



**ORGANİK RANKINE ÇEVİRİMİ KULLANILARAK
TRANSFORMATÖRDE ATIK ISININ GERİ KAZANIMI**

Ahmet Barış TÜRKER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet Barış TÜRKER

27/07/2022

ORGANİK RANKINE ÇEVİRİMİ KULLANILARAK TRANSFORMATÖRDE
ATIK ISININ GERİ KAZANIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet Barış TÜRKER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2022

ÖZET

Modern yaşamın vazgeçilmezlerinden biri olan enerji, istikrarlı ekonomik kalkınma için çok önemli bir konudur ve giderek karmaşıklaşan yapısı nedeniyle planlama gerektirmektedir. Artan nüfusa ek olarak sanayi alanındaki büyük gelişmeler ve değişimler ile dünyada enerji tüketimi daha önce hiç ulaşılmamış seviyelere yükselmiştir. Buna bağlı olarak, alternatif enerji üretim yöntemlerinin tespiti günümüzde hayati önem taşımaktadır. Atık ısının geri kazanımı da bu yöntemlerden bir tanesidir. Endüstride kullanılan çoğu yapı gibi transformatörlerde de meydana gelen bir atık ısı mevcuttur. Bu tez kapsamında, düşük sıcaklıklı kaynaklardan atık ısı geri kazanımı uygulamaları içerisinde en yaygın olarak kullanılan yöntem olan Organik Rankine Çevrimi kullanılarak güç transformatörlerinde oluşan atık ısının geri kazanımı incelenmiştir. Ankara ilinde bulunan bir trafo merkezinin yıllık çalışma verileri kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır. 62,5 MVA, 100 MVA ve 250 MVA gücündeki güç transformatörleri ele alınmıştır. Ankara ilinin yıllık sıcaklık değerleri ile transformatör yıllık çalışma verileri birleştirilerek hesaplamalar yapılarak, transformatörlerde atık ısı geri kazanımının termodinamik ve termo-ekonomik analizleri yapılmış ve sistemin uygulanabilirliği incelenmiştir. İncelenen sistemlerde organik akışkan olarak R134a, R245fa ve R123 akışkanları kullanılmıştır. Tezin konusu olan atık ısı geri kazanımı, fosil yakıtların tüketiminin azalmasına önemli katkıda bulunacak ve enerjinin verimli kullanılmasını sağlayacaktır.

Bilim Kodu : 91408
Anahtar Kelimeler : Organik Rankine Çevrimi, Atık Isı Geri Kazanımı, Enerji Ekonomisi, Güç Transformatörleri
Sayfa Adedi : 115
Danışman : Doç. Dr. Tolga PIRASACI

WASTE HEAT RECOVERY OF TRANSFORMERS BY USING
ORGANIC RANKINE CYCLE

(M.Sc. Thesis)

Ahmet Barış TÜRKER

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2022

ABSTRACT

Energy, one of the indispensables of modern life, is a very important issue for stable economic development and requires planning due to its increasingly complex structure. In addition to the increasing population, the energy consumption in the world has increased to levels that have never been reached before, with the great developments and changes in the industry. Accordingly, the determination of alternative energy production methods is so important today. Waste heat recovery is one of these methods. Like most structures used in industry, there is generated waste heat in transformers. Within the scope of this thesis, the recovery of waste heat generated in power transformers was investigated by using the Organic Rankine Cycle, which is the most widely used method among waste heat recovery applications from low temperature sources. Evaluations were made by using the annual operating data of a transformer substation in Ankara. 62,5 MVA, 100 MVA and 250 MVA power transformers were considered. Calculations were made by combining the annual temperature values of Ankara with the annual operating data of the transformers. Thermodynamic and thermo-economic analyzes of waste heat recovery in transformers were made and the feasibility of the system was examined. R134a, R245fa and R123 fluids were used as organic fluids in the examined systems. Waste heat recovery, which is the subject of the thesis, will contribute to the reduction of fossil fuel consumption and ensure efficient use of energy.

Science Code : 91408

Key Words : Organic Rankine Cycle, Waste Heat Recovery, Energy Economy,
Power Transformers

Page Number : 115

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tolga PIRASACI

TEŞEKKÜR

Sayın danışman hocam Doç. Dr. Tolga PIRASACI'ya sorularıma ve sorunlarıma gösterdiği olumlu yaklaşımı, eşsiz bilgisi ve hoşgörüsü ile beni yönlendirdiği, mesleki gelişimime katkıda bulunduğu ve bu süreçte yanımda olduğu için, bu sürece girmem için sonsuz şekilde göstermiş olduğu destek ve bu süreç boyunca bana hissettirdiği sevgisi, güveni ve varlığı için aileme, tez çalışması süresi boyunca her zaman destek olan ve fikir veren arkadaşlarıma emekleri için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. TRANSFORMATÖRLERDE ATIK ISI	15
3.1. Güç Transformatörleri.....	17
3.1.1. Transformatörlerde kayıplar.....	18
3.1.2. Transformatörlerde verim	20
3.1.3. Transformatörlerde soğutma	20
4. ORGANİK RANKINE ÇEVİRİMİ İLE ATIK ISI GERİ KAZANIMI...	27
4.1. Rankine Çevrimi	27
4.1.1. İdeal Rankine çevrimi	27
4.1.2. Gerçek buhar çevrimi.....	31
4.2. Organik Rankine Çevrimi	32
4.2.1. Organik Rankine Çevriminin bileşenleri	34
4.2.2. Çalışma akışkanı	35
5. YÖNTEM.....	37
5.1. Güç Verilerinin Eldesi.....	37
5.2. Atık Isıların Temini.....	37

	Sayfa
5.3. Termodinamik Tasarım	38
5.3.1. Isı değiştirici tasarımı	44
5.4. Termo-ekonomik analizler	46
5.4.1. Net Bugünkü Değer (NBD) yöntemi	48
6. BULGULAR VE YORUMLAR	49
7. SONUÇLAR VE TARTIşMA	89
KAYNAKLAR	91
EKLER.....	95
EK-1. 100 MVA Transformatörüne ait sıcaklık artış deneyi sonuçları	96
EK-2. ONAN soğutma diyagramı	106
EK-3. ONAF soğutma diyagramı	107
EK-4. OFAF soğutma diyagramı	108
EK-5. ODAF soğutma diyagramı	109
EK-6. Yıllık kütleel debi değerleri (kg/s)	110
ÖZGEÇMİş	115

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Tez kapsamında ele alınan akışkanlar	39
Çizelge 6.1. Transformatörlerdeki atık ısı miktarı	52
Çizelge 6.2. Sistem bileşenlerinin giriş-çıkış sıcaklık değerleri.....	56
Çizelge 6.3. 0°C ve R134a için çevrimin entalpi değerleri	64
Çizelge 6.4. Yıllık toplam elektrik üretim miktarı	76
Çizelge 6.5. Isı değıştiricilerin toplam ısı transfer katsayısı	77
Çizelge 6.6. Transformatörler için $\dot{Q}$ değerleri	77
Çizelge 6.7. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu alanları.....	79
Çizelge 6.8. 62,5 MVA için bileşen kapasiteleri (Y)	79
Çizelge 6.9. 100 MVA için bileşen kapasiteleri (Y)	80
Çizelge 6.10. 250 MVA için bileşen kapasiteleri (Y)	80
Çizelge 6.11. Bileşen maliyet parametreleri.....	80
Çizelge 6.12. Toplam maliyet (\$).....	81
Çizelge 6.13. 62,5 MVA için NBD hesapları.....	87
Çizelge 6.14. 100 MVA için NBD hesapları.....	88
Çizelge 6.15. 250 MVA için NBD hesapları.....	88

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1.	Dünyada birincil enerji tüketiminin kaynaklar bazında dağılımı	2
Şekil 1.2.	Türkiye’de birincil enerji tüketiminin kaynaklar bazında dağılımı	2
Şekil 2.1.	Atık ısı geri kazanımı yöntemleri	5
Şekil 3.1.	Faraday transformatörü.....	16
Şekil 3.2.	280 MVA 245 kV güç transformatörü.....	18
Şekil 3.3.	Transformatörde kayıplar	19
Şekil 3.4.	Soğutma ekipmanlarıyla örnek güç transformatörü	21
Şekil 3.5.	ONAN Soğutma.....	22
Şekil 3.6.	ONAF soğutma.....	23
Şekil 3.7.	OFAF soğutma.....	24
Şekil 3.8.	ODAF soğutma	25
Şekil 4.1.	Basit ideal Rankine çevrimi	28
Şekil 4.2.	Rankine çevrimi T-s diyagramı	29
Şekil 4.3.	Gerçek buhar çevrimi T-s diyagramı	31
Şekil 4.4.	Pompa ve türbin tersinmezlikleri.....	32
Şekil 4.5.	Atık ısı kaynaklı Organik Rankine Çevrimi	33
Şekil 5.1.	Transformatör atık ısısı kaynaklı ORÇ sistemi	38
Şekil 5.2.	R245fa Basınç-Entalpi diyagramı.....	40
Şekil 5.3.	R134a Basınç-Entalpi diyagramı	41
Şekil 5.4.	R123 Basınç-Entalpi diyagramı.....	41
Şekil 5.5.	Gövde borulu ısı değiştirici yapısı	44
Şekil 6.1.	62,5 MVA yıllık güç değerleri (MVA).....	49
Şekil 6.2.	100 MVA yıllık güç değerleri (MVA).....	50
Şekil 6.3.	250 MVA yıllık güç değerleri (MVA).....	51
Şekil 6.4.	62,5 MVA yıllık atık ısı miktarı-saatlik (kW)	52

Şekil		Sayfa
Şekil 6.5.	100 MVA yıllık atık ısı miktarı-saatlik (kW)	53
Şekil 6.6.	250 MVA yıllık atık ısı miktarı-saatlik (kW)	54
Şekil 6.7	Ankara ili yıllık sıcaklık dağılımı	55
Şekil 6.8.	Numaralandırılmış ORÇ sistem tasarımı	56
Şekil 6.9.	R245fa için yoğuşturucu basınç eğrisi	57
Şekil 6.10.	R134a için yoğuşturucu basınç eğrisi	58
Şekil 6.11.	R123 için yoğuşturucu basınç eğrisi	58
Şekil 6.12.	R245fa Basınç-Entalpi diyagramı	59
Şekil 6.13.	R134a Basınç-Entalpi diyagramı	60
Şekil 6.14.	R123 Basınç-Entalpi diyagramı	60
Şekil 6.15.	R245fa için h_1 eğrisi	61
Şekil 6.16.	R134a için h_1 eğrisi	61
Şekil 6.17.	R123 için h_1 eğrisi	62
Şekil 6.18.	R245fa v_1 eğrisi	62
Şekil 6.19.	R134a v_1 eğrisi	63
Şekil 6.20.	R123 v_1 eğrisi	63
Şekil 6.21.	R245fa çevrim yıllık verim grafiği	65
Şekil 6.22.	R134a çevrim yıllık verim grafiği	65
Şekil 6.23.	R123 çevrim yıllık verim grafiği	66
Şekil 6.24.	62,5 MVA R245fa yıllık $Q_{yoğ,ç}$ grafiği	67
Şekil 6.25.	100 MVA R245fa yıllık $Q_{yoğ,ç}$ grafiği	67
Şekil 6.26.	250 MVA R245fa yıllık $Q_{yoğ,ç}$ grafiği	68
Şekil 6.27.	62,5 MVA R134a yıllık $Q_{yoğ,ç}$ grafiği	68
Şekil 6.28.	100 MVA R134a yıllık $Q_{yoğ,ç}$ grafiği	69
Şekil 6.29.	250 MVA R134a yıllık $Q_{yoğ,ç}$ grafiği	69
Şekil 6.30.	62,5 MVA R123 yıllık $Q_{yoğ,ç}$ grafiği	70

Şekil	Sayfa
Şekil 6.31. 100 MVA R123 yıllık $Q_{yoğ,ç}$ grafiği	70
Şekil 6.32. 250 MVA R123 yıllık $Q_{yoğ,ç}$ grafiği	71
Şekil 6.33. 62,5 MVA R245fa yıllık $W_{türbin,ç}$ grafiği	72
Şekil 6.34. 100 MVA R245fa yıllık $W_{türbin,ç}$ grafiği	72
Şekil 6.35. 250 MVA R245fa yıllık $W_{türbin,ç}$ grafiği	73
Şekil 6.36. 62,5 MVA R134a yıllık $W_{türbin,ç}$ grafiği	73
Şekil 6.37. 100 MVA R134a yıllık $W_{türbin,ç}$ grafiği	74
Şekil 6.38. 250 MVA R134a yıllık $W_{türbin,ç}$ grafiği	74
Şekil 6.39. 62,5 MVA R123 yıllık $W_{türbin,ç}$ grafiği	75
Şekil 6.40. 100 MVA R123 yıllık $W_{türbin,ç}$ grafiği	75
Şekil 6.41. 250 MVA R123 yıllık $W_{türbin,ç}$ grafiği	76
Şekil 6.42. 62,5 MVA / R134a maliyet dağılımı	81
Şekil 6.43. 100 MVA / R134a maliyet dağılımı	82
Şekil 6.44. 250 MVA / R134a maliyet dağılımı	82
Şekil 6.45. 62,5 MVA / R245fa maliyet dağılımı.....	83
Şekil 6.46. 100 MVA / R245fa maliyet dağılımı.....	84
Şekil 6.47. 250 MVA / R245fa maliyet dağılımı.....	84
Şekil 6.48. 62,5 MVA / R123 maliyet dağılımı.....	85
Şekil 6.49. 100 MVA / R123 maliyet dağılımı.....	86
Şekil 6.50. 250 MVA / R123 maliyet dağılımı.....	86

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
h	Entalpi (kJ/kg)
i	Faiz oranı (-)
m	Kütle (kg)
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
N	Toplam dönem sayısı (-)
P	Basınç (MPa)
P_{buh}	Buharlaştırıcı basıncı (MPa)
P_{ϕ}	Transformatör çıkış gücü (MVA)
P_g	Transformatör giriş gücü (MVA)
P_T	Toplam kayıp (kW)
$P_{yoğ}$	Yoğuşturucu basıncı (MPa)
$\dot{Q}$	Isı akısı (kW)
$\dot{Q}_{buh,g}$	Buharlaştırıcıya verilen ısı akısı (kW)
$\dot{Q}_{yoğ,\phi}$	Yoğuşturucudan atılan ısı akısı (kW)
R_t	Net para akımı (\$)
s	Entropi (kJ/kg.K)
T	Sıcaklık (°C)
t	Dönem sıra numarası (-)
v	Özgöl hacim (m ³ /kg)
$\dot{W}$	İş akısı (kW)
$\dot{W}_{türbin,\phi}$	Türbinde yapılan iş akısı (kW)
x	Buhar kalitesi (-)
ΔT_{lm}	Logaritmik Sıcaklık Farkı (K)
η	Verim (-)

