıçapa sahip kavisli tünel.....                                                               | 190 |
| Şekil 168. | 950 N fan itme kuvvetinde difüzörsüz ve farklı difüzör açısına sahip fanlı tünellerdeki karbondioksit dağılımları (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (c) Karbondioksit değerlerinin zamanla değişimi..... | 192 |
| Şekil 169. | x = 150 m mesafede 950 N fan itme kuvvetinde difüzörsüz ve farklı difüzör açısına sahip fanlı tünellerdeki karbondioksit dağılımları (a) Difüzörsüz fanlı (b) 10° kanat açılı difüzörlü (c) 20° kanat açılı difüzörlü (d) 30° kanat açılı difüzörlü.....       | 193 |



## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                                             | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Tablo 1. Üç farklı tünel kesit tipinin karşılaştırması.....                                 | 39                     |
| Tablo 2. İç Ortam Kirleticileri ve Emisyon Kaynakları.....                                  | 40                     |
| Tablo 3. Karayolu tüneline yer alan hava kalitesi kriterleri.....                           | 41                     |
| Tablo 4. Dış ortam hava kalitesini değerlendirmeye esas kirleticilerin limit değerleri..... | 43                     |
| Tablo 5. Hava Kalitesi İndeksi değerleri.....                                               | 44                     |
| Tablo 6. Ulusal Hava Kalitesi İndeksi limit değerleri.....                                  | 44                     |
| Tablo 7. Hava kirleticilerin insan sağlığı üzerindeki etkileri.....                         | 45                     |
| Tablo 8. Karbonmonoksit miktarının insan üzerindeki süreye bağlı etkisi.....                | 46                     |
| Tablo 9. Kandaki karbonmonoksit düzeyine göre klinik bulgular.....                          | 47                     |

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                        |                                                                |
|------------------------|----------------------------------------------------------------|
| CO                     | : Karbonmonoksit                                               |
| CO <sub>2</sub>        | : Karbondioksit                                                |
| HC                     | : Hidrokarbon                                                  |
| NO <sub>x</sub>        | : Azotoksitler                                                 |
| N                      | : Kuvvet                                                       |
| PM                     | : Partikül Madde                                               |
| HKİ                    | : Hava Kalitesi İndeksi                                        |
| UOB                    | : Uçucu organik bileşikler                                     |
| ppm                    | : Milyonda kısım                                               |
| µg                     | : Mikrogram                                                    |
| cm                     | : Santimetre                                                   |
| m                      | : Metre                                                        |
| km                     | : Kilometre                                                    |
| s                      | : Saniye                                                       |
| $U$                    | : Ortalama hız [m/s]                                           |
| $U_{\infty}$           | : Serbest akış hızı [m/s]                                      |
| $Re$                   | : Reynolds sayısı                                              |
| $k$                    | : Türbülans kinetik enerjisi [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ] |
| $\varepsilon$          | : Yutulma [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]                    |
| $\mu_t$                | : Türbülans viskozitesi [kg/(m·s)]                             |
| $\alpha$               | : Güç kanunu üssü                                              |
| $G$                    | : Türbülans kinetik enerji üretimi                             |
| $S$                    | : Kaynak terimi                                                |
| $C$                    | : Model sabitleri                                              |
| $\sigma_k$             | : $k$ için Prandtl sayısı                                      |
| $\sigma_{\varepsilon}$ | : $\varepsilon$ için Prandtl sayısı                            |
| $\alpha_k$             | : $k$ için ters etkili Prandtl sayısı                          |
| $\omega$               | : Yutulmanın kinetik enerjiye oranı                            |
| $\Gamma$               | : Difüzite terimi                                              |

|        |                                                    |
|--------|----------------------------------------------------|
| $Y_i$  | : Türün kütle kesri                                |
| $J_i$  | : Türün difüzyon akısı                             |
| $R_i$  | : Kimyasal reaksiyonla $i$ türünün net üretim hızı |
| $Sc_t$ | : Türbülanslı Schmidt sayısı                       |
| $L$    | : Uzunluk [m]                                      |
| $W$    | : Genişlik [m]                                     |
| $H$    | : Yükseklik [m]                                    |
| $R$    | : Yarıçap [m]                                      |
| $x$    | : Enine Koordinat                                  |
| $y$    | : Dikey koordinat                                  |
| $z$    | : Yatay koordinat                                  |
| DNS    | : Doğrudan Sayısal Simülasyon                      |
| LES    | : Büyük Girdap Simülasyonu                         |
| RANS   | : Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes                |

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Canlılar, hayatlarını sürdürebilmeleri için temiz havaya ihtiyaç duymaktadır. Solunan havanın gerekli konfor şartlarını sağlaması sağlık açısından son derece önemlidir. Yetişkin bir insanın yaşamını sürdürebilmesi için günde yaklaşık 15 kg havaya ihtiyacı olmaktadır. Fabrikalar, motorlu taşıtlar ve enerji santralleri gibi kaynakların ürettiği zararlı gazların dış ortam havasını kirletmesi nedeniyle insanların dış ortamlarda soludukları havanın kalitesi bozulmaktadır. Bu nedenle hem ulusal hem de küresel ölçekte hava kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

Hem iç ortam hem de dış ortam kirleticileri insan sağlığı için gerekli temiz hava şartlarını bozmaktadır. Konut ve işyeri gibi kapalı ortamlardaki hava, iç mekanlardaki perde, koltuk ve benzeri aksesuarların kirletici etkisi nedeniyle iç ortam havasını kirletmektedir. Fabrikalar, motorlu aletler, kara ve hava taşıtları ve fosil yakıtların kullanıldığı enerji santralleri gibi kirleticiler de dış ortam havasını kirletmektedir.

Bu kirleticiler tüm canlılar için tehlike oluştursa da temiz hava şartlarının sağlanması öncelikli olarak insanların sağlıklı bir şekilde yaşamlarını sürdürmeleri için gerekli olmaktadır. İnsan fizyolojik yapısı gereği nefes alıp verdiğinde kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlarda nefes alışta oksijen tüketilirken, nefes veriş sırasında karbondioksit açığa çıkmakta ve ortama karbondioksit salınımı gerçekleşmektedir.

İnsanlar tarafından solunan hava yapısal olarak % 21 oksijen, % 78 azot, % 0.93 argon, % 0.03 karbondioksit ve diğer gazlardan oluşmaktadır. Önemli bir dış ortam kirleticisi olan motorlu taşıtlar, genellikle fosil yakıtları tüketmekte ve karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO<sub>2</sub>), nitrojen oksitler (NO<sub>x</sub>), hidrokarbonlar (HC) ve partikül madde gibi kirleticileri ortama yaymaktadır. Karayolu ve metro tünellerinde taşıtların egzozlarından yayılan zararlı gazlar nedeniyle tünel içerisindeki ortam havası kirlenmektedir. Ulaşım endüstrisi, fosil yakıtlardan enerji üreten santrallerden sonra karbon emisyonlarının en büyük ikinci nedeni olmaktadır (URL 1). Sağlıklı bir yaşam için insanın olduğu her ortamda ortam konforunun sağlanması gerekmektedir. Günümüzde şehirlerin büyümesiyle birlikte karayolu tünellerinde taşıt yoğunluğu artmakta ve bu durum tünel içerisindeki ortam havasını bozmaktadır. Bu nedenle, tünellerin içerisindeki hava konforunu sağlamak için çeşitli

yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en yaygın olanı tünel içerisinde eksenel fan kullanılarak hava konforunu sağlamaktır.

Karbonmonoksit ve karbondioksit solunan zehirli gazlar olarak bilinmektedir. Bu zehirli gazlar, karayolu tünellerinde taşıt yoğunluğuyla orantılı düzeyde birikmekte ve solunması ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Tüneller, hava akışının az olduğu ve hava hareketinin kısıtlı olduğu yerler olduğundan tünellerde hava kalitesi kolayca bozulabilmektedir. Karayolu tünelleri her ne kadar dış ortam olarak ifade edilseler de tünelin boyu, eğimi ve yüksekliğine bağlı olarak iç ortam gibi de değerlendirilebilmektedirler. Özellikle taşıt trafiğinin yoğun olduğu karayolu tünellerinde, araçların egzozundan çıkan zararlı gazlar tünelde birikebilmektedir. Tünellerde bu zararlı gazların birikmesini önlemek için, hava hareketini artırıcı önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu önlemler arasında, tünel girişlerine ve çıkışlarına hava verme sistemleri kurulması, tünellerde hava akışını artıran fanların kullanılması ve tünellerin periyodik olarak havalandırılması yer almaktadır (URL 2). Bir kaza sonucunda veya aşırı yoğunluk sonucu taşıtların tünel içerisini doldurması durumunda tünel içerisinde birikmiş zararlı gazların etkilerinden korunmak için, insanların solunum cihazları kullanmaları veya dış ortama çıkmaları gerekmektedir. Tünellerde karbonmonoksit ve karbondioksit birikmesi ciddi sağlık risklerine neden olabilmektedir. Bu nedenle, tünellerde hava hareketini artıran önlemlerin alınması tünel içerisinde bulunan insanların sağlığı açısından oldukça önemlidir. Tünel içerisinde biriken zararlı gazların tünelden 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. Bu durum, tünel içerisinde birikmiş zararlı gazların etkilerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi olan ihtiyacı göstermektedir.

## **1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı**

### **1.2.1. Amaç**

Bu tez çalışmasında, karayolları tünellerindeki taşıtların egzozlarından yayılan kirletici gazlardan karbonmonoksit ve karbondioksitin tünel içerisindeki dağılımlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk önce Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan

Akyazı Tüneli'nde karbondioksit ölçümleri ile sınırlı tutulan deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise, taşıtlı ve taşıtsız durumlar için tünel içerisindeki üç boyutlu akış alanları kapsamlı sayısal çalışmalarla incelenmiştir. Sayısal çalışmaların ilk aşamasında, içerisinde taşıt bulunan iki şeritli 500 m uzunluğundaki düz bir tünelde farklı taşıt hızlarında (farklı taşıt sayılarında) ve tünel geometrisinin iki farklı kavisli formunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmaların taşıtsız durumları içeren ikinci aşamasında ise, tünel içerisine yerleştirilmiş fan durumunda, fan itme kuvvetinin, tünel kavis durumunun, fan sayısının ve fana eklenmiş difüzör durumunda difüzör kanat açısının tünel içerisindeki karbonmonoksit ve karbondioksit düzeylerine etkisi incelenmiştir.

### 1.2.2. Kapsam

Bu çalışma kapsamında, tünel içerisinde taşıtların olduğu durumda, ilk önce iki şeritli 500 m uzunluğundaki düz tünel içerisinde taşıt hızının 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde (taşıt sayısının 80, 50, 34, 26 ve 20 değerlerinde) sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise, 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçaları iki farklı kavise sahip iki şeritli tüneller olarak dikkate alınmış ve bu tüneller içindeki üç boyutlu akış alanları taşıt hızının 70 km/saat (taşıt sayısının 26 değeri için) değeri için sayısal olarak çözülmüştür.

Tünel içerisinde taşıtlardan kaynaklanan karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımları üzerinde fan etkisini incelemek amacıyla tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konuma fan yerleştirilmiştir. Tünel içerisinde kirliliğin en üst değere ulaştığı kritik düzeyleri başlangıç durumu olarak dikkate alınmış ve taşıtsız durumda fan itme kuvveti değerinin, tünel kavis durumunun, fan sayısının ve fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısının karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Tünel içerisinde taşıtların olmadığı fanlı durumda, ilk önce tek fanlı iki şeritli düz tünelde fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, karayolları tünellerindeki fanlarda yaygın kullanılan itme kuvveti değeri olan 950 N için 950 m ve 1900 m yarıçap değerleri ile temsil edilen iki şeritli tek fanlı kavisli tünellerdeki akış alanları sayısal olarak incelenmiştir. Fan sayısı etkisi, iki şeritli düz tünelde 950 N fan itme kuvveti değerinde tek fanlı, özdeş iki fanlı ve özdeş üç fanlı durumlar için incelenmiştir. Fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısı etkisi ise, iki şeritli düz tünelde tek fan durumunda ve 950 N fan itme kuvveti değerinde, difüzör kanat

açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerleri için incelenmiştir.

### 1.3. Çalışmanın Bilimsel Önemi

Karayolu tünellerinde taşıtların egzozundan çıkan zararlı gazlar tünel içerisindeki hava kalitesini bozmaktadır. Tünel içerisindeki zararlı gazların incelenmesi ve fanlar yardımıyla uzaklaştırılmasına yönelik çalışmalar son yıllarda popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu kapsamda literatürde çoğunlukla tünel yangınlarının incelendiği çok sayıda sayısal ve deneysel çalışma bulunmaktadır. Söz konusu çalışmalar genellikle yangın kaynaklı akış hareketleri ve duman karakteristiği, duman kaynaklı kirleticilerin büyüklüğü, uygun tünel havalandırma sistemlerinin belirlenmesi ve duman tahliye senaryoları gibi konularda yoğunlaşmaktadır.

Tünel içerisinde taşıtlardan kaynaklanan hava kirliliğinin taşıt sayısına ve tünel geometrisine göre etkilerinin incelendiği ve zararlı gazların tünel içerisinden uzaklaştırılması için fan kullanılması durumunda fan sayısı ve fan itme kuvveti etkisini inceleyen çalışmalar oldukça az sayıdadır. Bu durum, tünel içerisinde oluşan zararlı gazların taşıt sayısına, tünel geometrisine ve fan durumuna göre etkisini ayrıntılı bir şekilde inceleyen çalışmalara olan ihtiyacı göstermektedir. Böylece, tünel içerisinde biriken zararlı gazların dağılımına ve hava hareketiyle uzaklaştırılmasına yönelik yeni bilgiler literatüre kazandırılmış olacaktır. Bu çalışmada, taşıtlı ve taşıtsız fanlı düz ve kavisli tünellerdeki karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, taşıtlı düz tünelde taşıt sayısı etkisi, taşıtsız fanlı düz tünelde itme kuvveti, fan sayısı ve difüzör kanat açısı etkisi, taşıtlı ve taşıtsız fanlı durumlar için ise kavis etkisi incelenmiştir. Taşıt sayısı, fan sayısı, fan itme kuvveti ve difüzör kanat açısının karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımları üzerindeki etkisinin literatürden farklı olarak incelenmiş olması çalışmanın özgün yönlerini oluşturmaktadır.

### 1.4. Literatür Araştırması

Bu konuda gerçekleştirmiş deneysel ve sayısal çalışmalar, tünel içerisindeki akış alanı ve kirleticilerin etkileri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Tünel içerisindeki zararlı gazların birikmesine yönelik deneysel çalışmalarda çoğunlukla bir kaza sonucu yanan aracın saldırdığı duman etkilerine yönelik ölçümler yapılmaktadır. Gerçek ölçekli deneysel çalışmaların, tünellerin içerisinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Literatürdeki deneysel

Çalışmalarda genellikle trafiğe kapatılmış boş bir tünel içerisinde yangın senaryoları incelenmektedir. Sayısal alışmalar ise, farklı tipte tünel, taşıt ve fan gruplarının tasarlanmasına olanak sağlamakta, böylece taşıt sayısı, tünel tipi, fan sayısı gibi etkilerin farklı türbülans modelleriyle incelenmesi mümkün olmaktadır. Bu konuda yapılan sayısal ve deneysel çalışmalar tünel içerisinde akış yapısının ve kirletici zararlı gazların etkilerinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Bu çalışmadaki literatür araştırması, tüneller içerisinde karbonmonoksit, karbondioksit, fan ile havalandırma ve yangın başlıklarında incelenmiştir.

#### 1.4.1. Tünel İçerisinde Karbonmonoksit Dağılımları

Garnier ve Schwap (1998), müstakil bir evin kapalı garajında bulunan bir taşıtın çalıştırılmasıyla oluşan karbonmonoksit düzeyini deneysel olarak incelemişlerdir. Ölçümlerin CO dedektörü kullanılarak gerçekleştirildiği çalışmada, 2 dakika ölçüm süresi sonunda CO düzeyinin taşıt egzoz borusu içerisinde 76900 ppm, garaj içerisinde ise 500 ppm değerlerine ulaştığı belirtilmiştir. Taşıt garajdan çıkarıldıktan 10 saat sonra garaj içerisindeki CO düzeyinin 30 ppm değerine kadar düştüğü ifade edilmiştir.

Chaloulakou vd. (2002), kapalı otoparklardaki karbonmonoksit düzeyini değerlendirmek amacıyla Atina'da bulunan 6 farklı kapalı otoparkta Solomat MPM4100 cihazı ile karbonmonoksit ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Kapalı otoparklarda uzun süre zaman geçirmenin sağlık açısından olumsuz sonuçlar oluşturacağını ifade etmişlerdir.

Kristensson vd. (2004), İsveç'in Stockholm şehrinde bir karayolu tünelindeki gaz ve parçacık emisyon faktörlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Emisyon faktörlerinin taşıt hızına bağlı olarak değiştiğini ve ortalama CO ve NO<sub>x</sub> değerlerinin sırasıyla 5300 ve 1400 mg·araç<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup> düzeyinde olduğunu belirtmişlerdir.

Li vd. (2017), çatallanan tünellerin içerisindeki taşıt kaynaklı kirleticilerin etkisini incelemek amacıyla içinde iki kola ayrılan in'deki Canghsa tünelinin 1:8 ölçekli modelinde karbonmonoksit ve karbondioksit ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Ayrılma kollarının ana tüneldeki kirletici konsantrasyonunu azaltmada önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır.

Villanueva ve Chen (2020), kapalı otoparklardaki karbonmonoksit kirliliğini incelemek amacıyla Kanada'da bulunan Langara Koleji'nin altındaki kapalı otoparkta CO lmleri gerçekleştirmişlerdir. Hava koşullarının olumsuz ve taşıt sayısının fazla olduğu

saatlerde otoparkın daha yoğun kullanılması nedeniyle karbonmonoksit miktarının arttığını belirtmişlerdir.

Al Mutairi vd. (2020), Kuveyt'te bulunan bir alışveriş merkezinin açık ve kapalı otoparklarında yaz ve kış dönemlerinde, hafta içi ve hafta sonu zamanlarda gerçekleştirdikleri karbonmonoksit ölçümleriyle otoparklardaki karbonmonoksit kirliliğini deneysel olarak incelemişlerdir. En yüksek karbonmonoksit değerinin kapalı otoparkta kış döneminde ve hafta sonunda 190 ppm, açık otoparkta ise yaz döneminde ve hafta sonunda 40 ppm olarak ölçüldüğünü belirtmişlerdir.

Molina vd. (2020), Meksika'nın Guanajuato şehrindeki karayolları tünellerinde karbonmonoksit (CO) ve partikül madde (PM<sub>2.5</sub> ve PM<sub>10</sub>) konsantrasyonlarını deneysel olarak incelemiştir. CO ölçümlerinin taşınabilir kızılötesi sensör ile gerçekleştirildiği çalışmada, ortalama CO değerinin, Dünya Sağlık Örgütü tarafından 30 dakikalık maruziyet için belirlenen 50 ppm sınır değerinin üstünde olduğunu ve hava kalitesinin iyileştirilmesi için tünellere havalandırma sistemlerinin kurulması gerektiğini vurgulamışlardır.

Vito vd. (2023), İtalya'da bir karayolu tünelindeki taşıt kaynaklı hava kirliliğini deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında karbonmonoksit (CO), nitrojendioksit (NO<sub>2</sub>), ozon (O<sub>3</sub>), partikül madde (PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>), bağıl nem (RH) ve sıcaklık (T) ölçümü gerçekleştirmişlerdir. Tüneldaki kirlilik seviyesinin dış çevreye kıyasla oldukça yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Chen vd. (2002), Tayvan'daki Cross-Harbor denizaltı tüneli içerisindeki hava akışını ve taşıt kaynaklı kirleticilerin dağılımını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Öncelikle saha çalışmasıyla tünel içerisinde karbonmonoksit, NO<sub>x</sub> ve toplam hidrokarbon (THC) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise tünel içerisindeki kirletici gaz dağılımları Standart k-ε türbülans modeli ile sayısal olarak elde edilmiştir. Tünel içerisindeki fanların çalıştırılmasıyla kirliliğin % 74'e kadar azalttığını belirtmişlerdir.

Kara (2013), İzmir Karşıyaka'daki bir otoyol tüneline taşıt kaynaklı kirletici emisyon faktörlerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Hava kalitesi ölçüm istasyonundan aldığı saha verileri ve Motorlu Araç Emisyon Simülatörü (MOVES) ile gerçekleştirdiği sayısal analizler sonucunda tünel içerisindeki en yüksek emisyon faktörünün karbonmonoksit olduğunu ifade etmiştir.

Shen vd. (2016), kömür madenlerindeki yer altı tünellerinde çalışan taşıtlardan kaynaklanan karbonmonoksit etkisini belirlemek amacıyla deneysel ve sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Öncelikle tünel içerisinde dört farklı noktada karbonmonoksit ölçümü

gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra ise bir ticari yazılım kullanarak tünel içerisindeki karbonmonoksit dağılımlarını sayısal olarak elde etmişlerdir. Saha verilerinin sayısal çalışmanın sonuçlarıyla uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır.

Sun vd. (2020), tek taşıttan kaynaklanan egzoz kirliliğini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Rüzgar tüneline taşıt üzerindeki basınç dağılımlarını deneysel olarak elde etmişlerdir. RNG k-ε türbülans modeli ile gerçekleştirilen çalışmalarda kimyasal kararlılığı nedeniyle karbonmonoksit izleyici gaz olarak seçilmiştir. Taşıt kaynaklı karbonmonoksit dağılımının, egzoz borusundan itibaren yarıçapı 1.5 m olan bir yarı çember bölgede yoğunlaştığını ortaya koymuşlardır.

Shi vd. (2020), kent merkezlerindeki sokak kanyonlarında oluşan kirlletici konsantrasyonlarını rüzgar tüneli çalışmasıyla deneysel olarak ve Standart k-ε türbülans modeli ile sayısal olarak incelemişlerdir. Sokak kanyonlarındaki karbonmonoksit dağılımlarının çoğunlukla yerden itibaren 2 m yüksekliğe kadar olan bölgelerde olduğunu belirtmişlerdir.

Shi vd. (2019), taşıtların hareketiyle oluşan türbülansın egzoz gazlarının dağılımı üzerindeki etkisini RNG k-ε türbülans modeli ile sayısal olarak incelemişler ve türbülans etkisinin egzoz gazlarının yayılmasını zorlaştırdığını ortaya koymuşlardır.

Nie vd. (2022), maden tünellerinde çalışan taşıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarının hava kalitesi üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. RNG k-ε türbülans modelinin kullanıldığı çalışmada karbonmonoksit, NO<sub>x</sub> (nitrit oksit ve türevleri) ve hidrokarbonların tünel içindeki konsantrasyonları hesaplanmıştır. Taşıt hızının saatte 16 km'den fazla olması durumunda tünel içerisinde 140 ppm düzeyinde karbonmonoksit oluştuğu ifade edilmiştir.

#### **1.4.2. Tünel İçerisinde Karbondioksit Dağılımları**

Fre vd. (1994), 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 CO değerinin 2.9 ppm ve ortalama CO<sub>2</sub> değerinin 543,8 ppm düzeyinde oluştuğunu belirtmişlerdir.

Luther vd. (2017) okul dersliklerindeki karbondioksit konsantrasyonlarını dersliklerin doluluk oranına göre deneysel olarak incelemişlerdir. Avustralya'da bulunan 6 farklı okuldaki 24 derslikte CO<sub>2</sub> 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 (2020), Şanghay'daki bazı karayolu tünellerinde mobil taşıt kullanarak karbondioksit ve metan konsantrasyonlarını deneysel olarak incelemişler ve ortalama CO<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> 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. (2021), 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 CO<sub>2</sub> 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. (2022), metro vagonlarında karbondioksit konsantrasyonunun dinamik özelliklerini deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında, vagonlara yerleştirdikleri sensörlerle CO<sub>2</sub> ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. CO<sub>2</sub> değerlerinin, metronun ilk vagonundan son vagonuna doğru ilerledikçe arttığını ve yolcu sayısından büyük ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Yolcu sayısının fazla olduğu sabah saatlerinde CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun normal saatlerdeki değerin 2.3 katına çıktığını ifade etmişlerdir.

Tao vd. (2017), 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 çözümlerin kirletici konsantrasyon oranları açısından deneysel verilerle uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Sun vd. (2024), 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 CO<sub>2</sub> değerleri ölçülmüştür. Sayısal çalışmada ise bina iç bölümlerindeki CO<sub>2</sub> 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. (2001), 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. (2001), bir oditoryumda insanların solunumu sonucu ortamda oluşan karbondioksit dağılımını sayısal olarak inceledikleri çalışmalarında elde ettikleri sonuçların literatürdeki verilerle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Bari vd. (2010), Avustralya'nın Melbourne kentindeki Burnley karayolu tüneline trafiğin yoğun olduğu durumlarda taşıt emisyonlarından kaynaklanan kirlilik seviyelerini sayısal olarak incelemiştir. 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 (2013), yarı kapalı bir stadyum içerisindeki karbondioksit dağılımlarını Realizable k-ε türbülans modeli ile hesaplamışlardır. Stadyumun kuzey ve güney bölümlerindeki CO<sub>2</sub> değerleri arasında 700 ppm'e varan farkların oluştuğunu belirtmişlerdir.

Ning vd. (2016), bir yatak odası içerisindeki CO<sub>2</sub> 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. (2017), karayolu tünellerinde oluşan taşıt kaynaklı karbondioksit dağılımını Standart k-ε türbülans modeli ile sayısal olarak incelemiştir. Üç farklı taşıt hızında yapılan çözümlerde, karbondioksit düzeyinin yüksek olduğu bölgelerin, zemine ve tünel çıkışına yakın bölgeler olduğunu ifade etmişlerdir.

Tan vd. (2017), belediyeye ait bir boru hattı tünelineki karbondioksit ve Metan dağılımlarını Standart k- $\epsilon$  türbülans modeli ile sayısal olarak elde etmişlerdir. 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 ciddi oranda azaldığını belirtmişlerdir.

Babadi vd. (2022), tavuk kümeslerinin bulunduğu havalandırma sistemine sahip kapalı bir çiftlik içerisindeki karbondioksit, amonyak konsantrasyonlarını ve nem dağılımını Standart k- $\epsilon$  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. (2024), 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.

#### **1.4.3. Tünel İçerisinde Fan ile Havalandırma**

Sekularac ve Jankovic (2017), 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 edilmiştir. Sayısal çalışma kısmında ise Standart k- $\epsilon$  ve SST k- $\omega$  türbülans modeller ile hız değerleri hesaplanmıştır. Sayısal çözümlerden elde edilen hız profillerinin ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Chen vd. (2019), 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 (2018), karayolları tünellerinde havalandırma amaçlı kullanılan fanların sayısının havalandırma performansına etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Tünel modeli içerisine yerleştirilen farklı sayıdaki fanlarla gerçekleştirilen deneysel çalışmada hız dağılımları elde edilmiştir. Realizable k- $\epsilon$  türbülans modeli ile hesaplanan hız değerlerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir.

Zhao vd. (2022), 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. (2009), kavisli bir karayolu tüneline eksenel fan kullanımının tünel havalandırması üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Standart k-ε türbülans modeli ile gerçekleştirilen çalışmada, eksenel fan kullanımının tünel içerisindeki kirletici gazların seviyesinin azaltılması ve tünel güvenliği için son derece önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

Pei ve Pan (2014), 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. (2014), 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. (2019), 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. (2019), 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.

#### 1.4.4. Tünel İçerisinde Yangın

Kayılı (2009) tarafından yapılan deneysel çalışmada, bir karayolu tünelindeki yangın durumunda tünel içerisinde bulunan farklı kesit alanlarına sahip parçaların yanma üzerindeki etkisi farklı fan hızları için incelenmiştir. Tünel içerisinde hava hızındaki değişimin yangın üzerinde çok etkili olmadığı ancak taşıt modelinin kesit alanındaki artışın yangını arttırdığı belirtilmiştir.

Abuasiheh (2019) karayolları tünellerinde ortaya çıkan yangınlarda fan hızının yangın üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla 1:13 oranında küçültülmüş bir tünel modeli üzerinde gerçekleştirdiği deneysel çalışmada, fan hızının yangını kontrol altına almada kritik öneme sahip olduğunu ifade etmiştir.

Hu vd. (2010), bir karayolu tünelinde meydana gelen yangında tünel içerisindeki CO konsantrasyonunu ve tünel boyunca sıcaklık değişimini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Yangın Dinamik Simülatörü kullanılarak gerçekleştirilen sayısal çalışmadan elde edilen sonuçların tünel içerisinde ölçülen verilerle uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Gültek (2017), karayolu tünellerinde yangın durumunda sürücü ve yayaların tünel içerisinde maruz kalacağı zehirli gazların ve sıcaklık değerlerinin düzeyini belirlemek amacıyla deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmiştir. 1:12 oranında küçültülmüş bir tünel modeli üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada yangın esnasında tünel içerisindeki karbonmonoksit ve oksijen değerleri ölçülmüştür. Sayısal çalışmada elde edilen sonuçların ölçüm verileriyle uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Shafee (2017), karayolları tünellerinde meydana gelen yangınların dinamiğini anlamak ve alınması gereken güvenlik önlemlerini değerlendirmek amacıyla tünel içinde farklı yangın senaryolarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Yangının yanma hızının fan hızından, duman hareketinin ve havalandırma ihtiyacının ise tünel eğiminden etkilendiğini belirtmiştir.

Kayılı (2005), yer altındaki metro istasyonlarında meydana gelebilecek yangınların etkilerini ve güvenli tahliye yollarını belirlemek amacıyla Yangın Dinamiği Simülatörü kullanarak sayısal bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Karaaslan vd. (2011), kısa mesafeli bir karayolu tüneli içerisinde iki farklı etkideki yangın durumunda, havalandırma sisteminin duman hareketleri ve sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisini Realizable k- $\epsilon$  türbülans modelini kullanarak belirlemiştir. Eksenel fanların üçerli gruplar halinde tünel içerisinde farklı kesitlerde konumlandırılmasıyla

çeşitlendirilen çalışmada, uzun tünellere kıyasla mevcut tünelde duman yayılımının daha hızlı olduğunu belirtmişlerdir.

Teodosiua vd. (2015), yer altındaki bir metro tüneline meydana gelebilecek bir yangın durumunu Standart k-ε türbülans modeli ile sayısal olarak inceledikleri çalışmada, mevcut havalandırma sisteminin yolcuların güvenli bir şekilde tahliyesi için yeterli olduğunu belirtmişlerdir

Altay (2016), bir karayolu tüneline meydana gelen taşıt kaynaklı yangın durumunu Yangın Dinamiği Simülatörünü kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Tünel içerisinde bulunan aksel havalandırma sistemlerinin etkinliğinin değerlendirildiği çalışmada, tünel içerisinde ağır tonajlı taşıtlardan kaynaklanan bir yangın durumunda mevcut havalandırma sisteminin yetersiz kaldığını belirtmiştir.

Bilge (2018), Marmaray metro hattında meydana gelecek bir yangın durumunda mevcut havalandırma sistemlerinin etkisini Yangın Dinamiği Simülatörü ile sayısal olarak incelediği çalışmada, havalandırmanın çalıştığı ve çalışmadığı iki duruma ait sıcaklık ve duman dağılımlarını karşılaştırmıştır. Yangının orta vagona çıkması senaryosu durumunda mevcut fan sistemlerinin yolcuların tahliyesini olumsuz etkileyeceğini belirtmiştir.

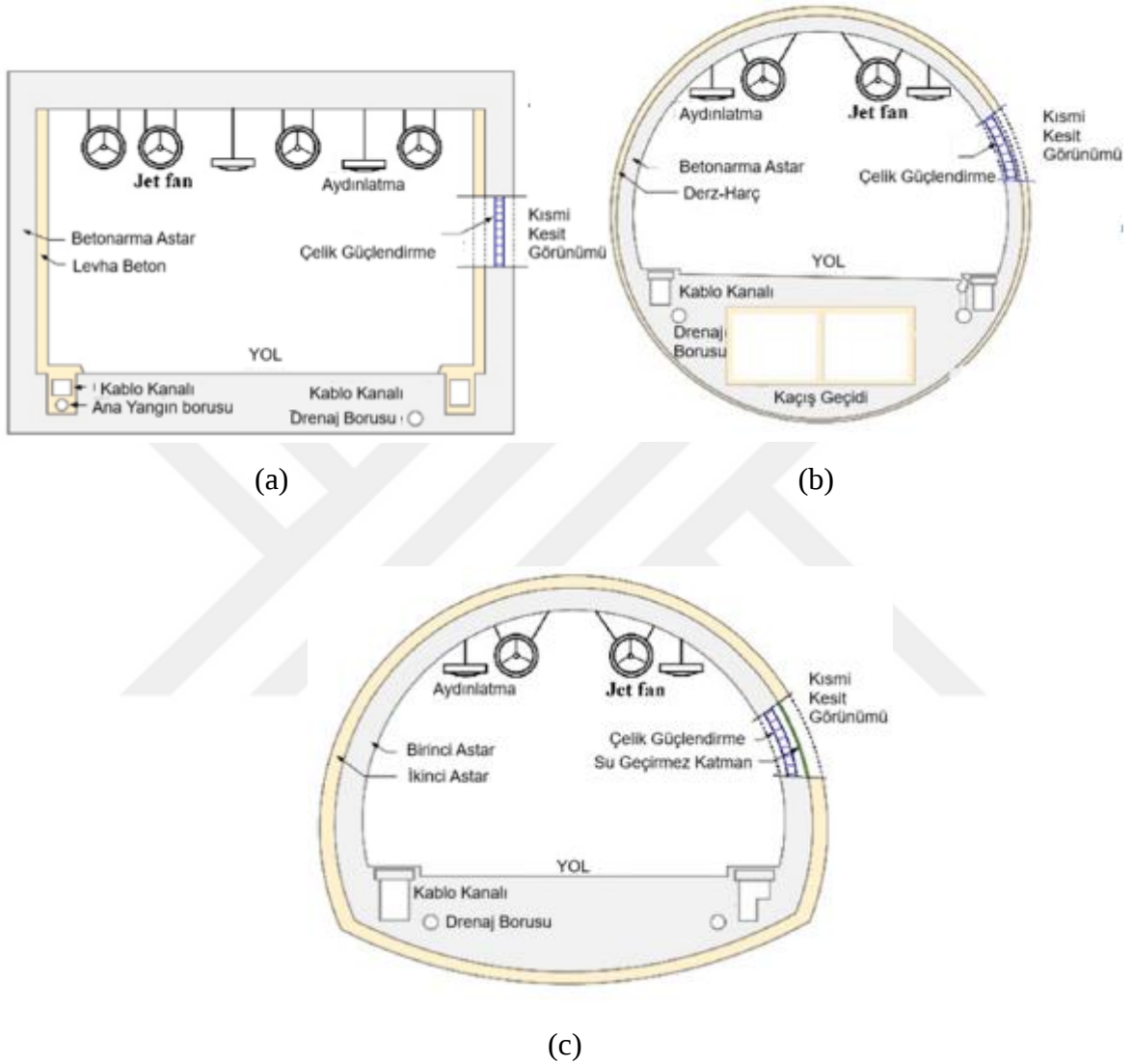
Başıbeyaz (2023), eğimli bir tünelde meydana gelen yangında tünel içerisinde bulunan aksel fanların konumunun, yönünün ve hızının duman tahliyesine etkisini sayısal olarak incelemiştir. Tünel içerisinde karbonmonoksit, karbondioksit, hız ve sıcaklık değerlerinin elde edildiği çalışma sonucunda, aksel fanların debi değerlerinin doğru ayarlanmasının duman tahliyesinde son derece önemli olduğunu belirtmiştir.

### 1.5. Karayolu Tünelleri

Karayolu tünelleri, taşıt erişimine sahip kapalı yollar olarak tanımlanmaktadır. Dağlar ve dereler gibi coğrafi engelleri aşmak veya yerleşim alanlarını etkilemeden güzergâh oluşturmak için tercih edilen karayolu tünelleri, aynı zamanda çevresel ve ekolojik hassasiyetleri göz önünde bulundurarak, doğal yaşamı ve kültürel mirasları korumak amacıyla da inşa edilmektedirler. Trafik yoğunluğu, hava kirliliği ve gürültü gibi sorunlara çözüm sunarak yaşam kalitesini artırırken, aynı zamanda yer altı geçişleriyle yüzey alanlarının verimli kullanılmasına da olanak sağlamaktadırlar.

Karayolu tünelleri, dikdörtgen, dairesel ve kemerli (at nalı şeklinde) olmak üzere üç farklı tipte kesit geometrisine sahiptir (Şekil 1). Dikdörtgen tüneller genellikle aç-kapa,

daldırma veya krikolu kutu tünel açma yöntemleriyle inşa edilirken, dairesel tüneller tünel açma makinesi veya patlatmalı kazı yöntemleriyle oluşturulmaktadır. Kemerli tüneller ise genellikle patlatmalı kazı veya sıralı kazı yöntemi ile inşa edilmektedir (FHWA,2009).



Şekil 1. Karayolu tünellerinin tipik geometrik yapıları  
(a) Dikdörtgen kesit (b) Dairesel kesit (c) Kemerli kesit (Cheng vd., 2021)

Karayolu tünelleri coğrafi koşullar dikkate alınarak inşa edilmektedir. Tablo 1’de, dikdörtgen, dairesel ve kemerli kesit tiplerine sahip tünellerin kullanım koşulları avantaj ve dezavantajları ile birlikte verilmiştir.

Tablo 1. Üç farklı tünel kesit tipinin karşılaştırması (Cheng vd., 2021)

| Tünel Kesiti      | Avantaj                                                                         | Dezavantaj                                                        | Kullanım Koşulları                                                                                                                                         |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Dikdörtgen</b> | Tünel iç hacmi büyük olduğundan mekân kullanım alanı daha fazladır.             | Dayanıklılığı düşük olup, çevresel basınçlara karşı dirençsizdir. | Sığ toprak tabakası ve düşük statik basınç için kullanıma uygundur.                                                                                        |
| <b>Dairesel</b>   | Dayanıklılığı orta düzeydedir ve zemin yerleşimi kolaydır.                      | İç mekân kullanımı kısıtlıdır.                                    | Yoğun yapıların yakınındaki derin olmayan gömülü toprak, yüksek yan ve üst basınçlara sahip derin gömülü toprak ve kaya kütleleri için kullanıma uygundur. |
| <b>Kemerli</b>    | Orta düzeyde dayanıklılığa ve orta düzeyde tünel içi alan kullanımına sahiptir. | Çevresel olarak yan basınçlara karşı dirençsizdir.                | Yüksek üst basınçlar ile orta ve düşük yan basınçlara sahip derin gömülü toprak ve kaya kütleleri için kullanıma uygundur.                                 |

Tünellerin inşasında kullanılan malzemeler ve teknikler antik çağlardan günümüze kadar sürekli olarak değişim ve gelişim göstermiştir. Özellikle endüstri devrimiyle birlikte beton ve çeliğin inşaat sektöründe kullanılmaya başlanması karayolları tünellerinin inşasında da çok önemli gelişmelere yol açmıştır. Böylece, geçmişte ulaşılması zor olan bölgelerde tüneller inşa edilebilmiş ve ulaşım ağları genişletilmiştir.

Ülkemizde, ulaşım mesafesini kısaltmak ve coğrafi dezavantajları ortadan kaldırmak amacıyla 1950 yılından itibaren karayolu tünelleri inşa edilmeye başlanmış, teknolojik ve ekonomik gelişimimizle orantılı şekilde çok sayıda tünel inşa edilmiştir. Ülkemizde 2024 yılı itibarıyla tek tüp ve iki tüp şeklinde toplam 607.329 km uzunluğunda 445 adet tünel bulunmaktadır (URL 3).

## 1.6. Hava Kalitesi Parametreleri

### 1.6.1. İç Ortam Hava Kalitesi

İnsanın yaşamında en önemli kavramlardan biri yaşam konforu veya yaşam kalitesi olarak ifade edilmektedir. İnsanın konforlu bir iç ortamda yaşamını sürdürmesi için bulunduğu ortamdaki havanın % 30-50 aralığında bağıl neme ve 19-20 °C değerlerinde sıcaklığına sahip olması gerekmektedir. İç ortam havasının ısıl konforunu belirleyen bu değerlerin yanında kirlilik düzeyi de konforlu bir iç ortam havası için son derece önemlidir. İç ortam hava kirlilik düzeyi gelişmiş ülkeler için en önemli dört çevre kriterinden biri olarak değerlendirilmektedir. İç ortam havasındaki kirlilik, iç ortamda bulunan malzemelerden kaynaklanan kirlilik ve dış ortamdan iç ortama giren kirleticilerin oluşturduğu kirlilik şeklinde iki farklı kaynaktan oluşmaktadır. İç ortam kalitesini etkileyen kirleticiler, ortamda bulunan karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO<sub>2</sub>), partikül madde (PM<sub>2.5</sub> ve PM<sub>10</sub>), azotoksitler (NO<sub>x</sub>), kükürtoksitler (SO<sub>x</sub>), uçucu organik bileşikler (UOB), oksijen (O<sub>2</sub>), sıcaklık, mikroorganizmalar ve alerjenlerdir (Akal, 2013). Tablo 2’de iç ortam kirleticileri ve emisyon kaynakları görülmektedir.

Tablo 2. İç Ortam Kirleticileri ve Emisyon Kaynakları (HKDYY, 2008)

| Kirletici         | Başlıca Emisyon Kaynakları                                                                                    |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alerjenler        | Ev tozu, evcil hayvanlar, böcekler                                                                            |
| Karbondioksit     | Metabolik aktiviteler, yanma faaliyetleri, garajlardaki motorlu cihazlar                                      |
| Karbonmonoksit    | Yakıtların yanması, sobalar, gazlı veya petrollü ısıtıcılar, tütün kullanımı                                  |
| Formaldehit       | Yalıtım malzemeleri, döşeme malzemeleri, mobilyalar                                                           |
| Mikroorganizmalar | İnsanlar, hayvanlar, bitkiler ve havalandırma sistemleri                                                      |
| Azotdioksit       | Dış ortam havası, yakıtların yanması, garajlardaki motorlu araçlar                                            |
| Partiküller       | Çözünmez taneciklerin çöktürüldükten sonra yeniden kullanımı (resüspansiyon), tütün kullanımı, yanma ürünleri |
| Polenler          | Dış ortam havası, ağaçlar, çimenler, bitkiler                                                                 |
| Kükürtdioksit     | Dış ortam havası, yakıtların yanması                                                                          |
| Ozon              | Fotokimyasal reaksiyonlar                                                                                     |
| Asbest            | Alev önleyici materyaller, izolasyon malzemeleri                                                              |

ASHRAE 62–1989, 2001 ve 2004 standardına göre iç ortam için kalitesi kabul edilebilir hava, içerisinde bilinen kirleticilerin yetkili kuruluşlar tarafından belirlenmiş zararlı konsantrasyonlar seviyelerinde bulunmadığı ve bu hava içinde bulunan insanların % 80 veya daha üzerindeki oranının havanın kalitesiyle ilgili herhangi bir memnuniyetsizlik hissetmediği hava olarak açıklanmaktadır.

Kapalı ortamlardaki hava, sadece dışarıdan gelen kirleticilerden değil, aynı zamanda içerideki insanlardan ve eşyalardan kaynaklanan partikül maddelerden de etkilenmektedir. İnsanlar, nefes alıp verirken, deri döküntüleri ve giysilerinden çok sayıda küçük parçacık havaya bırakmaktadır. Bu parçacıklar arasında bakteriler ve diğer mikroorganizmalar da bulunmaktadır. Bu durum, kapalı ortamlarda hava kalitesini düşürerek sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Hijyen kurallarına dikkat etmek ve özel kıyafetler kullanmak bu sorunu azaltmaya yardımcı olsa da tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmamaktadır. İç ortam hava kalitesinin önemli bir göstergesi olan karbondioksit seviyesi, insan faaliyetleri ve diğer kaynaklardan oluşan emisyonlar nedeniyle dış ortama kıyasla daha yüksek olmaktadır.

Karayolları tünellerinde tünel içerisindeki kirleticilerin sınır değerleri Tablo 3’da verilmiştir.

Tablo 3. Karayolu tüneline yer alan hava kalitesi kriterleri (Longley, 2018)

| Kirletici       | Standart Miktar           | Ortalama Zaman |
|-----------------|---------------------------|----------------|
| NO <sub>2</sub> | 0.12 ppm                  | 1 Saat         |
|                 | 0.03 ppm                  | Yıllık         |
| SO <sub>2</sub> | 0.27 ppm                  | 10 Dakika      |
|                 | 0.21 ppm                  | 1 Saat         |
|                 | 0.087 ppm                 | Yıllık         |
| CO              | 88 ppm                    | 15 Dakika      |
|                 | 26 ppm                    | 1 Saat         |
| Benzene         | 9x10 <sup>-3</sup> ppm    | 1 Saat         |
| Ksilen (Xylene) | 4.37x10 <sup>-2</sup> ppm | 1 Saat         |
| Toluen          | 9.55x10 <sup>-2</sup> ppm | 1 Saat         |
| Etil benzen     | 1.83 ppm                  | 1 Saat         |

### 1.6.2. Dış Ortam Hava Kalitesi

Dış ortam hava kalitesinde azotoksit, kükürtdioksit, karbonmonoksit, partikül madde ve uçucu organik bileşikler şeklinde doğrudan atmosfere salınan birincil kirleticiler

belirleyici olmaktadır. Bakteriler, volkanik etkiler ve şimşeklerden doğal olarak ortaya çıkan azotoksitler, insanlardan kaynaklanan azotoksit emisyonlarından çok daha fazla olmaktadır.

Azotoksit emisyonlarını elektrik üretimi ve taşımacılık gibi faaliyetler için kullanılan fosil yakıtların yanması ve nitrik asit üretimi, kaynak işlemleri ve patlayıcıların kullanımı gibi yanma dışı süreçler oluşturmaktadır (Batur ve Akgün, 2017).

Önemli hava kirleticilerinden biri olan kükürtdioksit, fosil yakıtların yanması, ergitme, sülfürik asit imalatı, odun hamurunun kâğıda dönüştürülmesi ve çöp yakma gibi işlemler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Atmosfere salınan kükürtdioksit emisyonlarının yaklaşık % 50'sini kömür yakma, % 30'unu ise petrol yakma işlemi oluşturmaktadır (Batur ve Akgün, 2017).

Yakıt verimli bir şekilde yakıldığında, kimyasal tepkime sonucunda yan ürün olarak karbonmonoksit ve su ortaya çıkmaktadır. Ancak ortamda yetersiz miktarda oksijen bulunduğunda, eksik yanma sonucu karbonmonoksit serbest kalarak havaya karışmaktadır. Karbonmonoksit, en belirgin olarak rölantide çalışan ya da yavaş hareket eden karayolu taşıtları tarafından yayılmaktadır. Bu nedenle, karbonmonoksit emisyonlarının % 25'i karayolu taşımacılığında meydana gelmektedir (Batur ve Akgün, 2017).

Partikül maddenin % 5'i kara yolu taşımacılığı ile, % 24'ü içinde yanma olmayan süreçlerle, % 17'si endüstriyel yakma tesisleriyle, % 16'sı konut ısıtmasıyla ve % 15'i enerji üretimiyle havaya karışmaktadır. Partikül madde emisyonunda doğal kaynakların etkisi daha az olmaktadır. Partikül madde de doğal emisyon kaynakları, yanardağlar ve toz fırtınalarıdır.

Hidrokarbon emisyonları, benzinin buharlaşmasından, tam yanmamış yakıtlardan, dağıtım sistemlerindeki doğalgaz kaçaklarından, solventlerin buharlaşmasından ve boya işlemlerinden kaynaklanmaktadır (Batur ve Akgün, 2017).

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan Dış Ortam Hava Kalitesi Yönetimi Yönetmeliği'ne göre dış ortam hava kalitesini değerlendirmeye esas kirleticiler, kurşun (Pb), benzen, karbonmonoksit (CO), kükürtdioksit (SO<sub>2</sub>), azotdioksit (NO<sub>2</sub>), azotoksit (NO<sub>x</sub>) ve partikül madde (PM<sub>10</sub>) olarak tanımlanmaktadır. Bu kirleticilerin limit değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Dış ortam hava kalitesini değerlendirmeye esas kirleticilerin limit değerleri (URL 4)

| KİRLETİCİ                                  | ORTALAMA SÜRE                                                                  | LİMİT DEĞERLER (µg/m <sup>3</sup> )               |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                                            |                                                                                | 2019                                              | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| <b>Kurşun (Pb)</b>                         | <b>Yıllık</b><br>- insan sağlığının korunması için                             | 0,5                                               |      |      |      |      |      |
| <b>Benzen</b>                              | <b>Yıllık</b><br>- insan sağlığının korunması için                             | 7                                                 | 6    | 5    | 5    | 5    | 5    |
| <b>CO</b><br>(Karbonmon oksit)             | <b>Maksimum günlük 8 saatlik ortalama</b><br>- insan sağlığının korunması için | 10                                                |      |      |      |      |      |
| <b>SO<sub>2</sub></b><br>(Kükürtdioksit)   | <b>Saatlik</b><br>- insan sağlığının korunması için                            | 350<br>(Bir takvim yılında 24'ten fazla aşılamaz) |      |      |      |      |      |
|                                            | <b>24 saatlik</b><br>- insan sağlığının korunması için                         | 125<br>(Bir takvim yılında 3'ten fazla aşılamaz)  |      |      |      |      |      |
| <b>NO<sub>2</sub></b> (Azot dioksit)       | <b>Saatlik</b><br>- insan sağlığının korunması için                            | 250                                               | 240  | 230  | 220  | 210  | 200  |
|                                            |                                                                                | (Bir takvim yılında 18'den fazla aşılamaz)        |      |      |      |      |      |
|                                            | <b>Yıllık</b><br>- insan sağlığının korunması için                             | 50                                                | 48   | 46   | 44   | 42   | 40   |
| <b>NO<sub>x</sub></b><br>(Azotoksit)       | <b>Yıllık</b><br>- vejetasyonun korunması için                                 | 30                                                |      |      |      |      |      |
| <b>PM<sub>10</sub></b><br>(Partikül madde) | <b>24 saatlik</b><br>- insan sağlığının korunması için                         | 50<br>(Bir takvim yılında 35'ten fazla aşılamaz)  |      |      |      |      |      |
|                                            | <b>Yıllık</b><br>- insan sağlığının korunması için                             | 40                                                |      |      |      |      |      |

Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu, hava kirleticilerin izlenmesini esas alan bir program kapsamında, havadaki kirletici gazların ölçümleri ile dış ortam hava kalitesi için TS EN ISO/IEC 17025 standardını oluşturmuştur (URL 5).

Ülkemizde ise hava konfor şartlarını belirlemek amacıyla 2008 yılında yürürlüğe giren Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği çıkarılmıştır. Bu kapsamda, yerel mevzuatımızı ve sınır değerlerimizi esas alan bir Hava Kalitesi İndeksi tanımlanmıştır. Bu

indeks ile, partikül madde (PM<sub>10</sub>), karbonmonoksit, kükürtdioksit, azotdioksit ve ozon şeklinde beş ana kirletici maddenin atmosferdeki konsantrasyonlarının karşılık geldiği hava kalitesi seviyeleri belirlenmiştir (URL 5). Tablo 5’de Hava Kalitesi İndeksi değer aralıkları görülmektedir

Ulusal hava kalitesi standartları için belirlenen limit değerler ise Tablo 6’te verilmiştir.

Tablo 5. Hava Kalitesi İndeksi değerleri (URL 5)

| Hava Kalitesi İndeksi Değer Aralıkları | Sağlık Endişe Seviyeleri | Renkler    | Anlamı                                                                                                              |
|----------------------------------------|--------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0 - 50                                 | İyi                      | Yeşil      | Hava kalitesi memnun edici seviyede ve hava kirliliği az riskli veya hiç risk oluşturmuyor.                         |
| 51 - 100                               | Orta                     | Sarı       | Hava kalitesi uygun ancak hassas insanlar için bazı kirleticiler açısından orta düzeyde sağlık endişesi oluşabilir. |
| 101- 150                               | Hassas                   | Turuncu    | Hassas gruplar için sağlık etkileri oluşabilir. Genel olarak kamunun etkilenmesi olası değildir.                    |
| 151 - 200                              | Sağlıksız                | Kırmızı    | Herkes sağlık etkileri yaşamaya başlayabilir. Hassas gruplar için ciddi sağlık etkileri söz konusu olabilir.        |
| 201 - 300                              | Kötü                     | Mor        | Sağlık açısından acil durum oluşturabilir. Nüfusun tamamının etkilenme olasılığı yüksektir.                         |
| 301 - 500                              | Tehlikeli                | Kahverengi | Sağlık alarmı: Herkes daha ciddi sağlık etkileri ile karşılaşabilir.                                                |

Tablo 6. Ulusal Hava Kalitesi İndeksi limit değerleri (URL 5)

| İndeks    | HKİ       | SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] | NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] | CO [µg/m <sup>3</sup> ] | O <sub>3</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] | PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] |
|-----------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|           |           | 1 Sa. Ort.                           | 1 Sa. Ort.                           | 8 Sa. Ort.              | 8 Sa. Ort.                          | 24 Sa. Ort.                           |
| İyi       | 0 - 50    | 0-100                                | 0-100                                | 0-5500                  | 0-120                               | 0-50                                  |
| Orta      | 51 - 100  | 101-250                              | 101-200                              | 5501-10000              | 121-160                             | 51-100                                |
| Hassas    | 101 – 150 | 251-500                              | 201-500                              | 10001-16000             | 161-180                             | 101-260                               |
| Sağlıksız | 151 – 200 | 501-850                              | 501-1000                             | 16001-24000             | 181-240                             | 261-400                               |
| Kötü      | 201 – 300 | 851-1100                             | 1001-2000                            | 24001-32000             | 241-700                             | 401-520                               |
| Tehlikeli | 301 – 500 | >1101                                | >2001                                | >32001                  | >701                                | >521                                  |

### 1.7. Hava Kirliliği

Hızla artan nüfus ve endüstriyel faaliyetler nedeniyle, hava kirliliği günümüzün en önemli çevre sorunlarından biri haline gelmiştir. Atmosfere salınan zararlı maddeler, insan

sağlığı, ekosistem ve iklim değişikliği üzerinde ciddi olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Meteorolojik koşullar, coğrafi yapı, enerji üretimi ve ulaşım gibi faktörler, hava kirliliğinin şiddetini ve dağılımını etkileyen en önemli parametreler arasında yer almaktadır. Plansız kentleşme ve yeşil alanların azalması da hava kirliliğini arttırmaktadır.

Yapay kaynaklı kirleticilerin miktarı ve bileşimi, olumsuz çevresel etkilerin şiddetini belirlemektedir. Hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkileri, solunum yoluyla doğrudan maruziyet ve gıda zinciri yoluyla dolaylı maruziyet olarak iki farklı şekilde oluşmaktadır. Özellikle kentsel alanlarda ısınma, ulaşım ve sanayi faaliyetlerinden kaynaklanan hava kirliliği, ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır (URL 5). Tablo 7’de hava kirletici maddelerin insan sağlığı üzerindeki etkileri görülmektedir.

Tablo 7. Hava kirleticilerin insan sağlığı üzerindeki etkileri

| <b>Kirletici</b>      | <b>Ana Kaynağı</b>                                                                       | <b>Sağlık Etkisi</b>                                                                  |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Kükürtdioksit</b>  | Fosil yakıt yanması                                                                      | Solunum yolu hastalıkları                                                             |
| <b>Azotoksitler</b>   | Taşıt emisyonları, Yüksek sıcaklıkta yakma prosesleri                                    | Göz ve solunum yolu hastalıkları, asit yağmurları                                     |
| <b>Partikül madde</b> | Sanayi, yakıt yanması, tarım ve ikincil kimyasal reaksiyonlar                            | Kanser, kalp problemleri, solunum yolu hastalıkları, bebek ölüm oranlarında artış     |
| <b>Karbonmonoksit</b> | Eksik yanma ürünü, taşıt emisyonları                                                     | Kandaki hemoglobinin ile birleşerek oksijen taşınma kapasitesinde azalma, ölüm        |
| <b>Ozon</b>           | Trafikten kaynaklanan azotoksitler ve uçucu organik bileşiklerin güneş ışığıyla değişimi | Solunum sistemi problemleri, göz ve burunda iritasyon, astım, vücut direncinde azalma |

#### 1.7.1. Kirletici Gazlar

Kirletici gazların birim hava içerisindeki miktarının artmasıyla ortamdaki hava kalitesi düşmektedir. Kirleticiler, karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO<sub>2</sub>), kükürtdioksit (SO<sub>2</sub>), azotoksitler (NO<sub>x</sub>) ve hidrokarbonlar (HC) şeklinde gaz kirleticiler ve duman, metalik duman, uçucu kül, mist (sis vb.) ve aerosoller şeklinde toz kirleticiler olarak iki alt gruba ayrılmaktadır. Bu grupların dışında yer alan, ozon (O<sub>3</sub>), peroksi asetil nitrat (PAN) ve peroksi benzol nitrat (PBN) gibi fotokimyasal oksidantlar da ikincil hava kirleticileri olarak tanımlanmaktadır (Denhez, 2017).

Kirleticiler, volkanik patlama, orman yangını, toz fırtınaları gibi doğal yollarla meydana gelebileceği gibi uçak, araba, tren gibi motorlu taşıtlarda ve endüstri faaliyetlerinde katı, sıvı ve gaz yakıtların yakılması şeklinde insan faaliyetleri sonucunda da meydana gelebilmektedir.

Ortam hava kalitesi üzerinde önemli etkilere sahip kirleticiler ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

- **Karbonmonoksit (CO):** Karbonmonoksit renksiz, kokusuz ve tatsız bir gaz olup karbon içeren yakıtların eksik yanması ile ortaya çıkmaktadır. Solunan havada karbonmonoksit konsantrasyonunun artmasıyla, kana geçen karbonmonoksit miktarı da artmaktadır. Kana geçen karbonmonoksit, hemoglobine oksijenden daha kolay bağlanmaktadır. Kandaki bütün karbonmonoksitler bitmeden oksijen hemoglobine bağlanamamakta ve bu nedenle, oksihemoglobin meydana gelememekte ve kanda karboksihemoglobin artmaktadır. Bu durum sonucunda dokulara oksijen taşınamamakta ve hücre ölümleri meydana gelmektedir. Ortamdaki karbonmonoksit konsantrasyonu 50 ppm değerinin üzerine çıktığında insan sağlığı için tehlike oluşturmakta, 100 ppm değerinin üzerine çıktığında ise koma hali oluşturmaktadır. Ortamda 400 ppm değerinden daha fazla bir konsantrasyon ortaya çıktığında müdahalede gecikildiğinde ölçüm tablosu ortaya çıkmaktadır. Karbonmonoksit miktarının insan üzerindeki süreye bağlı etkisi Tablo 8’de, kandaki karbonmonoksit düzeyine göre klinik bulgular ise Tablo 9’da görülmektedir.

Tablo 8. Karbonmonoksit miktarının insan üzerindeki süreye bağlı etkisi (TMMOB,2010)

| <b>Hava Konsantrasyonu (%)</b> | <b>İzin verilebilir maruziyet süresi</b>       |
|--------------------------------|------------------------------------------------|
| 0.01                           | Birkaç saat                                    |
| 0.04-0.06                      | Fark edilmeden 1 saat normal nefes alınabilir. |
| 0.06-0.07                      | 1 saat sonra fark edilir etki                  |
| 0.07-0.012                     | 1 saat maruz kalma tehlikeli                   |
| 0.12-0.020                     | 1 saatten az maruz kalma tehlikeli             |
| 0.20-0.40                      | 1 saatten az süre ölüme yol açar               |
| >0.40                          | Ölümcül sınır                                  |

Tablo 9. Kandaki karbonmonoksit düzeyine göre klinik bulgular (Dursen ve Yasun, 2012)

| Kandaki CO Düzeyi (%) | Bulgular                                                                                                                                  |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| %10-20                | Bulantı, yorgunluk, duygusal dengesizlik, konfüzyon, sakarlık                                                                             |
| %21-30                | Baş ağrısı, efor dispnesi, angına, görme duyusu değişikliği, tehlikeye karşı tepki vermede zayıflık, hafif güç kaybı, duyularda zayıflama |
| %31-40                | Baş dönmesi, sersemlik, bulantı, kusma, görme bozukluğu                                                                                   |
| %41-50                | Bayılma, bilinç değişikliği, unutkanlık, taşikardi, taşipne                                                                               |
| %51-60                | Nöbetler, koma, belirgin asidoz, ölüm ihtimali                                                                                            |
| %60 üzeri             | Ölüm                                                                                                                                      |

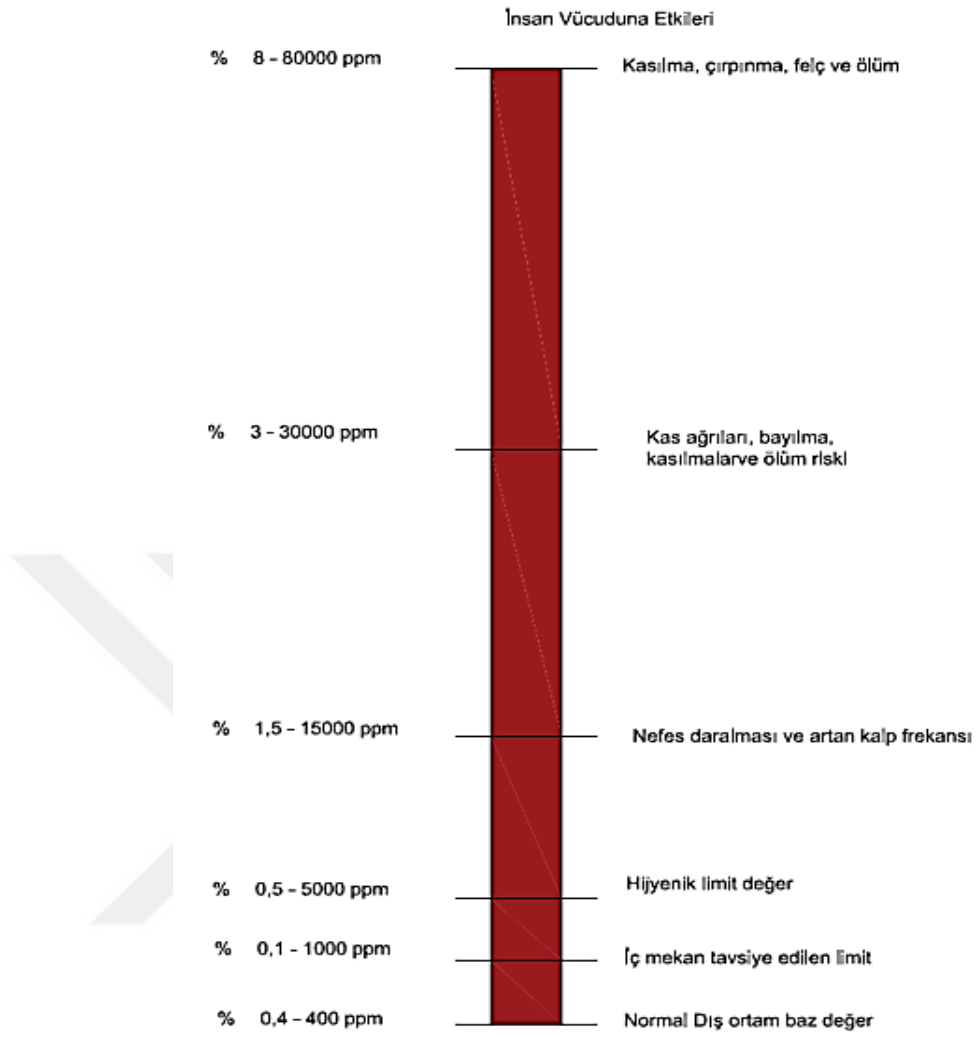
Kararlı bir gaz olan karbonmonoksitin atmosferde kalıcılık süresi 2 aydan fazladır. Dünyadaki karbonmonoksit üretiminin yaklaşık olarak %70'i ulaştırma sektöründen kaynaklanmaktadır (İncecik, 1994)

- Karbondioksit (CO<sub>2</sub>): Doğal hava içerisinde %0-0,03 düzeyinde bulunmasına rağmen insan konforu için önemli bir gazdır. Karbondioksit miktarı konutlarda ve sanayi bölgelerindeki bacalarda oldukça yüksektir. Havada bulunan karbondioksit gazının yıllık artış oranı %0,2-0,8 arasında değişmektedir. Son 20 yılda karbondioksit gazının yıllık artış oranı %0,4 civarında gerçekleşmiştir (Denhez, 2017). Hava içerisindeki karbondioksit konsantrasyonunun ölçülmesiyle iç hava kalitesini değerlendirmek mümkün olmaktadır. 1000 ppm değerine kadar olan karbondioksit konsantrasyonları, kabul edilebilir iç hava kalitesini göstermektedir. Karbondioksit konsantrasyonunun 1000 ppm değerini aşması durumu ise, havalandırma ihtiyacını göstermektedir. Karbondioksit konsantrasyonu ile havalandırma miktarı arasındaki ilişkiyi Şekil 2'de görülmektedir (URL 6).

|                                                      |                                                                                   |                                        |      |                                       |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------|---------------------------------------|
| Havalandırma Miktarının Arttırılması Gerekmemektedir |  | İç Ortam CO <sub>2</sub> Miktarı (ppm) | 2600 | Havalandırma Miktarı Kabul Edilemez   |
|                                                      |                                                                                   |                                        | 2400 |                                       |
|                                                      |                                                                                   |                                        | 2200 | Havalandırma Miktarı Çok Zayıf        |
|                                                      |                                                                                   |                                        | 2000 |                                       |
|                                                      |                                                                                   |                                        | 1800 | Havalandırma Miktarı Zayıf            |
|                                                      |                                                                                   |                                        | 1600 | Havalandırma Miktarı Yetersiz         |
|                                                      |                                                                                   |                                        | 1400 |                                       |
|                                                      |                                                                                   |                                        | 1200 | Havalandırma Miktarı Kabul Edilebilir |
|                                                      |                                                                                   |                                        | 1000 | Havalandırma Miktarı İdeal            |
|                                                      |                                                                                   |                                        | 800  | Havalandırma Miktarı Çok Fazla        |
| Havalandırma Miktarının Düşürülmesi Gerekmemektedir  |  |                                        | 600  |                                       |
|                                                      |                                                                                   |                                        | 400  | Dış Ortam Seviyesi                    |

Şekil 2. CO<sub>2</sub> seviyesi ile havalandırma arasındaki ilişki (URL 6)

Ortam hava kalitesini bozan karbondioksit, insan yaşamına etki eden önemli kirleticilerden biri olarak ifade edilmektedir. Karbondioksit, solunum ve volkanik patlamalar gibi doğal yollarla oluştuğu gibi yanan fosil yakıtlar ve ormansızlaşma gibi insan faaliyetleri yoluyla da oluşan önemli bir ısı tutucu gaz (sera gazı) olarak tanımlanmaktadır. Ortamda bulunduğu düzeye bağlı olarak insan metabolizmasını bozarak ölüme sonuçlanabilecek etkilere yol açabilmektedir. Farklı karbondioksit konsantrasyonlarının insan vücuduna etkileri Şekil 6’da görülmektedir.



Şekil 3. CO<sub>2</sub> gazının farklı konsantrasyonlardaki zarar düzeyleri (URL 7)

- Kükürtdioksit (SO<sub>2</sub>): Gaz halindeki kirleticiler arasında yanıcı olmayan renksiz bir gaz olan kükürtoksitler en çok bilinen birincil hava kirleticilerdendir. Atmosferde kalıcılık süresi 40 günü bulmaktadır. Çoğunlukla fosil yakıtların yanması sonucunda meydana gelmektedir (Agren, 1991). ASHRAE standartlarında yoğunluk sınırı 80 µg/m<sup>3</sup>, izin verilebilen en yüksek sınır ise 350 µg/m<sup>3</sup>'tür. Tüm dünyada yılda yaklaşık 80 milyon ton SO<sub>x</sub> atmosfere bırakılmaktadır. Bu durum, dünyadaki SO<sub>2</sub> konsantrasyonunu her yıl 0,006 ppm düzeyinde arttırmaktadır (URL 8).
- Azot Oksitler (NO<sub>x</sub>): Azotoksit renksiz ve kokusuz bir gazdır. Taşıtlarda yüksek sıcaklıkta yanma ürünü olarak ortaya çıkmaktadır. Egzoz gazları, fosil yakıtlar ve organik maddeler azotoksit kaynakları olarak ifade edilmektedir. Azotoksit (NO) ve azotdioksit (NO<sub>2</sub>) şeklindeki atmosferik konsantrasyonların birleşik değeri NO<sub>x</sub> ile

temsil edilmektedir. Azotdioksit ( $\text{NO}_2$ ) çoğunlukla gübre olarak kullanılmaktadır. Atmosferde kalıcılık süresi yaklaşık bir gün olmaktadır (URL 8).

- Partikül Maddeler (Toz Emisyonlar) ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ): Partikül madde, nefes alındığında vücuda girebilecek boyutlarda olan ve havada bulunan duman, is, toz ve sis gibi maddecikler olarak tanımlanmaktadır. Partikül çapı  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ )'den ve  $2,5\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ )'den küçük olanlar solunabilir partiküller olarak ifade edilmektedir (Sağlam, 2019).
- Kurşun: Kurşun, hava kirliliğine yol açan en önemli metallere biridir. Çoğunlukla, kurşunlu benzin kullanan taşıtlardan, sanayi tesislerinden ve boya uygulamalarından kaynaklanmaktadır. Özellikle çocuklarda ciddi zehirlenmelere yol açmaktadır. Ayrıca anemi ve zekâ geriliği etkileri oluşturmaktadır (URL 9).
- Uçucu Organik Bileşikler (UOB): Atmosferde bulunan karbon, karbonmonoksit ve karbondioksit dışındaki karbon içeren bileşikler olarak bilinen uçucu organik bileşikler ortam havası kirleticilerinin önemli bir grubunu oluşturmaktadır. Oda sıcaklığında buharlaşabilen bu kirleticilerin en önemlileri, aşağıda özellikleri verilen formaldehit, benzen ve tolüendir (Sağlam, 2019).

### 1.8. Havalandırma Sistemleri

Havalandırma sistemleri iç ortamların konforlu hale getirilmesi amacıyla kullanılan en yaygın sistemlerdir. Bu sistemler, doğal havalandırma, mekanik havalandırma ve hibrit havalandırma şeklinde üç farklı tipte uygulanmaktadır (URL 10).

Doğal havalandırmada, ortamdaki bir açıklık veya boşluktan kendiliğinden içeri giren veya dışarı çıkan havanın hareketi söz konusu olmaktadır. Bu ortamlardaki hava, sıcaklık ve basınç değişimleri nedeniyle sürekli hareket halindedir.

Mekanik havalandırmada, doğal havalandırmadan farklı olarak ortamdaki hava tahliye edilip ortama temiz havanın girmesi sağlanmaktadır. Hem ortamdaki kirli havanın dışarıya tahliyesi hem de dışarıdan temiz havanın ortama girmesi için fanlar kullanılmaktadır. Ortam havası temiz hale getirilirken ortamdaki nem ve sıcaklık değerleri de ısı konforu sağlayacak şekilde düzenlenmektedir.

Hibrit havalandırma, doğal ve mekanik havalandırmayı birleştiren bir sistem olarak ifade edilmektedir. Çoğunlukla yeni konutlar için uygun bir çözüm olarak sunulan bu

yöntemde farklı varyasyonlar uygulanmaktadır. Bu sayede, daha düşük enerji maliyetiyle iç ortamlarda optimum konfor şartları sağlanmaktadır (URL 6).

### **1.8.1. Doğal Havalandırma Sistemleri**

Karayolları tünellerindeki doğal havalandırma sistemlerinde meteorolojik koşulların durumuna ve hareket eden araçlardan kaynaklanan piston etkisine göre tünel içerisinde kabul edilebilir ortam koşulları sağlanmaktadır (Chen vd., 1998). Meteorolojik koşullar uzun tünellerdeki doğal havalandırmada önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Doğal havalandırma, dikey doğrultuda yerleştirilmiş şaftların oluşturduğu baca etkisiyle sağlanmaktadır. Doğal havalandırmada taşıt hızı, taşıtlar arası aralık, trafik yönü, taşıt sürüklenme katsayısı ve tünel geometrisi gibi birçok faktör etkili olmaktadır (Chen vd., 1998).

Karayollarındaki kısa tünellerde çoğunlukla doğal havalandırma sistemleri kullanılmaktadır. Yangın durumunda, mekanik havalandırma cihazlarının bulunmaması nedeniyle duman doğal olarak katmanlaşarak tünel boyunca boylamasına yayılmaktadır. Tünelin üst kısmında oluşan tabakalaşma nedeniyle, tünel kesitinin alt kısmında dumandan arındırılmış bir bölge meydana gelmektedir. Bu durum, tünel kullanıcılarının güvenli bir şekilde tahliyesine olanak sağlamaktadır. Tavanın altında oluşan duman tabakasının derinliği, yangının boyutuna ve büyüme hızına, tünel kesit geometrisine ve çevresel koşullara ve piston etkilerine göre şekillenen doğal havalandırma etkisine göre değişmektedir (Collela, 2010).

### **1.8.2. Mekanik Havalandırma Sistemleri**

Mekanik havalandırma, iç ortamların hava kalitesini optimum bir seviyede tutmak için kullanılan bir teknoloji olarak bilinmektedir. Boylamasına havalandırma, enine havalandırma ve yarı-enine havalandırma olmak üzere üç farklı şekilde uygulanan bu sistemler, doğal havalandırmanın yeterli olmadığı ya da istenilen koşulların sağlanamadığı durumlarda kullanılmaktadır.

