



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DİSK BALATA ÇİFTİNDEKİ SICAKLIK
DAĞILIMININ FRENLEME ÜZERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

CANSU AY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah DEMİR

İSTANBUL, 2021



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DİSK BALATA ÇİFTİNDEKİ SICAKLIK
DAĞILIMININ FRENLEME ÜZERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

CANSU AY

(523218004)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah DEMİR

İSTANBUL, 2021

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bana her konuda destek olan, yönlendiren ve kendisiyle çalışma fırsatı sunan değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Abdullah DEMİR'e ve yüksek lisans eğitimim boyunca her konuda desteklerini gördüğüm Prof. Cenk SAYIN'a ayrı ayrı en derin sevgi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca yaşam boyu yanımda olan ve her zaman destekleyen annem Emine AY, babam Kaan AY ve kardeşim Ceyhun AY'a da sonsuz teşekkür eder ve şükranlarımı sunarım.

Mayıs, 2021

Cansu AY

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
SEMBOLLER LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç ve Konu	1
1.2.Literatür Bilgisi	5
2.MATERYAL VE METOT	12
2.1 Problemin Tanımı ve Analize Yönelik Yapılan Kabuller	13
2.2 Frenleme Çiftindeki Isı Taşınım Katsayısının Belirlenmesi	15
2.3 Frenleme Çiftindeki Isı Transferine Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulanması.....	18
2.4 Frenleme Çiftindeki Geçişli Yapısal Analize Non-Linear Yaklaşım.....	23
2.5 Frenleme Analizinin ANSYS® Programında Gerçekleştirilme Süreci	26
2.6 Sabit Durum Termal Analiz Sınır Koşulları.....	30
2.7 Geçişli Yapısal Analiz Sınır Koşulları	32
2.7.1 Analizde Kullanılan Basınç Değerleri.....	33
2.7.2 Analizde Kullanılan Açısal Hız Değerleri.....	35
2.7.3 Analizde Kullanılan İvme Değerleri.....	35
2.7.4 Analizdeki Destek Parçalar	35

3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	37
3.1 Sabit Durum Termal Analiz Bulguları	37
3.2. Sabit Durum Termal Analiz Sonu Sıcaklık Bulguları.....	52
3.3 Sabit Durum Termal/Geçişli Yapısal Analiz (Multi-Fizik Çalışma) Bulguları	55
3.3.1 Toplam Deformasyon	55
3.3.2 Von-Misses Gerilme.....	56
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR.....	60
EK 1	66
EK 2.....	74

ÖZET

DİSK BALATA ÇİFTİNDEKİ SICAKLIK DAĞILIMININ FRENLEME ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Anahtar Kelimeler: Disk fren, sıcaklık, ısı taşınım katsayısı, toplam deformasyon, Von - Misses gerilme, ANSYS®, SAE J2522 kapsamlı fren etkinlik testi

Özet: Frenler; hareket halindeki taşıtı yavaşlatmak, taşıtın hızını kontrol altında tutmak, durdurmak ve duran taşıtı yerinde sabit tutmak amacıyla kullanılır. Fren sistemi, fren çiftinin sürtünmesine bağlı olarak aracın mekanik enerjisini ısı enerjisine dönüştüren en önemli aktif güvenlik sistemidir.

Fren çiftinin frenleme esnasında ve neticesinde ısı transferi iletim, taşınım ve ışınilma gerçekleştirilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan disk frenlerde diskin açışal hızına bağılı olarak sürekli değışen ısı taşınım katsayısının fren çiftlerinin soğumasına etkisi önemlidir. Isı taşınım katsayısındaki değışimi sayısal yaklaşımlarla hesaplamak mümkündür.

Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS® yazılımını kullanarak disk frenin termomekanik davranışı incelenmiştir. Öncelikle ısı taşınım katsayısındaki değışim sayısal yaklaşımla hesaplanmış ve akabinde bir binek otomobilin disk-balata fren çiftinin SAE J2522 Kapsamlı Fren Etkinlik Test standardından elde edilmiş deneysel verileri kullanılarak kararlı hal termik analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ısııl sonuçlar ve deneysel veriler geçişli yapısal analizde kullanıldıktan sonra toplam deformasyon ve Von-Misses gerilme değıerleri değıerlendirilmiştir. Frenleme sırasındaki disk sıcaklığının maksimum değıere ulaştığı bölgelerde, deformasyonların da maksimuma ulaşması sonuçların birbiriyle ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Genel olarak frenlemenin sonunda, başlangıç durumuna göre sıcaklık farkındaki düşüşte; taşınımın etkisinin %91,15 ile 91,74 arasında azaldığı tespit edilmiştir.

CANSU AY

ABSTRACT

INVESTIGATION OF EFFECT OF DISC-PAD PAIR TEMPERATURE DISTRIBUTION ON BRAKING

Keywords: Brake disc, temperature, total deformation, Von -Misses stress, ANSYS®, SAE J2522 dynamometer global brake effectiveness

Brakes; it is used to slow down the moving vehicle, keep the vehicle's speed under control, stop it and keep the stationary vehicle stable. Brake system is the most significant active safety system that converts the vehicle's mechanical energy into heat energy based on braking pair's friction.

The heat transfer of the brake pair during and as a result of braking is carried out by conduction, convection and radiation. In disc brakes, which are widely used today, the effect of the heat transfer coefficient, which constantly changes depending on the angular velocity of the disc, on the cooling of the brake pairs is important. It is possible to calculate the change in heat convection coefficient with numerical approaches.

In this study, the thermo-mechanical behavior of the disc brake was investigated by using ANSYS® software with the finite element method. Firstly, the change in heat convection coefficient was calculated by a numerical approach, and then steady-state thermal analysis was performed using the experimental data obtained from SAE J2522 Comprehensive Brake Efficiency Test standard of the disc-pad brake pair of a passenger car. After the thermal results obtained and experimental data were used in the transient structural analysis, the total deformation and Von-Misses stress values were evaluated. In the regions where the disc temperature during braking reaches its maximum value, the deformations reaching the maximum revealed that the results are related to each other. Generally, at the end of braking, the drop in temperature difference relative to the initial state has been determined the decreased effect of convection between 91.15% and 91.74%.

CANSU AY

SEMBOLLER LİSTESİ

- ρ** : Akışkanın yoğunluğu
- u_{∞}** : Akışkanın hızı
- D** : Karakteristik uzunluk (silindirin çapı)
- μ** : Akışkanın dinamik viskozitesi
- ν** : Akışkanın kinematik viskozitesi
- Re** : Reynolds sayısı
- Pr** : Prandtl sayısı
- α** : Isıl yayınma katsayısı
- c_p** : Özgül ısı
- h** : Isı taşınım katsayısı
- k** : Isı iletim katsayısı
- Nu** : Nusselt sayısı
- d_o** : Diskin dış çapı
- R** : Lastik çapı
- w** : Açısal hız

KISALTMALAR

AMMC	: Alüminyum Metal Matris Kompozit
APDL	: ANSYS® Parametrik Tasarım Dili
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
DTV	: Disk Kalınlık Değişimi
FEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
FG	: Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş
HTC	: Isı Transfer Katsayısı
HVOF	: Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtıyla Püskürtme
SAE	: Otomotiv Mühendisler Birliği (Society of Automotive Engineers)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Disk-Kaliper Kombinasyonları	1
Şekil 1.2. İletim, Taşınım ve Işınım	4
Şekil 2.1. Sonlu Eleman Ağı	20
Şekil 2.2. Lineer Durumda Kuvvet-Deplasman Değişimi	23
Şekil 2.3. Non-Linear Durumda Kuvvet Deplasman Değişimi.....	25
Şekil 2.4. Yakınsama Dairesi	26
Şekil 2.5. Kontak Tanımlamaları	28
Şekil 2.6. Disk-balata İkilisi için Oluşturulan Ağ Yapısı.....	29
Şekil 2.7. Sabit Durum Termal Analiz Yüzey Tanımlamaları	30
Şekil 2.8. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (99-212 °C Sıcaklık Aralığı)	31
Şekil 2.9. 15 Frenleme için Ortalama Isı Taşınım Katsayısı Değişimi	32
Şekil 2.10. Geçişli Yapısal Analiz Yüzey Tanımlamaları.....	33
Şekil 2.11. Dış Balataya Uygulanan Basınç Grafiği	34
Şekil 2.12. İç Balataya Uygulanan Basınç Grafiği.....	34
Şekil 2.13. Açısal Hız Grafiği	35
Şekil 3.1 99-212°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı. 37	
Şekil 3.2. 198-314°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	38
Şekil 3.3. 284-410°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	39
Şekil 3.4. 329-447°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	40

Şekil 3.5. 366-474°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	41
Şekil 3.6. 397-500°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	42
Şekil 3.7. 421-520°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	43
Şekil 3.8. 444-542°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	44
Şekil 3.9. 464-556°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	45
Şekil 3.10 481-570°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	46
Şekil 3.11. 496-581°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	47
Şekil 3.12. 511-593°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	48
Şekil 3.13. 524-602°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	49
Şekil 3.14. 537-610°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	50
Şekil 3.15. 548-620°C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı	51
Şekil 3.16. 99-212 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları.....	53
Şekil 3.17. 397-500 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları.....	53
Şekil 3.18. 548-620 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları.....	54
Şekil 3.19. Geçişli yapısal analiz toplam deformasyon görseli.....	55

Şekil 3.20. Geçişli yapısal analiz Equivalent Von-Misses gerilim görseli	57
EK 1-Şekil 1. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (99-212 °C Sıcaklık Aralığı) ...	66
EK 1-Şekil 2. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (198-314 °C Sıcaklık Aralığı) .	66
EK 1-Şekil 3. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (284-410 °C Sıcaklık Aralığı) .	67
EK 1-Şekil 4. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (329-447 °C Sıcaklık Aralığı) .	67
EK 1-Şekil 5. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (366-474 °C Sıcaklık Aralığı) .	68
EK 1-Şekil 6. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (397-500 °C Sıcaklık Aralığı) .	68
EK 1-Şekil 7. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (421-520 °C Sıcaklık Aralığı) .	69
EK 1-Şekil 8. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (444-542 °C Sıcaklık Aralığı) .	69
EK 1-Şekil 9. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (464-556 °C Sıcaklık Aralığı) .	70
EK 1-Şekil 10. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (481-570 °C Sıcaklık Aralığı)	70
EK 1-Şekil 11. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (496-581 °C Sıcaklık Aralığı)	71
EK 1-Şekil 12. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (511-593 °C Sıcaklık Aralığı)	71
EK 1-Şekil 13. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (524-602 °C Sıcaklık Aralığı)	72
EK 1-Şekil 14. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (537-610 °C Sıcaklık Aralığı)	72
EK 1-Şekil 15. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (548-620 °C Sıcaklık Aralığı)	73
EK 2-Şekil 1. 99-212 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları	74
EK 2-Şekil 2. 198-314 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları	74
EK 2-Şekil 3. 284-410 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları	75
EK 2-Şekil 4. 329-447 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları	75
EK 2-Şekil 5. 366-474 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları	76
EK 2-Şekil 6. 397-500 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları	76
EK 2-Şekil 7. 421-520 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları	77

EK 2-Şekil 8. 444-542 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları	77
EK 2-Şekil 9. 464-556 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları	78
EK 2-Şekil 10. 481-570 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları.....	78
EK 2-Şekil 11. 496-581 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları.....	79
EK 2-Şekil 12. 511-593 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları.....	79
EK 2-Şekil 13. 524-602 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları.....	80
EK 2-Şekil 14. 537-610 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları.....	80
EK 2-Şekil 15. 548-620 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları.....	81

TABLULAR LİSTESİ

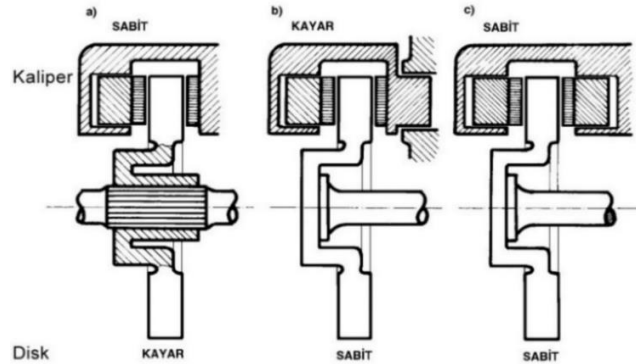
Tablo 2.1. Geometrik Boyutlar ve Uygulama Parametreleri	15
Tablo 2.2. Sıcaklıkla Fren Zayıflaması (Fade 1) Frenleme Koşulları	15
Tablo 2.3. Reynolds Sayısı Aralığına ve Yüzey Geometrisine Bağlı Olarak C ve m Sabitleri	17
Tablo 2.4. Havanın Belirli Sıcaklıklarına Karşılık Gelen Değerler.....	18

1.GİRİŞ

1.1 Amaç ve Konu

Fren sistemi hareket halindeki taşıtı yavaşlatmak, taşıtın hızını kontrol altında tutmak, durdurmak ve duran taşıtı yerinde sabit tutmak amacıyla kullanılan en önemli güvenlik sistemidir [1]. En yaygın olarak kullanılan frenler, iki nesne arasında üretilen sürtünmeden yararlanarak hareketli aracın kinetik enerjisini ısı enerjisine dönüştürüldüğü sürtünmeli frenlerdir. Sürtünmeli frenler, ticari veya özel amaçlı taşıtlarda en sık kullanılan uygulamadır [2]. Sürtünmeli fren sistemleri, fren pedalıyla oluşturulan baskı kuvveti sonucunda balata-disk ara yüzeyinde kayma sürtünmesi yoluyla oluşan kinetik ve potansiyel enerjiyi ısı enerjisine dönüştürür [3]. Genel olarak doğrudan doğruya tekerleğe bağlı olan frenler, fren momentinin oluşturulması ve enerji değişiminin gerçekleştirilmesi olmak üzere iki ana fonksiyonu yerine getirirler.

Fren diski aksa sabitlenerek tekerlekle eş eksenli hareket etmektedir ve frenleme esnasında bir çift balata, fren torkunu oluşturmak için fren diskine pistonlar vasıtasıyla hidrolik kuvvet uygulayarak diski iki ana yüzeyinden sıkarak, tekerleğin dönüşünü istenen düzeyde düzenler. Balataların diski her iki yandan eşit kuvvetle sıkıştırabilmesi için ya disk ya kaliper ya da her iki balatanın aksel yönde hareket halinde olması gerekmektedir. Hareketlilik açısından farklılık gösteren kaliper-disk kombinasyonları/tasarımları Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Bunlar sabit kaliper-kayar disk, kayar kaliper-sabit disk ve sabit kaliper-sabit disk şeklinde sıralanabilir [4].



Şekil 1.1 Disk-Kaliper Kombinasyonları [4]

Taşıt tekniğinde disk frenlerin gelişmesi sabit kaliper-sabit disk tipi ile başlamıştır. Eksenel yönde hareketsiz olarak monte edilmiş olan kaliperin her iki yanında karşılıklı duran fren silindirlilerindeki hidrolik basınçlar eşittir. Diskin eksenel yöndeki balanssızlığı pistonların hareketleri ile dengelenebilmektedir. Günümüzde kayar kaliper-sabit disk tipi, kayma bölgelerinin korozyon ve kirden iyi korunabiliyor olması nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Kayar kaliper-sabit disk tipinin avantajlarından biri fren sıvısı ile dolu bir adet hücrenin seyir rüzgarıyla soğutulabilmesi ve bu sayede ısınma ile ortaya çıkabilecek hidrolik buharlaşma tehlikesinin önüne geçilebilmesidir. Bir diğer avantajı ise frenin taşıtın daha dışına doğru yerleştirilebilmesidir. Bu durum ön aksta direksiyon başlık piminin daha dışa doğru eğilebilmesine ve negatif yuvarlanma yarıçapı elde edilebilmesine imkan vermektedir.

Fren disklerinin imalatında kullanılan en yaygın malzemelerden biri, yüksek karbon içeriğine sahip gri dökme demirdir. Gri dökme demir, diğer malzemelere göre iyi iletkenlik ve yüksek özgül ısı kapasitesine sahip olması, kolay işlenebilme özelliği ve iyi bir sönümlenme malzemesi olması gibi avantajlara sahiptir [5].

Fren diskleri katı ve hava kanallı disk olmak üzere temel olarak iki grupta ele alınır. Katı fren diski tek bir katı diskten oluşurken, hava kanallı diskte bulunan kanatlar iki dairesel diski ayırır ve havanın soğutma etkisini arttırmak için bir geçit görevi sağlar [6].

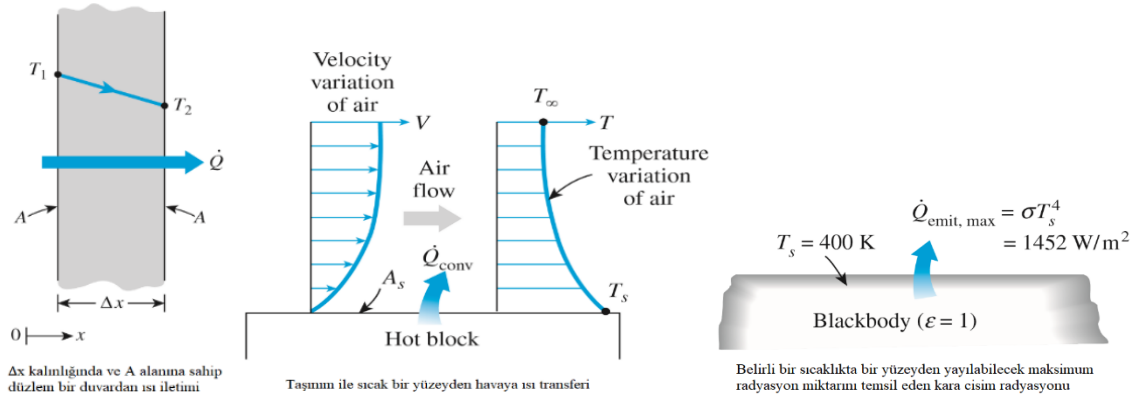
Disk frenlerin çok çabuk ısınmasını önlemek için ısı depolama kapasitesinin büyük olması gerekmektedir. Bu kapasite, özgül ısı kapasitesi ile disk fren ağırlığının çarpımıyla ifade edilir. Bu durumda frenin yeterince büyük ve özgül ısı kapasitesinin de yüksek olmasını gerektirmektedir [4].

Frenleme boyunca oluşan ısının mümkün olduğunca hızlı bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. Böylelikle frenleme esnasında sıcaklığın hızlı artması önlenmiş gibi fren bırakıldığında da hızlı bir soğuma sağlanmış olur. Buradan hareketle frenlerin yerleştirildiği bölgenin mümkün mertebe seyir rüzgarının soğutma etkisine açık olacak şekilde yerleştirilmesi amaçlanır. Ayrıca ısı transfer yüzey alanının büyütülmesi de ısının hızlı bir şekilde atılmasını sağlar. Bu amaçla diske hava kanalları eklenebilmektedir [4].

Bir disk freninin frenleme kapasitesi, balata ile disk arasındaki sürtünme kuvvetleri nedeniyle kinetik enerjinin ısıya dönüştürülme oranı ile belirlenir. Verimli bir fren tasarımı için, ısının olabildiğince çabuk dağıtılması önemlidir, aksi takdirde diskin sıcaklığı yükselebilir ve freninin performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle zorlu uygulamalarda optimum performans elde etmek için fren disklerinde soğutma, soğutma hızını artıran uygulamalarla desteklenmektedir. Sonuç olarak, frenleme çiftleri, özellikle yüksek hızlarda gerçekleştirilen acil/panik frenlemelerde, yüksek sıcaklıklara çıkabilmektedir. Bu koşullar altında, fren sisteminin işlevselliği ve güvenliği daha önemli hale gelmektedir [6].

Fren sistemleri performansının incelenmesinde önemli bir aşama olan termal analizde sıcaklık yapının termo-mekanik davranışını belirler [7]. Disk ve balatalardaki sıcaklık artışı frenleme performansını önemli derecede etkilemektedir. Frenleme esnasında artan sıcaklıklar, fren sıvısının buharlaşmasına, erken aşınmalara, termik çatlaklara ve termik olarak uyarılmış titreşimlere (termo-elastik kararsızlıklara) neden olabilmektedir [8]. Fren sıvısının buharlaşmasını önlemek için özellikle fren balatalarına olan ısı iletiminin en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden sürtünme ısısının yaklaşık %90'ının fren diskine aktarılması hedeflenmektedir [9].

Isı transferi; iletim, taşınım (konveksiyon) ve ışınım (radyasyon) olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleşir. Şekil 1.2'de görülen tüm ısı transfer modları bir sıcaklık farkının varlığını gerektirir ve tüm modlar yüksek sıcaklık ortamından düşük sıcaklık ortamına doğrudur. İletim, katı veya sıvı olabilen sabit bir ortamda bir sıcaklık gradyenti mevcut olduğunda, ortam boyunca meydana gelecek ısı transferidir [10]. Taşınım, bir yüzey ile hareketli veya sabit bir sıvı arasında farklı sıcaklıklarda olduklarında meydana gelen ısı transferini ifade eder. Sıvı hareketi ne kadar hızlı olursa, taşınım ile ısı transferi de o kadar büyük olur. Taşınım ile ısı transferi, akışın doğasına göre sınıflandırılabilir. Akış, fan, pompa veya atmosferik rüzgarlar gibi harici yöntemlerle oluşturulursa zorlanmış taşınımdır. Aksine, doğal (serbest) taşınım ise, akışındaki sıcaklık değişimlerinin sebep olduğu yoğunluk farklarından kaynaklanan kaldırma kuvvetleri tarafından oluşturulur [11]. Işınım (Radyasyon), atom veya moleküllerin elektronik konfigürasyonlarındaki değişikliklerin bir sonucu olarak, elektromanyetik dalgalar veya fotonlar şeklinde yayılan enerjidir [12].



Şekil 1.2. İletim, Taşınım ve Işınım [10]

Bu çalışmada, SAE J2522 Kapsamlı Fren Etkinlik Test standardına göre tekrarlı frenleme (Fade I - sıcaklıkla fren zayıflaması) koşulunda gerçekleştirilen testlerden elde edilen verilerden faydalanılarak [1], frenleme esnasındaki ısı taşınım katsayısı değişimine sayısal bir yaklaşım getirilmiştir. Bu yaklaşımla elde edilen ısı taşınım katsayısı verileri ve deneysel çalışmadan alınan veriler disk-balata ikilisinin sabit durum termal analizinde kullanılmıştır. Ardından termal yüklemelere bağlı geçişli yapısal analiz gerçekleştirilerek yani multi-fizik bir çalışma yapılarak diskte meydana gelen deformasyonlar ve gerilme değerleri incelenmiştir. Çalışmanın bu bölümünden sonra, literatür taramasına yer verilmiştir.

İkinci bölümde çalışmanın materyal ve metot kısmı ele alınarak öncelikle problemin tanımı yapılmış ve çalışma esnasında yapılacak varsayımlara yer verilmiştir. Çalışmada kullanılan disk-balata çiftinin özellikleri ve frenleme koşulları tablo halinde sunulmuştur. Ardından frenleme çiftindeki ısı taşınım katsayısının belirlenmesi, frenleme çiftindeki ısı transferine sonlu elemanlar metodunun uygulanması, frenleme çiftindeki geçişli yapısal analize non-linear yaklaşım, frenleme analizinin ANSYS® programında gerçekleştirilme konuları ele alınmıştır. Son olarak sabit durum termal analiz ve multi-fizik bir çalışma ile yapılan geçişli yapısal analizler için sınır koşulları belirlenmiştir.

Üçüncü bölümde çalışmanın bulgular ve tartışma kısmı ele alınarak öncelikle sabit durum termal analizde elde edilen bulgular görsellerle desteklenerek ifade edilmiş ardından elde edilen verilerle sıcaklık farkı yüzde değişim grafikleri yorumlanmıştır. Son olarak multi fizik çalışma ile elde edilen geçişli yapısal analiz bulguları ve görsellerine yer verilmiştir. Bu

bölüm boyunca elde edilen bulguların literatür taramasında bahsi geçen çalışmalarla benzerlik ve farklılıkları belirtilmiştir.

Son bölümde ise genel olarak çalışmadan elde edilen sonuçlar maddeler halinde sunulmuş ve çalışmanın devamı niteliğinde yapılabilecek araştırmalara yönelik önerilere yer verilmiştir.

1.2.Literatür Bilgisi

Voller ve ark. (2003) tarafından yapılan bir çalışmada, fren tertibatı ve ara yüzeyleri arasındaki ısının iletim, taşınım ve ışınım yoluyla transferini analiz etmek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Disk frenin soğutma özelliklerini araştırmak için sonlu elemanlar ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği metotları kullanılmıştır. Ortalama temas basıncı ile iletim katsayısı, diskin sıcaklığı ile değişen ışınım katsayısı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Belirli dönme hızlarındaki (150 ve 450 s⁻¹) sıcaklık ile zaman ve dönme hızı ile ortalama taşınım katsayısı arasındaki ilişkiyi belirlemek için grafikler oluşturulmuştur [13].

Choi ve Lee (2004) tarafından yapılan bir çalışmada, sürtünmeli ısı üretimi ile disk frenlerin termo-elastik temas problemi için tekrarlı frenleme koşulunda sonlu elemanlar metodu kullanılarak disk frenlerin geçişli termo-elastik analizi yapılmıştır. Disk frenlerde termo-elastik davranışın analizinde, birleştirilmiş ısı iletimi ve elastik denklemlerden yararlanılarak temas problemi ile çözüm gerçekleştirilmiştir. Temas halindeki parçalar arasında oluşan sürtünme yüzeyi üzerindeki basınç ve sıcaklık dağılımları çözümden elde edilen değerler ile sunulmuştur [14].

Gao ve ark. (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, üç boyutlu bir termo-mekanik model geliştirilmiş ve fren diskine geçici gerilme analizi uygulanarak termal yorgunluğun kaynağı tanımlanmıştır. Acil bir frenleme altında frenin geçici gerilim/sıcaklık alanlarını analiz etmek için, bu üç boyutlu model altındaki termo-elastik problem sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmüştür [15].

Talati ve Jalalifar (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, disk balata ikilisinin frenleme hareketi sırasında meydana gelen iletim ile ısı transferi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada makroskobik ve mikroskobik olmak üzere iki ana model

kullanılmıştır. Makroskobik modelde Termodinamiğin birinci yasasından, mikroskopik modelde ise iki tür termal temastan (mükemmel ve kusurlu) faydalanılmıştır. Bu modelde ısı akısı sınır koşulunun belirlenebilmesi için üniform aşınma ve üniform basınç olmak üzere iki çeşit basınç dağılımı göz önünde bulundurulmuştur. Sonuç kısmında zamana bağlı maksimum disk ve balata sıcaklığı, üniform aşınma ve basınç koşulları altında aksiyal ve radyal yönlerde farklı uzaklıklardaki sıcaklıklar, frenleme boyunca ve frenleme sonrası zamana bağlı sıcaklık değişimleri incelenmiştir [16].

Demir (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, binek bir otomobilin 4 adet ön fren diskine yüzey kaplama yöntemleri ile metalik (Metco 19E ve 18C), sermet ve seramik kaplama uygulanmıştır. İki disk, alevle püskürtme ve ergitme yöntemi kullanılarak metalik tozlarla (Metco 19E ve Metco 18C) kaplanırken diğer iki diskte de plazma sprej yöntemiyle $Al_2O_3-TiO_2$, HVOF (Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtıyla Püskürtme) yöntemiyle Cr_3C_2-NiCr kaplanmıştır. Tüm diskler SAE'nin J2522 fren etkinlik testine tabi tutularak; frenleme sayısı, frenleme başlangıç hızı, bırakma hızı, frenleme süresi, uygulama basıncı, frenleme torku, frenleme ivmesi, sürtünme katsayısı, diskin sıcaklığı, koniklik, frenleme tork değişimi ve disk kalınlık değişimi (DTV) gibi parametreler ölçülmüştür. Bu çalışma da kaplamalı disklerin hem korozyon direnci hem de sürtünme katsayısı (seramik disk hariç) açısından orijinal disk ile karşılaştırıldığında daha iyi performans sağladığı tespit edilmiştir [1].

Koç (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, 4 farklı kalınlıkta, 12 farklı balata malzemesi ile sürekli olarak frenlenme yapılmış ve meydana gelen sıcaklık dağılımları ile gerilme durumları ABAQUS® programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Balatanın dış kısımlarına doğru daha büyük sıcaklık değerleri elde edilmiş ve bu durum balataya etki eden ısı gücünün balata merkezinden uzaklığa bağlı olarak değişmesiyle belirtilmiştir. En büyük sıcaklık değerleri balatanın diske temas ettiği yüzeylerde oluşmuştur. Malzemenin ısıl iletkenlik katsayısı ile özgül ısı ve yoğunluğu arasında ters orantı olduğu bulunmuştur. En yüksek düzeyde gerilmeler, balatanın tutucu yüzeyindeki köşe kısımlarında ve balatanın orta kanal kısmında oluşmuştur. Aşınma miktarı arttıkça balata yüzeyinde oluşan sıcaklık değeri, sıcaklık farkı ve gerilme miktarı da artmıştır. Bu durum aşınma miktarının artmasıyla balatanın ömrünün daha az olacağını göstermiştir [17].

Shahzamanian ve ark. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FG) fren diskinin geçişli analizi sunulmuş ve ANSYS® APDL dili kullanılmıştır. FG fren diski metal-seramik malzemeden imal edilmiştir. Analizde, FG fren diski bir orijinal balata ile temas halindedir ve Coulomb temas sürtünmesi ısı kaynağı olarak kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlar farklı temas sertliği faktörü değerleri için basınç dağılımı, toplam gerilim, balata penetrasyonu, sürtünme gerilimi, ısı akısı ve temas sırasındaki sıcaklık değerleri için oluşturulmuştur. Sonuçlar temas basıncının ve temas toplam geriliminin artan F_{kn} değerleri ile arttığını ve bu nedenle metal-seramik derecelendirilmesinin FG fren disklerinin termomekanik tepkisinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [18].

Yevtushenko ve Kuciej (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, termal direnç ve taşınım ile soğumanın disk balata tribosisteminin termal performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve bu tribosistemdeki sıcaklığın hesaplanmasının matematiksel bir modeli önerilmiştir [19].

Zhang ve ark. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, test ile elde edilen disk balata çiftinin sürtünme-hız eğrisi dikkate alınarak asimetrik dış ve iç disk kalınlığına sahip hava kanallı disk frenin termo-mekanik dinamiklerinin makro-yapısal bir modelinin oluşturulması amaçlanmıştır. Modelin sonlu elemanlar analizi temelinde radyal, dairesel ve eksenel yönlerde normal gerilim, disk geçici sıcaklık alanı, disk yanal deformasyon ve disk kalınlığı değişimini kapsayan diskin termo-mekanik tepkilerinin tahminleri sunulmuştur. Disk yüzey sıcaklığı ve daha sonraki bozulmanın sayısal tahminleri elde edilen deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, sürtünme, termal ve mekanik davranışlar arasındaki karmaşık etkileşimleri göstermiştir [20].

Nejat ve ark. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, modifiye kanatlar kullanılarak hava kanallı disklerin ısı transferini arttırmak amaçlanmış ve yokuş aşağı sürüşte bir fren yavaşlaması ele alınmıştır. Kanadın sıcaklığını hesaplamak için basit bir model oluşturulmuştur. Fren diski havalandırması için ısı transfer katsayısı (HTC), doğrulanmış bir CFD hesaplaması yoluyla tahmin edilmiştir. Kanatlar için yeni bir tasarım olarak kanatlar arasındaki akış hızını ve verimliliğini artıran bir uçak kanadı profilinin kullanımı önerilmiştir.

Havalandırma kapasitesini daha da iyileştirmek için, birincil kanat profili tasarımına ikincil bir kanat profili eklenmiştir [21].

Adamowicz ve Grzes (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, sabit hızda tekrarlı frenleme işlemi sırasında diskin yüzeyindeki sıcaklık dağılımını belirlemek için üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile belirli bir zaman aralığında ki sıcaklık değişimi analiz edilmiştir. Disk balata çifti arasında oluşan sürtünmenin neden olduğu sıcaklık dağılımları taşınım ile ısı değişimi ön planda tutularak belirlenmiştir. Panik frenleme anında, otomobillerdeki standart çalışma koşulları için taşınım ile soğutmanın diskin sıcaklığını etkili bir şekilde azaltmadığı ve bu yüzden sürtünmeden dolayı ortaya çıkan aşırı ısınma problemini engelleyemediği tespit edilmiştir. Tekrarlı frenleme uygulamalarında sıcaklık eğrilerinin eğiminin yapılan frenleme sayısına bağlı olarak değişiklik gösterdiği grafiklerde gözlemlenmiştir [22].

Yevtushenko ve Grzes (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, ısı bölüştürme oranı için çeşitli deneysel ve teorik formüller benimseyen tek bir frenleme işlemi sırasında oluşturulan balata ve diskin aksel simetrik geçici sıcaklık alanları hesaplanmıştır [23]. Aynı araştırmacıların başka bir çalışmasında (2012a), disk-balata fren sisteminin sıcaklığı üzerindeki malzemelerin termik hassasiyetinin etkisine ilişkin doğrusal olmayan bir ısı iletim probleminin çözümü oluşturulmuştur [24]. Yine aynı araştırmacılar tarafından yapılan bir diğer çalışmada (2012b) ise dökme demir disk ile birleştirilen balatanın iki malzemesi (FC-16L ve FMC-11) için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı ve termo-mekanik aşınma oranındaki değişimlerin etkisi incelenmiştir [25].

Yevtushenko ve ark. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, zamana bağlı sürtünme gücüne ve temas yüzeyinden ısı transferine sahip üç elemanlı (disk/balata/kaliper) bir tribosistemdeki sıcaklığın hesaplanmasının matematiksel bir modeli önerilmiş ve frenleme esnasında meydana gelen geçici termal sürtünme probleminin çözümü elde edilmiştir. Bu tribosistem için tek boyutlu ısı iletimi probleminin formüllerinin oluşturulmasında temas yüzeyindeki termal direnç ve temas basıncının zamana olan bağımlılığı dikkate alınmıştır [26].

Adamowicz ve Grzes (2011a, 2011b, 2013) tarafından farklı zamanlarda yapılan çalışmalarda, sabit bir sürtünme katsayısında temas alanındaki belirli sürtünme gücüyle orantılı yoğunlukta hareket eden ısı akısı ile diskin aksel simetrik olmayan ısınması üzerine

bir dizi sonlu elemanlar modeli (FEM) çalışması gerçekleştirilmiştir [27-29]. Aynı araştırmacıların bir çalışmasında (2011a), lineer ısı iletimi çerçevesinde düzgün olmayan disk ısınmasının simülasyonu için üç boyutlu model geliştirilmiştir. Çevresel doğrultuda diskin temas yüzeyine eşit olarak dağıtılan ortalama ısı akısından doğan aksenal simetrik termal yükün üç boyutlu modelinin sıcaklık gelişmeleri ile iki boyutlu eşdeğeri arasında paralellikler oluşturulmuştur. Bu iki modelin hem temas yüzeyindeki sıcaklıklar hem de diskin spesifik aksenal pozisyonları karşılaştırılmıştır. Diskin aksenal simetrik ısınmasının bir etkisi olarak üretilen sıcaklığın, belirli bir kritik kayma hızının üzerindeki üç boyutlu modelin ortalama sıcaklığı ile karşılaştığı gösterilmiştir [27]. Bir diğer çalışma da (2011b), tekli ve çoklu frenleme esnasında otomotiv uygulaması için aşırı soğutma koşullarına karşılık gelen ısı taşınım katsayısının sıcaklık üzerine etkisi incelenmiştir. Isı taşınım katsayısı üzerine sıcaklığın tespit edilen bağımlılıkları doğrusal ilişkiyi ortaya çıkarmış ve bu eğrilerin eğiminin fren uygulamalarının sayısına bağlı olduğu tespit edilmiştir [28]. Yine bir başka çalışmaların da (2013) ise dökme demir disk (ChNMKh) ile birleştirilen bir balatanın iki malzemesi (FC-16L ve FMC-11) için hesaplamalar sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmıştır. Disk balata ikilisinin farklı malzeme kombinasyonları ile (balata FC-16L/disk ChNMKh, balata FMC-11/disk ChNMKh) sıcaklığa bağlı termo-fiziksel özelliklerinin deneysel bağımlılıkları, diskin üç boyutlu modeline uygulanan matematiksel formüllerle yaklaşık olarak değerlendirilmiştir [29].

