

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ONAN SOĞUTMALI YAĞLI TİP GÜÇ
TRANSFORMATÖRLERİNDE RADYATÖR TASARIMININ
SOĞUTMA PERFORMANSINA ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE ANALİZİ

ZEKİ GÜNDÜZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Fuat TAN (Tez Danışmanı)**
 Doç. Dr. Ahmet Serhan CANBOLAT
 Dr. Öğr. Üyesi Veli Gökhan DEMİR

BALIKESİR, NİSAN-2026

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Onan Soğutmalı Yağlı Tip Güç Transformatörlerinde Radyatör Tasarımının Soğutma Performansına Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Zeki GÜNDÜZ

ÖZET

ONAN SOĞUTMALI YAĞLI TİP GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE RADYATÖR TASARIMININ SOĞUTMA PERFORMANSINA ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZEKİ GÜNDÜZ

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. FUAT TAN)

BALIKESİR, NİSAN – 2026

Güç transformatörlerinde soğutma nedeniyle ısı transferi, trafonun sağlıklı çalışması ve trafonun ömrü açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle ONAN soğutma sisteminde yağ ve hava akışı tamamen doğal sirkülasyona dayandığından radyatör yüzeyinde oluşan ısı transferi, transformatörün çalışma sıcaklığını belirleyen temel faktörlerden biridir. Bu nedenle radyatörlerdeki yağın; ısıl davranışı, akış karakteristikleri ve ısı transferi performansı üzerindeki etkilerin detaylı olarak analiz edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada ONAN (Oil Natural Air Natural) soğutma sistemine sahip yağlı tip güç transformatörlerinde radyatör geometrisi değişmez sayılarak radyatör ısı transferinin sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışma 1 dilimli radyatörün geometrisini baz almış bir örnek üzerinden ilerlemiştir ve analize yağın viskozite, yoğunluk ve ısıl iletkenlik gibi fiziksel özellikleri de dahil edilmiştir. Çalışmada üç farklı yağ tipi için analize yer verilmiştir. Yağ tipi haricinde parametrik analizler her yağ türü için; yağ giriş sıcaklığı, hava sıcaklığı ve radyatör sac kalınlığı aynı anda değişken olarak ele alınmıştır. Doğal hava ve radyatör içerisine doğal olarak akan yağın oluşturduğu ısı transferini sonlu elemanlar ağırlıklı bir model ile elde edilmiştir.

Sonuç olarak, ONAN tip soğutma sistemli transformatörlerde yağ giriş sıcaklığı, hava sıcaklığı, yağ tipi ve radyatör sac kalınlığı ısıl performans üzerinde kritik etkiye sahip olduğunu ortaya çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar yağ tipi, çalışma koşulları ve radyatör sac kalınlığının; transformatör soğutma sisteminin optimize edilmesi açısından mühendislik adına önemli katkılar sunmaktadır. Ayrıca çalışma, Sonlu elemanlar yöntemi baz alınarak yapılmış analiz yönteminin, radyatör ısı transferinin güvenilir şekilde değerlendirilmesinde etkin bir araç olduğunu göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER: CFD analizi, sıcaklık dağılımı, yağlı tip transformatör.

Bilim Kod / Kodları : 91449

Sayfa Sayısı : 92

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF RADIATOR DESIGN USING THE FINITE ELEMENT METHOD OF COOLING PERFORMANCE ON ONAN COOLING OIL TYPE POWER TRANSFORMERS

MSC THESIS

ZEKİ GÜNDÜZ

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. FUAT TAN)

BALIKESİR, APRIL – 2026

Heat transfer due to cooling in power transformers is of critical importance for the transformer's proper operation and service life. In particular, since the oil and air flow in the ONAN cooling system rely entirely on natural circulation, the heat transfer occurring on the radiator surface is one of the key factors determining the transformer's operating temperature. For this reason, it is necessary to conduct a detailed analysis of the effects of the oil in the radiators on thermal behavior, flow characteristics, and heat transfer performance.

The objective of this thesis is to investigate heat transfer in oil-filled power transformers with ONAN (Oil Natural Air Natural) cooling systems using the finite element method, assuming a constant radiator geometry. A single-section radiator with a similar geometry was selected as the study model; properties of the oil such as viscosity, density, and thermal conductivity were included in the analysis. Analyses were performed for three different oil types. In the parametric analyses conducted separately for each oil type, the oil inlet temperature, air temperature, and sheet thickness were defined as input parameters. Heat transfer between the natural oil flow inside the radiator and the air on the outer surface was solved using a finite element method approach.

In conclusion, it has been found that the oil inlet temperature, ambient temperature, oil type, and radiator fin thickness have a critical impact on the thermal performance of transformers equipped with ONAN-type cooling systems. The results obtained provide significant engineering insights regarding the optimization of transformer cooling systems, particularly concerning oil type, operating conditions, and radiator fin thickness. Furthermore, the study demonstrates that the analysis method based on the finite element method is an effective tool for reliably evaluating heat transfer in radiators.

KEYWORDS: Fluent analysis, oil type transformer, temperature distribution.

Science Code / Codes : 91449

Page Number : 92

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ.....	vii
SEMBOL LİSTESİ VE KISALTMALAR.....	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgiler.....	1
1.2 Transformatör Çeşitleri.....	1
1.2.1 Güç transformatörleri	1
1.2.2 Dağıtım transformatörleri	1
1.2.3 Özel amaçlı transformatörler	1
1.3 Yağlı tip transformatörün yapısı	2
1.3.1 Çekirdek	2
1.3.2 Sargılar	2
1.4 Güç Transformatörlerinde Soğutma Yöntemleri	3
1.4.1 Oil natural air natural (ONAN)	3
1.4.2 Oil natural air forced (ONAF).....	4
1.4.3 Oil forced air forced (OFAF).....	4
1.4.4 Oil forced water forced (OFWF)	5
1.4.5 Oil directed air forced (ODAF)	6
1.4.6 Oil directed water forced (ODWF).....	6
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
3. ANALİZ.....	12
3.1 Problemin Tanımı	12
3.2 Model	13
3.3 Mesh.....	14
3.4 Malzeme Özellikleri ve Giriş Parametreleri	15
3.4.1 Yağ giriş sıcaklığı.....	15
3.4.2 Hava sıcaklığı	15
3.4.3 Sac kalınlığı	15
3.4.4 Radyatör sac malzemesi	16
3.4.5 Analizlerde kullanılan yağ çeşitleri	16
3.5 Sınır Şartları	18
3.6 Çözüm Modelleri	18
3.7 Analiz Sonuçları	20
4. YANIT YÜZEY METODOLOJİSİ (RSM).....	26
4.1 RSM Genel Bilgiler	26
4.2 RSM'nin Teorik Temeli.....	26
4.3 RSM uygulama metodolojisi	26
4.4 RSM Sonuçları.....	27
4.5 MBTY İçin RSM Sonuçları	28
4.5.1 MBTY ile S235J malzeme için RSM sonuçları	28
4.5.2 MBTY ile S355J malzeme için RSM sonuçları	33
4.5.3 MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için RSM sonuçları	38
4.5.4 MBTY ile 316L malzeme için RSM sonuçları.....	43

İÇİNDEKİLER (Devam)

4.6	NBTY İçin RSM Sonuçları.....	48
4.6.1	NBTY ile S235J malzeme için RSM sonuçları	48
4.6.2	NBTY ile S355J malzeme için RSM sonuçları	53
4.6.3	NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için RSM sonuçları	58
4.6.4	NBTY ile 316L malzeme için RSM sonuçları	63
4.7	DEBTY İçin RSM Sonuçları	68
4.7.1	DEBTY ile S235J malzeme için RSM sonuçları	68
4.7.2	DEBTY ile S355J malzeme için RSM sonuçları	73
4.7.3	DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için RSM sonuçları	78
4.7.4	DEBTY ile 316L malzeme için RSM sonuçları.....	83
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	88
6.	KAYNAKLAR	90
	ÖZGEÇMİŞ	92

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Yağlı tip Trafonun yapısı.....	2
Şekil 1.2: Yağlı Tip trafonun iç yapısı.....	3
Şekil 1.3: ONAN Soğutma.....	3
Şekil 1.4: ONAF Soğutma	4
Şekil 1.5: OFAF Soğutma	5
Şekil 1.6: OFWF Soğutma	5
Şekil 1.7: ODAF Soğutma	6
Şekil 1.8: ODWF Soğutma	6
Şekil 2.1: a) 4 adet radyatör dizisinin şematik görünümü ve b) teorik hesaplamalar için radyatör detayları	7
Şekil 2.2: Farklı debilerde radyatör sıcaklık dağılımının CFD simülasyon sonuçları	8
Şekil 2.3: Genel transformator sıcaklık dağılımı alt grafikleri	8
Şekil 2.4: Fiziksel modelin şematik gösterimi	9
Şekil 2.5: Isıl sıvının tamamen yağ olduğu mahfaza akış alanındaki sıcaklık dağılımı	9
Şekil 2.6: a) Kesitin orta düzlemindeki hız vektörleri b) Kesitin orta düzlemindeki sıcaklık konturları.....	10
Şekil 2.7: Kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı	10
Şekil 2.8: Ester bazlı transformator yağının radyatör giriş ve çıkış bölgelerindeki akım çizgileri	11
Şekil 2.9: Sentetik transformator yağının radyatör girişindeki basınç dağılımı	11
Şekil 2.10: Sıcaklık ve hız profilleri (L = 2000, N = 18)	11
Şekil 3.1: Radyatör genel görünümü.....	13
Şekil 3.2: Analiz edilen geometrinin genel ölçüleri.....	13
Şekil 3.3: Analiz edilen geometrinin yüzey tanımlamaları	14
Şekil 3.4: Geometrinin genel mesh yapısı	14
Şekil 3.5: Analiz programına girilen havanın özellikleri	15
Şekil 3.6: Analliz programına girilen NBTY özellikleri.....	16
Şekil 3.7: Analiz programına girilen MBTY özellikleri	17
Şekil 3.8: Analiz programına girilen DEBTY özellikleri	17
Şekil 3.9: DEBTY ile 316L malzeme analizinde YZ plane kesiti akış hızları-1	18
Şekil 3.10: DEBTY ile 316L malzeme analizinde YZ plane kesiti akış hızları-1	19
Şekil 3.11: DEBTY ile 316L malzeme analizinde oil mass flow analiz sonucu	19
Şekil 4.1: MBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-1	28
Şekil 4.2: MBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-2	29
Şekil 4.3: MBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-3	30
Şekil 4.4: MBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-4	31
Şekil 4.5: MBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-5	32
Şekil 4.6: MBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-1	33
Şekil 4.7: MBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-2	34
Şekil 4.8: MBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-3	35
Şekil 4.9: MBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-4	36
Şekil 4.10: MBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-5	37
Şekil 4.11: MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-1	38
Şekil 4.12: MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-2.....	39
Şekil 4.13: MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-3.....	40
Şekil 4.14: MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-4.....	41
Şekil 4.15: MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-5.....	42

ŞEKİL LİSTESİ (devam)

Şekil 4.16: MBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-1.....	43
Şekil 4.17: MBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-2.....	44
Şekil 4.18: MBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-3.....	45
Şekil 4.19: MBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-4.....	46
Şekil 4.20: MBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-5.....	47
Şekil 4.21: NBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-1	48
Şekil 4.22: NBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-2	49
Şekil 4.23: NBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-3	50
Şekil 4.24: NBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-4.....	51
Şekil 4.25: NBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-5	52
Şekil 4.26: NBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-1	53
Şekil 4.27: NBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-2.....	54
Şekil 4.28: NBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-3	55
Şekil 4.29: NBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-4.....	56
Şekil 4.30: NBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-5.....	57
Şekil 4.31: NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-1	58
Şekil 4.32: NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-2	59
Şekil 4.33: NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-3	60
Şekil 4.34: NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-4	61
Şekil 4.35: NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-5	62
Şekil 4.36: NBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-1	63
Şekil 4.37: NBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-2	64
Şekil 4.38: NBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-3	65
Şekil 4.39: NBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-4	66
Şekil 4.40: NBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-5	67
Şekil 4.41: DEBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-1	68
Şekil 4.42: DEBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-2	69
Şekil 4.43: DEBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-3	70
Şekil 4.44: DEBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-4	71
Şekil 4.45: DEBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-5	72
Şekil 4.46: DEBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-1	73
Şekil 4.47: DEBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-2	74
Şekil 4.48: DEBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-3	75
Şekil 4.49: DEBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-4	76
Şekil 4.50: DEBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-5	77
Şekil 4.51: DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-1	78
Şekil 4.52: DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-2	79
Şekil 4.53: DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-3	80
Şekil 4.54: DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-4.....	81
Şekil 4.55: DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-5	82
Şekil 4.56: DEBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-1	83
Şekil 4.57: DEBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-2.....	84
Şekil 4.58: DEBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-3.....	85
Şekil 4.59: DEBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-4.....	86
Şekil 4.60: DEBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-5.....	87

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: MBTY için S235J malzeme analiz sonuçları	20
Tablo 3.2: MBTY için S335J malzeme analiz sonuçları	20
Tablo 3.3: MBTY için carbon steel 1010 malzeme analiz sonuçları	21
Tablo 3.4: MBTY için 316L malzeme analiz sonuçları	21
Tablo 3.5: NBTY için S235J malzeme analiz sonuçları	22
Tablo 3.6: NBTY için S355J malzeme analiz sonuçları	22
Tablo 3.7: NBTY için carbon steel 1010 malzeme analiz sonuçları	23
Tablo 3.8: NBTY için 316L malzeme analiz sonuçları	23
Tablo 3.9: DEBTY için S235J malzeme analiz sonuçları	24
Tablo 3.10: DEBTY için S355J malzeme analiz sonuçları	24
Tablo 3.11: DEBTY için carbon steel 1010 malzeme analiz sonuçları	25
Tablo 3.12: DEBTY için 316L malzeme analiz sonuçları	25
Tablo 4.1: Analizler için sınır değişkenler	26
Tablo 4.2: RSM Central Composite Designa göre yapılması gereken analizler	27

SEMBOL LİSTESİ VE KISALTMALAR

X_i	: Faktörler (girdi değişkenleri)
β_i	: Doğrusal terimlerin katsayıları
β_{ii}	: Kare terim katsayıları (eğrilik etkisi)
β_{ij}	: Etkileşim terim katsayıları (faktörler arası etkileşim)
β_0	: Sabit terim
Y	: Tepki (çıktı değişkeni)
ε	: Rastgele hata terimi
DEBTY	: Doğal ester bazlı transformatör yağı
MBYT	: Mineral bazlı transformatör yağı
NBTY	: Naftanik bazlı transformatör yağı

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım boyunca tüm desteklerinden dolayı danışman hocam Sayın Doç. Dr. Fuat Tan'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında, tez yazımı için beni sürekli motive eden Annem Sayın Dürdane hanıma teşekkürlerimi sunarım.

Balıkesir, 2026

Zeki Gündüz

1. GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Elektrik enerjisine, uzak bölgelerdeki yerleşim yerlerinde, sanayi kuruluşlarında ve daha birçok alanda ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrik enerjisinin üretim yerinden tüketim yerine güvenli ve verimli bir şekilde iletilmesinde en önemli unsur trafodur [1].

Transformatör, elektrik enerjisini elektromanyetik indüksiyon prensibiyle, aynı frekansta fakat farklı gerilim ve akım seviyelerinde bir veya birden fazla devreye ileten ve hareketli parçası bulunmayan statik bir makinedir [1].

Transformatörü daha basit tanımlamak gerekirse, elektrik enerjisinin gerilimini artıran veya düşüren, hareketli parçası olmayan statik cihazlardır.

1.2 Transformatör Çeşitleri

1.2.1 Güç transformatörleri

Güç transformatörleri, yüksek gerilim seviyelerinde çalışmak üzere tasarlanmış ve genellikle 36 kV ve üzerindeki gerilim seviyeleri için kullanılan elektrik makinalarıdır. Güç transformatörleri; başta elektrik enerjisinin üretim ve iletim sistemleri olmak üzere, yüksek güç ve gerilim gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [1].

1.2.2 Dağıtım transformatörleri

Dağıtım transformatörleri, elektrik enerjisinin dağıtım şebekelerinde kullanılmak üzere tasarlanan, genellikle 36 kV ve altındaki gerilim seviyelerinde çalışan transformatörlerdir. Bu transformatörler, orta gerilim seviyesindeki elektriği kullanıcıların tüketebileceği alçak gerilim seviyelerine düşürmek amacıyla kullanılır [1].

1.2.3 Özel amaçlı transformatörler

Özel amaçlı transformatörler, standart güç veya dağıtım transformatörlerinden farklı olarak belirli bir uygulamaya ait özel elektriksel gereksinimlerini karşılamak üzere kullanılan transformatörlerdir. Bu transformatörler; ark ocağı trafoları, doğrultucu trafolar ve test trafoları olup, çalışma koşulları, gerilim seviyesi, kısa devre dayanımı ve yalıtım gereksinimleri bakımından özel bir yapıya sahiptir [1].

1.3 Yağlı tip transformatörün yapısı

Transformatör genel olarak iki kısımdan oluşur.

1.3.1 Çekirdek

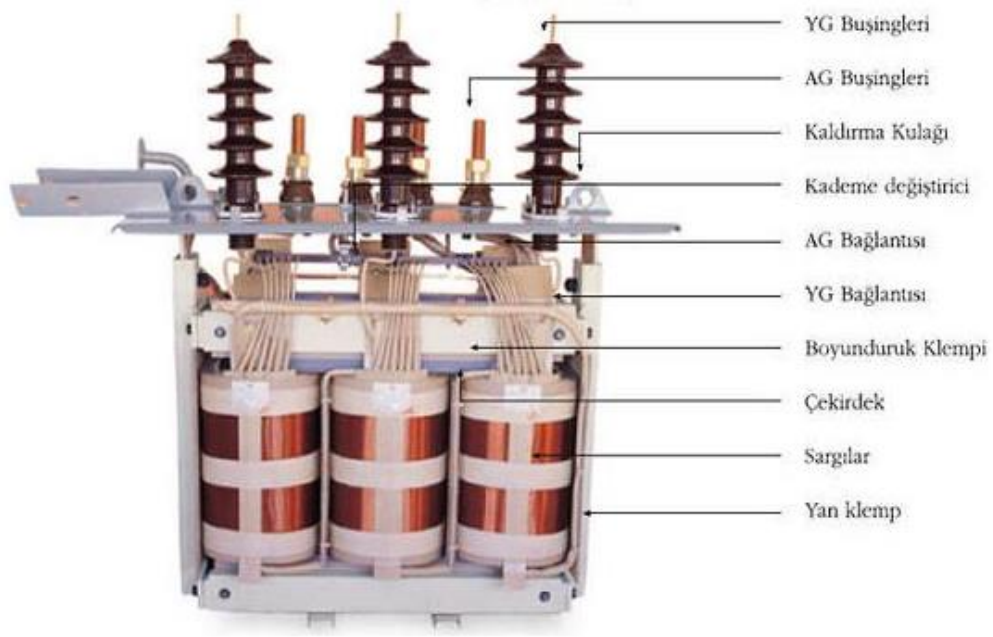
Transformatör çekirdeği, manyetik akıyı yönlendiren ve enerji kaybını azaltan silisli saclardan yapılır. Manyetik devreyi oluşturur ve sargılar arasında manyetik bağlantıyı sağlar.

1.3.2 Sargılar

Genel olarak bir transformatörde primer ve sekonder sargı vardır. Birinci sargı primer, ikinci sargı sekonder olarak isimlendirilir. Transformatörün yükseltici veya alçaltıcı olarak tasarlanmasına göre primerin gerilimi ya da akımı sekonderden daha küçük veya büyük olabilir. Gerilimin uygulandığı bobine primer ve elektrik enerjisinin değişik gerilimde alındığı bobine ise sekonder denir. Sargılar genellikle bakır telden yapılır ve yalıtkan malzemelerle izole edilir.



Şekil 1.1: Yağlı tip Trafonun yapısı [2]



Şekil 1.2: Yağlı Tip trafonun iç yapısı [2]

1.4 Güç Transformatörlerinde Soğutma Yöntemleri

Transformatörde çalışma sırasında açığa çıkan ısıyı, soğutma sistemleri ile dışarı atmak gerekir. Farklı transformatör tipleri için farklı soğutma yöntemleri kullanılır [3].

1.4.1 Oil natural air natural (ONAN)

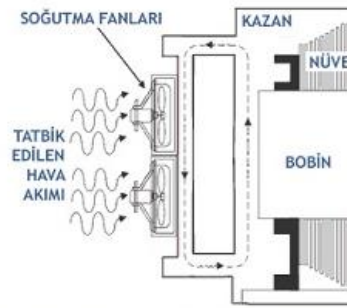
ONAN soğutma tipinde ısı transferi doğal taşınım ile yapılmaktadır. Çalışma esnasında ısınan transformatör yağı, doğal taşınım etkisi ile yukarıya doğru yükselmektedir. Sıcak yağ, radyatörler vasıtasıyla doğal olarak çevre havasına ısını aktarmakta ve soğuduktan sonra tekrar aşağıya doğru inilerek ısı transferinin gerçekleşmesi sağlanmaktadır [4].



Şekil 1.3: ONAN Soğutma

1.4.2 Oil natural air forced (ONAF)

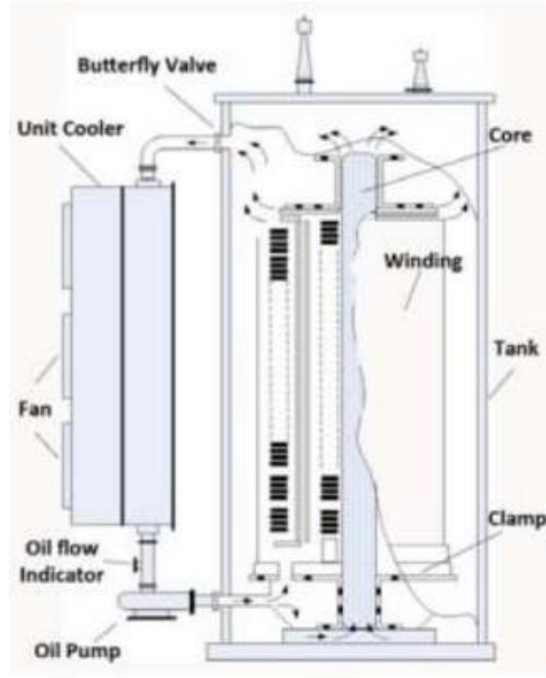
ONAF soğutma tipi, yağ sirkülasyonunun doğal yolla, hava sirkülasyonunun ise fanlar yardımıyla zorlanmış olarak sağlandığı soğutma yöntemini ifade etmektedir. Transformatör sargılarında oluşan ısı nedeniyle yağın sıcaklığı artmakta, ısınan yağ yoğunluk farkı etkisiyle kazan içerisinde yukarı doğru hareket ederek etmektedir. Dolaşımını sürdüren yağ, transformatörün yapısına bağlı olarak dalga duvarlar veya radyatörler içerisinde geçmektedir. Bu aşamada, radyatör yüzeylerine fanlar aracılığıyla yönlendirilen hava akımı sayesinde yağın ısısı atmosfere daha etkin bir şekilde aktarılmakta ve daha etkili bir soğutma sağlanmaktadır. ONAF soğutma sisteminin etkinliğini artıran temel unsur, yağın hava ile temas ettiği yüzey alanı üzerinde zorlanmış hava akışının sağlanmasıdır [4].



Şekil 1.4: ONAF Soğutma

1.4.3 Oil forced air forced (OFAF)

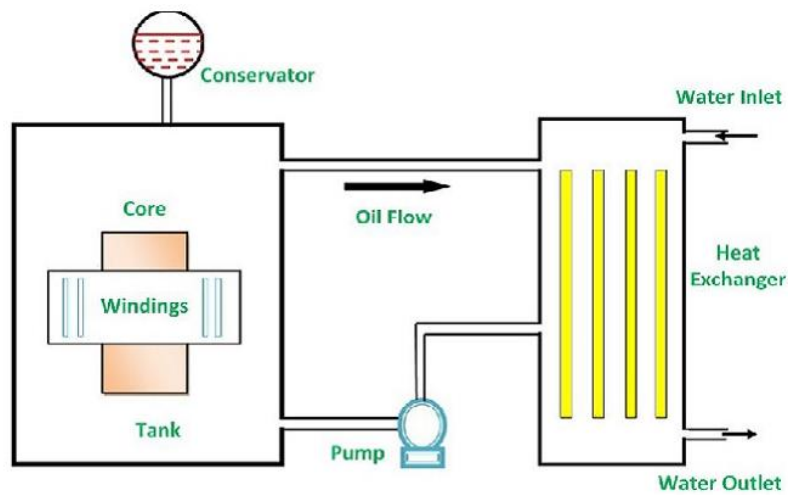
OFAF soğutma sistemlerinde, ısınan yağın dolaşımı yalnızca doğal akış ile değil, transformatör dışına yerleştirilen yağ pompası tarafından zorlanmış olarak da sağlanır. Yağın soğutulması için verilen bir diğer önlem olarak, ONAF sisteminde olduğu gibi transformatör dış yüzeyine yerleştirilen fanlarla soğutma işlemi yapılır. Bu sistemde, yağın sirkülasyonu pompa ile sağlanırken, yağın ısınıp aldığı ve soğuttuğu hava, fanlar ile yatırılan zorlanmış hava akımıdır. OFAF soğutma sistemine sahip transformatörlerde yağ pompası kullanımı, yağın akış hızını artırarak daha etkin bir soğutma sağlamaktadır [4].



Şekil 1.5: OFAF Soğutma

1.4.4 Oil forced water forced (OFWF)

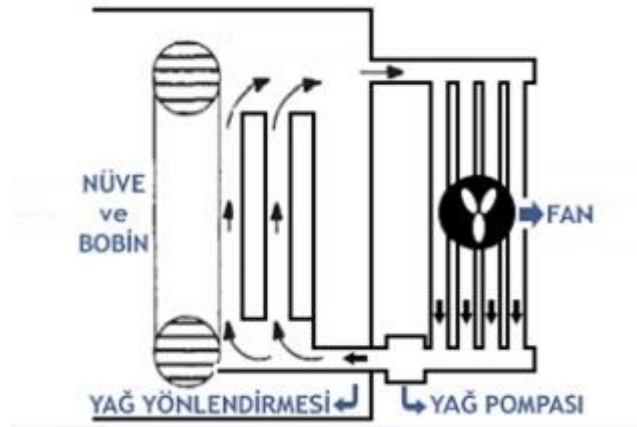
OFWF soğutma sisteminde, transformatör ısınınca yağ, bir yağ pompası yardımıyla ısı eşanjörüne gönderilir. Isı eşanjörünün içindeki borularda akan yağ ve su değişikliği ile ısınan yağın ısısı düşer. Bu işlemini su ile yaptığı için yağın soğuması çok hızlı olur. Dahili soğutma kapasitesi yüksek olan OFWF soğutma türü, genellikle güçlü ve büyük transformatörlerde kullanılır [4].



Şekil 1.6: OFWF Soğutma

1.4.5 Oil directed air forced (ODAF)

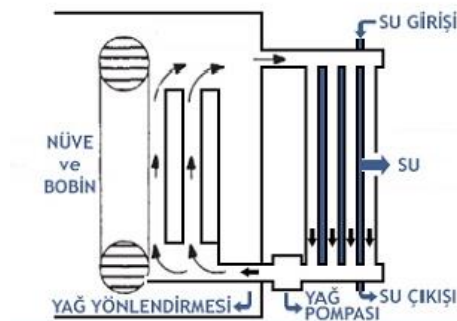
ODAF soğutma sistemi mantık olarak OFAF yöntemiyle aynı olsa da zorlanmış dolaşıma almış yağ belli kanallar içinde daha önceden belirlenmiş yol boyunca direkt olarak çekirdek ve sargılara temas edecek özellikte tasarlanmaktadır. Böylece radyatörde soğutulmuş yağ direkt transformatör çekirdeğine ve buna saran bobine ulaşacaktır. Soğuk yağın en çok ısınan bu noktalara direkt teması ısı transferini artıracak ve çok daha kısa sürede soğutma yapılabilecektir. Bu soğutma türü yüksek soğutma kapasitesi sunan yöntem olduğu için yüksek güç transformatörlerinde öncelikle tercih edilmektedir [4].



Şekil 1.7: ODAF Soğutma

1.4.6 Oil directed water forced (ODWF)

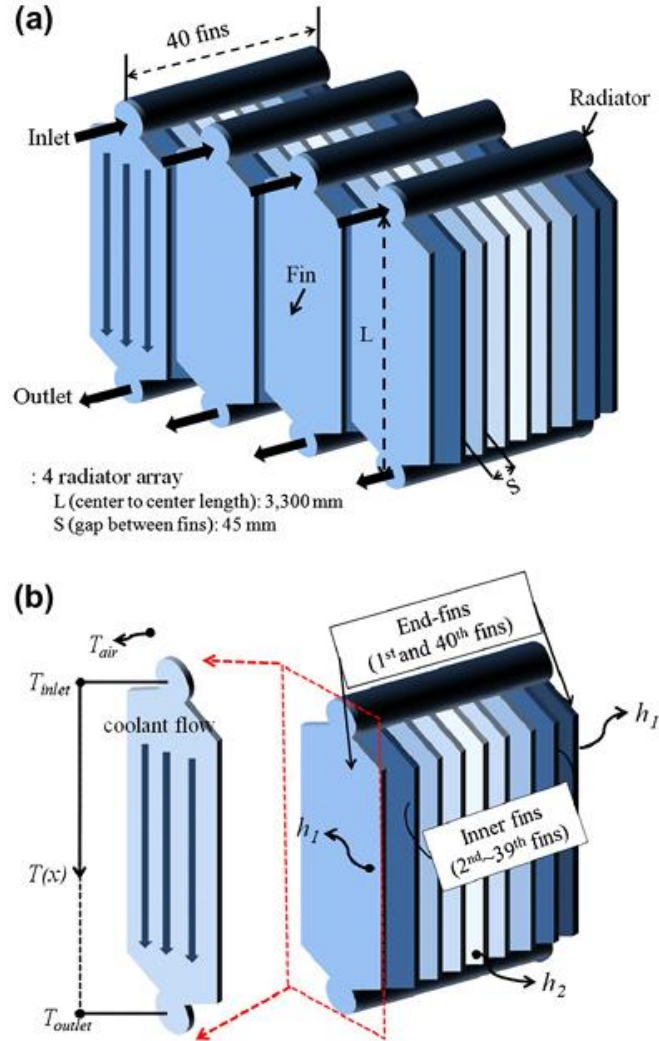
Bu yöntemde, transformatör yağı yağ pompaları ile zorlanmış olarak dolaştırılır ve bu yağın sıcaklığı su-soğutmalı ısı eşanjörleri ile düşürülür. Isı eşanjörlerinde, zorlanmış su akışı sayesinde yağdan alınan ısı hızlıca çevreye atılmış olmaktadır. Yüksek soğutma kapasitesi ve kompakt yapısı nedeniyle OFWF soğutma sistemi, yüksek güç derecelerinde ve/veya daralan yerleşim alanlarında kalan transformatörler için ideal bir çözüm olarak görülmektedir [4].



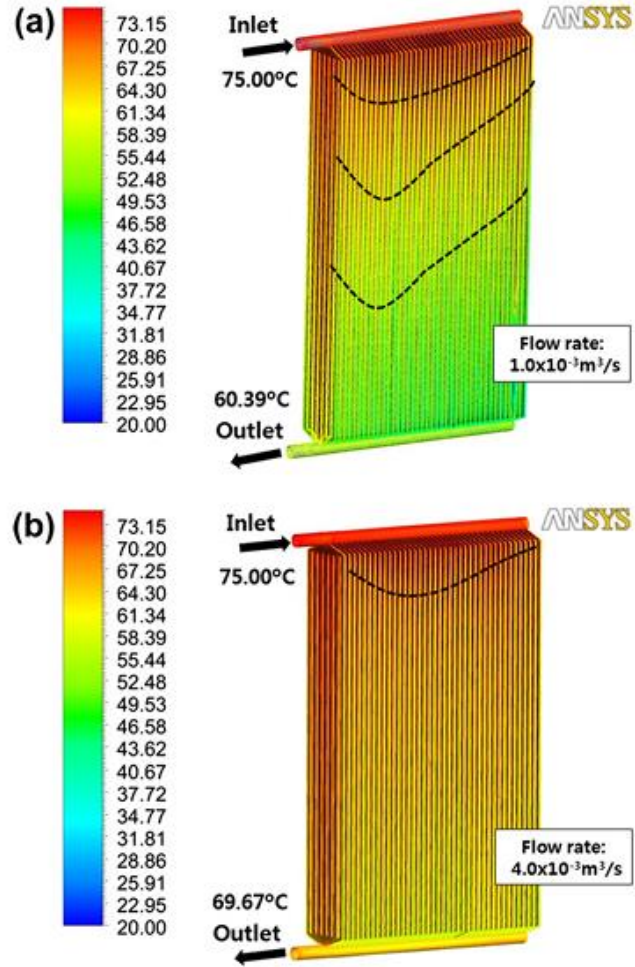
Şekil 1.8: ODWF Soğutma

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Min-gu Kim ve arkadaşları, bu makalede, yağlı tip transformatör uygulamalarında kullanılan radyatörlerin soğutma performansının deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. ONAN soğutma sistemini ele alıp, performans karşılaştırması yapmışlardır [5].

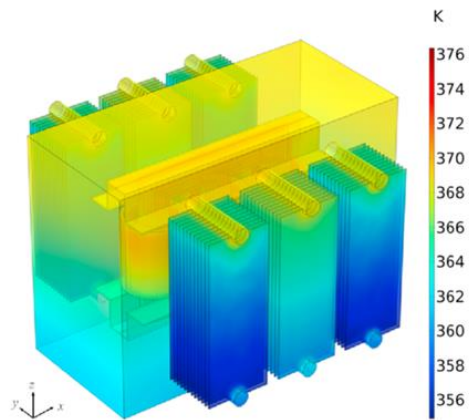


Şekil 2.1: a) 4 adet radyatör dizisinin şematik görünümü ve b) teorik hesaplamalar için radyatör detayları [5]

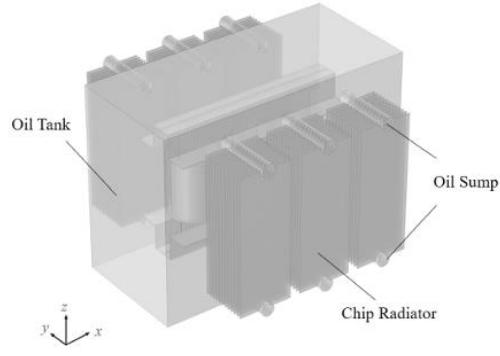


Şekil 2.2: Farklı debilerde radyatör sıcaklık dağılımının CFD simülasyon sonuçları [5]

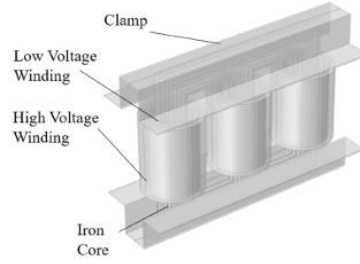
Bingshan Ma ve arkadaşları, bu çalışmada radyatörün şekli, konumu ve yerleşimi gibi tasarım değişkenlerinin, sıcaklık dağılımına ve dolayısıyla transformator performansına etkilerini incelemişlerdir [6].



Şekil 2.3: Genel transformator sıcaklık dağılımı alt grafikleri [6]



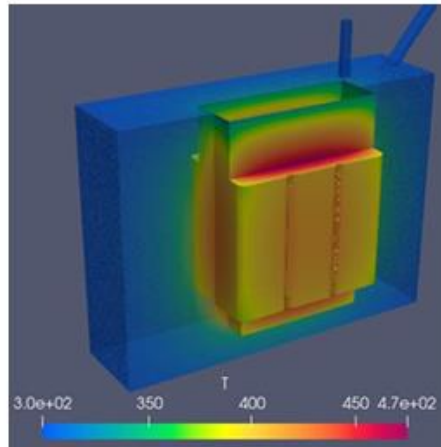
(a) Schematic diagram of transformer structure



(b) Schematic diagram of internal structure

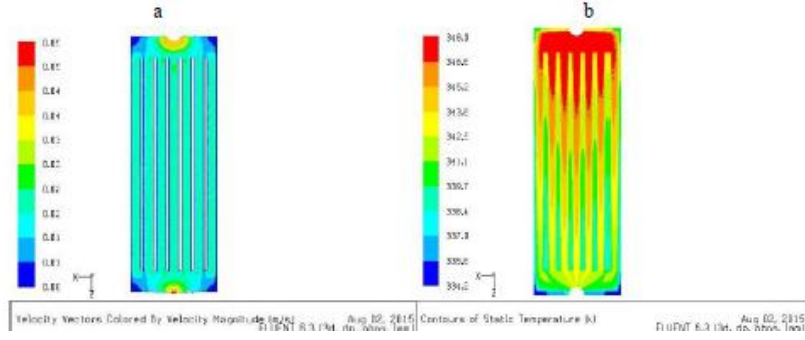
Şekil 2.4: Fiziksel modelin şematik gösterimi [6]

Bu çalışmada Murat Tören güç transformatörlerinde kullanılan yağlı tip soğutma sistemlerini sonlu elemanlar (FEM) ve hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) yöntemleri ile incelemiştir [7].



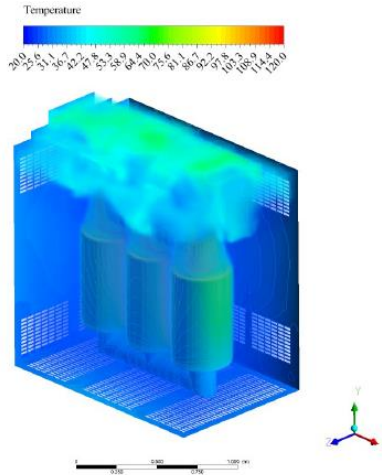
Şekil 2.5: Isıl sıvının tamamen yağ olduğu mahfaza akış alanındaki sıcaklık dağılımı [7]

Anishek ve arkadaşları bu çalışmada, yağlı tip transformatörde soğutma sistemlerinin FEM ve CFD ile analizi üzerine detaylı bir örnek sunmuşlardır [8].



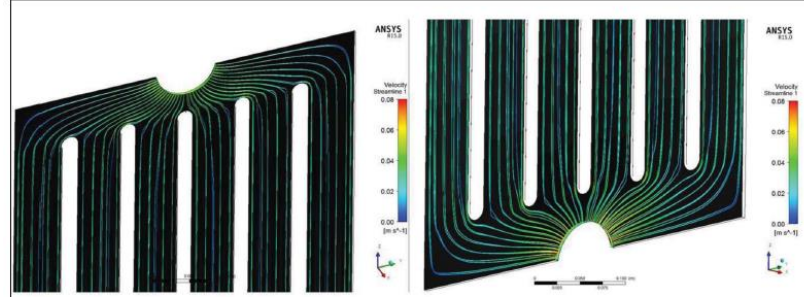
Şekil 2.6: a) Kesitin orta düzlemindeki hız vektörleri b) Kesitin orta düzlemindeki sıcaklık konturları [8]

Ramazan bu çalışmasında, kabinli kuru tip transformatörlerde ısı artışı ve soğuma performansını irdelenmiştir. Kuru tip transformatörlerde ısınma önemli bir problemdir. Kuru tip transformatörlerde genellikle yapılan ısınma analizleri kabin etkisi olmadan gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle kabinli tasarımlarda soğutma performansının nasıl olduğu literatürde yeterince bilinmemektedir [9].

