



**DUVAR KAPLAMASININ YOL TÜNELİ YANGININA
ETKİSİ**

Barbaros K



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DUVAR KAPLAMASININ YOL TÜNELİ YANGININA ETKİSİ

Barbaros KÜÇÜK
0000-0003-4267-9034

Doç. Dr. Onur YEMENİCİ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DUVAR KAPLAMASININ YOL TÜNELİ YANGININA ETKİSİ

Barbaros KÜÇÜK

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Onur YEMENİCİ

Dünyada olduğu gibi Türkiye’de de karayolu üzerinde birçok tünel bulunmakta ve sayıları giderek artmaktadır. Karayolu tünelleri ulaşım açısından kolaylık sağlamakla beraber işletilmesi ve güvenliğinin sağlanması açısından oldukça zor bir yapıdır. Hacimsel olarak kapalı bir kutu gibi düşünülen tünellerde yangın gibi olumsuz bir durumda tünel içerisinde neler olacağının belirlenmesi, olası senaryolar düşünüldükçe gerekli emniyet tedbirlerinin alınması gerekmektedir. Can güvenliği ile beraber içerideki sistemlerin ne derecede etkileneceğinin bilinmesi alınacak tedbirler ve kurulacak sistemlerin belirlenmesi açısından da büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın temeli tünel içerisindeki bir yangında oluşan yüksek sıcaklık dağılımının olası etkilerinin incelenmesidir. Bununla beraber beton duvarlar üzerine eklenecek herhangi bir katmanın sıcaklık dağılımını nasıl değiştireceği de araştırılmıştır.

Yangına bağlı oluşacak ısının duvar yüzeyinden transferi ve farklı özelliklere sahip katmanlar üzerinde etkileri incelenmiştir. Normalde tünel yapı itibarıyla, toprak yoğunluklu bir dağ içerisine gömülü beton yüzeylere sahip olduğundan çalışmada kullanılan model iki tabaka olarak tasarlanmıştır. Üçüncü tabaka olarak ise Kalsiyum-silikat, Alüminyum ve Nikel olmak üzere üç ayrı katman eklenerek, ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir. Nümerik analizler ANSYS/FLUENT programı ile standart k-ε modeli kullanılarak yapılmıştır. Herhangi bir fana yani cebri bir havalandırmaya sahip olmayan tüneller esas alınarak kütsel akışa sahip sıcak bir gaz üzerinden modelleme yapılmış ve çözümler zamana bağlı olarak yapılmıştır.

Üçüncü katman ile yapılan analizlerde en fazla ısı transferi Alüminyum ile Nikel tabakalarda elde edilmiştir. Sonuçlar üzerinde ısı iletim katsayısı ile beraber ısıl atalet, yoğunluk ve özgül ısının da etkili olduğu gözlenmiştir. Ayrıca üç katmanlı Kalsiyum-Silikat tabaka ile iki katmanlı tabakada benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yol tüneli, CFD, Duvar Kaplaması, Yangın, Isı İletim Katsayısı

2022, viii + 92 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

THE EFFECT OF THE WALL LINING ON ROAD TUNNEL FIRE

Barbaros KÜÇÜK

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Onur YEMENİCİ

As in the world, there are many tunnels on the highway in Turkey, and their number is gradually increasing. Although the road tunnel is convenient in terms of transportation, it is a very difficult structure to operate and ensure its safety. It is necessary to determine what will happen in the tunnel in a negative situation such as a fire in tunnels that are considered as a volumetrically closed box, and the necessary safety measures should be taken by considering possible scenarios. Along with life safety, knowing the extent to which the systems inside will be affected is also of great importance in terms of determining the measures to be taken and the systems to be installed.

The basis of this study is the study of the possible effects of the distribution of high temperature in a fire in a tunnel. In addition, it has also been investigated how any layer to be added on concrete walls will change the temperature distribution.

The transfer of heat from the wall surface due to fire and its effects on layers with different properties have been studied. The model used in the study is designed as two layers, since normally the tunnel structure has concrete surfaces embedded in a mountain of soil density. As the third layer, three separate layers were added, namely Calcium-silicate, Aluminum and Nickel, and the heat transfer characteristics were studied. Numerical analyses were performed using the ANSYS/FLUENT program and the standard k- ϵ model. Modeling was performed on a hot gas with mass flow based on tunnels that do not have any fan, that is, forced ventilation, and solutions were carried out depending on time.

In the study with the third layer, it was shown that the greatest heat transfer was achieved in Aluminum and Nickel layers, and the results were very close. It has been observed that thermal inertia, density and specific heat are also factors along with the heat conduction coefficient on the results. In addition, similar results were obtained with a three-layer Calcium-Silicate layer and a two-layer layer.

Key words: Road Tunnel, CFD, Wall Lining, Fire, Thermal Conductivity
2022, viii + 92 pages.

TEŞEKKÜR

Akademik çalışmamda fikir ve önerileriyle bana destek olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Onur Yemenici' ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında bana yol gösteren kardeşim Prof. Dr. Yasemin Küçük' e ve her zaman yanımda olan eşim Gülay Küçük' e teşekkür ediyorum.

Evin neşesi olan oğullarım Ege ve Efe' ye güzel bir gelecek diliyorum.

Bir parçası olduğum Karayolları ailesinin tüm çalışanlarına kolaylıklar diliyorum.

Barbaros KÜÇÜK
29/07/2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Genel Bakış	5
2.2. Deneysel Çalışmalar.....	5
2.2.1. Büyük Ölçekli Testler	5
2.2.2. Küçük Ölçekli Testler	7
2.3. Sayısal Çalışmalar	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM	11
3.1. Korunum Denklemleri	11
3.2. İletimle ısı transferi	14
3.3. Sayısal Analiz.....	15
3.4. CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği).....	17
3.4.1. Model oluşturma ve ölçeklendirme.....	17
3.4.2. Ağ Oluşturma	21
3.4.3. Ağ Bağımsızlık Çalışması.....	22
3.4.4. Akış Fizikinin Belirlenmesi	23
3.4.5. Sınır Şartları, Kabuller ve Isı Kaynağı Modeli	24
3.4.6. Çözüm şartları	26
3.4.7. Shell conduction modelleme	27
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	29
4.1. İki katmanlı Yapı ve Üç katmanlı Yapı İncelemeleri	29
4.2. 100s’lik Süre Analizleri	29
4.2.1. Gerçek boyutlarla yapılan analizler	29
4.2.2. Model ölçek ile yapılan analizler	38
4.3. 300 s’ lik Süre Analizleri	46
4.3.1. Gerçek boyutlarla yapılan analizler	46
4.3.2. Model ölçek ile yapılan analizler	53
4.4. 600s’lik Süre Analizleri	60
4.4.1. Gerçek boyutlarla yapılan analizler	60
4.4.2. Model Ölçek ile Yapılan Analizler	69
4.5. Tabakalar Arasında Duvar Sıcaklıklarının İncelemesi	78
4.6. Farklı Özellikte Duvar Tabakaları ile Analizler.....	80
4.6.1. Dört farklı malzeme ile yapılan analizler	81
4.6.2. Çelik ile duvar-4 katmanları kıyaslaması.....	84
5. SONUÇ	87
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	92

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
T	Sıcaklık (°K)
Q	HRR(MW)
Q_s	Ölçeğe göre HRR(MW)
Q_m	Gerçek HRR
$\dot{m}_g$	Gazın Kütlesel Debisi(kg/s)
T_g	Gaz Sıcaklığı(°K)
T_o	Ortam Sıcaklığı(°K)
C_p	Havanın Özgül Isısı(j/kgK)
p	İşletme Basıncı
A	Tünel Duvarı Yüzey Alanı(m ²)
k	Isı İletim Katsayısı(W/m K)
L	Duvar Kalınlığı(m)
l	Ölçek Faktörü
ρ	Yoğunluk(kg/m ³)
α	Isıl Yayılma Katsayısı(m ² /s)
Bi	Biot Sayısı
$ Fo$	Fourier Sayısı
I	Isıl Atalet(J/m ² /Ks ^{1/2})
Nu	Nusselt Sayısı
Ni	Nikel
Al	Alüminyum
St	Çelik
b	Isıl depolama kapasitesi(J/Km ³)

Kısaltmalar	Açıklama
CFD	Computational Fluid Dynamics
PIARC	Permanent International Association of Road Congress
FDS	Fire Dynamic Simulator
HRR	Heat Release Rate(Isı Salınım Oranı)
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
Calc	Kalsiyum Silikat
2-BT	Beton-Toprak İki katmanlı yapı
3-Calc	Kalsiyum-Silikat ile Üçüncü Tabaka
3-Al	Alüminyum ile Üçüncü Tabaka
3-Ni	Nikel ile Üçüncü Tabaka

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Yangının Evreleri (Kayılı, Köktürk ve Eralp, 2010).	2
Şekil 1.2 Gotthard tüneli yangını ve verdiği hasar görüntüleri.....	2
Şekil 3.1. Isı iletimi	14
Şekil 3. 2. Sayısal analiz çalışma şeması	16
Şekil 3.3. Tünel modeli genel görünümü	17
Şekil 3.4. Tünel kesit detayı	18
Şekil 3.5. Ağ yapısı	21
Şekil 3.6. Ağ yapısı dış görünüm detayı	21
Şekil 3.7. Akış fiziği şeması(Tu ve diğerleri 2020)	23
Şekil 3.8. Çözüm için bilgisayar ayarları ara yüzü	26
Şekil 3.9. Shell Conduction tasarımı	27
Şekil 3.10. Shell conduction metodunda ısıнын yayılım şekli	28
Şekil 4.1. Tünel iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı	30
Şekil 4.2. 200. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı.....	31
Şekil 4.3. 300. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı.....	31
Şekil 4.4. y-z düzleminde (x=0'da) sıcaklık dağılımı	32
Şekil 4.5 Sıcak gazın hız değişimi	33
Şekil 4.6. Tünel tavanının altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı	34
Şekil 4.7. 200. metrede y eksenı üzerinde sıcaklık dağılımı	35
Şekil 4.8. Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı	36
Şekil 4.9. Tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızı.....	37
Şekil 4.10. Tünel iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı	38
Şekil 4.11. 2. metre x-y düzleminde oluşan sıcaklık dağılımı	39
Şekil 4.12. 3. metre x-y düzleminde sıcaklık dağılımı.....	39
Şekil 4.13. y-z düzleminde(x=0'da) sıcaklık dağılımı	40
Şekil 4.14. Sıcak gazın hız değişimi	41
Şekil 4.15. Tünel tavanının altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı	42
Şekil 4.16. 2. metrede y eksenı üzerinde sıcaklık dağılımı.....	43
Şekil 4.17. Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı	44
Şekil 4.18. Tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızı.....	45
Şekil 4.19. Tünel iç yüzeyi üzerindeki sıcaklık dağılımı	46
Şekil 4.20. 200. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı.....	47
Şekil 4.21. 300.metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı	47
Şekil 4.22. y-z düzleminde(x=0'da) sıcaklık dağılımı	48
Şekil 4.23. Tünel tavanının altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı	49
Şekil 4.24. 200. metrede y eksenı üzerinde sıcaklık dağılımı	50
Şekil 4.25. Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı	51
Şekil 4.26. Tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızı.....	52
Şekil 4.27. Tünel iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı	53
Şekil 4.28. 2. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı.....	54
Şekil 4.29. 3. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı.....	54
Şekil 4.30. y-z düzleminde(x=0'da) sıcaklık dağılımı	55
Şekil 4.31. Tünel tavanının altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı	56
Şekil 4.32. 2. metrede y eksenı üzerinde sıcaklık dağılımı	57
Şekil 4.33. Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı	58
Şekil 4.34. Tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızı.....	59

Şekil 4.35.	Tünel iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı	60
Şekil 4.36.	200. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı	61
Şekil 4.37.	300. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı	61
Şekil 4.38.	y-z düzleminde($x=0$ 'da) sıcaklık dağılımı	62
Şekil 4.39.	Tünel içindeki akışkanın sıcaklık dağılımı	63
Şekil 4.40.	Sıcaklık gradyanı	64
Şekil 4.41.	Tünel tavanı altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı	65
Şekil 4.42.	200. metrede y ekseninde sıcaklık dağılımı	66
Şekil 4.43.	Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı	67
Şekil 4.44.	Tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızı	68
Şekil 4.45.	Tünel iç yüzeyinde sıcaklık dağılımı	69
Şekil 4.46.	2. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı	70
Şekil 4.47.	3. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı	70
Şekil 4.48.	y-z düzleminde($x=0$ 'da) sıcaklık dağılımı	71
Şekil 4.49.	Tünel içindeki akışkanın sıcaklık dağılımı	72
Şekil 4.50.	Sıcaklık gradyanı	73
Şekil 4.51.	Tünel tavanı altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı	74
Şekil 4.52.	2. metrede y ekseninde sıcaklık dağılımı	75
Şekil 4.53.	Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı	76
Şekil 4.54.	Tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızı	77
Şekil 4.55.	Duvar sıcaklıklarının temsili gösterimi	78
Şekil 4.56.	Tünel iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı	81
Şekil 4.57.	Tünel tavanı altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı	82
Şekil 4.58.	Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı	83
Şekil 4.59.	Tünel duvarı iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı	84
Şekil 4.60.	Tünel tavanı altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı	85
Şekil 4.61.	Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

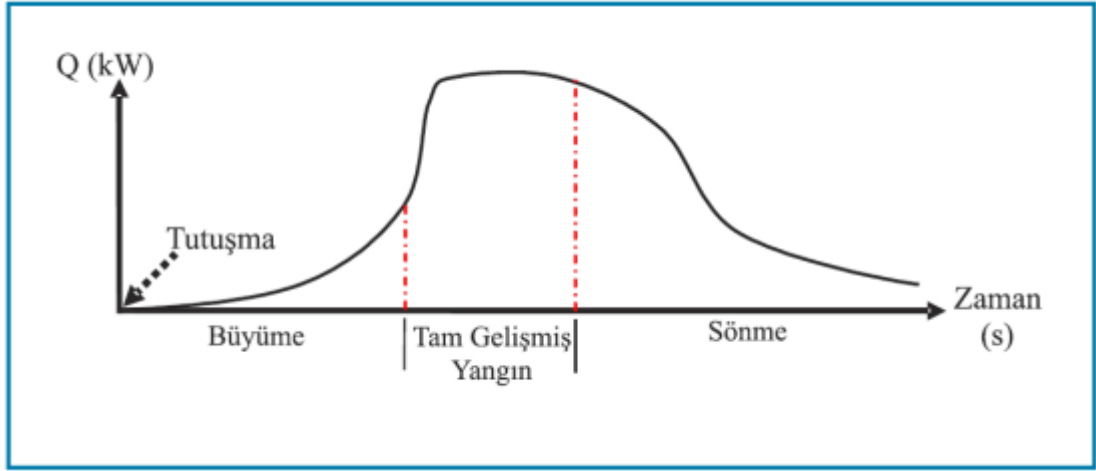
	Sayfa
Çizelge 2. 1. Yapılan büyük ölçekli testler (Ingason, 2006).....	6
Çizelge 3.1. Ağ eleman sayısı ile ısı transferi değişimi	22
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri.....	25
Çizelge 4.1. 300 s sonunda duvar katman sıcaklıkları	79
Çizelge 4.2. 600 s sonunda duvar katman sıcaklıkları	79
Çizelge 4.3. Farklı duvar katmanlarına ait özellikler	80



1. GİRİŞ

Dünyada olduğu gibi Türkiye’de de karayolu tüneli sayısı oldukça artmış ve zamanla bunlara yenileri eklenmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) bünyesinde 466 adet, 651 km toplam uzunluğunda tünel bulunmakta, inşaatı süren tünellerle beraber 2023 yılında toplam tünel uzunluğunun 720 km olması hedeflenmektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü [KGM], 2022). Bununla beraber tünellerin işletilmesi ve güvenli bir şekilde kontrolünün sağlanması giderek daha da önem kazanmaktadır. Trafik açısından her hangi bir yola kıyasla risk faktörü de çok fazladır. Olası bir kaza tünel içerisinde olması bir kaos ortamı oluşturabilir. Geçtiğimiz Mart ayında Bolu Tünelinde yaşanan zincirleme trafik kazasında üzücü olaylar yaşanmıştır. Bolu Tüneli hem otoyol üzerinde olması nedeniyle üç şeritli ve geniş bir yapıya sahip hem de kurumsal yapı açısından en iyi işletilen tünellerden biridir. O olay esnasında bir yangın ya da patlamanın olmaması büyük bir şanstır. Çünkü tünellerde olası bir yangın durumunda, hele ki çok sayıda aracın karıştığı bir yangında, kötü durumlar meydana gelebilir.

Yanma ısı, yanıcı madde ve oksijenin bir araya gelmesi olayıdır. Yanma olayının kontrol edilemez olduğu duruma yangın denir. Tünel yangınları tünellerin yapısı itibarıyla kapalı hacim yangınları olarak kabul edilir. Tüneldeki havalandırma sistemi daha fazla yangın ortamına daha fazla oksijen sağlamaktadır. Yapılan araştırmalar, tüneldeki yangın yükünün aynı şartlardaki açık hava yangınlarındaki yangın yükünden dört kat fazla olduğunu ortaya koymuştur (Beard ve Richard, 2005).



Şekil 1.1 Yangının Evreleri (Kayılı, Köktürk ve Eralp, 2010).

Şekil 1.1’ de görüldüğü gibi yangın tutuşma, büyüme, tam gelişmiş yangın ve sönme olmak üzere dört evreden oluşmaktadır. Tutuşma yanma reaksiyonunun meydana gelmesi olayıdır. Tutuşma bir yangın kaynağı ile ya da ortam ısısının yükselmesi ile olabilir. Büyüme yanan maddenin özelliğine ve çevresel şartlara göre değişebilir. Tam gelişmiş evrede, ortamdaki tüm maddelerin yanmaya başladığı düşünülür. Bu evrede yangın en yüksek ısı güce ulaşır. Sönme evresinde yanıcı maddenin tükenmesiyle yangının ısı gücü azalır (Kayılı, Köktürk ve Eralp, 2010).



Şekil 1.2 Gotthard tüneli yangını ve verdiği hasar görüntüleri (Haack, 2003)

Bilinen en ciddi tünel yangınları, 1999 yılında Mont Blanc ve Tauern tünellerinde ve 2001 yılında Gotthard tünelinde meydana gelmiştir. En ciddi tünel yangını Fransa ile İtalya arasında bulunan Mont Blanc tünel kazasında meydana gelmiştir. 11,6 km uzunluğa sahip tünelde 39 kişi hayatını kaybetmiştir (Permanent International Association of Road Congress [PIARC], 2017).

Haack (2003), tünellerde oluşacak yangının etkileri konusuna dikkat çekmektedir. Tünel yangınları sadece insanları tehlikeye atmaz, araçlara hatta tünel yapısına ciddi zararlar verir. Şekil 1.2, 24 Ekim 2001 yılında İsviçre’ deki Gotthard tünelinde meydana gelen yangına ait görüntüleri vermektedir. Burada angın sonrasında tünel tavanının çktğ görülmekte ve yangının ne kadar büyük zarar verdiği anlaşılmaktadır.

Yol tüneli yangınları konusunda yapılan bu çalışma, tünellerin çokluğu, can ve mal güvenliği açısından işletme ve güvenlik zorluğu nedenleri ile yapılmıştır. Tünel içerisindeki olası yangında öncelik yangını önlemek, eğer önlenemiyorsa olabildiğince çabuk müdahale edip durdurmak, durdurulamıyorsa da sıfır can kaybı ve en az mal kaybı olacak şekilde tahliye ve müdahale etmektir.

Dünyada tünel yangınları konusunda çok sayıda çalışma yapılırken tünel yangınını önlemek konusunda herhangi bir çalışma tünel yapısının buna izin vermemesi sebebiyle yapılamamaktadır. Örneğin Oksijen azaltma (Oksigen Reduction) gibi birçok etkin sistemler vardır ancak tünel tam izole edilemeyeceğinden yapımı mümkün değildir. En çok çalışma water-mist (su sisi) yangın söndürme sistemi gibi yangına hızlı bir şekilde müdahale etmeyi amaçlayan otomatik yangın söndürme sistemleridir. Bu sistem yangın konusunda iyi bir çözüm olmakla beraber çok maliyetli ve bakımı oldukça zor bir sistemdir. Bununla beraber tüneller için en uygun sistemin zamanla geliştirileceği düşünülmektedir.

Diğer çalışma alanlarından biri de yangın durumunda oluşacak ısı ve duman gibi fiziksel olayların yangına ve tünele etkileri ile bunların kontrolü konusundadır. Bu çalışmada amaç yangınla açığa çıkan ısı enerjisinin etkisini farklı durumlarda gözlemleyerek tünel duvarlarındaki etkisini incelemektir. Isı enerjisi tünel içerisinde en çok duvar yüzeyleri

üzerinde etkisini göstermektedir. Sırasıyla tavan ve yan duvarlarda yüksek sıcaklıklara sebep olmaktadır. Isı geçişini duvar yüzeyleri üzerinden artırarak ortam sıcaklığının artmasını engelleme düşüncesiyle çalışmaya yön verilmiştir. Tünel içerisinde en çok taşınım ile ısı transferi gerçekleşmekle beraber bu çalışmada iletimle olan ısı transferinin etkileri incelenmiş ve parametreler buna göre seçilmiştir. Başlıca parametreler ısı iletkenlik katsayısı(k) ve ısıl atalet(I) olup, farklı özellikte malzemeler kullanılarak ısı dağılımı incelenmiştir. Bununla beraber yoğunluk ve özgül ısı da etkinliği araştırılmıştır.

Isının duvardan iletimle çıkışı amaçlandığından doğal bir havalandırma tercih edilmiştir. Ayrıca cebri bir havalandırmanın yangın oluşumuna etkisinin olmaması (yangın başlayana kadar aktif olamaması) ve herhangi bir sebeple çalışmaması durumu göz önüne alındığında etkisinin olmayacağı öngörülmüştür.

Deney yapmanın birçok açıdan zorluğu nedeniyle son yıllarda nümerik çalışmalara hız verilmiştir. Bilgisayar sistemlerinin gelişimi ve programlamanın artışı ile CFD yazılımları yeni bir sanal deney ortamı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tezde de karayolu tünellerinde olası bir yangının etkileri ve bu etkilerin azaltılması için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada beton yüzeyler üzerine uygulanan katmanların ısı transferine etkisi incelenmiştir. Genel itibarıyla iki katman (Beton-Toprak) olan tünellere burada üçüncü bir katman eklenmiştir. Farklı iletim katsayısına sahip Kalsiyum silikat, Nikel ve Alüminyum malzeme kullanılarak yapılan analizlerde ısı tünel içerisinde ve yüzeyler üzerindeki dağılımı sayısal olarak incelenmiştir. Nümerik analiz için Ansys/Fluent yazılım programı kullanılmıştır. Standart $k-\epsilon$ türbülans modeliyle yapılan bu çalışmada geçici (transient) rejimde çalışılmış ve ısı duvardan iletimle transferi üzerinde durulmuştur. Her iki tünel portalı da atmosferik çıkış (pressure outlet) olarak kabul edilmiş ve ısı salınım oranı (HRR) 50 MW olarak alınmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Genel Bakış

Tünel yangınları üzerine çok sayıda sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Dumanın dağılımı, oluşacak sınır tabakalar, yangında oluşan ısı salınım hızı (HRR) ve buna etki eden faktörler gibi çalışmaların yanında, tüneldeki yapının durumu, yangına etkileri veya yangından ne yönde etkilendikleri ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Tünel yangınlarında riskin yüksek olması, senaryoların, teorilerin ve çözümlerinin karmaşık yapıda olması çalışmaları zorlaştırmasına rağmen ilgiyi artırmıştır. Bilindiği gibi deney yapmak en sağlıklı çalışma olarak kabul edilmektedir. Özellikle tünel gibi bir alanda ve yangın gibi komplike bir olayda çok sayıda parametreyi göz önüne alınca deneyler tünel yangını çalışmalarında önemli rol oynamaktadır. Ancak deney maliyetlerinin yüksek olması nümerik çalışmaların alternatif hale getirmiştir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin (Computational Fluid Dynamics-CFD) gelişimi de nümerik çalışmaları hızlandırmıştır.

2.2. Deneysel Çalışmalar

2.2.1. Büyük Ölçekli Testler

Çizelge 2.1’ de yapılan tam ölçekli testler detaylandırılmıştır. Bu testlerin bazıları eski yani terk edilmiş bazıları ise test amaçlı yapılmış tünellerdir. 1960 yılından 2014 yılına kadar çeşitli tam ölçekli testler yapılmıştır. Amaçlar HRR ölçümü, yangın tipi, tünel kesiti gibi alanlarda değişebilmektedir. Bununla beraber burada sabit yangın söndürme sistemi (FFFS) olan tüneller için ayrı çalışmalar da yapılmıştır (Ingason ve diğerleri, 2015).

Teknik bilgi elde etme amaçlı yapılan ilk büyük ölçekli test 1965 yılında İsviçre’de Ofenegg Tünelinde gerçekleştirilmiştir. Bu testin temel amacı, benzin tanklarının neden olduğu yangınlarda tünelin havalandırma kapasitelerini değerlendirmektir. Bu test Tünel havalandırma tasarımı konusunda çok önemli olmuş ve FFFS sisteminin kullanılmasını Avrupa’ya tanıtmıştır (Hearter, 1994).

Çizelge 2. 1. Yapılan büyük ölçekli testler (Ingason, 2006)

Test Programı, Yer ve Yıl	Test Sayısı	Yangın Kaynağı	Tünel Kesit Alanı(m ²)	Tünel Yüksekliği (m)	Tünel Uzunluğu (m)	En Yüksek HRR Aralığı(MW)
Ofenegg, İsviçre, 1965	11	Benzin Havuzu	23	6	190	11-80
Glasgow,1975	5	Gaz/Gazyacı Havuzu	39.5	5.2	620	2-8
Zwenberg, Avusturya, 1974-1975	30	Benzin Havuzu, Odun, Lastik	20	3.9	390	8-21
P.W.R.I, Japonya, 1980	16	Benzin Havuzu, Yolcu Aracı, Otobüs	57.3	6.8	700	9-30
P.W.R.I, Japonya, 1980	8	Benzin Havuzu, Otobüs	58	6.8	3277	9-Otobüs Bilinmiyor
TUB-VTT, Finlandiya, 1985	2	Ahşap Beşik(Metro Simülasyonu)	24-31	5	140	1.8-8
EUREKA EU499, Norveç, 1990-1992	21	Ahşap Beşik, Heptan Havuzu, Otomobiller, Metro Aracı, Tren, Ağır Yüklü Tır	25-35	4.8-5.5	2300	2-120
Memorial,ABD, 1993-1995	98	Fuel Oil	36 ve 60	4.4 ve 7.9	853	10-100
Shimizu No.3, Japonya, 2001	10	Benzin Havuzu, Otomobiller, Otobüs	115	8.5	1120	2-30
2. Benelux Tüneli, Hollanda, 2002	14	n-Heptane Toluen, otomobil, Ağır Yüklü Tır	50	5.1	872	3-26
Runehamar Tüneli, Norveç, 2003,2013	4	Selüloz, Plastik, Mobilya, Tahta palet	32-47	4.7-5.1	1600	70-203
Brunsberg, İsveç, 2011	2	Metro Aracı	44	6.9	276	77
San Pedro Tüneli, 2012	1	Ağır Yüklü Tır	37	5.2	600	150
Carleton Laboratuvarı, 2011	2	Tren Ve Metro Aracı	55	5.5	37	32-55

EUREKA EU499 test programı Norveç’te artık kullanılmayan bir tünel olan 2,3 km uzunluğundaki Repparfjord Tünelinde 1990-1992 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Bu testin temel amacı gerçek karayolu ve demiryolu araçlarının yangın davranışlarını

araştırmaktır. Gerçekleştirilen bu test günümüzdeki tünel tasarım çalışmalarını büyük ölçüde etkilemiştir. Programın önemi ilk kez oksijen tüketimi büyük ölçekli bir testte gerçek araçlara uygulanmış olmasıdır. Ayrıca bilimsel analiz için önemli olan ahşap beşik ve heptan havuzu gibi materyaller kullanılarak iyi tanımlanmış veriler içermektedir. Havalandırma oranı ile yangın büyüme eğilimi verilmiştir (Haack, 1994).

2.2.2. Küçük Ölçekli Testler

Gao vd. (2019) yaptıkları çalışmada tünel içerisinde enine ve boyuna sıcaklık dağılımlarını karşılaştırmalı olarak araştırmak için bir takım deneyler yapmışlardır. 1/3,7 ölçeğinde tasarladıkları tünel at nalı formunda yapılmıştır. Betondan yaptıkları tünelde 12 ile 120 kW arasında değişen ısı güce sahip kaynaklar kullanmışlardır. Tünel yangınları güvenliği için tünel tasarımlarına katkı sağlamayı amaçlayarak sıcaklık profillerinin daha iyi anlaşılmasını hedeflemişlerdir. Gong vd. (2016) tarafından oluşturulan modelle kıyaslandığında tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir. Özellikle yan duvarlar üzerinde taşınım ve radyasyon bölgesi olarak ayırdıkları bölgelerdeki etkilerle beraber incelendiğinde enlemesine sıcaklık dağılımının monoton olmadığını ortaya koymuşlardır.

Li vd. (2011) bir yangını tespit etmek ve yangından korunma sağlamak için, yapının maruz kaldığı tavanın altındaki maksimum gaz sıcaklığının tahmin edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmalarında iki seri model ölçekli deneysel test yapmışlardır. Hem analiz hem de deney sonuçları, tavanın altındaki maksimum gaz sıcaklığının iki bölgeye ayrılabilirliğini göstermişlerdir. Boyutsuz havalandırma hızı 0,19' dan büyük olduğunda, tünel tavanının altındaki maksimum gaz sıcaklığının, ısı salınım hızı ile doğrusal olarak arttığı ve uzunlamasına havalandırma hızı ile doğrusal olarak azaldığı görülmüştür. Sonuçlar gerçek model ölçekli testler ile diğer testler arasında benzerlik olduğunu ve yangın kaynaklarının farklılığının da önemli bir etken olduğunu göstermişlerdir.

2.3. Sayısal Çalışmalar

Xu vd. (2022) Fluent kullanarak yaptıkları nümerik çalışmalarında farklı yanma modellerini karşılaştırmışlardır. Amaçları duman karakteristiklerini incelerken kullanılan modeller arasında kıyaslama yapmaktır. Literatürde FLUENT kullanılarak tahmin edilen sıcaklık, her zaman deneysel verilerden ve teorik tahminlerden daha yüksek elde edilmiştir. Duman tabakasının yüksekliği de doğrulanamamıştır. Bu nedenle Hava Sürüklenme Modeli (AEM) ve Kütle Transferi-Hacimsel Isı kaynağı modeli (MT-VHS) önerilmiştir. Daha sonra yangın senaryosu olarak indirgenmiş ölçekli deneyler yapılarak farklı fiziksel modeller, yanma modelleri ve gaz tanımlama modelleri kullanılmış, sıcaklık profili ve duman tabakası yüksekliği açısından karşılaştırılmıştır. Fiziksel model açısından, geleneksel tünel modeli asimetrik sıcaklık profiline yol açabilir. Bunun nedeni, tünel portalına sabit bir basınç çıkış sınırının uygulanması olarak açıklanmıştır. Ancak tünel portalındaki basınç yüksekliğe göre değiştiğinden genişletilmiş hesaplama alanı önerilmiştir. Tünel duvar kalınlığının, tavanın altındaki sıcaklık profili üzerinde çok az etkisi olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada, farklı CFD modellerinin (önceki ve yeni kurulan modeller dahil) sonuçları, azaltılmış ölçekli deney verileri ve teorik tahminlerle karşılaştırılmıştır. Doğruluk ve ekonomiye uygun modeller bulunmuş, sadece doğal havalandırma altında sıcaklık profilini ve duman tabakası yüksekliğini dikkate almışlardır. Uzunlamasına havalandırma altında alev morfolojisi ve hava sürüklenmesinin farklı olması gerektiğini, alev bölgesi ve kütle kaynağını buna göre değiştirilmesini önermiştir. Ayrıca, MT-VHS modelinin birleştirilmemiş tavan jeti için uygun olup olmadığı da tespit edilememiştir (Zhang ve diğerleri,2014).

Saito ve Yamauchi (2021) tavan jeti (ceiling jet) diye adlandırılan sıcak gaz akışının yayılımının tünel içerisindeki hareketini incelerken duvarlar üzerinden ısı kaybı üzerine etkisini araştırmışlardır. Duvarlar üzerinden ısı kaybı konusunda birkaç araştırma yapılmıştır. Teorik olarak da aynı konuda katkı sağladıkları bu alanda FDS yazılımı kullanarak nümerik analiz gerçekleştirmişlerdir. Tünel duvarı için Çelik, Kalsiyum-silikat, beton, pleksi (polimetil metakrilat) ve kendilerinin özel olarak tanımladığı (Wall A-B-C-D-E) toplam dokuz farklı malzeme kullanmışlardır. Taşınımın etkisinin olduğu çalışmalarında daha çok iletimle olan ısı transferine bağlı olarak duvardan geçen ısının

kullanılan malzemelere bağılı değiştiğini göstermişlerdir. Zamana bağılı yaptıkları çalışmalarında malzemenin ısı iletim katsayısının ve kalınlığının etkisini ve Biot ve Fourier sayılarının etkinliğini incelemişlerdir. alışmalarında ısı ataletin tavan altındaki gaz sıcaklığına etkisi olduğunu tespit etmişler ve yakın ısı atalet değerlerinde yakın gaz sıcaklığı değerleri elde etmişlerdir.

Wang ve Wang (2016) alışmalarında tünel içerisindeki bir yangında duman hareketinin yangın oluşum yerine göre değişimini incelemişlerdir. Hacimsel ısı kaynağı yönetimini kullanarak (VHS) ısıının yönünü ve dağılım şeklini göstermişlerdir. Ayrıca gene yangın lokasyonuna bağılı olarak akışkanın kritik hızını bulmaya çalışmışlardır.

Vega vd. (2008) alışmalarında bir karayolu tüneli içerisindeki yangının davranışını Fluent kullanarak incelemişlerdir. Uzunlamasına havalandırma sistemi kullanılan çalışmada CO ve sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Ayrıca Memorial Tünel projesi kapsamında yapılan deneylerle karşılaştırma yapılmıştır. Standart k- ϵ türbülans modelini ve volumetric heat source (VHS) yanma modellemesini kullandıkları analizlerinde tünel içerisindeki CO ve sıcaklığın karşılaştırmalı olarak grafiksel olarak sunmuşlardır. Sonuç olarak CFD modellemesinin yangın durumunda akışkanın davranışını tahmin etme konusunda çok önemli bir araç olduğunu ortaya koymuşlardır.

Tomar vd. (2022) alışmalarında, pasif koruma olarak nitelendirilen tünel duvarlarına uygulanan malzemelerden olan Kalsiyum-silikat tabakasının etkisini FDS yardımıyla incelemişlerdir. Ahşap paletlerden oluşturuldukları simülasyonlarında iki farklı model oluşturmuşlar ve Runehamar testleriyle çalışmalarını kıyaslamışlardır. Sonuç olarak, Kalsiyum-silikat levhalarla donatılmış tünelin, 30 dakikalık tüm yangın süresi boyunca betonla donatılmış tünele kıyasla daha yüksek HRR ve gaz sıcaklığına yol açtığını tespit etmişlerdir. Kalsiyum silikat ve beton arasındaki farkın zamana göre değiştiğini ve tepe HRR değerinin aynı kaldığını belirtmişlerdir. Bu davranışın temel nedeni olarak, ısı iletkenliği ve emissivite gibi Kalsiyum-silikatın malzeme özelliklerini göstermişlerdir. Kalsiyum-silikat ile kaplanmış tüneller ısı geri besleme etkisine neden olmuş ve bu da daha yüksek piroliz ve yangın büyüme oranlarına neden olmuştur. Kalsiyum silikatlı tünelde toplam yakıt tüketiminin de 30 dakikalık yangın süresi boyunca betonla

donatılmış tünele göre daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Bu çalışma sonucunda görülmüştür ki; Kalsiyum-silikat levhaları HRR'yi etkilemektedir ve tünel tasarımlarında ayrı bir parametre olarak ele alınmalıdır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada yangın gibi bir ısı kaynağından doğan enerjinin tünel duvarları üzerinden aktarımının içerideki mevcut sıcaklığa olan etkisini gözlemlemek amaçlanmış ve tünel duvarları üzerinden ısı transferi incelenmiştir. Literatürdeki bazı çalışmalarda tünel duvarları adyabatik olarak alınmış yani herhangi bir ısı transferi olmadığı düşünülmüştür. Tünellerin dağ içinde konumlanması nedeniyle ısı kaybının düşünülmemesi mantıklı görünmekle beraber büyük bir toprak tabakanın içinde olması onun termal difüzyon için iyi bir sönümleyici olmasına sebep olabilir. Buradan hareketle tünel yüzeyi ısıyı ne kadar iyi transfer ederse içeride o kadar düşük bir sıcaklık olacaktır.

CFD analizinde kullanılan Fluent programı Navier-Stokes denklemleri, süreklilik denklemi ve enerji denkleminin çözülmesi prensibiyle çalışmaktadır. Bu bölümde korunum denklemleri ve iletimle ısı transferi ile ilgili temel bilgiler verilmiştir.

3.1. Korunum Denklemleri

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde korunum denklemleri kütle (süreklilik), momentum ve enerji denklemleri olarak bilinen diferansiyel denklemlerden oluşur. Bu denklemler akış analizi yapılırken oluşturulan küçük parçalar (diferansiyeller) üzerine termodinamik yasaları ve Newton kanunlarının uygulanması ile ortaya çıkmıştır.

Eşitlik 3.1’ de kütle korunumu ilkesi ile elde edilen süreklilik denklemi verilmiştir.

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 3.1$$

Sıkıştırılamaz akış için süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 3.2$$

halini alır.