Nathi ve ark. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, ANSYS® programında otomobiller için kullanılan disk frenin frenleme koşulları ve diskin sertlik ile mukavemet parametrelerinin sıcaklık ve gerilim dağılımları üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Disk modelinin sıcaklık dağılımını zamanın bir fonksiyonu olarak değerlendirmek için geçici termal analiz yapılarak yapısal analiz ile birleştirilmiş ve dört durum ele alınmıştır. Birleştirilmiş yapısal termal analizde kalınlık ve malzeme tipi sabit tutularak 10 mm flanş kalınlığına sahip bir dökme demir disk üzerinde 4 saniye frenleme ve 4, 5, 6 saniye frenleme olmak üzere iki farklı durum incelenmiştir. Buna ek olarak sabit frenleme süresinde (4 saniye) 10 mm flanş genişliğindeki farklı malzemelerde (dökme demir, çelik, alüminyum) disk ve farklı flanş kalınlıklarında (8 mm, 10 mm, 12 mm) dökme demir disk kullanılmak üzere iki farklı durum incelenmiştir [30].

Babukanth ve Teja (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, disk frenlerde meydana gelen termo-elastik davranış, ısı iletimi ve elastik denklemlerle çözülmüştür. Disk frenin termo-elastik davranışı tekrarlanan fren durumunda sayısal simülasyon ile elde edilmiştir. Hesaplama sonuçları, disk balata arasındaki sürtünme yüzeyi üzerinde ısı akısının ve sıcaklığın dağılımı için sunulmuştur. Ayrıca, bu çalışmada termo-elastik kararsızlık problemi araştırılmış ve disk fren sisteminin malzeme özelliklerinin termo-elastik davranışlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır [31].

Belhocine ve Bouchetara (2012a) tarafından yapılan bir çalışma da, hava kanallı disk-balata çifti termo-mekanik sınır koşulları uygulanarak ve multi-body tekniği kullanılarak üç boyutlu modellenmiştir. Diskte balataların basıncı ile meydana gelen deformasyonların gerilme alanlarını değerlendirmek için ANSYS® yazılımı ile geçici termal ve stres alanı çiftinin sayısal simülasyonu yapılmıştır. Böylece, balatalardaki temas basıncı dağılımları elde edilmiştir [32]. Aynı araştırmacıların diğer çalışmalarında (2012b, 2012c, 2013a, 2013b ve 2014), ANSYS® yazılımı ile araçların katı ve hava kanallı fren disklerinin termal davranışları analiz edilmiştir. Fren diskindeki sıcaklık dağılımı, frenleme esnasındaki tekrarlı frenleme modu, diskin geometrik tasarımı, kullanılan malzeme gibi ilgili tüm faktörler ve giriş parametreleri tanımlanarak modellenmiştir. Balatalardaki temas basınç dağılımları değerlendirilmiştir [33-37].

Alnaqi ve ark. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, disk frenin güvenilirliği ve termal davranışı, fren dinamometresi ekipmanı ve farklı sayısal yaklaşımlar kullanılarak incelenmiştir. Başlangıçta ABAQUS® ve MATLAB® yazılımı disk frenlerin termal performansını incelemek için kullanılmıştır. Daha sonra diskin sıcaklık dağılımını araştırmak için ABAQUS® programı ile bir aksisimetrik termal model geliştirilmiştir. Disk fren üzerindeki kaplama tabakasının etkisi, kaplama tabakasının modellenmesinin geliştirilmesini ve sonuçların doğruluğunun değerlendirilmesini içeren ABAQUS® analizleri kullanılarak incelenmiştir [38].

Yevtushenko ve ark. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, dökme demir disk ile balatanın iki farklı kompozisyonu (FC-16L ve FMC-11) için yapılan hesaplamalarda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak geçişli termal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler panik ve tekrarlı

frenleme koşullarında sıcaklığa bağlı ve sabit sürtünme katsayılarında üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Temas basıncının farklı değerlerinde disk balata ikilisinin sürtünme katsayısının sıcaklığa bağımlılığı deneysel veriler doğrultusunda oluşturulmuştur. Düşük sıcaklıklar için ($T \approx 100$ °C) yapılan hesaplamalarda, sürtünme katsayısının ortaya çıkan temas sıcaklık değerleri üzerinde doğrudan etkisi olduğu görülmüştür [39].

Baranowski ve ark. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, frenleme işleminin sayısal simülasyonları iki pistonlu ve modifiye edilmiş üç pistonlu tekerlek fren silindiri için gerçekleştirilerek, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tipik bir sonlu eleman ve ağsız sayısal yöntemler kullanılarak, fren işleminde meydana gelen termo-mekanik bağlantı olgusunun yanı sıra balataların yüzeyinde meydana gelen aşınma işlemlerine dikkat edilerek frenin dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Disk analizinde her türlü faktörü dikkate almanın önemli olduğu, ancak bu durumun hesaplama süresini arttıracakı belirtilmiştir [40].

Lakkam ve ark. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, ısı taşınım katsayılarını değerlendirmek için fren diskinin sıcaklık gradyenti incelenerek bir test oluşturulmuştur. Sabit koşullarda zorlanmış ısı taşınımı altında her iki fren diskindeki (ön ve arka) sıcaklık dağılımının değiştirilmesi ile katsayılar da değiştirilmiştir. Taşınım ile ısı transferini araştırmak için deneysel test oluşturmak üzere JASO C406 standardı benimsenmiştir. Havalandırılmalı ön ve arka fren disklerinin sıcaklık yayılımı ve ısı taşınım katsayısını incelemek için deneysel sonuçlar, sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal simülasyonda kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda, hava kanallı ön fren diskinin ısı taşınım katsayılarının, hava kanallı arka fren diskinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [41].

Saiz ve ark. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı fren disklerinin verimlilik ve kararlılıklarını değerlendirmek için termo-mekanik davranışlar incelenmiştir. Özellikle, tam dolu bir disk ve farklı şekillere sahip üç hava kanallı diskin termo-mekanik analizleri yapılmıştır. Sıcaklık dağılımı ve gerilmeler açısından disklerin performanslarını değerlendirmek için çok zorlu çalışma koşulları uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, analiz edilen hava kanallı disklerin, tam diskten farklı olarak, zorlu çalışma koşullarında bile etkili bir şekilde kullanılabileceğini ve yüksek güvenlik seviyelerinin sağlanabileceğini

göstermiştir. İncelenen diskler arasında eğri kanatlı diskler en iyi çözüm olarak tespit edilmiştir [42].

Kulkarni ve ark. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, fren diskinin şiddetli fren koşulları altındaki performansı incelenmiştir. Genellikle, disk fren üretmek için dökme demir kullanılırken; bu çalışmada dökme demir yerine Alüminyum Metal Matris Kompozit (AMMC) kullanılmıştır. AMMC'nin genel mekanik ve termal özelliklerini güçlendirmek için silisyum karbür takviye olarak eklenmiştir. Termal ve yapısal yük altında disk frenin geçerliliğini kontrol etmek ve disk boyunca sıcaklık dağılımını ve ısı akısını incelemek için birleştirilmiş termal ve yapısal analiz gerçekleştirilmiştir [43].

Belhocine (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek karbon içeriğine sahip gri dökme demir FG 15'ten yapılmış hava kanallı disk ve iki balatanın sonlu elemanlar metoduyla mekanik ve termo-mekanik analizler yapılmıştır. Başlangıçta termal etkilerin yokluğunda disk balata çiftinin yapısal performansı, deformasyon ve Von Mises stresi açısından analizleri yapılmıştır. Daha sonra, taşınım, adyabatik ve ısı akısı gibi termal etkilerin dahil edilmesiyle aynı disk balata çiftinin termo-mekanik analizi gerçekleştirilmiştir. İki analiz arasındaki yapısal performans (mekanik ve termo-mekanik) karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir [44].

Jian ve Shui (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, araçların hava kanallı disk freni için termo-yapısal model oluşturularak sert fren koşullarında otomobil freninin geçici sıcaklık alanı analiz edilmiştir. Sert frenleme testi profesyonel araç test tezgahı platformunda gerçekleştirilmiş ve radyal ile çevresel yönlerde fren diskinin sıcaklık eğrileri elde edilmiştir. Sert frenleme sırasında, fren diskinin sıcaklık değişim eğrileri önce artmış ve sonra biraz azalmıştır. Radyal yönde, orta konumun sıcaklığının her iki tarafın sıcaklığından daha yüksek olduğu görülmüştür. Çevresel yönde, sıcaklık her zaman farklı zamanlarda maksimuma ulaşmış, ancak her bir düğümün maksimum sıcaklığı eşit olma eğilimi göstermiştir. Eksenel Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde geçişli yapısal analiz çalışmalarında genellikle kısa süreli frenleme değerleri ve sabit basınç koşullarında gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada ilgili literatüre özgün katkı yapılması amaçlanmıştır.

2.MATERYAL VE METOT

SAE J2522 Kapsamlı Fren Etkinlik Test standardına göre sıcaklıkla fren zayıflaması koşulunda gerçekleştirilen testlerden elde edilen verilerden yararlanılarak yapılan bu çalışmada frenleme esnasındaki ısı taşınım katsayısı değişimine sayısal bir yaklaşım getirilmiştir. Bu yaklaşımla elde edilen ısı taşınım katsayısı verileri ve deneysel çalışmadan alınan veriler disk-balata ikilisinin sabit durum termal analizinde kullanılmıştır. Ardından termal yüklemelere bağlı geçişli yapısal analiz gerçekleştirilerek diskte meydana gelen deformasyon ve gerilme değerleri incelenmiştir. Buna yönelik olarak bu kısımda problemin tanımı ve analize yönelik kabuller, frenleme çiftindeki ısı taşınım katsayısının belirlenmesi, frenleme çiftindeki ısı transferine sonlu elemanlar metodunun uygulanması, geçişli yapısal analize non-lineer yaklaşım, analizin ANSYS® programında gerçekleştirilme süreci, sabit durum termal analiz sınır koşulları ve geçişli yapısal analiz sınır koşulları konularına yer verilmiştir.

2.1 Problemin Tanımı ve Analize Yönelik Yapılan Kabuller

Termo-mekanik yapının sınır koşulları, yer değiştirme ve termal sınır koşullarını içerir. Balatalarda meydana gelen sürtünme, yer değiştirme sınırı esas alınmak üzere kuvvet yüzeyleri ve diskin sürtünme yüzeyi arasında sınırlıdır. Balatalardaki hidrolik kuvvet sadece aksel yönde etki etmektedir. Fren diski ise sürtünme yüzeyi, temas yüzeyi ve diskin dönüşü ile sınırlandırılır. Diskin aksel ve radyal yönlerde hareketine izin verilmez [45].

Termal sınır koşulu ise iletim, taşınım ve ışıınımı içermektedir. Panik frenleme işleminde ışıınımla ısı transferi çok önemli değildir ve ışıınımın kesin hesaplanması güçtür, bu nedenle ısı ışıınımının etkisi ihmal edilebilir. Aynı zamanda disk balata ikilisinin sürtünme ara yüzeyindeki ısı dağılımı da termal sınır koşulu içerisinde değerlendirilmektedir ve oldukça karmaşıktır.

Yapılan araştırmalar, karayolu taşıtlarının frenlemesi esnasında birkaç tribolojik ve termomekanik sorunun eş zamanlı etkileşimi nedeniyle gerçekte dönen fren diskinin modellenmesinin zorluğuna dikkat çekmiştir. Frenleme boyunca, disk freninin geçici sıcaklık alanı ve termal gerilim dağılımı birçok çevresel faktörden etkilenmektedir. Gerçek sonuçlara

mümkün olduğunca yakın simülasyon sonuçlarının elde edilebilmesi ve sayısal hesaplamaların daha uygun olabilmesi için aşağıda verilen varsayımlar uygulanarak daha hızlı bir çözüm elde edilmiştir.

1. Malzeme özellikleri izotropik ve sıcaklıktan bağımsız kabul edilmiştir.
2. Simülasyonda, fren diskinin iç ve dış yüzeylerinde, ışınlı ısı transferi göz ardı edilerek iletim ve taşınım olmak üzere iki ısı transfer modu dikkate alınmıştır.
3. Sürtünme yüzeyine uygulanan basıncın uniform dağıldığı varsayılmıştır.
4. Frenleme esnasında meydana gelen hidrolik kuvvet, önde %60 ve arkada %40 olacak şekilde kabul edilmiştir.
5. Diskin dönüş hızı ile meydana gelen kinetik enerji miktarı frenleme boyunca tamamen fren diskinin yüzeylerine dağılmış bir ısı ile temsil edilen ısı enerjisine dönüştürülmüştür.
6. Sürtünme katsayısı uygulanan basınca, hıza, sıcaklığa, balata ile diskin yüzey koşullarına ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Ancak sonlu elemanlar analiz yöntemi ile yapılan bu simülasyon da ortalama bir davranışı temsil etmek için sabit olarak alınmıştır.
7. Fren diski ve balata malzemesi gri dökme demirdir. Araç 100 km/h hızda fren yapmaya başlamıştır. Ortamın hava sıcaklığı ise 295,15 K'dir.
8. Bu çalışmada SAE J2522 Kapsamlı Fren Etkinlik Test standardı sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedüründeki deneysel veriler kullanılmıştır [1].
9. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan bu çalışma da sabit ivme prosesi uygulanmıştır.

Bu çalışmada binek bir otomobilin OEM (orijinal) ön fren diski kullanılmıştır. Frenleme çiftinin tasarımında kullanılan bazı geometrik boyutlar ve uygulama parametreleri Tablo 2.1'de ve SAE J2522 Kapsamlı Fren Etkinlik Test standardı sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedürüne ait frenleme koşulları Tablo 2.2'de ve deneysel veriler ise Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Geometrik Boyutlar ve Uygulama Parametreleri

	Değerler
Disk kütlesi (g)	5000
Disk kalınlığı (mm)	22,05
Balata kalınlığı (mm)	12
Disk çapı (mm)	255
Tekerlek çapı (mm)	298
Disk yoğunluğu (kg/m ³)	7228
Disk in özgül ısısı (J/kgK)	419
Disk in ısı iletim katsayısı (W/mK)	48
Disk in ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)	1,54
Balata yüzey alanı (mm ²)	4213

Tablo 2.2. Sıcaklıkla Fren Zayıflaması (Fade 1) Frenleme Koşulları

	Değerler
Frenleme ve bırakma hızı (km/h)	100-<5
Başlangıç fren sıcaklığı (°C)	100-500
Fren uygulaması kontrolü	0,4g
Basınç (MPa)	Değişken
Yavaşlama sayısı	15

2.2 Frenleme Çiftindeki Isı Taşınım Katsayısının Belirlenmesi

Fren diski silindirik bir yüzeye sahip olup atmosferik koşullarda hava akışkanı bu yüzeyin üzerinden akarak dış akışı meydana getirmektedir. Frenleme boyunca, fren diskinin tüm yüzeylerinde dış etkenlerden dolayı zorlanmış taşınım meydana gelmektedir [46]. Disk frenler için bu tanımlamalar göz önünde bulundurulduğunda ısı transfer yollarından biri olan taşınımın incelenmesi önem arz etmektedir.

Farklı akış koşulları, akışkanlar ve yüzey geometrileri gibi değişkenler ısı taşınım katsayısının belirlenmesinde önemli faktörlerdir. Boyutsuz parametrelerden faydalanılarak evrensel fonksiyonlar tanımlanabilir ve ısı taşınım katsayısı tahmin edilebilir. Bu boyutsuz parametreler sırasıyla tanımlanıp değişkenler göz önünde bulundurularak formüller yazılabilir [11].

Bir akışkanın, atalet kuvvetlerinin viskozite kuvvetlerine oranı olan Reynolds sayısı akışkanın laminer (düzgün akış) veya türbülanslı oluşunu belirler. Reynolds sayısı, $Re < 2300$ ise laminer, $Re > 4000$ ise türbülanslı akıştır. Denklem (2.1)'de belirtilen ρ akışkanın yoğunluğu, u_∞ akışkanın hızı, D karakteristik uzunluk (silindirin çapı), μ akışkanın dinamik viskozitesi ve ν akışkanın kinematik viskozitesidir.

$$Re_D = \frac{\rho \cdot u_\infty \cdot D}{\mu} = \frac{u_\infty \cdot D}{\nu} \quad (2.1)$$

Momentum yayılımının termal yayıma oranı olan Prandtl sayısı akışın bir özelliğidir. Denklem (2.2)'de belirtilen α ısı yayınma katsayısı, c_p özgül ısıdır.

$$Pr_D = \frac{c_p \cdot \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.2)$$

Yüzeydeki boyutsuz sıcaklık gradyanını temsil eden Nusselt Sayısı, taşınım ile gerçekleşen ısı transferinin iletimle gerçekleşen ısı transferine oranıdır. Denklem (2.3)'de belirtilen "D" ilgili yüzeyin karakteristik uzunluğu, "h" ısı taşınım katsayısı ve "k" ısı iletim katsayısıdır. Nusselt sayısı ısı taşınım katsayısının tahmininde kullanılır.

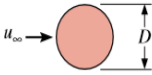
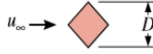
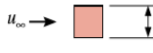
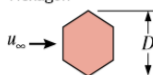
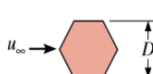
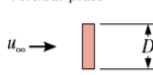
$$Nu_D = \frac{h \cdot D}{k} \quad (2.3)$$

Nusselt sayısı, aynı zamanda Reynolds sayısı ve Prandtl sayısının bir fonksiyonu olarak Hilpert korelasyonu ile tanımlanabilir. Denklem (2.4)'de belirtilen C ve m sabitleri Reynolds sayısı aralığına ve yüzey geometrisine bağlı olarak Tablo 2.3'den seçilir. Prandtl sayısı atmosfer basıncında gazların (fren diski için hava) sıcaklığa bağlı olarak verilen özellikleri

arasında yer almaktadır. Örneğin disk için havanın 300 K sıcaklığında Prandtl sayısı 0,707'dir.

$$Nu_D = \frac{h \cdot D}{k} = C \cdot Re_D^m \cdot Pr^{1/3} \quad [Pr \geq 0,7] \quad (2.4)$$

Tablo 2.3. Reynolds Sayısı Aralığına ve Yüzey Geometrisine Bağlı Olarak C ve m Sabitleri [11]

Geometry	Re_D	C	m	Geometry	Re_D	C	m
Circular 	0.4–4	0.989	0.330	Square 	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.246	0.588
	4–40	0.911	0.385		$5 \times 10^3 - 10^5$	0.102	0.675
	40–4000	0.683	0.466	Hexagon 	$5 \times 10^3 - 1.95 \times 10^4$ $1.95 \times 10^4 - 10^5$	0.160 0.0385	0.638 0.782
4000–40,000	0.193	0.618		$5 \times 10^3 - 10^5$	0.153	0.638	
40,000–400,000	0.027	0.805	Vertical plate 	$4 \times 10^3 - 1.5 \times 10^4$	0.228	0.731	

Havanın sıcaklık, yoğunluk, viskozite ve termal iletkenlik gibi bütün özellikleri ısı taşınım katsayısının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Havanın tüm bu özelliklerinin belirlenebildiği göz önünde bulundurularak fren diski için ısı taşınım katsayısının sabit bir değer alacağı düşünülebilir. Ancak hava fren diskinin kendi eksenine etrafındaki dönüşünden dolayı sahip olduğu açısal hız değeri ile etkileşim içerisinde. Bu durum frenleme boyunca değişen açısal hız değerlerine karşılık ısı taşınım katsayısı değerlerinin belirlenmesini mümkün kılar. Öncelikli olarak belirlediğimiz ortam koşulundaki havanın sıcaklığına (22 °C) karşılık gelen değerlerin interpolasyon yöntemi ile tespit edilmesi gerekmektedir. Tablo 2.4’de 295,15 K sıcaklığa karşılık gelen değerler görülmektedir.

Tablo 2.4. Havanın Belirli Sıcaklıklarına Karşılık Gelen Değerleri

Sıcaklık (K)	ρ_{air} (kg/m ³)	μ_{air} (kg/m.s)	k_{air} (W/m.K)
250	1,4128	$1,599 \cdot 10^{-5}$	0,02227
295,15	1,2002	$1,82 \cdot 10^{-5}$	0,02585
300	1,1774	$1,8462 \cdot 10^{-5}$	0,02624

Tablo 2.4'deki 295,15 K için verilen değerler ile birlikte diskin dış çapı ($d_o=256$ mm) ve lastik çapı ($R= 596$ mm) denklem (2.5)'te yerine konulmak suretiyle açılmal hıza bağlı Re sayısı elde edilir.

$$Re = \frac{wR\rho_a d_o}{\mu_a} \quad (2.5)$$

Hava akış karakteristiğine bağlı olarak değişen ısı taşınım katsayısı formülü denklem (2.6)'da verilmiştir ($Re \leq 2,4 \cdot 10^5$ ise laminar akış, $Re > 2,4 \cdot 10^5$ ise türbülanslı akış) [47].

$$h = \begin{cases} 0,7 \left(\frac{k_a}{D} \right) \cdot Re^{0,55}, & Re \leq 2,4 \cdot 10^5 \\ 0,4 \left(\frac{k_a}{D} \right) \cdot Re^{0,8}, & Re > 2,4 \cdot 10^5 \end{cases} \quad (2.6)$$

Re sayısı denklem (2.6)'da yerine konularak ve gerekli işlemler yapılarak denklem (2.7) elde edilir. Açılmal hızın "23,85" değerinden küçük ve eşit olduğu değerlerde denklem (2.7)'nin üst kısmı büyük olduğu değerlerde ise alt kısmı kullanılır. Böylece frenleme boyunca değişen açılmal hız değerlerine karşılık farklı ısı taşınım katsayısı değerleri elde edilmiştir.

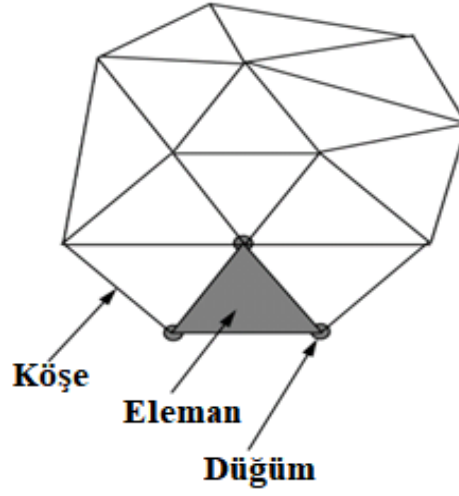
$$h = \begin{cases} 11,24 \cdot w^{0,55}, & w \leq 23,85 \\ 6,43 \cdot w^{0,8}, & w > 23,85 \end{cases} \quad (2.7)$$

2.3 Frenleme Çiftindeki Isı Transferine Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulanması

Sonlu elemanlar yöntemi, ileri mühendislik problemlerine yaklaşık çözümler getirmek için kullanılan sayısal bir araçtır. Yöntem başlangıçta uçak gövdesi yapılarındaki karmaşık gerilmeleri incelemek için geliştirilmiş ve daha sonra sürekli ortamlar mekaniği genel alanına

genişletilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi, bir analiz aracı olarak çeşitliliği ve esnekliği nedeniyle mühendislik eğitiminde ve endüstride büyük bir ilgi görmektedir. Tam kapalı formulu çözümlerin elde edilmesi zor olan karmaşık endüstriyel problemler için yaklaşık sayısal çözümler elde etmek gereklidir. Düzgün olmayan atmosfer koşullarında kirleticilerin dağılımı, elektrik motorlarında soğutma problemleri, çeşitli faz değiştirme problemleri bu tür kompleks problemlere birkaç örnektir. Her ne kadar genel denklemleri ve sınır koşullarını ilk prensiplerden çıkarmak mümkün olsa da bu tür problemlere herhangi bir analitik çözüm elde etmek zordur. Komplekslik hem geometrinin hem de problemin bazı diğer özelliklerinin düzensiz veya keyfi olmasından kaynaklanmaktadır. Analitik çözümler nadiren mevcuttur; ancak bunlar mühendislerin ve bilim insanlarının günlük olarak çözdüğü türden problemlerdir. Yıllar içinde gelişen çeşitli sayısal yöntemler arasında en yaygın kullanılan teknikler; sonlu farklar, sonlu hacim ve sonlu elemanlar yöntemleridir. Sonlu farklar, genel denklemlere noktasal bir yaklaşım gerektiren köklü ve kavramsal olarak basit bir yöntemdir. Her ne kadar birçok ısı transfer problemi sonlu farklar yöntemleri kullanılarak zlebilse de düzensiz geometriler veya olağandışı bir sınır koşulu ile karşılaşıldığında bu yöntemin kullanımı güçleşmektedir. Sonlu hacim yöntemi, sonlu farklar yönteminin bir başka tercih edilen versiyonudur ve hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde popüler hale gelmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde ise çözüm bölgesi birçok küçük, birbirine bağlı, alt bölge veya eleman içerir ve genel denklemlere parça bazında bir yaklaşım sunar, yani kompleks kısmi diferansiyel denklemler doğrusal veya doğrusal olmayan eş zamanlı denklemlere indirgenir [48].

Bir ısı transfer probleminin sayısal modeline, öncelikle fiziksel modelin oluşturulmasıyla başlanır. Denklemler oluşturulmadan önce geometrinin kaç boyutta (bir boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu) ele alınacağı ve koordinat sistemine (kartezyen veya silindirik gibi) karar verilir. zm bölgesi Şekil 2.1’de görüldüğü gibi elemanlara veya alt bölgelere bölünürken Şekil fonksiyonu (lineer element, üçgen, dörtgen, üç boyutlu elementler; tetrahedron, hegzahedron ve prizma gibi) belirlenir. Her eleman, belirli sayıda düğümün bağlanmasıyla oluşturulur. Bir eleman oluşturmak için kullanılan düğüm sayısı Şekil fonksiyonuna bağlıdır.



Şekil 2.1. Sonlu Eleman Ağı [48]

Bir sonraki adım, alan değişkeninin bir eleman üzerindeki varyasyonunu temsil eden fonksiyonunun türünü seçmektir. Düğüm sayısı bir eleman oluşturur; her bir düğümdeki bilinmeyenlerin niteliği ve sayısı, eleman içindeki bir alan değişkeninin varyasyonuna karar verilir. Daha sonra, seçilen elementi temsil eden matris denklemleri belirlenir. Tüm sistemin özelliklerini bulmak için, tüm bireysel eleman denklemleri bir araya getirilir, yani her bir elemanın matris denklemleri uygun bir şekilde birleştirilerek ortaya çıkan matris, sorunun tüm çözüm bölgesindeki davranışını temsil edecek şekilde birleştirilir. Sınır koşulları, bireysel elementleri temsil eden matrislerin bir araya getirilmesinden sonra denkleme dahil edilir. Elde edilen matris denklemleri çözülerek bilinmeyen değerler elde edilir.

Eksenel simetrik (aksisimetri) yapıya sahip olan diskteki ısı iletim probleminin sonlu elemanlar metodu ile çözümünde r - z silindirik koordinat düzlemi kullanılır ve simetri nedeniyle θ açısından bağımsızdır. Diskin iki boyutlu ısı transfer probleminde Galerkin formülasyonundan faydalanılarak denklemler aksisimetri için uygun hale getirilir. Kararlı durum için silindirik koordinat sistemindeki (r, z) diferansiyel denklem (2.8)'de verilmiştir [48].

$$k_r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{k_r}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{k_\theta}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + G = 0 \quad (2.8)$$

Eksenel simetrik yapıya göre denklem (2.8) düzenlenirse (θ açısından bağımsız);

$$k_r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{k_r}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + G = 0 \quad (2.9)$$

Eğer termal yönde iletkenlik varsa, k_r sabittir ve denklem (2.9) buna göre düzenlenirse;

$$\frac{1}{r} \cdot \left[k_r \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + G = 0 \quad (2.10)$$

Sınır koşulları;

$$\begin{aligned} T = T_b & \quad T_1 \\ k_r \frac{\partial T}{\partial r} l + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n + h(T - T_a) + q = 0 & \quad T_2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Sıcaklık dağılımı;

$$T = N_i T_i + N_j T_j + N_k T_k \quad (2.12)$$

Şekil fonksiyonları;

$$N_i = \frac{1}{2A} (a_i + b_i r + c_i z) \quad (2.13)$$

$$N_j = \frac{1}{2A} (a_j + b_j r + c_j z) \quad (2.14)$$

$$N_k = \frac{1}{2A} (a_k + b_k r + c_k z) \quad (2.15)$$

Alan;

$$2A = \det \begin{vmatrix} 1 & r_i & z_i \\ 1 & r_j & z_j \\ 1 & r_k & z_k \end{vmatrix} \quad (2.16)$$

Denklem (2.13), (2.14) ve (2.15)'deki sabitler;

$$a_i = r_j z_k - r_k z_j; \quad b_i = z_j - z_k; \quad c_i = r_k - r_j \quad (2.17)$$

$$a_j = r_k z_i - r_i z_k; \quad b_j = z_k - z_i; \quad c_j = r_i - r_k \quad (2.18)$$

$$a_k = r_i z_j - r_j z_i; \quad b_k = z_i - z_j; \quad c_k = r_j - r_i \quad (2.19)$$

Eksenel simetrik denklemler için Galerkin metodunun integral formu denklem (2.20)'de verilmiştir.

$$\int_{\Omega} N_i \left[\frac{k_r}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + G \right] d\Omega = 0 \quad (2.20)$$

Kararlı durum (steady state) için ısı iletim probleminin matris formu denklem (2.21)'de verilmiştir.

$$[K][T] = \{f\} \quad (2.21)$$

$$[K] = \int_{\Omega} [B]^T [D] [B] d\Omega + \int h [N]^T [N] dT \quad (2.22)$$

$$[B] = \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} & \frac{\partial N_j}{\partial r} & \frac{\partial N_k}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_j}{\partial z} & \frac{\partial N_k}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} k_r & 0 \\ 0 & k_z \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Hacim (Ω);

$$dV = 2\pi r dA \quad (2.25)$$

Burada ki yarıçap şekil ve yarıçap fonksiyonları biçiminde yazılırsa;

$$r = N_i r_i + N_j r_j + N_k r_k \quad (2.26)$$

Termal yer değiştirme matrisi (Thermal stiffness matrix);

$$[K] = \frac{2\pi \bar{r} k_r}{4A} \cdot \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_i b_j & b_j^2 & b_j b_k \\ b_i b_k & b_j b_k & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{2\pi \bar{r} k_z}{4A} \cdot \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_i c_j & c_j^2 & c_j c_k \\ c_i c_k & c_j c_k & c_k^2 \end{bmatrix} \\ + \frac{2\pi h l_{ij}}{12} \begin{bmatrix} 3r_i + r_j & r_i + r_j & 0 \\ r_i + r_j & r_i + 3r_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Burada ki \bar{r} ;

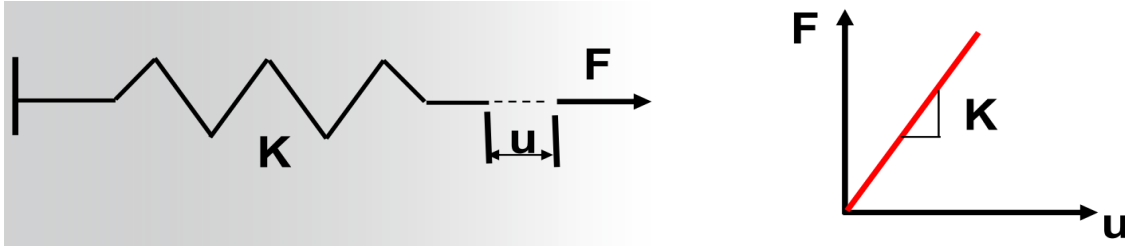
$$\bar{r} = \frac{r_i + r_j + r_k}{3} \quad (2.28)$$

Benzer bir şekilde kuvvet vektörü (load vector);

$$\begin{aligned} \{f\} &= \int_{\Omega} G[N]^T d\Omega - \int_T q [N]^T dT + \int_T h T_a [N]^T dT \\ &= \frac{2\pi GA}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_i \\ r_j \\ r_k \end{bmatrix} - \frac{2\pi q l_{jk}}{6} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 2r_j + r_k \\ r_j + 2r_k \end{bmatrix} + \frac{2\pi h T_a l_{ij}}{6} \begin{bmatrix} 2r_i + r_j \\ r_i + 2r_j \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.29)$$

2.4 Frenleme Çiftindeki Geçişli Yapısal Analize Non-Linear Yaklaşım

Linear bir analizde sisteme bir kuvvet uygulandığında deplasman oluşmaya başlamaktadır. Bu deplasman Şekil 2.2'de görüldüğü gibi sistemin rijitlik matrisi ile doğru orantılıdır. Sisteme uygulanan kuvvet ile deplasman linear olarak değişmiyorsa ya da başka bir ifadeyle yapıya ait kuvvet deplasman grafiğinde eğimi değişen bir eğri profili oluşturuyorsa burada non-linear bir analiz söz konusudur. Non-linear analizlerde kuvvet karşısında meydana gelen deplasman linear olarak değişmediği için artık cismin K değeri sabit olmayacak ve herhangi bir zamandaki K değeri ifade edilecektir.



Şekil 2.2. Linear Durumda Kuvvet-Deplasman Değişimi

Disk balata çiftinin analizinde oluşturulan ağ modelinde her bir ağ elemanının eleman matrisleri bulunmaktadır ve bu matrisler elemana ait malzeme ve geometri bilgilerini içermektedir. Bunların birleşimi büyük K matrisini oluşturmaktadır ve bu elemanlar non-linear bölgeye geçtiğinde K matrisi de non-linear bölgeye geçmektedir.

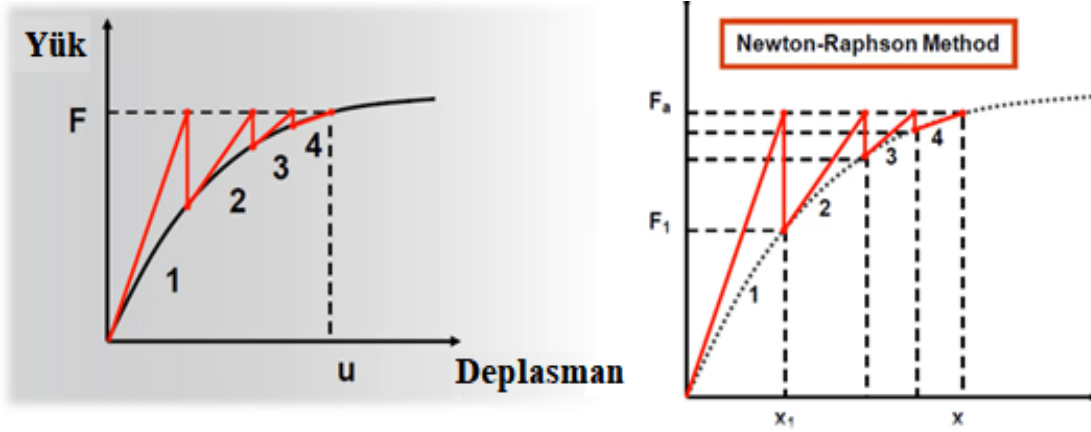
Normalde linear davranış gösteren bir yapı, plastik şekil değiştirme bölgesine geçiş, büyük sapma (large deflection) ve kontak durumlarının değişmesi olmak üzere üç durumda

nonlineer davranış göstermeye başlar. Plastik şekil değiştirme bölgesine geçiş herhangi bir yapının aşırı zorlamaya maruz kalması durumunda gerçekleşir. Burada kuvvet kaldırıldığında yapı eski haline geri dönemez yani akma noktası geçilmiş olur. Büyük sapma incelendiğinde herhangi bir yapının çok kalın olmadan yüklere karşı dayanıklı olması istenirse kubbe şekli tercih edilir. Buradan anlaşılacağı gibi yapının geometrisi yüklemelere karşı olan mukavemeti etkilemekte ve lineer olup olmama durumunda etkili olmaktadır. Kontak durumlarının değişmesine bakıldığında statik analiz lineer bölge de gerçekleştiği için analiz boyunca kontak durumlarında değişiklik olmazken; dinamik analizler non-lineer bölgede gerçekleştiği için farklı temas şekilleri ortaya çıkmakta mevcut temas şekilleri ortadan kalkmakta ve bu durum kontakların mukavemetlerinin değişmesine neden olmaktadır. Disk balata ikilisinde bulunan mevcut temas noktaları basınç uygulanmaya başladıktan sonra yerini farklı temas noktalarına bırakmaktadır.