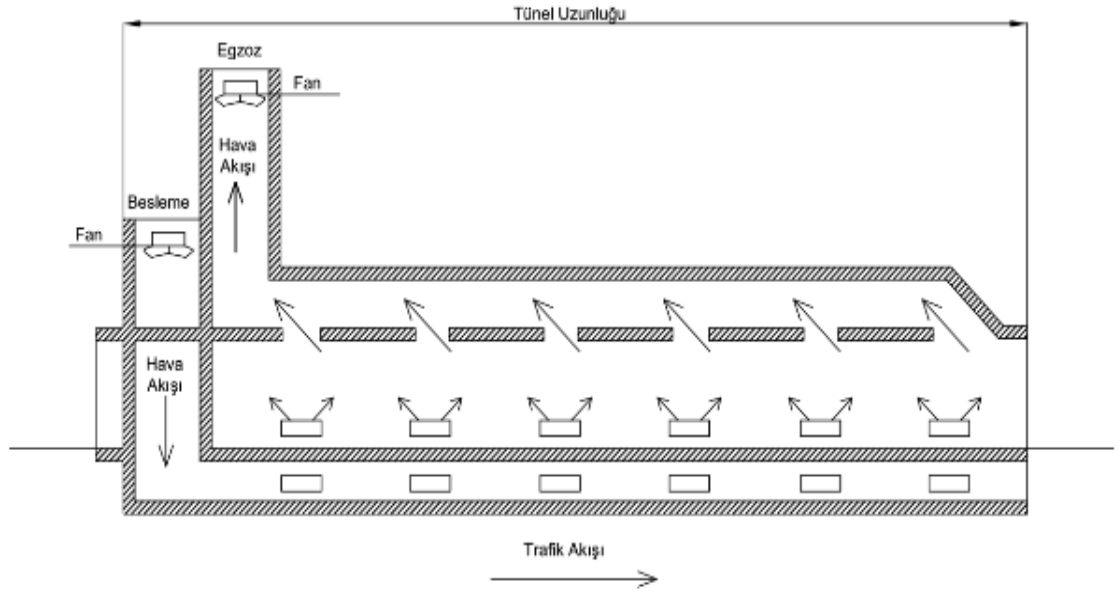
- **Boylamasına Havalandırma Sistemleri**

Boylamasına havalandırma sistemlerinde, sınırlı sayıda noktadan giren veya çıkan hava ile tünel içerisinde boylamasına bir havalandırma akışı oluşturulmaktadır. Boylamasına hareket, tünel tavanına yerleştirilen ve boylamasına itme kuvveti sağlayan fanlarla veya hava enjeksiyon noktalarıyla oluşturulmaktadır. Tünel boşluklarında yüksek hızda hava üflemesi

yaparak boylamasına hava akışı sağlayan ve Saccardo nozülleri olarak adlandırılan hava üfleme aparatları kullanılmaktadır. (PIARC, 2008). Boylamasına havalandırma sistemlerinde, tünel tavanına yerleştirilmiş yüksek itme kuvvetine sahip eksenel fanlar kullanılmaktadır.

- **Enine Havalandırma Sistemleri**

Enine havalandırma sistemlerinde, tünel uzunluğu boyunca üniform hava beslemesi ve tahliyesi ile havalandırma sağlanmaktadır. Besleme kanalları genellikle zemin altında veya asma tavan üzerinde bulunmakta ve duman tahliyesi için belirli bir konumda otomatik olarak açılabilen ızgaralar kullanılmaktadır. Kanalların içinde, eksenel fanlarla donatılmış havalandırma istasyonları yer almaktadır. Şekil 4’de tipik bir enine havalandırma sistemi şematik olarak verilmiştir. Uzun tünellerde besleme kanalları, her bir havalandırma istasyonunun boyutunu ve hava hızlarını sınırlamak için genellikle bölümlere ayrılmaktadır. Enine havalandırma sistemleri uzun tüneller ve çift yönlü trafik durumlarında tercih edilmektedir.

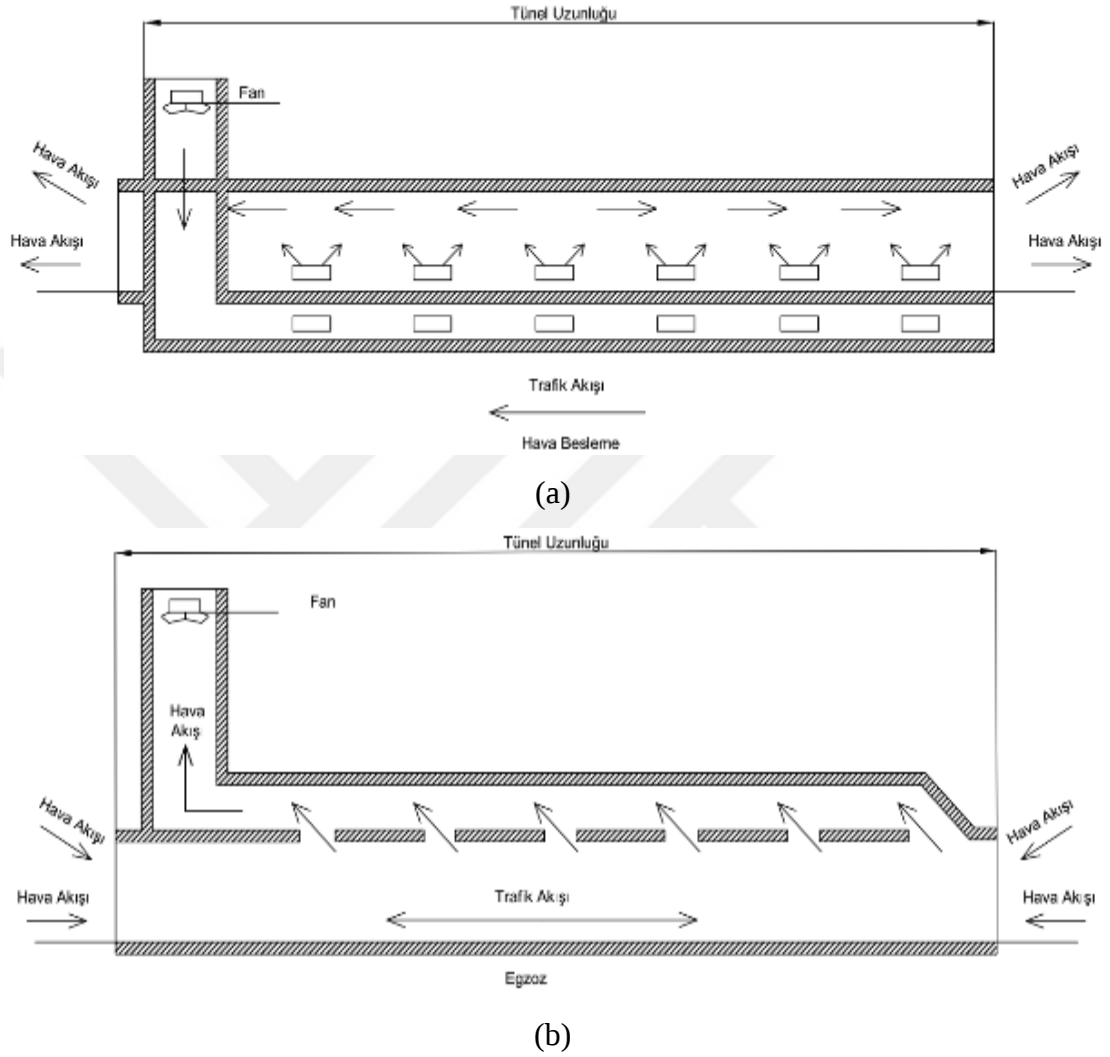


Şekil 4. Enine havalandırma sistemi (Collela, 2010)

- **Yarı-Enine Havalandırma Sistemleri**

Yarı enine havalandırma sistemlerinde de tünel uzunluğu boyunca üniform hava beslemesi veya tahliyesi ile havalandırma sağlanmaktadır. Havalandırma sisteminin çalışma şekline bağlı olarak, yarı enine havalandırma sistemleri, Şekil 5’de görüldüğü gibi besleme yarı enine havalandırma sistemleri veya egzoz yarı enine havalandırma sistemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Besleme yarı enine havalandırma sistemlerinde hava tünel içerisine

üflenerek kirliliğin azaltılması sağlanmaktadır. Egzoz yarı enine havalandırma sistemlerinde ise, yangın durumlarında tünel içerisindeki dumanın tahliye edilmesi için fanların ters çalıştırılarak kullanıldığı sistemlerdir.



Şekil 5. Yarı enine havalandırma sistemi (Collela, 2010)  
(a) Besleme (b) Egzoz

### 1.8.3. Hibrit Havalandırma Sistemleri

Hibrit havalandırma, doğal ve mekanik havalandırmayı birleştiren bir sistem olarak ifade edilmektedir. Hibrit havalandırma sistemi, yeni konutlar için uygun bir çözüm olarak sunulmaktadır. Bu sistemler, eski havalandırma sistemlerinin yenilenmesi sürecinde fanların uzunlamasına ve enine düzenlerinin hibrit kombinasyonları şeklinde uygulanmaktadır.

Hibrit havalandırma sistemleri, tünel içerisinde yüksek duman kontrol kabiliyeti sağlamaktadır (Collela, 2010).

#### **1.8.4. Karayolu Tünel Havalandırma Sistemleri**

Tünellerin güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için uluslararası standartlarda belirtilen şartlara uygun havalandırma sistemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu havalandırma sistemleri, normal şartlarda tüneli kullanan taşıtların oluşturduğu zehirli gazların tünel içerisinde uzaklaştırılması için kullanılırken, yangın gibi acil durumlarda ise oluşacak dumanın ve sıcak havanın tahliyesi için kullanılmaktadırlar. Bu sistemler sayesinde yangın durumunda tünel içerisindeki insanlar acil kaçış tüplerine ve tünel dışına hareket ederlerken daha az zehirli gaza maruz kalmaktadır. Karayolu tünellerinde en yaygın kullanılan fan tipi aksel fanlardır.

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Deneyisel Çalışma**

Saha çalışması şeklinde gerçekleştirilen deneyisel çalışma Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan Akyazı Tüneli'ndeki karbondioksit ölçümleri ile sınırlı tutulmuştur. 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.

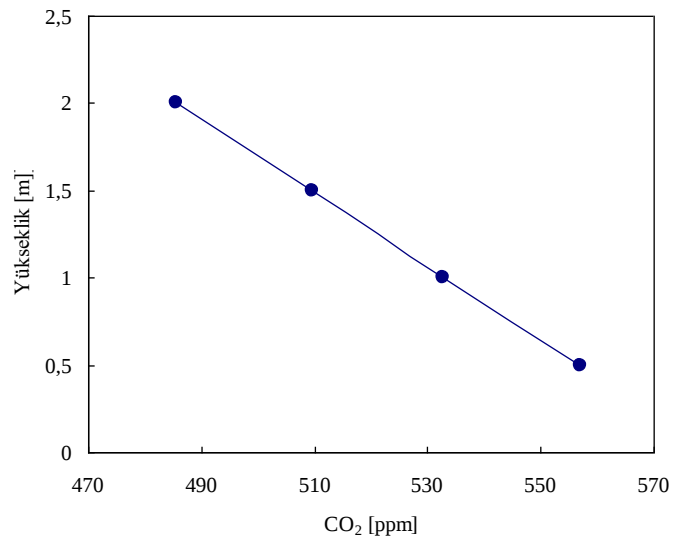
#### **2.1.1. Karbondioksit Ölçümü**

Tünel içerisindeki karbondioksit ölçümleri Şekil 6'da görülen 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 (URL 11).



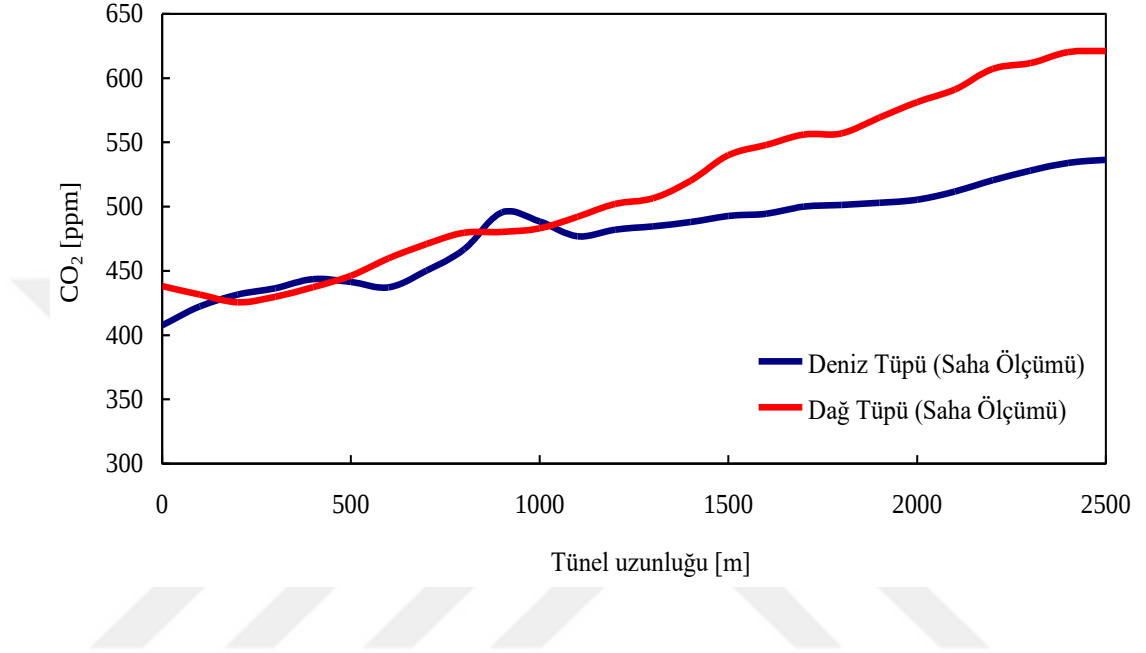
Şekil 6. İç hava kalitesi ölçüm cihazı ve probu

Şekil 7’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. Taşıtların egzoz seviyesine karşılık gelen 50 cm yüksekliğinde en büyük olan karbondioksit değeri yükseklik arttıkça doğrusal olarak azalmaktadır.



Şekil 7. Duraklama cebinde karbondioksit değerlerinin yükseklikle değişimi

Şekil 8’da, 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 8. Tünel boyunca karbondioksit değerleri

## 2.2. Sayısal Çalışma

### 2.2.1. Hareket Denklemleri

Akış probleminin sayısal çözümünde, akışkanlar mekaniğinin genel denklemleri olan Navier-Stokes ve süreklilik denklemleri 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. Sıkıştırılamaz 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 ise 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 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 olarak elde edilmektedir. Bu denklemlerde yer alan çalkantı terimlerinin hesaplanmasına yönelik çok sayıda türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, Standart k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε ve Standart k-ω türbülans modelleriyle çözümler gerçekleştirilmiştir.

### 2.2.2. Türbülans Modelleri

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 incelenebilmesi için akış alanını çözmeyi amaçlayan modeller geliştirilmiş ve “türbülans modeli” kavramı bu şekilde ortaya çıkmıştır (Launder ve Spalding, 1974). Son yıllarda teknolojinin gelişimine paralel olarak bilgisayarların hız ve kapasitesindeki iyileşme sayesinde, türbülanslı akışların sayısal incelenmesine yönelik çalışmalar son derece yaygınlaşmıştır. Farklı türbülans modelleriyle hesaplanan akış alanları, türbülans modellerinin hassasiyetlerine yönelik bilgiler de sunmaktadır. Birçok türbülans modelinin bazı akış alanlarındaki deneysel verilerle uyumlu sonuçlarına rağmen, yine de bütün türbülanslı akışları yüksek doğrulukta çözen genel bir model üretilmemiştir. Türbülans modelleri, gerçek türbülanslı akış karakteristiklerini hesaplayabilmek için, zaman ortalaması alınmış Navier-Stokes (RANS) denklemleri ile birlikte çözülen bir dizi diferansiyel transport denklemleri ve cebirsel sabitler 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'ı hesaplamak için aynı yapıdaki denklemleri kullanmaktadır. Aralarındaki belirleyici farklar, türbülans viskozitesini hesaplama yöntemi, türbülanslı Prandtl sayısı ve ε denklemindeki terimlerde ortaya çıkmaktadır.

- **Standard k-ε Türbülans Modeli**

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

- **RNG k-ε Türbülans Modeli**

RNG k-ε türbülans modeli, Navier-Stokes denklemlerinin “renormalisation group (RNG)” metodu olarak bilinen bir matematiksel teknikle çözülmesiyle elde edilmiştir. RNG metodu kullanılarak çözülen denklemlerin oluşturduğu model Standard k-ε modeline göre farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar, oluşan yeni katsayılar, eklenen yeni terimler ve

transport denklemlerindeki değişimler şeklindedir (Fluent, 2011). RNG k-ε türbülans modelinde transport denklemleri,

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (8)$$

şeklinde oluşmaktadır. Burada;  $G_k$ ,  $G_b$ ,  $S_k$ ,  $Y_M$  ve  $S_\varepsilon$ , Standard k-ε modelindeki terimler ile aynı olmakta,  $\alpha_k$ , k için ters etkili Prandtl sayısı,  $\alpha_\varepsilon$ , ε için ters etkili Prandtl sayısı,  $\mu_{eff}$ , efektif viskozite,  $R_\varepsilon$ , RNG modelinde ε için kullanılan ek terim,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$ , model sabitleri olarak tanımlanmaktadır.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  model sabitleri, RNG k-ε türbülans modelinde analitik olarak  $C_{1\varepsilon}=1.42$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.68$  olarak belirlenmişlerdir.

- **Realizable k-ε Türbülans Modeli**

Shih vd. (1995) tarafından önerilen Realizable k-ε model, türbülanslı akışın fiziği ile ilgili normal gerilmeler üzerindeki belli matematiksel sınırlamaları aşmaya yönelik bir yaklaşım getirmektedir. Bu yaklaşımda,  $\delta_{ij}$  kroneker delta olmak üzere, sıkıştırılamaz bir akış için Reynolds gerilmeleri,

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (9)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Türbülans viskozitesi,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

ve normal gerilmeler,

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3} k - 2 \nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \quad (11)$$

olarak tanımlanmaktadır. Türbülans viskozitesi ifadesinde yer alan  $C_\mu$  terimi değişken olup, ana şekil değişimi, rotasyon oranı ve sistemin açısısal hızını bir fonksiyonudur.

$k$  ve  $\varepsilon$  için modellenmiş transport denklemleri,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (13)$$

şeklindedir. Bu denklemlerde,  $G_k$ , ortalama hız gradyenti nedeniyle türbülanslı kinetik enerji üretimini;  $G_b$ , kaldırma kuvveti nedeniyle türbülanslı kinetik enerji üretimini ifade etmektedir.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_2$  ve  $C_{3\varepsilon}$  sabitler olup,  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  ise türbülans Prandtl sayılarıdır.  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$  sırasıyla,  $k$  ve  $\varepsilon$  için kaynak terimleridir. Realizable k- $\varepsilon$  modelinde kullanılan sabitler,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_2 = 1.9$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.2$  şeklindedir.

- **Standard k- $\omega$  Türbülans Modeli**

Kolmogorov tarafından önerilen bu türbülans modelinde,  $k$  türbülans kinetik enerjiyi;  $\omega$  ise yutulmanın kinetik enerjiye oranını ( $\omega = \varepsilon/k$ ) ifade etmektedir (Wilcox,2002). Bu modelde türbülans viskozitesi,

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (14)$$

olarak tanımlanmaktadır. Türbülans kinetik enerji ( $k$ ) ve özgül yutulma ( $\omega$ ) için transport denklemleri,

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (15)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega + \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (16)$$

şeklindedir. Bu denklemlerde,  $G_k$ , ortalama hız gradyanları nedeniyle türbülans kinetik enerjisi üretimini;  $G_\omega$ ,  $\omega$ 'nın üretimini ifade etmektedir.  $\Gamma_k$  ve  $\Gamma_\omega$ ,  $k$  ve  $\omega$  için efektif difüzyon;  $S_k$  ve  $S_\omega$  ise, kaynak terimleridir)

### 2.2.3. Konsantrasyon Denklemleri

Bu çalışmada, karayolu tünellerinde taşıt egzozlarından çıkan karbonmonoksit ve karbondioksit gazlarının tünel havası içerisindeki düzeyleri ve dağılımları sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, ticari bir yazılım olan ANSYS FLUENT ile sayısal gerçekleştirilmiştir. Karbonmonoksit ve karbondioksit gibi kimyasal gazların ANSYS FLUENT ile hesaplanmasında, konsantrasyon modeli etkinleştirilmekte ve transfer denklemleri çözülmektedir. Aşağıda verilen konveksiyon-difüzyon denkleminin çözümü ile her bir gazın yerel kütle oranı tahmin edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (17)$$

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

Türbülanslı akışlarda, kütle difüzyon akısı,

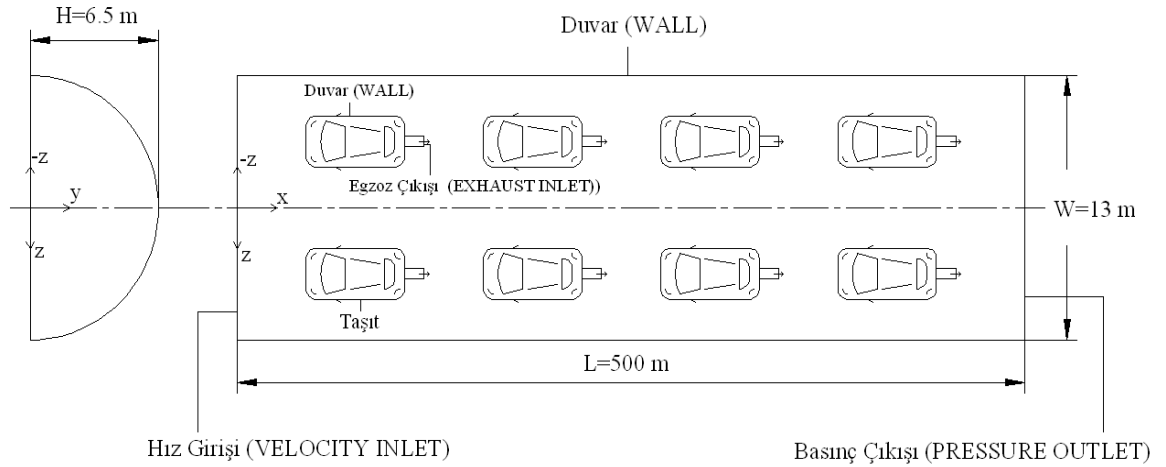
$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla \cdot Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (18)$$

şeklindedir. 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.

### 2.2.4. Akış Alanı

Bu tez çalışmasının sayısal kısmında, taşıtlı ve taşıtsız durumlar için tünel içerisindeki üç boyutlu akış alanları zaman bağımlı olarak kapsamlı şekilde incelenmiştir. Sayısal çalışmaların tamamında L=500 m uzunluğa, W=13 m genişliğe ve H=6.5 m yüksekliğe sahip

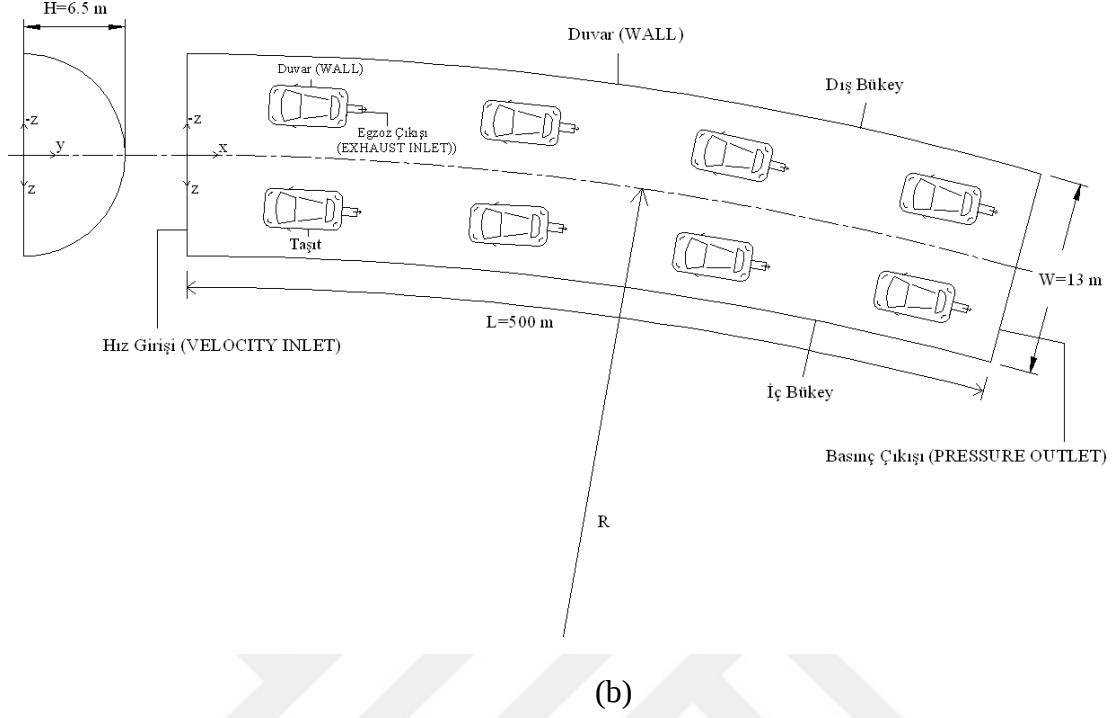
iki şeritli tünelleri dikkate alınmıştır. Sayısal çalışmaların ilk aşamasında, içerisinde taşıt bulunan iki şeritli 500 m uzunluğundaki düz bir tünelt ve  $R=950$  m ve  $R=1900$  m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçaları ile oluşan iki farklı kavise sahip iki şeritli iki tünelt incelenmiştir. Şekil 9’da taşıtlı tünellere ait örnek akış alanı görüntüleri verilmektedir. Hem düz tüneltde hem de kavisli tünellertde sınır şartları sırasıyla tünelt girişinde “Hız Girişi”, tünelt çıkışında “Basınç Çıkışı”, duvarlarda “Duvar” ve egzozlarda “Egzoz Çıkışı” şeklindedir. Düz tüneltde, farklı taşıt hızlarında çözümler gerçekleştirilmiştir. Taşıt hareketinin olmadığı 0 km/saat durağan hız durumunda zaman adımı 1 dakika alınarak 60 dakikalık çözüm elde edilmiştir. Taşıt hızının 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde ise zaman adımı 0.5 s alınarak sırasıyla 60 s, 36 s, 26 s ve 20 s sürelerle çözümler gerçekleştirilmiştir.



(a)

Şekil 9. Taşıtlı tünellertde örnek akış alanı görüntüleri (a) Düz tünelt (b) Kavisli tünelt

Şekil 9'un devamı

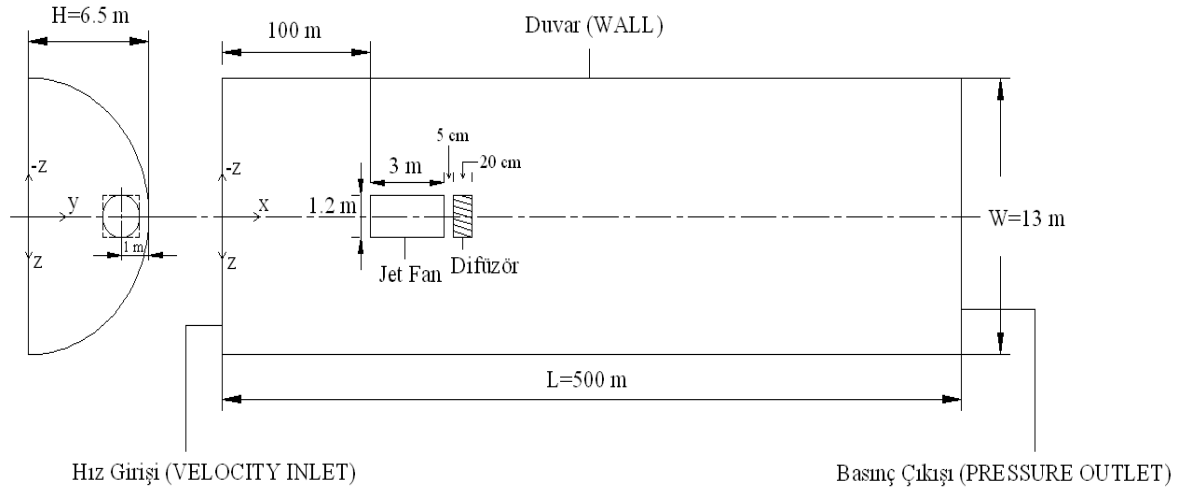


Sayısal çalışmaların ikinci aşamasında, tünel içerisinde kirliliğin en üst değere ulaştığı kritik düzeyler başlangıç durumu olarak dikkate alınmış ve taşıtsız durumda fan etkisi, tünel kavis durumu ve fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısı etkisi incelenmiştir. Tünel içerisinde fan etkisini incelemek amacıyla tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konuma fan yerleştirilmiştir.

500 m uzunluğundaki iki şeritli düz bir tünelde fan itme kuvveti etkisi, fan sayısı etkisi ve difüzör kanat açısı etkisi,  $R=950$  m ve  $R=1900$  m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçaları ile oluşan iki farklı kavise sahip iki şeritli iki tünelde ise fan durumu etkisi incelenmiştir. Şekil 10'de 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", duvarlarda "Duvar" ve egzozlarda "Egzoz Çıkışı" şeklindedir. Her iki tünel geometrisinde de 1.2 m çapa ve 3 m uzunluğa sahip eksenel fan kullanılmıştır. Düz tünelde fanın hemen arkasına 1.2 m kenar uzunluğuna ve 20 cm kalınlığa sahip kare şeklindeki difüzör yerleştirilmiştir.

Tünel içerisinde taşıtların olmadığı fanlı durumda, ilk önce tek fanlı iki şeritli düz tünelde fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, karayolları tünellerindeki fanlarda yaygın kullanılan itme

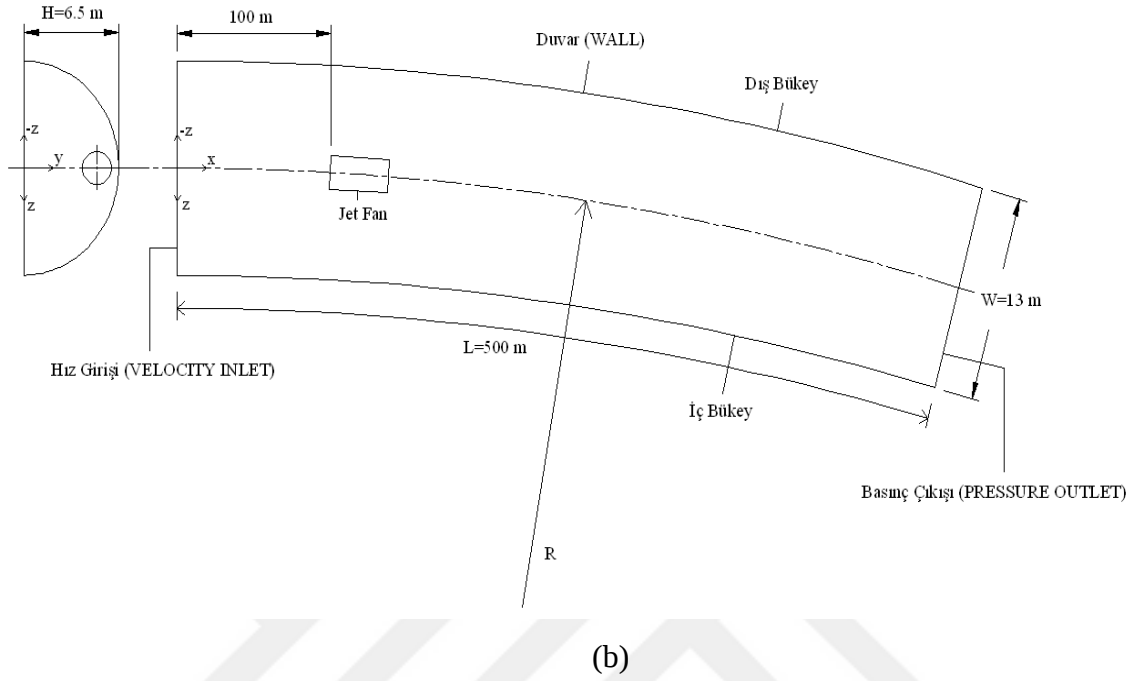
kuvveti değeri olan 950 N için 950 m ve 1900 m yarıçap değerleri ile temsil edilen iki şeritli tek fanlı kavisli tünellerdeki akış alanları sayısal olarak incelenmiştir. Fan sayısı etkisi, iki şeritli düz tünelde 950 N fan itme kuvveti değerinde tek fanlı, özdeş iki fanlı ve özdeş üç fanlı durumlar için incelenmiştir. Fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısı etkisi ise, iki şeritli düz tünelde tek fan durumunda ve 950 N fan itme kuvveti değerinde, difüzör kanat açısının  $\alpha=10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerleri için incelenmiştir. Taşıtsız fanlı tünellerdeki tüm sayısal çalışmalarda zaman adımı 1 dakika alınarak 60 dakikalık sürelerde çözümler elde edilmiştir. Taşıtsız fanlı tünellerde, karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımlarının zamana göre değişimlerinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen zaman bağımlı çözümlerde, kirliliğin en üst düzeye ulaştığı kritik düzeyler başlangıç durumundaki karbonmonoksit ve karbondioksit seviyeleri olarak sırasıyla 100 ppm ve 25000 ppm şeklinde dikkate alınmıştır.



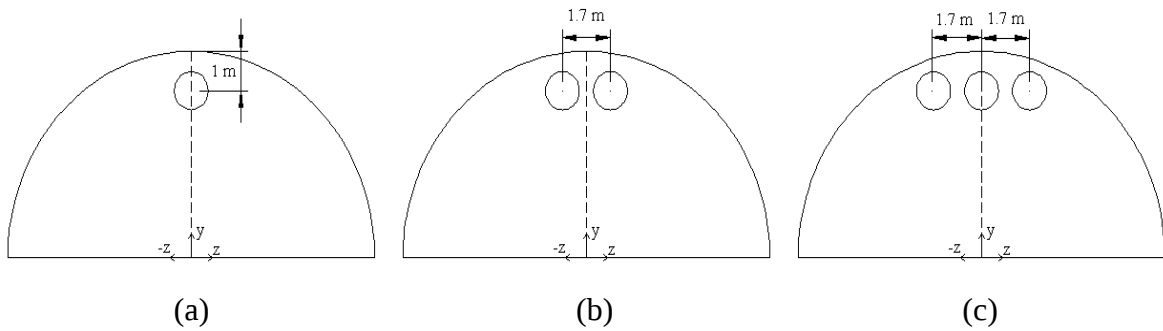
(a)

Şekil 10. Taşıtsız fanlı tünellerde örnek akış alanı görüntüleri  
(a) Düz tünel (b) Kavisli tünel

Şekil 10'un devamı

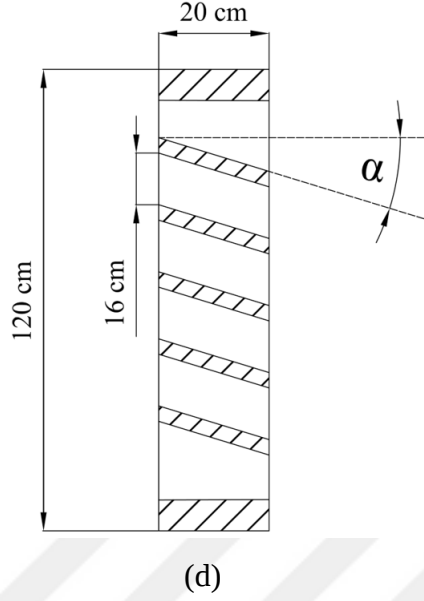


Fan sayısı etkisini incelemek amacıyla taşıtsız düz tünelde tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanı yakınına konumları Şekil 11a,b,c'de görülen özdeş fanlar yerleştirilmiştir. Şekil 11d'de taşıtsız fanlı difüzörlü çözümlerde kullanılan difüzör kesit görüntüsü yer almaktadır.

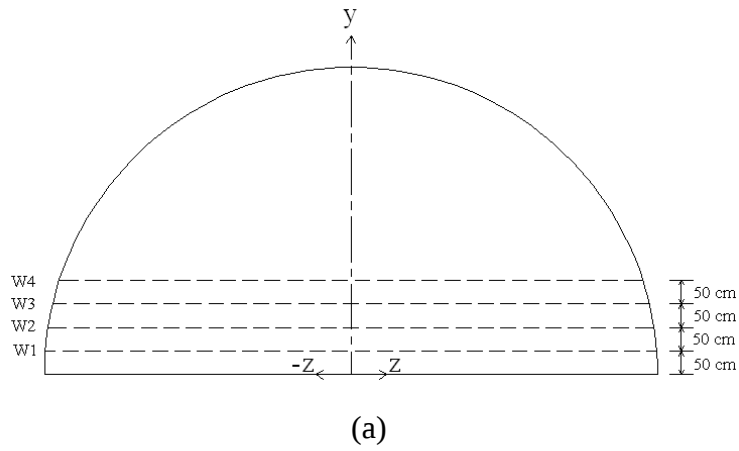


Şekil 11. Özdeş fanların konumu ve difüzör kesit görüntüsü  
 (a) Tek Fan (b) İki Özdeş Fan (c) Üç Özdeş Fan (d) Difüzör

Şekil 11'in devamı

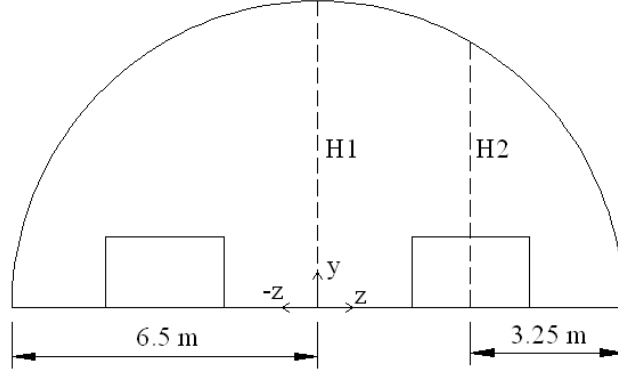


Sayısal çözümler sonucunda akış alanlarında hesaplanan büyüklükler, tünel içerisinde farklı istasyonlarda tanımlanmış yatay ve düşey hatlardaki çizgisel değişimler ve tünel en kesitlerindeki dağılımlar şeklinde verilmiştir. En kesitlerde tanımlanmış yatay ve düşey hatların konumu Şekil 12’de verilmiştir. W1, W2, W3 ve W4 olarak adlandırılan yatay hatlar tünel tabanından itibaren düşey doğrultuda 50 cm’lik mesafelerle oluşturulmuştur (Şekil 12a). Düşey hatlar ise, tünel yüksekliğine karşılık gelen H1 hattı ve taşıt kesitinin orta konumundaki düşey hattı temsil eden H2 hattıdır (Şekil 12b).



Şekil 12. Tünel en kesitinde tanımlanmış çizgisel hatlar  
(a) Yatay hatlar (b) Düşey hatlar

Şekil 12'nin devamı

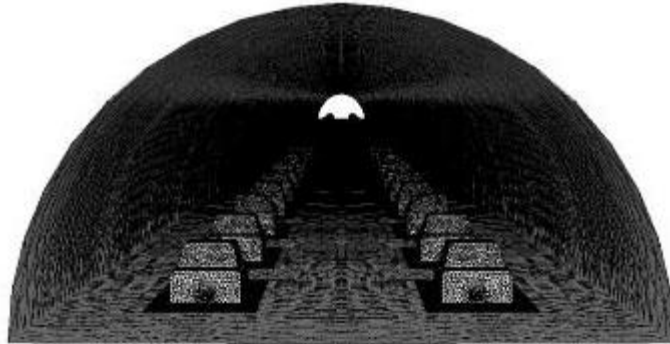


(b)

### 2.2.5. Ağ Yapısı

Sayısal çözümlerde akış alanlarındaki ağ yapıları, ANSYS FLUENT ticari yazılımı içerisindeki ağ modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada yapılandırılmamış ağ yapısı kullanılmıştır. Akış alanında taşıtların bulunduğu durumlarda egzoz çıkışında, taşıt etrafında ve akış alanının diğer bölgelerindeki ağ yoğunluğu taşıt boyuna göre belirlenmiştir. Ağ metodu olarak “Curvature ve Proximity” yaklaşımı esas alınmış ve ağ büyüme oranı 1.1 olarak dikkate alınmıştır. Maksimum çarpıklık oranının 0.85’den küçük olması sağlanmıştır.

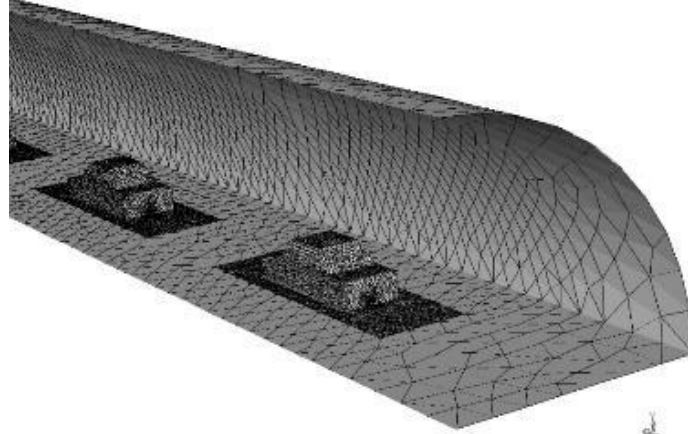
Şekil 14’de taşıtlı ve fanlı durumlara ait örnek ağ yapıları görülmektedir. Taşıtlı durumda egzoz ve araç etrafında yoğun olan ağ yapısı tünel duvarlarına doğru seyrekleşmektedir (Şekil 13a ve b). Fanlı durumda ise, fan etrafında daha yoğun olan ağ yapısı akış alanının diğer bölgelerinde seyrekleşmektedir (Şekil 13c).



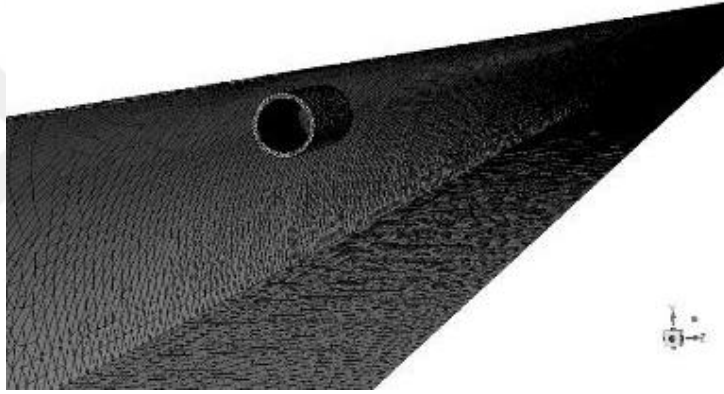
(a)

Şekil 13. Örnek ağ yapısı görüntüleri  
(a, b) Taşıtlı tünel (c) Fanlı tünel

Şekil 13'ün devamı

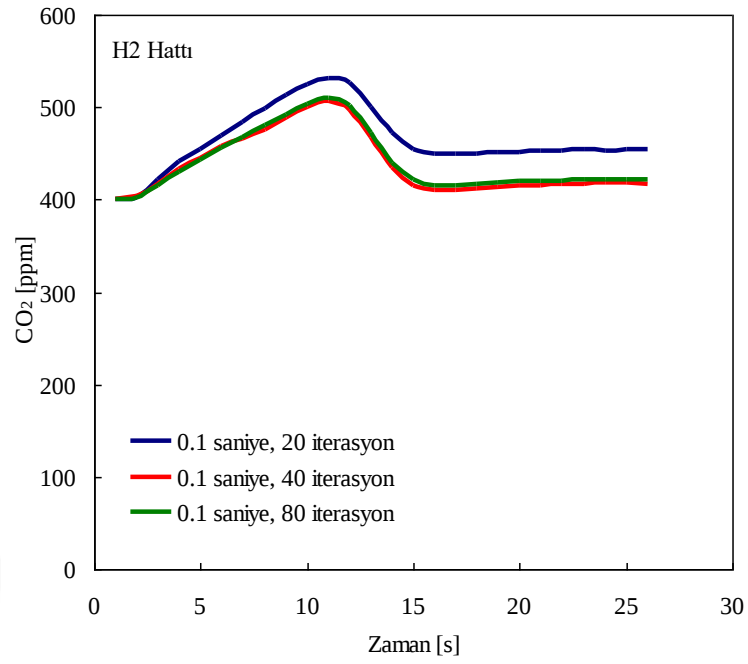


(b)



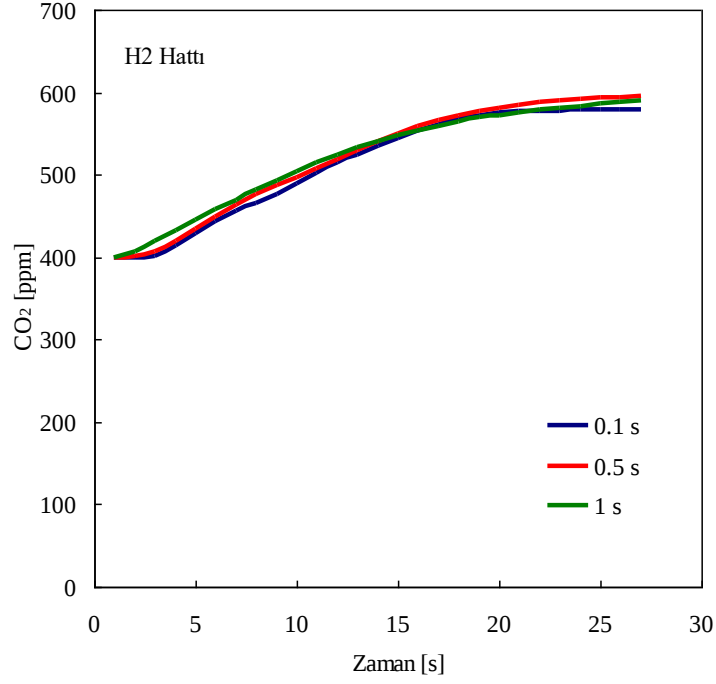
(c)

Sayısal çözümlerden elde edilecek sonuçların 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. İlk olarak zaman adımı 0.1 seçilerek iterasyon sayısının 20, 40 ve 80 değerleri için çözümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 14'te, taşıt hızının 70 km/saat olduğu durumda H2 hattındaki karbondioksit değerlerinin 26 s boyunca iterasyon sayısına göre değişimi görülmektedir. İterasyon sayısının 40 değerinden itibaren sonuçların değişmemesi nedeniyle tüm çözümlerde iterasyon sayısı olarak 40 dikkate alınmıştır.



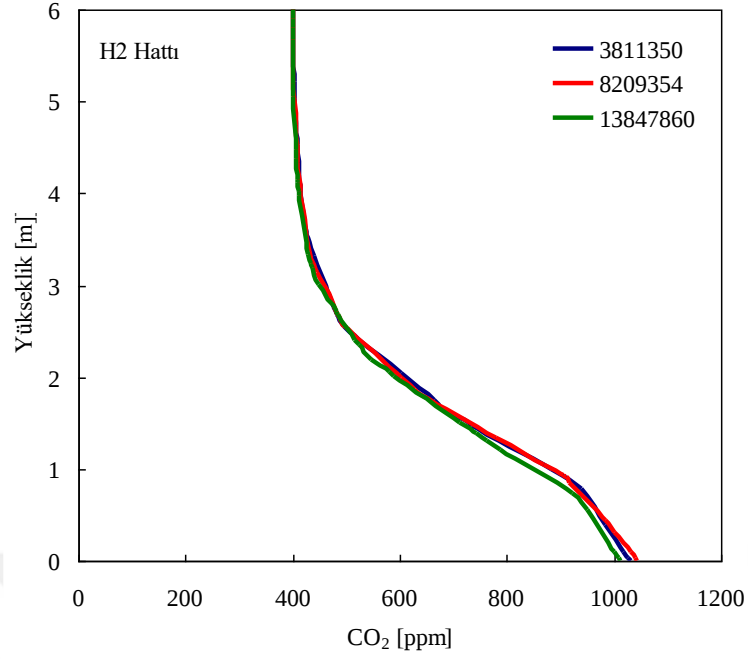
Şekil 14. İterasyon sayısı etkisi

Daha sonra, iterasyon sayısı 40 olarak dikkate alınıp, zaman adımının 0.1 s, 0.5 s ve 1 s değerleri için çözümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 15’de, taşıt hızının 70 km/saat olduğu durumda H2 hattındaki karbondioksit değerlerinin 26 s boyunca zaman adımına göre değişimi görülmektedir. Zaman adımının çözüm üzerinde belirgin bir etkisi olmaması nedeniyle tüm çözümlerde zaman adımı olarak 0.5 s dikkate alınmıştır.



Şekil 15. Zaman adımı etkisi

Üçüncü aşamada ise, belirlenen iterasyon sayısı ve zaman adımı değeri dikkate alınarak, egzoz çıkışında ve taşıt etrafında farklı ağ yoğunlukları denenmiştir. Şekil 16’da, taşıt hızının 70 km/saat olduğu durumda üç farklı ağ yoğunluğu için karbondioksit değerlerinin H2 hattındaki değişimi görülmektedir. Her üç ağ yoğunluğu durumunda da H2 hattındaki karbondioksit değerlerinin benzer olması çözümlerin ağdan bağımsız olduğunu göstermektedir. 70 km/saat taşıt hızı için ağ yoğunluğu 8.2 milyon olarak dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamındaki ağ yoğunlukları, taşıtlı düz tünelde taşıt sayısının 80 olduğu kritik durumda yaklaşık 50 milyon, taşıtlı kavisli tünelde yaklaşık 16 milyon, üç fanlı düz tünelde yaklaşık 15 milyon, fanlı kavisli tünelde yaklaşık 10.7 milyon ve fanlı difüzörlü tünelde yaklaşık 6.5 milyon şeklindedir. Taşıt yüzeylerinde  $y^+ \approx 35$  olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 16. Ağ yoğunluğunun çözüm üzerindeki etkisi

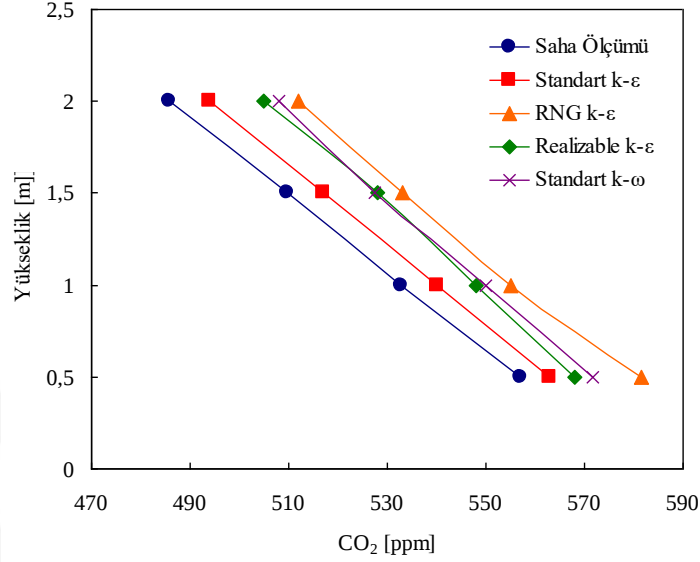
#### 2.2.6. Çözüm Metodu

Sayısal çözümlerde, duvar yaklaşımı olarak, daha kısa sürede yakınsama sağlaması nedeniyle iyileştirilmiş duvar yaklaşımı (Standart Wall Function) kullanılmıştır. İteratif çözücü olarak literatürde yaygın olarak kullanılan SIMPLE algoritması esas alınmıştır. Basınç interpolasyonu için ‘Standard’, diğer değişkenlerin ayrıklaştırılmasında ise ‘Second Order Upwind’ yöntemi kullanılmıştır. Çözümlerde yakınsama kriteri  $10^{-5}$  olarak dikkate alınmıştır. Karbonmonoksit ve karbondioksit konsantrasyon denklemlerinde ‘Diffusion Energy Source’ yaklaşımı esas alınmıştır.

#### 2.2.7. Türbülans Modeli Etkisi

Sayısal çözümlerde, türbülans modellerinin hassasiyetini incelemek amacıyla Standart k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$ , Realizable k- $\epsilon$  ve Standart k- $\omega$  şeklinde dört farklı türbülans modeli ile sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 17’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- $\epsilon$  türbülans modeli ile

hesaplanan değerlerin deneysel verilere daha yakın olduğu görülmüştür. Bu nedenle, çalışma kapsamındaki tüm sayısal çözümlerde Standart k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır.

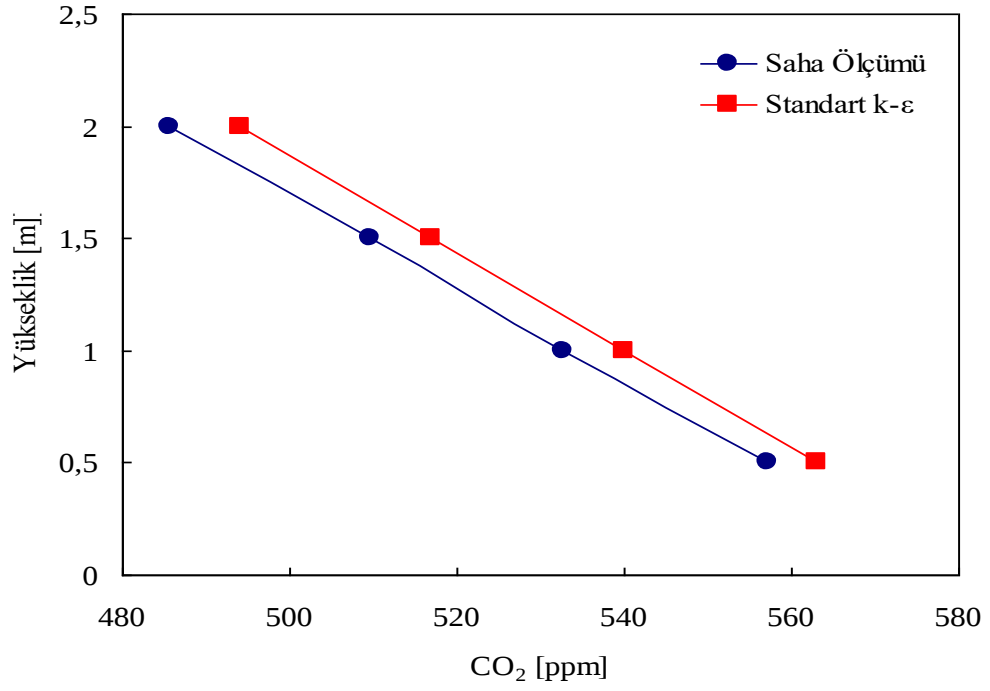


Şekil 17. Türbülans modeli etkisi

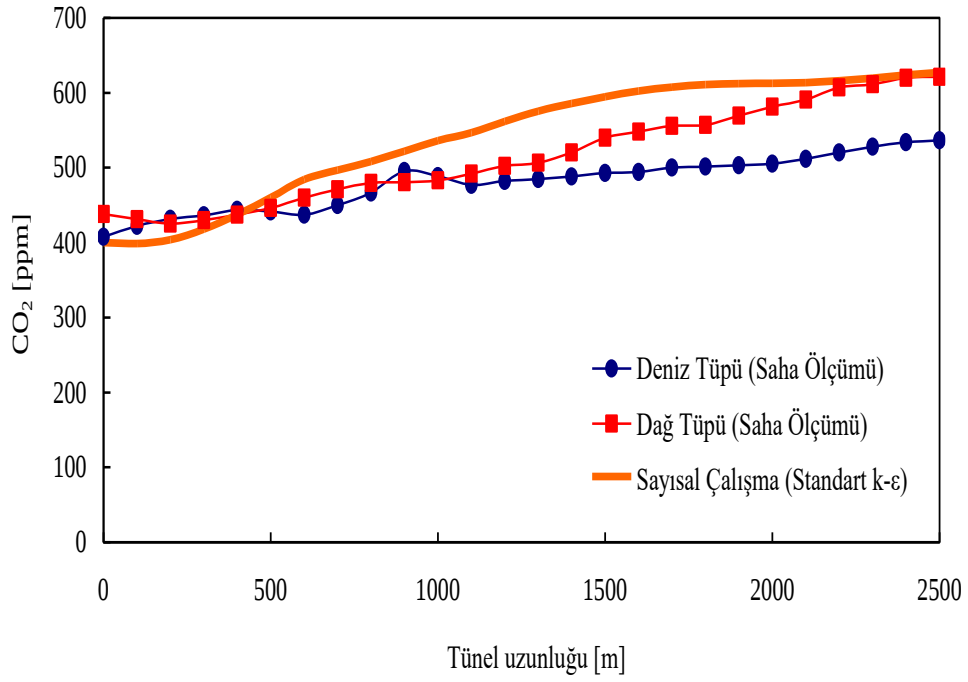
#### 2.2.8. Sayısal Modelin Doğrulanması

- **Saha Ölçümleri İle Doğrulama**

Bu çalışmada, 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- $\epsilon$  türbülans modeli ile hesaplanan karbondioksit değerleri ölçüm verileriyle birlikte Şekil 18'de görülmektedir. Tünel içerisindeki orta cepte düşey doğrultuda deneysel ve sayısal olarak elde edilen karbondioksit değerleri oldukça uyumludur (Şekil 18a). Şekil 3b'de Standart k- $\epsilon$  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)

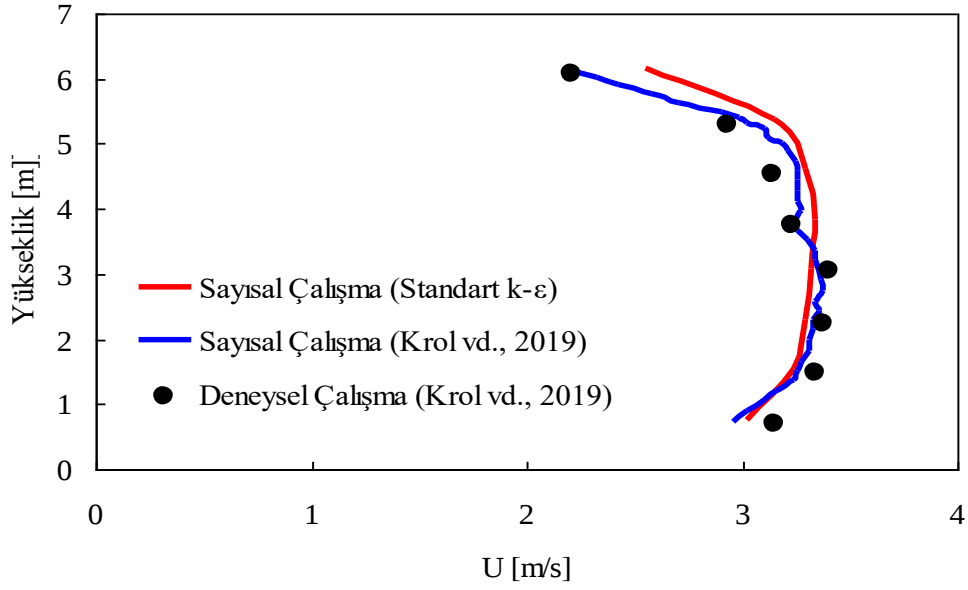


(b)

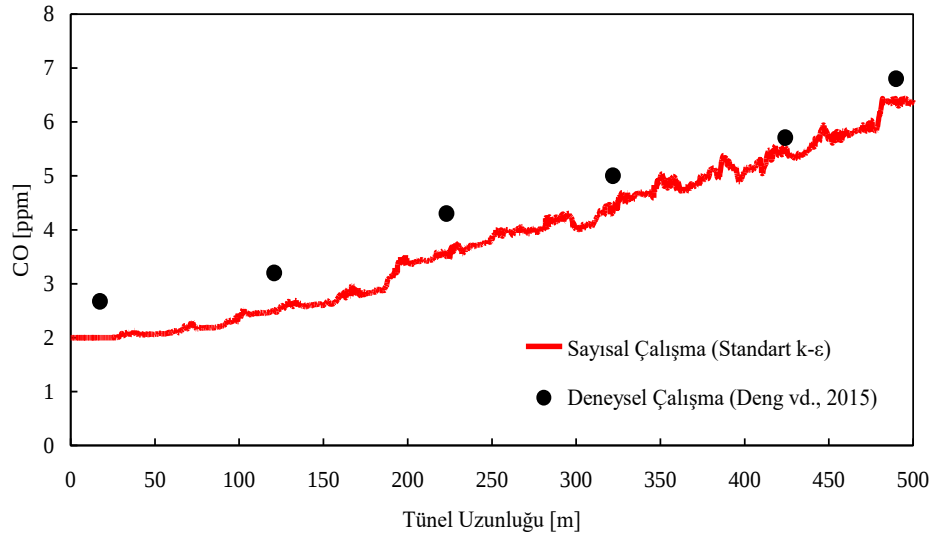
Şekil 18. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması  
(a) Düşey doğrultu (b) Yatay doğrultu

- **Literatür Verileri İle Doğrulama**

Şekil de mevcut çalışmada sayısal çözümlerden elde edilen hız, karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımlarının literatürdeki deneysel dağılımlarla karşılaştırması verilmektedir. Hem hız dağılımının hem de karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum çalışma kapsamında kullanılan sayısal yaklaşımın incelenen problem açısından doğru ve yeterli olduğunu göstermektedir (Şekil 19).



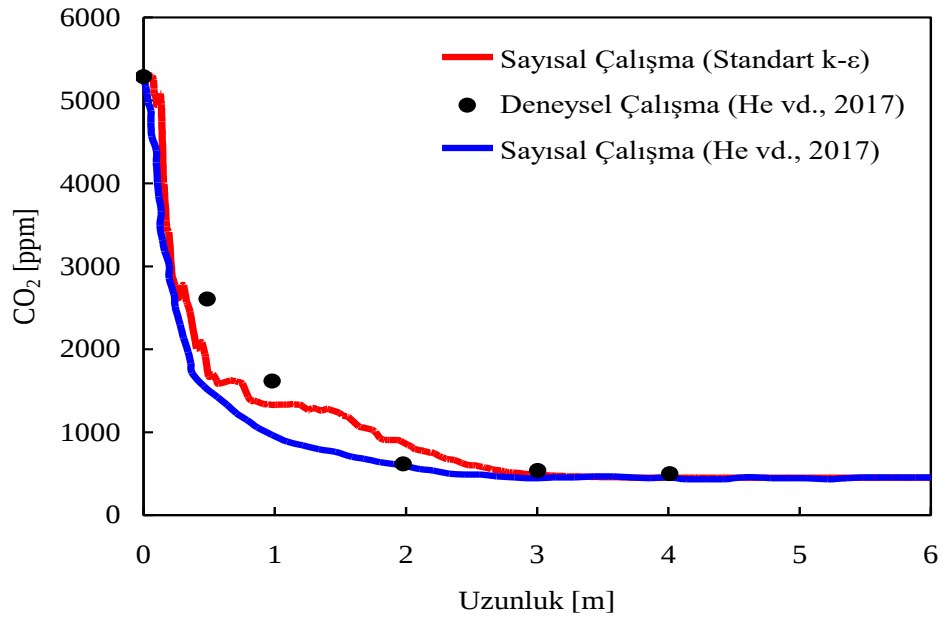
(a)



(b)

Şekil 19. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması  
(a) Hız dağılımı (b) Karbonmonoksit dağılımı (c) Karbondioksit dağılımı

Şekil 19'un Devamı



(c)

### 3. BULGULAR

Bu tez çalışmasında, karayolları tünellerindeki taşıtların egzozlarından yayılan kirlletici gazlardan karbonmonoksit ve karbondioksitin tünel içerisindeki dağılımlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk önce Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan Akyazı Tüneli'nde karbondioksit ölçümleri ile sınırlı tutulan bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise, taşıtlı ve taşıtsız durumlar için tünel içerisindeki üç boyutlu akış alanları zaman bağımlı olarak kapsamlı sayısal çalışmalarla incelenmiştir. Sayısal çalışmaların tamamında 500 m uzunluğa, 13 m genişliğe ve 6.5 m yüksekliğe sahip iki şeritli tünel modelleri dikkate alınmıştır. Sayısal çalışmaların ilk aşamasında, içerisinde taşıt bulunan iki şeritli 500 m uzunluğundaki düz bir tünelde farklı taşıt hızlarında ve tünel geometrisinin iki farklı kavisli formunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmaların taşıtsız durumları içeren ikinci aşamasında ise, tünel içerisine yerleştirilmiş fan durumunda, fan itme kuvvetinin, tünel kavis durumunun, fan sayısının ve fana eklenmiş difüzör durumunda difüzör kanat açısının tünel içerisindeki karbonmonoksit ve karbondioksit düzeylerine etkisi incelenmiştir.

Tünel içerisinde taşıtların olduğu durumda, ilk önce iki şeritli 500 m uzunluğundaki düz tünel içerisinde taşıt hızının 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde (taşıt sayısının 80, 50, 34, 26 ve 20 değerlerinde) sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise, 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçaları iki farklı kavise sahip iki şeritli tüneller olarak dikkate alınmış ve bu tüneller içindeki üç boyutlu akış alanları taşıt hızının 70 km/saat (taşıt sayısının 26 değeri için) değeri için sayısal olarak çözülmüştür.

Tünel içerisinde taşıtlardan kaynaklanan karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımları üzerinde fan etkisini incelemek amacıyla tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konuma fan yerleştirilmiştir. Tünel içerisinde kirliliğin en üst değere ulaştığı kritik düzeyler başlangıç durumu olarak dikkate alınmış ve taşıtsız durumda fan itme kuvveti değerinin, tünel kavis durumunun, fan sayısının ve fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısının karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Tünel içerisinde taşıtların olmadığı fanlı durumda, ilk önce tek fanlı iki şeritli düz tünelde fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, karayolları tünellerindeki fanlarda yaygın kullanılan itme kuvveti değeri olan 950 N için 950 m ve 1900 m yarıçap değerleri ile temsil edilen iki şeritli

tek fanlı kavisli tünellerdeki akış alanları sayısal olarak incelenmiştir. Fan sayısı ektisi, iki şeritli düz tünelde 950 N fan itme kuvveti değerinde tek fanlı, özdeş iki fanlı ve özdeş üç fanlı durumlar için incelenmiştir. Fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısı etkisi ise, iki şeritli düz tünelde tek fan durumunda ve 950 N fan itme kuvveti değerinde, difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerleri için incelenmiştir.

Sayısal çalışmadan elde edilen bulgular, hız dağılımları, karbonmonoksit dağılımları ve karbondioksit dağılımları şeklinde üç ana başlık altında sunulmuştur. Karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımları “ppm (part per million, milyonda kısım)” şeklinde ifade edilen kütleli konsantrasyon cinsinden verilmiştir.

### **3.1. Tünel İçerisinde Hız Dağılımları**

Tünel içerisindeki hız dağılımları, taşıtlı düz tünel, taşıtlı kavisli tünel, taşıtsız fanlı düz tünel, taşıtsız fanlı kavisli tünel ve taşıtsız fanlı ve difüzörlü düz tünel alt başlıklarına göre düzenlenmiştir. Hız dağılımları, tünel boyunca farklı istasyonlarda tünel içerisinde tanımlanmış yatay ve düşey hatlarda çizgisel değişimler ve tünel en kesitlerindeki dağılımlar şeklinde verilmiştir.

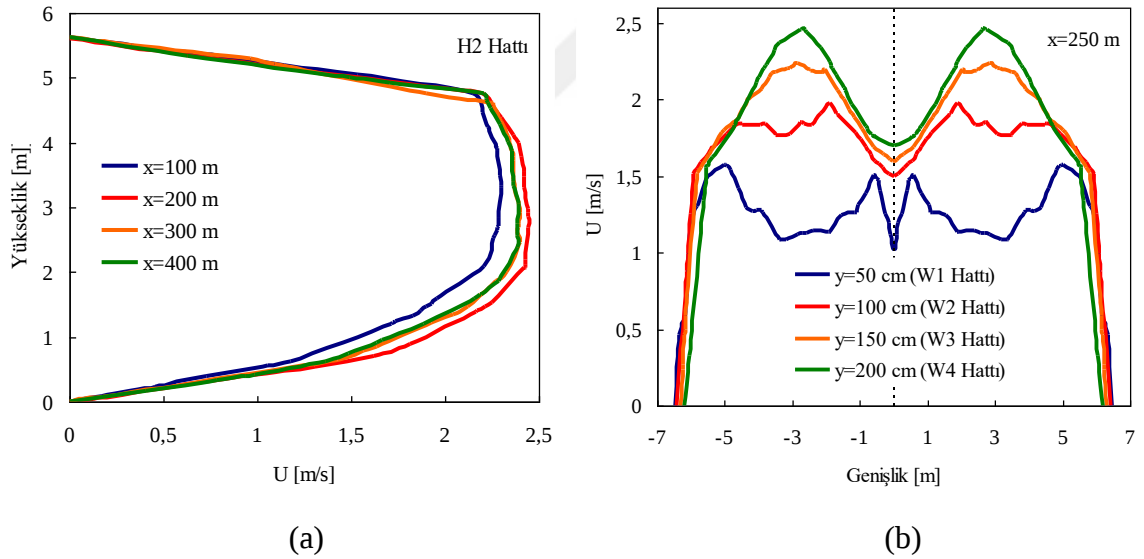
#### **3.1.1. Taşıtlı Düz Tünel**

Taşıtlı düz tünelde, 500 m uzunluğundaki iki şeritli düz tünelin içerisine sırasıyla 80 adet, 50 adet, 34 adet, 26 adet ve 20 adet taşıt yerleştirilmiş ve taşıt sayısı ters orantılı 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat şeklinde taşıt hızı değerleri elde edilmiştir. Tünel içerisine yerleştirilen araçların aralarındaki mesafe taşıt hızının yarısı olarak takip mesafesi şeklinde dikkate alınmıştır. Böylece, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat taşıt hızlarında takip mesafeleri sırasıyla 15 m, 25 m, 35 m ve 45 m şeklinde oluşmuştur. 80 adet taşıt, taşıt hareketinin olmadığı kritik durum olarak tanımlanmıştır. Kritik durumda iki taşıt arası mesafe 8 m olarak gerçekleşmiştir.

Taşıt hızı değerleri, sayısal çalışmalara “m/s” biriminde yansıtılmıştır. Kritik durumu temsil eden 0 km/saat hız değerine karşılık doğal havalandırma durumundaki hız değeri olan 2 m/s kullanılmıştır. 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerine karşılık ise sırasıyla 8.3 m/s, 13.9 m/s, 19.4 m/s ve 25 m/s hız değerleri kullanılmıştır. Taşıt hareketinin olmadığı 0 km/saat durağan hız durumunda zaman adımı 1 dakika alınarak 60 dakikalık çözüm elde edilmiştir. Taşıt hızının 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90

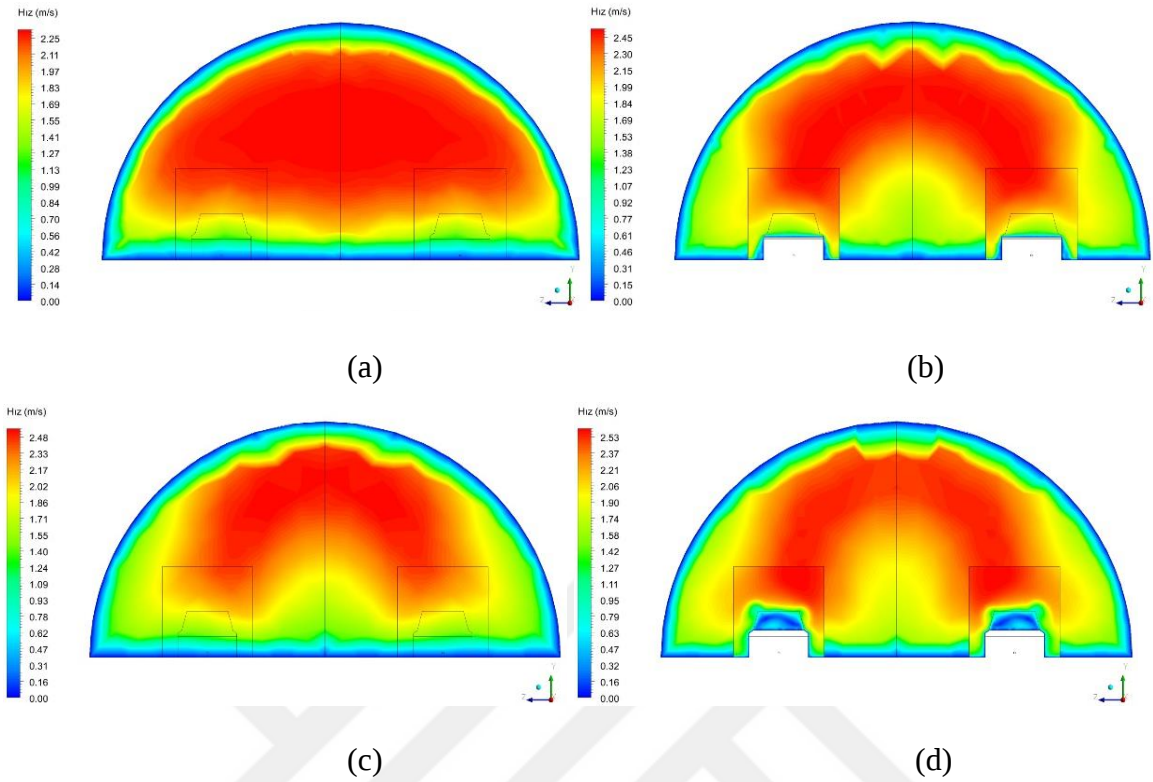
km/saat değerlerinde ise zaman adımı 0.5 s alınarak sırasıyla 60 s, 36 s, 26 s ve 20 s sürelerle çözümler gerçekleştirilmiştir. Tünel içerisindeki hız değerleri çözüm sürelerinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

Şekil 20a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hareketinin olmadığı 0 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında 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  $y=2$  m seviyesinde maksimum olmaktadır. Şekil 20b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hareketinin olmadığı 0 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. Taşıt arkasına karşılık gelen konumlardaki hız değerlerinin  $y=50$  cm yüksekliğindeki W1 hattında düştüğü,  $y=100$  cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerindeki W2, W3 ve W4 hatlarında ise arttığı görülmektedir.