Kısaltmalar**Açıklamalar****AC**

Alternating current

EES

Engineering Equation Solver

IEC

International Electrotechnical Commission

IEEE

Institute of Electrical and Electronics Engineers

LMTD

Logarithmic Mean Temperature Difference

MVA

Megavolt-ampere

NBD

Net Bugünkü Değer

ORÇ

Organik Rankine Çevrimi

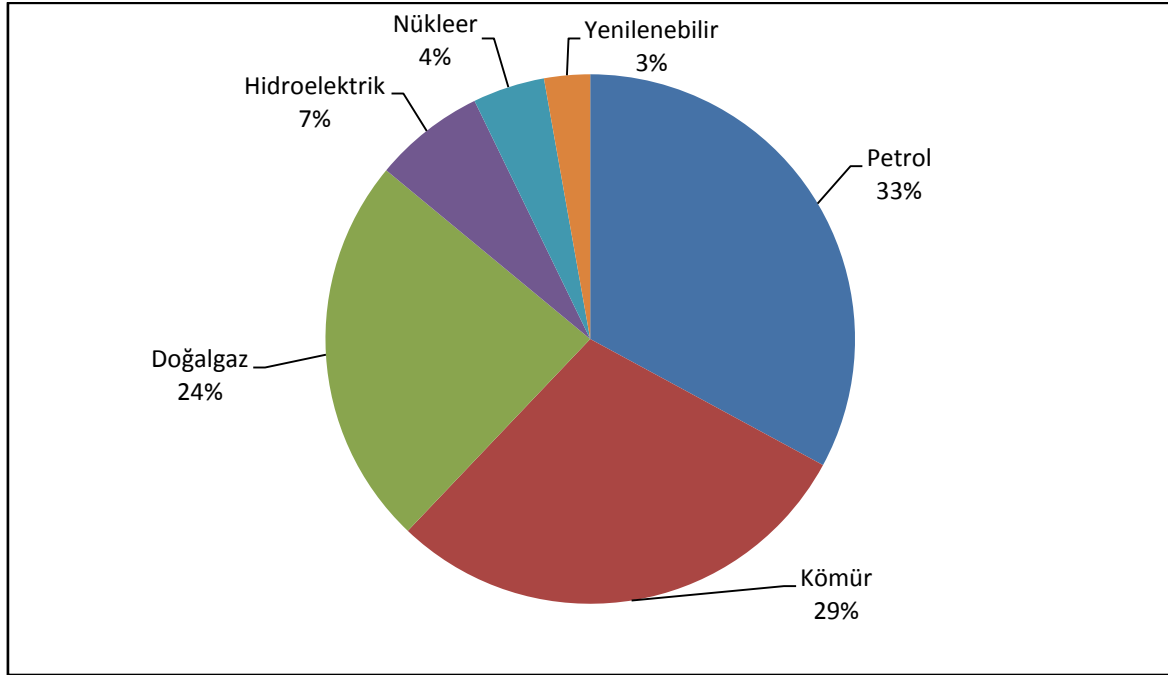
TEİAŞ

Türkiye Elektrik İletim A.Ş.

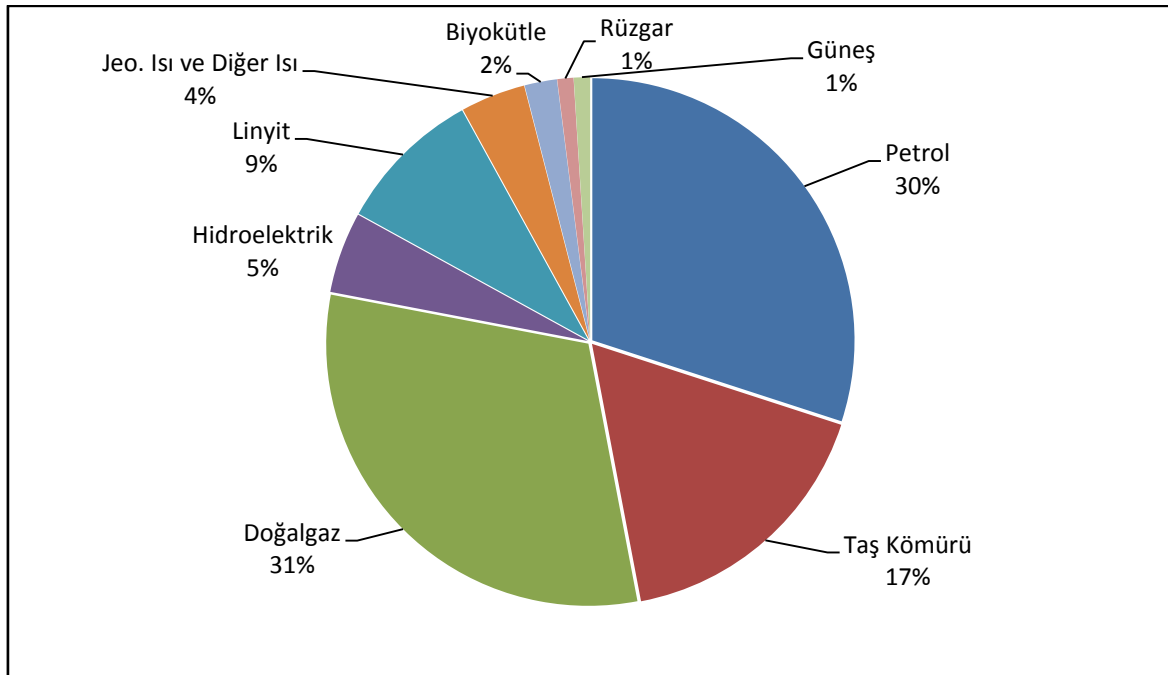
1. GİRİŞ

Modern yaşamın vazgeçilmezlerinden biri olan enerji, istikrarlı ekonomik kalkınma için önemli bir konudur ve giderek karmaşıklaşan yapısı nedeniyle planlama gerektirmektedir. Nüfus artışı, kentsel gelişim ve sanayileşme nedeniyle enerji tüketimi dünya çapında artmaktadır. 2040 yılına kadar dünya nüfusunun, 9 milyara ulaşması bekleniyor. Aynı şekilde, dünya ekonomisinin de önümüzdeki 20 yılda yaklaşık %3 oranında büyümesi bekleniyor. Bu durum, daha fazla insana enerji arzı sağlamanın gerekliliğini vurgulamaktadır [1].

Geride bıraktığımız birkaç yıl, dünyada hızlı artan enerji tüketimine tanık olmuştur. Artan nüfusa ek olarak sanayi alanındaki büyük gelişmeler ve değişimler ile dünyada enerji tüketimi daha önce hiç ulaşılmamış seviyelere yükselmiştir. Yaşadığımız global ekonomik kriz, sahip olduğumuz tüm değerleri olabildiği kadar iyi kullanmamız gerektiğini bir kez daha ortaya çıkarmıştır. Dünyada kullanılan enerjinin çoğu birincil enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. 2016 yılı verilerine göre, dünyada tüketilen toplam birincil enerji 13.147 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olup tüketilen enerjinin kaynaklara göre dağılımı petrol (%32,9), kömür (%29,2), doğal gaz (%23,9), hidroelektrik (%6,8), nükleer (%4,4) ve yenilenebilir (%2,8) şeklinde sıralanmaktadır (Şekil 1.1). Dünyada toplam birincil enerji tüketiminin %86'sını petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtlar olarak adlandırılan yenilenemez enerji kaynakları oluşturmaktadır. Dünyada olduğu gibi Türkiye'de de kullanılan enerjinin çoğu birincil enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. 2016 yılı verilerine göre, Türkiye'de tüketilen toplam birincil enerji 129.27 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olarak gerçekleşmiş olup tüketilen enerjinin kaynaklara göre dağılımı petrol (%30), kömür (taş kömürü %17, linyit %9) doğal gaz (%31), hidroelektrik (hidrolik) (%5) ve yenilenebilir enerji kaynakları (%8) şeklinde sıralanmaktadır (Şekil 1.2). Türkiye'de toplam birincil enerji tüketiminin %87'si petrol, doğal gaz ve kömür gibi yenilenemez enerji kaynaklarından oluşmaktadır [2].



Şekil 1.1. Dünyada birincil enerji tüketiminin kaynaklar bazında dağılımı



Şekil 1.2. Türkiye’de birincil enerji tüketiminin kaynaklar bazında dağılımı

Fosil yakıtların kullanımı, büyük ölçüde enerji ihtiyacını karşılarken iklim değişikliği, buzulların erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi gibi birçok olumsuz etkiye yol açmıştır. Buna bağlı olarak, alternatif enerji üretim yöntemlerinin tespiti ve mevcut enerji üretim yöntemlerinin daha verimli kullanımına yönelik çalışmalar, günümüzde sürdürülen önemli

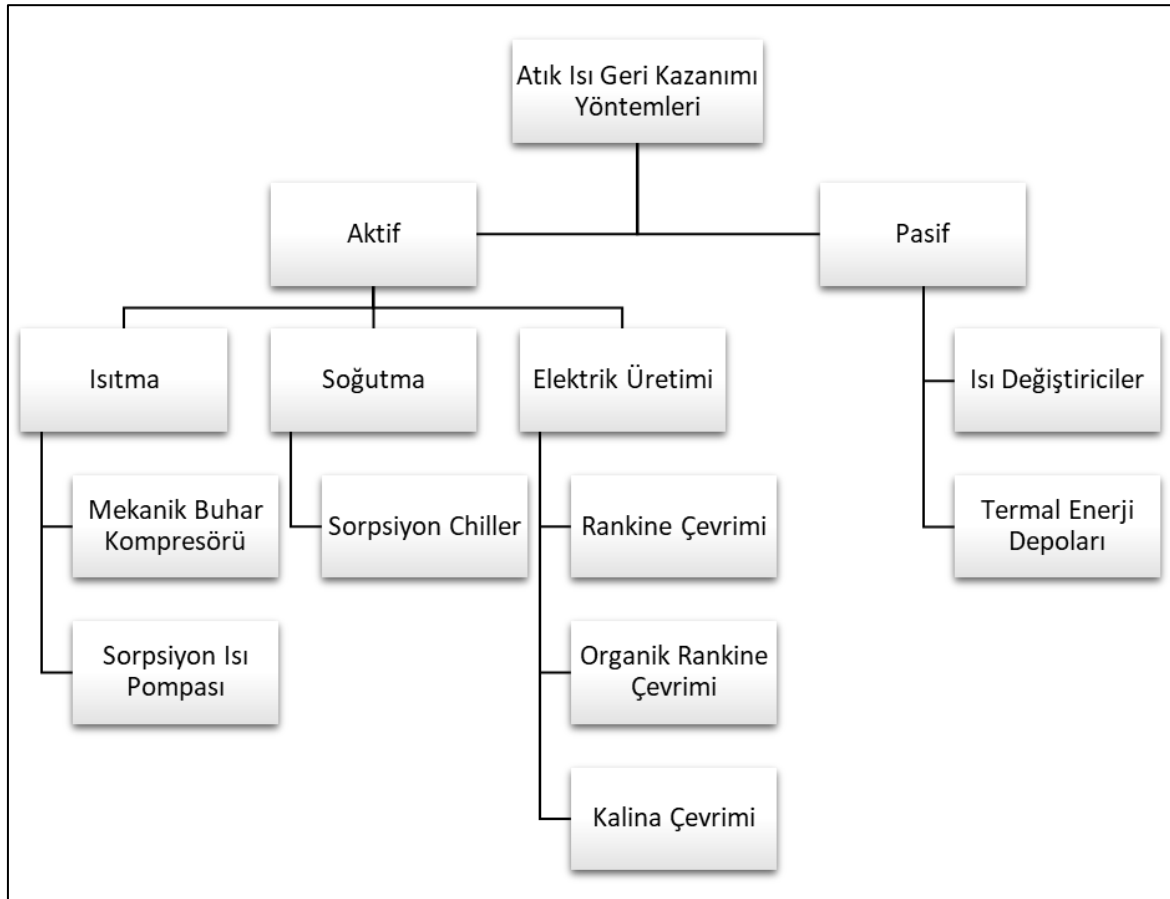
araştırmalardandır. Atık ısı geri kazanımı ise bu yöntemlerden bir tanesidir. Endüstriyel atık ısının geri kazanılması, enerji verimliliğinin artırılması açısından etkili bir yöntemdir. Enerji üretiminin ve enerji ekonomisinin çok fazla önem kazandığı günümüzde atık ısının geri kazanımı da çok fazla önem taşımaktadır.

Atık ısı işleyen makineler ve enerji kullanan işlemler sonucu zorunlu yan ürün olarak üretilir. Birçok sistemin yan ürünü olarak ısı çıkarma ihtiyacı, termodinamik kanunlarının temelidir. Endüstride kullanılan çoğu yapı gibi transformatörlerde de meydana gelen bir atık ısı mevcuttur. Transformatörler elektrik iletim hatlarında, sanayi tesislerinde, elektrik üretim merkezlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Transformatörler özel durumlar dışında (arıza, bakım vb.) sürekli çalışan bir yapıdır, bu nedenle sürekli atık ısı üretir. Çevreye salınarak atık olması yerine, bazen atık ısı başka bir işlemde kullanılabilir. Enerji verimliliğini sağlamaya yönelik çalışmalarda göz önünde bulundurulması gereken en önemli unsurlardan biri prosesler sonucunda ortaya çıkan atık ısıyı geri kazanmaktır. Yaygın olarak kullanılan ve sürekli çalışan bir yapı olan transformatörlerde oluşan bu atık ısının geri kazanımı da oldukça önemlidir.

Bu çalışmada öncelikle literatür taraması yapılmıştır. Literatürde Organik Rankine Çevrimi kullanılarak atık ısı geri kazanımı konusunda yapılan çalışmalara değinilmiştir (Bölüm 2). Sonrasında transformatörlerde oluşan atık ısı üretimi incelenmiştir. Transformatörler kısaca anlatılmıştır. Transformatörün tarihçesi ve transformatör türlerinden bahsedilmiştir. Transformatörün neden ısındığı, nasıl soğutulduğu konusunda bilgiler verilmiştir (Bölüm 3). Daha sonra, Organik Rankine Çevrimi ile atık ısı geri kazanım sistemleri ele alınmıştır. Organik Rankine Çevriminin nasıl çalıştığı, sistemin bileşenlerinin ne olduğu ve çevrimde kullanılan akışkanlar konusunda bilgiler verilmiştir. (Bölüm 4). Akabinde bu çalışmada izlenen yöntem anlatılmıştır. Süreçlerden bahsedilmiştir (Bölüm 5). Ardından, sistem tasarımı yapılarak termodinamik ve termo-ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Çevrimin termodinamik değerleri hesaplanmıştır. Bulgular değerlendirilmiştir. Farklı akışkanlar ve farklı transformatörler dikkate alınarak sistemin toplam maliyeti belirlenmiştir. Tasarlanan sistemler için NBD hesapları yapılmıştır. (Bölüm 6). Son olarak yapılan tasarım sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Ulaşılan NBD sonuçları ile hesaplanan toplam maliyetler karşılaştırılmıştır. Sistemin uygulanabilirliği yorumlanmıştır (Bölüm 7).