Non-lineer problemlerin çözümünde en çok kullanılan yöntem Newton Raphson yöntemidir. Bu yöntemle çözümde ilk olarak F_1 yüklemesi ile birlikte bir x_1 deplasmanı bulunur ve bir deplasman alanı oluşturulur. Deplasman alanı ile birlikte deplasman vektörü tespit edilir. Bu aşamada kuvvet bırakılıp deplasman vektörü sisteme uygulanmaya başladığında gerilmeler oluşur ve model de çekme, basma, burulma veya eğilme meydana gelir. Modelin iç kuvvetleri hesaplandığında bu kuvvet toplam dış kuvvet olan F_a 'ya eşit olmazsa problem non-lineerdir. Yani bir dış kuvvet uygulanarak model lineer olarak çözülmüş ve ortaya çıkan deplasman modele uygulandığında modelde elde edilen iç kuvvet ile uyuşmazsa problem non-lineerdir. İç kuvvetlerin dış kuvvete eşit olması durumunda ise lineerdir.

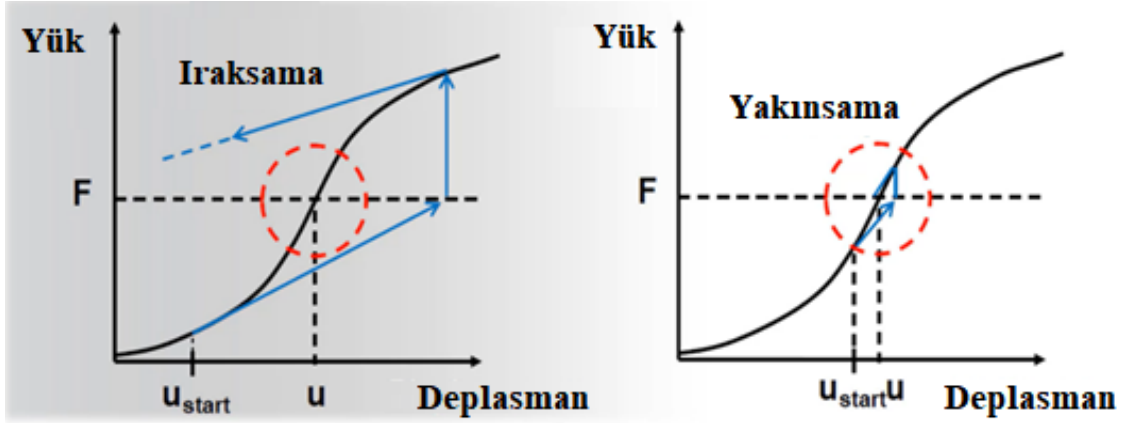
Şekil 2.3'de yer alan ilk grafikte F yükü ve u deplasmanı ile 4 adımda sonuca ulaşıldığı görülmektedir. Şekil 2.3'de ikinci grafik değerlendirildiğinde uygulanan kuvvet ile iç kuvvetler denge de ise ilgili iterasyonun yakınsadığı söylenebilir ve bu şekilde analiz devam eder. Bu kısımda ki yakınsama F_a ile F_1 arasındaki farkın kabul edilebilir tolerans değerlerinde olmasıdır. Bu tolerans değerleri analizi yapan kişi tarafından belirlenebildiği gibi programın kontrolüne de bırakılabilir. Sonuç olarak iç kuvvetlerin dış kuvvetlere eşit olması durumuna kadar iterasyon devam eder ve eşitlendiğinde analiz tamamlanır. Analiz de

yakınsama için gerçekleştirilen iterasyonun sayısı analiz sürelerini belirlemede önemli bir etkendir.



Şekil 2.3. Non-Linear Durumda Kuvvet Deplasman Değişimi

Problem adım adım çözülürken bir yakınsama dairesi vardır. Sonuçlar bu yakınsama dairesi içinde olduğunda analiz çözülebilir. Şekil 2.4'deki ilk grafiğe bakıldığında yukarıdaki eğim aşağıdaki eğimden küçük olduğu için sonuç yakınsama dairesi dışında kalır ve yakınsama gerçekleşmeyeceğinden dolayı analiz hata verecek ve çözüme ulaşamayacaktır. Şekil 2.4'deki ikinci grafikte ise seçilen başlangıç değerinin grafiği kestiği noktadan çizilen teğetin eğimi yakınsama dairesi içinde kaldığı için yakınsama gerçekleşir ve çözüme ulaşılabilir. Yakınsama dairesi çapı deneme yanılma yoluyla ve geçmiş tecrübelerle analiz yapan kişi tarafından oluşturulabilmekte ya da yakınsama seviyesine göre program bu çapı kendi belirleyebilmektedir. Yakınsama dairesi çapını ayarlayabilmek için yük adım adım uygulanır ya da rijitlik matrisin de yapılan kabuller genişletilir. Yük adım adım uygulandığında yakınsama dairesi küçülse bile yük adım adım gittiği için daha kolay bir yakınsama meydana gelir ancak bu durum analiz sürelerini de uzatır. Rijitlik matrisinde yapılan kabullerin genişletilmesi, yakınsama dairesi çapını arttırmakta ve elde edilen sonuçların hassasiyetini düşürmektedir. Bu şekilde yapılan analizlerde çözüm süreleri daha kısa olmaktadır.



Şekil 2.4. Yakınsama Dairesi

Frenleme esnasında disk balata çifti için yapılan analiz de balatalara uygulanan basınç değerleri değişkendir. Buna bağlı olarak açısal hız değerleri de frenleme süresi ilerledikçe azalarak frenleme sonunda sıfıra yaklaşmaktadır. Analiz için 132 adet değişken değerlerdeki basınç ve açısal hız verileri kullanılırken yakınsamanın kolaylaşması için 131 adım oluşturularak bu veriler girilmiştir. Böylece her adıma bir basınç ve bir açısal hız değeri karşılık gelmiştir. Bu şekilde gerçekleştirilecek olan analiz uzun zaman almaktadır. Genel olarak analizlerde daha hassas çözümler elde etmek istendiğinde daha uzun analiz süreleri ile karşılaşılırken, bazı kabullerle daha kısa sürede ve hassasiyeti daha düşük sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu çalışma da disk balata çiftinin termal ve yapısal analizi için daha hassas sonuçların elde edilmesine öncelik verilmiştir.

2.5 Frenleme Analizinin ANSYS® Programında Gerçekleştirilme Süreci

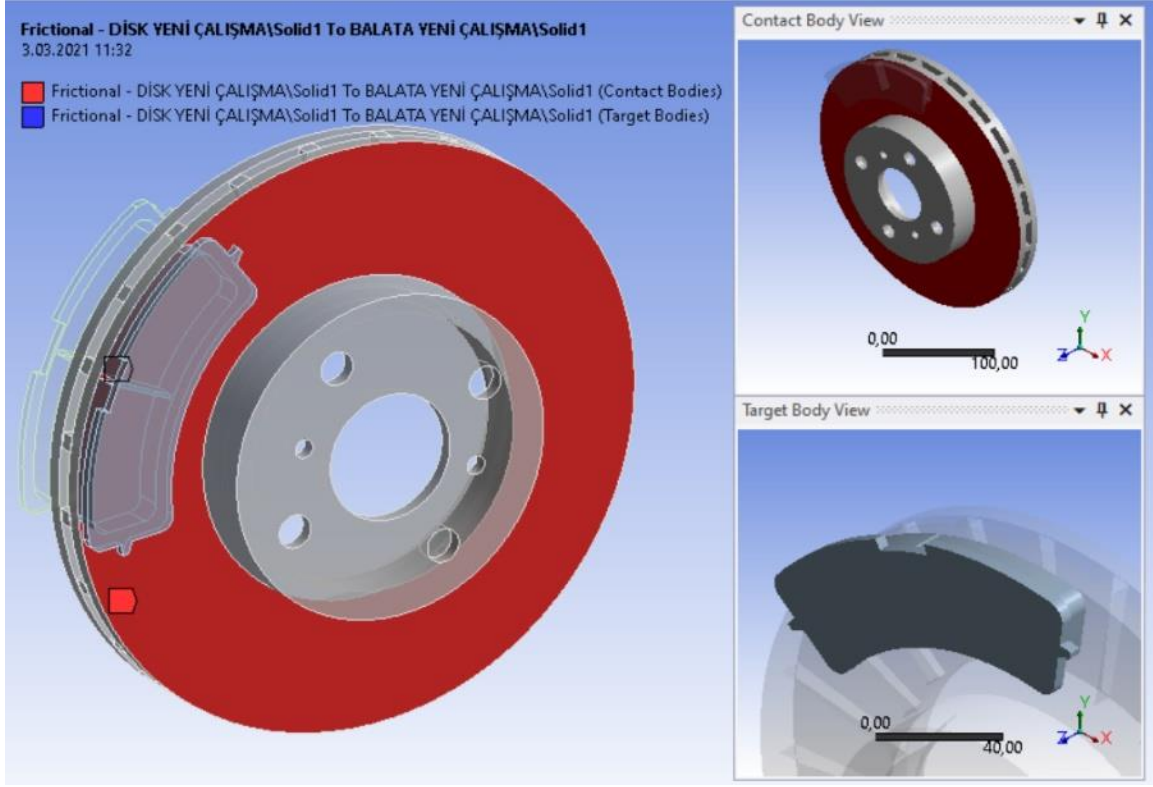
Günümüzde sonlu elemanlar yöntemiyle mühendislik problemlerinin çözümü için el ile yapılan hesaplamalar yetersiz kalmaktadır. Kompleks problemlerde modelin oluşturulması ve analizlerin yapılması için bilgisayar ortamında birçok ara yüz bulunmaktadır. Bu çalışmada analizlerin yapılması için günümüzde kullanılan ara yüzlerden biri olan ANSYS® programı tercih edilmiştir. Bu programda dinamik, statik, harmonik, burkulma, lineer, lineer olmayan, akış, termal ve yorulma gibi birçok analiz yapılabilmektedir. SAE J2522 Kapsamlı Fren Etkinlik Test standardına göre gerçekleştirilen sıcaklıkla fren zayıflaması test verileri kullanılmak suretiyle termal ve yapısal analizler multi-fizik simülasyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem de sabit durum termal analiz bölümünde yapılan termal

analizin çözüm bölümü geçişli yapısal analizin kurulum bölümüne bağlanmıştır. Böylece frenleme esnasında oluşan termal yüklemeler yapısal olarak gerçekleşen analizde kullanılmıştır.

Termal ve yapısal analiz bölümleri; mühendislik verileri (malzeme verileri), geometri, model, kurulum, çözüm ve sonuçlar olmak üzere altı bölümden oluşmaktadır. Sabit durum termal bölümü programın ana sayfasına getirilerek malzeme bilgisi “Engineering Data” bölümünden gri dökme demir olarak seçilmiştir. Daha sonra SOLIDWORKS® programında çizimi yapılan binek araç ön fren disk modeli ANSYS® programının geometri bölümüne aktarılmıştır. Frenleme simülasyonunun gerçekleştirilmesi için deneysel verilerin girileceği model bölümü açılmıştır. Burada verilerin girilmesinden önce geometriler üzerinde belirli tanımlamalar yapılmıştır. Malzeme bilgisi bölümünde seçilen gri dökme demir model bölümünde geometrilerin alt bilgilerinde bulunan malzeme bölümünden de gri dökme demir olarak seçilmiştir.

Kontak, oluşturulan model içerisinde birbirine temas halinde olan iki farklı geometri varsa ortaya çıkan bir kavramdır. Parçalar arasında kontak tanımlamaları yapılmazsa devam eden yüklemeler belirli bir süreç sonra parçalar arasında penetrasyona (iç içe geçmeye) sebep olmaktadır. Ancak penetrasyon istenmeyen bir durumdur. Frenleme de kullanılan disk ve balata da bu durumu temsil etmektedir. Bundan dolayı disk-balata çiftinin temas ettiği iki bölgenin tanımlanması için bağlantılar (connection) bölümünün içerisinde kontak (contact) bölümü oluşturulmuştur. Burada yapışık (bonded), ayrılma olmayan (no separation), sürtünmesiz (frictionless), kaba (rough) ve sürtünmeli (frictional) olmak üzere beş adet kontak tipi bulunmaktadır. Yapışık (bonded) ve ayrılma olmayan (no separation) kontak tipleri lineer durumlarda tercih edilmektedir ve amacı yüzeylerin birbirine tork iletmemesidir. Sürtünmesiz (frictionless), kaba (rough) ve sürtünmeli (frictional) kontak tipleri ise lineer olmayan durumlarda tercih edilir ve bu kontak tiplerinde yüzeyler birbirinden ayrılabilir. Frenleme analizi için disk ve balata yüzeyi arasında oluşan değişken temas durumları lineer olmayan kontak tipini oluşturmaktadır ve frenlemenin temeli sürtünmeye dayanmaktadır. Bu yüzden analiz için sürtünmeli (frictional) kontak tipi tercih

edilmiştir. Şekil 2.5’de görüldüğü gibi disk yüzeyi “contact bodies” ve balata yüzeyi “target bodies” olarak seçilmiş ve sabit bir sürtünme katsayısı değeri verilmiştir.

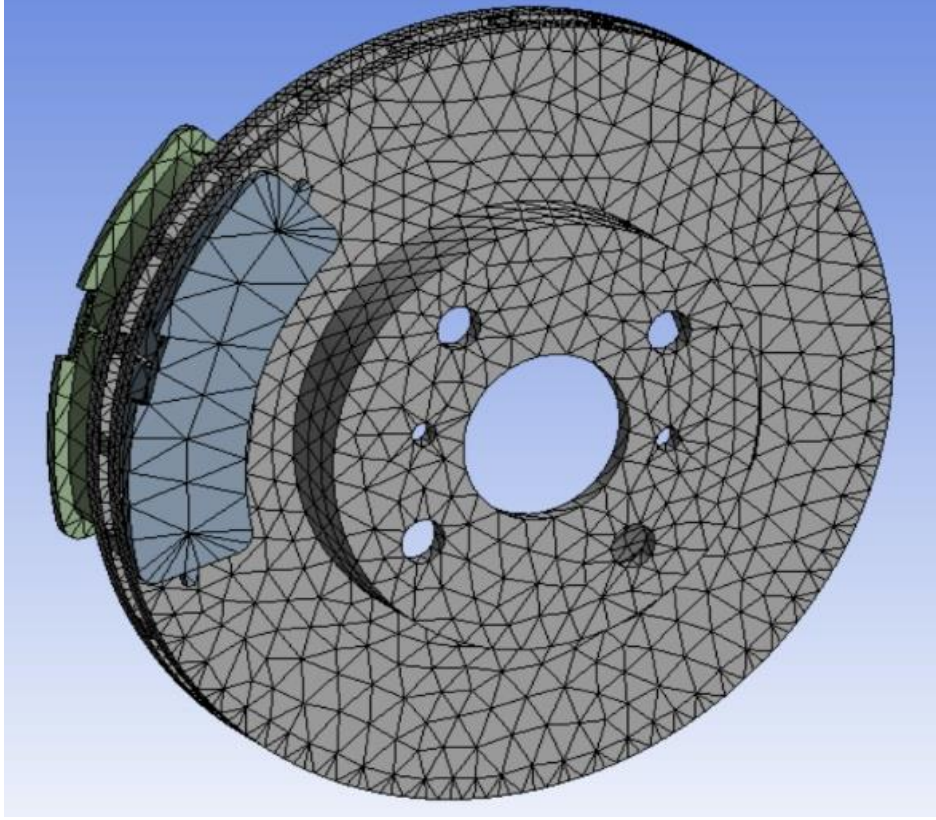


Şekil 2.5. Kontak Tanımlamaları

Sürtünmenin gerçekleştiği temas bölgeleri tanımlanırken belirli alt seçenekler incelendiğinde program kontrolüne bırakılabileceği gibi analizi yapan kişi tarafından da seçilebilir. Bunlardan biri olan kontak formülasyon tipi “Pure Penalty”, “Augmented Lagrange”, “Normal Lagrange” ve “MPC” olmak üzere dört adettir. “Pure Penalty” ve “MPC” formülasyonları iyi yakınsama eğilimi göstermektedir ve yapışık (bonded) ile ayrılma olmayan (no separation) kontak tiplerinde; “Augmented Lagrange” ve “Normal Lagrange” ise lineer olmayan kontak tiplerinde tercih edilmektedir. Bu analizde “Augment Lagrange” formülasyonu ve algılama yöntemi (detection method) “nodal-to normal to target” seçilmiştir.

Malzeme bilgisi ve kontak tipleri belirlenen geometrinin, analiz verileri oluşturulmadan önce yapılması gereken son işlem, geometrinin ağ yapısının oluşturulmasıdır. Sonlu elemanlar

metodu kullanılan bu programın mesh bölümünde düğüm sayısı 27.704 ve element sayısı ise 13.952 olacak şekilde disk balata çifti çözüm için küçük parçalara bölünmüştür (Şekil 2.6).

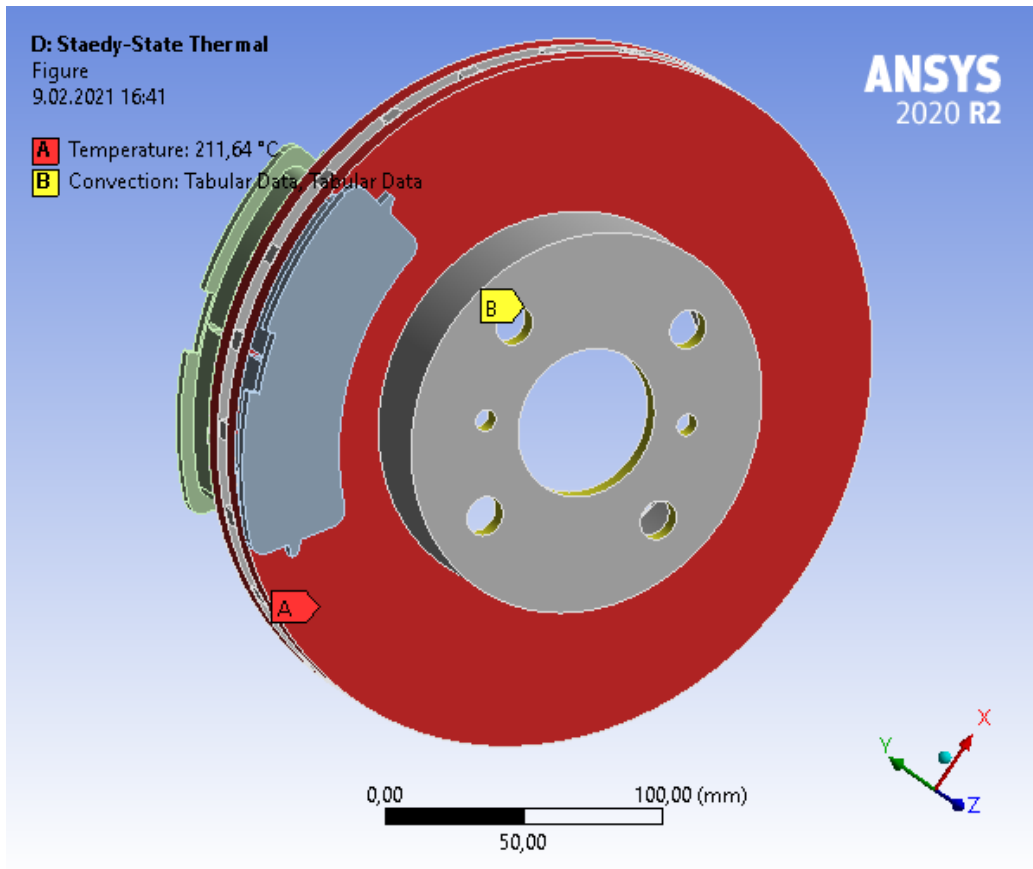


Şekil 2.6. Disk-Balata İkilisi için Oluşturulan Ağ Yapısı

Sabit durum termal analiz ve geçişli yapısal analiz için zaman adımlarının belirlenmesi çözüm sürecinde etkili olmaktadır. Zaman adımları sayesinde yüklemeler alt adımlarda tanımlanarak yakınsama kolaylaştırılır. Sabit durum termal analiz için adım sayısı girilmesi yeterli iken geçişli yapısal analiz bölümünde her adım için “Analysis Settings” bölümünden “Step Controls” bölümünde yer alan “Auto Time Stepping” kısmı açılıp manuel olarak başlangıç, minimum ve maksimum zaman değerleri sırasıyla $1,5e-004$; $1,5e-006$ (minimum zaman değeri başlangıcın 100’e bölünmüş değeridir) ve $7,0e-003$ saniye olarak girilmiştir. Disk fren analizi için termal analiz bölümünde 1000 adet zaman verisi ve geçişli yapısal analiz bölümünde ise 132 adet zaman verisi kullanılmıştır. Her zaman adımı için yapısal analizde basınç, açısal hız ve açısal ivme verileri; termal analizde ise sıcaklık ve ısı taşınım katsayısı verileri girilmiştir.

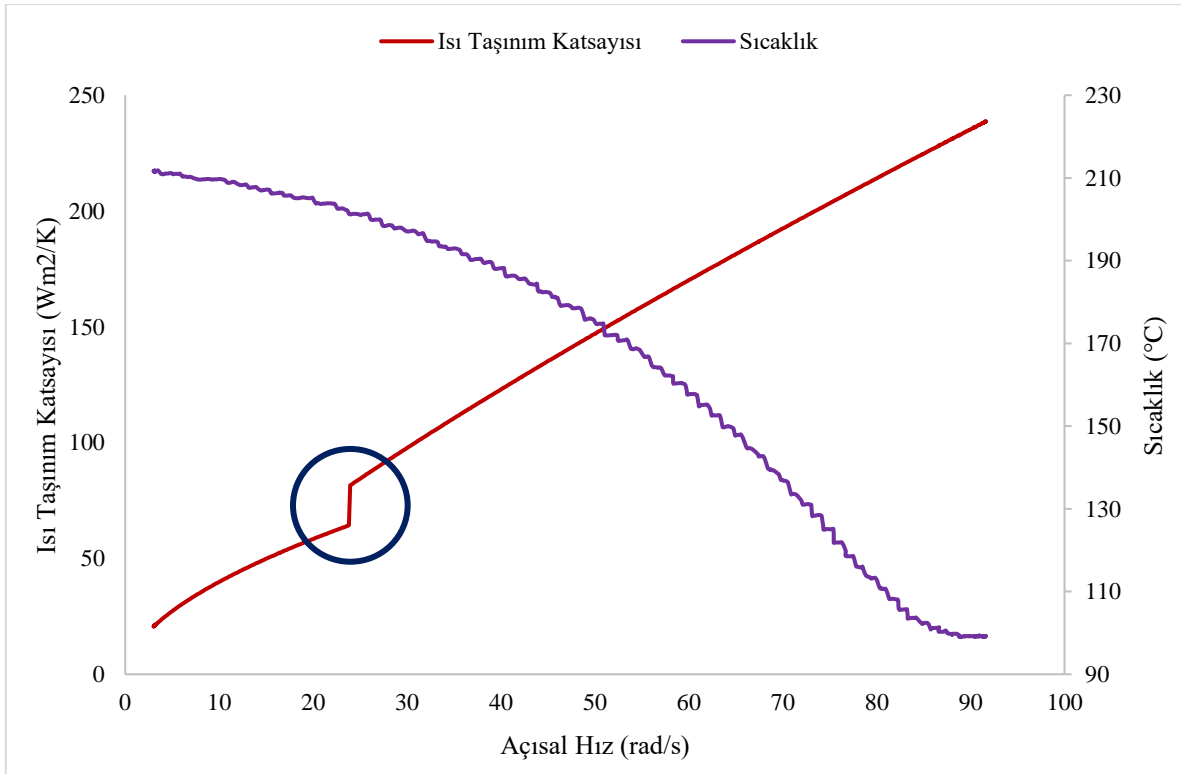
2.6 Sabit Durum Termal Analiz Sınır Koşulları

Frenleme boyunca yükselen sıcaklıklara etki eden en önemli parametrelerden biri diskin hava ile temas ettiği bölgelerde gerçekleşen taşınımıdır. Disk balata ikilisi için çok yüksek sıcaklıklar istenmeyen bir durum olduğundan dolayı taşınım yolu ile ısının havaya aktarılması yani diskin soğutulması incelenmesi gereken önemli bir konudur. Bu çalışmada ısı taşınım katsayısı değerleri programa tanımlanırken sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedüründeki deneysel verilerden hesaplanan açısal hız değerleri ile bir fonksiyon oluşturulmuştur. Bu fonksiyonda her açısal hız değerine karşılık bir ısı taşınım katsayısı verisi elde edilmiş ve 1000 adet veri seti programda adımlar tanımlanarak oluşturulmuştur. Şekil 2.7’de seçilen yüzeylere sıcaklık ve ısı taşınım katsayısı verileri tanımlanarak sabit durum termal analizi için 15 adet tekrarlı frenleme analizi ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.7. Sabit Durum Termal Analiz Yüzey Tanımlamaları

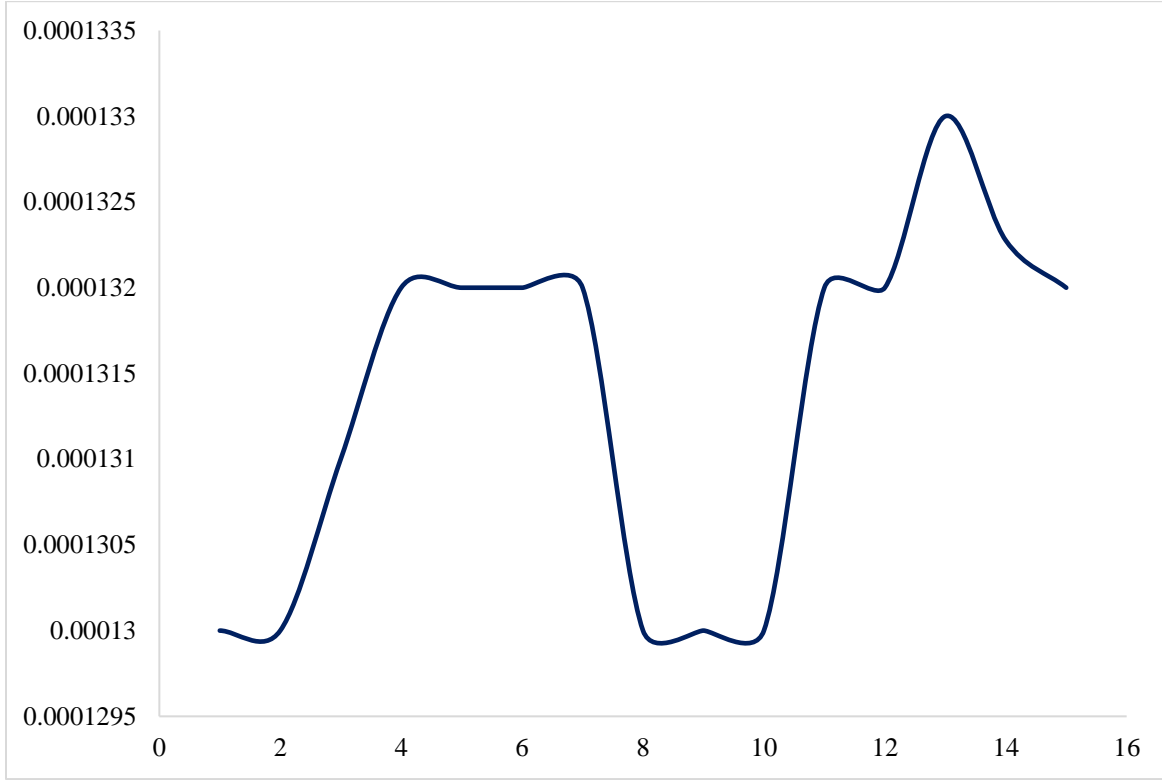
99-212°C sıcaklık aralığında gerçekleşen frenleme için sıcaklık ve ısı taşınım katsayısının 1000 adet verisinden oluşan eğri Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Yapılan analizlerdeki 15 frenleme için sıcaklık ve ısı taşınım katsayısı grafiklerinin devamı ise EK 1’de verilmiştir. Frenleme boyunca analizlerde sıcaklık zamanla artarken diskin açısal hızı zamanla azalmış ve buna bağlı olarak ısı taşınım katsayısı değerleri düşmüştür. 99-212°C sıcaklık aralığında gerçekleşen frenleme için açısal hız 23,85 rad/s değerine düştüğünde bu değere karşılık ısı taşınım katsayısında ani bir düşüş oluşmuştur. Şekil 2.8’de mavi daire içerisinde görülen kırılma, akışın hızının düşmesi ile birlikte Re sayısındaki değişimin belirli değerinden ($Re \leq 2,4.10^5$ ise laminar akış, $Re > 2,4.10^5$ ise türbülanslı akış) itibaren akışın türbülanslı halden laminar hale geçişini göstermektedir. Bu çalışmada termal analizler yapılırken kullanılan veriler ile açısal hıza bağlı olarak ısı taşınım katsayısının sıcaklıklar üzerinde oluşturduğu etkinin tespit edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2.8. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (99-212 °C Sıcaklık Aralığı)

Uygulanan ısı taşınım katsayısı değerleri zamanla azalan değerler almakla birlikte 15 adet sabit durum termal analiz için ortalama ısı taşınım katsayısı verileri Şekil 2.9’da

gösterilmiştir. Ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri 0,00013 W/mm²K ile 0,000133 W/mm²K arasında değişim gösterdiği tespit edilmiştir.

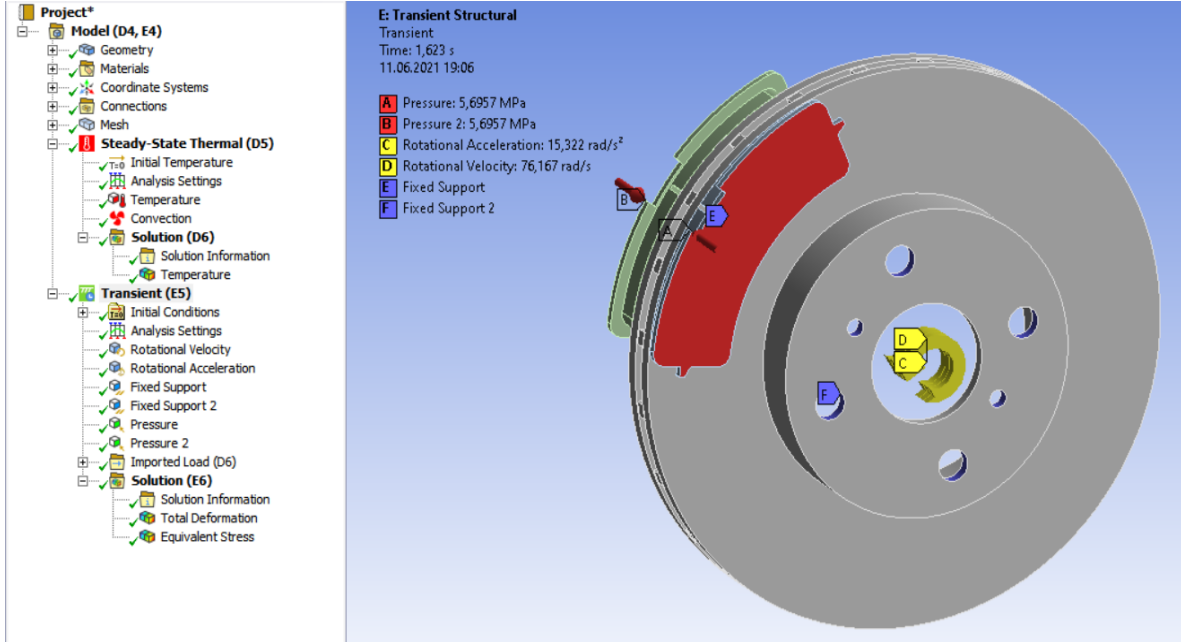


Şekil 2.9. 15 Frenleme için Ortalama Isı Taşınım Katsayısı Değişimi

2.7 Geçişli Yapısal Analiz Sınır Koşulları

Disk-balata ikilisi termal yüklemelerle birlikte balataya uygulanan basınç, diskin sahip olduğu açısal hız ve diskte oluşturulan sabit ivme prosesi gibi faktörlerden etkilenmektedir. Bu çalışmada deneysel verilerden faydalanılarak yapılan termal analiz sonuçları geçişli yapısal analizin kurulum bölümüne bağlanmıştır. Böylece termal analiz yapılırken kurulan model ve elde edilen termal sonuçlar yapısal analizde de kullanılmıştır. Bundan dolayı yeniden modellemeye yani malzeme tanımlama, temas bilgileri oluşturma ve sonlu eleman ağ yapısı kurulmasına gerek kalmamıştır. Geçişli yapısal analizde zaman adımları belirlenmiş ve her adım için başlangıç, minimum ve maksimum zaman değerleri oluşturulmuştur. Başlangıç zaman değeri 1,5e-004 saniye, minimum zaman değeri başlangıcın 100'e bölünmüş değeri olan 1,5e-006 saniye ve maksimum zaman değeri 7,0e-

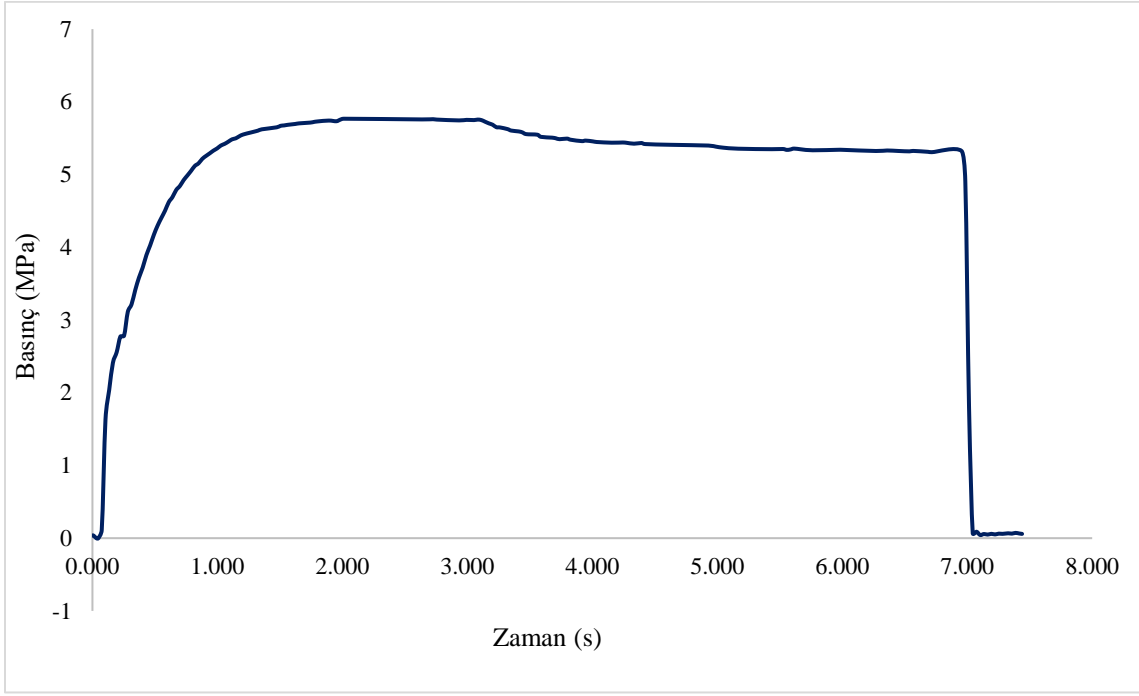
003 saniyedir. Zaman adımları geçişli yapısal analizde 132 veriye karşılık olarak 131 adım olarak belirlenmiştir. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi basınç, açısal hız, açısal ivme ve destek parça yüzeyleri seçilmiştir.