Eşitlik 3.3 ve 3.4 ile verilen Newton'un 2. yasasına göre, bir cisme uygulanan kuvvetlerin etkisi ile cisim ya dengededir ya da bir ivmeyle hareket eder (Umur, 2021). Bu denklem ile momentum denklemleri elde edilir.

$$\sum F = m \cdot \vec{a} \quad 3.3$$

$$\sum F = F_b + F_y + F_v = m \cdot a = \rho dx dy dz a \quad 3.4$$

Eşitlik 3.5 ile ifade edilen ivme hıza bağlı üç ayrı bileşenden oluşur (Umur, 2021).

$$a = \frac{dU(x, t, z, t)}{dt} \quad 3.5$$

Eşitlik 3.5 ile verilen ivmenin x, y, z yönündeki bileşenleri sırasıyla Eşitlik 3.6, 3.7 ve 3.8 ile verilmiştir.

$$a_x = \frac{du(x, t, z, t)}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad 3.6$$

$$a_y = \frac{dv(x, t, z, t)}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \quad 3.7$$

$$a_z = \frac{dw(x, t, z, t)}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \quad 3.8$$

Eşitlik 3.9' da birim hacim için yer çekimi kuvveti;

$$F_y = i\rho g_x + j\rho g_y + k\rho g_z = \rho g \quad 3.9$$

olarak verilmiştir. Basınç kuvvetleri

$$F_b = \nabla P = -\left(i \frac{\partial P}{\partial x} + j \frac{\partial P}{\partial y} + k \frac{\partial P}{\partial z}\right) \quad 3.10$$

Eşitlik 3.10 ile ifade edilmiştir. x, y, z yönündeki viskoz kuvvetler ise Eşitlik 3.11, 3.12 ve 3.13 ile sırasıyla verilmiştir.

$$F_v = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad 3.11$$

$$F_v = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad 3.12$$

$$F_v = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad 3.13$$

Bu eşitliklerin yerine yazılmasıyla kartezyen koordinatlardaki momentum denklemleri elde edilir. x, y ve z yönündeki momentum denklemleri sırasıyla Eşitlik 3.14, 3.15 ve 3.16' da verilmiştir.

x- momentum denklemi:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad 3.14$$

y- momentum denklemi:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad 3.15$$

z-momentum denklemi:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad 3.16$$

Eşitlik 3.17' de enerji denklemi verilmiştir.

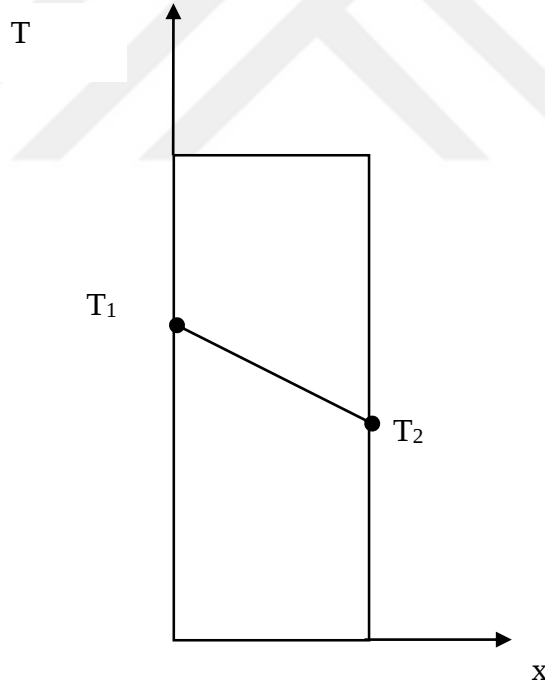
$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \emptyset \quad 3.17$$

3.2. İletimle ısı transferi

İletimle ısı transferi, daha fazla enerjiye sahip partiküllerden daha az enerjiye sahip partiküllere enerji transferi olarak ifade edilebilir (Kılıç ve Yiğit, 2018). Isı iletiminde sıcaklık zamanın bir fonksiyonu ise geçici rejim (transient), zamanın bir fonksiyonu değilse sürekli rejim olarak adlandırılır. Eşitlik 3.18’ de Fourier ısı iletim kanunu verilmiştir ve iki nokta arasındaki ısı transferi ile ısı akısı bu eşitlik ile hesaplanabilir.

$$Q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad 3.18$$

Şekil 3.1’ de bir yüzey üzerindeki ısı iletimi sembolik olarak gösterilmiştir. Şekilde ısı akışı doğrusal görünmekle birlikte özellikle geçici rejimde iki nokta arasındaki ısı transferi bir eğri oluşturmaktadır.



Şekil 3.1. Isı iletimi

Birim alan için ve üç boyutlu ısı iletimi denklemi Eşitlik 3.19 ile ifade edilmiştir.

$$q'' = -k\left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad 3.19$$

Enerji denklemi yerine yazıldığında Eşitlik 3.20 ile verilen ısı yayılma denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.20$$

Geçici rejimde içinde enerji üretimi olan tek boyutlu ısı iletim denklemi Eşitlik 3.21' de verilmiştir (Kılıç ve Yiğit, 2018).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.21$$

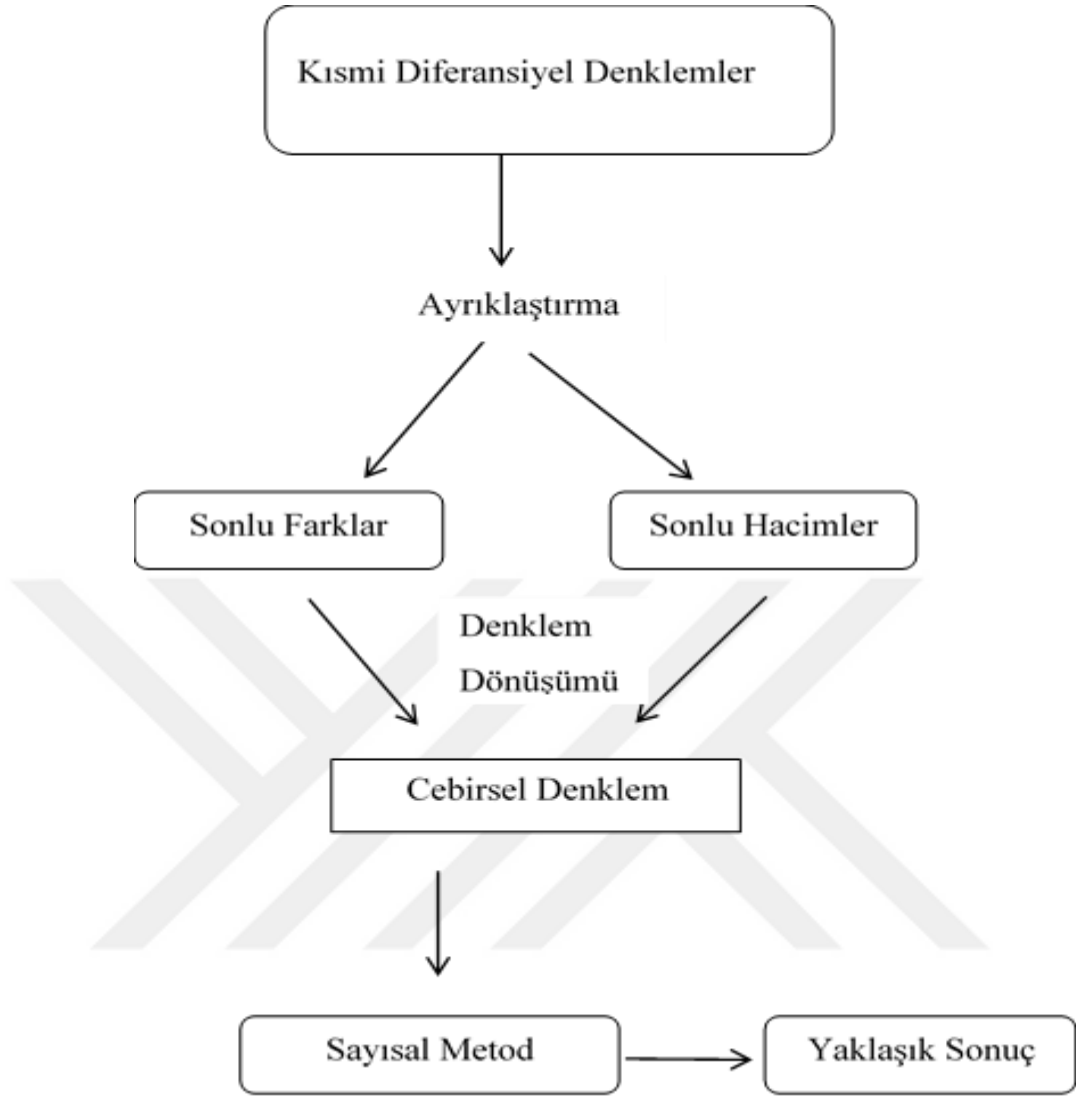
$\dot{q}$, içerideki ısı üretimini, α , ısı yayılım katsayısını göstermektedir. Geçici rejimde ve ısı üretimi olmadığı durumda tek boyutlu iletim denklemi,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.22$$

Eşitlik 3.22 ile ifade edilir. Bu eşitlik sıcaklığın hem zamana bağlı hem de ısı transferinin gerçekleştiği cismin kalınlığına bağlı olduğunu göstermektedir.

3.3. Sayısal Analiz

Bilimsel birçok çalışmanın temelinde diferansiyel denklemler vardır. Genel olarak çözüm yoluna giden ilk yol matematiksel olarak kurulan denklemdir. Matematik ilerledikçe denklemler gelişmiş ve gittikçe karmaşık hale gelmiştir. Analitik olarak çözülemeyen bazı denklemler için sayısal olarak çözülme yoluna gidilmiştir. Nümerik hesaplama olarak adlandırılan bu çözümleme tekniğinde problemin niteliğine göre farklı yöntemler kullanılmaktadır. Şekil 3.2' de sayısal analizin çalışma şeması verilmiştir.



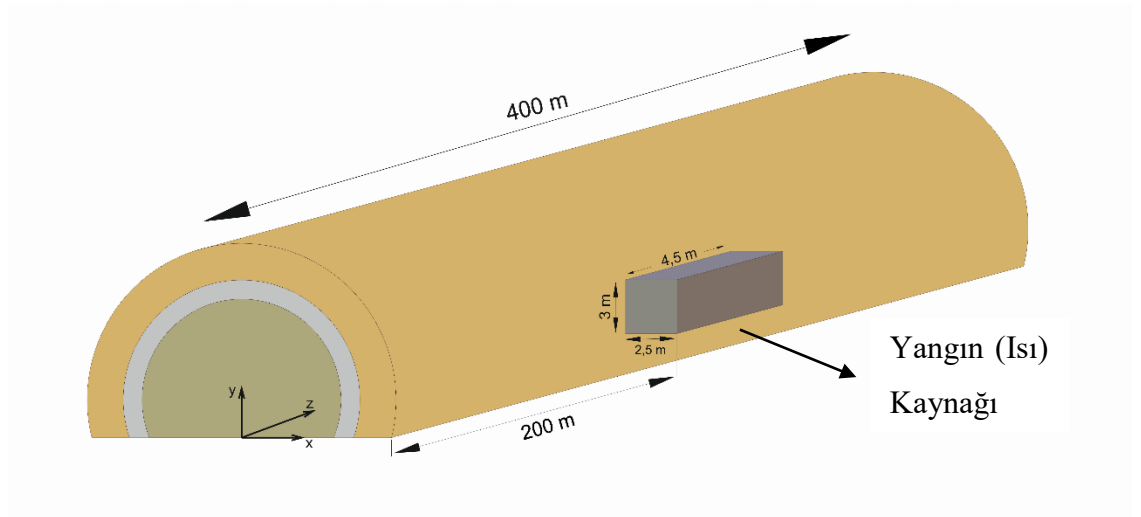
Şekil 3. 2. Sayısal analiz çalışma şeması

3.4. CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)

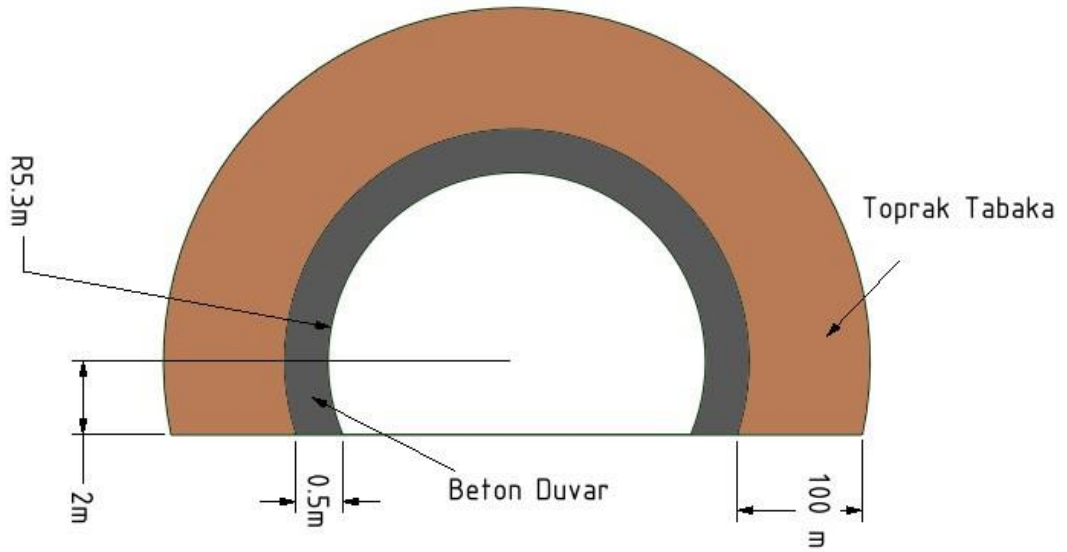
Bilimsel çalışmalar ilerledikçe ve endüstriyel alanda analiz ihtiyacı arttıkça sayısal hesaplamalar daha önemli hale gelmiştir. Sayısal hesaplamalarda, kullanılan matematiksel ifadeler bilgisayar sistemi ile birleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan Fluent programında da, arka planda korunum denklemleri çalışmakta, yapılan tasarıma ve seçilen çözüm şekline göre hesaplamalar yapılmaktadır.

3.4.1. Model oluşturma ve ölçeklendirme

Analizler yapılırken gerçek ölçüler yerine daha küçük ölçülerdeki modeller kullanılır. Boyutun küçülmesi ile daha az ağ eleman sayısı oluşturulabilir. Ağ eleman sayısının azalması hem daha iyi sonuçlar elde etmemizi hem de zamandan tasarruf etmemizi sağlar. Bu çalışmada da benzer şekilde tünel modeli ölçeklendirilerek analizler yapılmıştır. Şekil 3.3 tünelin gerçek uzunluklarla genel görünümünü, Şekil 3.4 ise tünelin kesit detayını vermektedir.



Şekil 3.3. Tünel modeli genel görünümü



Şekil 3.4. Tünel kesit detayı

Tünel uzunluğu 400 m olup girişten 200 metre mesafede, bir kamyon kasası ölçü ve formatı ile tasarlanan 3mx2,5mx4,5m boyutlarında hacimsel ısı kaynağı görülmektedir. Şekil 3.4’ te görüldüğü gibi tünel iki tabakalı olarak tasarlanmıştır. İç yüzeyde beton duvar en dışta (bir dağ içine gömülü olduğundan) toprak tabaka olarak modellenmiştir. Çalışmada tünel geometrisi 1:100 oranında küçültülerek modellenmiştir.

Isı transferi denklemi Eşitlik 3.23 ile ifade edilmektedir.

$$Q = \dot{m}c_p\Delta T \quad 3.23$$

Bu eşitlikte kütleli debi hız cinsinden yazıldığında,

$$Q = \rho A c_p \Delta T \quad 3.24$$

Eşitlik 3.24 elde edilir. Bu eşitlikte kesit alanı, A , uzunluğun karesi, L^2 , ile gösterilirse,

$$Q = \rho c_p \Delta T L^2 \quad 3.25$$

Eşitlik 3.25 elde edilir. Merci (2016) yaptığı çalışmada benzer şekilde ölçeklendirme yapılabileceğini göstermiştir. Eşitlik 3.11’ de $u, \rho, c_p, \Delta T$ sabit alındığında ısı salınım oranı (Q),

$$Q = L^2 \quad 3.26$$

olarak elde edilir. Eşitlik 3.27’ de 1:100 ölçekli modeldeki ısı transferi, Q_m , ile gerçek ölçüdeki ısı transferi, Q_r , arasında, l , ölçek faktörü olmak üzere;

$$l = \frac{L_m}{L_r} = 0,01 \quad 3.27$$

$$\frac{Q_m}{Q_r} = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^2 = l^2 = \left(\frac{1}{100}\right)^2 = 10^{-4} \quad 3.28$$

elde edilir.

$$t = L/u \quad 3.29$$

ve u sabit alınırsa

$$t = L \quad 3.30$$

elde edilir. Model ölçek ve gerçek ölçülerin oranında zaman,

$$\frac{t_m}{t_r} = \frac{L_m}{L_r} = 0,01 \quad 3.31$$

olarak ölçeklendirilir. Isı salınım oranı Eşitlik 3.28 düzenlenirse,

$Q_m=3250$ W olarak bulunur. Model ölçek ile gerçek ölçü oranının (m/r), l , ölçek faktörü ile eşit olduğu,

$$L = l \quad 3.32$$

eşitliği ile, L uzunluğu yerine l ölçek faktörü yazılması gerektiği anlaşılmaktadır. Yapılan ölçeklendirmeler Bi , Fo ve Nu sayıları üzerinden sağlama yapılarak doğrulanmıştır. Bi , Fo , α ve Nu sayıları sırasıyla Eşitlik 3.33, 3.34, 3.35 ve 3.36 ile verilmiştir.

$$Bi = \frac{h \cdot L}{k} \quad 3.33$$

$$Fo = \frac{\alpha \cdot t}{L^2} \quad 3.34$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad 3.35$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad 3.36$$

Bi sayısının sabit olduğu bilindiğinden, h , taşınım katsayısının sabit alınması ile ($L = l$ ve $l = 0,01$)

$$k = l$$

olarak bulunur. Yani k iletim katsayısı l oranında ölçeklendirilir.

$$\frac{k_m}{k_r} = l \quad 3.37$$

Eşitlik 3.37 düzenlendiğinde iletim katsayısı, k_m ,

$$k_m = k_r \cdot l$$

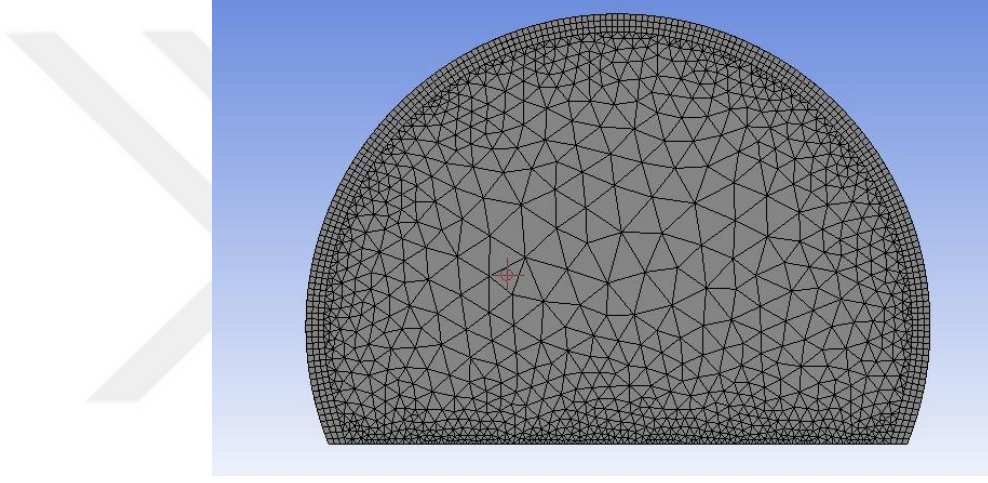
olarak hesaplanır. Buradan k , Eşitlik 3.35' de yerine yazılarak (ρ ve c_p sabit)

$$\alpha = k = l$$

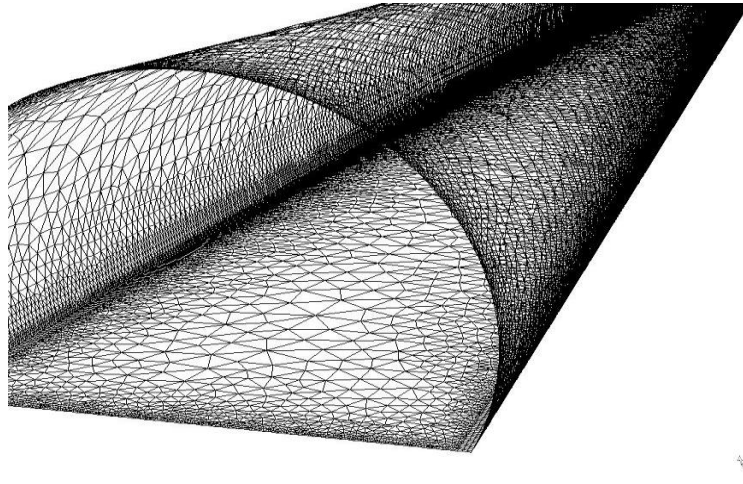
olarak bulunur. Böylece $t=l$ olduğunda Fo sayısının sabit olduğu görülmüştür. Aynı şekilde Eşitlik 3.36' da $D=l$ olduğundan Nu sayısının sabit olmasına bağlı olarak h , taşınım katsayısı da sabit hale getirilir.

3.4.2. Ağ Oluşturma

CFD, sonlu hacimler yöntemine göre çalıştığından oluşturulan geometrik model küçük parçalara ayırır. Mesh atma ya da ağ oluşturma dediğimiz işlemde model küçük elemanlara bölünür. Eleman sayısı arttıkça çözüm daha doğru yapılmış olacak ve gerçek çözüme o kadar yaklaşılmış olacaktır. Tabi bununla birlikte oluşturulan mesh yapısının istenen kaliteye (orthogonal quality) sahip olması da gerekmektedir. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’ da bu çalışmada kullanılan tünelin ağ yapısı ve dış görünüm detayı verilmiştir.



Şekil 3.5. Ağ yapısı



Şekil 3.6. Ağ yapısı dış görünüm detayı

Bu çalışmada tetrahedron modeli seçilerek ana eleman yapısı olarak tetrahedral yapı oluşturulmuştur. Tetrahedral yapı ile karmaşık geometrilerde ve eğri yüzeylerde daha kaliteli ağ yapısı oluşturulabilir. Akışın olduğu bir tasarımda duvara yakın bölgede inflation metodu kullanıldığında, duvar etkileri daha iyi analiz edilebilir (Udemy, 2021). Tünel duvarı olarak modellenen kısımda sınır tabaka oluşacağından ve duvar üzerinde ısı transferi olacağından Inflation metodu kullanılmıştır. Inflation, sınır tabaka etkilerinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile 3 tabakalı ve daha kübik yapılar oluşturulmuştur.

3.4.3. Ağ Bağımsızlık Çalışması

Yapılan analiz sonuçları ağ eleman sayısından etkilenebilir. Ağ eleman sayısı artırılarak analiz sonuçlarının değişmediğinin gözlenmesi gerekmektedir. Ağdan bağımsızlık çalışması olarak adlandırılan bu çalışma ile daha doğru sonuçlar elde edilebilir. Bu tez çalışmasında, tünel duvar yüzeyi üzerinden geçen ısı miktarı referans alınarak ağ bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Çizelge 3.1 ısı transferine bağlı olarak yapılan ağ bağımsızlık çalışmasına ait verileri göstermektedir.

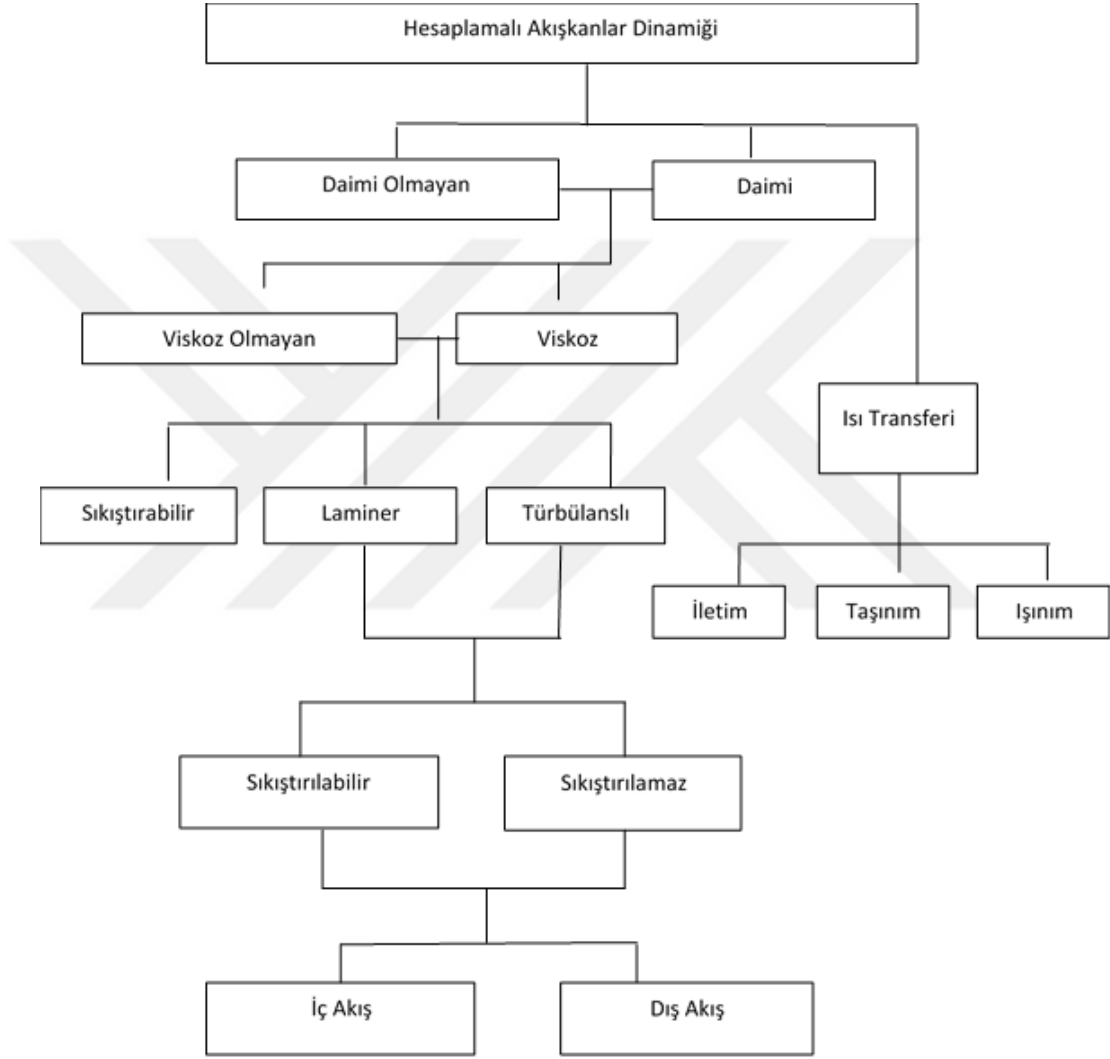
Çizelge 3.1. Ağ eleman sayısı ile ısı transferi değişimi

Ağ Eleman Sayısı	Duvardan Geçen Isı Miktarı(w)
222 490	241,69
550 291	240,13
1 214 102	239,53
1 594 011	239,24

Çizelgede ağ eleman sayısı artışı ile önce duvardan geçen ısı miktarının biraz değiştiği daha sonra aynı kaldığı gözlemlenmiştir. Ağ eleman sayısına bağlı olarak yapılan bağımsızlık çalışmasında 1 214 102 ve 1 594 011 toplam eleman sayılarında referans alınan değerlerin aynı kaldığı görüldüğünden çalışmaya 1 214 100 eleman sayısına sahip ağ modeli ile devam edilmiştir.

3.4.4. Akış Fiziğinin Belirlenmesi

CFD programında akış fiziğinin ne olduğu belirlenir ve belirlenen bu fiziksel şartlara göre çözüm yapılır. Bu akış fiziği şeması Şekil 3.7 (Tu vd.(2020)) ile gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Akış fiziği şeması(Tu ve diğerleri 2020)

Bu çalışma sıkıştırılamaz akış için geçici rejimde (transient analysis) yapılmıştır. Analizler ilk önce realizable k- ϵ türbülans modeliyle yapılmış ancak standart k- ϵ modelinin daha iyi yakınsadığı görüldüğü için standart k- ϵ türbülans modeli ile devam

edilmiştir. Ayrıca analizde gelişmiş duvar fonksiyonları (enhanced Wall functions) kullanılmıştır.

3.4.5. Sınır Şartları, Kabuller ve Isı Kaynağı Modeli

Bu çalışmada ısı kaynağı olarak VHS olarak adlandırılan hacimsel ısı kaynağı yanma modeli kullanılmıştır. Yanma sonucu çıkan gazın (havanın) kütleli debisi

$$\dot{m}_g = \frac{Q}{C_p(T_g - T_o)} \quad 3.38$$

ile Eşitlik 3.38’ de verilmektedir. Q ısı salınım oranını, C_p havaya ait özgül ısıyı, T_g gaz sıcaklığını ve T_o ortamın sıcaklığını göstermektedir. Vega vd.(2008)’ nin yaptıkları çalışmada gaz içerisinde %9 oranında CO_2 gazı bulunmakla beraber bu çalışmada ısı etkileri incelendiğinden, gazın tamamı hava olarak kabul edilmiştir. Burada ısı salınım oranı 50 MW olarak alınmıştır ve ısısal etkileri ihmal edilmiştir. ısısalınımın ihmaline bağlı olarak HRR miktarı %35 azaltılmıştır. Vega vd.(2008) çalışmalarında, (Permanent International Association of Road Congress [PIARC] , 1999) tarafından sunulan raporu uyarlayarak 50 MW’ lık bir ısı salınım hızında çıkan gazın sıcaklığının 950 K alınabileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışma içerisinde ısı kaynağı da 50 MW olarak alınmış ve yukarıdaki bilgiler ışığında çalışma değerleri belirlenmiştir. Tünel tabanı yani yolun olduğu alt kısım adyabatik olarak alınmıştır. Duvar ilk sıcaklığı ve ortam sıcaklığı 285.15 K olarak alınmıştır. HRR miktarı ölçek modele göre 3250 W olarak hesaplanmış ve buradan çıkan sıcak havanın kütleli debisi $48,6 \cdot 10^{-4}$ kg/s olarak elde edilmiştir.

Tünel yapısında bulunan ve üçüncü katman olarak tasarlanan malzemelere ait özellikler Çizelge 3.2’de verilmiştir. Kalsiyum-silikat ve betona ait değerler Saito ve Yamauchi (2021) çalışmasından alınmıştır. Burada Alüminyum yüksek ısı iletim katsayısına sahip iken Nikel nispeten daha düşük ısı iletimiyile beraber yüksek yoğunluğa sahiptir. Bu da Nikelin yüksek bir ısısal ataletine sahip olmasını sağlamaktadır.

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri

Malzeme Adı	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (j/kgK)	İletim Katsayısı (W/mK)	Isıl Yayılma Katsayısı (m ² /s)	Isıl Depolama kapasitesi (J/Km ³)	Isıl Atalet (J/m ² Ks ^{1/2})
Beton	2100	880	1,5	8,11x10 ⁻⁷	1,84x10 ⁶	1664,9
Kalsiyum Silikat	820	1000	0,16	1,95x10 ⁻⁷	8,2x10 ⁵	362,2
Nikel	8900	460,6	91,74	2,23x10 ⁻⁵	4,01x10 ⁶	19392,6
Toprak	2050	1840	0,52	1,37x10 ⁻⁷	3,77x10 ⁶	1400,5
Alüminyum	2719	871	202,4	8,54x10 ⁻⁵	2,37x10 ⁶	21893,6
Çelik	8030	502,48	16,27	4,03x10 ⁻⁶	4,03x10 ⁶	8102,3

Çizelgedeki $\rho \cdot c_p$ (yoğunluk-ölgül ısı çarpımı) ısı depolama kapasitesi olarak tanımlanmıştır. Birimi J/Km³ olan bu parametre b ile sembolize edilmiştir. Bu değeri ısı enerjisinin hacimsel sıcaklığa oranı olarak düşünölebilir.

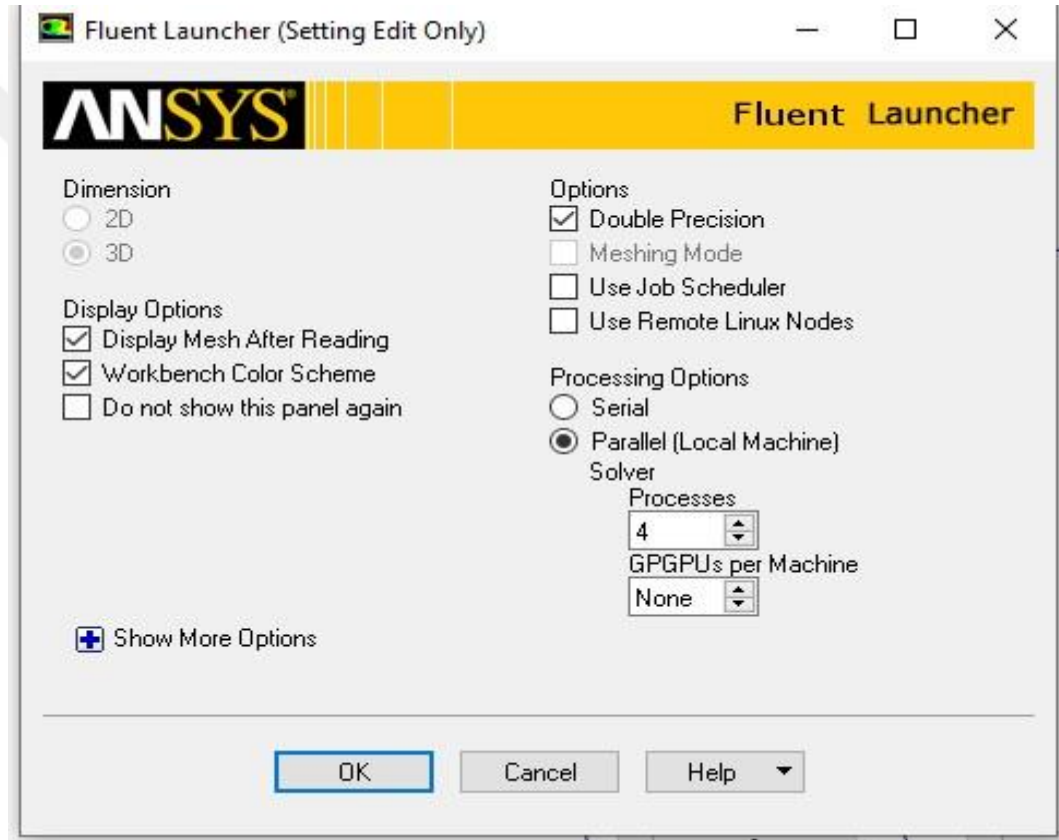
Isıl atalet (thermal inertia) zamana bağılı ısı iletiminde etkili parametrelerden biridir. Isıl atalet, I ,

$$I = \sqrt{k \cdot \rho \cdot c_p} \quad 3.39$$

olarak Eşitlik 3.39 ile tanımlanmıştır.

3.4.6. Çözüm şartları

Analizlerde standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Bununla beraber daha iyi sonuç almak için geliştirilmiş duvar fonksiyonları (enhanced wall function) ile çözüm yaptırılmıştır. SIMPLE çözüm yaklaşımı kullanılmış ve ikinci dereceden ayırıklaştırma (second order upwind) ile analizler gerçekleştirilmiştir. Basınç tabanlı (pressure based) yapılan analizlerde yer çekimi (gravity) etkisi de dahil edilmiştir. Zamana bağlı, geçici rejim ile çözümler yapılmış ve Şekil 3.8 ile çözüm ayarları verilmiştir.

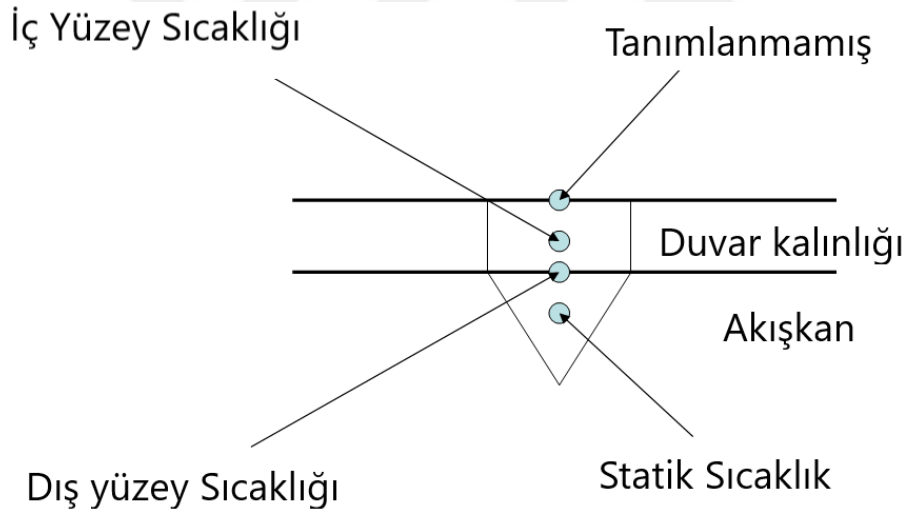


Şekil 3.8. Çözüm için bilgisayar ayarları ara yüzü

3.4.7. Shell conduction modelleme

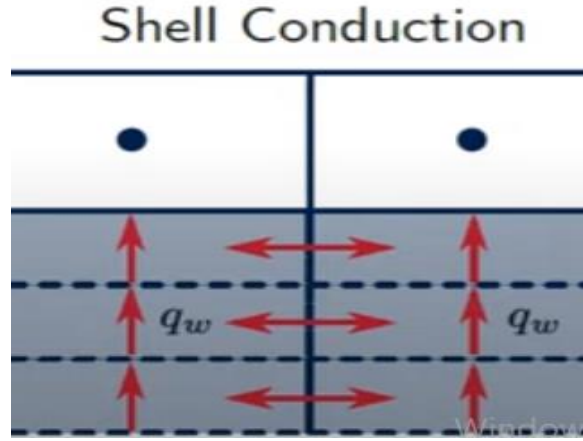
Şekil 3.9’ da Shell Conduction tasarımı şematik olarak verilmiştir. Shell conduction modelleme şekli yalnızca üç boyutlu tasarımlar için ve basınç tabanlı (pressure based) analizlerde kullanılabilir (Shell Conduction Consendiration, 2022). Bu modelleme biçiminde birden fazla tabaka tanımlanabilir. Bu tez çalışmasında iki ve üç tabakalı yapı olarak tasarımlar yapılmıştır. Ayrıca çalışmalarda her bir tabaka arasındaki değerler de okunabilir.

Bir sınır duvarına uygulanan tabaka iletimi durumunda, orijinal duvarda belirlenen sınır koşulu iç yüzeye uygulanmış ve orijinal duvar birleştirilmiş duvar olarak değerlendirilmiştir (Shell Conduction Consendiration, 2022).



Şekil 3.9. Shell Conduction tasarımı (Shell Conduction Consendiration, 2022)

Wall tickness metodunda ısı tek boyutlu olarak hesaplanırken Shell conduction metodunda iki boyutlu olarak hesaplanır (Wimshurst, 2019). Bu çalışmadaki yapı gereği de ısıнын tünel tabakalarında uzunlamasına ilerlediği göz önüne alındığında bu metodun kullanılması daha uygundur.



Şekil 3.10. Shell conduction metodunda ısıнын yayılım şekli (Wimshurst, 2019).