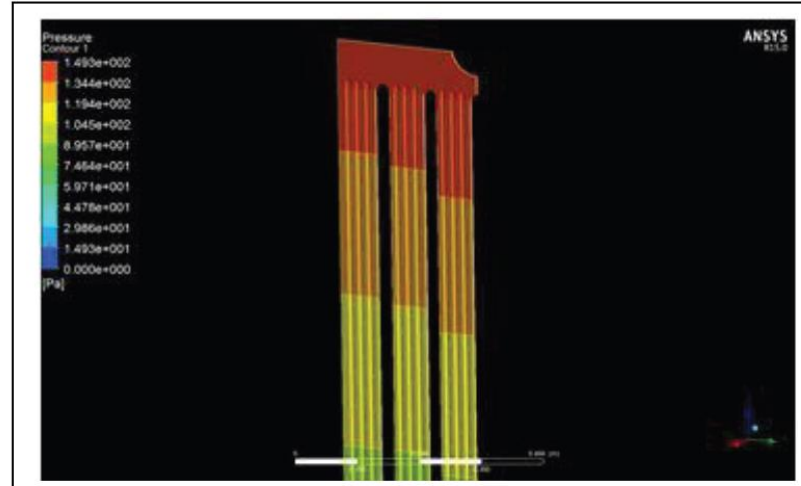


Şekil 2.7: Kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı [9]

Özben bu tez çalışmasında, yağlı tip transformatör radyatörlerinde ısı transferinin incelenmesi üzerine odaklanmaktadır. Transformatörler, sargı dirençlerinden kaynaklanan kayıplar nedeniyle ısı üretirler ve bu ısı, transformatör yağının yardımıyla taşınarak radyatör yüzeylerinden çevreye yayılır. Transformatörün güvenli çalışması ve ömrü için sargı sıcaklığının belirli sınırlar altında tutulması kritik önemdedir. Yüksek sıcaklık izolasyon malzemesine ve transformatöre zara verebilir. Mineral yağ, silikon yağ ve ester yağı olmak üzere üç farklı transformatör yağının radyatör içerisindeki akış ve ısı transferi davranışı 3B olarak modellenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ısı akışı, basınç kaybı gibi farklı açılardan değerlendirilmiştir [10].

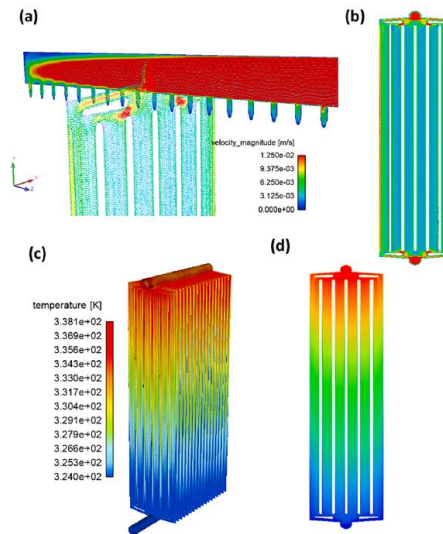


Şekil 2.8: Ester bazlı transformatör yağının radyatör giriş ve çıkış bölgelerindeki akım çizgileri [10]



Şekil 2.9: Sentetik transformatör yağının radyatör girişindeki basınç dağılımı [10]

Ali İhsan Koca ve arkadaşları bu çalışmada, ONAN (Oil Natural Air Natural) soğutma sistemine sahip bir güç transformatöründe kullanılan farklı radyatör konfigürasyonlarının soğutma kapasitesini, yapay sinir ağları (Artificial Neural Networks – ANN) kullanılarak tahmin etmeyi amaçlanmıştır [11].



Şekil 2.10: Sıcaklık ve hız profilleri ($L = 2000$, $N = 18$) [11]

3. ANALİZ

3.1 Problemin Tanımı

ONAN (Oil Natural Air Natural) soğutma sistemine sahip yağlı tip güç transformatörlerinde, transformatörün güvenli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi, sargılar ve çekirdek üzerinde oluşan ısının etkin bir biçimde uzaklaştırılmasına bağlıdır. Bu ısı transferi sürecinde radyatörler, transformatör yağında oluşan ısının doğal konveksiyon yoluyla havaya aktarılmasını sağlayan en kritik soğutma elemanlarıdır. Radyatörlerin geometrik yapısı, yüzey alanı, dilim sayısı ve yerleşimi gibi tasarım parametreleri, soğutma performansını doğrudan etkilemektedir.

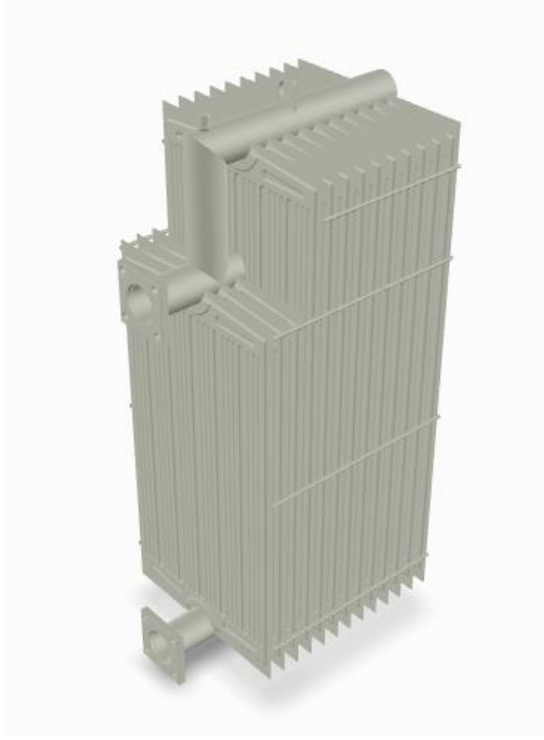
Yetersiz ya da radyatör tasarımlarının uygunsuzluğu, transformatör çekirdeği ve yağı birlikte sargıların da aşırı ısınmasına neden olur. Bu durum iletkenlerin üzerindeki izolasyon materyallerinde bozulmaya yol açmakta, sonuçta transformatörün işletme süresinin azalmasına neden olmaktadır. İyi bir radyatör tasarımı ise sadece bu olumsuzlukları engellemekle kalmaz aynı zamanda maksimum radyatör kapasitesine kadar kullanılmalıdır. Aksi takdirde radyatör kapasitesi gereğinden fazla kullanılırsa, malzeme israfına ve fazladan transformatör hacmine yol açmakta, dolayısıyla maliyeti artırmaktadır. Bu nedenle, ONAN soğutmalı yağlı tip güç transformatörlerinde kullanılan radyatör tasarımlarının soğutma kapasiteleri üzerine etkisi, parametrik bir inceleme ve karşılaştırmalı bir değerlendirme olarak gündeme gelebilmektedir.

Bu nedenle, radyatörün parametrik analiz ile incelenmesi gerekmektedir. Ancak parametrik analizler için yüksek hesaplama süresi gerekmektedir. Bu nedenle radyatör geometrisinin basitleştirilmesi zorunludur. Bu nedenle basit bir radyatör geometrisi üzerinde sonlu elemanlar yöntemi analiz yapılması gerekir. Böylece farklı radyatör tasarımlarının soğutma performansları karşılaştırabilecek ve ONAN soğutmalı yağlı tip güç transformatörleri için en uygun radyatör tasarımı hakkında sonuçlar elde edilebilecektir.

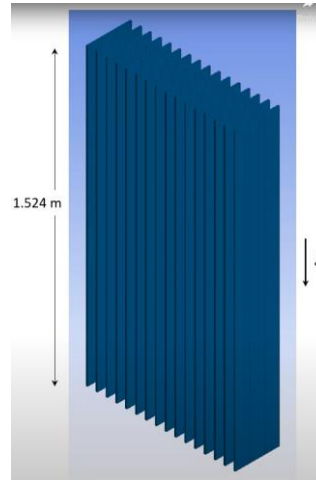
Gerçekleştirilen tüm parametrik analizler ANSYS 2023/R2 yazılımı kullanılarak yapılmıştır [12].

3.2 Model

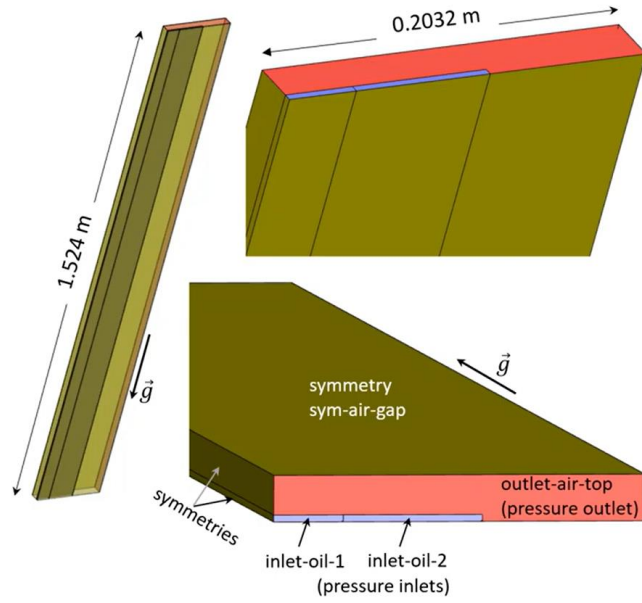
Bu çalışmada kullanılan radyatör 3D modeli, ANSYS Innovation Space platformunda yer alan “Two-Stream Natural Convection in a Panel Radiator” başlıklı doğal konveksiyon örnek çalışması esas alınarak oluşturulmuştur. İlgili örnek model, ONAN soğutma koşullarını temsil ettiği için seçilmiştir. İlgili model, radyatör geometrisinde yağ ve havanın doğal konveksiyon davranışının sonuçlarını incelemek amacıyla referans alınmıştır [13].



Şekil 3.1: Radyatör genel görünümü [14]



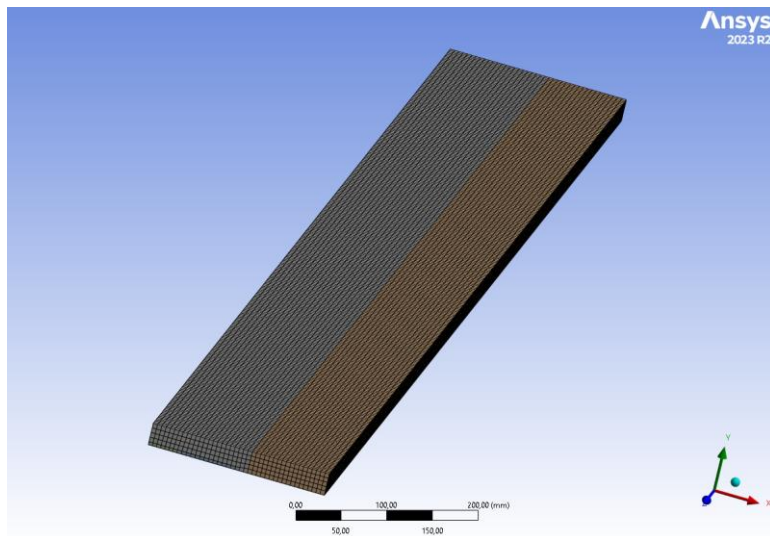
Şekil 3.2: Analiz edilen geometrinin genel ölçüleri



Şekil 3.3: Analiz edilen geometrinin yüzey tanımlamaları

3.3 Mesh

Kesin ve güvenilir sonuçlar elde etmek mesh kalitesi çok önemlidir. Bu nedenle çözüm ağı oluşturulurken, ısı transferi davranışının doğru şekilde temsil edilebilmesi amacıyla geometriye uygun hücre yapısı, yeterli eleman yoğunluğu ve yüksek ağ kalitesi kriterleri dikkate alınmıştır. 3D modeldeki mesh elemanı sayısı 62525 adettir. Mesh ağının minimum skewness değeri $1,3035 \times 10^{-10}$, maksimum skewness değeri ise 0,070056'dır. Elde edilen bu değerler, literatürde önerilen ve kabul edilebilir seviyededir. Ayrıca bu değerler, ağ yapısının yüksek kalitede olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.4: Geometrinin genel mesh yapısı

3.4 Malzeme Özellikleri ve Giriş Parametreleri

3.4.1 Yağ giriş sıcaklığı

Bu çalışmada yapılan sayısal analizlerde, yağ giriş sıcaklığı 50 °C ile 90 °C aralığında seçilmiştir. Bu sıcaklık aralığı, transformatörlerin normal işletme koşullarından yüksek yük altında çalışma durumlarına kadar olan geniş bir çalışma rejimini temsil etmektedir.

3.4.2 Hava sıcaklığı

Yapılan analizlerde çevre (hava) sıcaklığı, IEC 60076-1 standardı referans alınarak -25 °C ile +40 °C aralığında belirlenmiştir. Bu aralık, güç transformatörlerinin normal saha koşullarında güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak üzere uluslararası standartlar tarafından belirlenmiş hava sıcaklığı aralığıdır [15].

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box. The 'Name' field is set to 'air'. The 'Material Type' is 'fluid'. The 'Chemical Formula' field is empty. The 'Fluent Fluid Materials' dropdown is set to 'air'. The 'Mixture' dropdown is set to 'none'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. There are buttons for 'Fluent Database...', 'GRANTA MDS Database...', and 'User-Defined Database...'. The 'Properties' section is expanded, showing the following properties and values:

Property	Value
Density [kg/m ³]	incompressible-ideal-gas
Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]	constant, 1006.43
Thermal Conductivity [W/(m K)]	constant, 0.0242
Viscosity [kg/(m s)]	sutherland
Molecular Weight [kg/kmol]	constant, 28.966

At the bottom of the dialog are buttons for 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help'.

Şekil 3.5: Analiz programına girilen havanın özellikleri

3.4.3 Sac kalınlığı

Analizlerde kullanılan radyatör sac kalınlığı için, 1 mm ve 1,2 mm olmak üzere iki farklı değer seçilmiştir. Bu kalınlık değerleri standartlar ve şartnameler dikkate alınarak seçilmiştir.

3.4.4 Radyatör sac malzemesi

Radyatör sac malzemesi olarak ST12, S235J, S355J ve AISI 316L olmak üzere dört farklı malzeme seçilmiştir.

ST12, radyatör imalatında en fazla kullanılan malzemedir. S235J ve S355J, ST12'ye göre daha mukavemetli olması ve kolay bulunabilirliği nedeniyle seçilmiştir. S235J ve S355J, EN 10025 standardına göre yapısal çeliklerdir.

AISI 316L ise nadir olarak şartnamelerde müşteriler tarafından talep edilmesi nedeniyle seçilmiştir. AISI 316L ise yüksek korozyon direnci ve iyi ısı iletkenlik özellikleri sayesinde zorlu çevresel koşullarda kullanılan paslanmaz çelik türüdür. AISI 316L, pahalı olması nedeniyle radyatör üretiminde kullanılan bir malzeme değildir. Sadece şartnamelerde talep edilmesi nedeniyle seçilmiştir. Yapılan analizlerde ST12 malzemeye en yakın özelliklerde olan carbon steel 1010 malzeme seçilmiştir.

3.4.5 Analizlerde kullanılan yağ çeşitleri

Analizler için transformatörlerde yaygın olarak kullanılan 3 farklı yağ türü seçilmiştir. Seçilen yağlar farklı özelliklere sahiptir. Bunlardan ilki mineral bazlı transformatör yağına örnek, diğeri naftanik bazlı transformatör yağına örnek ve son olarak seçilen yağda doğal ester bazlı transformatör yağına örnektir.

Create/Edit Materials

Name: oil

Material Type: fluid

Chemical Formula:

Fluent Fluid Materials: oil

Mixture: none

Order Materials by: ☒ Name ☐ Chemical Formula

Fluent Database... GRANTA MDS Database... User-Defined Database...

Properties

Density [kg/m³]: boussinesq (856)

Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]: constant (1887)

Thermal Conductivity [W/(m K)]: constant (0.1151)

Viscosity [kg/(m s)]: piecewise-linear

Thermal Expansion Coefficient [K⁻¹]: constant (0.000769)

Change/Create Delete Close Help

Şekil 3.6: Analliz programına girilen NBTY özellikleri

Create/Edit Materials

Name: oil

Chemical Formula:

Material Type: fluid

Fluent Fluid Materials: oil

Mixture: none

Order Materials by:
 ☒ Name
 ☐ Chemical Formula

Fluent Database...
GRANTA MDS Database...
User-Defined Database...

Properties

Density [kg/m³]: boussinesq Edit...
802

Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]: constant Edit...
2201

Thermal Conductivity [W/(m K)]: constant Edit...
0.143

Viscosity [kg/(m s)]: piecewise-linear Edit...
[Empty field]

Thermal Expansion Coefficient [K⁻¹]: constant Edit...
0.00080342

Change/Create Delete Close Help

Şekil 3.7: Analiz programına girilen MBTY özellikleri

Create/Edit Materials

Name: oil

Chemical Formula:

Material Type: fluid

Fluent Fluid Materials: oil

Mixture: none

Order Materials by:
 ☒ Name
 ☐ Chemical Formula

Fluent Database...
GRANTA MDS Database...
User-Defined Database...

Properties

Density [kg/m³]: boussinesq Edit...
917

Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]: constant Edit...
2169

Thermal Conductivity [W/(m K)]: constant Edit...
0.162

Viscosity [kg/(m s)]: piecewise-linear Edit...
[Empty field]

Thermal Expansion Coefficient [K⁻¹]: constant Edit...
0.00075577

Change/Create Delete Close Help

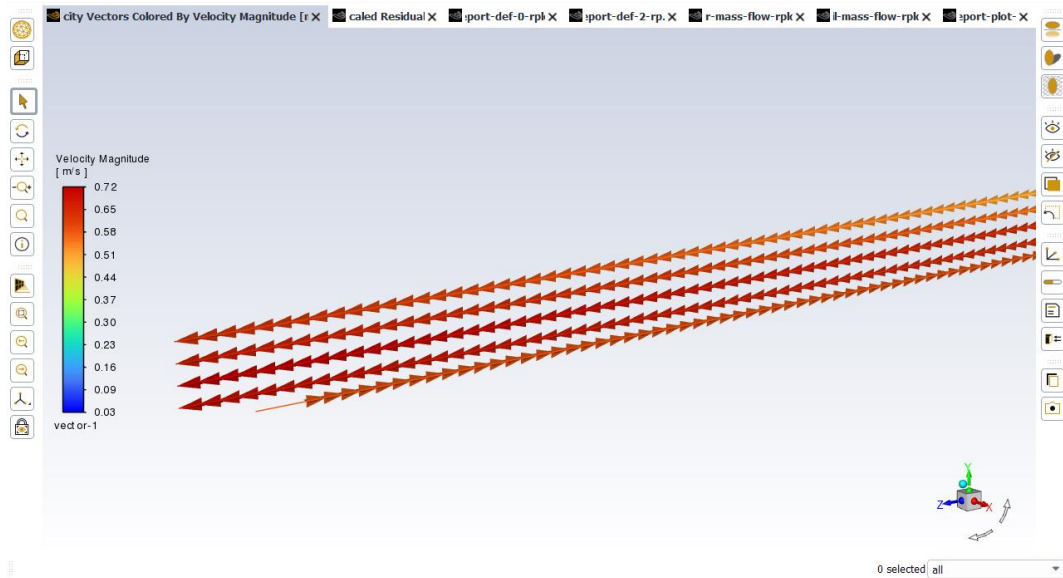
Şekil 3.8: Analiz programına girilen DEBTY özellikleri

3.5 Sınır Şartları

Analizlerde enerji denklemi aktif edilmiştir ve k- ω türbülans modeli kullanılmıştır. Daha hassas çözüm için k- ω SST (Shear Stress Transport) modeli tercih edilmiştir. Sınır şartı olarak yağ ve hava girişi pressure inlet, Yağ ve hava çıkışı pressure outlet olarak girilmiştir.

3.6 Çözüm Modelleri

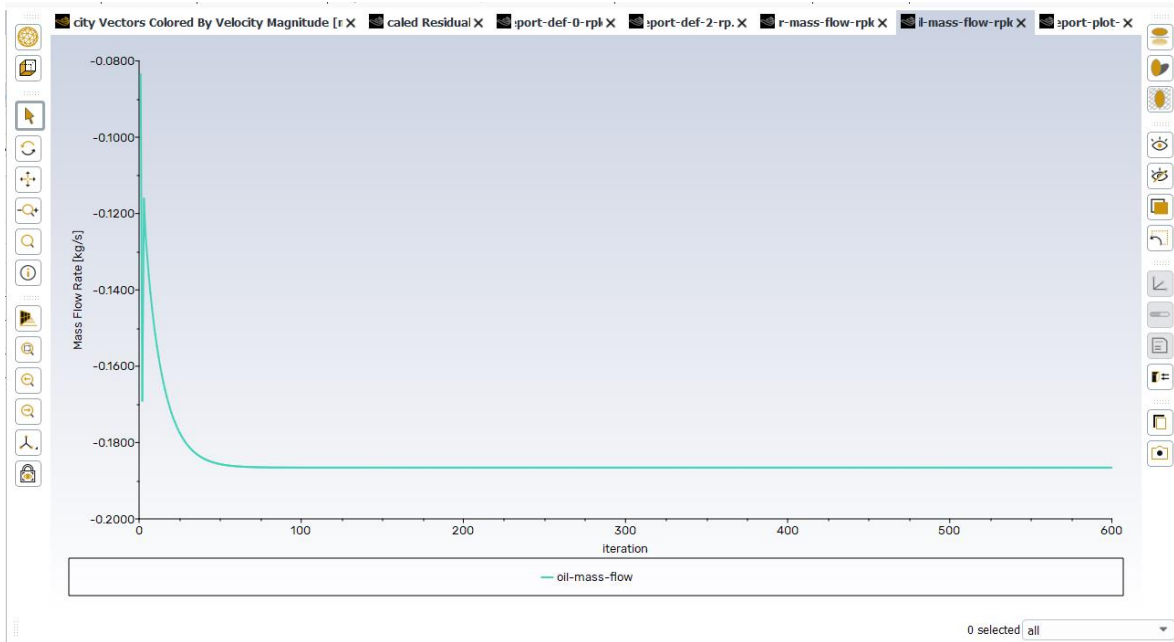
Birçok parametrik analiz yapılmıştır. Analizlerin hepsinin bir arada sunulması, genişliği açısından, mümkün değildir. Yani, sadece bir parametrik analiz örnek teşkil etmek üzere bu bölümde sunulmuştur. Diğer tüm analizlerde gözlenen genel trendin de içerisinde olan bu analiz, parametrik analizlerin genel durumunu değerlendirebilmek için seçilmiştir.



Şekil 3.9: DEBTY ile 316L malzeme analizinde YZ plane kesiti akış hızları-1



Şekil 3.10: DEBTY ile 316L malzeme analizinde YZ plane kesiti akış hızları-1



Şekil 3.11: DEBTY ile 316L malzeme analizinde oil mass flow analiz sonucu

3.7 Analiz Sonuçları

Tablo 3.1: MBTY için S235J malzeme analiz sonuçları

Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)	Yağ çıkış sıcaklığı (K)	Hava kütle akışı (kg/s)	Yağ kütle akışı (kg/s)	Entalpi (j/kg)	Güç (W)
DP 1	343	280,5	0,0011	314,20	-0,0034	-0,11	33636,37	-3566,05
DP 2	323	248	0,0012	289,77	-0,0009	-0,15	-18215,82	2715,91
DP 3	343	225,84	0,0011	276,66	-0,0025	-0,14	-45607,12	6167,94
DP 4	343	280,5	0,0011	314,20	-0,0034	-0,11	33636,37	-3566,05
DP 5	309,36	280,5	0,0011	299,59	-0,0018	-0,15	3122,97	-454,32
DP 6	323	313	0,0012	316,05	-0,0025	-0,27	39024,97	-10507,84
DP 7	343	280,5	0,0011	314,20	-0,0034	-0,11	33636,37	-3566,05
DP 8	323	248	0,001	289,72	-0,0008	-0,15	-18336,77	2733,44
DP 9	343	280,5	0,0011	314,20	-0,0034	-0,11	33636,37	-3566,05
DP 10	363	248	0,0012	269,06	-0,0034	-0,08	-59725,16	4816,32
DP 11	343	280,5	0,00093	314,16	-0,0034	-0,11	34078,42	-3211,06
DP 12	363	248	0,001	268,35	-0,0030	-0,08	-61388,85	4915,16
DP 13	343	335,158	0,0011	337,42	-0,0031	-0,19	85132,87	-16316,28
DP 14	343	280,5	0,0011	314,20	-0,0034	-0,11	33636,37	-3566,05
DP 15	376,63	280,5	0,0011	367,15	-0,0018	-0,09	139790,86	-12184,71
DP 16	363	313	0,0012	315,12	-0,0034	-0,20	37144,01	-7243,82
DP 17	323	313	0,001	316,05	-0,0027	-0,27	39024,71	-10507,66
DP 18	343	280,5	0,0011	314,20	-0,0034	-0,11	33636,37	-3566,05
DP 19	363	313	0,001	315,04	-0,0033	-0,19	37018,48	-7207,21
DP 20	343	280,5	0,00126	314,23	-0,0030	-0,11	34668,19	-3677,04

Tablo 3.2: MBTY için S335J malzeme analiz sonuçları

Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)	Yağ çıkış sıcaklığı (K)	Hava kütle akışı (kg/s)	Yağ kütle akışı (kg/s)	Entalpi (j/kg)	Güç (W)
DP 1	343	280,5	0,0011	314,19	-0,0033	-0,11	34103,56	-3615,36
DP 2	323	248	0,0012	289,78	-0,0015	-0,15	-18099,64	2698,45
DP 3	343	225,842	0,0011	276,65	-0,0024	-0,14	-45893,99	6205,31
DP 4	343	280,5	0,0011	314,19	-0,0033	-0,11	34103,56	-3615,36
DP 5	309,364	280,5	0,0011	299,59	-0,0018	-0,15	3122,30	-454,23
DP 6	323	313	0,0012	316,05	-0,0026	-0,27	39003,21	-10501,95
DP 7	343	280,5	0,0011	314,19	-0,0033	-0,11	34103,56	-3615,36
DP 8	323	248	0,001	289,79	-0,0017	-0,15	-18058,80	2691,60
DP 9	343	280,5	0,0011	314,19	-0,0033	-0,11	34103,56	-3615,36
DP 10	363	248	0,0012	268,98	-0,0032	-0,08	-59777,20	4816,96
DP 11	343	280,5	0,00093	314,16	-0,0029	-0,11	34603,97	-3666,52
DP 12	363	248	0,001	268,28	-0,0035	-0,08	-61501,16	4920,45
DP 13	343	335,158	0,0011	337,42	-0,0031	-0,19	85087,16	-16307,43
DP 14	343	280,5	0,0011	314,19	-0,0033	-0,11	34103,56	-3615,36
DP 15	376,636	280,5	0,0011	367,15	-0,0018	-0,09	139790,86	-12184,71
DP 16	363	313	0,0012	315,12	-0,0034	-0,19	37146,94	-7242,94
DP 17	323	313	0,001	316,05	-0,0025	-0,27	39037,12	-10511,01
DP 18	343	280,5	0,0011	314,19	-0,0033	-0,11	34103,56	-3615,36
DP 19	363	313	0,001	315,04	-0,0044	-0,19	35742,53	-6957,35
DP 20	343	280,5	0,00126	314,22	-0,0029	-0,11	34767,83	-3687,40

Tablo 3.3: MBTY için carbon steel 1010 malzeme analiz sonuçları

Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)	Yağ çıkış sıcaklığı (K)	Hava kütle akışı (kg/s)	Yağ kütle akışı (kg/s)	Entalpi (j/kg)	Güç (W)
DP 1	343	280,5	0,0011	314,23	-0,0029	-0,11	34775,99	-3688,80
DP 2	323	248	0,0012	289,85	-0,0019	-0,15	-17861,22	2663,22
DP 3	343	225,842	0,0011	276,76	-0,0022	-0,14	-45151,17	6111,12
DP 4	343	280,5	0,0011	314,23	-0,0029	-0,11	34775,99	-3688,80
DP 5	309,364	280,5	0,0011	299,60	-0,0018	-0,15	3139,63	-456,74
DP 6	323	313	0,0012	316,05	-0,0026	-0,27	39023,93	-10507,66
DP 7	343	280,5	0,0011	314,23	-0,0029	-0,11	34775,99	-3688,80
DP 8	323	248	0,001	289,82	-0,0019	-0,15	-17906,35	2669,37
DP 9	343	280,5	0,0011	314,23	-0,0029	-0,11	34775,99	-3688,80
DP 10	363	248	0,0012	269,65	-0,0033	-0,08	-58815,39	4771,17
DP 11	343	280,5	0,00093	314,19	-0,0030	-0,11	34577,39	-3665,94
DP 12	363	248	0,001	268,99	-0,0029	-0,08	-60503,20	4876,63
DP 13	343	335,158	0,0011	337,42	-0,0033	-0,19	84422,23	-16180,15
DP 14	343	280,5	0,0011	314,23	-0,0029	-0,11	34775,99	-3688,80
DP 15	376,636	280,5	0,0011	367,15	-0,0018	-0,09	139790,86	-12184,71
DP 16	363	313	0,0012	315,20	-0,0039	-0,20	36786,89	-7184,75
DP 17	323	313	0,001	316,05	-0,0026	-0,27	39036,79	-10510,99
DP 18	343	280,5	0,0011	314,23	-0,0029	-0,11	34775,99	-3688,80
DP 19	363	313	0,001	315,12	-0,0034	-0,19	37123,91	-7239,07
DP 20	343	280,5	0,00126	314,27	-0,0031	-0,11	34710,15	-3683,47

Tablo 3.4: MBTY için 316L malzeme analiz sonuçları

Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)	Yağ çıkış sıcaklığı (K)	Hava kütle akışı (kg/s)	Yağ kütle akışı (kg/s)	Entalpi (j/kg)	Güç (W)
DP 1	343	280,5	0,0011	313,97	-0,0030	-0,11	33932,76	-3585,86
DP 2	323	248	0,0012	289,66	-0,0015	-0,15	-18217,29	2712,65
DP 3	343	225,842	0,0011	275,99	-0,0020	-0,13	-46836,02	6293,38
DP 4	343	280,5	0,0011	313,97	-0,0030	-0,11	33932,76	-3585,86
DP 5	309,364	280,5	0,0011	299,57	-0,0025	-0,15	3017,50	-439,03
DP 6	323	313	0,0012	316,04	-0,0026	-0,27	38962,36	-10490,51
DP 7	343	280,5	0,0011	313,97	-0,0030	-0,11	33932,76	-3585,86
DP 8	323	248	0,001	289,64	-0,0019	-0,15	-18304,08	2725,49
DP 9	343	280,5	0,0011	313,97	-0,0030	-0,11	33932,76	-3585,86
DP 10	363	248	0,0012	263,43	-0,0033	-0,08	-71541,92	5459,40
DP 11	343	280,5	0,00093	313,94	-0,0031	-0,11	34057,10	-3597,84
DP 12	363	248	0,001	262,50	-0,0029	-0,08	-74032,64	5599,36
DP 13	343	335,158	0,0011	337,42	-0,0031	-0,19	85130,51	-16313,58
DP 14	343	280,5	0,0011	313,97	-0,0030	-0,11	33932,76	-3585,86
DP 15	376,636	280,5	0,0011	294,28	-0,0036	-0,04	-5712,38	252,72
DP 16	363	313	0,0012	314,43	-0,0034	-0,19	35629,09	-6848,21
DP 17	323	313	0,001	316,04	-0,0026	-0,27	39039,31	-10511,16
DP 18	343	280,5	0,0011	313,97	-0,0030	-0,11	33932,76	-3585,86
DP 19	363	313	0,001	314,98	-0,0035	-0,20	36827,50	-7193,60
DP 20	343	280,5	0,00126	313,98	-0,0030	-0,11	33990,35	-3593,20

Tablo 3.5: NBTY için S235J malzeme analiz sonuçları

Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)	Yağ çıkış sıcaklığı (K)	Hava kütle akışı (kg/s)	Yağ kütle akışı (kg/s)	Entalpi (j/kg)	Güç (W)
DP 1	343	280,5	0,0011	313,72	-0,0031	-0,11	28837,28	28837,28
DP 2	323	248	0,0012	289,29	-0,0022	-0,16	-16326,42	-16326,42
DP 3	343	225,842	0,0011	275,95	-0,0021	-0,14	-40479,08	-40479,08
DP 4	343	280,5	0,0011	313,72	-0,0031	-0,11	28837,28	28837,28
DP 5	309,364	280,5	0,0011	299,38	-0,0018	-0,15	2297,43	2297,43
DP 6	323	313	0,0012	316,04	-0,0026	-0,28	33273,23	33273,23
DP 7	343	280,5	0,0011	313,72	-0,0031	-0,11	28837,28	28837,28
DP 8	323	248	0,001	289,26	-0,0013	-0,16	-16465,82	-16465,82
DP 9	343	280,5	0,0011	313,72	-0,0031	-0,11	28837,28	28837,28
DP 10	363	248	0,0012	268,32	-0,0040	-0,09	-51177,13	-51177,13
DP 11	343	280,5	0,00093	313,67	-0,0029	-0,11	28898,95	28898,95
DP 12	363	248	0,001	267,67	-0,0031	-0,09	-53173,08	-53173,08
DP 13	343	335,158	0,0011	337,42	-0,0032	-0,20	73050,77	73050,77
DP 14	343	280,5	0,0011	313,72	-0,0031	-0,11	28837,28	28837,28
DP 15	376,636	280,5	0,0011	345,13	-0,0018	0,02	46659,96	17258,59
DP 16	363	313	0,0012	315,06	-0,0034	-0,20	31835,20	31835,20
DP 17	323	313	0,001	316,04	-0,0025	-0,28	33504,90	33504,90
DP 18	343	280,5	0,0011	313,72	-0,0031	-0,11	28837,28	28837,28
DP 19	363	313	0,001	314,99	-0,0035	-0,20	31545,84	31545,84
DP 20	343	280,5	0,00126	313,75	-0,0029	-0,11	29010,15	29010,15

Tablo 3.6: NBTY için S355J malzeme analiz sonuçları

Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)	Yağ çıkış sıcaklığı (K)	Hava kütle akışı (kg/s)	Yağ kütle akışı (kg/s)	Entalpi (j/kg)	Güç (W)
DP 1	343	280,5	0,0011	313,71	-0,0029	-0,11	28971,07	-3257,77
DP 2	323	248	0,0012	289,30	-0,0026	-0,16	-16361,40	2580,99
DP 3	343	225,842	0,0011	275,94	-0,0024	-0,14	-40576,50	5820,67
DP 4	343	280,5	0,0011	313,71	-0,0029	-0,11	28971,07	-3257,77
DP 5	309,364	280,5	0,0011	299,38	-0,0017	-0,15	2294,88	-352,60
DP 6	323	313	0,0012	316,04	-0,0025	-0,28	33435,91	-9402,25
DP 7	343	280,5	0,0011	313,71	-0,0029	-0,11	28971,07	-3257,77
DP 8	323	248	0,001	289,28	-0,0012	-0,16	-16278,02	2567,15
DP 9	343	280,5	0,0011	313,71	-0,0029	-0,11	28971,07	-3257,77
DP 10	363	248	0,0012	268,23	-0,0031	-0,09	-53281,79	4578,61
DP 11	343	280,5	0,00093	313,68	-0,0030	-0,11	28409,09	-3193,00
DP 12	363	248	0,001	267,59	-0,0035	-0,09	-53861,38	4599,08
DP 13	343	335,158	0,0011	337,41	-0,0031	-0,20	73010,77	-14614,52
DP 14	343	280,5	0,0011	313,71	-0,0029	-0,11	28971,07	-3257,77
DP 15	376,636	280,5	0,0011	345,13	-0,0018	0,02	46659,96	755,54
DP 16	363	313	0,0012	315,06	-0,0035	-0,20	31741,89	-6455,37
DP 17	323	313	0,001	316,04	-0,0026	-0,28	33486,56	-9416,43
DP 18	343	280,5	0,0011	313,71	-0,0029	-0,11	28971,07	-3257,77
DP 19	363	313	0,001	314,98	-0,0034	-0,20	31634,34	-6424,24
DP 20	343	280,5	0,00126	313,74	-0,0029	-0,11	28976,97	-3260,01

Tablo 3.7: NBTY için carbon steel 1010 malzeme analiz sonuçları

Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)	Yağ çıkış sıcaklığı (K)	Hava kütle akışı (kg/s)	Yağ kütle akışı (kg/s)	Entalpi (j/kg)	Güç (W)
DP 1	343	280,5	0,0011	313,76	-0,0032	-0,11	28617,71	-3219,84
DP 2	323	248	0,0012	289,32	-0,0018	-0,16	-16336,60	2577,55
DP 3	343	225,842	0,0011	276,06	-0,0024	-0,14	-40414,57	5803,98
DP 4	343	280,5	0,0011	313,76	-0,0032	-0,11	28617,71	-3219,84
DP 5	309,364	280,5	0,0011	299,39	-0,0018	-0,15	2305,20	-354,17
DP 6	323	313	0,0012	316,04	-0,0027	-0,28	33463,36	-9410,11
DP 7	343	280,5	0,0011	313,76	-0,0032	-0,11	28617,71	-3219,84
DP 8	323	248	0,001	289,22	-0,0006	-0,16	-16690,77	2633,27
DP 9	343	280,5	0,0011	313,76	-0,0032	-0,11	28617,71	-3219,84
DP 10	363	248	0,0012	268,85	-0,0032	-0,09	-52095,82	4504,48
DP 11	343	280,5	0,00093	313,72	-0,0029	-0,11	28990,85	-3260,25
DP 12	363	248	0,001	268,26	-0,0032	-0,09	-53084,89	4562,43
DP 13	343	335,158	0,0011	337,42	-0,0032	-0,20	73016,51	-14615,56
DP 14	343	280,5	0,0011	313,76	-0,0032	-0,11	28617,71	-3219,84
DP 15	376,636	280,5	0,0011	345,26	-0,0018	0,02	46659,96	755,54
DP 16	363	313	0,0012	315,13	-0,0034	-0,20	31949,26	-6506,94
DP 17	323	313	0,001	316,04	-0,0025	-0,28	33503,43	-9421,27
DP 18	343	280,5	0,0011	313,76	-0,0032	-0,11	28617,71	-3219,84
DP 19	363	313	0,001	315,06	-0,0034	-0,20	31817,37	-6471,15
DP 20	343	280,5	0,00126	313,78	-0,0028	-0,11	29120,81	-3278,17