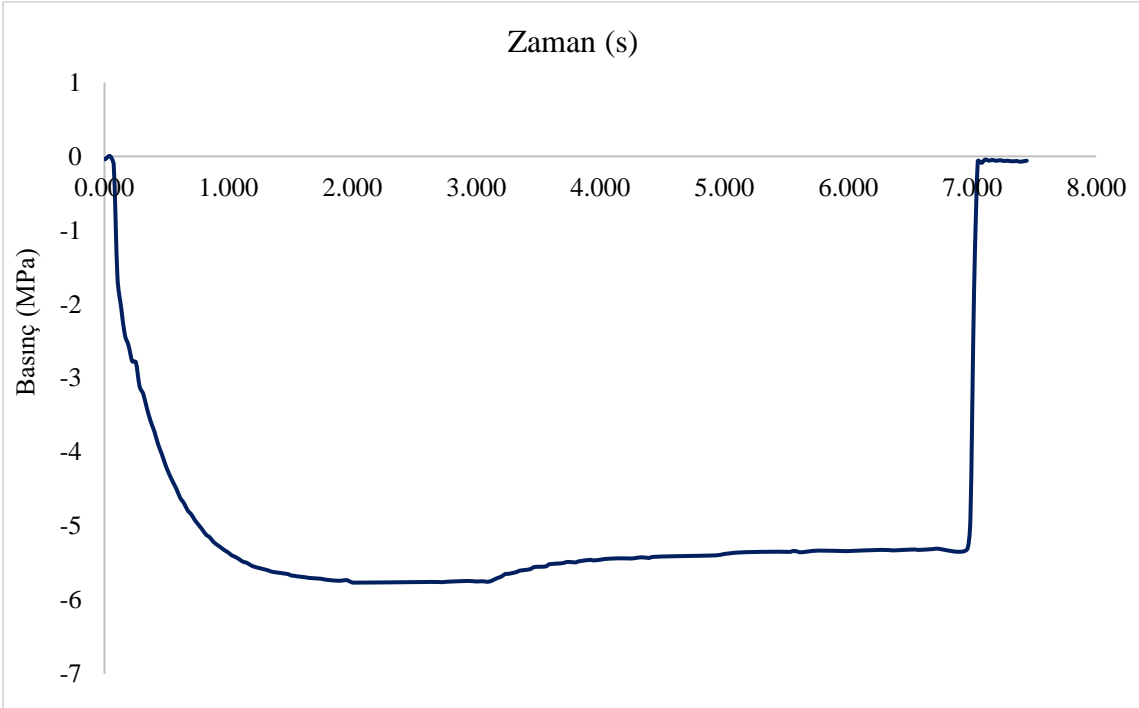
Şekil 2.10. Geçişli Yapısal Analiz Yüzey Tanımlamaları

2.7.1 Analizde Kullanılan Basınç Değerleri

Balatalara uygulanacak olan basınç için “Pressure” komutu açılıp balataların disk ile temas ettiği yüzeyler ayrı ayrı seçilerek iki basınç komutu verilmiştir. Basınç eğrileri sıcaklıkla fren zayıflaması prosedüründe yer alan değişken basınç verileri yazılarak oluşturulmuştur. Balatalara basınç iki taraftan ayrı ayrı ve birbirine zıt yönde uygulanmıştır. Uygulanan basınç değerleri aynı olduğu için Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’de görüldüğü gibi eğriler aynı ancak yönleri birbirine terstir.



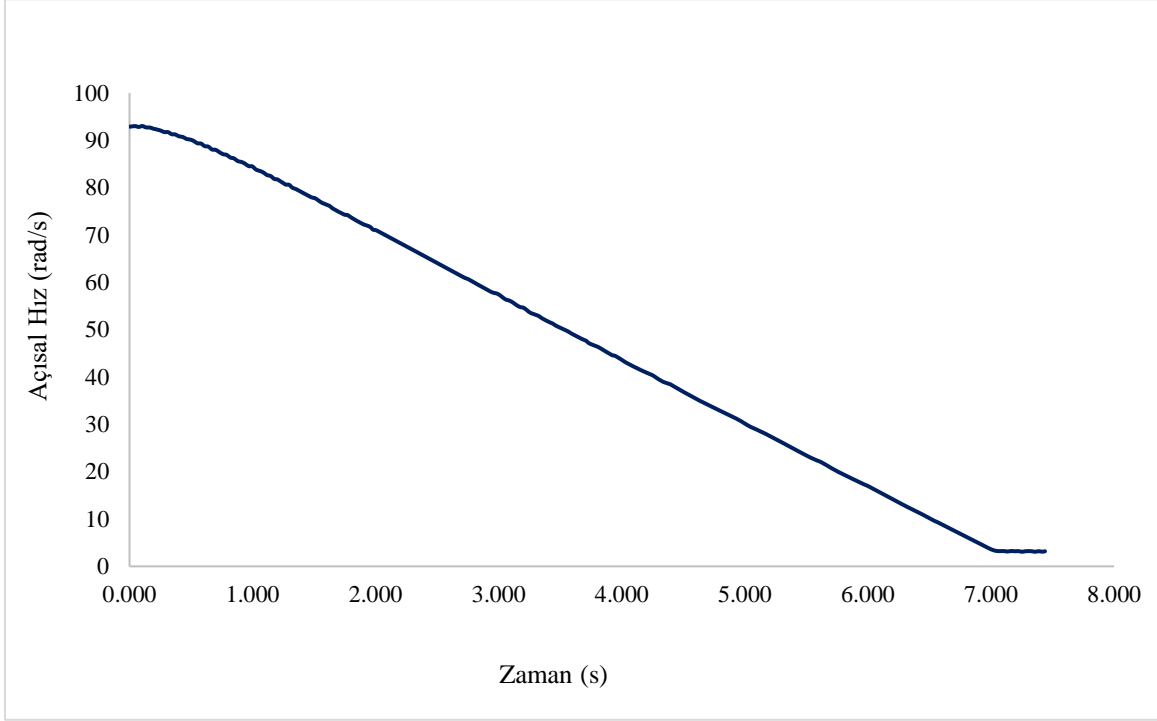
Şekil 2.11. Dış Balataya Uygulanan Basınç Grafiği



Şekil 2.12. İç Balataya Uygulanan Basınç Grafiği

2.7.2 Analizde Kullanılan Açısal Hız Değerleri

Diske uygulanacak açısal hız için “Rotational Velocity” komutu açılıp diskin orta deliğindeki iç yüzey seçilmiştir. Açısal hız eğrisi, Şekil 2.13’de görüldüğü gibi uygulanan frenleme prosedürüne uygun bir şekilde frenleme süresindeki zamanla azalan veriler şeklinde tabloya girilerek oluşturulmuştur.



Şekil 2.13. Açısal Hız Grafiği

2.7.3 Analizde Kullanılan İvme Değerleri

SAE J2522 Kapsamlı Fren Etkinlik Test standardı sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedüründeki sabit ivme prosesi uygulanmıştır. “Rotational acceleration” komutu açıldıktan sonra açısal hız da olduğu gibi açısal ivmede de geometri bölümü için diskin orta deliğindeki iç yüzey seçilmiş ve açısal ivme değeri “0,4g” olarak girilmiştir.

2.7.4 Analizdeki Destek Parçalar

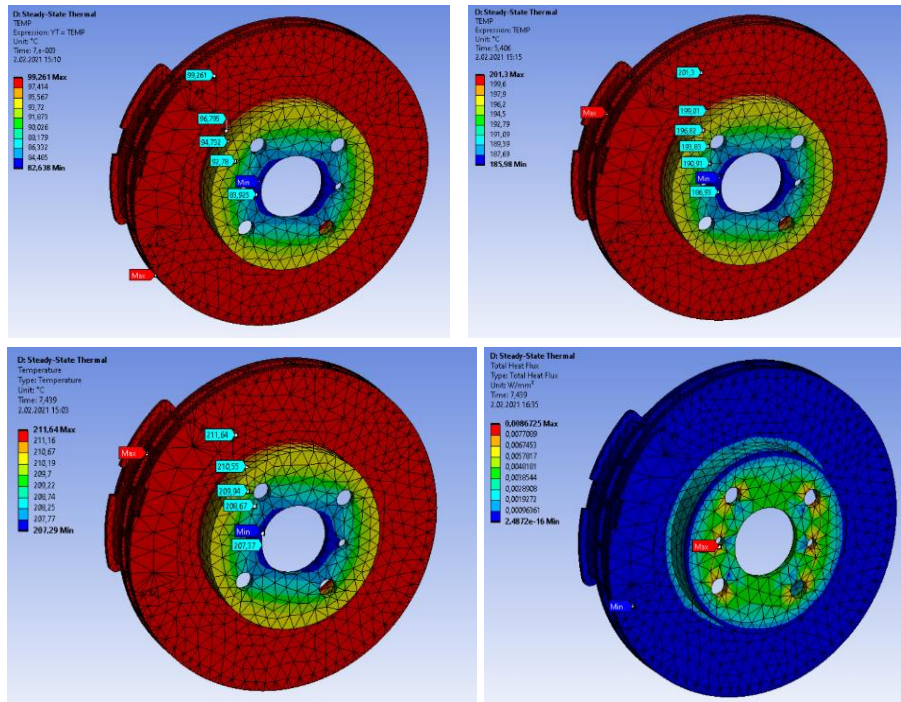
Disk balata ikilisinin analizinde verilen açısal hız değerleri, uygulanan basınçlar ve sabit ivme değeri ile simülasyonun gerçekleşmesi için en kritik kısım destek olarak seçilen nokta,

yüzey veya parçanın doğru bir şekilde belirlenmesidir. Analiz disk için yapıldığından dolayı balata sadece diske basıncı uygulayan sabit bir parçadır. Bu yüzden iki balatanın yüzeyi de “Fixed Support” komutu ile sabitlenmiştir. Ayrıca diskin belirli açısal hız değerlerinde kendi eksenini etrafında dönebilmesi yani araçta aksa sabitlenmesi durumunu simülasyona yansıtılabilmek için diskte bulunan deliklerin iç yüzeyi seçilerek “Fixed Support” komutu uygulanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

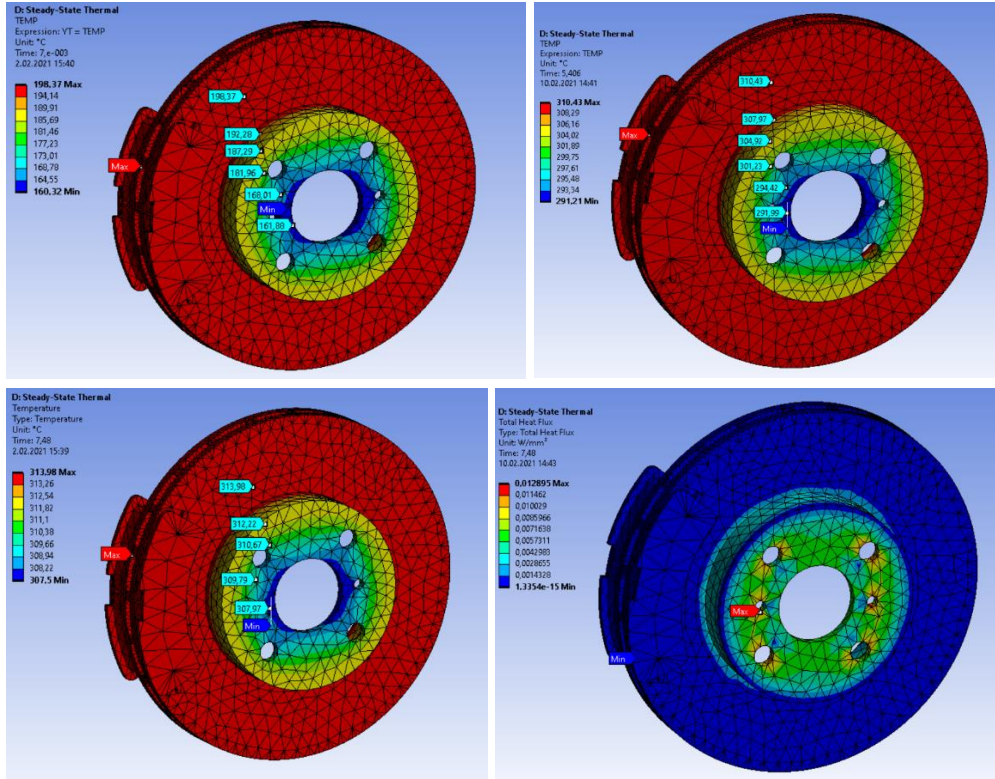
3.1 Sabit Durum Termal Analiz Bulguları

Frenleme gerçekleşirken 99-212 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.1’de görüldüğü gibi diskin dış yarıçapı ve merkezi arasında oluşan sıcaklık farkı frenleme başlangıcında (0,007 s) 16,62 °C, ortasında (5,406 s) 15,32 °C ve sonunda (7,439 s) 4,35 °C olmuştur. Frenlemenin sonunda başlangıç durumuna göre sıcaklık farkındaki düşüşte taşınım etkisinin %91,15; frenlemenin 5,406’ncı saniyesinde frenleme başlangıcına göre oluşan sıcaklık farkındaki düşüşte taşınım etkisinin %65,15 ve frenleme sonunda frenlemenin 5,406’ncü saniyesine göre oluşan sıcaklık düşüşünde taşınımın etkisinin ise %74,61 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Disk merkezinde sıcaklık düşüşleri gözlenirken diskin dış yarıçapında sürtünme meydana geldiği için maksimum sıcaklık değeri elde edilmiştir. Deliklerin olduğu bölgeler sürtünmeye maruz kalmadığından minimum sıcaklık değerleri gözlenmiştir. Toplam ısı akısı minimum 2,4872e-16 W/mm² ve maksimum 0,0086725 W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Toplam ısı akısı görseli incelendiğinde ise disk merkezinde ısı akısı değerleri daha yüksek çıkarken, diskin dış yarıçapında minimum değerler elde edilmiştir.



Şekil 3.1. 99-212 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

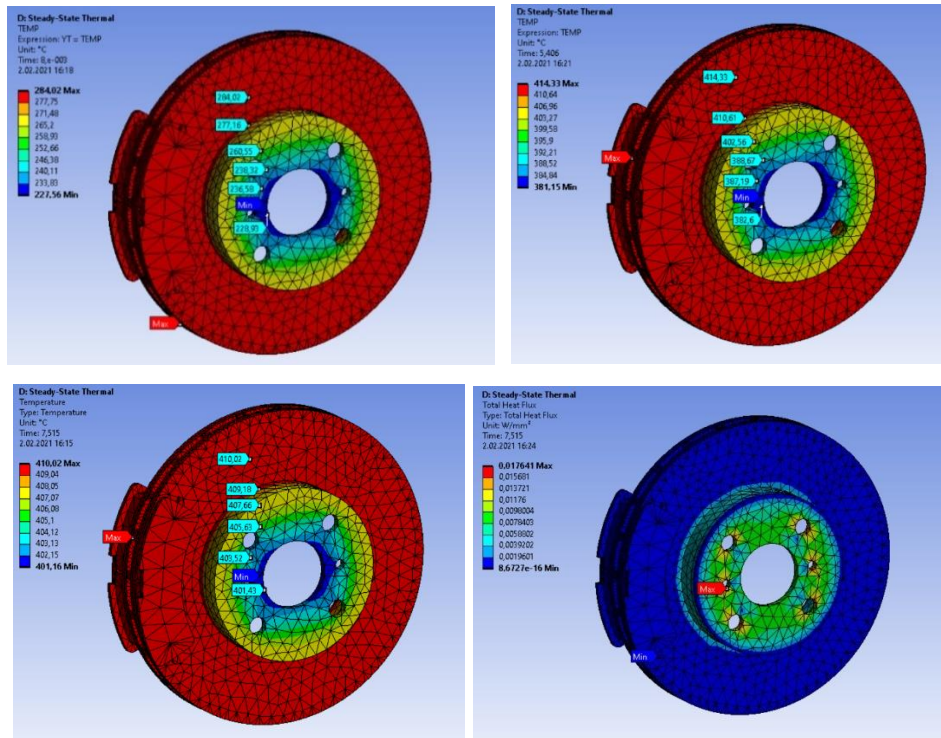
Disk fren için yapılan termal analiz de 198-314 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.2’de görüldüğü gibi diskin farklı bölgelerinde farklı sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark frenleme başlangıcında (0,007 s) 38,05 °C, ortasında (5,406 s) 19,22 °C ve sonunda (7,48 s) 6,48 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum $1,3354e-15$ W/mm² ve maksimum 0,0012895 W/mm² olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.2. 198-314 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

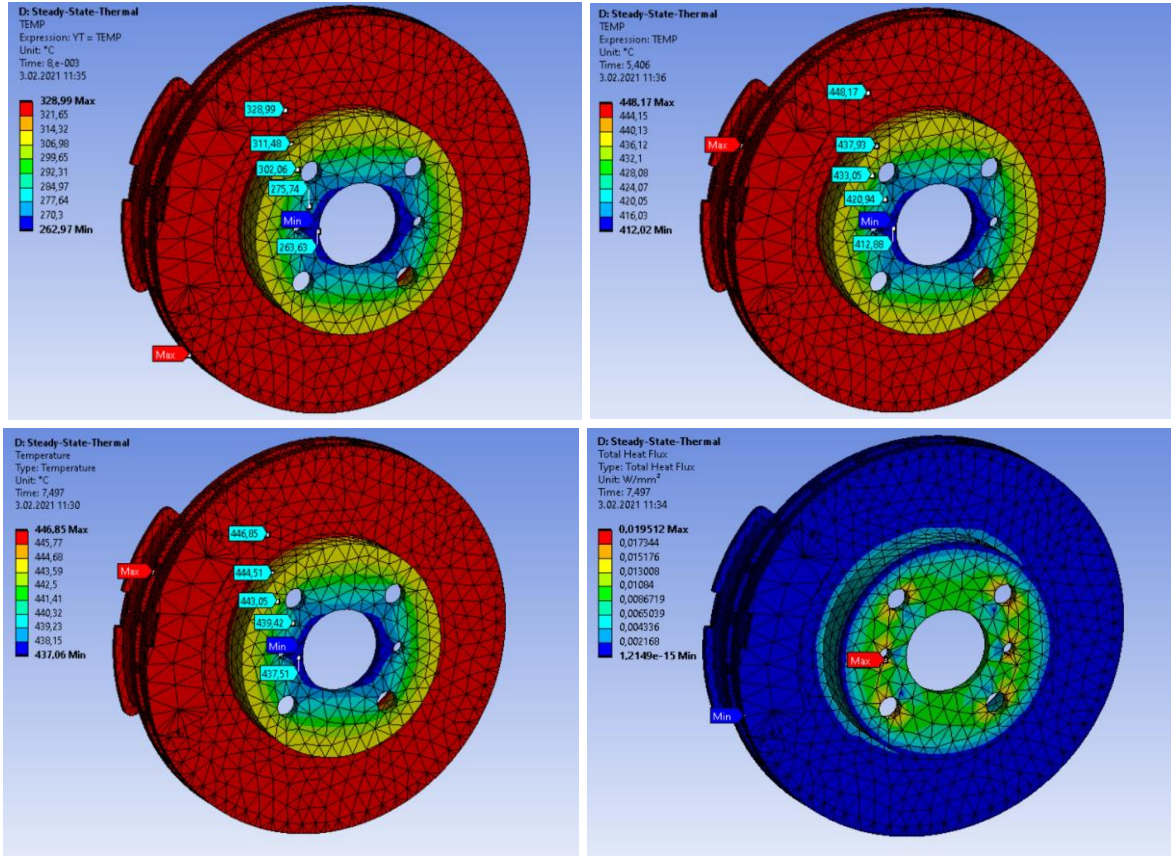
Frenlemenin sonunda başlangıç durumuna göre sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %91,48; frenlemenin 5,406’ncı saniyesinde frenleme başlangıcına göre oluşan sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %73,35 ve frenleme sonunda frenlemenin 5,406’ncı saniyesine göre oluşan sıcaklık düşüşünde, taşınım etkisinin ise %68,04 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Diskte deliklerin bulunduğu kısım sürtünmeye maruz kalmadığından, minimum sıcaklık değerleri gözlenmiştir. Sürtünmenin meydana geldiği diskin dış yarıçapında ise sıcaklık maksimum değere ulaşmıştır. Analizde ki maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark 99-212 °C sıcaklık aralığında yapılan analize kıyasla daha yüksek çıkmış ve ısı akısı daha yüksek maksimum ve minimum değerlere sahip olmuştur.

Yapılan frenleme analizinde 284-410 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.3’de görüldüğü gibi diskin maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark frenleme başlangıcında (0,008 s) 56,46 °C, ortasında (5,406 s) 33,18 °C ve sonunda (7,515 s) 8,86 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum 8,6727e-16 W/mm² ve maksimum 0,017641 W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Frenlemenin sonunda başlangıç durumuna göre sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %91,22; frenlemenin 5,406’ıncı saniyesinde frenleme başlangıcına göre oluşan sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %65,67 ve frenleme sonunda frenlemenin 5,406’ıncı saniyesine göre oluşan sıcaklık düşüşünde, taşınım etkisinin ise %74,43 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Taşınımın daha etkili olduğu disk merkezinde minimum sıcaklık değerleri elde edilirken sürtünmenin meydana geldiği diskin dış yarıçapında maksimum sıcaklık değerleri oluşmuştur. 198-314 °C sıcaklık aralığında yapılan analizden daha yüksek sıcaklıklara ulaşan bu analizde diskin dış yarıçapı ve merkezi arasındaki sıcaklık farkının arttığı gözlemlenmiştir. Isı akısı disk merkezinde daha yüksek değerlere ulaşmıştır ve 198-314 °C sıcaklık aralığında yapılan analize kıyasla daha yüksek maksimum değerler tespit edilmiştir.



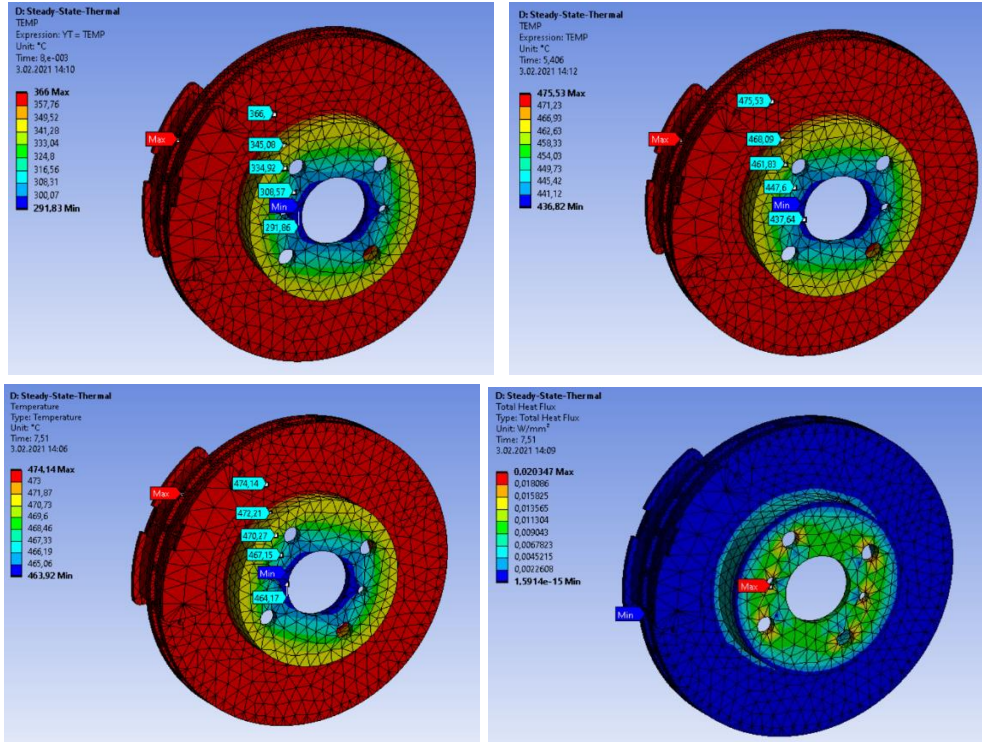
Şekil 3.3. 284-410 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

Frenleme gerçekleşirken 329-447 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.4’de görüldüğü gibi diskin dış yarıçapı ve merkezi arasında oluşan sıcaklık farkı frenleme başlangıcında (0,008 s) 66,02 °C, ortasında (5,406 s) 36,15 °C ve sonunda (7,497 s) 9,79 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum 1,2149e-15 W/mm² ve maksimum 0,019512 W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Frenlemenin sonunda başlangıç durumuna göre sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %91,11; frenlemenin 5,406’ıncı saniyesinde frenleme başlangıcına göre oluşan sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %65,46 ve frenleme sonunda frenlemenin 5,406’ıncı saniyesine göre oluşan sıcaklık düşüşünde, taşınım etkisinin ise %74,26 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Diskin merkezinde sıcaklık düşüşleri gözlenirken, diskin dış yarıçapında sürtünme meydana geldiği için maksimum sıcaklık değeri elde edilmiştir. Deliklerin olduğu bölgeler sürtünmeye maruz kalmadığından minimum sıcaklık değerleri gözlenmiştir. Toplam ısı akısı görseli incelendiğinde ise disk merkezinde ısı akısı değerleri daha yüksek çıkarken, diskin dış yarıçapında minimum değerler elde edilmiştir.



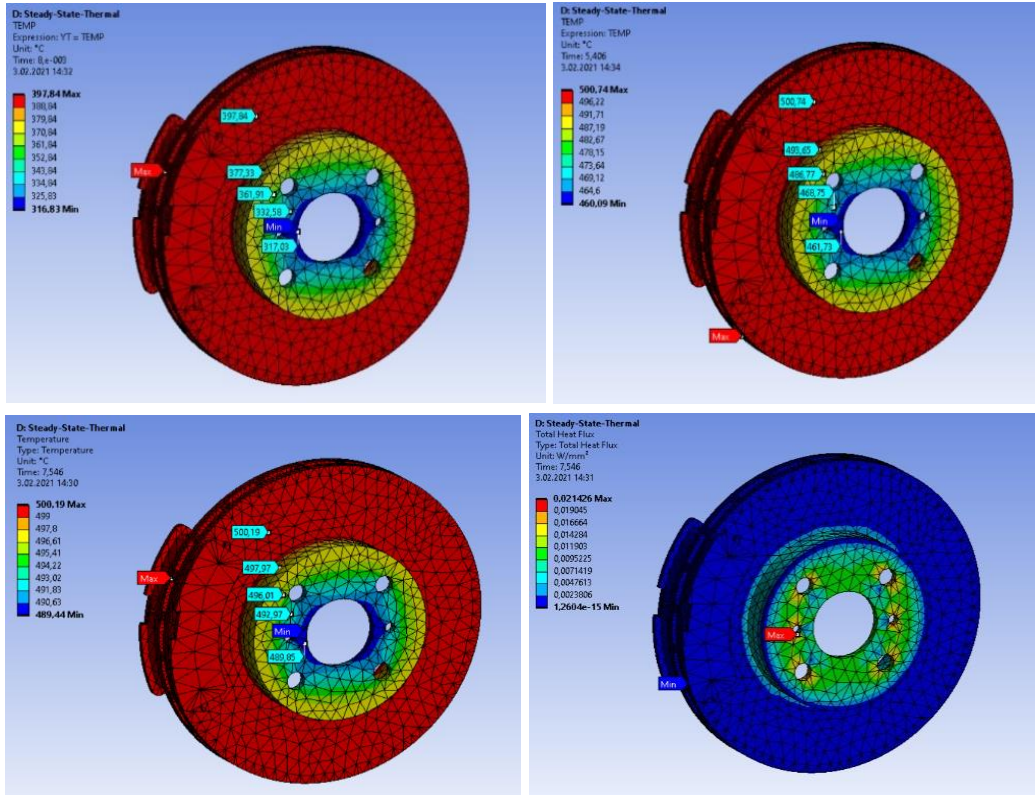
Şekil 3.4. 329-447 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

Disk fren için yapılan termal analiz de 366-474 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.5’de görüldüğü gibi diskin farklı bölgelerinde farklı sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Maksimum ve minimum değerler arasındaki fark frenleme başlangıcında (0,008 s) 74,17 °C, ortasında (5,406 s) 38,71 °C ve sonunda (7,51 s) 10,22 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum 1,5914e-15 W/mm² ve maksimum 0,020347 W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Frenlemenin sonunda başlangıç durumuna göre sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %91,32; frenlemenin 5,406’ncı saniyesinde frenleme başlangıcına göre oluşan sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %65,18 ve frenleme sonunda frenlemenin 5,406’ncı saniyesine göre oluşan sıcaklık düşüşünde, taşınım etkisinin ise %74,79 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Diskte deliklerin bulunduğu kısım sürtünmeye maruz kalmadığından, minimum sıcaklık değerleri gözlenmiştir. Sürtünmenin meydana geldiği diskin dış yarıçapında ise sıcaklık değeri maksimuma ulaşmıştır. Analizde ki maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark 329-447 °C sıcaklık aralığında yapılan analize kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca ısı akısının da disk merkezinde daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir.



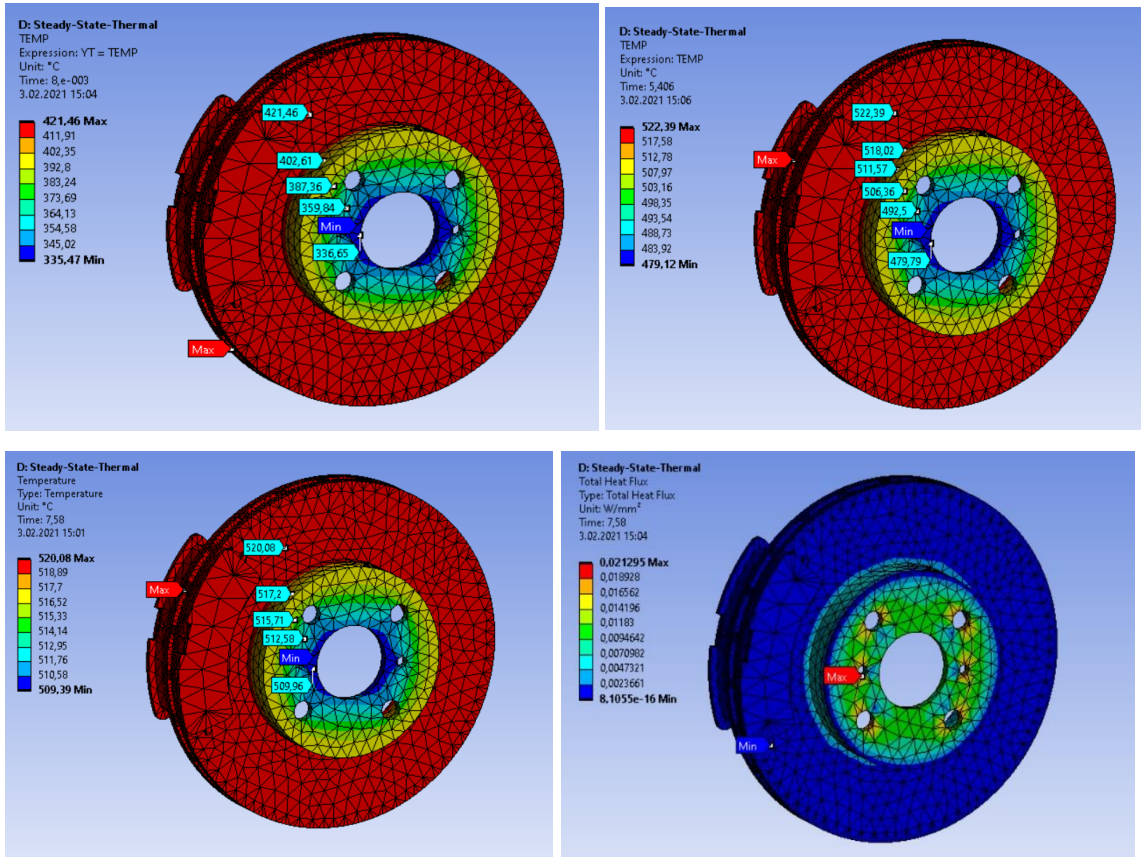
Şekil 3.5. 366-474 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

Yapılan frenleme analizinde 397-500 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.6’da görüldüğü gibi diskin maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark frenleme başlangıcında (0,008 s) 81,01 °C, ortasında (5,406 s) 40,65 °C ve sonunda (7,546 s) 10,75 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum 1,2604e-15 W/mm² ve maksimum 0,021426 W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Frenlemenin sonunda başlangıç durumuna göre sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %91,34; frenlemenin 5,406’ıncı saniyesinde frenleme başlangıcına göre oluşan sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %64,72 ve frenleme sonunda frenlemenin 5,406’ıncı saniyesine göre oluşan sıcaklık düşüşünde, taşınım etkisinin ise %74,46 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Diskin merkezinde minimum sıcaklık değerleri elde edilirken sürtünmenin meydana geldiği diskin dış yarıçapında maksimum sıcaklık değerleri oluşmuştur. Yapılan daha önceki analizlere göre daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu analizde diskin dış yarıçapı ve merkezi arasındaki sıcaklık farkının arttığı gözlemlenmiştir. Isı akısı ise disk merkezinde daha yüksek değerlere ulaşmış ve bir önceki analize kıyasla daha yüksek maksimum değer elde edilmiştir.



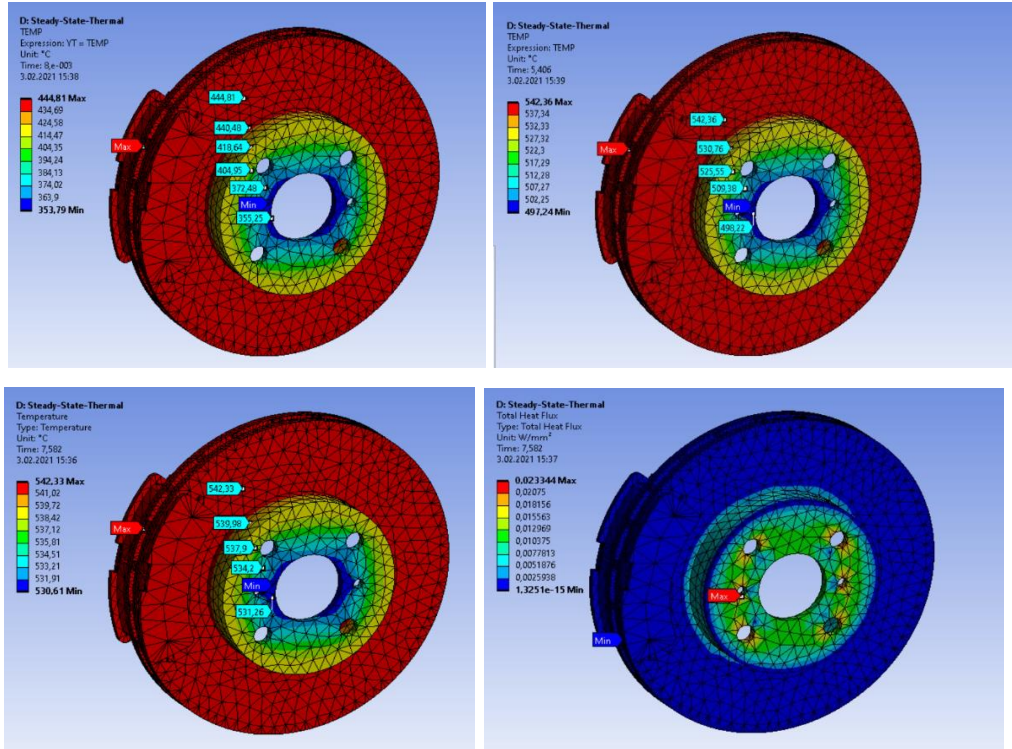
Şekil 3.6. 397-500 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

Frenleme gerçekleşirken 421-520 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.7’de görüldüğü gibi diskin dış yarıçapı ve merkezi arasında oluşan sıcaklık farkı frenleme başlangıcında (0,008 s) 85,99 °C, ortasında (5,406 s) 43,27 °C ve sonunda (7,58 s) 10,69 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum $8,1055e-16$ W/mm² ve maksimum 0,021925 W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Frenlemenin sonunda başlangıç durumuna göre sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %91,74; frenlemenin 5,406’ıncı saniyesinde frenleme başlangıcına göre oluşan sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %64,75 ve frenleme sonunda frenlemenin 5,406’ıncı saniyesine göre oluşan sıcaklık düşüşünde, taşınım etkisinin ise %76,57 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Diskin merkezinde sıcaklık düşüşleri gözlenirken, diskin dış yarıçapında sürtünme meydana geldiği için maksimum sıcaklık değeri elde edilmiştir. Deliklerin olduğu bölgeler sürtünmeye maruz kalmadığından minimum sıcaklık değerleri gözlenmiştir. Toplam ısı akısı görseli incelendiğinde ise disk merkezinde ısı akısı değerleri daha yüksek çıkarken, diskin dış yarıçapında minimum değerler elde edilmiştir.