Şekil 3.10’ da Shell conduction metodunda ısıнын yayılım şekli ve katmanların yapısı gösterilmiştir. Burada katmanların yapısı da görülmektedir. Özellikle çok katmanlı yapılarda, her bir katmandaki sıcaklık değerlerinin bulunması açısından çok kullanışlı bir yöntemdir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tünel duvarı temel olarak beton ve toprak (dağ) olmak üzere iki tabakadan meydana gelmektedir. Bu çalışmada iki tabakaya ek olarak farklı özelliklere sahip malzemelerle üçüncü bir tabaka uygulanmıştır. Üçüncü katmanın tünel duvarı iç yüzeyi üzerindeki ısı transferine etkisi ve ısı transferine etki eden diğer parametreler araştırılmıştır. Tünelin genel olarak sahip olduğu iki tabakalı durumu ile üç tabakalı durumu kıyaslanmıştır. Yapılan analizler 100 s, 300 s ve 600 s olmak üzere üç ayrı sürede gerçekleştirilmiştir.

4.1. İki katmanlı Yapı ve Üç katmanlı Yapı İncelemeleri

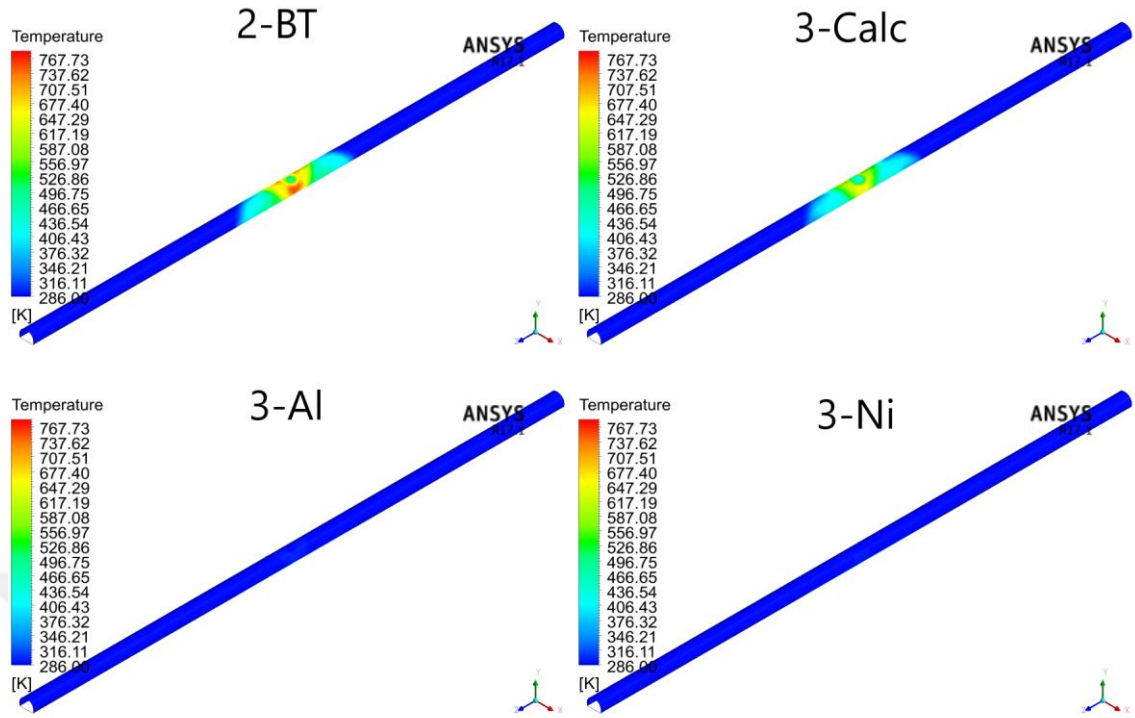
Tünel duvarlarına üçüncü katman olarak 3 cm kalınlığında Kalsiyum-silikat, Alüminyum ve Nikel uygulanmıştır. Kalsiyum-silikat malzemesi yangından korunma alanında, pasif korunma olarak adlandırılan bir uygulama ürünüdür. Kalsiyum-silikat (Calc) düşük ısı iletkenliği sayesinde ısıyı tünel duvar yüzeyine iletmez. Ayrıca kimyasal özelliğiyle de uzun süre ısıya dayanarak tünel içerisinde yangının büyümesini önler. Ancak oluşan ısı ın da içeride hapsolacağı unutulmamalıdır. Bu nedenle ısı ın duvar yüzeylerinden dışarıya atılmasının daha doğru bir yöntem olacağı düşünülmüştür. Bu çalışmada ısı iletkenlik katsayısı daha yüksek malzemeler kullanılarak ısı transferini artırmak hedeflenmiştir.

4.2. 100s’lik Süre Analizleri

Bu çalışmada ölçeklendirme yaklaşımının doğruluğunu göstermek için hem tünelin gerçek ölçüleri ile hem de 1:100 ölçekli model ile analizler yapılmıştır.

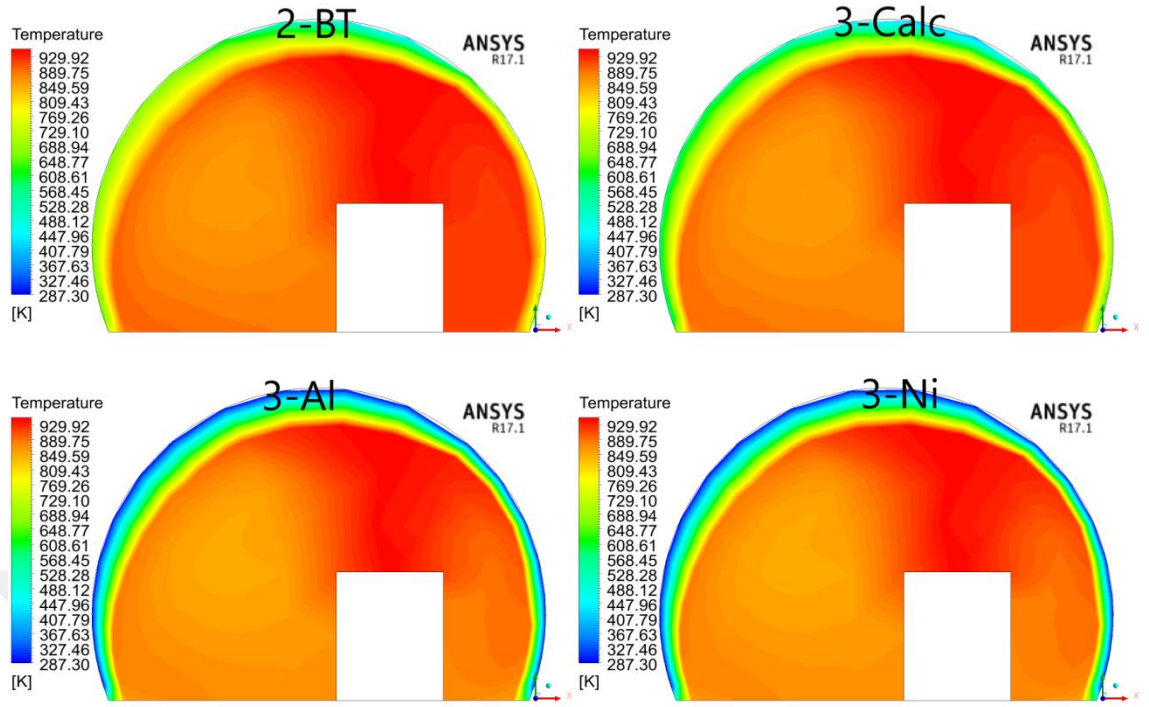
4.2.1. Gerçek boyutlarla yapılan analizler

Bu bölümde önce tünelin gerçek boyutları ile yapılan analizlere ait sonuçlar verilmiştir. Konturlar ve grafikler yardımıyla sıcaklık dağılımına ait veriler gösterilmiştir. Ayrıca akışkana ait hız grafikleri de gösterilmiştir.

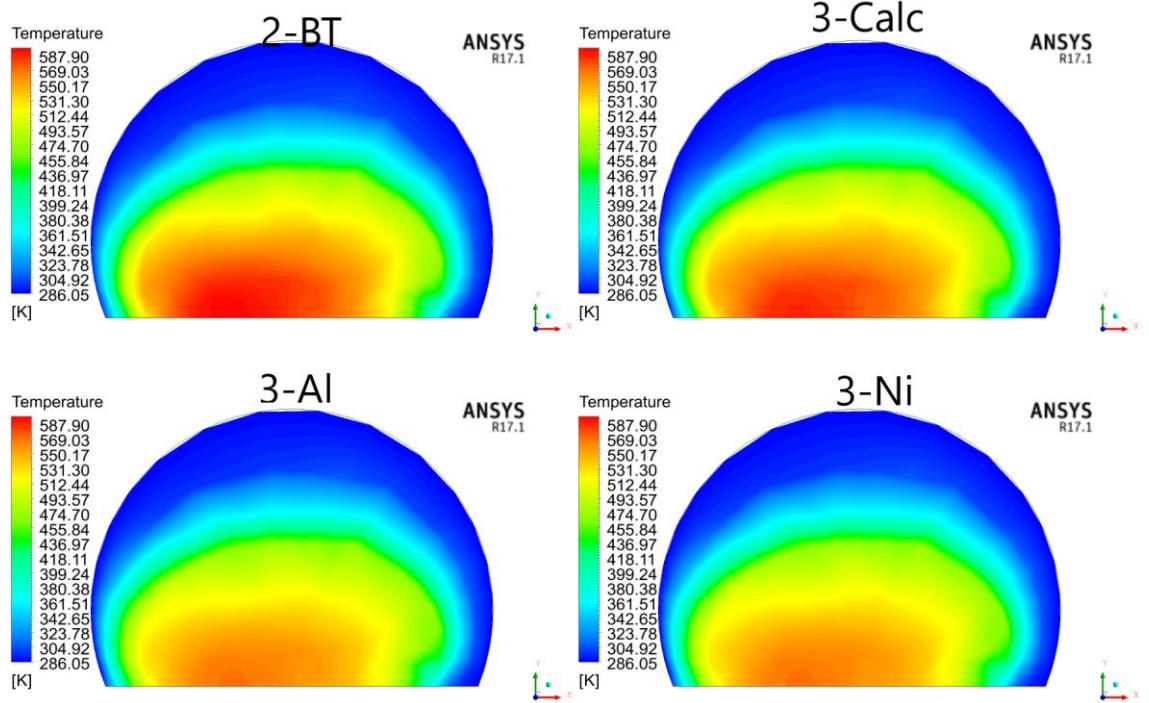


Şekil 4.1. Tünel iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 4.1 tünel iç duvar yüzeyindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Duvar iç yüzeyindeki maksimum sıcaklık 764 K olarak beton-toprak yapıda elde edilmiştir. Kalsiyum-silikat kullanılan üç tabakalı yapıda sıcaklık değeri 682 K olarak tespit edilirken, Alüminyum ve Nikel ile oluşturulan yapıda sırasıyla 298 K ve 294 K olarak elde edilmiştir.

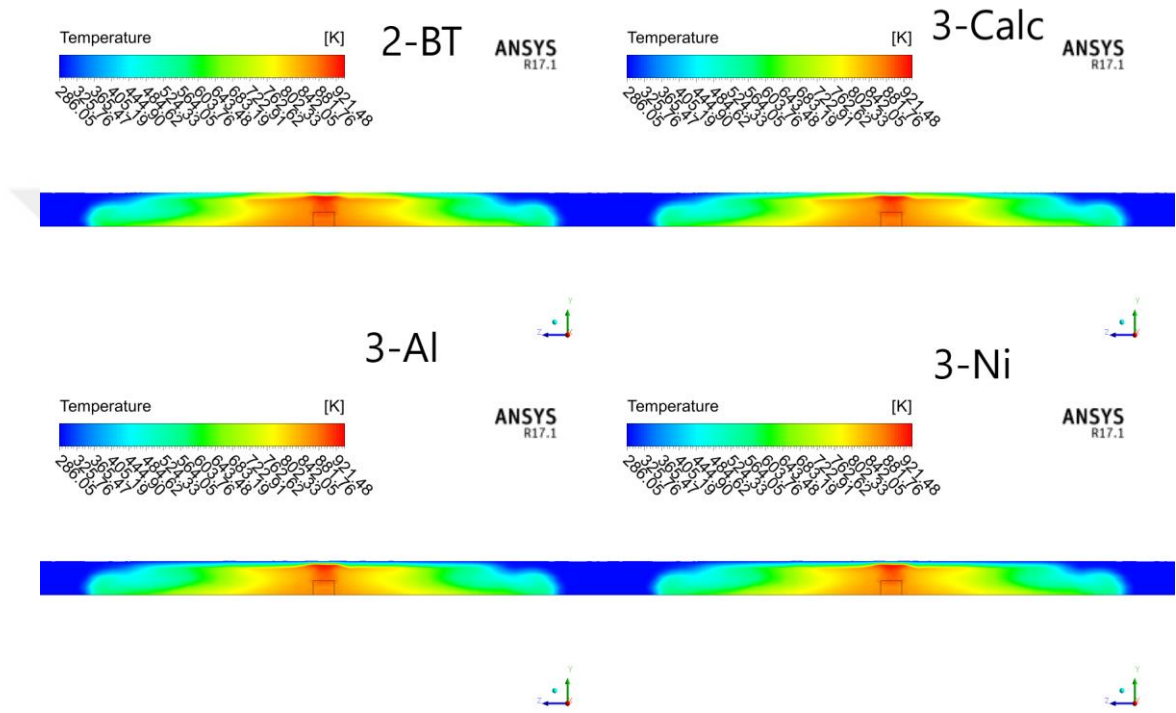


Şekil 4.2. 200. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı



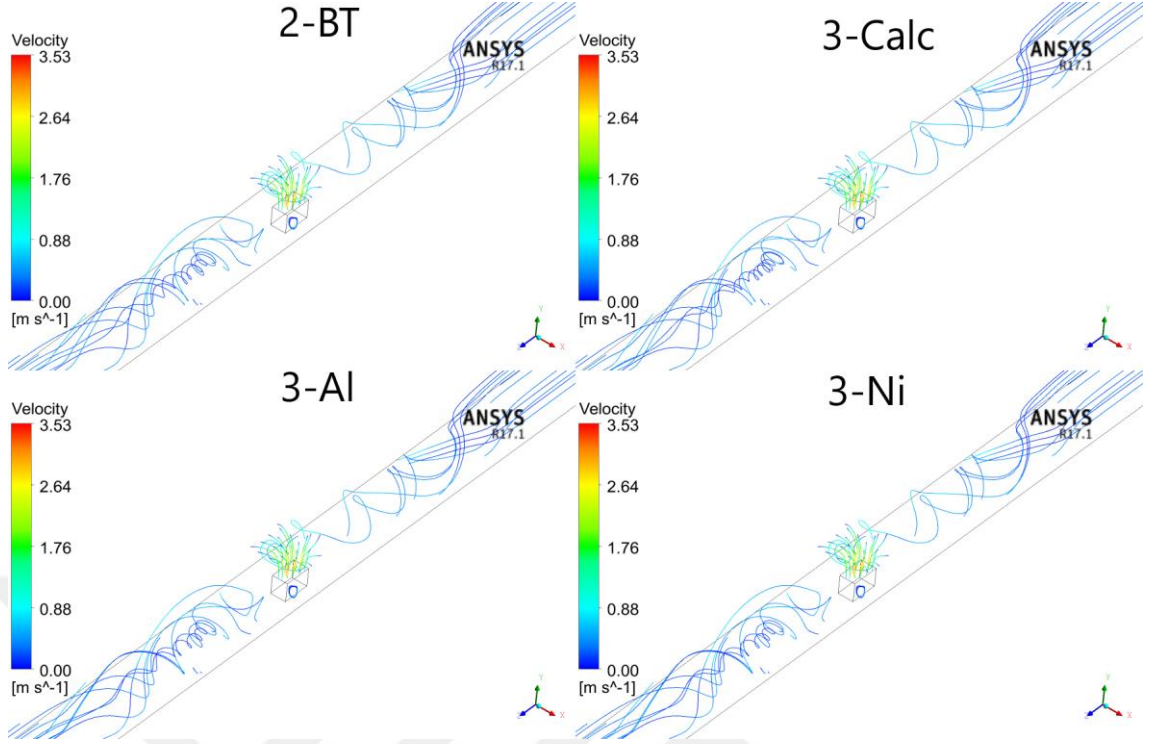
Şekil 4.3. 300. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 sırasıyla tünelin 200. ve 300. metresinde enine kesitteki (x-y düzlemi) sıcaklık dağılımını göstermektedir. Yangın kaynağından uzaklaştıkça sıcaklık dağılımı değişmiştir. Tünelin 300. metresinde, iki tabakalı yapı ile Kalsiyum-silikat kullanılan üç tabakalı yapıda sıcaklığın yaklaşık 600 K olduğu gözlemlenirken, Alüminyum ve Nikel malzemenin kullanıldığı üç tabakalı yapılarda 510 K-530 K aralığında olduğu görülmüştür.



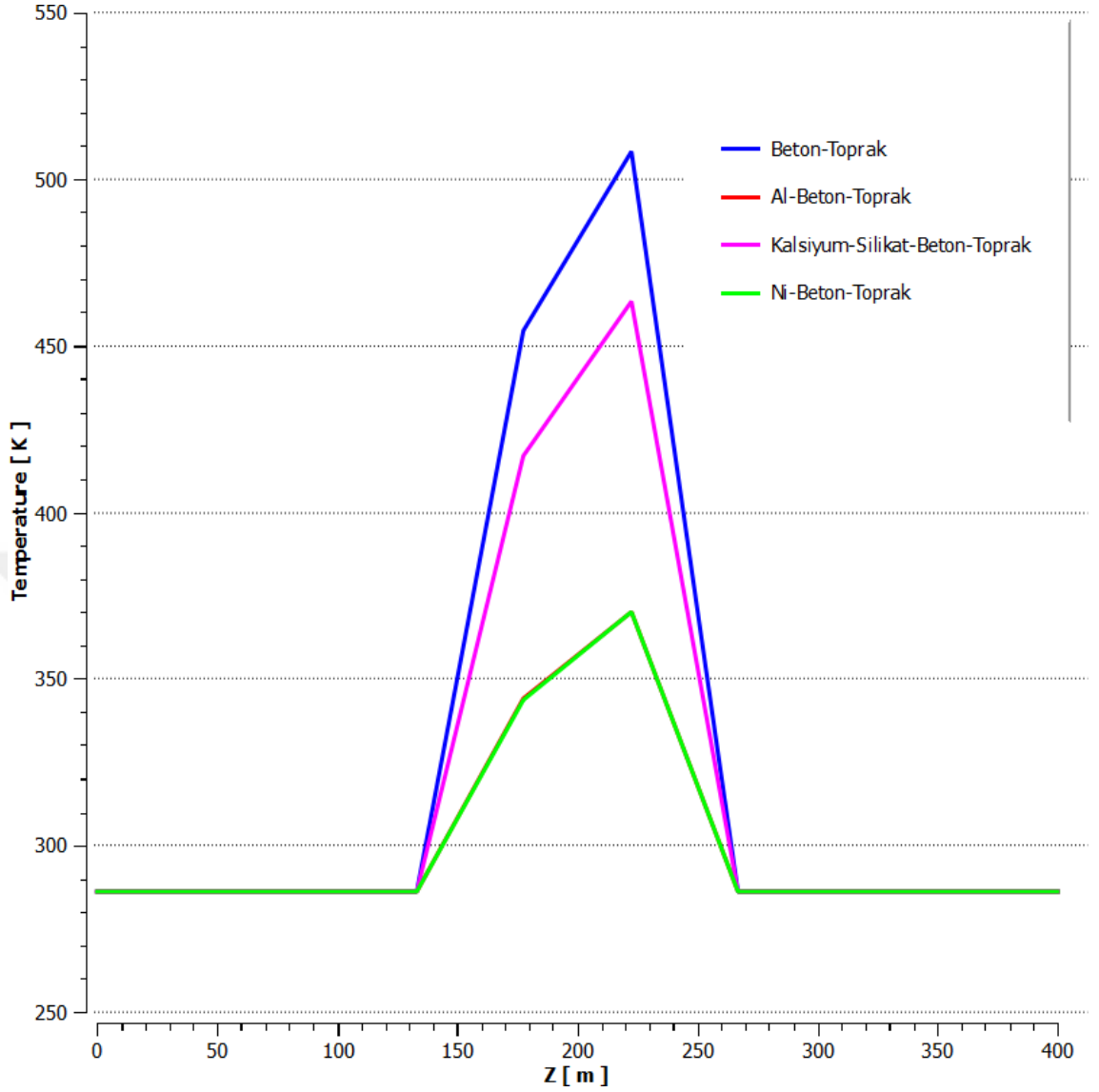
Şekil 4.4. y-z düzleminde (x=0'da) sıcaklık dağılımı

Şekil 4.4 y-z düzleminde sıcaklık dağılımını vermektedir. Kalsiyum-Silikat kaplı yapı ile iki tabakalı yapıda, ısının ortamda kaldığı ve sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 100 s süresinde ısı etkilerinin az olması nedeniyle sıcaklık dağılımında belirgin farklar oluşmamıştır. Ancak yangın kaynağına yakın bölgelerde iki tabakalı yapı ile Kalsiyum-Silikat kaplı yapıda sıcaklığın azalmadığı 900 K civarında kaldığı gözlemlenmiştir.



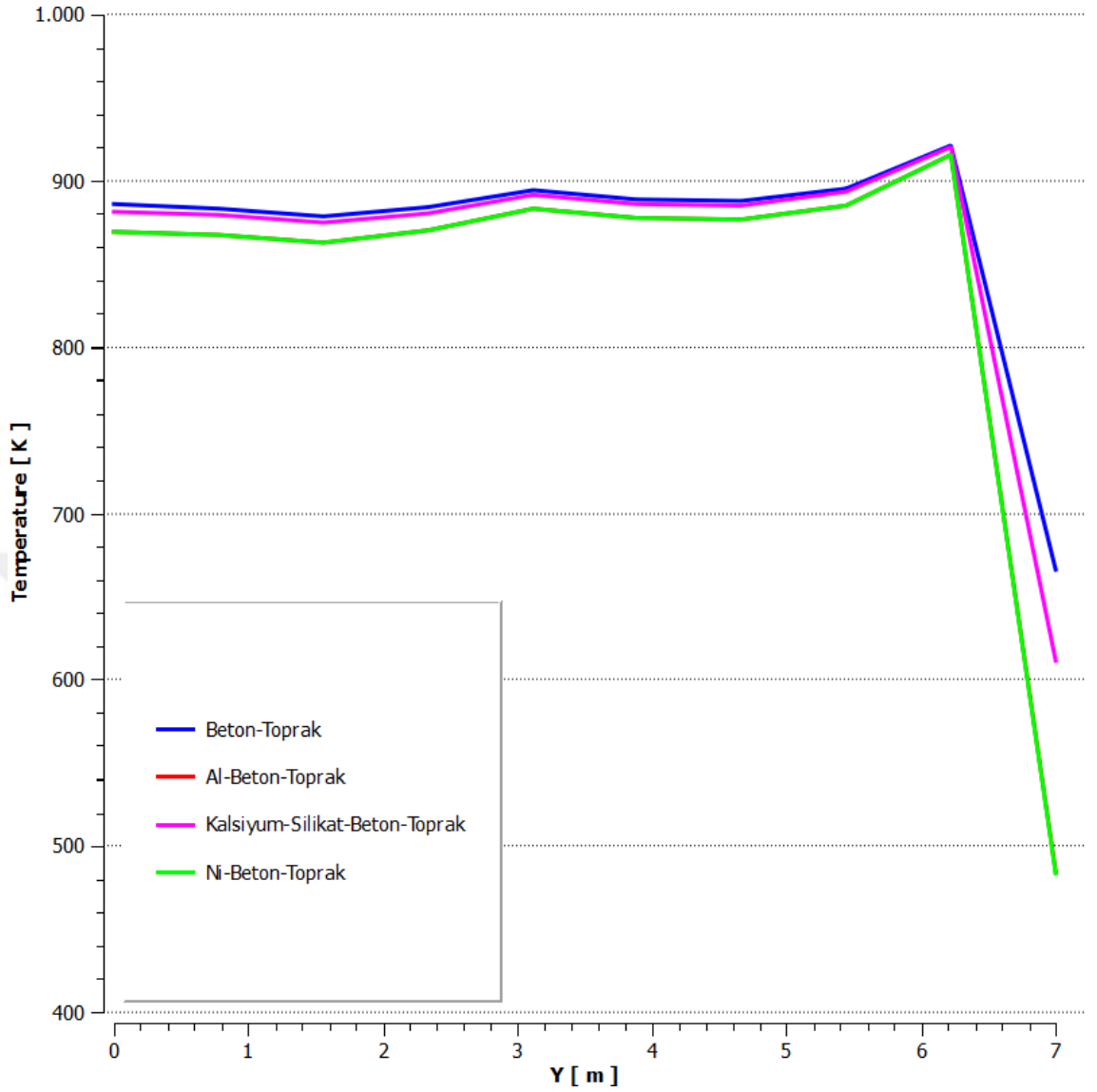
Şekil 4.5 Sıcak gazın hız değişimi

Şekil 4.5 sıcak gazın hız değişimini göstermektedir. Yangın kaynağına yakın bölgelerde vorteksler oluştuğu, tünel portallarına yakın bölgelerde ise daha düzgün bir akış olduğu görülmektedir. Ayrıca gazın hız değişiminin her bir tabaka için benzer olduğu tespit edilmiştir.



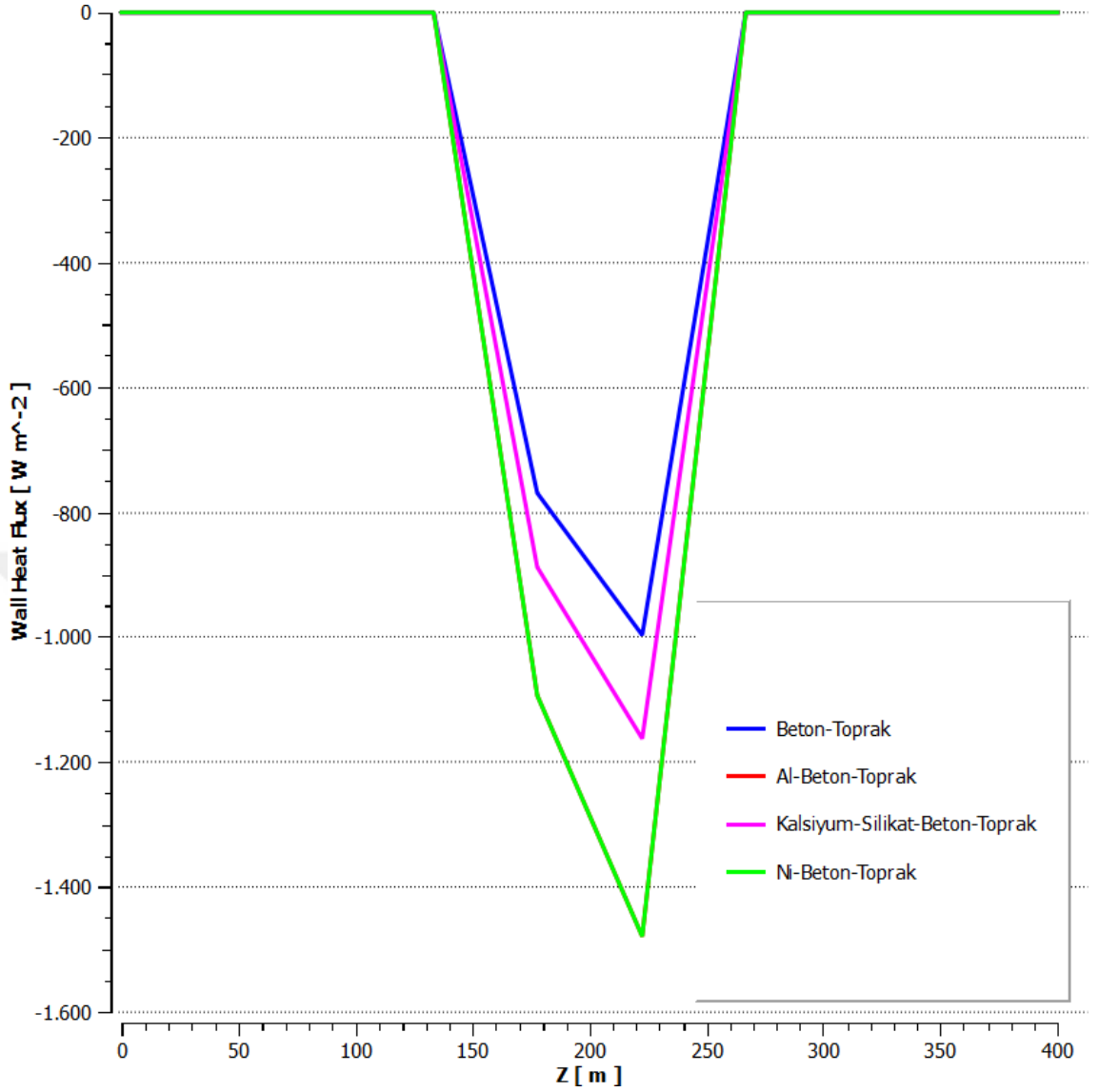
Şekil 4.6. Tünel tavanının altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı

Tavanın hemen altında ve tünel uzunluğu boyunca sıcaklık değişimi Şekil 4.6’ da verilmiştir. En yüksek sıcaklık değeri 510 K ile iki tabakalı yapıda elde edilmiştir. Kalsiyum-silikat kaplı yapıda sıcaklık 460 K olarak tespit edilirken, Alüminyum ile Nikel kaplı üç tabakalı yapılarda aynı sıcaklık değeri 372 K olarak elde edilmiştir. Kalsiyum-silikat kaplı yapı ile yapılan analiz sonuçları, Tomar vd. (2022) çalışmalarında elde ettikleri gaz sıcaklığına ait sonuçlarla benzerlik göstermektedir.



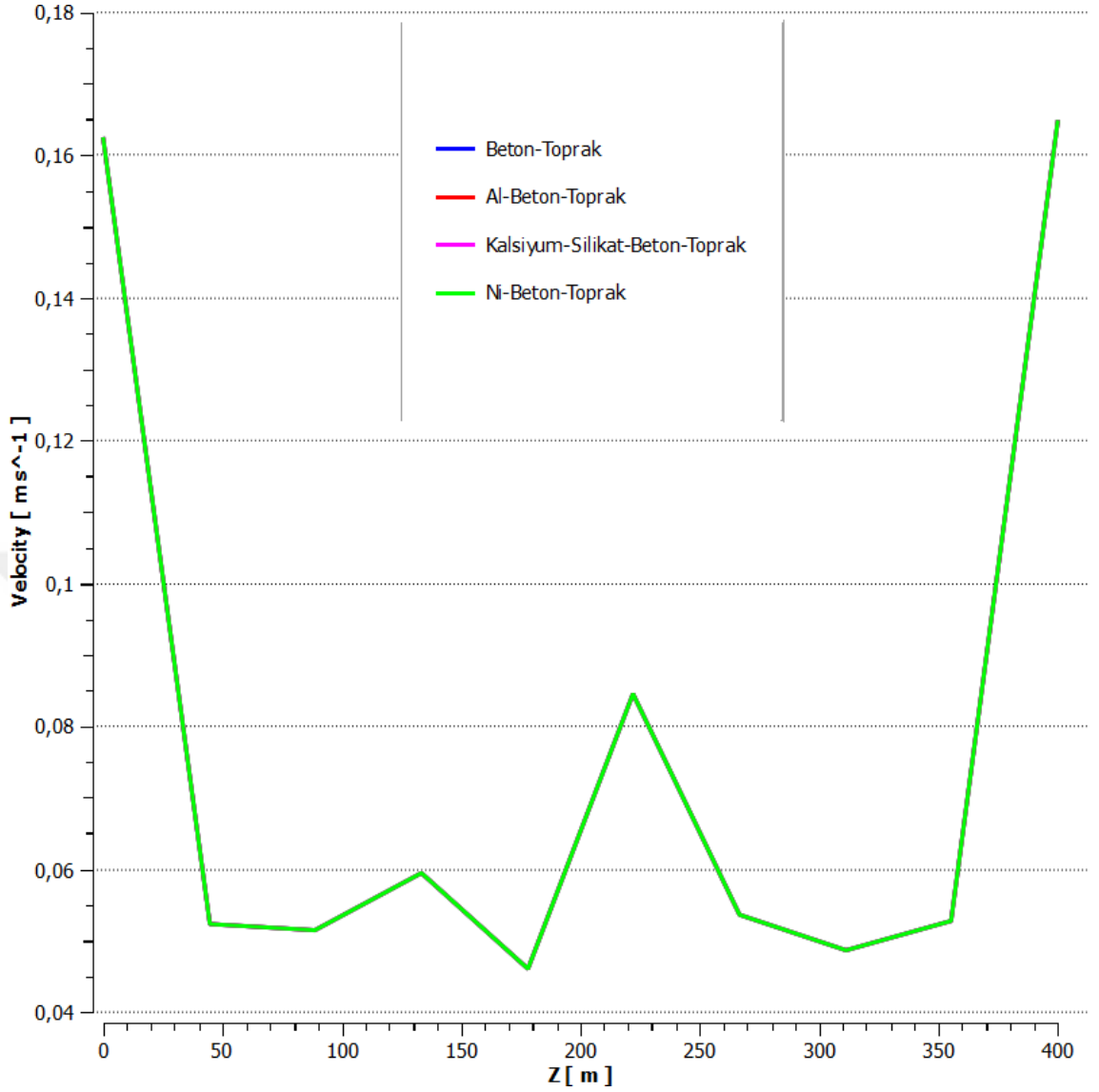
Şekil 4.7. 200. metrede y ekseninde sıcaklık dağılımı

Şekil 4.7 yangın kaynağının bulunduğu yer olan 200. metrede, gazın y eksenine doğrultusunda (tünel tavanına doğru) sıcaklık değişimini göstermektedir. Tüm yapılar için sıcaklık tavana kadar aynı kalmış ve ısı özellikleri nedeniyle tavanın altında hızla düşmüştür. En hızlı düşüş, 920 K'den 480 K sıcaklığa, Alüminyum ve Nikel kaplı yapılarda elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Tünel tavanının altında tünel boyunca oluşan ısı akısı

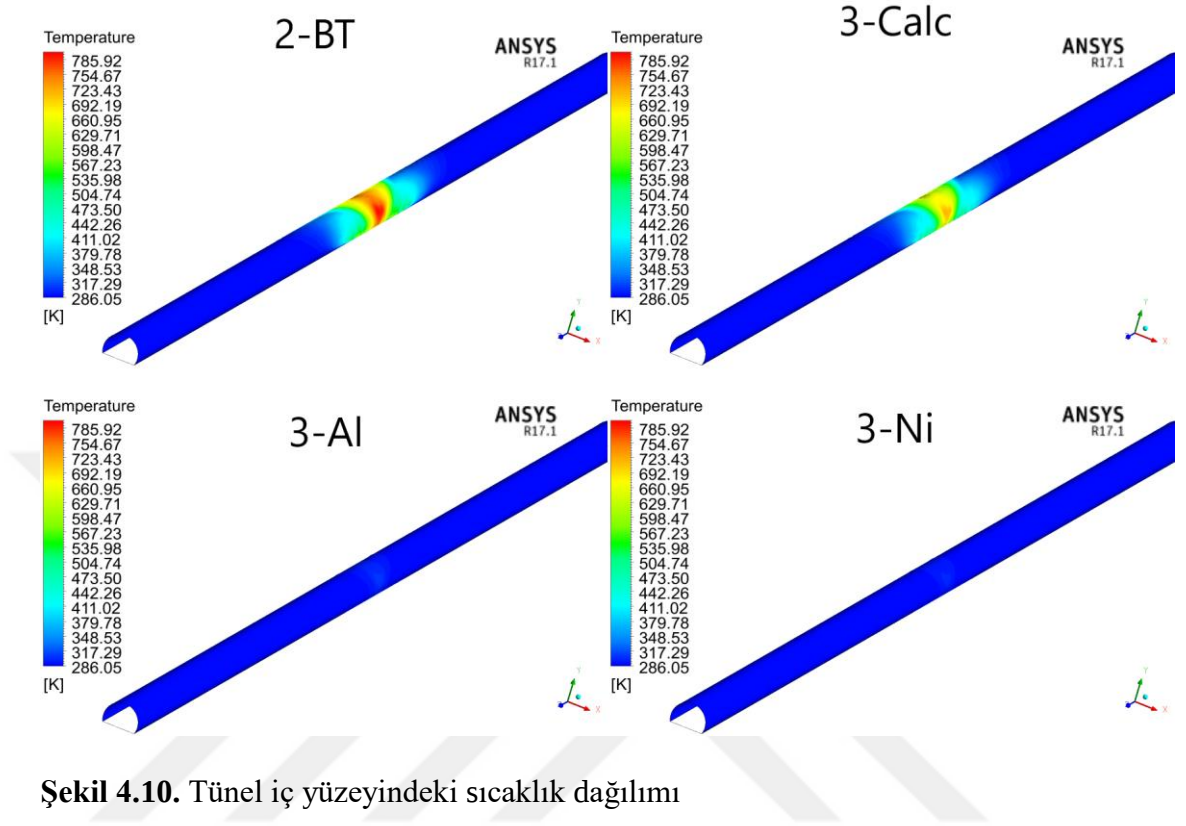
Tünel tavanının hemen altında oluşan ısı akısı Şekil 4.8’ de verilmiştir. Daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip olan Alüminyum ve Nikel malzemelerin kullanıldığı üç tabakalı yapılarda, en yüksek ısı akısı yangın kaynağının olduğu noktada 1450 W/m^2 olarak elde edilmiştir. En düşük ısı akısının ise beton-toprak yapıda 1000 W/m^2 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.9. Tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızı

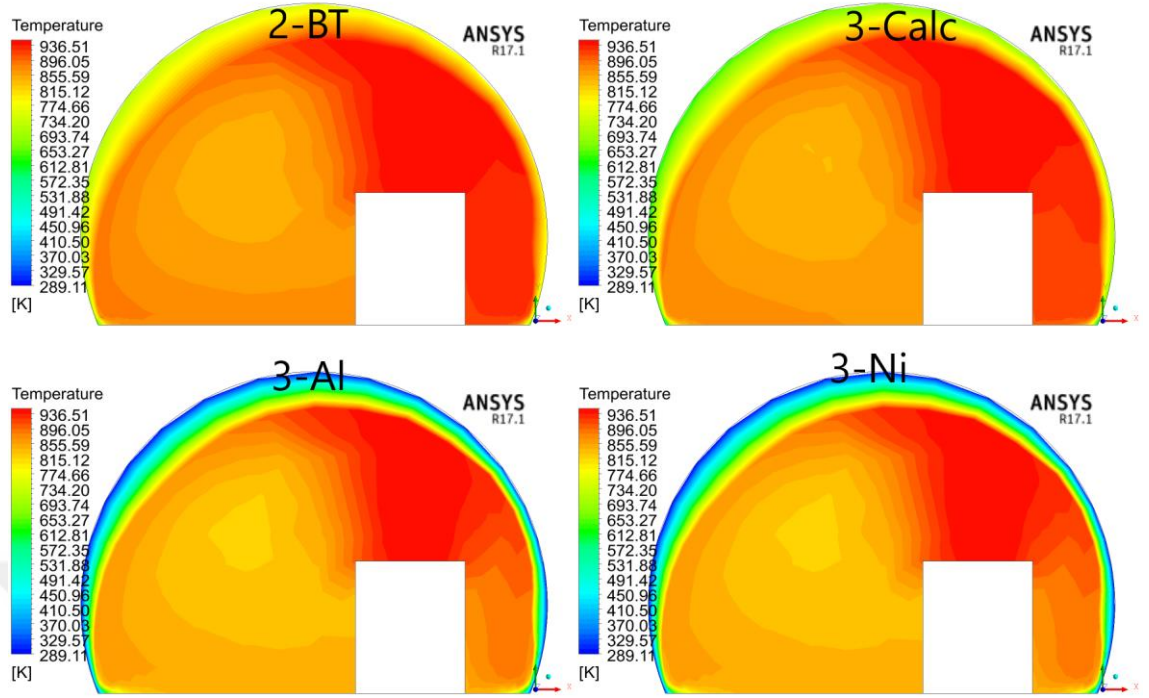
Şekil 4.9 tünel tavanının hemen altında, gaz akış hızının tünel uzunluğu boyunca değişim grafiğini vermektedir. Akışkan hızındaki değişimin tüm yapılar için aynı olduğu gözlenmektedir. En düşük hız yangın kaynağına yakın bölgede 0,046 m/s olarak elde edilirken, en yüksek hız 0,162 m/s olarak tünel portallarında elde edilmiştir.