Tablo 3.8: NBTY için 316L malzeme analiz sonuçları

Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)	Yağ çıkış sıcaklığı (K)	Hava kütle akışı (kg/s)	Yağ kütle akışı (kg/s)	Entalpi (j/kg)	Güç (W)
DP 1	343	280,5	0,0011	313,47	-0,0028	-0,11	28558,63	-3201,25
DP 2	323	248	0,0012	289,14	-0,0012	-0,16	-16480,40	2596,62
DP 3	343	225,842	0,0011	275,18	-0,0004	-0,14	-41734,13	5953,25
DP 4	343	280,5	0,0011	313,47	-0,0028	-0,11	28558,63	-3201,25
DP 5	309,364	280,5	0,0011	299,36	-0,0017	-0,15	2251,99	-346,03
DP 6	323	313	0,0012	316,04	-0,0025	-0,28	33508,48	-9422,05
DP 7	343	280,5	0,0011	313,47	-0,0028	-0,11	28558,63	-3201,25
DP 8	323	248	0,001	289,13	-0,0021	-0,16	-16658,38	2624,30
DP 9	343	280,5	0,0011	313,47	-0,0028	-0,11	28558,63	-3201,25
DP 10	363	248	0,0012	263,06	-0,0033	-0,08	-62236,05	5084,46
DP 11	343	280,5	0,00093	313,46	-0,0029	-0,11	28462,78	-3189,31
DP 12	363	248	0,001	262,20	-0,0039	-0,08	-60610,57	4911,82
DP 13	343	335,158	0,0011	337,42	-0,0037	-0,20	71829,18	-14374,74
DP 14	343	280,5	0,0011	313,47	-0,0028	-0,11	28558,63	-3201,25
DP 15	376,636	280,5	0,0011	345,41	-0,0018	-0,03	88772,33	-2436,00
DP 16	363	313	0,0012	314,41	-0,0036	-0,20	30590,42	-6135,65
DP 17	323	313	0,001	316,04	-0,0026	-0,28	33488,91	-9416,50
DP 18	343	280,5	0,0011	313,47	-0,0028	-0,11	28558,63	-3201,25
DP 19	363	313	0,001	314,61	-0,0034	-0,20	30962,63	-6249,24
DP 20	343	280,5	0,00126	313,49	-0,0029	-0,11	28522,57	-3198,26

Tablo 3.9: DEBTY için S235J malzeme analiz sonuçları

Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)	Yağ çıkış sıcaklığı (K)	Hava kütle akışı (kg/s)	Yağ kütle akışı (kg/s)	Entalpi (j/kg)	Güç (W)
DP 1	343	280,5	0,0011	312,97	-0,0032	-0,12	31320,79	-3820,56
DP 2	323	248	0,0012	288,54	-0,0018	-0,17	-20512,61	3498,39
DP 3	343	225,842	0,0011	274,81	-0,0026	-0,16	-49121,85	7639,67
DP 4	343	280,5	0,0011	312,97	-0,0032	-0,12	31320,79	-3820,56
DP 5	309,364	280,5	0,0011	299,09	-0,0018	-0,17	2003,63	-332,11
DP 6	323	313	0,0012	316,05	-0,0027	-0,30	38468,55	-11489,42
DP 7	343	280,5	0,0011	312,97	-0,0032	-0,12	31320,79	-3820,56
DP 8	323	248	0,001	288,51	-0,0018	-0,17	-20520,89	3499,07
DP 9	343	280,5	0,0011	312,97	-0,0032	-0,12	31320,79	-3820,56
DP 10	363	248	0,0012	267,94	-0,0032	-0,09	-62036,15	5874,94
DP 11	343	280,5	0,00093	312,94	-0,0031	-0,12	31371,23	-3824,74
DP 12	363	248	0,001	267,24	-0,0032	-0,09	-63543,94	5975,89
DP 13	343	335,158	0,0011	337,42	-0,0034	-0,21	83739,13	-17801,37
DP 14	343	280,5	0,0011	312,97	-0,0032	-0,12	31320,79	-3820,56
DP 15	376,636	280,5	0,0011	346,67	-0,0017	-0,03	96803,25	-3378,65
DP 16	363	313	0,0012	315,11	-0,0035	-0,22	36063,19	-7801,31
DP 17	323	313	0,001	316,05	-0,0026	-0,30	38520,58	-11504,87
DP 18	343	280,5	0,0011	312,97	-0,0032	-0,12	31320,79	-3820,56
DP 19	363	313	0,001	315,02	-0,0034	-0,22	36429,25	-7866,03
DP 20	343	280,5	0,00126	313,01	-0,0033	-0,12	31314,78	-3821,32

Tablo 3.10: DEBTY için S355J malzeme analiz sonuçları

Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)	Yağ çıkış sıcaklığı (K)	Hava kütle akışı (kg/s)	Yağ kütle akışı (kg/s)	Entalpi (j/kg)	Güç (W)
DP 1	343	280,5	0,0011	312,98	-0,0030	-0,12	31476,60	-3839,17
DP 2	323	248	0,0012	288,54	-0,0020	-0,17	-20449,23	3487,32
DP 3	343	225,842	0,0011	274,76	-0,0019	-0,16	-49000,11	7620,98
DP 4	343	280,5	0,0011	312,98	-0,0030	-0,12	31476,60	-3839,17
DP 5	309,364	280,5	0,0011	299,09	-0,0018	-0,17	1982,32	-328,57
DP 6	323	313	0,0012	316,05	-0,0026	-0,30	38501,33	-11499,15
DP 7	343	280,5	0,0011	312,98	-0,0030	-0,12	31476,60	-3839,17
DP 8	323	248	0,001	288,50	-0,0015	-0,17	-20558,64	3505,42
DP 9	343	280,5	0,0011	312,98	-0,0030	-0,12	31476,60	-3839,17
DP 10	363	248	0,0012	267,85	-0,0032	-0,09	-62287,69	5894,50
DP 11	343	280,5	0,00093	312,93	-0,0030	-0,12	31584,86	-3850,53
DP 12	363	248	0,001	267,15	-0,0034	-0,09	-63609,41	5977,84
DP 13	343	335,158	0,0011	337,43	-0,0032	-0,21	83227,34	-17692,43
DP 14	343	280,5	0,0011	312,98	-0,0030	-0,12	31476,60	-3839,17
DP 15	376,636	280,5	0,0011	346,67	-0,0017	-0,03	96803,25	-3378,65
DP 16	363	313	0,0012	315,11	-0,0036	-0,22	36404,00	-7872,89
DP 17	323	313	0,001	316,05	-0,0026	-0,30	38484,74	-11494,14
DP 18	343	280,5	0,0011	312,98	-0,0030	-0,12	31476,60	-3839,17
DP 19	363	313	0,001	315,02	-0,0036	-0,22	36127,12	-7799,46
DP 20	343	280,5	0,00126	313,01	-0,0030	-0,12	31739,53	-3872,89

Tablo 3.11: DEBTY için carbon steel 1010 malzeme analiz sonuçları

Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)	Yağ çıkış sıcaklığı (K)	Hava kütle akışı (kg/s)	Yağ kütle akışı (kg/s)	Entalpi (j/kg)	Güç (W)
DP 1	343	280,5	0,0011	313,02	-0,0031	-0,12	31559,21	-3851,49
DP 2	323	248	0,0012	288,56	-0,0021	-0,17	-20351,44	3471,52
DP 3	343	225,842	0,0011	274,91	-0,0025	-0,16	-49085,87	7641,65
DP 4	343	280,5	0,0011	313,02	-0,0031	-0,12	31559,21	-3851,49
DP 5	309,364	280,5	0,0011	299,09	-0,0017	-0,17	1992,38	-330,24
DP 6	323	313	0,0012	316,05	-0,0026	-0,30	38506,31	-11500,83
DP 7	343	280,5	0,0011	313,02	-0,0031	-0,12	31559,21	-3851,49
DP 8	323	248	0,001	288,54	-0,0019	-0,17	-20420,58	3482,60
DP 9	343	280,5	0,0011	313,02	-0,0031	-0,12	31559,21	-3851,49
DP 10	363	248	0,0012	268,54	-0,0032	-0,10	-57021,54	5432,69
DP 11	343	280,5	0,00093	312,97	-0,0031	-0,12	31501,02	-3842,52
DP 12	363	248	0,001	267,88	-0,0031	-0,09	-62420,32	5907,59
DP 13	343	335,158	0,0011	337,43	-0,0031	-0,21	83523,54	-17755,86
DP 14	343	280,5	0,0011	313,02	-0,0031	-0,12	31559,21	-3851,49
DP 15	376,636	280,5	0,0011	346,67	-0,0017	-0,03	96803,25	-3378,65
DP 16	363	313	0,0012	315,20	-0,0034	-0,22	36789,95	-7970,52
DP 17	323	313	0,001	316,05	-0,0027	-0,30	38389,92	-11465,95
DP 18	343	280,5	0,0011	313,02	-0,0031	-0,12	31559,21	-3851,49
DP 19	363	313	0,001	315,10	-0,0034	-0,22	36569,13	-7909,61
DP 20	343	280,5	0,00126	313,05	-0,0029	-0,12	31861,18	-3890,09

Tablo 3.12: DEBTY için 316L malzeme analiz sonuçları

Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)	Yağ çıkış sıcaklığı (K)	Hava kütle akışı (kg/s)	Yağ kütle akışı (kg/s)	Entalpi (j/kg)	Güç (W)
DP 1	343	280,5	0,0011	312,75	-0,0032	-0,12	30864,71	-3753,01
DP 2	323	248	0,0012	288,39	-0,0024	-0,17	-20754,59	3535,58
DP 3	343	225,842	0,0011	274,15	-0,0020	-0,15	-50433,73	7797,42
DP 4	343	280,5	0,0011	312,75	-0,0032	-0,12	30864,71	-3753,01
DP 5	309,364	280,5	0,0011	299,06	-0,0018	-0,17	1954,41	-323,98
DP 6	323	313	0,0012	316,05	-0,0026	-0,30	38498,73	-11497,91
DP 7	343	280,5	0,0011	312,75	-0,0032	-0,12	30864,71	-3753,01
DP 8	323	248	0,001	288,33	-0,0012	-0,17	-20810,55	3544,82
DP 9	343	280,5	0,0011	312,75	-0,0032	-0,12	30864,71	-3753,01
DP 10	363	248	0,0012	262,38	-0,0033	-0,09	-72917,22	6541,48
DP 11	343	280,5	0,00093	312,73	-0,0029	-0,12	31188,04	-3791,13
DP 12	363	248	0,001	261,46	-0,0032	-0,09	-75258,00	6694,00
DP 13	343	335,158	0,0011	337,42	-0,0032	-0,21	83823,15	-17816,73
DP 14	343	280,5	0,0011	312,75	-0,0032	-0,12	30864,71	-3753,01
DP 15	376,636	280,5	0,0011	345,37	-0,0017	0,06	97260,88	5532,29
DP 16	363	313	0,0012	314,65	-0,0034	-0,21	35611,04	-7641,51
DP 17	323	313	0,001	316,04	-0,0026	-0,30	38424,41	-11475,67
DP 18	343	280,5	0,0011	312,75	-0,0032	-0,12	30864,71	-3753,01
DP 19	363	313	0,001	315,10	-0,0034	-0,22	36573,65	-7944,96
DP 20	343	280,5	0,00126	312,77	-0,0030	-0,12	30978,05	-3767,91

4. YANIT YÜZEY METODOLOJİSİ (RSM)

4.1 RSM Genel Bilgiler

Box ve Wilson üretim süreçlerinde düşük maliyetlerle yüksek verim ve saflık gibi iyileştirmeler yapabilmek amacıyla 1951 yılında kimyasal reaksiyonları optimize etmek için acaba en iyi ayarlamaları nasıl bulabiliriz diye tepki yüzey metodolojisi'ne (RSM) öncülük ettiler. Yıllardan beri bu metodoloji bir ya da birden çok değişkenden etkilenen sonuçları modellemek veya optimize etmek için çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [16].

RSM, sistemin davranışına ilişkin bilgileri en üst düzeye çıkarırken, gerekli deney sayısını en aza indirmeyi amaçlamaktadır. RSM, elde edilen verileri analiz ederek, tepki değişkenini deneysel faktörlerle ilişkilendiren ampirik modellerin geliştirilmesini sağlar. Bu modeller, daha iyi proses tepkilerinin bulunmasına rehberlik eder. Süreç, optimal bir tepki bulunana veya deneysel kaynakların sınırlarına ulaşılan kadar modeli iyileştirerek ve kendini yenileyecek şekilde devam eder [17].

4.2 RSM'nin Teorik Temeli

RSM, bir sistemin nicel çıktısının, kontrol edilebilir faktörlerin nicel seviyeleriyle değiştiği varsayımına dayanır. Bu ilişki çoğunlukla doğrusal olmayan olduğundan, RSM çoğu zaman ikinci dereceden polinomial modeller kullanır. RSM'nin temel matematiksel modelinden biri şöyledir:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (4.1)$$

Bu modelin amacı, faktör seviyeleri değiştirildiğinde tepkinin nasıl değiştiğini tahmin edebilmek ve bu modeli kullanarak optimum koşulları belirlemektir [18].

4.3 RSM uygulama metodolojisi

Parametrik analizlerde elde edilen sayısal sonuçların modelleri, Response Surface Methodology (RSM) ile yapılmıştır. RSM, Design Expert programı kullanılarak yapılmıştır. Programda yağ giriş sıcaklığı, hava sıcaklığı ve radyatör sac kalınlığı giriş parametreleri

olarak tanımlanmıştır. Yağ çıkış sıcaklığı, hava kütle debisi, yağ kütle debisi, entalpi ve ısı transferi ise çıktı parametreleri olarak girilmiştir [19].

Tablo 4.1: Analizler için sınır değişkenler

Oil inlet (K)	Air inlet (K)	Thickness (M)
323	248	0,001
363	313	0,0012

Tablo 4.2: RSM Central Composite Designa göre yapılması gereken analizler

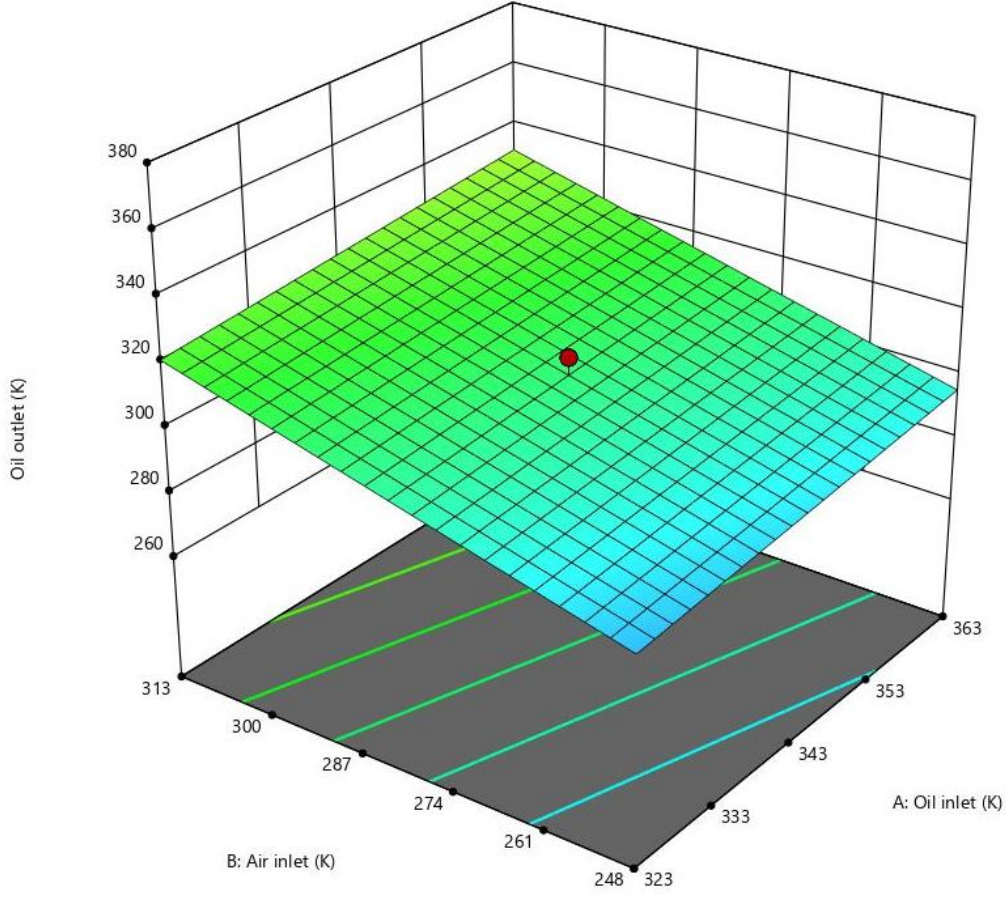
Design point	Yağ giriş sıcaklığı (K)	Hava sıcaklığı (K)	Sac kalınlığı (M)
DP 1	343	280,5	0,0011
DP 2	323	248	0,0012
DP 3	343	225,842	0,0011
DP 4	343	280,5	0,0011
DP 5	309,364	280,5	0,0011
DP 6	323	313	0,0012
DP 7	343	280,5	0,0011
DP 8	323	248	0,001
DP 9	343	280,5	0,0011
DP 10	363	248	0,0012
DP 11	343	280,5	0,000931821
DP 12	363	248	0,001
DP 13	343	335,158	0,0011
DP 14	343	280,5	0,0011
DP 15	376,636	280,5	0,0011
DP 16	363	313	0,0012
DP 17	323	313	0,001
DP 18	343	280,5	0,0011
DP 19	363	313	0,001
DP 20	343	280,5	0,00126818

4.4 RSM Sonuçları

ONAN soğutmalı yağlı tip güç transformatörlerinde radyatör tasarım parametrelerinin soğutma performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla optimizasyon metodu olarak yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) kullanılmıştır. Parametrik analizler, Central Composite Design (CCD) deney tasarımı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Yağ giriş sıcaklığı, hava sıcaklığı ve sac kalınlığı girdi parametresi, analiz sonuçları çıktı parametresi kabul edilerek radyatörün soğutma performansı incelenmiştir.

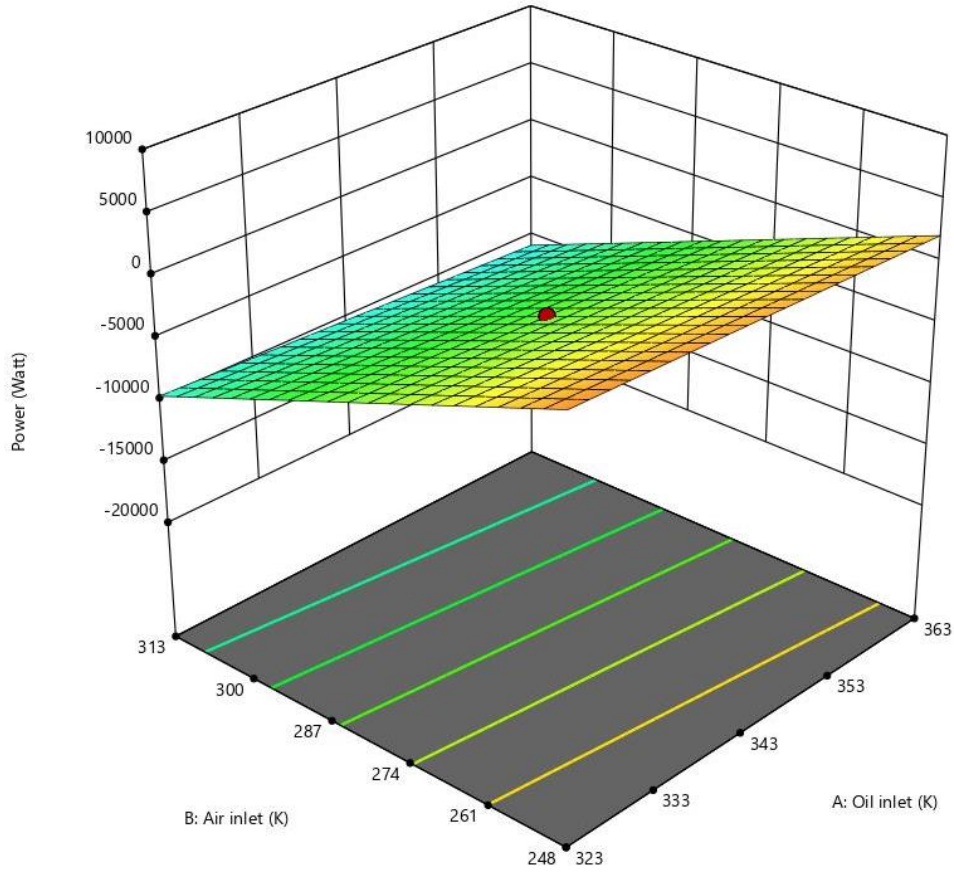
4.5 MBTY İçin RSM Sonuçları

4.5.1 MBTY ile S235J malzeme için RSM sonuçları



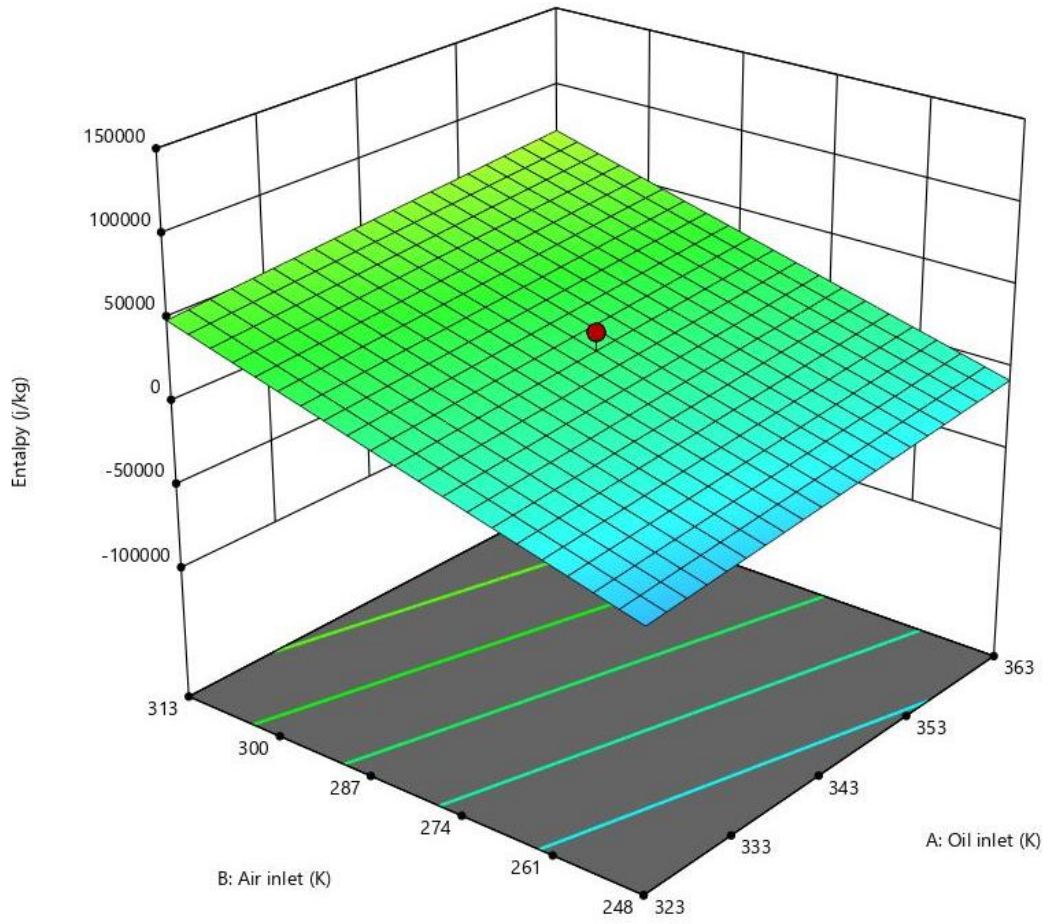
Şekil 4.1: MBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-1

MBTY ile S235J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça yağ çıkış sıcaklığının yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının yağ çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



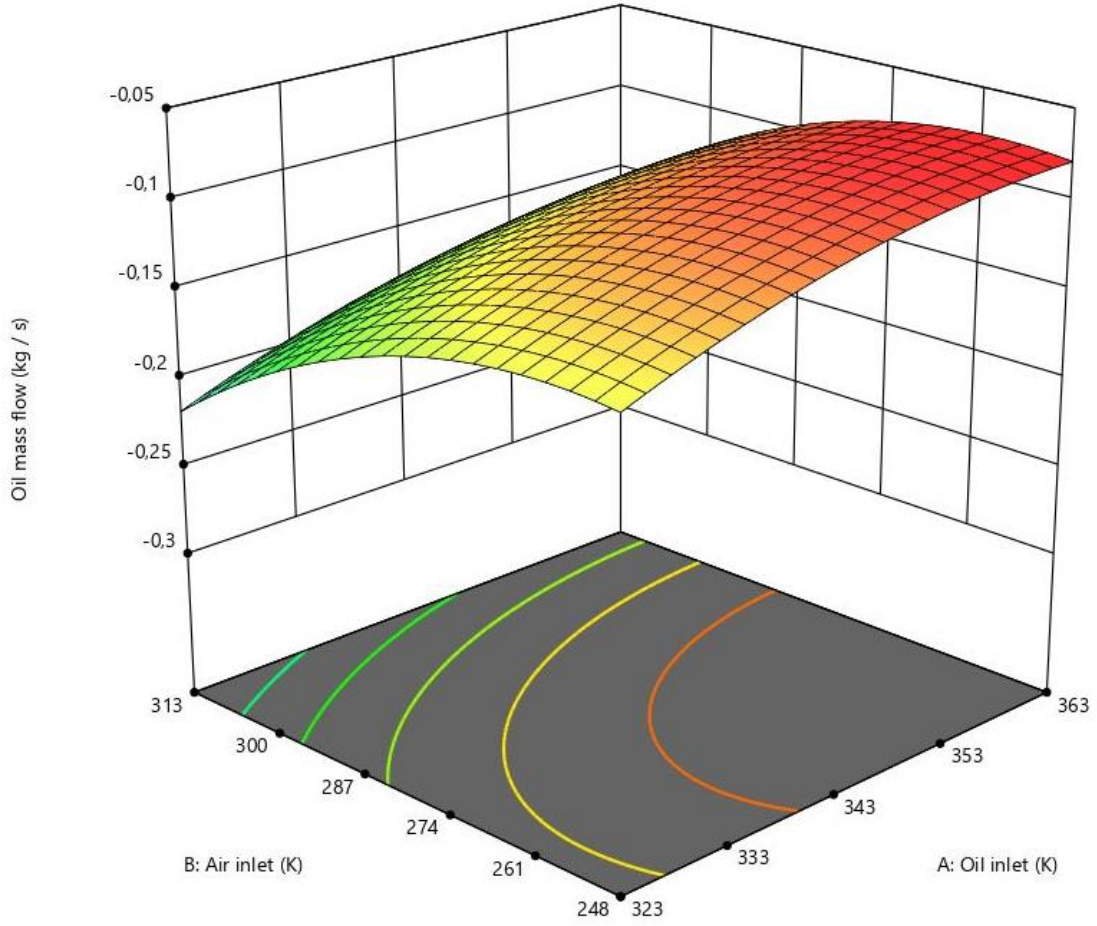
Şekil 4.2: MBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-2

MBTY ile S235J malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve yağ çıkış sıcaklıklarındaki artışla birlikte güç değerinin yaklaşık lineer bir eğilimle değiştiği görülmektedir. Yüzey eğiminin özellikle hava giriş doğrultusunda daha belirgin olması, gücün hava giriş sıcaklığına daha duyarlı olduğunu, buna karşılık yağ giriş sıcaklığının etkisinin görece daha sınırlı kaldığını göstermektedir.



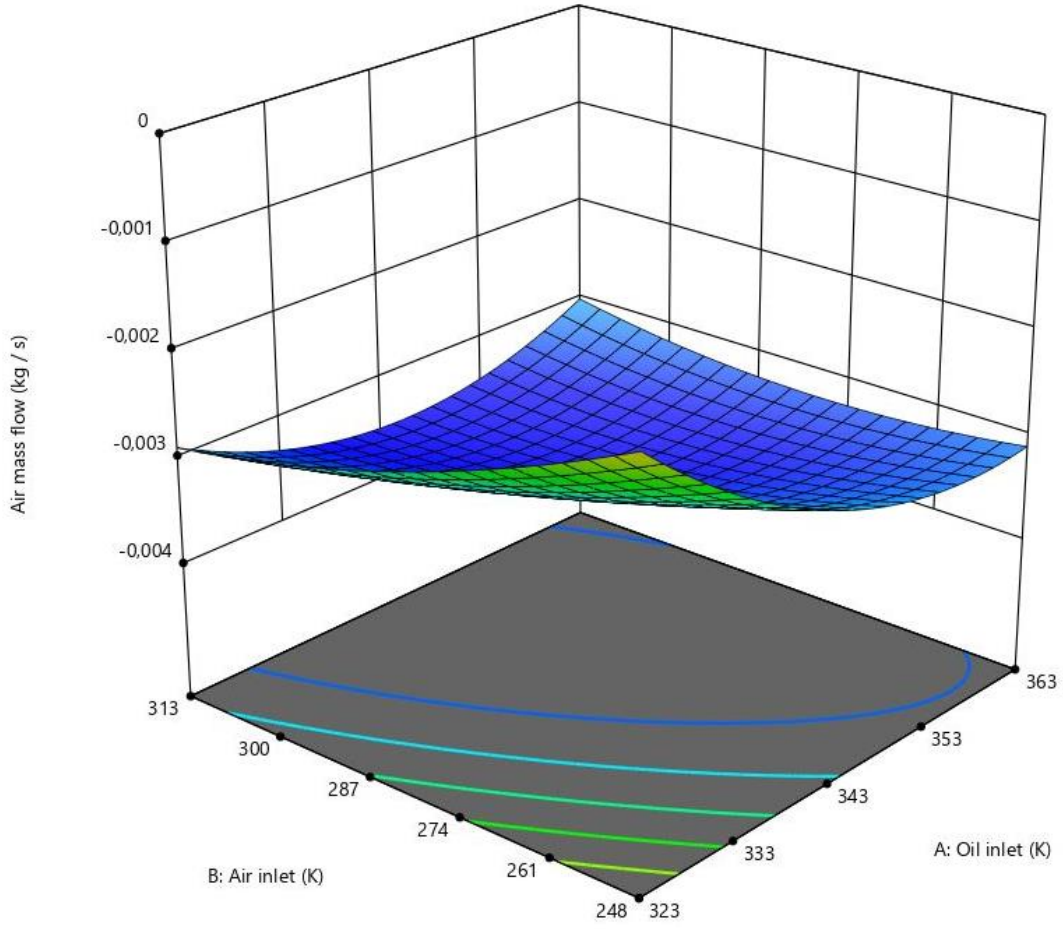
Şekil 4.3: MBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-3

MBTY ile S235J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça entalpi değerinin yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının entalpi üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.4: MBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-4

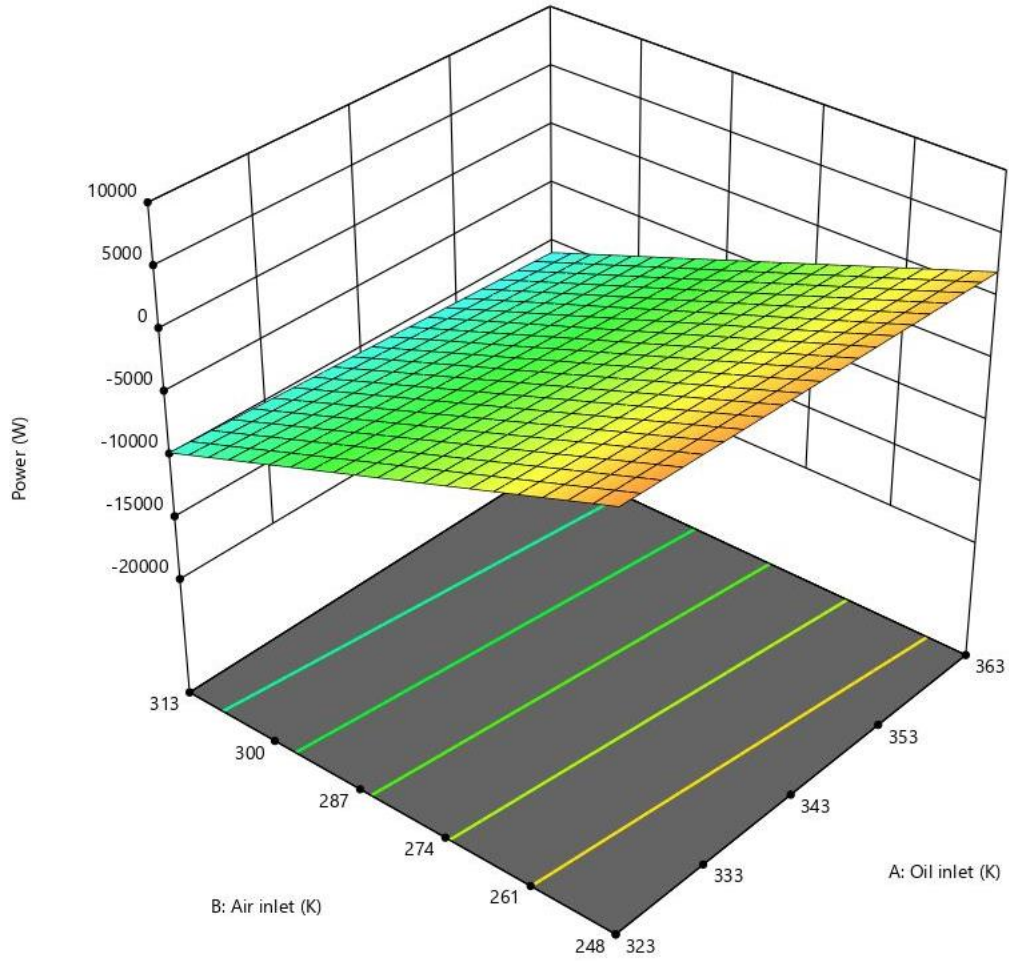
MBTY ile S235J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının artışıyla yağ kütleli debisinin eğrisel bir değişim gösterdiğini ve yaklaşık 350 K yağ giriş ile 260 K hava giriş sıcaklığı civarına kadar artıp bu noktadan sonra azaldığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.5: MBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-5

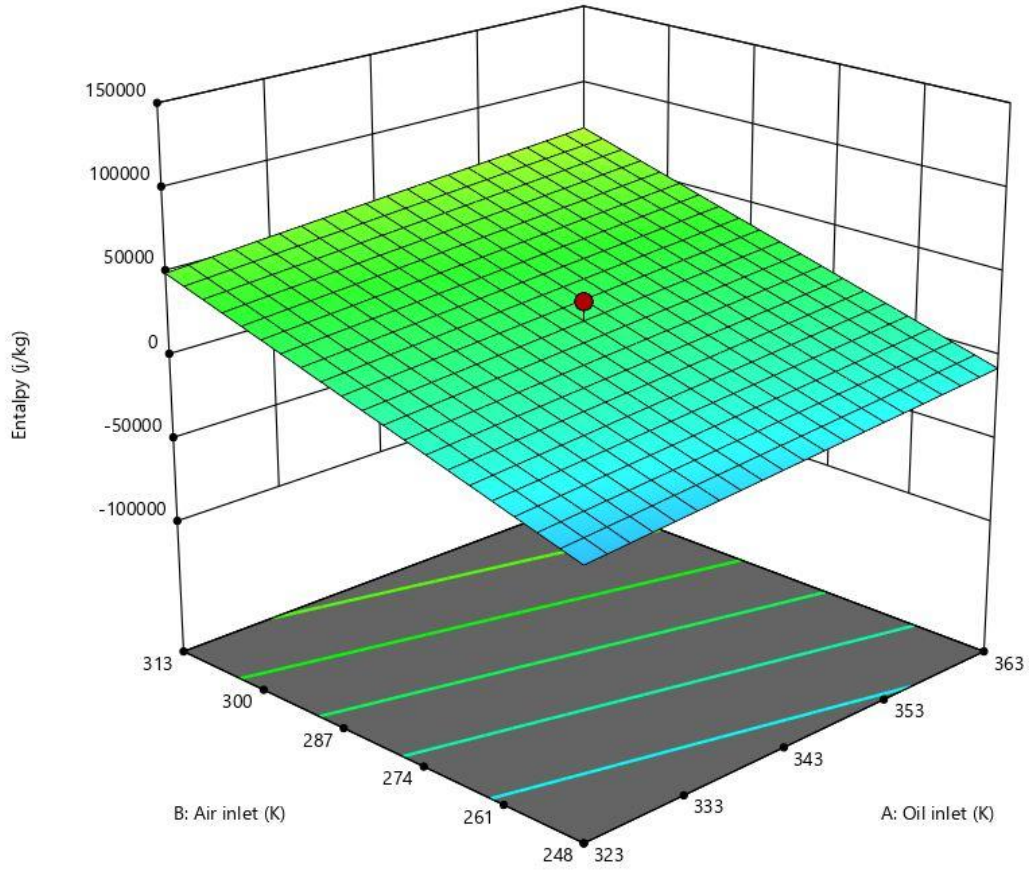
MBTY ile S235J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının artışıyla hava kütleli debisinin doğrusal olmayan (eğrisel) bir değişim gösterdiğini ve yaklaşık 345 K yağ giriş ile 290 K hava giriş sıcaklığı civarına kadar azalıp bu noktadan sonra artış eğilimi sergilediğini göstermektedir.

4.5.2 MBTY ile S355J malzeme için RSM sonuçları



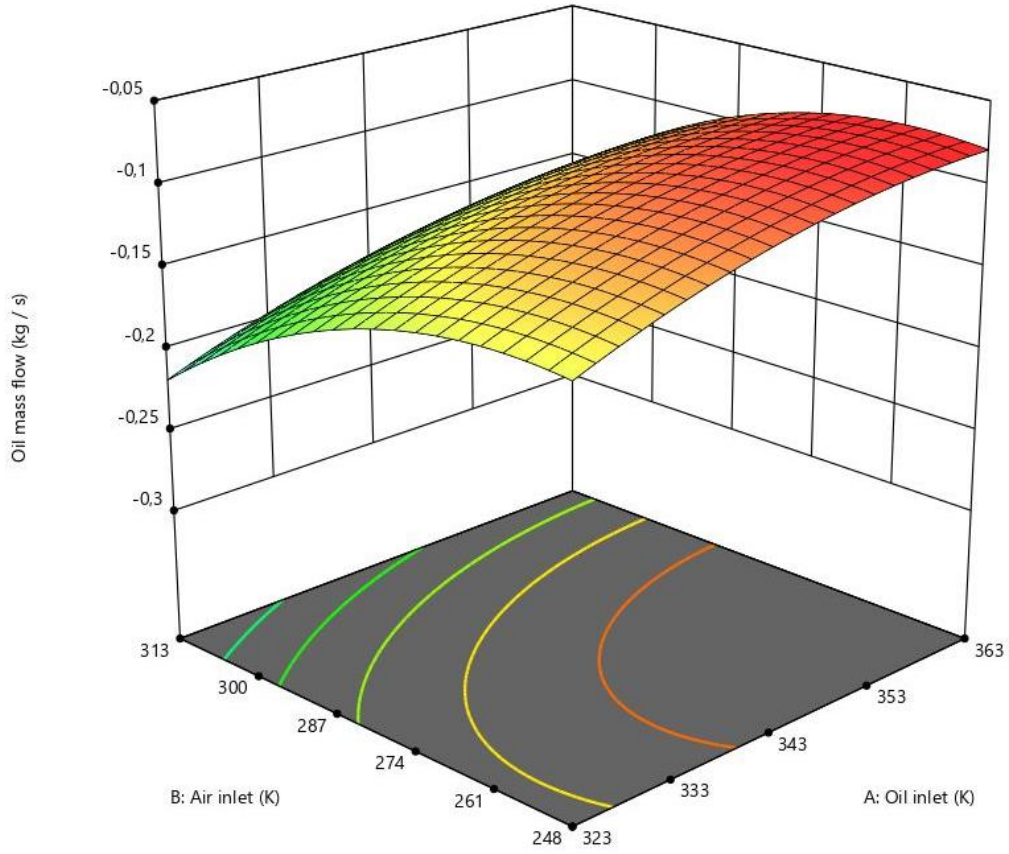
Şekil 4.6: MBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-1

MBTY ile S355J malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve yağ çıkış sıcaklıklarındaki artışla birlikte güç değerinin yaklaşık lineer bir eğilimle değiştiği görülmektedir. Yüzey eğiminin özellikle hava giriş doğrultusunda daha belirgin olması, gücün hava giriş sıcaklığına daha duyarlı olduğunu, buna karşılık yağ giriş sıcaklığının etkisinin görece daha sınırlı kaldığını göstermektedir.