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde atık ısı geri kazanımı için farklı yöntemler bulunmaktadır. Endüstriyel kaynaklı atık ısıyı kullanacak teknolojiler pasif veya aktif teknolojiler olarak kategorize edilebilir. Bu, ısının doğrudan aynı veya daha düşük sıcaklık seviyesinde kullanılmasına veya başka bir enerji formuna mı yoksa daha yüksek bir sıcaklığa mı dönüştürüldüğüne bağlıdır. Isı değiştiriciler ve termal enerji depoları iki baskın pasif teknolojidir. Bu teknolojiler, diğer süreçleri ısıtma veya ön ısıtma için bir endüstride atık ısıyı geri dönüştürmek veya yeniden kullanmak için kullanılabilir. Sorpsiyon sistemleri, mekanik tahrikli ısı pompaları ve Organik Rankine Çevrimleri (ORC) aktif teknolojilerdir. Atık ısının aktif uygulamaları üçe ayrılır: ısıtma, soğutma veya elektrik üretimi. Bu yöntemler Şekil 2.1’de gösterilmiştir [3].



Şekil 2.1. Atık ısı geri kazanımı yöntemleri

Aktif çevrimler arasında bulunan Organik Rankine çevrimi (ORC), düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarının değerlendirilmesinde kullanılan bir buhar çevrimi çeşididir. Organik Rankine Çevrimi, düşük sıcaklıktaki atık ısının kullanımında özel avantajlara sahiptir.

Kullanılan çalışma sıvısı genellikle daha düşük kaynama noktasına sahip organiklerdir, daha düşük bir sıcaklıkta buharlaşabilir ve elektrik üretmek için türbine girebilir. Daha önce Organik Rankine Çevrimi ile atık ısının geri kazanımı konusunda farklı kaynaklar kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır.

Hettiarachchi ve diğerleri [4] yapmış olduğu çalışmada düşük sıcaklıklı jeotermal ısı kaynaklarından faydalanan Organik Rankine Çevrimi için en ideal tasarım kriterlerini incelemiştir. Amonyak, HCFC123, n-Pentan ve PF5050 iş akışkanlarının değerlendirilmesi yapılmıştır. İş akışkanının seçiminin maliyeti büyük ölçüde etkilediği, ancak uygun olmayan seçimlerde iki kattan daha fazla maliyete neden olacağı sonucuna varılmıştır. Ekserji analizi sonunda amonyak kullanılan çevrimin en düşük maliyette olduğu gözlemlenmiştir.

Liu ve diğerleri [5] yapmış olduğu çalışmada Organik Rankine Çevriminde kullanılan farklı çalışma akışkanlarının ısı verimliliği ve ısı geri kazanımı verimliliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. İçerisinde hidrojen bağları bulunan su, amonyak ve etanol gibi akışkanların yüksek buharlaşma entalpileri sebebiyle çevrime uygun olmadığı gözlemlenmiştir.

Wang ve diğerleri [6] yapmış olduğu çalışmada Organik Rankine Çevriminde kullanılan farklı çalışma akışkanlarının performanslarını incelemiştir. REFPROP programı kullanılarak Matlab'da termodinamik model oluşturulmuştur. 9 farklı akışkan kullanılmıştır. Sonuçlara göre, R11, R141b, R113 ve R123 diğer akışkanlara göre daha yüksek termodinamik performans göstermiştir. Çevresel etkiler incelendiğinde, R245fa ve R245ca akışkanlarının motor atık ısı geri kazanımı uygulamaları için en zararsız akışkanlar olduğu tespit edilmiştir.

Pulyaev ve diğerleri [7] yapmış olduğu çalışmada Bilkent Üniversitesi kampüsünde bulunan BilEnerji kombine çevrim santralinde ortaya çıkan atık ısıdan Organik Rankine Çevrimi kullanılarak elektrik enerjisi üretimini incelemişlerdir. Sistemin termodinamik analizi EBSILON Professional yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada R254fa akışkanı kullanılarak sub-kritik, R236fa akışkanı kullanılarak süper-kritik çevrim simülasyonları yapılmıştır. R245fa ve R236fa akışkanları için farklı türbin basınçları ve

yoğuşturucu sıcaklıkları için sistemin güç çıktıları belirlenmiştir. Süper-kritik çevrimin sub-kritik çevrime oranla %39 daha fazla güç üretebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Ergün ve diğerleri [8] yapmış olduğu çalışmada Organik Rankine Çevrimi ile düşük sıcaklıklı kaynaklardan elektrik üretimini incelemiştir. Organik Rankine Çevriminin çalışma prensibi, kullanım alanları konusunda bilgi verilmiştir. Çalışma sonucunda, ülkemizde kullanılabilecek Organik Rankine Çevrimi sistemleri hakkında önerilerde bulunulmuştur.

Calise ve diğerleri [9] yapmış olduğu çalışmada küçük bir Organik Rankine Çevrimi ile termal kolektörlerin birleşmesiyle oluşan, aynı anda elektrik enerjisi ve ısı enerjisi üreten 6kWe gücündeki bir güneş enerjisi santralinin dinamik simülasyon modelini oluşturmuşlardır. Organik Rankine Çevrimi simülasyonu için EES (Engineering Equation Solver) programı kullanılmıştır. Ayrıca, sistemin termo-ekonomik performansını maksimize edebilecek sistem/tasarım parametreleri kombinasyonunu belirlemek için analiz yapılmıştır. Fizibilite çalışmasında ise geri ödeme süresi sistem garantisi olması durumunda 5 yıl civarı olarak belirlenmiştir.

Cihan [10] yapmış olduğu çalışmada atık ısı kaynaklı çalışan Organik Rankine Çevrimi ile klasik buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin bir arada olduğu bir sistem modellemiş ve bu sistemi termodinamik açıdan incelemiştir. Kuru tip akışkan özelliği taşıdığı için R600, R600a ve R601 akışkanları seçilmiştir. Ek olarak bu akışkanlar ile çevrimde dünyada yaygın olarak kullanılan R245fa akışkanının karşılaştırılması da yapılmıştır. Termodinamik incelemeler sonucunda en uygun akışkanın R601 olduğu belirlenmiştir.

Kurbanoğlu [11] yapmış olduğu çalışmada demir çelik sektöründe tav fırınından atık ısının geri kazanımını incelemiştir. Çalışmada tolüen akışkanı kullanılmıştır. Sistemin tasarımında ve hesaplarında Excel ve EES (Engineering Equation Solver) programları kullanılmıştır, tasarım için enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda ORC sisteminin enerji verimi %21,76, ekserji verimi %46,02 olarak hesaplanmış ve sisteme giren ekserjinin %53,98'inin kaybolduğu gözlemlenmiştir. Baca gazı ile yaklaşık 370 kW iş üretilabileceği ve yılda yaklaşık 3470 MWh elektrik elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Sistemin geri ödeme süresi 5-6 yıl olarak belirlenmiştir.

Önal ve diğerleri [12] yapmış olduğu çalışmada EES (Engineering Equation Solver) programını kullanarak düşük sıcaklıklı endüstriyel atık akışkanlardan ısı geri kazanımı ile elektrik üretimini iki farklı çevrim üzerinde incelemişlerdir. Bunlar Basit Organik Rankine Çevrimi ve Rejeneratif Organik Rankine Çevrimidir. İki sistem için de atık akışkan giriş sıcaklığı ve debisi sabit alınmıştır. Organik çalışma akışkanları olarak izopentan, izobütan, R134a, R123, R245fa, R22, R13, propan ve R600 akışkanları incelenmiştir. En uygun akışkanı belirlemek için analizler yapılmıştır. İnceleme sonucunda farklı çevrim tiplerinde ve basınç aralıklarına göre çalışacak uygun akışkanlar belirlenmiştir.

Tian ve diğerleri [13] yapmış olduğu çalışmada içten yanmalı motorda egzoz ısının Organik Rankine Çevrimi kullanılarak geri kazanımını incelemiştir. Farklı çalışma akışkanlarına göre termo-ekonomik analizler yapılmıştır. 20 akışkan arasından sistem için önerilen akışkanlar belirlenmiştir. Ayrıca ısı verim, genleşme oranı, net güç çıkışı, toplam ısı transfer alanının net güç çıkışına oranı ve elektrik üretim maliyeti analiz edilmiştir. Elde edilen verilere göre R141b, R123 ve R245fa akışkanlarının en yüksek ısı verim ve net güç çıkışına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Minea [14] yapmış olduğu çalışmada 85 °C ve 116 °C arasındaki kaynakları kullanan 50 kW gücündeki Organik Rankine Çevriminin fizibilitesini, verimliliğini ve güvenilirliğini incelemiştir. Üretilen güç ve verimliliğin ısı kaynağının çevrime giriş sıcaklığı, soğutucu akışkan gibi parametrelere ve ayrıca gerekli parazitik elektriksel güç (bekleme gücü) miktarına bağlı olduğunu gözlemlemiştir.

Quoilin ve diğerleri [15] yapmış olduğu çalışmada farklı Organik Rankine Çevrimi uygulamalarını incelemiştir. Birkaç örnek Organik Rankine Çevriminin pazar incelemesi yapılmıştır. Bazı üreticiler listelenmiştir. Akışkan seçiminin ve türbin seçiminin analizleri yapılmıştır.

Lecompte ve diğerleri [16] yapmış olduğu çalışmada atık ısı kaynaklı sub-kritik ve trans-kritik Organik Rankine Çevrimlerinin termo-ekonomik optimizasyonunu incelemiştir. Sistemin çıktıları hesaplanarak finansal değerlendirme yapılmıştır. Finansal değerlendirme sonucunda sub-kritik çevrimin trans-kritik çevrimden daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Yang ve Yeh [17] yapmış olduğu çalışmada büyük deniz dizel motorlarından atık ısıyı geri kazanabilmek için kullanılan Organik Rankine Çevriminin termo-ekonomik optimizasyonunu sayısal olarak incelemiştir. Çeşitli türbin giriş ve çıkış basınçlarına sahip sistemin net güç çıkışı, ısı verimi ve sistem bileşenlerinin maliyetindeki değişimler araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda R1234yf akışkanı termo-ekonomik açıdan en iyi performansı göstermiştir.

Quoilin ve diğerleri [18] yapmış olduğu bir diğer çalışmada Organik Rankine Çevrimi ile atık ısı geri kazanımının termodinamik ve termo-ekonomik optimizasyonunu incelemiştir. Farklı çalışma akışkanları (R245fa, R123, n-butane, n-pentane ve R1234yf) ve farklı bileşen boyutlarında çevrimin performansı incelenmiştir.

Song ve diğerleri [19] yapmış olduğu çalışmada sub-kritik ve süper-kritik jeotermal ORC enerji santrallerinin termo-ekonomik performansını incelemiştir. 180 °C sıcaklığındaki kaynak örnek olarak ele alınmıştır. Verimliliği en üst seviyeye çıkarmak ve geri ödeme süresini en aza indirmek için optimizasyon yapılmıştır.

Delgado-Torres ve García-Rodríguez [20] yapmış olduğu çalışmada güneş enerjisi ile çalışan Organik Rankine Çevrimi ile güneş enerjisi ile çalışan ters ozmozun, tuzdan arındırma, ortak kullanımını incelemiştir. Organik Rankine Çevrimi çalışma sıvısı olarak 12 farklı madde ve 4 farklı sabit güneş kolektörü modeli düşünülmüştür. Solar Organik Rankine Çevriminin çalışma koşulları her akışkan ve her güneş kolektörü için belirlenmiştir. Organik Rankine Çevriminde kullanılan akışkanın ve sistemin boyutlandırılmasının önemine değinilmiştir.

García-Afonso ve diğerleri [21] yapmış olduğu çalışmada piston motorlu güç santrallerinde Organik Rankine Çevrimi ile atık ısının geri kazanımını incelemiştir. Kanarya Adaları'nda bulunan bir elektrik santrali örnek alınarak çalışılmıştır. Santralin termo-ekonomik analizi yıllık egzoz enerjisi girdi alınarak gerçekleştirilmiştir. Enerji santrali yakıt ekonomisi kazancının %5 ile %7 arasında olduğu tahmin edilmektedir. Ek olarak Organik Rankine Çevrimi tarafından sağlanan ekstra güç dizel motor çalıştırma sayısını azaltarak santralin işletme maliyetinin düşmesini sağlamıştır.

Ramirez ve diğerleri [22] yapmış olduğu çalışmada bir çelik fabrikasında atık ısı geri kazanım ünitesi ile büyük ölçekli bir Organik Rankine Çevrimi tesisi tasarlamış, devreye almış ve işletmiştir. Yapılan tesis Avrupa Komisyonu tarafından finanse edilen PITAGORAS projesinin bir parçasıdır ve İtalya'da Brescia'da kurulmuştur. Atık ısı, ısıtma mevsimi boyunca bir bölgesel ısıtma şebekesine, yılın geri kalanında ise elektrik üretimi için Organik Rankine Çevrimine gönderilmiştir. Çevrimin güç çıkışı 1,8 MW'dır ve ilk çalışma haftaları sonucunda %21,7 değerinde verim elde edilmiştir.

Gomaa ve diğerleri [23] yapmış olduğu çalışmada bir çimento sanayide Organik Rankine Çevrimi kullanarak atık ısının geri kazanımını incelemişlerdir. Endüstride kullanılan fırının baca gazlarından çıkan ve 250 °C ile 380 °C arasında değişen atık ısı kullanılmıştır. Bileşenlerin performansları incelenmiştir. Çevrimin ekonomik ve çevresel olarak endüstriye katkıda bulunacağı tespit edilmiştir.

Wang ve diğerleri [24] yapmış olduğu çalışmada evrimsel algoritma kullanarak düşük dereceli atık ısı geri kazanımı için Organik Rankine Çevriminin optimizasyonunu incelemiştir. R134a organik akışkanı kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Toplam sermaye maliyeti üzerindeki önemli etkenler belirlenmiştir. Ekserji verimliliğindeki artışın toplam sermaye maliyetini artırabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Uusitalo ve diğerleri [25] yapmış olduğu çalışmada bir dizel motorun egzoz ısını kullanan küçük ölçekli bir ORC ünitesinin çalışma sıvısı seçimini ve deneysel sonuçlarını incelemiştir. Çalışma sıvısı seçimi olarak, siloksan MDM, deney sistemi için en uygun sıvı olarak değerlendirilmiştir. ORC işleminin dizel motor egzozundan ısıyı geri kazanma kapasitesini incelemek ve analiz etmek amacıyla deneyler yapılmıştır. İncelenen sistemin egzoz gazlarının atık ısını verimli bir şekilde geri kazanabileceği belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıkta, küçük ölçekli ORC uygulamalarında çalışma sıvıları olarak yüksek moleküler ağırlıklı ve yüksek kritik sıcaklıklı sıvıları kullanma potansiyeli doğrulanmıştır.

Yue ve diğerleri [26] yapmış olduğu çalışmada bir atık ısı geri kazanımı organik Rankine çevrimi alt sisteminin araç iklimlendirme alt sistemine entegre edilmesi yoluyla yeni bir araç enerji besleme sistemini incelemiştir. Önerilen araç enerji tedarik sisteminin, bir atık ısı geri kazanımlı organik Rankine çevrim alt sistemine sahip araç enerji tedarik sistemine kıyasla belirgin termal ve ekonomik performans avantajlarına sahip olduğunu göstermiştir.

Mevsim değişikliği ile birlikte önerilen sistem genel olarak en iyi performansı kışın göstermiş, ardından ilkbahar/sonbahar gelmiştir. En kötü performans yaz mevsiminde gerçekleşmiştir. Ayrıca, Cyclo-pentan, bu araştırmada işletme koşulları altında atık ısı geri kazanım alt sisteminin en iyi çalışan sıvısı olarak belirlenmiştir.