4.2.2. Model ölçek ile yapılan analizler

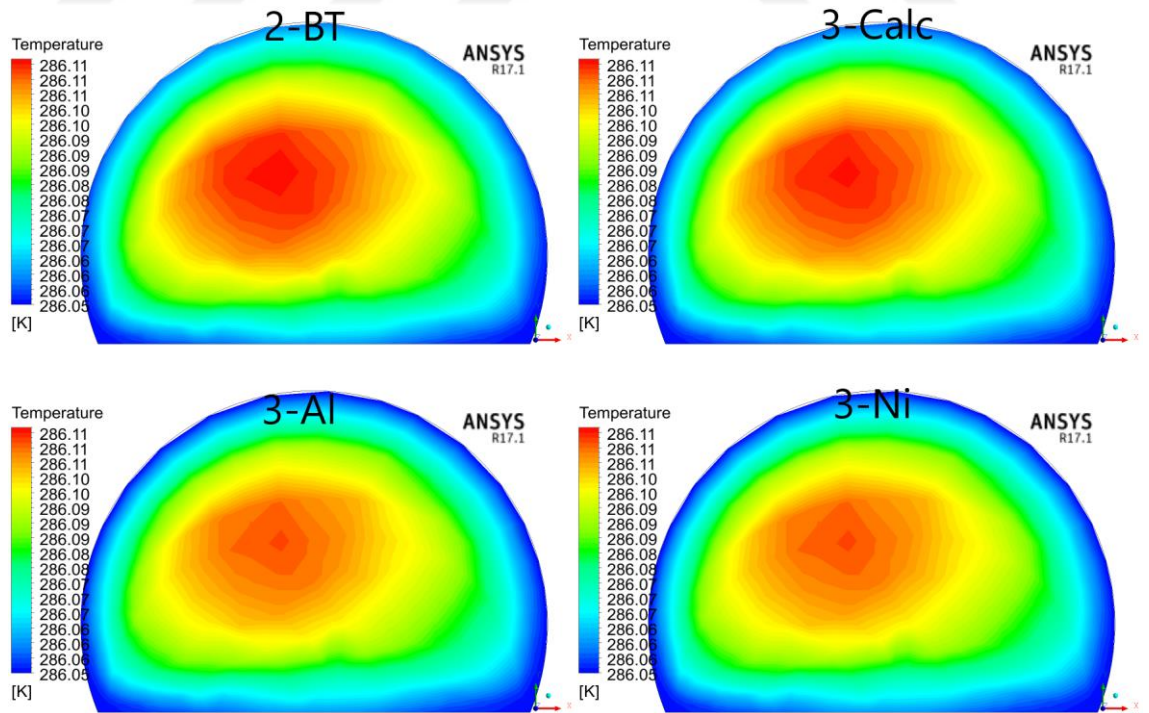


Şekil 4.10. Tünel iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 4.10 tünel içi duvar yüzeyindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Gerçek ölçülerle yakın değerler elde edilmiştir. İki tabakalı yapı 804 K ile en yüksek sıcaklık değerinin görüldüğü yapı olmuştur. Kalsiyum-silikat kaplı üç tabakalı yapıda 734 K, Alüminyum kaplı yapıda 305 K ve Nikel kaplı yapıda ise 298 K sıcaklık değerleri elde edilmiştir.

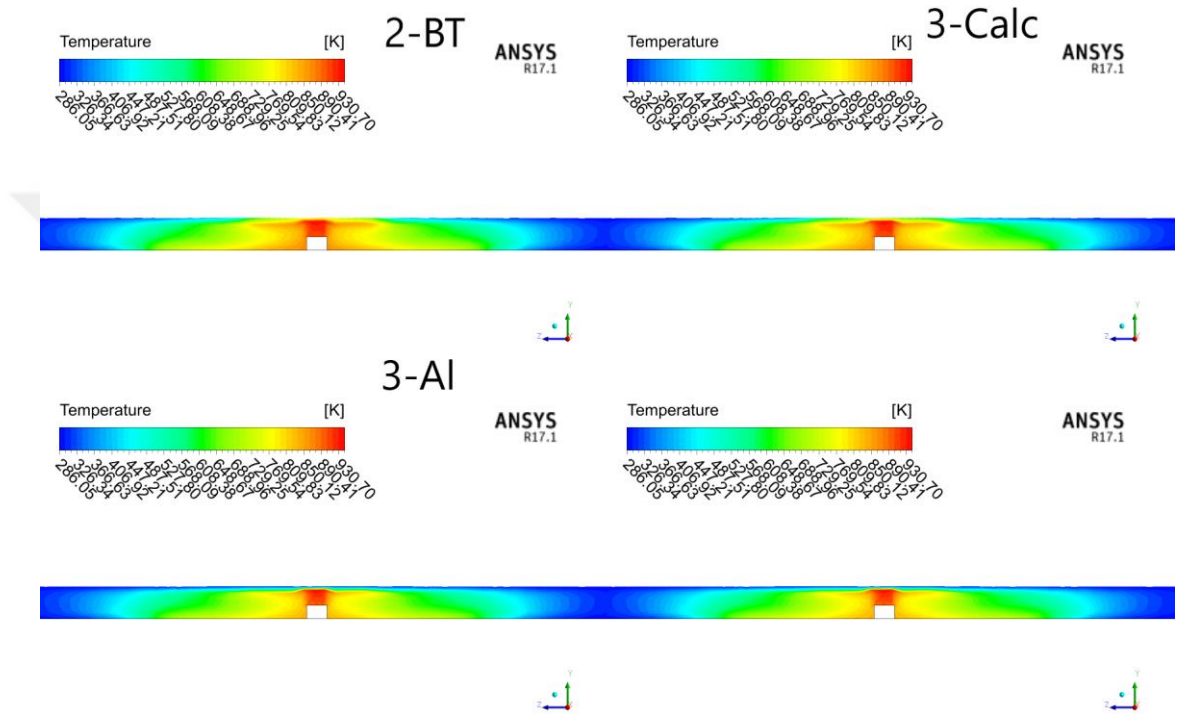


Şekil 4.11. 2. metre x-y düzleminde oluşan sıcaklık dağılımı



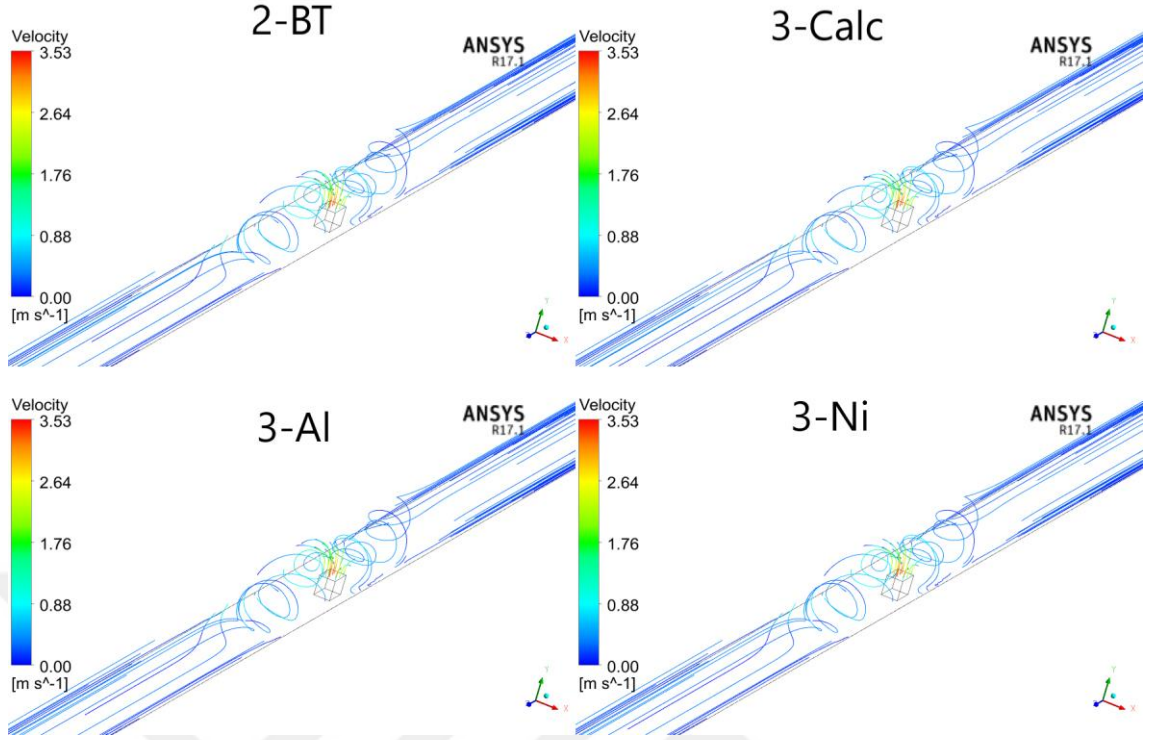
Şekil 4.12. 3. metre x-y düzleminde sıcaklık dağılımı

Şekil 4.11 tünelin 2. metresinde enine kesitteki sıcaklık dağılımını gösterirken, Şekil 4.12 tünelin 3. metresindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Diğer sürelerle kıyasla 100 s'lik zaman aralığında sıcaklık değişimleri daha düşük olmuştur. 3. metrede, yapılarıdaki sıcaklık değerleri arasındaki fark çok azdır.



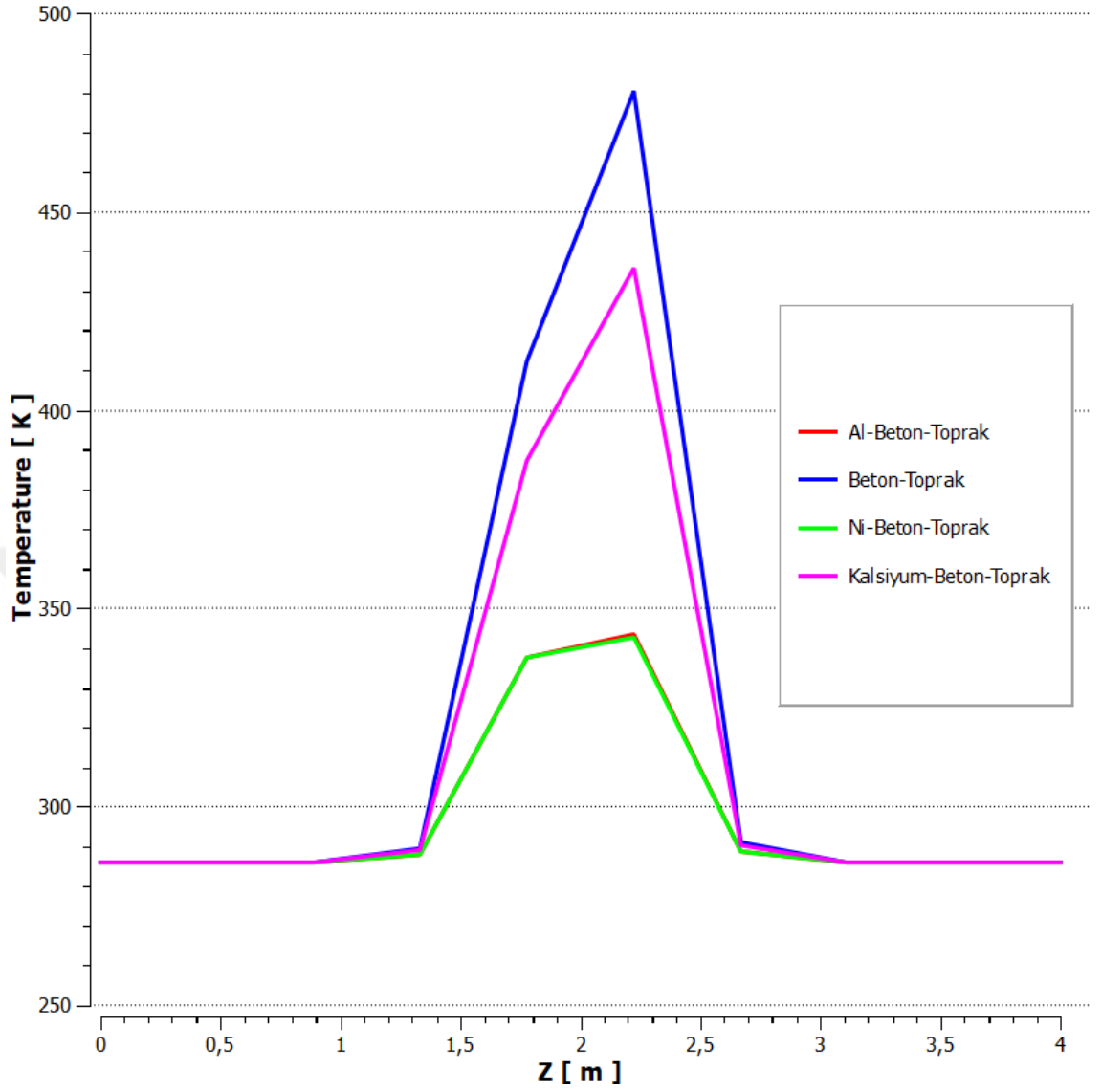
Şekil 4.13. y-z düzleminde($x=0$ 'da) sıcaklık dağılımı

Şekil 4.13 tünel boyunca dik kesit üzerinde oluşan sıcaklık dağılımını göstermektedir. Gerçek ölçülerle yapılan analizlere yakın değerler elde edilmiştir. Isı kaynağına yakın bölgelerde, iki tabakalı yapı ve Kalsiyum-silikat kaplı yapılarda sıcaklığın 900 K civarında olduğu gözlemlenmiştir. Alüminyum ve Nikel kullanılan üç tabakalı yapılarda ise aynı bölgelerde sıcaklığın 800 K değerine kadar düştüğü görülmüştür.



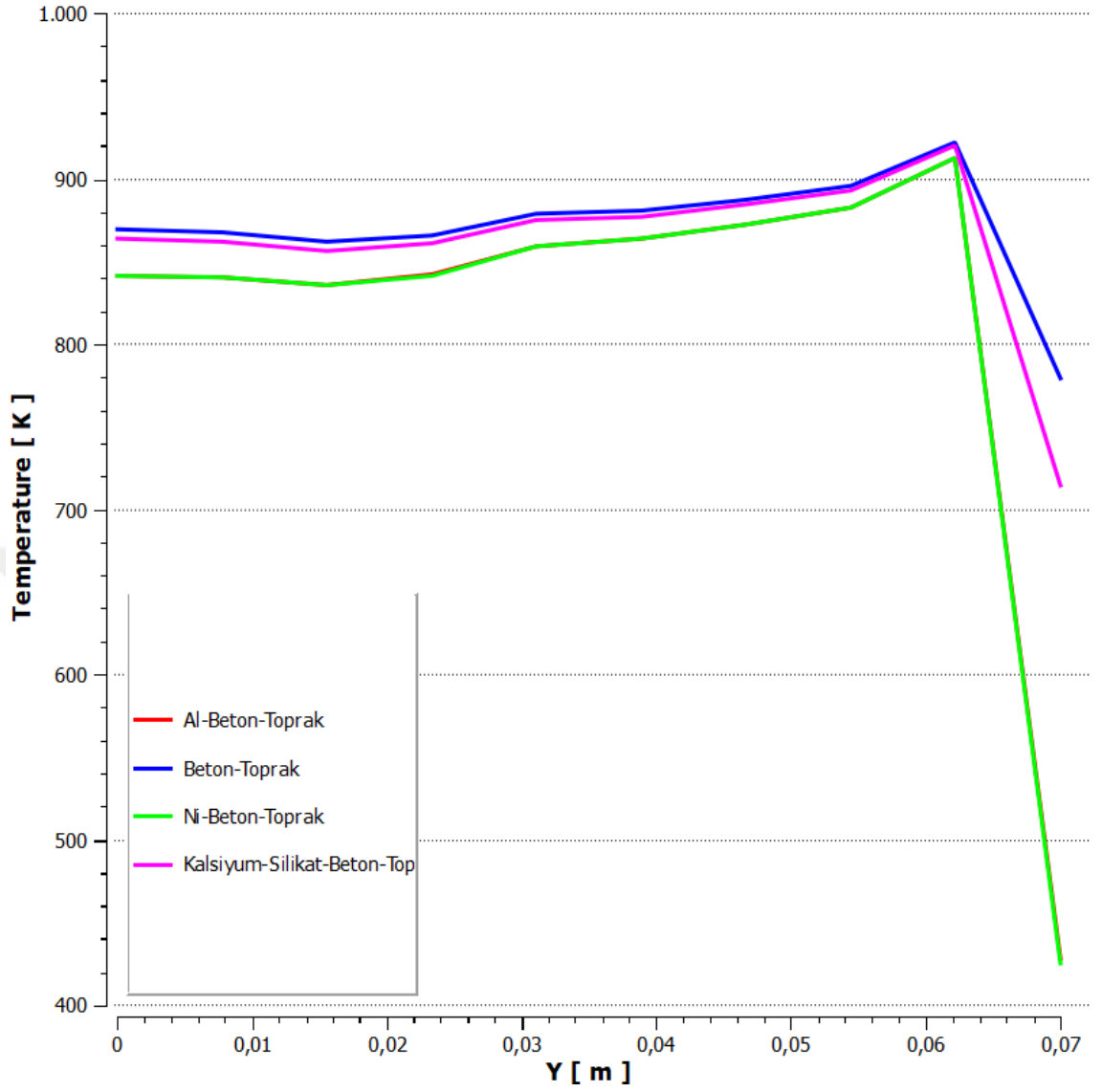
Şekil 4.14. Sıcak gazın hız değişimi

Şekil 4.14 ile sıcak gazın hız değişimi gösterilmiştir. Gerçek ölçülerle yapılan analizlerde olduğu gibi akışkan, yangın kaynağından portallara doğru vorteksler görülmektedir.



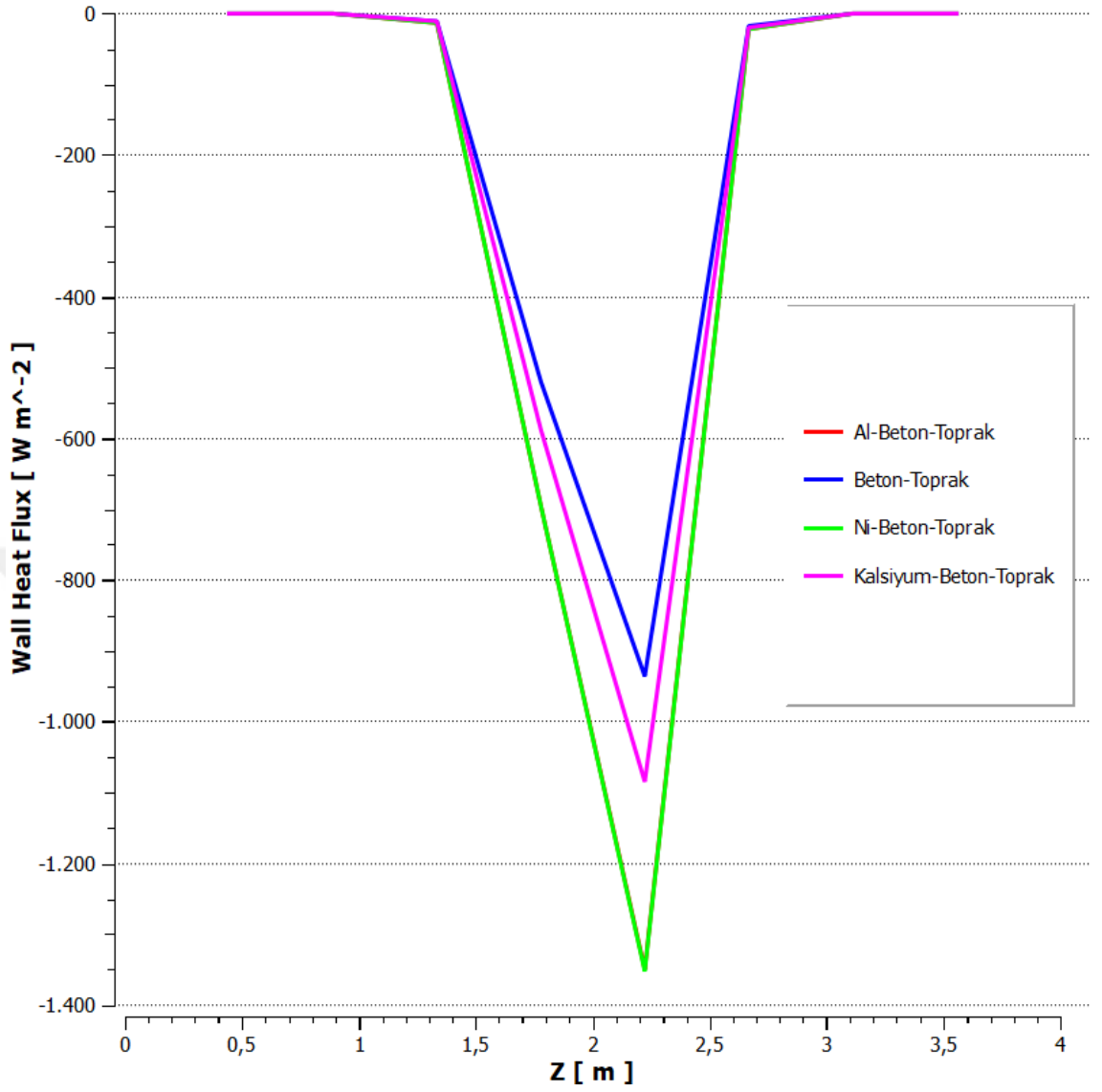
Şekil 4.15. Tünel tavanının altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı

Tavanın hemen altında z-ekseni boyunca sıcaklık dağılımı Şekil 4.15’ te verilmiştir. Beton-toprak yapıda tünel tavanı altında sıcaklığın 480 K olduğu tespit edilirken, Alüminyum ile Nikel kaplı üç tabakalı yapılarda bu değer 340 K olarak elde edilmiştir.



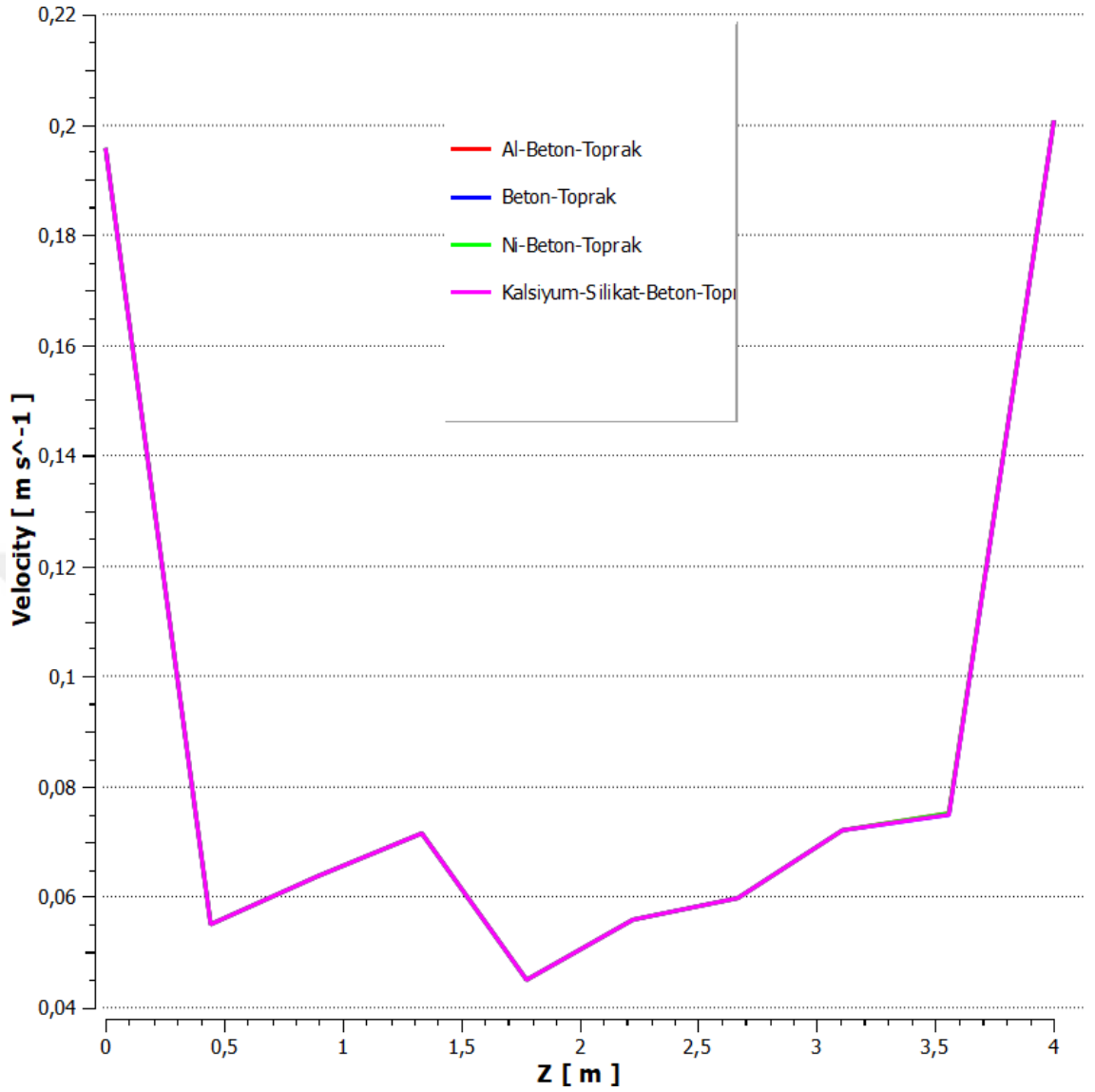
Şekil 4.16. 2. metrede y ekseninde sıcaklık dağılımı

Şekil 4.16 yangın kaynağı noktasında, gazın y eksenine doğrultusunda sıcaklık değişimini göstermektedir. Nikel ve Alüminyum kaplı üç katmanlı yapıya ait tünel tavanındaki sıcaklık 900 K'den 420 K'e hızlı bir düşüş gösterirken, iki tabakalı yapıda sıcaklığın 780 K'e düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4.17. Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı

Tünel tavanının hemen altında oluşan ısı akısı değişimi Şekil 4.17’ de verilmiştir. Maksimum ısı akısı Alüminyum ve Nikel malzemelerin kullanıldığı üç tabakalı yapılarda 1350 W/m^2 olarak elde edilirken, en düşük değer (920 W/m^2) iki tabakalı yapıda ortaya çıkmıştır.



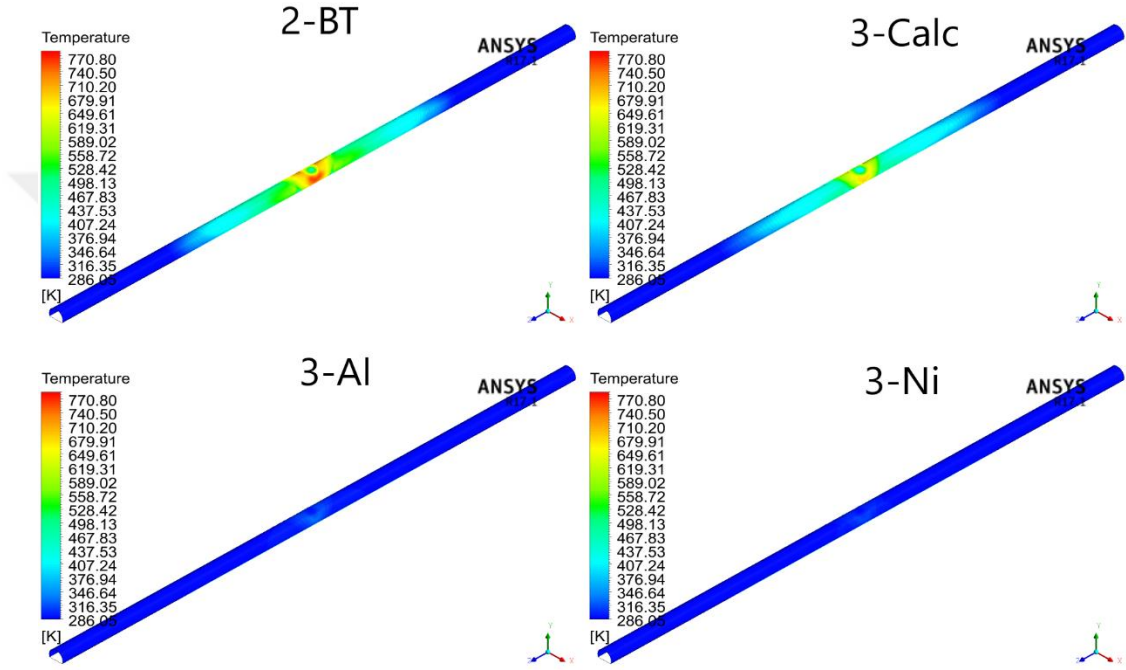
Şekil 4.18. Tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızı

Şekil 4.18 tünel tavanı altındaki gaz akış hızının değişimini göstermektedir. Model ölçekli yapı ile yapılan analizlerde en yüksek hız değeri 0,195 m/s olarak elde edilmiştir. Gerçek ölçülerle yapılan analize yakın değerler görülmüş ve akışkan hızının tünel portallarına yaklaştıkça doğrusal bir şekilde arttığı gözlenmiştir.

4.3. 300 s' lik Süre Analizleri

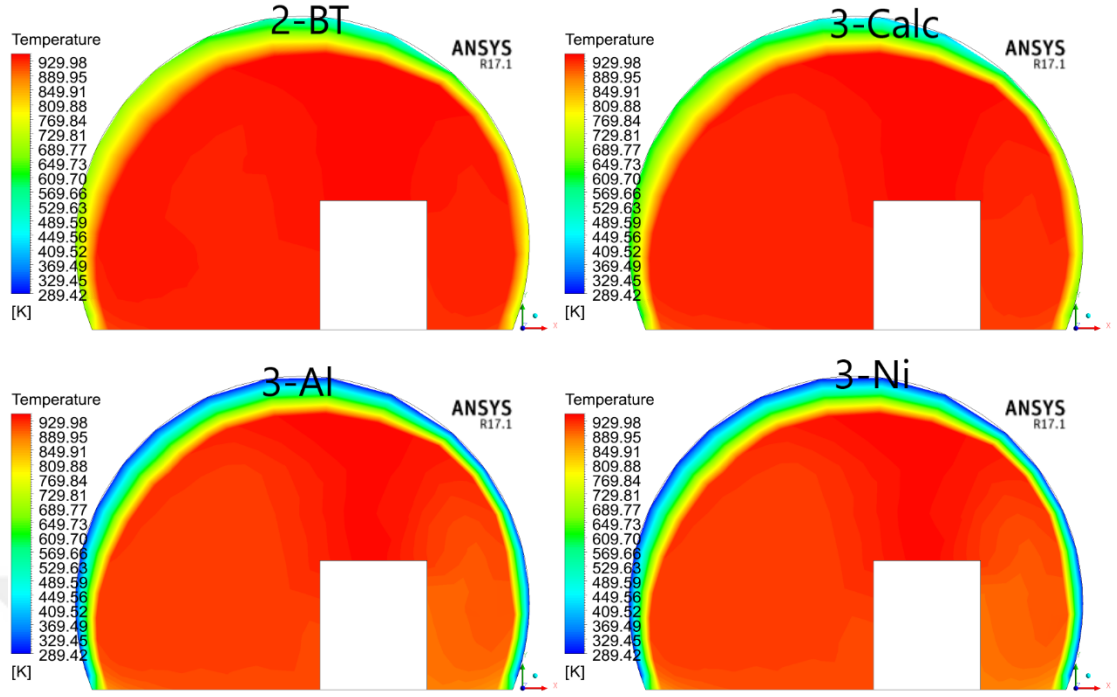
100 s ile kıyasla 300 s' lik sürede yapılan analizlerde, zamana bağlı olarak ısı etkisinin artmasıyla malzeme özellikleri arasındaki farkın daha belirgin şekilde ortaya çıktığı görülmüştür.

4.3.1. Gerçek boyutlarla yapılan analizler

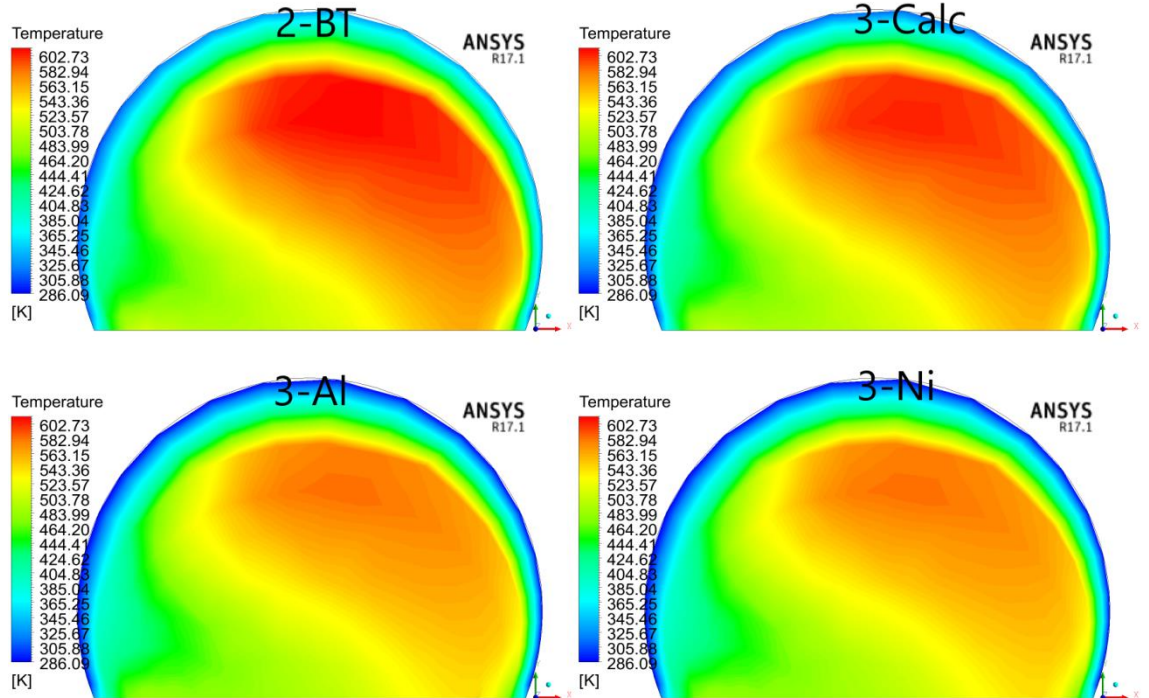


Şekil 4.19. Tünel iç yüzeyi üzerindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 4.19 tünel içi duvar yüzeyindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Sürenin artmasıyla ısı etkisinin arttığı görülmektedir. İki tabakalı yapıda duvar sıcaklığı 771 K olarak elde edilirken, üç tabakalı yapılar arasında en yüksek sıcaklık değeri Kalsiyum-silikat kullanılan üç tabakalı yapıda 702 K olarak gözlemlenmiştir.