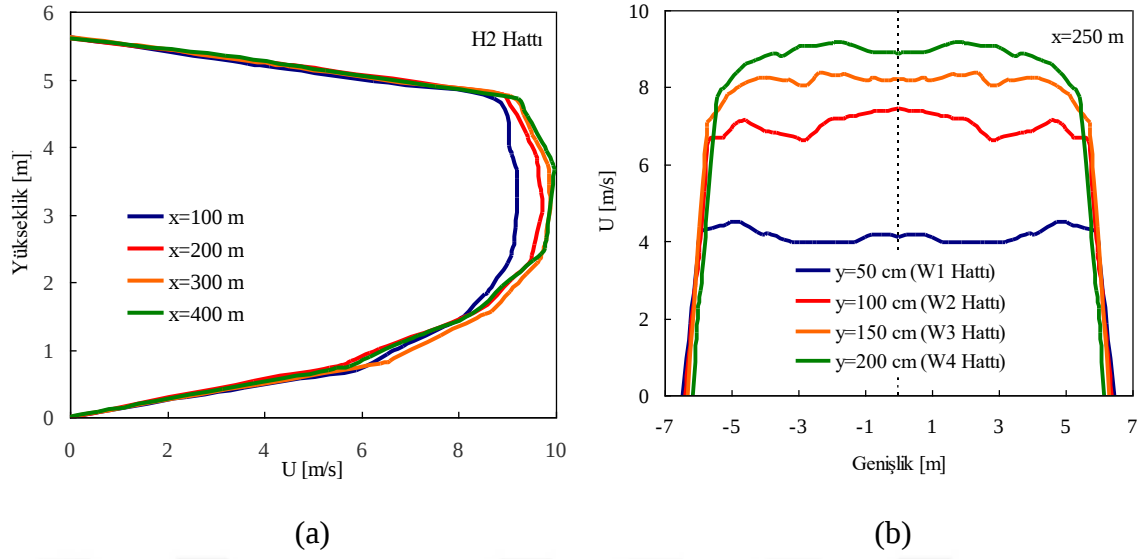
Şekil 20. 0 km/saat taşıt hızındaki hız profilleri  
(a) H2 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 21'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hareketinin olmadığı 0 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 dağılımı bozulmaktadır. Durağan haldeki taşıtlardan yayılan egzoz hız dağılımını etkilemekte ve bu etki tünel çıkışına doğru daha belirgin olmaktadır.



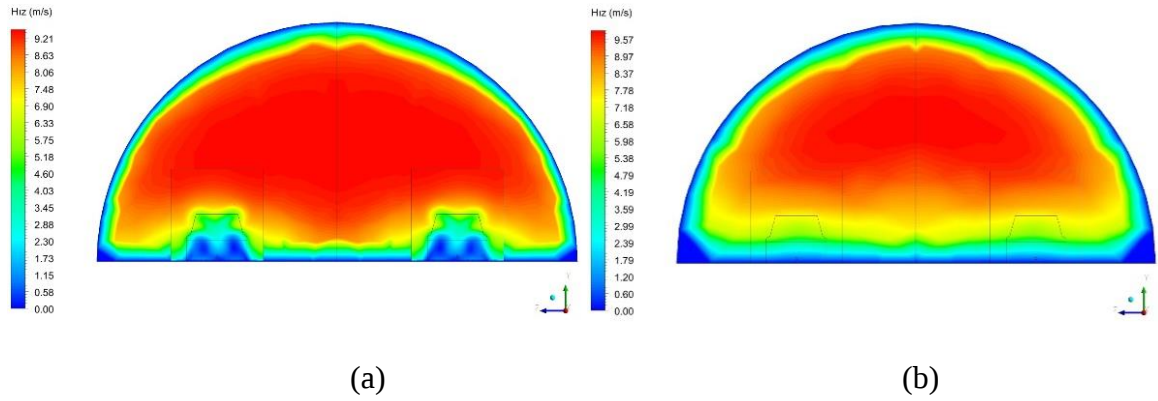
Şekil 21. 0 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

Şekil 22a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 30 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında 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 22b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 30 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.



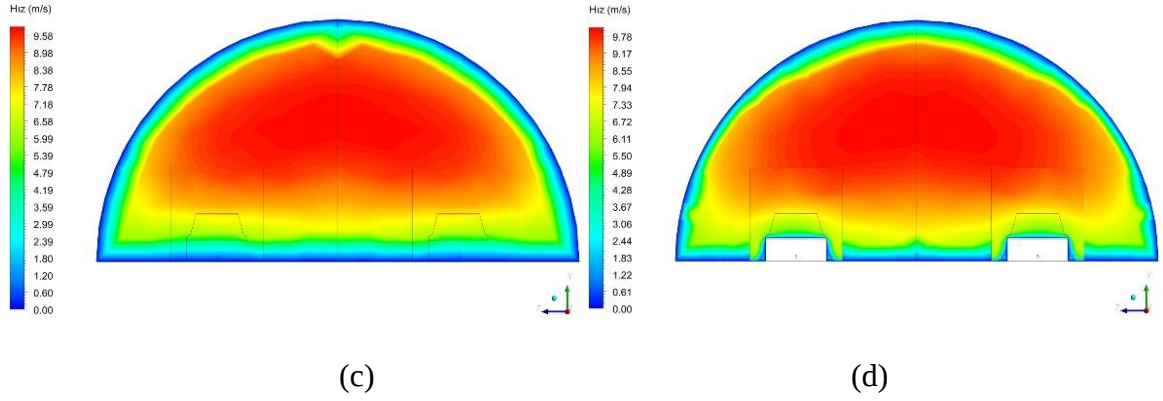
Şekil 22. 30 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız profilleri  
(a) H2 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 23'te, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 30 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.

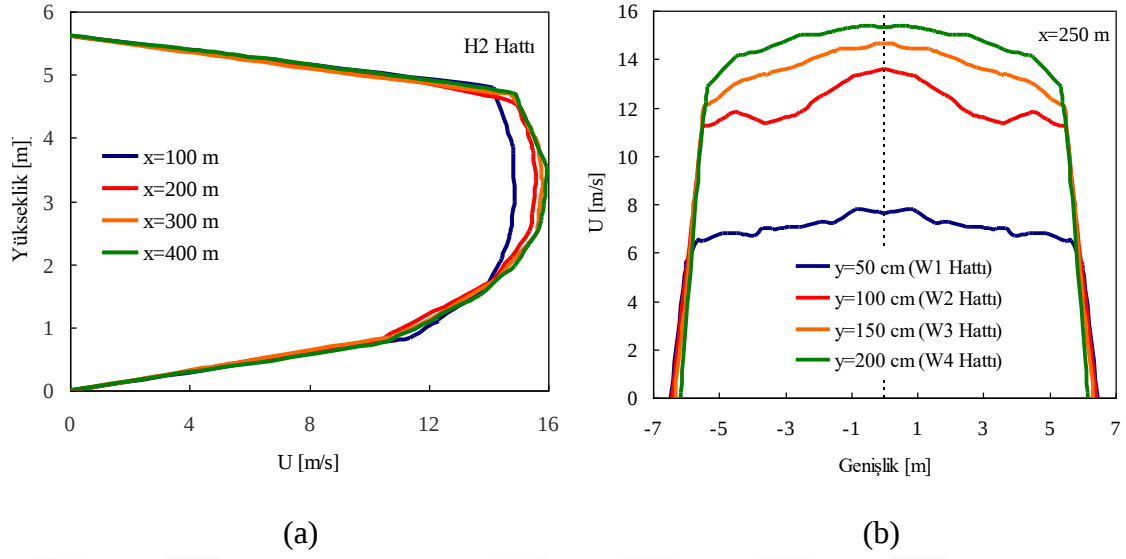


Şekil 23. 30 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

Şekil 23'ün devamı

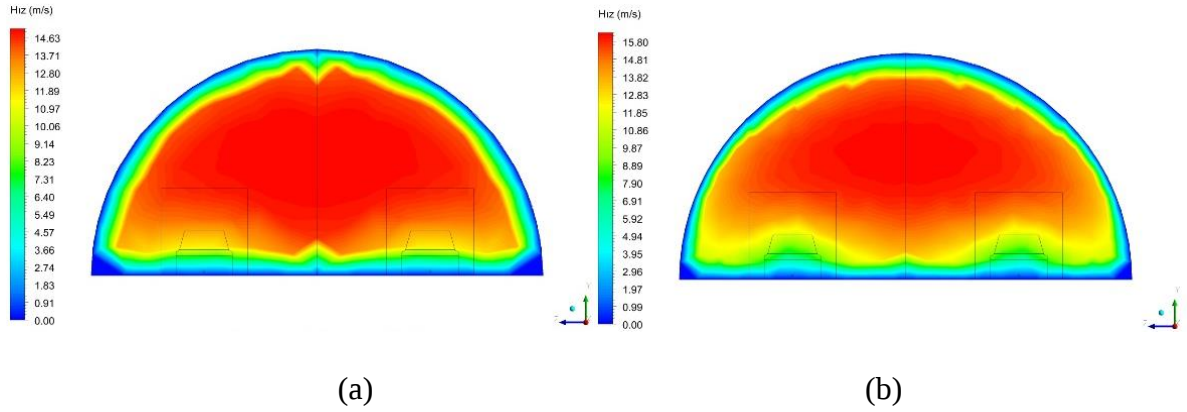


Şekil 24a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 50 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Parabolik görüntüdeki hız değerleri dört istasyonda da birbirine benzer şekilde zemin 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 24b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 50 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.



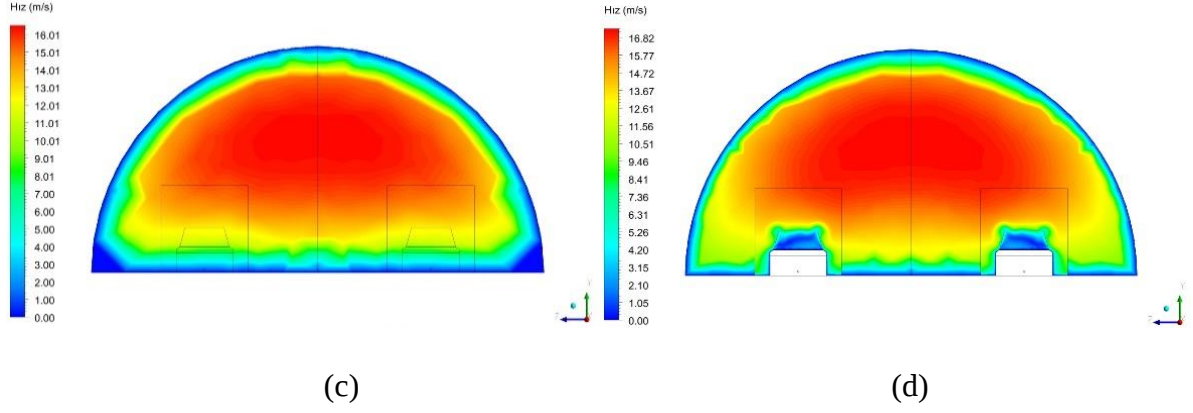
Şekil 24. 50 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız profilleri  
(a) H2 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 25’de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 50 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 sayıdaki taşıtın egzozu en kesit hız dağılımlarını etkilemektedir.

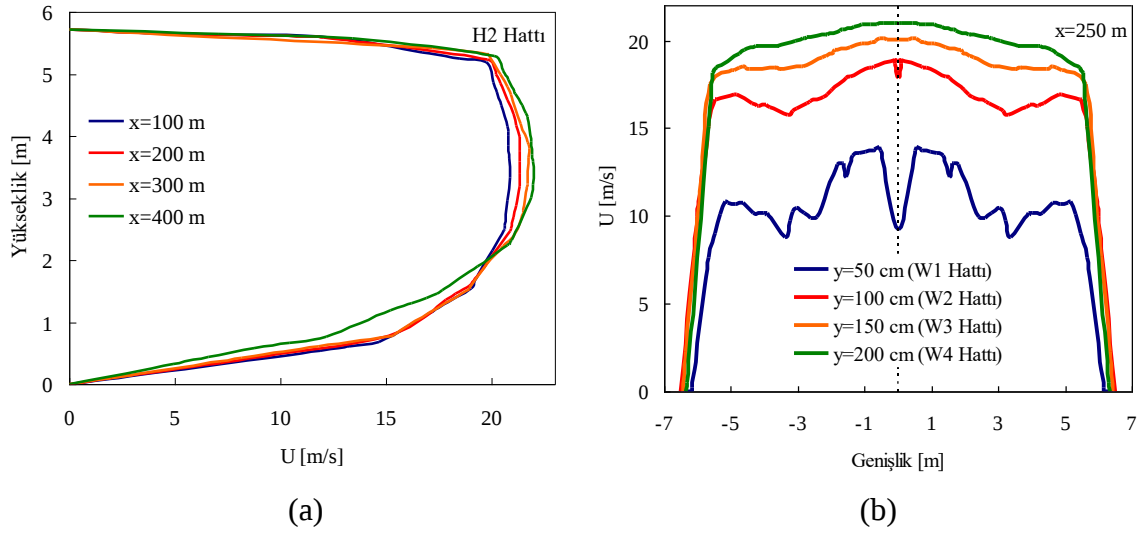


Şekil 25. 50 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

Şekil 25'in devamı

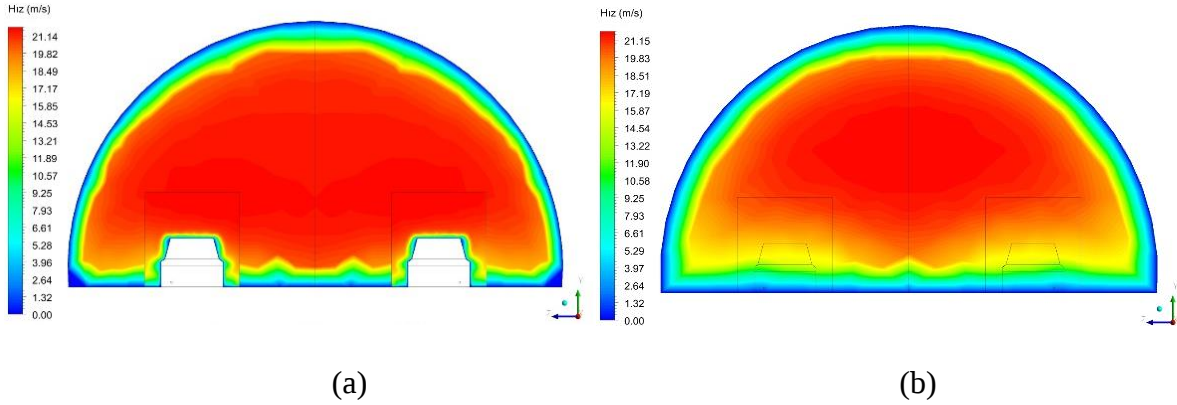


Şekil 26a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Parabolik görüntüdeki hız değerleri dört istasyonda da birbirine benzer şekilde zemin 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 26b'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.



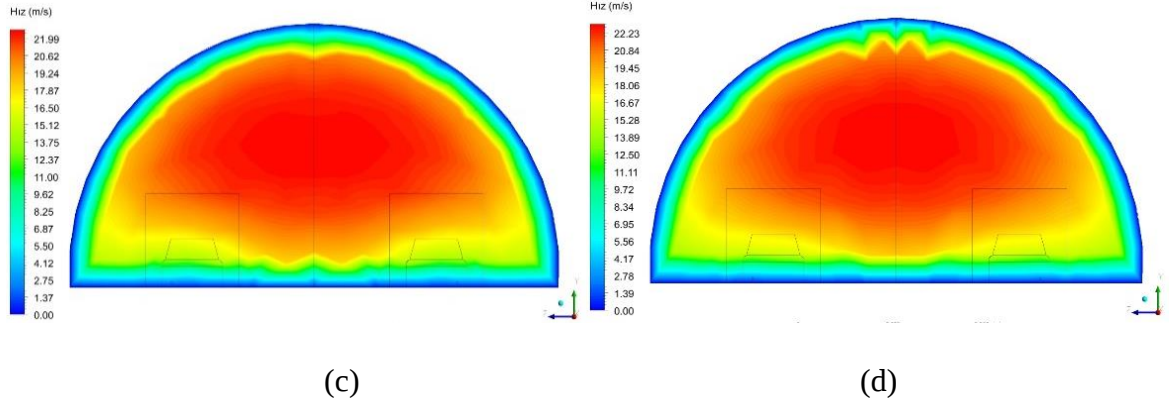
Şekil 26. 70 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız profilleri  
(a) H2 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 27’de, 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.

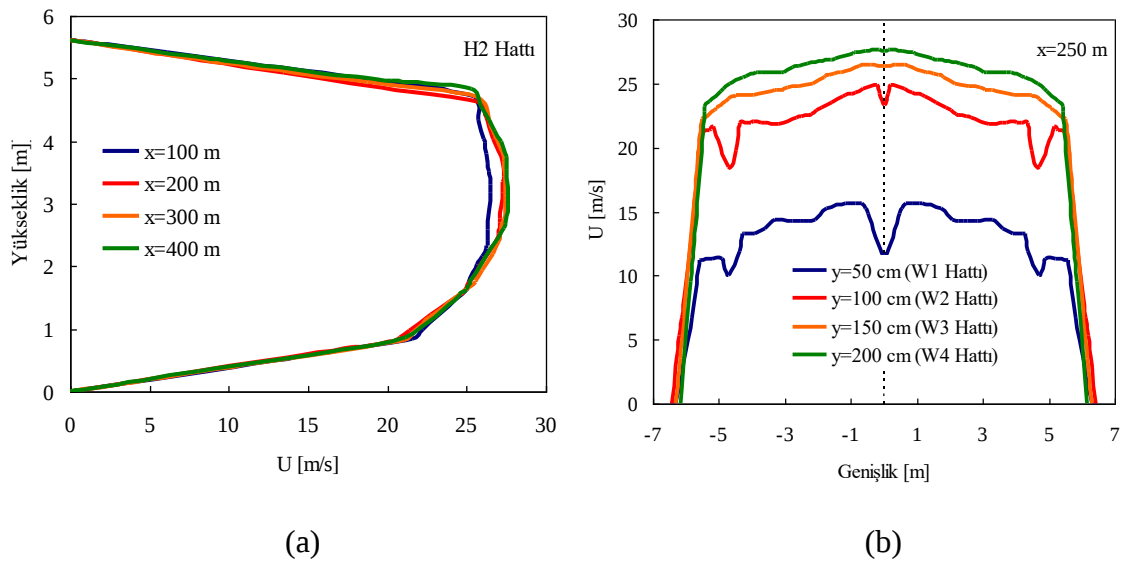


Şekil 27. 70 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

Şekil 27'nin devamı

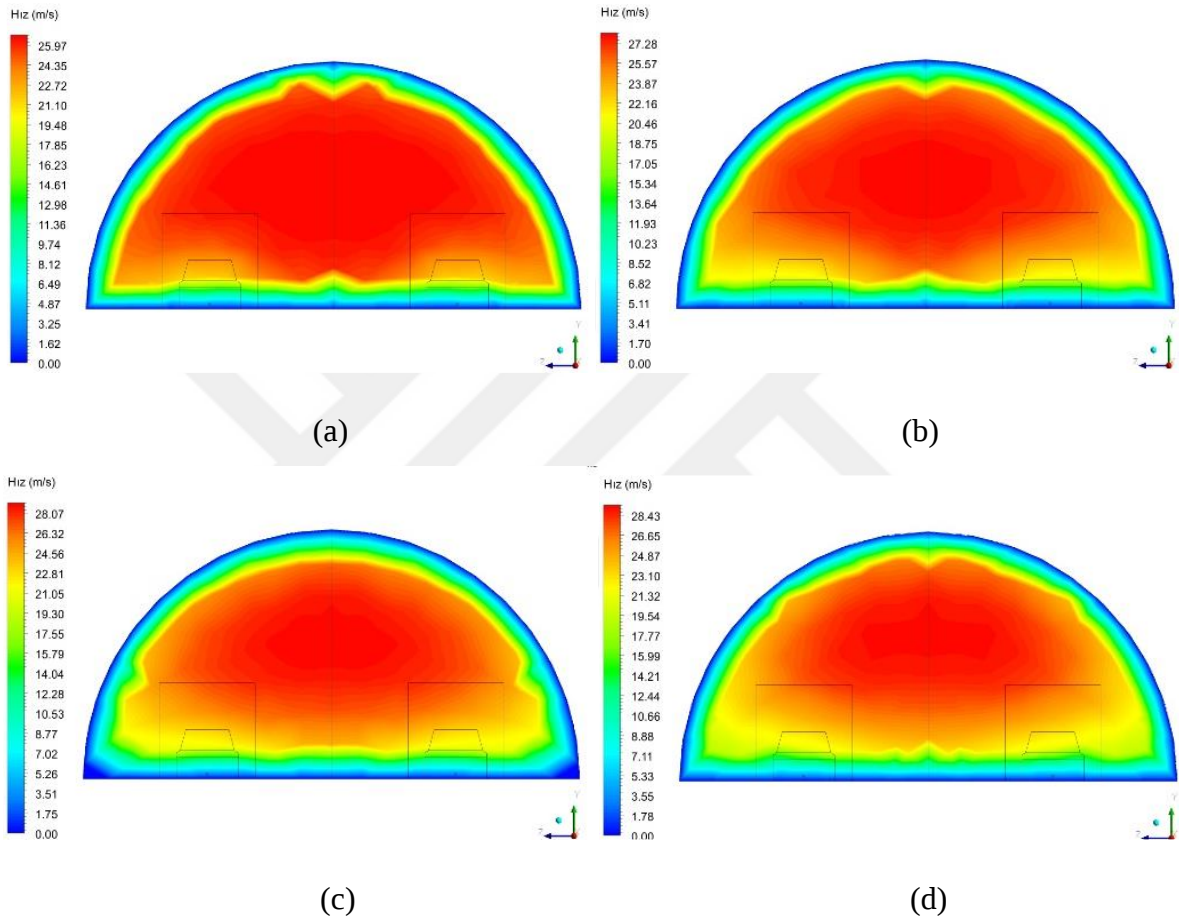


Şekil 28a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 90 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Parabolik görüntüdeki hız değerleri dört istasyonda da birbirine benzer şekilde zemin 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 28b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 90 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 28. 90 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız profilleri  
 (a) H2 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 29’da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 90 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.



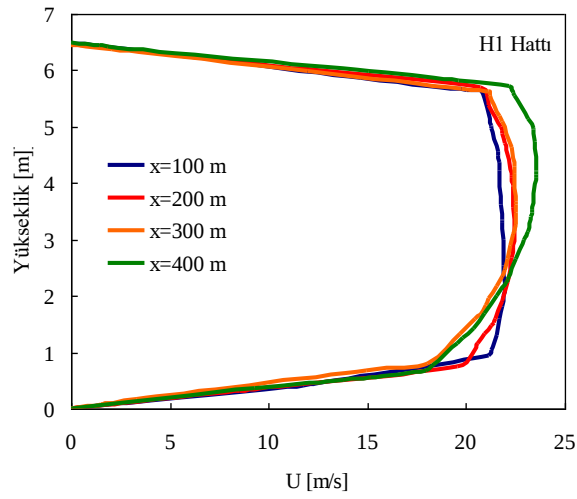
Şekil 29. 90 km/saat taşıt hızındaki tünel içerisindeki hız dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

Taşıt hızındaki değişimin tünel içerisindeki hız dağılımlarına etkisi birlikte değerlendirildiğinde, incelenen tüm taşıt hızlarında H2 hatlarındaki değişimlerin benzer olduğu, yatay doğrultudaki en büyük hızların W4 hatlarında olduğu, hız arttıkça W1 hattındaki hız değerlerinde yerel piklerin olduğu ve tünel boyunca ilerledikçe en kesitlerdeki homojen hız dağılımlarının bozulduğu görülmektedir.

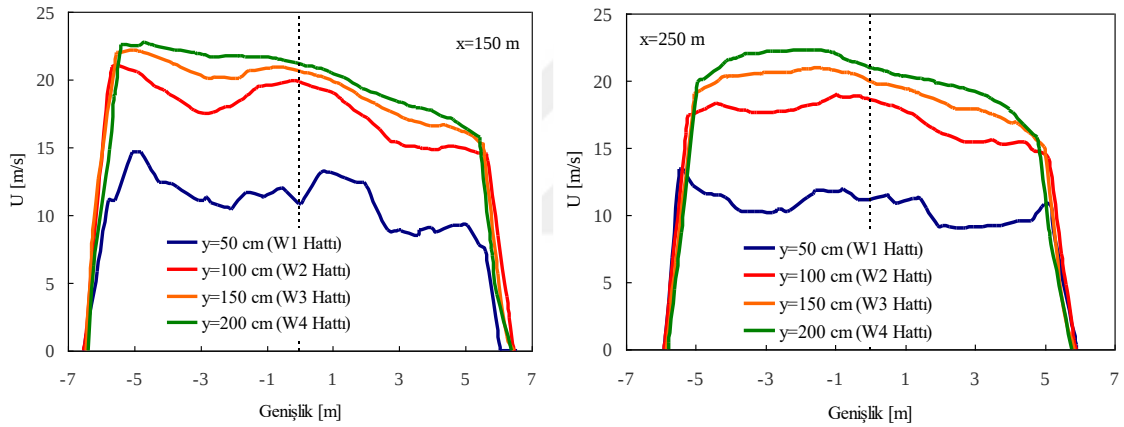
### 3.1.2. Taşıtlı Kavisli Tünel

Taşıtlı kavisli tünelde, 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçaları iki farklı kavise sahip iki şeritli tüneller olarak dikkate alınmış ve bu tüneller içindeki üç boyutlu akış alanları taşıt hızının 70 km/saat (taşıt sayısının 26 değeri için) değeri için sayısal olarak çözülmüştür. 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. Tünel içerisindeki hız değerleri çözüm sürelerinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

Şekil 30'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 hatlarında 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 31'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 büyük tarafta daha yüksek olmaktadır.



Şekil 30. R=950 m’de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hatlarındaki tünel içerisindeki hız profilleri



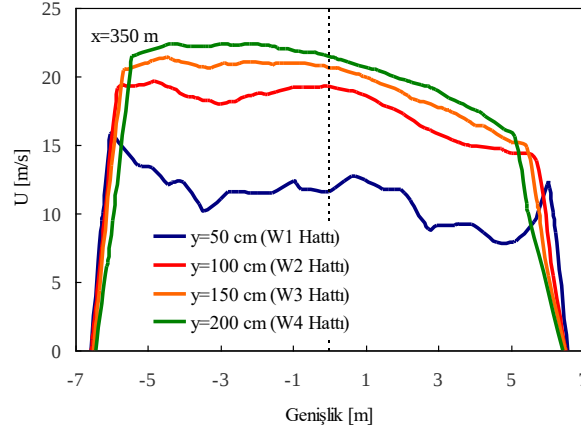
(a)

(b)

Şekil 31. R=950 m’de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki tünel içerisindeki hız profilleri

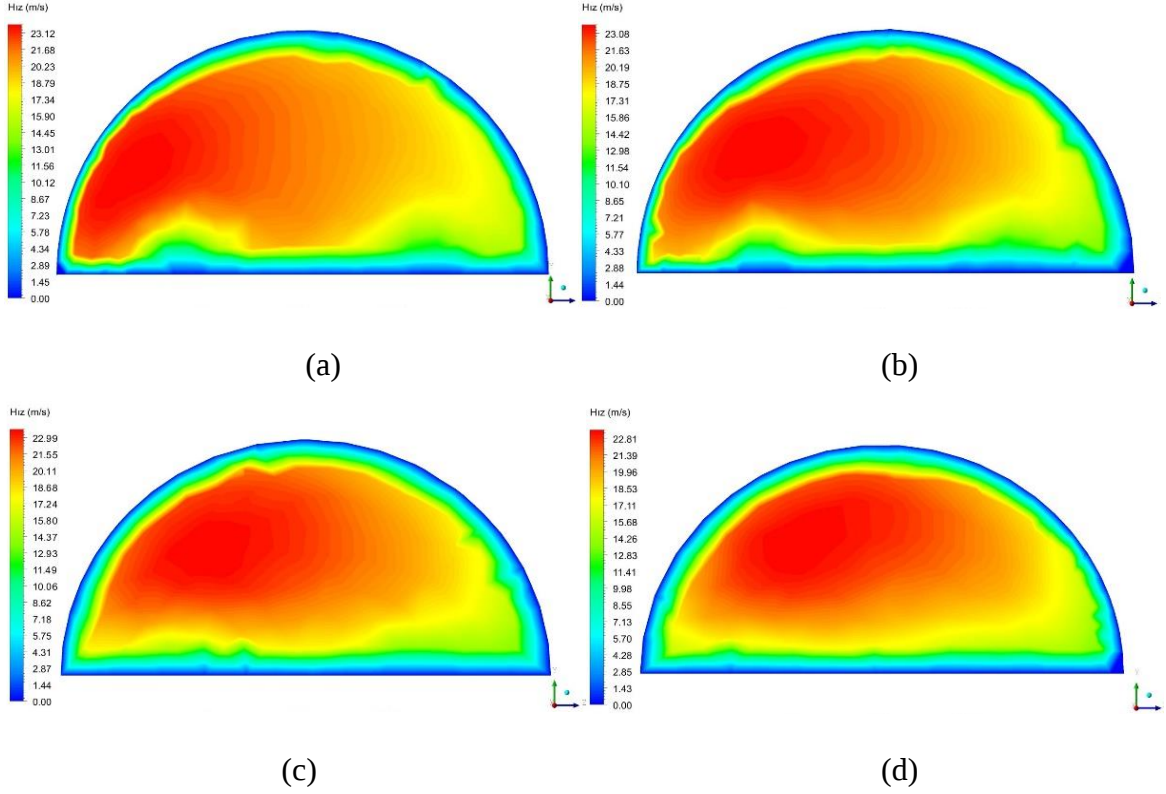
(a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m

Şekil 31'in devamı



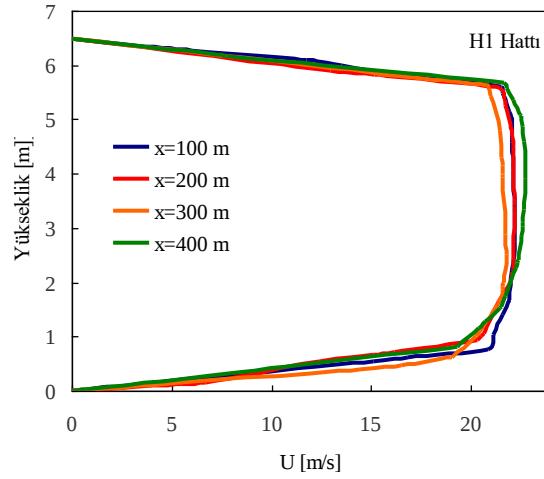
(c)

Şekil 32'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.

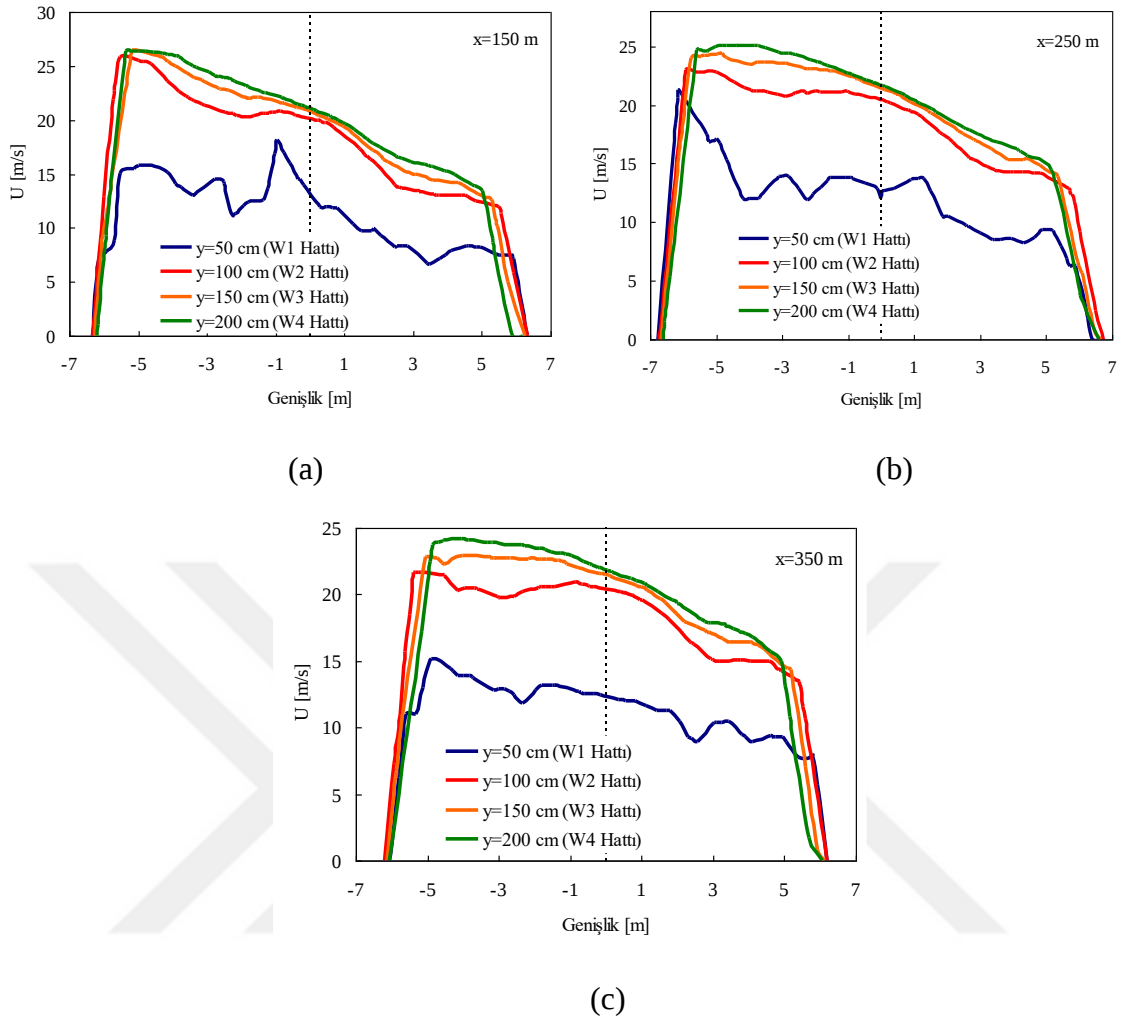


Şekil 32.  $R=950$  m'de ve 70 km/saat taşıt hızında tünel içerisindeki hız dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

Şekil 33’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 hatlarında 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 34’te, 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.

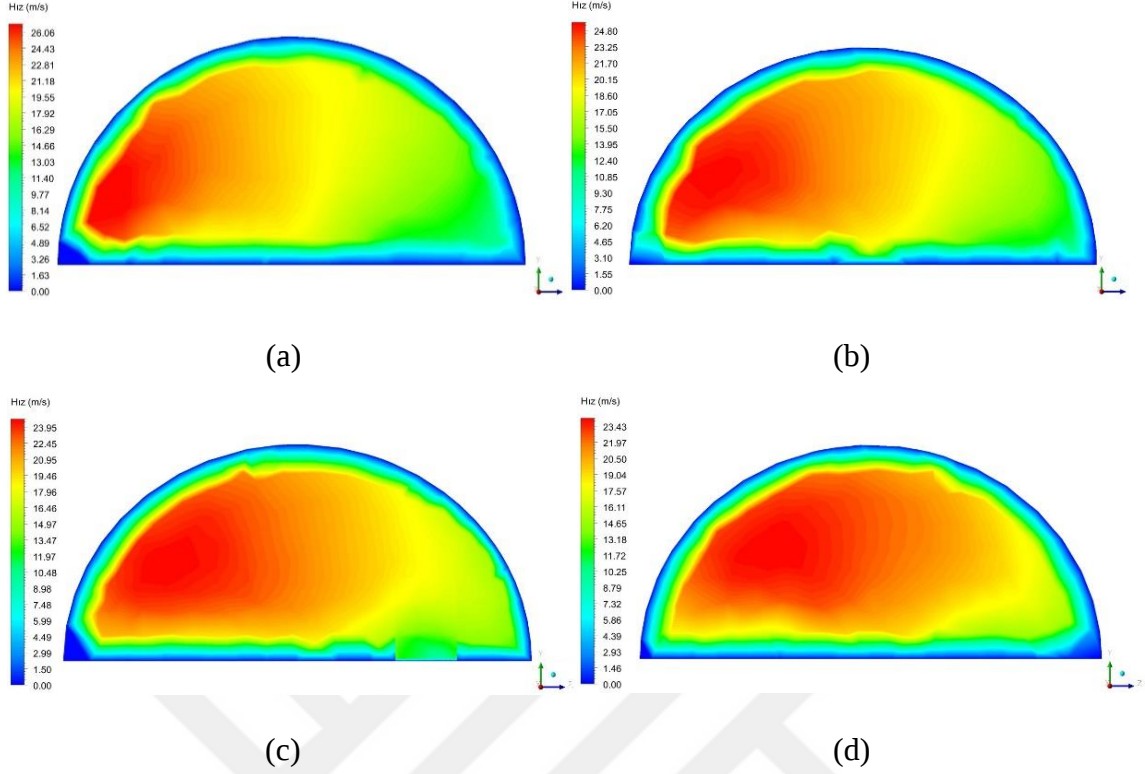


Şekil 33. R=1900 m’de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hatlarındaki tünel içerisindeki hız profilleri



Şekil 34. R=1900 m’de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki tünel içerisindeki hız profilleri  
(a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m

Şekil 35’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 35.  $R=1900 \text{ m}^2$ 'de ve  $70 \text{ km/saat}$  taşıt hızında tünel içerisindeki hız dağılımları  
(a)  $x=100 \text{ m}$  (b)  $x=200 \text{ m}$  (c)  $x=300 \text{ m}$  (d)  $x=400 \text{ m}$

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 hatlarında olduğu görülmektedir.

### 3.1.3. Taşıtsız Fanlı Düz Tünel

Taşıtsız fanlı tünellerde, tünel içerisine yerleştirilmiş fan durumunda, fan itme kuvvetinin, tünel kavis durumunun, fan sayısının ve fana eklenmiş difüzör durumunda difüzör kanat açısının tünel içerisindeki karbonmonoksit ve karbondioksit düzeylerine etkisi incelenmiştir.

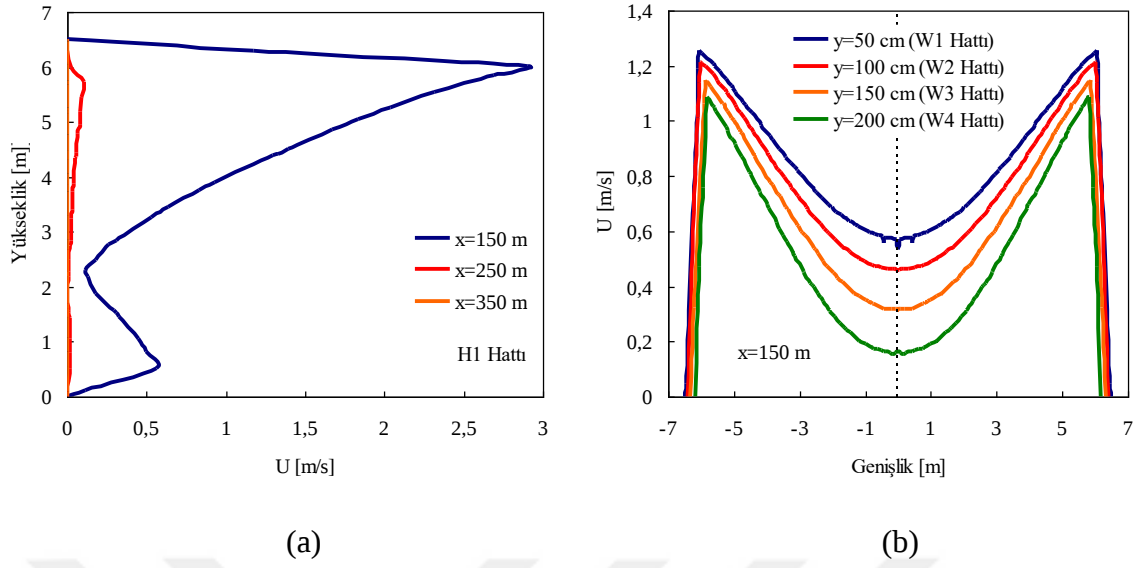
Tünel içerisinde taşıtların olmadığı fanlı durumda, ilk önce tek fanlı iki şeritli düz tünelde fan itme kuvvetinin  $296 \text{ N}$ ,  $525 \text{ N}$ ,  $950 \text{ N}$  ve  $2035 \text{ N}$  değerlerinde sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, karayolları tünellerindeki fanlarda yaygın kullanılan itme kuvveti değeri olan  $950 \text{ N}$  için  $950 \text{ m}$  ve  $1900 \text{ m}$  yarıçap değerleri ile temsil edilen iki şeritli tek fanlı kavisli tünellerdeki akış alanları sayısal olarak incelenmiştir. Fan sayısı etkisi, iki şeritli düz tünelde  $950 \text{ N}$  fan itme kuvveti değerinde tek fanlı, özdeş iki fanlı ve özdeş üç

fanlı durumlar için incelenmiştir. Fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısı etkisi ise, iki şeritli düz tünelde tek fan durumunda ve 950 N fan itme kuvveti değerinde, difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerleri için incelenmiştir.

Tünel içerisinde taşıtlardan kaynaklanan karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımları üzerinde fan etkisini incelemek amacıyla tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konuma fan/fanlar yerleştirilmiştir. Tünel içerisinde kirliliğin en üst değere ulaştığı kritik düzeyler başlangıç durumu olarak dikkate alınmış ve taşıtsız durumda fan itme kuvveti değerinin, tünel kavis durumunun, fan sayısının ve fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısının karbonmonoksit ve 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.

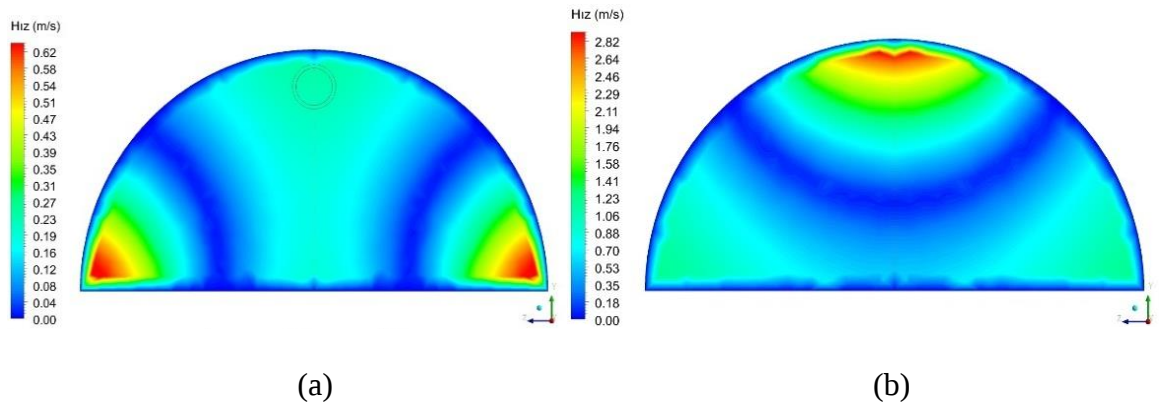
- Tek Fanlı Tünel

Şekil 36a'da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 296 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında 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 m/s şeklinde en yüksek değerini almaktadır. İlerleyen istasyonlarda fanın hız değerleri üzerindeki etkisi azalarak kaybolmaktadır. Şekil 36b'de iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 296 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.



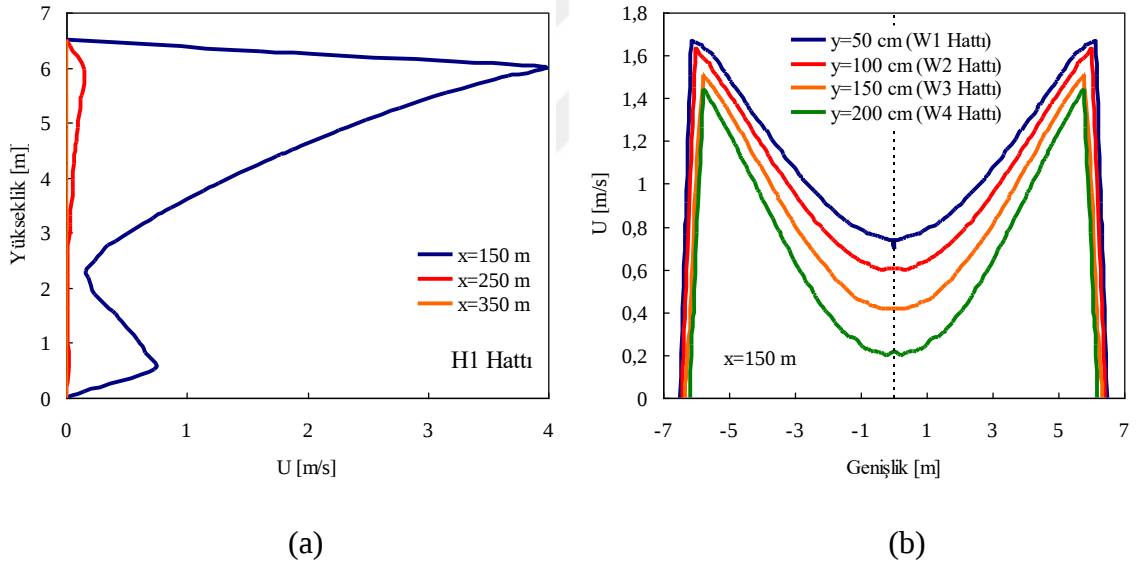
Şekil 36. 296 N itme kuvvetinde hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 37’de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 296 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 37. 296 N itme kuvvetinde hız dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

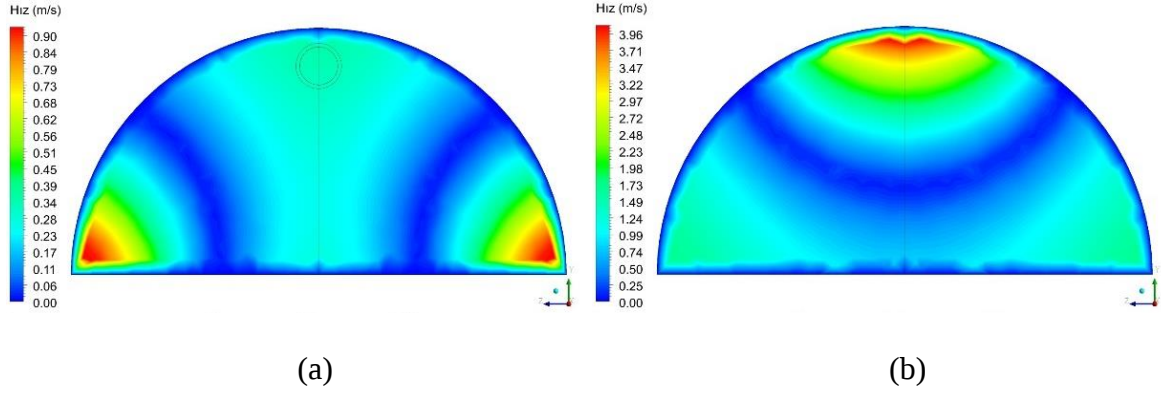
Şekil 38a’da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 525 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir.  $x=150$  m’de fan etkisiyle düşey doğrultudaki hız değerleri  $y=2.5$  m’den itibaren artmakta ve fan doğrultusunda yaklaşık 4 m/s şeklinde en yüksek değerini almaktadır. İlerleyen istasyonlarda fanın hız değerleri üzerindeki etkisi azalarak kaybolmaktadır. Şekil 38b’de iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 525 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 38. 525 N itme kuvvetinde hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

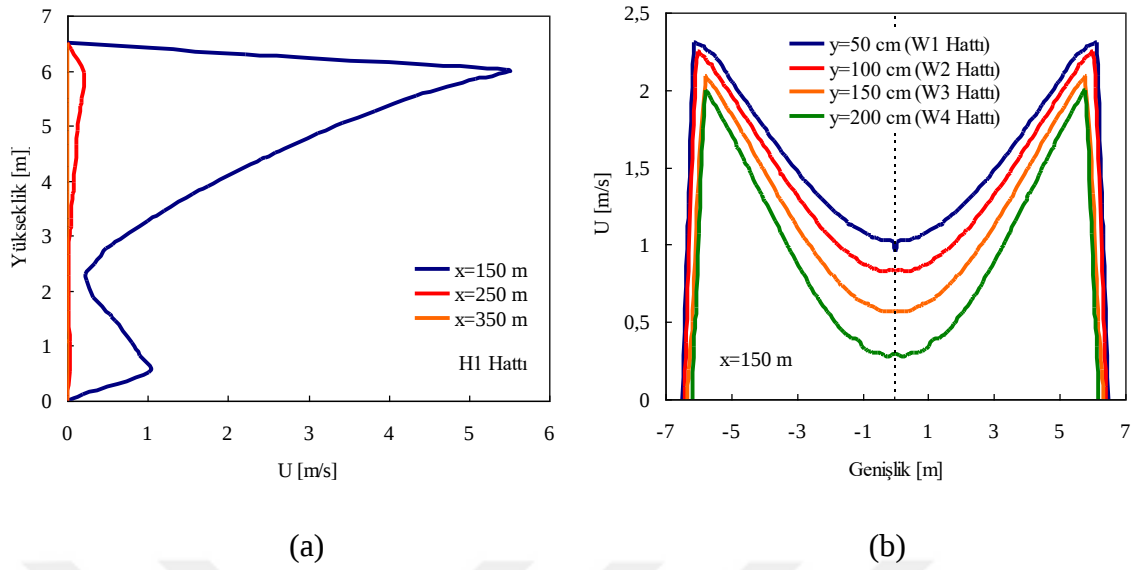
Şekil 39’da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 525 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel boyunca  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Fanın emme etkisinin 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.



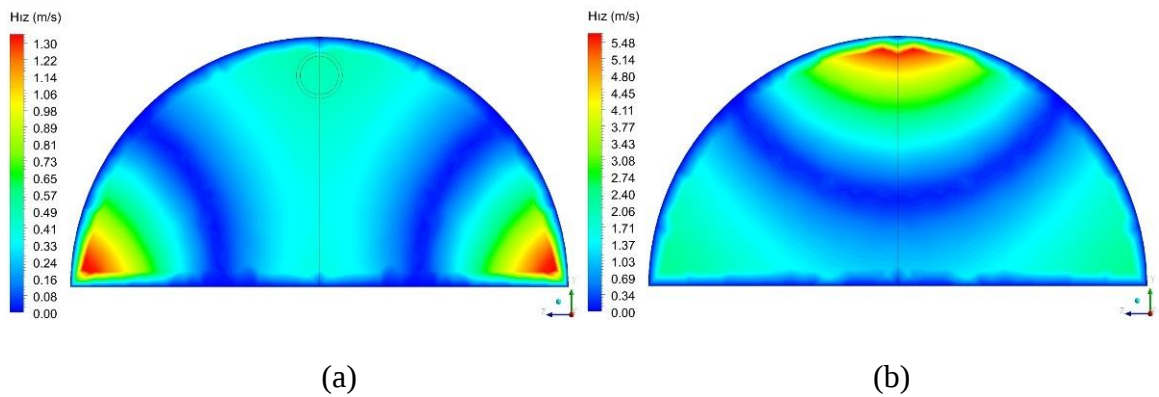
Şekil 39. 525 N itme kuvvetinde hız dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

Şekil 40a’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 hatlarında 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 40b’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 40. 950 N itme kuvvetinde hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

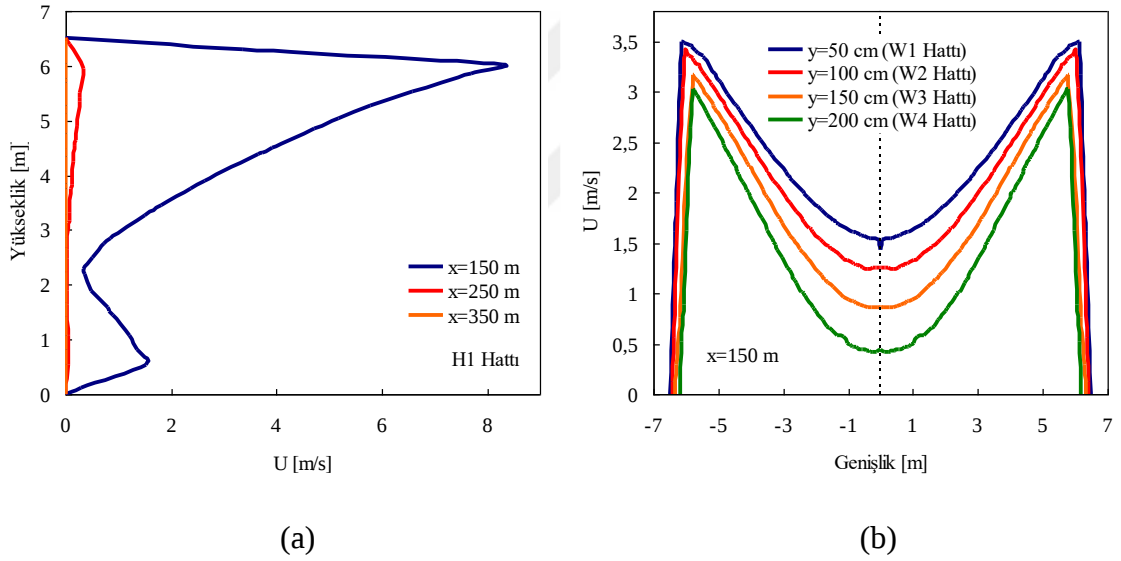
Şekil 41’de, iki şeritli düz tünel içerisinde tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel boyunca  $x=50$  m ve  $150$  m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Fanın emme etkisinin gözlendiği  $x=50$  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 41. 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

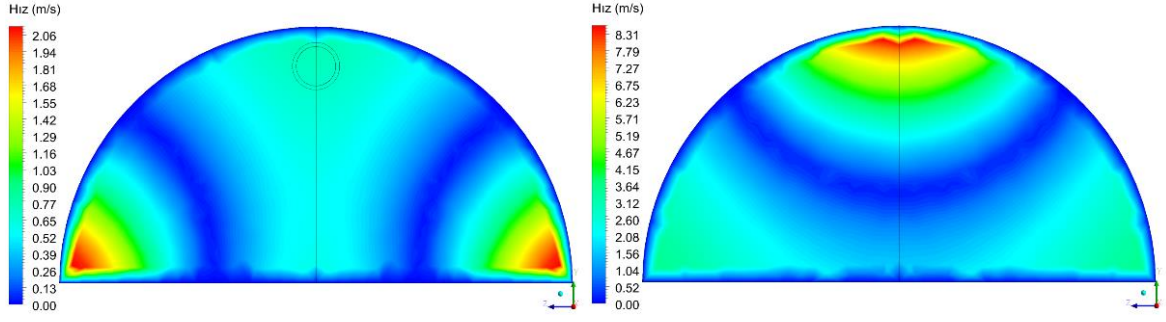
Şekil 42a’da, iki şeritli düz tünel içerisinde tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 2035 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel

boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında 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 8.5 m/s şeklinde en yüksek değerini almaktadır. İlerleyen istasyonlarda fanın hız değerleri üzerindeki etkisi azalarak kaybolmaktadır. Şekil 42b’de iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 2035 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 42. 2035 N itme kuvvetinde hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 43’te, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 2035 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 gözlendiği  $x=50$  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.

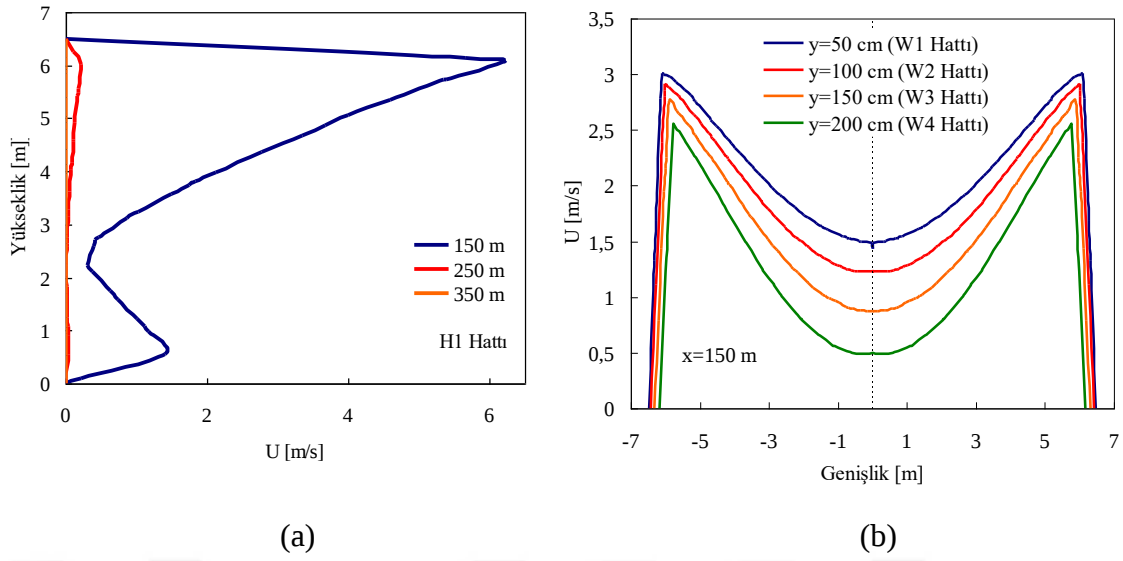


(a) (b)

Şekil 43. 2035 N itme kuvvetinde hız dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

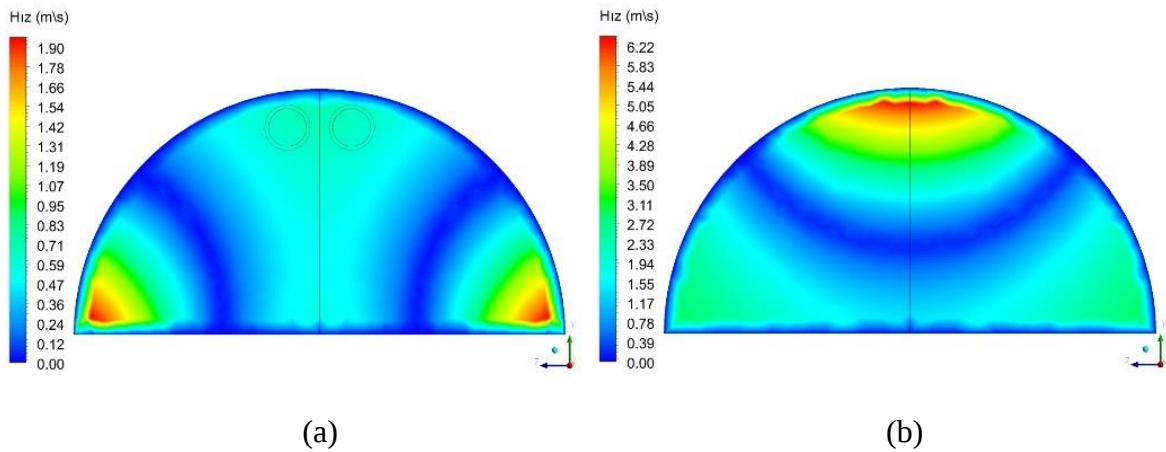
- İki Fanlı Tünel

Şekil 44a’da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş fan durumunda, tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında 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 6.2 m/s şeklinde en yüksek değerini almaktadır. İlerleyen istasyonlarda fanın hız değerleri üzerindeki etkisi azalarak kaybolmaktadır. Şekil 44b’de iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş 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 44. 950 N itme kuvvetinde hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

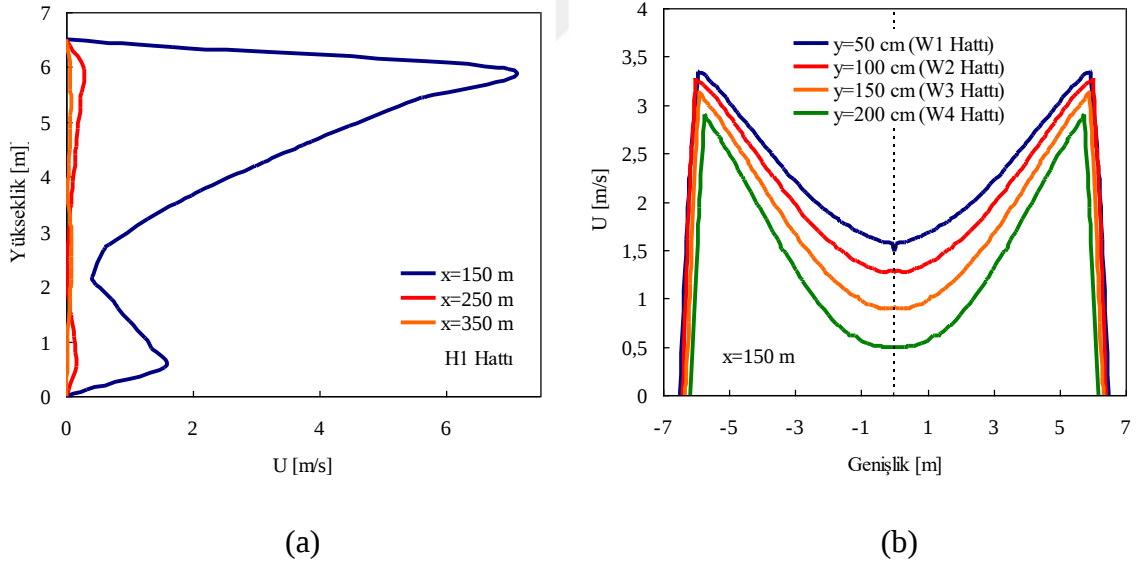
Şekil 45’de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş fan durumunda, tünel boyunca  $x=50$  m ve  $150$  m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Fanın emme etkisinin gözlendiği  $x=50$  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 45. 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

- Üç Fanlı Tünel

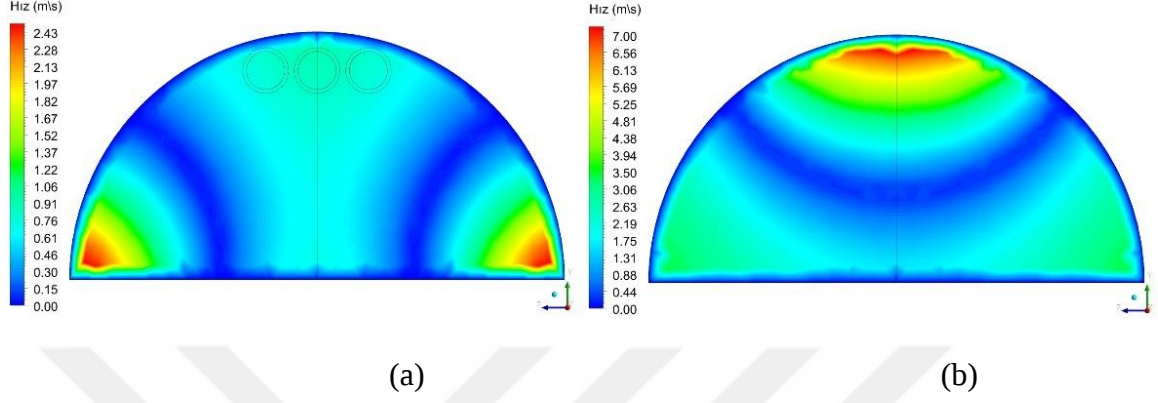
Şekil 46a’da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan üç özdeş fan durumunda, tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir.  $x=150$  m’de fan etkisiyle düşey doğrultudaki hız değerleri  $y=2.5$  m’den itibaren artmakta ve fan doğrultusunda yaklaşık 7 m/s şeklinde en yüksek değerini almaktadır. İlerleyen istasyonlarda fanın hız değerleri üzerindeki etkisi azalarak kaybolmaktadır. Şekil 46b’de iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan üç özdeş 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 46. 950 N itme kuvvetinde hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 47’de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan üç özdeş fan durumunda, tünel boyunca  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Fanın emme etkisinin gözlendiği  $x=50$  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.



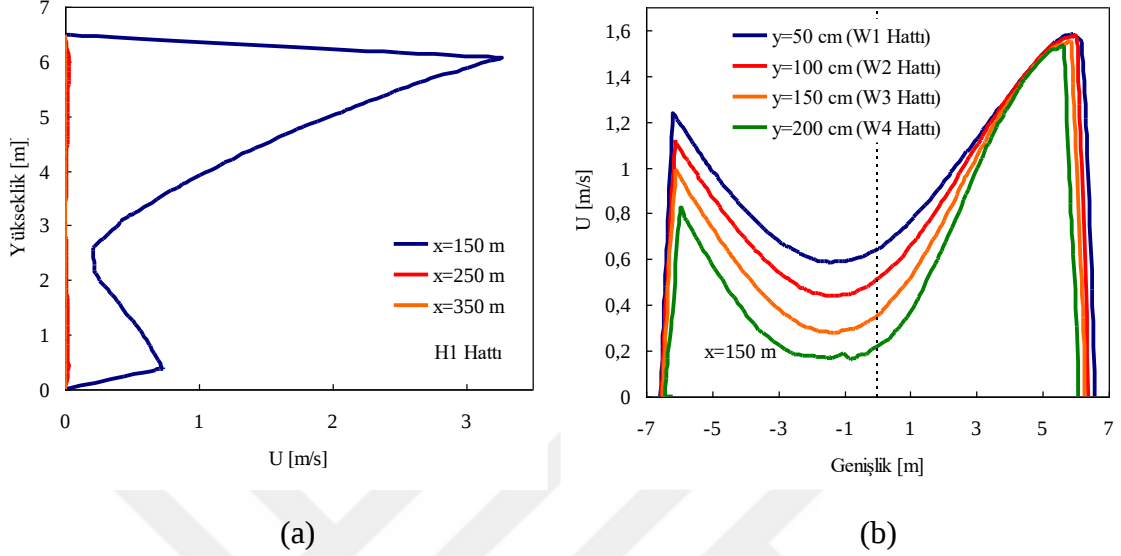
Şekil 47. 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

#### 3.1.4. Taşıtsız Fanlı Kavisli Tünel

Tünel içerisinde taşıtların olmadığı fanlı durumda, 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçaları iki farklı kavise sahip iki şeritli tüneller olarak dikkate alınmış ve fan itme kuvvetinin 950 N değerinde sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir.

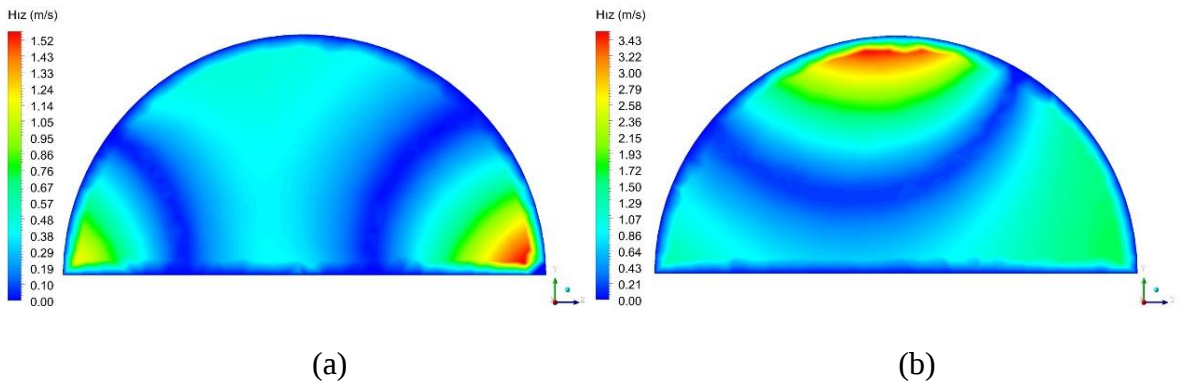
Şekil 48a'da 950 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış 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 48b'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.



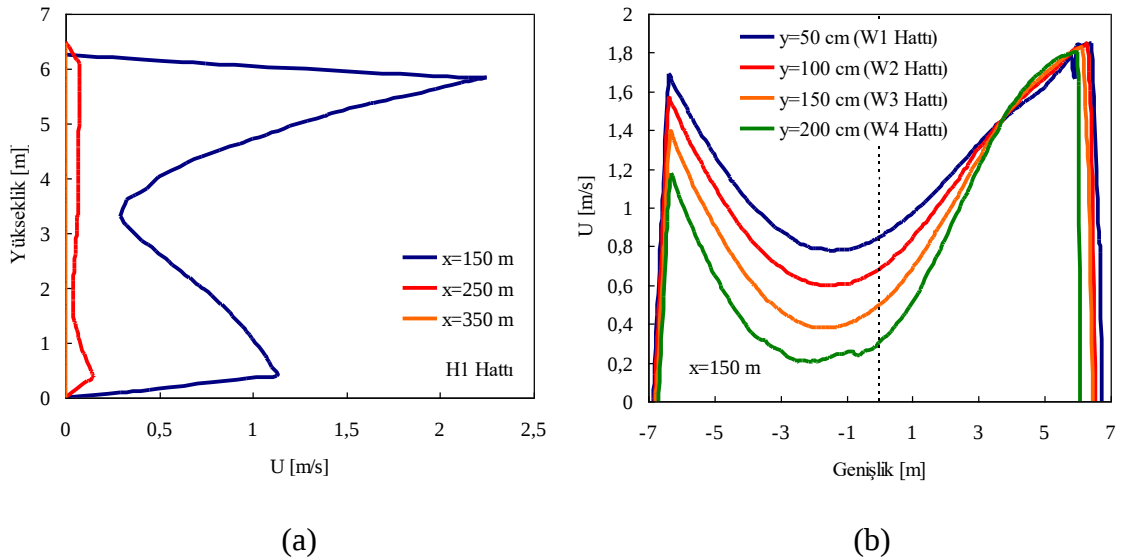
Şekil 48.  $R=950$  m’de ve 950 N itme kuvvetinde hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 49’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  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Fanın emme etkisinin gözlendiği  $x=50$  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 kesitin iç bükey tarafında hız değerleri daha yüksek olmaktadır.



Şekil 49.  $R=950$  m’de ve 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

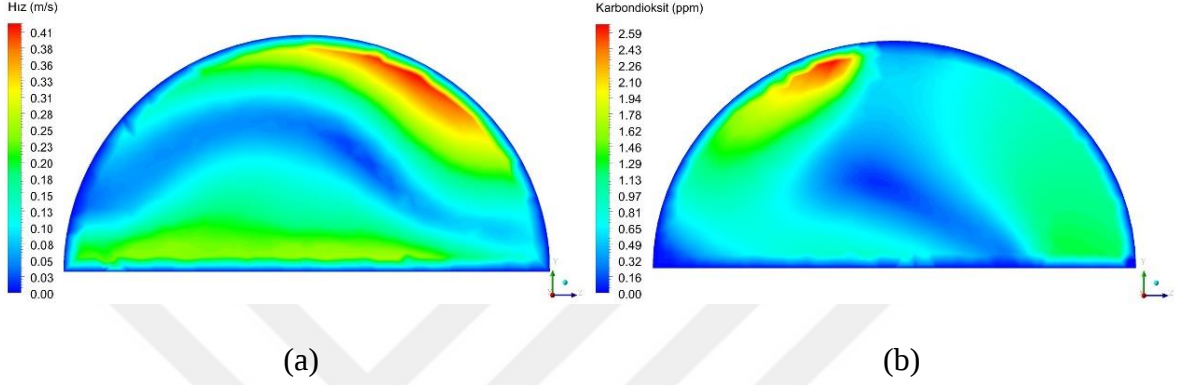
Şekil 50a'da 1900 m yarıçap değerine sahip iki şeritli kavisli tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda, tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış 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 50b'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 50. R=1900 m'de ve 950 N itme kuvvetinde hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 51'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, 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 51.  $R=1900$  m’de ve 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

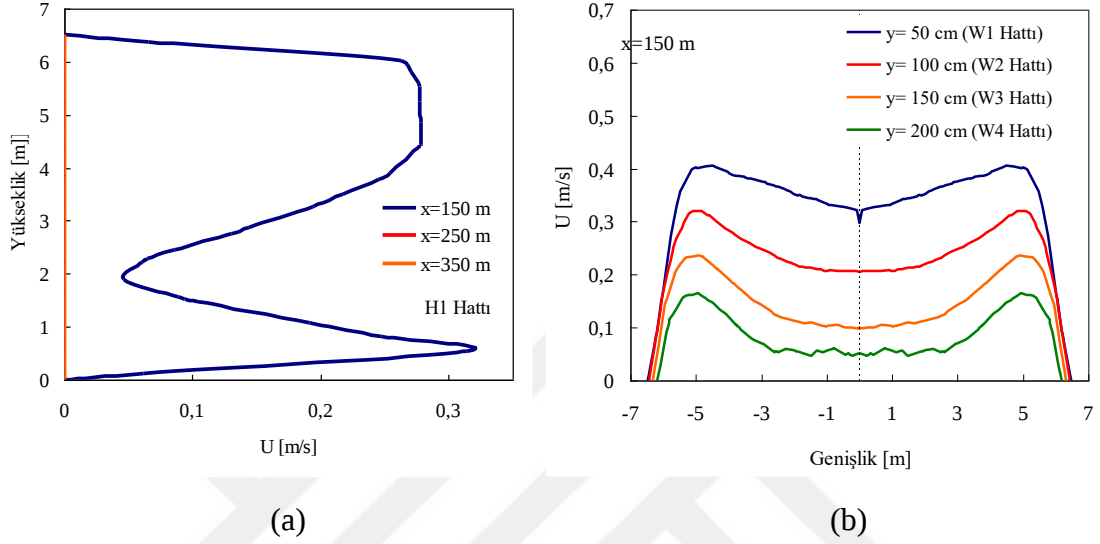
Taşıtlı kavisli tünellerde yaya seviyesinde en kesitlerdeki hız değerleri dış bükey tarafta daha büyük olurken, taşıtsız fanlı kavisli tünellerde hız değerleri fan etkisi nedeniyle iç bükey tarafta daha büyük olmaktadır.