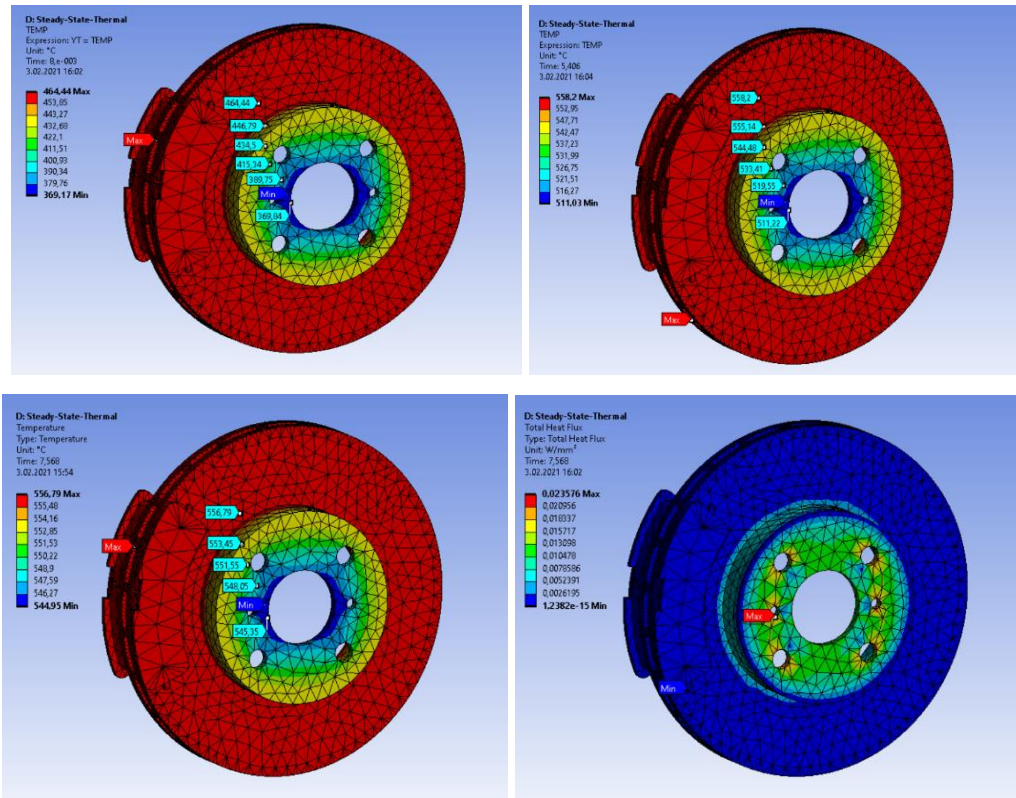
Şekil 3.7 421-520 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

Disk fren için yapılan termal analiz de 444-542 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.8’de görüldüğü gibi diskin farklı bölgelerinde farklı sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Maksimum ve minimum değerler arasındaki fark frenleme başlangıcında (0,008 s) 91,02 °C, ortasında (5,406 s) 45,12 °C ve sonunda (7,582 s) 11,72 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum $1,3251e-15$ W/mm² ve maksimum $0,023344$ W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Frenlemenin sonunda başlangıç durumuna göre sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %91,33; frenlemenin 5,406’ncı saniyesinde frenleme başlangıcına göre oluşan sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %64,61 ve frenleme sonunda frenlemenin 5,406’ncı saniyesine göre oluşan sıcaklık düşüşünde, taşınım etkisinin ise %75,52 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Diskte deliklerin bulunduğu kısım sürtünmeye maruz kalmadığından, minimum sıcaklık değerleri gözlenmiştir. Sürtünmenin meydana geldiği diskin dış yarıçapında ise sıcaklık maksimum değere ulaşmıştır. Analizde ki maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark daha önce yapılan analizlere kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Toplam ısı akısı görseli incelendiğinde ise disk merkezinde ısı akısı değerleri daha yüksek çıkarken, diskin dış yarıçapında minimum değerler elde edilmiştir.



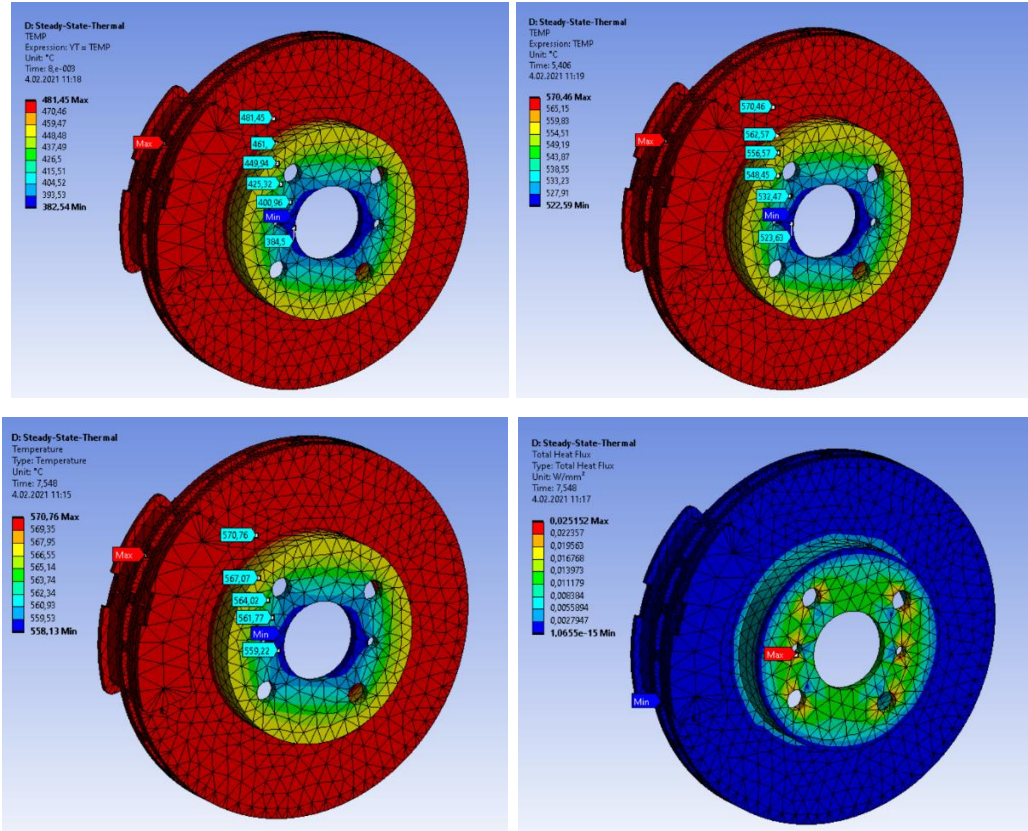
Şekil 3.8. 444-542 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

Yapılan frenleme analizinde 464-556 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.9’da görüldüğü gibi diskin maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark frenleme başlangıcında (0,008 s) 95,27 °C, ortasında (5,406 s) 47,17 °C ve sonunda (7,568 s) 11,84 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum $1,2382e-15$ W/mm² ve maksimum $0,023576$ W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Frenlemenin sonunda başlangıç durumuna göre sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %91,49; frenlemenin 5,406’ıncı saniyesinde frenleme başlangıcına göre oluşan sıcaklık farkındaki düşüşte, taşınım etkisinin %64,13 ve frenleme sonunda frenlemenin 5,406’ıncı saniyesine göre oluşan sıcaklık düşüşünde, taşınım etkisinin ise %76,27 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Diskin merkezinde minimum sıcaklık değerleri elde edilirken sürtünmenin meydana geldiği diskin dış yarıçapında maksimum sıcaklık değerleri oluşmuştur. Yapılan daha önceki analizlere göre daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu analizde diskin dış yarıçapı ve merkezi arasındaki sıcaklık farkının arttığı gözlemlenmiştir. Isı akısı ise taşınımın daha etkin olduğu bölgelerde daha yüksek değerlere ulaşmıştır ve bir önceki analize kıyasla daha yüksek maksimum değer elde edilmiştir.



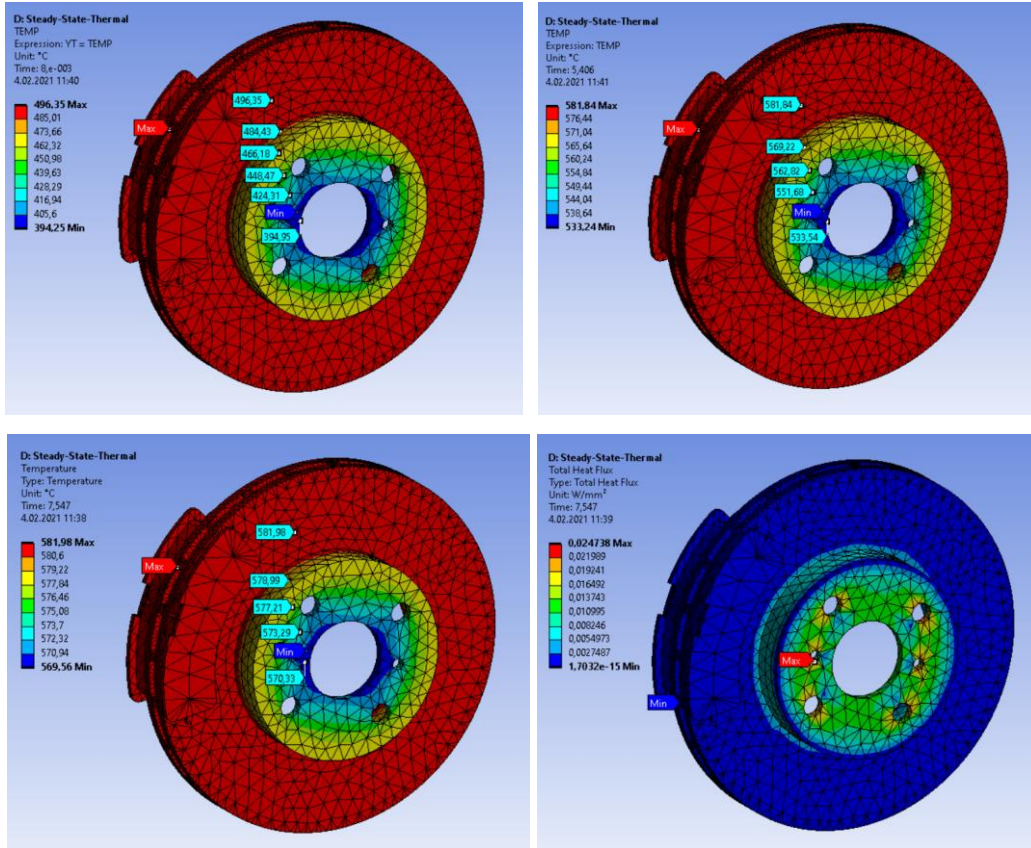
Şekil 3.9. 464-556 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

Frenleme gerçekleşirken 481-570 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.10'da görüldüğü gibi diskin dış yarıçapı ve merkezi arasında oluşan sıcaklık farkı frenleme başlangıcında (0,008 s) 98,91 °C, ortasında (5,406 s) 47,87 °C ve sonunda (7,548 s) 12,63 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum 1,0655e-15 W/mm² ve maksimum 0,025152 W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Diskin merkezinde sıcaklık düşüşleri gözlenirken, diskin dış yarıçapında sürtünme meydana geldiği için maksimum sıcaklık değeri elde edilmiştir. Deliklerin olduğu bölgeler sürtünmeye maruz kalmadığından minimum sıcaklık değerleri gözlenmiştir. Toplam ısı akısı görseli incelendiğinde ise disk merkezinde ısı akısı değerleri daha yüksek çıkarken, diskin dış yarıçapında minimum değerler elde edilmiştir. Kulkarni ve ark. (2016) tarafından yapılan benzer bir çalışmada geçişli termal analiz yapılarak diskin dış yarıçapında maksimum sıcaklıklar elde edilirken, diskin merkezinde minimum sıcaklıklar tespit edilmiştir. Isı akısı görsellerinde ise diskin dış yarıçapında minimum, disk merkezinde maksimum değerler elde edilmiştir [43].



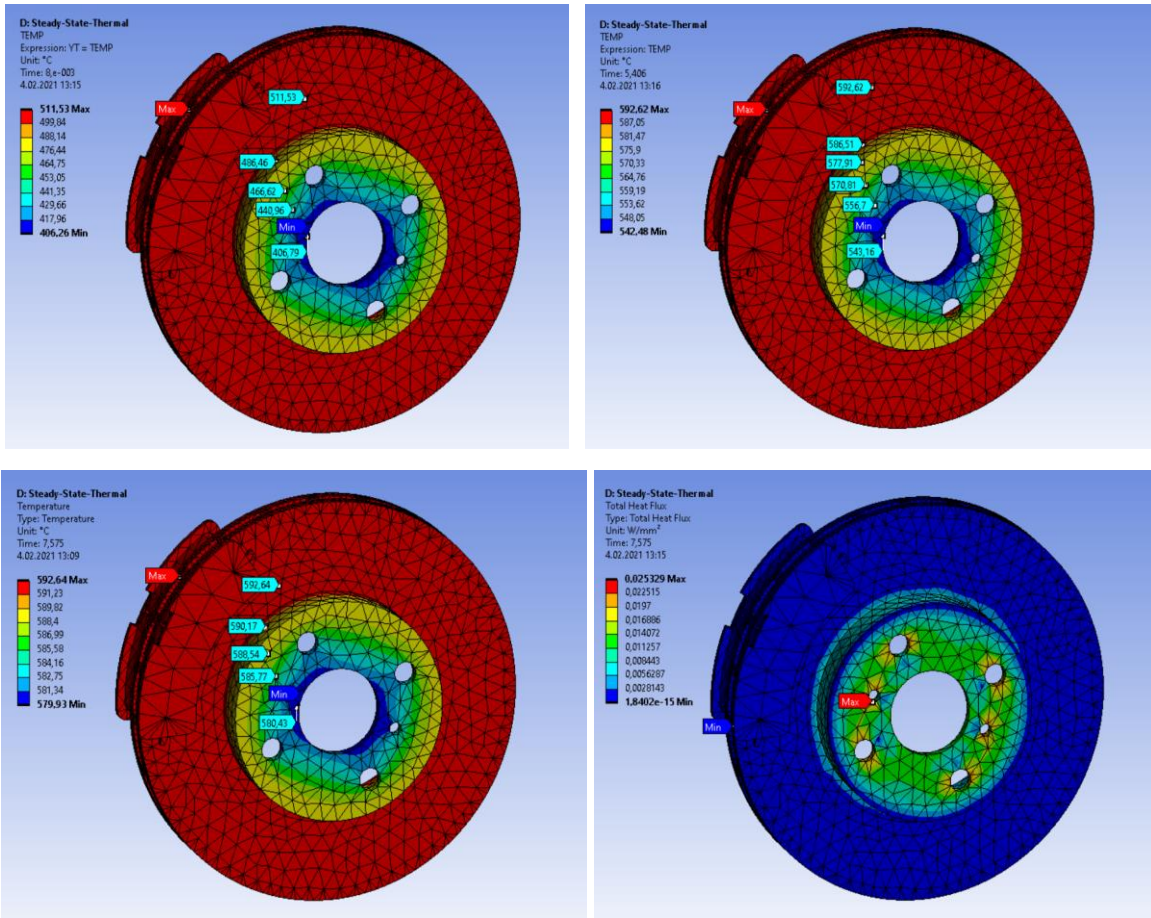
Şekil 3.10. 481-570 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

Disk fren için yapılan termal analiz de 496-581 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.11’de görüldüğü gibi diskin farklı bölgelerinde farklı sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Maksimum ve minimum değerler arasındaki fark frenleme başlangıcında (0,008 s) 102,10 °C, ortasında (5,406 s) 48,60 °C ve sonunda (7,547 s) 12,42 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum $1,7032e-15$ W/mm² ve maksimum $0,024738$ W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Diskte deliklerin bulunduğu kısım sürtünmeye maruz kalmadığından, minimum sıcaklık değerleri gözlenmiştir. Sürtünmenin meydana geldiği diskin dış yarıçapında ise sıcaklık maksimum değere ulaşmıştır. Toplam ısı akısı görseli incelendiğinde ise disk merkezinde ısı akısı değerleri daha yüksek çıkarken, diskin dış yarıçapında minimum değerler elde edilmiştir. Jian ve Shui (2017) tarafından yapılan benzer bir çalışmada sürtünmenin olduğu disk balata temas bölgelerinde maksimum sıcaklık değerleri elde edilmiş ve sıcaklık dağılımının da homojen gerçekleşmediği belirtilmiştir. Bu bulgular, Şekil 3.3’deki tespitleri doğrulamaktadır [45].



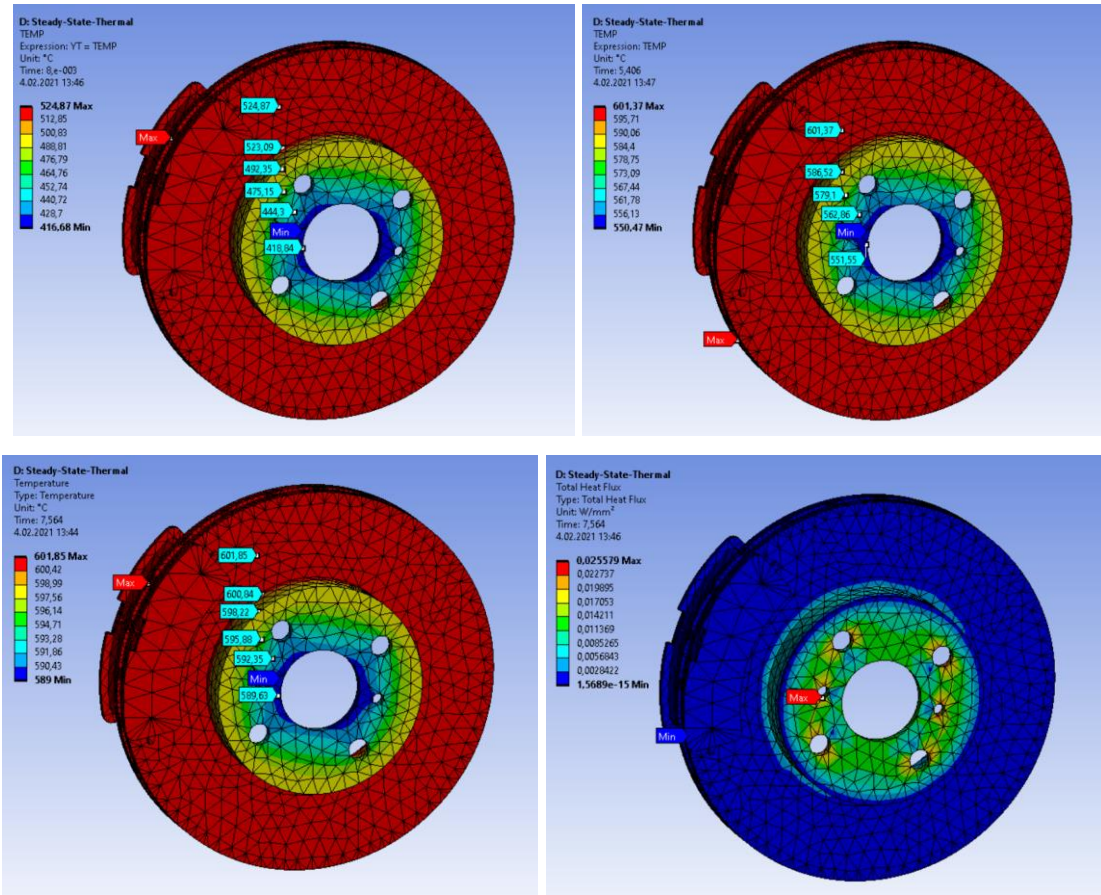
Şekil 3.11. 496-581 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

Yapılan frenleme analizinde 511-593 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.12’de görüldüğü gibi diskin maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark frenleme başlangıcında (0,008 s) 105,27 °C, ortasında (5,406 s) 50,14 °C ve sonunda (7,575 s) 12,71 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum $1,8402e-15$ W/mm² ve maksimum $0,025329$ W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Diskin merkezinde minimum sıcaklık değerleri elde edilirken, sürtünmenin meydana geldiği diskin dış yarıçapında maksimum sıcaklık değerleri oluşmuştur. Yapılan daha önceki analizlere göre daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu analizde diskin dış yarıçapı ve merkezi arasındaki sıcaklık farkının arttığı gözlemlenmiştir. Isı akısı ise diskin dış yarıçapında minimum, diskin merkezinde maksimum değerlere ulaşmış ve bir önceki analize kıyasla daha yüksek değerler tespit edilmiştir. Saiz ve ark. (2015) tarafından yapılan benzer bir çalışmada sıcaklık değerlerinin temas bölgelerinde daha yüksek olduğu görülmüştür [42].



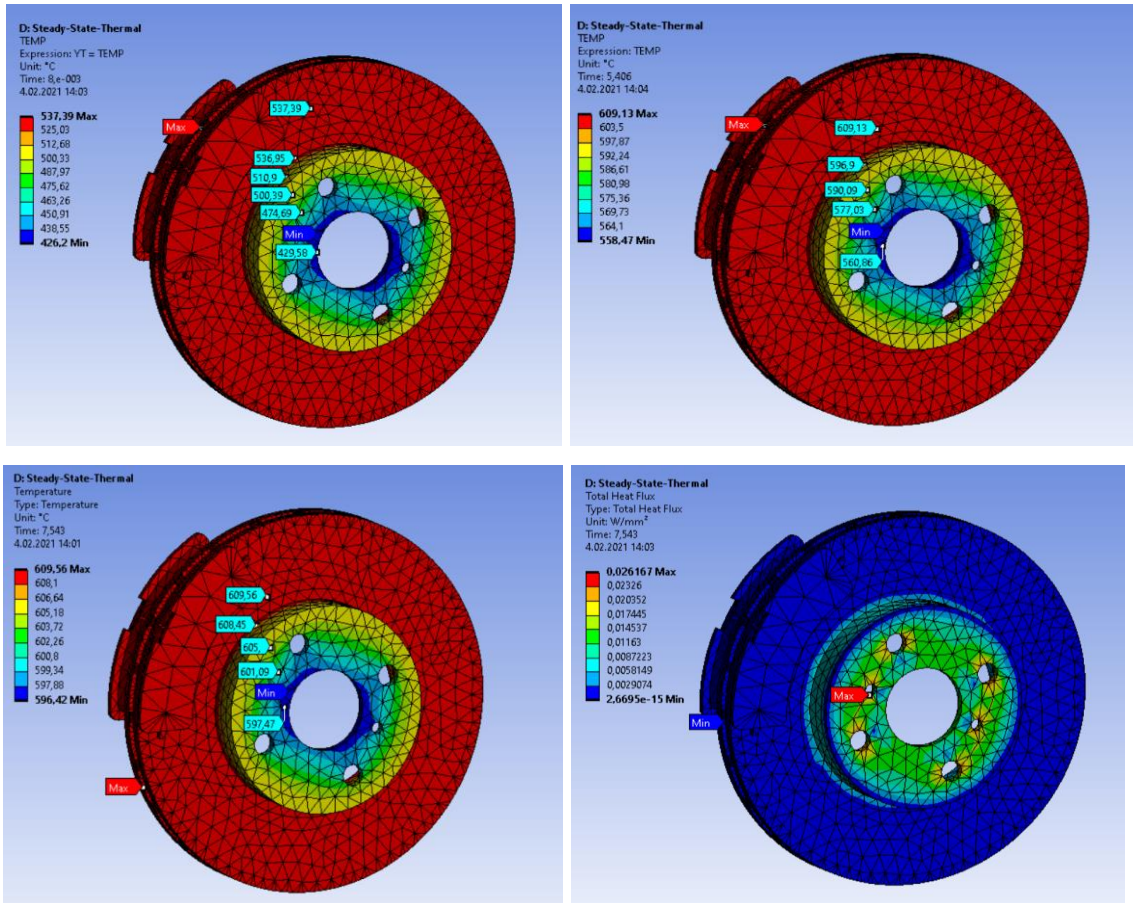
Şekil 3.12. 511-593 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

Frenleme gerçekleşirken 524-602 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.13’de görüldüğü gibi diskin dış yarıçapı ve merkezi arasında oluşan sıcaklık farkı frenleme başlangıcında (0,008 s) 108,19 °C, ortasında (5,406 s) 50,90 °C ve sonunda (7,564 s) 12,85 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum $1,5689e-15$ W/mm² ve maksimum 0,025579 W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Diskin merkezinde sıcaklık düşüşleri gözlenirken, diskin dış yarıçapında sürtünme meydana geldiği için maksimum sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Deliklerin olduğu bölgeler sürtünmeye maruz kalmadığından, minimum sıcaklık değerleri gözlenmiştir. Toplam ısı akısı görseli incelendiğinde ise disk merkezinde ısı akısı değerleri daha yüksek çıkarken, diskin dış yarıçapında minimum değerler elde edilmiştir. Belhocine ve Bouchetara (2012c) tarafından yapılan fren disklerinin termal davranışlarının incelendiği bir çalışma da katı ve hava kanallı diskin dış yarıçapında maksimum sıcaklıklar elde edilirken, disk merkezinde daha düşük sıcaklık değerleri tespit edilmiştir [34].



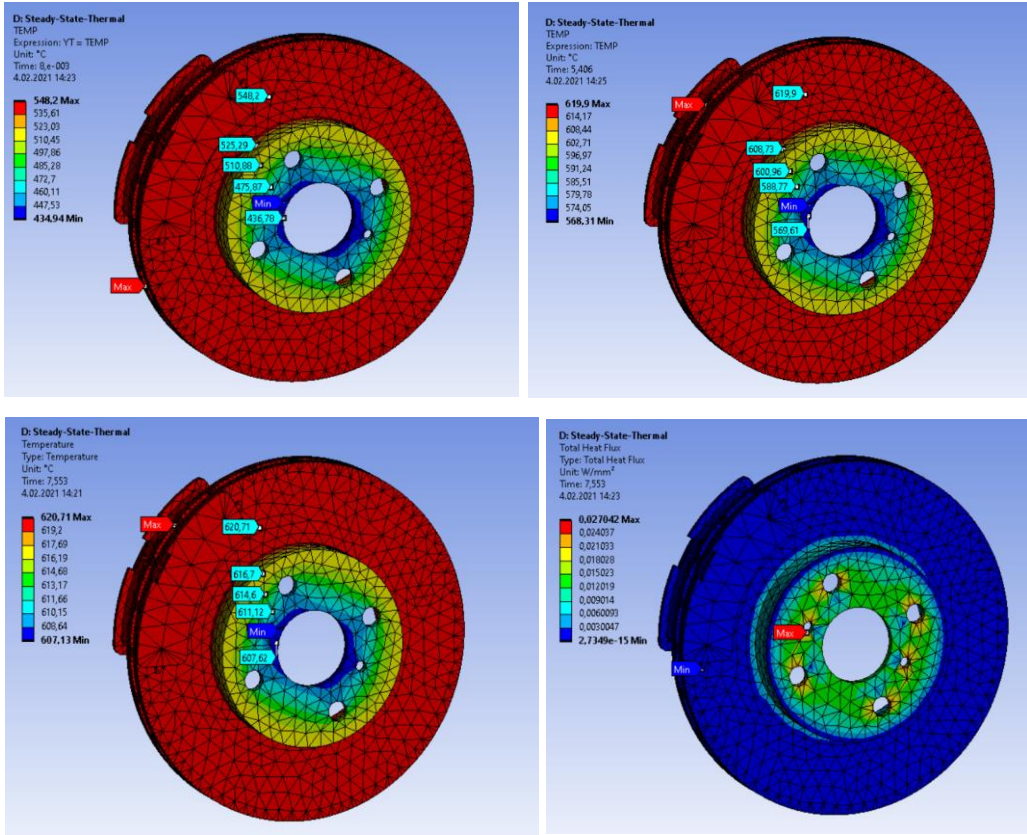
Şekil 3.13. 524-602 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

Disk fren için yapılan termal analiz de 537-610 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.14’de görüldüğü gibi diskin farklı bölgelerinde farklı sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Maksimum ve minimum değerler arasındaki fark frenleme başlangıcında (0,008 s) 111,19 °C, ortasında (5,406 s) 50,66 °C ve sonunda (7,543 s) 13,14 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum 2,6695e-15 W/mm² ve maksimum 0,026167 W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Diskte deliklerin bulunduğu kısım sürtünmeye maruz kalmadığından, minimum sıcaklık değerleri gözlenmiştir. Sürtünmenin meydana geldiği diskin dış yarıçapında ise sıcaklık maksimum değere ulaşmıştır. Toplam ısı akısı görseli incelendiğinde ise disk merkezinde ısı akısı değerleri daha yüksek çıkarken, diskin dış yarıçapında minimum değerler elde edilmiştir. Gao ve ark. (2007) tarafından yapılan benzer bir çalışmada üç boyutlu bir termo-mekanik modelde sıcaklık dağılımının sürtünme yüzeylerinde maksimum sıcaklık değerleri elde edilmiştir [15].



Şekil 3.14 537-610 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

Yapılan frenleme analizinde 548-620 °C sıcaklık aralığında Şekil 3.15’de görüldüğü gibi diskin maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark frenleme başlangıcında (0,008 s) 113,26 °C, ortasında (5,406 s) 51,59 °C ve sonunda (7,553 s) 13,58 °C olmuştur. Toplam ısı akısı minimum $2,7349e-15$ W/mm² ve maksimum 0,027042 W/mm² olduğu tespit edilmiştir. Diskin merkezinde minimum sıcaklık değerleri elde edilirken, sürtünmenin meydana geldiği diskin dış yarıçapında maksimum sıcaklık değerleri oluşmuştur. Yapılan daha önceki analizlere göre daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu analizde diskin dış yarıçapı ve merkezi arasındaki sıcaklık farkının arttığı gözlemlenmiştir. Isı akısı ise deliklerin bulunduğu diskin merkezinde daha yüksek değerlere ulaşmıştır ve bir önceki analize kıyasla daha yüksek maksimum değer elde edilmiştir. Babukanth ve Teja (2012) tarafından yapılan benzer bir çalışmada dökme demir diskin sıcaklık dağılımı incelendiğinde disk merkezinde minimum sıcaklık değerleri oluşurken diskin dış yarıçapında maksimum sıcaklık değerleri tespit edilmiştir [31].



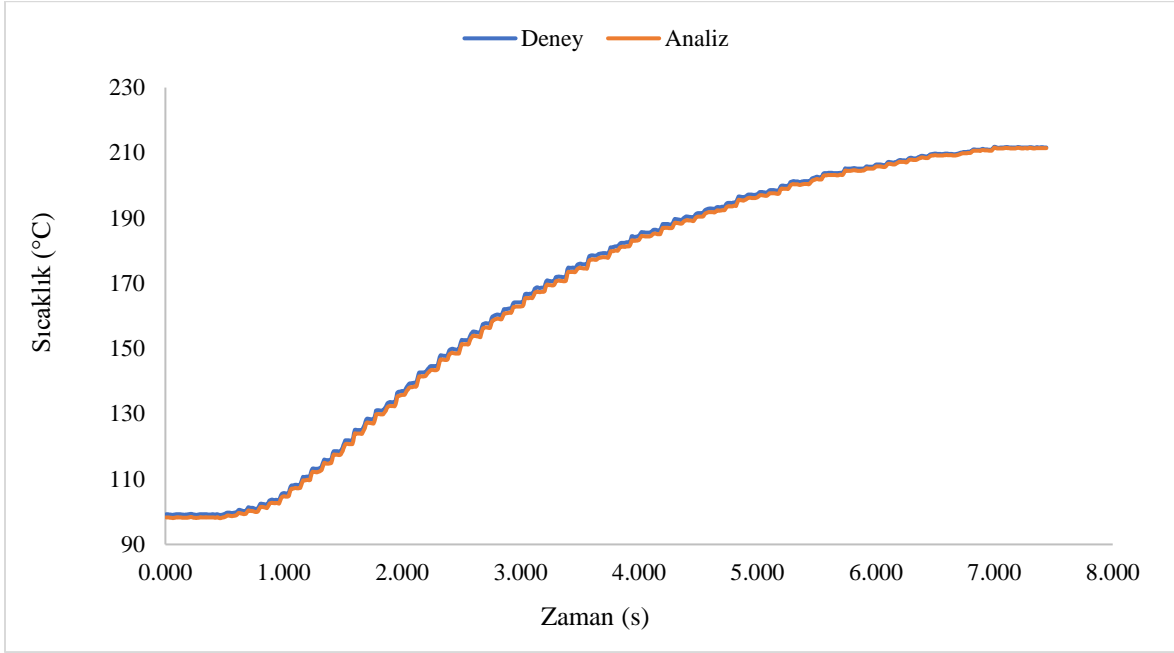
Şekil 3.15 548-620 °C Sıcaklık Aralığında Termal Analizdeki Sıcaklık ve Toplam Isı Akısı

3.2. Sabit Durum Termal Analiz Sonu Sıcaklık Bulguları

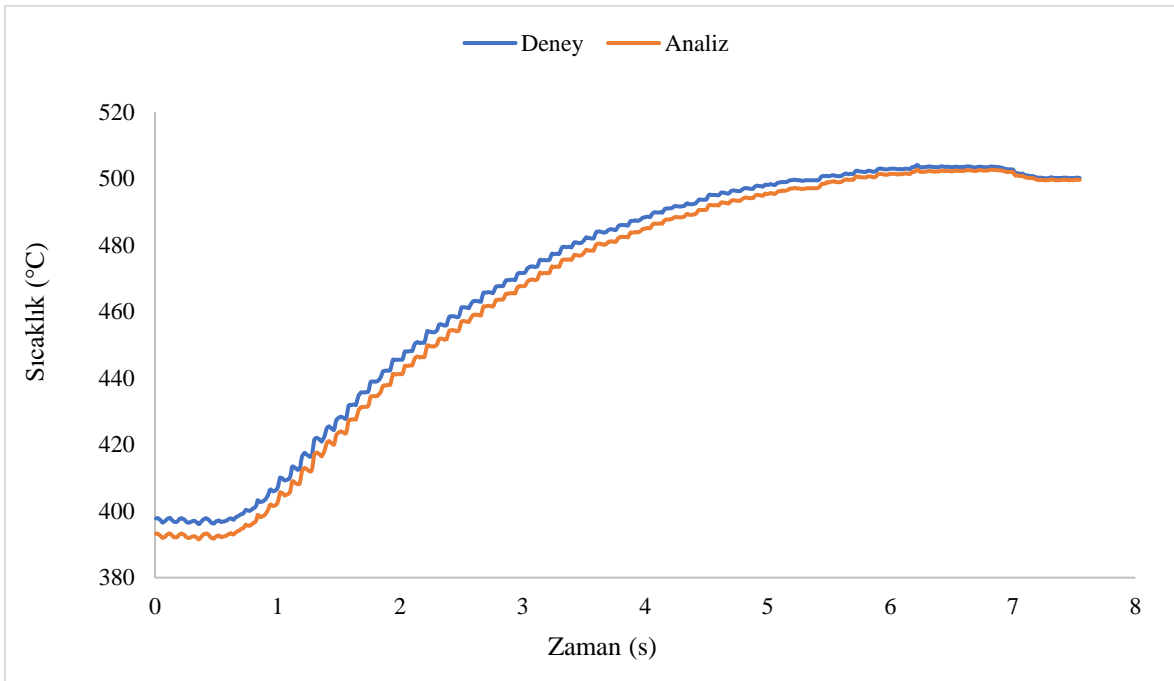
Fren diskinin soğutulması, iletim, taşınım ve ışıyım gibi modlar tarafından yönetilen karmaşık bir olgudur. Bu modlardan biri olan taşınım, araç hareket halindeyken fren diskinden ısı transferinin en önemli mekanizmasıdır. Disk sıcaklığı hava sıcaklığının üzerine çıktığında, sıcaklık farkından dolayı havaya doğru bir enerji (ısı) alışverişi gerçekleşir. Bu süreçte fren disklerindeki sıcaklık aralıkları için, Prandtl sayısı çok az değişiklik gösterir. Bu yüzden taşınımın fren diski ile temas halinde olan hava arasındaki sıcaklık farkından oluşmasına rağmen, disk yüzeyine yakın akışın dinamiğine bağlı olduğu söylenebilir. Akışın dinamiğine bakıldığında ise yüksek hızlı akışlar, büyük sıcaklık gradyanları oluşturur. Yani, yüksek hızlı akışlar için düşük hızlı akışlardan daha fazla miktarda ısı taşınmaktadır. Diskin etrafındaki akışın hızı ise diskin açısal hızından etkilenmekte ve bu durum ısı taşınım katsayısına yansiyarak diskteki soğuma miktarlarına etki etmektedir. Araç belirli bir hızdan frenlemeye başladığında açısal hızın düşüşüyle birlikte ısı taşınım katsayısı da düşmektedir. Düşük ısı taşınım katsayısı değerleri ise özellikle bir disk için daha düşük düzeyde transfer edilen enerjiye karşılık gelmektedir. Bu tespitler analiz sonucunda elde edilen sıcaklık verilerine yansımıştır. Disk-balata ikilisi için yapılan çalışmada 15 frenleme için deneyden alınan sıcaklık verileri ile analiz sonucunda elde edilen sıcaklık verilerinden 99-212 °C, 397-500 °C ve 548-620 °C sıcaklık aralığı Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de sırasıyla verilmiştir. Bunların haricindeki karşılaştırmalı grafiklerin tamamı ise EK 2’de sunulmuştur. 99-212 °C sıcaklık aralığı için deney verileri ile analiz verileri karşılaştırıldığında, küçük bir miktarda fark tespit edilmiştir. Bu fark frenleme başlangıcında 0,95792 °C ve frenlemenin sonunda ise 0,25003 °C olmuştur. Aynı sıcaklık aralığında frenlemenin sonunda başlangıca göre soğutma miktarındaki azalış, taşınım etkisinin %91,15 oranında azalmasından kaynaklanmıştır.