Mahmoudi ve diğerleri [27] yapmış olduğu çalışmada Organik Rankine Çevrimi ile atık ısı geri kazanımını incelemişlerdir. Son 4 yıldaki atık ısı geri kazanımı için ORÇ kullanımı üzerine hem teorik hem de deneysel çalışmaları incelemeyerek çevrim konfigürasyonu, çalışma sıvısı seçimi ve çalışma koşullarının sistem performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Wei ve diğerleri [28] yapmış olduğu çalışmada egzoz ısısı tarafından tahrik edilen çalışma sıvısı olarak HFC-245fa (1,1,1,3,3 pentafloropropan) kullanan bir Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) sisteminin sistem performans analizini ve optimizasyonunu incelemiştir. Egzoz ısısının kullanımını mümkün olduğunca maksimize etmenin, sistem çıkış net gücünü ve verimliliğini arttıracığından bahsedilmiştir. Çalışma ortamına göre, uygun nominal durum seçmenin, sistemin çıkış net gücünü ve verimliliğini iyileştirmek için iyi bir fikir olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Hung [29] yapmış olduğu çalışmada kuru akışkanların kullanıldığı Organik Rankine Çevrimi ile atık ısı geri kazanımını incelemiştir. ORÇ'nin verimli çalışmasının büyük ölçüde iki faktöre bağlı olduğundan bahsedilmiştir, bunlar çevrimin çalışma koşulları ve çalışma sıvılarının termodinamik özellikleridir. Benzen (C₆H₆), Toluen (C₇H₈), p-Xylene (C₈H₁₀), R113 ve R123 çalışma sıvıları incelenmiştir. İncelenen çalışma sıvıları arasında en yüksek verimi p-Xylene, en düşük verimi ise Benzen göstermiştir.

Sprouse ve Depcik [30] yapmış olduğu çalışmada içten yanmalı motor egzoz atık ısı geri kazanımı için Organik Rankine Çevrimini incelemiştir. Sistem performansı üzerinde en büyük etkiye sahip oldukları kabul edildiğinden, çevrimdeki türbin ve kullanılan çalışma sıvısının seçiminin öneminden bahsedilmiştir. Modern soğutucu akışkanlar ve türbin teknolojisindeki gelişmelerle yakıt ekonomisinde %10 civarında bir iyileşme potansiyeli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Dai ve diğerkleri [31] yapmış olduğu çalışmada düşük dereceli atık ısı geri kazanımı için Organik Rankine Çevriminin (ORÇ) parametrik optimizasyonunu incelemiştir. Termodinamik parametrelerin ORÇ performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı çalışma akışkanlarına sahip çevrimlerin optimum performansı, aynı atık ısı koşulu altında karşılaştırılmıştır ve analiz edilmiştir. Düşük dereceli atık ısıyı faydalı işe dönüştürmede organik çalışma sıvıları ile çalışan çevrimlerin su ile çalışan çevrimlerden çok daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. R236EA ile çevrim en yüksek ekserji verimliliğine sahiptir.

Loni ve diğerkleri [32] yapmış olduğu çalışmada Organik Rankine Çevrimi ile elektrik üretimi için endüstriyel atık ısı geri kazanım sistemi ve bu sistemin geleceğe etkisini incelemiştir. Atık ısıdan yararlanmanın elektriği verimli bir şekilde üretmenin günümüz için çekici bir yolu olduğu, atık ısı ile kojenerasyonun, yüksek genel verimliliğe ve atık enerjinin optimal kullanımına yol açabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Lecompte ve diğerkleri [33] yapmış olduğu çalışmada atık ısı geri kazanımı için Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) mimarilerini incelemiştir. Organik Rankine Çevriminin (ORÇ), düşük sıcaklıktaki ısıyı elektriğe dönüştürmek için yaygın olarak uygulanabilir bir teknoloji olarak kabul edildiğinden ve ORÇ'lerin az bakım gerektiren insansız operasyonlar için tasarlandığından bahsedilmiştir. Sistemin ek karmaşıklığının değerlendirilmesindeki zorluktan, literatürden elde edilen deneysel veri eksikliğinden ve literatürdeki çeşitli sınır koşullarıyla başa çıkmanın zorluğundan bahsedilmiştir.

Hoang [34] yapmış olduğu çalışmada Organik Rankine Çevrimine dayalı dizel motorlardan atık ısı geri kazanımını incelemiştir. Hava-yakıt karışımının yanmasından kaynaklanan enerjinin %60'ından fazlasının mekanik işi üretmek için kullanılmadığı ve çevreye atık ısı olarak salındığı, bu nedenle dizel motorlardan çıkan atık ısının faydalı işe dönüştürülmesinin faydalarından bahsedilmiştir. Çalışma akışkanı seçimi, termodinamik analiz, ana bileşen seçimi ve teknolojiye dayalı ORÇ sistem tasarımı, ekonomik ve çevresel yönler için veriler toplanmıştır ve seçilen uygulamalar için en uygun tasarım incelenmiştir.

Carcasci ve diğerkleri [35] yapmış olduğu çalışmada gaz türbinlerinden atık ısı geri kazanımı için bir Organik Rankine Çevriminin termodinamik analizini incelemiştir. Akışkan seçiminin öneminden bahsedilmiştir. Dört farklı çalışma sıvısı arasında bir

karşılaştırma yapılmıştır. Seçilen akışkanlar toluen, benzen, siklopentan ve sikloheksan akışkanlarıdır. Düşük yağ sıcaklığı için en iyi sıvı sikloheksan, orta yağ sıcaklığı için en iyi seçim benzen ve yüksek yağ sıcaklığı için toluen sonuçlarına ulaşılmıştır.

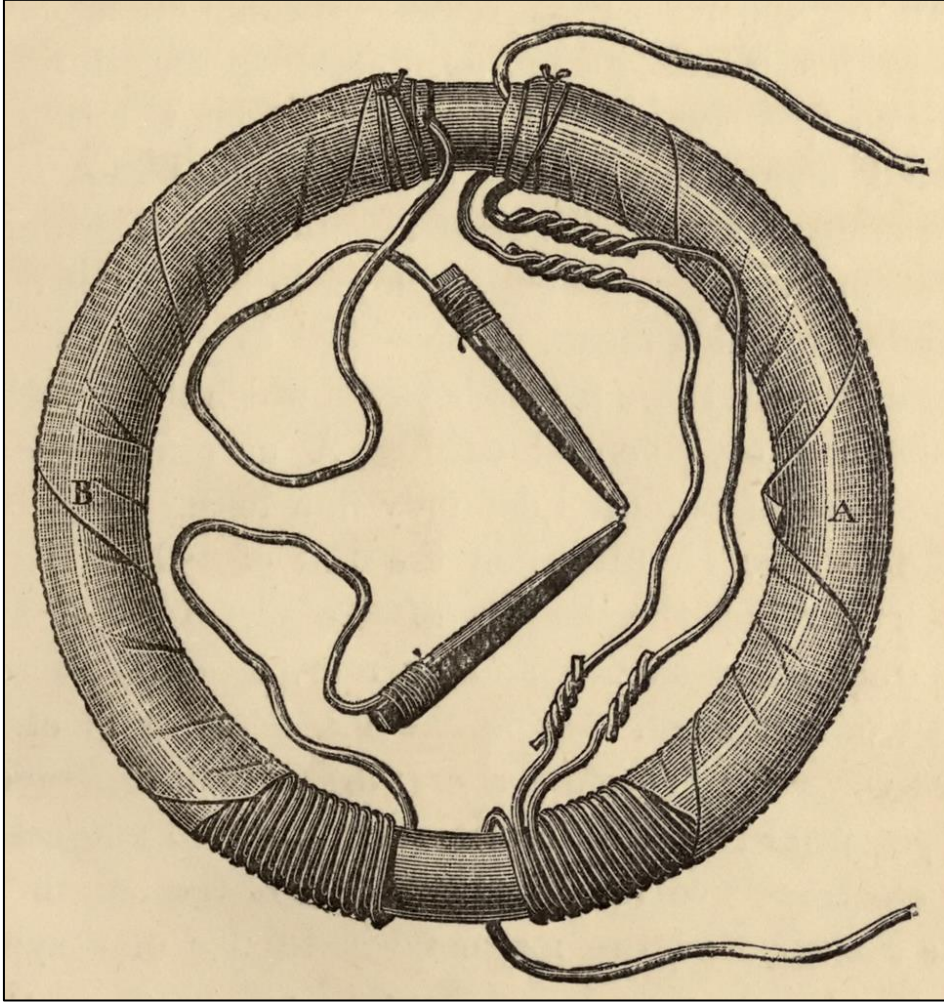
Yukarıda belirtildiği gibi atık ısının geri kazanımı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır ancak transformatörlerde atık ısı geri kazanımı ile ilgili termodinamik ve termo-ekonomik analiz konusunda literatürde bir çalışma bulunmamaktadır. Bu tez kapsamında, transformatörlerde oluşan atık ısının geri kazanımı incelenecektir. Transformatörlerde atık ısı geri kazanımının termodinamik ve termo-ekonomik analizleri yapılacaktır. Düşük sıcaklıklı kaynaklardan atık ısı geri kazanımı uygulamaları içerisinde en yaygın olarak kullanılan yöntem Organik Rankine Çevrimidir, bu sebeple bu çalışmada da Organik Rankine Çevrimi kullanılarak transformatörde oluşan atık ısının geri kazanımının fizibilitesi değerlendirilecektir. Tezin konusu olan atık ısı geri kazanımı, fosil yakıtların tüketiminin azalmasına önemli katkıda bulunacak ve enerjinin verimli kullanılmasını sağlayacaktır.

3. TRANSFORMATÖRLERDE ATIK ISI

Transformatör ya da kısa adıyla trafo iki veya daha fazla elektrik devresini elektromanyetik indüksiyonla birbirine bağlayan bir elektrik aletidir. Bir elektrik devresinden diğer elektrik devresine, enerjiyi elektromanyetik alan aracılığıyla nakletmektedir. Transformatörler elektrik enerjisinin belirli gücünde gerilim ve akım değerlerinde istenilen değişimi yapan makinelerdir. Genel olarak transformatörler bir elektrik devresinde voltaj veya akımı düşürmek veya yükseltmek için kullanılmaktadır.

Transformatörün işlevi, düşük akımlı yüksek gerilimli elektriği, hemen hiç enerji kaybı olmaksızın yüksek akımlı düşük gerilimli duruma (veya tam tersi) dönüştürmektir. Transformatörler elektrikte çalışan birçok cihazın tamamlayıcı elemanıdır. Masa lambaları, pil şarj araçları, oyuncak arabalar ve bilgisayar gibi cihazların hepsinde gerilimi ayarlamak için transformatör kullanılmaktadır. Transformatörün boyutları kullanım yerine göre bezelye iriliğinde küçük olabildiği gibi, 500 ton ağırlığında olanları da vardır [36].

Temel transformatör prensibi ve uygulamaları 19. yy'de, çoğunun adı günümüzde yaygın olarak kullandığımız araçlardan bazılarıyla ilişkilendirilmiş olan yaratıcı mühendisler ve mucitler tarafından keşfedildi. 1831'de transformatörün çalışma prensibi olan elektromanyetik indüksiyon, Michael Faraday tarafından keşfedilmiştir. Faraday deneylerini, elektromanyetik alan ile manyetik akı arasındaki ilişkiyi tanımlayan ve şu anda Faraday'ın indüksiyon yasası olarak bilinen denkleme kadar ilerletmiştir. Faraday, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, bir demir halkanın etrafına bir çift bobin sarmıştır. Daha sonra tel bobinleri arasındaki indüksiyon üzerine erken deneyler yapmıştır. Böylece ilk halka şeklinde kapalı çekirdekli transformatörü oluşturmuştur. Bununla birlikte, transformatörüne yalnızca bireysel akım darbeleri uygulamıştır. Sonuç olarak sargılardaki dönüş oranı ile elektromanyetik alan arasındaki ilişkiyi asla keşfedememiştir.



Şekil 3.1. Faraday transformatörü

1870'lere gelindiğinde, alternatif akım (AC) üreten verimli jeneratörler mevcuttur. Alternatif akımın bir indüksiyon bobinine bir kesici olmadan doğrudan güç sağlayabileceği bulunmuştur. 1876'da Rus mühendis Pavel Yablochkov, birincil sargıların bir AC kaynağına bağlandığı bir dizi indüksiyon bobinine dayanan bir aydınlatma sistemi icat etmiştir. İkincil sargılar, kendi tasarımı olan birkaç 'elektrikli mum'a (ark lambaları) bağlanabilmektedir. Yablochkov'un kullandığı bobinler esasen transformatör olarak işlev görmüştür. 1889'da Rus mühendis Mikhail Dolivo-Dobrovolsky ilk kez 3 fazlı transformatörü keşfetmiştir [37].

Geçmişten günümüze transformatörlerin çalışma prensibi değişmemiş ancak yapılan çalışmalar ile verimlilikleri ve kapasiteleri mucitlerinin hiç ummayacağı seviyelere gelmiştir.

3.1. Güç Transformatörleri

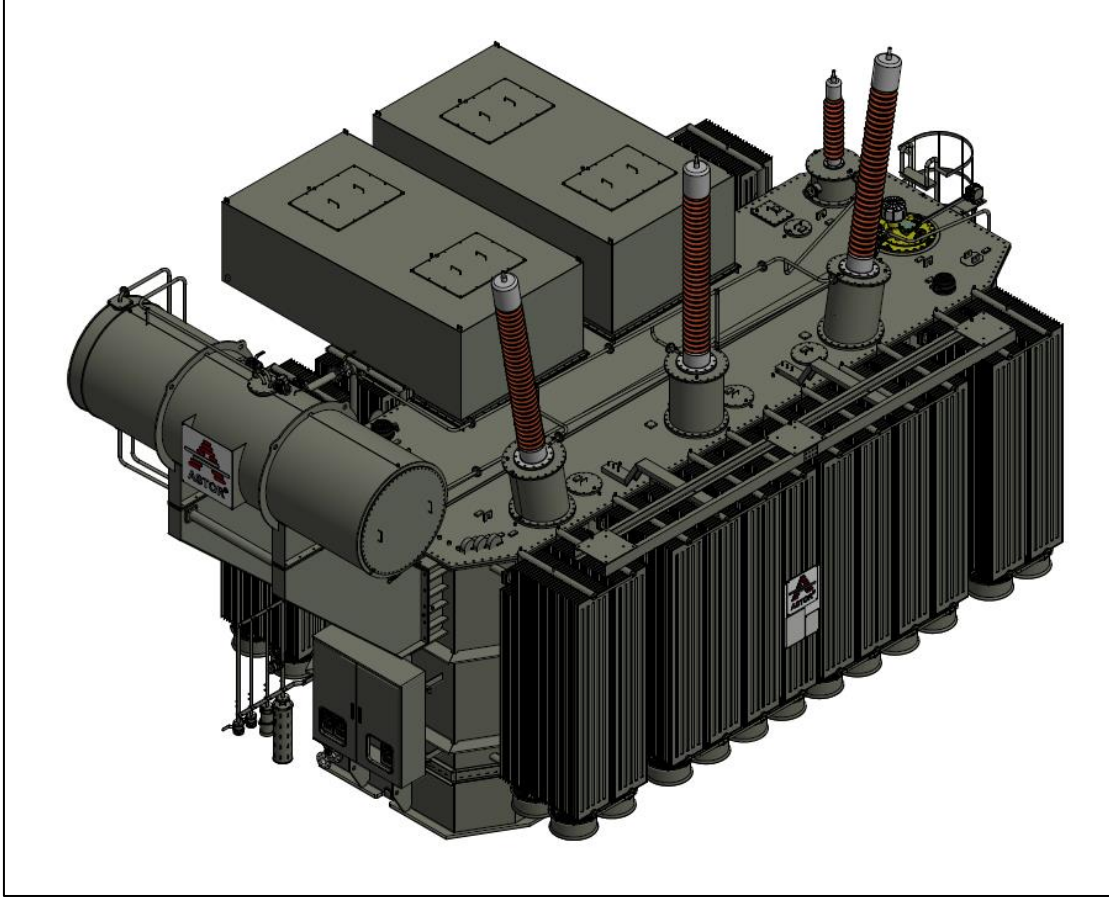
Güç trafosu, dağıtım birincil devreleri ile jeneratör arasındaki elektronik veya elektrik devresinin herhangi bir bileşeninde elektrik enerjisini iletmek için kullanılan bir tür transformatördür. Bu transformatörler, dağıtım şebekelerinde, voltaj düşürme ve yükseltme voltajlarını ara yüzlemek için kullanılır. Güç transformatörleri, üretim, iletim ve dağıtım sistemleri gibi farklı gerilimlerdeki sistemlerin birbirine bağlanmasında kullanıldıkları için elektrik sisteminin en önemli parçalarından biridir. Güç transformatörleri, trafo merkezindeki en pahalı ekipmandır [38].