### 3.1.5. Taşıtsız Fanlı ve Difüzörlü Düz Tünel

Tünel içerisinde taşıtların olmadığı fanlı durumda, tek fanlı iki şeritli düz tünelde fan itme kuvvetinin 950 N değerinde fanın önüne yerleştirilmiş difüzör durumunda difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerlerinde sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir.

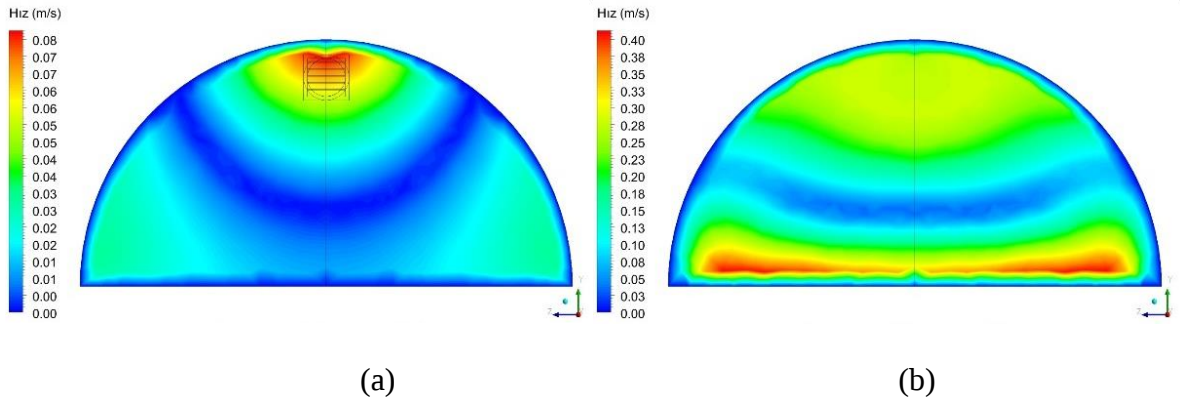
Şekil 52a’da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fan durumunda  $10^\circ$  difüzör kanat açısında tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir.  $x=150$  m’de difüzör etkisiyle düşey doğrultudaki hız değerleri  $y=2$  m’den itibaren artmakta ve fan doğrultusunda yaklaşık 0.28 m/s değerini almaktadır. İlerleyen istasyonlarda fanın hız değerleri üzerindeki etkisi azalarak kaybolmaktadır. Şekil 52b’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  $10^\circ$  difüzör kanat açısında  $x=150$  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.



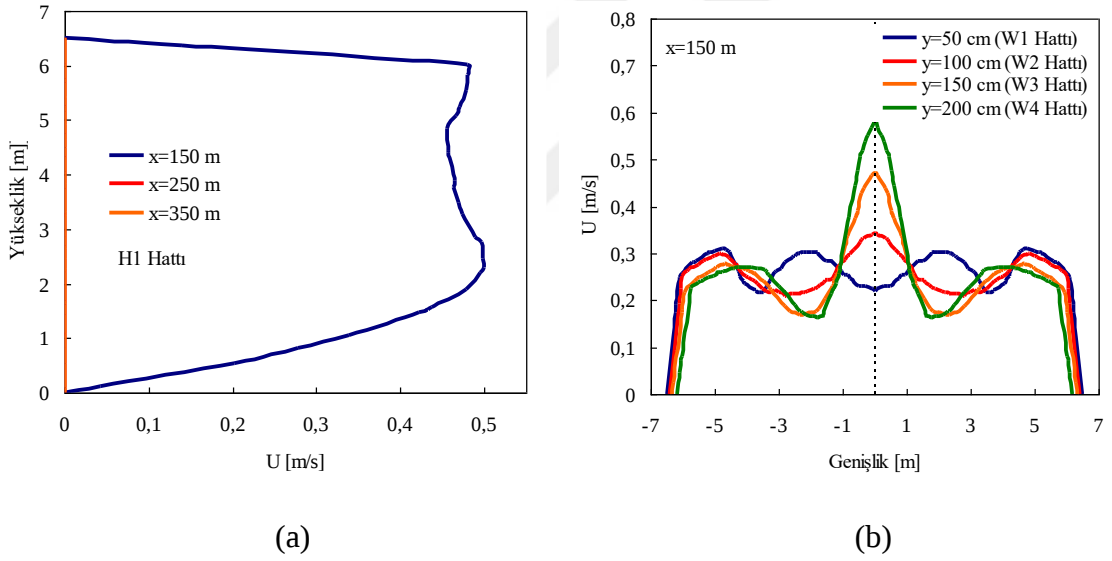
Şekil 52.  $10^\circ$  difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde hız profilleri H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 53’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  $10^\circ$  difüzör kanat açısında, 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 fan civarında maksimum olmaktadır.  $x=150$  m istasyonunda ise difüzör etkisiyle tünel bölgesinde hız değerleri artmaktadır.



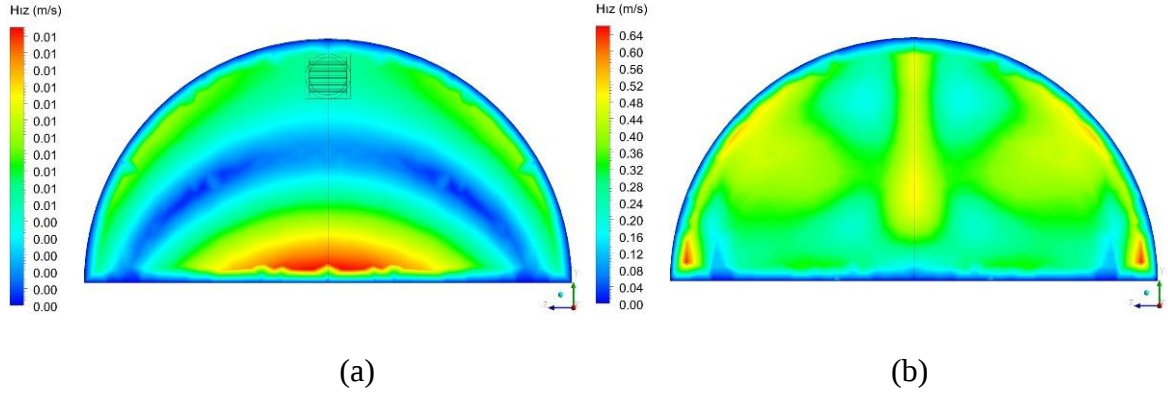
Şekil 53.  $10^\circ$  difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları (a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

Şekil 54a’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  $20^\circ$  difüzör kanat açısında tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir.  $x=150$  m’de fan etkisiyle düşey doğrultudaki hız değerleri tabandan itibaren artarak  $y=2$  m civarında en yüksek değerini almaktadır. Şekil 54b’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  $20^\circ$  difüzör kanat açısında  $x=150$  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. Difüzör etkisiyle tünel orta bölgesinde hız değeri W1 hattında düşük olmakta, artan yükseklikle birlikte kademeli olarak artarak W4 hattında en büyük olmaktadır.



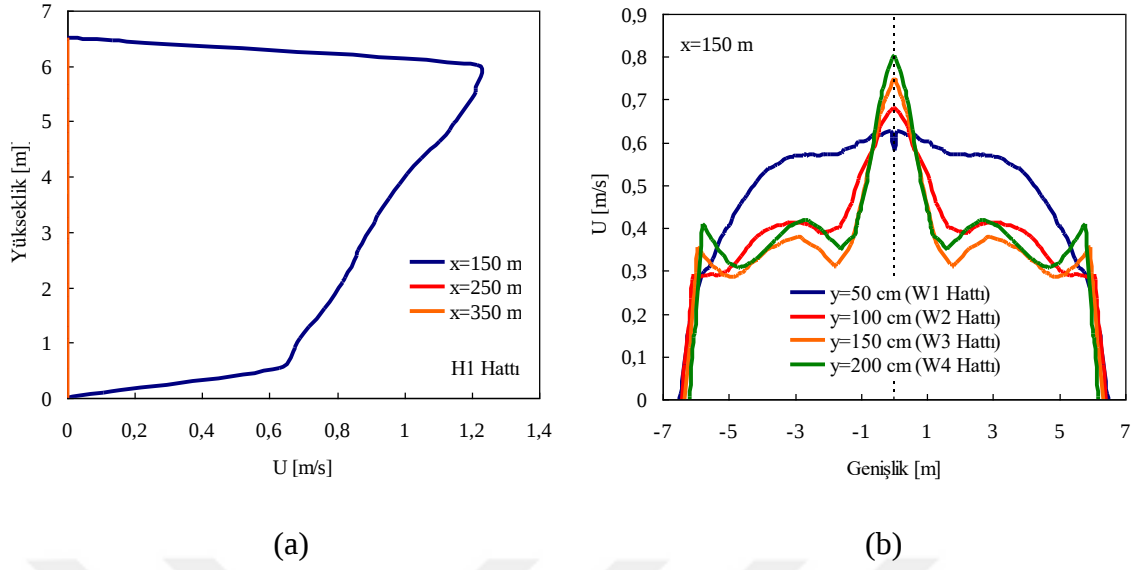
Şekil 54.  $20^\circ$  difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 55’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  $20^\circ$  difüzör kanat açısında, 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 bölgede maksimum olmaktadır.  $x=150$  m istasyonunda ise difüzör etkisiyle tünelin orta bölgesinde hız değerleri artmaktadır.



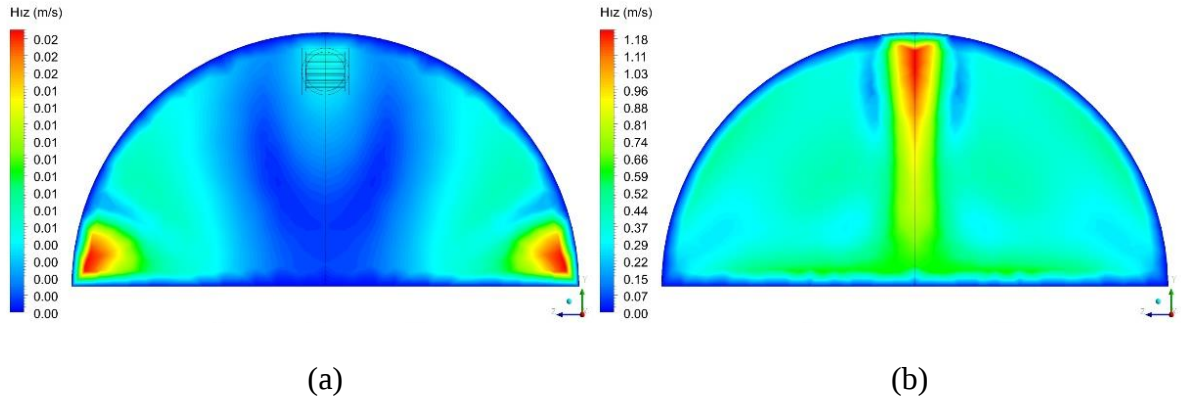
Şekil 55. 20° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları  
(a) x=50 m (b) x=150 m

Şekil 56a’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 30° difüzör kanat açısında tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. x=150 m’de fan etkisiyle düşey doğrultudaki hız değerleri tabandan itibaren artarak y=6 m civarında en yüksek değerini almaktadır. Şekil 56b’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 30° difüzör kanat açısında 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. Difüzör etkisiyle tünel orta bölgesinde hız değeri W1 hattında düşük olmakta, artan yükseklikle birlikte kademeli olarak artarak W4 hattında en büyük olmaktadır.



Şekil 56. 30° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 57’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 30° difüzör kanat açısında, 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 köşe bölgelerinde maksimum olmaktadır.  $x=150$  m istasyonunda ise difüzör etkisiyle tünelin orta bölgesinde hız değerleri artmaktadır.



Şekil 57. 30° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde hız dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

### 3.2. Tünel İçerisinde Karbonmonoksit (CO) Dağılımları

Tünel içerisindeki karbonmonoksit dağılımları, taşıtlı düz tünel, taşıtlı kavisli tünel,

taşıtsız fanlı düz tünel, taşıtsız fanlı kavisli tünel, taşıtsız fanlı ve difüzörlü düz tünel alt başlıklarına göre düzenlenmiştir. Karbonmonoksit dağılımları, tünel boyunca farklı istasyonlarda tünel içerisinde tanımlanmış yatay ve düşey hatlarda çizgisel değişimler ve tünel eni kesitlerindeki dağılım görüntüleri şeklinde verilmiştir.

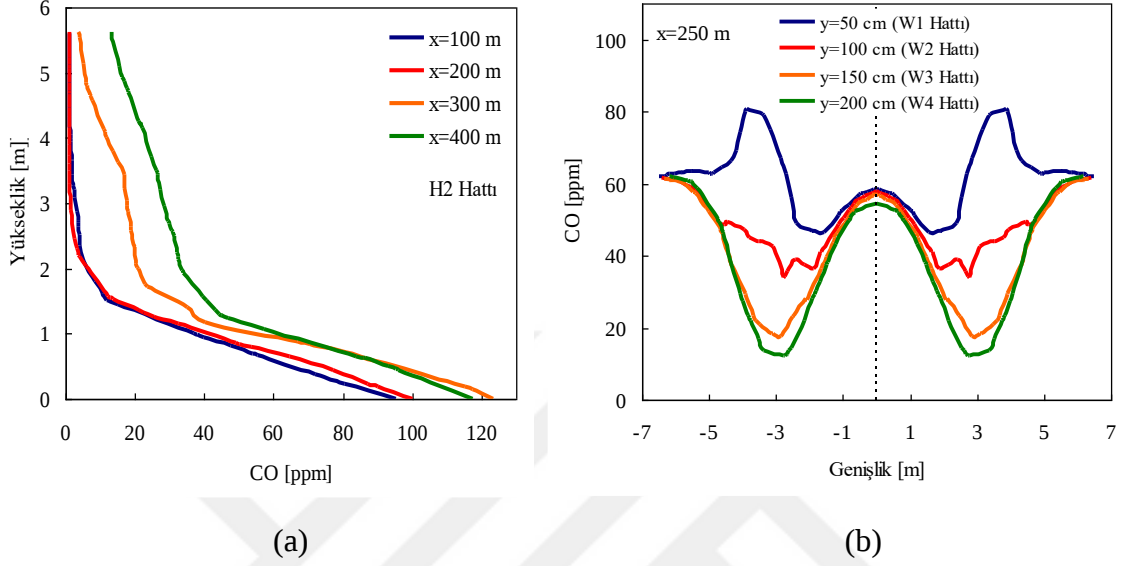
### 3.2.1. Taşıtlı Düz Tünel

Taşıtlı düz tünelde, 500 m uzunluğundaki iki şeritli düz tünelin içerisine sırasıyla 80 adet, 50 adet, 34 adet, 26 adet ve 20 adet taşıt yerleştirilmiş ve taşıt sayısı ile ters orantılı 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat şeklinde taşıt hızı değerleri elde edilmiştir. Tünel içerisine yerleştirilen araçların aralarındaki mesafe taşıt hızının yarısı olarak takip mesafesi şeklinde dikkate alınmıştır. Böylece, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat taşıt hızlarında takip mesafeleri sırasıyla 15 m, 25 m, 35 m ve 45 m şeklinde oluşmuştur. 80 adet taşıt, taşıt hareketinin olmadığı kritik durum olarak tanımlanmıştır. Kritik durumda iki taşıt arası mesafe 8 m olarak gerçekleştirilmiştir.

Taşıt hızı değerleri, sayısal çalışmalara “m/s” biriminde yansıtılmıştır. Kritik durumu temsil eden 0 km/saat hız değerine karşılık doğal havalandırma durumundaki hız değeri olan 2 m/s kullanılmıştır. 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerine karşılık ise sırasıyla 8.3 m/s, 13.9 m/s, 19.4 m/s ve 25 m/s hız değerleri kullanılmıştır. Taşıt hareketinin olmadığı 0 km/saat durağan hız durumunda zaman adımı 1 dakika alınarak 60 dakikalık çözüm elde edilmiştir. Taşıt hızının 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde ise zaman adımı 0.5 s alınarak sırasıyla 60 s, 36 s, 26 s ve 20 s sürelerle çözümler gerçekleştirilmiştir. Tünel içerisindeki karbonmonoksit değerleri çözüm sürelerinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

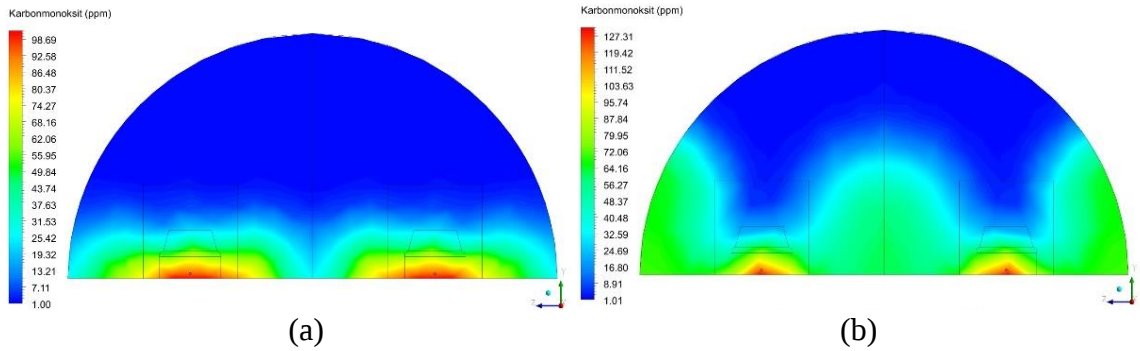
Şekil 58a’da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hareketinin olmadığı 0 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H<sub>2</sub> hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değerleri, y=1.5 m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Tünel boyunca ilerledikçe artış gösteren karbonmonoksit değerleri, tünel çıkışı etkisiyle x=400 m’de x=300 m’deki değerlerden daha düşük olmaktadır. Şekil 58b’de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hareketinin olmadığı 0 km/saat değerinde x=250 m istasyonunda enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200

cm yüksekliklerde sırasıyla W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri verilmiştir. Taşıt arkasına karşılık gelen konumlarda  $y=50$  cm yüksekliğindeki W1 hattında en yüksek olan karbonmonoksit değerleri yükseklik arttıkça azalmakta ve  $y=200$  cm yüksekliğindeki W4 hattında en düşük olmaktadır.



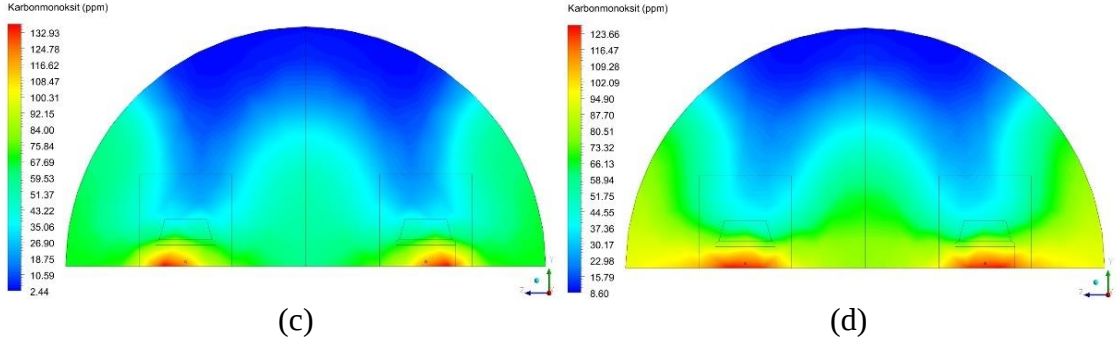
Şekil 58. 0 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit profilleri  
(a) H2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 59’da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hareketinin olmadığı 0 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla  $x=100$  m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbonmonoksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı görülmektedir. Taşıtların egzoz bölgelerinde en kritik değerlere ulaşan karbonmonoksit düzeyleri tünel içerisinde ilerledikçe artmakta,  $x=400$  m’de tünel çıkışı etkisiyle  $x=300$  m’deki değerlerden daha düşük olmaktadır.

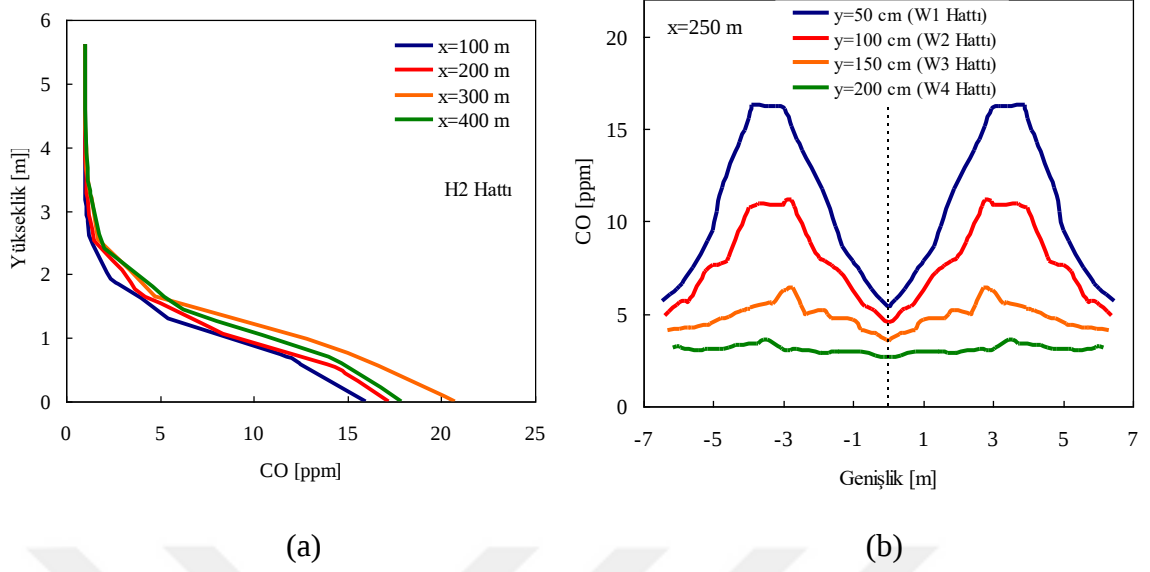


Şekil 59. 0 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

Şekil 59'un devamı

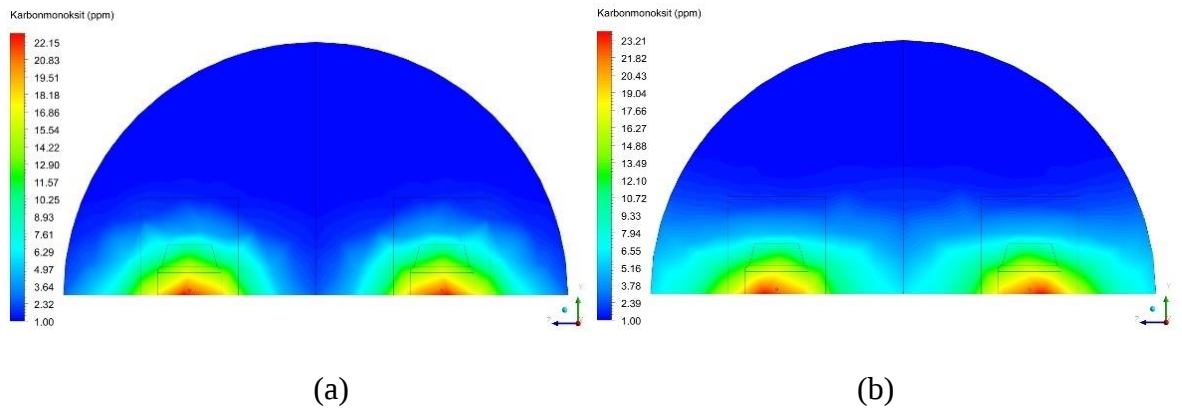


Şekil 60a'da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 30 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değerleri,  $y=2$  m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Tünel boyunca ilerledikçe artış gösteren karbonmonoksit değerleri, tünel çıkışı etkisiyle  $x=400$  m'de  $x=300$  m'deki değerlerden daha düşük olmaktadır. Şekil 60b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 30 km/saat değerinde  $x=250$  m istasyonunda enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde sırasıyla W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri verilmiştir. Taşıt arkasına karşılık gelen konumlarda W1 ve W2 hatlarında yüksek olan karbonmonoksit değerleri yükseklik arttıkça azalmakta ve  $y=200$  cm yüksekliğindeki W4 hattında en düşük olmaktadır.



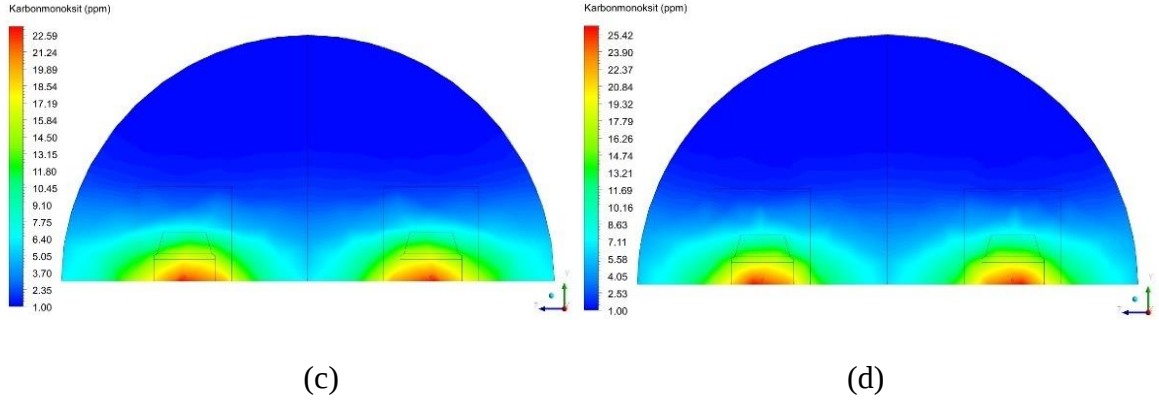
Şekil 60. 30 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit profilleri  
(a) H2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 61’de iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 30 km/saat olduğu kuvvetinde tünel boyunca sırasıyla  $x=100$  m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış Karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbonmonoksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı ancak, bu yayılmanın taşıt hızının etkisiyle 0 km/saat hızdaki duruma göre daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Taşıtların egzoz bölgelerinde en kritik değerlere ulaşan karbonmonoksit düzeyleri tünel içerisinde ilerledikçe artmakta,  $x=400$  m’de tünel çıkış etkisiyle  $x=300$  m’deki değerlerden daha düşük olmaktadır.

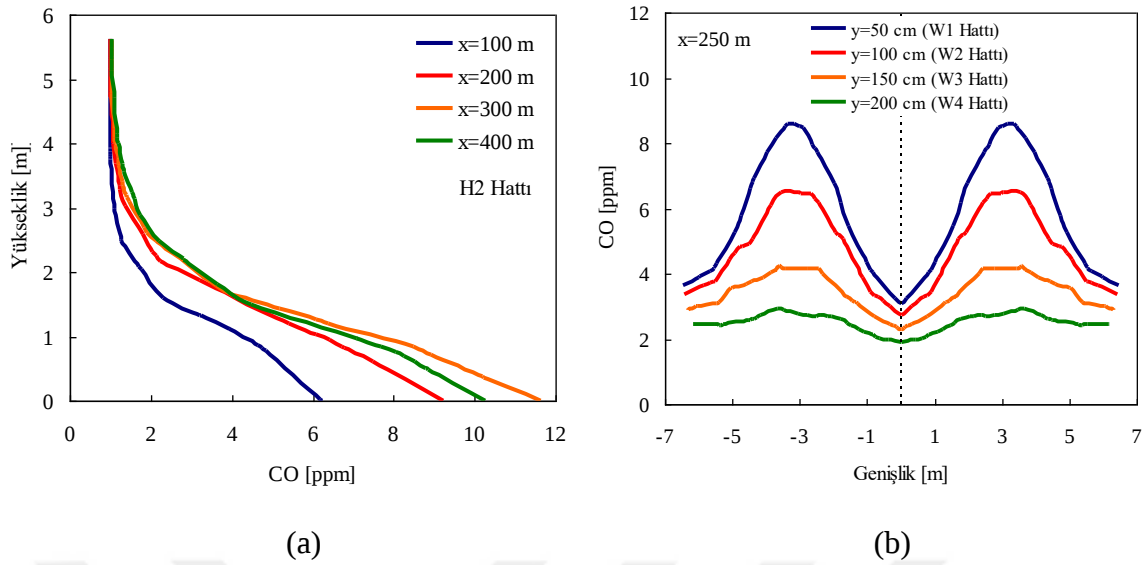


Şekil 61. 30 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

Şekil 61'in devamı

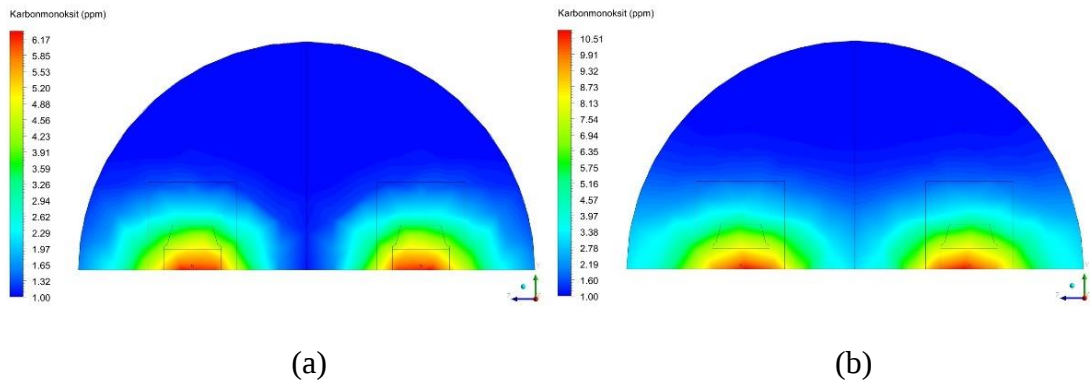


Şekil 62a'da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 50 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değerleri,  $y=2.5$  m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Tünel boyunca ilerledikçe artış gösteren karbonmonoksit değerleri, tünel çıkışı etkisiyle  $x=400$  m'de  $x=300$  m'deki değerlerden daha düşük olmaktadır. Şekil 62b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 50 km/saat değerinde  $x=250$  m istasyonunda enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde sırasıyla W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri verilmiştir. W1 hattında en yüksek, W4 hattında en düşük olacak şekilde taşıt arkasına karşılık gelen dört konumda da karbonmonoksit değerleri artmaktadır.



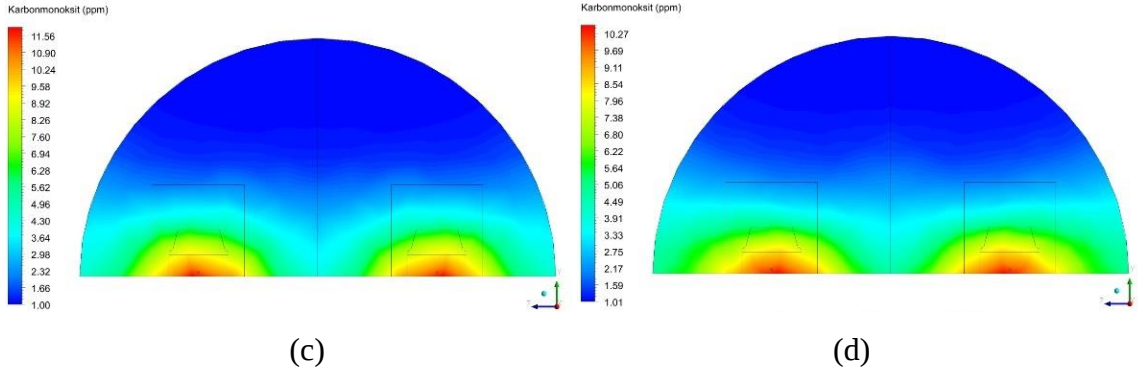
Şekil 62. 50 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit profilleri  
(a) H2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 63’de iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 50 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla  $x=100$  m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış Karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbonmonoksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı ancak, bu yayılmanın taşıt hızının etkisiyle daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Taşıtların egzoz bölgelerinde en kritik değerlere ulaşan karbonmonoksit düzeyleri tünel içerisinde ilerledikçe artmakta,  $x=400$  m’de tünel çıkışı etkisiyle  $x=300$  m’deki değerlerden daha düşük olmaktadır.

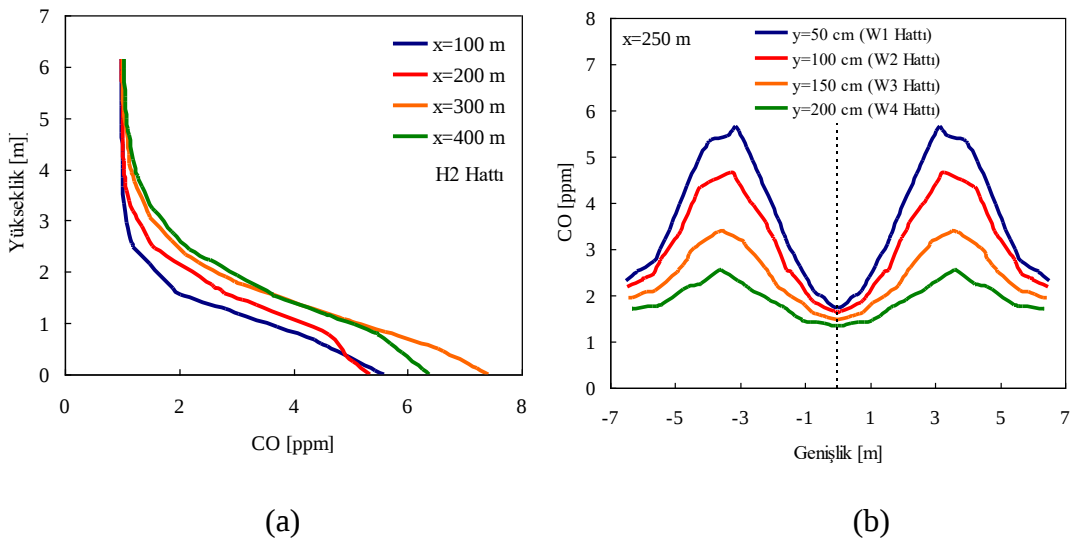


Şekil 63. 50 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

Şekil 63'ün devamı

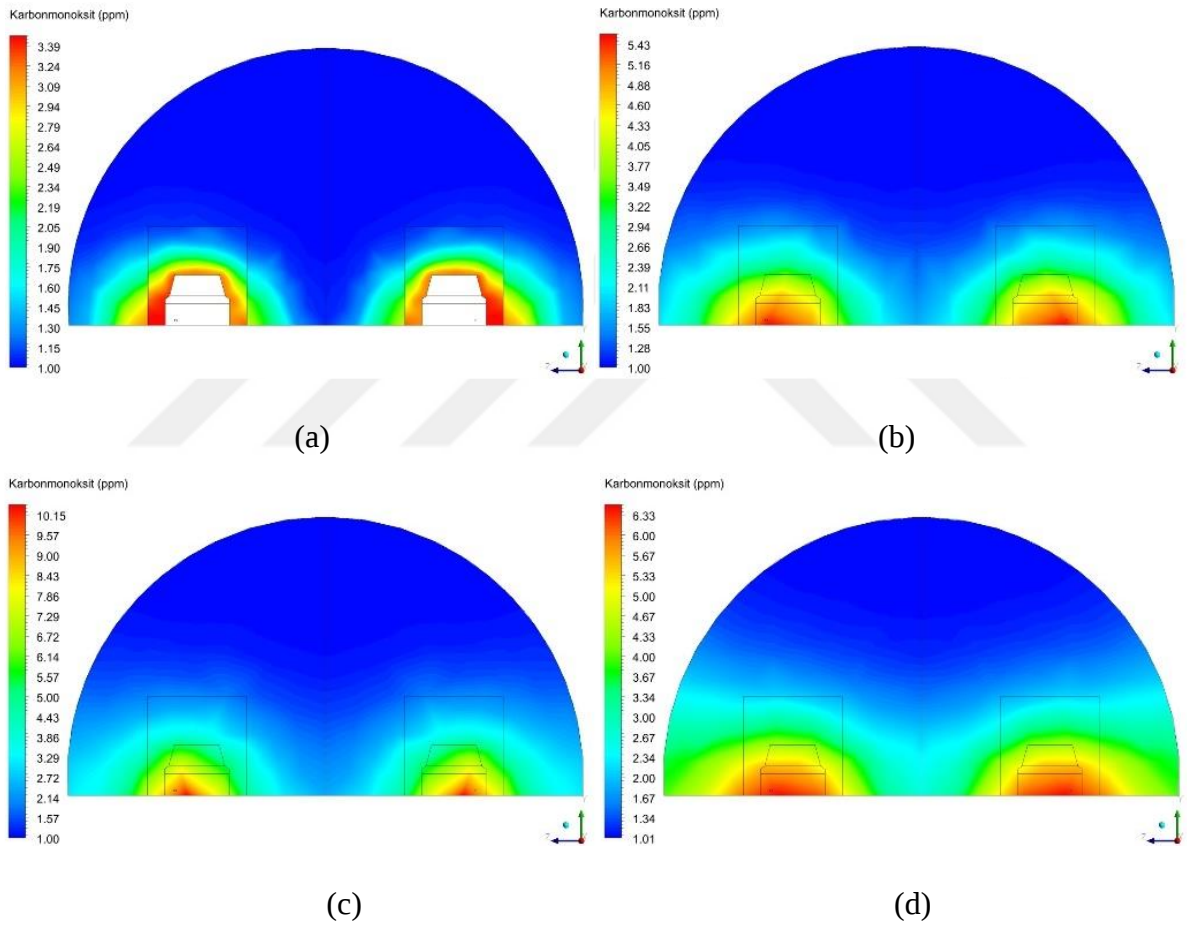


Şekil 64a'da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış Karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değerleri,  $y=3$  m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Tünel boyunca ilerledikçe artış gösteren karbonmonoksit değerleri, tünel çıkışı etkisiyle  $x=400$  m'de  $x=300$  m'deki değerlerden daha düşük olmaktadır. Şekil 64b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde  $x=250$  m istasyonunda enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde sırasıyla W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri verilmiştir. W1 hattında en yüksek, W4 hattında en düşük olacak şekilde taşıt arkasına karşılık gelen dört konumda da karbonmonoksit değerleri artmaktadır.



Şekil 64. 70 km/saat taşıt hızındaki Karbonmonoksit profilleri  
(a) H2 hatlarındaki Karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki Karbonmonoksit değerleri

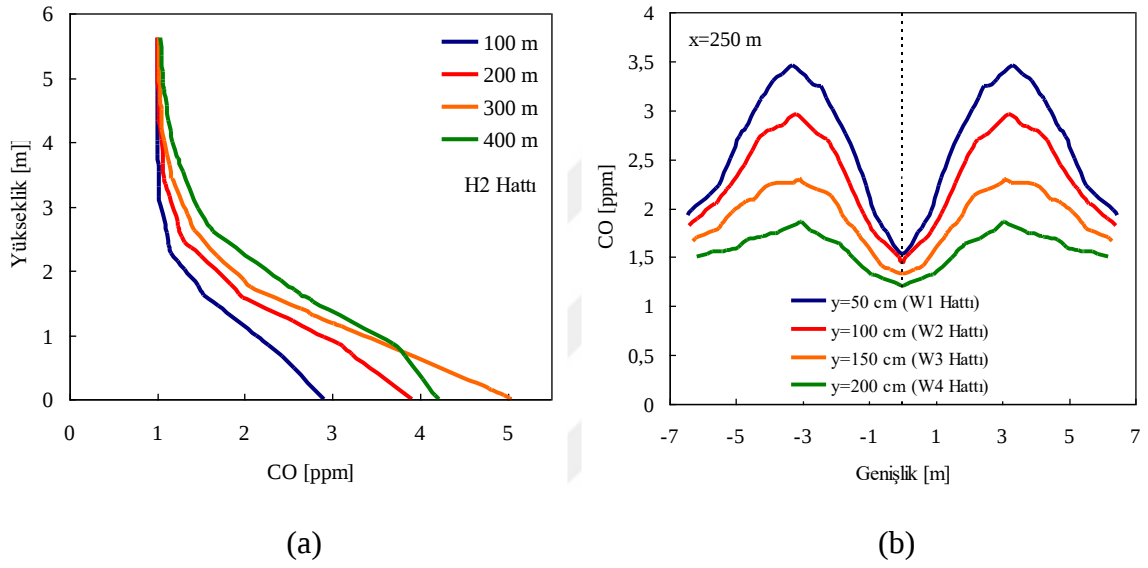
Şekil 65’de iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla  $x=100$  m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış Karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbonmonoksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı ancak, bu yayılmanın taşıt hızının etkisiyle daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Taşıtların egzoz bölgelerinde en kritik değerlere ulaşan karbonmonoksit düzeyleri tünel içerisinde ilerledikçe artmakta,  $x=400$  m’de tünel çıkış etkisiyle  $x=300$  m’deki değerlerden daha düşük olmaktadır.



Şekil 65. 70 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları  
 $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

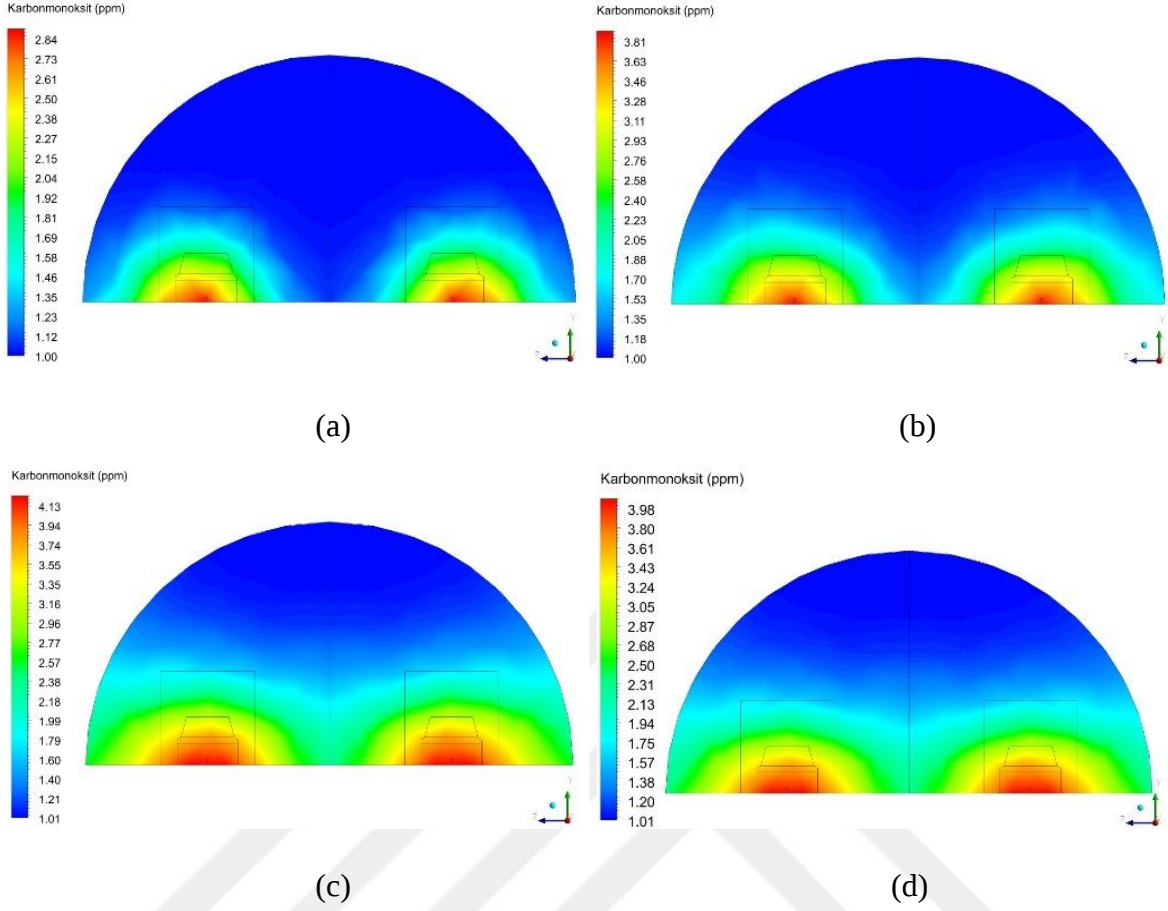
Şekil 66a’da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 90 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değerleri,  $y=3$  m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir.

Tünel boyunca ilerledikçe artış gösteren karbonmonoksit değerleri, tünel çıkışı etkisiyle  $x=400$  m'de  $x=300$  m'deki değerlerden daha düşük olmaktadır. Şekil 66b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 90 km/saat değerinde  $x=250$  m istasyonunda enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde sırasıyla W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri verilmiştir. W1 hattında en yüksek, W4 hattında en düşük olacak şekilde taşıt arkasına karşılık gelen dört konumda da karbonmonoksit değerleri artmaktadır.



Şekil 66. 90 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit profilleri  
(a) H2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 67'de iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hareketinin olmadığı 90 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla  $x=100$  m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbonmonoksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı ancak, bu yayılmanın taşıt hızının etkisiyle daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Taşıtların egzoz bölgelerinde en kritik değerlere ulaşan karbonmonoksit düzeyleri tünel içerisinde ilerledikçe artmakta,  $x=400$  m'de tünel çıkışı etkisiyle  $x=300$  m'deki değerlerden daha düşük olmaktadır.



Şekil 67. 90 km/saat taşıt hızındaki Karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

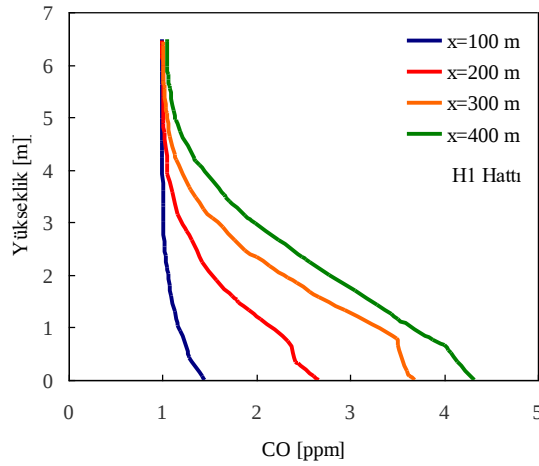
### 3.2.2. Taşıtlı Kavisli Tünel

Tünel içerisindeki karbonmonoksit dağılımları, 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçaları iki farklı kavise sahip iki şeritli tüneller olarak dikkate alınmış ve bu tüneller içindeki üç boyutlu akış alanları taşıt hızının 70 km/saat (taşıt sayısının 26 değeri için) değeri için sayısal olarak çözülmüştür.

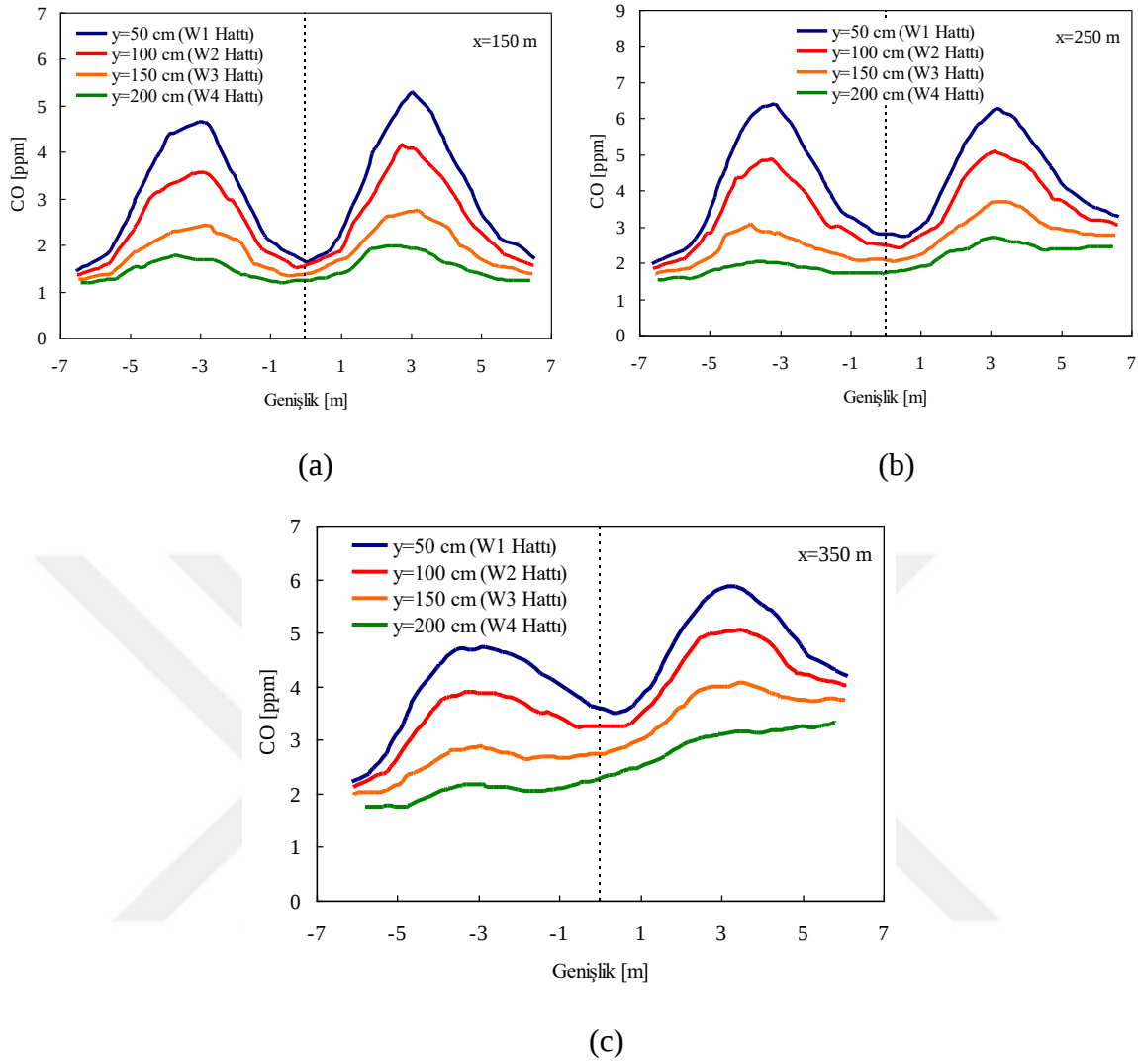
Taşıt hızı değeri, sayısal çalışmalara “m/s” biriminde yansıtılmıştır. Tüm kavisli tünel çalışmalarında, 70 km/saat değerlerine karşılık 19.4 m/s hız değerleri kullanılmıştır. Taşıt hızının 70 km/saat değerlerinde zaman adımı 0.5 s alınarak sırasıyla 26 s süresinde çözümler gerçekleştirilmiştir. Tünel içerisindeki karbonmonoksit değerleri çözüm sürelerinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

Şekil 68’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 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Tünel

tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değerleri,  $y=4$  m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Tünel boyunca ilerledikçe karbonmonoksit değerleri artmaktadır. Şekil 69'da, iki şeritli 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde  $x=150$ , 250 ve 350 m istasyonlarında enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde sırasıyla W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri verilmiştir.  $x=150$  m'de, taşıtların arkasına karşılık gelen dört konumda da karbonmonoksit değerleri W1 hattında en yüksek, W4 hattında en düşük olacak şekilde artmakta, ancak kavis etkisiyle bu artış iç bükey tarafta daha fazla olmaktadır (Şekil 69a). Tünel boyunca ilerledikçe kavis etkisiyle iç bükey taraftaki karbonmonoksit değerlerindeki artış daha belirgin olmaktadır (Şekil 69b, c).

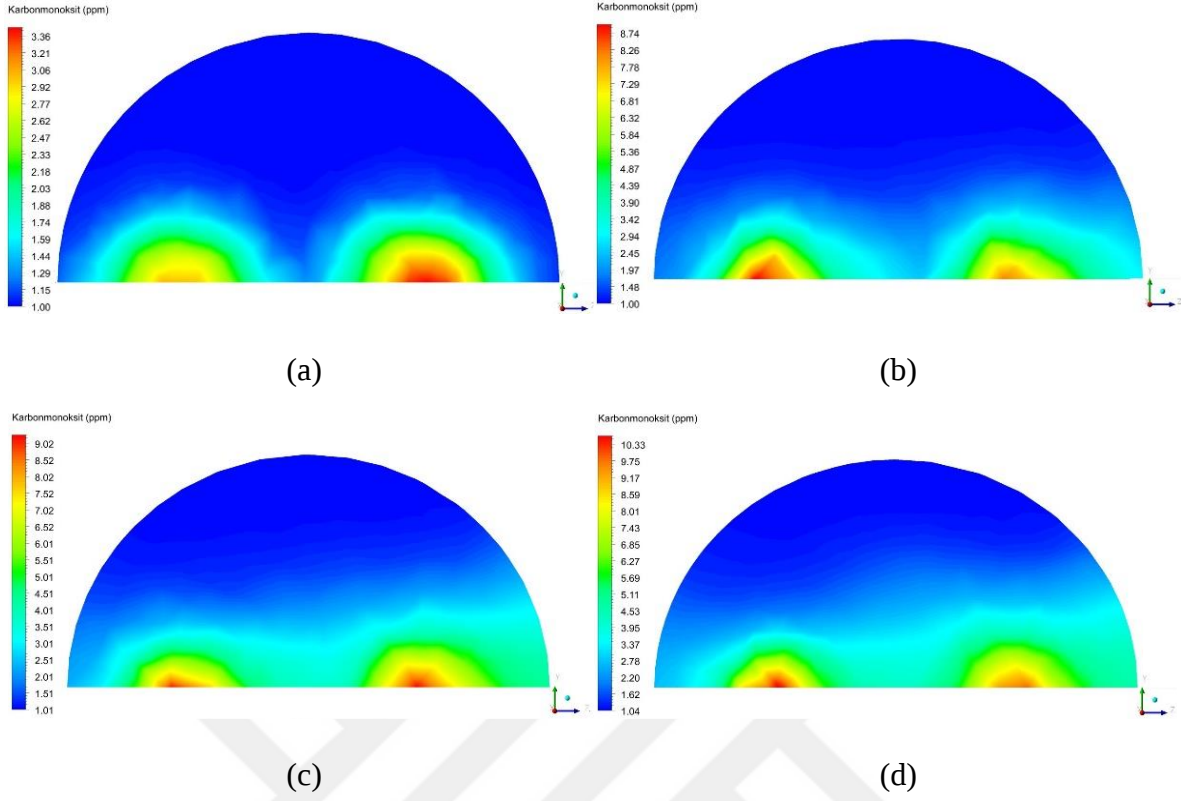


Şekil 68. R=950 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hatlarındaki karbonmonoksit profilleri



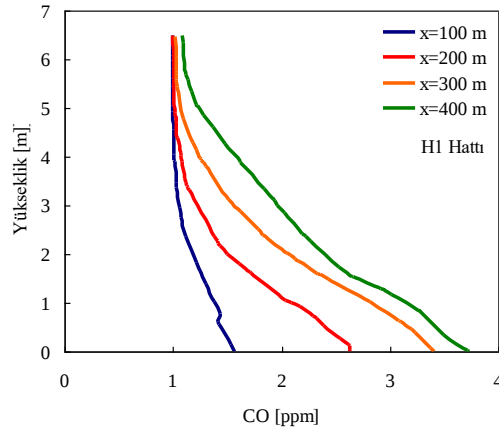
Şekil 69.  $R=950$  m’de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit profilleri  
(a)  $x=150$  m (b)  $x=250$  m (c)  $x=350$  m

Şekil 70’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 karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbonmonoksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı ancak, bu yayılmanın kavis etkisiyle iç bükey tarafta daha etkili olduğu görülmektedir.

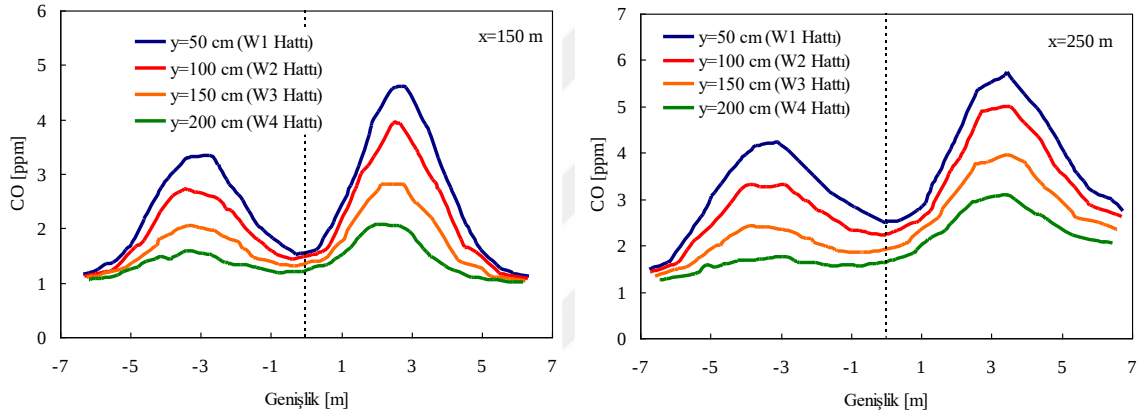


Şekil 70. 950 m yarıçapa sahip kavisli tünelde 70 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

Şekil 71’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 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değerleri,  $y=4$  m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Tünel boyunca ilerledikçe karbonmonoksit değerleri artmaktadır. Şekil 72’de, iki şeritli 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde  $x=150$ , 250 ve 350 m istasyonlarında enine yatay doğrultularda zeminden itibaren 50 cm, 100 cm, 150 cm ve 200 cm yüksekliklerde sırasıyla W1, W2, W3 ve W4 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri verilmiştir.  $x=150$  m’de, taşıtların arkasına karşılık gelen dört konumda da karbonmonoksit değerleri W1 hattında en yüksek, W4 hattında en düşük olacak şekilde artmakta, ancak kavis etkisiyle bu artış iç bükey tarafta daha fazla olmaktadır (Şekil 72a). Tünel boyunca ilerledikçe kavis etkisiyle iç bükey taraftaki karbonmonoksit değerlerindeki artış daha belirgin olmaktadır (Şekil 72b, c).

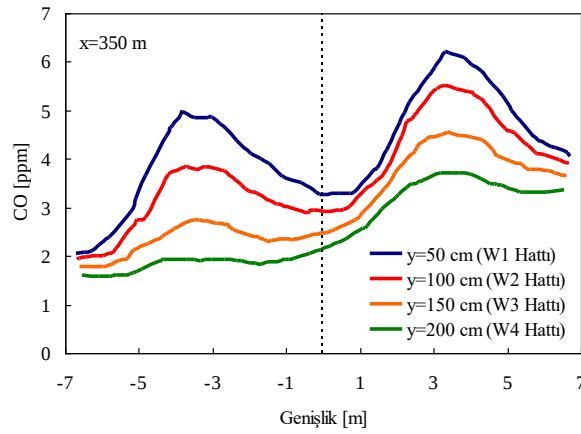


Şekil 71. R=1900 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hatlarındaki karbonmonoksit profilleri



(a)

(b)

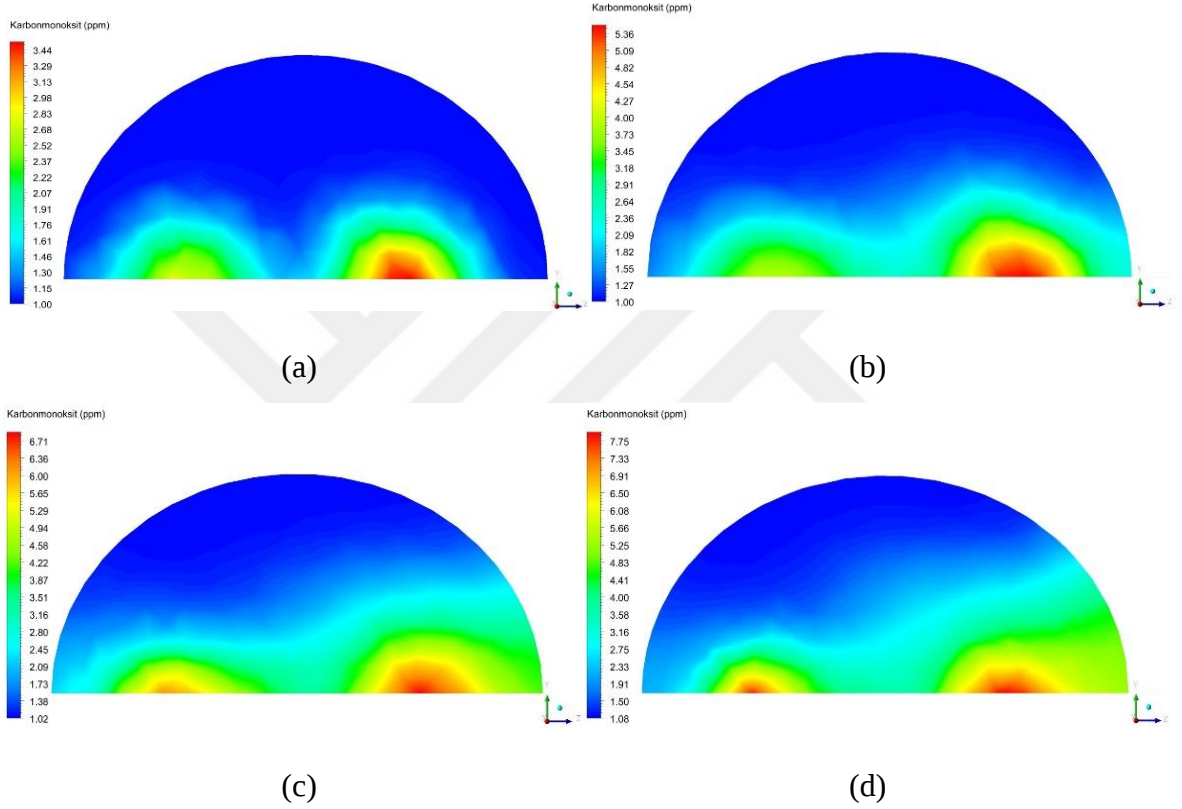


(c)

Şekil 72. R=1900 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit profilleri

(a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m

Şekil 73’de iki şeritli 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla  $x=100$  m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbonmonoksit etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı ancak, bu yayılmanın kavis etkisiyle iç bükey tarafta daha etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 73. 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünelde 70 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları

(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

### 3.2.3. Taşıtsız Fanlı Düz Tünel

Taşıtsız fanlı tünellerde, tünel içerisine yerleştirilmiş fan durumunda, fan itme kuvvetinin, tünel kavis durumunun, fan sayısının ve fana eklenmiş difüzör durumunda difüzör kanat açısının tünel içerisindeki karbonmonoksit ve karbondioksit düzeylerine etkisi incelenmiştir.

Tünel içerisinde taşıtların olmadığı fanlı durumda, ilk önce tek fanlı iki şeritli düz tünelde fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde sayısal çözümler

gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, karayolları tünellerindeki fanlarda yaygın kullanılan itme kuvveti değeri olan 950 N için 950 m ve 1900 m yarıçap değerleri ile temsil edilen iki şeritli tek fanlı kavisli tünellerdeki akış alanları sayısal olarak incelenmiştir. Fan sayısı etkisi, iki şeritli düz tünelde 950 N fan itme kuvveti değerinde tek fanlı, özdeş iki fanlı ve özdeş üç fanlı durumlar için incelenmiştir. Fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısı etkisi ise, iki şeritli düz tünelde tek fan durumunda ve 950 N fan itme kuvveti değerinde, difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerleri için incelenmiştir.

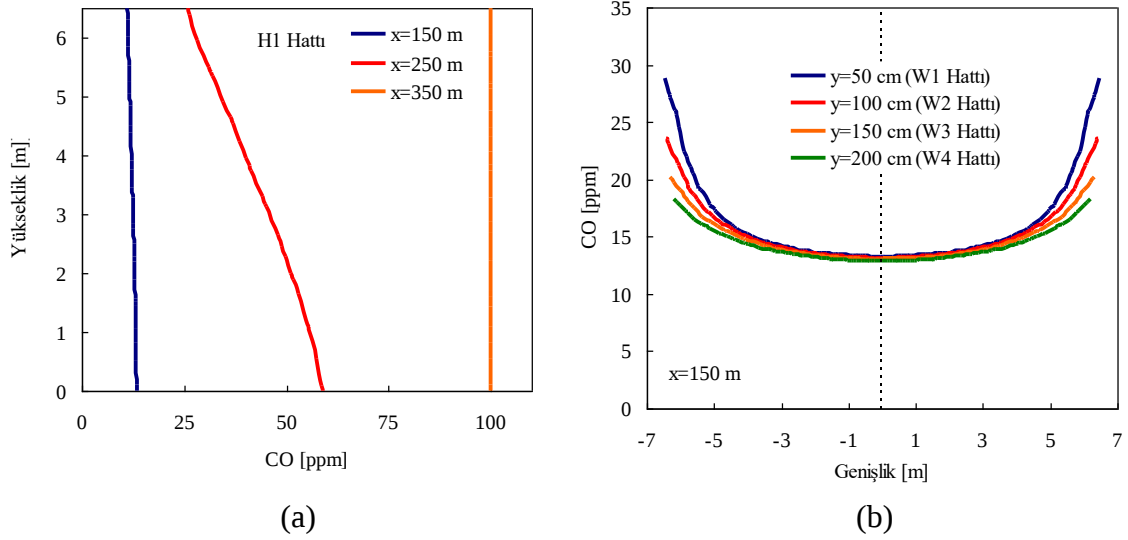
Tünel içerisinde taşıtlardan kaynaklanan karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımları üzerinde fan etkisini incelemek amacıyla tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konuma fan/fanlar yerleştirilmiştir. Tünel içerisinde kirliliğin en üst değere ulaştığı kritik düzeyler başlangıç durumu olarak dikkate alınmış ve taşıtsız durumda fan itme kuvveti değerinin, tünel kavis durumunun, fan sayısının ve fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısının karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Taşıtsız fanlı tünellerdeki tüm sayısal çözümlerde durumda zaman adımı 1 dakika alınarak 60 dakikalık çözüm elde edilmiştir. Tünel içerisindeki karbonmonoksit değerleri çözüm süresinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

Taşıtsız fanlı tünellerde, karbonmonoksit dağılımlarının zamana göre değişimlerinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen zaman bağımlı çözümlerde, kirliliğin en üst düzeye ulaştığı kritik düzey başlangıç durumundaki karbonmonoksit seviyesi olarak 100 ppm şeklinde dikkate alınmıştır.

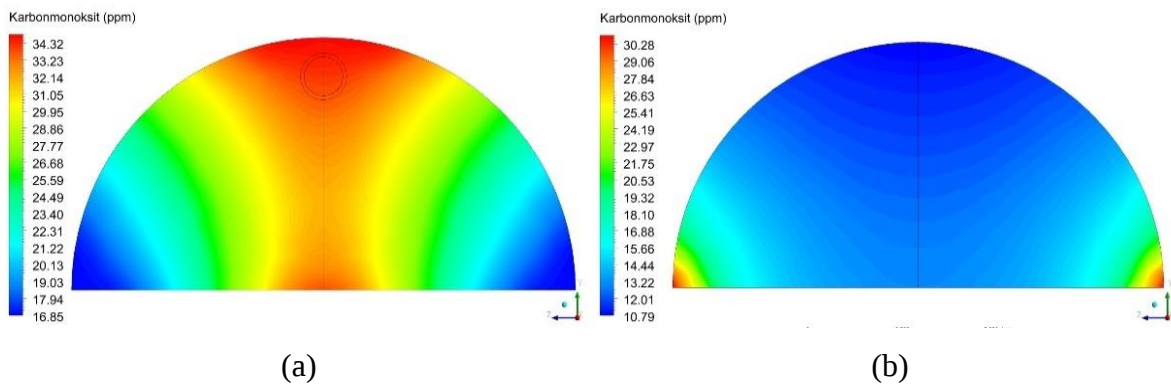
- Tek Fanlı Tünel

Şekil 74a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde 296 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyesinin 60 dakika sonunda yaklaşık 13 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe azalan düşüş etkisi,  $x=350$  m'de tamamen sona etmektedir. Şekil 74b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde 296 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 karbonmonoksit değerleri verilmiştir. Tünelin orta bölgesinde fan etkisiyle azalan karbonmonoksit değerleri, tünel yan duvarlarında W1 hattında en yüksek olacak şekilde artmaktadır.



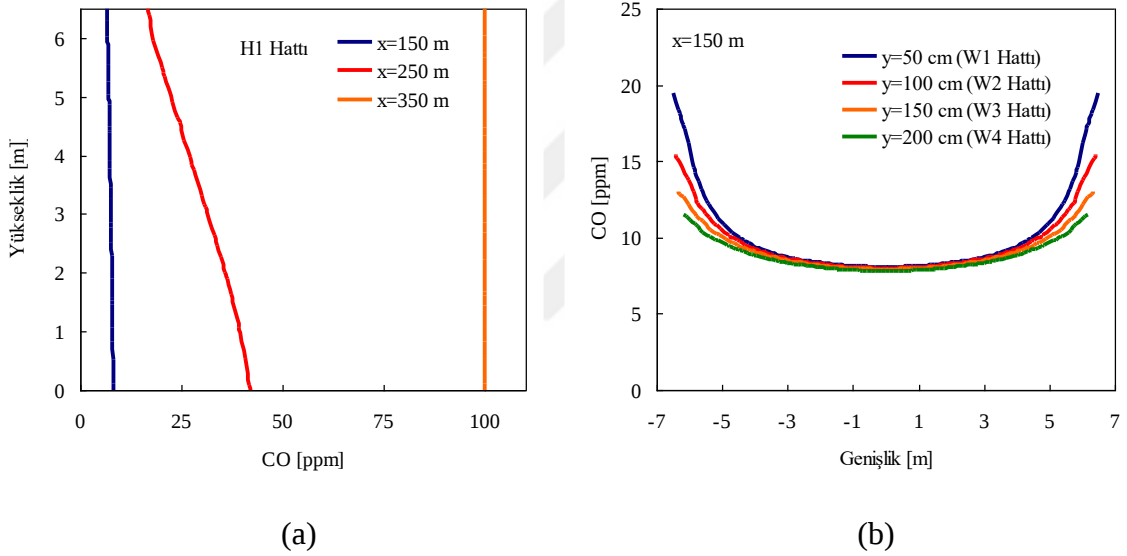
Şekil 74. 296 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 75’de iki şeritli düz tünel içerisinde 296 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbonmonoksit değerleri tünel orta bölgesinde en yüksek, tünel yan duvarları yakınında ise en düşük olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbonmonoksit değerleri azalmaktadır.



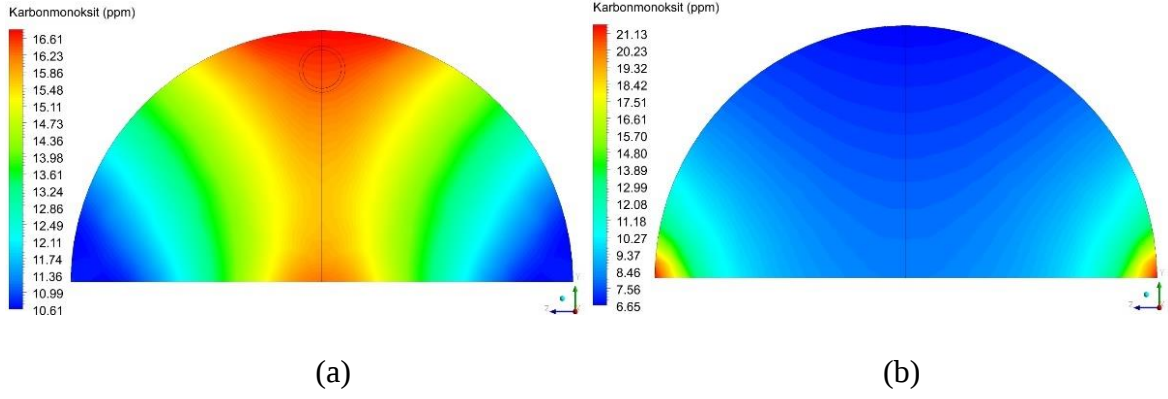
Şekil 75. 296 N itme kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

Şekil 76a’da, iki şeritli düz tünel içerisinde 525 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyesinin 60 dakika sonunda yaklaşık 7 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe azalan düşüş etkisi,  $x=350$  m’de tamamen sona etmektedir. Şekil 76b’de, iki şeritli düz tünel içerisinde 525 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 karbonmonoksit değerleri verilmiştir. Tünelin orta bölgesinde fan etkisiyle azalan karbonmonoksit değerleri, tünel yan duvarlarında W1 hattında en yüksek olacak şekilde artmaktadır.