397-500 °C sıcaklık aralığı için deney verileri ile analiz verileri karşılaştırıldığında, frenleme başlangıcında 2,18944 °C ve frenleme sonunda ise 0,36876 °C fark olduğu tespit edilmiştir. Aynı sıcaklık aralığında frenlemenin sonunda başlangıca göre soğutma miktarındaki azalış, taşınım etkisinin %91,35 oranında azalmasından kaynaklanmıştır. 99-212 °C sıcaklık

aralığında elde edilen bulgularla karşılaştırıldığında deney verileri ve analiz verileri arasındaki farkın daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

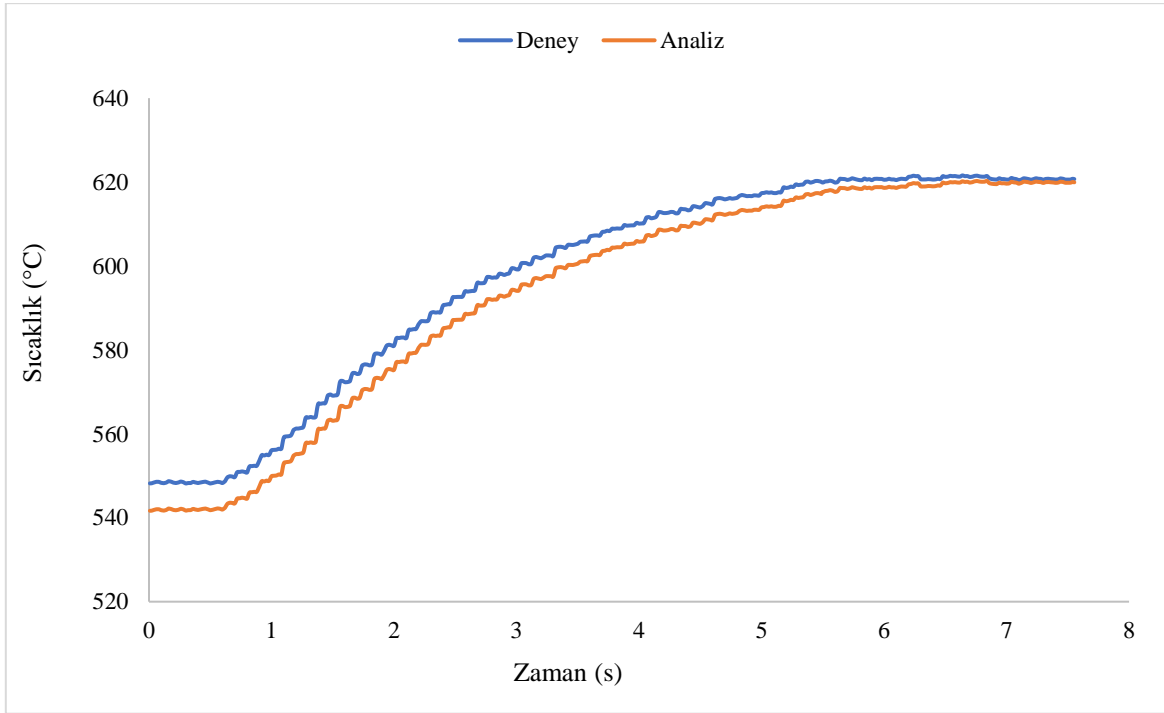


Şekil 3.16 99-212 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



Şekil 3.17. 397-500 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları

548-620 °C sıcaklık aralığı için deney verileri ile analiz verileri karşılaştırıldığında frenleme başlangıcında 6,52815 °C ve frenleme sonunda ise 0,77216 °C fark olduğu tespit edilmiştir. Aynı sıcaklık aralığında frenlemenin sonunda başlangıca göre soğutma miktarındaki azalış, taşınım etkisinin %91,27 oranında azalmasından kaynaklanmıştır. 99-212 °C ve 548-620 °C sıcaklık aralıklarında elde edilen bulgularla karşılaştırıldığında 548-620 °C için analizde oluşturulan ısı taşınım katsayısı verilerinin disk sıcaklıklarının düşüşü üzerinde etkisinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.18. 548-620 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları

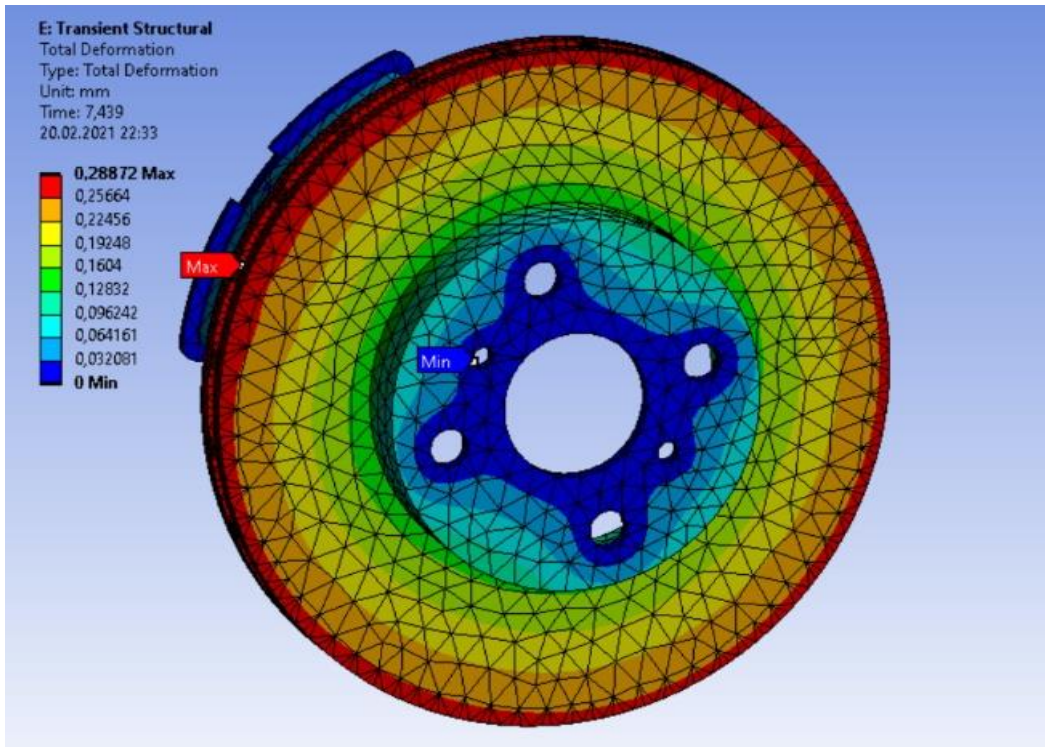
Sıcaklık aralığı artışı ile beraber taşınımın sıcaklık düşüşü üzerinde etkisinin belirginleştiği ve frenleme başlangıcındaki sıcaklık düşüş miktarlarının frenleme sonundaki sıcaklık düşüş miktarlarından yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum ısı taşınım katsayısı değerlerinin açısal hızın bir fonksiyonu olması ile açıklanır. Açısal hız değeri düştükçe ısı taşınım katsayısı değeri düştüğü için frenleme başlangıcına kıyasla frenleme sonunda taşınımın soğutma üzerine etkisi azalmaktadır.

3.3 Sabit Durum Termal/Geçişli Yapısal Analiz (Multi-Fizik Çalışma) Bulguları

Sabit durum termal/geçişli yapısal analiz bağlamında toplam deformasyon ve Von-Misses gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.3.1 Toplam Deformasyon

Frenleme sonu maksimum toplam deformasyon değeri 0,28872 mm olarak tespit edilmiştir. Fren diski deformasyonunun diskin radyal yönünde arttığı ve diskin dış yarıçapında maksimum değerlere ulaştığı görülmüştür. Termal yüke bağlı oluşan deformasyon, disk kesitinden bakıldığında simetrik olmayan bir hal almıştır. Şekil 3.19 incelendiğinde balatanın diske basınç uyguladığı kısımdan itibaren dıştan içe doğru deformasyon değerlerinin azaldığı ve deliklerin olduğu disk merkezinde minimum değerlere ulaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.19. Geçişli Yapısal Analiz Toplam Deformasyon

Aynı zamanda frenleme sonu deformasyon dağılımında diskin dış yarıçapındaki kırmızı bölge kalınlığının değişkenlik gösterdiği ve bu kalınlığın diskin balata ile temas halinde olduğu bölgeden itibaren dönüş yönünde azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum diskin kendi

ekseni etrafındaki dönüşü esnasında disk balata temasının kesintili olması, yüzey koşulları ve basınç dağılımındaki değişkenlik gibi hususlardan kaynaklanmıştır. Farklı temas koşulları beraberinde dalgalı formda renk skalası oluşturmuştur. Geçişli yapısal analizden elde edilen bu bulgulardan hareketle disk balata temasındaki lineer olmayan durumların deformasyon oluşumunda etkili olduğu ifade edilebilir. Benzer şekilde Kulkarni ve ark. (2016), Belhocine (2017) ve Belhocine ve Bouchetara (2012a, 2012b, 2012c, 2013a, 2013b ve 2014) tarafından yapılan benzer çalışmalarda disk balata ikilisinin temas bölgelerinde maksimum, disk merkezinde ise minimum deformasyon değerleri tespit edilmiştir [32-37,43,44].

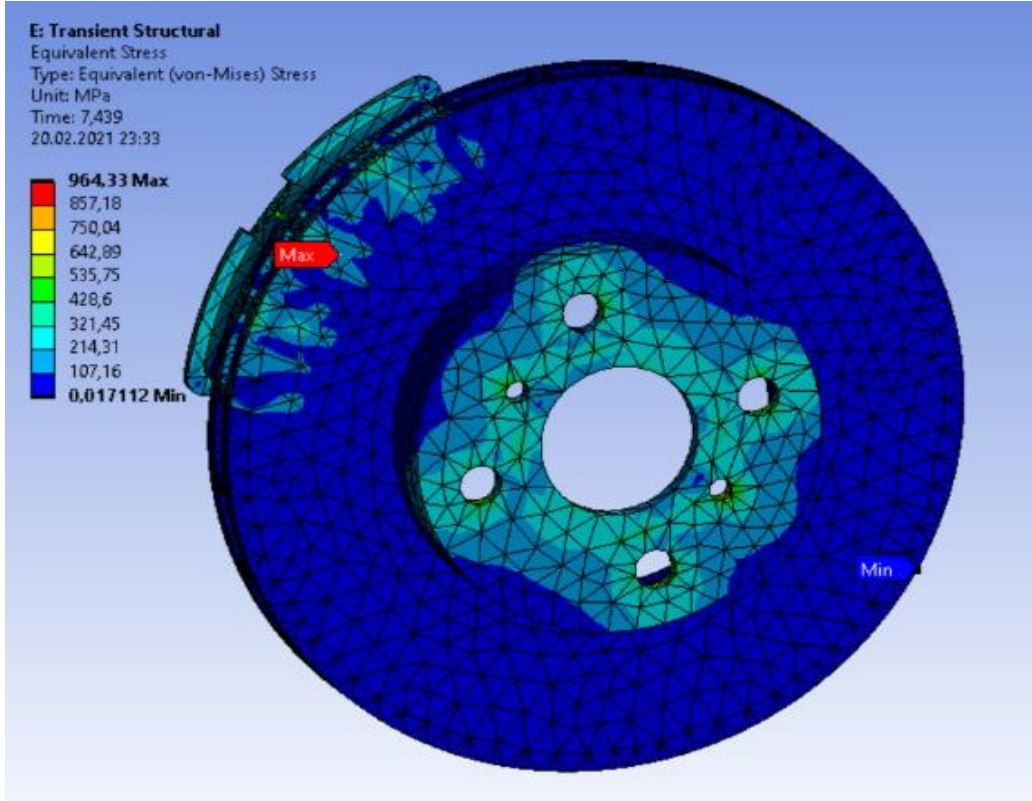
3.3.2 Von-Misses Gerilme

Frenleme esnasında disk kendi eksenini etrafında dönüşünü gerçekleştirirken diskin iki yüzeyine temas eden balatalar tarafından basınç uygulanması suretiyle disk durmaya zorlanmış ve etki eden dış etkiler diskte iç kuvvetlerin yani gerilmelerin oluşmasına sebep olmuştur. Şekil 3.20 incelendiğinde 0,017112 MPa ve 964,33 MPa arasında değişen gerilme değerleri meydana gelmiştir.

Disk deliklerden sabitlendiği bölgelerde ve disk-balata ikilisinin temas bölgesinde yüksek gerilme değerleri oluşmuştur. Diskin yüzeyine dik olarak uygulanan basınç disk yüzeyinde basma gerilmesi oluşturmuştur. Aynı zamanda diskin delik bölgelerinden yapılan sabitlemeler ve sahip olduğu dairesel kesitten dolayı balatalardan uygulanan basıncın etkisi ile durmaya zorlanan diskte burulma gerilmeleri de meydana gelmiştir. Disk yapısal olarak incelediğimizde deliklerin olduğu bölgeler de kesit ani bir değişime uğramış ve yapıda süreksizlik meydana getirmiştir. Bu durum diskin delik bölgelerinde gerilme yığılması oluşturmuştur. Elastik sınırlar içerisinde tekrarlı yüklemelere maruz kalan diskin gerilme yığılmalarının olduğu bölgeler de zamanla yorulma sebebiyle malzeme de çatlaklar ve çatlakların yayılması ile ani kırılmalar meydana gelebilir. Gerilmelerin maksimum olduğu bölgelerin tekrarlı yüklemelere mukavemetli olması gerekmektedir.

Belhocine (2017), Saiz ve ark. (2015), Belhocine ve Bouchetara (2012a, 2012b, 2012c, 2013a, 2013b ve 2014) tarafından yapılan benzer çalışmalarda diskin delik bölgesinde maksimum gerilme değerleri diskin katı yüzeyinde minimum gerilme değerleri oluşmuştur

[32-37,42,44]. Bu çalışmadaki balata ile diskin temas ettiği bölgelerde oluşan basma gerilmesi Saiz ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmadaki ile benzerlik göstermiştir [42].



şekil 3.20. Geçişli Yapısal Analiz Equivalent Von-Misses Gerilim

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

SAE J2522 Kapsamlı Fren Etkinlik Test standardına göre sıcaklıkla fren zayıflaması koşulunda gerçekleştirilen testlerden elde edilen verilerden yararlanılarak yapılan bu çalışmada frenleme esnasındaki ısı taşınım katsayısı değişimine sayısal bir yaklaşım getirilmiştir. Bu yaklaşımla elde edilen ısı taşınım katsayısı verileri ve deneysel çalışmadan alınan veriler disk-balata ikilisinin sabit durum termal analizinde kullanılmıştır. Ardından multi-fizik bir çalışma yapılarak termal yüklemelere bağlı geçişli yapısal analiz gerçekleştirilmiş ve diskte meydana gelen deformasyonlar ve gerilme değerleri incelenmiştir. Yapılan analizlerden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Isı taşınım katsayısı-açısal hız grafiklerinde açısal hızın 23,85 rad/s olduğu değerde meydana gelen kırılma, akışın hızının düşmesi ile birlikte Re sayısındaki değişimin belirli değerinden itibaren akışın türbülanslı halden laminer hale geçişini göstermiştir.
- Diskin dış yarıçapında maksimum sıcaklık değerleri oluşurken, beklendiği üzere merkezinde daha düşük sıcaklık değerleri tespit edilmiştir.
- Genel olarak taşınım etkisinin; frenlemenin sonunda, başlangıç durumuna göre sıcaklık farkındaki düşüşte %91,15 ile %91,74; frenlemenin 5,406'ncı saniyesinde frenleme başlangıcına göre oluşan sıcaklık farkındaki düşüşte %64,13 ile %73,35 ve frenleme sonunda frenlemenin 5,406'ncü saniyesine göre oluşan sıcaklık düşüşünde ise %68,04 ile %76,57 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
- Tüm tekrarlı frenlemelerde frenleme başlangıcındaki soğutma miktarlarının frenleme sonundaki soğutma miktarlarından yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum ısı taşınım katsayısı değerlerinin açısal hızın bir fonksiyonu olduğu ile açıklanabilir.
- Frenleme sonu maksimum toplam deformasyon değeri 0,28872 mm olarak tespit edilmiştir.
- Frenleme sonunda 0,017112 MPa ile 964,33 MPa arasında değişen gerilme değerleri elde edilmiştir.
- Diskin merkezinden dışa doğru radyal yönde artan deformasyon değerleri elde edilmiş ve diskten dış yarıçapında deformasyon değeri maksimuma ulaşmıştır.

- Diskin delikli bölgelerinden yapılan sabitlemelerin ve balatalardan uygulanan basıncın etkisiyle diskin delik bölgelerinde yüksek Von Mises gerilmeleri tespit edilmiştir.
- Frenleme anında diskin sıcaklığının maksimuma ulaştığı bölgeler de deformasyon değerleri de maksimuma ulaşmıştır. Bu durum termal yüklemelerin yapısal bölümdeki toplam deformasyon ile ilişki içerisinde olduğunu göstermiştir.
- Termal yüklemelerle beraber yapısal yüklemeler disk-balata ikilisinde sıcaklık, deformasyon ve gerilme artışıyla birlikte zamanla diskte yorulma ve çatlak oluşumu gibi durumlara sebep olabilir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlarla birlikte disk-balata ikilisinin termo-mekanik davranışında oluşan yüksek deformasyon ve gerilmeler tekrarlı yüklemeler karşısında ki yorulma ve ömür analizlerinin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca disk ile beraber balatalarda oluşan gerilme ve deformasyonlar daha sonraki çalışmalar da ayrıntılı bir şekilde incelenebilir. Bu çalışmada ortalama bir sürtünme katsayısı değeri alınarak analizler yapılmıştır. Ancak sürtünme katsayısı disk-balata çiftinin frenleme performansı için önemli bir faktördür. İleriye yönelik yapılacak olan çalışmalarda disk balata ikilisindeki sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi de incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Demir, A. (2009) Fren Disklerine Uygulanan Kaplamaların Frenleme Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye.
- [2] Amrish, P.N., (2016) Computer Aided Design and Analysis of Disc Brake Rotors. *Advances in Automobile Engineering*, 5(2), 257-301.
- [3] Dhir, K.D. (2018) Thermo-mechanical Performance of Automotive Disc Brakes. *Materialstoday Proceedings*, 5(1), 1864-1871.
- [4] Göktaş, A., Güney, A., Ereke, M. (1995) Taşıt Frenleri. Alliedsignal Automotive, Panel Matbaacılık, ISBN 975-95017-0-8, Türkiye.
- [5] Bryant, D. (2010) Thermo-elastic Deformation of a Vented Brake Disc. Doctoral Thesis, University of Huddersfield, England.
- [6] Rashid, A. (2014) Overview of Disc Brakes and Related Phenomena - a Review. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 10(4), 257-301.
- [7] Belhocine, A., Bouchetara, M. (2012c) Thermal Analysis of a Solid Brake Disc. *Applied Thermal Engineering*, 32, 59-67.
- [8] Lee, K. (1999) Numerical Prediction of Brake Fluid Temperature Rise During Braking and Heat Soaking. SAE Technical Paper Series, 1999-01-0483.
- [9] Yan, H.B., Zhang, Q.C., Lu, T.J. (2016) Heat Transfer Enhancement by X-type Lattice in Ventilated Brake Disc. 107, 39-55.
- [10] Çengel, Y.A., Ghajar, A.J. (2015) Heat and Mass Transfer. Fifth edition, McGraw-Hill Education, ISBN 978-0-07-339818-1, New York.
- [11] Moran, M.J., Shapiro, H.N., Munson, B.R., DeWitt, D.P. (2003) Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer. John Wiley & Sons, Inc., 405-467.

- [12] Bergman, T.L., Lavine, A.S. (2017) Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, Inc., ISBN: 978-1-119-32042-5, USA.
- [13] Voller, G. P., Tirovic, M., Morris, R., Gibbens, P. (2003) Analysis of Automotive Disc Brake Cooling Characteristics. Proc. Instn Mech. Engrs, 217, 657-666.
- [14] Choi, J. H., Lee, I. (2004) Finite Element Analysis of Transient Thermoelastic Behaviors in Disk Brakes. Wear 257, 47–58.
- [15] Gao, C. H., Huang, J. M., Lin, X. Z., Tang, X. S. (2007) Stress Analysis of Thermal Fatigue Fracture of Brake Disks Based on Thermomechanical Coupling. Journal of Tribology, 129, 536-543.
- [15] Talati, F., Jalafiar, S. (2008) Investigation of Heat Transfer Phenomena in a Ventilated Disk Brake Rotor with Straight Radial Rounded Vanes. Journal of Applied Sciences, 8(20), 3583-3592.
- [16] Talati, F., Jalafiar, S. (2008) Investigation of Heat Transfer Phenomena in a Ventilated Disk Brake Rotor with Straight Radial Rounded Vanes. Journal of Applied Sciences, 8(20), 3583-3592.
- [17] Koç, O. (2009) Fren Balata Sisteminde Sürtünme Sonucu Oluşan Isı Transferi ve Termal Gerilme Analizi, Yüksek Lisans, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, Türkiye.
- [18] Shahzamanian, M.M., Sahari, B.B., Bayat, M., Ismarrubie, Z.N., Mustapha, F. (2010) Transient and Thermal Contact Analysis for the Elastic Behavior of Functionally Graded Brake Disks Due to Mechanical and Thermal Loads. Materials and Design 31, 4655–4665.
- [19] Yevtushenko, A.A., Kuciej, M. (2010) Influence of the Convective Cooling and the Thermal Resistance on the Temperature of the Pad/Disc Tribosystem. International Communications in Heat and Mass Transfer 37, 337–342.

- [20] Zhang, L., Meng, D. (2010) Theoretical Modeling and FEM Analysis of the Thermo-mechanical Dynamics of Ventilated Disc Brakes. SAE International, 2010-01-0075.
- [21] Nejat, A., Aslani, M., Mirzakhali, E., Najian, A.R. (2011) Heat Transfer Enhancement in Ventilated Brake Disk Using Double Airfoil Vanes. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, Vol. 3 / 045001-1.
- [22] Adamowicz, A., Grzes, P. (2011) Influence of convective cooling on a disc brake temperature distribution during repetitive braking. Applied Thermal Engineering 31, 2177-2185.
- [23] Yevtushenko, A.A., Grzes, P. (2011) Finite element analysis of heat partition in a pad/disc brake system. Numerical Heat Transfer, 59 (7), 521–542.
- [24] Yevtushenko, A.A., Grzes, P. (2012a) Axisymmetric finite element model for the calculation of temperature at braking for thermosensitive materials of a pad and a disc, Numerical Heat Transfer, 62 (3), 211–230.
- [25] Yevtushenko, A.A., Grzes, P. (2012b) Axisymmetric FEA of temperature in a pad/disc brake system at temperature-dependent coefficients of friction and wear. International Communications in Heat and Mass Transfer, 39 (8), 1045–1053.
- [26] Yevtushenko, A.A., Kuciej, M., Yevtushenko, O. (2011) Three-element model of frictional heating during braking with contact thermal resistance and time-dependent pressure. International Journal of Thermal Sciences 50, 1116-1124.
- [27] Adamowicz, A., Grzes, P., (2011a) Analysis of disc brake temperature distribution during single braking under non-axisymmetric load. Applied Thermal Engineering, 31 (6–7), 1003–1012.
- [28] Adamowicz, A., Grzes, P., (2011b) Influence of convective cooling on a disc brake temperature distribution during repetitive braking. Applied Thermal Engineering, 31(14–15), 2177–2185.

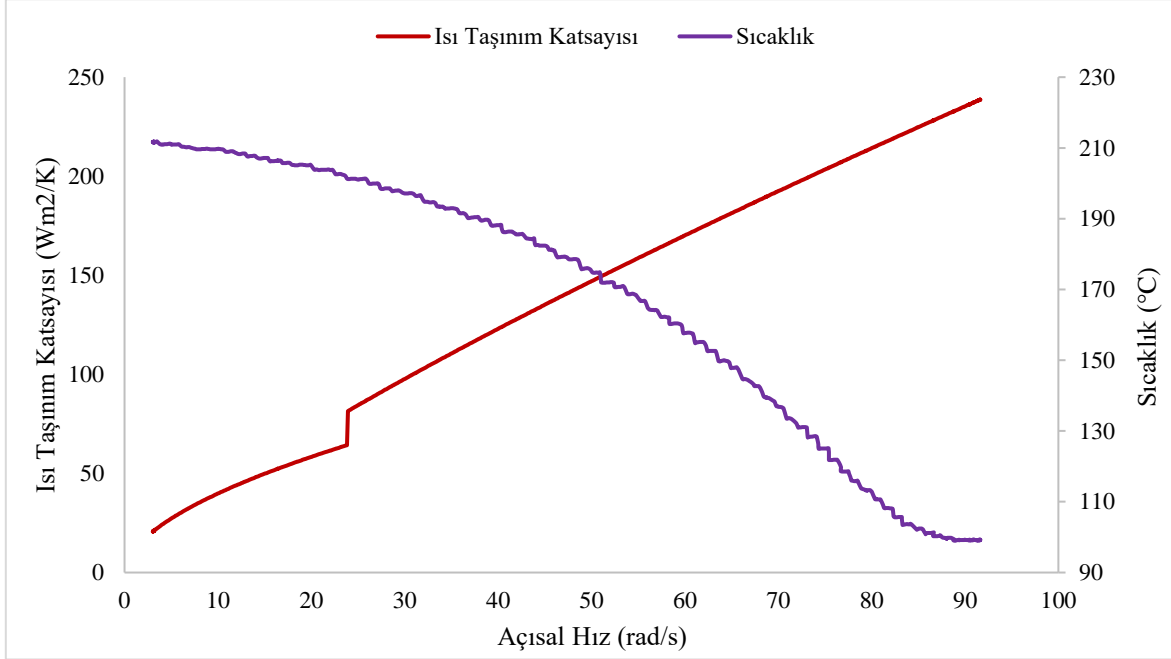
- [29] Adamowicz, A., Grzes, P., (2013) Three-dimensional FE model for calculation of temperature of a thermosensitive disc. *Applied Thermal Engineering*, 50 (1), 572–581.
- [30] Nathi, G.M., Charyulu, T.N., Gowtha, K., Reddy P.S. (2012) Coupled Structural / Thermal Analysis of Disc Brake. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, ISSN: 2319-1163, 1(4), 539-553.
- [31] Babukanth, G., Teja M.V. (2012) Transient Analysis of Disk Brake By using ANSYS® Software. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, ISSN: 2231 –6477, 2(1), 21-25.
- [32] Belhocine, A., Bouchetara, M. (2012a) Simulation of Fully Coupled Thermomechanical Analysis of Automotive Brake Discs. *Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 88(8), 921–935.
- [33] Belhocine, A., Bouchetara, M. (2012b) Thermomechanical modelling of dry contacts in automotive disc brake. *International Journal of Thermal Sciences* 60, 161-170.
- [34] Belhocine, A., Bouchetara, M. (2012c) Thermal analysis of a solid brake disc, *Applied Thermal Engineering* 32, 59-67.
- [35] Belhocine, A., Bouchetara, M. (2013a) Investigation of temperature and thermal stress in ventilated disc brake based on 3D thermomechanical coupling model. “*Ain Shams Engineering Journal* 4”, 475–483.
- [36] Belhocine, A., Bouchetara, M. (2013b) Thermomechanical modelling of disc brake contact phenomena. *FME Transactions* 41, 59-65.
- [37] Belhocine, A., Bouchetara, M. (2014) Structural and thermal analysis of automotive disc brake rotor. *Archive of Mechanical Engineering*, VOL. LXI, 89-113.
- [38] Alnaqi, A., Barton, D., Brooks, P. (2013) Thermal Performance of Monolithic and Coated Disc Brakes Using Abaqus and Matlab Software. *SIMULIA Community Conference*, 1-16.

- [39] Yevtushenko, A.A., Adamowicz, A., Grzes, P. (2013) Three-dimensional FE model for the calculation of temperature of a disc brake at temperature-dependent coefficients of friction. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 42,18-24.
- [40] Baranowski P, Damaziak K, Małachowski J. (2013) Brake system studies using numerical methods. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 15(4), 337–342.
- [41] Lakkam, S., Suwantaroj, K., Puangcharoenchai, P., Mongkonlerdmanee, S., Koetnuyom, S. (2013) Study of heat transfer on front– and back-vented brake discs. *Songklanakarin Journal Science Technology*, 35 (6), 671-681.
- [42] Saiz, C.B., Ingrassia, T., Nigrelli, V., Ricotta, V. (2015) Thermal stress analysis of different full and ventilated disc brakes. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 34, 608-621.
- [43] Kulkarni, A.S., Hegade, K.C., Karale, O.V., Joshi, P.S. (2016) Coupled Thermal and Structural Analysis of Brake Disc Rotor Manufactured from Aluminum Metal Matrix Composite (AMMC) reinforced with Silicon Carbide. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, ISSN: 2454-1362, 2(6), 1188-1194.
- [44] Belhocine, A. (2017) FE prediction of thermal performance and stresses in an automotive disc brake system. *Int J Adv Manuf Technol* 89, 3563–3578.
- [45] Jian, Q., Shui, Y. (2017) Numerical and experimental analysis of transient temperature field of ventilated disc brake under the condition of hard braking. *International Journal of Thermal Sciences* 122, 115-123.
- [46] Düzgün, M. (2014) Hava Soğutma Kanallı Fren Disklerinin Termo-Mekanik Özelliklerinin Sonlu Elemanlar Analizi Kullanılarak Geliştirilmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 625-635.
- [47] Limpert, R. (2001) *Brake Design and Safety*. Third Edition, Society of Automotive Engineers, Warrendale.

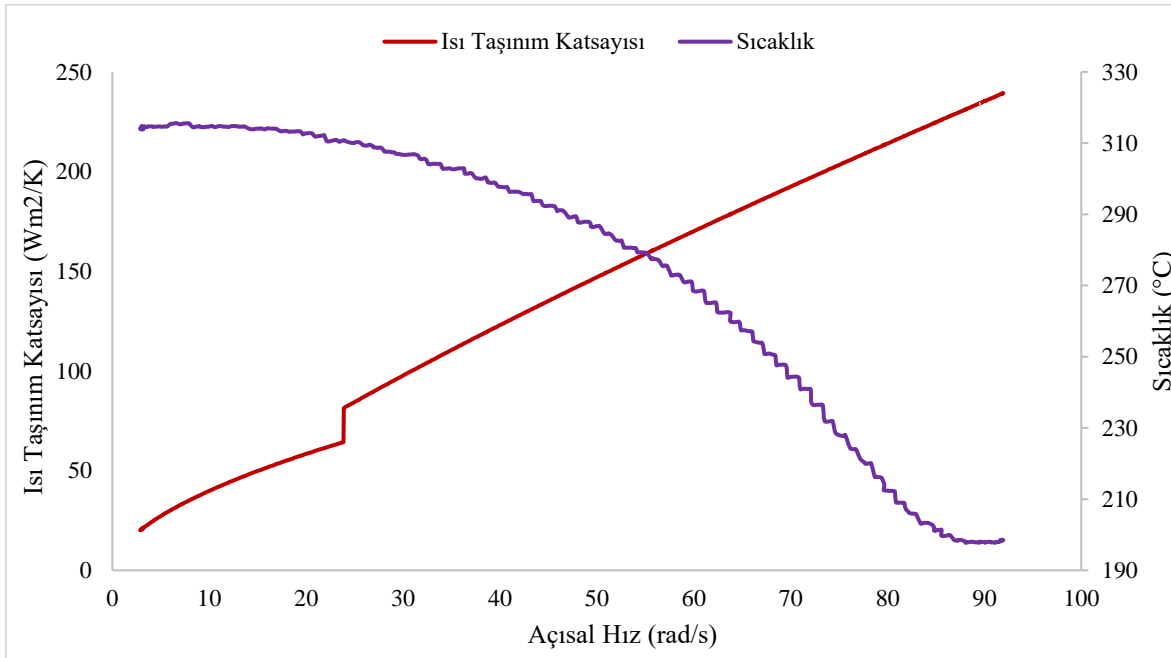
- [48] Lewis, R.W., Nithiarasu, P., Seetharamu, K.N. (2004) Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow. John Wiley & Sons Ltd, ISBN 0-470-84788-3, England.