Bu transformatörler gerilimi iletir. Transformatörün bir bölümünde alçak gerilim, yüksek akım devresi, trafonun diğer tarafında ise yüksek gerilim düşük akım devresi bulunmaktadır. Bir Güç trafosu, Faraday'ın endüksiyon yasası ilkesine göre çalışır. Güç transformatörü, frekansı değiştirmeden gücü bir devreden diğerine dönüştürmek için kullanılan statik bir cihazdır. Hareketli veya dönen bir bileşen olmadığından, bir transformatör statik bir cihaz olarak tanıtılmıştır.

Güç transformatörleri, güç ve voltaj değerleri bakımından en büyük transformatörlerdir. Üretilen transformatörler 1500 MVA ile 1785 kV arasında değişmektedir. Birleştirilmiş 2750 MVA kapasiteli, iki bağlantılı ünitelerden oluşan birkaç büyük transformatör üretilmiştir. Güç transformatörleri, güç aralıklarına göre üç tipe ayrılabilir. Bunlar büyük güç transformatörleri, orta güç transformatörleri ve küçük güç transformatörleridir [39].

- Gücü 100 MVA ve üzeri transformatörler büyük güç transformatörleri,
- Gücü 100 MVA ve altı transformatörler orta güç transformatörleri,
- Gücü 500-7500 kVA arasında olan transformatörler düşük güç transformatörleri olarak adlandırılır.

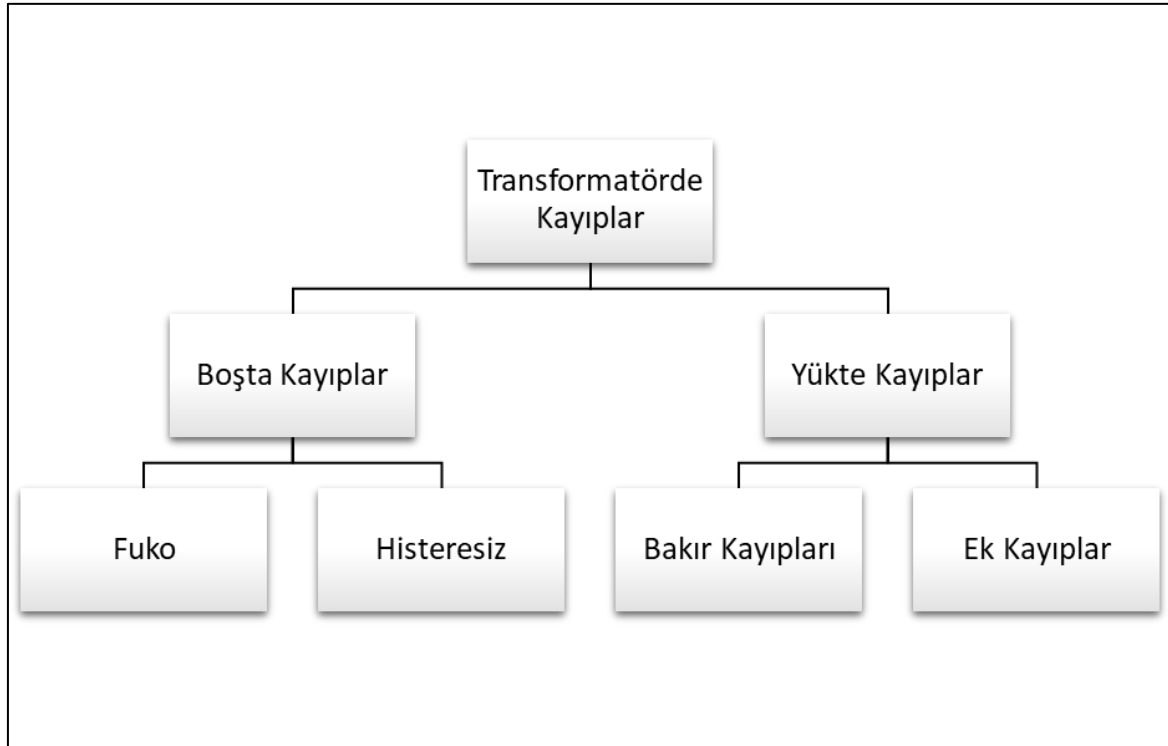
Büyük güç transformatörlerine örnek olarak 280 MVA 245 kV gücünde bir güç transformatörü Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. 280 MVA 245 kV güç transformatörü

3.1.1. Transformatörlerde kayıplar

Transformatörler de diğer tüm cihazlar gibi mükemmel değildir. İdeal transformatörlerde kayıplar olmazken, gerçek transformatörlerde güç kayıpları vardır. Bir transformatörün çıkış gücü her zaman transformatörün giriş gücünden biraz daha azdır. Bu güç kayıpları, transformatörden çıkarılması gereken ısı olarak sonuçlanır. Trafoların güç kayıpları nüve ve bakır kayıplarından ibarettir. Şekil 3.3’te gösterilmiştir [40].



Şekil 3.3. Transformatörde kayıplar

Boşta Kayıplar (Nüve/Demir Kayıpları): Nüve/Demir kayıplarına transformatörün çekirdeğindeki akı sebep olur. Fuko–histeresiz kayıplarından oluşan nüve kayıpları bütün çalışma yüklerinde sabittir. Fuko (Eddy Current) kayıpları nüveyi ince saçlardan yapmak suretiyle minimuma indirilir. Histeresiz kayıpları da demire silisyum katarak azaltılır. Bu kayıplar transformatörün boşta çalışmasında oluşan, akımın oluşturduğu bakır kayıplarının dikkate alınmadığı durumda elde edilmektedir. Ayrıca boşta kayıplarda histeresiz ve fuko kayıpları ile açıklanamayan kayıplar anormal kayıplar olarak adlandırılır. Toplam kayıp içinde anormal kayıplar küçük bir yüzdeye sahip olduğu için ihmal edilebilir.

Yükte Kayıplar (Bakır Kayıpları): Bakır kayıpları transformatör sargılarında oluşur. Birincil (primer) ve ikincil (sekonder) sargılarda geçirilen akımların oluşturduğu kayıplardır. Bu kayıplar sargı dirençlerinden dolayı meydana gelir. Sargılarda kullanılan iletkenin direnci ve iletkenin geçen akımın karesi ile doğru orantılıdır.

Ek kayıplar, toplam yük kaybının bileşenidir ve sargılarda, tankta, çekirdekte, çekirdek sıkıştırma plakalarında, manyetik kalkanlarda vb. elektromanyetik akı tarafından üretilirler. Kaçak akı ve kaçak kayıpların araştırılması, büyük güç transformatörleri için çok önemlidir. Transformatörün metalik parçalarındaki kaçak kayıplar, temel olarak

sargılardan geçen akımın ve ayrıca sargıların dışındaki yüksek akım döngülerinin ürettiği manyetik kaçak akıdan kaynaklanır. Göreceli olarak çok yüksek ve tehlikeli olabilseler de bazen ihmal edilir.

Transformatörde oluşan toplam kayıplar, yani transformatörün atması gereken toplam ısı miktarı ise hesaplanan boşa kayıplar ve yükte kayıpların toplamıdır. Eşitlik 3.1’de gösterilmiştir.

$$P_T = \text{Nüve(Demir) Kayıpları} + \text{Bakır Kayıpları} \quad (3.1)$$

3.1.2. Transformatörlerde verim

Transformatörlerde verim alınan gücün verilen güce oranıdır. Güç transformatörlerinin verimi genellikle %99 üzerindedir [41]. Transformatörler yüksek verimli çalışan yapılardır. Transformatörün verimi Eşitlik 3.2’de gösterildiği gibi hesaplanır [42].

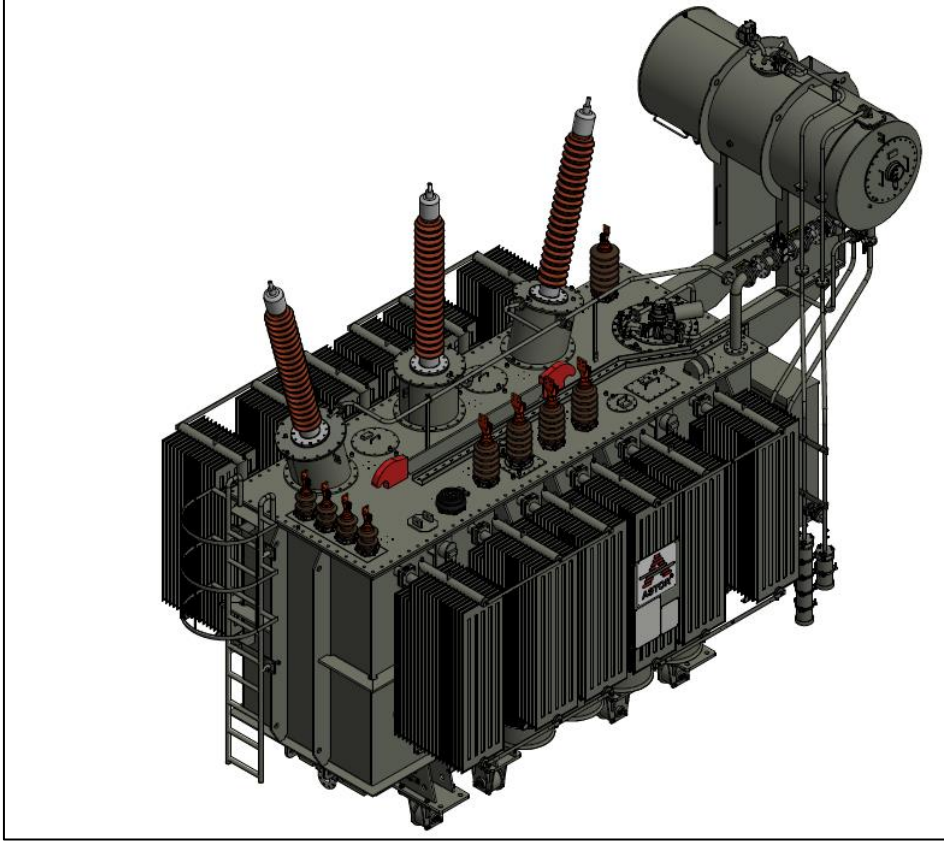
$$\eta = \frac{P_c}{P_g} \quad (3.2)$$

- P_c transformatör çıkış gücü
- P_g transformatör giriş gücü

3.1.3. Transformatörlerde soğutma

Bir güç transformatörünün normal çalışması sırasında, boşa kayıplar ve yükte kayıplar sebebiyle transformatör içerisinde önemli bir ısı üretimi gerçekleşir. Transformatörün performansını ve ömrünü korumak için uygun bir soğutma gerekmektedir. Bu ısıyı uzaklaştırmak için, aktif kısım (bobin, sargılar, çekirdek) içinde, elektriksel ve termal özellikleri için seçilen bir madeni yağ geçişi için birkaç soğutma kanalı sağlanmıştır. Genellikle büyük transformatörler için yağ giriş ve çıkışı tankın yan tarafında yapılır; yağ çekirdek ekseninin altından girer, transformatörün aktif kısımlarından geçer. Transformatörde yağ üst kısmından çıkmadan önce, yağ dolaşımı sebebiyle iletim ve taşınım yoluyla ısı transferi gerçekleşir. Transformatör içindeki yağ akışı, doğal yolla olduğu gibi pompa gibi yardımcı ekipmanlarla da desteklenebilir. Bu genelde yüksek

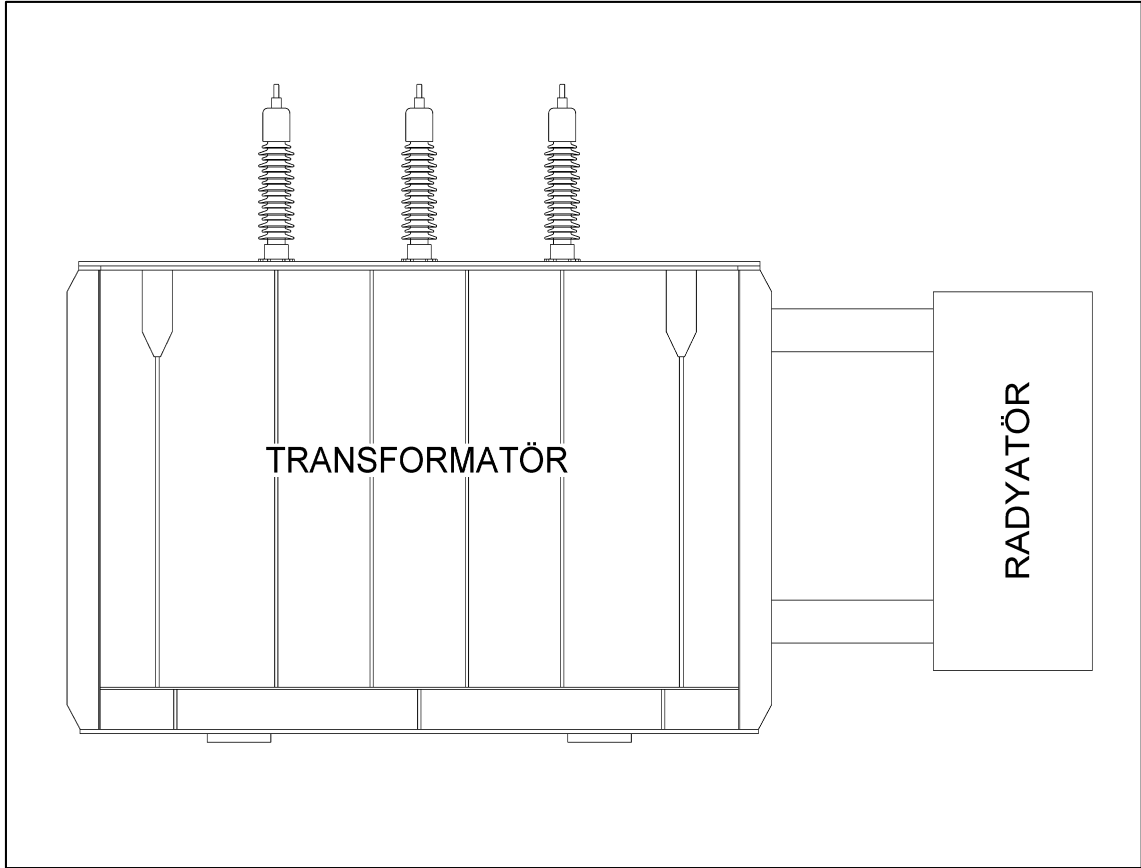
güçteki transformatörler için geçerlidir. Şekil 3.4'te soğutma ekipmanlarının (radyatör ve fan) kullanıldığı bir güç transformatörü gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Soğutma ekipmanlarıyla örnek güç transformatörü