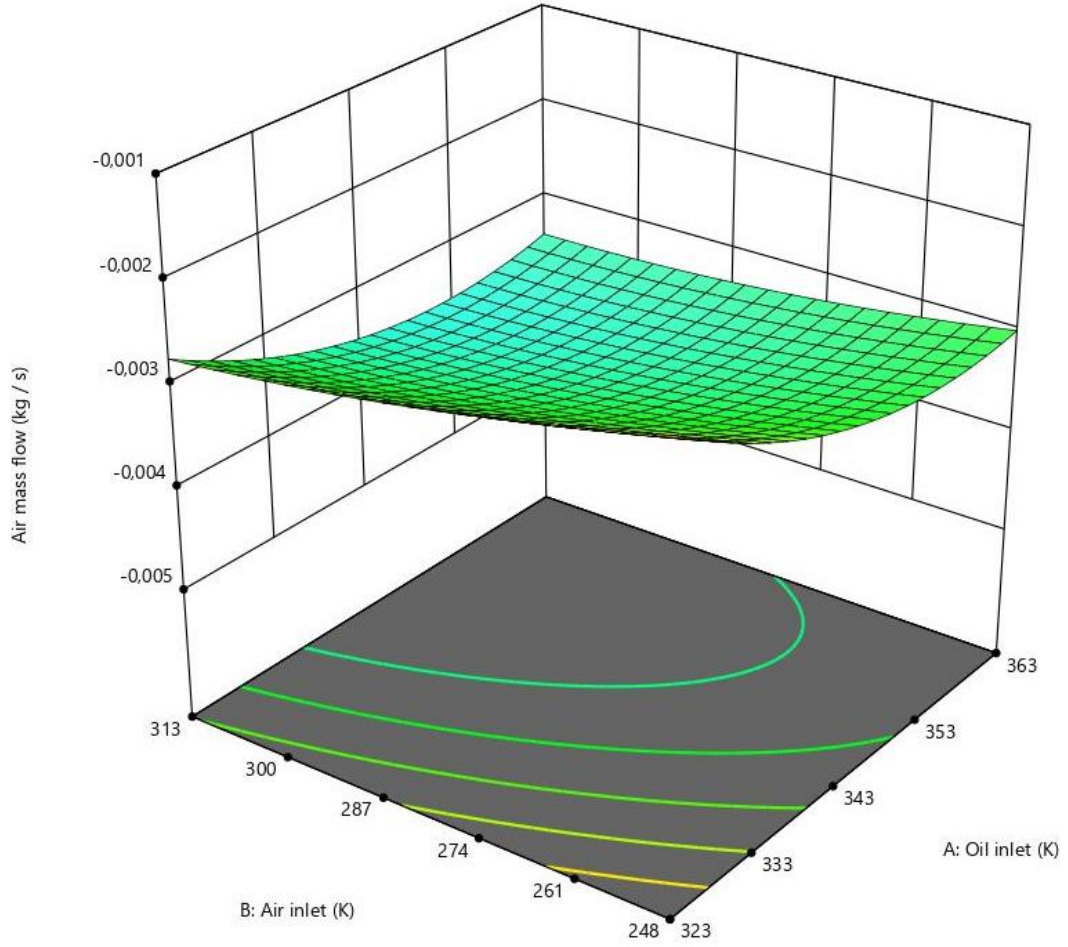
Şekil 4.7: MBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-2

MBTY ile S355J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça entalpi değerinin yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının entalpi üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



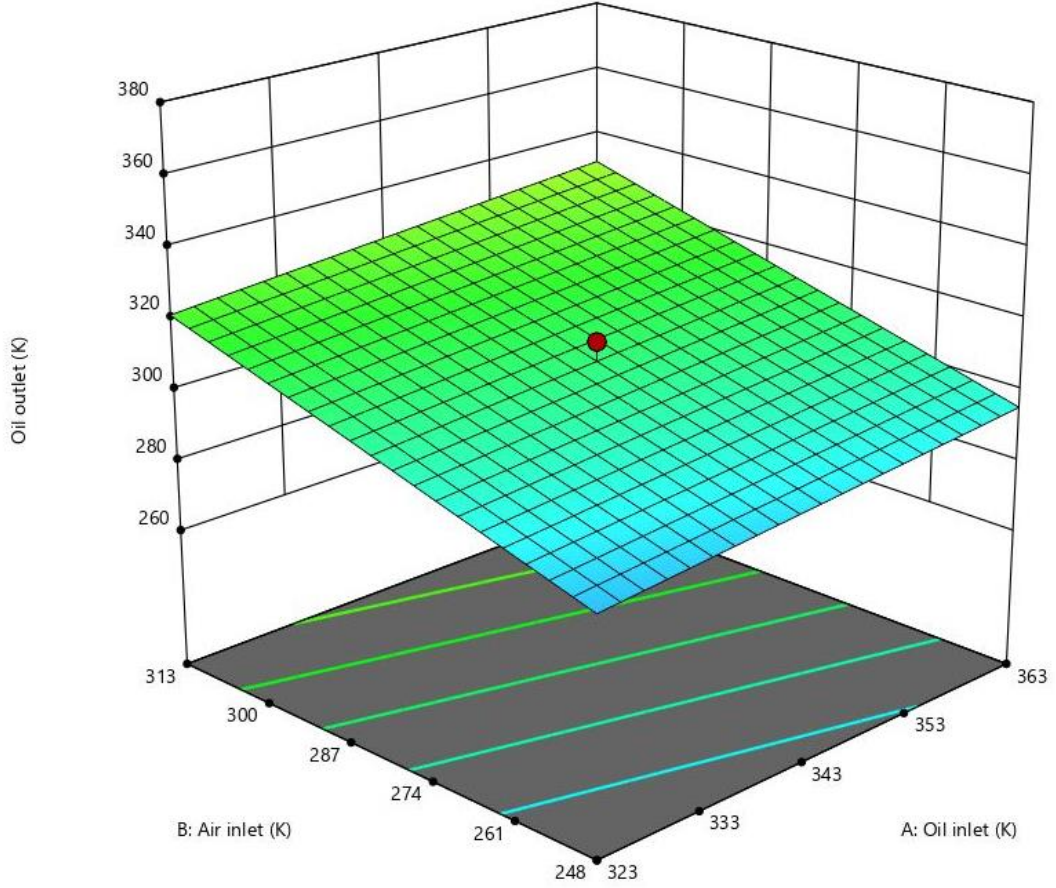
Şekil 4.8: MBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-3

MBTY ile S355J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının artışıyla yağ kütleli debisinin eğrisel bir değişim gösterdiği ve yaklaşık 350 K yağ giriş ile 260–270 K hava giriş sıcaklığı civarına kadar artıp bu noktadan sonra azalma eğilimi sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.9: MBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-4

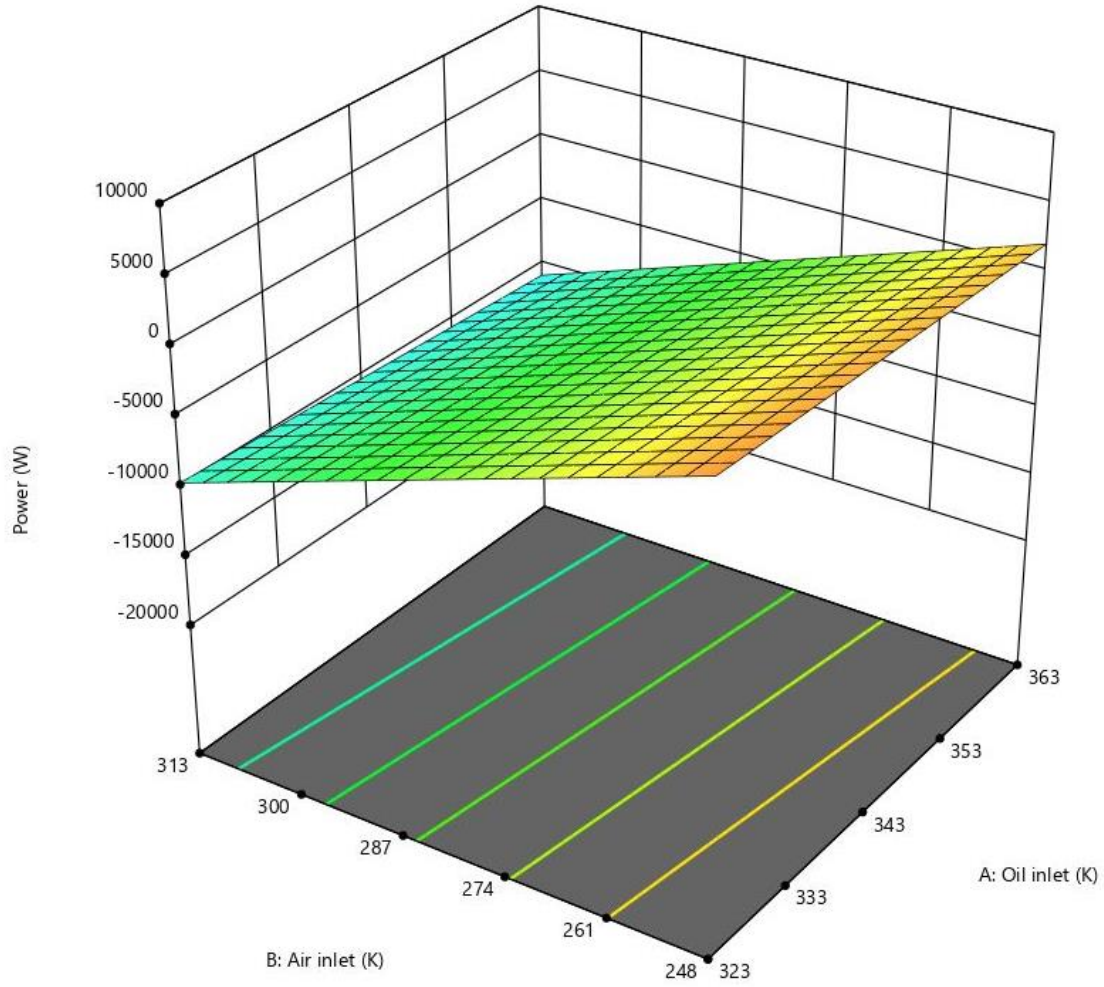
MBTY ile S355J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının artışıyla hava kütleli debisinin doğrusal olmayan (eğrisel) bir değişim gösterdiğini ve yaklaşık 350 K yağ giriş ile 270–280 K hava giriş sıcaklığı civarında minimum değere ulaştıktan sonra tekrar artış eğilimi sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.10: MBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-5

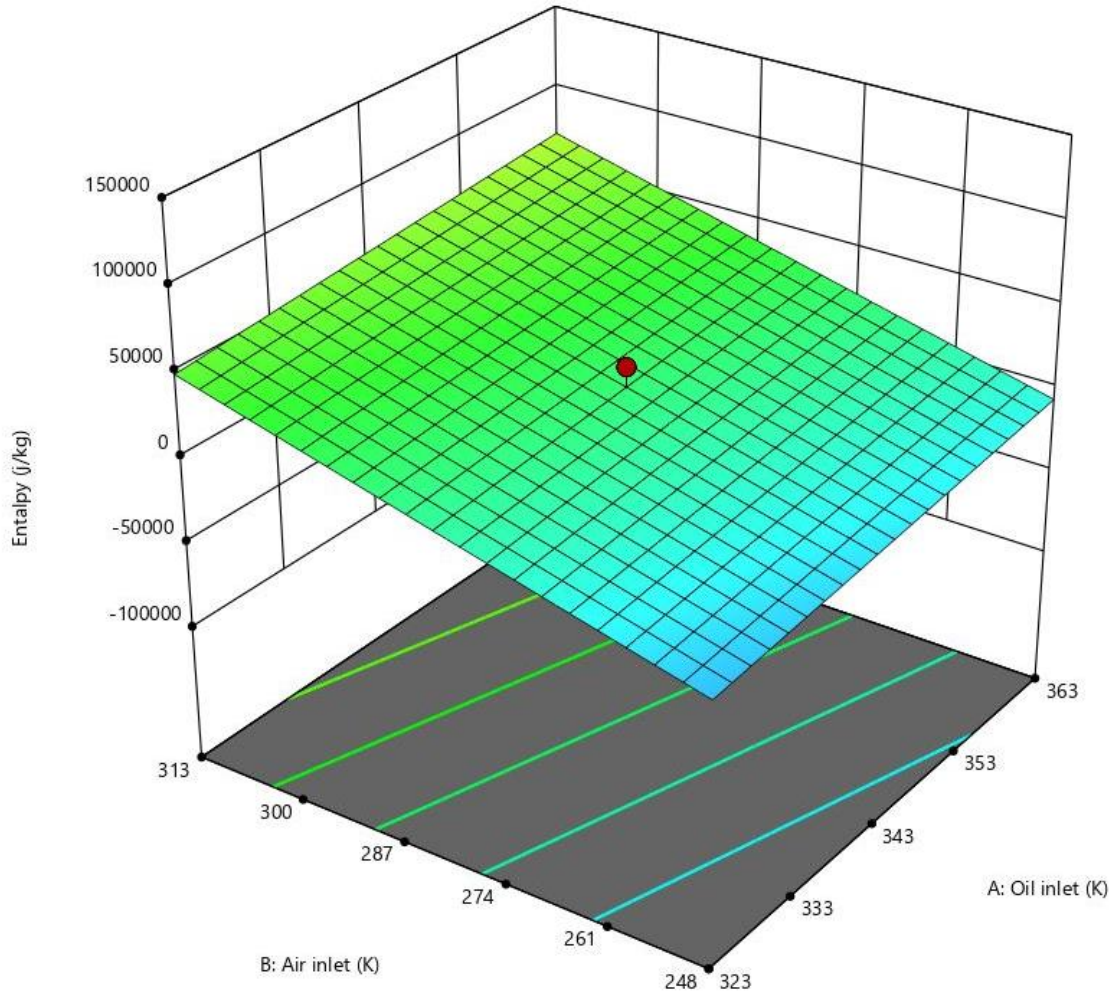
MBTY ile S355J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça yağ çıkış sıcaklığının yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının yağ çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

4.5.3 MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için RSM sonuçları



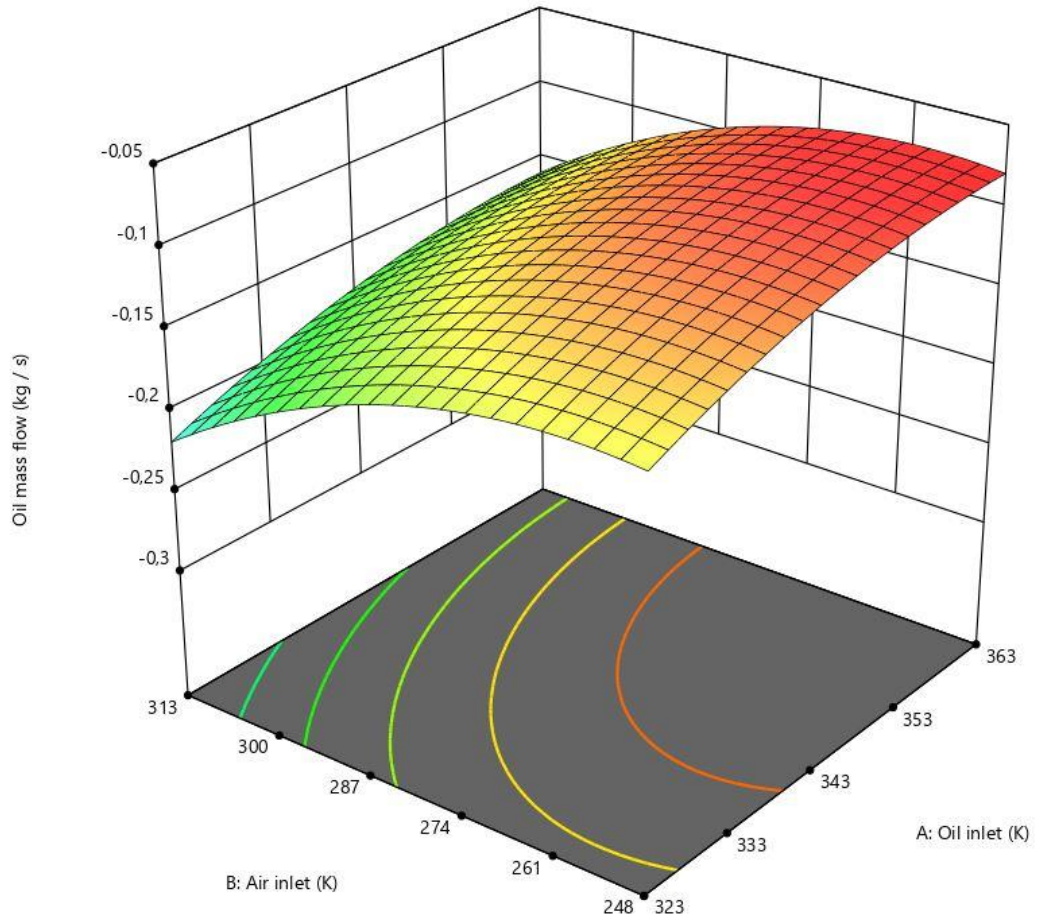
Şekil 4.11: MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-1

MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve yağ çıkış sıcaklıklarındaki artışla birlikte güç değerinin yaklaşık lineer bir eğilimle değiştiği görülmektedir. Yüzey eğiminin özellikle hava giriş doğrultusunda daha belirgin olması, gücün hava giriş sıcaklığına daha duyarlı olduğunu, buna karşılık yağ giriş sıcaklığının etkisinin görece daha sınırlı kaldığını göstermektedir.



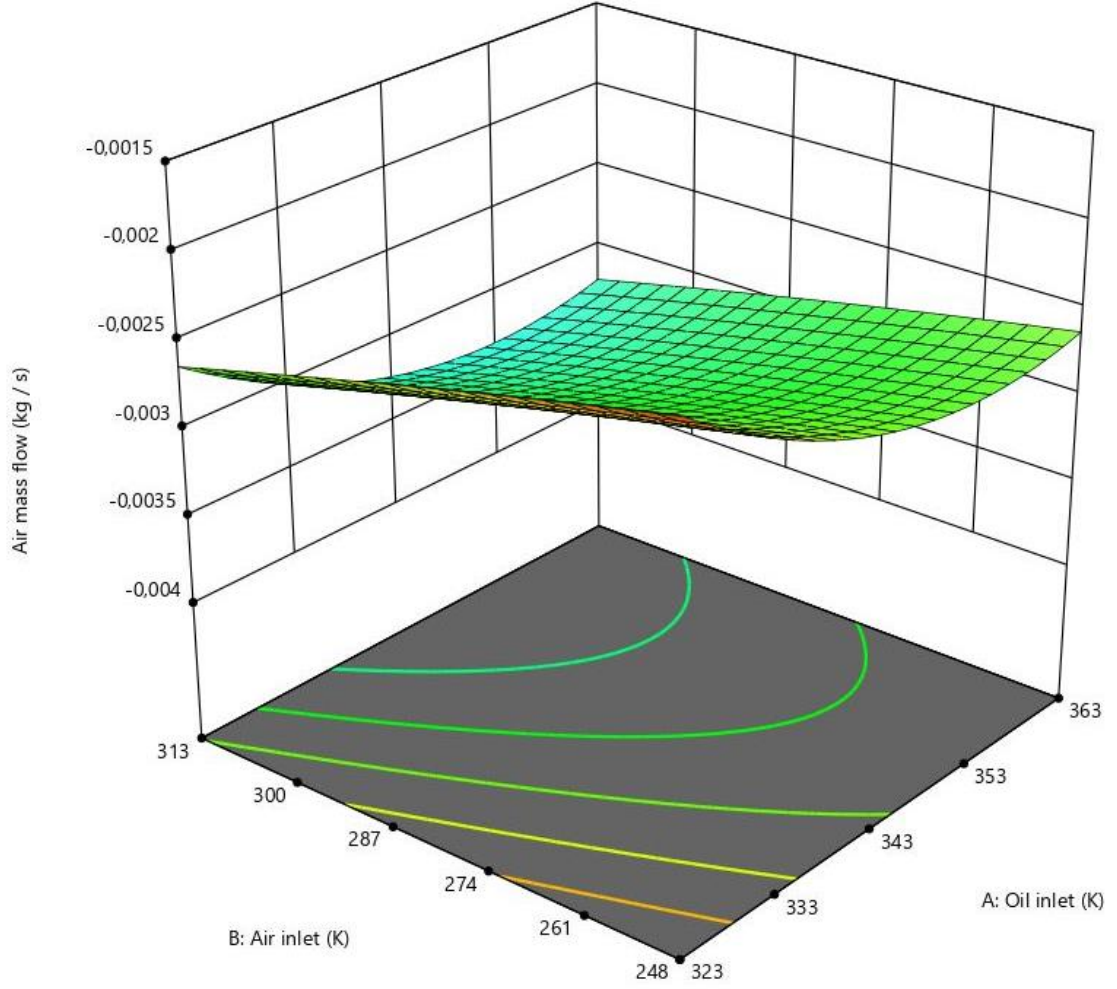
Şekil 4.12: MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-2

MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça entalpi değerinin yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının entalpi üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



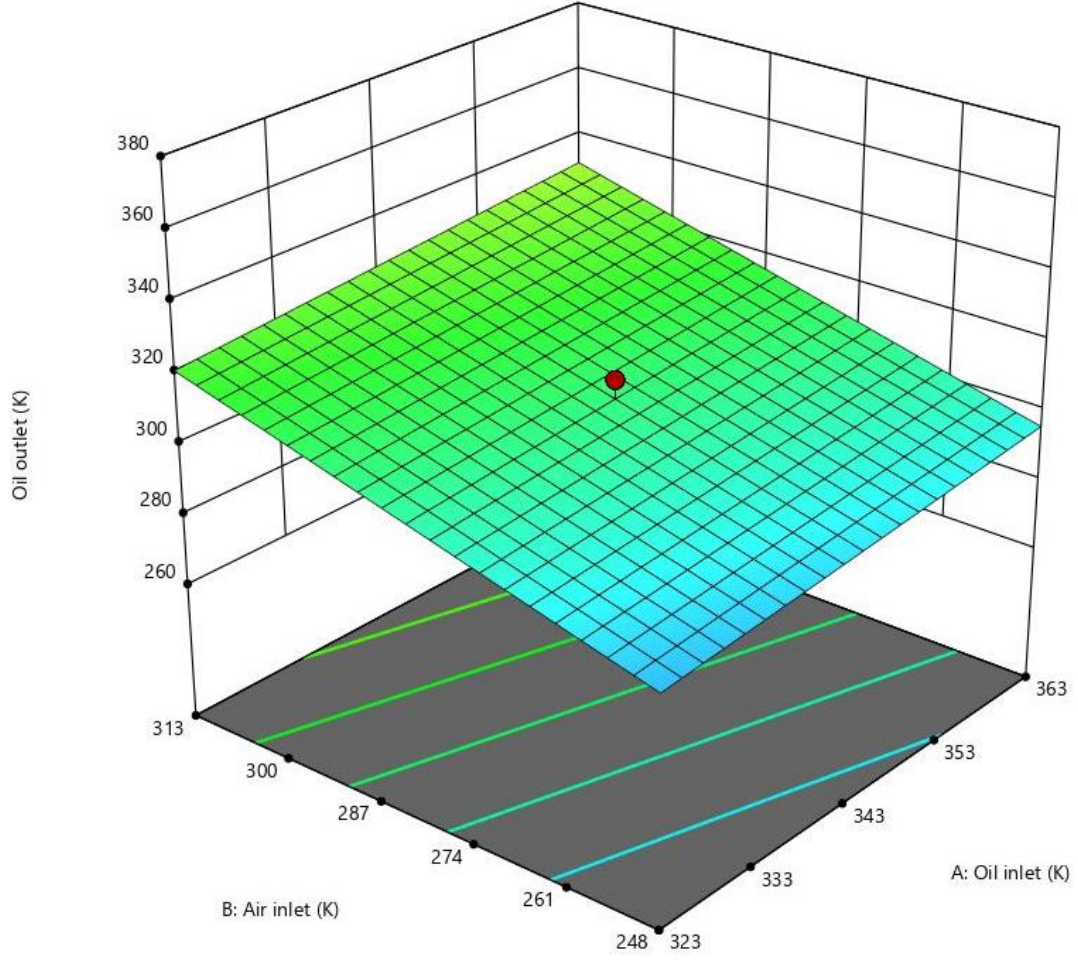
Şekil 4.13: MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-3

MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının artışıyla yağ kütleli debisinin eğrisel bir değişim gösterdiğini ve yaklaşık 350 K yağ giriş ile 260–270 K hava giriş civarına kadar artıp bu noktadan sonra azalma eğilimi sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.14: MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-4

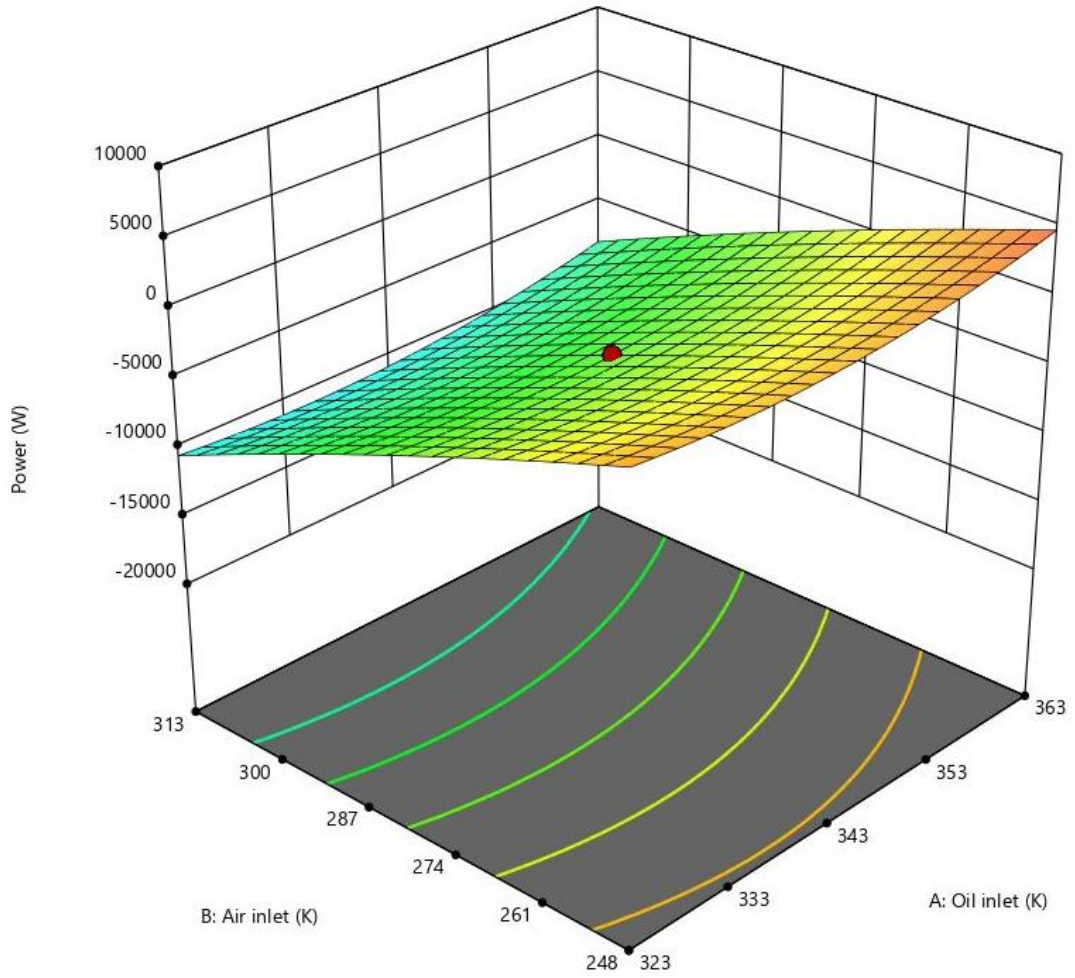
MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının artışıyla hava kütleli debisinin eğrisel bir değişim gösterdiğini ve yaklaşık 345–350 K yağ giriş ile 270–280 K hava giriş sıcaklığı civarında minimum değere ulaştıktan sonra artış eğilimi sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.15: MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-5

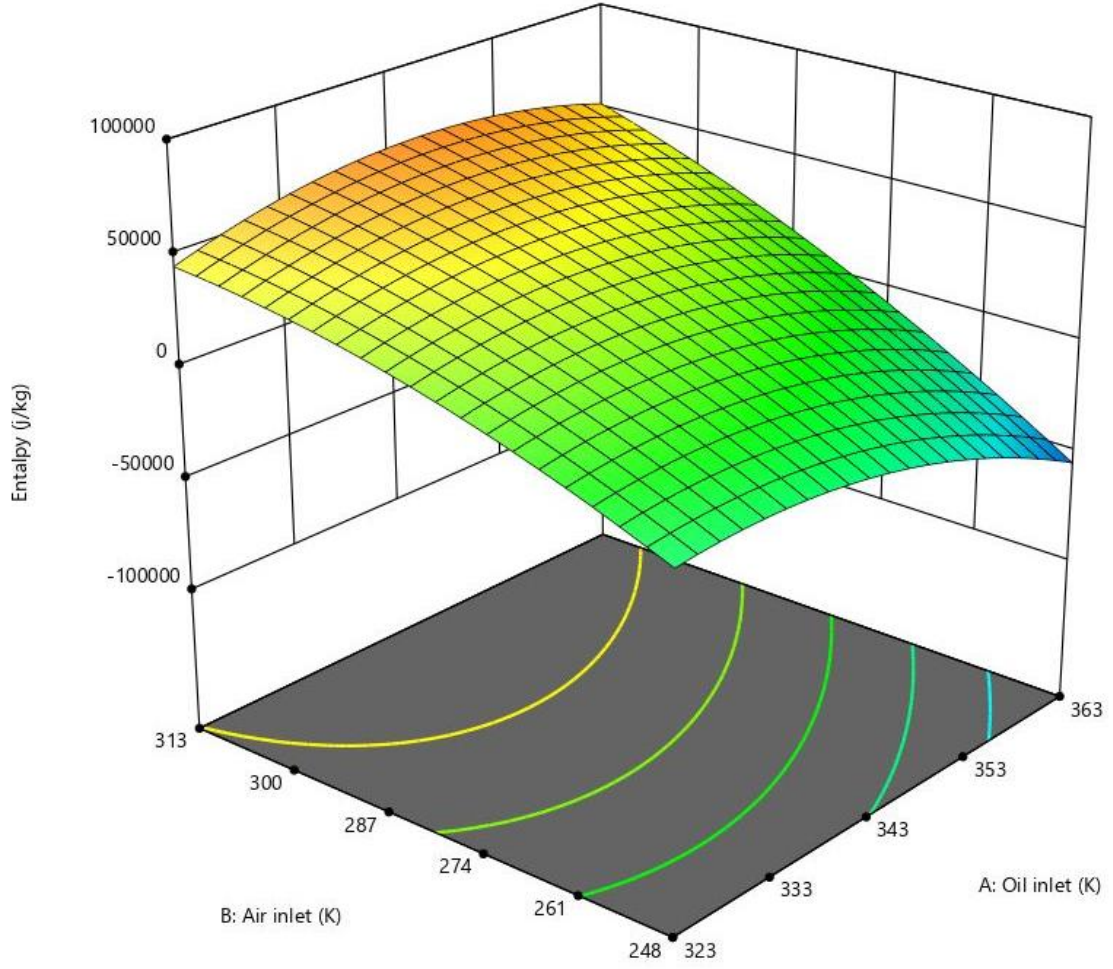
MBTY ile carbon steel 1010 malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça yağ çıkış sıcaklığının yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının yağ çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

4.5.4 MBTY ile 316L malzeme için RSM sonuçları



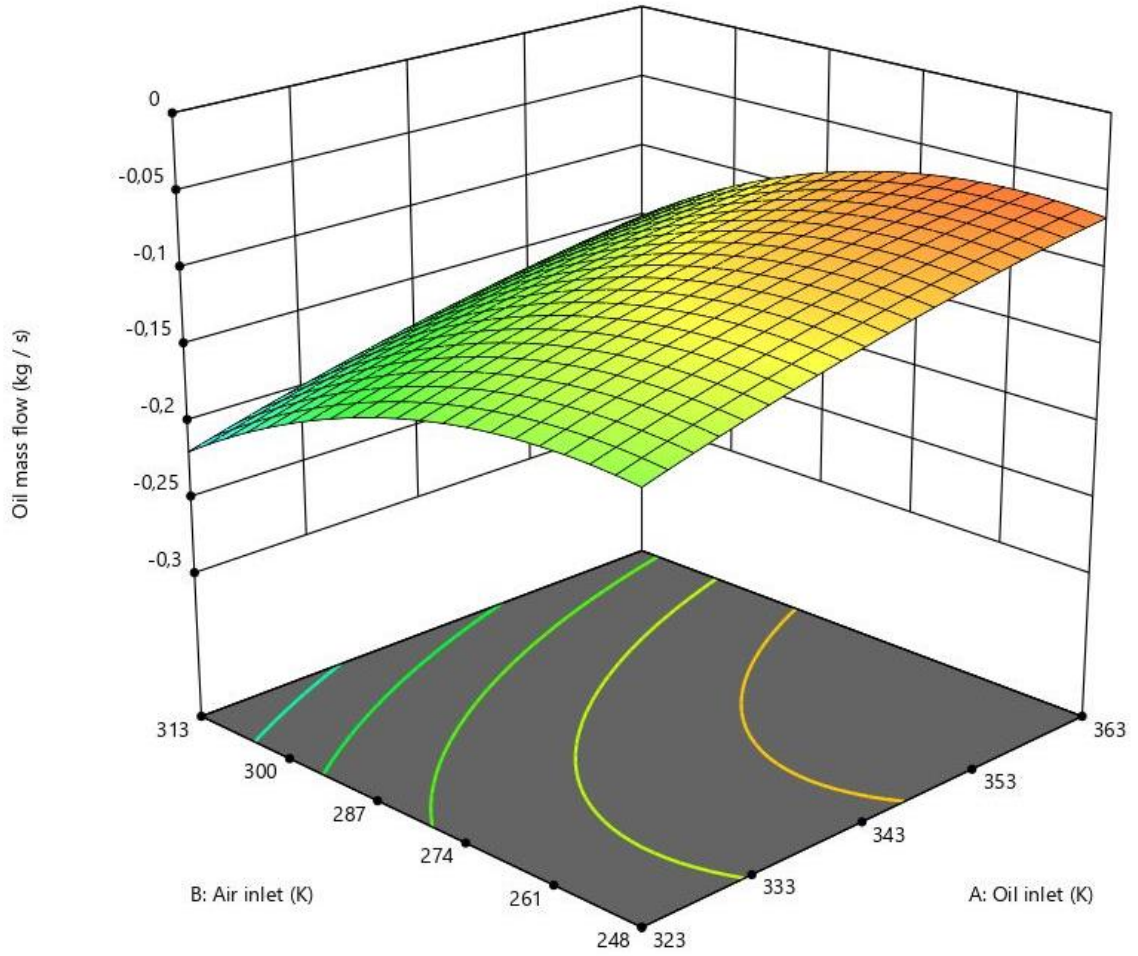
Şekil 4.16: MBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-1

MBTY ile 316L malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının artışıyla gücün yataya yakın eğrisel bir değişim gösterdiğini ve yaklaşık 355–360 K yağ giriş ile 250–260 K hava giriş sıcaklığı civarında maksimum değere ulaştığını göstermektedir.



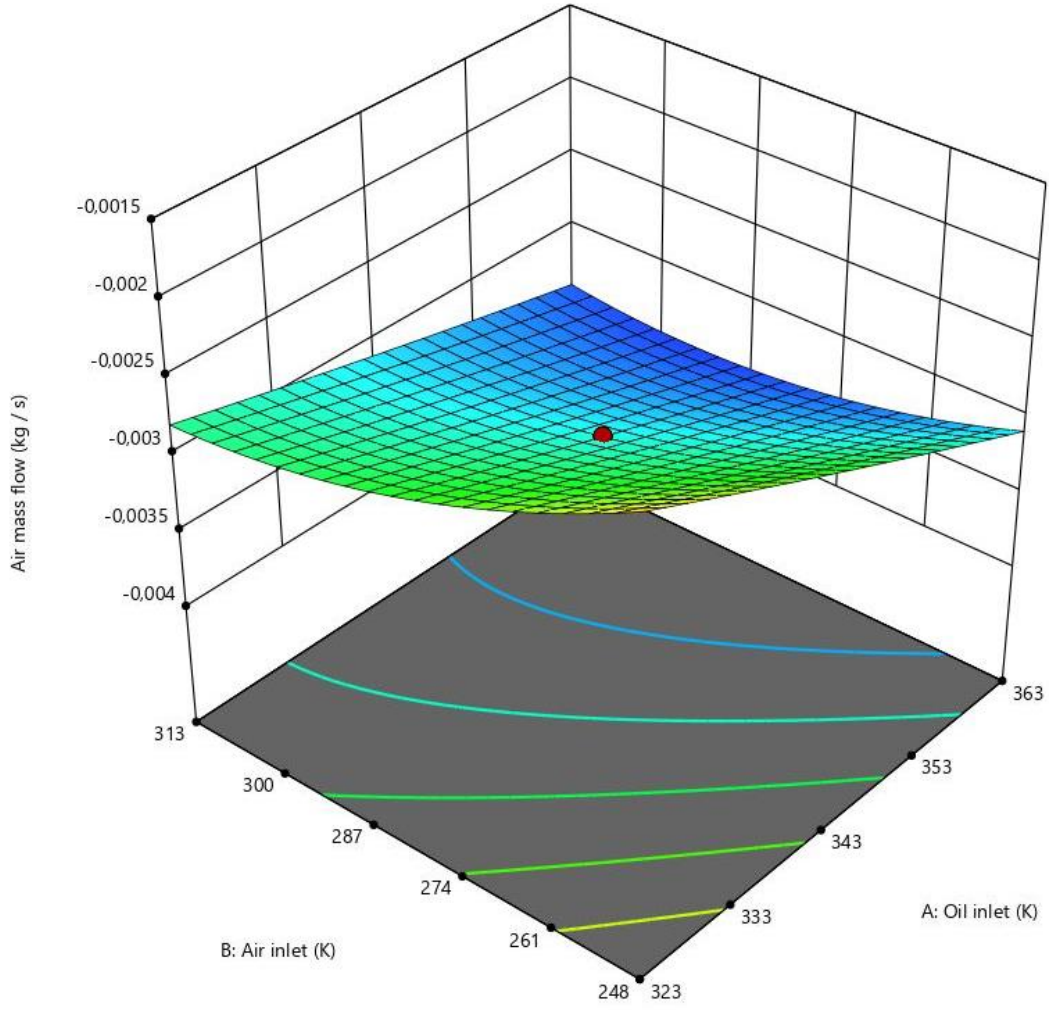
Şekil 4.17: MBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-2

MBTY ile 316L malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının artışıyla entalpi değerinin eğrisel bir değişim gösterdiğini ve yaklaşık 330–335 K yağ giriş ile 300–310 K hava giriş civarında maksimum değere ulaştığını göstermektedir.