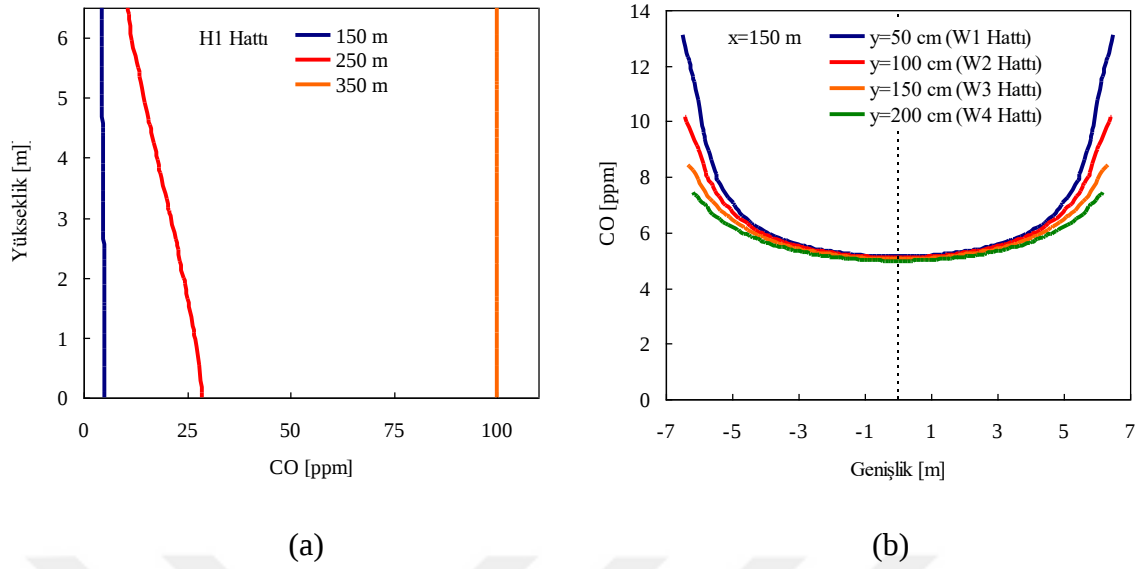
Şekil 76. 525 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 77’de iki şeritli düz tünel içerisinde 525 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbonmonoksit değerleri tünel orta bölgesinde en yüksek, tünel yan duvarları yakınında ise en düşük olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbonmonoksit değerleri azalmaktadır.



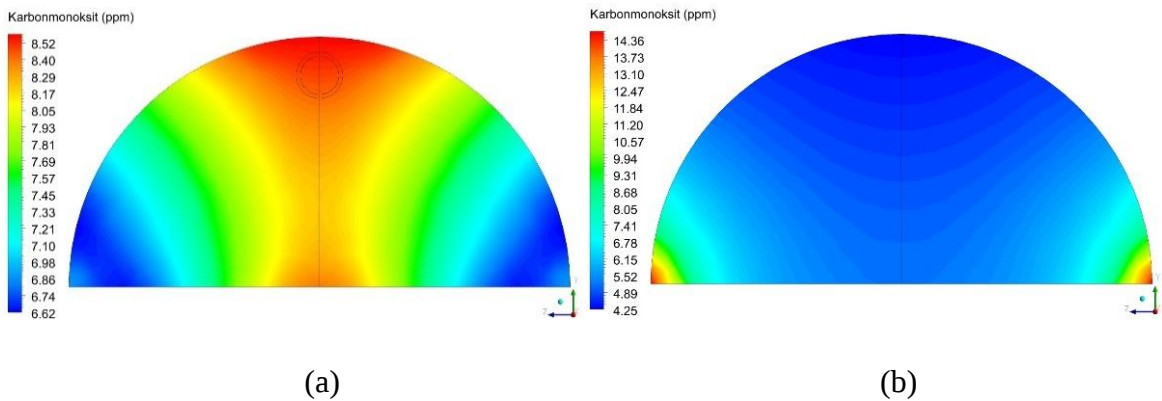
Şekil 77. 525 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

Şekil 78a’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 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyesinin 60 dakika sonunda yaklaşık 4 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe azalan düşüş etkisi,  $x=350$  m’de tamamen sona etmektedir. Şekil 78b’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 karbonmonoksit değerleri verilmiştir. Tünelin orta bölgesinde fan etkisiyle azalan karbonmonoksit değerleri, tünel yan duvarlarında W1 hattında en yüksek olacak şekilde artmaktadır.



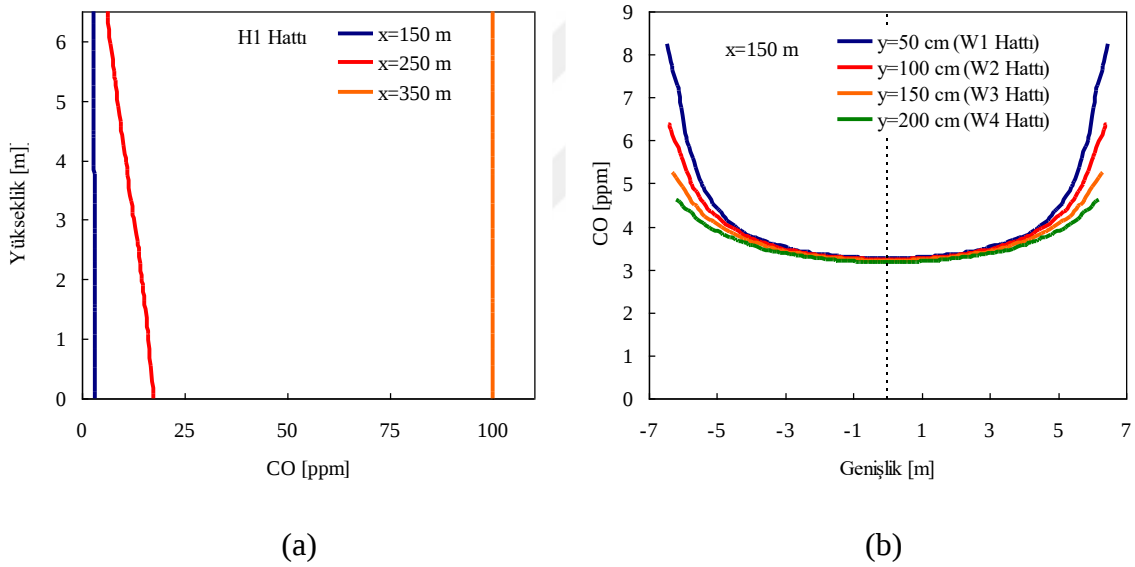
Şekil 78. 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 79’da iki şeritli düz tünel içerisinde 296 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbonmonoksit değerleri tünel orta bölgesinde en yüksek, tünel yan duvarları yakınında ise en düşük olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbonmonoksit değerleri azalmaktadır.



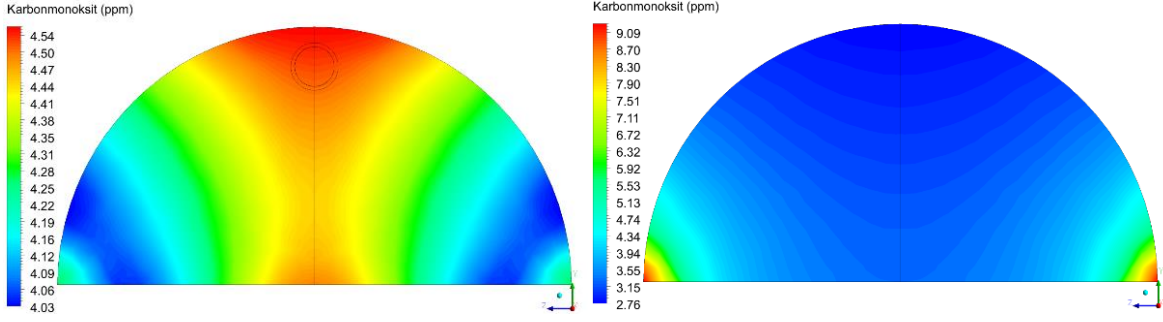
Şekil 79. 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

Şekil 80a’da, iki şeritli düz tünel içerisinde 2035 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış Karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyesinin 60 dakika sonunda yaklaşık 3 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe  $x=250$  m’de karbonmonoksit seviyesinin yaklaşık 15 ppm değerine düştüğü,  $x=350$  m’de ise fan etkisinin olmadığı görülmektedir. Şekil 80b’de, iki şeritli düz tünel içerisinde 2035 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 karbonmonoksit değerleri verilmiştir. Tünelin orta bölgesinde fan etkisiyle azalan karbonmonoksit değerleri, tünel yan duvarlarında W1 hattında en yüksek olacak şekilde artmaktadır.



Şekil 80. 2035 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 81’de iki şeritli düz tünel içerisinde 296 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbonmonoksit değerleri tünel orta bölgesinde en yüksek, tünel yan duvarları yakınında ise düşük olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbonmonoksit değerleri azalmaktadır.



(a)

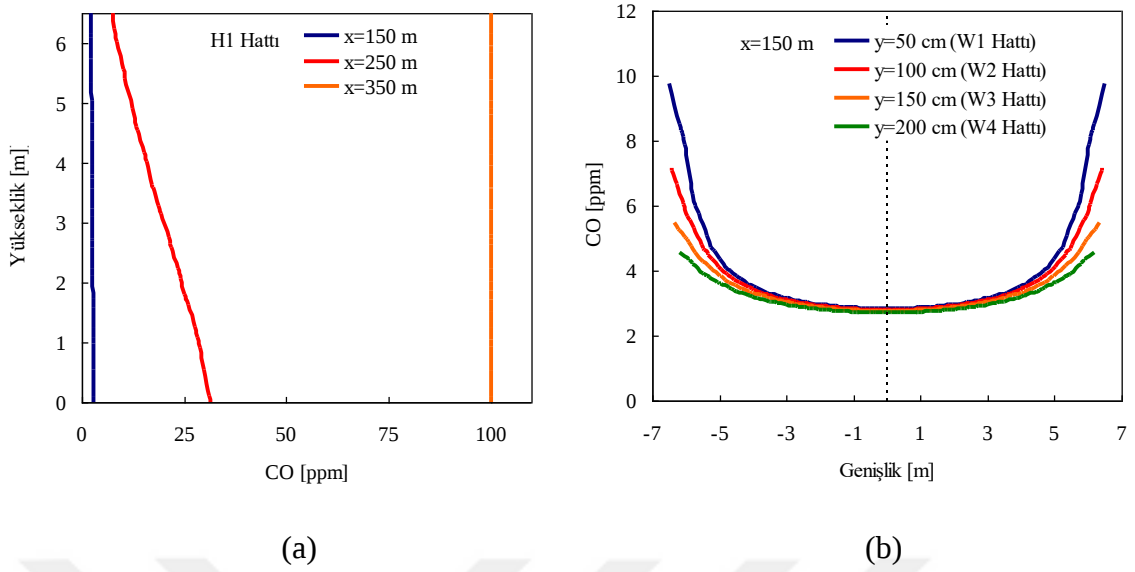
(b)

Şekil 81. 2035 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbonmonoksit dağılımları

(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

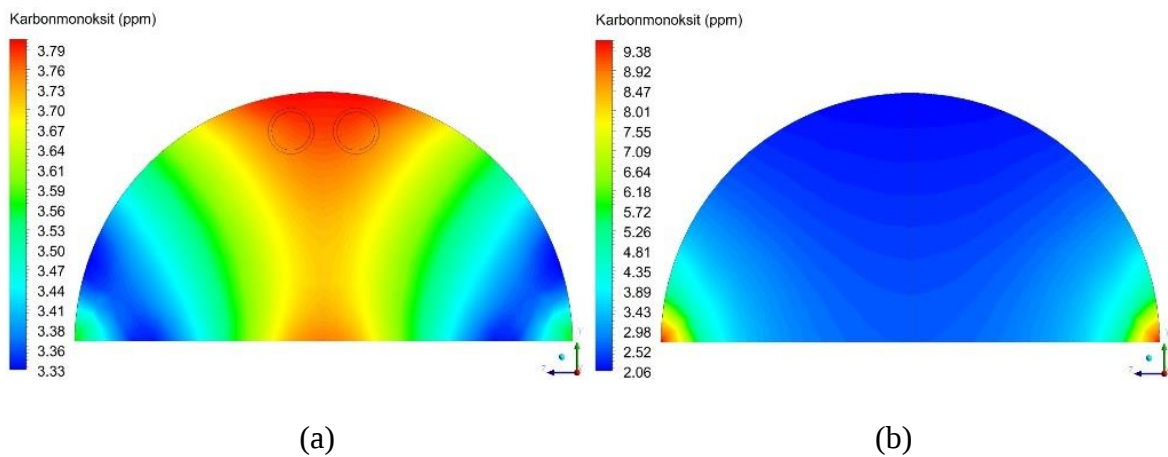
- İki Fanlı Tünel

Şekil 82a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış Karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyesinin 60 dakika sonunda yaklaşık 2,5 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe azalan düşüş etkisi,  $x=350$  m'de tamamen sona etmektedir. Şekil 82b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş 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 karbonmonoksit değerleri verilmiştir. Tünelin orta bölgesinde fan etkisiyle azalan karbonmonoksit değerleri, tünel yan duvarlarında W1 hattında en yüksek olacak şekilde artmaktadır.



Şekil 82. 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

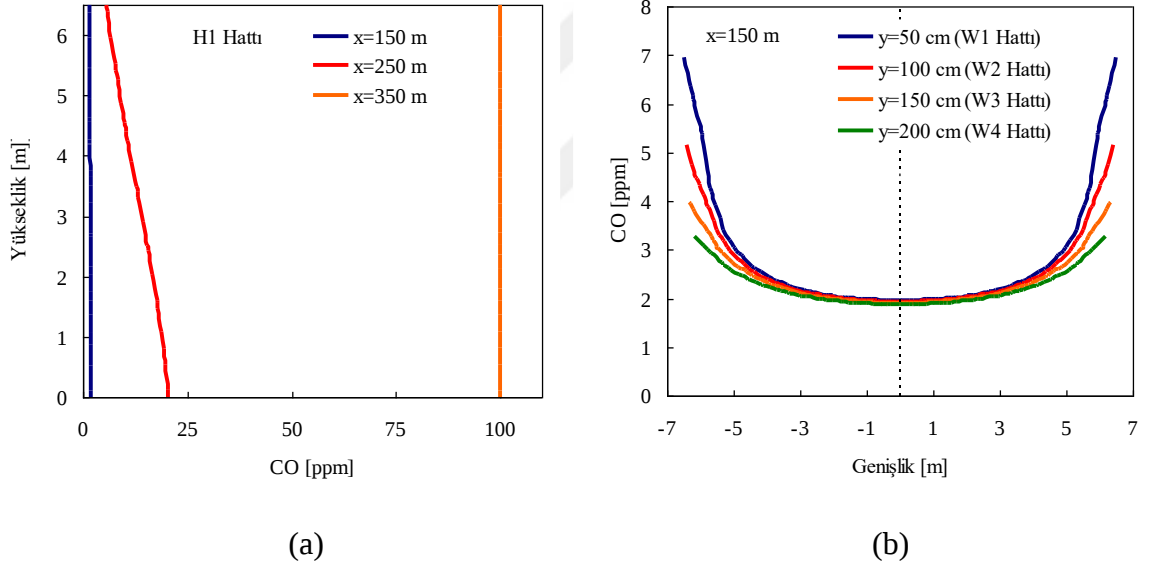
Şekil 83’de iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbonmonoksit değerleri tünel orta bölgesinde en yüksek, tünel yan duvarları yakınında ise düşük olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbonmonoksit değerleri azalmaktadır.



Şekil 83. 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

- Üç Fanlı Tünel

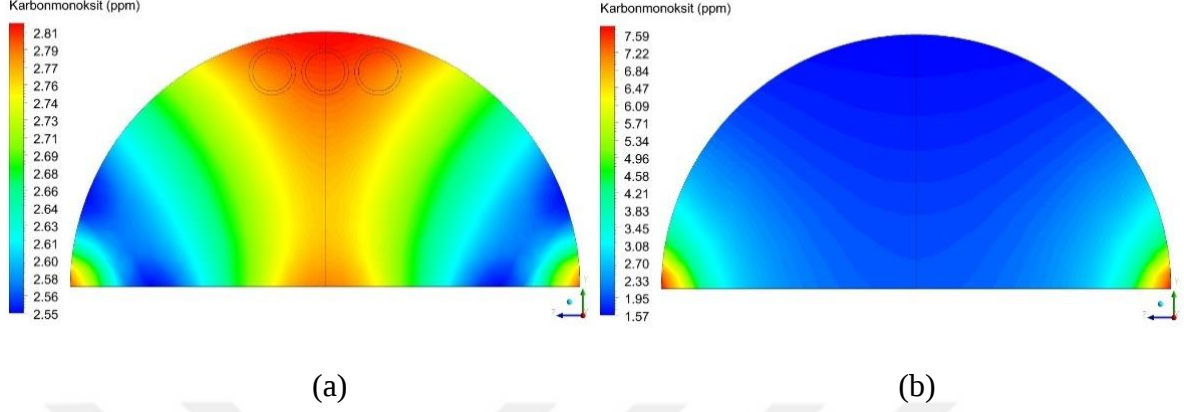
Şekil 84a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan üç özdeş fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyesinin 60 dakika sonunda yaklaşık 1,5 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe azalan düşüş etkisi,  $x=350$  m'de tamamen sona etmektedir. Şekil 84b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş 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 karbonmonoksit değerleri verilmiştir. Tünelin orta bölgesinde fan etkisiyle azalan karbonmonoksit değerleri, tünel yan duvarlarında W1 hattında en yüksek olacak şekilde artmaktadır.



Şekil 84. 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 85'de iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m'deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbonmonoksit değerleri tünel orta bölgesinde ve tünel köşelerinde yüksek, tünel yan duvarları yakınında ise düşük olmaktadır.  $x=150$  m'de ise, fanın üfleme etkisiyle yaya

seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbonmonoksit değerleri azalmaktadır.



Şekil 85. 950 N itki kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları  
(a) x=50 m (b) x=150 m

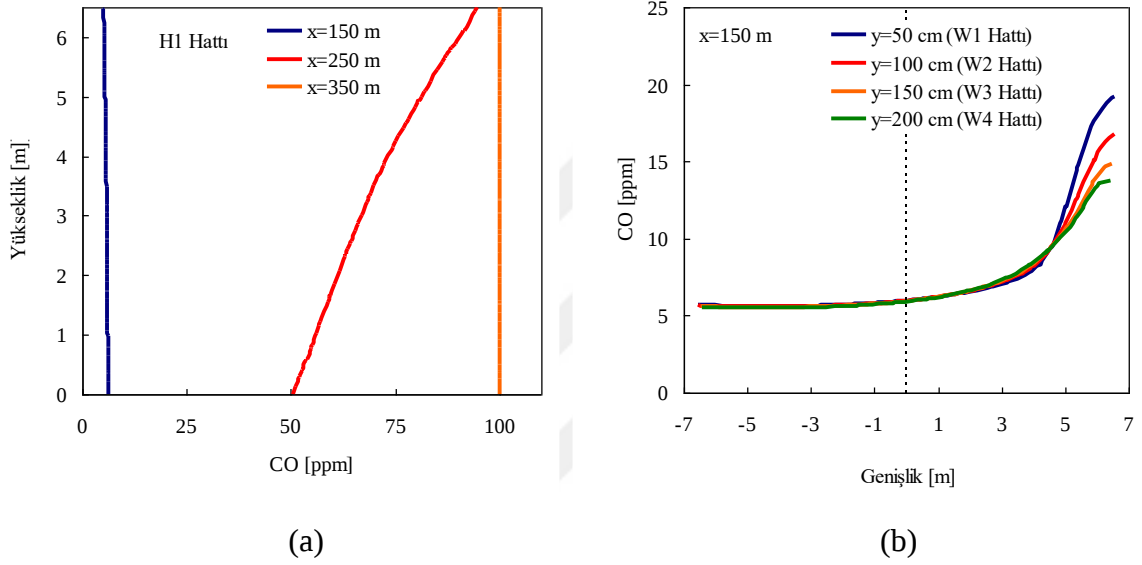
### 3.2.4. Taşıtsız Fanlı Kavisli Tünel

Tünel içerisindeki karbonmonoksit dağılımları, 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçaları iki farklı kavise sahip iki şeritli tüneller olarak dikkate alınmış ve bu tüneller içindeki üç boyutlu akış alanları fan itme kuvvetinin 950 N değeri için sayısal olarak çözülmüştür. Fan itme kuvvetinin 950 N itme kuvveti değerlerinde zaman adımı 1 dk alınarak 60 dk süresinde çözümler gerçekleştirilmiştir. Tünel içerisindeki Karbonmonoksit değerleri çözüm sürelerinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

Taşıtsız fanlı kavisli tünellerde, karbonmonoksit dağılımlarının zamana göre değişimlerinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen zaman bağımlı çözümlerde, kirliliğin en üst düzeye ulaştığı kritik düzey başlangıç durumundaki karbonmonoksit seviyesi olarak 100 ppm şeklinde dikkate alınmıştır.

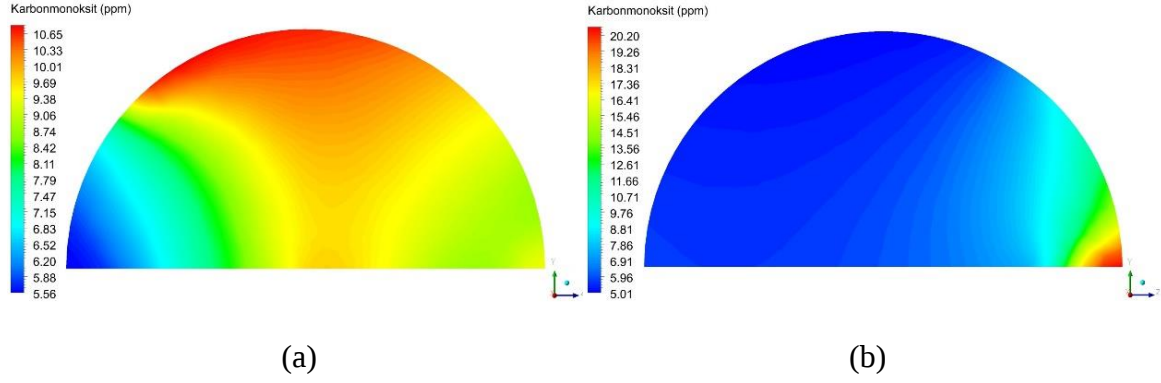
Şekil 86a'da iki şeritli 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki x=150 m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyesinin 60 dakika sonunda yaklaşık 5,5 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe x=250 m'de karbonmonoksit değerlerinin yaya seviyesine göre fan hızında daha büyük olduğu, x=350 m'de ise fan

etkisinin olmadığı görülmektedir. Şekil 86b’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 karbonmonoksit değerleri verilmiştir. Kavis etkisi nedeniyle, tüm hatlarda karbonmonoksit değerleri tünel kesitinin dış bükey tarafındaki sol bölgesinde düşük olmakta, iç bükey taraftaki sağ bölgesinde ise tünel duvarında en büyük değerlere ulaşacak şekilde artmaktadır.



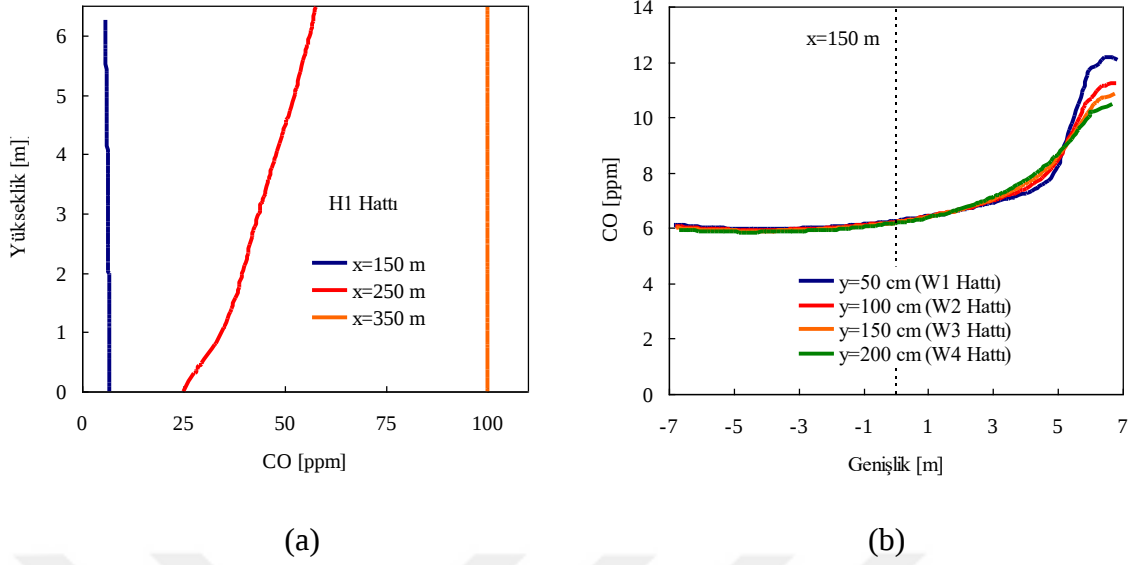
Şekil 86. R=950 m’de 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 87’de iki şeritli 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde çalışan tek fanın 950 N itme kuvveti kuvvetinde tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan ve kavis etkisiyle karbonmonoksit değerleri tünel en kesitinin dış bükey tarafında düşük, diğer bölgelerinde ise 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 karbonmonoksit değerleri azalmaktadır.



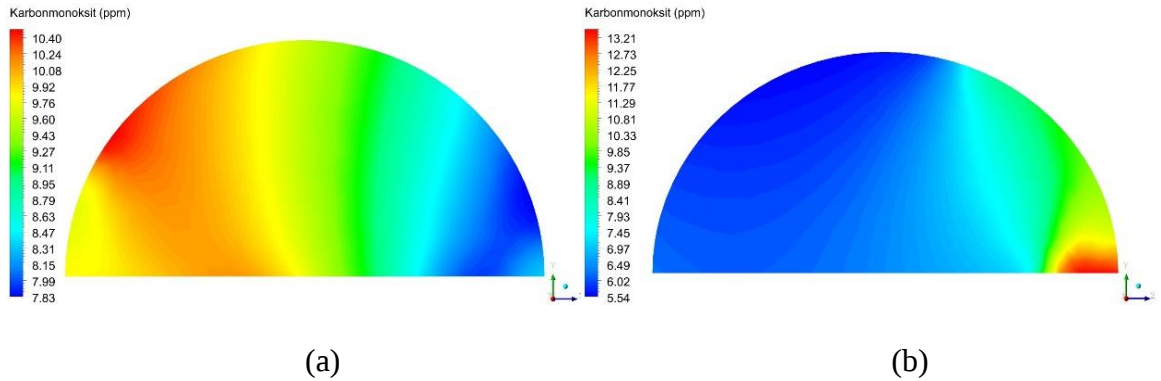
Şekil 87. 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde çalışan 950 N itme kuvveti kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

Şekil 88a'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 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyesinin 60 dakika sonunda yaklaşık 6 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe  $x=250$  m'de karbonmonoksit değerlerinin yaya seviyesine göre fan hızında daha büyük olduğu,  $x=350$  m'de ise fan etkisinin olmadığı görülmektedir. Şekil 88b'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 karbonmonoksit değerleri verilmiştir. Kavis etkisi nedeniyle, tüm hatlarda karbonmonoksit 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 88. R=1900 m’de 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 89’da iki şeritli 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde çalışan tek fanın 950 N itme kuvveti kuvvetinde tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan ve kavis etkisiyle karbonmonoksit değerleri tünel en kesitinin dış bükey tarafında yüksek, diğer bölgelerinde ise daha düşük olmaktadır.  $x=150$  m’de, fan ve kavis etkisiyle yaya seviyesinin iç bükey tarafındaki tünel duvarına yakın bölge hariç en kesitin büyük bölümünde karbonmonoksit değerleri azalmaktadır.



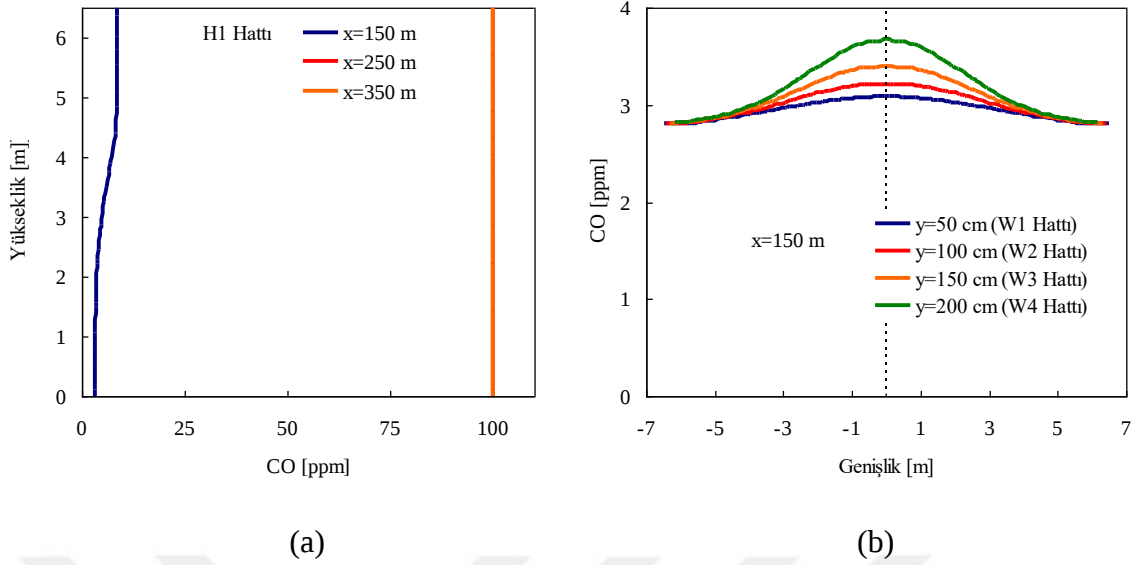
Şekil 89. 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde çalışan 950 N itme kuvveti kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

### 3.2.5. Taşıtsız Fanlı ve Difüzörlü Düz Tünel

Fanlı tünel çalışmalarında, fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısı etkisi ise, 500 metre uzunluğundaki iki şeritli düz tünelde tek fan durumunda ve 950 N fan itki kuvvetinde, difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerleri için sayısal olarak çözülmüştür. Fan itme kuvvetinin 950 N itme kuvveti değerlerinde zaman adımı 1 dk alınarak 60 dk süresinde çözümler gerçekleştirilmiştir. Tünel içerisindeki Karbonmonoksit değerleri çözüm sürelerinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

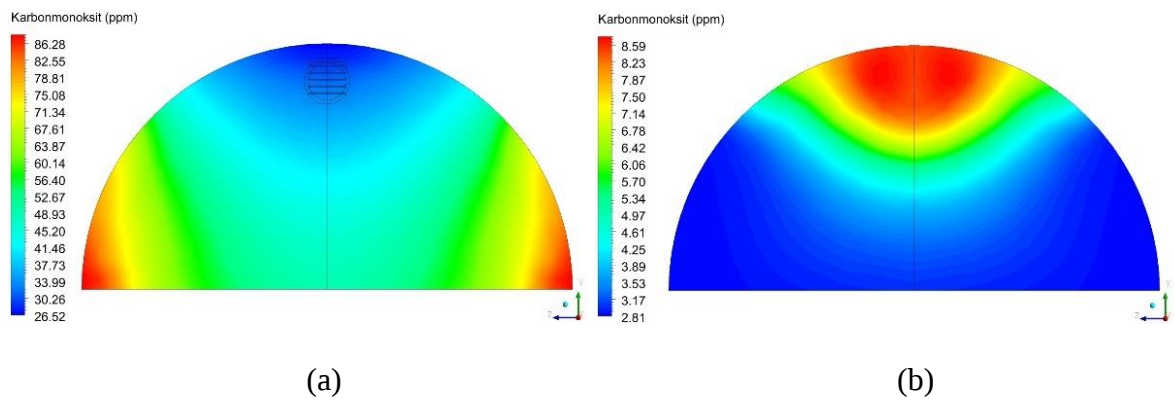
Taşıtsız fanlı ve difüzörlü düz tünelde, karbonmonoksit dağılımlarının zamana göre değişimlerinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen zaman bağımlı çözümlerde, kirliliğin en üst düzeye ulaştığı kritik düzey başlangıç durumundaki karbonmonoksit seviyesi olarak 100 ppm şeklinde dikkate alınmıştır.

Şekil 90a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan  $10^\circ$  difüzör kanat açısına sahip difüzörlü tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyesinin 60 dakika sonunda difüzör etkisiyle yaklaşık 5,5 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe  $x=250$  m'de tamamen sona ermektedir. Şekil 90b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan  $10^\circ$  difüzör kanat açısının sahip difüzörlü 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 difüzör etkisiyle artan karbonmonoksit değerleri, W4 hattında en büyük olmaktadır.



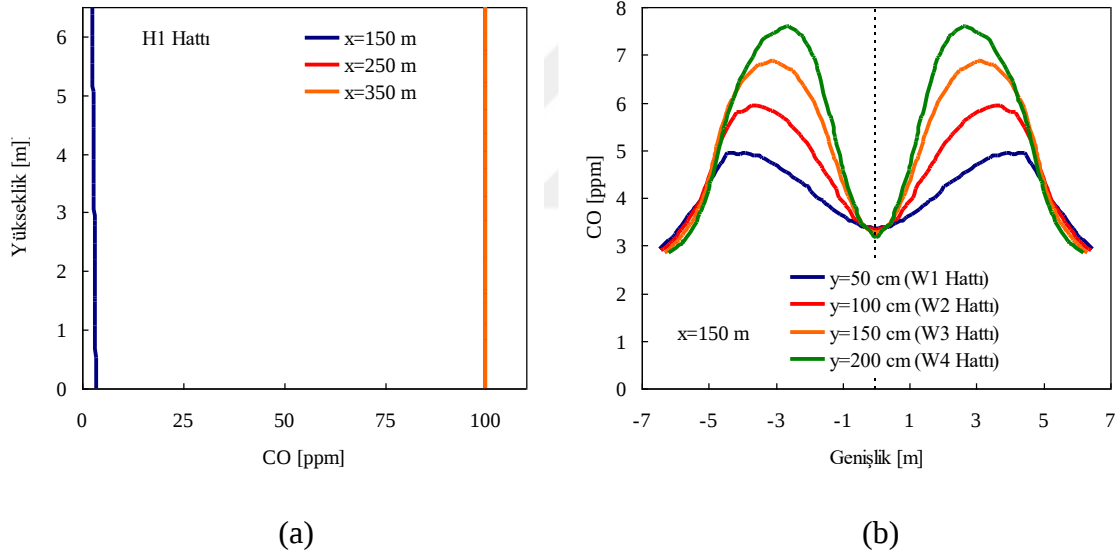
Şekil 90. 10° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 91’de iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 10° difüzör kanat açısının sahip difüzörlü tek fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbonmonoksit değerleri tünel orta bölgesinde düşük, tünel köşelerinde ise yüksek olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, difüzör etkisiyle fan civarında karbonmonoksit değerleri artmaktadır.



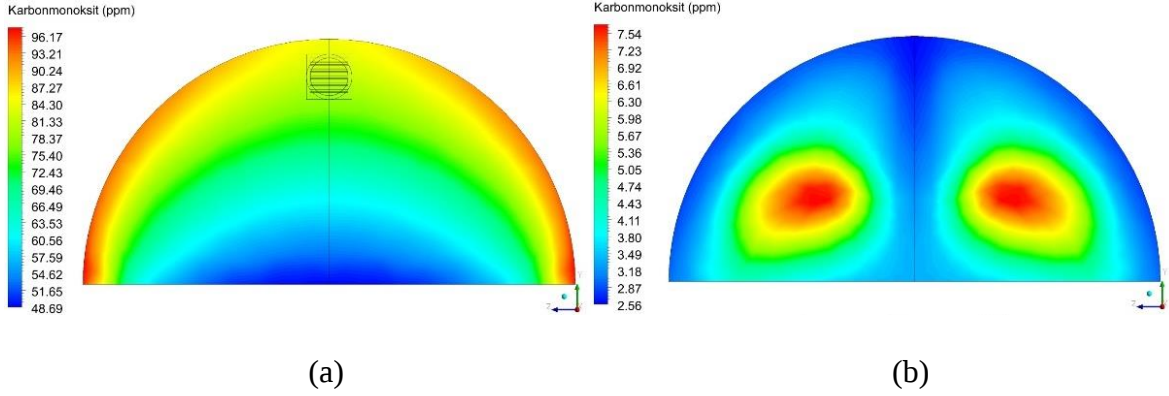
Şekil 91. 10° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

Şekil 92a’da, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 20° difüzör kanat açısına sahip difüzörlü tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyesinin 60 dakika sonunda difüzör etkisiyle yaklaşık 3 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe  $x=250$  m’de tamamen sona etmektedir. Şekil 92b’de, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 20° difüzör kanat açısının sahip 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. Difüzör etkisiyle, tünelin orta bölgesinde düşük olan karbonmonoksit değerleri, W4 hattında en büyük olmak üzere tüm hatlarda şerit bölgelerinde artmaktadır.



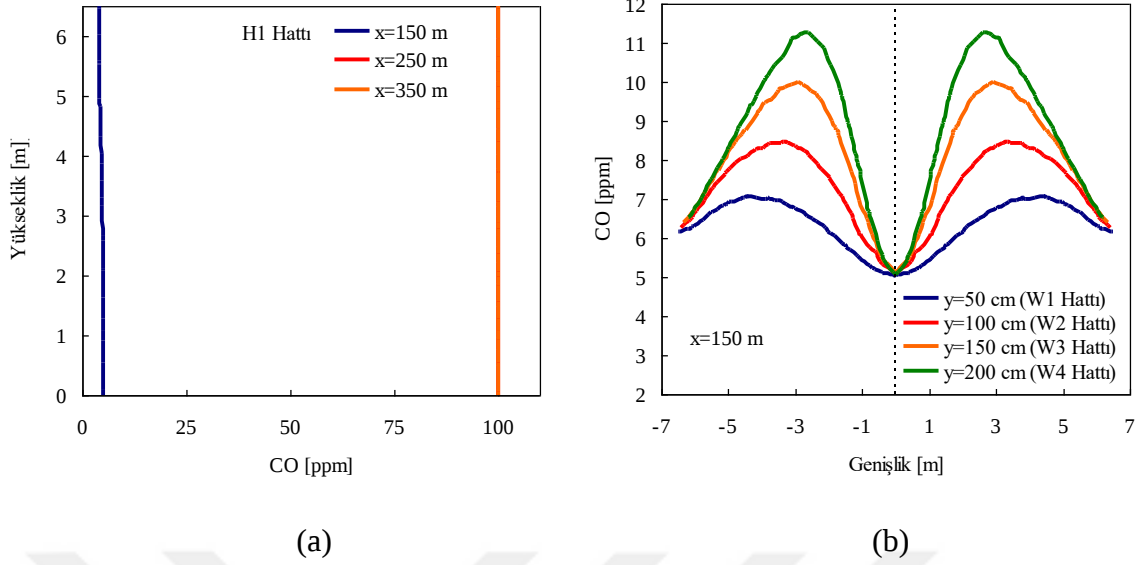
Şekil 92. 20° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 93’de iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 20° difüzör kanat açısının sahip difüzörlü tek fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbonmonoksit değerleri tünelin tüm duvar hattı boyunca yüksek olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, difüzör etkisiyle tünelin orta bölgesinde düşük olan karbonmonoksit değerleri, bu bölgenin her iki yanında büyük olmaktadır.



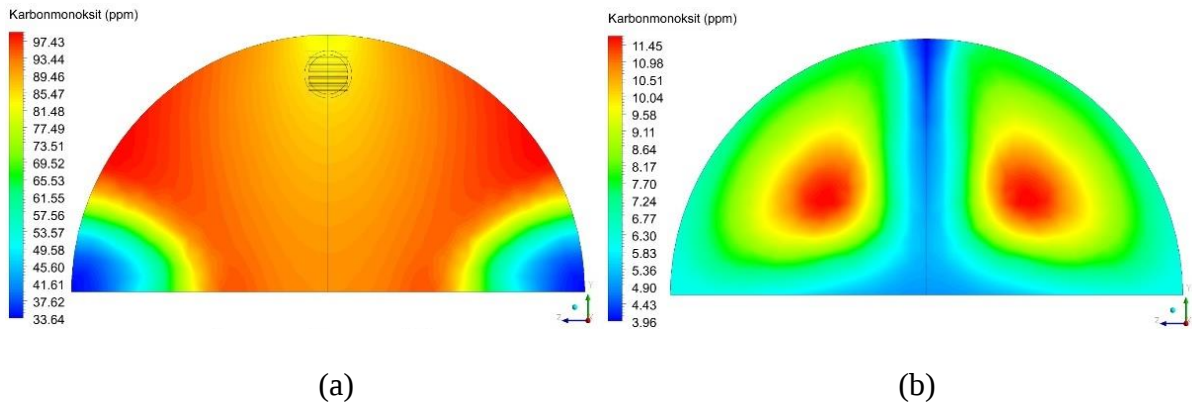
Şekil 93. 20° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları  
(a) x=50 m (b) x=150 m

Şekil 94a’da, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 30° difüzör kanat açısına sahip difüzörlü tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki x=150 m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyesinin 60 dakika sonunda difüzör etkisiyle yaklaşık 4 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe x=250 m’de tamamen sona etmektedir. Şekil 94b’de, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 20° difüzör kanat açısının sahip 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. Difüzör etkisiyle, tünelin orta bölgesinde düşük olan karbonmonoksit değerleri, W4 hattında en büyük olmak üzere tüm hatlarda şerit bölgelerinde artmaktadır.



Şekil 94. 30° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 95’de iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 30° difüzör kanat açısının sahip difüzörlü tek fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbonmonoksit değerleri tünel köşe bölgeleri hariç yüksek olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, difüzör etkisiyle tünelin orta bölgesinde düşük olan karbonmonoksit değerleri, bu bölgenin her iki yanında büyük olmaktadır.



Şekil 95. 30° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbonmonoksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

### 3.3. Tünel İçerisinde Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) Dağılımları

Tünel içerisindeki karbondioksit dağılımları, taşıtlı düz tünel, taşıtlı kavisli tünel, taşıtsız fanlı düz tünel, taşıtsız fanlı kavisli tünel, taşıtsız fanlı ve difüzörlü düz tünel alt başlıklarına göre düzenlenmiştir. Karbondioksit dağılımları, tünel boyunca farklı istasyonlarda tünel içerisinde tanımlanmış yatay ve düşey hatlarda çizgisel değişimler ve tünel eni kesitlerindeki dağılım görüntüleri şeklinde verilmiştir.

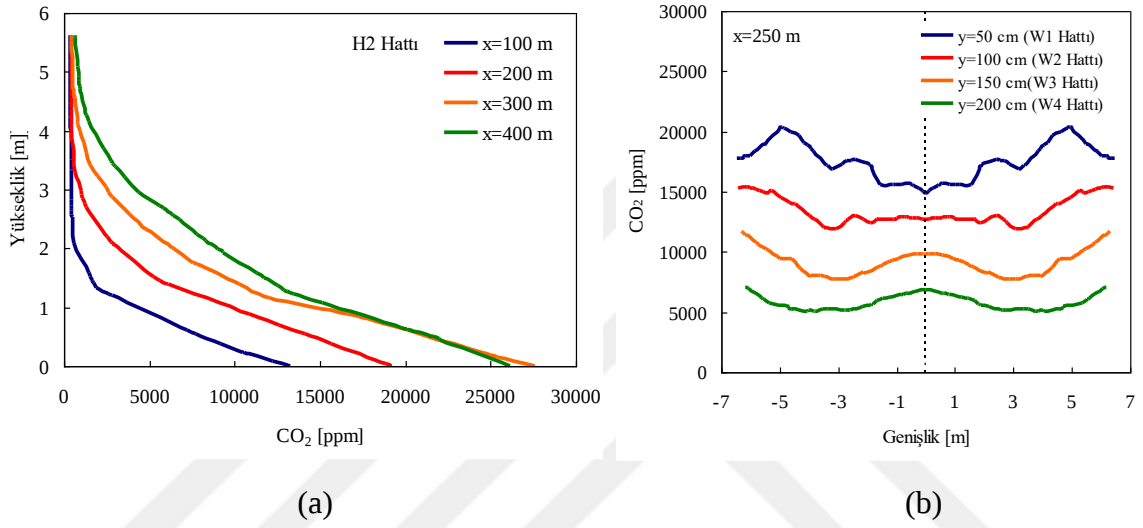
#### 3.3.1. Taşıtlı Düz Tünel

Taşıtlı düz tünelde, 500 m uzunluğundaki iki şeritli düz tünelin içerisine sırasıyla 80 adet, 50 adet, 34 adet, 26 adet ve 20 adet taşıt yerleştirilmiş ve taşıt sayısı ters orantılı 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat şeklinde taşıt hızı değerleri elde edilmiştir. Tünel içerisine yerleştirilen araçların aralarındaki mesafe taşıt hızının yarısı olarak takip mesafesi şeklinde dikkate alınmıştır. Böylece, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat taşıt hızlarında takip mesafeleri sırasıyla 15 m, 25 m, 35 m ve 45 m şeklinde oluşmuştur. 80 adet taşıt, taşıt hareketinin olmadığı kritik durum olarak tanımlanmıştır. Kritik durumda iki taşıt arası mesafe 8 m olarak gerçekleşmiştir.

Taşıtlı hızı değerleri, sayısal çalışmalara “m/s” biriminde yansıtılmıştır. Kritik durumu temsil eden 0 km/saat hız değerine karşılık doğal havalandırma durumundaki hız değeri olan 2 m/s kullanılmıştır. 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerine karşılık ise sırasıyla 8.3 m/s, 13.9 m/s, 19.4 m/s ve 25 m/s hız değerleri kullanılmıştır. Taşıtlı hareketinin olmadığı 0 km/saat durağan hız durumunda zaman adımı 1 dakika alınarak 60 dakikalık çözüm elde edilmiştir. Taşıtlı hızının 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde ise zaman adımı 0.5 s alınarak sırasıyla 60 s, 36 s, 26 s ve 20 s sürelerle çözümler gerçekleştirilmiştir. Tünel içerisindeki karbondioksit değerleri çözüm sürelerinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

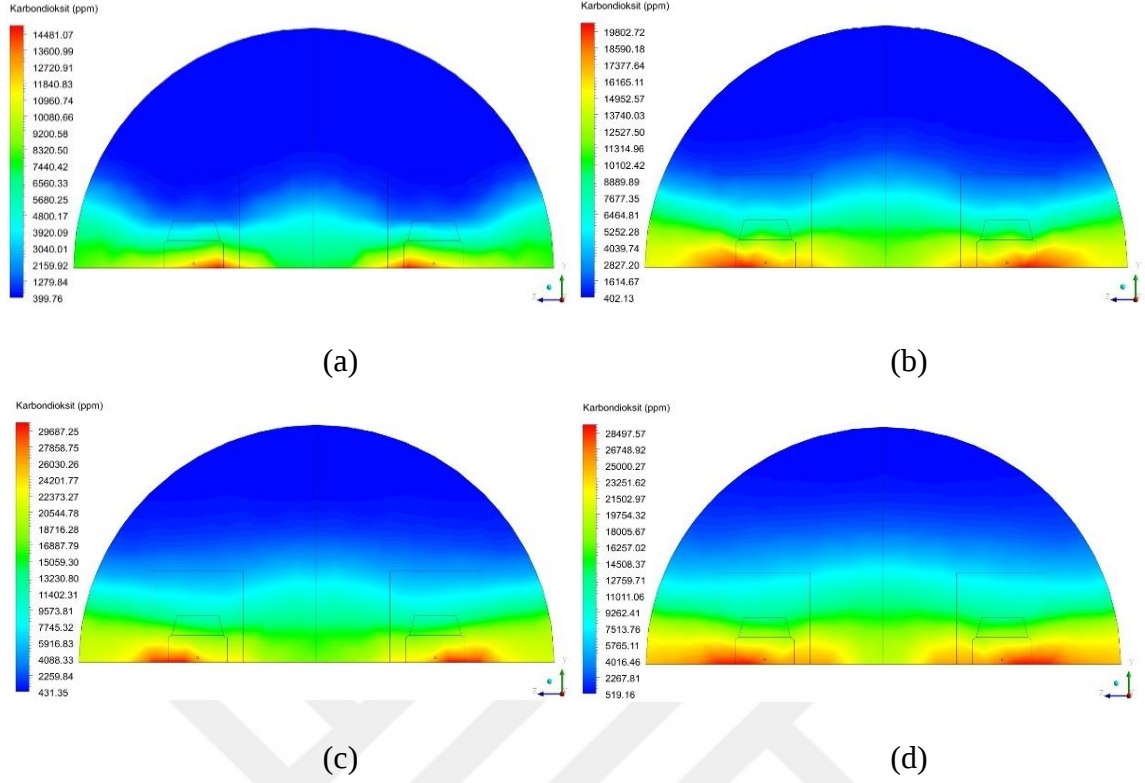
Şekil 96a’da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıtlı hareketinin olmadığı 0 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H<sub>2</sub> hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbondioksit değerleri, y=2 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 96b’de, iki

şeritli düz tünel içerisinde taşıt hareketinin olmadığı 0 km/saat hızda  $x=250$  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. Taşıt arkasına karşılık gelen konumlarda  $y=50$  cm yüksekliğindeki W1 hattında en yüksek olan karbondioksit değerleri yükseklik arttıkça azalmakta ve  $y=200$  cm yüksekliğindeki W4 hattında en düşük olmaktadır.



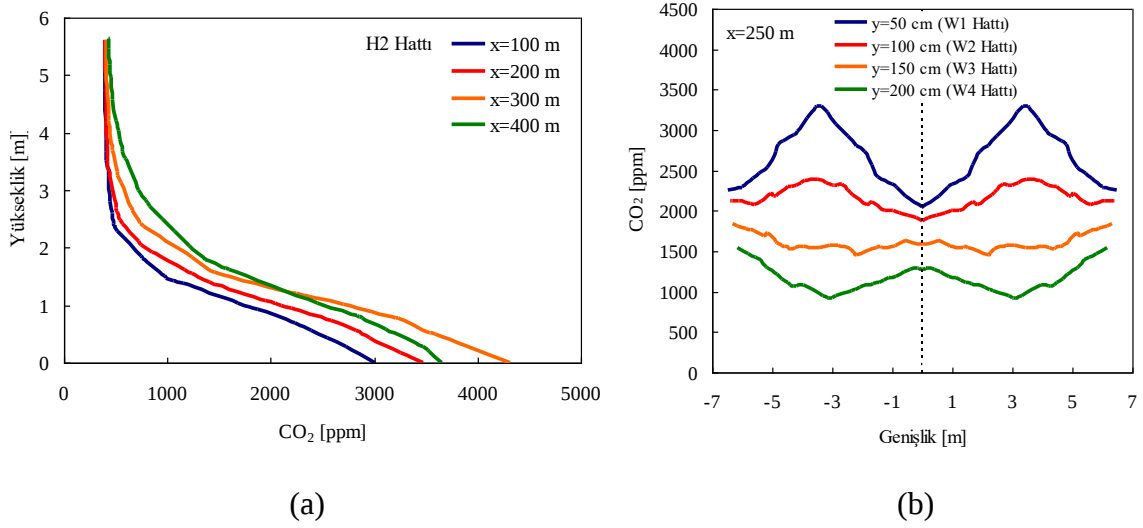
Şekil 96. 0 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit profilleri  
(a) H2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 97'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hareketinin olmadığı 0 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 çıkış etkisiyle  $x=300$  m'deki değerlerden daha düşük olmaktadır.



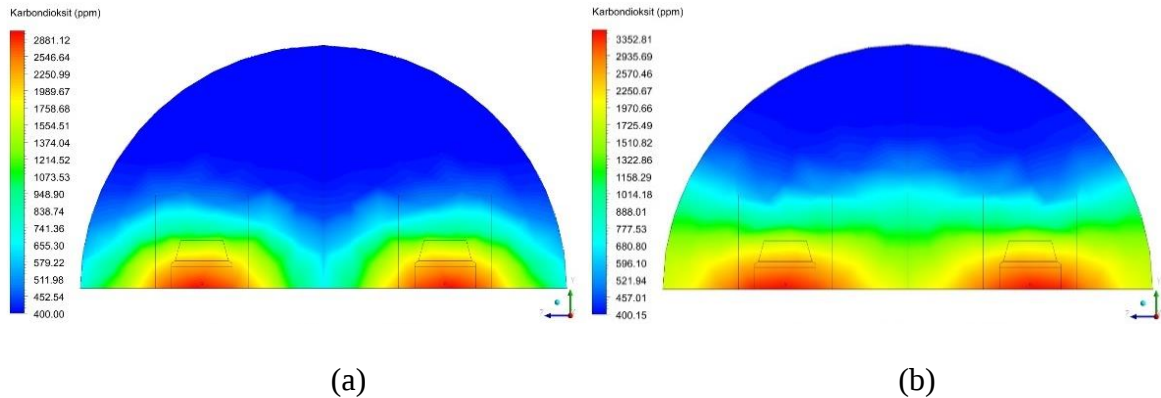
Şekil 97. 0 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları  
(a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m

Şekil 98a’da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 30 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbondioksit değerleri,  $y=2,5$  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 98b’de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 30 km/saat hızında  $x=250$  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. Taşıt arkasına karşılık gelen konumlarda W1 ve W2 hatlarında yüksek olan karbondioksit değerleri yükseklik arttıkça azalmakta ve  $y=200$  cm yüksekliğindeki W4 hattında en düşük olmaktadır.



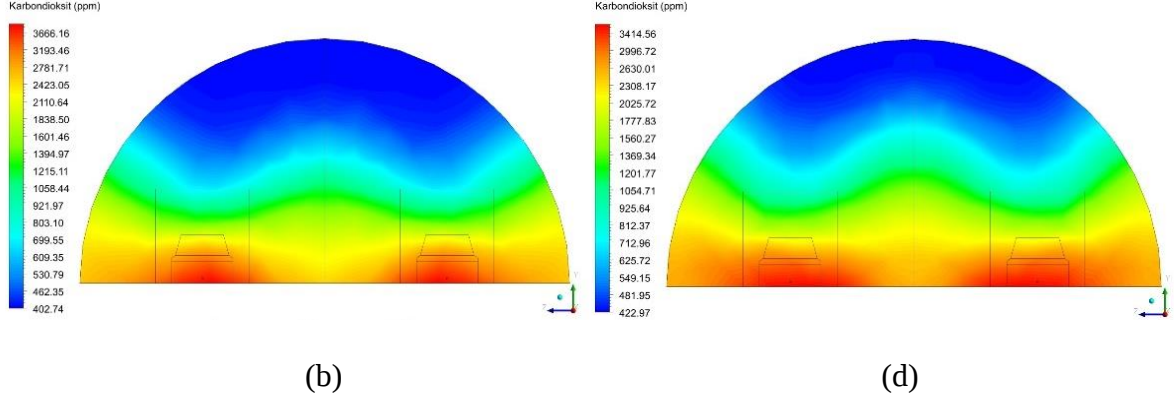
Şekil 98. 30 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit profilleri  
(a) H2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 99’da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 30 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 taşıt hızının etkisiyle 0 km/saat hızdaki duruma göre daha geniş olduğu görülmektedir. Taşıtların egzoz bölgelerinde en kritik değerlere ulaşan karbondioksit düzeyleri tünel içerisinde ilerledikçe artmakta,  $x=400$  m’de tünel çıkış etkisiyle  $x=300$  m’deki değerlerden daha düşük olmaktadır.

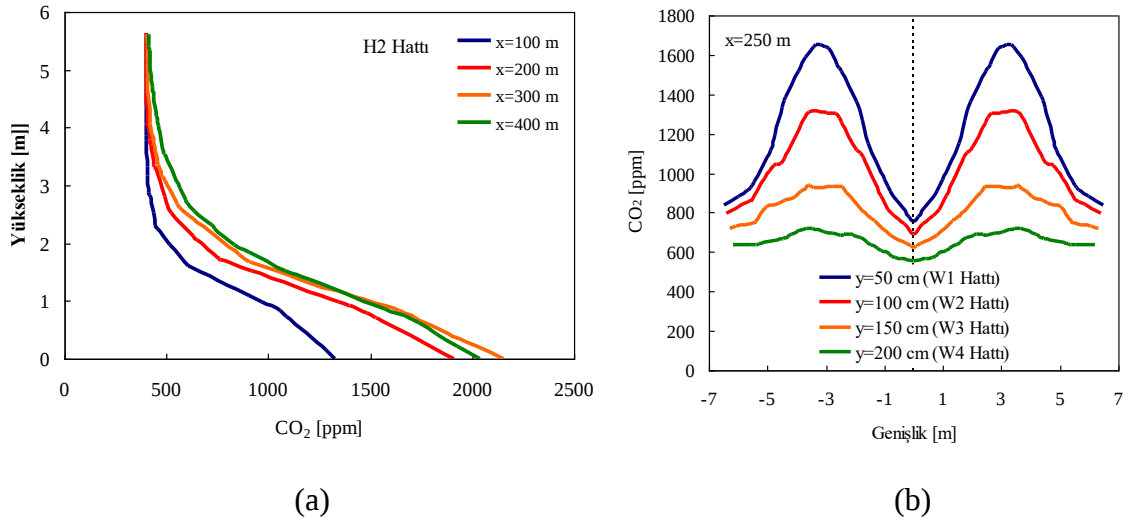


Şekil 99. 30 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

Şekil 99'un Devamı

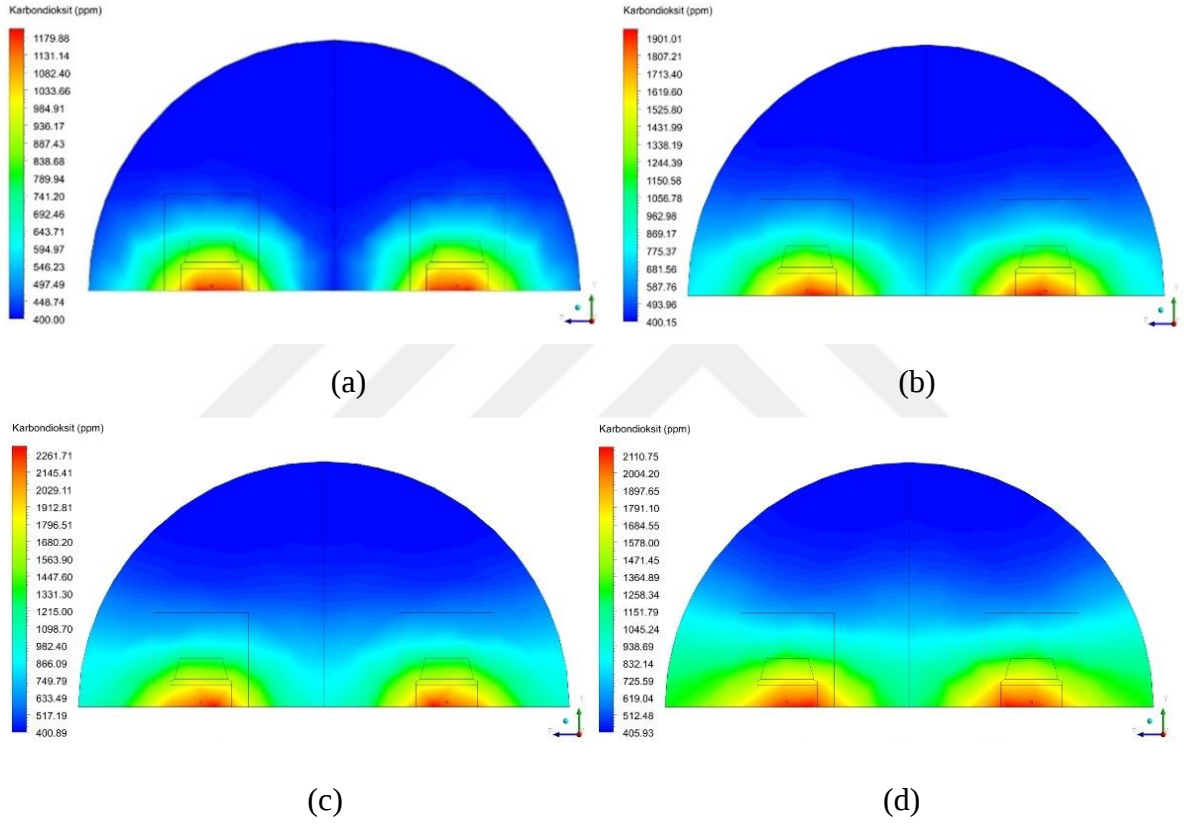


Şekil 100a'da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 50 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbondioksit değerleri,  $y=3$  m 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 100b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 50 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 100. 50 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit profilleri  
 (a) H2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

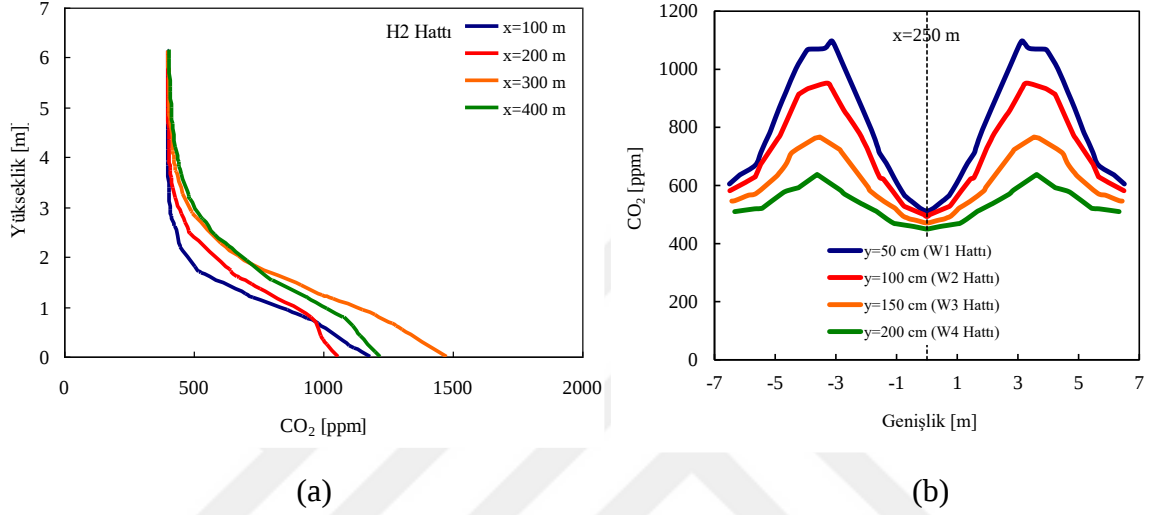
Şekil 101’de iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 50 km/saat değerinde tünel boyunca sırasıyla  $x=100$  m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe taşıt sayısının artmasıyla tünel en kesitlerindeki karbondioksit 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 çıkış etkisiyle  $x=300$  m’deki değerlerden daha düşük olmaktadır.



Şekil 101. 50 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları  
(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

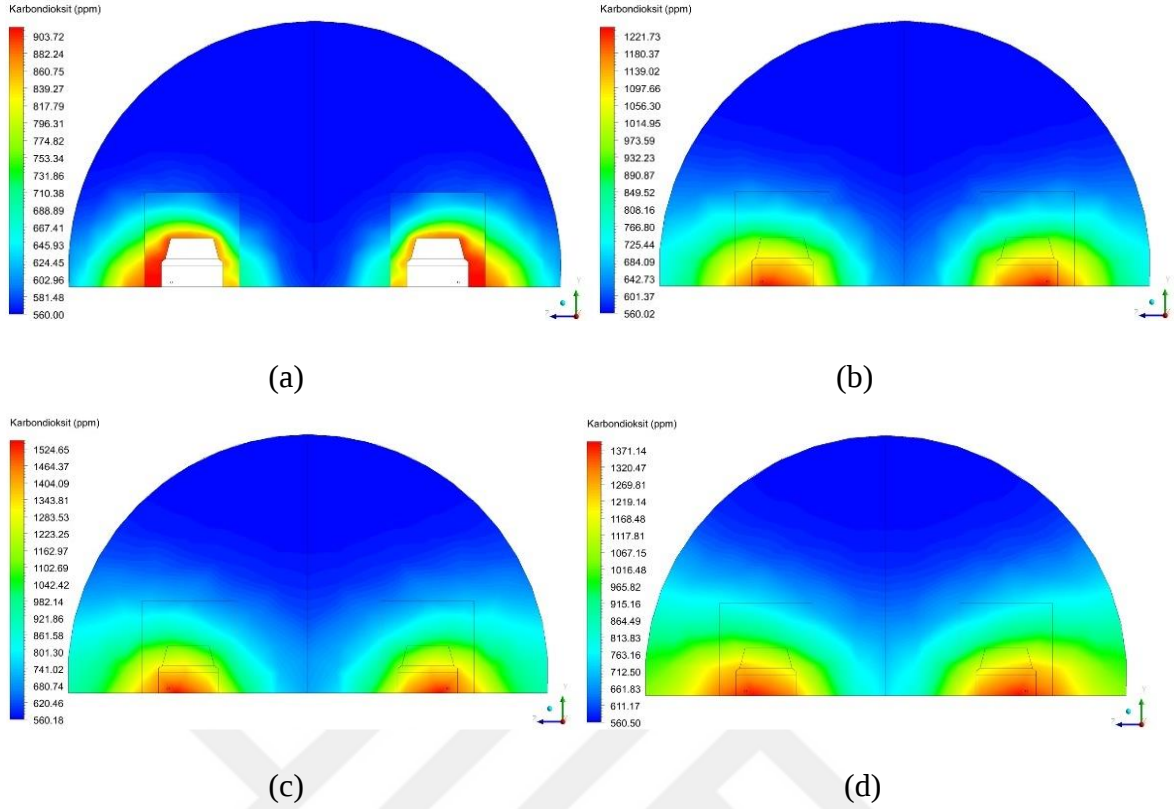
Şekil 102a’da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbondioksit değerleri,  $y=3$  m 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 102b’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.



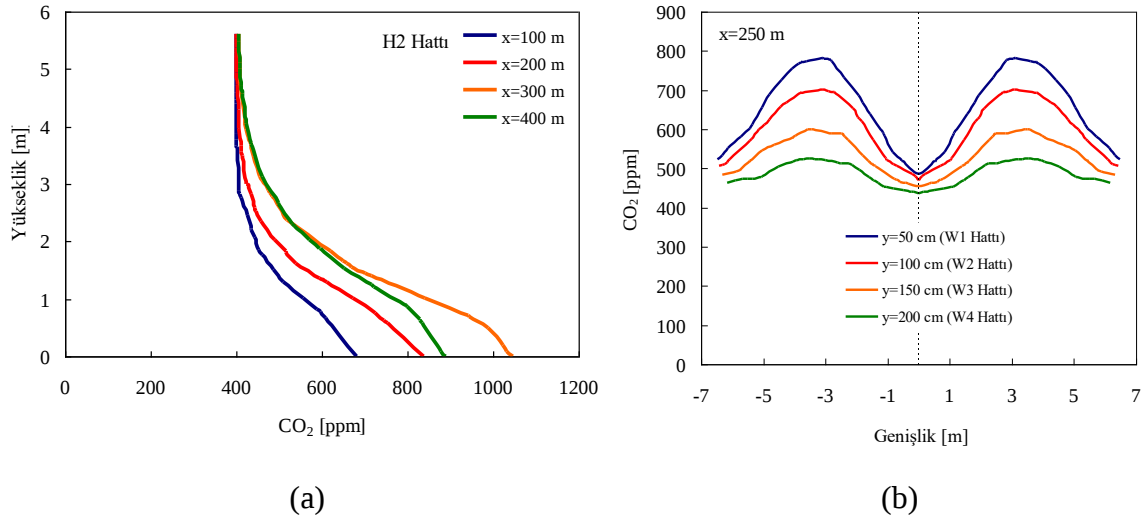
Şekil 102. 70 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit profilleri  
(a) H2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 103’de 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 çıkış etkisiyle  $x=300$  m’deki değerlerden daha düşük olmaktadır.



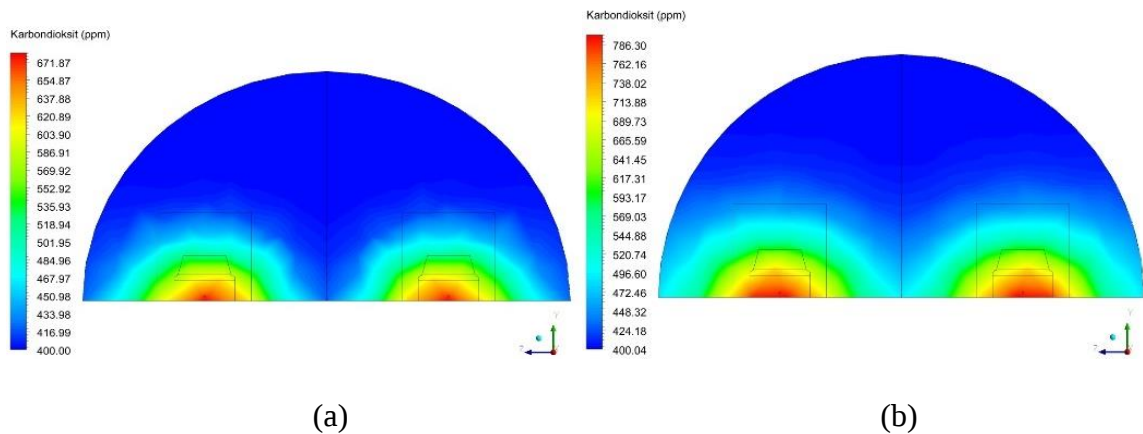
Şekil 103. 70 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları  
(a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m

Şekil 104a'da iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 90 km/saat değerinde tünel boyunca 100 m, 200 m, 300 m ve 400 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Tünel tabanında en yüksek düzeyine ulaşan karbondioksit değerleri,  $y=3,5$  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 104b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 90 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.



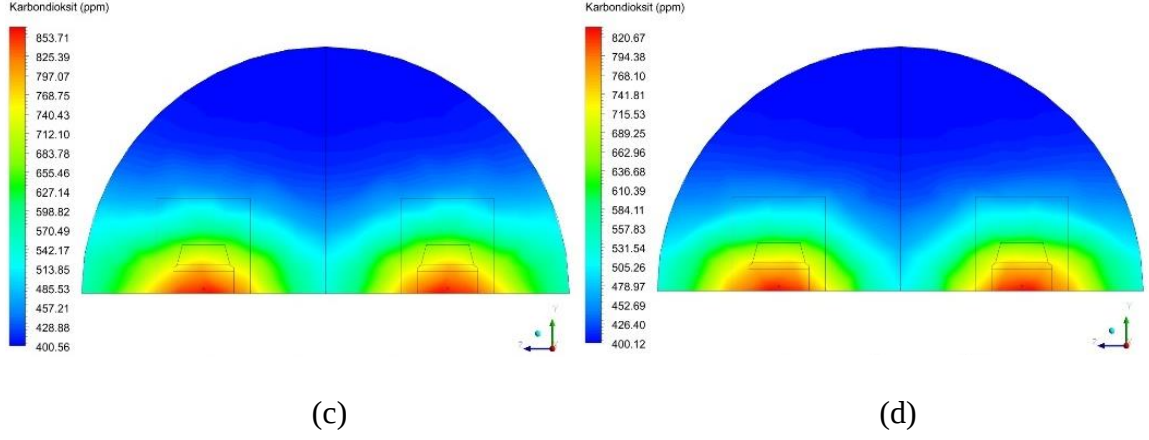
Şekil 104. 90 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit profilleri  
(a) H2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 105’de iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hareketinin olmadığı 90 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 çıkış etkisiyle x=300 m’deki değerlerden daha düşük olmaktadır.



Şekil 105. 90 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları  
(a) x=100 m (b) x=200 m (c) x=300 m (d) x=400 m

Şekil 105'in devamı



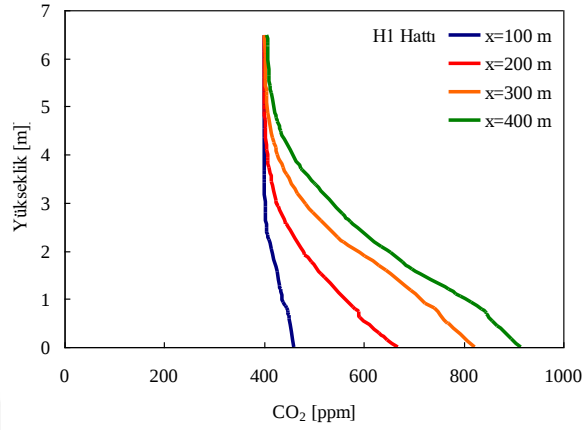
### 3.3.2. Taşıtlı Kavisli Tünel

Tünel içerisindeki karbondioksit dağılımları, 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçaları iki farklı kavise sahip iki şeritli tüneller olarak dikkate alınmış ve bu tüneller içindeki üç boyutlu akış alanları taşıt hızının 70 km/saat (taşıt sayısının 26 değeri için) değeri için sayısal olarak çözülmüştür.