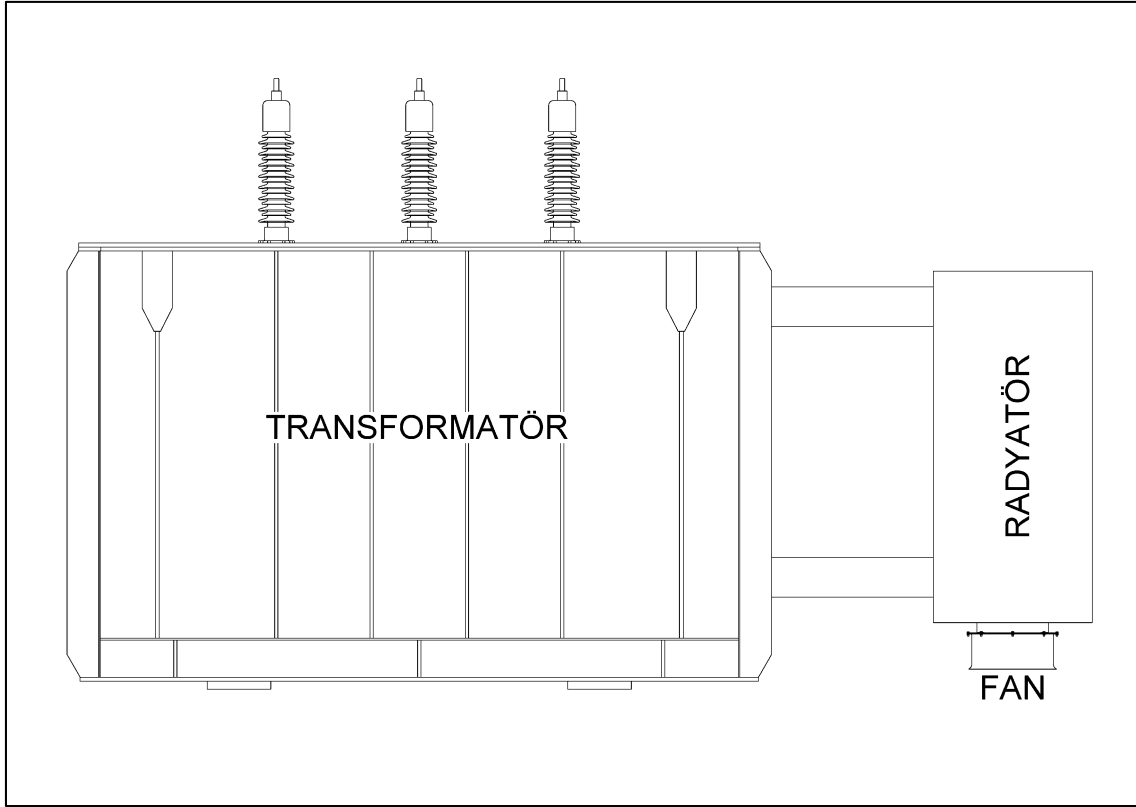
Transformatörler için farklı soğutma yöntemleri bulunmaktadır. Trafonun farklı boyutu, tasarımı ve kullanıldığı yer gibi değişen şartlara göre soğutma yöntemleri değişmektedir. IEC ve IEEE standartlarına göre, transformatörlerde soğutma tipi 4 harf ile tanımlanmaktadır. Transformatörde kullanılan başlıca soğutma tipleri şunlardır [43];

- ONAN (Oil Natural-Air Natural)
- ONAF (Oil Natural-Air Forced)
- OFAF (Oil Forced-Air Forced)
- ODAF (Oil Directed-Air Forced)



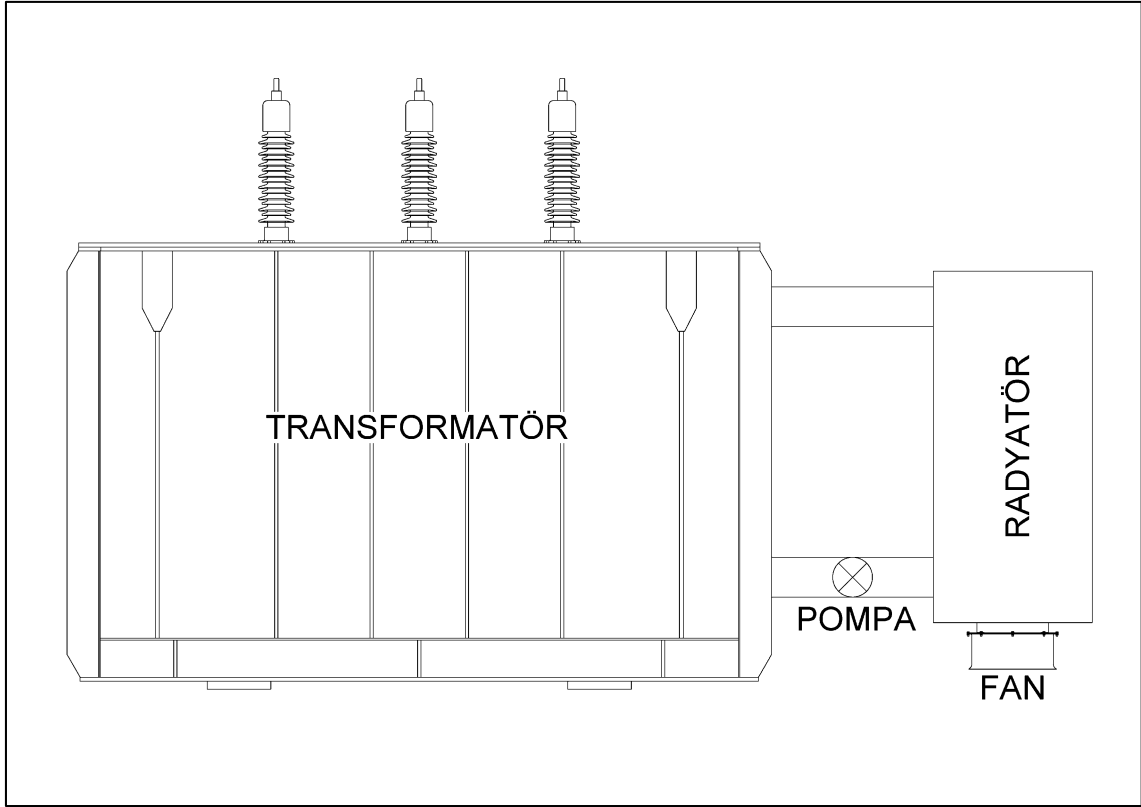
Şekil 3.5. ONAN Soğutma

ONAN Tip Soğutma: En yaygın ve en basit soğutma tekniğidir. Transformatörün soğutulması doğal sirkülasyon yoluyla sağlanır. Transformatörde açığa çıkan ısı ile ısısı ve doğal olarak kinetik enerjisi yükselen yağ molekülleri kazan içerisinde yukarıya doğru hareket ederek burada bulunan soğuk yağ molekülleri ile yer değiştirir. Yukarı yönde hareket eden bu sıcak yağ molekülleri radyatörlerin içerisinde geçerken ısılarını doğal iletim, yayılım ve ışıma ile atmosfere ileterek soğurlar. ONAN tip soğutmanın şematik gösterimi Şekil 3.5'te belirtilmiştir. ONAN soğutma diyagramı EK-2'de gösterilmiştir.



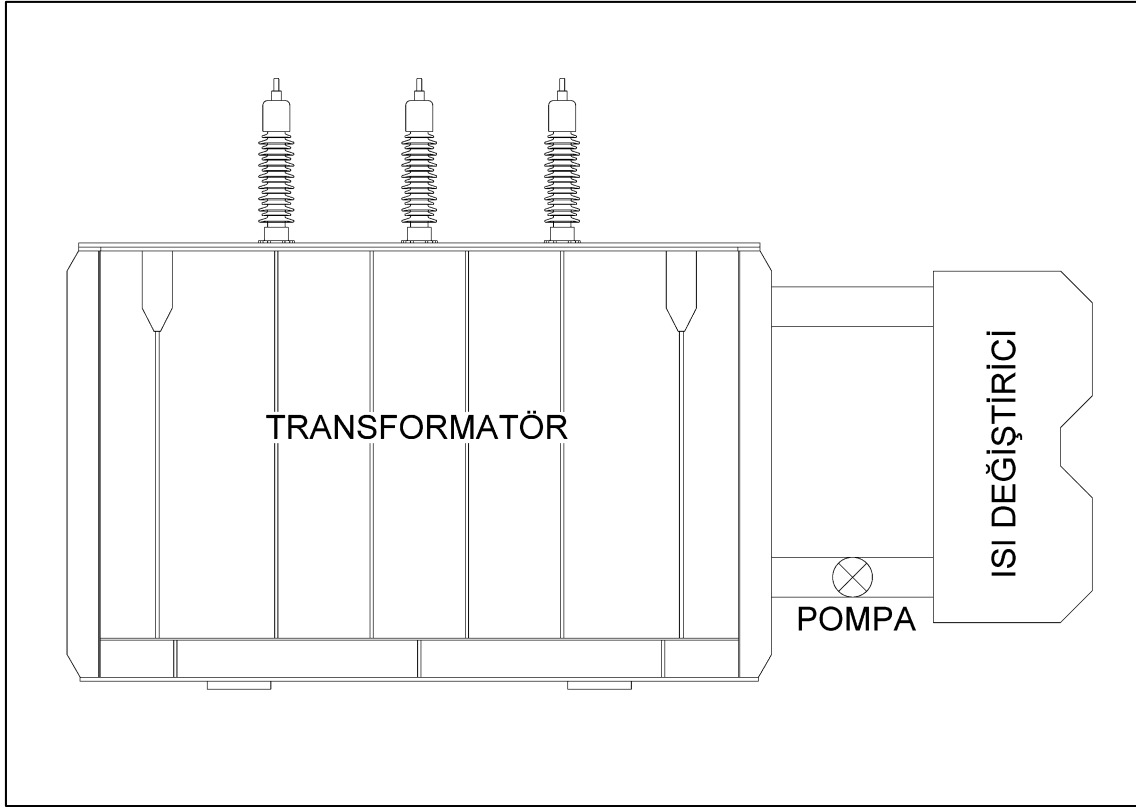
Şekil 3.6. ONAF soğutma

ONAF Tip Soğutma: Genel olarak yağ dolaşımı konvansiyonel olarak ve hava teması fan aracılığı ile tatbik edilen trafo kazan tipi anlamında gelmektedir. Sıcak yağın doğal konvansiyonel dolaşımı soğutma sisteminde değerlendirilmektedir. ONAN tip soğutmada olduğu gibi, transformatörde açığa çıkan ısı ile ısısı ve doğal olarak kinetik enerjisi yükselen yağ molekülleri kazan içerisinde yukarı doğru hareket ederek burada bulunan soğuk yağ molekülleri ile yer değiştirir. Yukarı kısımlara hareket eden bu sıcak yağ molekülleri radyatörlerin içerisinde geçerken bu soğutma ünitelerine dışarıdan soğutma fanları aracılığı ile tatbik edilen hava akımı sayesinde ısılarını daha çabuk bir şekilde atmosfere ileterek soğurlar. Fanlar radyatörlerin altına veya yanlarına monte edilebilir. ONAF tip soğutmanın şematik gösterimi Şekil 3.6’da belirtilmiştir. ONAF soğutma diyagramı EK-3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.7. OFAF soğutma

OFAF Tip Soğutma: Bu soğutma yönteminde ısınan yağın sirkülasyonu, konvansiyonel sisteme ek olarak kazan içerisindeki yağ pompası ile takviye edilirken soğutma sisteminde yine hava fanları vasıtasıyla hava tatbik edilir. ONAN ve ONAF soğutmaya göre daha kompleks bir yapısı vardır. Bu sistemde hem yağın dolaşımı hem de yağın soğutulması takviye sistemler ile yapılır. Transformatör kazanının içerisindeki ısınmış yağın sirkülasyon hızı arttırılırsa yağın soğuma hızı da artacaktır. Bu sebeple transformatör kazanının içerisine yağ pompası koyularak yağın sirkülasyon hızı arttırılır. ONAN veya ONAF soğutma tipindeki transformatör kazanlarında ısınan yağın radyatörlere ulaşması konvansiyonel olarak gerçekleştiği için bu oldukça yavaş bir hızda gerçekleşir. OFAF soğutma tipindeki transformatör kazanlarında ise yağ pompası ile bu sirkülasyon hızlandırılır. Ayrıca yine ONAF sistemdeki gibi radyatörlerin üzerine yerleştirilen soğutma fanları sıcak yağın üzerindeki ısının atmosfere verilmesini hızlandırır. OFAF tip soğutmanın şematik gösterimi Şekil 3.7’de belirtilmiştir. OFAF soğutma diyagramı EK-4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.8. ODAF soğutma

ODAF Tip Soğutma: ODAF soğutma sistemi OFAF soğutma sistemine oldukça benzemektedir. Bu sistemde sirkülasyonu sağlanan yağ daha önceden belirlenmiş bir güzergâh doğrultusunda direkt nüve ve bobine ulaşacak şekilde yönlendirilir. Soğumuş yağ transformatör kazanına soğutucu veya radyatör kısmında girerek bobinin içerisinde bulunan ve yağın geçebileceği boşluklardan ya da daha önceden yağın geçişi için belirlenen yolu takip ederek nüve ve bobine soğuk yağın direkt nüfuz ederek soğutma işleminin çok hızlı bir şekilde gerçekleşmesi sağlanır. ODAF soğutma sistemi daha çok yüksek güç değerine sahip güç transformatörlerinde kullanılan bir soğutma yöntemidir. ODAF tip soğutmanın şematik gösterimi Şekil 3.8’de belirtilmiştir. ODAF soğutma diyagramı EK-5’te gösterilmiştir.