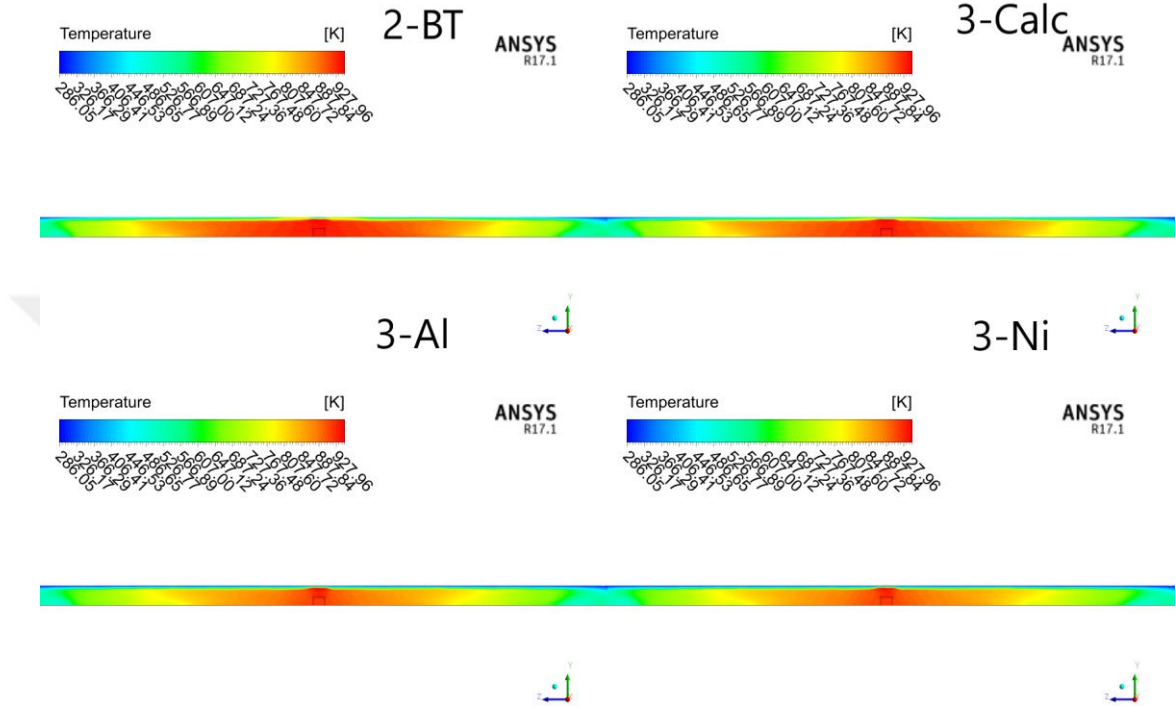


Şekil 4.20. 200. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı



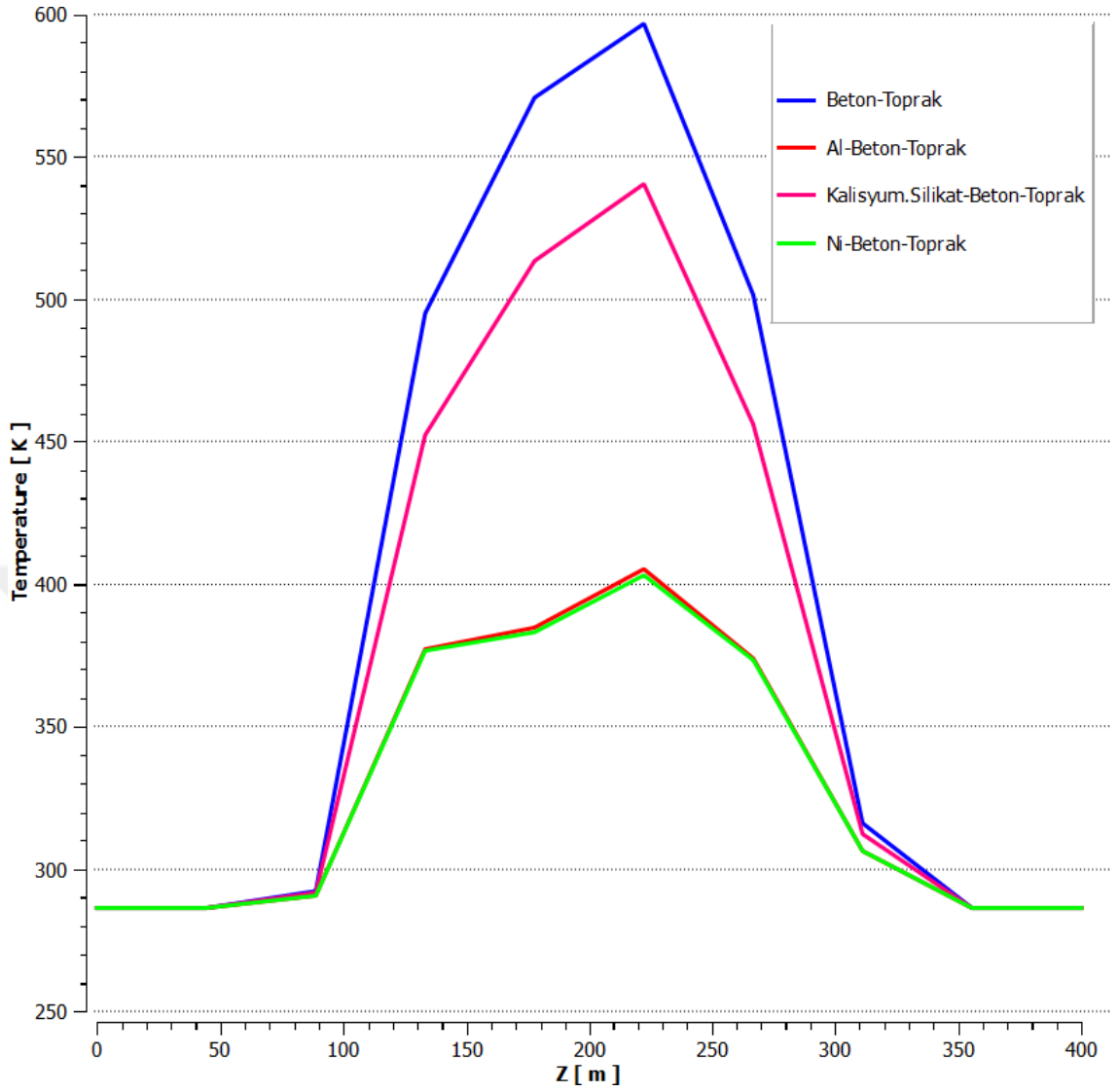
Şekil 4.21. 300.metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı

Şekil 4.20 tünelin 200. metresinde enine kesitteki sıcaklık dağılımını, Şekil 4.21 ise 300. metresindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Kalsiyum-silikat kaplı yapı ve iki tabakalı yapılarda benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu iki yapıda, iç bölge sıcaklıklarının 300. metrede daha yüksek olduğu görülmüştür.



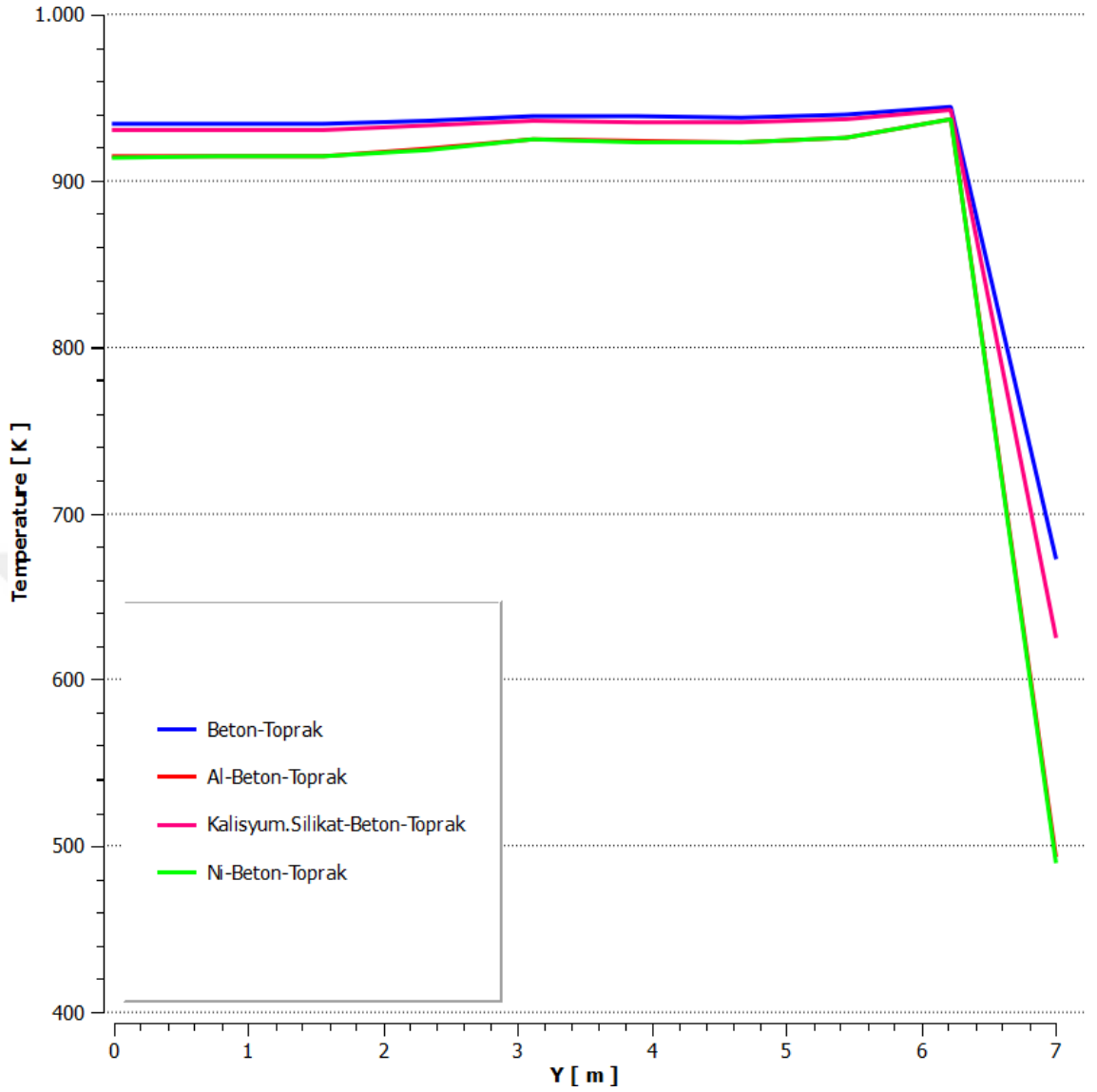
Şekil 4.22. y-z düzleminde($x=0$ 'da) sıcaklık dağılımı

Şekil 4.22 y-z düzlemi üzerindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. 300 s süre sonunda içerdeki sıcaklık dağılımının daha belirgin şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Sıcaklığın beton-toprak yapıda tünel boyunca 900 K civarında sabit kaldığı görülmüştür. Nikel kaplı yapıda ise sıcaklık tünel içerisinde düşüş göstererek 700 K değerine kadar inmiştir.



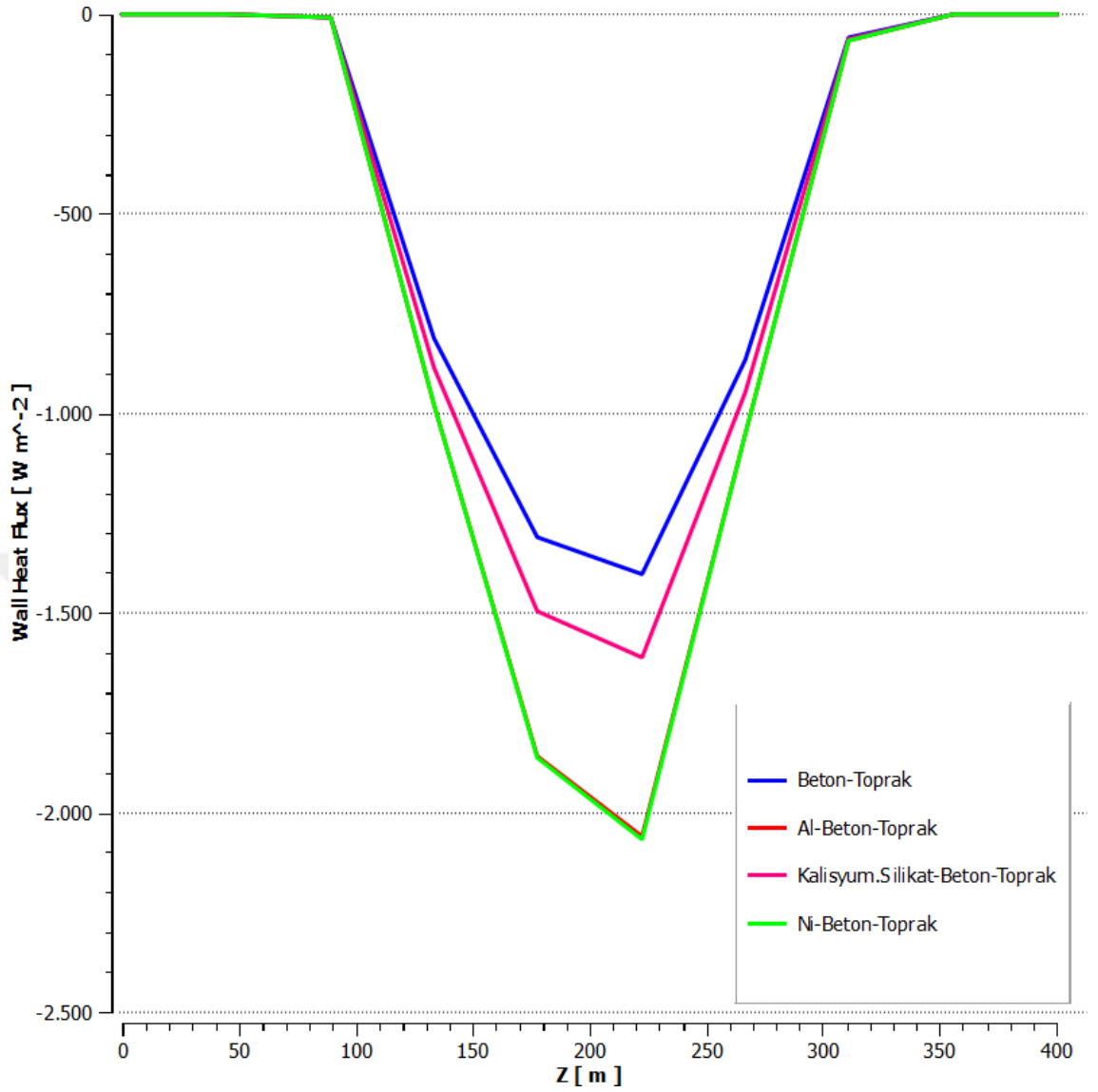
Şekil 4.23. Tünel tavanının altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı

Şekil 4.23 ile z eksenini boyunca, tünel tavanı altındaki sıcaklık değerlerinin değişimi verilmiştir. Tünel tavanındaki sıcaklık iki tabakalı yapıda 600 K iken, Kalsiyum -silikat kaplı üç tabakalı yapıda 540 K olarak elde edilmiştir. İç bölge sıcaklığı Alüminyum ve Nikel kaplı yapılarda diğer yapılara göre daha yavaş yükselmiştir.



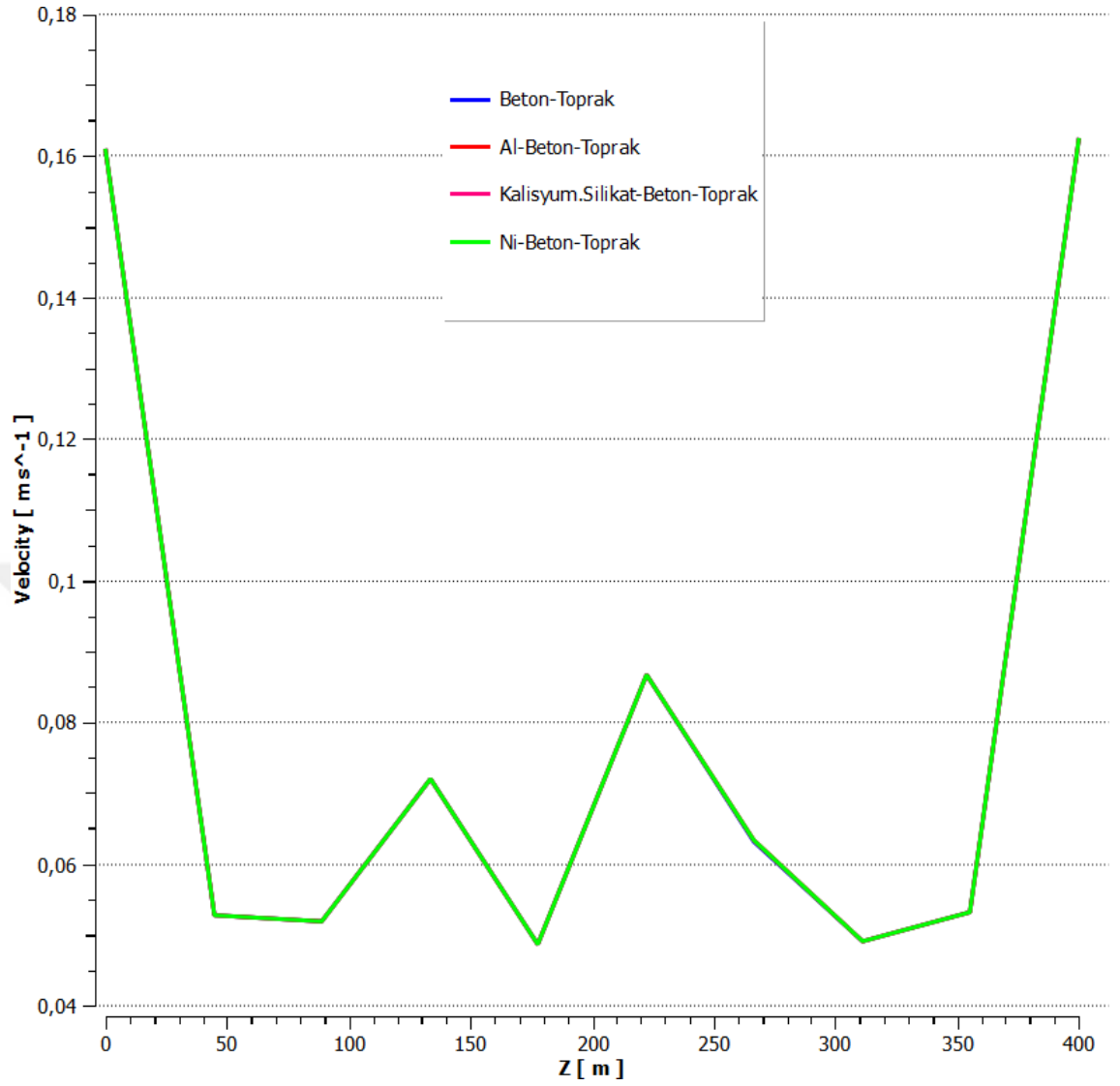
Şekil 4.24. 200. metrede y ekseninde sıcaklık dağılımı

Tünel içerisinde yangın kaynağının bulunduğu yerde, gazın yukarı yönlü hareketi sırasındaki sıcaklık değerleri Şekil 4.24' te verilmiştir. Alüminyum ve Nikel malzemelerinin kullanıldığı yapılarda sıcaklık düşüş eğiminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu iki yapıda sıcaklık farkı 400 K iken, iki tabakalı yapıda ve kalsiyum-silikat kaplı yapılarda bu fark yaklaşık 200 K olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.25. Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı

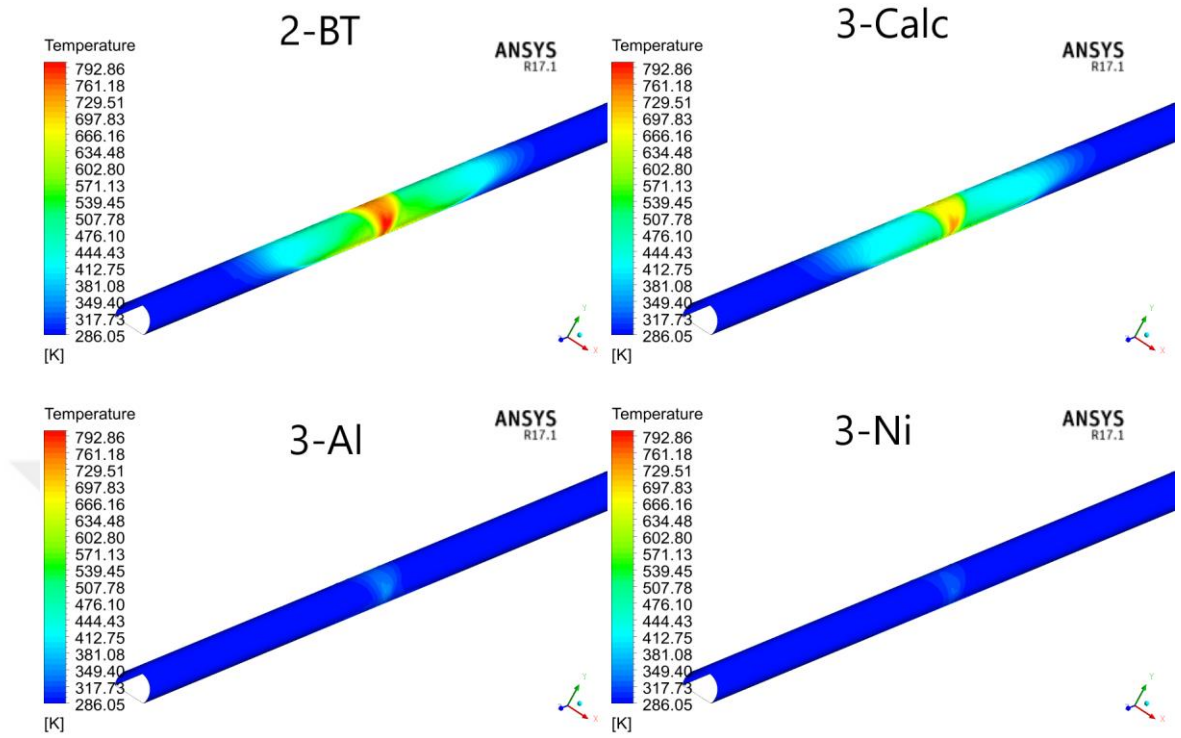
Şekil 4.25' te tünel tavanı altındaki ısı akısı değişimi gösterilmiştir ve maksimum ısı akısının Alüminyum ve Nikel tabakalarda oluştuğu gözlemlenmiştir. Isı akısının tünelin 120 m-300 m aralığında her yapı için çok yakın değerler aldığı, yangın kaynağına yakın bölgelerde değiştiği ve en yüksek değerle en düşük değer arasındaki farkın 700 W/m^2 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.26. Tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızı

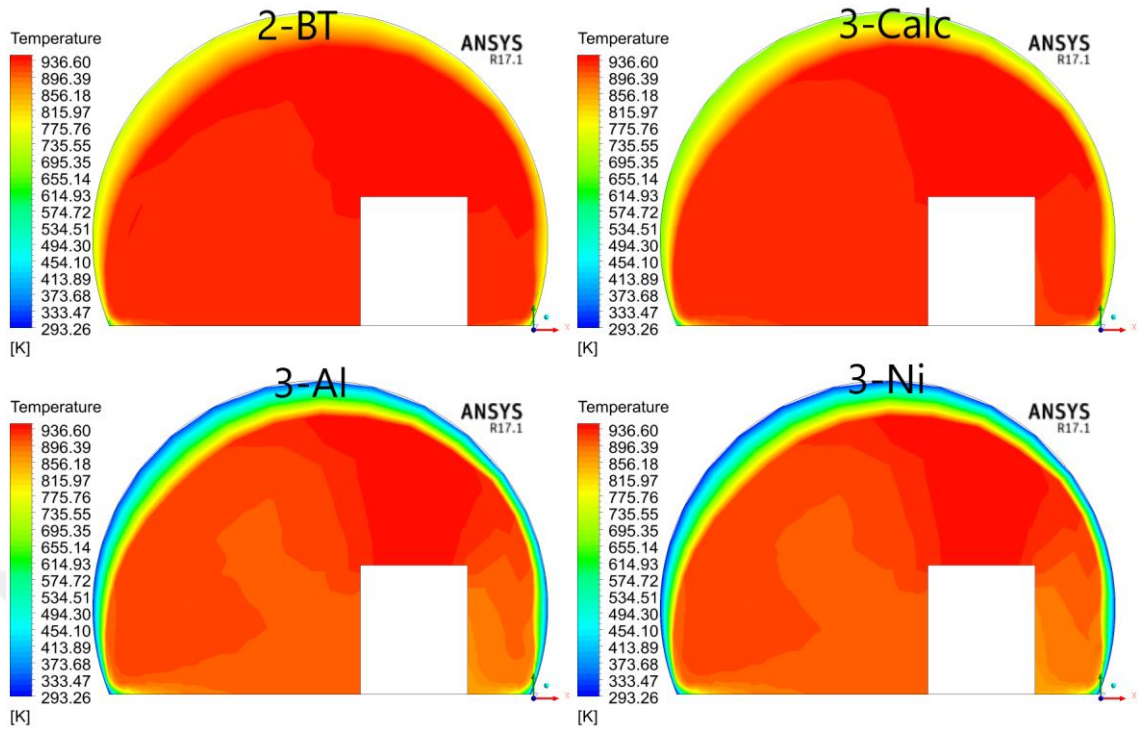
Şekil 4.26 tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızının değişimi verilmiştir. Hızın değişmemesi yapılan analizlerin doğruluğunu ortaya koymaktadır.

4.3.2. Model ölçek ile yapılan analizler

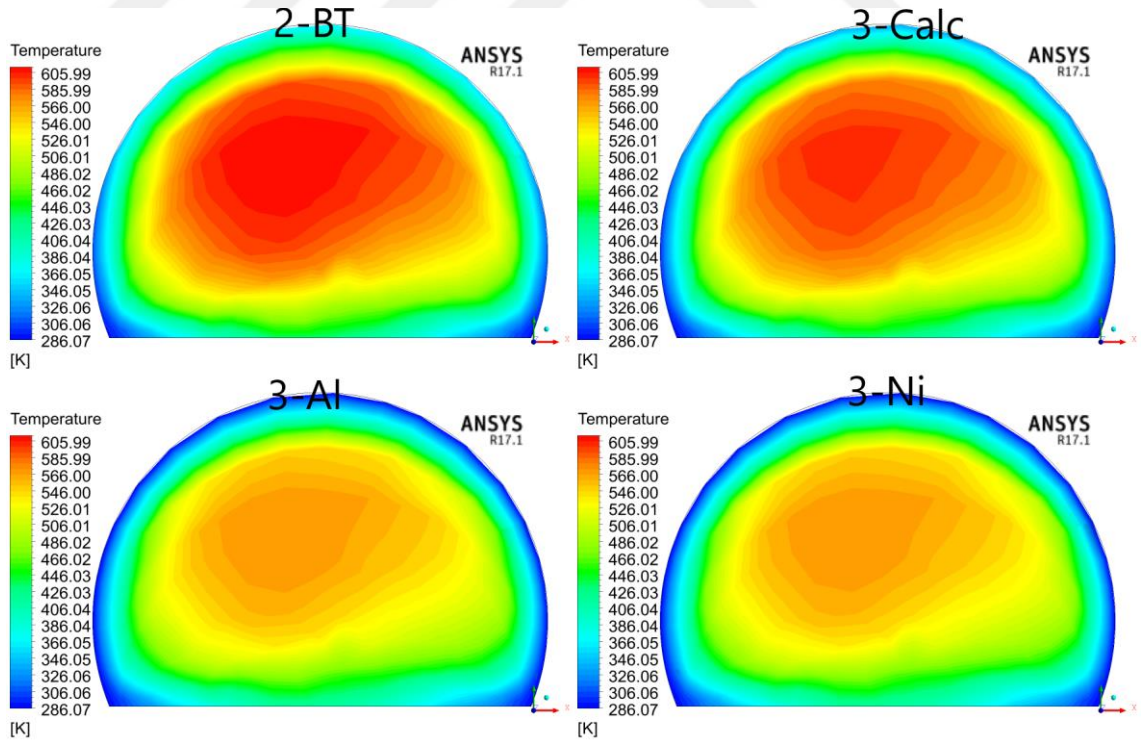


Şekil 4.27. Tünel iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

Tünel duvar yüzeyindeki sıcaklık dağılımı Şekil 4.27’de verilmiştir. Sıcaklık değeri iki tabakalı yapıda 806 K, Kalsiyum-silikat kaplı yapıda 747 K, Alüminyum kaplı yapıda 341 K ve Nikel kaplı yapıda 320 K olarak elde edilmiştir.

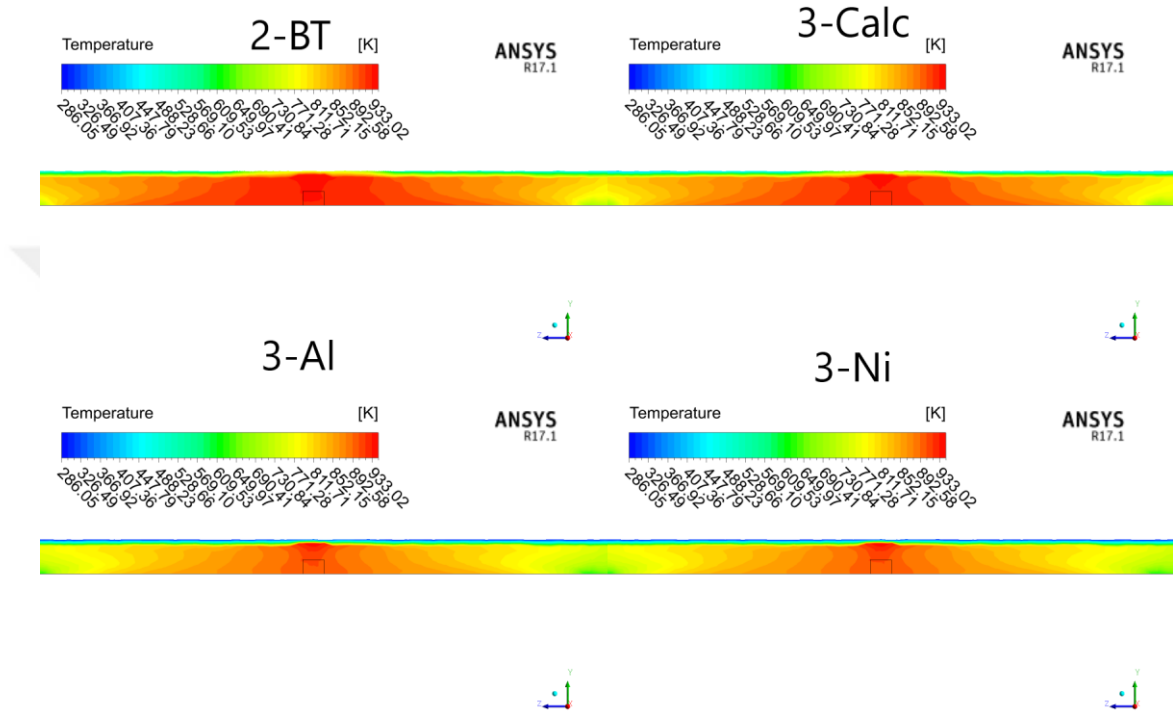


Şekil 4.28. 2. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı



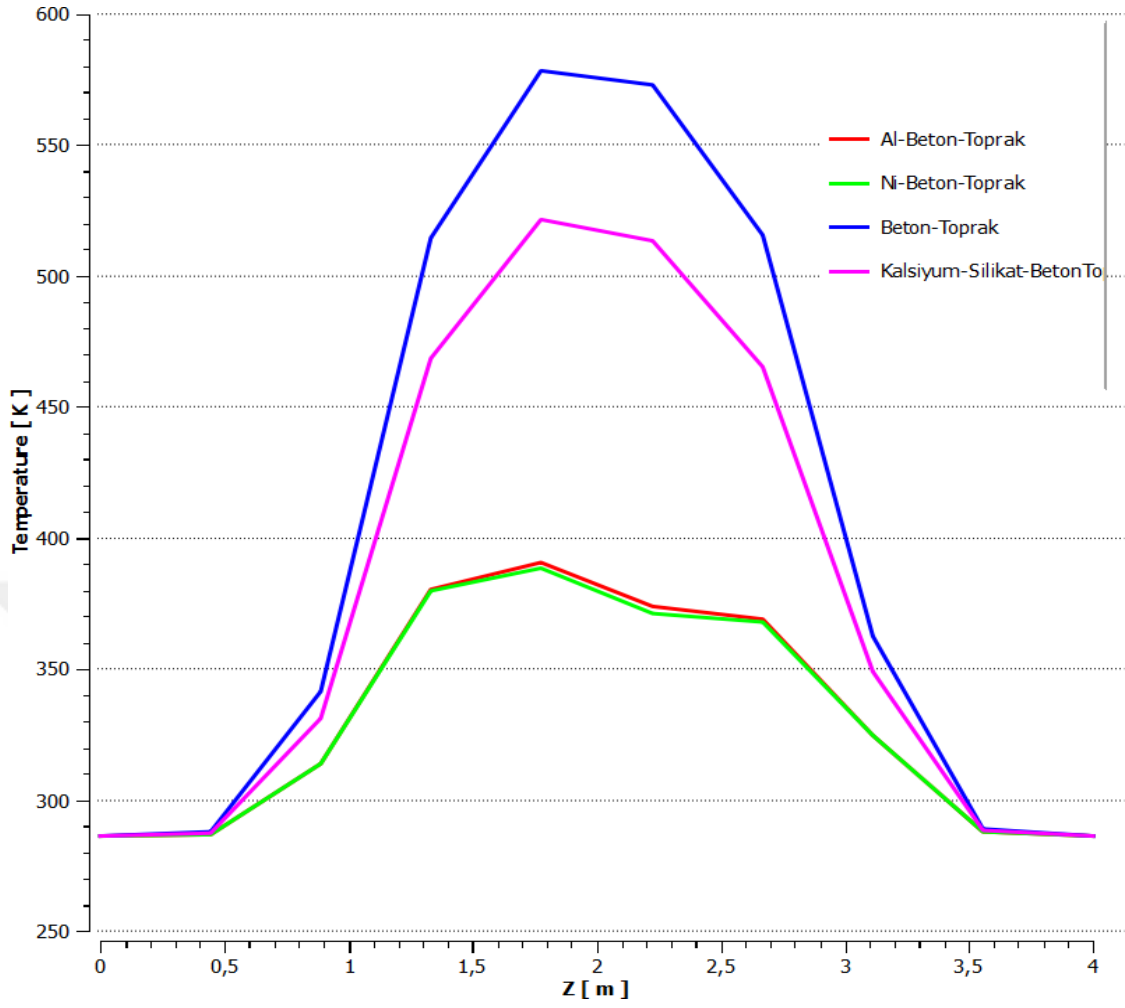
Şekil 4.29. 3. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı

Şekil 4.28 ve 4.29 tünelin sırasıyla 2. ve 3. metresinde enine kesitteki sıcaklık dağılımını göstermektedir. İç sıcaklık iki tabakalı yapı ve Kalsiyum-silikat kaplı yapıda 900 K civarında sabit kalırken, Nikel ve Alüminyum kullanılan üç tabakalı yapılarda düşüş gösterir.



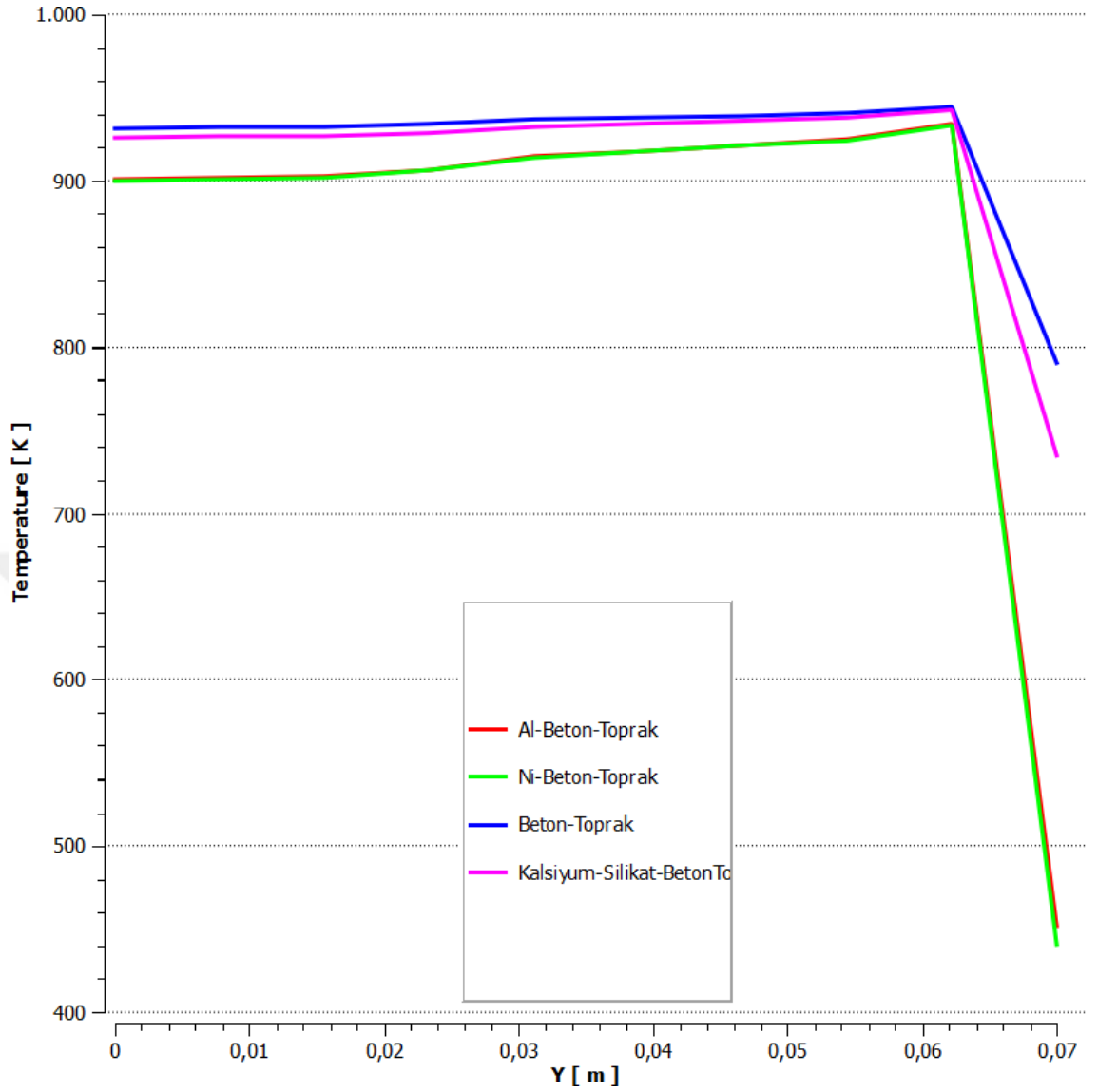
Şekil 4.30. y-z düzleminde($x=0$ 'da) sıcaklık dağılımı

Şekil 4.30 tünelin uzunlamasına eksen üzerinde oluşan sıcaklık dağılımını göstermektedir. Tünel iç kısımlarında sıcaklık değişimleri incelendiğinde iki tabakalı yapı ve Kalsiyum-silikat kaplı üç tabakalı yapıda ısıнын içerde hapsoldüğü ve iç sıcaklığın daha yüksek olduğı tespit edilmiştir.