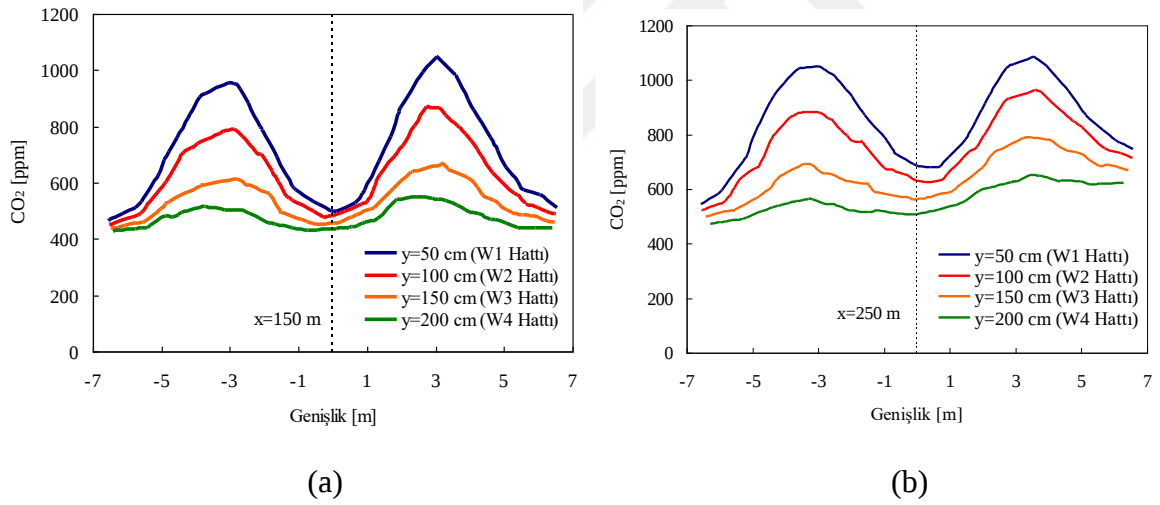
Taşıt hızı değeri, sayısal çalışmalara “m/s” biriminde yansıtılmıştır. Tüm kavisli tünel çalışmalarında, 70 km/saat değerlerine karşılık 19.4 m/s hız değerleri kullanılmıştır. Taşıt hızının 70 km/saat değerlerinde zaman adımı 0.5 s alınarak sırasıyla 26 s süresinde çözümler gerçekleştirilmiştir. Tünel içerisindeki karbondioksit değerleri çözüm sürelerinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

Şekil 106’da 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 hatlarında 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 107’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 107a). Tünel boyunca ilerledikçe kavis etkisiyle iç bükey taraftaki karbondioksit değerlerindeki artış daha belirgin olmaktadır (Şekil 107b, c).

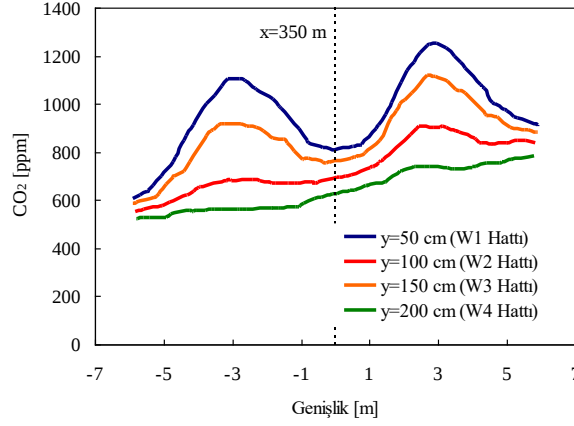


Şekil 106. R=950 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hatlarındaki karbondioksit profilleri



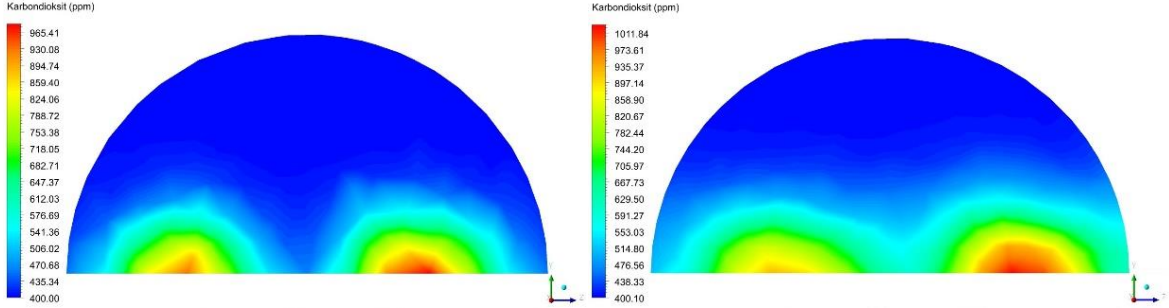
Şekil 107. R=950 m'de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit profilleri  
(a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m

Şekil 107'nin devamı



(c)

Şekil 108'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.



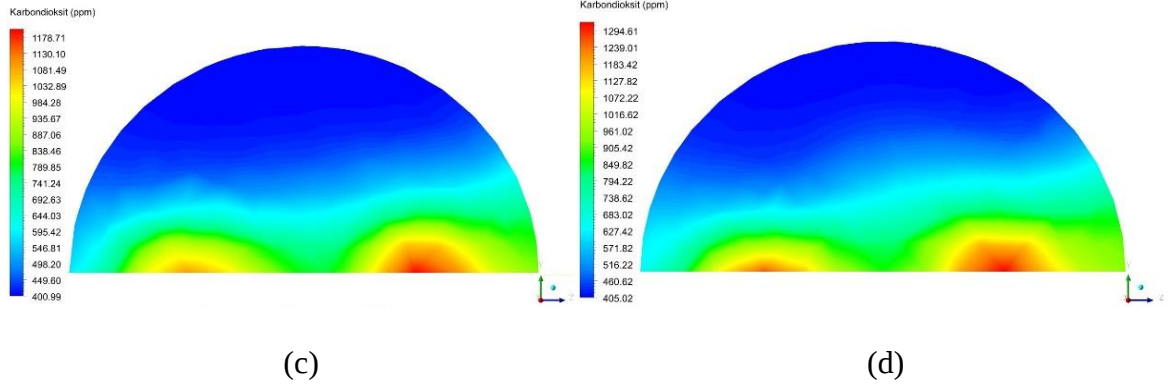
(a)

(b)

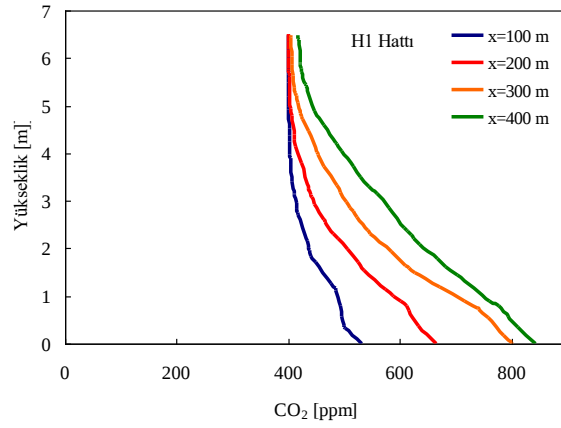
Şekil 108. 950 m yarıçapa sahip kavisli tünelde 70 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları

(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

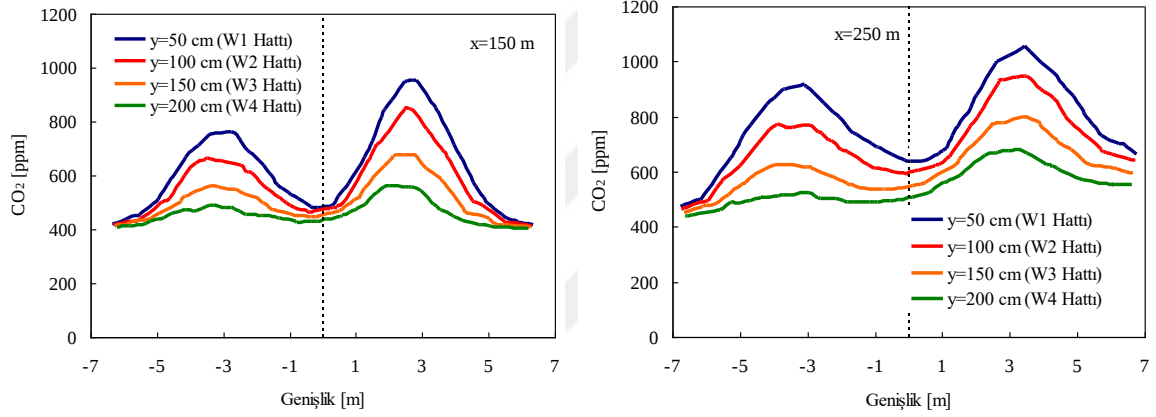
Şekil 108'in devamı



Şekil 109'da 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 hatlarında 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 110'da, 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 110a). Tünel boyunca ilerledikçe kavis etkisiyle iç bükey taraftaki karbondioksit değerlerindeki artış daha belirgin olmaktadır (Şekil 110b, c).

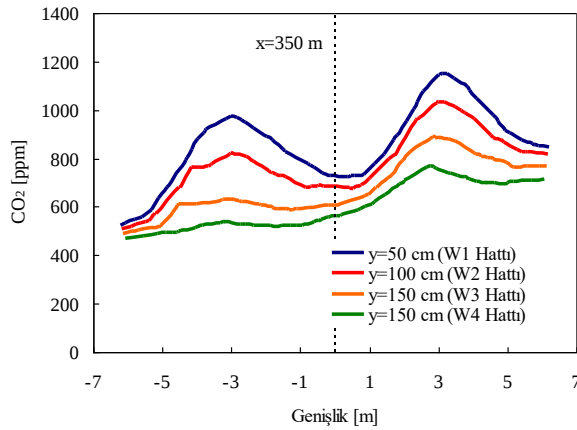


Şekil 109. R=1900 m’de ve 70 km/saat taşıt hızında H1 hatlarındaki karbondioksit profilleri



(a)

(b)

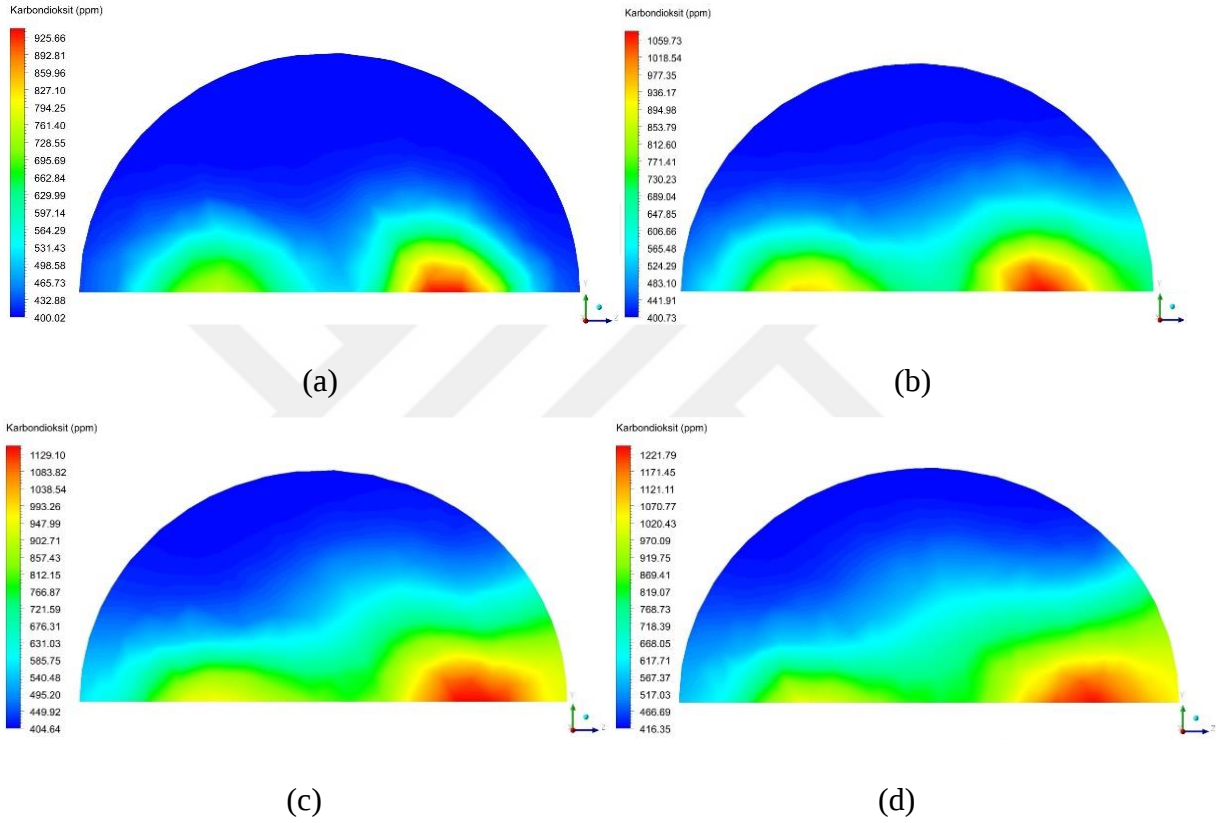


(c)

Şekil 110. R=1900 m’de ve 70 km/saat taşıt hızında W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit profilleri

(a) x=150 m (b) x=250 m (c) x=350 m

Şekil 111’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 111. 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünelde 70 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları

(a)  $x=100$  m (b)  $x=200$  m (c)  $x=300$  m (d)  $x=400$  m

### 3.3.3. Taşıtsız Fanlı Düz Tünel

Taşıtsız fanlı tünellerde, tünel içerisine yerleştirilmiş fan durumunda, fan itme kuvvetinin, tünel kavis durumunun, fan sayısının ve fana eklenmiş difüzör durumunda difüzör kanat açısının tünel içerisindeki karbonmonoksit ve karbondioksit düzeylerine etkisi incelenmiştir.

Tünel içerisinde taşıtların olmadığı fanlı durumda, ilk önce tek fanlı iki şeritli düz tünelde fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde sayısal çözümler

gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, karayolları tünellerindeki fanlarda yaygın kullanılan itme kuvveti değeri olan 950 N için 950 m ve 1900 m yarıçap değerleri ile temsil edilen iki şeritli tek fanlı kavisli tünellerdeki akış alanları sayısal olarak incelenmiştir. Fan sayısı etkisi, iki şeritli düz tünelde 950 N fan itme kuvveti değerinde tek fanlı, özdeş iki fanlı ve özdeş üç fanlı durumlar için incelenmiştir. Fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısı etkisi ise, iki şeritli düz tünelde tek fan durumunda ve 950 N fan itme kuvveti değerinde, difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerleri için incelenmiştir.

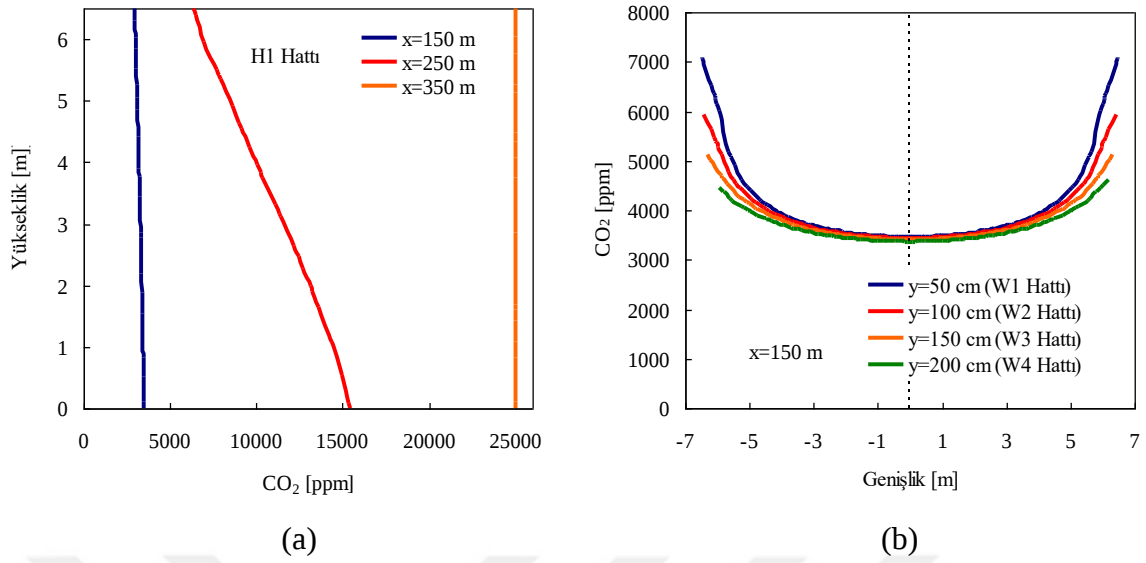
Tünel içerisinde taşıtlardan kaynaklanan karbondioksit ve karbondioksit dağılımları üzerinde fan etkisini incelemek amacıyla tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konuma fan/fanlar yerleştirilmiştir. Tünel içerisinde kirliliğin en üst değere ulaştığı kritik düzeyler başlangıç durumu olarak dikkate alınmış ve taşıtsız durumda fan itme kuvveti değerinin, tünel kavis durumunun, fan sayısının ve fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısının karbondioksit ve karbondioksit dağılımları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Taşıtsız fanlı tünellerdeki tüm sayısal çözümlerde durumda zaman adımı 1 dakika alınarak 60 dakikalık çözüm elde edilmiştir. Tünel içerisindeki karbondioksit değerleri çözüm süresinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

Taşıtsız 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.

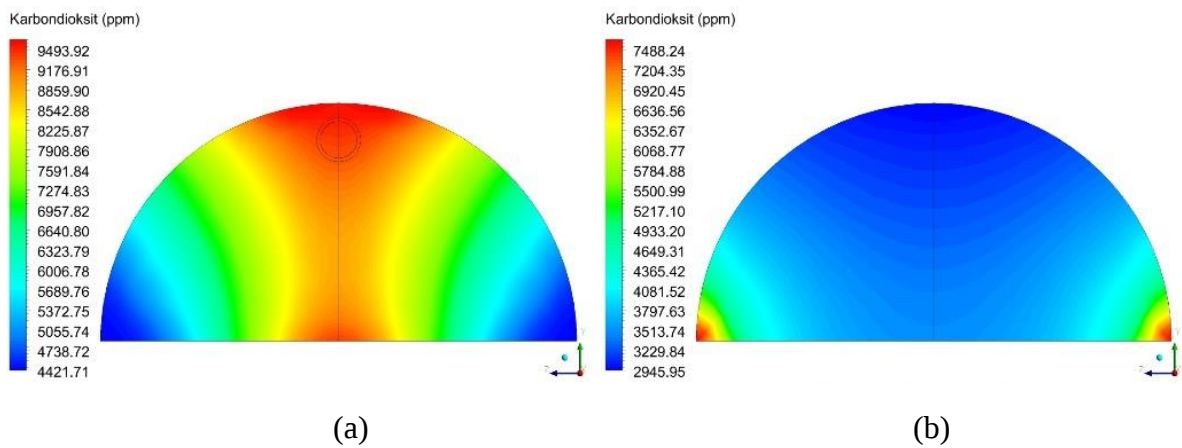
- Tek Fanlı Tünel

Şekil 112a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde 296 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında 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 3200 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe azalan düşüş etkisi,  $x=350$  m'de tamamen sona etmektedir. Şekil 112b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde 296 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.



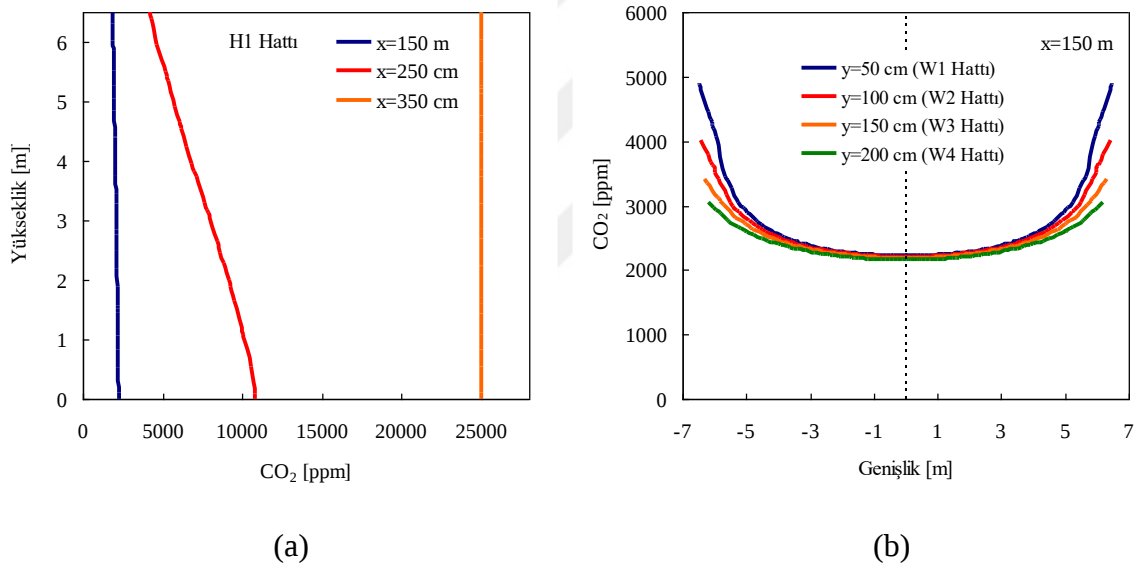
Şekil 112. 296 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 113’de iki şeritli düz tünel içerisinde 296 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve  $150$  m istasyonlarında en kesitlerde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbondioksit değerleri tünel orta bölgesinde en yüksek, tünel yan duvarları yakınında ise en düşük olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır.



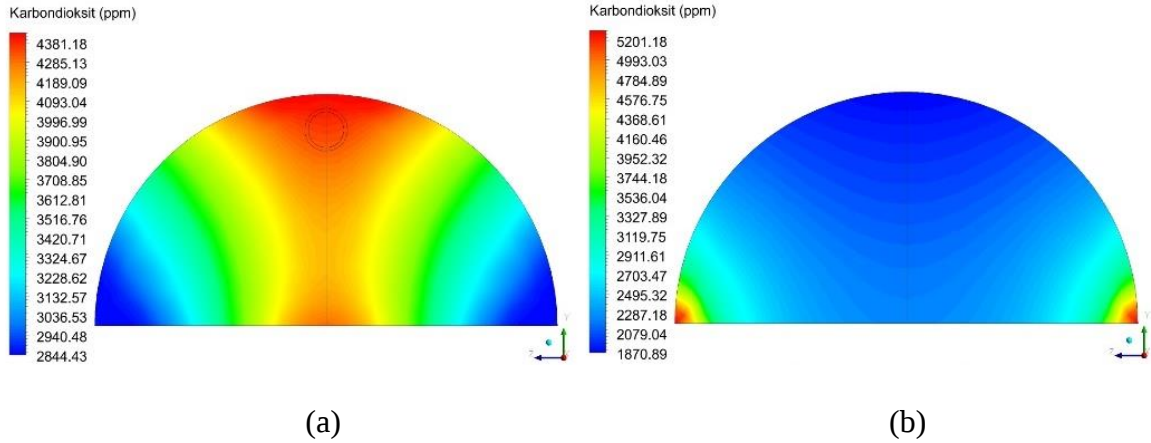
Şekil 113. 296 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbondioksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

Şekil 114a’da, iki şeritli düz tünel içerisinde 525 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında 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 2000 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe azalan düşüş etkisi,  $x=350$  m’de tamamen sona etmektedir. Şekil 114b’de, iki şeritli düz tünel içerisinde 525 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.



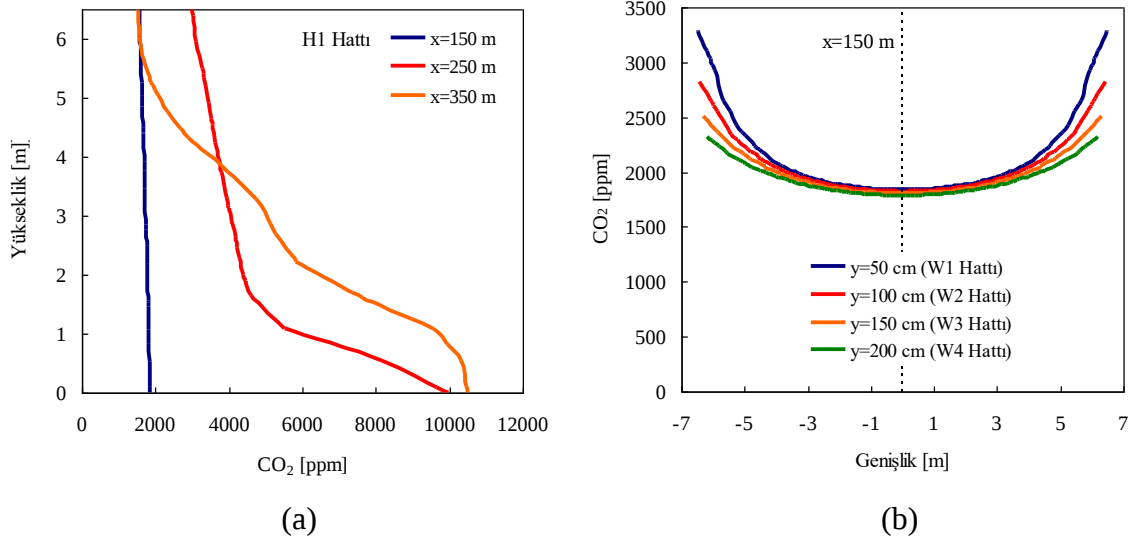
Şekil 114. 525 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 115’de iki şeritli düz tünel içerisinde 525 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 istasyonunda fanın emişinden kaynaklı karbondioksit dağılımı görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbondioksit değerleri tünel orta bölgesinde en yüksek, tünel yan duvarları yakınında ise en düşük olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır.



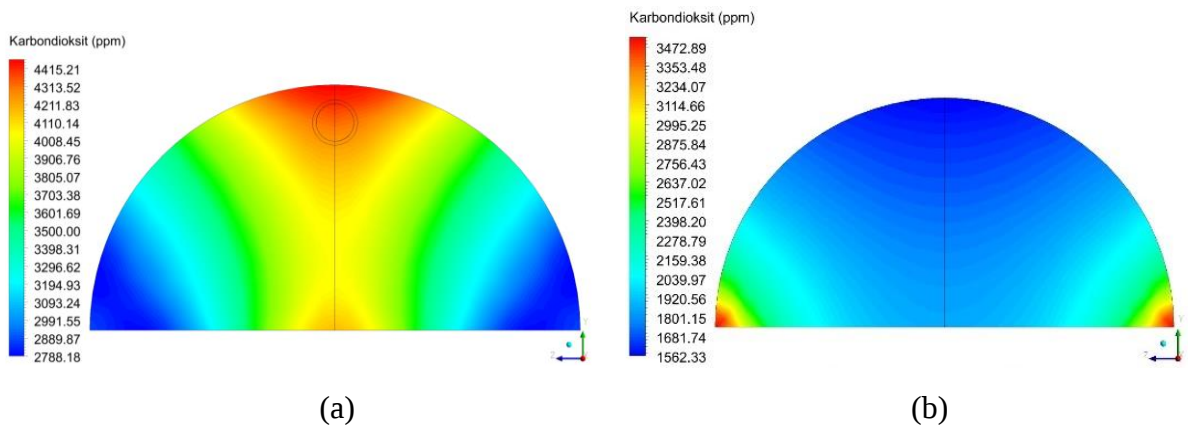
Şekil 115. 525 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbondioksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

Şekil 116a'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 hatlarında 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 116b'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.



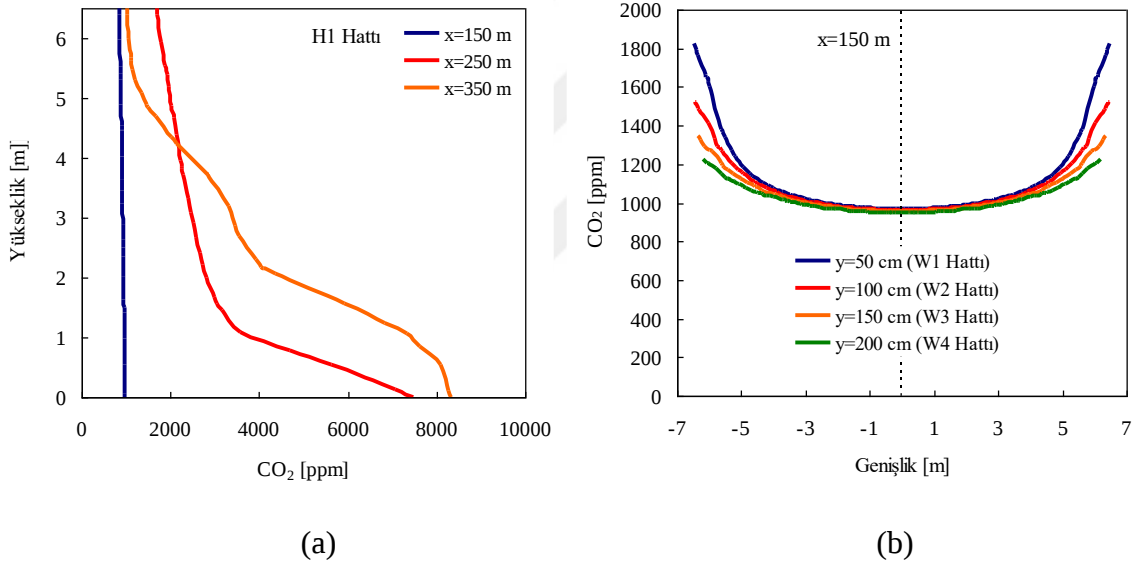
Şekil 116. 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 117’de 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.



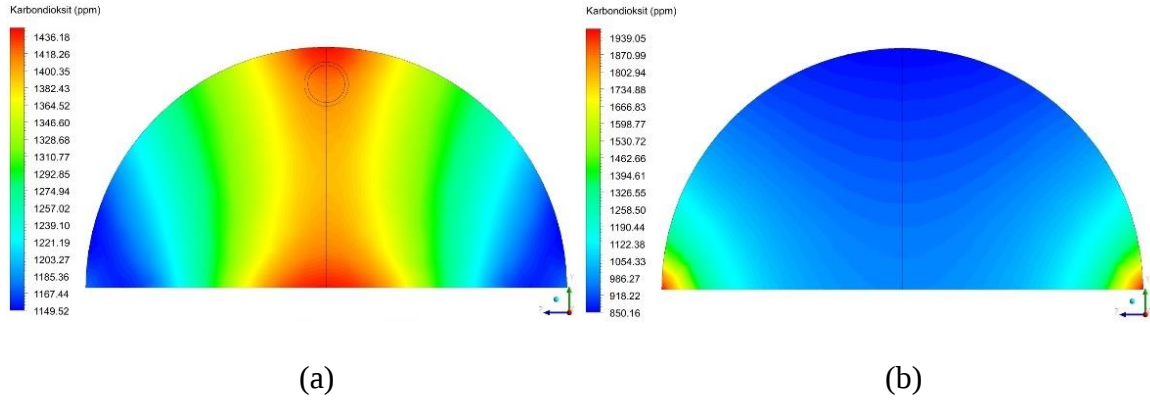
Şekil 117. 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbondioksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

Şekil 118a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde 2035 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında 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 900 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe düşüş etkisi azalmaktadır. Şekil 118b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde 2035 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 118. 2035 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

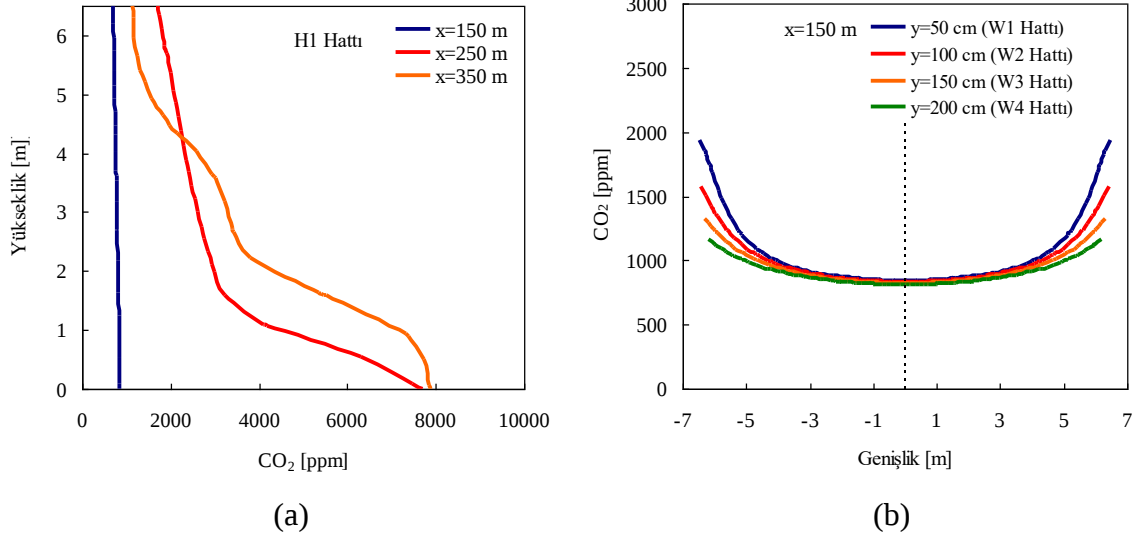
Şekil 119'da iki şeritli düz tünel içerisinde 296 N itme kuvvetinde çalışan tek fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m'deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbondioksit değerleri tünel duvar 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 119. 2035 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu karbondioksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

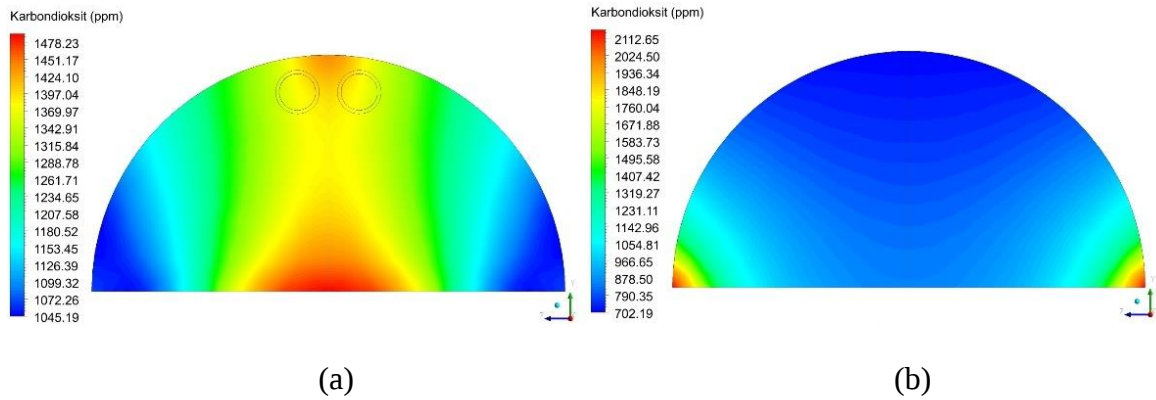
- İki Fanlı Tünel

Şekil 120a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında 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 750 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe düşüş etkisi azalmaktadır. Şekil 120b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş 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 120. 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

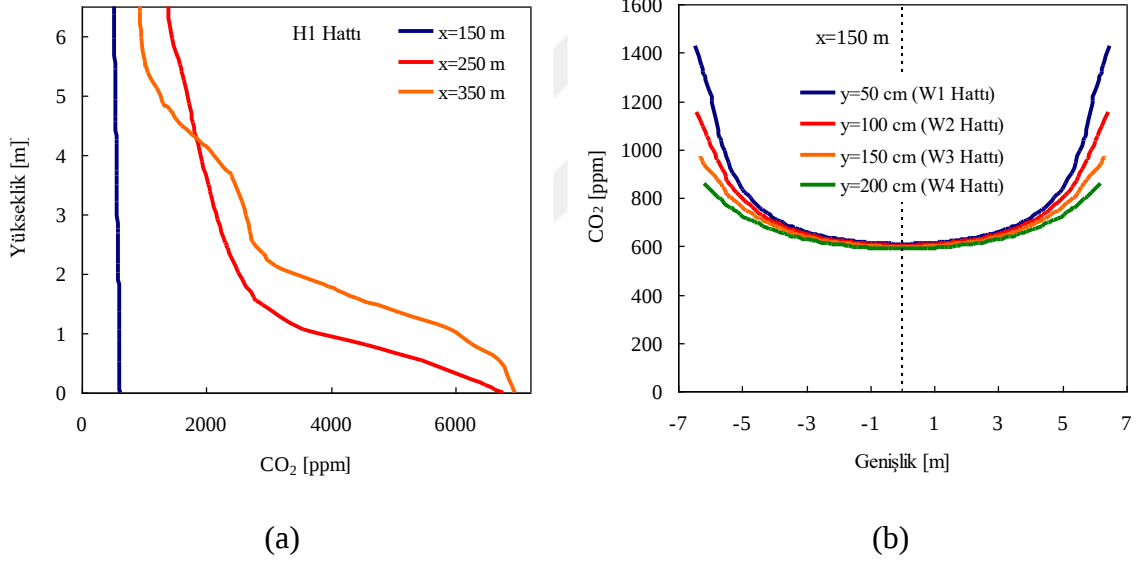
Şekil 121’de iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m’deki emme bölgesinde, fan etkisiyle karbondioksit değerleri tünel 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 121. 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş fanın oluşturduğu karbondioksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

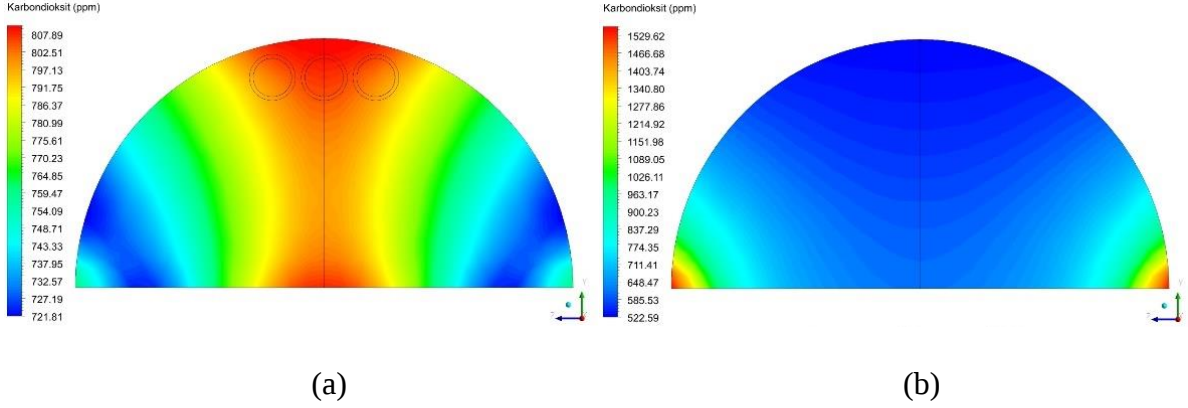
- Üç Fanlı Tünel

Şekil 122a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan üç özdeş fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında 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 550 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe düşüş etkisi azalmaktadır. Şekil 122b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş 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 122. 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 123'de iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan iki özdeş fan için tünel boyunca sırasıyla  $x=50$  m ve 150 m istasyonlarında en kesitlerinde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir.  $x=50$  m istasyonunda fanın emişinden kaynaklı karbondioksit dağılımı 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 123. 950 N itki kuvvetinde karbondioksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

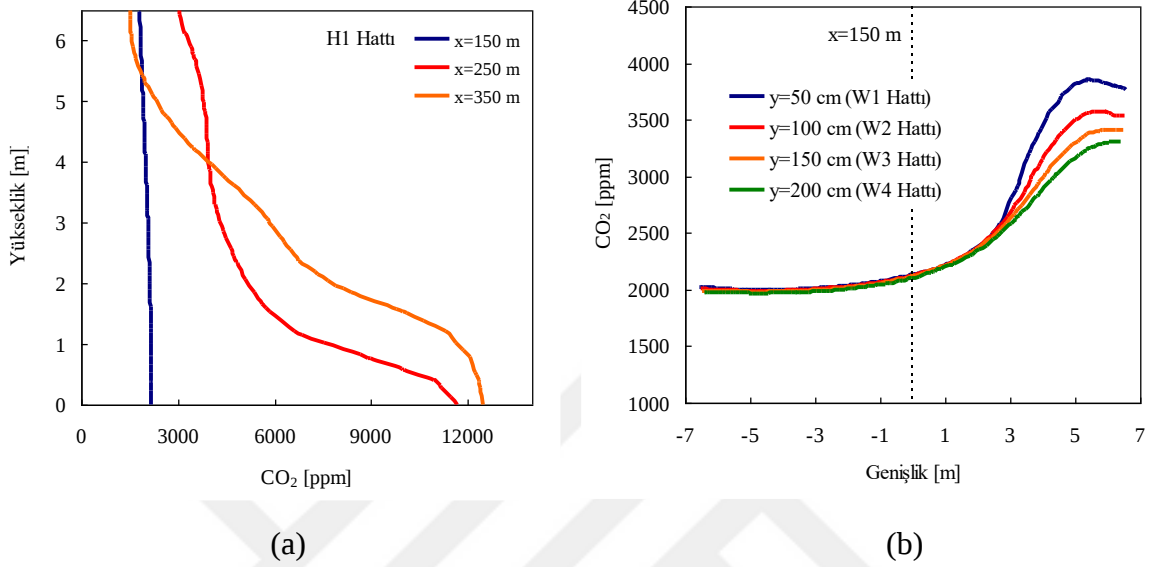
### 3.3.4. Taşıtsız Fanlı Kavisli Tünel

Tünel içerisindeki karbondioksit dağılımları, 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip iki çemberin 500 m uzunluğundaki yay parçaları iki farklı kavise sahip iki şeritli tüneller olarak dikkate alınmış ve bu tüneller içindeki üç boyutlu akış alanları fan itme kuvvetinin 950 N değeri için sayısal olarak çözülmüştür. Fan itme kuvvetinin 950 N itme kuvveti değerlerinde zaman adımı 1 dk alınarak 60 dk süresinde çözümler gerçekleştirilmiştir. Tünel içerisindeki karbondioksit değerleri çözüm sürelerinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

Taşıtsız fanlı kavisli 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.

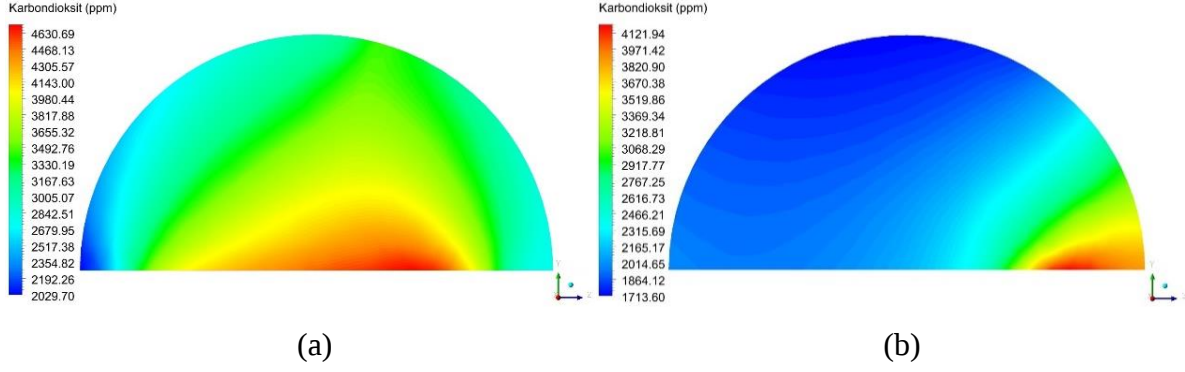
Şekil 124a'da iki şeritli 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan tek fanın oluşturduğu tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 25000 ppm olan karbondioksit seviyesinin 60 dakika sonunda yaklaşık 1900 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe düşüş etkisi azalmaktadır. Şekil 124b'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.



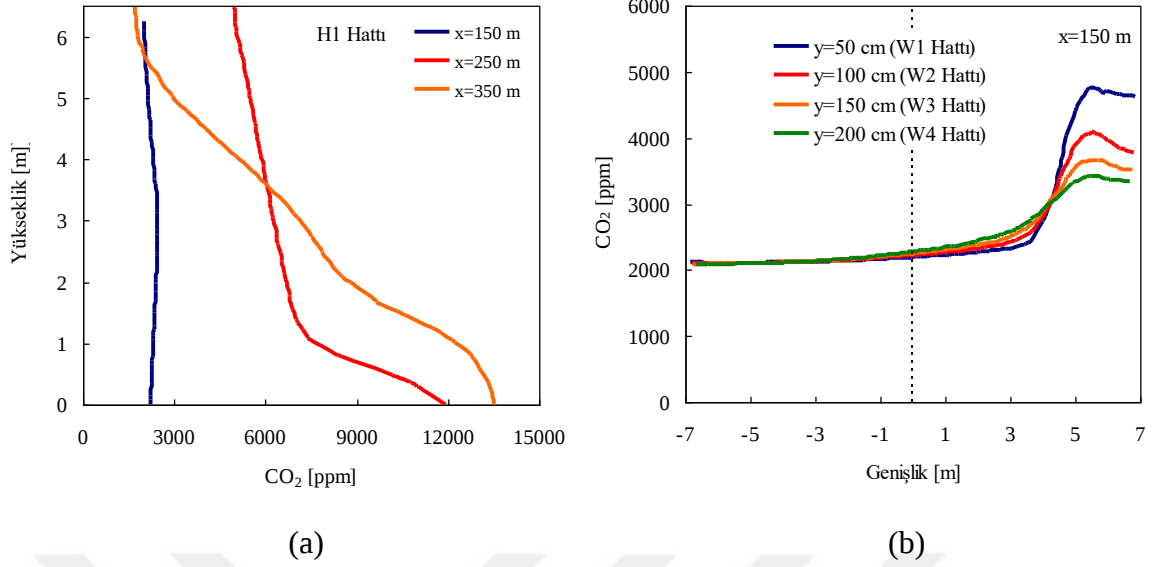
Şekil 124. R=950 m’de 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 125’de iki şeritli 950 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde çalışan tek fanın 950 N itme kuvveti 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.



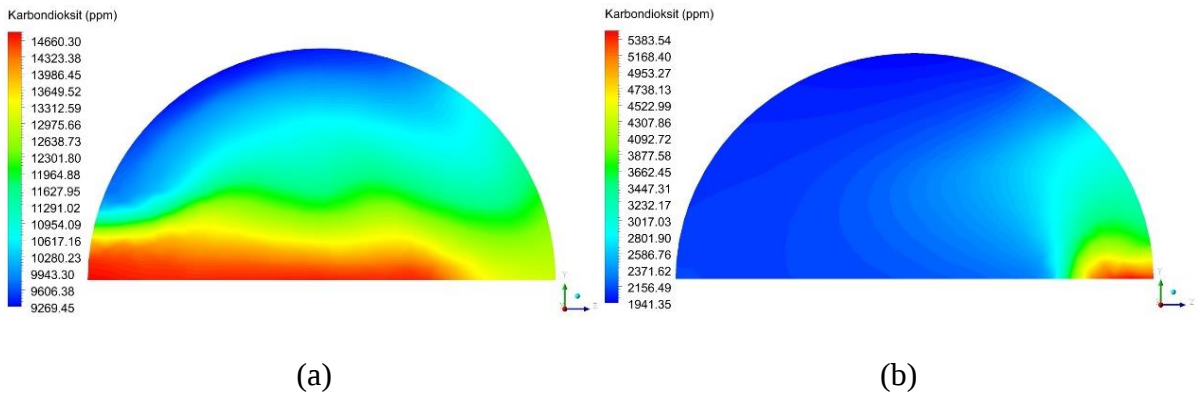
Şekil 125. R=950 m’de 950 N itme kuvveti kuvvetinde karbondioksit dağılımları  
(a) x=50 m (b) x=150 m

Şekil 126a’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 hatlarında 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 126b’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 126. R=1900 m’de 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 127’de iki şeritli 1900 m yarıçapa sahip kavisli tünel içerisinde çalışan tek fanın 950 N itme kuvveti 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.



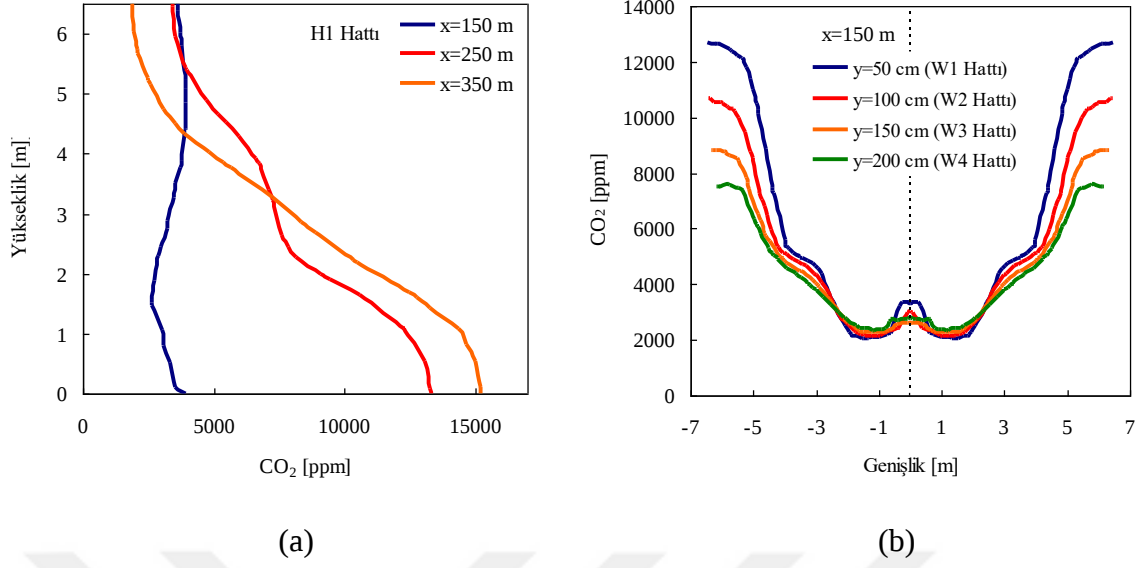
Şekil 127. R=1900 m’de 950 N itme kuvvetinde karbondioksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

### 3.3.5. Taşıtsız Fanlı ve Difüzörlü Düz Tünel

Fanlı tünel çalışmalarında, fan önüne yerleştirilen difüzörün kanat açısı etkisi ise, 500 metre uzunluğundaki iki şeritli düz tünelde tek fan durumunda ve 950 N fan itki kuvvetinde, difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerleri için sayısal olarak çözülmüştür. Fan itme kuvvetinin 950 N itme kuvveti değerlerinde zaman adımı 1 dk alınarak 60 dk süresinde çözümler gerçekleştirilmiştir. Tünel içerisindeki karbondioksit değerleri çözüm sürelerinin sonundaki değerler olarak grafiklere yansıtılmıştır.

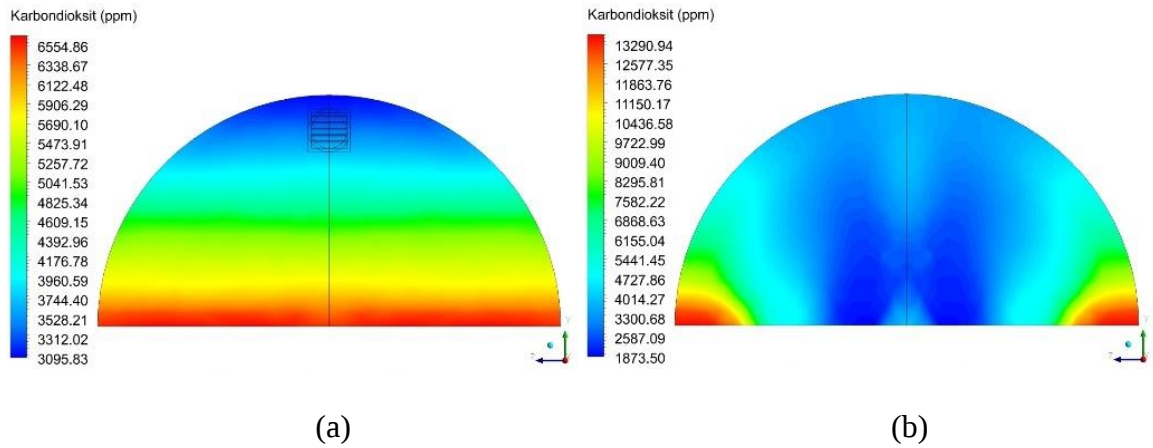
Taşıtsız fanlı ve difüzörlü düz tünelde, karbondioksit dağılımlarının zamana göre değişimlerinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen zaman bağımlı çözümlerde, kirliliğin en üst düzeye ulaştığı kritik düzey başlangıç durumundaki karbondioksit seviyesi olarak 25000 ppm şeklinde dikkate alınmıştır.

Şekil 128a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan  $10^\circ$  difüzör kanat açısına sahip difüzörlü tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 25000 ppm olan karbondioksit seviyesinin 60 dakika sonunda difüzör etkisiyle yaklaşık 3000 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe düşüş etkisi azalmaktadır. Şekil 128b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan  $10^\circ$  difüzör kanat açısının sahip difüzörlü 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.



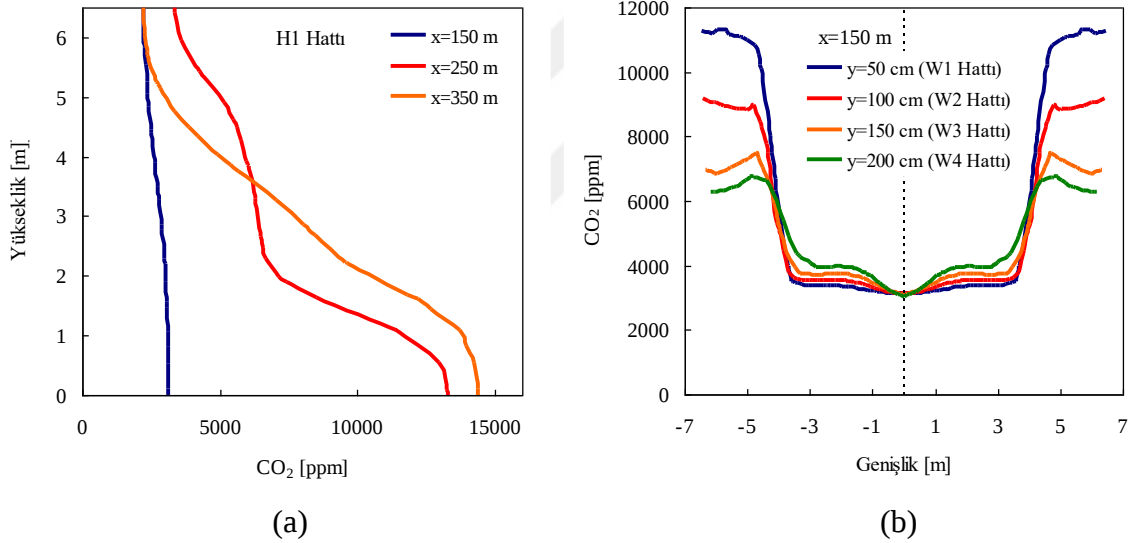
Şekil 128. 10° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 129’da iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 10° difüzör kanat açısının sahip difüzörlü 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 tabanına yakın bölgede yüksek olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, difüzör etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır.



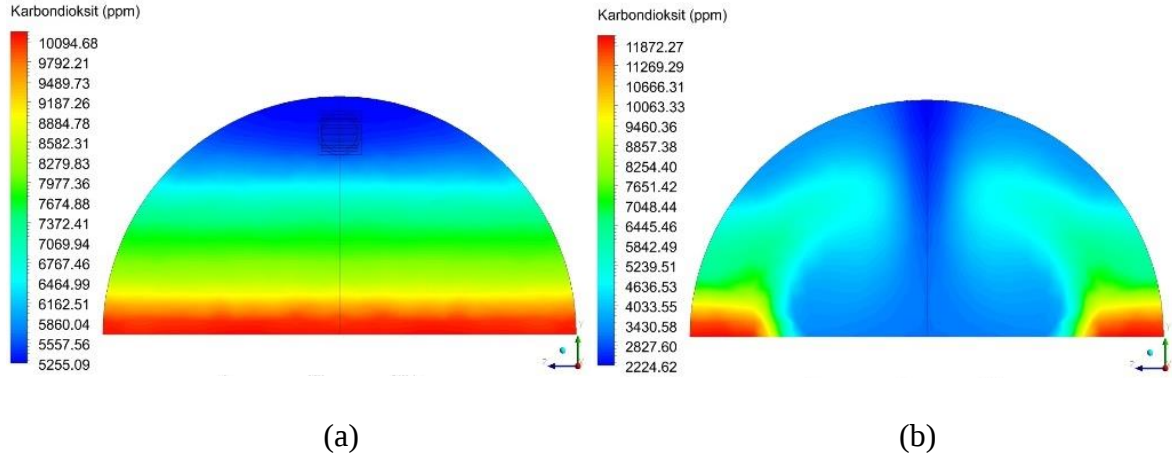
Şekil 129. 10° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbondioksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

Şekil 130a’da, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 20° difüzör kanat açısına sahip difüzörlü tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 25000 ppm olan karbondioksit seviyesinin 60 dakika sonunda difüzör etkisiyle yaklaşık 2500 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe düşüş etkisi azalmaktadır. Şekil 130b’de, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 20° difüzör kanat açısının sahip difüzörlü 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.



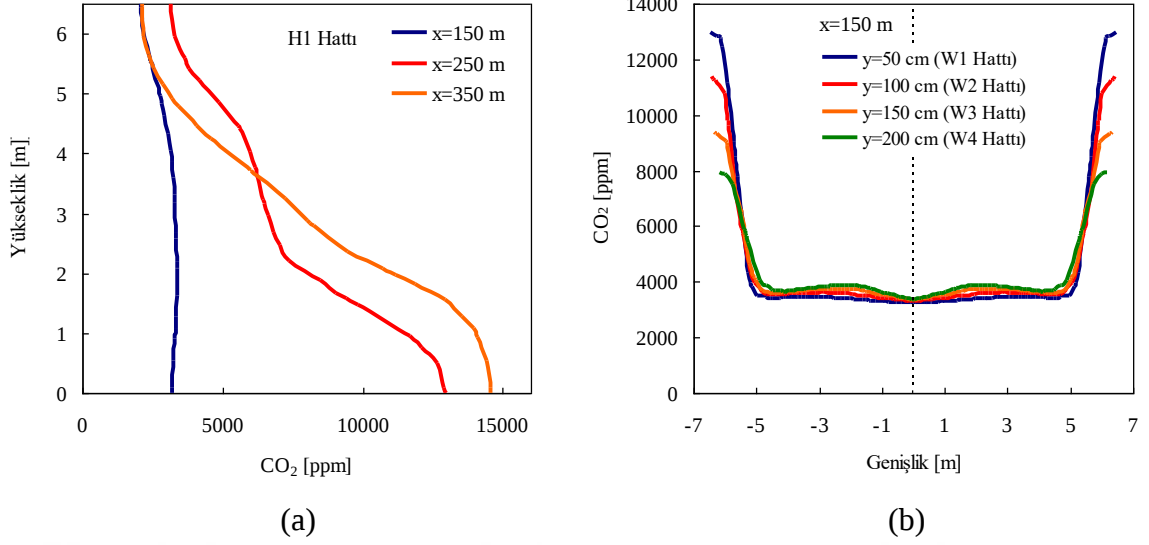
Şekil 130. 20° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 131’de iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 20° difüzör kanat açısının sahip difüzörlü 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 tabanına yakın bölgede yüksek olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, difüzör etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır.



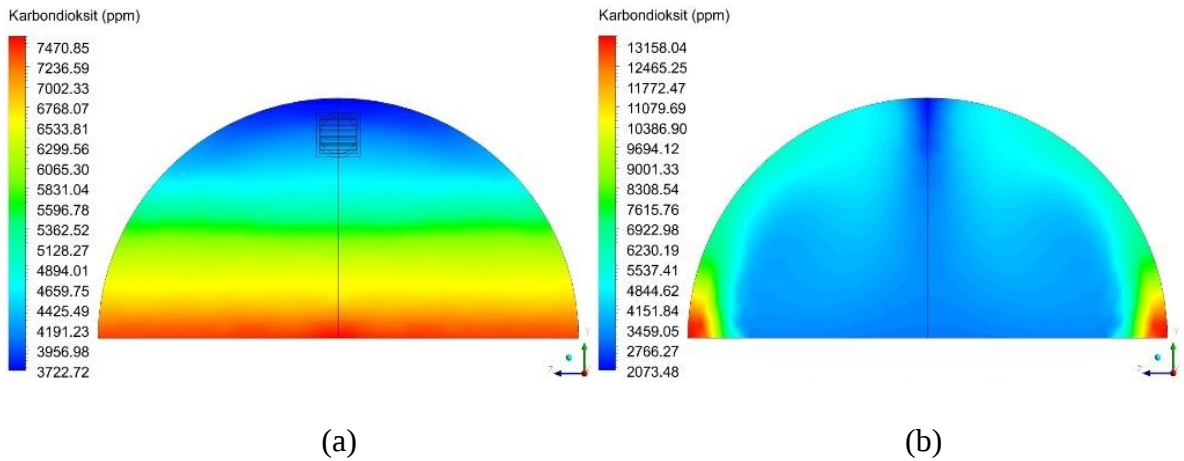
Şekil 131. 20° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbondioksit dağılımları  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

Şekil 132a’da, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 30° difüzör kanat açısına sahip difüzörlü tek fan için tünel boyunca 150 m, 250 m ve 350 m istasyonlarında düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hattında başlangıçta 25000 ppm olan karbondioksit seviyesinin 60 dakika sonunda difüzör etkisiyle yaklaşık 2600 ppm düzeyine düştüğü görülmektedir. Tünel boyunca ilerledikçe düşüş etkisi azalmaktadır. Şekil 132b’de, iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 30° difüzör kanat açısının sahip difüzörlü 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 132. 30° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbondioksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W1, W2, W3 ve W4 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 133’de iki şeritli düz tünel içerisinde 950 N itme kuvvetinde çalışan 30° difüzör kanat açısının sahip difüzörlü 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 tabanına yakın bölgede yüksek olmaktadır.  $x=150$  m’de ise, difüzör etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır.



Şekil 133. 30° difüzör kanat açısında ve 950 N itme kuvvetinde karbondioksit dağılımlar  
(a)  $x=50$  m (b)  $x=150$  m

#### **4. İRDELEME**

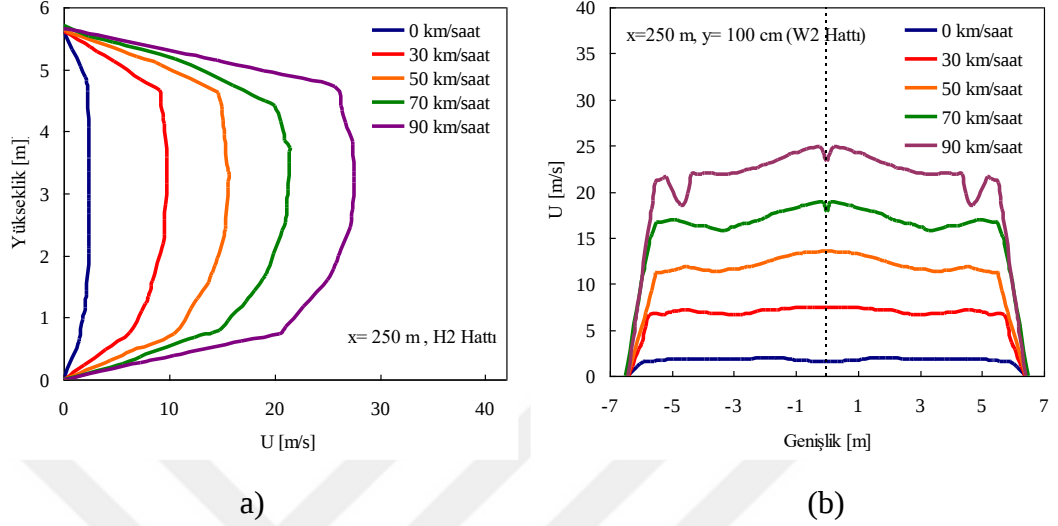
Bu tez çalışmasında, karayolları tünellerindeki taşıtların egzozlarından yayılan kirletici gazlardan karbonmonoksit ve karbondioksitin tünel içerisindeki dağılımları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla, ilk önce Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan Akyazı Tüneli'nde karbondioksit ölçümleri ile sınırlı tutulan deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise taşıtlı ve taşıtsız durumlar için tünel içerisindeki üç boyutlu akış alanları zaman bağımlı olarak kapsamlı sayısal çözümlerle incelenmiştir. Sayısal çalışmaların ilk aşamasında, içerisinde taşıt bulunan iki şeritli 500 m uzunluğundaki düz bir tünelde farklı taşıt hızlarında ve tünel geometrisinin iki farklı kavisli formunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmaların taşıtsız durumları içeren ikinci aşamasında ise, aynı boyutlardaki tünel içerisine yerleştirilmiş fan durumunda, fan itme kuvvetinin, tünel kavis durumunun, fan sayısının ve fana eklenmiş difüzör durumunda difüzör kanat açısının tünel içerisindeki karbonmonoksit ve karbondioksit düzeylerine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında tünel içerisindeki hız, karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımları, düz tünelde taşıt hızı etkisi, taşıtlı kavisli tünellerde kavis etkisi, taşıtsız fanlı düz tünelde fan itme kuvveti ve fan sayısı etkisi, taşıtsız fanlı kavisli tünelde kavis etkisi ve taşıtsız fanlı ve difüzörlü düz tünelde difüzör kanat açısı etkisi alt başlıklarında incelenmiştir.

##### **4.1. Tünel İçerisindeki Hız Dağılımları**

###### **4.1.1. Düz Tünelde Taşıt Hızı Etkisi**

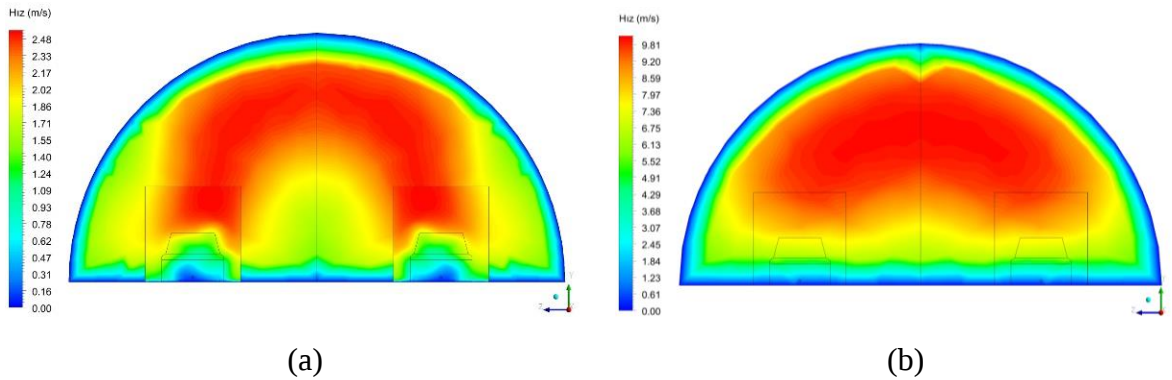
Şekil 134a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde  $x=250$  m istasyonunda dikey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış hız profilleri görülmektedir. Parabolik görüntüdeki hız profillerini oluşturan yerel hız değerleri artan taşıt hızı ile birlikte belirgin bir şekilde artmaktadır. Taşıtların oluşturduğu pürüzlülük etkisi nedeniyle hız profillerindeki yerel hız değerleri yaklaşık  $y=3$  m seviyesinde maksimum olmaktadır. Bhautmage ve Gokhale (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 134b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde  $x=250$  m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hatlarında hesaplanmış hız profilleri görülmektedir. Artan taşıt hızı ile birlikte hız profillerini oluşturan yerel hız değerleri belirgin bir şekilde artmaktadır. Taşıt hızının düşük değerlerinde ( $<50$  km/saat)

üniform görüntüde olan hız profilleri taşıt hızının yüksek değerlerinde ( $>50$  km/saat) parabolik görüntüye dönüşmektedir.



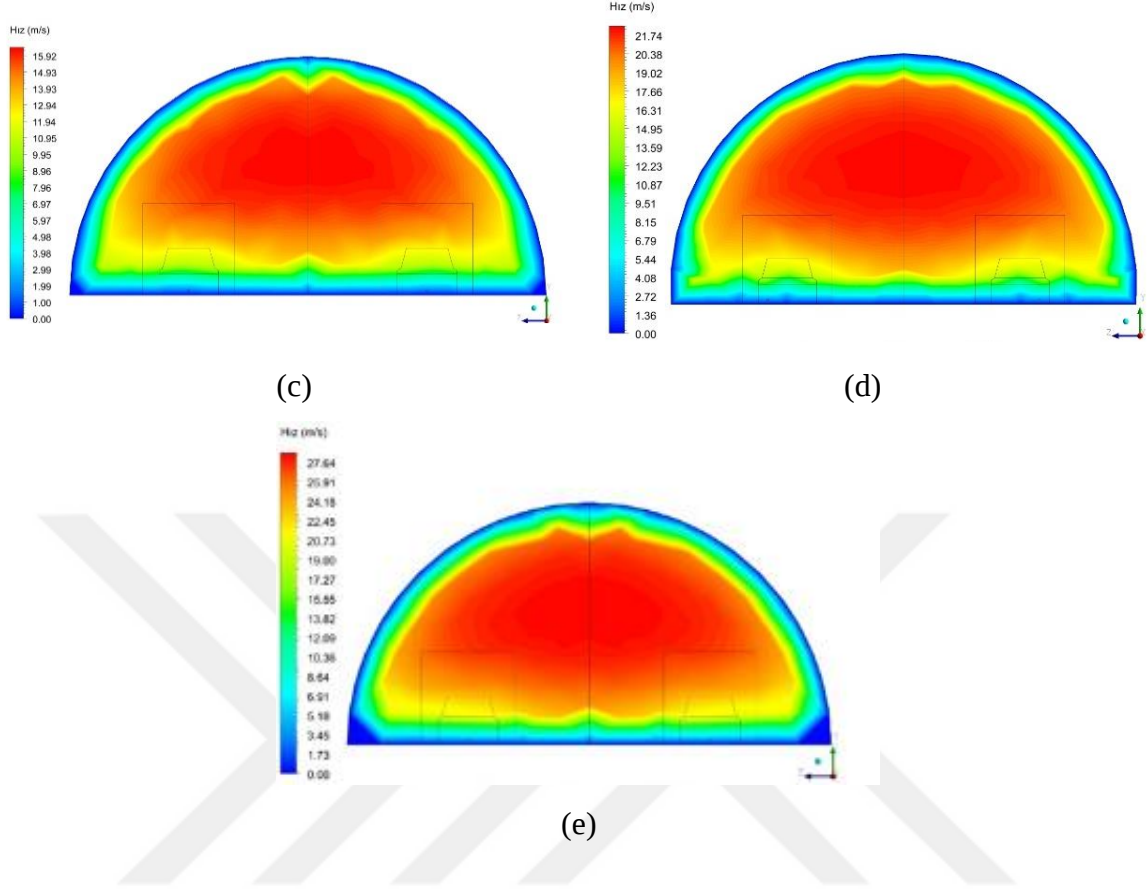
Şekil 134. Farklı taşıt hızlarındaki hız profilleri  
(a) H2 hatlarındaki hız değerleri (b) W2 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 135'de, iki şeritli düz tünel içerisinde  $x=250$  m istasyonunda taşıt hızının 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Taşıt hızı arttıkça en kesitteki maksimum hız değerleri daha geniş bir bölgeye yayılmaktadır.