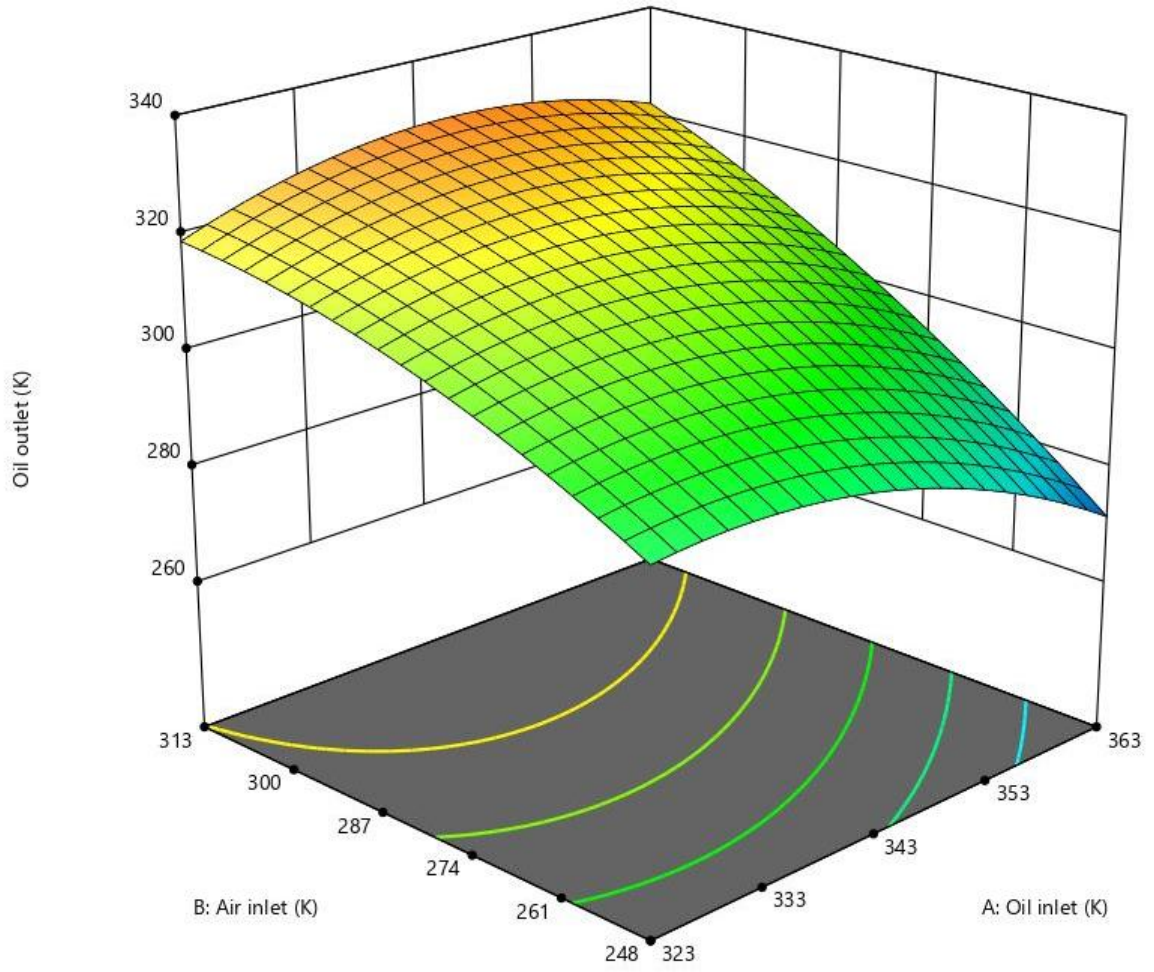
Şekil 4.18: MBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-3

MBTY ile 316L malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının artışıyla yağ kütleli debisinin eğrisel bir değişim gösterdiğini ve yaklaşık 355–360 K yağ giriş ile 260–270 K hava giriş sıcaklığı civarında maksimum değere ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4.19: MBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-4

MBTY ile 316L malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının artışıyla hava kütleli debisinin eğrisel bir değişim gösterdiğini ve yaklaşık 350 K yağ giriş ile 270–280 K hava giriş sıcaklığı civarında minimum değere ulaştığını göstermektedir.

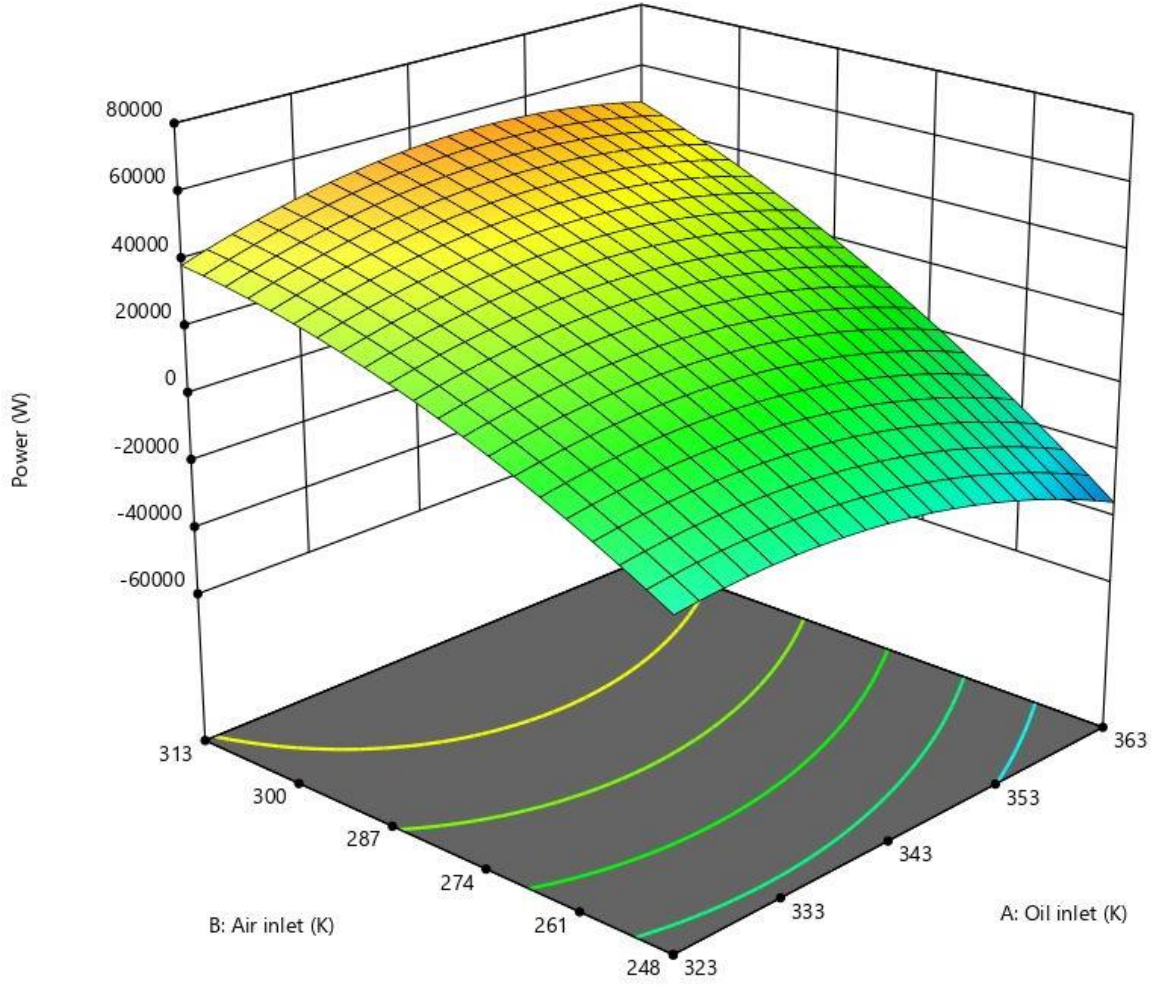


Şekil 4.20: MBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-5

MBTY ile 316L malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının artışıyla yağ çıkış sıcaklığının eğrisel bir değişim gösterdiğini ve yaklaşık 330–335 K yağ giriş ile 300–310 K hava giriş sıcaklığı civarında maksimum değere ulaştığını göstermektedir.

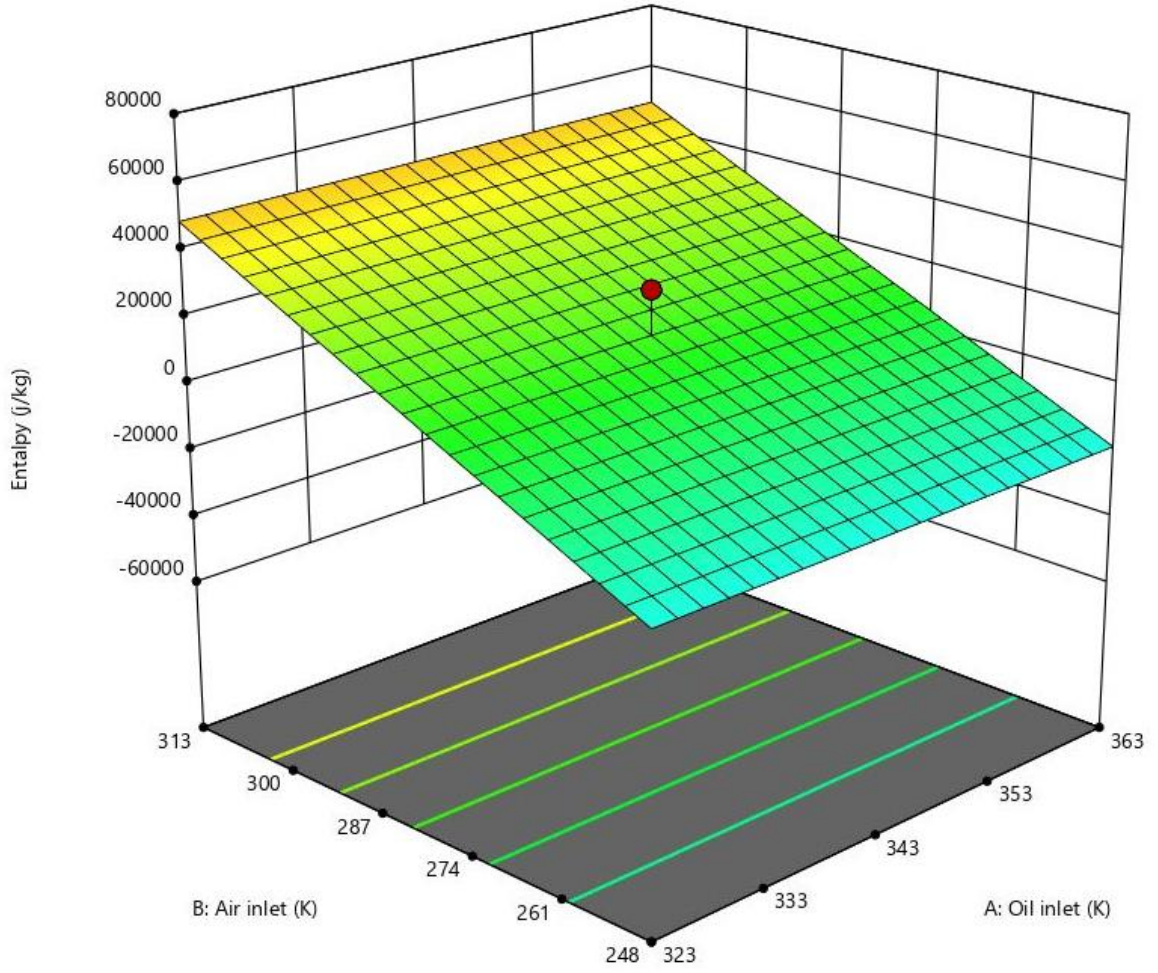
4.6 NBTY İçin RSM Sonuçları

4.6.1 NBTY ile S235J malzeme için RSM sonuçları



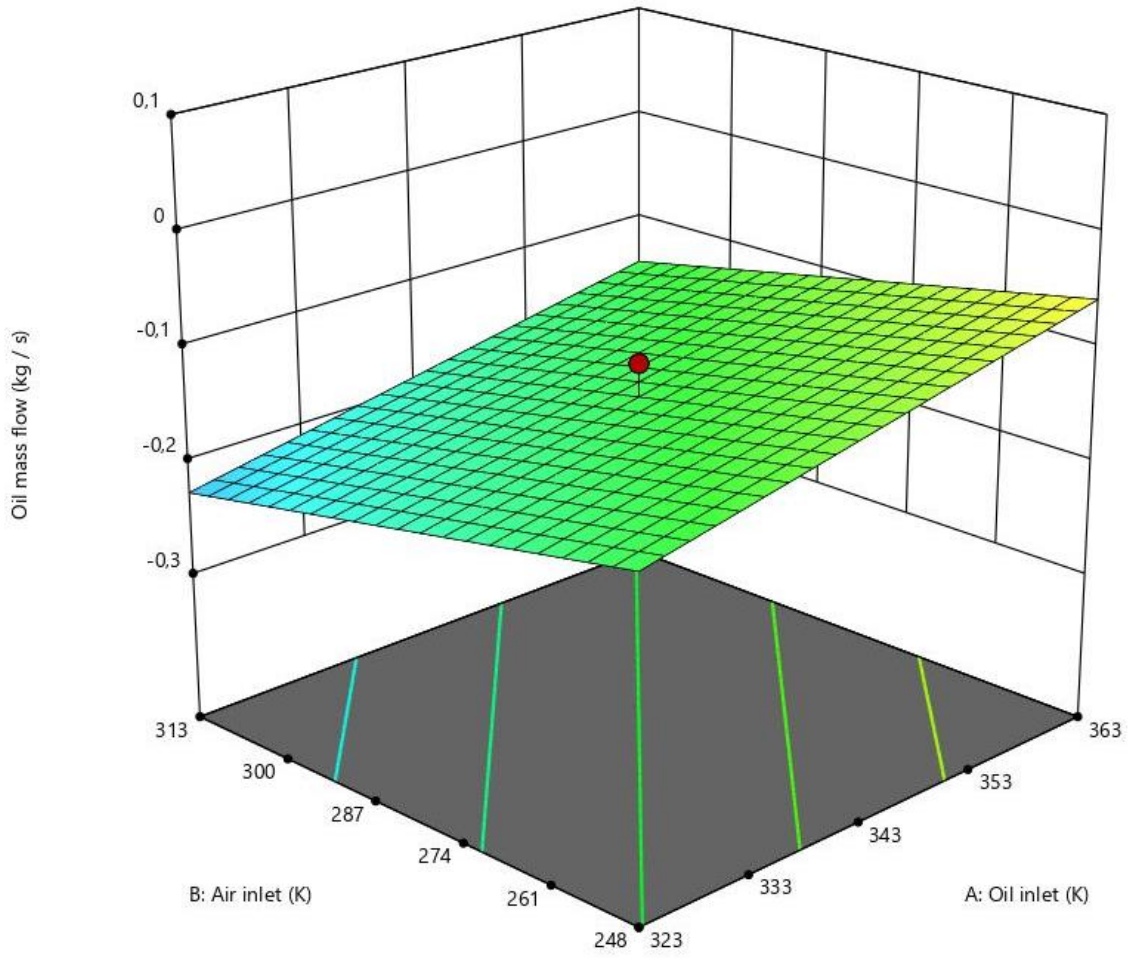
Şekil 4.21: NBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-1

NBTY ile S235J malzeme için elde edilen yüzey grafiği, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça gücün eğrisel bir değişim gösterdiğini ve yaklaşık 355–360 K yağ giriş ile 295–305 K hava giriş sıcaklıkları civarında maksimum değere ulaştığını göstermektedir.



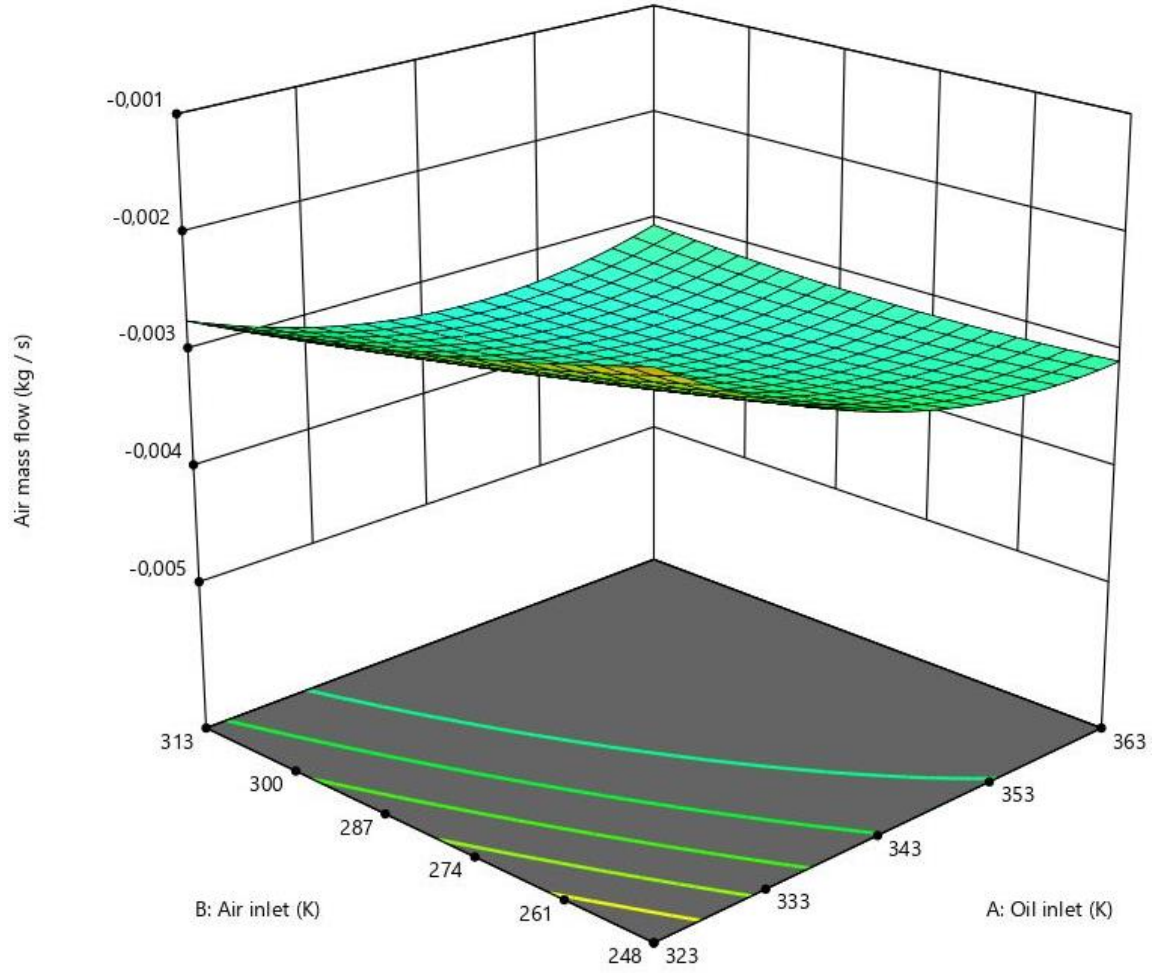
Şekil 4.22: NBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-2

NBTY ile S235J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça entalpi değerinin yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının entalpi üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



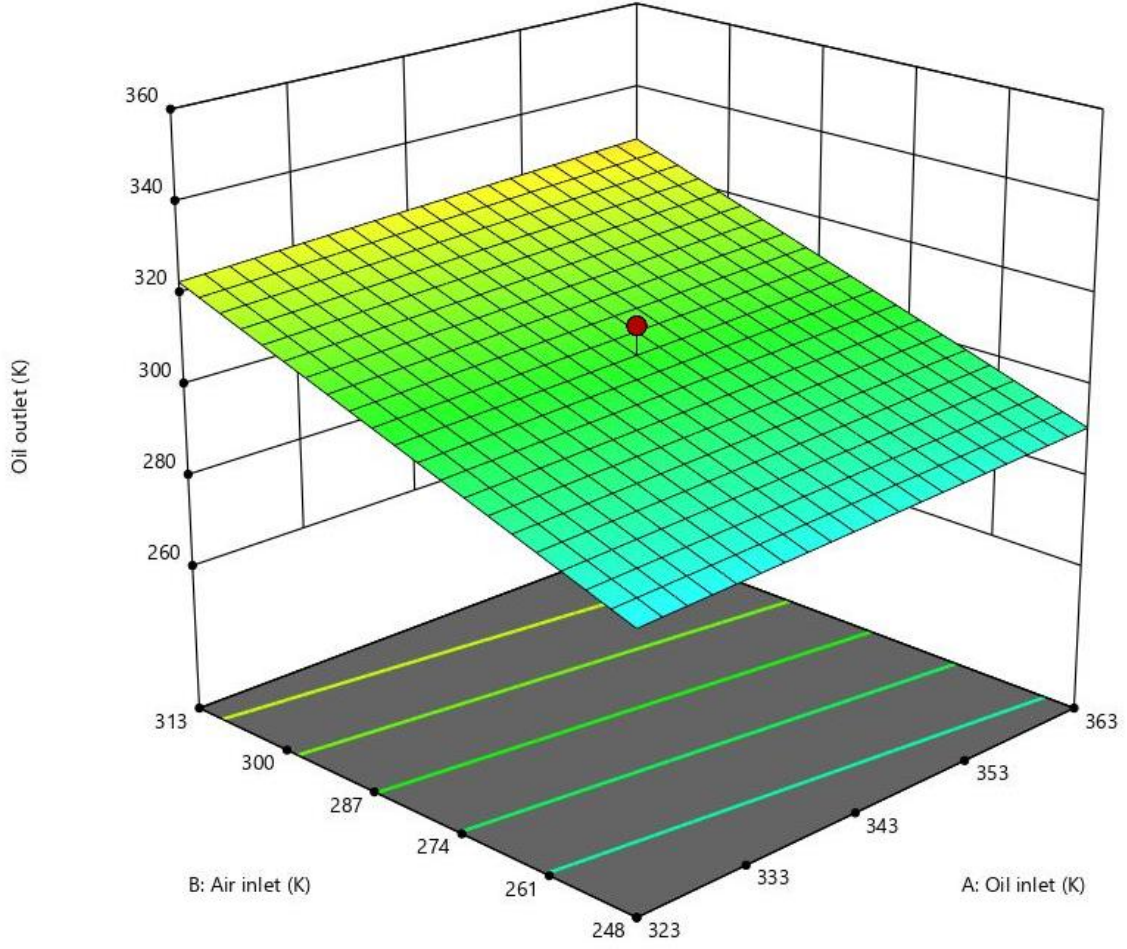
Şekil 4.23: NBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-3

NBTY ile S235J malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının değişmesiyle birlikte yağ kütle akışının yaklaşık lineer ve pozitif yönde değiştiği görülmüştür. Bu değişim hava giriş sıcaklığının azalmasıyla yağ kütle akışının artması, yağ giriş sıcaklığının artmasıyla da yağ kütle akışının artması şeklinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.24: NBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-4

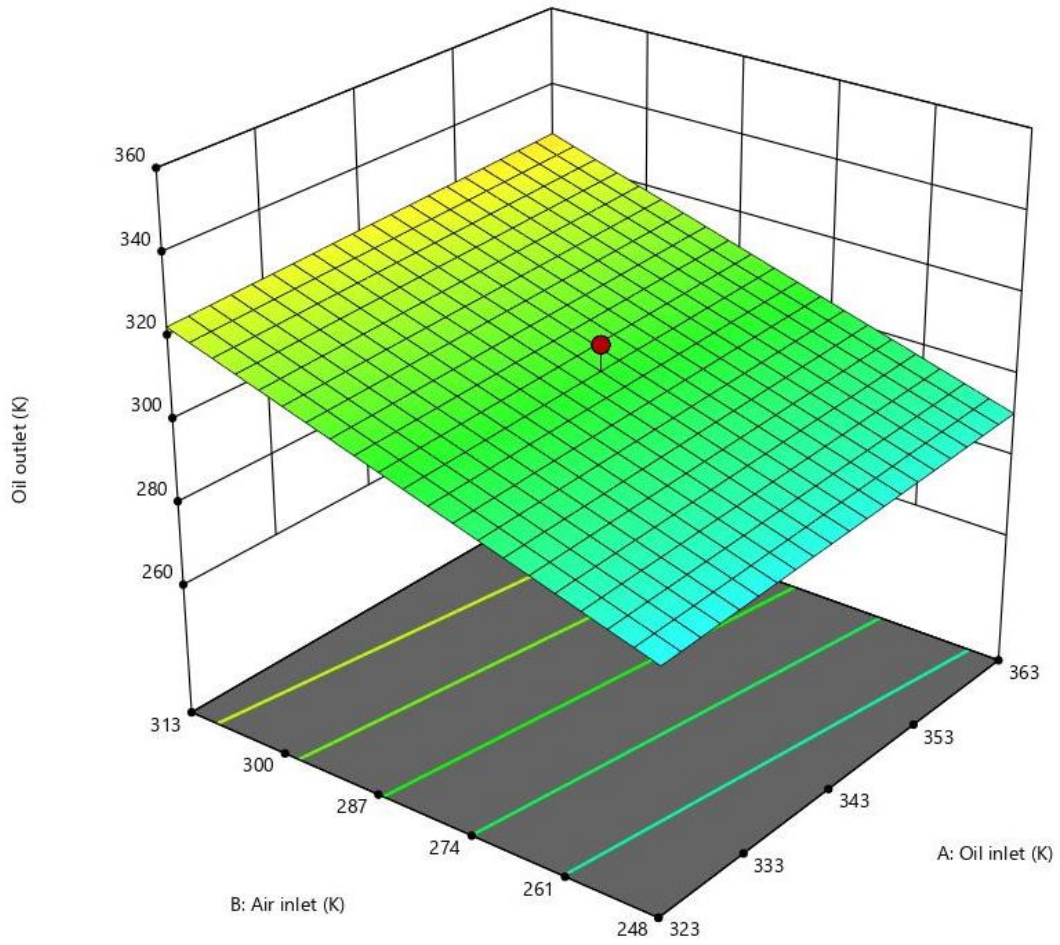
NBTY ile S235J malzeme için elde edilen yüzey grafiği, hava kütle debisinin yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının artışıyla birlikte eğrisel bir değişim sergilediğini ve yaklaşık 350–360 K yağ giriş ile 290–305 K hava giriş sıcaklıkları aralığında maksimum değere ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4.25: NBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-5

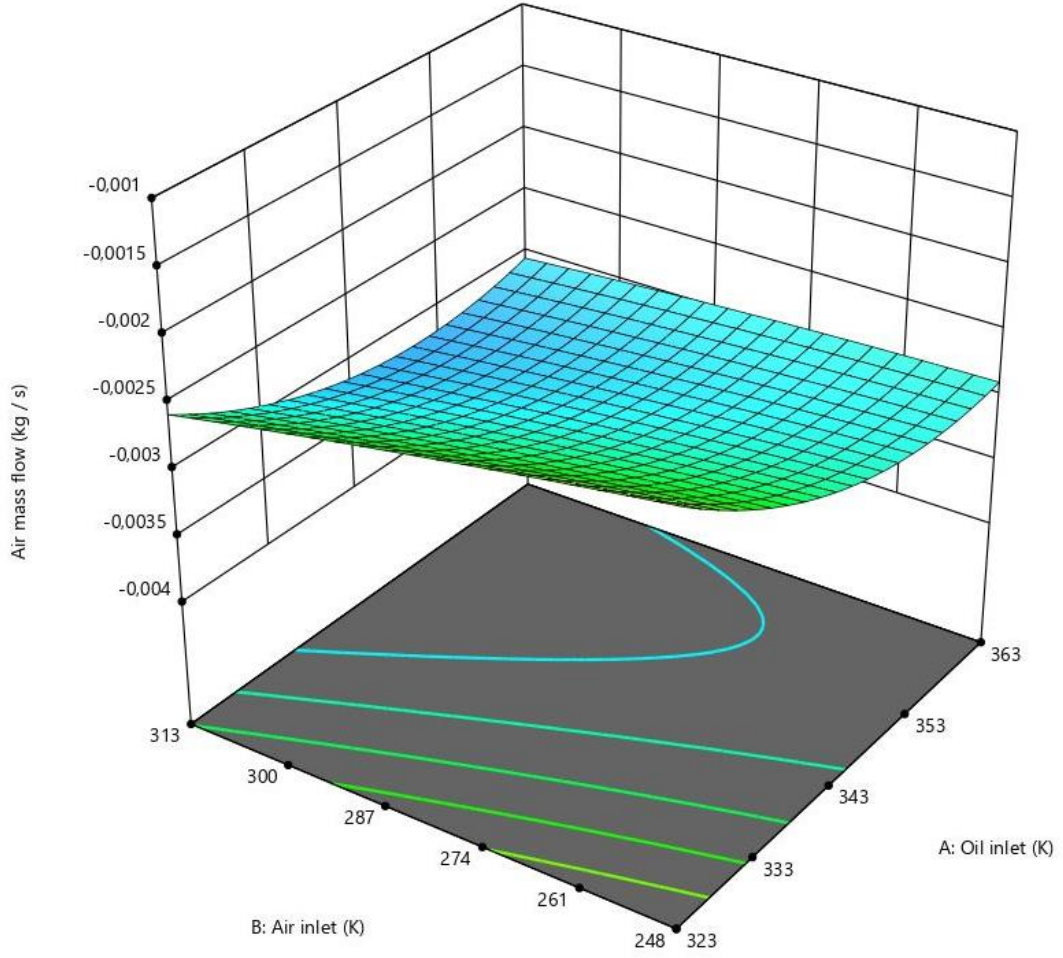
NBTY ile S235J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça yağ çıkış sıcaklığının yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının yağ çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

4.6.2 NBTY ile S355J malzeme için RSM sonuçları



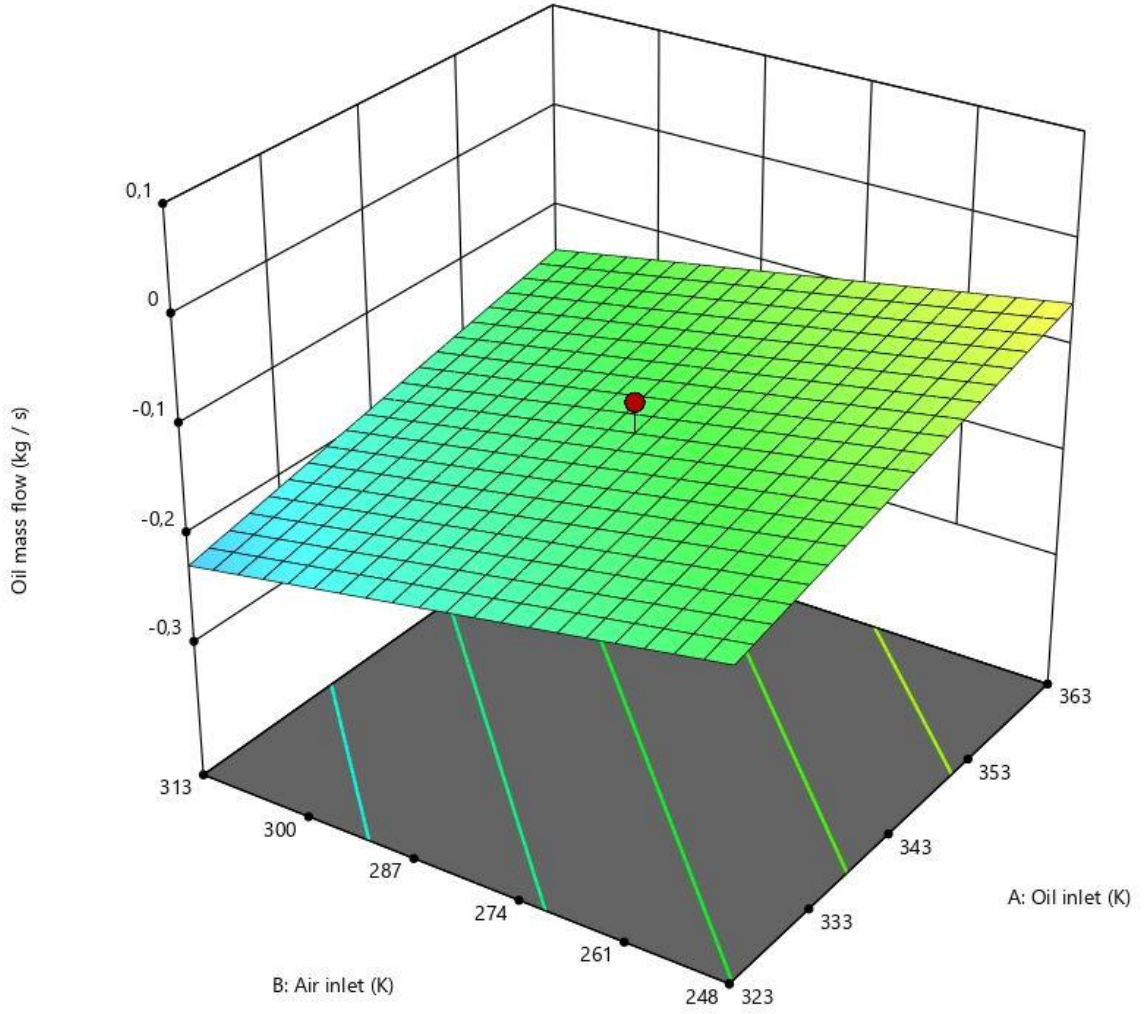
Şekil 4.26: NBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-1

NBTY ile S355J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça yağ çıkış sıcaklığının yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının yağ çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



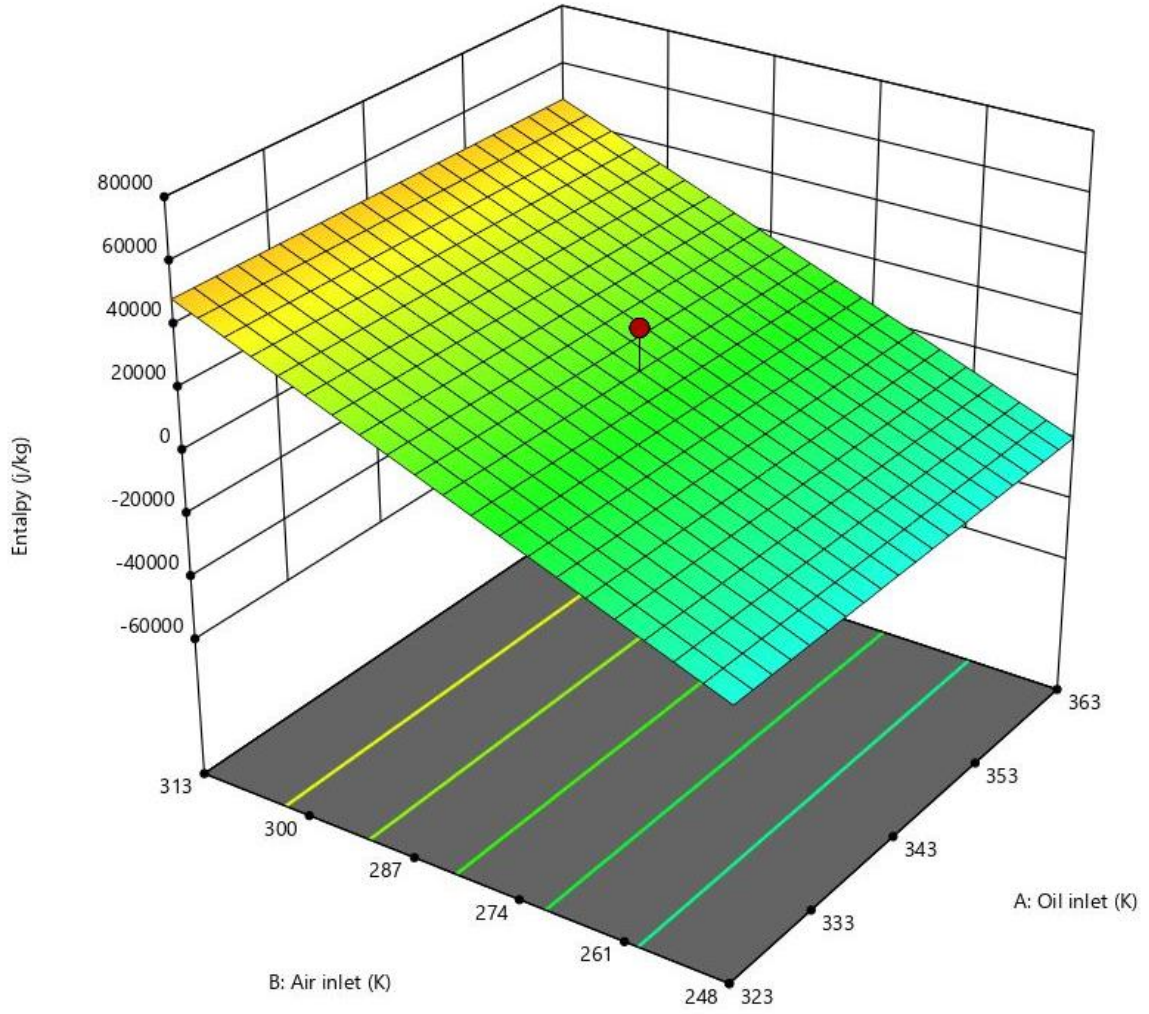
Şekil 4.27: NBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-2

NBTY ile S355J malzeme için elde edilen yüzey grafiği, hava kütleli debisinin yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarına bağlı olarak eğrisel bir değişim gösterdiğini ve maksimum değerinin yaklaşık 323–330 K yağ giriş ile 248–260 K hava giriş sıcaklıkları civarında gerçekleştiğini göstermektedir.