EK 1

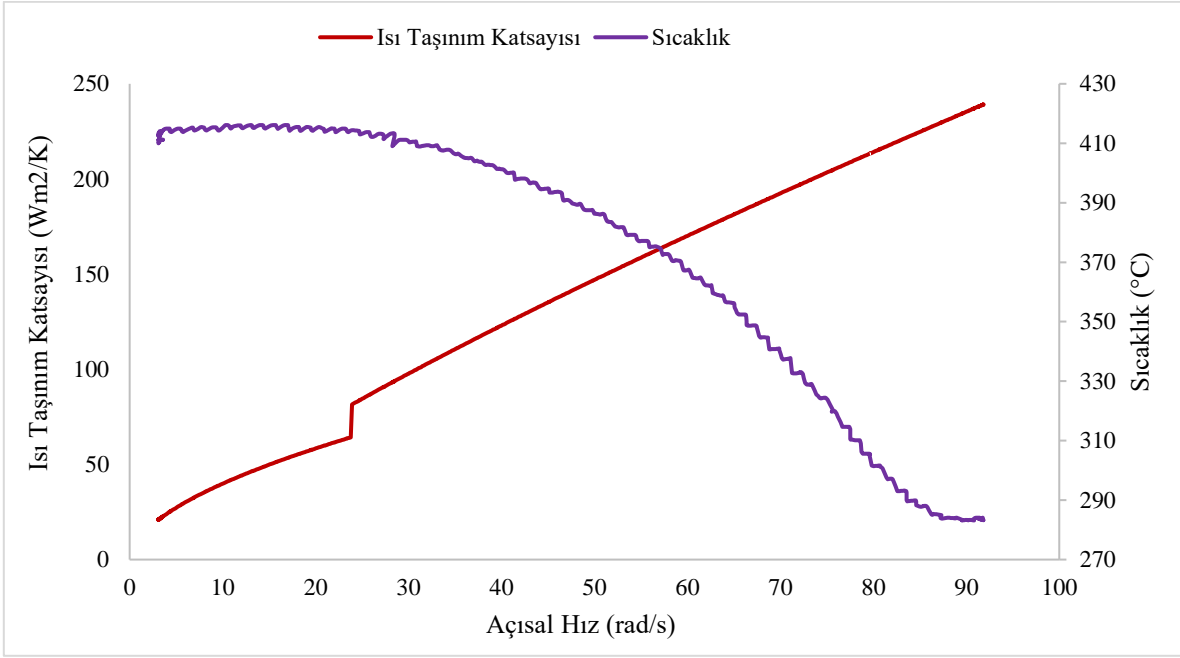
15 Frenleme için Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi



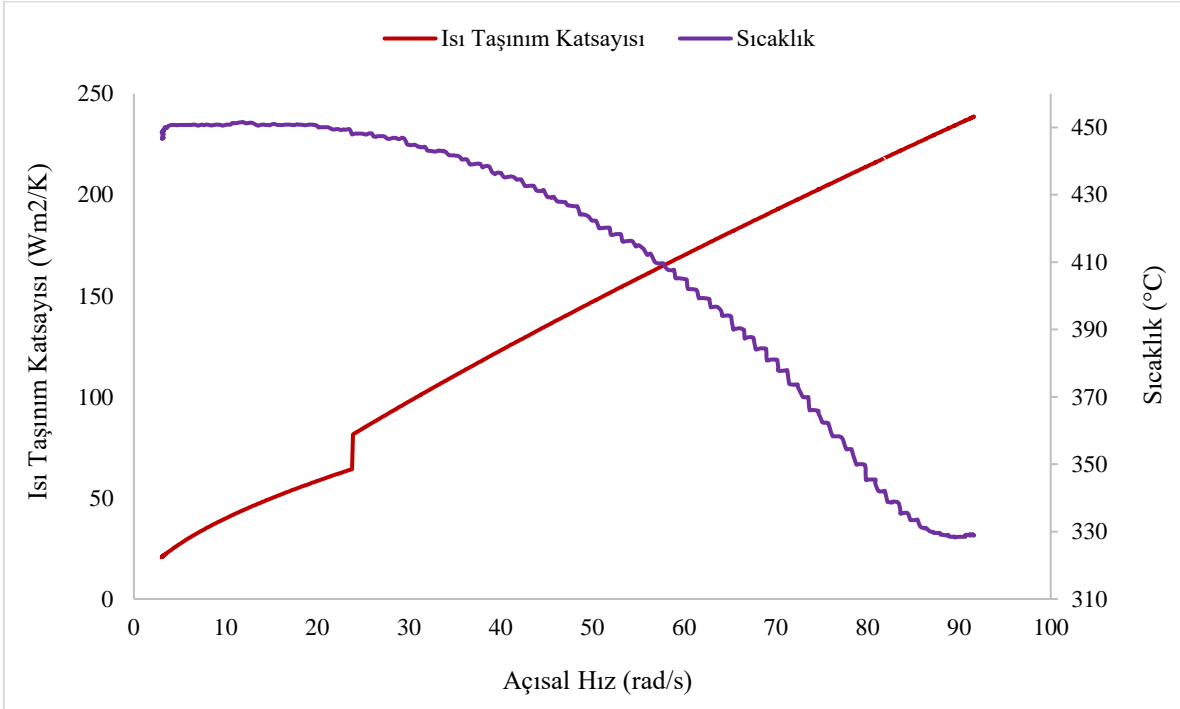
EK 1-Şekil 1. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (99-212 $^{\circ}C$ Sıcaklık Aralığı)



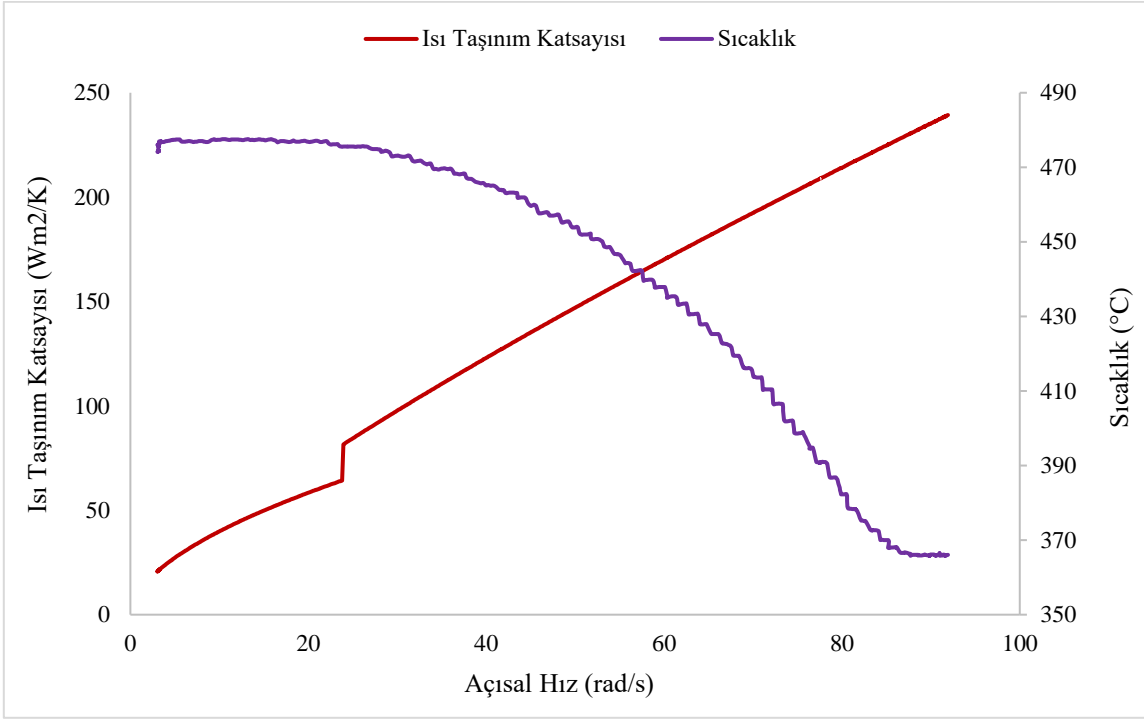
EK 1-Şekil 2. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (198-314 $^{\circ}C$ Sıcaklık Aralığı)



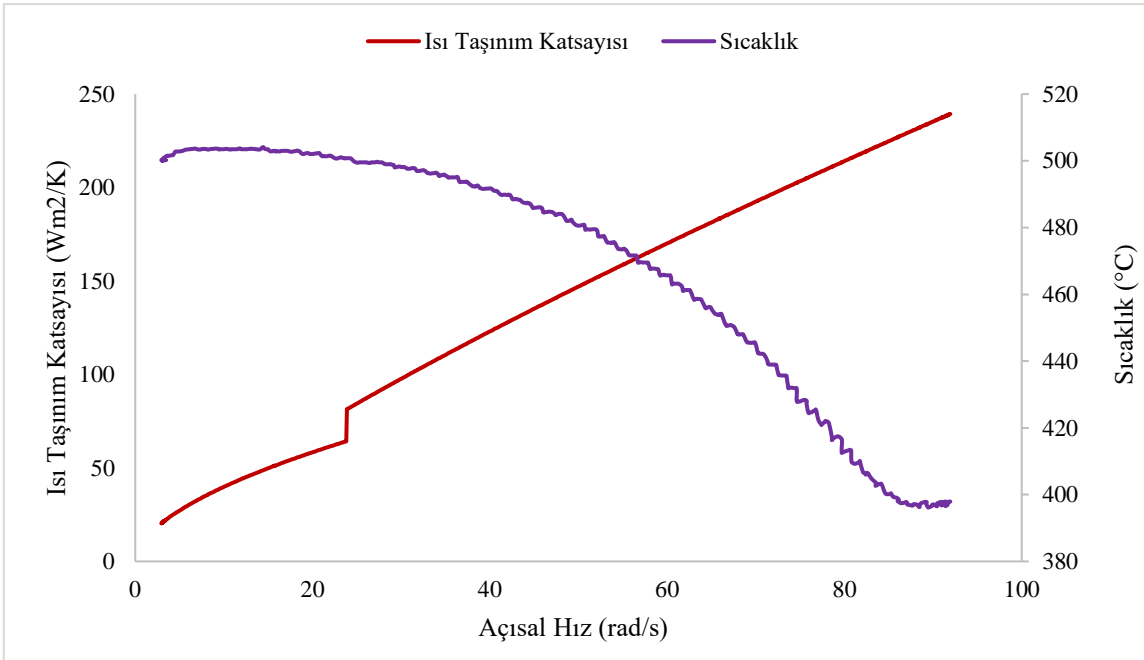
EK 1-Şekil 3. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (284-410 °C Sıcaklık Aralığı)



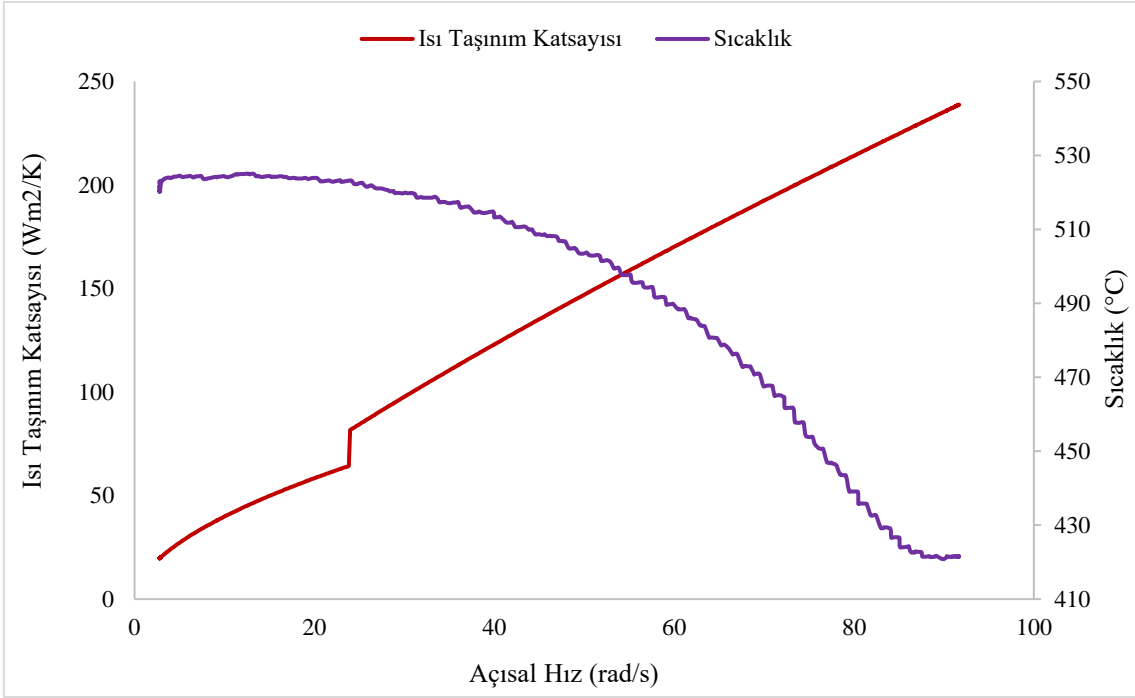
EK 1-Şekil 4. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (329-447 °C Sıcaklık Aralığı)



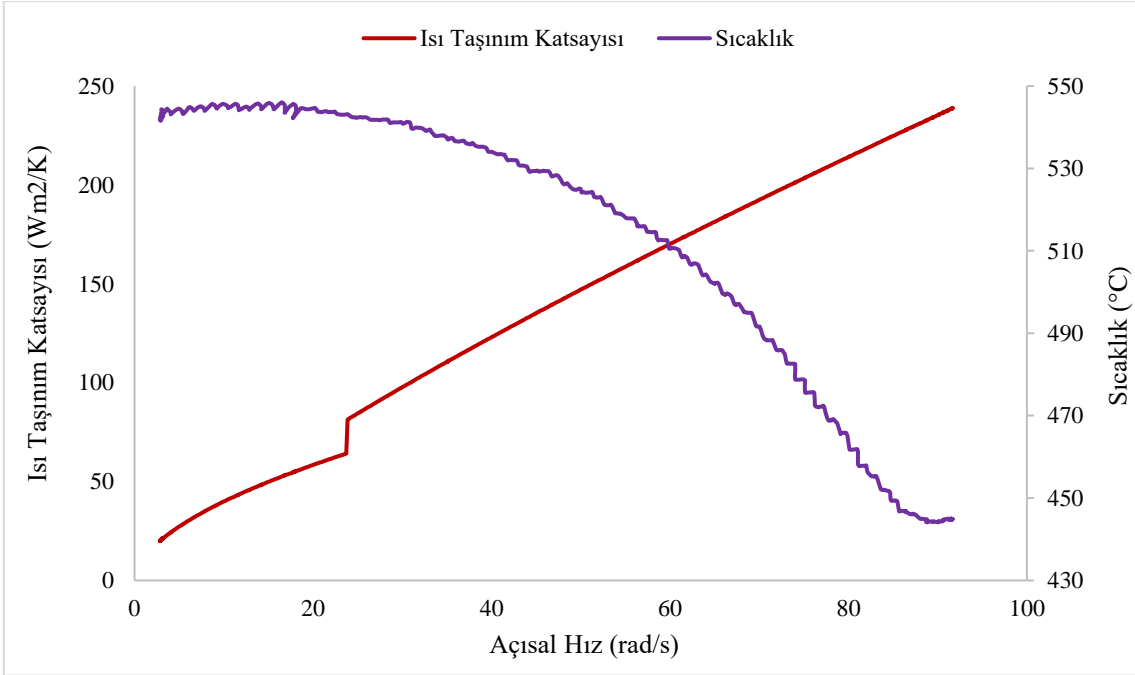
EK 1-Şekil 5. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (366-474 °C Sıcaklık Aralığı)



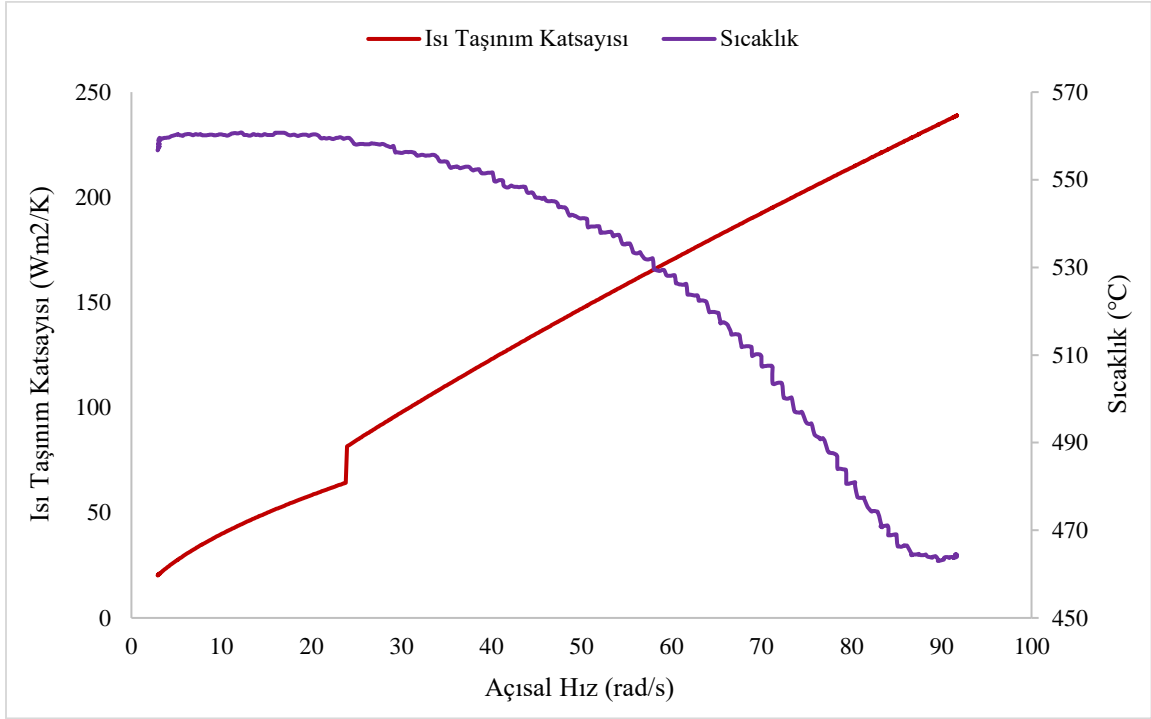
EK 1-Şekil 6. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (397-500 °C Sıcaklık Aralığı)



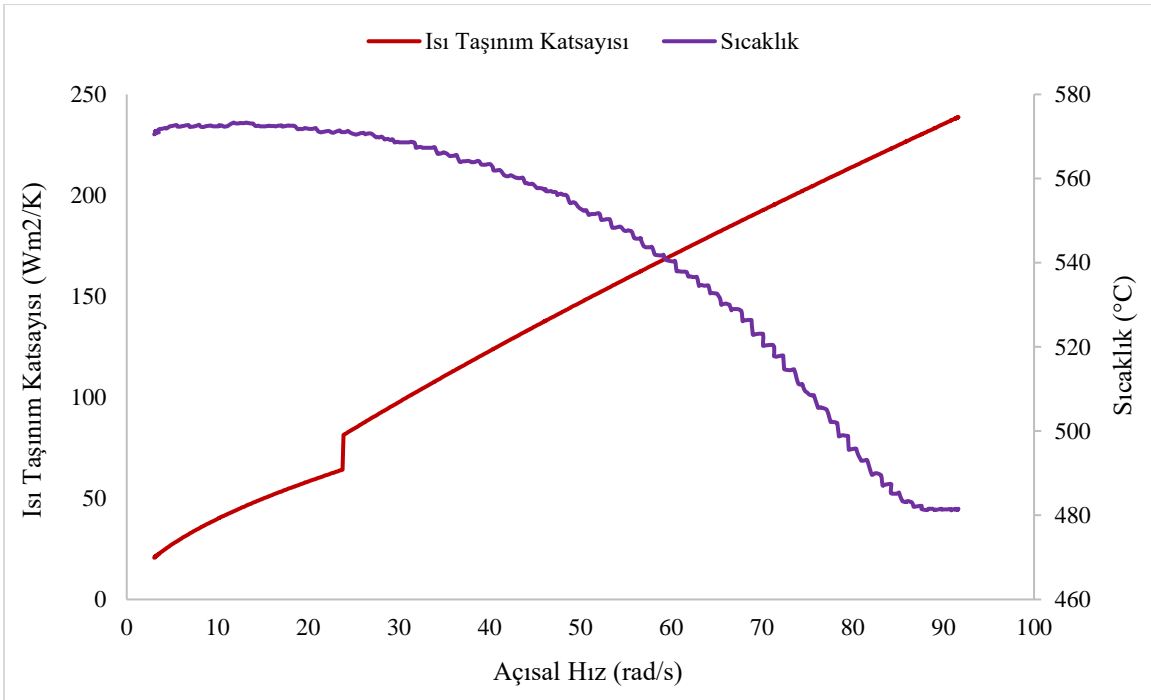
EK 1-Şekil 7. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (421-520 °C Sıcaklık Aralığı)



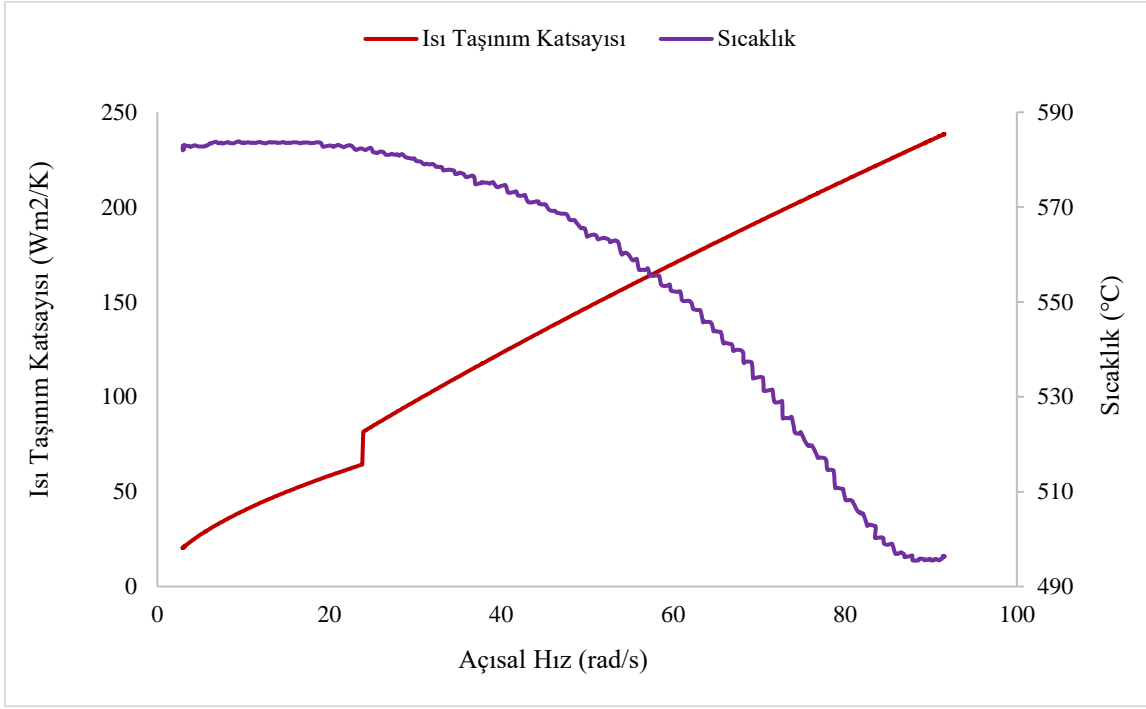
EK 1-Şekil 8. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (444-542 °C Sıcaklık Aralığı)



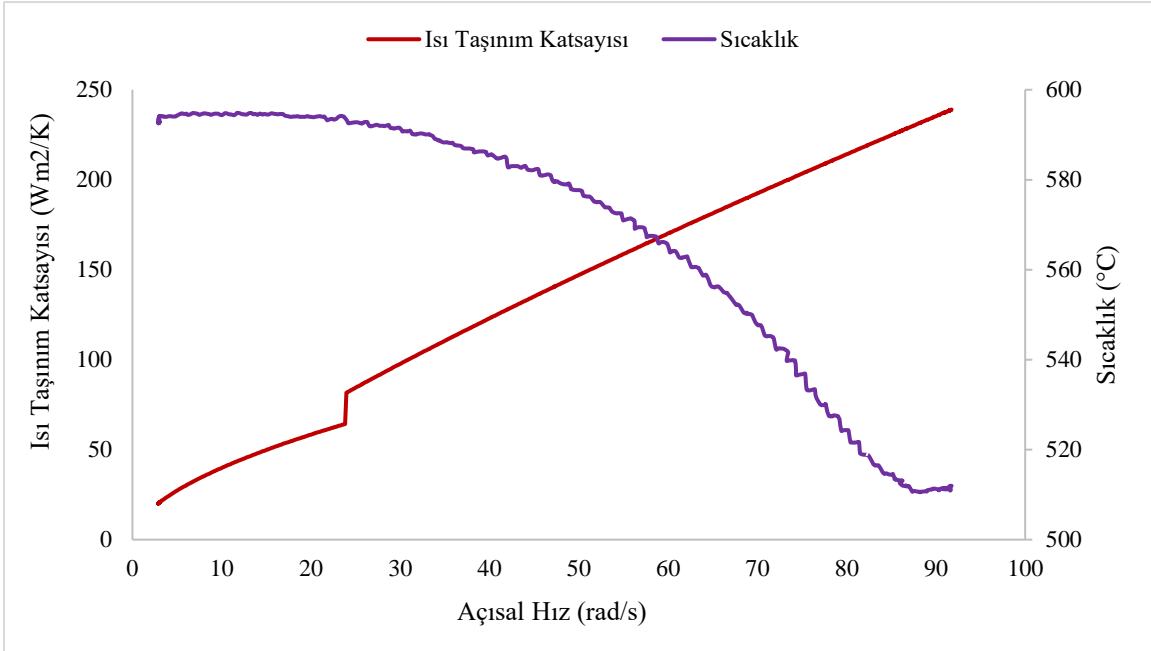
EK 1-Şekil 9. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (464-556 °C Sıcaklık Aralığı)



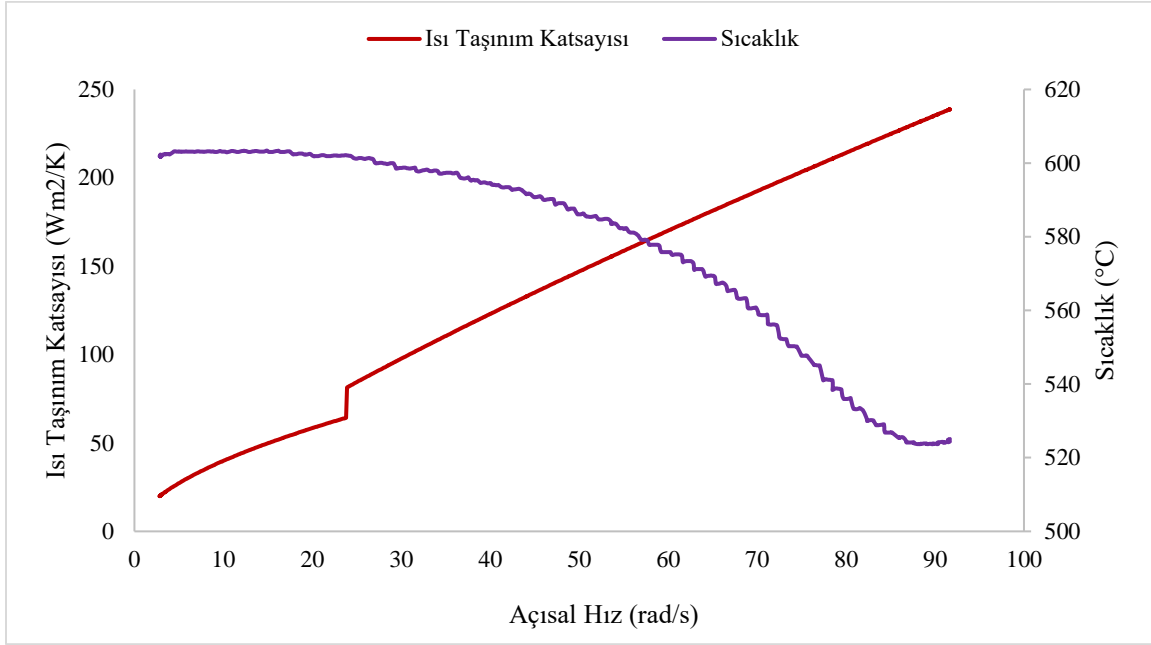
EK 1-Şekil 10. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (481-570 °C Sıcaklık Aralığı)



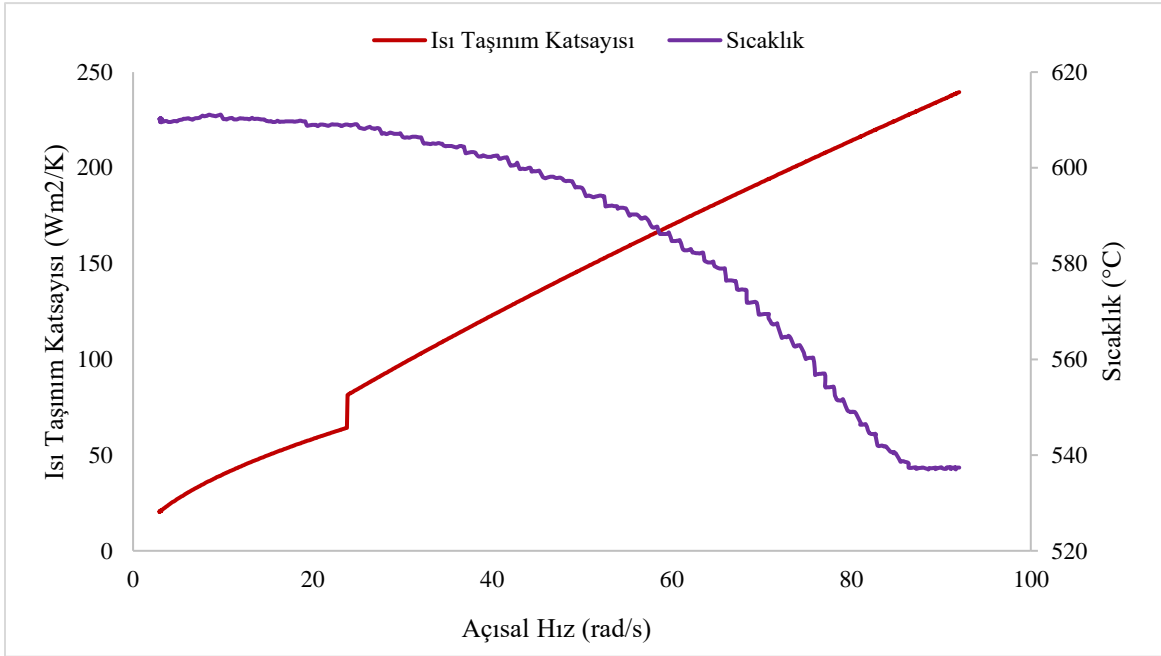
EK 1-Şekil 11. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (496-581 °C Sıcaklık Aralığı)



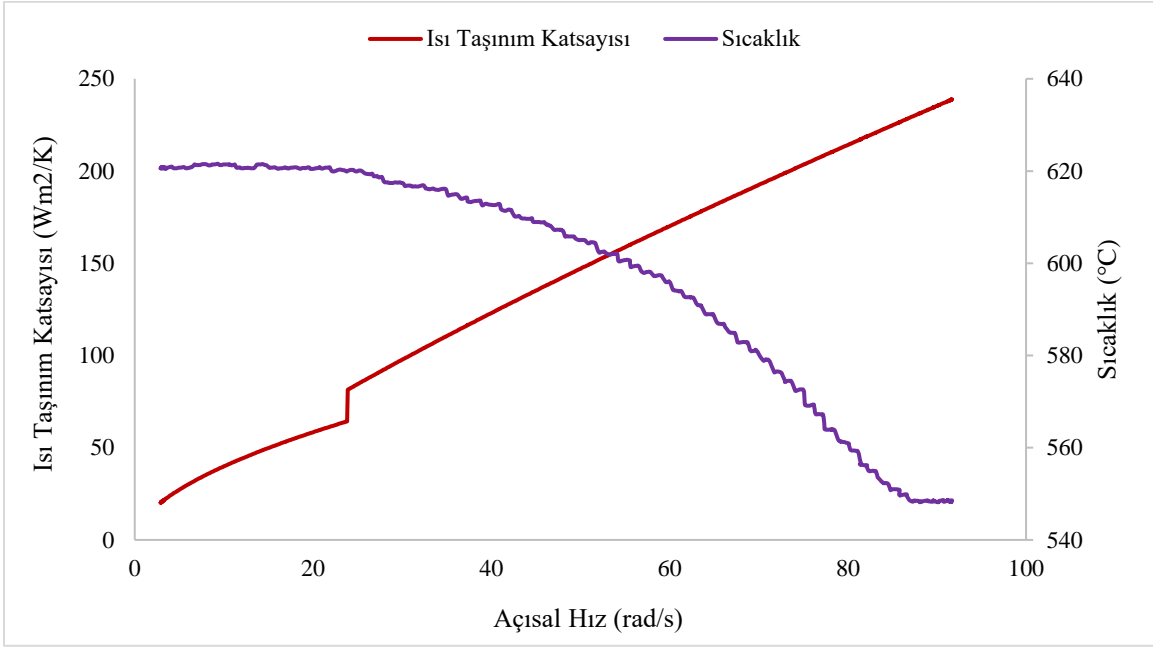
EK 1-Şekil 12. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (511-593 °C Sıcaklık Aralığı)



EK 1-Şekil 13. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (524-602 °C Sıcaklık Aralığı)



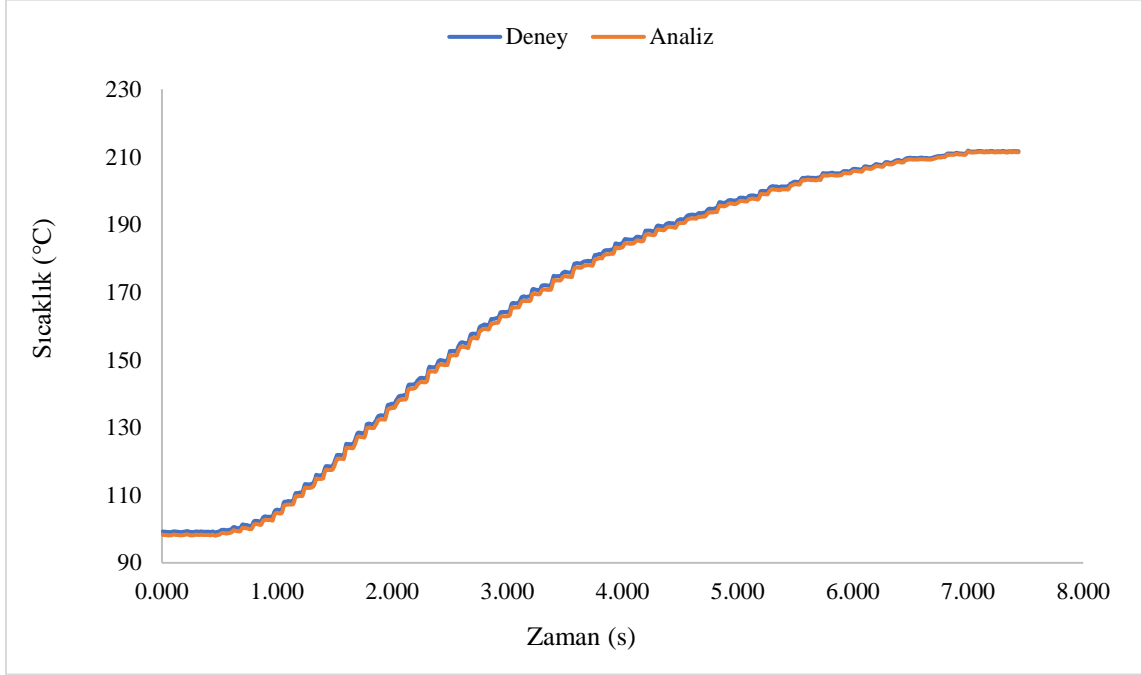
EK 1-Şekil 14. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (537-610 °C Sıcaklık Aralığı)



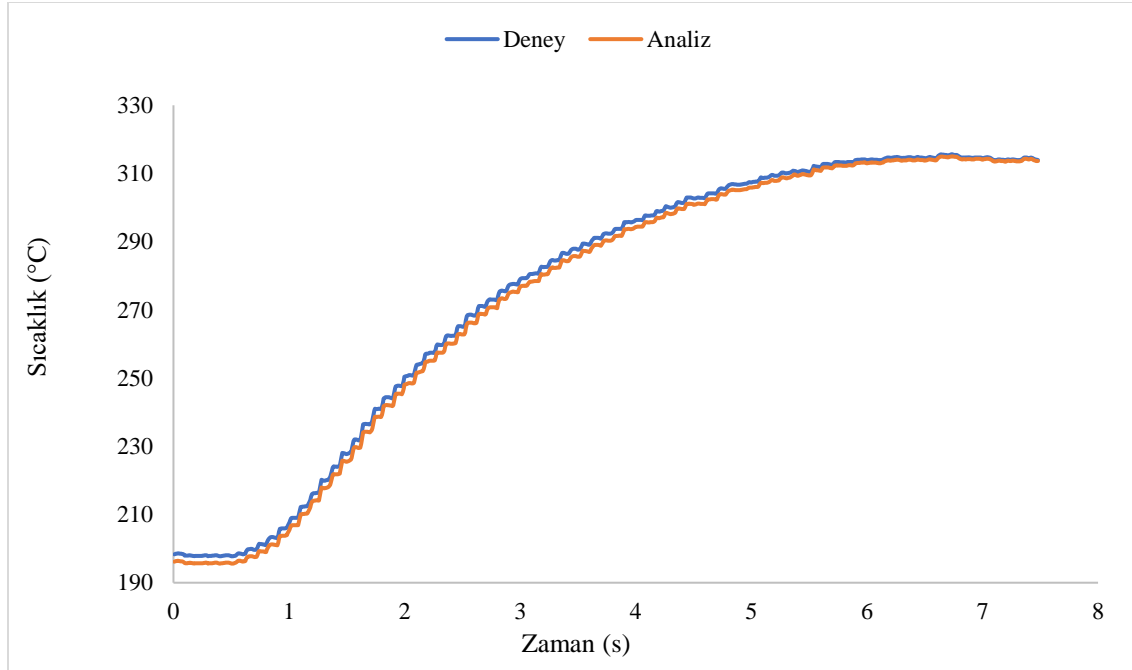
EK 1-Şekil 15. Sıcaklık ve Isı Taşınım Katsayısı Değişimi (548-620 °C Sıcaklık Aralığı)