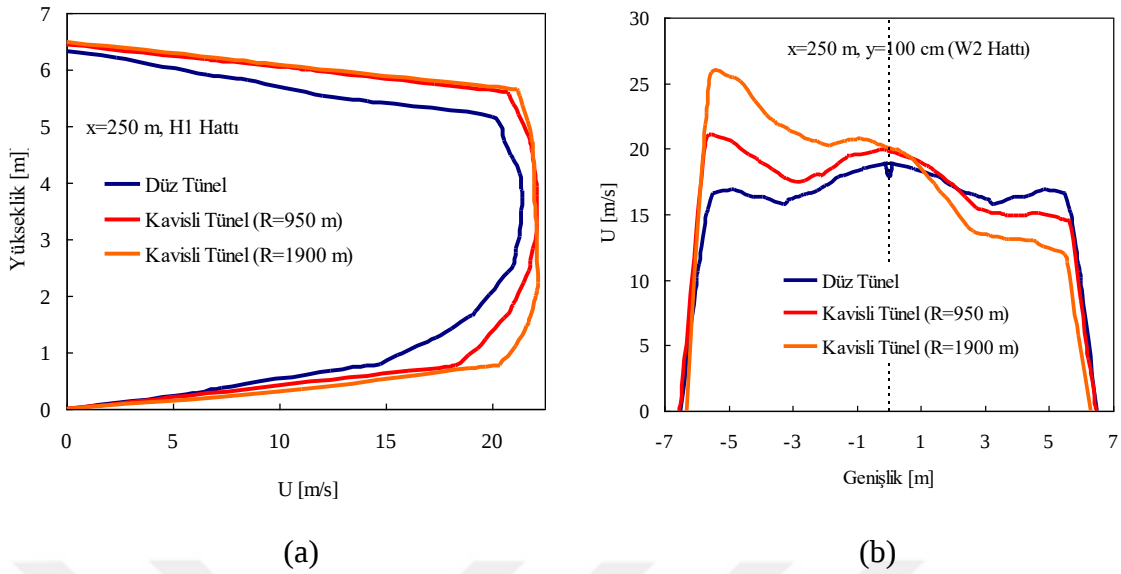
Şekil 135.  $x=250$  m'de farklı taşıt hızlarında hız dağılımları  
(a) 0 km/saat (b) 30 km/saat (c) 50 km/saat (d) 70 km/saat (e) 90 km/saat

Şekil 135'in devamı



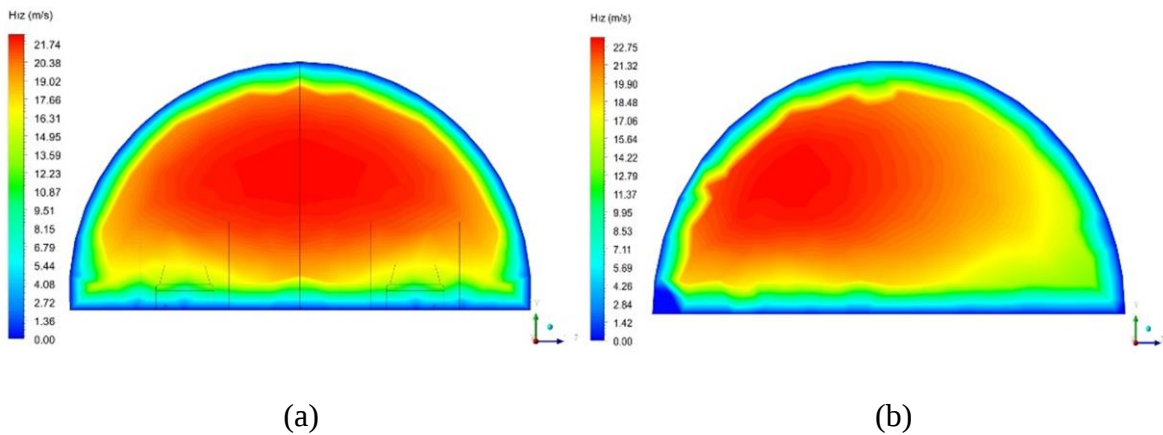
#### 4.1.2. Taşıtlı Kavisli Tünellerde Kavis Etkisi

Şekil 136'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 düşey doğrultudaki H1 hatlarında 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 136b'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 hatlarında 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.



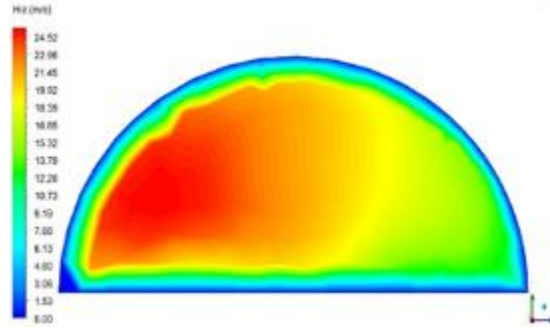
Şekil 136. 70 km/saat taşıt hızında düz ve kavisli tünellerdeki hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W2 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 137’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 137.  $x=250$  m’de ve 70 km/saat taşıt hızında hız dağılımları  
(a) Düz tünel (b)  $R=950$  m yarıçapındaki kavisli tünel (c)  $R=1900$  m yarıçapındaki kavisli tünel

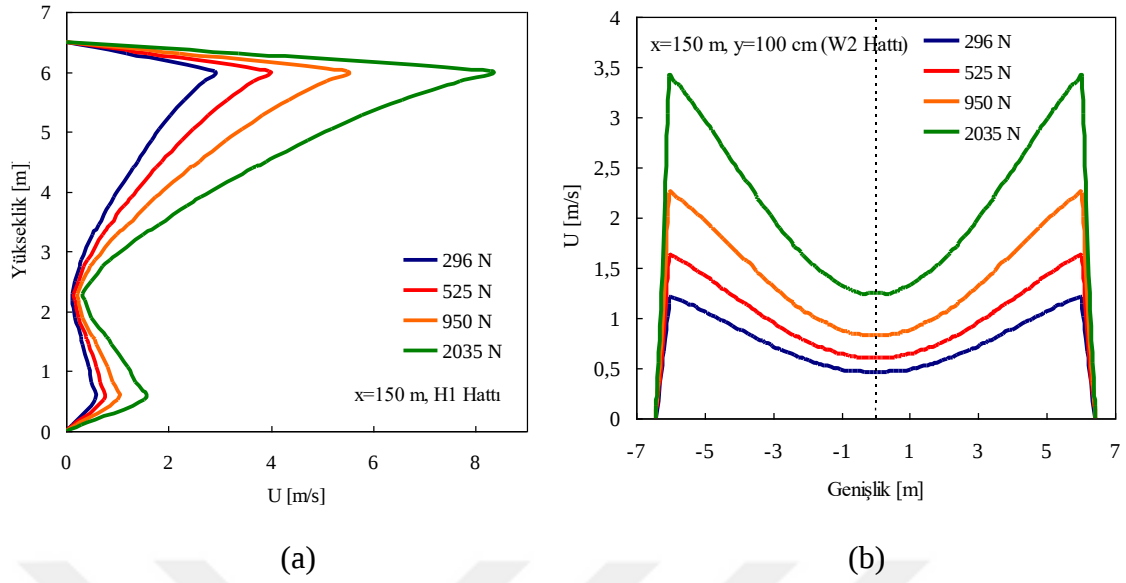
Şekil 137'nin devamı



(c)

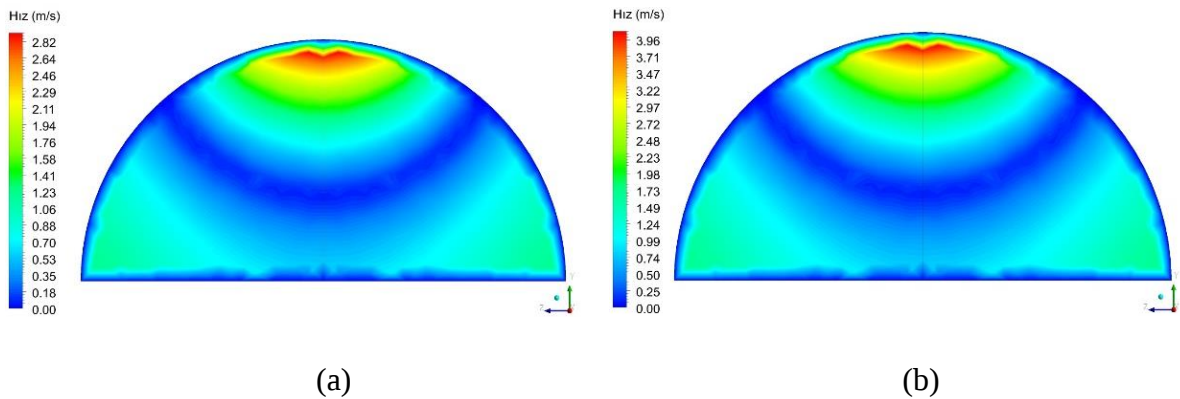
#### 4.1.3. Taşıtsız Fanlı Düz Tünelde İtme Kuvveti Etkisi

Şekil 138a'da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan durumunda, fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde  $x=150$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Düşey doğrultudaki hız değerleri, tünel tabanından itibaren artarak  $y=0.5$  m yüksekliğinde küçük ölçekli pikler oluşturmakta, daha sonra azalarak  $y=2.5$  m'de minimum olmaktadır.  $y=2.5$  m'den itibaren tekrar artan hız değerleri fan doğrultusunda maksimum olmaktadır. İtme kuvvetine bağlı olarak artan hız değerleri fan doğrultusunda fan itme kuvvetinin 296 N değerinde 2.9 m/s, 2035 N değerinde ise 8.3 m/s olmaktadır. Tünel tabanından itibaren H1 hattı boyunca hız profillerindeki değişim fan etkisiyle oluşan ters akış bölgesiyle ilgilidir. Colella vd. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 138b'de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan durumunda, fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde  $x=150$  m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Tünel yan duvarları yakınında yüksek olan hız değerleri orta bölgede azalmaktadır. Fan itme kuvvetinin 2035 N değerinde hız değeri en büyük olmaktadır.



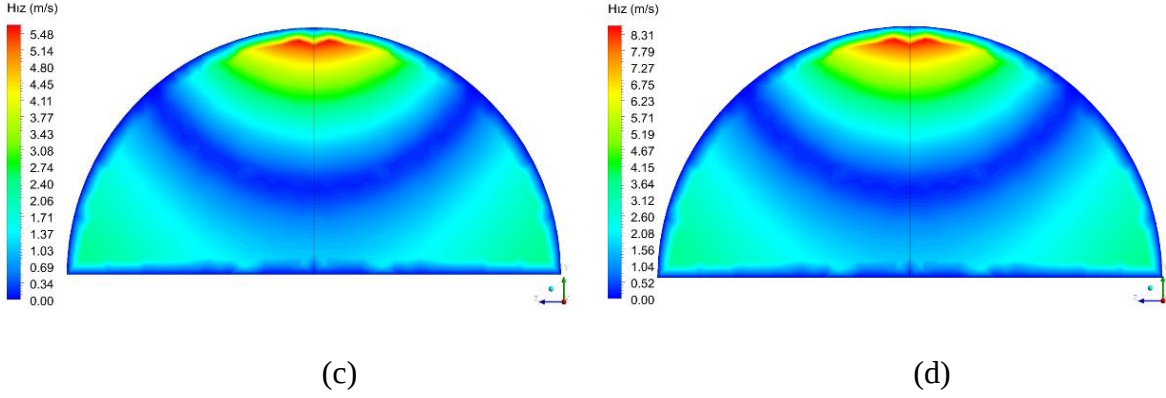
Şekil 138. Farklı fan itme kuvvetlerinde hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W2 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 139’da, iki şeritli düz tünel içerisinde tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan durumunda, fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde  $x=150$  m istasyonunda en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. İncelenen tüm fan itme kuvvetlerinde fanın üfleme etkisiyle fan doğrultusundaki bölgelerde hız değerleri artmaktadır. Fan itme kuvvetinin 296 N değerinde fan doğrultusundaki maksimum hız değeri 2.82 m/s iken, 2035 N değerinde maksimum hız 8.31 m/s olmaktadır.



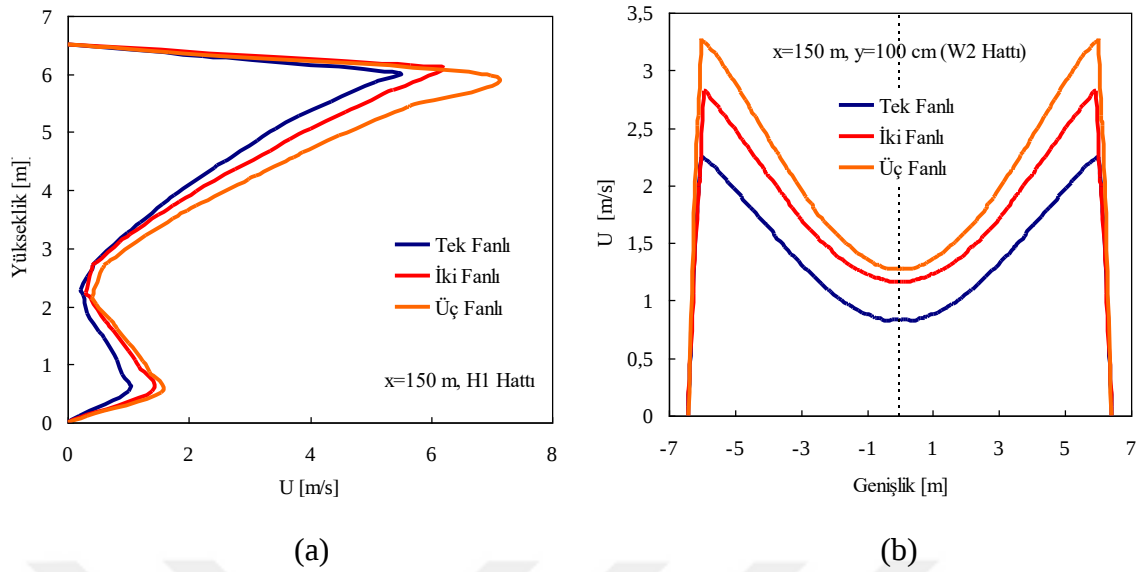
Şekil 139.  $x=150$  m’de farklı fan itme kuvvetlerinde hız dağılımları  
(a) 296 N (b) 525 N (c) 950 N (d) 2035 N

Şekil 139'un devamı



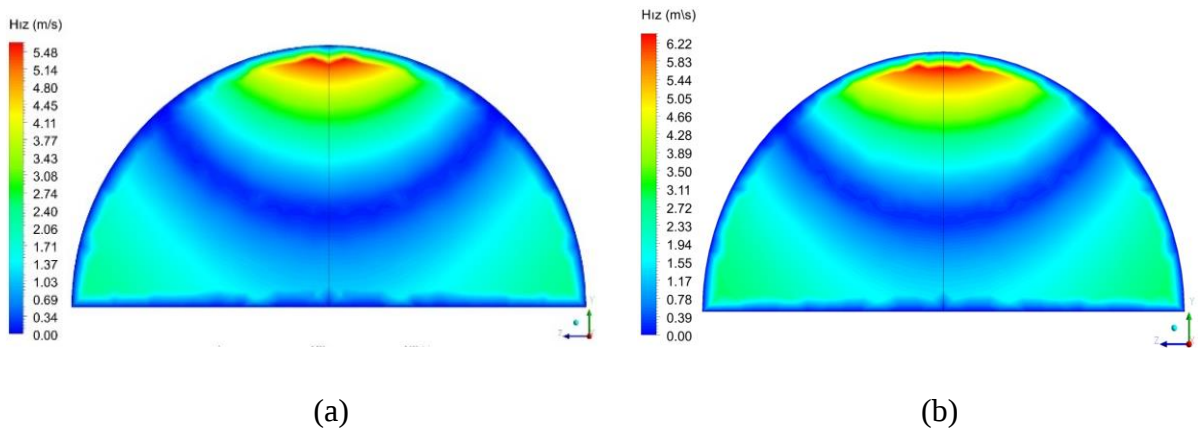
#### 4.1.4. Taşıtsız Fanlı Düz Tünelde Fan Sayısı Etkisi

Şekil 140a'da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında,  $x=150$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Düşey doğrultudaki hız değerleri, tünel tabanından itibaren artarak  $y=0.5$  m yüksekliğinde küçük ölçekli pikler oluşturmakta, daha sonra azalarak  $y=2.5$  m'de minimum olmaktadır.  $y=2.5$  m'den itibaren tekrar artan hız değerleri fan doğrultusunda maksimum olmaktadır. Fan sayısına bağlı olarak artan hız değerleri fan doğrultusunda tek fan durumunda 5.5 m/s, üç fan durumunda ise 7 m/s olmaktadır. Şekil 140b'de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, fan sayısının tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan çalışan durumlarında,  $x=150$  m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Tünel yan duvarları yakınında yüksek olan hız değerleri orta bölgede azalmaktadır. Üç özdeş fan durumunda hız değeri en büyük olmaktadır.



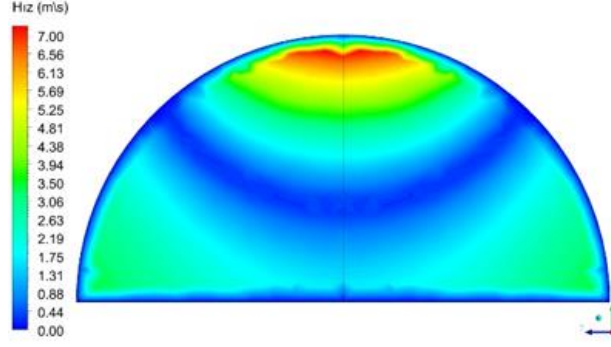
Şekil 140. Farklı fan sayılarında hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W2 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 141’de, iki şeritli düz tünel içerisinde tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, fan sayısının tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan çalışan durumlarında,  $x=150$  m istasyonunda en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Her üç fan sayısı durumunda da fanın üfleme etkisiyle fan doğrultusundaki bölgelerde hız değerleri artmaktadır. Tek fan durumunda fan doğrultusundaki maksimum hız değeri 5.48 m/s iken, üç özdeş fan durumunda maksimum hız 7 m/s olmaktadır.



Şekil 141.  $x=150$  m’de farklı fan sayılarında hız dağılımları  
(a) Tek fan (b) Özdeş iki fan (c) Özdeş üç fan

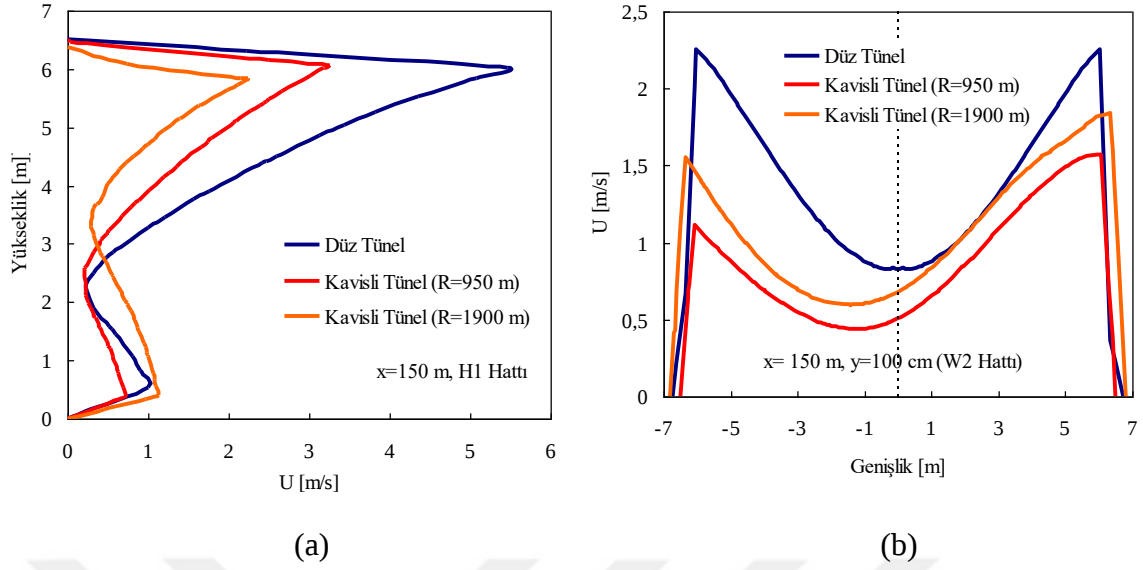
Şekil 141'in devamı



(c)

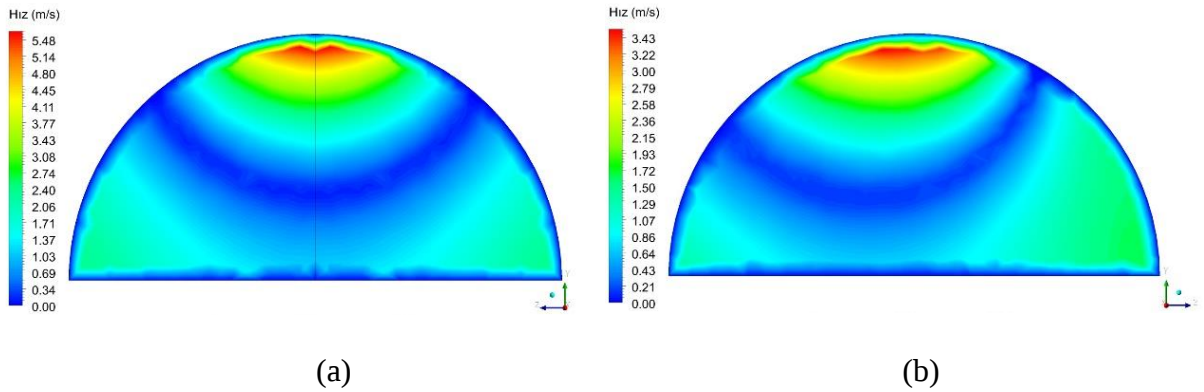
#### 4.1.5. Taşıtsız Fanlı Kavisli Tünelde Kavis Etkisi

Şekil 142a'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 hatlarında 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 142b'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 hatlarında 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. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir.



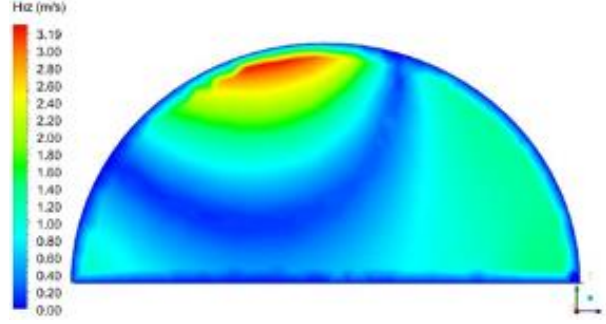
Şekil 142. 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki hız profilleri  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W2 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 143’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 143.  $x=150$  m’de 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki hız dağılımları  
(a) Düz tünel (b)  $R=950$  m yarıçapa sahip kavisli tünel (c)  $R=1900$  m yarıçapa sahip kavisli tünel

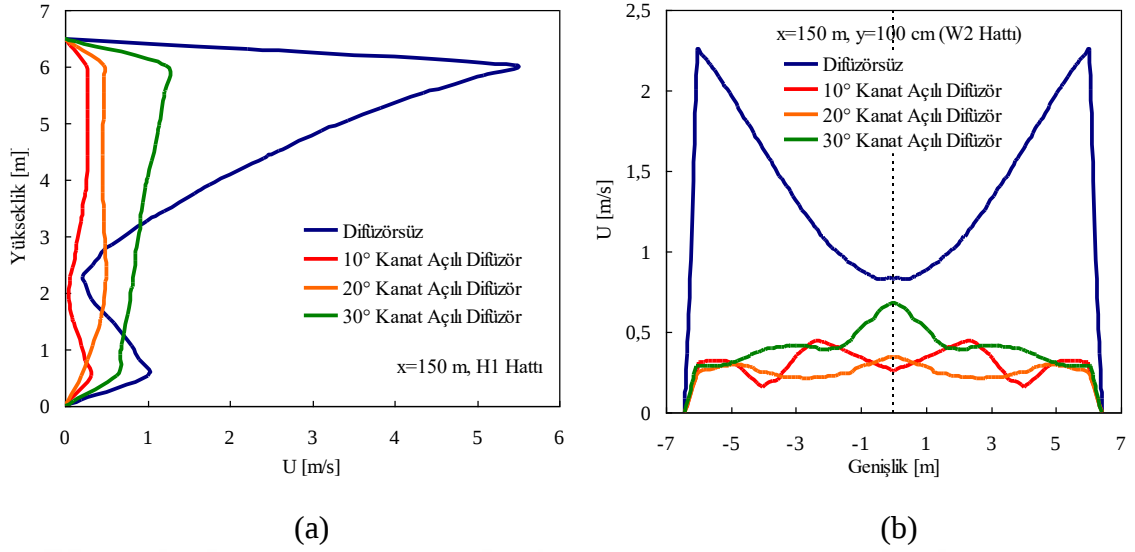
Şekil 143'ün devamı



(c)

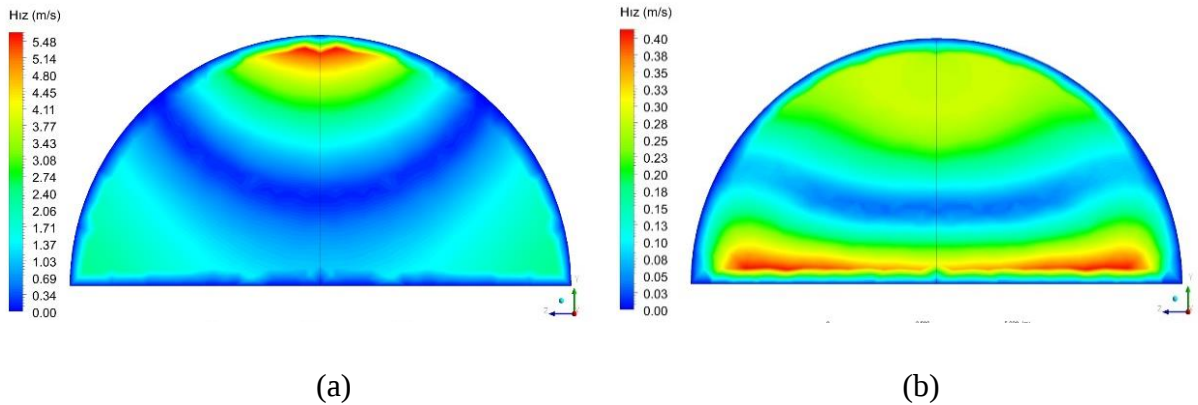
#### 4.1.6. Taşıtsız Fanlı ve Difüzörlü Düz Tünelde Difüzör Kanat Açısı Etkisi

Şekil 144a'da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, difüzörsüz durumda ve difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerlerinde,  $x=150$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Difüzörsüz durumda, düşey doğrultudaki hız değerleri, tünel tabanından itibaren artarak  $y=0.5$  m yüksekliğinde küçük ölçekli bir pik oluşturmakta, daha sonra azalarak yaklaşık  $y=2.5$  m'de minimum olmaktadır. Tekrar artan hız değerleri fan doğrultusunda maksimum olmaktadır. İncelenen tüm difüzör kanat açılarında fan doğrultusundaki hız değerleri difüzörsüz durumdaki hız değerine göre belirgin azalmaktadır. En büyük azalma  $10^\circ$  difüzör kanat açısında meydana gelmektedir. Bu durum tünel içerisinde difüzör kullanımının fan etkinliği bozduğunu göstermektedir. Şekil 144b'de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, difüzörsüz durumda ve difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerlerinde,  $x=150$  m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hatlarında hesaplanmış hız değerleri görülmektedir. Difüzörsüz durumda, fan etkisiyle tünel yan duvarları yakınında yüksek olan hız değerleri orta bölgede azalmaktadır. İncelenen tüm difüzörlü durumlarda hız değerleri difüzörsüz duruma göre azalmaktadır. Difüzörlü durumlarda, tünelin orta bölgesindeki hız değerleri difüzör kanat açısının  $30^\circ$  değerinde en yüksek olmaktadır.



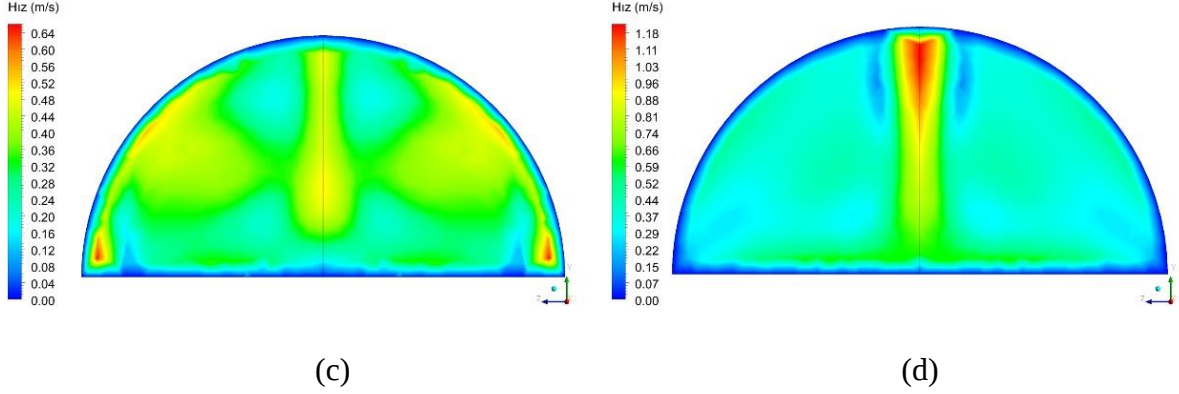
Şekil 144. 950 N fan itme kuvvetinde difüzörsüz ve difüzörlü fanlı tünellerdeki hız dağılımları  
(a) H1 hatlarındaki hız değerleri (b) W2 hatlarındaki hız değerleri

Şekil 145’de, iki şeritli düz tünel içerisinde tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, difüzörsüz durumda ve difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerlerinde,  $x=150$  m istasyonunda en kesitlerde hesaplanmış hız dağılımları görülmektedir. Difüzörsüz durumda, fanın üfleme etkisiyle fan doğrultusundaki bölgede hız değerleri artmaktadır. Difüzörlü durumlar tünel en kesitlerindeki hız dağılımlarını oldukça değiştirmektedir. Difüzör kanat açısının  $10^\circ$  olduğu durumda, yaya bölgesinde hız değerleri artmaktadır.  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  difüzör kanat açısı durumlarında ise, tünelin orta bölgesinde hız değerleri artmaktadır.



Şekil 145.  $x=150$  m’de 950 N fan itme kuvvetinde difüzörsüz ve farklı difüzör açısına sahip fanlı tünellerdeki hız dağılımları  
(a) Difüzörsüz (b)  $10^\circ$  kanat açılı (c)  $20^\circ$  kanat açılı (d)  $30^\circ$  kanat açılı

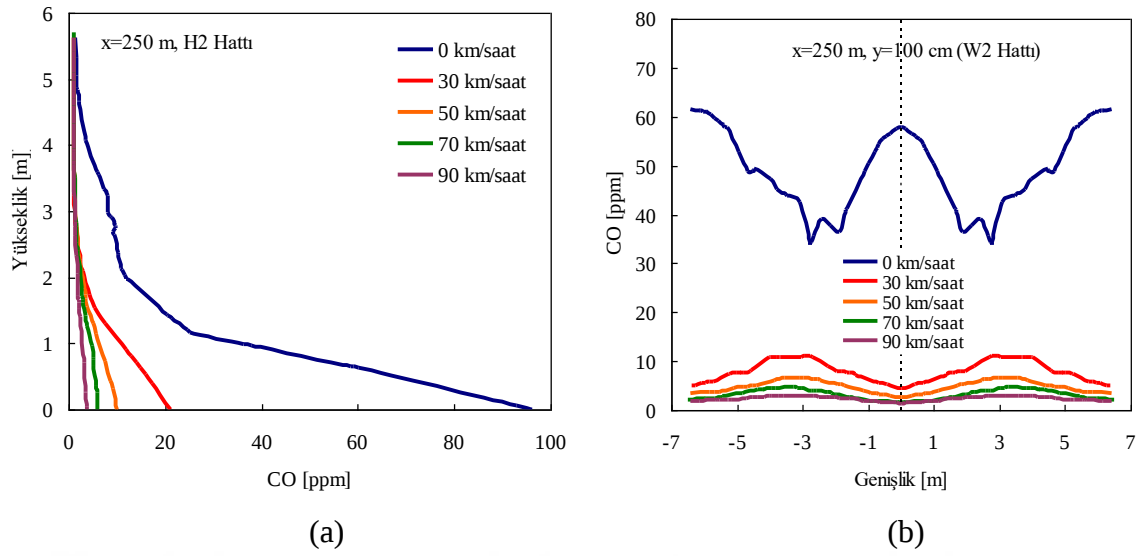
Şekil 145'in devamı



## 4.2. Tünel İçerisindeki Karbonmonoksit Dağılımları

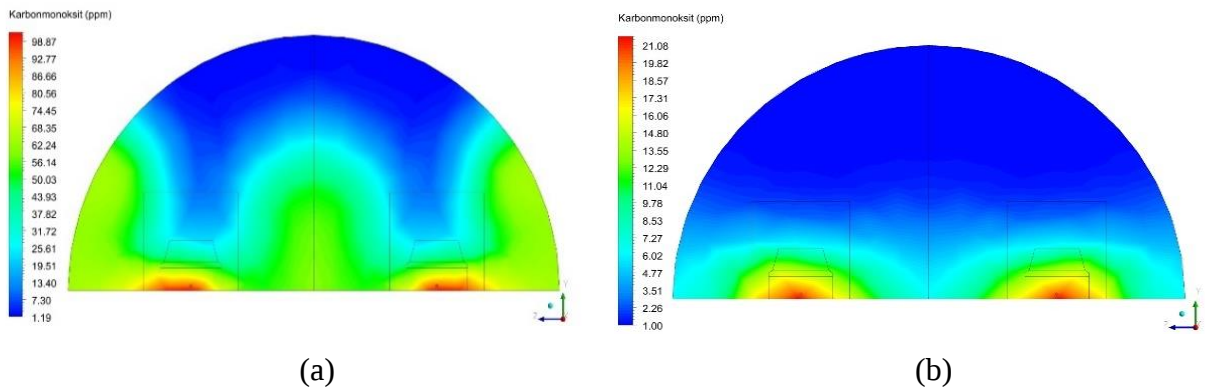
### 4.2.1. Düz Tünelde Taşıt Hızı Etkisi

Şekil 146a'da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde  $x=250$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit profilleri görülmektedir. 0 km/saat taşıt hızında, tünel tabanında 96 ppm olarak en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değeri,  $y=2$  m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta 11 ppm değerine düşmektedir. Taşıt hızı arttıkça H2 hattındaki karbonmonoksit değerleri azalmakta ve taşıt hızının 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde sırasıyla 20 ppm, 10 ppm, 6 ppm ve 4 ppm olmaktadır. Kristensson vd. (2004) Stockholm tünelinde gerçekleştirdikleri saha çalışmasında 70 km/saat taşıt hızında karbonmonoksit değerleri yaklaşık 6 ppm olarak ölçmüşlerdir. Bu değer mevcut çalışmada 70 km/saat taşıt hızında elde edilen değerle uyumludur. Şekil 146b'de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde  $x=250$  m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit profilleri görülmektedir. 0 km/saat taşıt hızında, tünelin orta bölgesinde ve tünel yan duvarları yakınında karbonmonoksit değerleri yüksek olmaktadır. Aynı hat üzerinde orta bölgede hız değerlerindeki oluşan düşüş bu bölgedeki karbonmonoksit artışına neden olmaktadır.



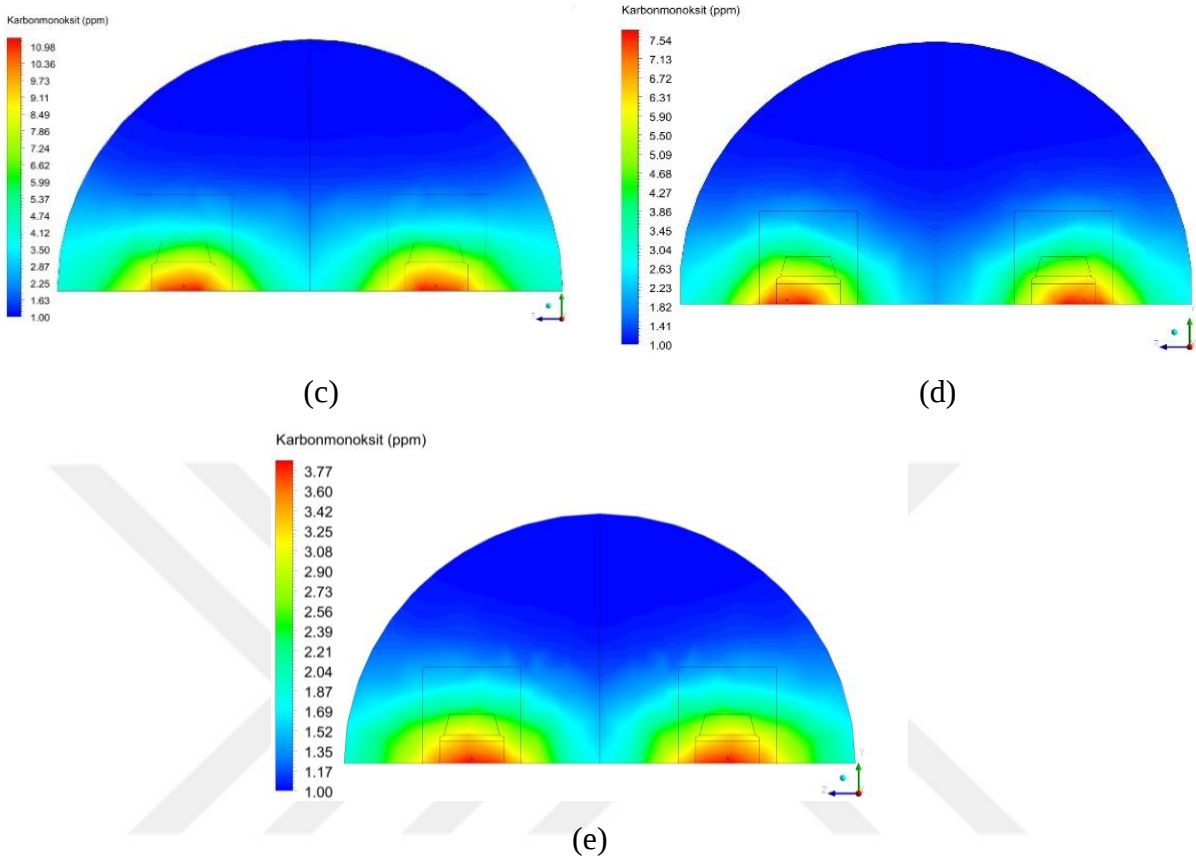
Şekil 146. Farklı taşıt hızlarındaki karbonmonoksit profilleri  
(a) H2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 147’de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde  $x=250$  m istasyonunda tünel en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. 0 km/saat taşıt hızında egzoz salınımı nedeniyle tünel en kesitindeki karbonmonoksit etkisi daha geniş bir alana yayılmaktadır. Egzozlardan salınan karbonmonoksit taşıt hızının etkisiyle tünel tabanına yakın bölgede yoğunlaşırken tünelin üst bölgesinde daha az etkili olmaktadır. Egzoz civarında maksimum olan karbonmonoksit değerleri taşıt hızı arttıkça azalmaktadır. 0 km/saat hızında 98 ppm olan maksimum karbonmonoksit seviyesi 90 km/saat taşıt hızında 4 ppm düzeyine inmektedir.



Şekil 147.  $x=250$  m’de farklı taşıt hızlarındaki karbonmonoksit dağılımları  
(a) 0 km/saat (b) 30 km/saat (c) 50 km/saat (d) 70 km/saat (e) 90 km/saat

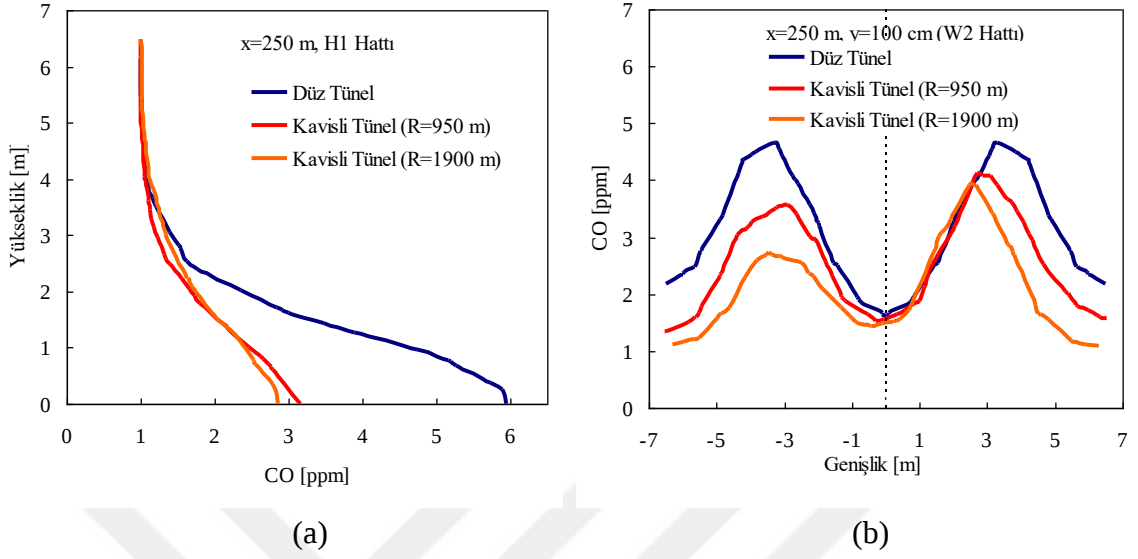
Şekil 147'nin devamı



#### 4.2.2. Taşıtlı Kavisli Tünellerde Kavis Etkisi

Şekil 148a'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 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Düz tünelde, tünel tabanında 6 ppm şeklinde en yüksek düzeyine ulaşan karbonmonoksit değeri,  $y=3$  m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta, bu seviyeden itibaren yaklaşık aynı değerlerle tünel tavanına kadar etkisini göstermektedir. Kavis etkisiyle aynı hattaki karbonmonoksit değerleri tünel tabanında 3 ppm düzeyine inmektedir. Şekil 148b'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 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Her üç tünel geometrisinde de taşıtların arkasına karşılık gelen bölgelerde karbonmonoksit değerleri yüksek olmaktadır. Düz tünelde 5 ppm olan bu maksimum değer

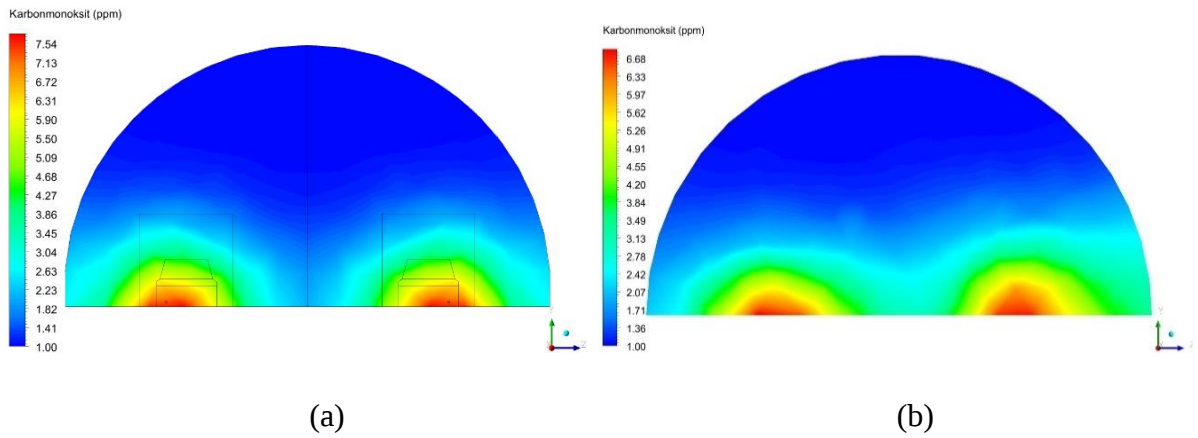
kavis etkisiyle azalmakta ve  $R=1900$  m yarıçaplı kavis durumunda tünel kesitinin sol kısmında 2.5 ppm, sağ kısmında ise 4 ppm olmaktadır.



Şekil 148. 70 km/saat taşıt hızlarındaki düz ve kavisli tünellerdeki Karbonmonoksit profilleri

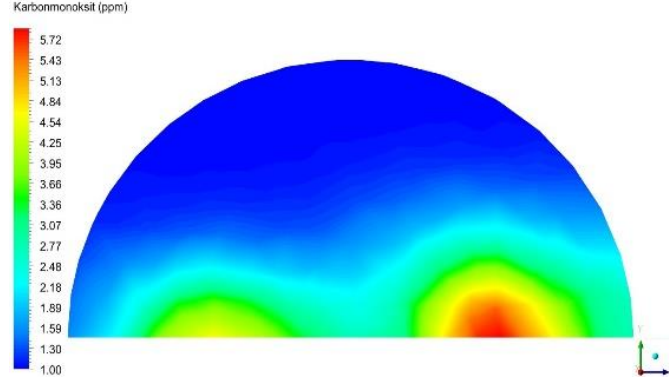
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri

Şekil 149'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 tünel en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Düz tünelde, karbonmonoksit etkisi taşıtların etrafında daha fazla olacak şekilde simetrik bir görüntüde iken, kavisli tünellerde bu simetrik etki bozularak iç bükey bölgelerde daha belirgin olmaktadır.



Şekil 149.  $x=250$  m'de 70 km/saat taşıt hızındaki karbonmonoksit dağılımları  
(a) Düz tünel (b) R=950 m yarıçapındaki kavisli tünel (c) R=1900 m yarıçapındaki kavisli tünel

Şekil 149'un devamı

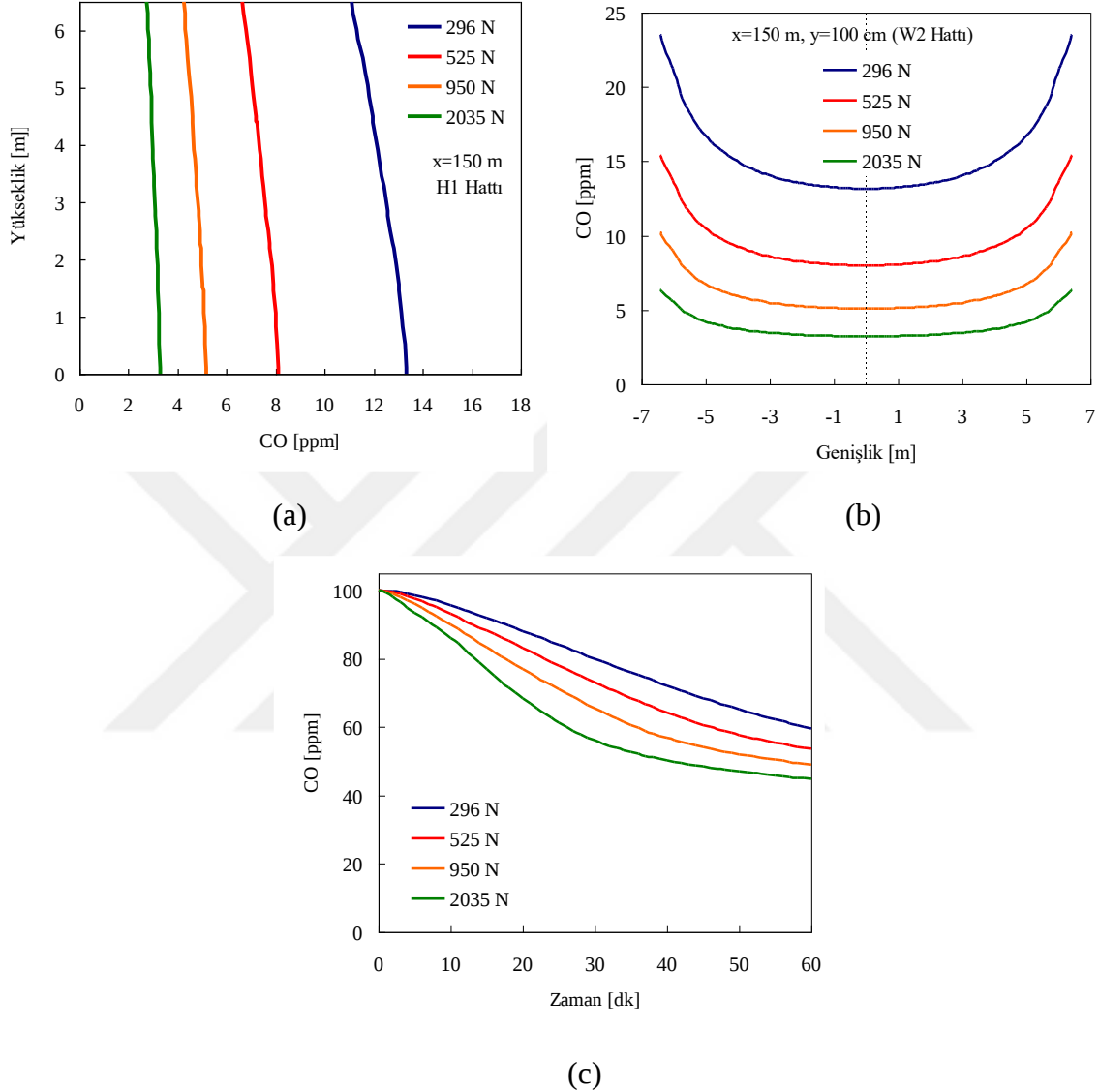


(c)

#### 4.2.3. Taşıtsız Fanlı Düz Tünelde İtme Kuvveti Etkisi

Şekil 150a'da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan durumunda, fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde  $x=150$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hatlarında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyeleri 60 dakika sonunda fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde sırasıyla 13 ppm, 8 ppm, 5 ppm ve 3 ppm düzeylerine düşmektedir. Şekil 150b'de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan durumunda, fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde  $x=150$  m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Tünelin orta bölgesinde fan etkisiyle azalan karbonmonoksit değerleri, tünel yan duvarlarında en yüksek olmaktadır. Tünel yan duvarlarında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyeleri 60 dakika sonunda fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde sırasıyla 23 ppm, 15 ppm, 10 ppm ve 6 ppm düzeylerine düşmektedir. Şekil 150c'de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan durumunda, başlangıçta 100 ppm düzeyinde olan karbonmonoksit seviyelerinin 60 dakika boyunca tünel hacmi içerisindeki değişimleri fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerleri için görülmektedir. 60 dakika sonunda karbonmonoksit düzeyleri, fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerleri için sırasıyla 60 ppm, 53 ppm, 49 ppm ve 45 ppm

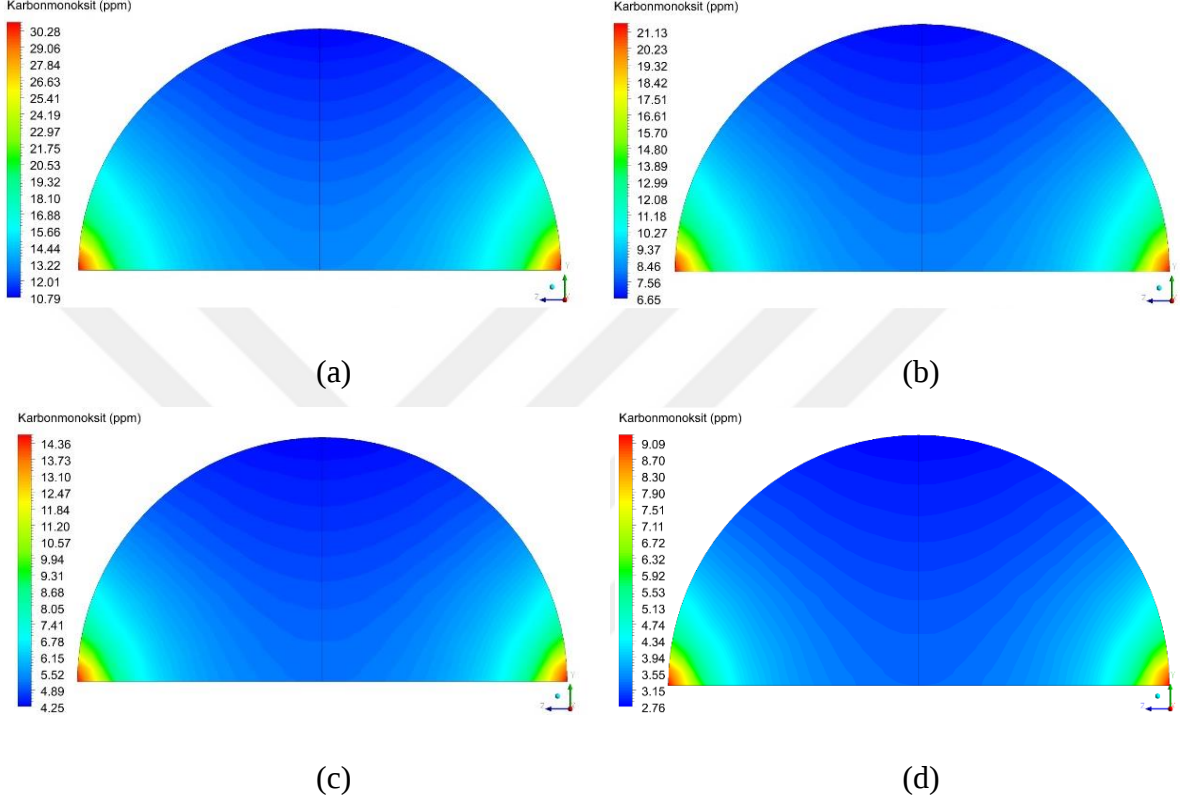
olmaktadır. Karbonmonoksit seviyesindeki en büyük azalma % 55 ile 2035 N itme kuvvetinde gerçekleşmiştir.



Şekil 150. Farklı fan itme kuvvetlerinde karbonmonoksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (c) Karbonmonoksit değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 151’de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan durumunda, fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde  $x=150$  m istasyonunda tünel en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. İncelenen tüm fan itme kuvveti değerlerinde, fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbonmonoksit değerleri azalmaktadır. Fan itme kuvveti arttıkça tünel

en kesitindeki karbonmonoksit seviyeleri azalmaktadır. Fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerleri için tünel köşelerinde maksimum karbonmonoksit değerleri sırasıyla 30 ppm, 21 ppm, 14 ppm ve 9 ppm şeklindedir. Fan kullanımı tünel içerisindeki karbonmonoksit düzeyini azaltmada etkili olmaktadır.

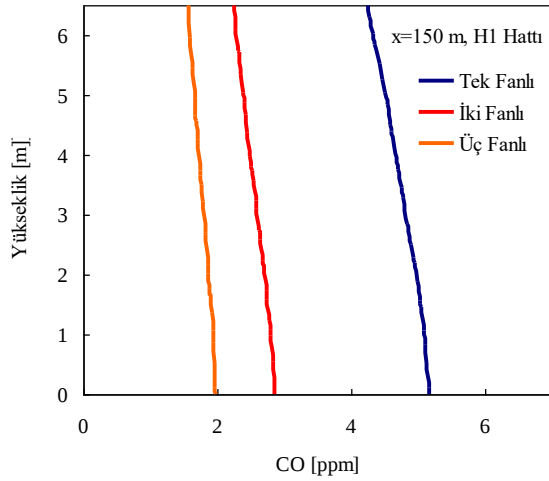


Şekil 151.  $x=150$  m’de farklı fan itme kuvvetlerinde karbonmonoksit dağılımları  
(a) 296 N (b) 525 N (c) 950 N (d) 2035 N

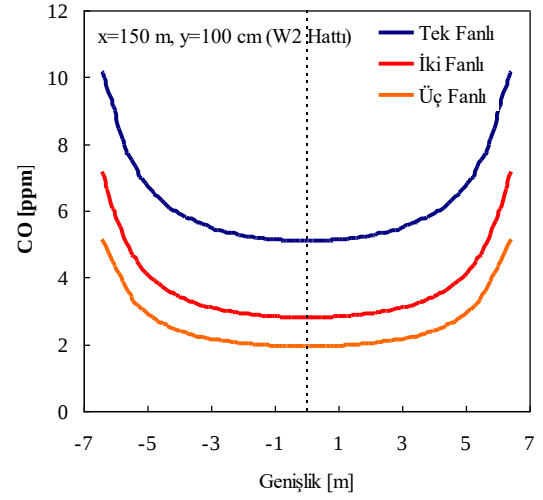
#### 4.2.4. Taşıtsız Fanlı Düz Tünelde Fan Sayısı Etkisi

Şekil 152a’da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında 950 N itme kuvvetinde,  $x=150$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hatlarında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyeleri 60 dakika sonunda tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında sırasıyla 5 ppm, 3 ppm ve 2 ppm düzeylerine düşmektedir. Şekil 152b’de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında, 950 N itme kuvvetinde,  $x=150$  m istasyonunda yatay

doğrultudaki W2 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Tünelin orta bölgesinde fan etkisiyle azalan karbonmonoksit değerleri, tünel yan duvarlarında en yüksek olmaktadır. Tünel yan duvarlarında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyeleri 60 dakika sonunda tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında sırasıyla 10 ppm, 7 ppm ve 5 ppm düzeylerine düşmektedir. Şekil 152c’de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında 950 N itme kuvvetinde,  $x=150$  m istasyonunda, başlangıçta 100 ppm düzeyinde olan karbonmonoksit seviyelerinin 60 dakika boyunca tünel hacmi içerisindeki değişimleri görülmektedir. 60 dakika sonunda karbonmonoksit düzeyleri, tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumları için sırasıyla 49 ppm, 47 ppm ve 45 ppm olmaktadır. Karbonmonoksit seviyesindeki en büyük azalma % 55 ile üç özdeş fanlı durumda gerçekleşmiştir.



(a)

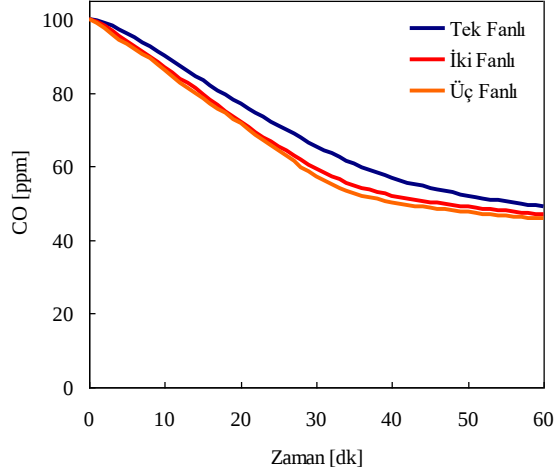


(b)

Şekil 152. Farklı fan sayılarında karbonmonoksit profilleri

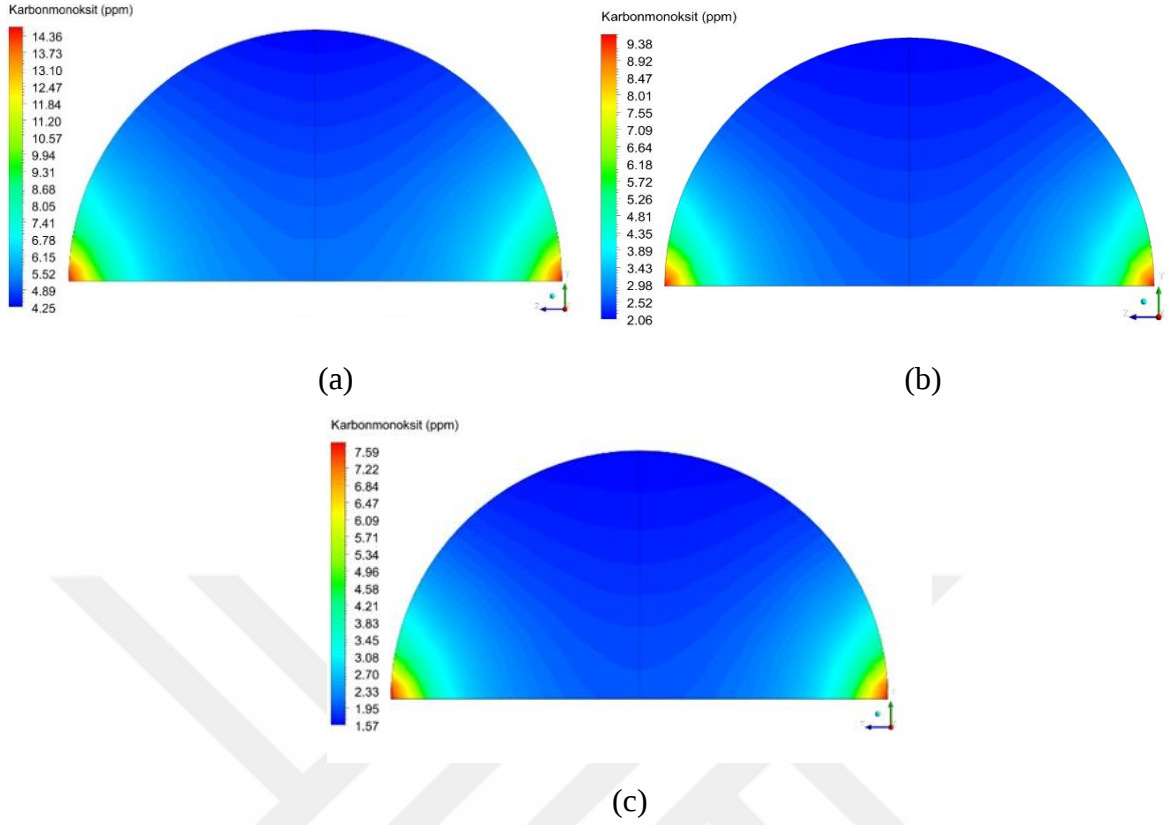
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (c) Karbonmonoksit değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 152'nin devamı



(c)

Şekil 153’de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında 950 N itme kuvvetinde,  $x=150$  m istasyonunda tünel en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. İncelenen her üç fan sayısı durumunda da fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbonmonoksit değerleri azalmaktadır. Fan sayısı arttıkça tünel en kesitindeki karbonmonoksit seviyeleri azalmaktadır. Tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında tünel köşelerindeki maksimum karbonmonoksit değerleri sırasıyla 14 ppm, 9 ppm ve 7 ppm şeklindedir. Fan sayısı arttıkça tünel içerisindeki karbonmonoksit düzeyi azalmaktadır. 950 N itme kuvvetine sahip üç özdeş fanlı durum ile 2035 N itme kuvvetine sahip tek fanlı durum karşılaştırıldığında her iki durumda da tünel hacminde başlangıçtaki karbonmonoksit seviyelerinin 60 dakika sonunda % 55 oranında azaldığı görülmektedir.

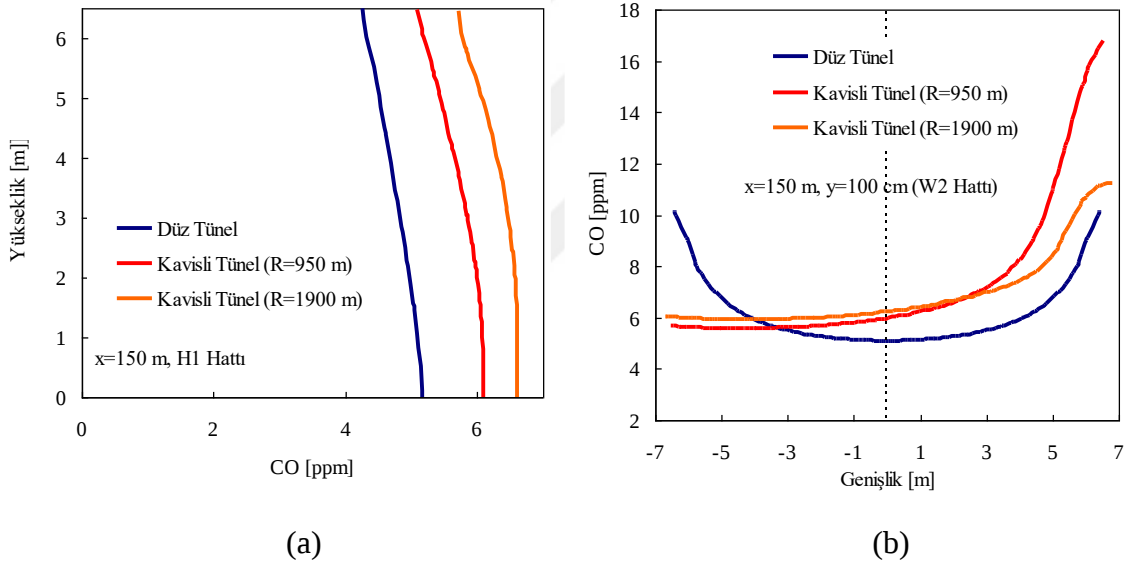


Şekil 153.  $x=150$  m' farklı fan sayılarında karbonmonoksit dağılımları  
(a) Tek fan (b) İki özdeş fan (c) Üç özdeş fan

#### 4.2.5. Taşıtsız Fanlı Kavisli Tünelde Kavis Etkisi

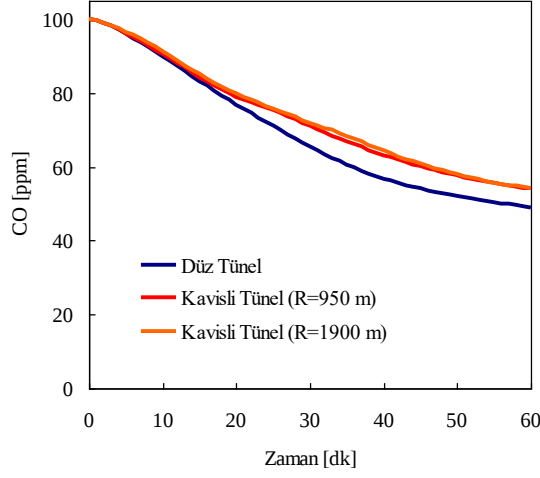
Şekil 154a'da, 950 N fan itme kuvvetinde, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde,  $x=150$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hatlarında başlangıçta 100 ppm olan karbonmonoksit seviyeleri 60 dakika sonunda düz tünel,  $R=950$  m yarıçapındaki kavisli tünel ve  $R=1900$  m yarıçapındaki kavisli tünel durumlarında sırasıyla 5 ppm, 6 ppm ve 7 ppm düzeylerine düşmektedir. Şekil 154b'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 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Düz tünel durumunda, karbonmonoksit seviyesi, tünel orta bölgesinde düşük ve tünel duvarlarında yüksek değerler olarak simetrik bir görüntü oluşturmaktadır. Kavis etkisi nedeniyle, karbonmonoksit 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 karbonmonoksit değeri tünelin iç bükey tarafındaki duvarında  $R=950$  m yarıçapındaki kavis durumunda 17 ppm olarak hesaplanmaktadır. Şekil 154c’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 100 ppm düzeyinde olan karbonmonoksit seviyelerinin 60 dakika boyunca tünel hacmi içerisindeki değişimleri görülmektedir. 60 dakika sonunda karbonmonoksit düzeyleri, düz tünel ve kavisli tünel durumlarında sırasıyla 49 ppm ve 54 ppm olmaktadır. Tünel hacmi içerisinde karbonmonoksit seviyesindeki azalmada kavis yarıçapındaki değişimin etkili olmadığı görülmektedir. Tünel geometrileri karşılaştırıldığında tünel hacminde oluşan karbonmonoksit seviyesini azaltmada düz tüneldeki fan kullanımının daha etkili olduğu görülmüştür.



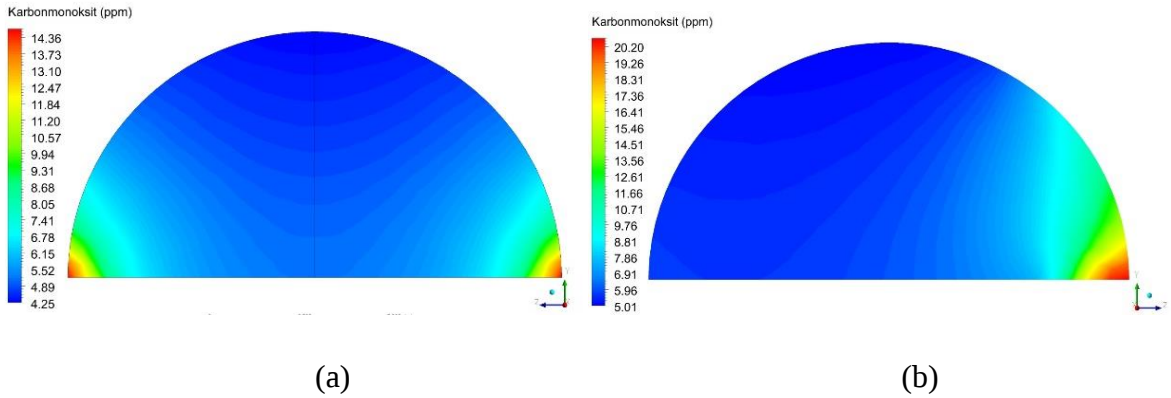
Şekil 154. 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki karbonmonoksit profilleri  
 (a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (c) Karbonmonoksit değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 154'ün devamı



(c)

Şekil 155'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 karbonmonoksit dağılımları görülmektedir. Düz tünel durumunda fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbonmonoksit değerleri azalmaktadır. Fan ve kavis etkisiyle yaya seviyesinin iç bükey tarafındaki tünel duvarına yakın bölge hariç en kesitin büyük bölümünde karbonmonoksit değerleri azalmaktadır. Maksimum karbonmonoksit değeri tünelin iç bükey tarafındaki duvarında  $R=950$  m yarıçapındaki kavis durumunda 20 ppm olarak hesaplanmaktadır.



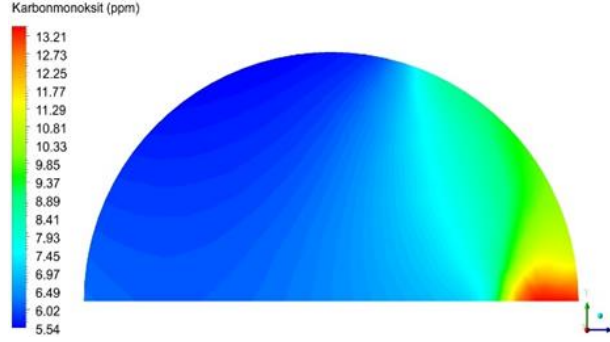
(a)

(b)

Şekil 155.  $x=150$  m'de 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki karbonmonoksit dağılımları

(a) Düz tünel (b)  $R=950$  m yarıçapa sahip kavisli tünel (c)  $R=1900$  m yarıçapa sahip kavisli tünel

Şekil 155'in devamı

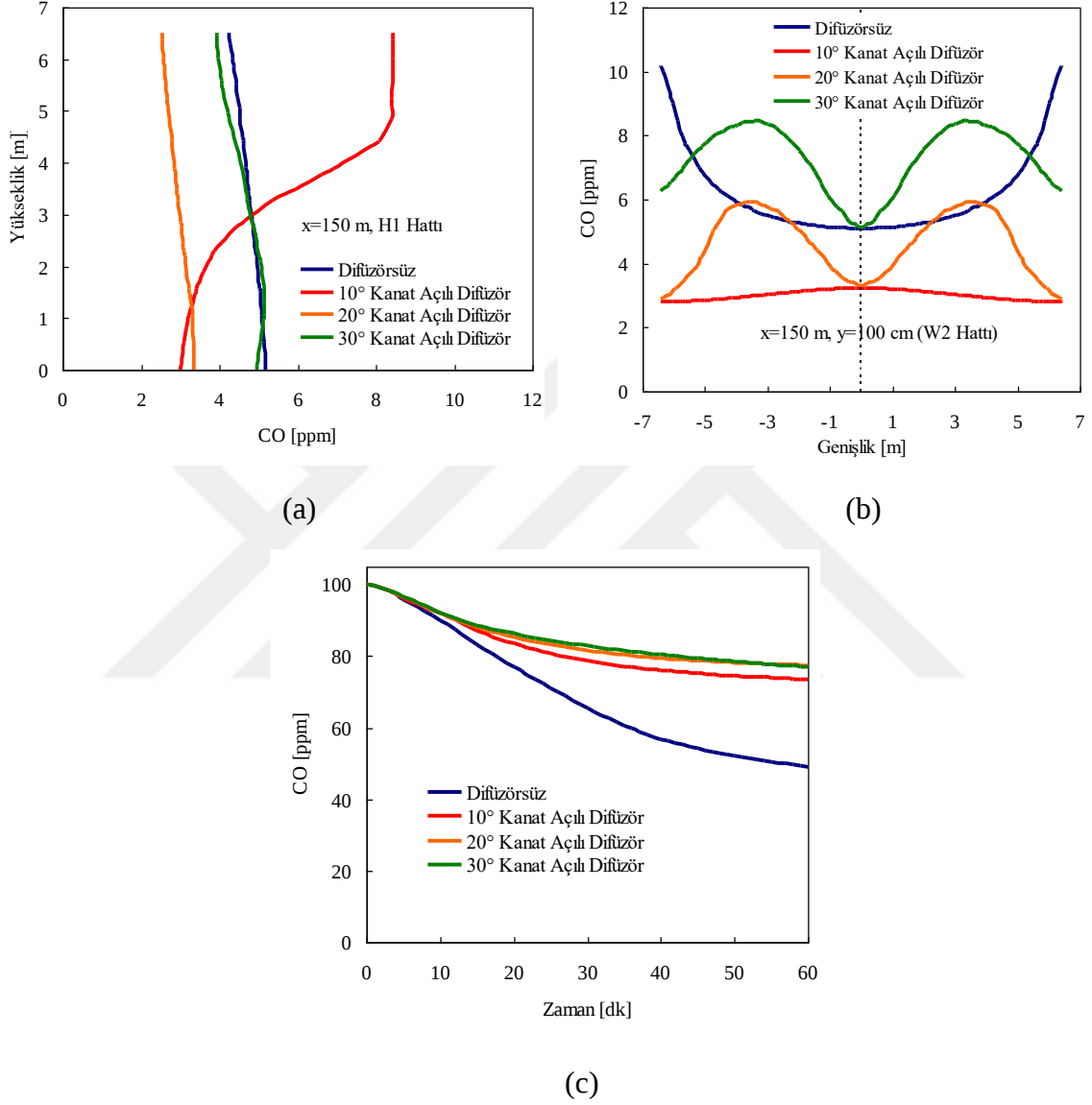


(c)

#### 4.2.6. Taşıtsız Fanlı ve Difüzörlü Düz Tünelde Difüzör Kanat Açısı Etkisi

Şekil 156a'da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, difüzörsüz durumda ve difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerlerinde,  $x=150$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. H1 hattındaki karbonmonoksit dağılımları difüzörsüz durumda ve difüzör kanat açısının  $30^\circ$  olduğu durumda benzer olmaktadır. Difüzör kanat açısının  $20^\circ$  olduğu durumda ortalama karbonmonoksit seviyesi 3 ppm olarak en düşük değerde olmaktadır. Şekil 156b'de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, difüzörsüz durumda ve difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerlerinde,  $x=150$  m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hatlarında hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Difüzörsüz durumda tünel kesitinin orta bölgesinde düşük olan karbonmonoksit düzeyi tünel yan duvarlarında yüksek olarak simetrik bir görüntü oluşturmaktadır. Difüzörlü durumlarda en düşük karbonmonoksit seviyesi difüzör kanat açısının  $10^\circ$  olduğu durumda oluşmaktadır. Şekil 156c'de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, difüzörsüz durumda ve difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerlerinde,  $x=150$  m istasyonunda başlangıçta 100 ppm düzeyinde olan karbonmonoksit seviyelerinin 60 dakika boyunca tünel hacmi içerisindeki değişimleri görülmektedir. 60 dakika sonunda karbonmonoksit düzeyleri, difüzörsüz durumda 49 ppm, difüzörlü durumlarda ise difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerleri için sırasıyla 73 ppm, 77 ppm ve 77 ppm olmaktadır. Tünel hacmi içerisinde karbonmonoksit seviyesindeki azalmada

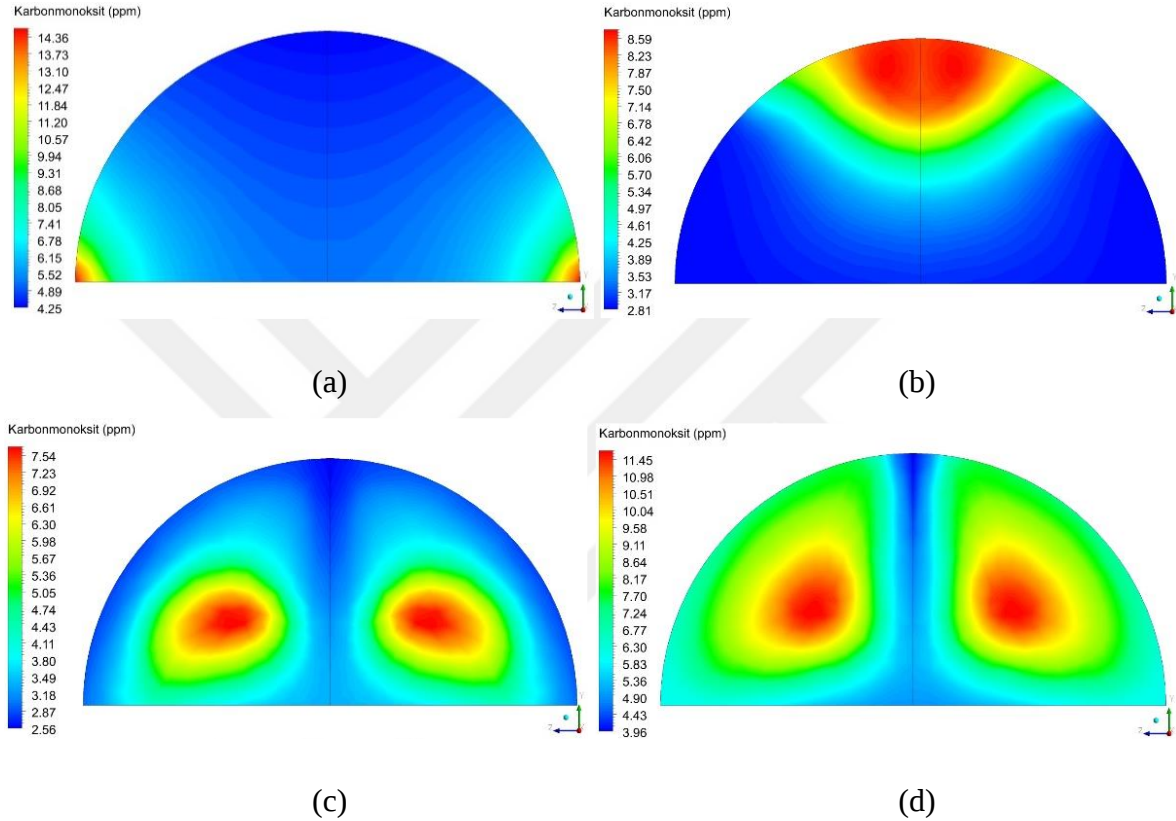
difüzör kullanımının avantajlı olmadığı görülmektedir. Difüzörlü durumlar kendi içerisinde değerlendirildiğinde, difüzör kanat açısının  $10^\circ$  olduğu durumun karbonmonoksit seviyesini azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 156. 950 N fan itme kuvvetinde difüzörsüz ve farklı difüzör açısına sahip fanlı tünellerdeki karbonmonoksit dağılımları  
(a) H1 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbonmonoksit değerleri (c) Karbonmonoksit değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 157’de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, difüzörsüz durumda ve difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerlerinde,  $x=150$  m istasyonunda tünel en kesitlerinde hesaplanmış karbonmonoksit değerleri görülmektedir. Difüzörsüz fanlı düz tünel

durumunda fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbonmonoksit değerleri azalmaktadır. Difüzörlü durumlarda, difüzör kanat açısının  $10^\circ$  değerinde en yüksek karbonmonoksit değerleri fan hizasında oluşmaktadır. Difüzör kanat açısının  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  olduğu durumlarda ise, en yüksek karbonmonoksit değerleri tünel düşey orta hattının sağ ve sol taraflarında oluşmaktadır.