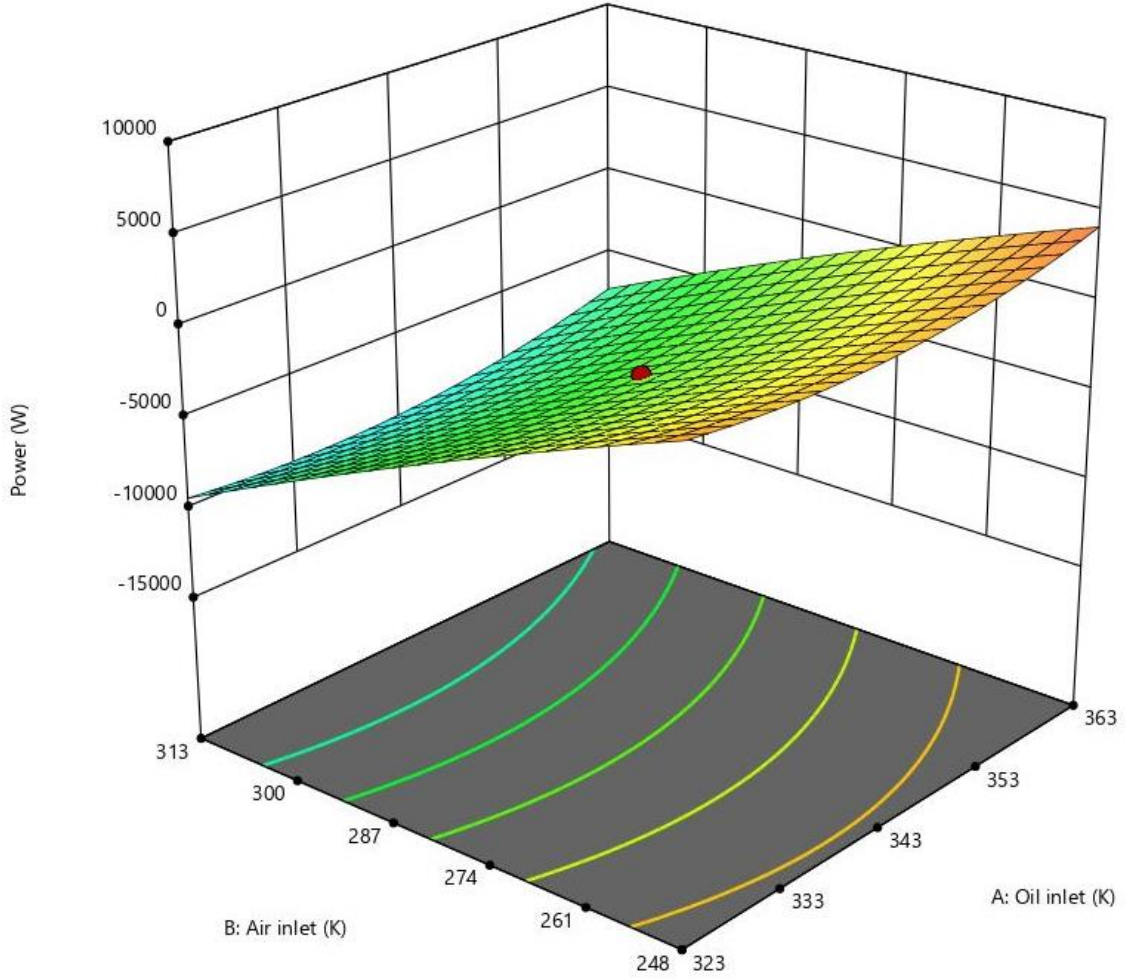
Şekil 4.28: NBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-3

NBTY ile S355J malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının değişimiyle birlikte yağ kütle akışının yaklaşık lineer ve pozitif yönde değiştiği görülmüştür. Bu değişim hava giriş sıcaklığının azalmasıyla yağ kütle akışının artması, yağ giriş sıcaklığının artmasıyla da yağ kütle akışının artması şeklinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.29: NBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-4

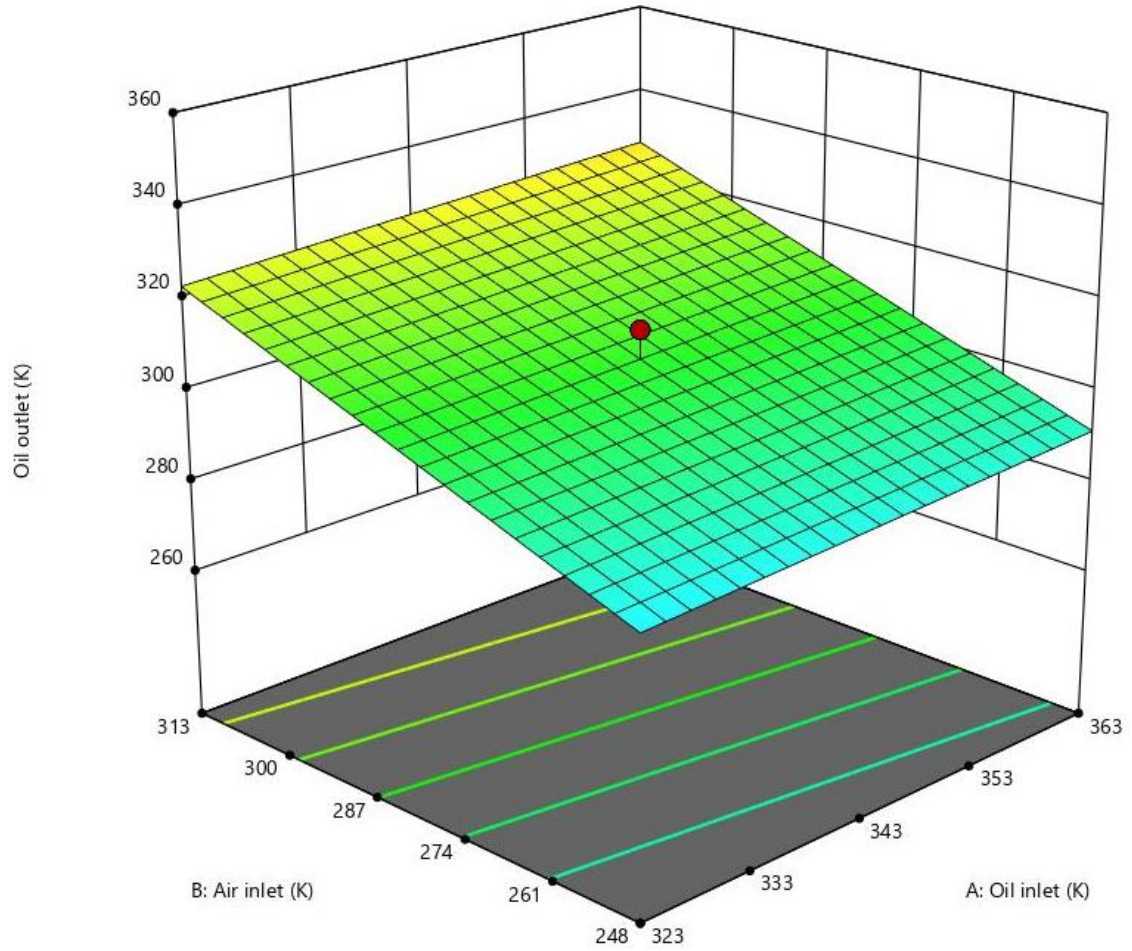
NBTY ile S235J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça entalpi değerinin yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının entalpi üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.30: NBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-5

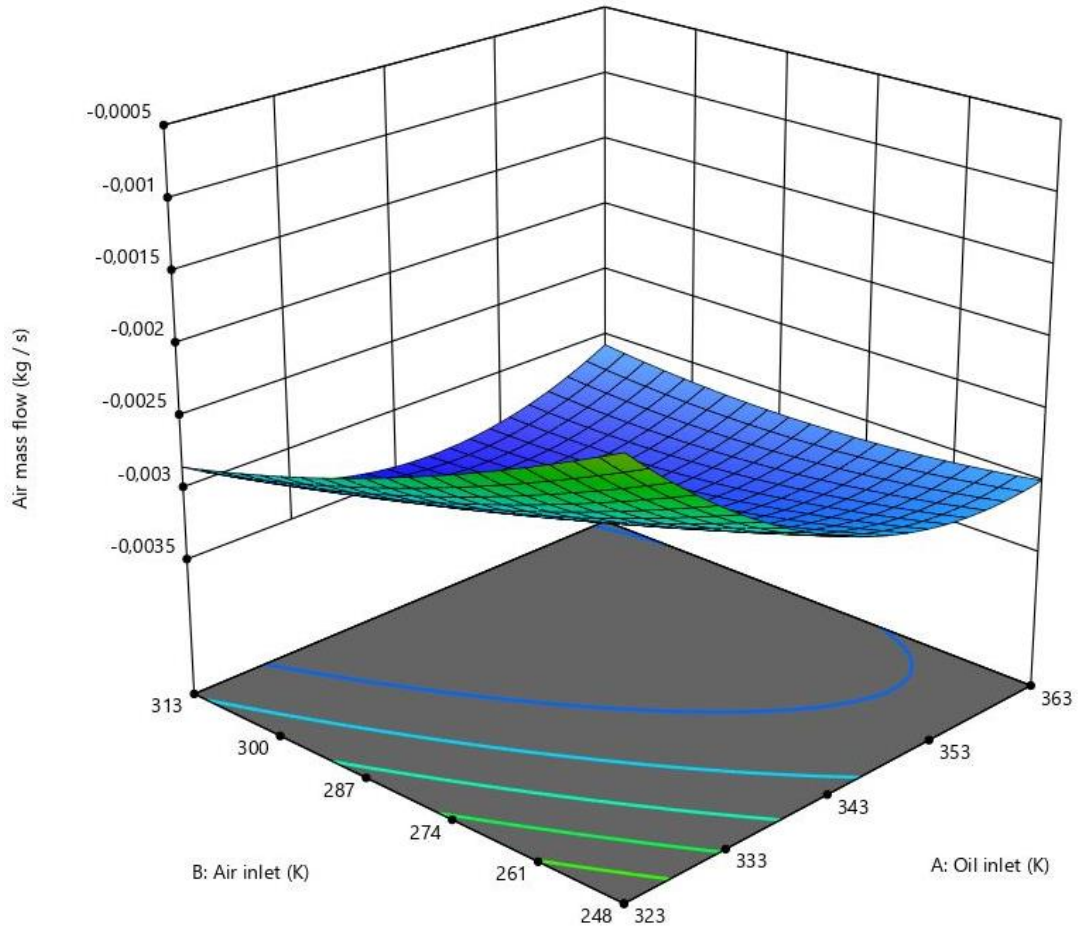
NBTY ile S355J malzemesi için elde edilen yüzey grafiği, güç değerinin yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarına bağlı olarak eğrisel bir değişim sergilediğini ve en yüksek değerlerin yaklaşık 353–363 K yağ giriş ile 248–260 K hava giriş sıcaklıkları aralığında elde edildiğini göstermektedir.

4.6.3 NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için RSM sonuçları



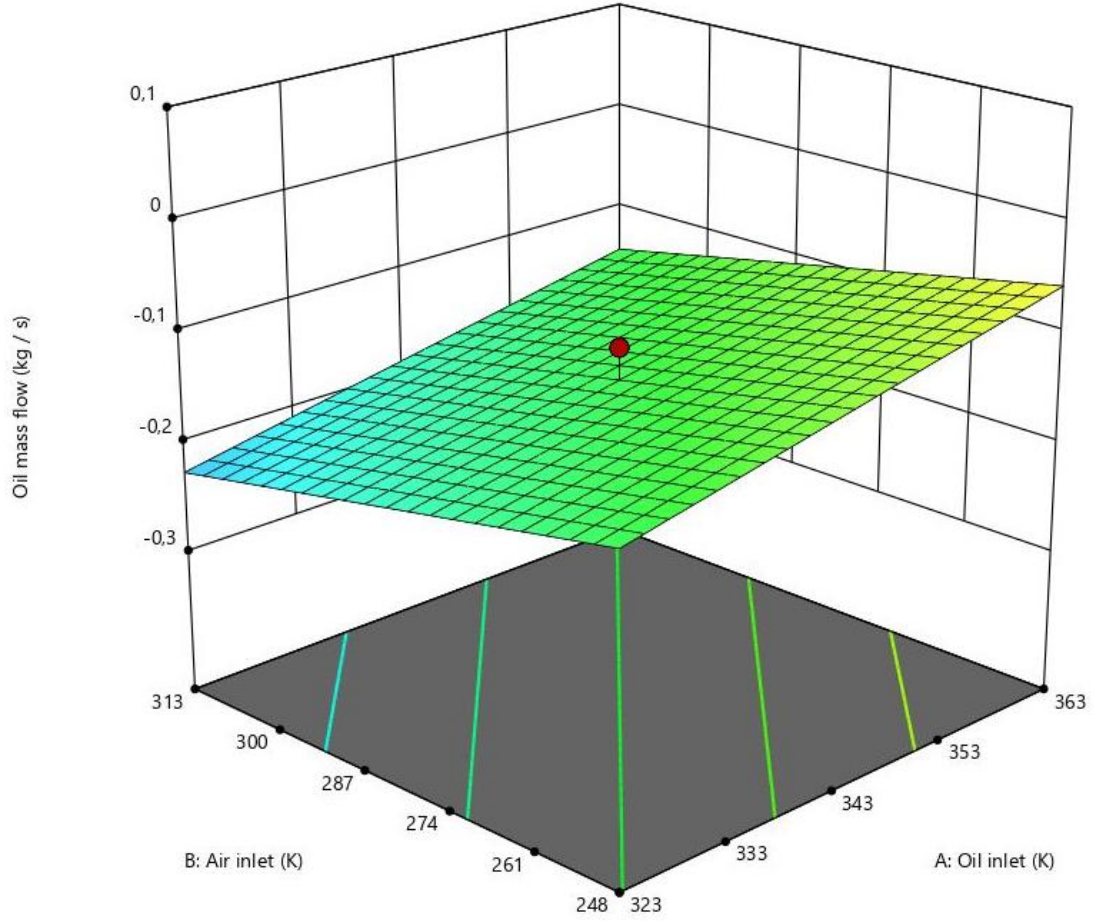
Şekil 4.31: NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-1

NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça yağ çıkış sıcaklığının yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının yağ çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



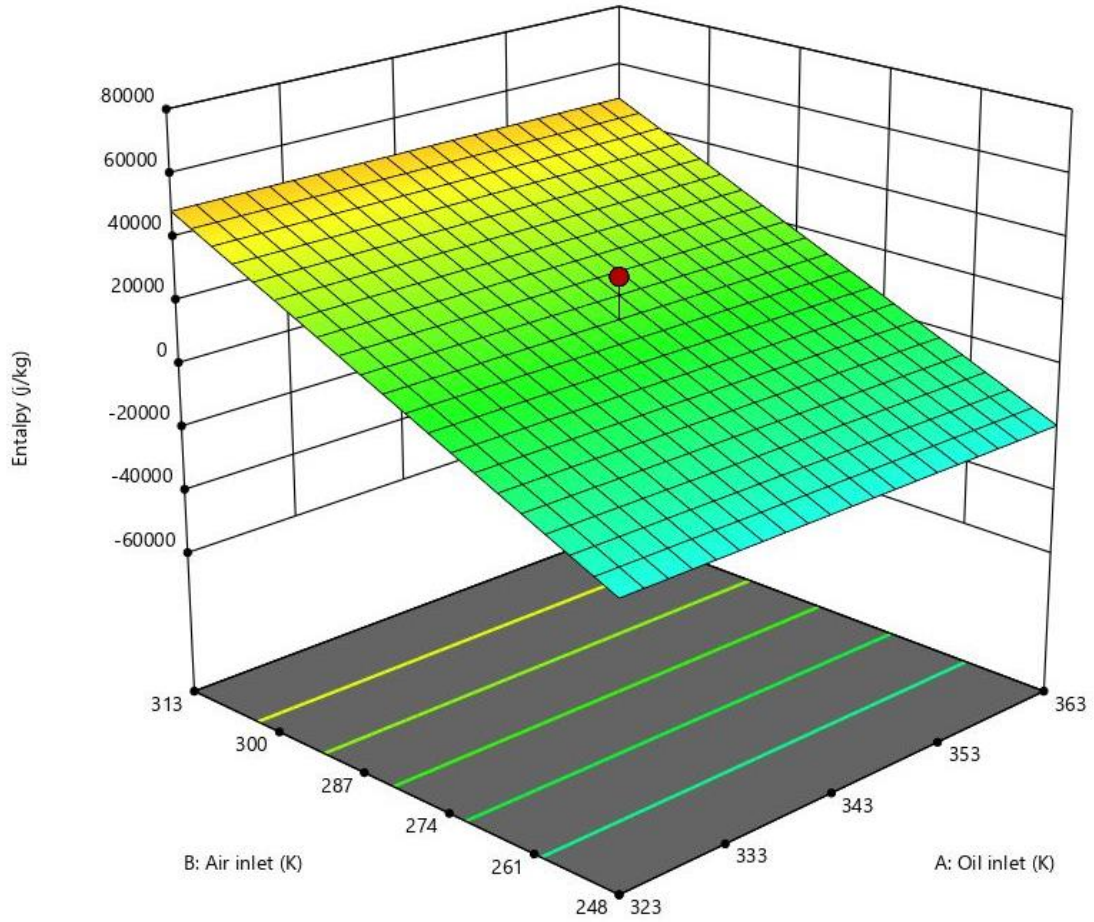
Şekil 4.32: NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-2

NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için elde edilen yüzey grafiği, hava kütleli debisinin yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarına bağlı olarak doğrusal olmayan (eğrisel) bir değişim gösterdiğini ve en düşük değerlerin yaklaşık 353–363 K yağ giriş ile 300–313 K hava giriş sıcaklıkları aralığında meydana geldiğini göstermektedir.



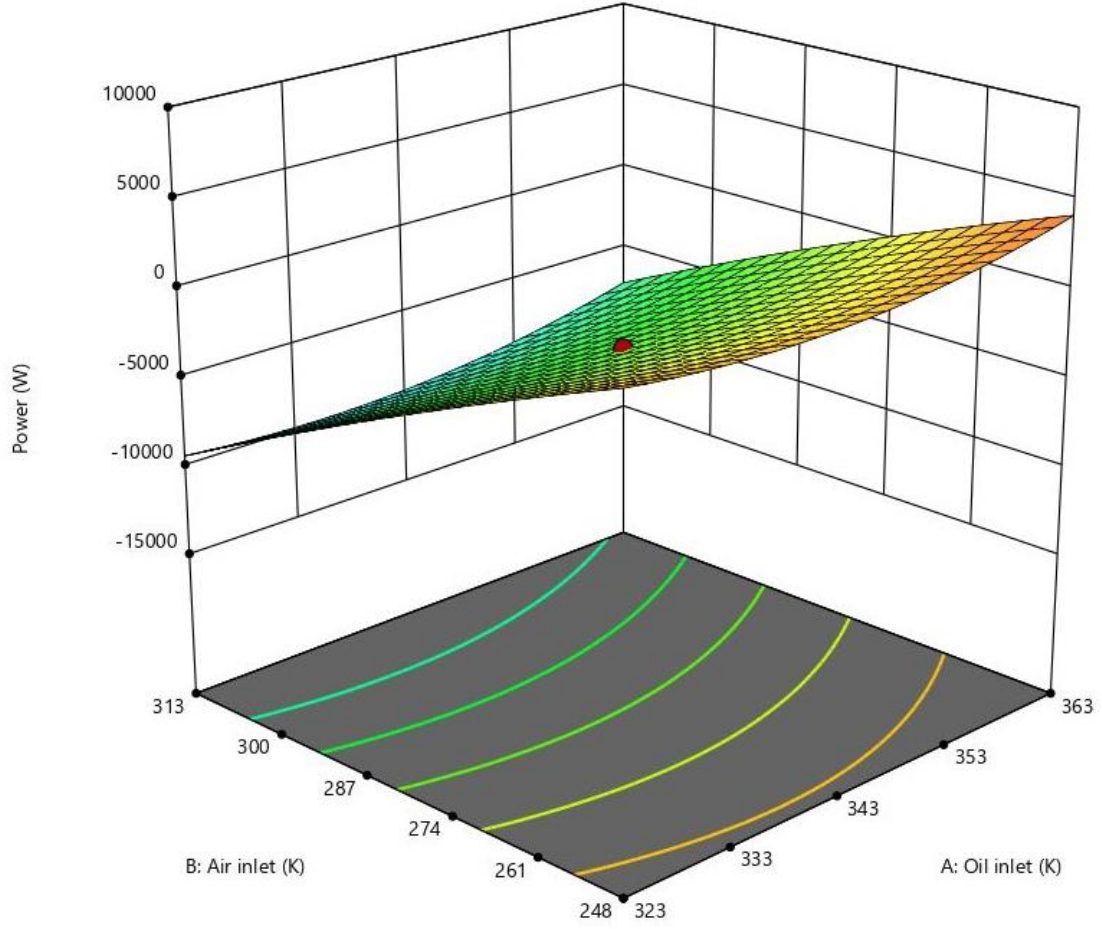
Şekil 4.33: NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-3

NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının değişmesiyle birlikte yağ kütle akışının yaklaşık lineer ve pozitif yönde değiştiği görülmüştür. Bu değişim hava giriş sıcaklığının azalmasıyla yağ kütle akışının artması, yağ giriş sıcaklığının artmasıyla da yağ kütle akışının artması şeklinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.34: NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-4

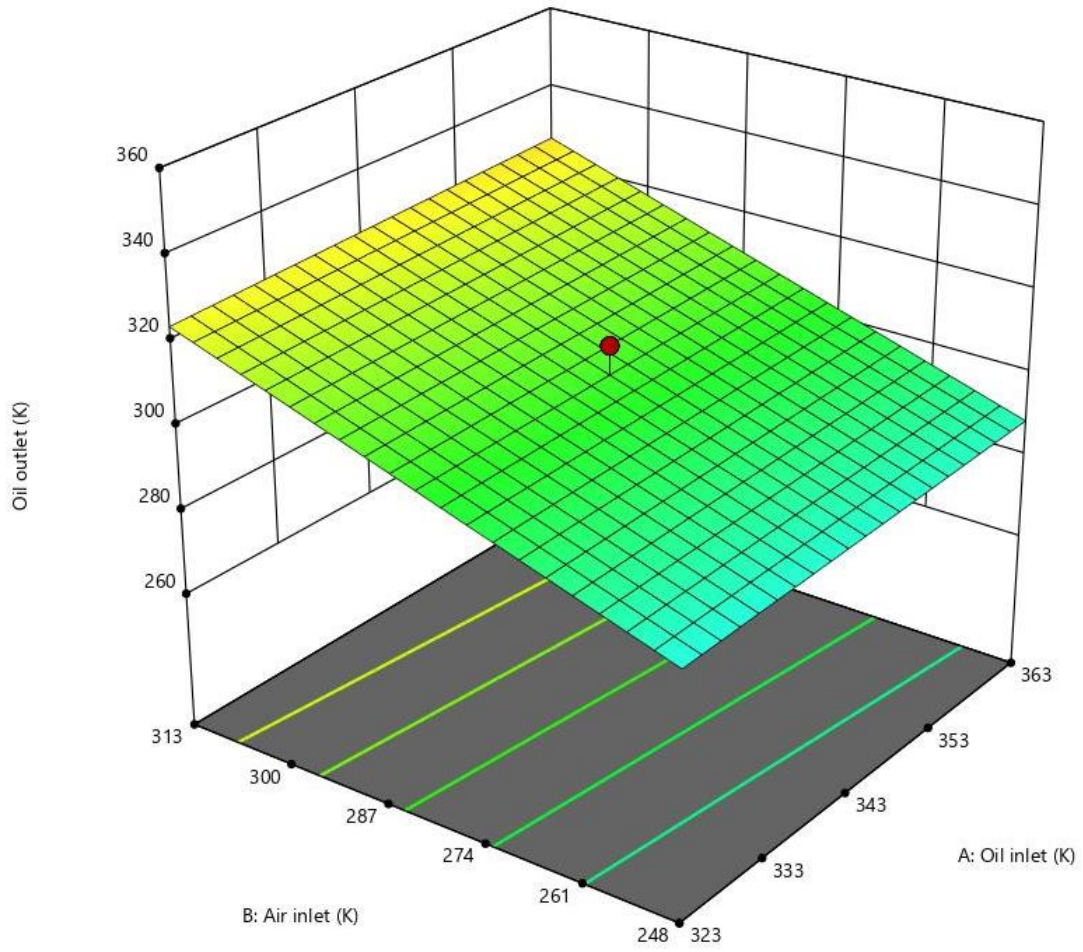
NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça entalpi değerinin yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının entalpi üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.35: NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-5

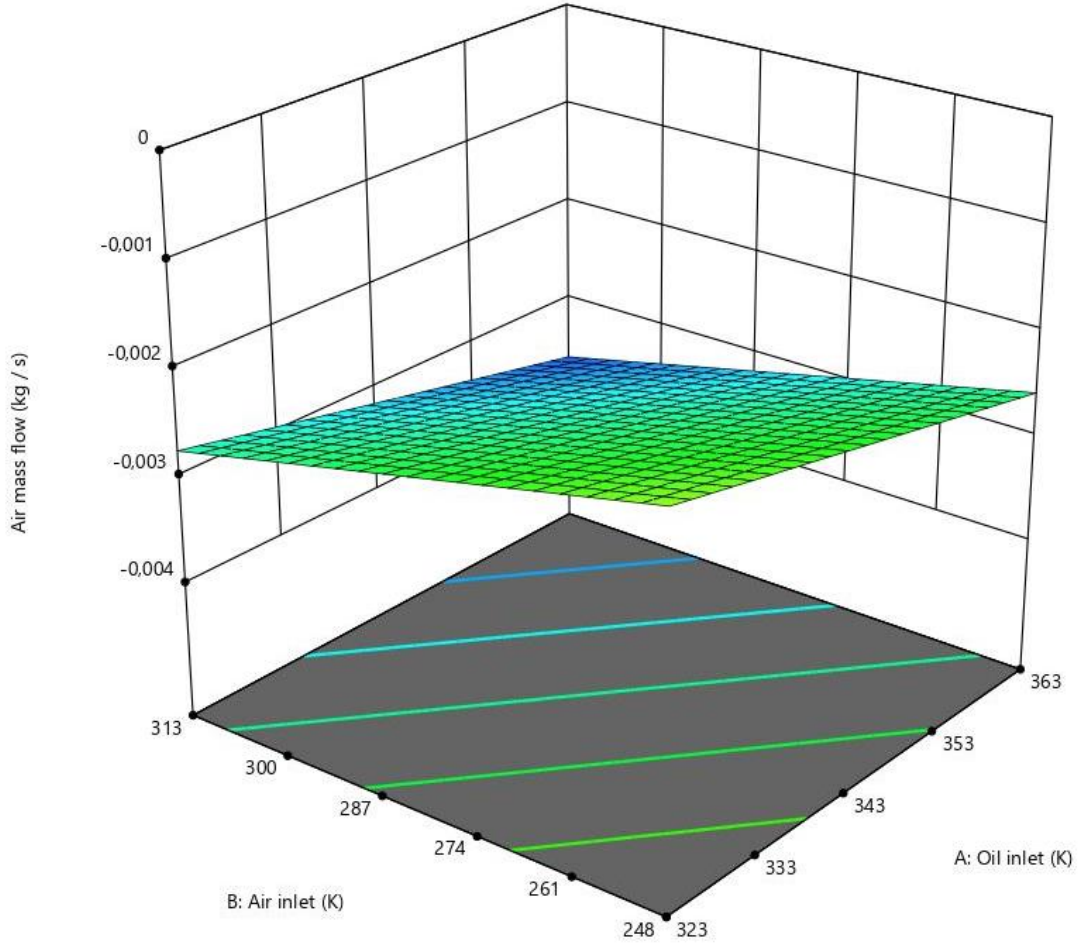
NBTY ile S355J malzemesi için elde edilen yüzey grafiği, güç değerinin yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarına bağlı olarak yaklaşık doğrusal bir artış eğilimi gösterdiğini ve en yüksek güç değerlerinin 353–363 K yağ giriş ile 248–260 K hava giriş sıcaklıkları aralığında elde edildiğini ortaya koymaktadır.

4.6.4 NBTY ile 316L malzeme için RSM sonuçları



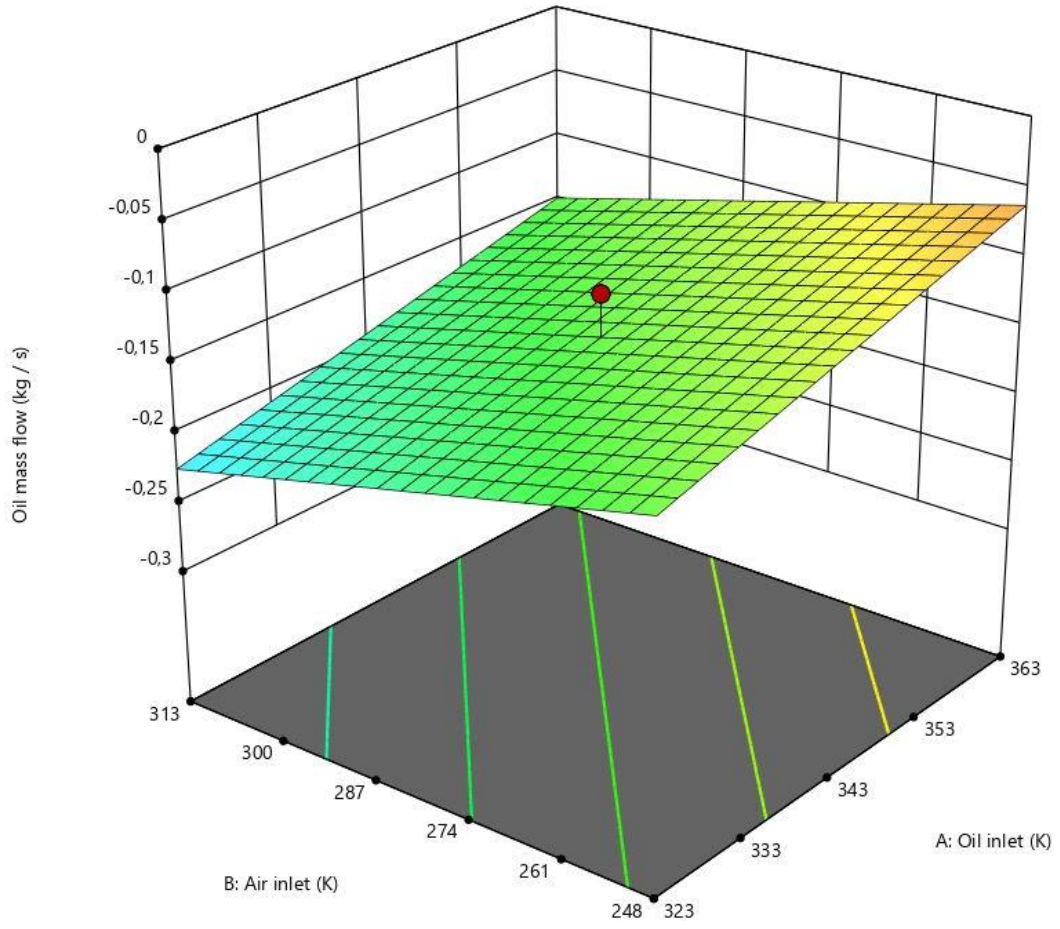
Şekil 4.36: NBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-1

NBTY ile 316L malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça yağ çıkış sıcaklığının yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının yağ çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



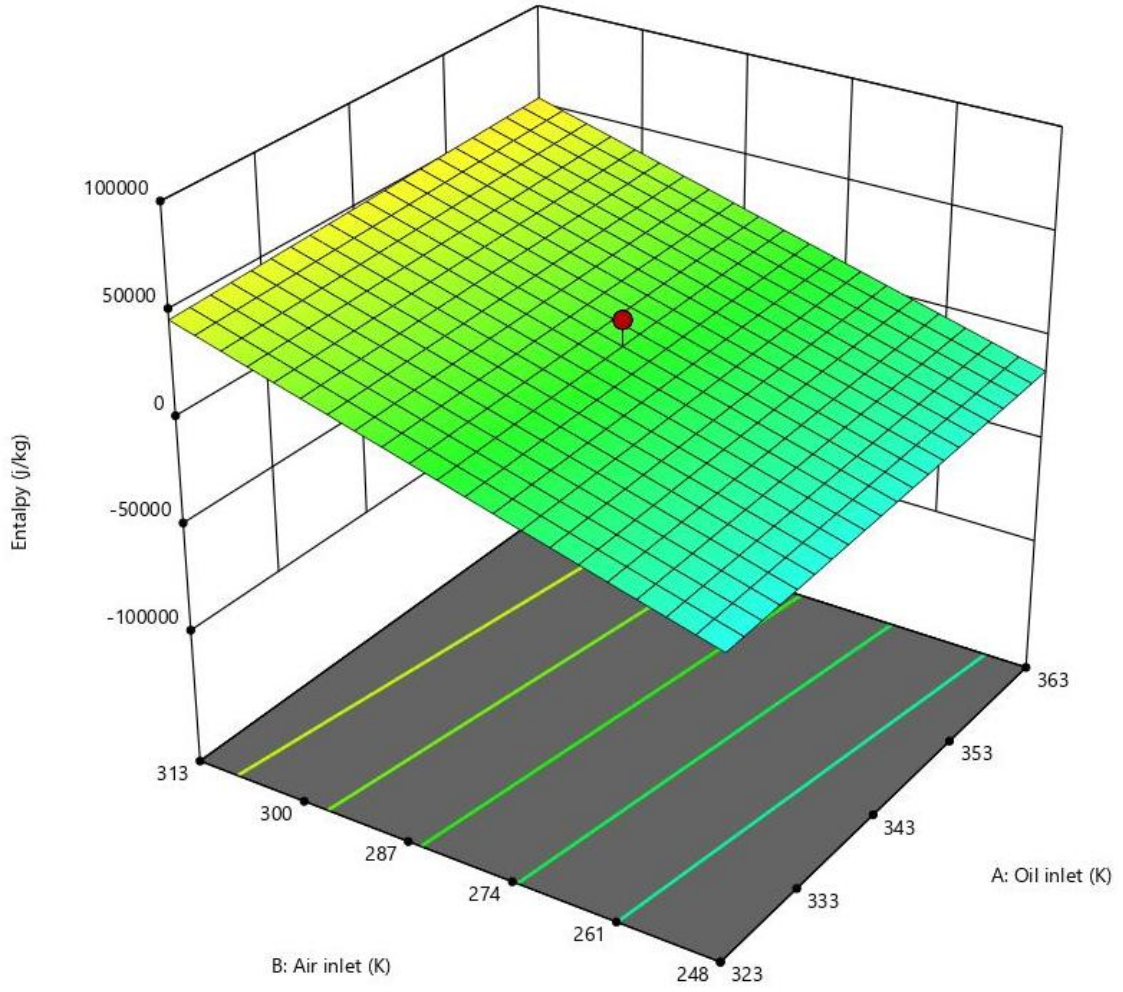
Şekil 4.37: NBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-2

NBTY ile 316L malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının değişmesiyle birlikte hava kütle akışının yaklaşık lineer ve negatif yönde değiştiği görülmüştür. Bu değişim hava giriş sıcaklığının azalmasıyla hava kütle akışının artması, yağ giriş sıcaklığının artmasıyla da hava kütle akışının azalması şeklinde olduğu görülmüştür.



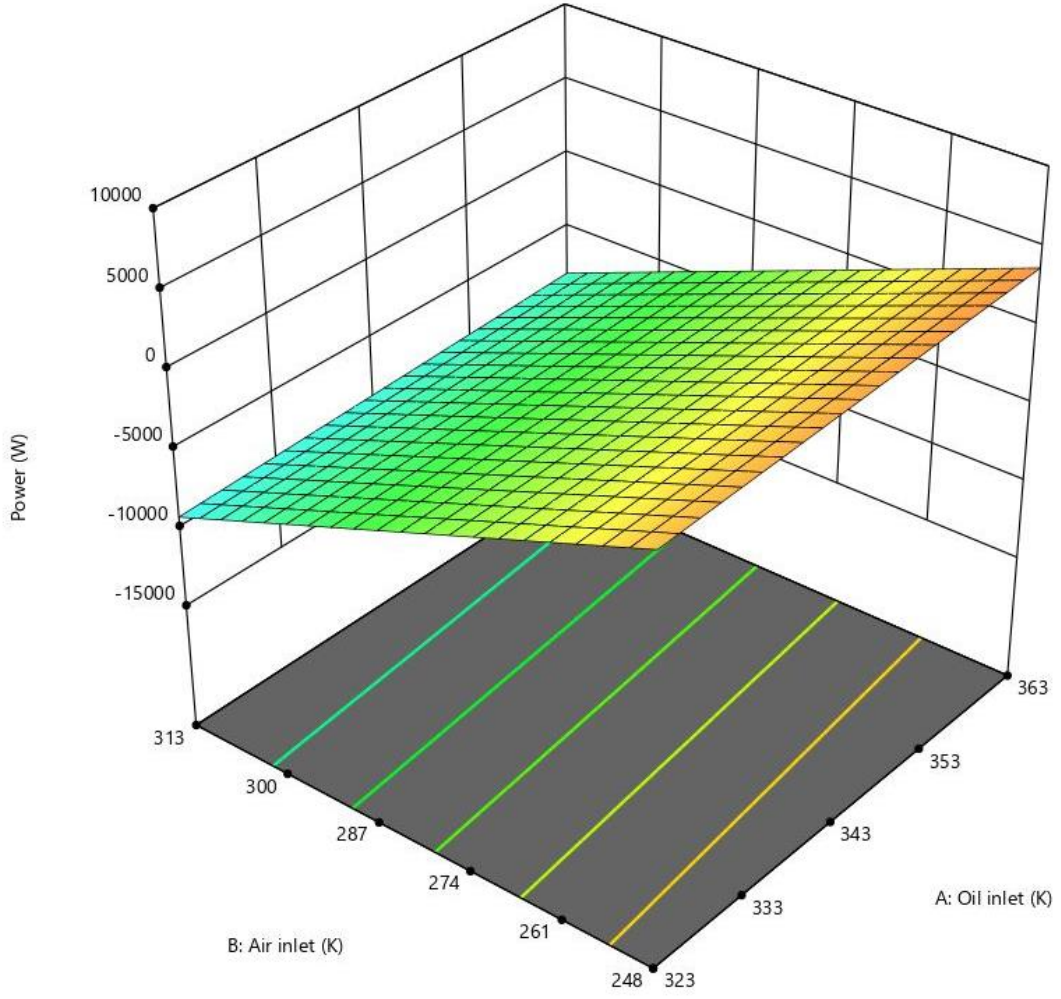
Şekil 4.38: NBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-3

NBTY ile 316L malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının değişmesiyle birlikte yağ kütle akışının yaklaşık lineer ve pozitif yönde değiştiği görülmüştür. Bu değişim hava giriş sıcaklığının azalmasıyla yağ kütle akışının artması, yağ giriş sıcaklığının artmasıyla da yağ kütle akışının artması şeklinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.39: NBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-4

NBTY ile carbon steel 1010 malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça entalpi değerinin yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının entalpi üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

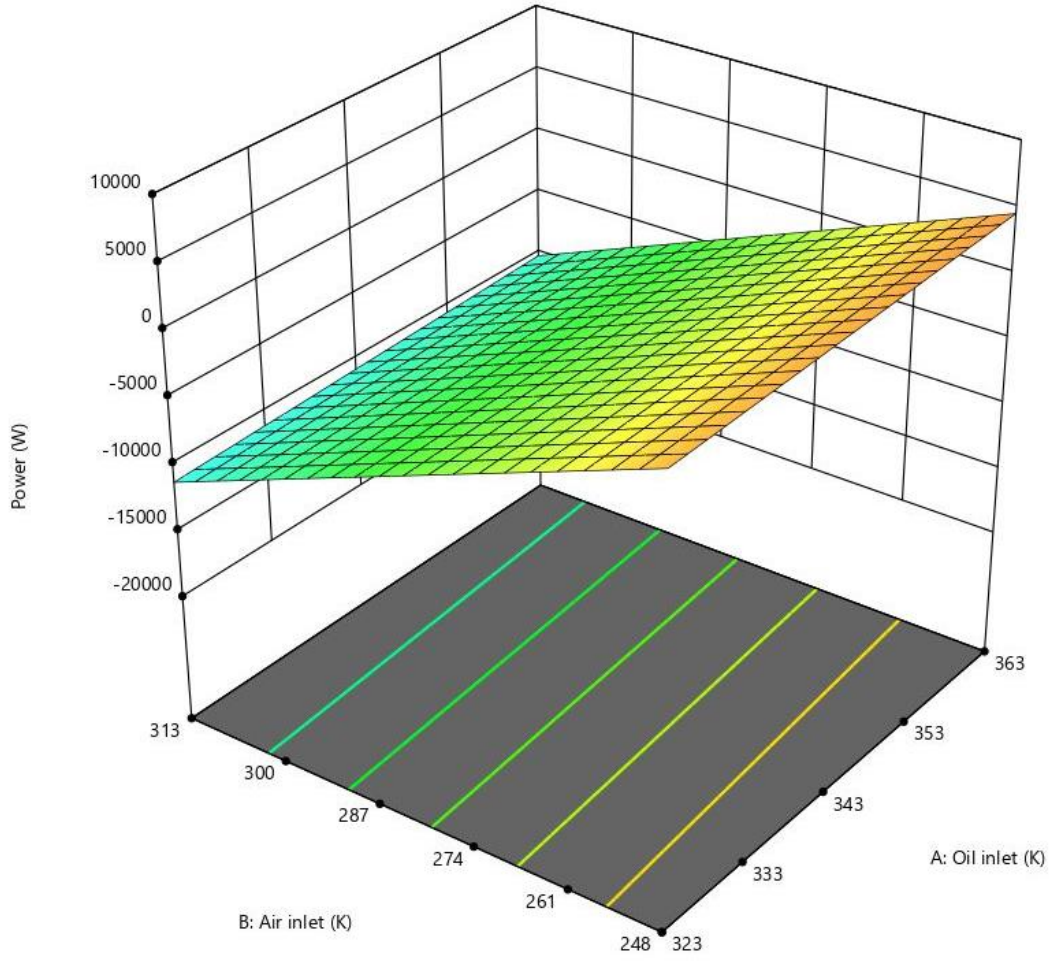


Şekil 4.40: NBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-5

NBTY ile 316L malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve yağ çıkış sıcaklıklarındaki artışla birlikte güç değerinin yaklaşık lineer bir eğilimle değiştiği görülmektedir. Yüzey eğiminin özellikle hava giriş doğrultusunda daha belirgin olması, gücün hava giriş sıcaklığına daha duyarlı olduğunu, buna karşılık yağ giriş sıcaklığının etkisinin görece daha sınırlı kaldığını göstermektedir.