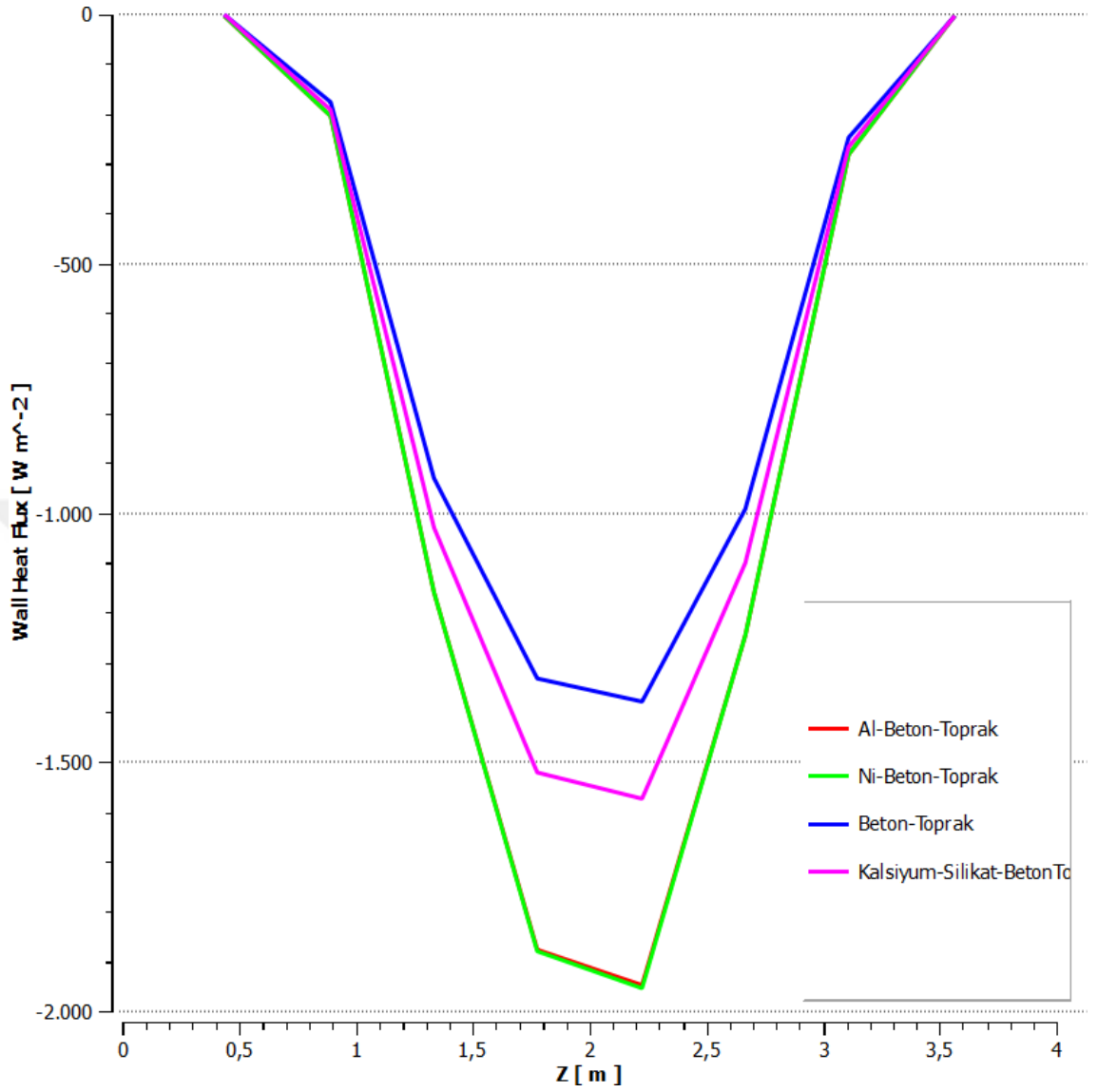
Şekil 4.31. Tünel tavanının altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı

Tünel tavanının hemen altında sıcaklık değerlerinin tünel uzunluğu boyunca değişimi Şekil 4.31’ de verilmiştir. Tünel tavanındaki en yüksek sıcaklık Alüminyum ve Nikel kaplı yapılarda 390 K olarak elde edilmiştir. Yapılar içinde en yüksek sıcaklık değerlerinin izlendiği iki tabakalı yapıda ise aynı noktadaki tavan sıcaklığının 600 K’ e yaklaştığı görülmüştür.



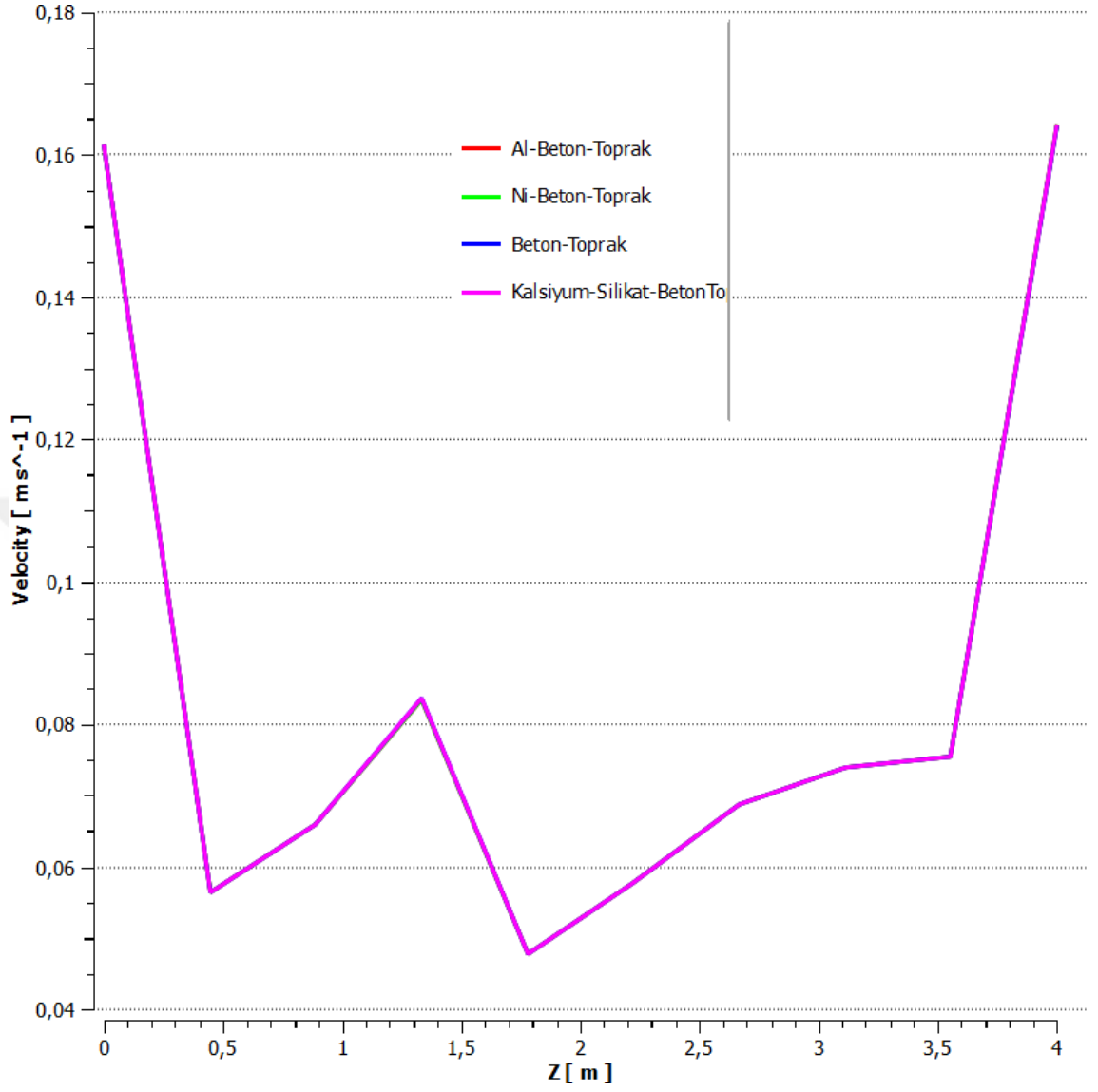
Şekil 4.32. 2. metrede y ekseninde sıcaklık dağılımı

Tünel girişinden 2 metre mesafede, gazın çıkışı ile beraber dik eksen boyunca sıcaklık değişimi Şekil 4.32’ te verilmiştir. Tavandaki sıcaklığın, ısı iletimi etkisiyle Alüminyum ve Nikel kaplı yapılarda daha düşük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.33. Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı

Şekil 4.33’ te görüldüğü gibi tünel tavanı altındaki ısı akısının en yüksek değeri Alüminyum ve Nikel tabakalarda elde edilmiştir. Beton-toprak yapıda, bu iki yapıya oranla % 26 daha düşük ısı akısı ile en düşük değer elde edilmiştir. Kalsiyum-silikat kaplı yapıda ise Alüminyum Nikel tabakalara göre % 15 daha düşük ısı akısı ortaya çıkmıştır.



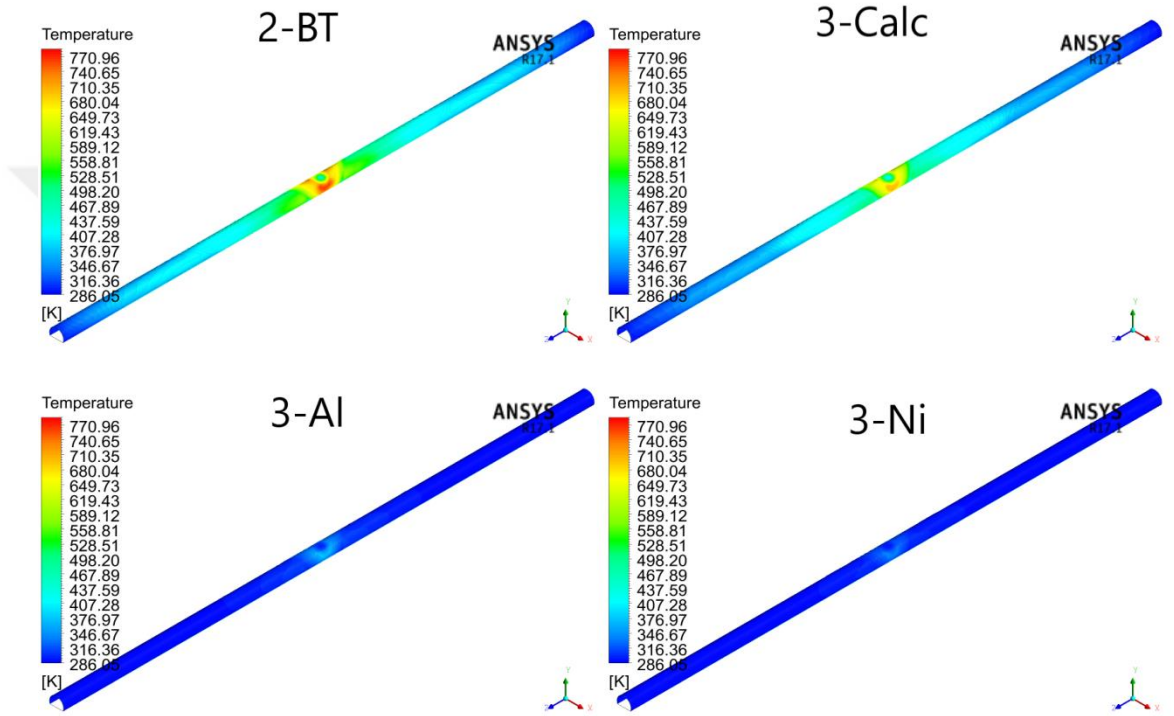
Şekil 4.34. Tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızı

Şekil 4.34 tünel boyunca tavanın altında akışkan hızının değişimini vermektedir. En düşük hız değeri 0,048 m/s olarak yangın kaynağının bulunduğu bölgede elde edilmiştir.

4.4. 600s'lik Süre Analizleri

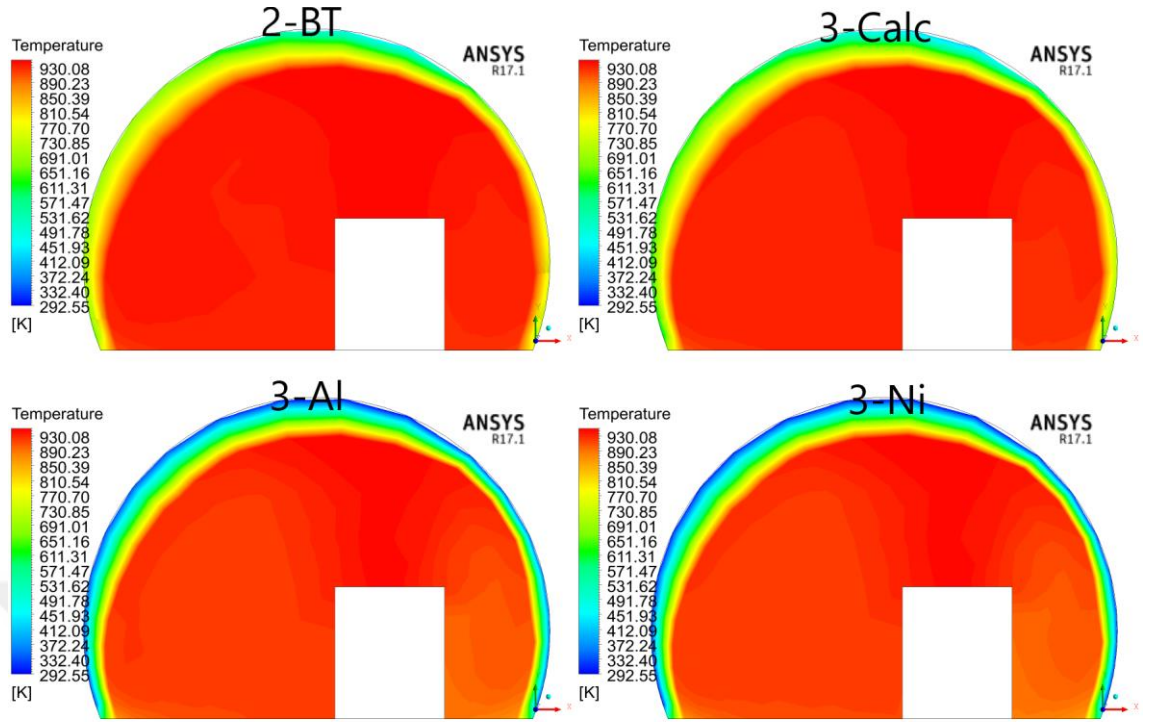
10 dakikalık süreyi kapsayan bu analizlerde ısı etkilere daha belirgin olarak ortaya çıktığı görülmüştür. Sürenin daha uzun olmasından dolayı sıcaklık farklarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

4.4.1. Gerçek boyutlarla yapılan analizler

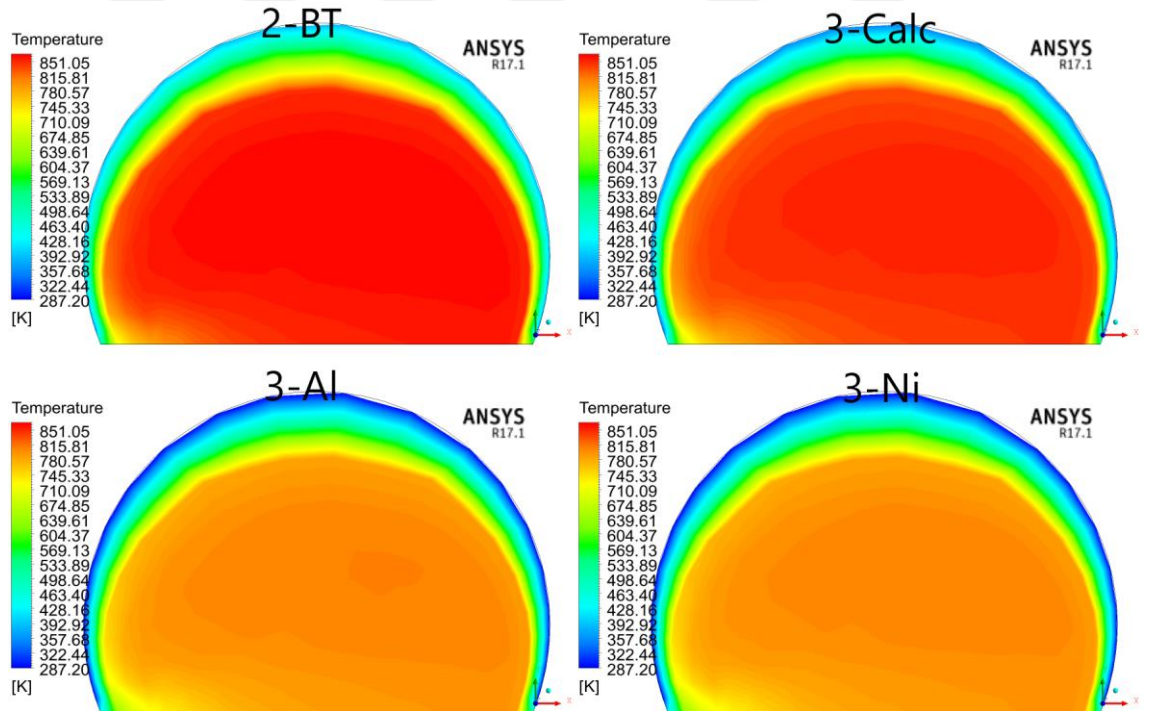


Şekil 4.35. Tünel iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 4.35 tünel iç duvar yüzeyindeki sıcaklık değerlerini vermektedir. Beton- toprak yapıda gözlemlenen 771 K sıcaklık değeri, en düşük değerin görüldüğü Nikel tabakalı yapının iki katından fazladır. 600 s sürenin ısı etkileri artırmasıyla, malzeme özellikleri arasındaki farklar daha açık şekilde görülmüştür.

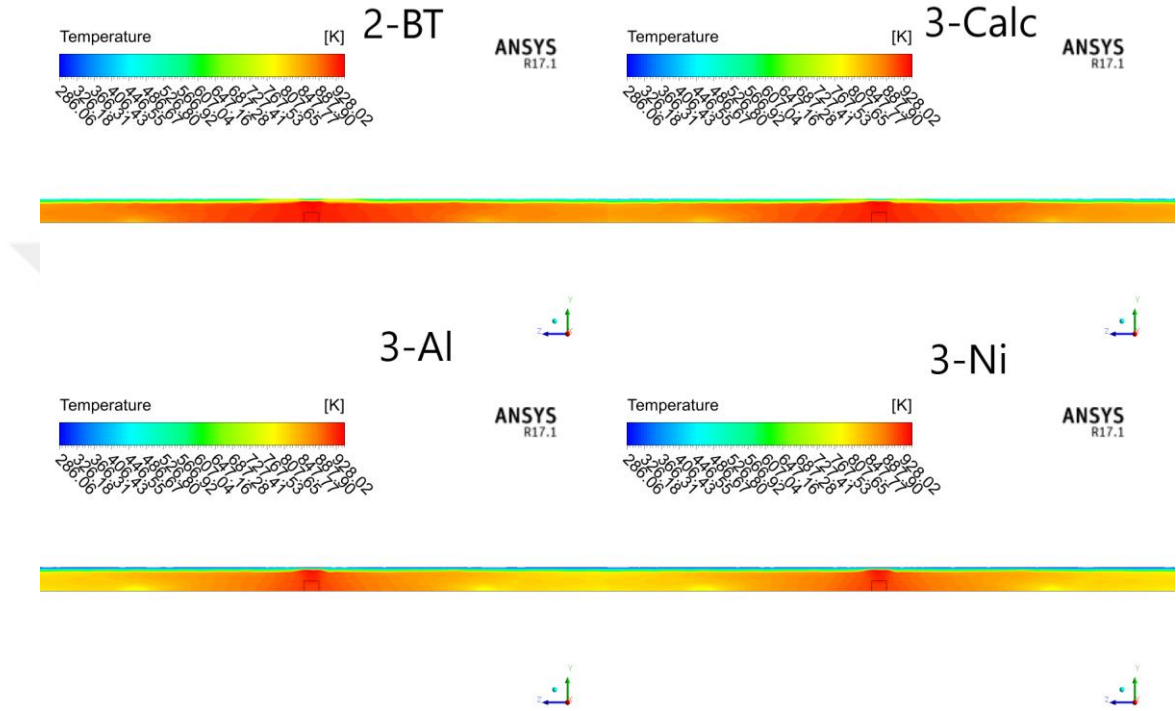


Şekil 4.36. 200. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı



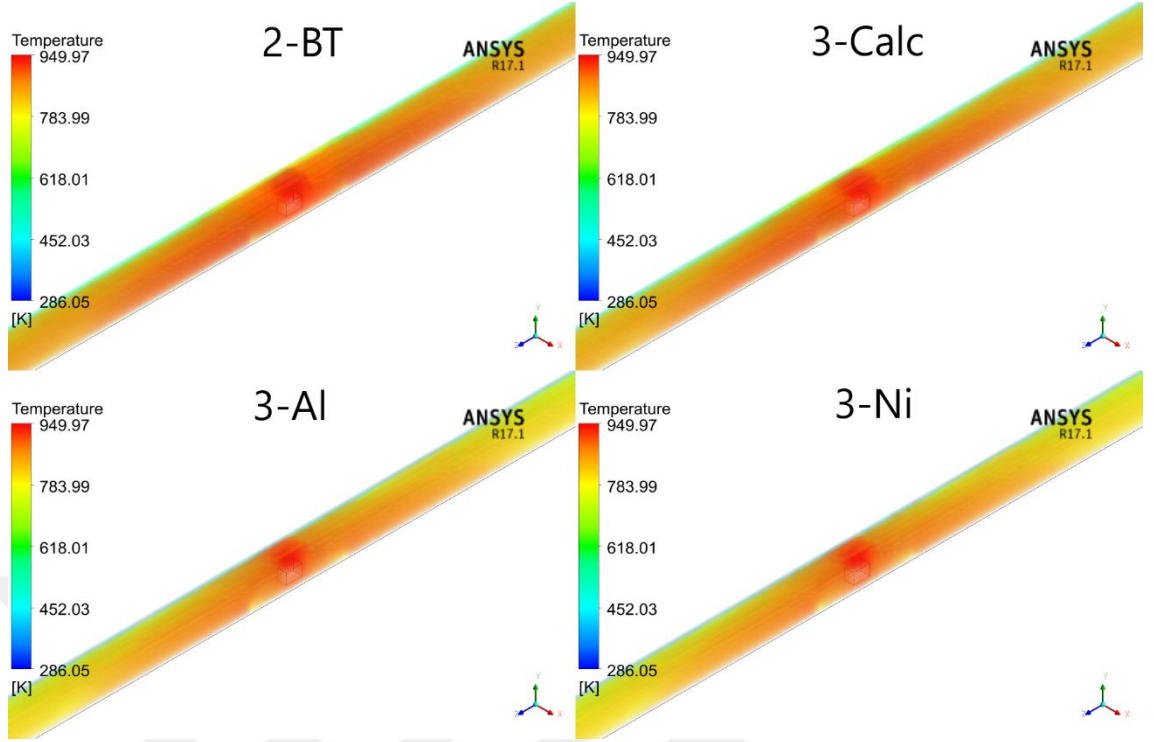
Şekil 4.37. 300. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı

Şekil 4.36 tünelin 200. metresinde enine kesitteki sıcaklık dağılımını, Şekil 4.37 ise 300. metresindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Yangın kaynağından uzaklaştıkça sıcaklık dağılımının değiştiği görülmektedir. Alüminyum ve Nikel malzemenin kullanıldığı üç tabakalı yapılarda ısının duvarlardan transfer edildiği gözlenmiştir.



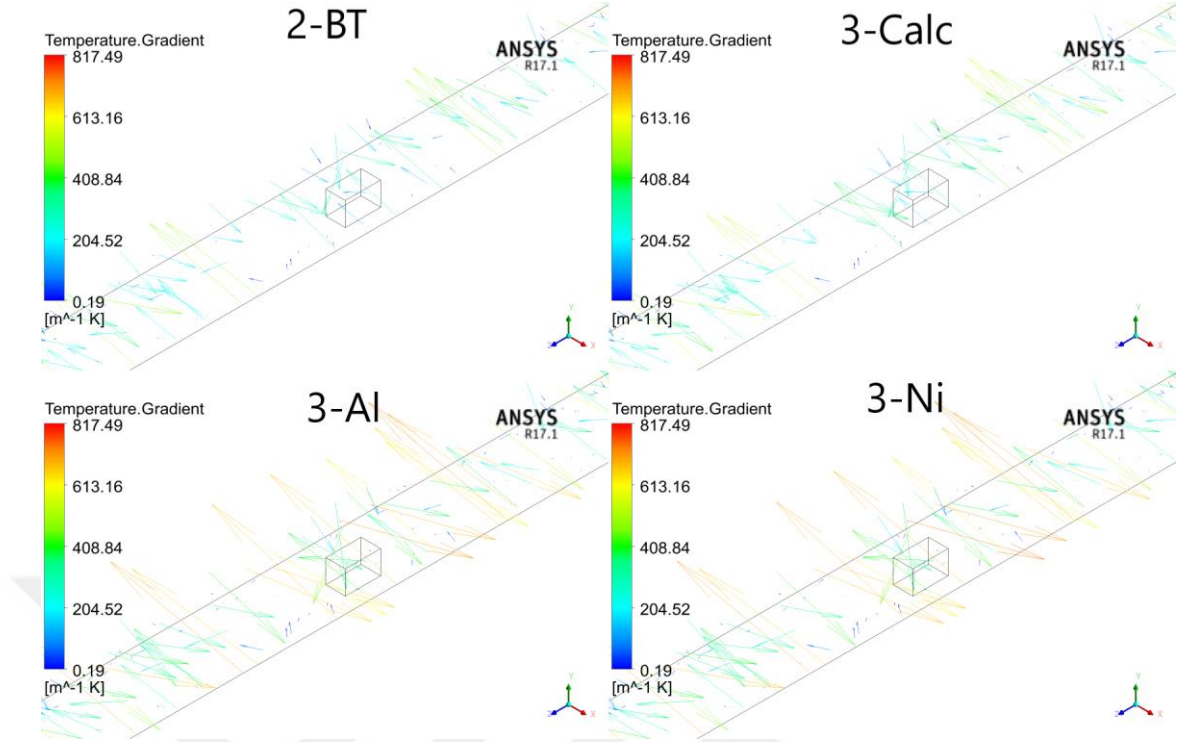
Şekil 4.38. y-z düzleminde($x=0$ 'da) sıcaklık dağılımı

Şekil 4.38' de y-z düzlemi boyunca oluşan sıcaklık değişimi görülmektedir. İki tabakalı yapı ile Kalsiyum-silikat kaplı yapıda sıcaklık tüm tünele yayılmaktadır. Alüminyum ve Nikel kaplı tabakalarda ise sıcaklık dağılımının duvardan gerçekleşen ısı transferi ile çok değişmediği gözlenmiştir.



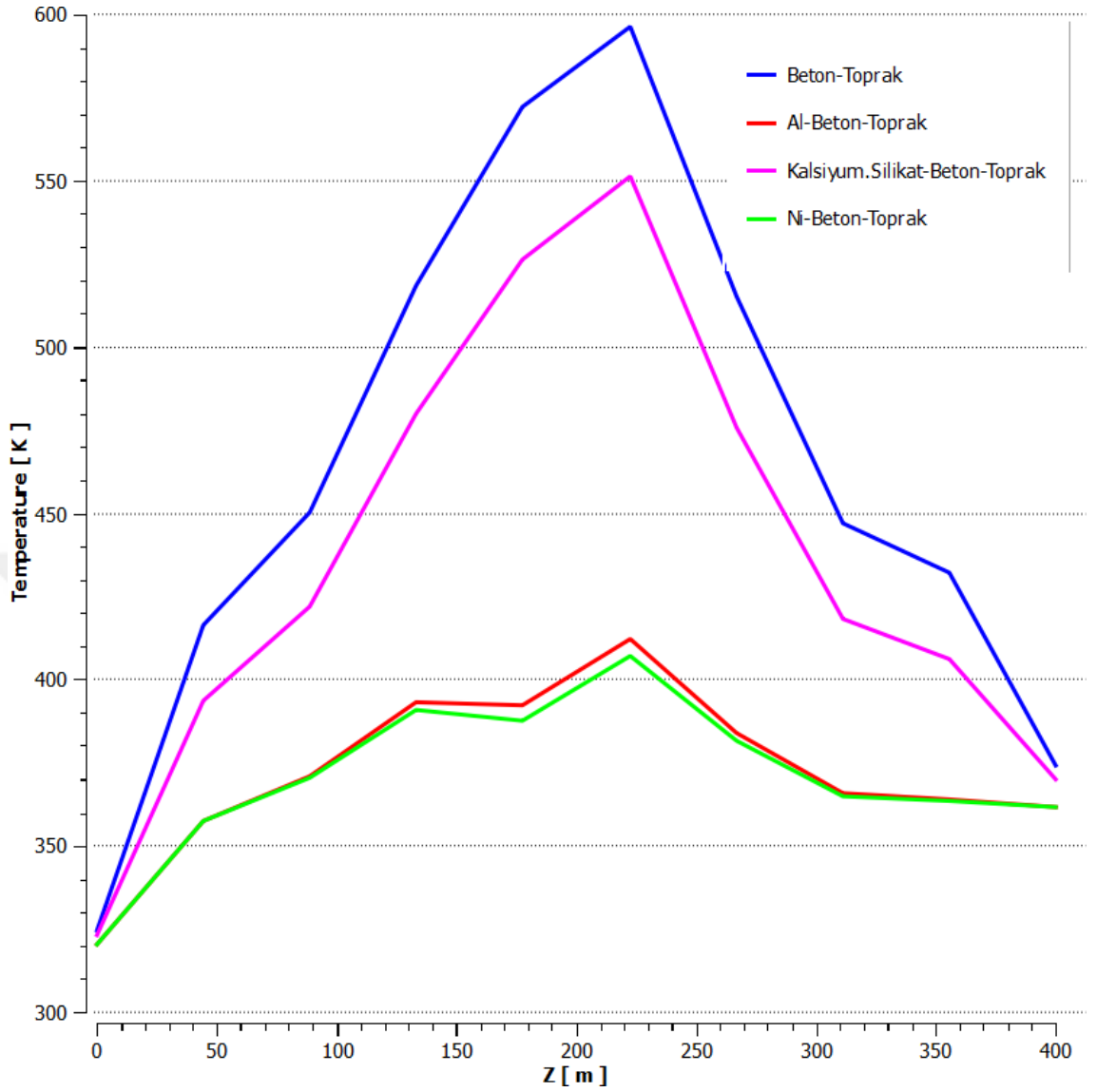
Şekil 4.39. Tünel içindeki akışkanın sıcaklık dağılımı

Şekil 4.39 tünel içindeki akışkanın sıcaklık dağılımı göstermektedir. Alüminyum ve Nikel kaplı tabakalarda iç hacmin ortalama sıcaklığı sırasıyla 763 K ve 760 K olarak belirlenirken, iki tabakalı yapıda bu değer 812 K ve Kalsiyum silikat kaplı yapıda 800 K olarak elde edilmiştir.



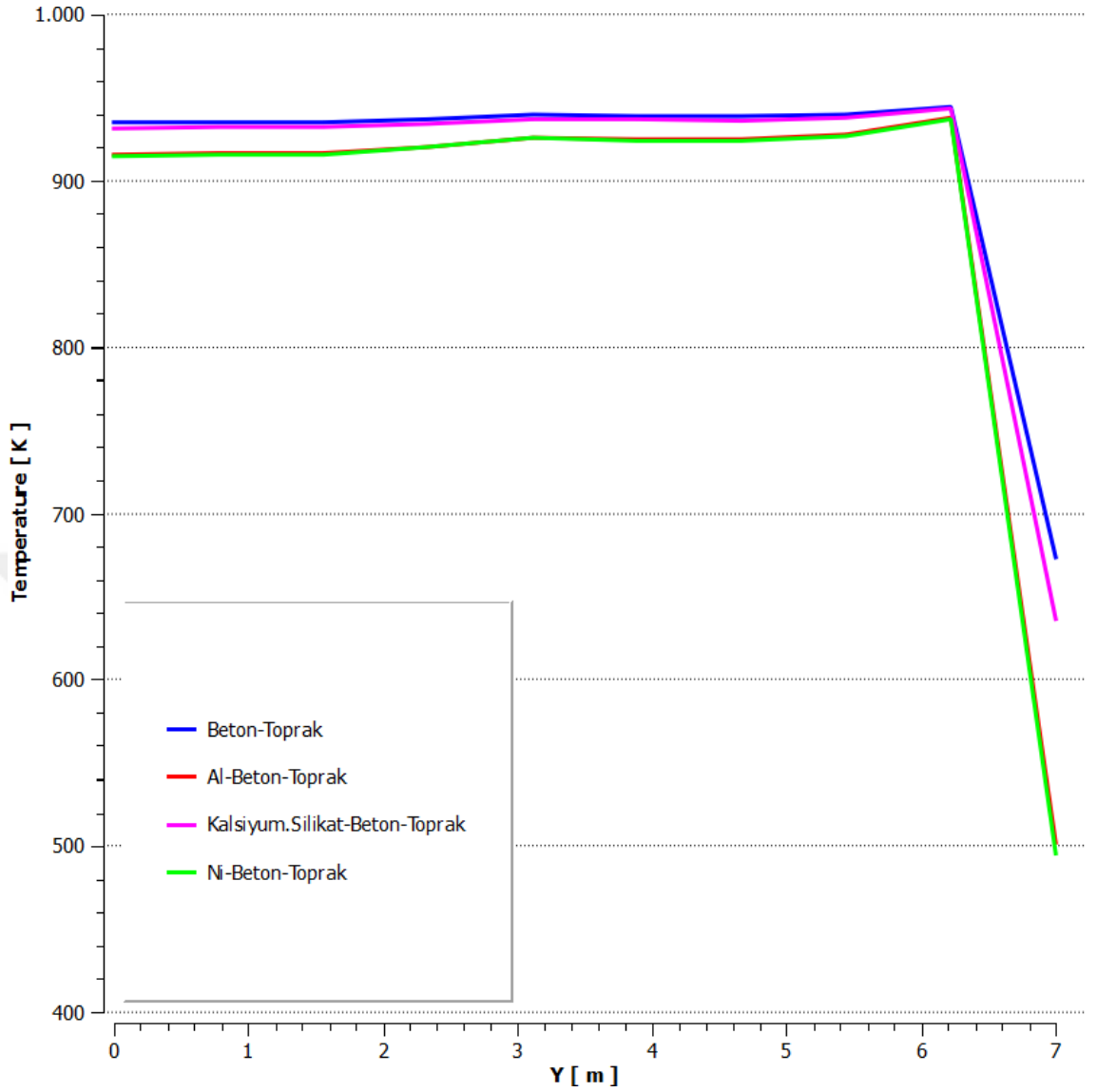
Şekil 4.40. Sıcaklık gradyanı

Şekil 4.40 tünel içindeki sıcaklık gradyanını göstermektedir. Sıcaklık gradyanı birim uzunluktaki sıcaklık farkı veya sıcaklıktaki değişim hızı olarak tanımlanabilir (Çengel ve Ghajar, 2015). Belli bir yöndeki ısı transfer hızı sıcaklık gradyanına bağlı olduğundan, sıcaklık gradyanı ne kadar büyükse ısı transfer hızı da o kadar büyük olur. Şekilde görüldüğü üzere en yüksek sıcaklık gradyanı Alüminyum ve Nikel kaplı yapılarda, yaklaşık 700 K/m, elde edilmiştir. Yani en yüksek ısı transferi Alüminyum ve Nikel kullanılan üç tabakalı yapılarda görülmüştür.



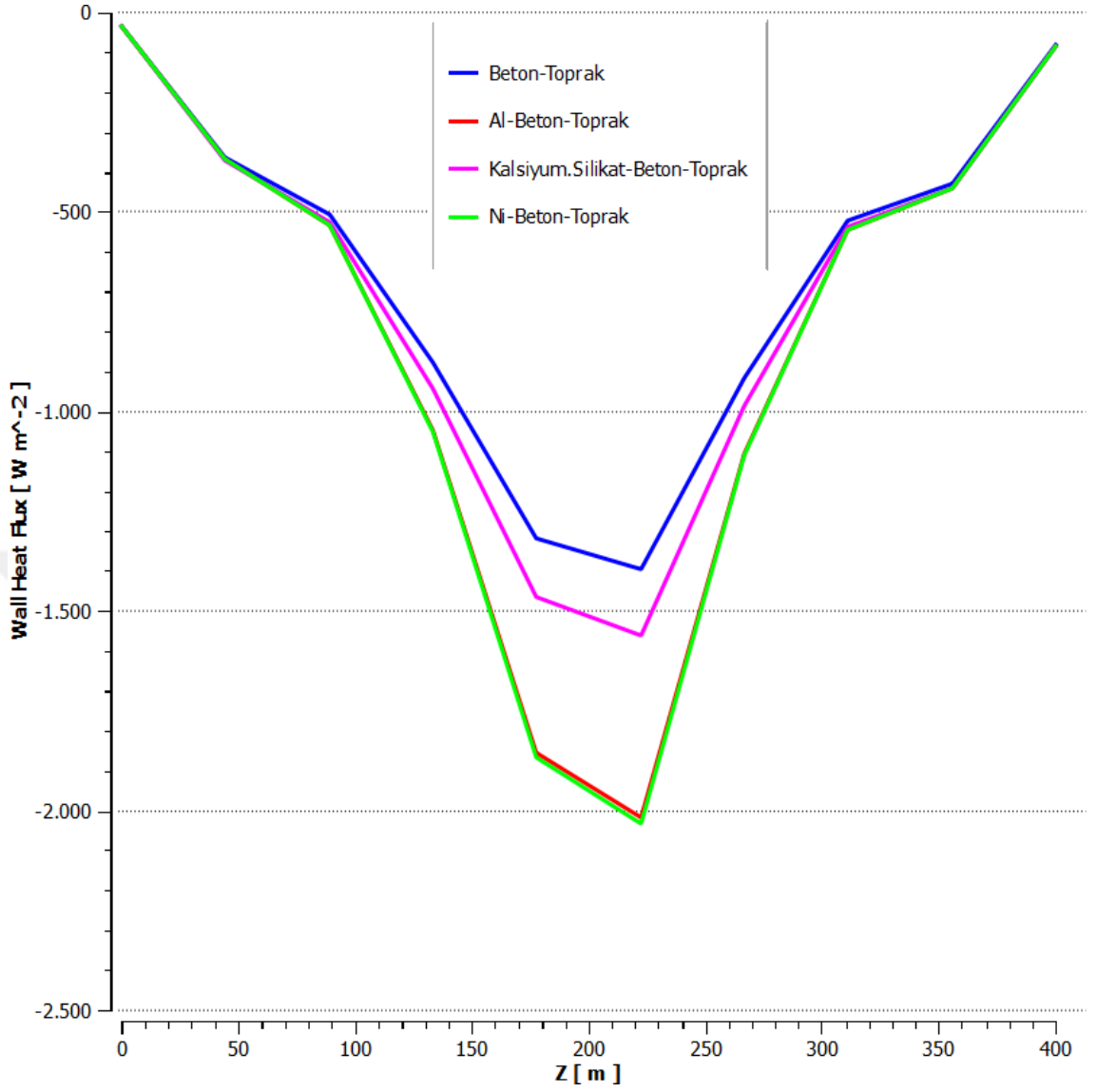
Şekil 4.41. Tünel tavanı altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı

Tünel tavanının hemen altında sıcaklık değerlerinin tünel uzunluğu boyunca değişimi Şekil 4.41’ de verilmiştir. Alüminyum ve Nikel kaplı yapılarda sıcaklık değerlerinin 320 K ile 410 K aralığında değiştiği ve sıcaklık farkının azaldığı tespit edilmiştir. Ancak beton-toprak yapı ve Kalsiyum-silikat kaplı yapıda sıcaklık farkı artmıştır.