4. ORGANİK RANKINE ÇEVİRİMİ İLE ATIK ISI GERİ KAZANIMI

4.1. Rankine Çevrimi

Rankine Çevrimi, ısıyı işe dönüştüren termodinamik bir sistemdir. Rankine çevrimi adını Glasgow Üniversitesi'nde İskoç bir bilge profesör olan William John Macquorn Rankine'den almıştır. Rankine çevrimi, termik enerji üretim tesislerinde yaygın olarak bulunan buhar motorlarının elektrik üretmek için bir yakıtın veya başka bir ısı kaynağının termal enerjisini kullanma sürecini tanımlar. Olası ısı kaynakları arasında kömür, doğal gaz veya petrol gibi fosil yakıtların yanması, biyokütle veya etanol gibi yenilenebilir yakıtlar, nükleer fisyon ve konsantre güneş enerjisi sayılabilir [44].

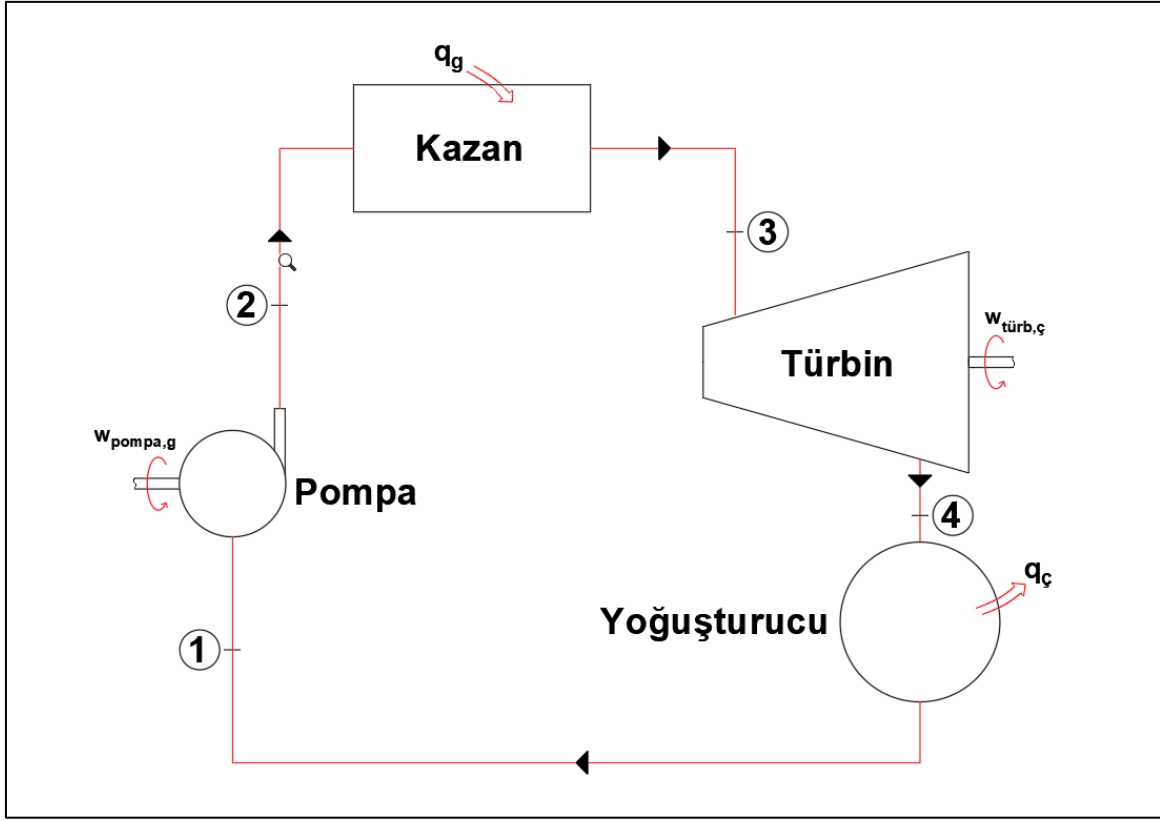
Rankine çevrimi genellikle çalışma sıvısının yeniden kullanıldığı kapalı bir döngüde çalışır. Rankine çevriminde üretilen iş bir türbin vasıtasıyla elektriğe dönüştürülür. Çalışma akışkanı olarak birçok madde kullanılabilirken, genellikle basit kimyası, düşük maliyeti ve termodinamik özellikleri nedeniyle su seçilir.

Atık ısıdan elektrik üretimi için en yaygın olarak kullanılan sistemdir. Rankine çevrimi, termodinamik bir çevrimdir. Çevrim 4 ana elemandan oluşur. Bunlar, pompa, kazan, türbin ve yoğuşturucudur.

4.1.1. İdeal Rankine çevrimi

Şekil 4.1'de Basit İdeal Rankine Çevrimi gösterilmiştir. Rankine çevriminde dört süreç vardır. Şekil 4.1'de bu süreçler numaralar ile gösterilmiştir. Basit ideal Rankine çevrimi prosesleri aşağıdaki şekilde açıklanabilir [45];

- 1-2 Pompada izantropik sıkıştırma
- 2-3 Kazanda sabit basınçta ısı girişi
- 3-4 Türbinde izantropik genleşme
- 4-1 Yoğuşturucuda sabit basınçta ısı atılması



Şekil 4.1. Basit ideal Rankine çevrimi

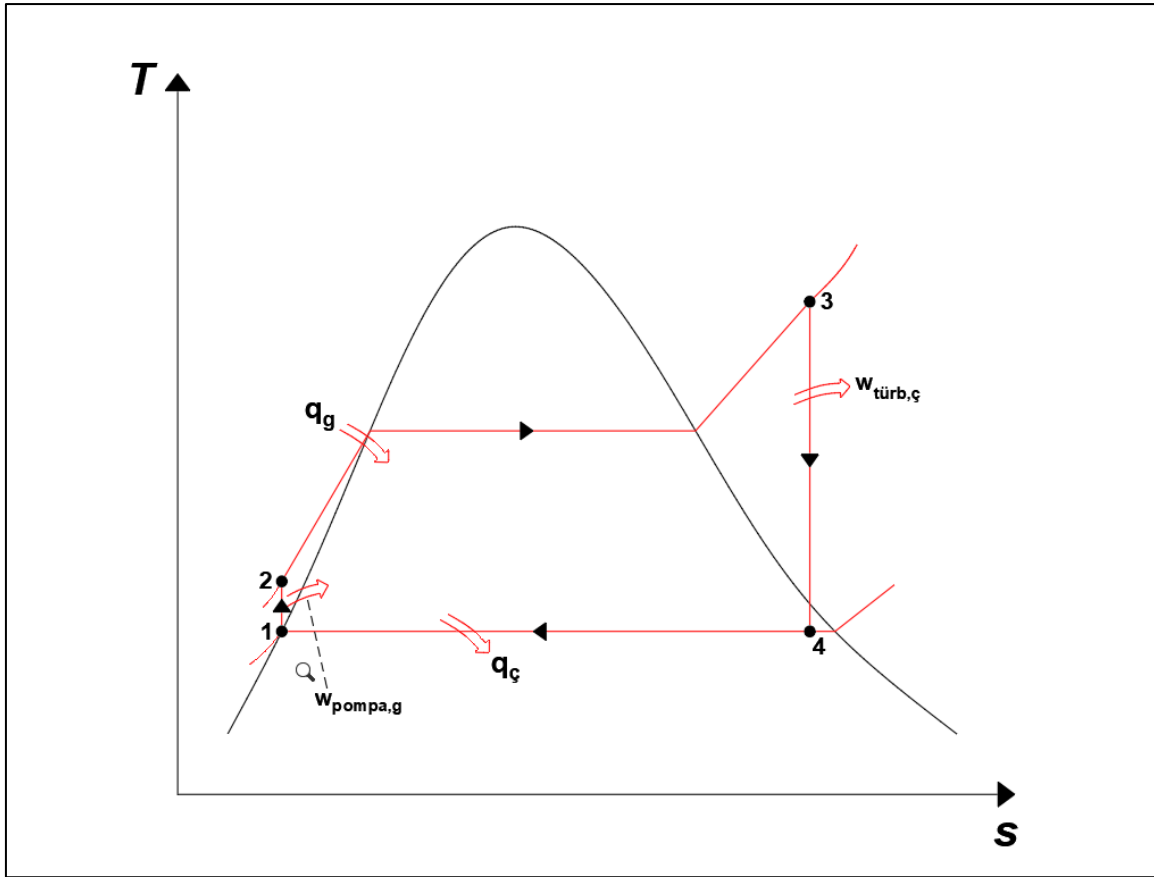
1-2 Önce çalışma akışkanı, düşük basınçtan, yüksek basınca pompalanır (İdeal şartlarda izentropik olarak). Pompalama için güç girişine ihtiyaç vardır (Örneğin mekanik veya elektrik gücü).

2-3 Yüksek basınçlı sıvı bir ısıtıcıya girer, bir dış ısı kaynağı ile sabit basınçta kızgın buhar halini alana dek ısıtılır. Genelde ısı kaynağı olarak, kömür, doğal gaz veya nükleer güç kullanılır.

3-4 Kızgın buhar, türbin boyunca genişler ve güç çıkışı oluşturur. İdeal şartlarda, bu genişleme izentropiktir. Bu olay buharın basınç ve sıcaklık kaybetmesine sebep olur.

4-1 Buhar daha sonra yoğuşturucuya girer, doymuş sıvı halini alana kadar soğutulur. Bu sıvı daha sonra tekrar pompaya girer ve çevrim tekrar eder.

Şekil 4.2’de ideal Rankine çevrimine ait T-s diyagramı belirtilmiştir.



Şekil 4.2. Rankine çevrimi T-s diyagramı

Su, pompaya 1 halinde doymuş sıvı olarak girer ve izantropik bir hal değişimi ile kazan basıncına sıkıştırılır. Su sıcaklığı, izantropik sıkıştırma işlemi sırasında bir miktar artar. Su, kazana 2 halinde sıkıştırılmış sıvı olarak girer ve 3 halinde kızgın buhar olarak çıkar. Kazan temelde büyük ısı değiştiricisidir. 3 halindeki kızgın buhar, türbinde izantropik olarak genişler ve bir mili döndürerek iş yapar. Bu hal değişimi sırasında buharın basıncı ve sıcaklığı azalarak 4 halindeki değerlere ulaşılır. Buhar, türbinden çıktıktan sonra yoğuşturucuya girer. Yoğuşturucuya giren buhar genellikle yüksek kuruluk derecesinde doymuş sıvı-buhar karışımı halindedir. Yoğuşturucu da büyük bir ısı değiştiricisidir. Buhar, burada dış ortama ısı vererek yoğuşur. Su, yoğuşturucudan doymuş sıvı olarak çıkar ve pompaya girerek çevrimi tamamlar.

Buharın birim kütlesi için, kararlı akıştaki enerji denklemi Eşitlik 4.1’de verilmiştir.

$$(q_g - q_\zeta) + (w_g - w_\zeta) = h_\zeta - h_g \quad (4.1)$$

Sistemdeki her bir ekipman için enerji denklemleri aşağıda verilmiştir.

Pompa için;

$$w_{p,g} = h_2 - h_1 = v(P_2 - P_1) \quad (4.2)$$

Kazan için;

$$q_g = h_3 - h_2 \quad (4.3)$$

Türbin için;

$$w_{t,\zeta} = h_3 - h_4 \quad (4.4)$$

Yoğuşturucu için;

$$q_\zeta = h_4 - h_1 \quad (4.5)$$

Rankine Çevriminin ısı verimi;

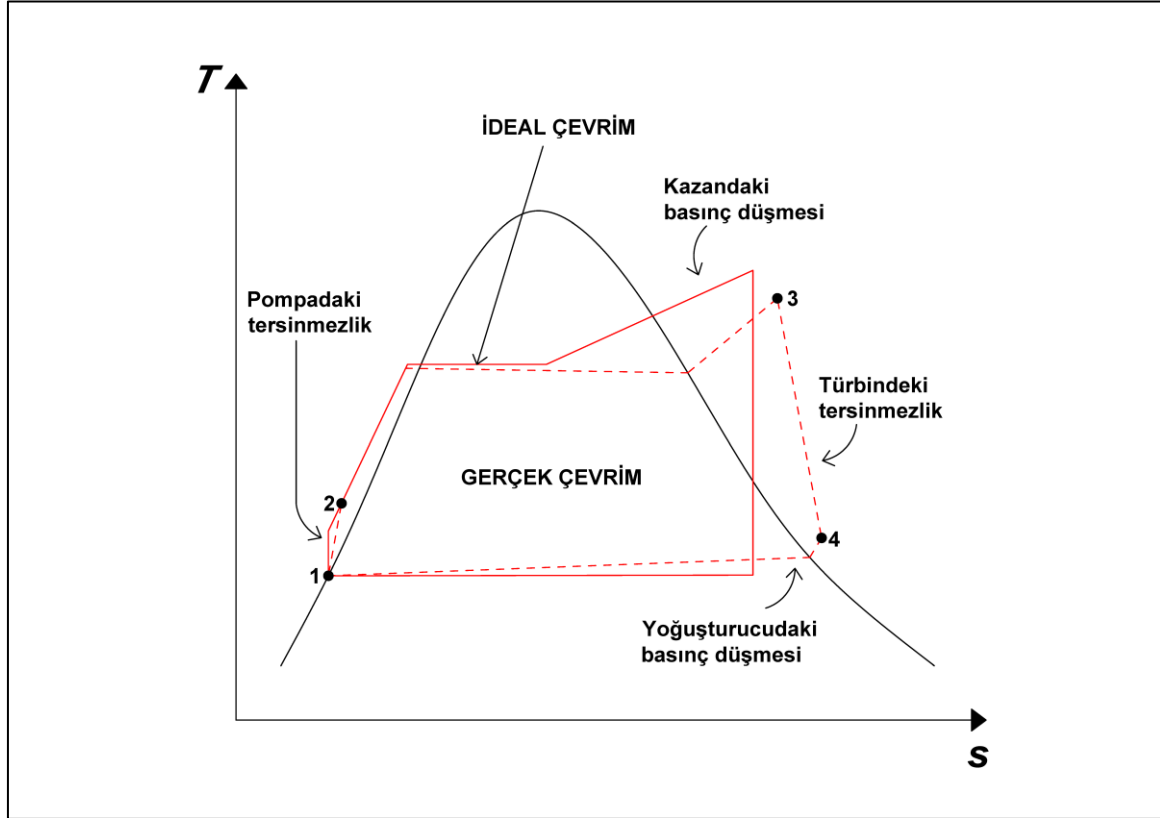
$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_g} = 1 - \frac{q_\zeta}{q_g} \quad (4.6)$$

Sistemin ideal net işi;

$$w_{net} = q_g - q_\zeta = w_{t,\zeta} - w_{p,g} \quad (4.7)$$

4.1.2. Gerçek buhar çevrimi

Gerçek buharlı güç çevrimi ideal Rankine çevriminden farklıdır. Bunun nedeni Şekil 4.3'te gösterilen tersinmezliklerdir.