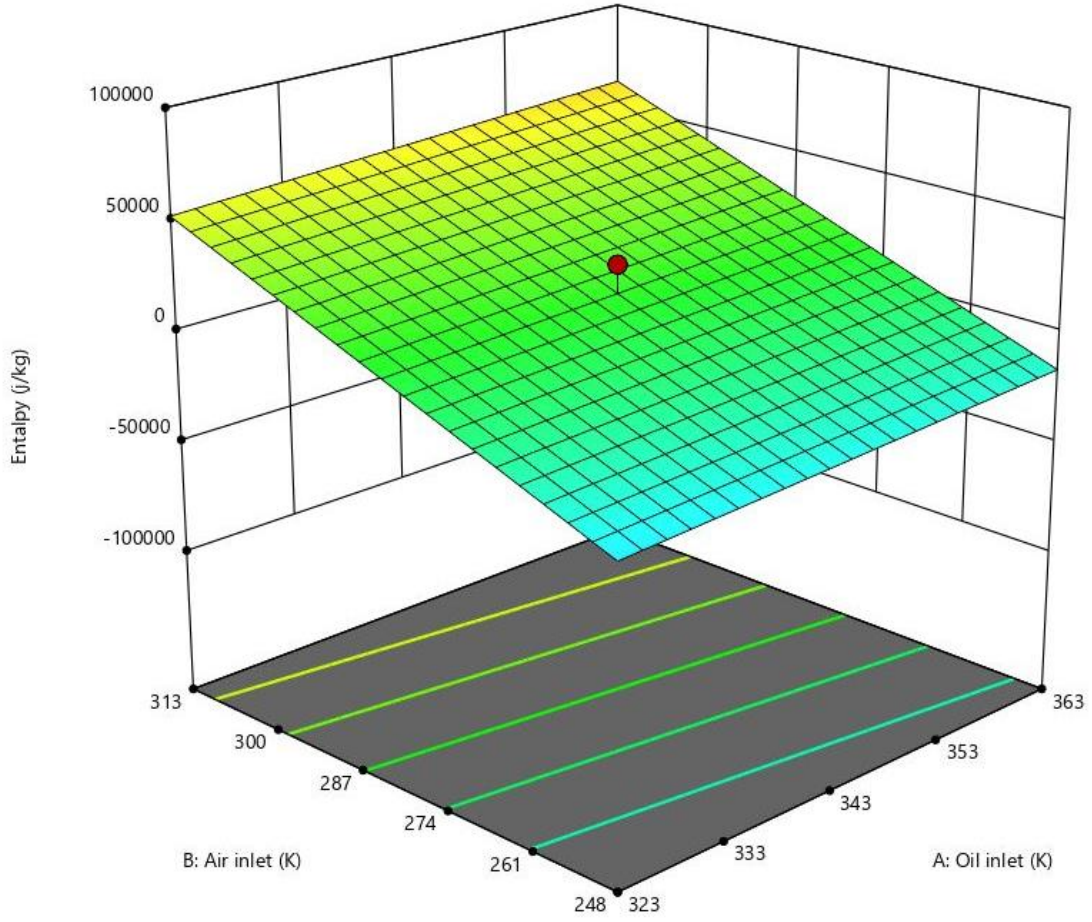
4.7 DEBTY İçin RSM Sonuçları

4.7.1 DEBTY ile S235J malzeme için RSM sonuçları



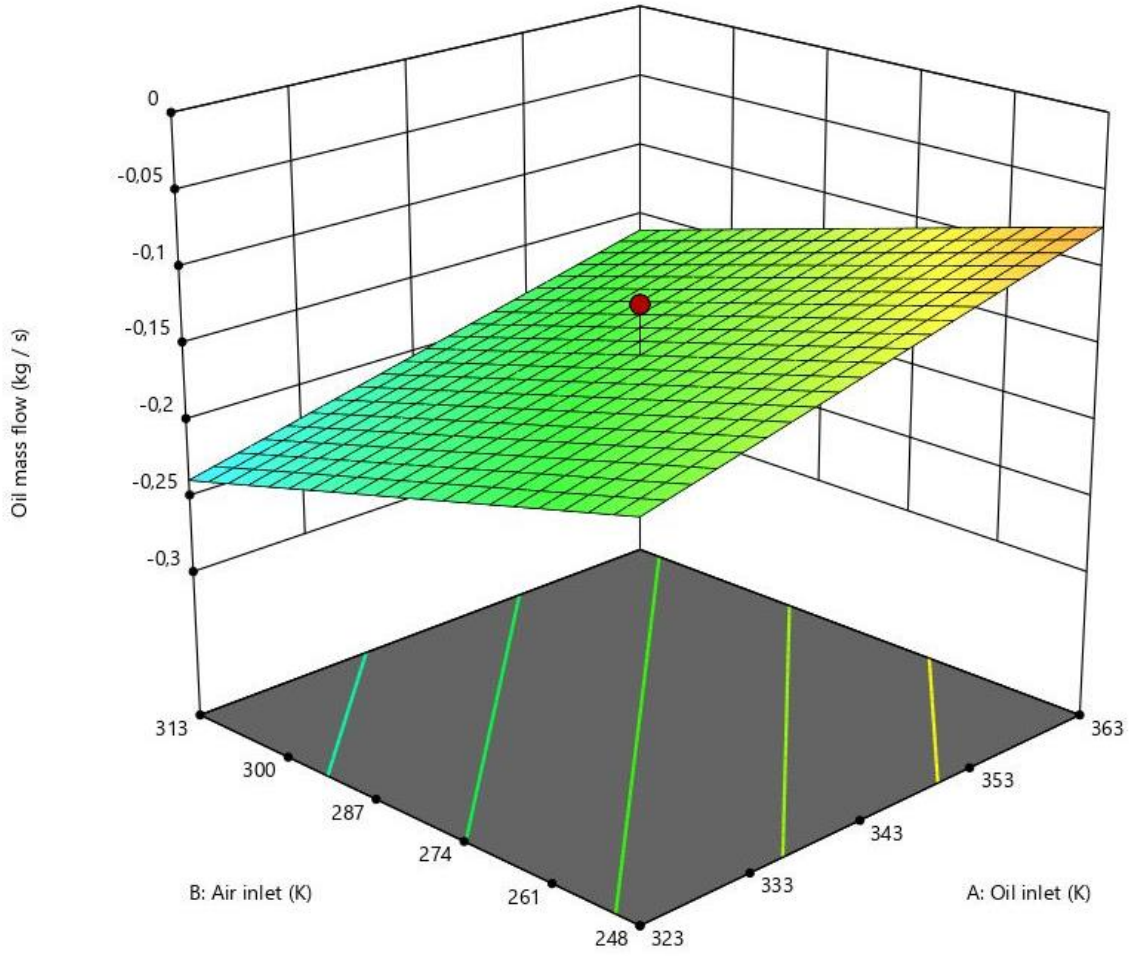
Şekil 4.41: DEBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-1

DEBTY ile S235J malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve yağ çıkış sıcaklıklarındaki artışla birlikte güç değerinin yaklaşık lineer bir eğilimle değiştiği görülmektedir. Yüzey eğiminin özellikle hava giriş doğrultusunda daha belirgin olması, gücün hava giriş sıcaklığına daha duyarlı olduğunu, buna karşılık yağ giriş sıcaklığının etkisinin görece daha sınırlı kaldığını göstermektedir.



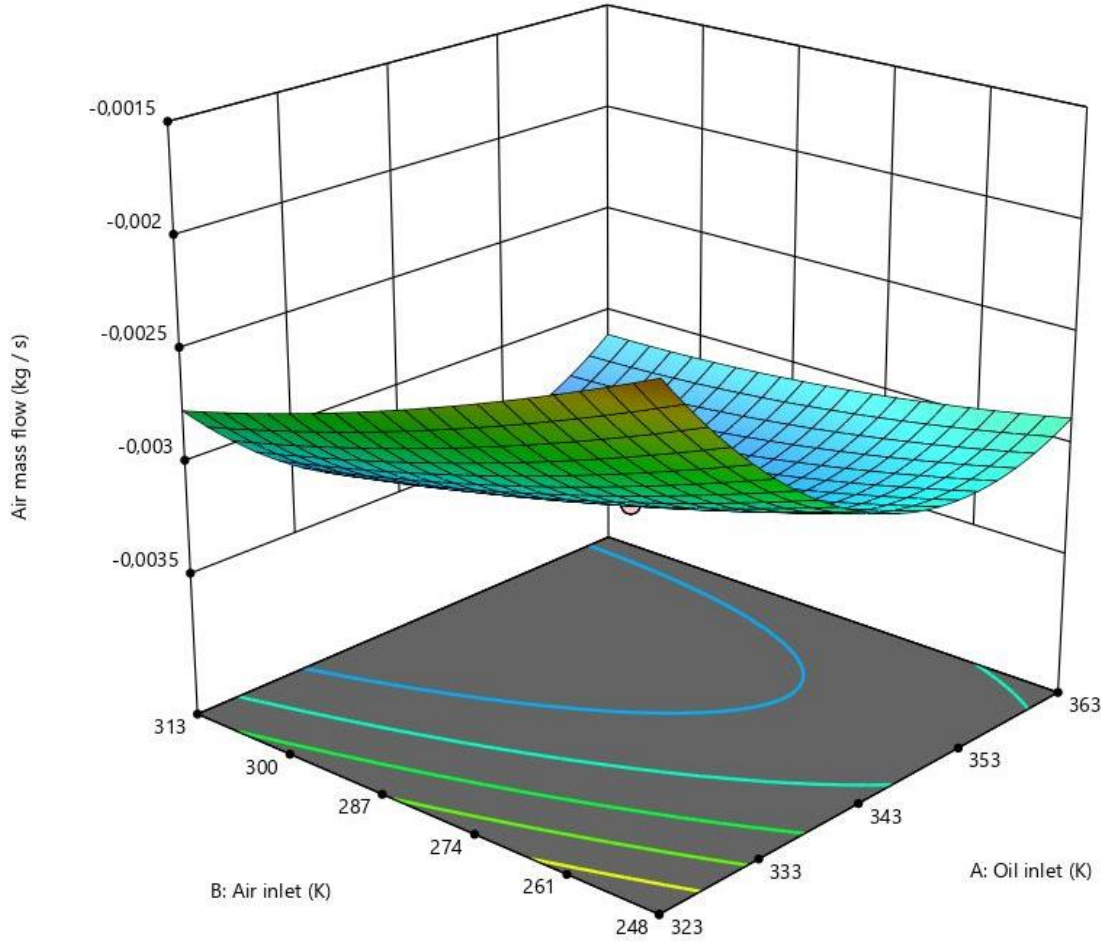
Şekil 4.42: DEBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-2

DEBTY ile S235J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça entalpi değerinin yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının entalpi üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



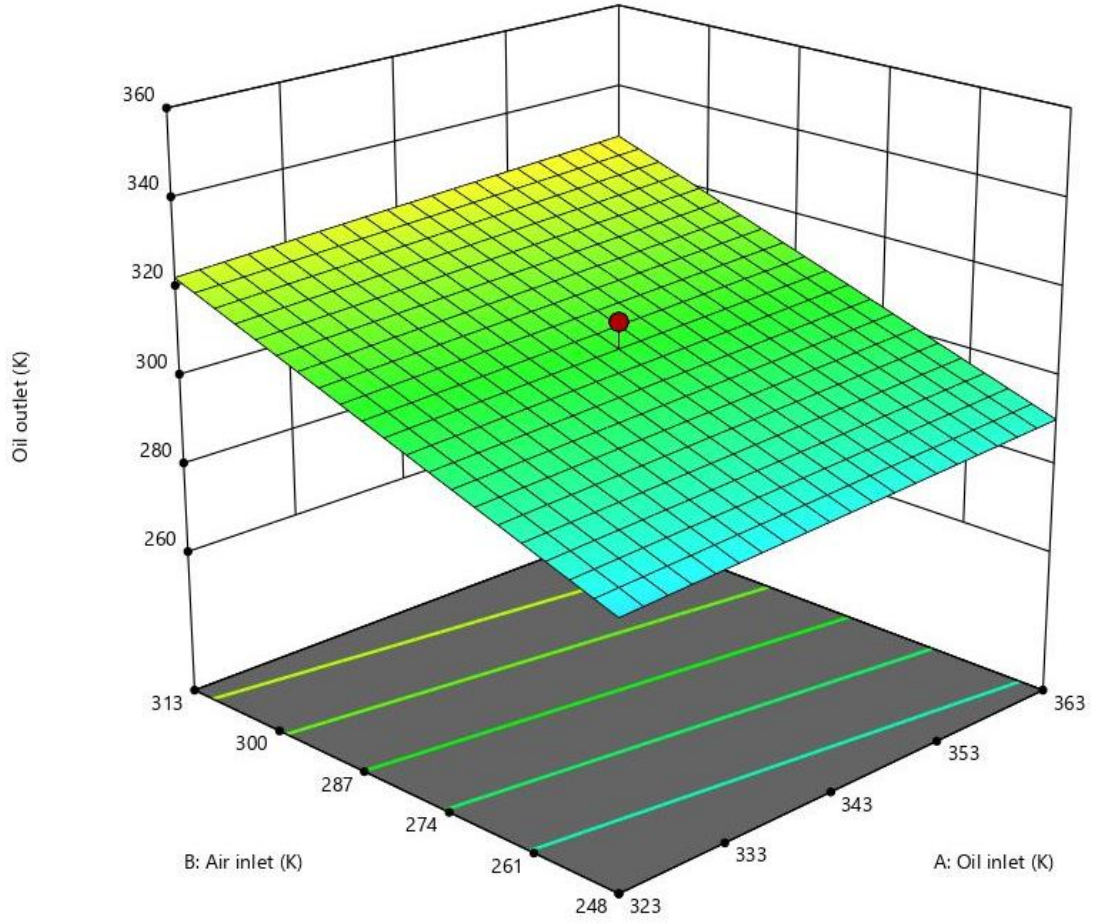
Şekil 4.43: DEBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-3

DEBTY ile S235J malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının değişmesiyle birlikte yağ kütle akışının yaklaşık lineer ve pozitif yönde değiştiği görülmüştür. Bu değişim hava giriş sıcaklığının azalmasıyla yağ kütle akışının artması, yağ giriş sıcaklığının artmasıyla da yağ kütle akışının artması şeklinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.44: DEBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-4

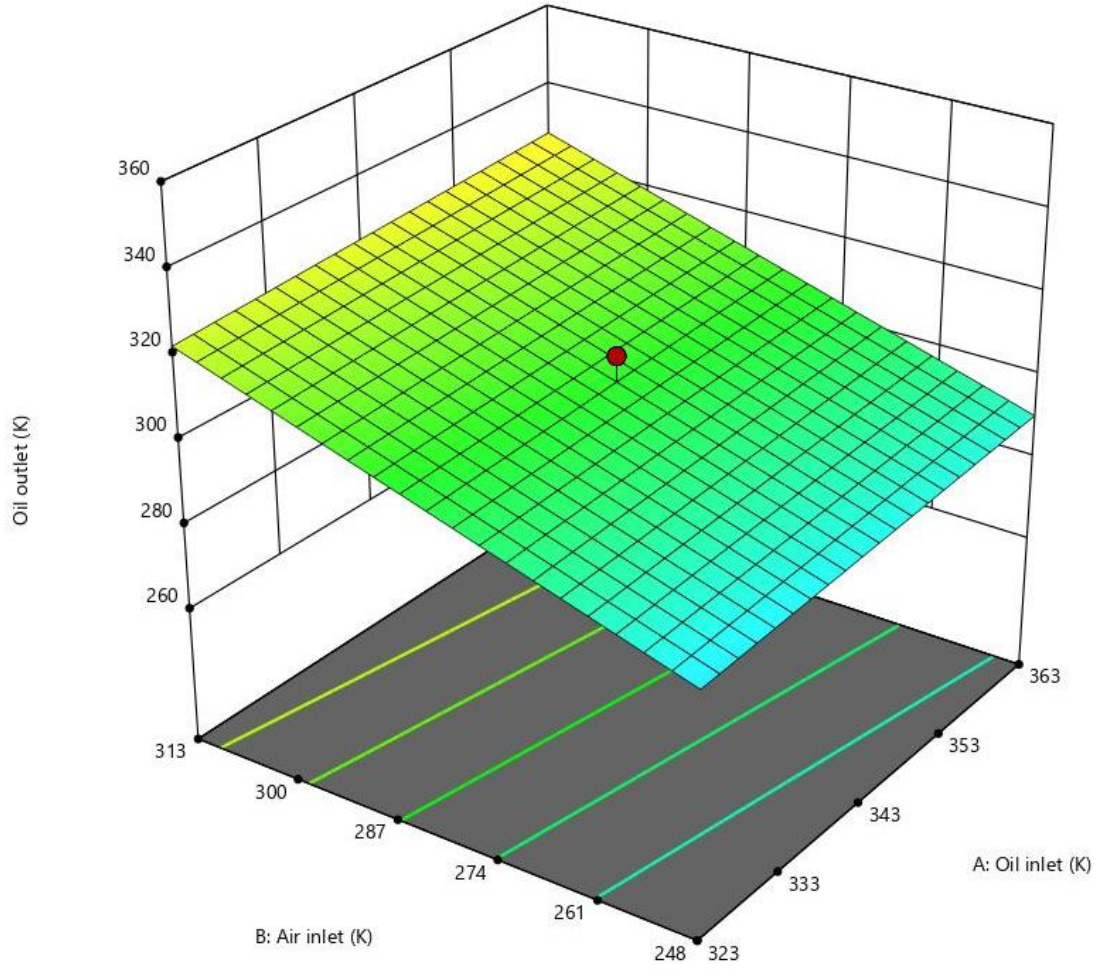
DEBTY ile S235J malzeme için elde edilen yüzey grafiği, hava debisi değerinin yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarına bağlı olarak eğrisel bir artış eğilimi gösterdiğini ve en yüksek hava debisi değerlerinin 353–363 K yağ ile 248–260 K hava giriş sıcaklıkları aralığında elde edildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.45: DEBTY ile S235J malzeme için 3D surface sonuçları-5

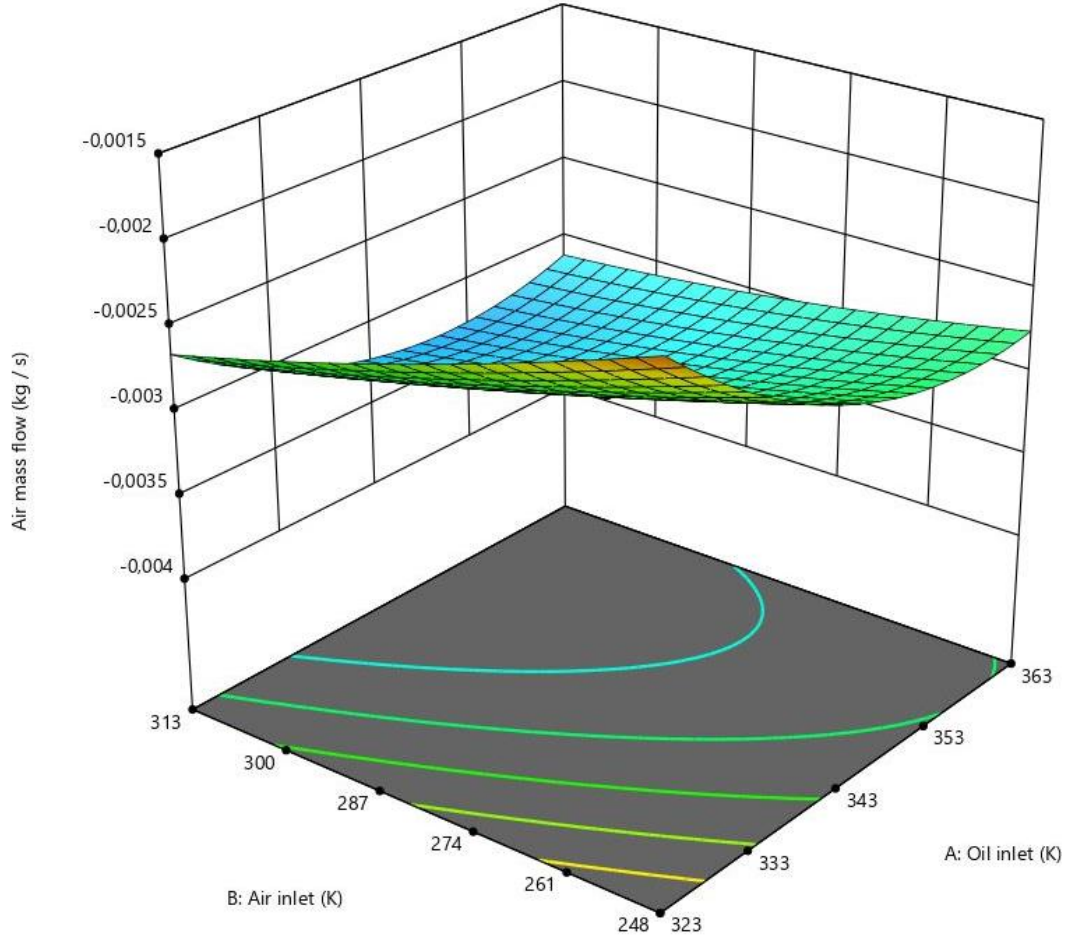
DEBTY ile S235J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça yağ çıkış sıcaklığının yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının yağ çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

4.7.2 DEBTY ile S355J malzeme için RSM sonuçları



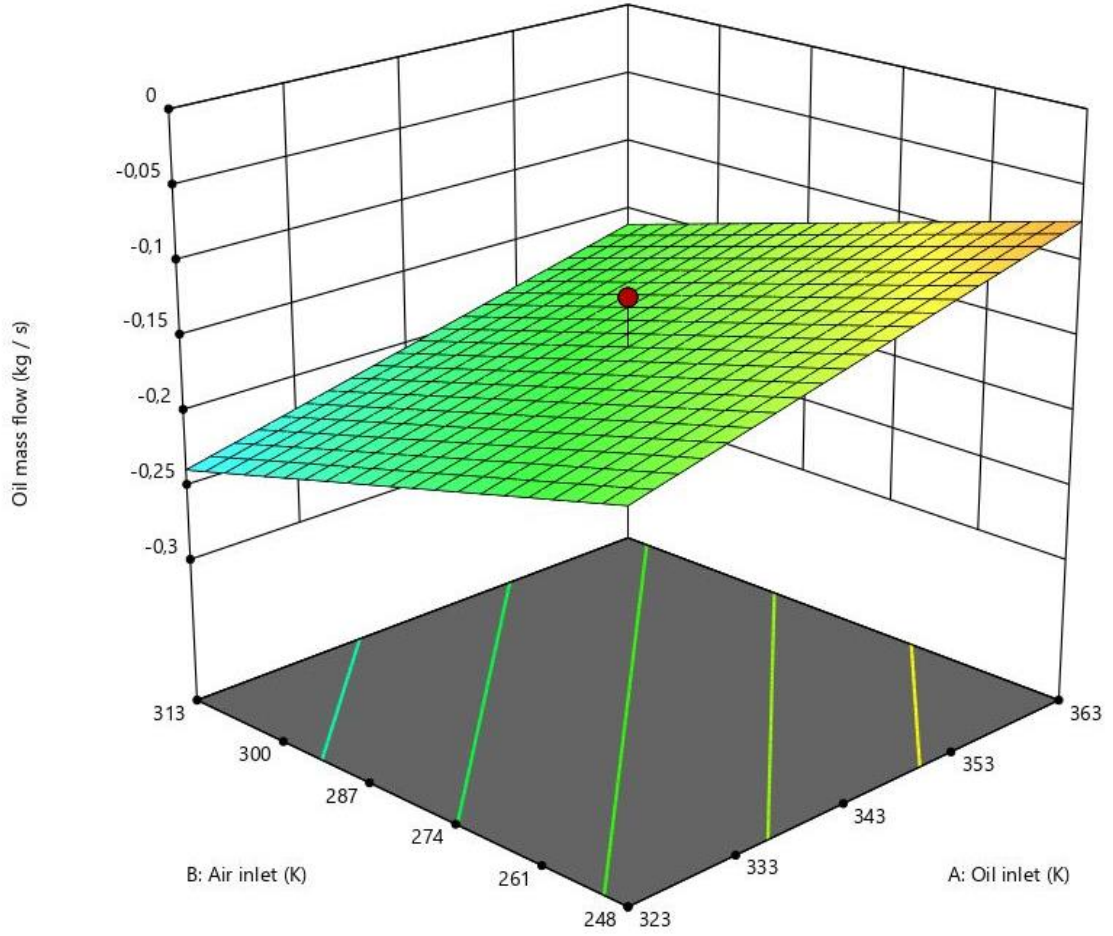
Şekil 4.46: DEBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-1

DEBTY ile S355J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça yağ çıkış sıcaklığının yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının yağ çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



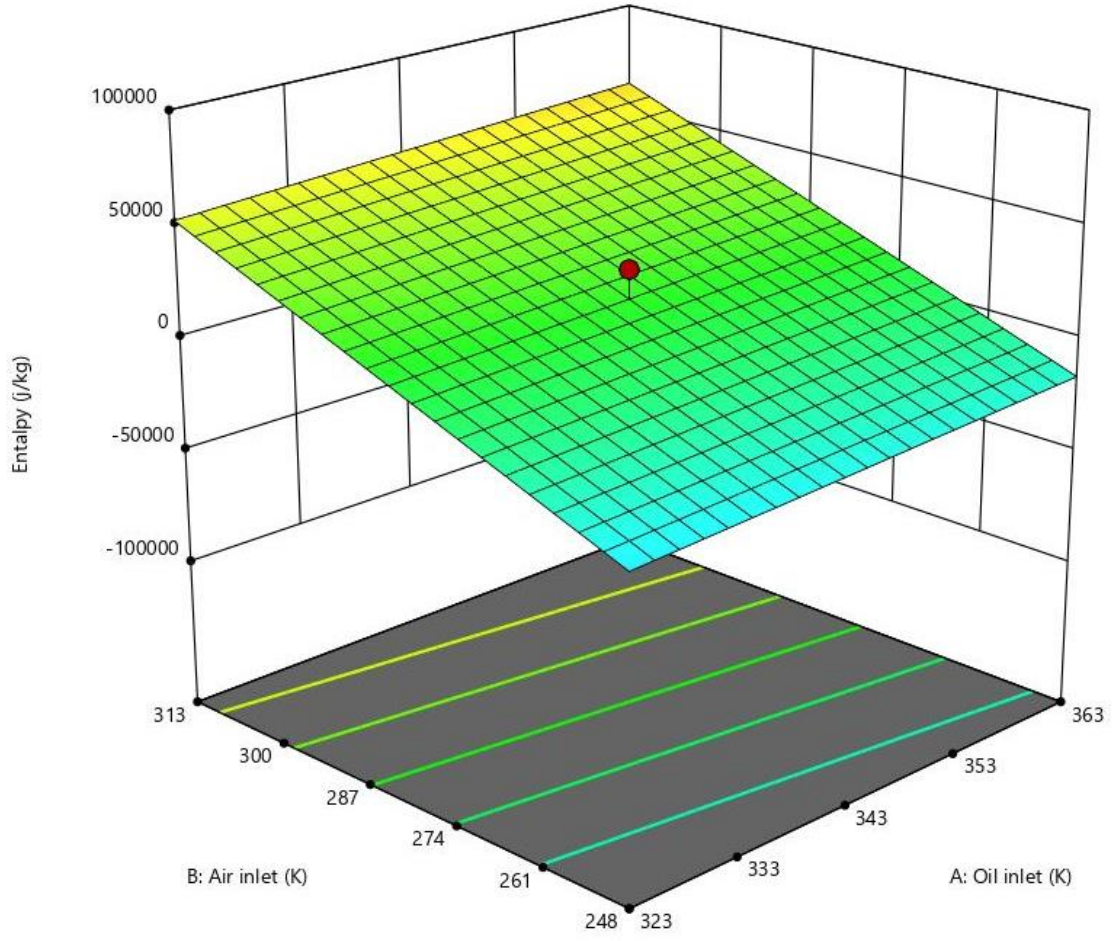
Şekil 4.47: DEBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-2

DEBTY ile S355J malzemesi için elde edilen yüzey grafiği, hava debisinin yağ ve hava giriş sıcaklıklarına bağlı olarak eğrisel bir yükseliş eğilimi sergilediğini, özellikle 350–360 K yağ giriş sıcaklığı ile 250–260 K hava giriş sıcaklığı aralığında maksimum değerlere ulaştığını göstermektedir.



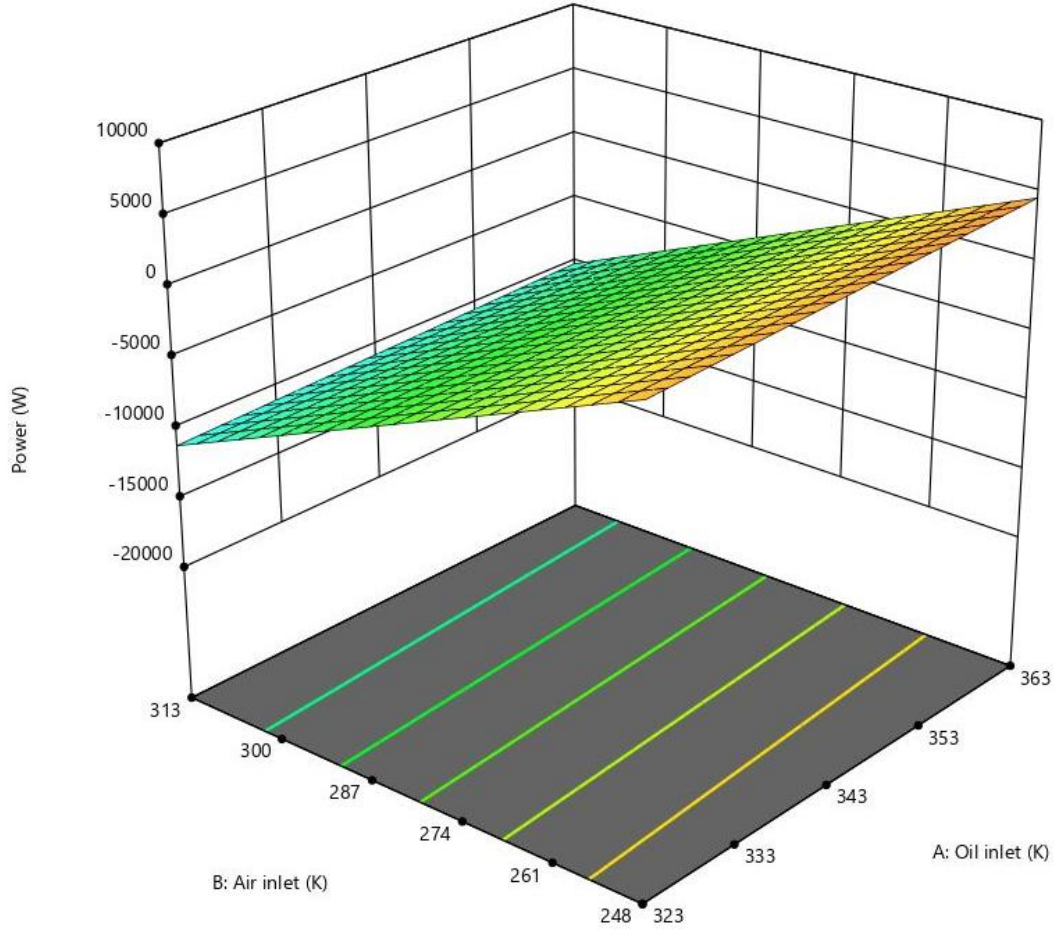
Şekil 4.48: DEBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-3

DEBTY ile S355J malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının değişmesiyle birlikte yağ kütle akışının yaklaşık lineer ve pozitif yönde değiştiği görülmüştür. Bu değişim hava giriş sıcaklığının azalmasıyla yağ kütle akışının artması, yağ giriş sıcaklığının artmasıyla da yağ kütle akışının artması şeklinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.49: DEBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-4

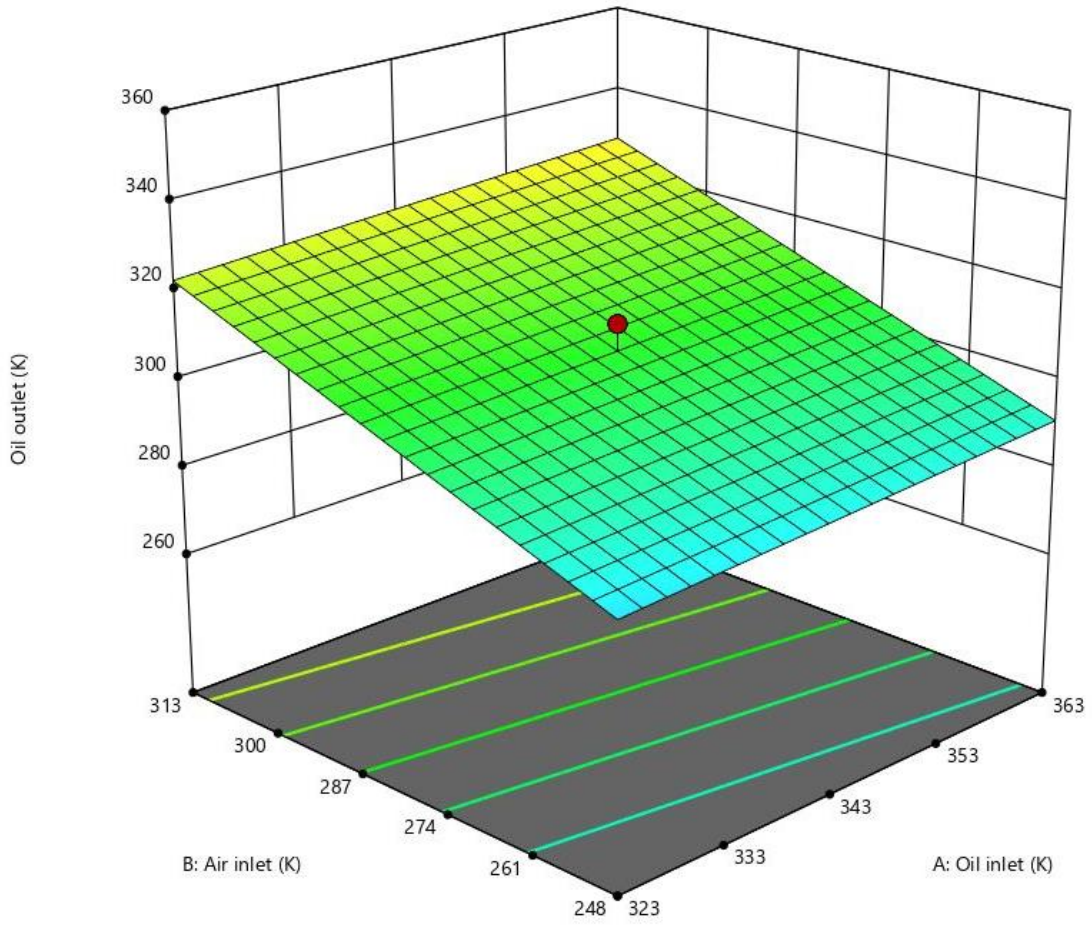
DEBTY ile S355J malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça entalpi değerinin yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının entalpi üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.50: DEBTY ile S355J malzeme için 3D surface sonuçları-5

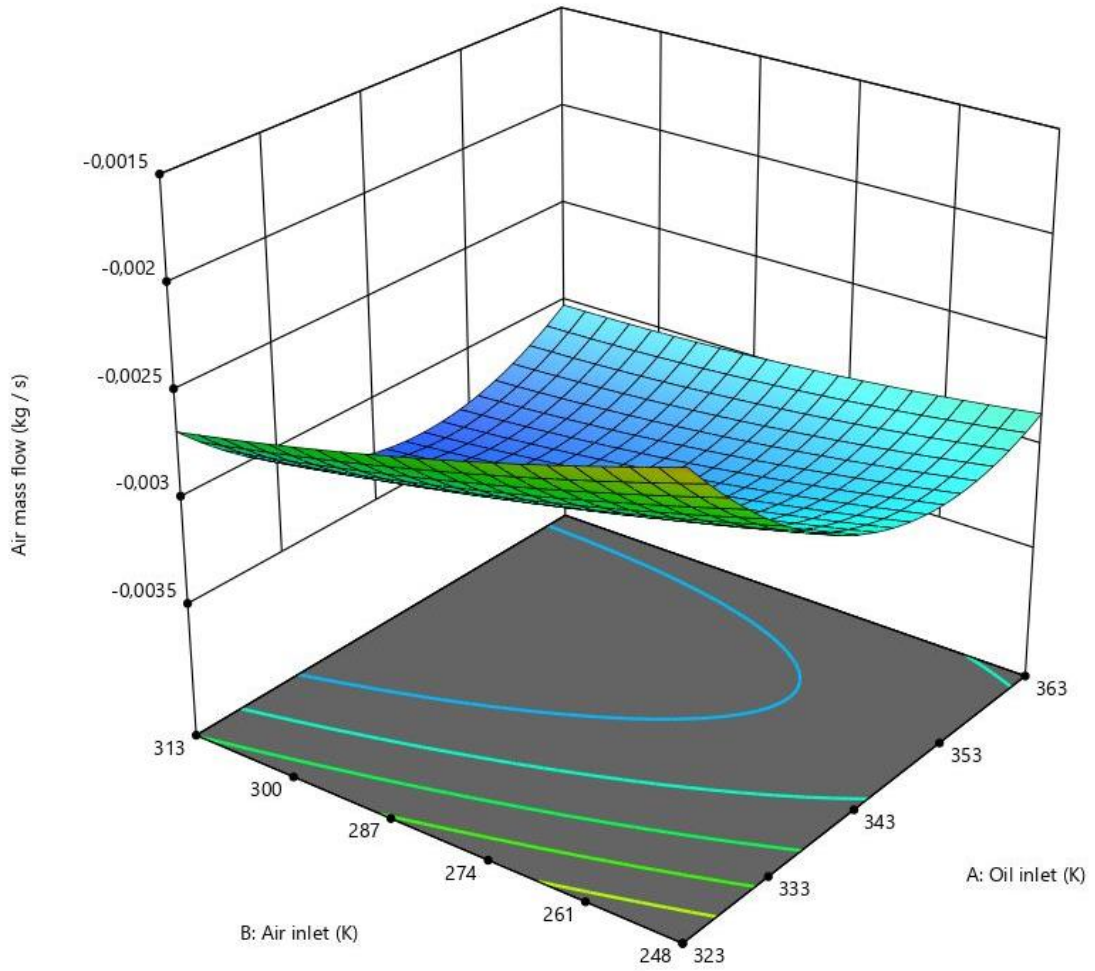
DEBTY ile S355J malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve yağ çıkış sıcaklıklarındaki artışla birlikte güç değerinin yaklaşık lineer bir eğilimle değiştiği görülmektedir. Yüzey eğiminin özellikle hava giriş doğrultusunda daha belirgin olması, gücün hava giriş sıcaklığına daha duyarlı olduğunu, buna karşılık yağ giriş sıcaklığının etkisinin görece daha sınırlı kaldığını göstermektedir.