EK 2

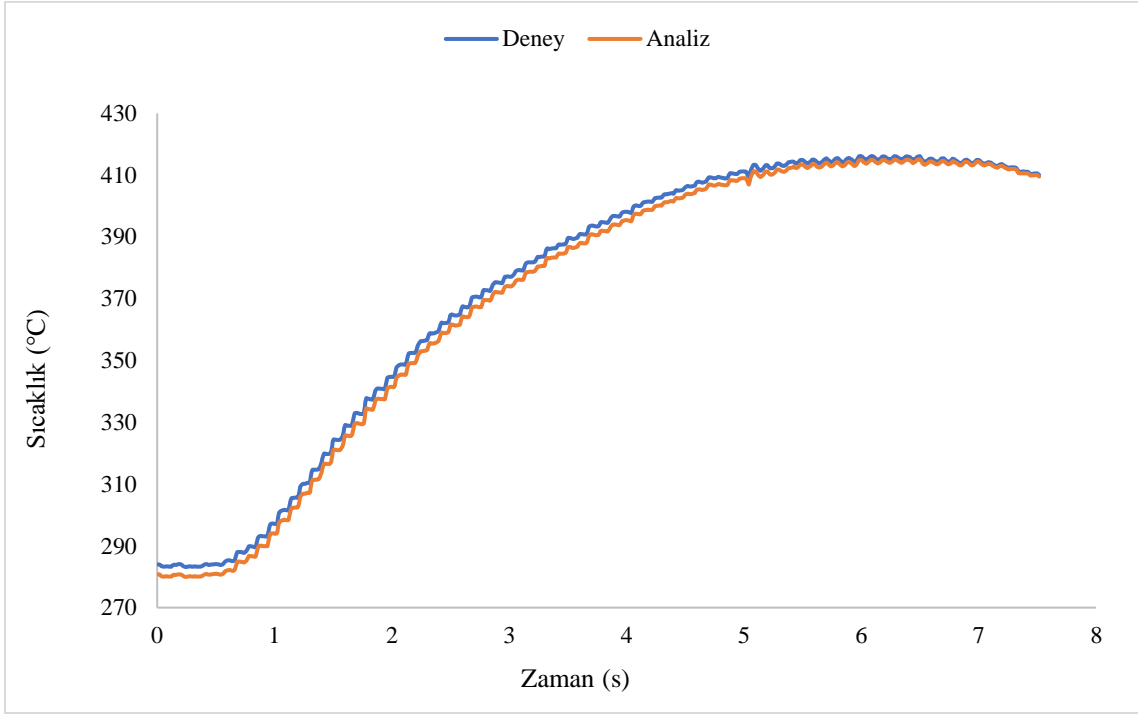
15 Frenleme için Deney ve Analiz Sıcaklıkları



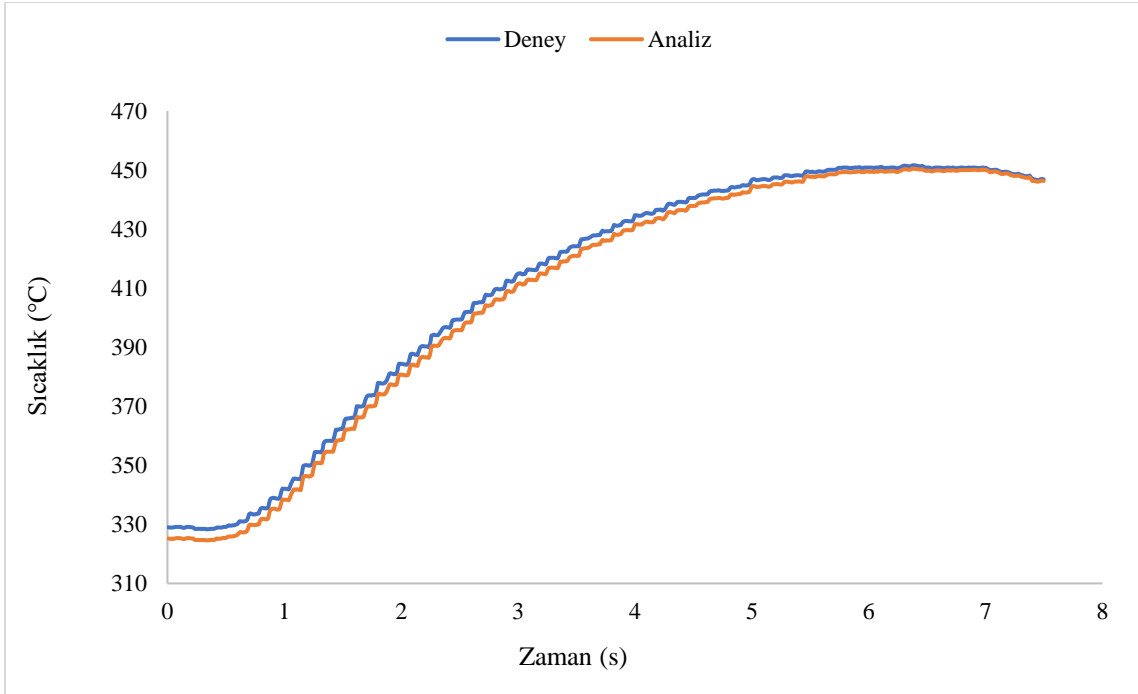
EK 2-Şekil 1. 99-212 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



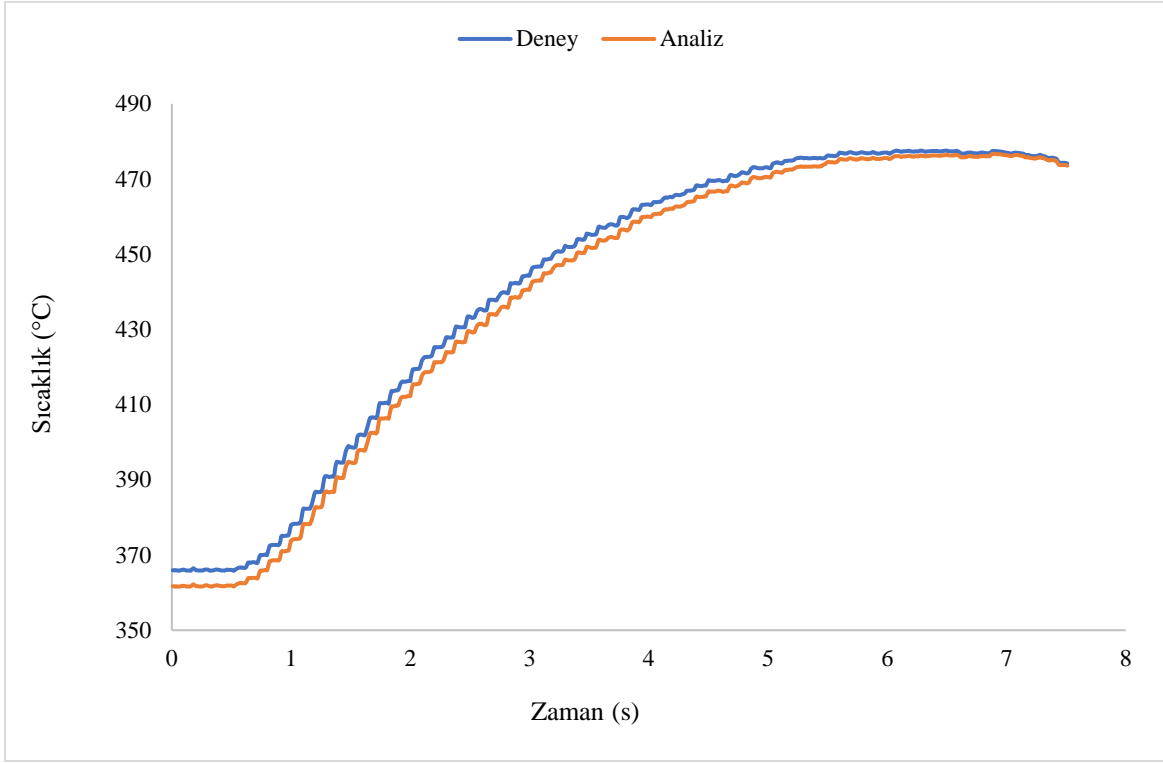
EK 2-Şekil 2. 198-314 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



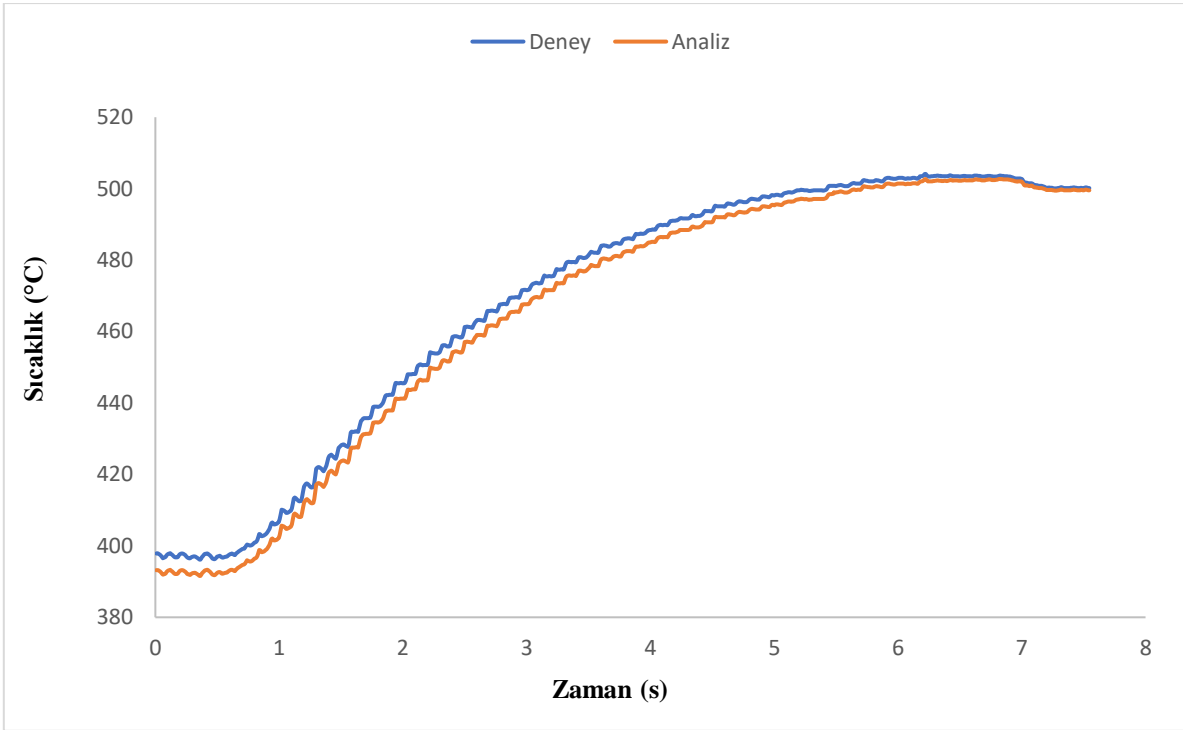
EK 2-Şekil 3. 284-410 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



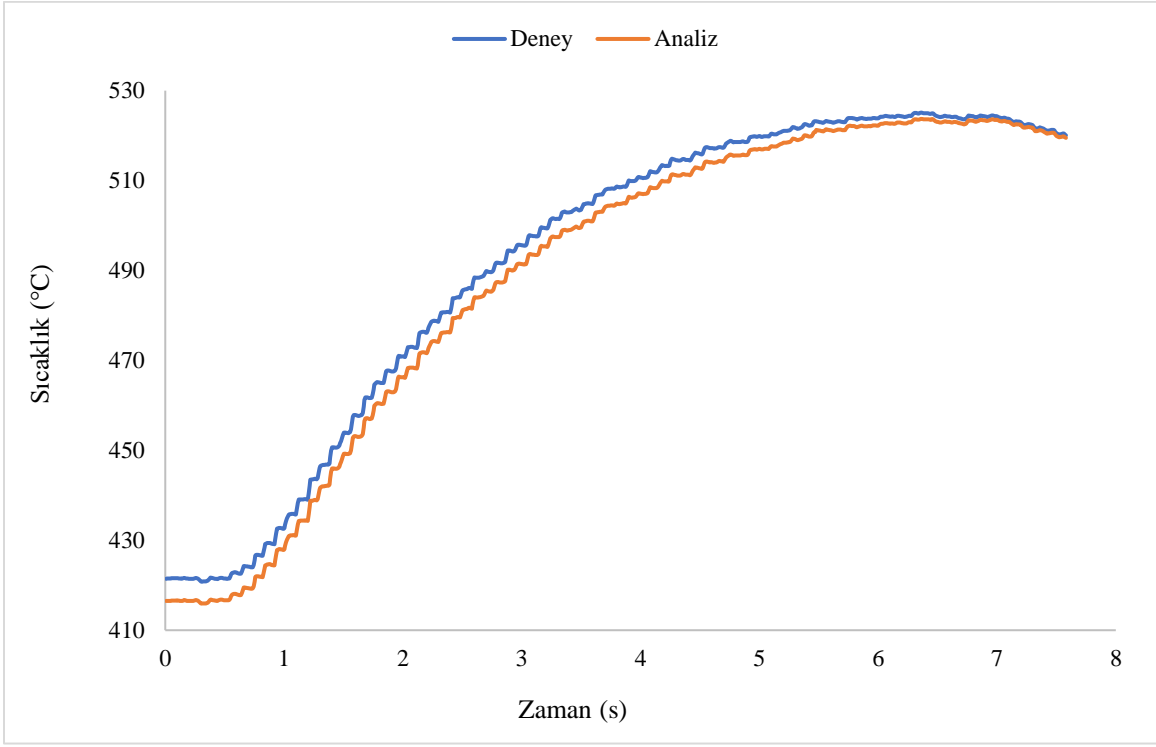
EK 2-Şekil 4. 329-447 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



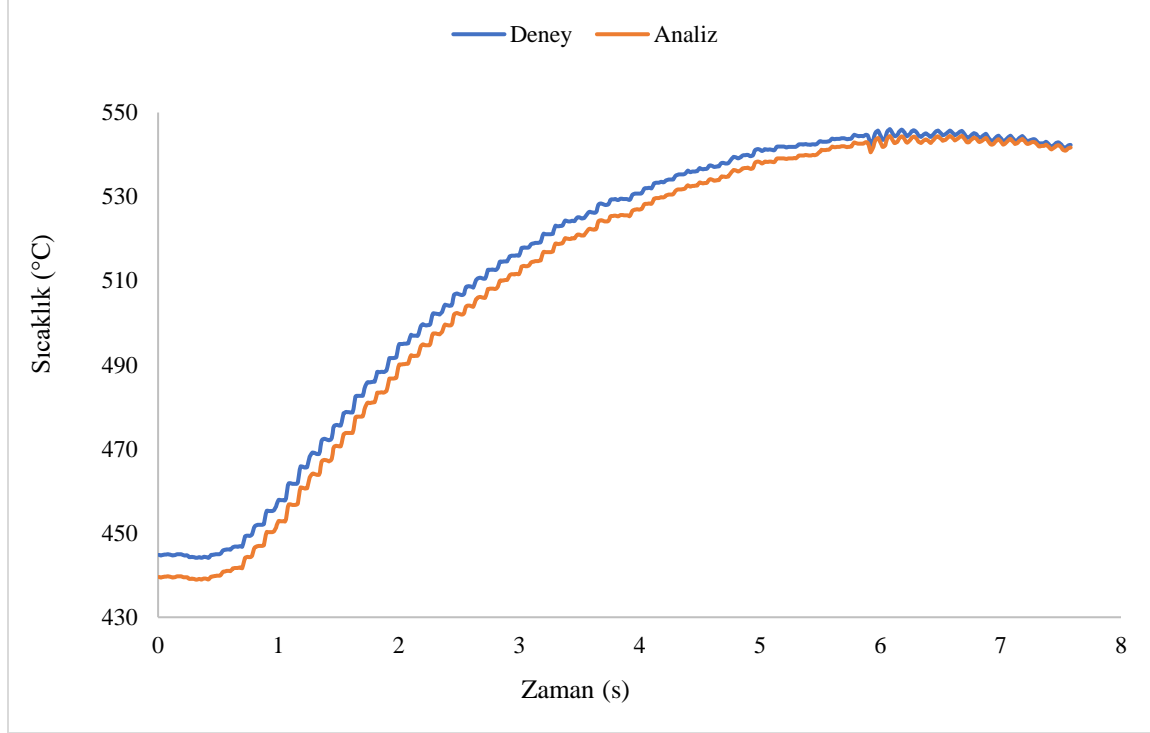
EK 2-Şekil 5. 366-474 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



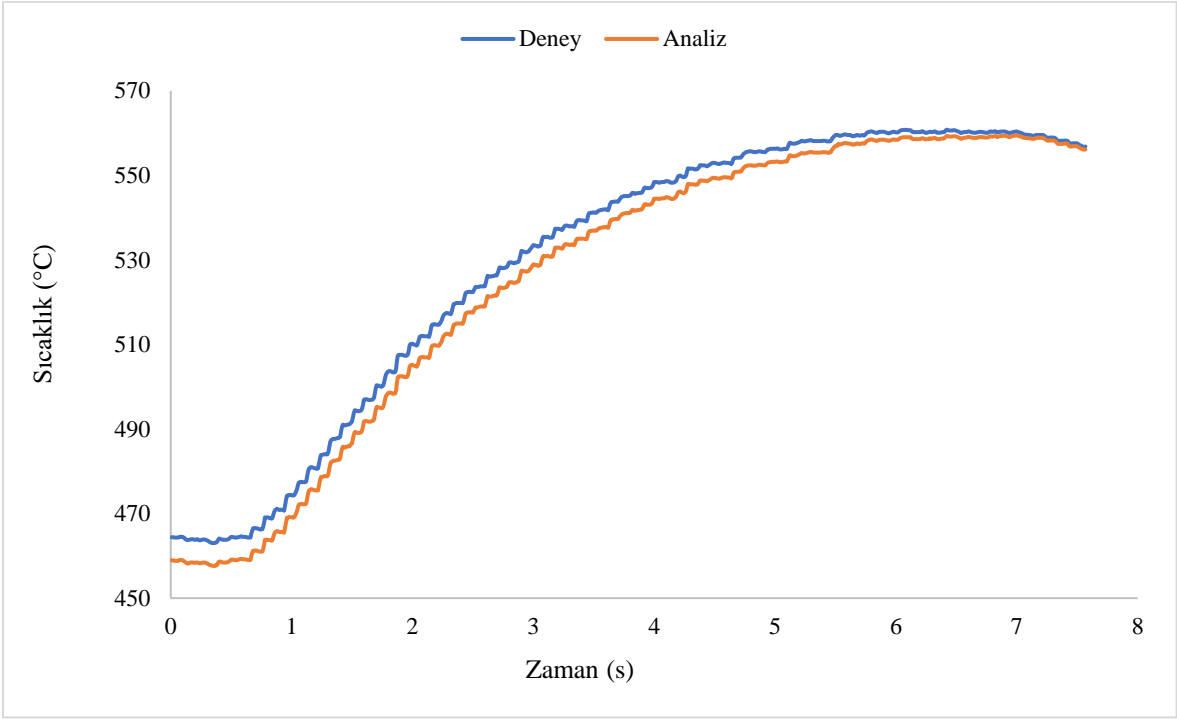
EK 2-Şekil 6. 397-500 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



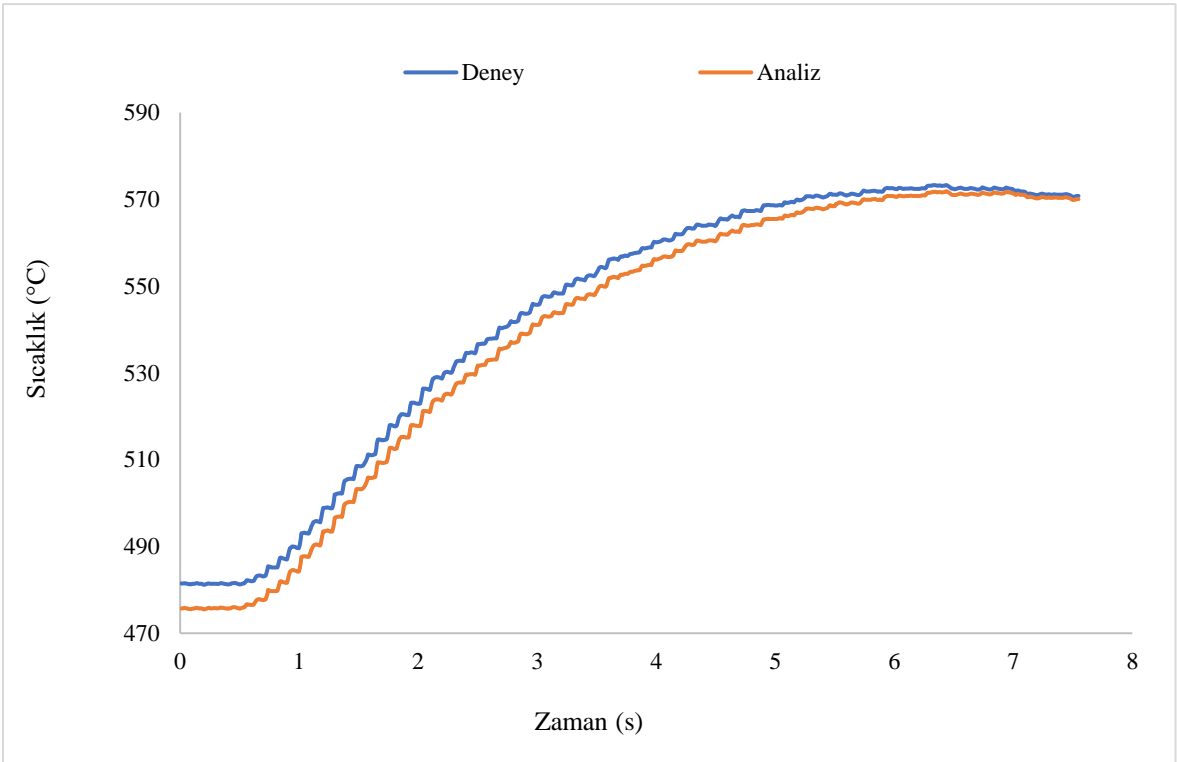
EK 2-Şekil 7. 421-520 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



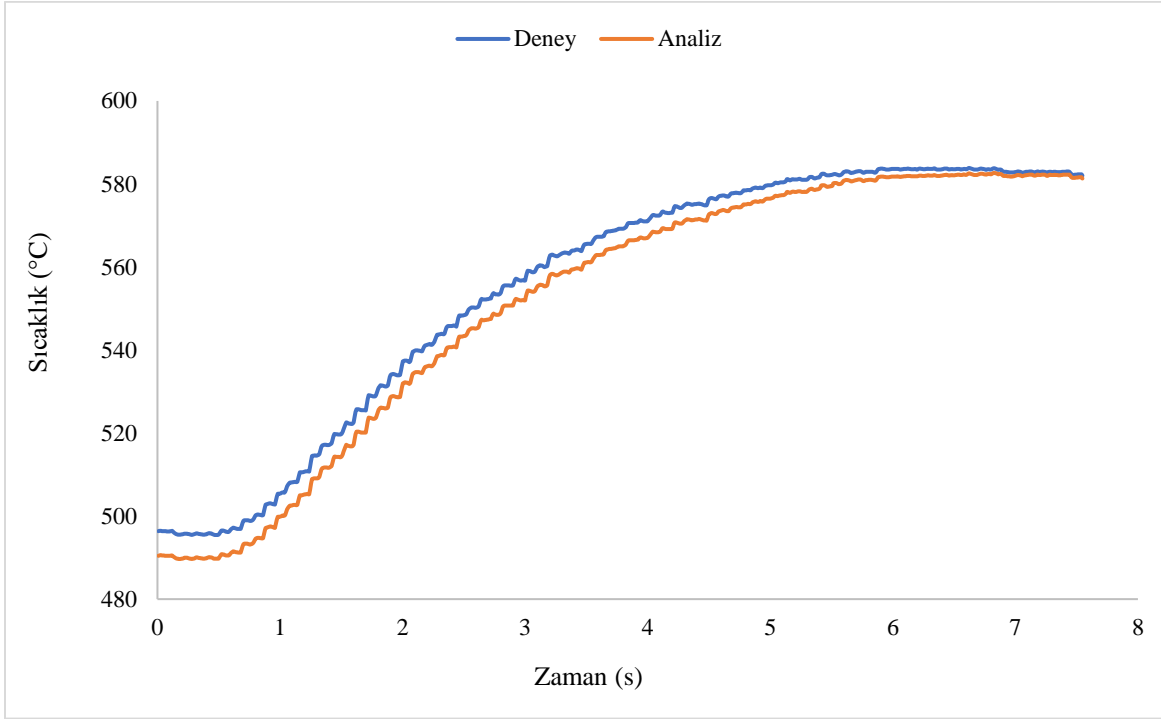
EK 2-Şekil 8. 444-542 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



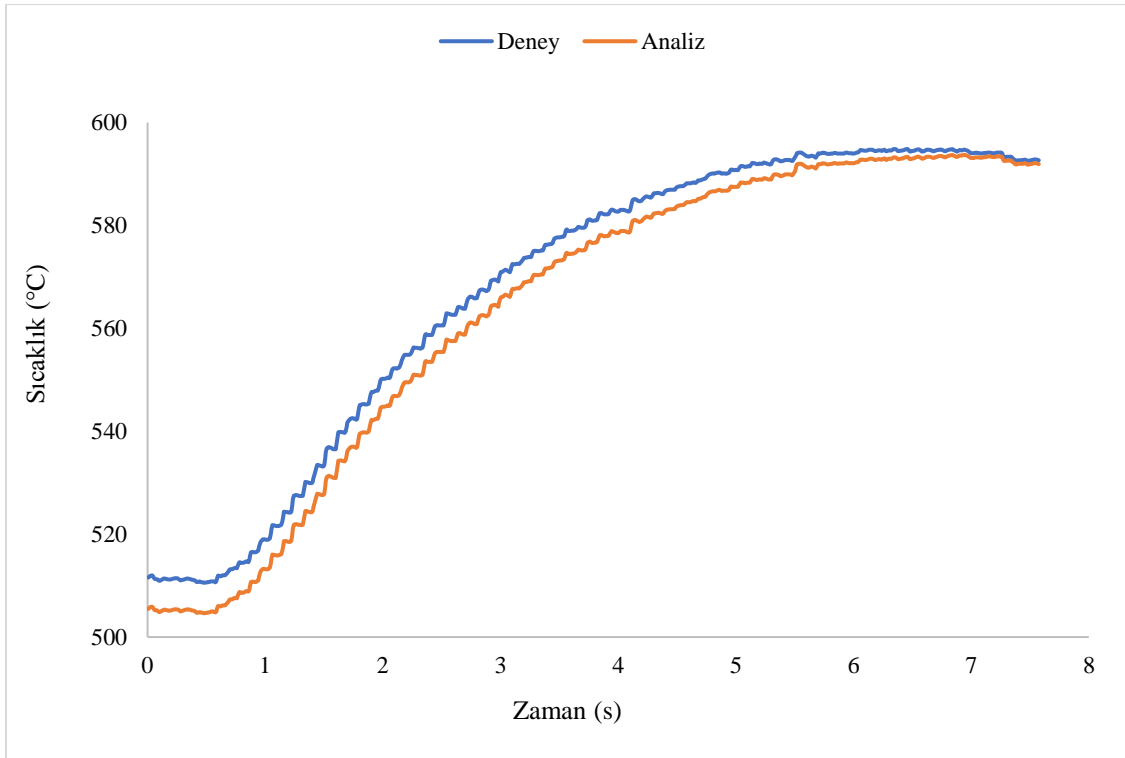
EK 2-Şekil 9. 464-556 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



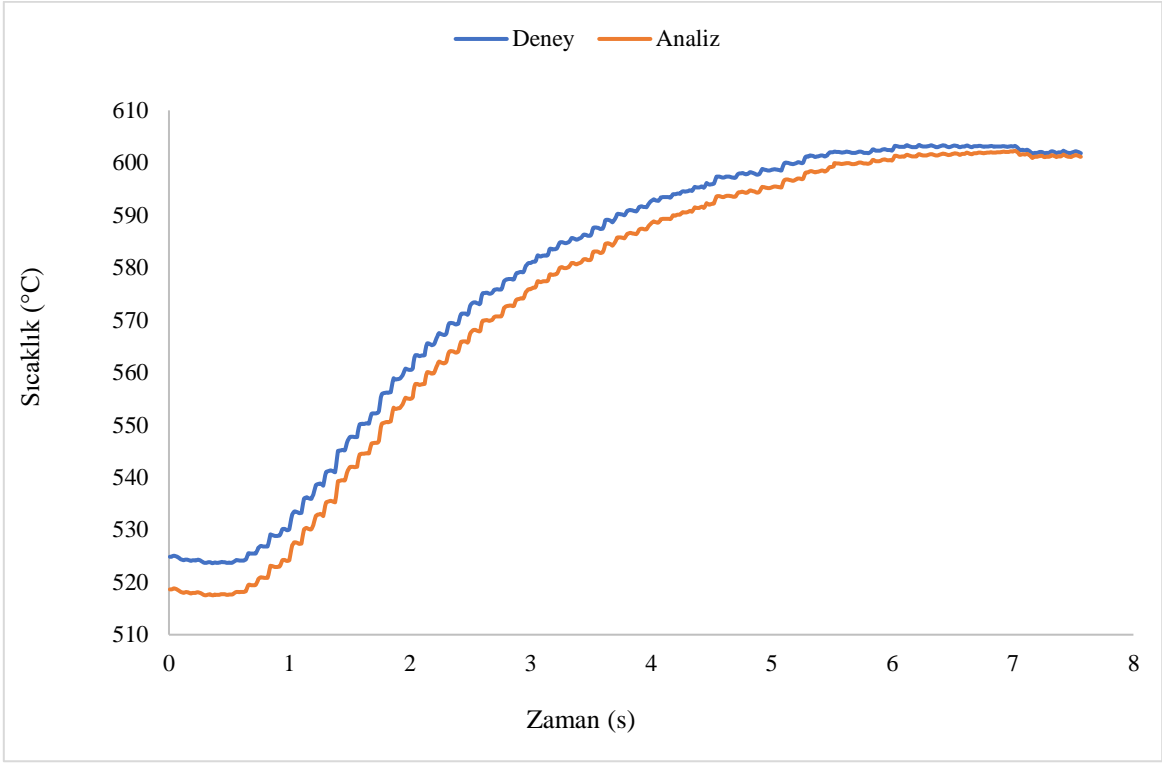
EK 2-Şekil 10. 481-570 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



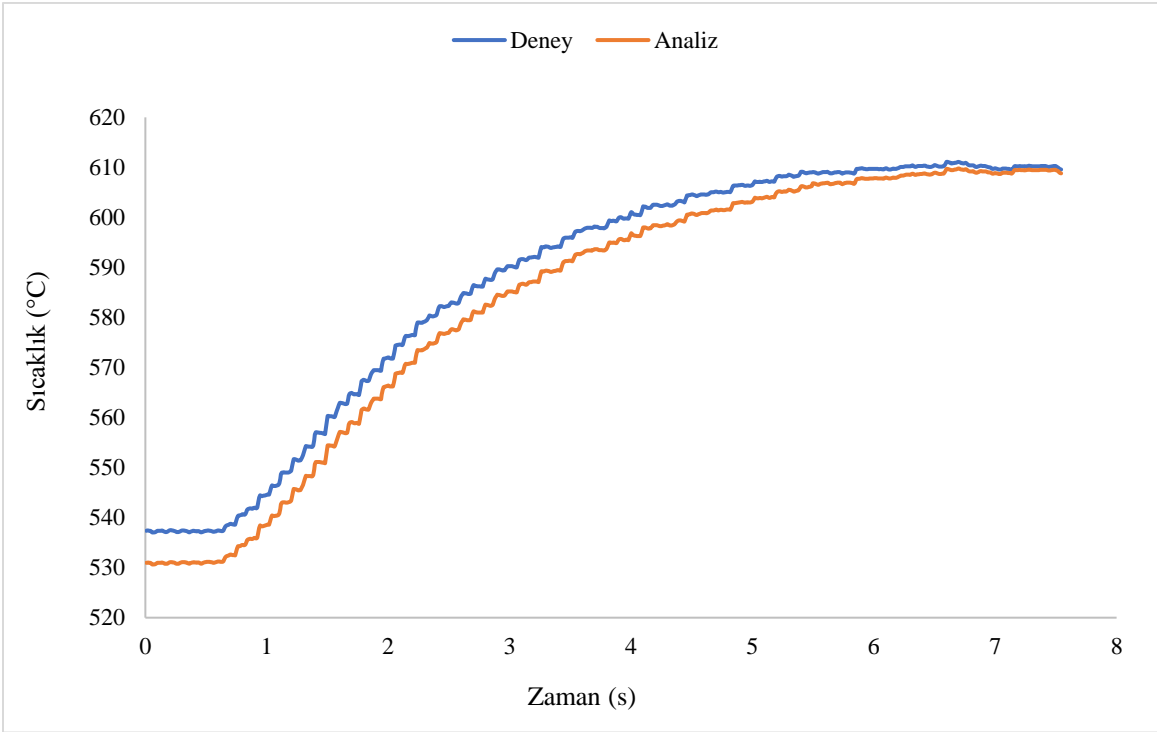
EK 2-Şekil 11. 496-581 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



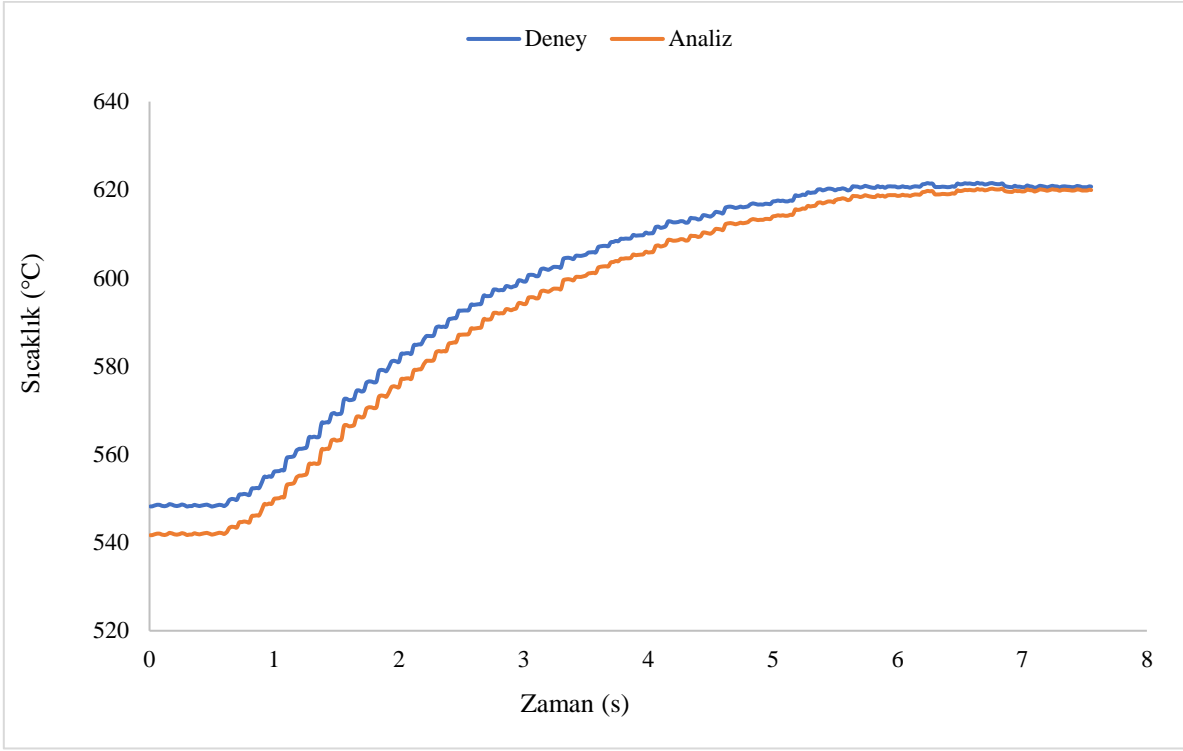
EK 2-Şekil 12. 511-593 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



EK 2-Şekil 13. 524-602 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



EK 2-Şekil 14. 537-610 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları



EK 2-Şekil 15. 548-620 °C Sıcaklık Aralığında Deney ve Analiz Sıcaklıkları

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı Cansu AY

Uyruğu T.C.

Eğitim Bilgileri

Lisans (Çift Anadal)

Üniversite Marmara Üniversitesi

Fakülte Teknoloji Fakültesi

Bölüm Makine Mühendisliği

GANO 3,24/4

Lisans (Anadal)

Üniversite Marmara Üniversitesi

Fakülte Atatürk Eğitim Fakültesi

Bölüm Fen Bilgisi Öğretmenliği

GANO 3,09/4

Yüksek Lisans

Üniversite Marmara Üniversitesi

Enstitü Fen Bilimleri Enstitüsü

Anabilim dalı Makine Mühendisliği

GANO 3,86/4

İş Bilgileri

2021-... Araştırma Görevlisi – Makine Mühendisliği – Karadeniz Teknik Üniversitesi

Yabancı Dil Bilgileri

YDS: 65 YÖK DİL: 81,25

Yetenekler

AUTOCAD®, ANSYS®, SOLIDWORKS®