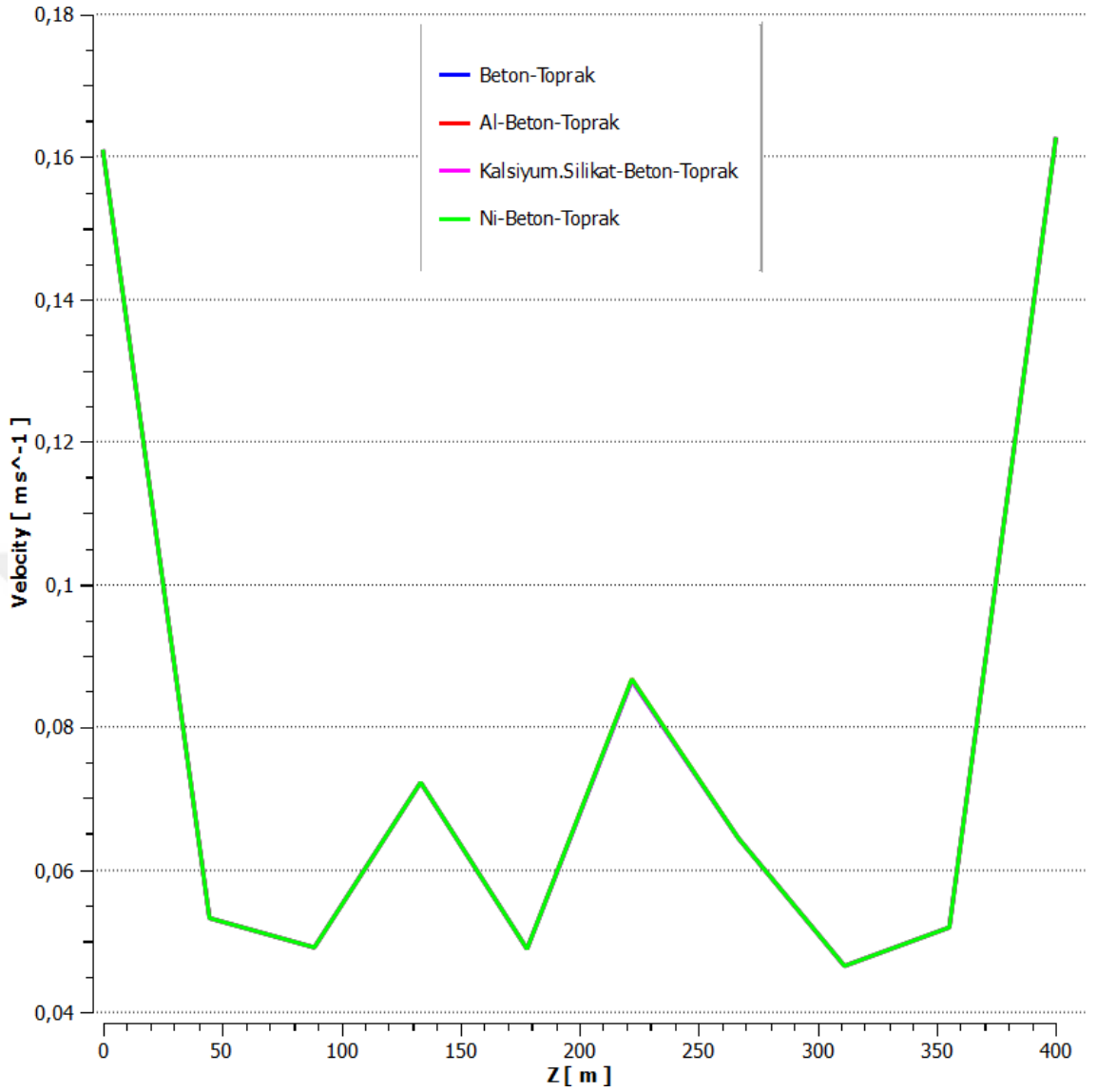
Şekil 4.42. 200. metrede y ekseninde sıcaklık dağılımı

Tünel içerisinde yangın kaynağının bulunduğu yer olan 200. metrede, gazın çıkışı ile beraber dik eksen boyunca sıcaklık değişimi Şekil 4.42’ de verilmiştir. 100 s ve 300 s süreleriyle kıyaslandığında, ısının tavana daha uzun süre etkimesi o noktada sıcaklığın her katman için yükselmesine sebep olmuştur. Yangın kaynağı noktasındaki çok fazla ısıya rağmen Alüminyum ve Nikel tabakaların nispeten iyi performans verdiği anlaşılmıştır.



Şekil 4.43. Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı

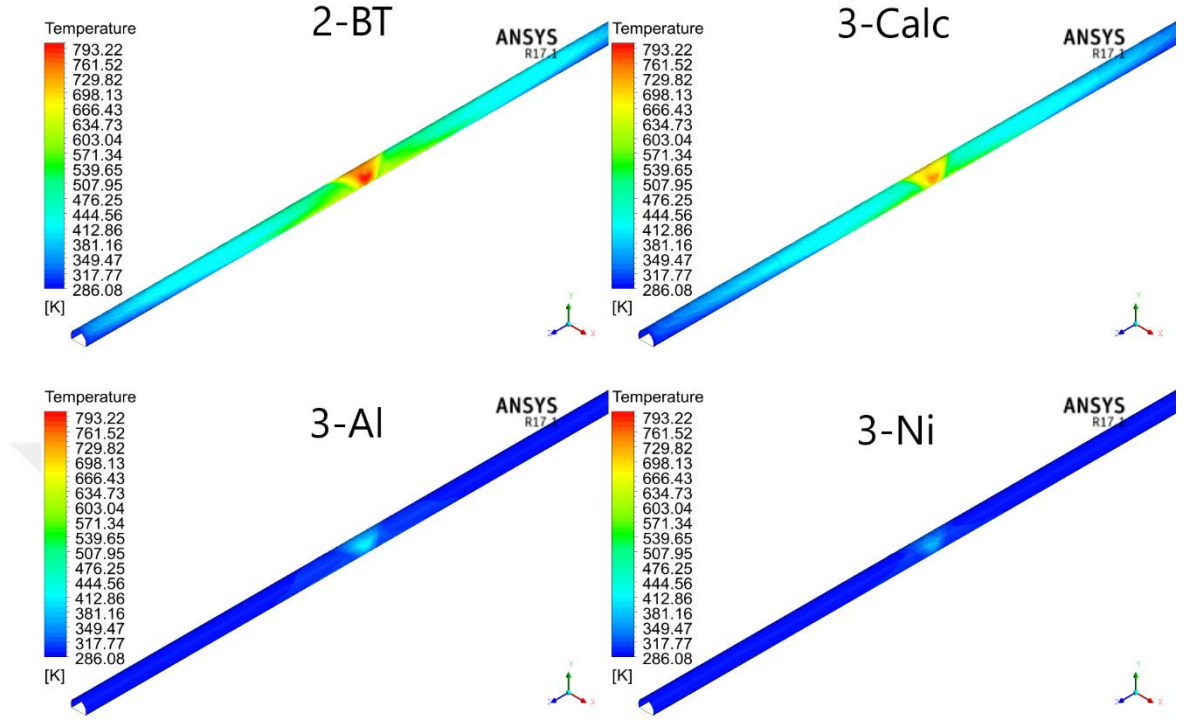
Şekil 4.43’ te görüldüğü gibi tünel tavanı altındaki ısı akısı en fazla Alüminyum ve Nikel tabakalarda oluşmuştur. İki tabakalı yapı ile Kalsiyum-silikat kullanılan yapıda oluşan ısı akısı değerleri birbirine yakındır. Isı akısı, Beton-toprak yapıda 1400 W/m^2 iken Kalsiyum-silikat tabakada 1550 W/m^2 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.44. Tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızı

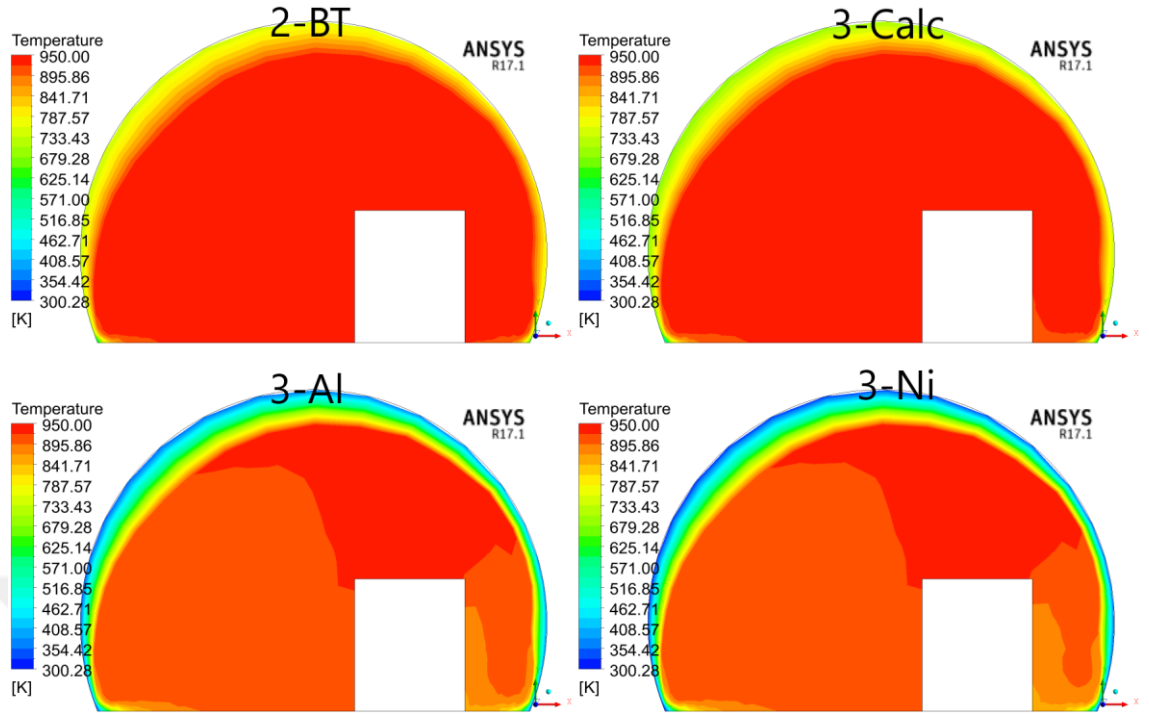
Şekil 4.44 tünel boyunca tavanın altındaki akışkanın hızının değişimini göstermektedir. Tünel iç kısımlarında hızın değişiklik gösterdiği ancak tünel portallarına doğru doğrusal bir şekilde arttığı tespit edilmiştir.

4.4.2. Model Ölçek ile Yapılan Analizler

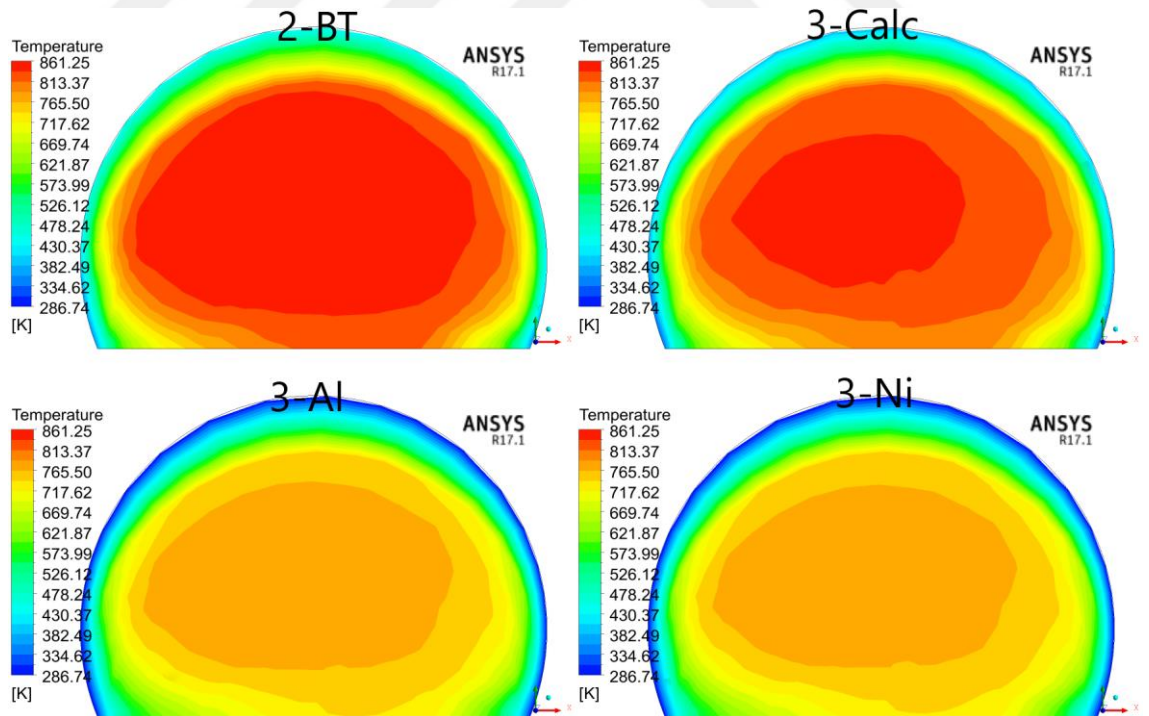


Şekil 4.45. Tünel iç yüzeyinde sıcaklık dağılımı

Şekil 4.45 tünel içi duvar yüzeyindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. 600 s süre sonunda, gerçek ölçülerle yapılan analizlerle 1:100 ölçekli modelle yapılan analizler uyum göstermiştir. Duvar iç yüzeyindeki en yüksek sıcaklık değeri 806 K olarak iki tabakalı yapıda elde edilmiştir. En düşük sıcaklık ise 351 K olarak Nikel kaplı yapıda gözlemlenmiştir.

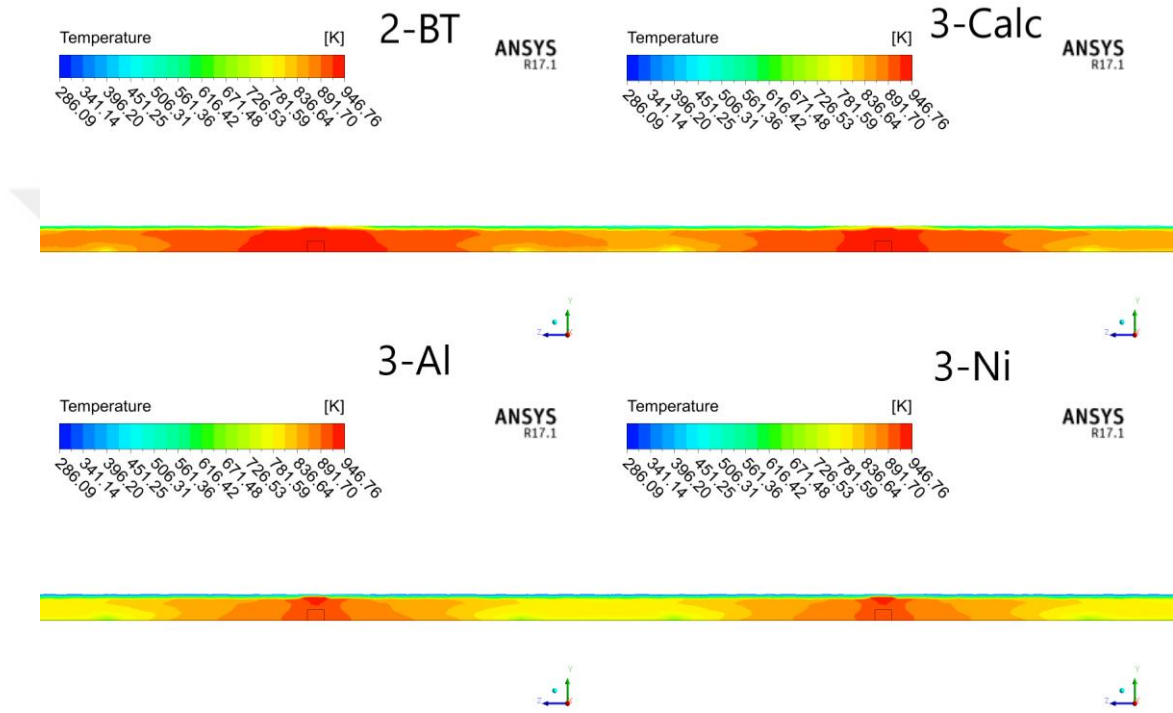


Şekil 4.46. 2. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı



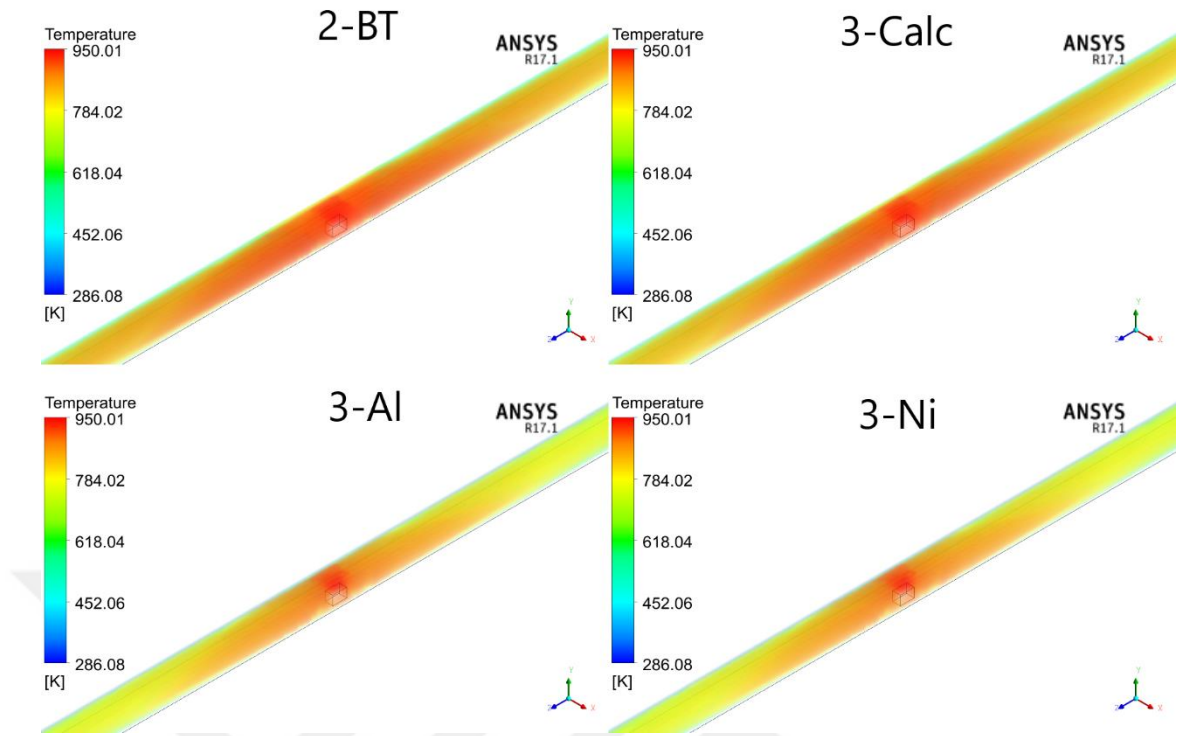
Şekil 4.47. 3. metrede x-y düzleminde sıcaklık dağılımı

Şekil 4.46 ve Şekil 4.47 sırasıyla tünel girişlerinden 2 ile 3 metre mesafedeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. 600 s süre sonunda 3. metredeki sıcaklık dağılımı, malzemelere ait ısı özelliklerinin daha fazla ortaya çıktığını göstermektedir. Alüminyum ve Nikel malzemenin kullanıldığı üç tabakalı yapılarda sıcaklık aynı seviyede kalmamış, iç sıcaklık değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür.



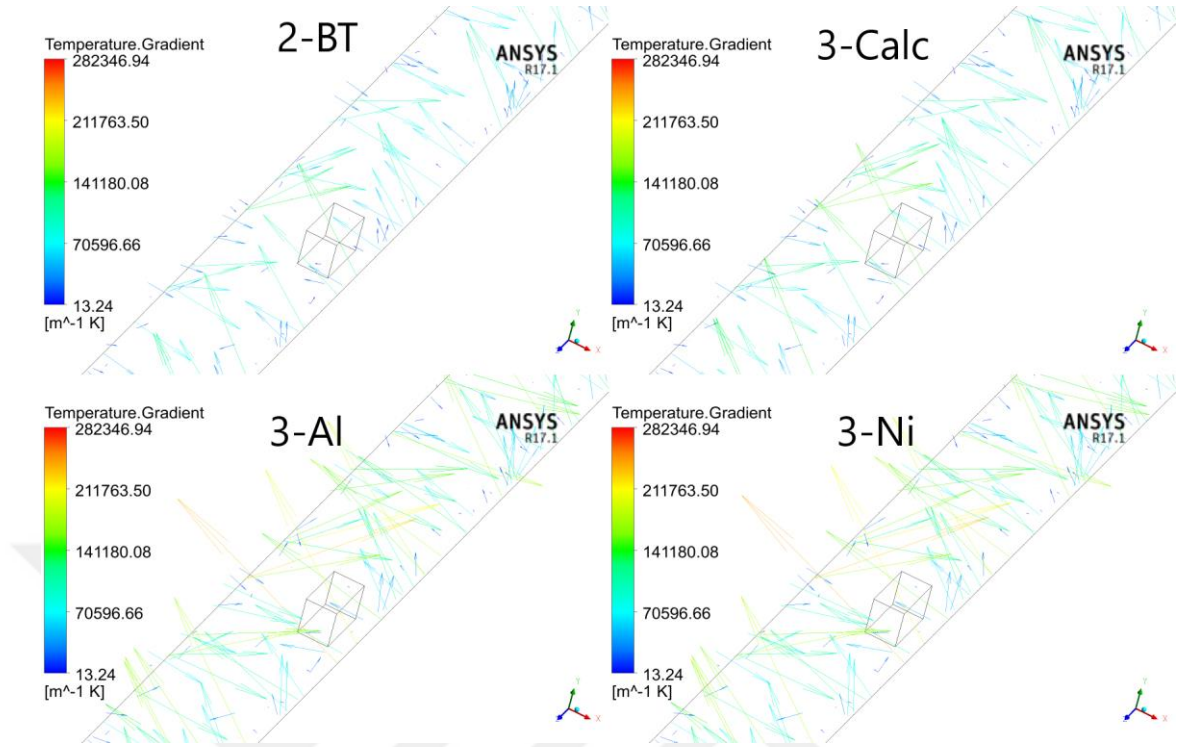
Şekil 4.48. y-z düzleminde($x=0$ 'da) sıcaklık dağılımı

Şekil 4.48 tünelin uzunlamasına eksen üzerinde oluşan sıcaklık dağılımını göstermektedir. İki tabakalı yapı ile Kalsiyum-silikat kaplı yapıda sıcaklığın içerde daha fazla olduğu görülmüştür.



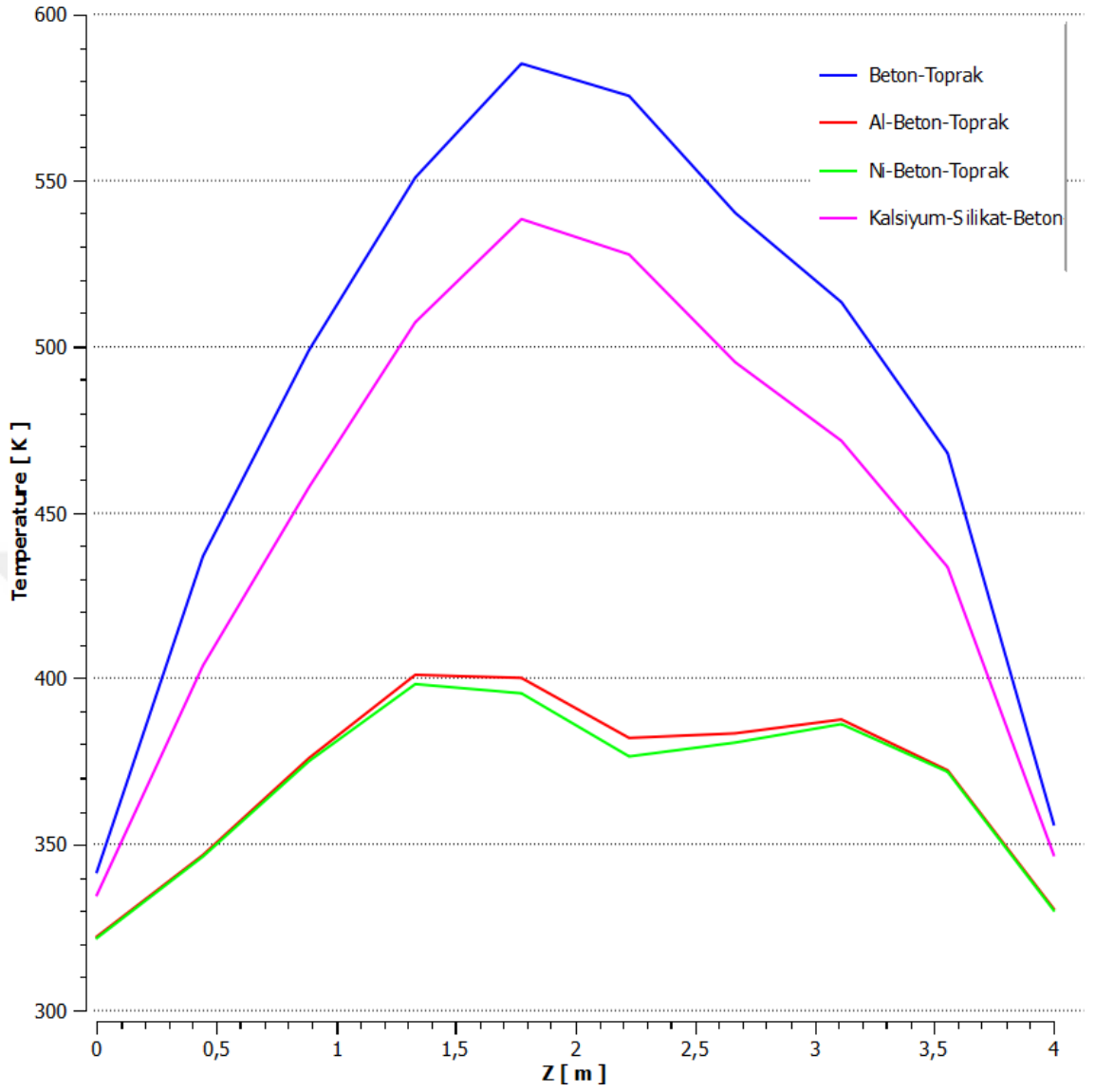
Şekil 4.49. Tünel içindeki akışkanın sıcaklık dağılımı

Şekil 4.49 tünel ortamındaki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Alüminyum ve Nikel kaplı tabakalarda en yüksek sıcaklık değerleri yangının etrafında görülürken, diğer iki yapıda yüksek sıcaklıkların tünelin tamamına yayıldığı gözlemlenmiştir. Tünelin iç hacmindeki ortalama sıcaklıklar iki tabakalı yapıda 777 K iken, Kalsiyum, Alüminyum ve Nikel kaplı yapıda sırasıyla 761 K, 710 K ve 708 K olarak elde edilmiştir.



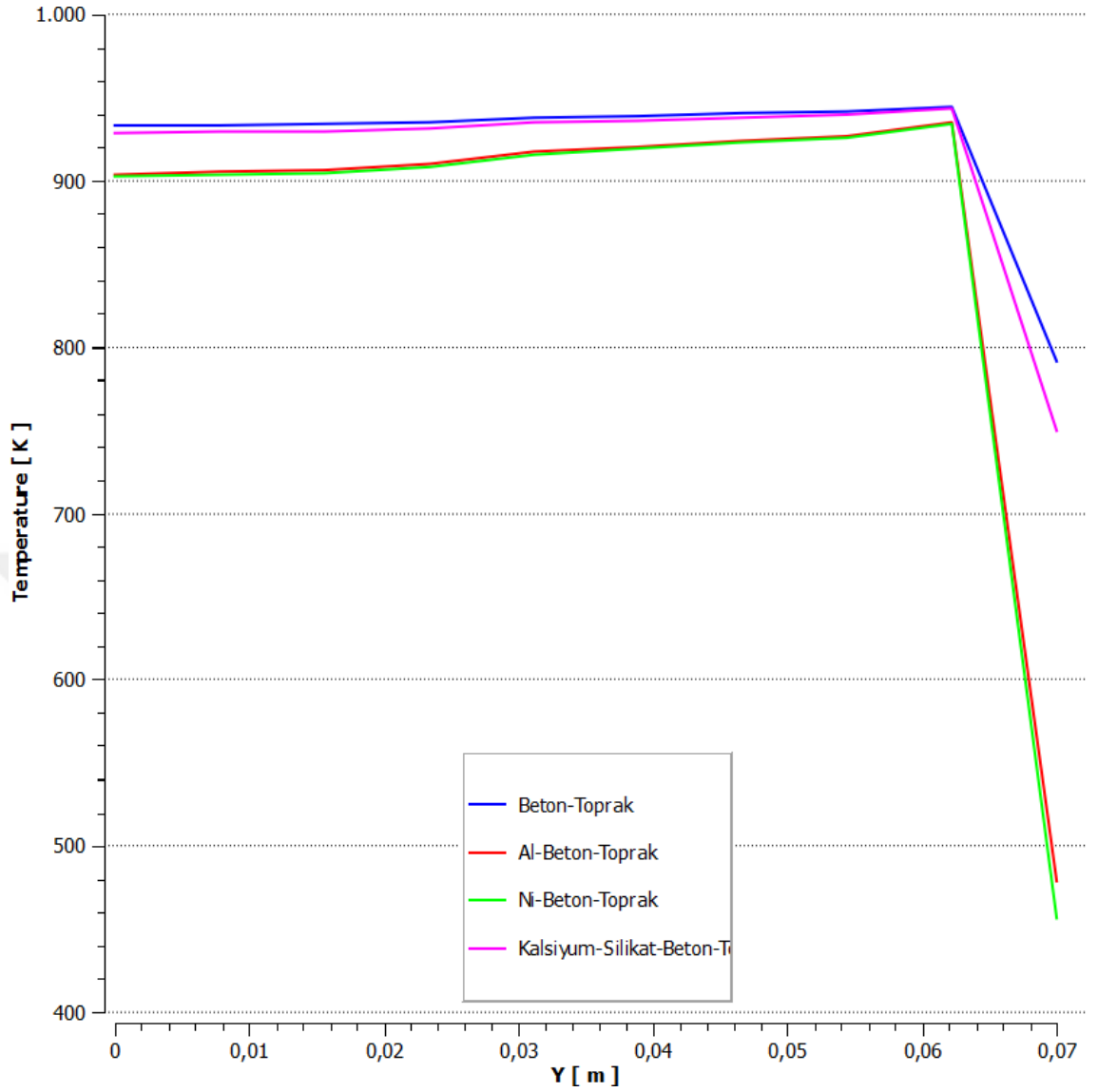
Şekil 4.50. Sıcaklık gradyanı

Şekil 4.50 tünel içerisinde oluşan sıcaklık gradyanını göstermektedir. Alüminyum ve Nikel malzemelerin kullanıldığı yapılarda sıcaklık gradyanının daha yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklık gradyanı, daha fazla ısı transferi oluşturmuş ve yüzeylerden ısı aktarımı artmıştır.



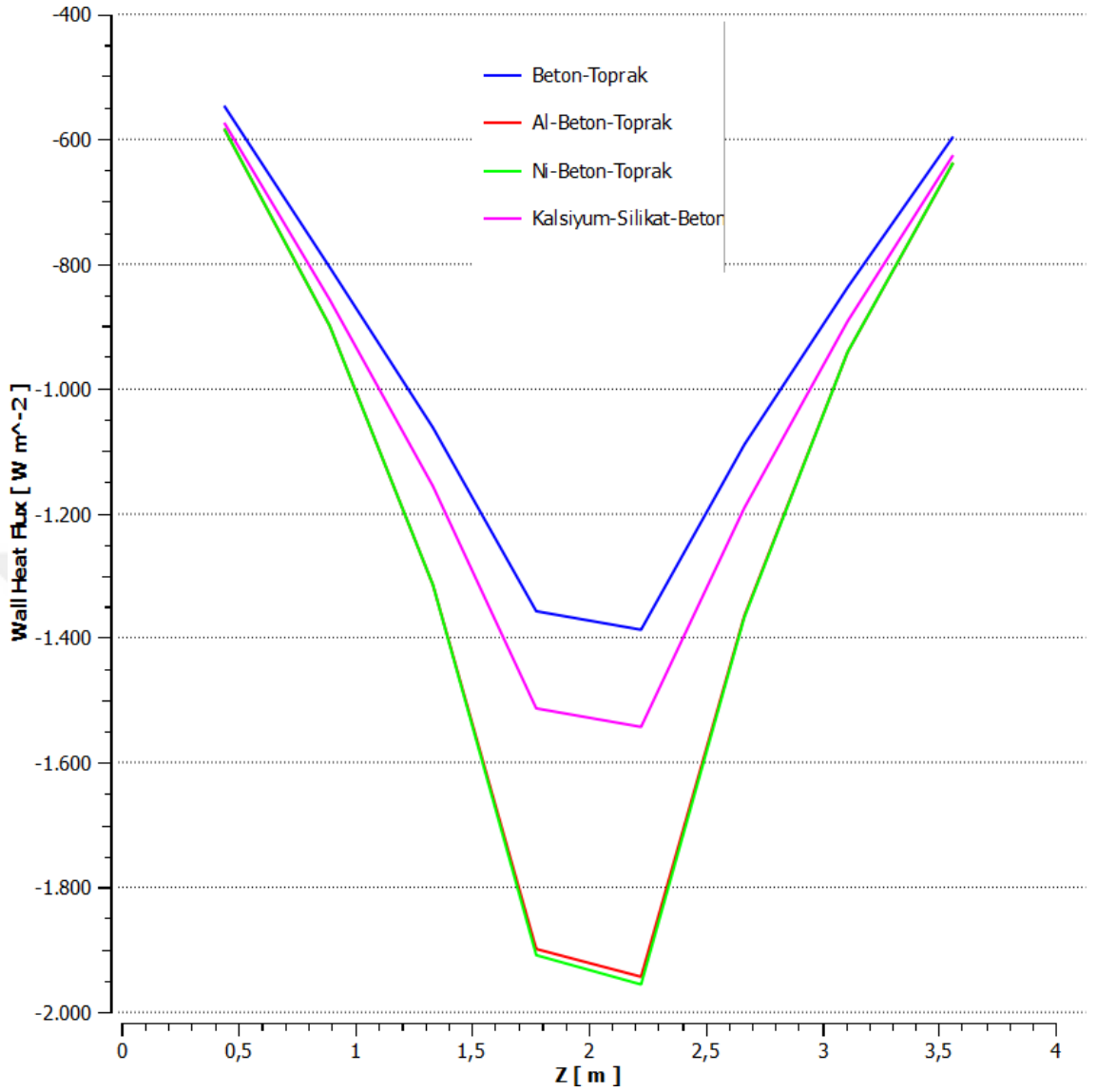
Şekil 4.51. Tünel tavanı altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı

Tünel tavanının hemen altında sıcaklık değerlerinin tünel uzunluğu boyunca değişimi Şekil 4.51' de verilmiştir. Beton-toprak yapıda sıcaklık 600 K'e yaklaşırken Nikel ve Alüminyum kaplı yapılarda sıcaklık 400 K' de kalmıştır.



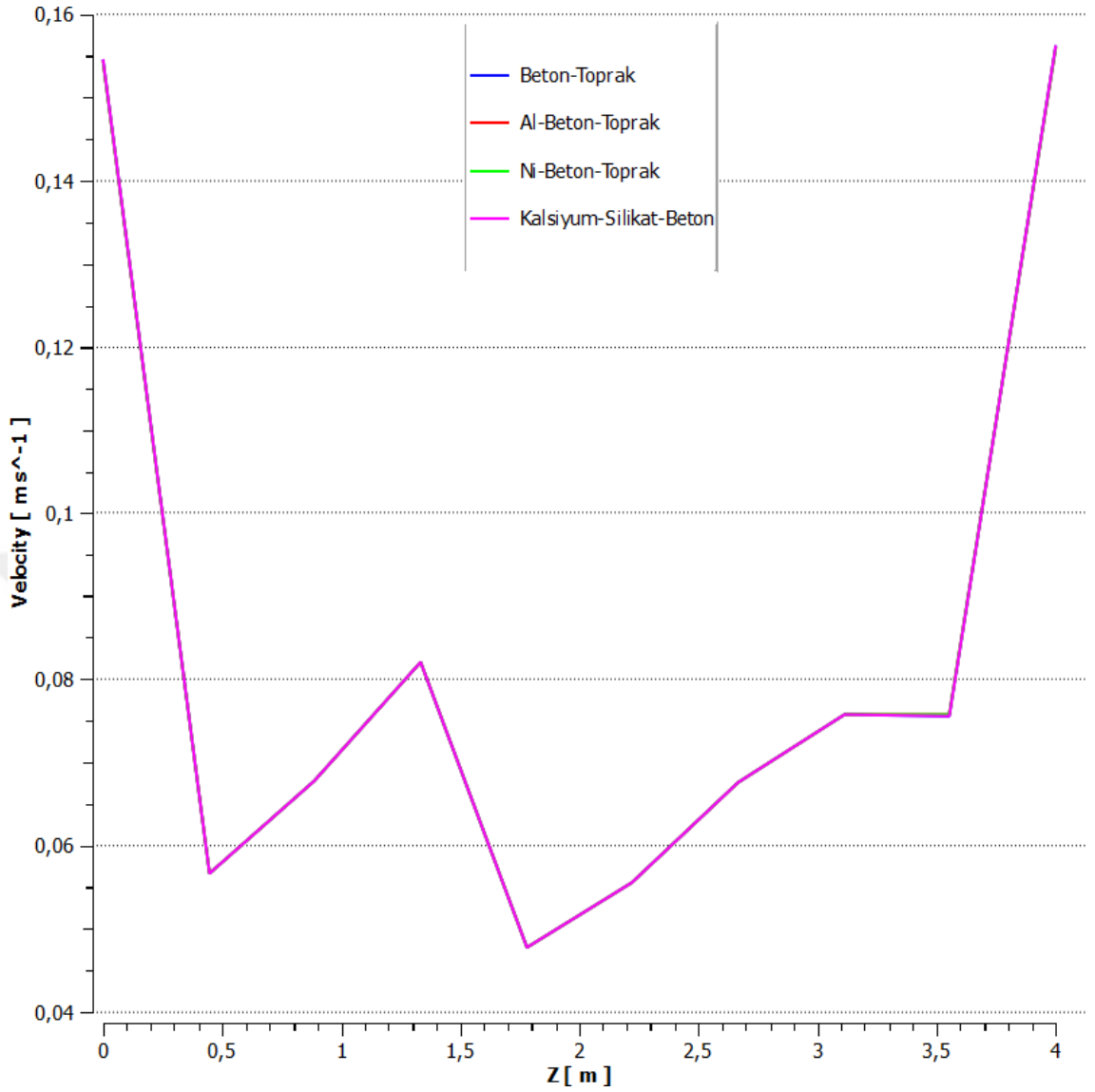
Şekil 4.52. 2. metrede y ekseninde sıcaklık dağılımı

Tünel içerisinde yangın kaynağının bulunduğu yer olan 2. metrede, gazın çıkışı ile beraber dik eksen boyunca sıcaklık değişimi Şekil 4.52’ de verilmiştir. Burada tavandaki sıcaklığın, ısı iletimi etkisiyle Alüminyum ve Nikel kaplı yapılarda daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.53. Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı

Şekil 4.53 tünelin tavanı altında oluşan ısı akısının değişimini göstermektedir. En düşük ısı akısı 1400 W/m^2 olarak iki tabakalı yapıda elde edilmiştir. Alüminyum ve Nikel kaplı yapılarda birbirine yakın değerler görülmekle beraber, en yüksek ısı akısı Nikel kaplı yapıda 1880 W/m^2 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.54. Tünel tavanı altında tünel boyunca akışkan hızı

Tünel boyunca tavanın altında akışkan hızının değişimi Şekil 4.54’ de verilmiştir. Tüm yapılar için akışkan hızı benzer dağılım göstermiştir. Akışkan hızının, iç bölgelerde 0,048 m/s ile 0,08 m/s arasında değiştiği, tünel ağzlarına doğru ise hızlanarak 0,16 m/s değerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

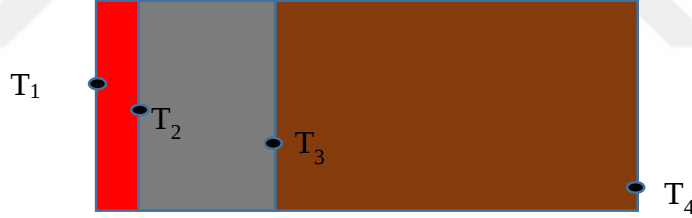
Tüm analiz bulguları incelendiğinde ısı iletim katsayısının tek etkin parametre olmadığı, en önemli parametrenin ise ısıl atalet olduğu tespit edilmiştir. Isıl ataleti yakın olan malzemelerle çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Benzer şekilde Saito ve Yamauchi

(2021) çalışmalarında tünelin tavanı altında gaz sıcaklığının ısıl ataletle bağlantılı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada buna ek olarak ısıl depolama kapasitesi olarak tanımlanan, b parametresinin de etkin olduğu görülmektedir. Beton ve toprak tabakanın ısıyı depoladığı anlaşılmaktadır. Yine buna benzer durum Saito ve Yamauchi (2021) tarafından ısı nüfuz (thermal penetration) etkisi olarak gösterilmiştir. Çalışmalarında ısı nüfuz öncesi ve sonrası malzemelerin farklı davrandıklarını ortaya koymuşlardır.