4.7.3 DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için RSM sonuçları



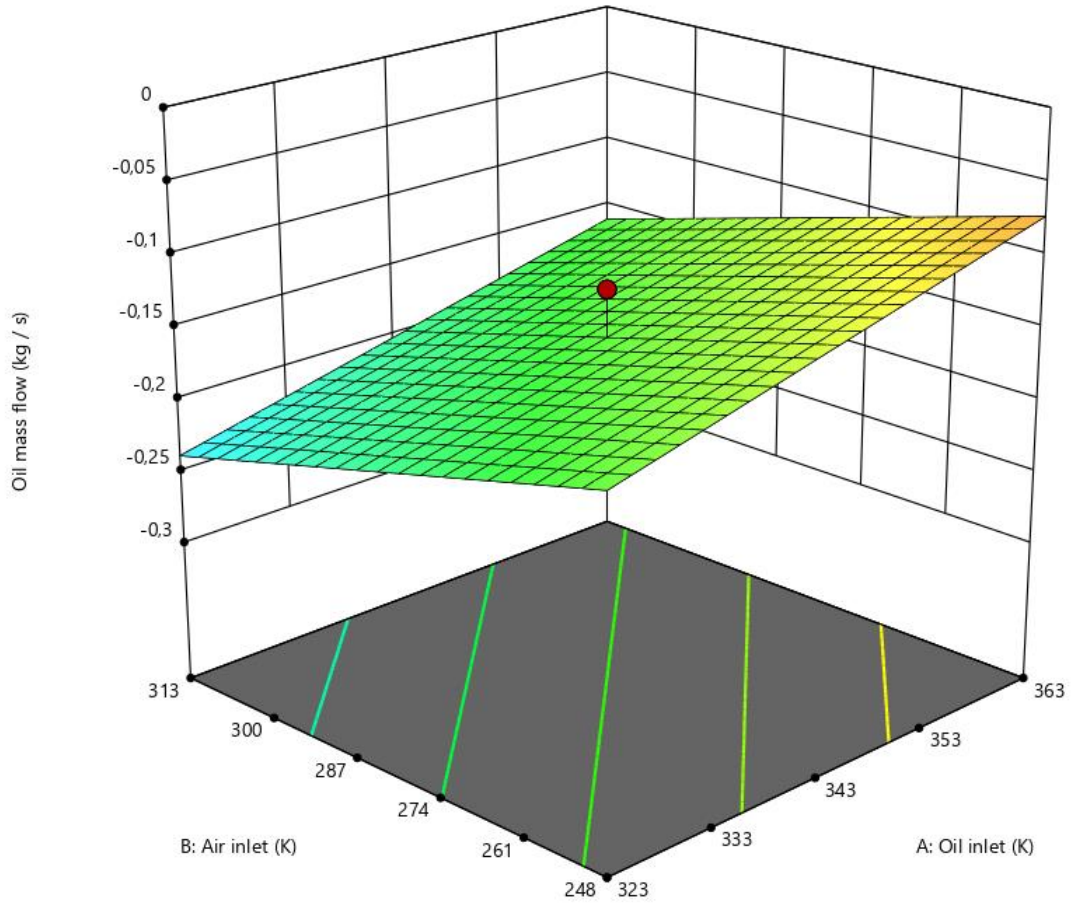
Şekil 4.51: DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-1

DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça yağ çıkış sıcaklığının yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının yağ çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



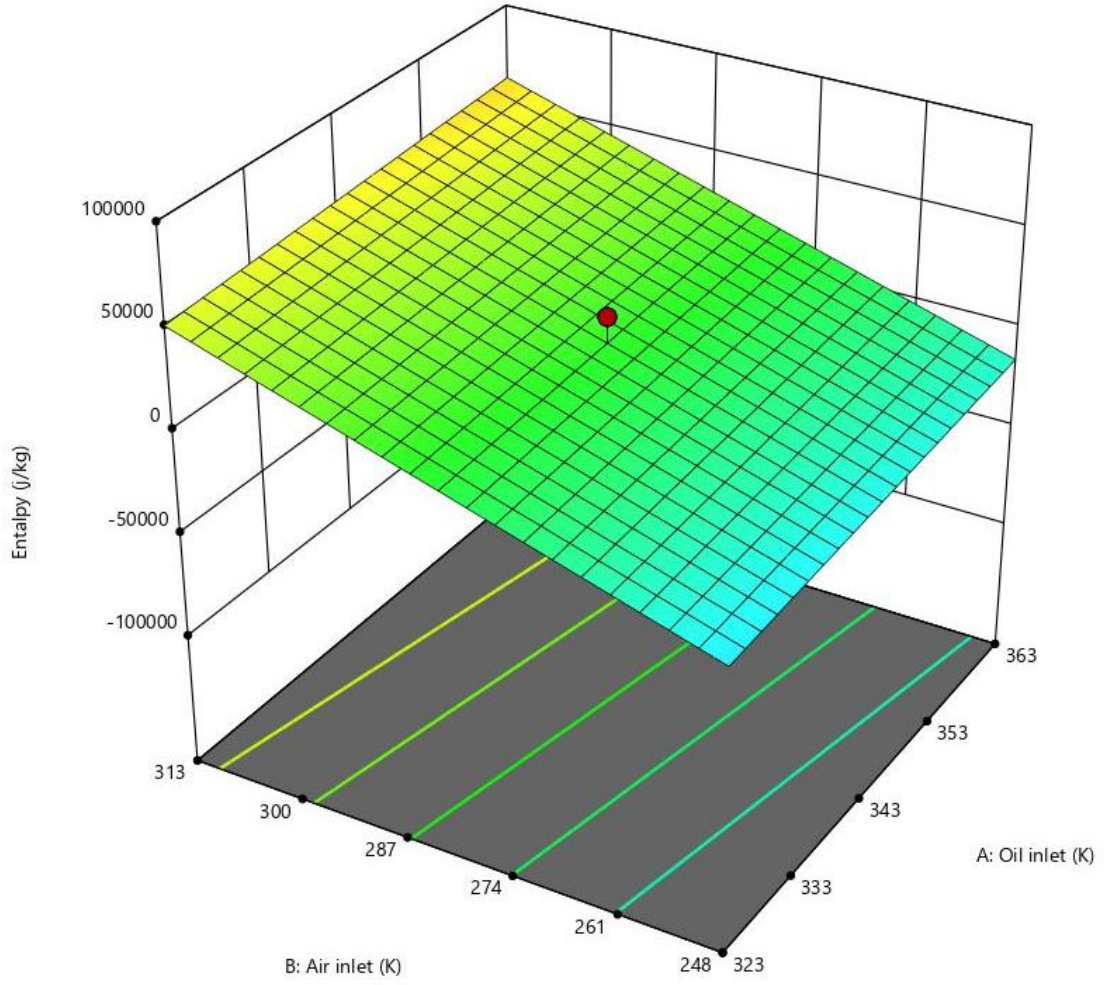
Şekil 4.52: DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-2

DEBTY ile carbon steel 1010 malzemesi için elde edilen yüzey grafiği, hava debisinin yağ ve hava giriş sıcaklıklarına bağlı olarak eğrisel bir artış eğilimi gösterdiğini, özellikle 350–360 K yağ giriş sıcaklığı ile 250–260 K hava giriş sıcaklığı aralığında en yüksek değerlere ulaştığını ortaya koymaktadır.



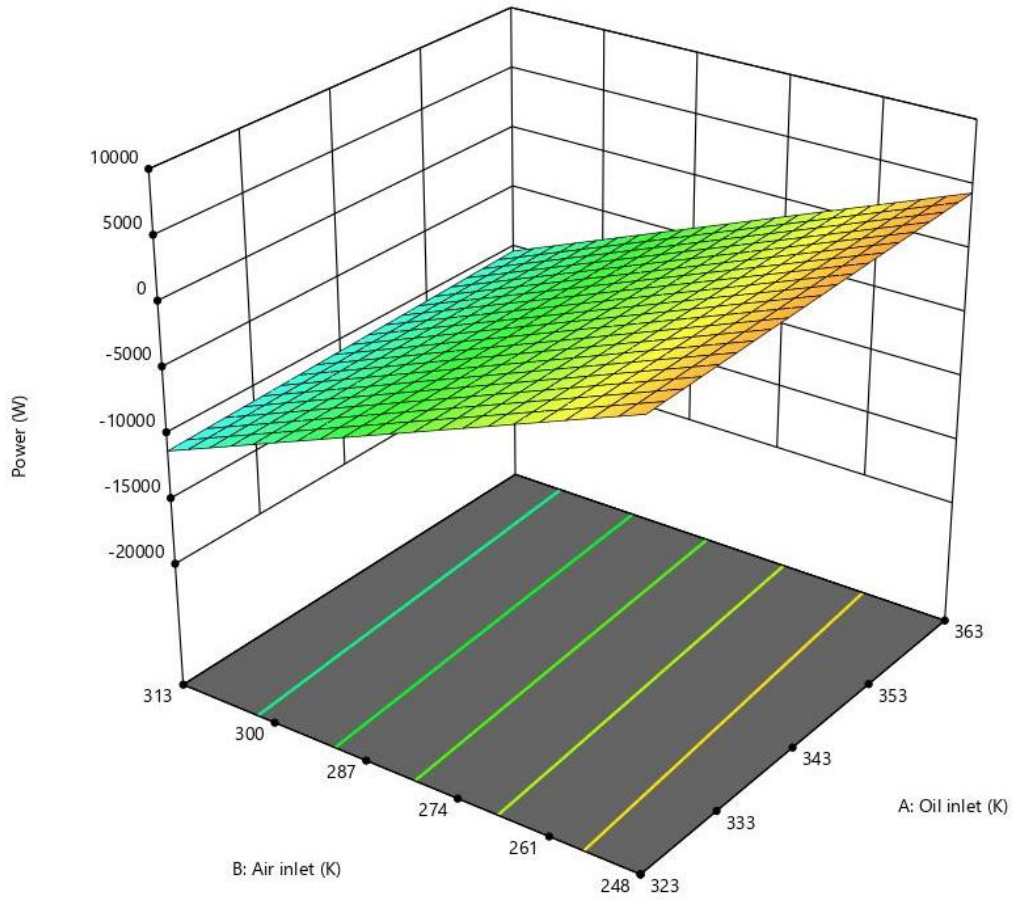
Şekil 4.53: DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-3

DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının değişmesiyle birlikte yağ kütle akışının yaklaşık lineer ve pozitif yönde değiştiği görülmüştür. Bu değişim hava giriş sıcaklığının azalmasıyla yağ kütle akışının artması, yağ giriş sıcaklığının artmasıyla da yağ kütle akışının artması şeklinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.54: DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-4

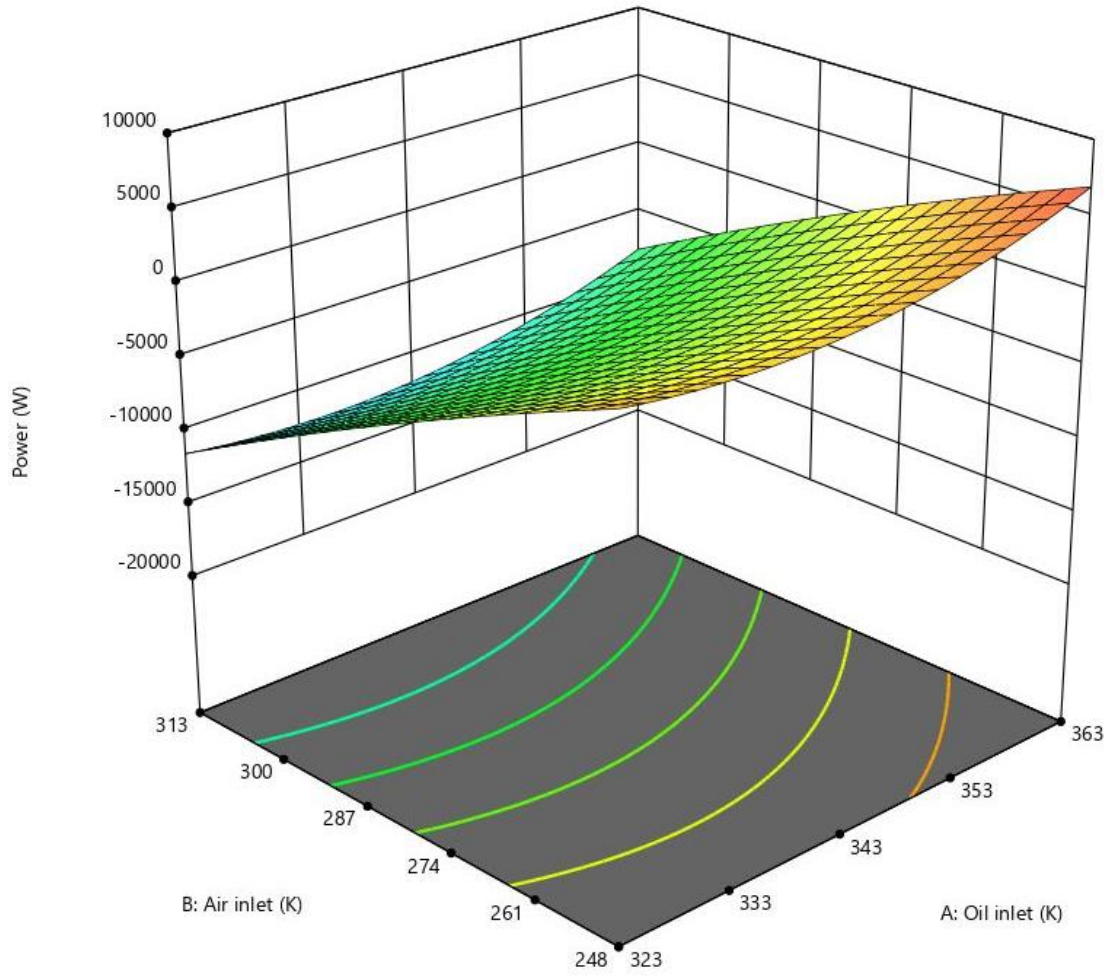
DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça entalpi değerinin yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının entalpi üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.55: DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için 3D surface sonuçları-5

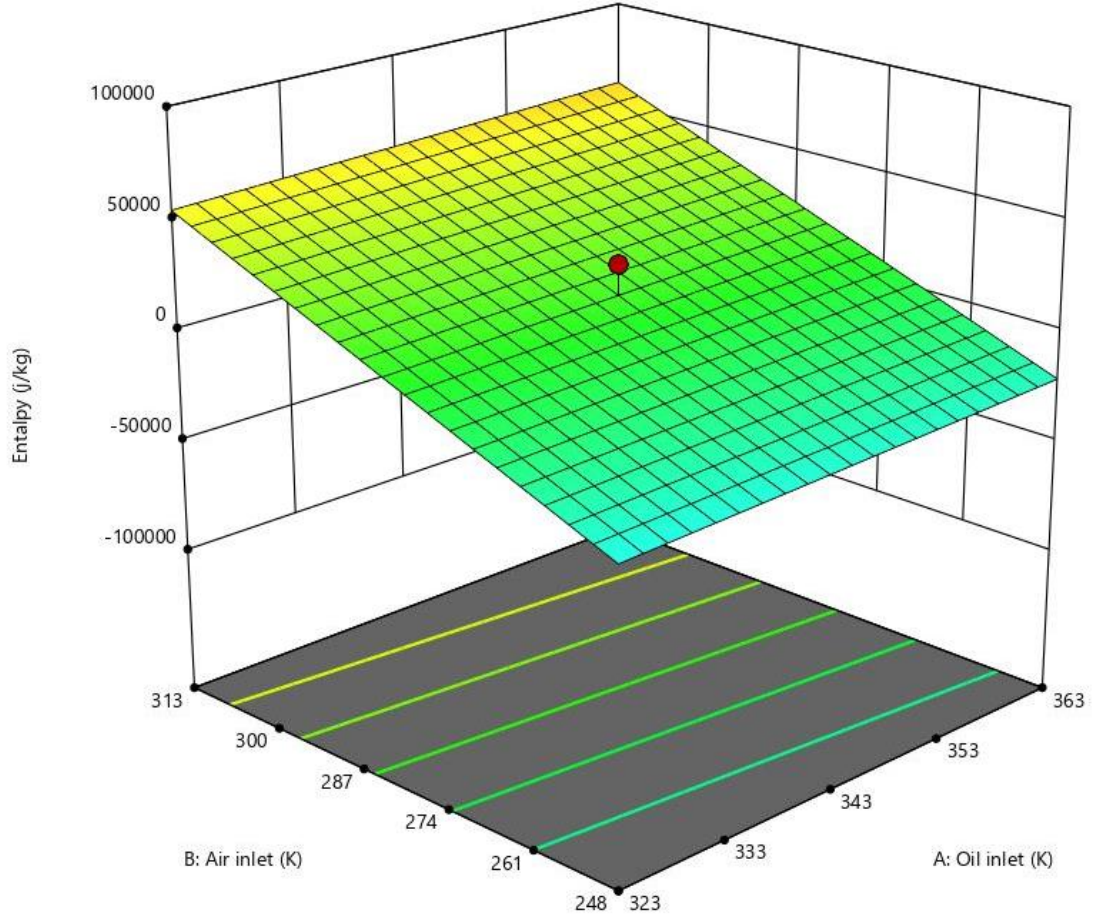
DEBTY ile carbon steel 1010 malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve yağ çıkış sıcaklıklarındaki artışla birlikte güç değerinin yaklaşık lineer bir eğilimle değiştiği görülmektedir. Yüzey eğiminin özellikle hava giriş doğrultusunda daha belirgin olması, gücün hava giriş sıcaklığına daha duyarlı olduğunu, buna karşılık yağ giriş sıcaklığının etkisinin görece daha sınırlı kaldığını göstermektedir.

4.7.4 DEBTY ile 316L malzeme için RSM sonuçları



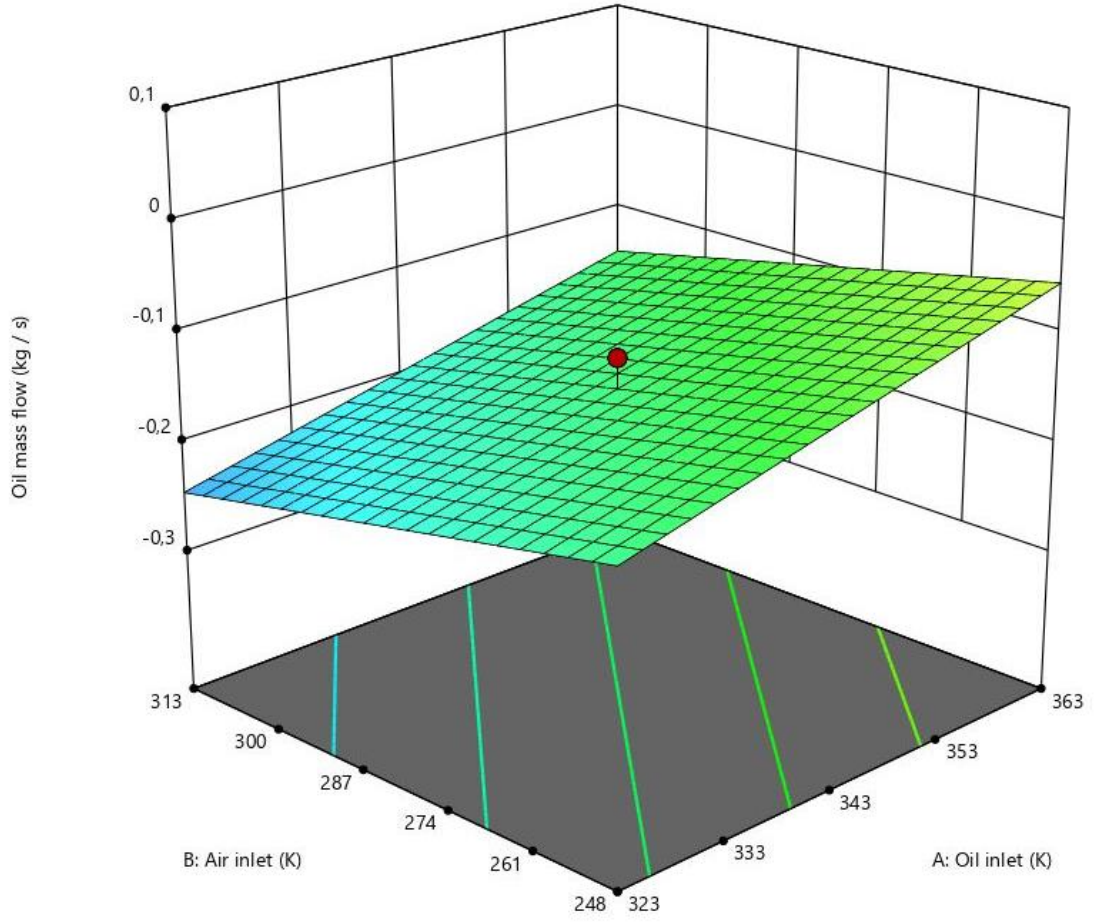
Şekil 4.56: DEBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-1

DEBTY ile 316L malzemesi için elde edilen yüzey grafiği, güç çıktısının yağ ve hava giriş sıcaklıklarına bağlı olarak eğrisel bir değişim sergilediğini, özellikle 340–343 K yağ giriş sıcaklığı ile 360–363 K hava giriş sıcaklığı aralığında minimum değerlere, 310–320 K hava giriş sıcaklığı ile 330–340 K yağ giriş sıcaklığı aralığında ise maksimum değerlere ulaştığını göstermektedir.



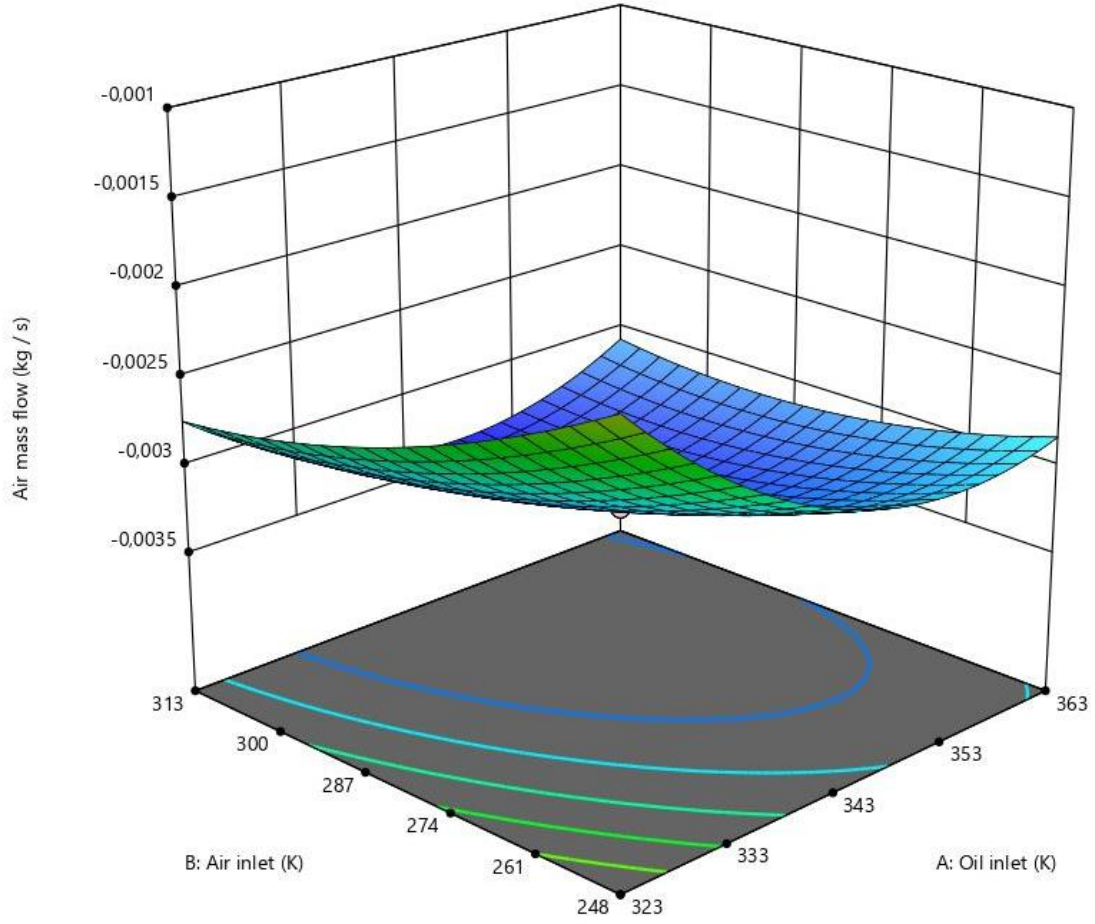
Şekil 4.57: DEBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-2

DEBTY ile 316L malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça entalpi değerinin yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının entalpi üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



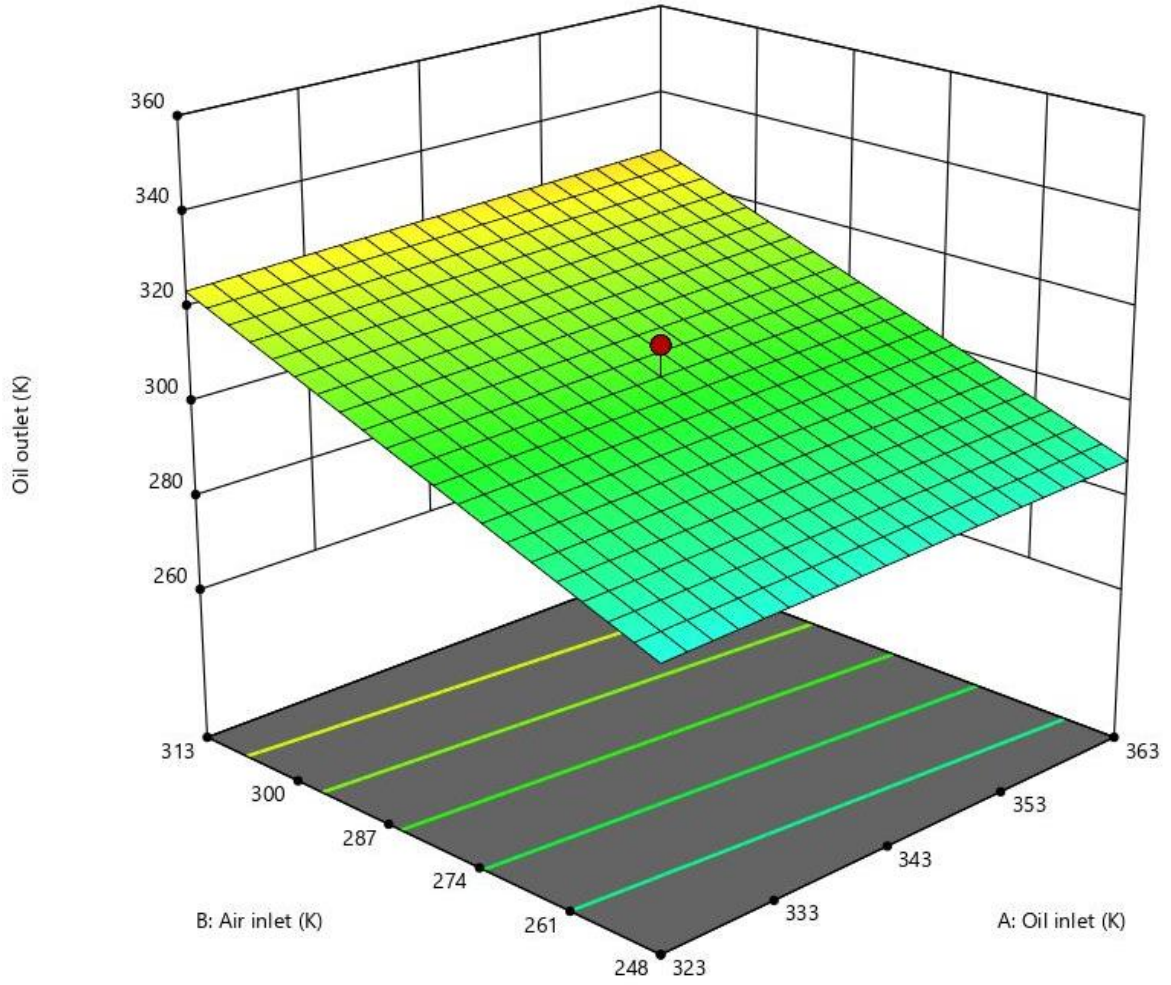
Şekil 4.58: DEBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-3

DEBTY ile 316L malzeme için elde edilen yüzey grafiğine göre, yağ giriş ve hava giriş sıcaklıklarının değişmesiyle birlikte yağ kütle akışının yaklaşık lineer ve pozitif yönde değiştiği görülmüştür. Bu değişim hava giriş sıcaklığının azalmasıyla yağ kütle akışının artması, yağ giriş sıcaklığının artmasıyla da yağ kütle akışının artması şeklinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.59: DEBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-4

DEBTY ile 316L malzemesi için elde edilen yüzey grafiği, hava kütle debisinin yağ ve hava giriş sıcaklıklarına bağlı olarak eğrisel bir değişim sergilediğini, özellikle 360 K civarı yağ giriş sıcaklığı ile 310–313 K hava giriş sıcaklığı aralığında minimum değerlere, 250–260 K hava giriş sıcaklığı ile 340–350 K yağ giriş sıcaklığı aralığında ise maksimum değerlere ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4.60: DEBTY ile 316L malzeme için 3D surface sonuçları-5

DEBTY ile 316L malzeme için yüzey grafiği incelendiğinde, yağ ve hava giriş sıcaklıkları arttıkça yağ çıkış sıcaklığının yaklaşık lineer ve pozitif yönde arttığı görülmekte, ancak yağ giriş sıcaklığının yağ çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisinin görece daha sınırlı olduğu ve değişimin daha çok hava giriş sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Analiz sonuçları, tüm yağlar için soğutma performansının önemli ölçüde kullanılan malzemeye bağlı olduğunu göstermiştir. Seçilen malzemeler arasında AISI 316, en düşük yağ çıkış sıcaklığı ve en yüksek ısı transfer performansına sahipken, Carbon Steel 1010 en yüksek yağ çıkış sıcaklığı ve en düşük ısı transfer performansına sahiptir.

S235J, S355J ve Carbon Steel 1010 malzemeleri ise birbirine oldukça yakın ve dengeli sonuçlar vermiştir. Aynı yağ koşulunda AISI 316 malzemesi, en düşük yağ çıkış sıcaklık değerlerini sağlayarak en iyi ısı transfer performansını göstermiştir.

Paslanmaz olmayan çelikleri kendi aralarında karşılaştırmak gerekirse; S235J ve S355J malzemeleri, ısı transfer performansı açısından birbirine çok yakın sonuçlar vermiş ve orta seviyede bir soğutma performansı sergilemiştir. Carbon Steel 1010, diğer çeliklere kıyasla daha yüksek yağ çıkış sıcaklığı değerlerine sahip olmuş ve ısı transfer performansı daha düşük seviyede kalmıştır.

Sac kalınlığı artışı tüm yağ türlerinde yağ çıkış sıcaklık değerlerini artırırken, bu etkinin mineral trafo yağında daha belirgin, Naftanik bazlı transformatör yağında ise daha sınırlı olduğu belirlenmiştir. İnce sac kalınlıklarının tüm yağ türleri için daha etkin bir soğutma sağlamıştır.

Naftanik bazlı transformatör yağı, en düşük maksimum sıcaklık değerlerini sağlayarak en yüksek soğutma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir.

Mineral trafo yağı, diğer yağlara kıyasla daha yüksek maksimum sıcaklık değerlerine sahip olmuş ve soğutma kapasitesi açısından en kötü performansı sergilemiştir.

Yağ çıkış sıcaklığı bakımından en iyi soğutmayı sağlayan yağların genel sıralaması şu şekilde elde edilmiştir: Doğal ester bazlı transformatör yağı>Naftanik bazlı transformatör yağı>Mineral bazlı transformatör yağı.

Yağ çıkış sıcaklığı ve entalpi değerlerinin genel olarak hava sıcaklığına bağlı olarak değiştiği, buna karşılık yağ giriş sıcaklığındaki değişimin yağ çıkış sıcaklığı ve entalpi üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığı belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçların doğrulanabilmesi ve modelin gerçek çalışma koşullarındaki performansının değerlendirilebilmesi için ölçümlerin üretimi tamamlanmış bir trafo üzerinde de yapılması tavsiye edilmektedir.

Bu tez çalışmasında analizler zaman kaybını önlemek amacıyla indirgenmiş 3D data üzerinden gerçekleştirilmiş olup, gelecekte yapılacak çalışmalarda gerçeğe daha yakın ve detaylı bir 3D data kullanılarak daha uzun süreli analizlerin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Radyatör sac malzemesi ST12 olmasına rağmen, analiz programında ST12 malzeme tanımlı olmadığı ve ST12 malzemeye ait teknik özelliklere ulaşamadığı için, bu malzemeye özellikleri en yakın malzeme olan Carbon Steel 1010 seçilmiştir. Daha hassas sonuçlar için ST12 malzemeye ait gerçek mekanik ve termal özelliklerin analiz programına tanıtılması önerilmektedir.

Bu çalışmada analizlerde kullanılan yağın termal özellikleri yaklaşık 25 °C'deki değerler esas alınarak tanımlanmıştır. Ancak yağın fiziksel ve termal özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden, ilerleyen çalışmalarda sıcaklığa bağlı değişken yağ özellikleri tanımlanarak analizlerin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- [1] **Sezer, M.** (2014). Yalıtım ve trafo yağı, Dora Yayıncılık.
- [2] <https://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik-trafolari/yagli-tip-trafo-1901/> (Erişim tarihi: 10 Ocak 2026)
- [3] <https://elektrikmen.com/3-fazli-trafo/> (Erişim tarihi: 10 Ocak 2026)
- [4] **AREVA T&D.** (2008). *Power transformers: Vol. 1 fundamentals*. AREVA.
- [5] **Kim,M., Cho,S., Kim,J.** (2012). *Prediction and evaluation of the cooling performance of radiators used in oil-filled power transformer applications with non-direct and direct-oil-forced flow*, Experimental Thermal and Fluid Science 44 (2013) 392–397, Gyeonggi-do 431-080.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.07.011> (Erişim tarihi: 10 Ocak 2026)
- [6] **Ma,B., Hu,R., Wang,Y., Cheng,Y.** (2024). *A study on the optimization of cooling performance for oil-immersed transformers in high temperature environments utilizing response surface methodology*, Case Studies in Thermal Engineering 63 (2024) 105353.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105353> (Erişim tarihi: 10 Ocak 2026)
- [7] **Tören, M.** (2022). Yağlı tip transformatörlerde hibrit bir soğutma sistem tasarımının FEM ve CFD analizleri” NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / *NOHU J. Eng. Sci.* 11(3), 611-619
<https://doi.org/10.28948/ngumuh.1122317> (Erişim tarihi: 10 Ocak 2026)
- [8] **Anishek,S., Sony,R., Kumar,J., Kamath,P.** (2015). *Performance Analysis and Optimisation of an Oil Natural Air Natural Power Transformer Radiator*.
<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.059> (Erişim tarihi: 10 Ocak 2026)
- [9] **Altay, R.** (2018) *Kabinli kuru tip transformatörlerde soğuma sürecinin cfd analizi ve deneysel çalışmalar ile incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [10] **Kaymaz,Ö., Kalkan,G., Başaran,T., Erek,A.** (2015). *Bir Dilim Transformatör Radyatöründe Akış ve Isı Transferinin Farklı Yağ Tipleri Kullanılarak İncelenmesi*, Mühendis ve Makine, Cilt:56, Sayı:666.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [11] **Koca,A., Senturk,O., Çolak,A., Bacak,A., Dalkilic,A.** (2024). Artificial neural network-based cooling capacity estimation of various radiator configurations for power transformers operated in ONAN mode, *Thermal Science and Engineering Progress* 50 (2024) 102515.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102515>
- [12] **ANSYS Inc.**, *ANSYS Fluent Theory Guide*, Release 2023 R2, Canonsburg, PA, USA, 2023.
- [13] <https://innovationspace.ansys.com/courses/courses/natural-convection/lessons/simulation-examples-homework-and-quiz/topic/two-stream-natural-convection-in-a-panel-radiator-simulation-example/> (Erişim tarihi: 10 Ocak 2026)
- [14] <https://akgunradiator.com.tr/trafo-radyatoru/> (Erişim tarihi: 10 Ocak 2026)
- [15] **International Electrotechnical Commission** (2011). *IEC 60076-1: Power transformers – Part 1: General*, Geneva, Switzerland,
- [16] **Dean,A., Voss,D., Draguljić,D., Dean,A., Voss,D., and Draguljić,D.** (2017). Response surface methodology, *Des. Anal. Exp.*, pp. 565–614.
- [17] **Danmaliki,G., Saleh,T., Shamsuddeen,A.** (2017). Response surface methodology optimization of adsorptive desulfurization on nickel/activated carbon, *Chemical Engineering Journal* 313 (2017) 993–1003.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.141> (Erişim tarihi: 10 Ocak 2026)
- [18] **Khuri,A., Mukhopadhyay,S.** (2010). Response surface methodology, 2 128–149
<https://doi.org/10.1002/wics.73> (Erişim tarihi: 10 Ocak 2026)
- [19] Stat-Ease Inc., *Design-Expert® Software*, Version 13, Minneapolis, MN, USA, 2021.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Zeki GÜNDÜZ

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği YL	2026
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği	2007
Lise	Balıkesir Merkez Teknik Lise/Makine Bölümü	1999