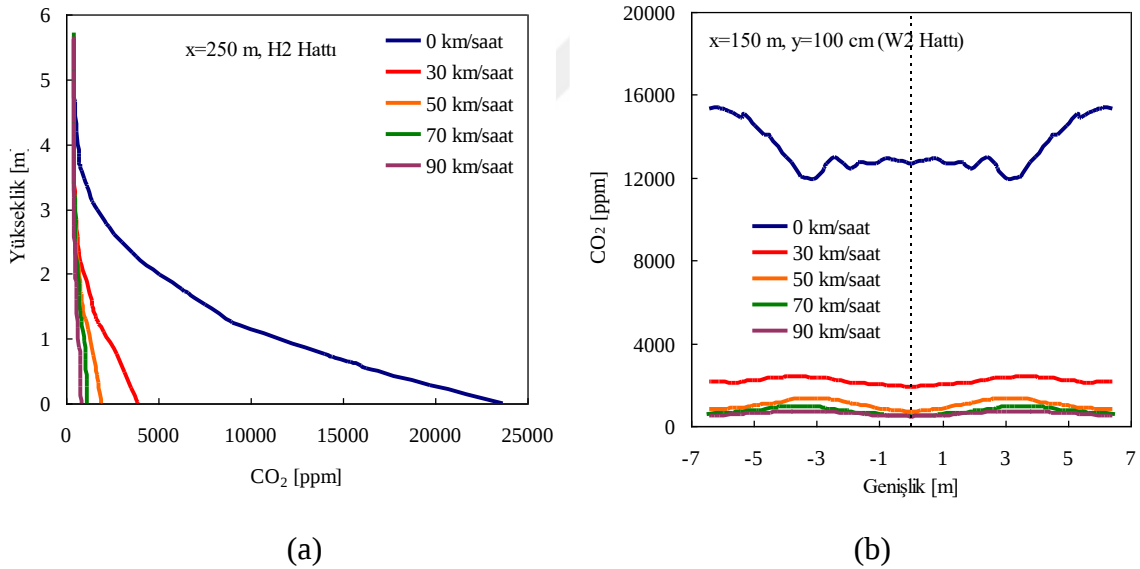
Şekil 157.  $x = 150$  m’de 950 N fan itme kuvvetinde difüzörsüz ve farklı difüzör açısına sahip fanlı tünellerdeki karbonmonoksit dağılımları  
(a) Difüzörsüz fanlı (b)  $10^\circ$  kanat açılı difüzörlü (c)  $20^\circ$  kanat açılı difüzörlü (d)  $30^\circ$  kanat açılı difüzörlü

### 4.3. Tünel İçerisindeki Karbondioksit Dağılımları

#### 4.3.1. Düz Tünelde Taşıt Hızı Etkisi

Şekil 158a’da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde  $x=250$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H2 hatlarında hesaplanmış karbondioksit profilleri görülmektedir. 0 km/saat taşıt hızında, tünel tabanında 23500 ppm olarak en yüksek düzeyine ulaşan karbondioksit değeri,  $y=3$  m seviyesine kadar hızlı bir şekilde azalmakta 400 ppm değerine düşmektedir. Taşıt hızı

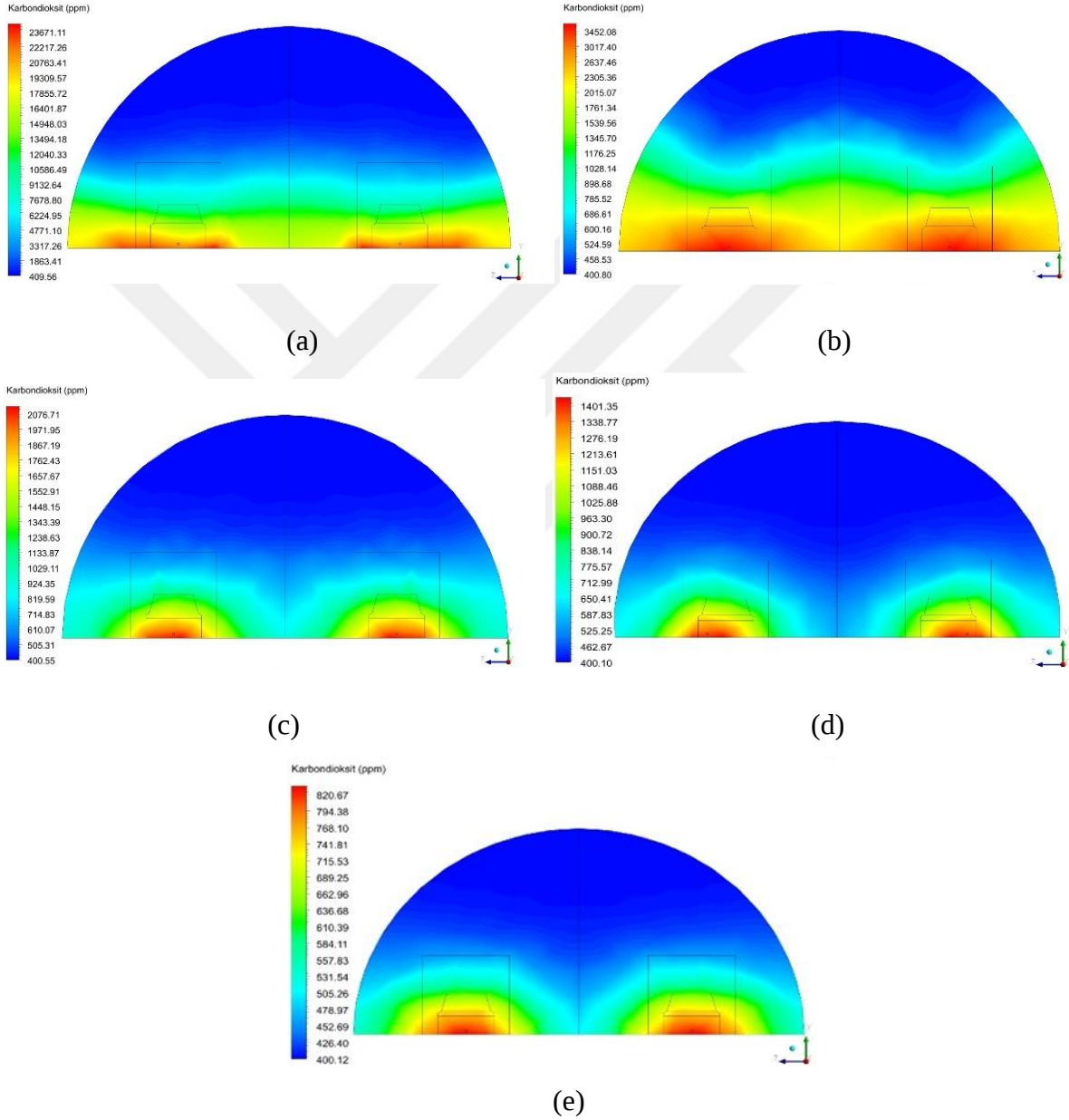
arttıkça H2 hattındaki karbondioksit değerleri azalmakta ve taşıt hızının 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde sırasıyla 3900 ppm, 1900 ppm, 1150 ppm ve 830 ppm olmaktadır. Benzer şekilde, Fre vd. (1994) de azalan taşıt hızına bağlı olarak karbondioksit seviyelerinin arttığını belirtmişlerdir. Dong vd. (2017) tarafından taşıt hızının 40 km/saat değerinde gerçekleştirilen sayısal bir çalışmada, tünel içerisindeki karbondioksit seviyesinin 3000 ppm ile 6000 ppm arasında değiştiği ve düşük hava akışı nedeniyle karbondioksitin tünel taban bölgesinde yoğunlaştığı belirtilmiştir. Mevcut çalışmada benzer taşıt hızında hesaplanan karbondioksit değerlerinin Dong vd. (2017) tarafından elde edilen değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 158b’de, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde  $x=250$  m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hatlarında hesaplanmış karbondioksit profilleri görülmektedir. 0 km/saat taşıt hızında, tünel yan duvarları yakınında karbondioksit değerleri yüksek olmaktadır. Aynı hat üzerinde taşıt arkasına karşılık gelen bölgede karbondioksit değerleri düşmektedir.



Şekil 158. Farklı taşıt hızlarındaki karbondioksit profilleri  
(a) H2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 159’da, iki şeritli düz tünel içerisinde taşıt hızının 0 km/saat, 30 km/saat, 50 km/saat, 70 km/saat ve 90 km/saat değerlerinde  $x=250$  m istasyonunda tünel en kesitlerinde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir. 0 km/saat taşıt hızında karbondioksitin havadan daha ağır olması nedeniyle tünel en kesitindeki karbondioksit etkisi tünel taban bölgesinde daha yoğun olmaktadır. Taşıt hızının küçük değerlerinde ( $\leq 30$

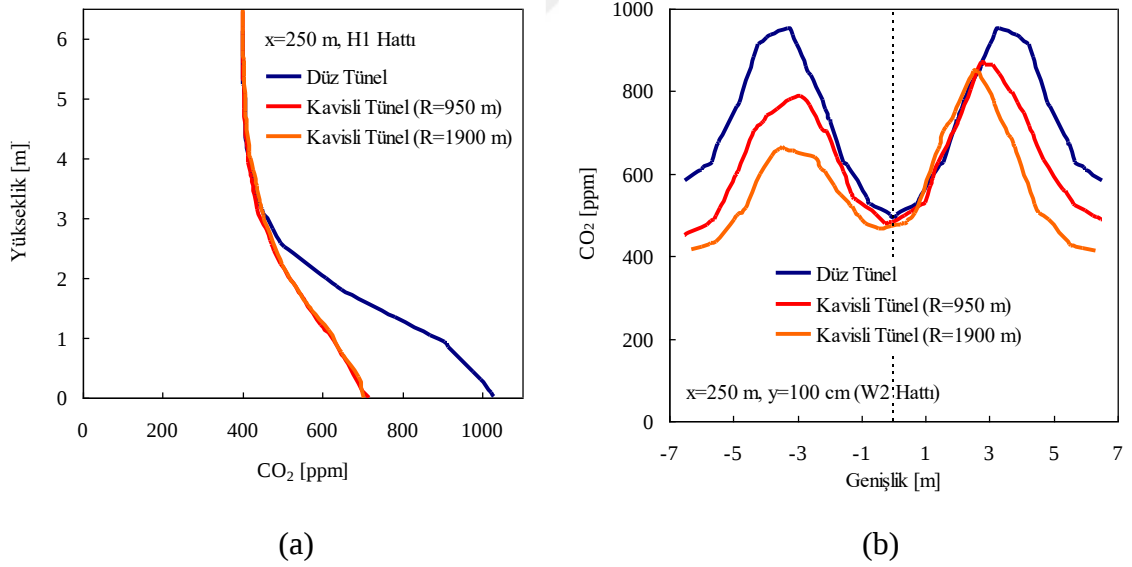
km/saat) tünel en kesitindeki karbondioksit daha geniş bir alana yayılırken taşıt hızının daha yüksek değeriinde (>30 km/saat) süpürme etkisiyle karbondioksit dağılımının taban bölgesinde yoğunlaştığı görülmektedir. Egzoz civarında maksimum olan karbondioksit değeri taşıt hızı arttıkça azalmaktadır. 0 km/saat hızında 23500 ppm olan maksimum karbondioksit 90 km/saat taşıt hızında 800 ppm düzeyine inmektedir.



şekil 159. x=250 m’de farklı taşıt hızlarındaki karbondioksit dağılımları  
(a) 0 km/saat (b) 30 km/saat (c) 50 km/saat (d) 70 km/saat (e) 90 km/saat

#### 4.3.2. Taşıtlı Kavisli Tünellerde Kavis Etkisi

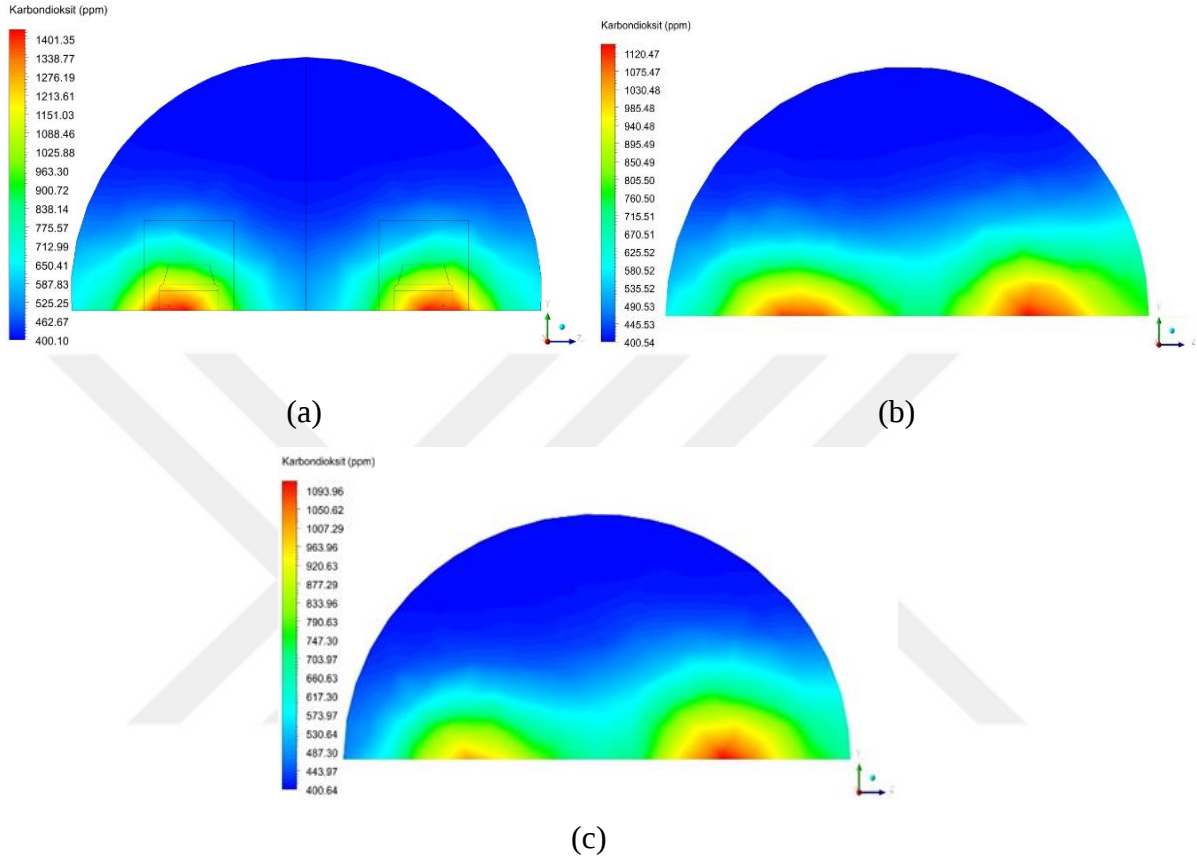
Şekil 160a'da, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde taşıt hızının 70 km/saat değerinde  $x=250$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Düz tünelde, tünel tabanında 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 160b'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 hatlarında 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 160. 70 km/saat taşıt hızlarındaki düz ve kavisli tünellerdeki karbondioksit profilleri  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbondioksit değerleri

Şekil 161'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.

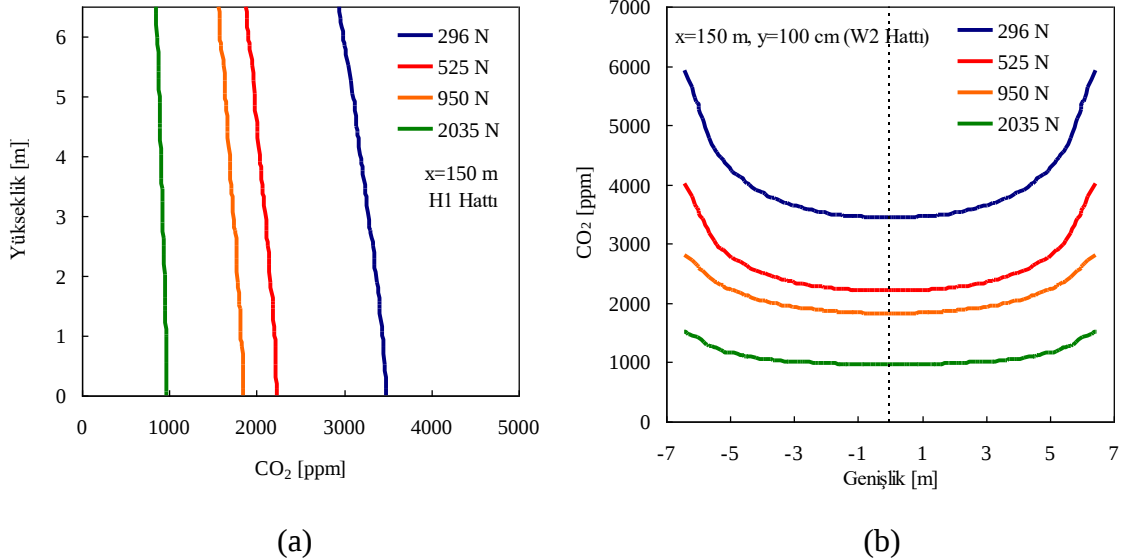


Şekil 161.  $x=250$  m’de 70 km/saat taşıt hızındaki karbondioksit dağılımları  
(a) Düz tünel (b)  $R=950$  m yarıçapındaki kavisli tünel (c)  $R=1900$  m yarıçapındaki kavisli tünel

#### 4.3.3. Taşıtsız Fanlı Düz Tünelde İtme Kuvveti Etkisi

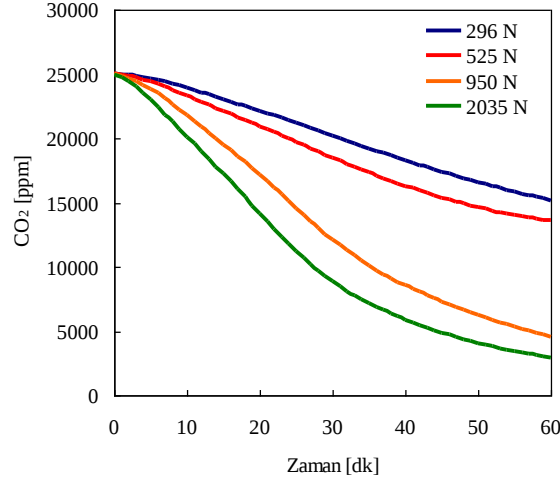
Şekil 162a’da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan durumunda, fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde  $x=150$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hatlarında başlangıçta 25000 ppm olan karbondioksit seviyeleri 60 dakika sonunda fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde sırasıyla 3500 ppm, 2200 ppm, 1800 ppm ve 1000 ppm düzeylerine düşmektedir. Şekil 162b’de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel

tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan durumunda, fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde  $x=150$  m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Tünelin orta bölgesinde fan etkisiyle azalan karbondioksit değerleri, tünel yan duvarlarında en yüksek olmaktadır. Tünel yan duvarlarında başlangıçta 25000 ppm olan karbondioksit seviyeleri 60 dakika sonunda fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde sırasıyla 5900 ppm, 4000 ppm, 2800 ppm ve 1500 ppm düzeylerine düşmektedir. Şekil 162c’de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan durumunda, başlangıçta 25000 ppm düzeyinde olan karbondioksit seviyelerinin 60 dakika boyunca tünel hacmi içerisindeki değişimleri fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerleri için görülmektedir. 60 dakika sonunda karbondioksit düzeyleri, fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerleri için sırasıyla 15000 ppm, 13500 ppm, 4600 ppm ve 2900 ppm olmaktadır. Karbondioksit seviyesindeki en büyük azalma % 88 ile 2035 N itme kuvvetinde gerçekleşmiştir. Tao vd. (2016) tarafından fan itme kuvvetinin 296 N değerinde gerçekleştirilen sayısal çalışmada, fan etkisiyle karbondioksit seviyesinin % 53 oranında azaltıldığı belirtilmiştir. Bu oran mevcut çalışmada aynı itme kuvvetinde elde edilen azalma oranıyla uyumludur.



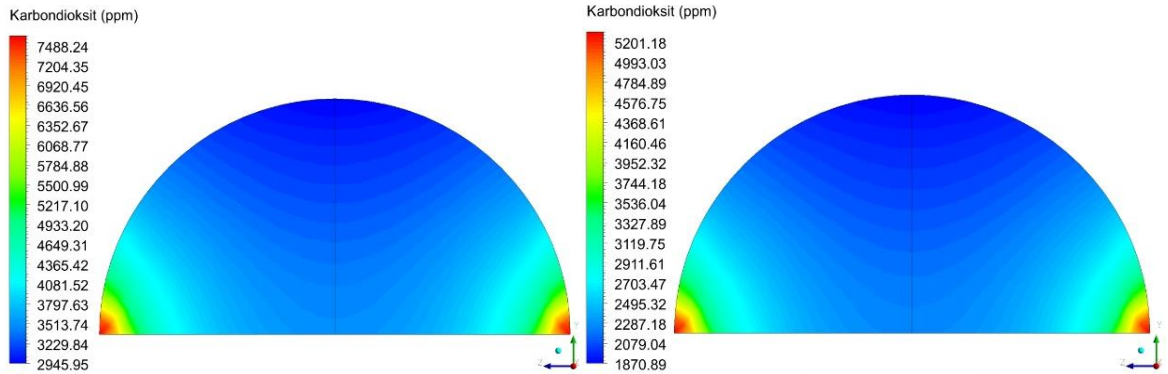
Şekil 162. Farklı fan itme kuvvetlerinde karbondioksit profilleri  
 (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (c)  
 Karbondioksit değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 162'nin devamı



(c)

Şekil 163'de, iki şeritli düz tünel içerisinde tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan durumunda, fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerlerinde  $x=150$  m istasyonunda tünel en kesitlerinde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir. İncelenen tüm fan itme kuvveti değerlerinde, fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır. Fan itme kuvveti arttıkça tünel en kesitindeki karbondioksit seviyeleri azalmaktadır. Fan itme kuvvetinin 296 N, 525 N, 950 N ve 2035 N değerleri için tünel köşelerinde maksimum karbondioksit değerleri sırasıyla 7500 ppm, 5200 ppm, 3500 ppm ve 1900 ppm şeklindedir. Fan kullanımı tünel içerisindeki karbondioksit düzeyini azaltmada etkili olmaktadır.



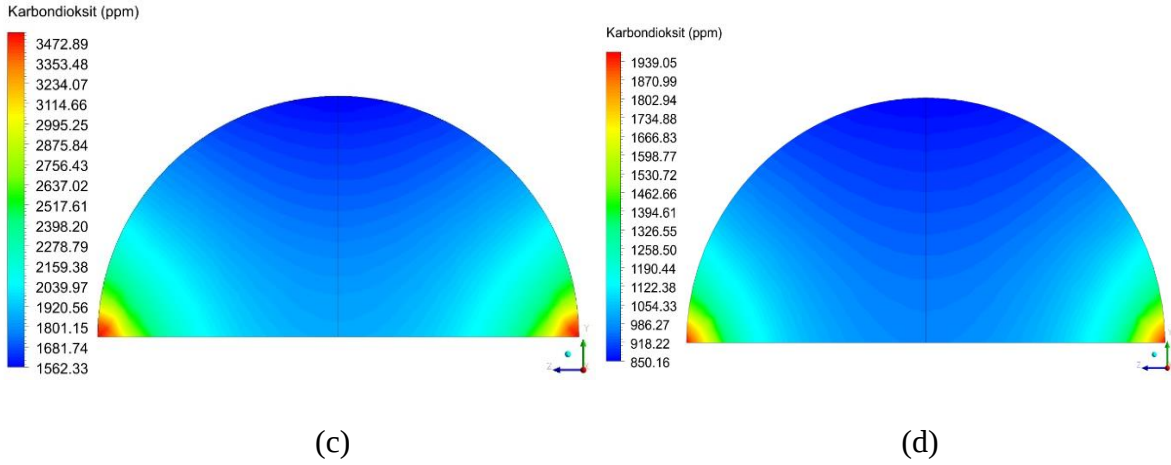
(a)

(b)

Şekil 163.  $x=150$  m'de farklı fan itme kuvvetlerinde karbondioksit dağılımları

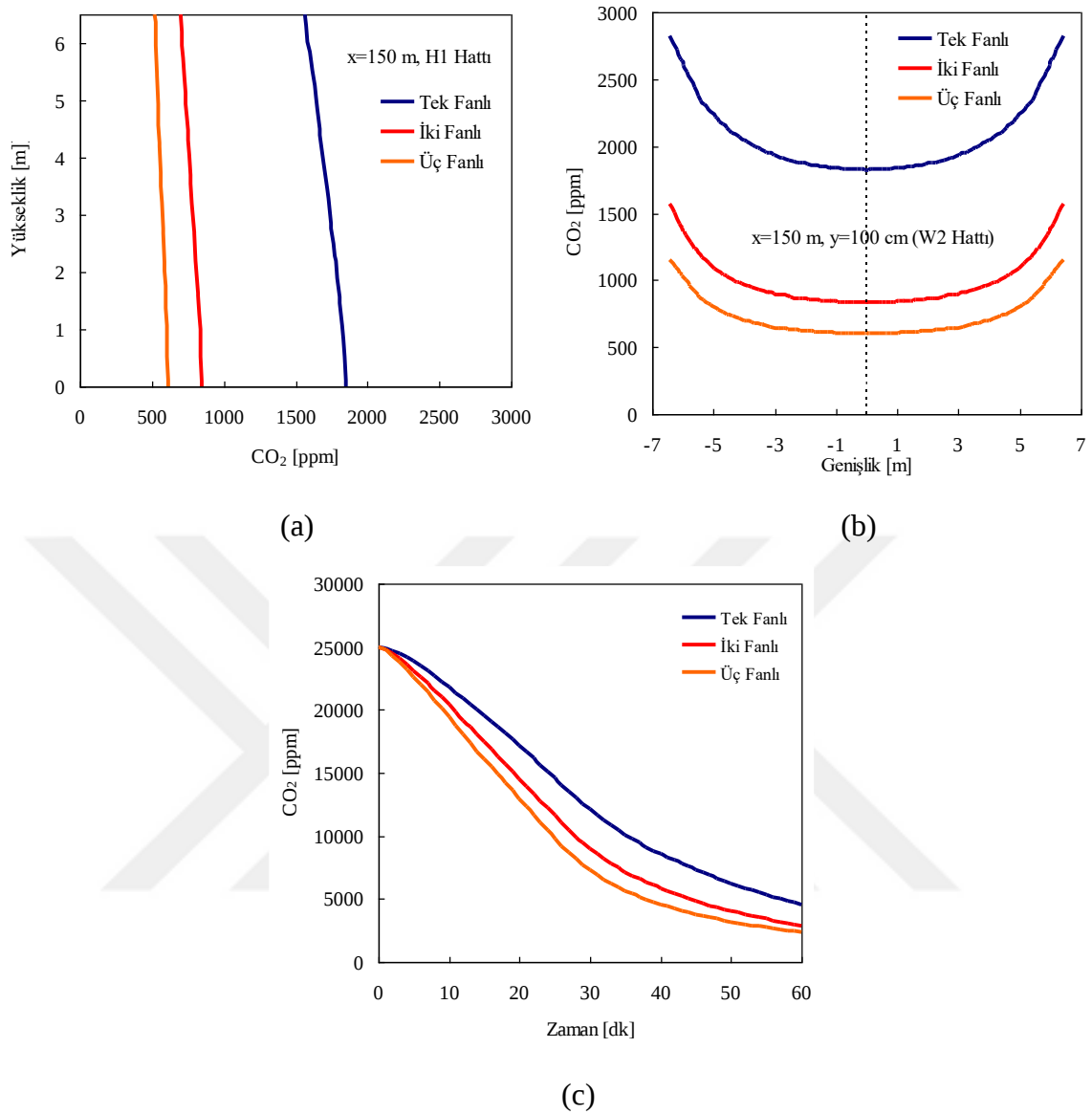
(a) 296 N (b) 525 N (c) 950 N (d) 2035 N

Şekil 163'ün devamı



#### 4.3.4. Taşıtsız Fanlı Düz Tünelde Fan Sayısı Etkisi

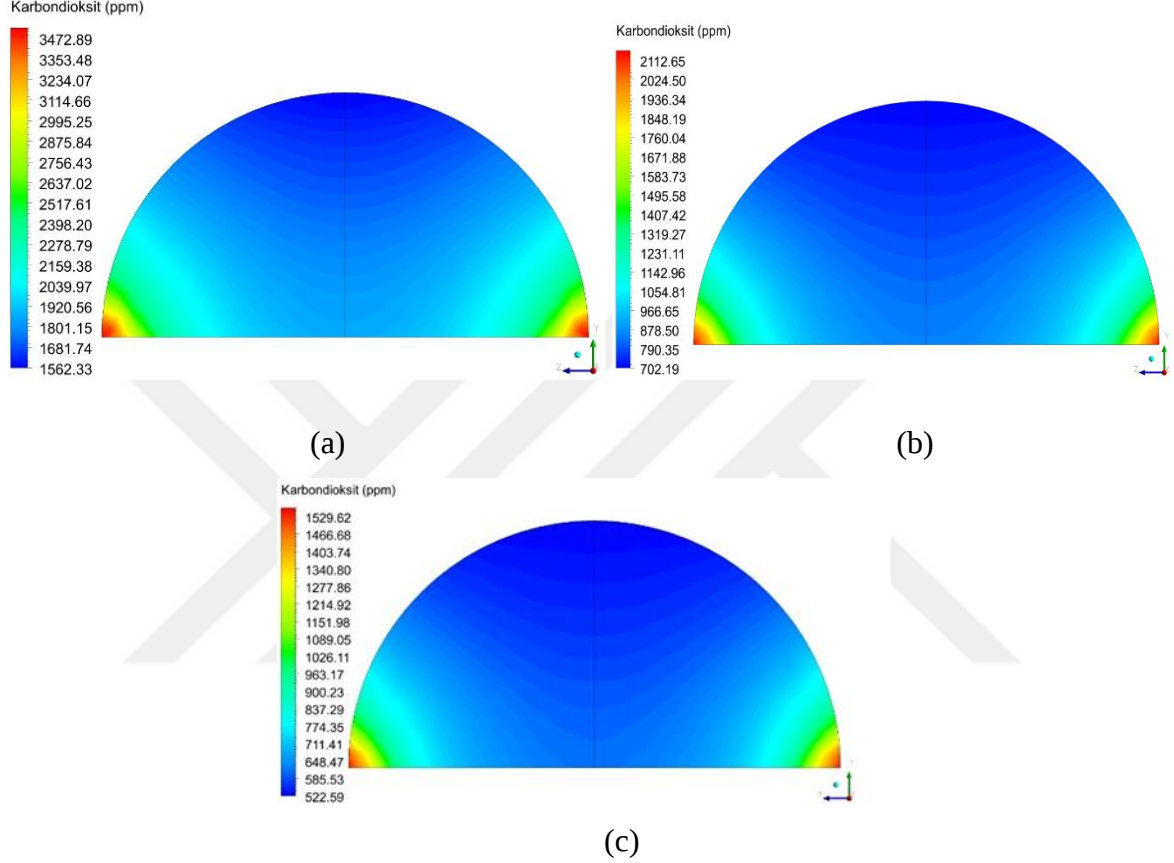
Şekil 164a'da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında 950 N itme kuvvetinde,  $x=150$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hatlarında başlangıçta 25000 ppm olan karbondioksit seviyeleri 60 dakika sonunda tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında sırasıyla 1800 ppm, 800 ppm ve 600 ppm düzeylerine düşmektedir. Şekil 164b'de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında, 950 N itme kuvvetinde,  $x=150$  m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Tünelin orta bölgesinde fan etkisiyle azalan karbondioksit değerleri, tünel yan duvarlarında en yüksek olmaktadır. Tünel yan duvarlarında başlangıçta 25000 ppm olan karbondioksit seviyeleri 60 dakika sonunda tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında sırasıyla 2800 ppm, 1550 ppm ve 1150 ppm düzeylerine düşmektedir. Şekil 164c'de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında 950 N itme kuvvetinde,  $x=150$  m istasyonunda, başlangıçta 25000 ppm düzeyinde olan karbondioksit seviyelerinin 60 dakika boyunca tünel hacmi içerisindeki değişimleri görülmektedir. 60 dakika sonunda karbondioksit düzeyleri, tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumları için sırasıyla 4600 ppm, 2900 ppm ve 2350 ppm olmaktadır. Karbondioksit seviyesindeki en büyük azalma % 94 ile üç özdeş fanlı durumda gerçekleşmiştir.



Şekil 164. Farklı fan sayılarında karbondioksit profilleri  
 (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (c)  
 Karbondioksit değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 165’de, iki şeritli düz tünel içerisinde tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında 950 N itme kuvvetinde,  $x=150$  m istasyonunda tünel en kesitlerinde hesaplanmış karbondioksit dağılımları görülmektedir. İncelenen her üç fan sayısı durumunda da, fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır. Fan sayısı arttıkça tünel en kesitindeki karbondioksit seviyeleri azalmaktadır. Tek fan, özdeş iki fan ve özdeş üç fan durumlarında tünel köşelerindeki maksimum karbondioksit değerleri sırasıyla 3500 ppm, 2100 ppm ve 1500

ppm şeklindedir. Fan sayısı arttıkça tünel içerisindeki karbondioksit düzeyi azalmaktadır. 950 N itme kuvvetine sahip üç özdeş fanlı durum ile 2035 N itme kuvvetine sahip tek fanlı durum karşılaştırıldığında her iki durumda da tünel hacminde başlangıçtaki karbondioksit seviyelerinin 60 dakika sonunda birbirine yakın oran azaldığı görülmektedir.

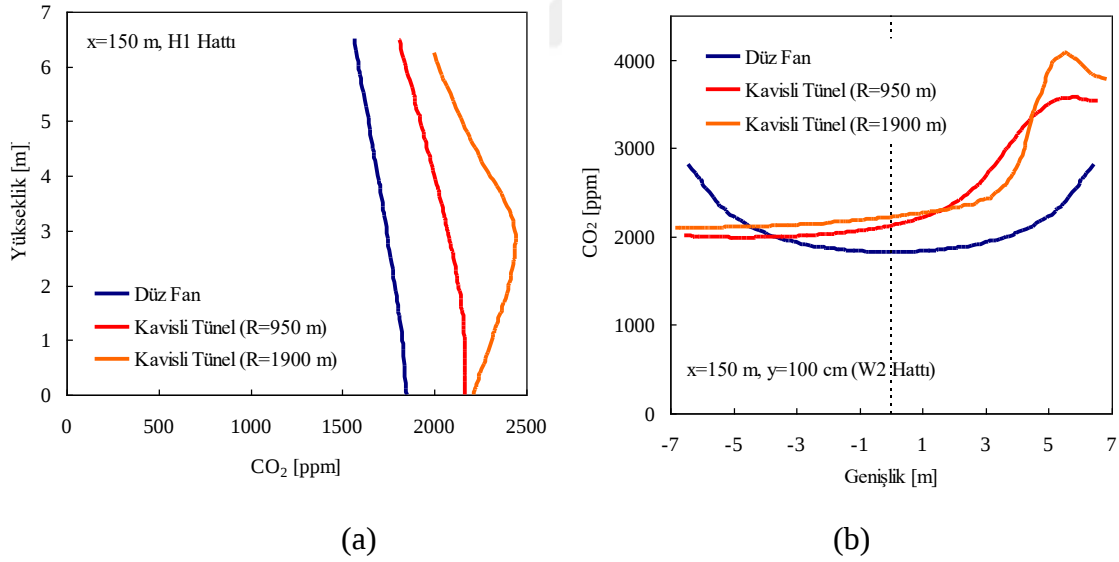


Şekil 165.  $x=150$  m' farklı fan sayılarında karbondioksit dağılımları  
(a) Tek fan (b) İki özdeş fan (c) Üç özdeş fan

#### 4.3.5. Taşıtsız Fanlı Kavisli Tünelde Kavis Etkisi

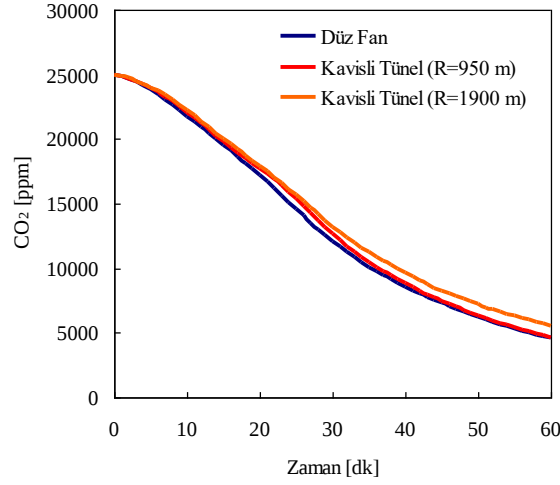
Şekil 166a'da, 950 N fan itme kuvvetinde, 500 m uzunluğundaki iki şeritli bir düz tünel ve 950 m ve 1900 m yarıçap değerlerine sahip kavisli iki tünel içerisinde,  $x=150$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Fan konumundan 50 m sonraki  $x=150$  m istasyonunda, H1 hatlarında 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 166b'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 hatlarında 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 166c’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 seviyelerindeki azalmalar, düz tünel ve kavisli tünel durumlarında birbirine benzer şekilde yaklaşık % 50 oranında olmaktadır. Tünel hacmi içerisinde karbondioksit seviyesindeki azalmada kavis yarıçapındaki değişimin etkili olmadığı görülmektedir.



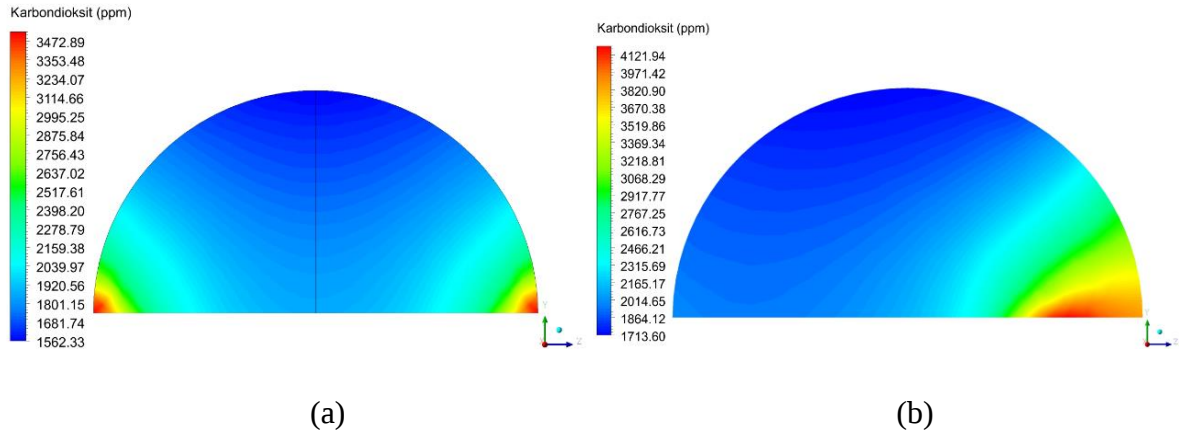
Şekil 166. 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki karbondioksit profilleri (a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (c) Karbondioksit değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 166'nın devamı



(c)

Şekil 167'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 167.  $x=150$  m'de 950 N fan itme kuvvetinde düz ve kavisli tünellerdeki karbondioksit dağılımları  
 (a) Düz tünel (b)  $R=950$  m yarıçapa sahip kavisli tünel (c)  $R=1900$  m yarıçapa sahip kavisli tünel

Şekil 167'nin devamı

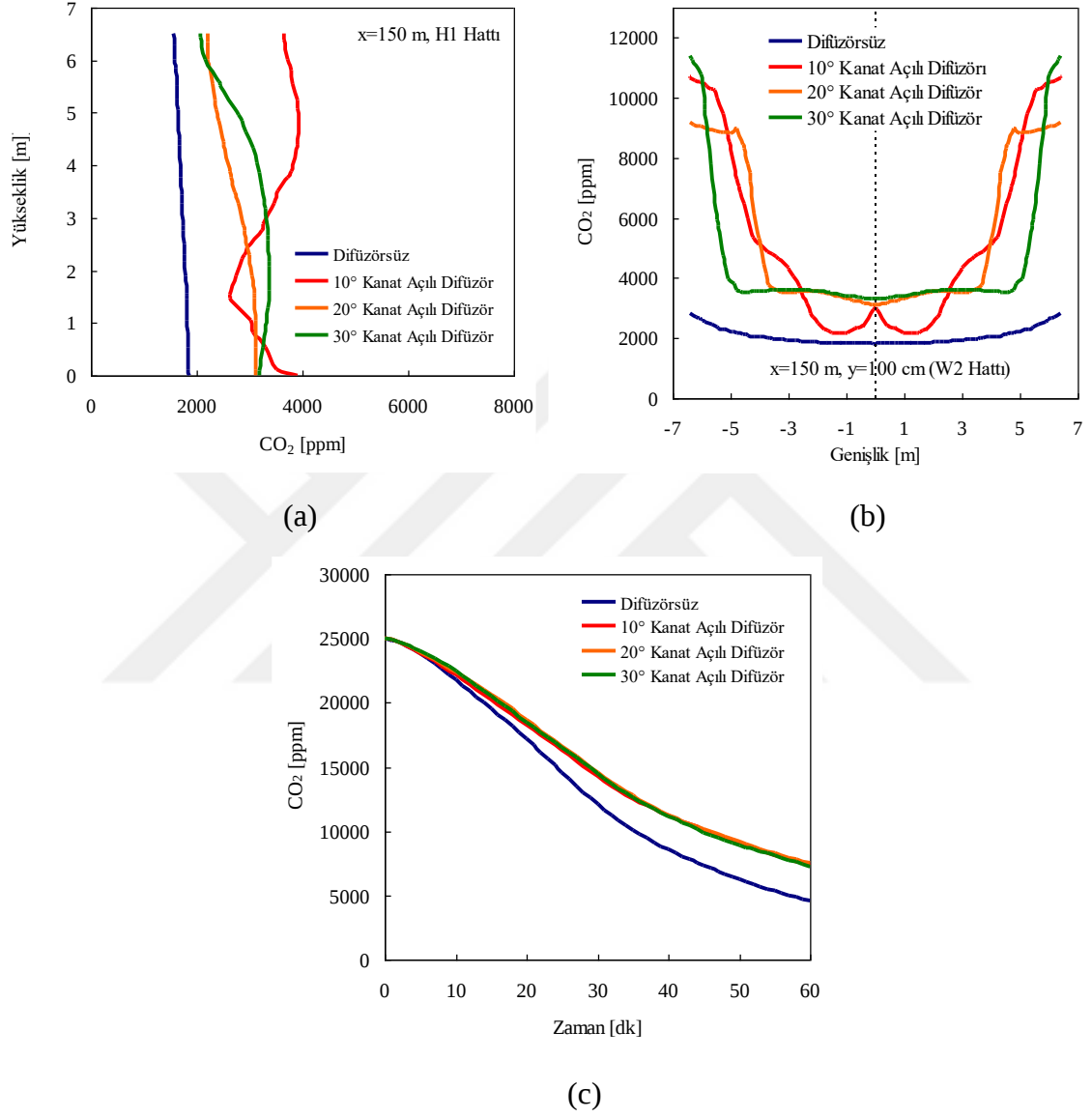


(c)

#### 4.3.6. Taşıtsız Fanlı ve Difüzörlü Düz Tünelde Difüzör Kanat Açısı Etkisi

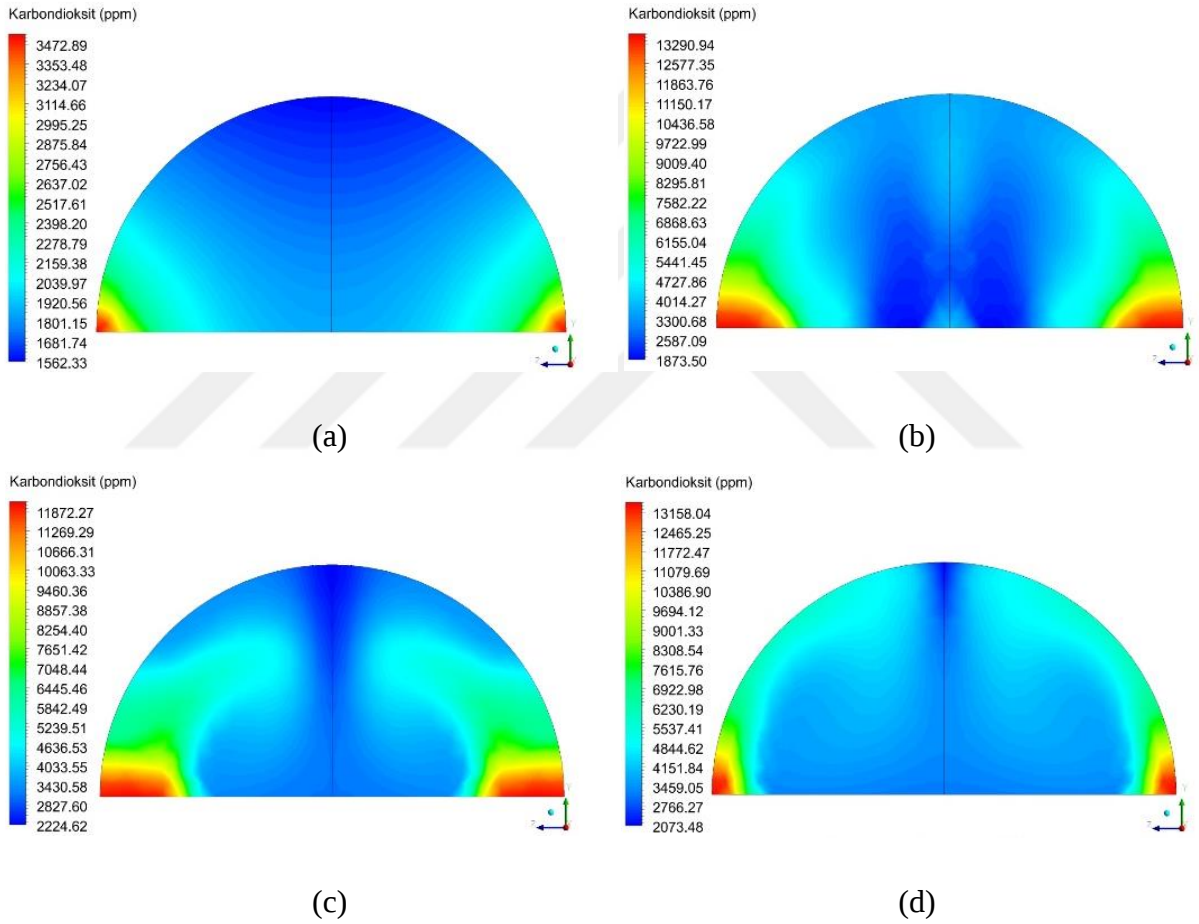
Şekil 168a'da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, difüzörsüz durumda ve difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerlerinde,  $x=150$  m istasyonunda düşey doğrultudaki H1 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Difüzörsüz durumda H1 hattındaki karbondioksit seviyesi 1800 ppm olurken, difüzörlü durumlarda bu seviye daha yüksek olmaktadır. Difüzör kanat açısının  $20^\circ$  olduğu durumda ortalama karbondioksit seviyesi 3000 ppm olarak en düşük değerde olmaktadır. Şekil 168b'de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, difüzörsüz durumda ve difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerlerinde,  $x=150$  m istasyonunda yatay doğrultudaki W2 hatlarında hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Difüzörsüz durumda tünel kesitinin orta bölgesinde düşük olan karbondioksit düzeyi tünel yan duvarlarında yüksek olarak simetrik bir görüntü oluşturmaktadır. Difüzörlü durumlarda en düşük karbondioksit seviyesi difüzör kanat açısının  $10^\circ$  olduğu durumda tünel orta bölgesinde oluşmaktadır. Şekil 168c'de, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, difüzörsüz durumda ve difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerlerinde,  $x=150$  m istasyonunda başlangıçta 25000 ppm düzeyinde olan karbondioksit seviyelerinin 60 dakika boyunca tünel hacmi içerisindeki değişimleri görülmektedir. 60 dakika sonunda karbondioksit düzeyleri, difüzörsüz durumda 4600 ppm, difüzörlü durumlarda ise difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerleri için sırasıyla 7300 ppm, 7500 ppm ve 7250 ppm olmaktadır. Tünel hacmi içerisinde karbondioksit

seviyesindeki azalmada difüzör kullanımının avantajlı olmadığı görülmektedir. Difüzörlü durumlar kendi içerisinde değerlendirildiğinde, difüzör kanat açısının  $30^\circ$  olduğu durumun karbondioksit seviyesini azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 168. 950 N fan itme kuvvetinde difüzörsüz ve farklı difüzör açısına sahip fanlı tünellerdeki karbondioksit dağılımları  
(a) H1 hatlarındaki karbondioksit değerleri (b) W2 hatlarındaki karbondioksit değerleri (c) Karbondioksit değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 169’da, iki şeritli düz tünel içerisine tünel girişinden 100 m ileride tünel tavanına yakın bir konumda yerleştirilmiş 950 N itme kuvvetinde, difüzörsüz durumda ve difüzör kanat açısının  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  değerlerinde,  $x=150$  m istasyonunda tünel en kesitlerinde hesaplanmış karbondioksit değerleri görülmektedir. Difüzörsüz fanlı düz tünel durumunda fanın üfleme etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır. Difüzörlü durumlarda da benzer şekilde fanın üfleme etkisi ve yerçekimi etkisiyle yaya seviyesinin tünel duvarlarına yakın bölgeleri hariç en kesitin büyük bölümünde karbondioksit değerleri azalmaktadır.



Şekil 169.  $x = 150$  m mesafede 950 N fan itme kuvvetinde difüzörsüz ve farklı difüzör açısına sahip fanlı tünellerdeki karbondioksit dağılımları  
(a) Difüzörsüz fanlı (b)  $10^\circ$  kanat açılı difüzörlü (c)  $20^\circ$  kanat açılı difüzörlü (d)  $30^\circ$  kanat açılı difüzörlü

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, karayolları tünellerindeki taşıtların egzozlarından yayılan kirlетici gazlardan karbonmonoksit ve karbondioksitin tünел içerisindeki dağılımları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla, ilk önce Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan Akyazı Tüneli'nde karbondioksit ölçümleri ile sınırlı tutulan deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise taşıtlı ve taşıtsız durumlar için tünел içerisindeki üç boyutlu akış alanları zaman bağımlı olarak kapsamlı sayısal çözümlerle incelenmiştir. Sayısal çalışmaların ilk aşamasında, içerisinde taşıt bulunan iki şeritli 500 m uzunluğundaki düz bir tünелde farklı taşıt hızlarında ve tünел geometrisinin iki farklı kavisli formunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmaların taşıtsız durumları içeren ikinci aşamasında ise, aynı boyutlardaki tünел içerisine yerleştirilmiş fan durumunda, fan itme kuvvetinin, tünел kavis durumunun, fan sayısının ve fana eklenmiş difüzör durumunda difüzör kanat açısının tünел içerisindeki karbonmonoksit ve karbondioksit düzeylerine etkisi incelenmiştir. Düz tünелde taşıt hızı etkisi, taşıtlı kavisli tünellerde kavis etkisi, taşıtsız fanlı düz tünелde fan itme kuvveti ve fan sayısı etkisi, taşıtsız fanlı kavisli tünелde kavis etkisi ve taşıtsız fanlı ve difüzörlü düz tünелde difüzör kanat açısı etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Taşıtlı düz tünелde, düşey doğrultuda parabolik görüntüdeki hız profillerini oluşturan yerel hız değerleri artan taşıt hızı ile birlikte artmaktadır.
2. Taşıtlı düz tünелde, taşıt hızı arttıkça tünел en kesitindeki maksimum hız değerleri daha geniş bir bölgeye yayılmaktadır.
3. Taşıtlı kavisli tünellerde, kavis etkisiyle tünелin dış bükey tarafındaki hız değerleri artmakta, iç bükey tarafındaki hız değerleri ise azalmaktadır.
4. Taşıtsız fanlı düz tünелde, yatay ve düşey doğrultudaki hız değerleri artan fan itme kuvvetiyle ve artan fan sayısı ile birlikte artmaktadır.
5. Taşıtsız fanlı kavisli tünellerde hız değerleri iç bükey tarafta daha yüksek, dış bükey tarafta ise daha düşük olmaktadır.
6. Taşıtlı düz tünелde, taşıt hızı arttıkça yatay ve düşey doğrultudaki karbonmonoksit ve karbondioksit değerleri azalmaktadır.
7. Taşıtlı kavisli tünellerde, kavis etkisiyle yatay ve düşey doğrultudaki karbonmonoksit ve karbondioksit değerleri azalmaktadır.

8. Taşıtlı kavisli tünellerde, karbonmonoksit ve karbondioksit dağılımları tünellerin iç bükey tarafında yoğun olmaktadır.

9. Taşıtsız fanlı düz tünelde, fan itme kuvveti ve fan sayısı arttıkça yatay ve düşey doğrultudaki karbonmonoksit ve karbondioksit değerleri azalmaktadır.

10. Taşıtsız fanlı düz tünelde, tek fanlı durumda 2035 N itme kuvvetinde ve üç özdeş fanlı durumda 950 N itme kuvvetinde tünel hacmindeki karbonmonoksitteki azalma aynı oranla % 55 olmaktadır.

11. Taşıtsız fanlı kavisli tünellerde, kavis etkisi nedeniyle, karbonmonoksit ve karbondioksit değerleri tünel kesitinin dış bükey tarafındaki sol bölgesinde düşük, iç bükey tarafındaki sağ bölgesinde büyük olmaktadır.

12. Taşıtsız fanlı ve difüzörlü düz tünelde, tünel hacmi içerisinde karbonmonoksit ve karbondioksit seviyelerindeki azalmada difüzör kullanımı dezavantajlı olmaktadır.

13. Taşıtsız fanlı düz tünelde, tek fanlı durumda 2035 N itme kuvvetinde ve üç özdeş fanlı durumda 950 N itme kuvvetinde tünel hacmindeki karbondioksitteki azalma oranları sırasıyla % 88 ve % 94 olmaktadır.

14. Tünel hacmi içerisinde karbonmonoksit ve karbondioksit seviyelerindeki azalmada kavis yarıçapındaki değişim etkili olmamaktadır.

15. Sayısal çalışmada kullanılan türbülans modelleri değerlendirildiğinde Standart k- $\epsilon$  modeli ile elde edilen sonuçlar deneysel verilerle daha iyi bir uyum göstermektedir.

## 6. ÖNERİLER

Karayolları tünellerinde taşıt kaynaklı kirleticilerin dağılımının daha kapsamlı incelenmesine yönelik aşağıdaki çalışmalar yapılabilir.

1. Farklı tünel tipleri için saha çalışması yapılarak tünel içerisindeki kirlilik durumu farklı zaman dilimlerini içerecek ölçümlerle incelenebilir.
2. Farklı taşıt tiplerinin tünel içerisindeki kirliliğe olan etkisi incelenebilir.
3. Fan içeren çalışmalarda fan konumu ve fanlar arası mesafe etkisi ayrıntılı olarak incelenebilir.
4. Akış alanları, zamana bağımlılık içeren LES ve DNS gibi ileri türbülans modelleri ile incelenerek deneysel verilere daha yakın sayısal sonuçlar türetilir.

## 7. KAYNAKLAR

- Abuaishah, M.B.A.M. (2019). *Flow Characterization Study And Fire Experiments in a Reduced Scaled Tunnel*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Agren,,C. (1991). *EMEP Report*, MCS-W 1/91, Norveç.
- Akal, D. (2013) İç Ortam Hava Kirliliği Vve Çalışanlara Olumsuz Etkileri, *ÇSGB Çalışma Dünyası Dergisi*, 1(1), 112-119.
- Al-Mutairi, N. Z., Almutairi, T., & Matar, H. B. (2020). Concentration of Carbon Monoxide in an Enclosed Parking Garage, *American Journal Of Engineering And Applied Sciences*, 13(3), 402-408.
- Altay, M.(2016). *Tünel Yangınlarının Modellenmesi ve Etkin Parametrelerin Modellemedeki Gerçekçiliğinin İncelenmesi*, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
- Babadi, K. A., Khorasanizadeh, & H., Aghaei, A. (2022). 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*, 193, 106677.
- 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.
- Başıbeyaz, M. (2023). *Tünel Yangınlarında Jet Fanların Konumu Hava İletim Yönü ve Fan Hızının Tahliye Etkisinin Simülasyon ile İncelenmesi*, Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bingöl.
- Batur, B., & Akgün, M. (2017). Dış Ortam Hava Kirliliği İle İlgili Standartların Gelişimi ve Dünyadaki Dış Ortam Hava Kirliliği Standartlarının Karşılaştırılması, *Termodinamik*, 298, 84-90
- Bhautmage, U., & Gokhale, S. (2016). Effects Of Moving-Vehicle Wakes on Pollutant Dispersion Inside a Highway Road Tunnel. *Environmental Pollution*, 218, 783-793.
- Bilge, M. İ., (2018). *CFD Simulation of Train Fire in The İstanbul Metro Tunnel*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Canitz, G., Ciesta, C., Green, K., Sanders, J., Valencia, J., Willingham, J., & Fonseca, D. (2024). Capturing CO<sub>2</sub> Emissions in The George C. Wallace Tunnel: A Case Study. *Intelligent Control and Automation*, 15(3), 83-94.
- Chaloulakou, A., Duci, A., & Spyrellis, N. (2002). Exposure to Carbon Monoxide In Enclosed Multi-Level Parking Garages In The Central Athens Urban Area. *Indoor and Built Environment*, 11(4), 191-201.

- Chen, T.Y., Lee, T.T., & Hsu, C.C. (1998). Investigation of Piston-Effect and Jet Fan-Effect in Model Vehicle Tunnels, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 73, 99-110.
- Chen, K. S., Chung, C. Y., Wang, S. & W. (2002). Measurement and Three-Dimensional Modeling of Airflow and Pollutant Dispersion in an Undersea Traffic Tunnel, *Journal of The Air & Waste Management Association*, 52(3), 349-363.
- 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.
- Cheng, R., Chen, W., Hao, H., & Li, J. (2021). A State-Of-The-Art Review of Road Tunnels Subject to Blast Loads, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 112, 103911.
- Colella F. (2010). *Multiscale Modelling Of Tunnel Ventilation Flows And Fires*, Politecnico Di Torino, Diparti”Mento Di Energetica Dottora Tezi, İtalya.
- De Fré, R., Bruynseraede, & P., Kretzschmar, J. G. (1994). Air Pollution Measurements in Traffic Tunnels. *Environmental Health Perspectives*, 102(4), 31-37.
- De Vito, S., Del Giudice, A., D’Elia, G., Esposito, E., Fattoruso, G., Ferlito, S., & Di Francia, G. (2023). Correlating Air Pollution Concentrations and Vehicular Emissions in an Italian Roadway Tunnel by Means of Low Cost Sensors. *Atmosphere*, 14(4), 679.
- Deng, Y., Chen, C., Li, Q., Hu, Q., Yuan, H., Li, J., & Li, Y. (2015). Measurements of Real-World Vehicle CO and NO<sub>x</sub> Fleet Average Emissions in Urban Tunnels of Two Cities in China, *Atmospheric Environment*, 122, 417-426.
- Denhez, F. (2017). *Küresel Isınma Atlası*, İstanbul: NTV Yayınları,
- 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.
- Durşen, M., & Yasun, B. (2012). Yeraltı Madenlerinde Bulunan Zararlı Gazlar Ve Metan Drenajı. Ankara: İSGÜM.
- 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.
- FHWA (Federal Highway Administration). (2009). Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels - Civil Elements, Washington DC: FHWA-NHI-10-034, U.S. Department of Transportation.
- Fluent Inc. (2001). Fluent 6 Users Guide.
- Greiner, T. H., & Schwab, C. V. (1998). Carbon Monoxide Exposure from a Vehicle in a Garage. *Thermal Envelopes VII, Indoor Air Quality And Sustainability*, 209-216.

- Gültek, A. S. (2017). *Tünel Yangınlarında Sıcaklık Değişiminin Bir Model Üzerinde DeneySEL ve Sayısal Olarak İncelenmesi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- 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.
- Resmi Gazete. (2008). *Hava Kalitesi Değerlendirme vve Yönetimi Yönetmeliği*. Cumhurbaşkanlığı Basımevi 26898.
- Hu, L. H., Tang, F., Yang, D., Liu, S., & Huo, R. (2010). Longitudinal Distributions of CO Concentration and Difference with Temperature Field in a Tunnel Fire Smoke Flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(13-14), 2844-2855.
- İncecik, S. (1994). *Hava Kirliliği*, İstanbul: Teknik Üniversite Matbaası.
- Kara, N. (2019). *Bir Otoyol Tünelini Kullanarak Emisyon Faktörlerinin Belirlenmesi ve Modellenmesi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Karaaslan, S., Hepkaya, E., & Yucel, N. (2013). CFD Simulation of Longitudinal Ventilation Systems in a Scaled Short Tunnel, *Isı Bilimi Ve Tekniği Dergisi*, 33(1).
- Kayılı, S. (2005). *CFD Simulation of Fire and Ventilation in The Stations of Underground Transportation Systems*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Kayılı, S. (2009). *Effect of Vehicles' Blockage On Heat Release Rate in Case of Tunnel Fire*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- 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.
- Kristensson, A., Johansson, C., Westerholm, R., Swietlicki, E., Gidhagen, L., Wideqvist, U., & Vesely, V. (2004). Real-World Traffic Emission Factors of Gases and Particles Measured in a Road Tunnel in Stockholm, Sweden, *Atmospheric Environment*, 38(5), 657-673.
- 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.
- Launder, B.E., & Spalding D.B. (1974). The Numerical Computation of Turbulent Flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269-289.
- Li, Q., Chen, C., Yuan, H., Wang, L., Xu, S., & Li, Y. (2018). Prediction of Pollutant Concentration and Ventilation Control in Urban Bifurcate Tunnel, China, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 82, 406-415.

- 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.
- Longley, I. (2018). TP07: Criteria for In-Tunnel and Ambient Air Quality, Advisory Committee On Tunnel Air Quality. National Institute and Atmospheric Research.
- Luther, M. B., Horan, P., & Tokede, O. (2018). Investigating CO<sub>2</sub> Concentration and Occupancy in School Classrooms at Different Stages in Their Life Cycle. *Architectural Science Review*, 61(1-2), 83-95.
- 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.
- Nie, W., Liu, X., Liu, C., Guo, L., & Hua, Y. (2022). Prediction of Dispersion Behavior of Typical Exhaust Pollutants from Hydraulic Support Transporters Based on Numerical Simulation, *Environmental Science and Pollution Research*, 29(25), 38110-38125.
- Ning, M., Mengjie, S., Mingyin, C., Dongmei, P., & Shiming, D. (2016). 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*, 164, 906-915.
- Papakonstantinou, K. A., Kiranoudis, C. T., & Markatos, N. C. (2002). Numerical Simulation of CO<sub>2</sub> Dispersion in an Auditorium. *Energy and Buildings*, 34(3), 245-250.
- 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.
- PIARC (2008). Road Tunnels, Operational Strategies for Emergency Ventilation, Technical Committee C3.3 Tunnel Operations, Working Group No. 6 Ventilation and Fire Control, World Road Association.
- Ren, J., He, J., Kong, X., Xu, W., Kang, Y., Yu, Z., & Li, H. (2022). 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*, 254, 111620.
- Sağlam, S. (2019). *Farklı Mekanlarda Hava Kalitesinin İncelenmesi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- 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.
- Shafee, S. (2017). *An Experimental and Numerical Study On the Combustion Characteristics of Pool Fires in Tunnels*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.

- Shen, J., Zhu, H., Luo, M., & Liu, D. (2016). Numerical Simulation of CO Distribution Discharged by Flame-Proof Vehicle in Underground Tunnel of Coal Mine, *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*, 40, 117-121.
- Shi, X., Sun, D., Fu, S., Zhao, Z., & Liu, J. (2019). Assessing On-Road Emission Flow Pattern Under Car-Following Induced Turbulence Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Numerical Simulation. *Sustainability*, 11(23), 6705.
- Shi, X., Sun, D., Zhang, Y., Xiong, J., & Zhao, Z. (2020). Modeling Emission Flow Pattern of a Single Cruising Vehicle On Urban Streets with CFD Simulation and Wind Tunnel Validation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 4557.
- Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A., & Zhu J. (1995). A New K-E Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows – Model Development and Validation, *Computers Fluids*, 24, 227-238.
- Sun, D. J., Shi, X., Zhang, Y., & Zhang, L. (2021). Spatiotemporal Distribution of Traffic Emission Based On Wind Tunnel Experiment and Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124495.
- 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.
- 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*, 1-6.
- 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.
- Teodosiu C., Ilie V., Dumitru R., & Teodosiu R. (2015). Numerical Evaluation of Ventilation Efficiency in Underground Metro Rail Transport Systems, *Energy Procedia*, 85, 539-549.
- TMMOB, M.M.O. (2010). Madencilikte Yaşanan İş Kazaları Raporu.
- Van Hooff, T., & Blocken, B. (2013). 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*, 61, 1-17.
- Villanueva, J., & Chen, D. (2020). Measurement of Carbon Monoxide Concentration Levels Within an Underground Parking Lot Throughout the Day, *BCIT Environmental Public Health Journal*. 1-14.
- 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.

- Wei, C., & Wang, M. (2020). 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*, 27, 31143-31152.
- Wilcox D.C. (2002). *Turbulence Modeling for CFD, Second Edition*, DCW Industries Inc., USA.
- Yang, H., Wang, H., & Wu, Y. (2022). Analysis of Dynamic Characteristics of CO<sub>2</sub> Concentration in Subway Cars. *In E3S Web of Conferences EDP Science*, 356, 02019.
- Zamorategui-Molina, A., Gutiérrez-Ortega, N. L., Baltazar-Vera, J. C., Del Ángel-Soto, J., & Tirado-Torres, D. (2021). Carbon Monoxide and Particulate Matter Concentrations Inside the Road Tunnels of Guanajuato City, Mexico. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(10), 210039.
- 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.
- İnternet Kaynakları:
- URL-1. (2024, Aralık 27). International Energy Agency (IEA). Statistics: Global Energy Data at Your Fingertips: <https://www.iea.org/statistics/> adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2023, Aralık 28). Pollutant Gases: <https://www.numesys.com.tr/ansys-fluent/> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2024, Ekim 16). Türkiye'deki Tünel Sayıları: <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/KoprueTunelBilgileri/tunelenvanterbilgileri.pdf> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2024, Eylül 08). Dış Ortam Hava Kalitesinin Limit Değerleri: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/dis-ortam-hava-kal-tes--webde-yayimlanan-20210517101404.doc> adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2024, Ekim 16). Dış Ortam Parametreleri: <https://sim.csb.gov.tr/Home/HKI?baslik=HAVZA%20%C4%B0ZLEME%20%C4%B0STEM%C4%B0> adresinden alınmıştır.
- URL-6. (2024, Haziran 21) Havalandırma Sistemleri: <https://www.muntes.net/havalandirma-sistemleri> adresinden alınmıştır.
- URL-7. (2024, Haziran 24). CO<sub>2</sub> gazının zarar düzeyleri: <https://www.maden.org.tr/icerik/gazlarla-ilgili-zararli-ortamlar-ve-gaz-guvenligi-7890> adresinden alınmıştır.
- URL-8. (2024, Eylül 10). Fan Standartları: <http://www.infinair.com/d/default/pdf/yfmr&tnv.pdf> adresinden alınmıştır.
- URL-9. (2024, Eylül 11). Zararlı Gazlar: [https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/ormankoruma\\_d0053.pdf](https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/ormankoruma_d0053.pdf) adresinden alınmıştır.

URL-10. (2024, Eylül 13). Havalandırma Sistemleri: <https://www.saltmuhendislik.com/hizmetlerimiz/havalandirma-sistemleri> adresinden alınmıştır.

URL-11. (2024, Aralık 10). Testo 480 Cihazı Kullanıcı Kılavuzu Instruction manual: [www.testo.com.tr](http://www.testo.com.tr) adresinden alınmıştır.



## ÖZGEÇMİŞ

Kerim SÖNMEZ, İlk, orta ve lise öğrenimini Adana'da tamamladı. 2009 yılında Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı ve buradan 2014 yılında bölüm birincisi ve fakülte ikincisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı ve 2017 yılında mezun oldu. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Teknoloji Transferi Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne Öğretim Görevlisi olarak atandı. Yine aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Şuan Karadeniz Teknik Üniversitesi Teknoloji Transferi Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Fikri Sınai Mülkiyet Hakları Koordinatörü olup, çok sayıda patent, faydalı model, tasarım başvurusu ve tescili bulunmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.