4.5. Tabakalar Arasında Duvar Sıcaklıklarının İncelemesi

Duvar tabakaları arasındaki sıcaklık dağılımları ayrıca incelenmiş ve her bir modellemedeki sonuçlar verilmiştir. Şekil 4.55 temsili olarak duvar tabakalarını göstermektedir. T_1 , T_2 , T_3 , T_4 sırasıyla tünel iç yüzeyinden dışa doğru tabakalardaki maksimum sıcaklıkları gösterirken, T_{ort} tünel duvarı iç yüzeyindeki ortalama sıcaklığı göstermektedir.



Şekil 4.55. Duvar sıcaklıklarının temsili gösterimi

Çizelge 4.1 ve 4.2' de sırasıyla 300 s ve 600 s' lik süre sonunda duvar yüzeyinde ve ara katmanlardaki sıcaklık değerlerini vermektedir. Ayrıca tünel iç hacminden duvar iç yüzeyine geçen, Q ile sembolize edilmiş toplam ısı transfer oranı (total heat transfer rate) verilmiştir. Daha önce görsel grafiklerin sağlaması olan bu değerler ara bölgelerdeki değerlerin bu modelleme için nasıl bir sonuç ortaya koyduğunu anlatmaktadır. Çeliğin alüminyuma göre daha düşük bir iletim katsayısına sahip olmasına rağmen yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. 300 s sonunda duvar katman sıcaklıkları

Malzeme Adı	Q(W)	T _{ort} (K)	T ₁ (K)	T ₂ (K)	T ₃ (K)	T ₄ (K)
Alüminyum	946,22	289,45	341,82	340,87	286,1	286,05
Nikel	954,27	288,17	320,73	318,55	286,08	286,05
Kalsiyum Silikat	638,93	364,18	747,66	339,13	286,08	286,05
Çelik	950,01	289,06	330,7	318,58	286,08	286,05
Beton-Toprak 2 Tabakalı Yapı	537,88	394,35	-	806,02	287,04	286,05

Çizelge 4.2. 600 s sonunda duvar katman sıcaklıkları

Malzeme Adı	Q(W)	T _{ort} (K)	T ₁ (K)	T ₂ (K)	T ₃ (K)	T ₄ (K)
Alüminyum	1184,75	294,87	391,14	390,26	286,26	286,05
Nikel	1201,08	291,41	351,52	349,45	286,17	286,05
Kalsiyum Silikat	867,53	401,44	763,49	386,45	286,18	286,05
Çelik	1201,59	291,27	349,13	349,02	286,17	286,05
Beton-Toprak 2 Tabakalı Yapı	773,84	443,15	-	806,29	288,05	286,05

Bu çalışmanın temel amacı, beton-toprak yapı ile Kalsiyum-silikat, Alüminyum ve Nikel katmanları ile oluşturulan 3 tabakalı yapıların ısı etkilerini incelemektir. Analizlerde Nikel ve Alüminyum ile oluşturulan yapılarda çok yakın bulgular elde edilmiştir. Isıl ataletle ilgili olan bu sonuçları desteklemek için Çelik malzemesi ile de analizler yapılmıştır. Diğer katmanlarla aynı şekilde 3 cm kalınlığında Çelik malzemesiyle yapılan 3 tabakalı yapı kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, Çelik ile elde edilen sonuçların hem Nikel hem de Alüminyuma yakın olduğu görülmektedir. Böylece ısı atalet ve ısı depolama kapasitesi etkisi gösterilmiştir.

4.6. Farklı Özellikte Duvar Tabakaları ile Analizler

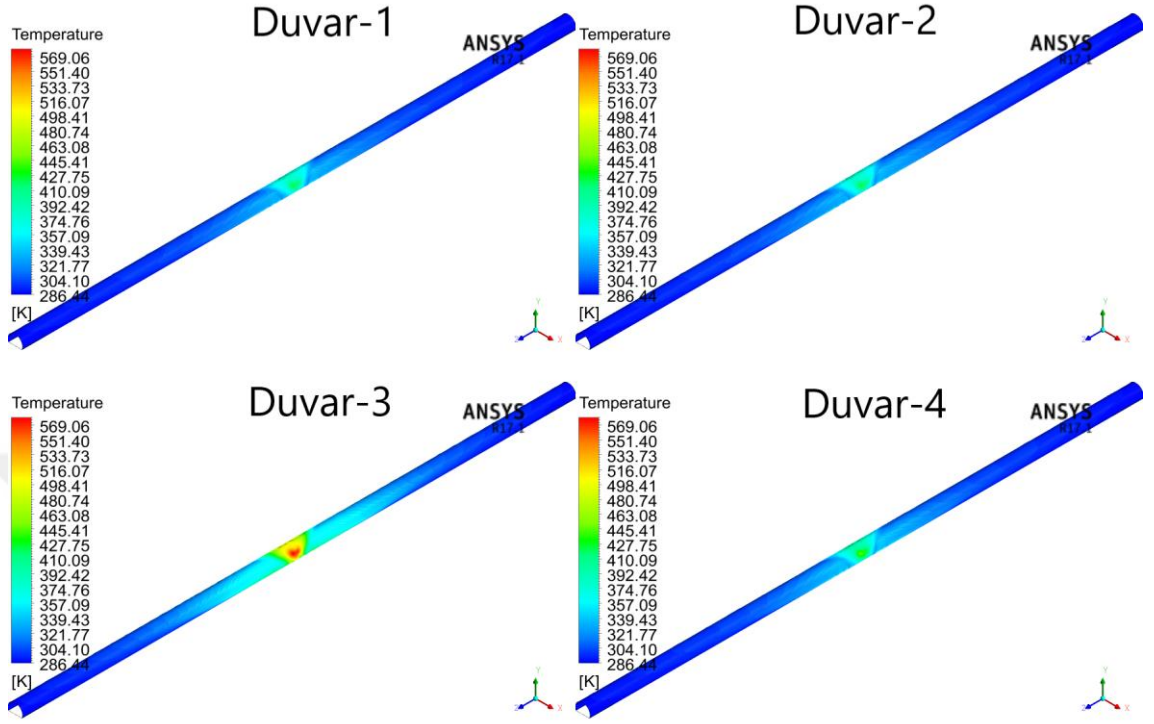
Bu çalışmada ısı atalet etkisinin ön planda olduğu ve yine ısı depolama kapasitesinin de önemli bir etken olduğu ortaya çıkmıştır. Bu konuda daha detaylı bir analiz ortaya koymak için dört farklı duvar katmanını tanımlanarak birbiriyle kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.3. Farklı duvar katmanlarına ait özellikler

Malzeme Adı	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (j/kgK)	İletim Katsayısı (W/mK)	Isıl Yayılma Katsayısı (m ² /s)	Isıl Depolama kapasitesi (J/Km ³)	Isıl Atalet (J/m ² Ks ^{1/2})
Duvar-1	8000	880	1,5	2,13x10 ⁻⁷	7,04x10 ⁵	3249
Duvar-2	2100	3352	1,5	2,13x10 ⁻⁷	7,04x10 ⁵	3249
Duvar-3	8000	100	1,5	1,87x10 ⁻⁶	8x10 ⁵	1095
Duvar-4	8030	502,48	1,5	3,71x10 ⁻⁷	4,03x10 ⁶	2460
Çelik	8030	502,48	16,27	4,03x10 ⁻⁶	4,03x10 ⁶	8102,3

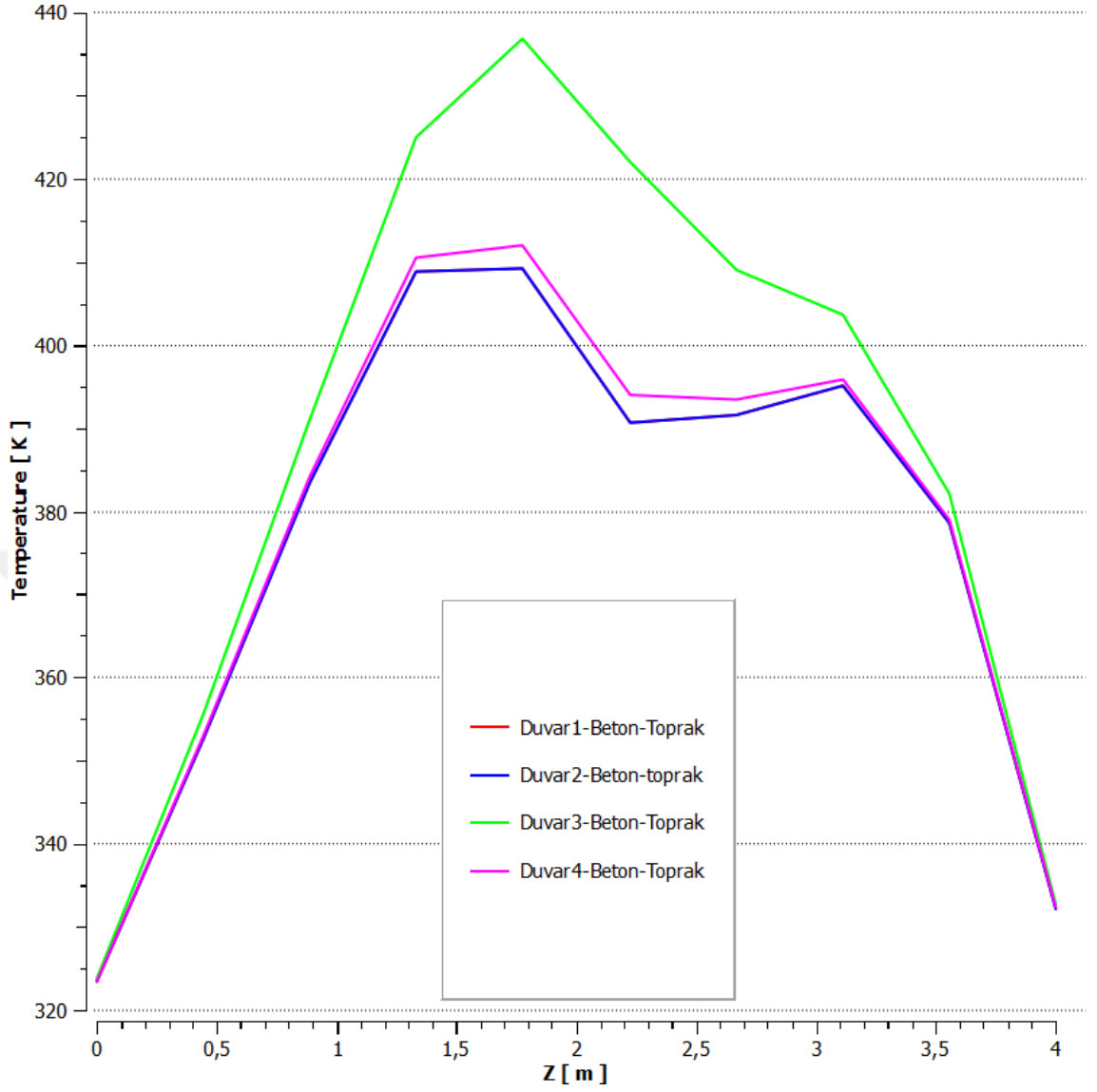
Çizelge 4.3 özel olarak tanımlanmış duvar katmanlarının özelliklerini vermektedir. İletim katsayısı aynı olan bu katmanlarda ısı atalet, yoğunluk ve özgül ısı arasındaki ilişki incelenecek şekilde tasarımlar yapılmıştır. Ayrıca son olarak Çelik ile duvar-4 arasında iletim katsayısına bağlı bir araştırma yapılmıştır.

4.6.1. Dört farklı malzeme ile yapılan analizler



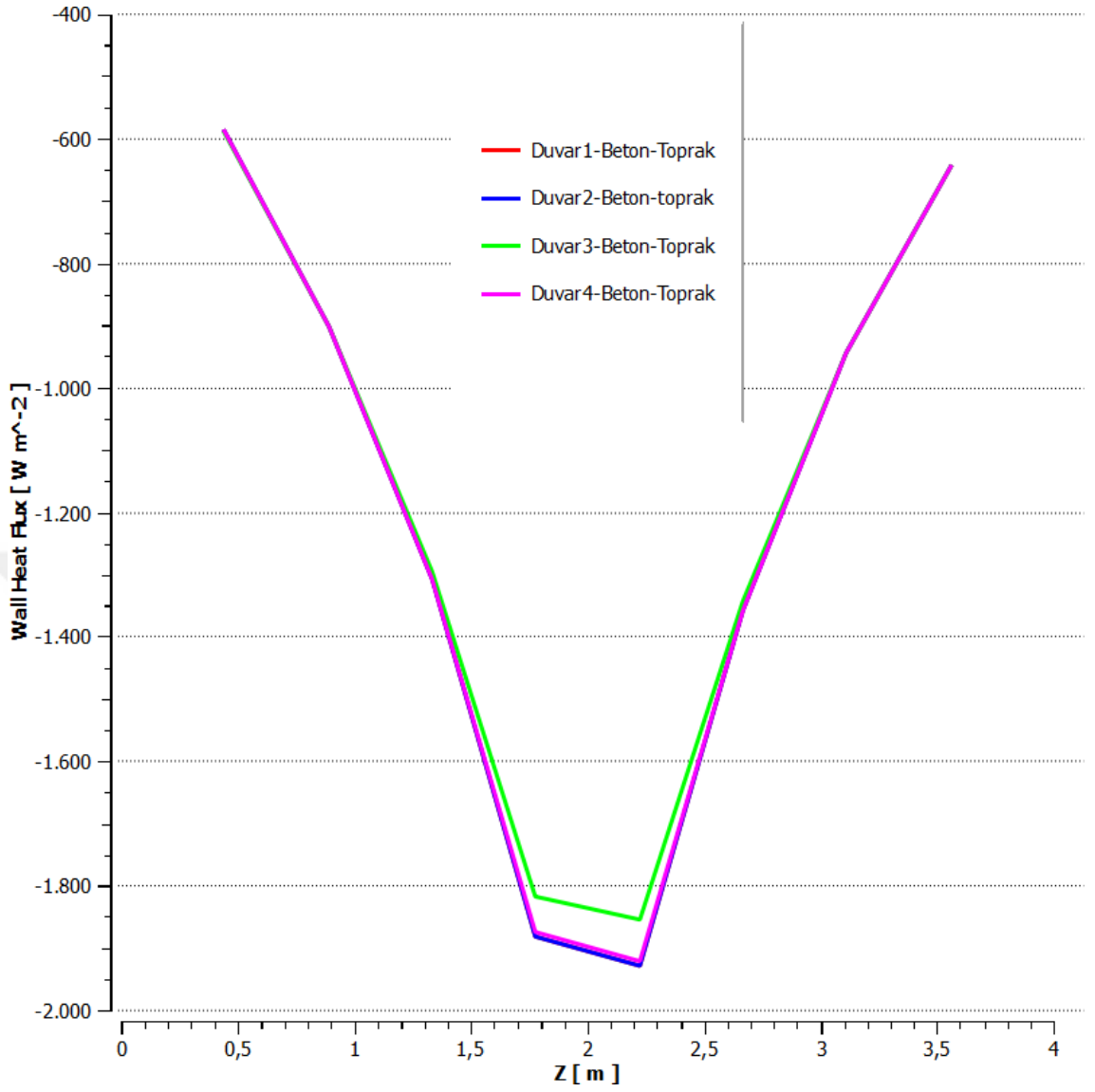
Şekil 4.56. Tünel iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 4.56 incelendiğinde ısııl ataleti düşük olan duvar-3 katmanında ısıнын daha çok depolandığı görülmüştür. İletim katsayıları aynı olmalarına rağmen duvar yüzeyinde farklı sıcaklık dağılımları gözlenmiştir. En yüksek sıcaklık değeri 581 K olarak duvar-3 malzemesi ile oluşturulan üç tabakalı yapıda görülmüştür. En düşük sıcaklık değeri ise 428 K olarak duvar-1 kaplı yapıda gözlemlenmiştir.



Şekil 4.57. Tünel tavanı altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı

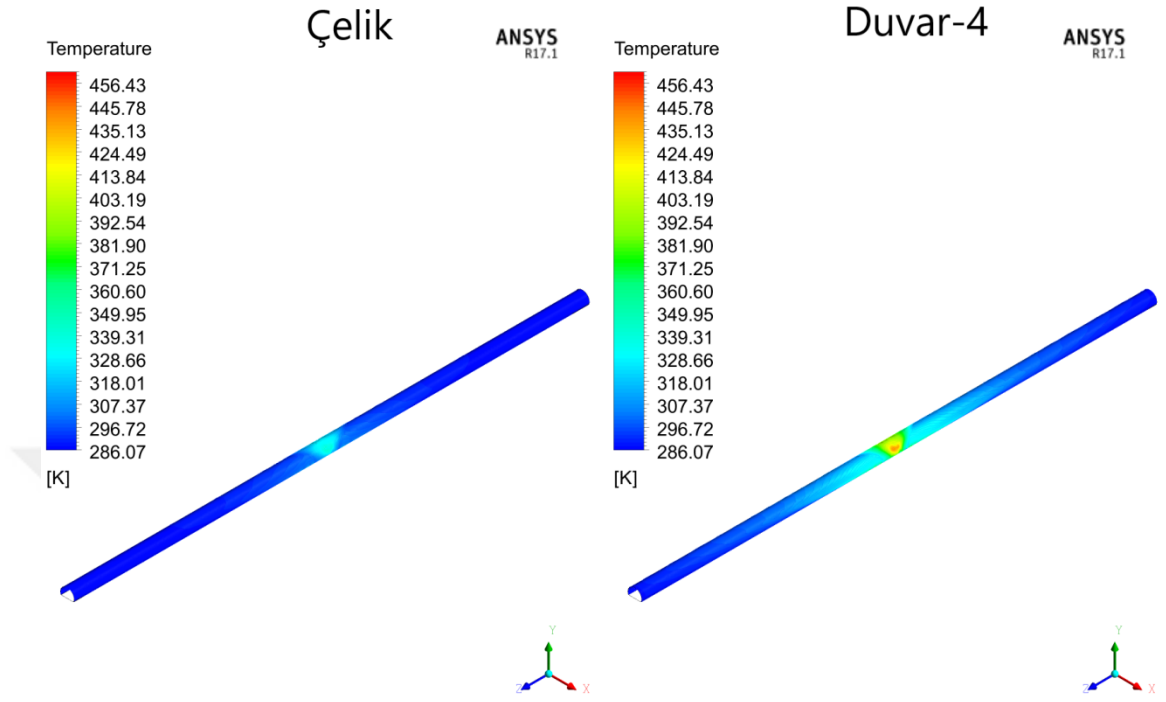
Tünel uzunluğu boyunca tavanın hemen altındaki sıcaklık dağılımı Şekil 4.57 ile gösterilmektedir. En yüksek sıcaklık değeri, ısıl ataleti en düşük olan duvar-3 kaplı yapıda 435 K olarak elde edilmiştir. Bu bulgular ısıl ataletin en etkin parametre olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.58. Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı

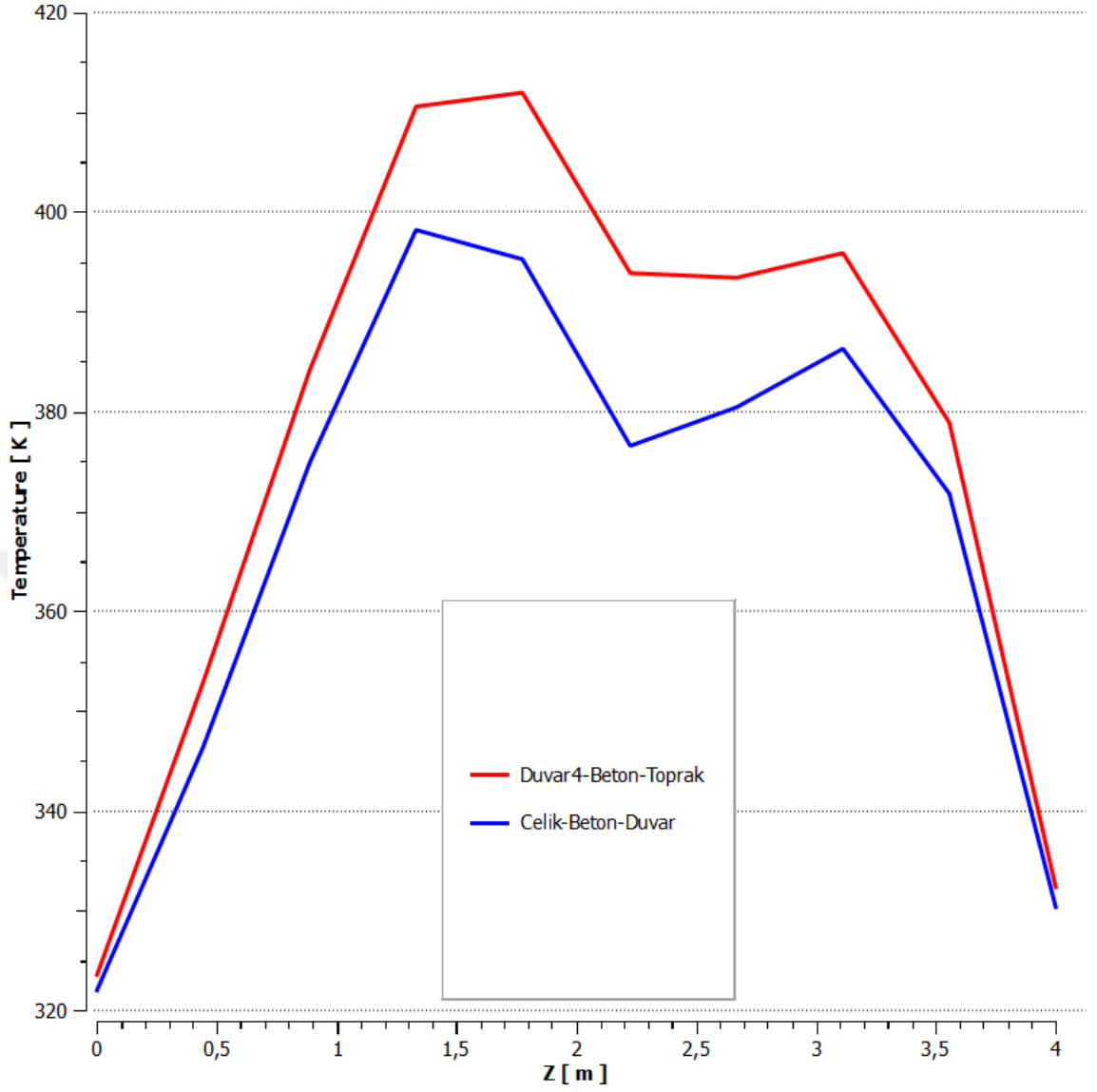
Tünel tavanı altındaki ısı akısı Şekil 4.58’ de verilmiştir. Isı akısı değerlerinin, bütün katmanlar için çok yakın olduğu görülmüştür. En düşük ve en yüksek ısı akısı değerleri arasındaki fark yaklaşık 50 W/m²’dir.

4.6.2. Çelik ile duvar-4 katmanları kıyaslaması



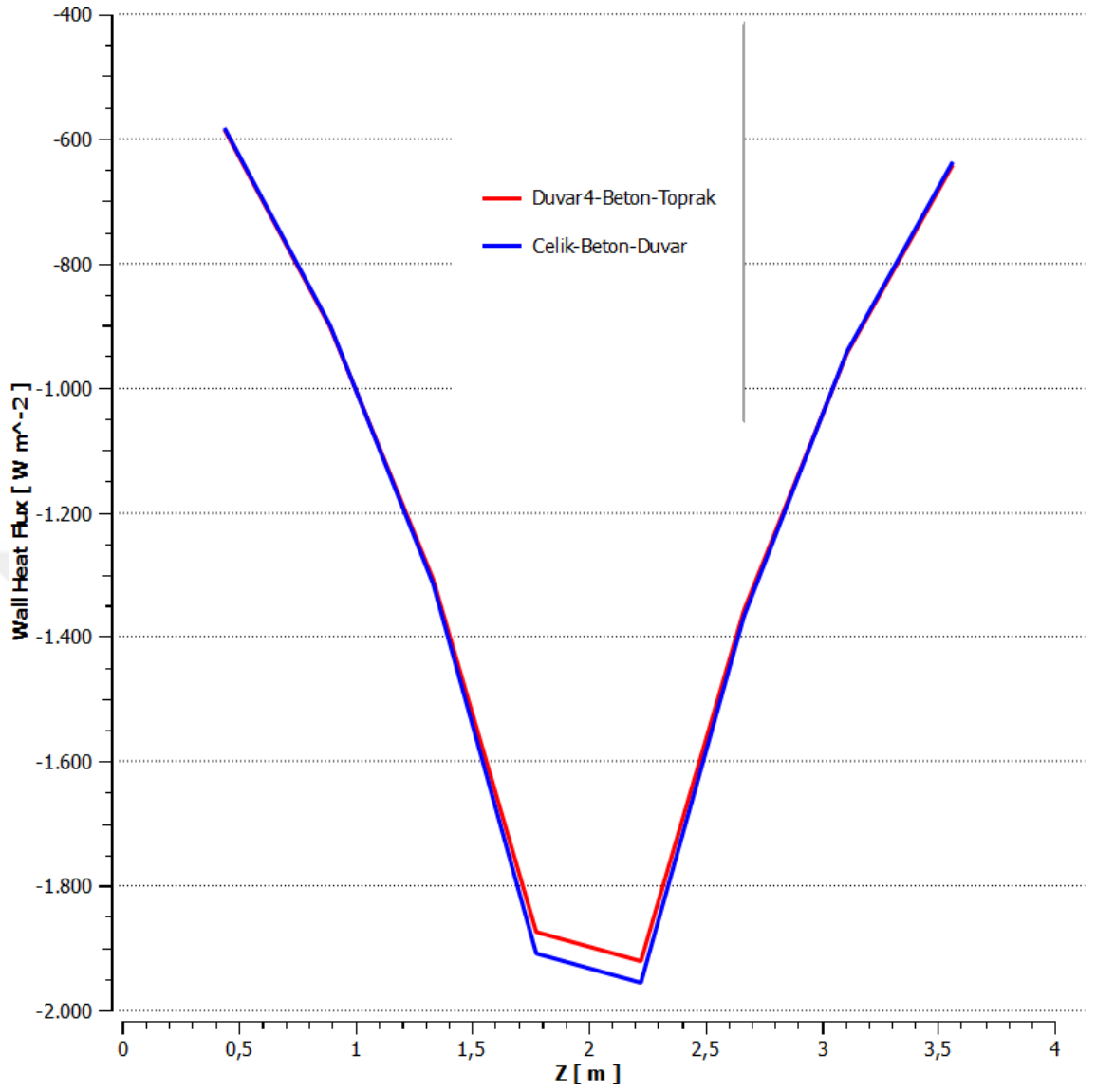
Şekil 4.59. Tünel duvarı iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

Tünel duvarı iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımı Şekil 4.59’ da verilmektedir. Aynı ısı depolama kapasitesine sahip Çelik ve duvar-4 malzemeleri ile oluşturulan üç tabakalı yapılarla yapılan analizlerde, Çelik ile oluşturulan yapıda daha düşük sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Yüzey sıcaklığı Çelik kaplı yapıda 349 K iken, duvar-4 kaplı yapıda 446 K olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.60. Tünel tavanı altında tünel boyunca sıcaklık dağılımı

Şekil 4.60 tünel uzunluğu boyunca tavanın hemen altındaki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Duvar-4 ile oluşturulan yapıda sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak sıcaklık değerleri arasındaki fark yaklaşık 30 K' dir. Yani yüksek bir sıcaklık farkı oluşmamıştır.



Şekil 4.61. Tünel tavanı altında tünel boyunca oluşan ısı akısı

Şekil 4.61 tünel tavanı altında oluşan ısı akısını göstermektedir. Her iki yapıdaki ısı akısı değerlerinin çok yakın olduğu görülmüştür.

5. SONUÇ

Tünel yangınları çok fazla parametreye bağlı olduğundan üzerinde çalışılması zor bir konudur. Her gün yeni bir çalışmanın eklendiği tünel yangını konusunda, çalışmaların çoğu havalandırma ve ısı salınım oranı hesaplaması üzerine yapılmıştır. Duvardan ısı kaybı ile ilgili çok az çalışma yapılmıştır.

Tünel duvarına uygulanan üçüncü katman yangından korunma amaçlı yapılan bir uygulamadır. Kalsiyum silikat bu örneklerden biridir. Çok düşük ısı iletim katsayısına sahip olması nedeniyle, ısıyı tünel duvarlarından transfer edemez ve ortam sıcaklığının daha yüksek değerlere çıkmasına neden olabilir. Bununla beraber 3 cm kalınlığındaki Kalsiyum-silikat tabakası az da olsa bir emicilik yapıp ısıyı hapsedtiği sonucu çıkarılabilir. Tünelin tüm kısımlarında Kalsiyum-silikat kaplı yapıda, beton-toprak yapı ile çok yakın değerler elde edildiği görülmüştür.

Alüminyum ve Nikel malzemelerin kullanıldığı üç tabakalı yapılarda tünel duvarı iç yüzeyinden daha fazla ısı transferi oluşmuş ve ortam sıcaklığının yükselmesine engel olmuştur. Ayrıca iç yüzeyin daha düşük sıcaklıklarda kalmasını sağlamıştır. Ancak Nikel, Alüminyum ile düşük iletim katsayısına sahip olmasına rağmen, Alüminyum kaplı yapı ile Nikel kaplı yapıda çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bunun sebebi iki malzemenin çok yakın ısı iletkenlik değerlerine sahip olmasıdır.

Çelik ve Alüminyum ile oluşturulan üç tabakalı yapılar da çok yakın sonuçlar vermiştir. Çeliğe ait ısı iletkenlik katsayısı ve ısı iletkenliği Alüminyuma göre düşüktür. Bu iki malzemelerle yakın sonuçlar elde edilmesi, ısı iletkenliğinin tek etkin parametre olmadığını ortaya çıkarmıştır. Yapılan analizler ısı depolama kapasitesinin de etkin bir parametre olduğunu göstermiştir.

Isı iletkenliği ve ısı depolama kapasitesi etkilerinin incelenmesi adına Çelik ve özel olarak tanımlanan duvar-4 malzemeleri ile oluşturulan yapılar arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Analizler sonunda, aynı ısı depolama kapasitesine sahip olmalarına rağmen farklı sonuçlar elde edilmiştir. Daha yüksek ısı iletkenliğine sahip olan Çelik kaplı yapıda daha

yüksek ısı transferi elde edilmiştir. Burada ısıl ataletin ısıl depolama kapasitesine göre daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak bu çalışmada, en etkin parametrenin ısıl atalet olduğu tespit edilirken, diğer etkin parametrenin ısıl depolama kapasitesi olduğu belirlenmiştir. Isı iletim katsayısı etkisinin ise düşük olduğu görülmüştür. Isı iletim katsayıları yakın olan malzeme ile kaplı yapılarda ısı akısının da yakın değerler aldığı belirlenmiştir. Ancak ısıl ataletin ve ısıl depolama kapasitesinin etkisiyle, ısı duvar iç yüzeyinden duvar içerisine doğru ilerlemiştir. Yani duvar ısıyı emerek içerdeki sıcaklığı düşürmüştür.

Tünel yangınları konusunda deneysel çalışma pek yapılmamakla beraber, nümerik olarak yapılan bu çalışmanın deneylerle desteklenmesi daha iyi olacaktır. Artan tünel sayısı ve risk faktörü göz önüne alındığında, daha fazla deney yapılması, gerekli önlemlerin alınabilmesi ve yeni çözümler geliştirilmesi açısından gereklidir.

KAYNAKLAR

- Beard, A., & Richard, C. (2005). *Handbook Tunnel Fire Safety*. Thomas Telford Publishing.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and Mass Transfer*. Mc Graw Hill.
- Gao, Y., Zhu, G., Gu, S., Zhu, H., & An, W. (2019). Experimental investigation on longitudinal and transverse temperature distribution in a horseshoe shaped tunnel fire. *Advances in Structural Engineering*, 2089-2096.
- Gong, L., Jiang, L., & Li, S. (2016). Experimental study on longitudinal and transverse temperature distribution of sidewall confined ceiling jet plume. *Applied Thermal Engineering* , 583-590.
- Haack, A. (1994). Introduction to The EUREKA EU 499 Firetune project. *Proceedings of the International Conference on Fire In Tunnels* (s. 3-19). İsveç: Swedish National Testing and Research Institute.
- Haack, A. (2003, Kasım 20-21). Catastrophic Tunnel Fires –What have we learnt? H.Ingason(Ed.). *Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires* (s. 7-17). SP Swedish National Testing and Research Institute.
- Hearter, A. (1994). Fire Tests in the Ofenegg-Tunnel in 1965. *Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels* (s. 195-214). İsveç: Sweden National Testing and Research Institute.
- Ingason, H. (2006). Fire Testing in Road and Railway Tunnels. V. Apted(ed) içinde, *Flammability testing of materials used in construction, transport and mining* (s. 231-274). Woodhead Publishing.
- Ingason, H., Zhen, L. Y., & Lönnemark, A. (2015). *Tunnel Fire Dynamics*. New York: Springer.
- Jiang, Z., Zhao, J., & Xie, H. (2017). Scaling Heat Conduction. *Microforming Technology Theory, Simulation, and Practice*, 53-71.doi.org/10.1016/B978-0-12-811212-0.00003-0.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2022, Mayıs 16). *KGM web sitesi*. www.kgm.gov.tr: <http://www.kgm.gov.tr> adresinden alındı

- Kayılı, S., Köktürk, T., & Eralp, O. C. (2010). Tünel Yangınlarının ve Yangın Güvenliği İçin Kullanılan Havalandırma Sistemlerinin Özellikleri. *Mühendis ve Makina*, 51(604), 1-8.
- Kılıç, M., & Yiğit, A. (2018). *Isı Transferi*. Dora Yayıncılık.
- Li, Y. Z., Lei, B., & Ingason, H. (2011). The maximum temperature of buoyancy-driven smoke flow beneath the ceiling in tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 204-210.
- Merci, B. (2016). Introduction to Fluid Mechanics. M. J. Hurley içinde, *SFPE Handbook of Fire Protection* (s. 12). New York: Springer.
- Permanent International Association of Road Congress (1999). *Fire and Smoke Control in Road Tunnels*. Fransa: PIARC Technical Committee on Road.
- Permanent International Association of Road Congress (2017). *Road Tunnels: (2017R02EN) Design Fire Characteristics for Road Tunnels*. Paris: PIARC Technical Committee on Road.
- Saito, S., & Yamauchi, Y. (2021). Numerical study of the influence of tunnel wall properties on ceiling jet. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research* 110, 103811. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104087>.
- Shell Conduction Consendiration. (2022). Ansys: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node471.htm#> adresinden alındı
- Tomar, M. S., Khurana, S., & Chowdhury, S. (2022). A numerical method for studying the effect of calcium silicate lining on road tunnel fires. *Thermal Science and Engineering Progress*, 43, doi:10.1016/j.tsep.2022.101245.
- Tu, J., Yeoh, G.-H., & Liu, C. (2020). *Computational Fluid Dynamics*. (Çev.Engin, T). Ankara: Palme Yayıncılık.
- Udemy. (2021). *ANSYS Fluent - CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi*. Udemy: <https://www.udemy.com/course/ansys-fluent-aks-analizleri-uygulamalaryla-cfd-egitimi/learn/lecture/18047413#overview> adresinden alındı
- Umur, H. (2021). *Akışkanlar Mekaniği*. Dora Yayıncılık.

- Vega, M. G., Diaz, M. A., Oro, J. M., Tajadura, R. B., & Morros, C. S. (2008). Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, 539-551.
- Wang, F., & Wang, M. (2016). A computational study on effects of fire location on smoke movement in a road tunne. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51, 405-413.
- Wimshurst, A. (2019, Ağustos). *Shell conduction in CFD*[Video]. Fluid Mechanics 101: <https://www.youtube.com/watch?v=6jJDM62B1o8> adresinden alındı
- Xu, T., Zhao, D., Tao, H., & Lei, P. (2022). Extended CFD models for numerical simulation of tunnel fire under natural ventilation: Comparative analysis and experimental verification. *Case Studies in Thermal Engineering*.
- Zhang, X., Hu, L., Zu, W., Zhang, X., & Yang, L. (2014). Flame extension length and temperature profile in thermal impinging flow of buoyant round jet upon a horizontal plate. *Applied Thermal Engineering* 73(1), 15-22.