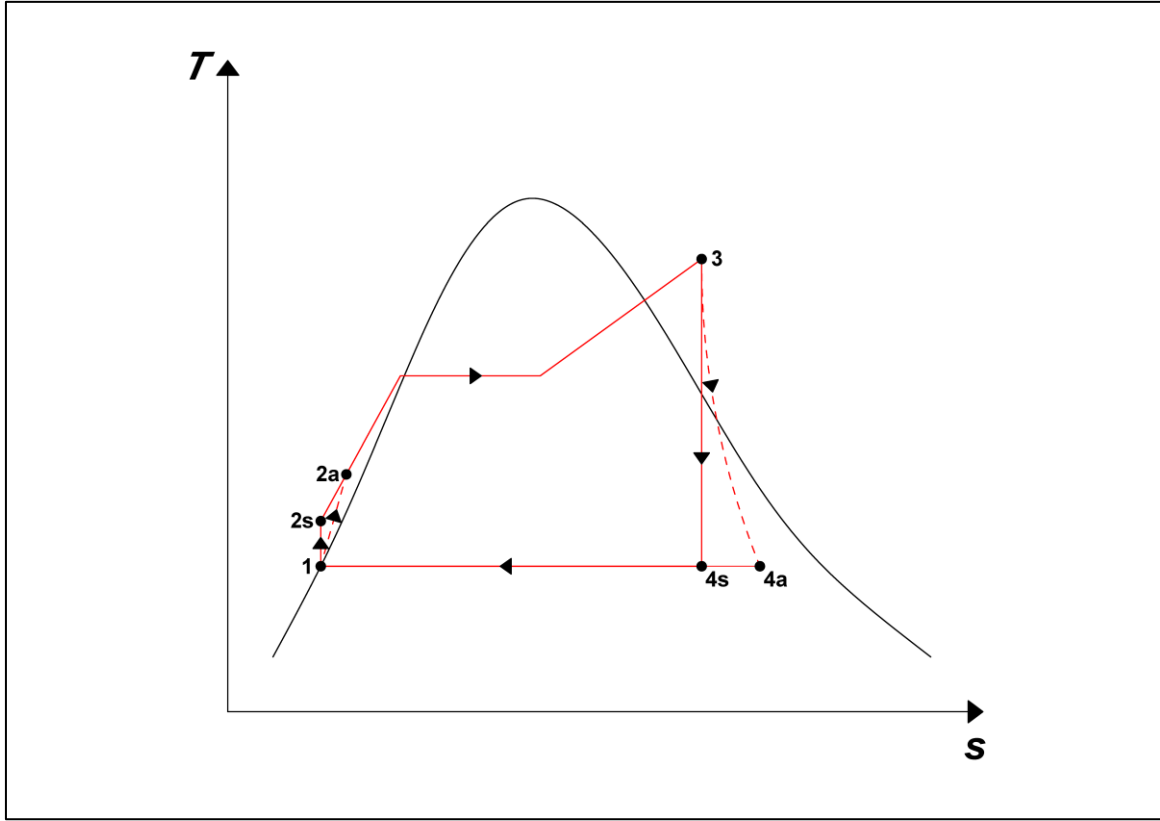
Şekil 4.3. Gerçek buhar çevrimi T-s diyagramı

Pompa ve türbinde olan tersinmezlikler özel bir önem taşır. Tersinmezlikler sonucu bir pompa daha çok iş gerektirir, bir türbin daha az iş yapar. İdeal koşullarda bu makinelerde akış izantropiktir. Gerçek pompa ve türbinlerin izantropik pompa ve türbinlerden farklılığı, adyabatik verim tanımıyla açıklanabilir. Eşitlik 4.7 ve Eşitlik 4.8'de bu verimler gösterilmiştir. η_p pompa ve η_t türbinin adyabatik verimleridir.

$$\eta_p = \frac{W_s}{W_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (4.8)$$

$$\eta_T = \frac{W_a}{W_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (4.9)$$

Bu denklemlerde 2 ve 4 indisleri sırasıyla pompa ve türbinin gerçek çıkış halleri, 2s ve 4s indisleri ise izantropik çıkış hallerini göstermektedir. Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Pompa ve türbin tersinmezlikleri

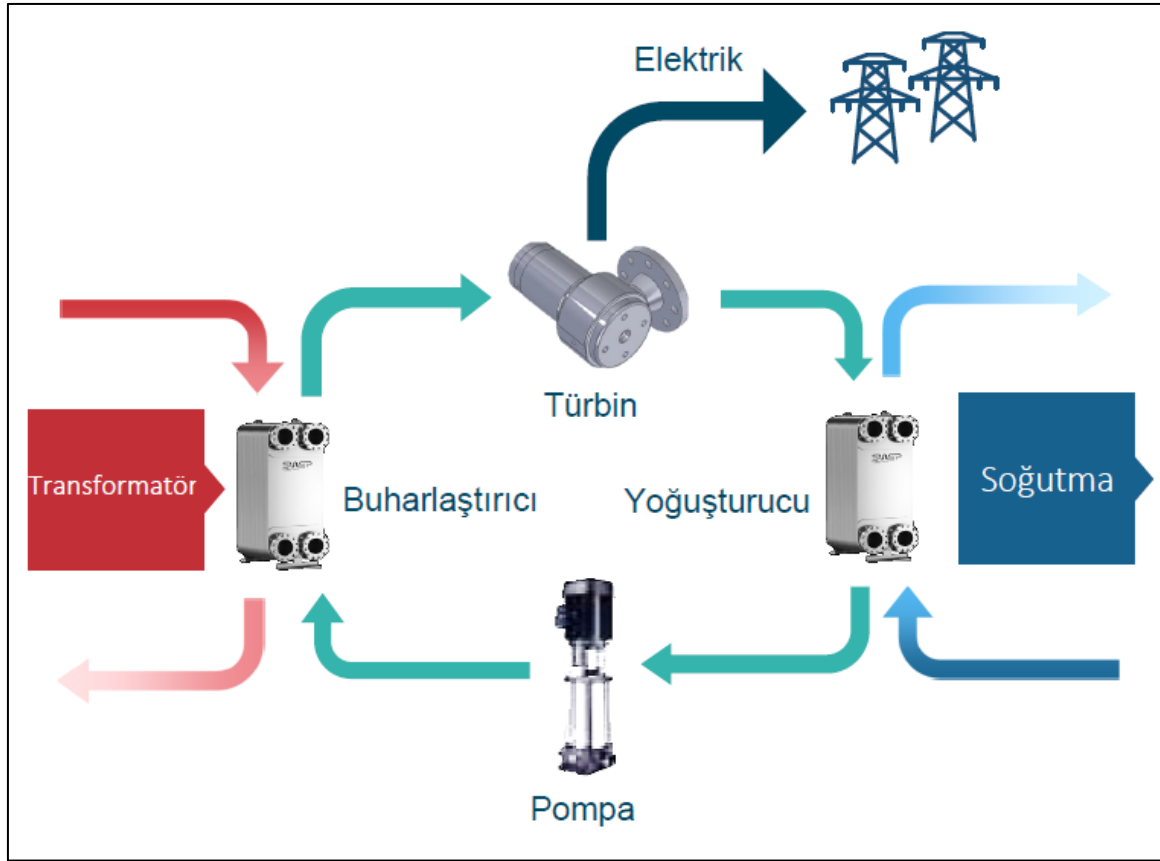
4.2. Organik Rankine Çevrimi

Günümüzde, organik akışkanların çalışma akışkanı olarak kullanıldığı Organik Rankine Çevrim sistemleri, atık ısının geri kazanılması için dikkate alınan önemli teknolojilerden birisi olarak değerlendirilmektedir. Organik Rankine Çevrimi, düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarının değerlendirilmesinde kullanılan bir buhar çevrimi çeşididir. Organik Rankine Çevrimi, düşük sıcaklıktaki enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir. Rankine çevriminde kullanılan suyun düşük sıcaklıklarda, çok düşük basınçlarla çalışması, su buharının bu uygulamalarda kullanımını zorlaştırmaktadır. Bu yüzden, Rankine çevrimleri, kritik sıcaklıkları düşük farklı organik akışkanlar kullanılarak düşük sıcaklık uygulamalarına uygun hale getirilmektedir. Organik Rankine Çevrimi buhar türbini çevrimi ile hemen hemen aynı özelliklere sahiptir.

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), Rankine Çevriminden türetilmiştir ve her ikisi de aynı çalışma prensibine ve aynı ana bileşenlere sahiptir. Aralarındaki temel fark, çalışma sıvısıdır. Rankine Çevriminde çalışma sıvısı olarak su kullanırken, Organik Rankine Çevrimi'nde çok sayıda farklı organik akışkan kullanabilir.

Organik Rankine Çevriminin avantajları şunlardır;

- Diğer çevrimler ile kıyaslandığında daha yüksek atık ısı geri kazanımı sağlar.
- ORÇ ile daha yüksek termal verim ve daha fazla net güç elde edilir.
- Sistem hacmini ve ağırlığını küçültmek kolaydır.
- Termoelektrik jeneratör gibi diğer sistemlere kıyasla maliyeti daha düşüktür.



Şekil 4.5. Atık ısı kaynaklı Organik Rankine Çevrimi

Şekil 4.5'te Atık ısı kaynaklı Organik Rankine Çevriminin şematik görüntüsü verilmiştir. Bu şekilde de görüldüğü üzere sistemin temel elemanları buharlaştırıcı, türbin, yoğuşturucu ve pompadır. Sistemdeki akışkanın sıvı fazda buharlaştırıcıya gönderilmesiyle çevrim başlar. Buharlaştırıcıdaki sıcak kaynak sayesinde çalışma akışkanı doymuş ya da kızgın buhar fazına geçer. Elde edilen buhar fazındaki çevrim akışkanı türbinde

genişlemesiyle elektrik enerjisi üretimi sağlanmaktadır. Türbinden çıkan buhar fazındaki organik akışkan yoğuşturucudan geçirilerek tekrar sıvı faza dönüştürülür, pompa yardımı ile çevrime tekrar gönderilir.

4.2.1. Organik Rankine Çevriminin bileşenleri

Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu

Buharlaştırıcı, transformatör atık ısısından aldığı enerji ile çevrimde kullanılan organik akışkanı sıvı fazından kızgın buhar fazına dönüştürür. Yoğuşturucu ise türbinden genişlererek çıkan ıslak buharın yoğuşturularak sıvı hale gelmesinde kullanılmaktadır. ORÇ sisteminde kullanılan buharlaştırıcı ve yoğuşturucu genellikle ısı değiştiricilerdir. Gövde borulu (shell-and-tube) ya da plakalı ısı değiştiriciler kullanılmaktadır.

Türbin

Türbin, enerji üretiminde verimliği sınırlayan ve enerji maliyetine etki eden en kritik komponenttir. Buharlaştırıcıdan kızgın buhar olarak çıkan organik akışkan, türbin kanatçıklarına çarparak türbin miline hareket verir, hareket milin çıkışında mekanik işe dönüşür.

Buhar çevrimlerinde türbin üzerindeki basınç oranı ve entalpi düşüşü çok yüksektir. Bu, birkaç genişleme aşamasına sahip türbinlerin kullanılmasını içerir. ORÇ çevrimlerinde entalpi düşüşü çok daha düşüktür ve genellikle tek veya iki kademeli türbinler kullanılır, bu da maliyetlerini düşürür.

ORÇ sisteminin performansı, türbinin performansı ile güçlü bir şekilde ilişkilidir. Makinenin seçimi, çalışma koşullarına ve sistemin boyutuna bağlıdır. ORÇ sistemlerinde eksenel türbinler ve radyal türbinler kullanılabilir [46].

Pompa

Yoğuşturucudan çıkan sıvı haldeki organik akışkanı yoğuşturucu alçak basıncından buharlaştırıcı yüksek basıncına yükseltmekte kullanılmaktadır. ORÇ sisteminde kullanılan pompalar, pozitif yer değiştirmeli veya santrifüj pompalardır.

4.2.2. Çalışma akışkanı

Organik Rankine Çevriminde kullanılacak akışkanın aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekmektedir [14]:

- Termodinamik performans: Verimlilik ve/veya çıkış gücü, ısı kaynağı ve soğutucu sıcaklıkları için mümkün olduğunca yüksek olmalıdır. Bu performans, çalışma sıvısının birbirine bağlı bir dizi termodinamik özelliğine bağlıdır: kritik nokta, özgül ısı, yoğunluk, vb. Her bir termodinamik özellik için bağımsız olarak bir optimum belirlemek kolay değildir. En yaygın yaklaşım, farklı aday çalışma sıvılarını kıyaslarken, bir termodinamik modelle çevrimi simüle etmekten ibarettir.
- Yüksek buhar yoğunluğu: Bu parametre, özellikle çok düşük yoğunlaşma basıncı gösteren sıvılar (örneğin silikon yağları) için kilit öneme sahiptir. Düşük yoğunluk, daha yüksek bir hacim akış hızına yol açar: basınç düşüşlerini sınırlamak için ısı eşanjörlerinin boyutları büyütülmelidir. Bu, sistemin maliyeti üzerinde ihmal edilemez bir etkiye sahiptir.
- Düşük viskozite: Hem sıvı hem de buhar fazlarında düşük viskozite, ısı eşanjörlerinde yüksek ısı transfer katsayıları ve düşük sürtünme kayıpları ile sonuçlanır.
- Yüksek iletkenlik: Isı eşanjörlerinde yüksek ısı transfer katsayısı ile ilgilidir.
- Kabul edilebilir buharlaşma basıncı: Daha yüksek basınçlar genellikle daha yüksek yatırım maliyetlerine ve artan karmaşıklığa yol açar.
- Yüksek sıcaklık kararlılığı: Suyun aksine, organik akışkanlar genellikle yüksek sıcaklıklarda kimyasal bozulmaya ve ayrışmaya maruz kalır. Bu nedenle maksimum ısı kaynağı sıcaklığı, çalışma sıvısının kimyasal kararlılığı ile sınırlıdır.
- Erime sıcaklığı: Çalışma sıvısının donmasını önlemek için erime noktası, yıl boyunca en düşük ortam sıcaklığından daha düşük olmalıdır.
- Yüksek güvenlik seviyesi: Soğutucu akışkanlar, toksisite, yanıcılık, boğulma ve/veya fiziksel tehlikelerle ilgili olanlar dahil olmak üzere çok sayıda tehlike oluşturabilir. Amerikan ısıtma, soğutma ve klima mühendisliği derneği (ASHRAE) standart 34, soğutucu akışkanları toksisite ve yanıcılık temelinde tehlikeye göre sınıflandırır.
- Düşük Ozon Tüketme Potansiyeli (ODP): Ozon Tahribatına neden olan Cİ ve Br içeren tüm soğutucular değişen oranlarda ozon tahribatına neden olmaktadır. Montreal Protokolü kapsamında üretimleri durdurulan CFC'ler yüksek ODP değerine sahip maddelerdir. Ancak HCFC'ler de ozon tüketme potansiyeline sahip olmalarına rağmen

bu oran çok düşük olduğundan 2030 yılına kadar denetim altında olmak kaydı ile kullanılmalarına izin verilmiştir. Mevcut soğutucu akışkanların ODP'si ya sıfırdır ya da sıfıra çok yakındır.

- GWP (Greenhouse Warming Potential) değeri: Ozon tahribatının yanı sıra çevre açısından gündeme gelen bir başka zararlı etki de sera etkisidir. Küresel ısıtma etkisi olarak tanımlanan bu değer de soğutucu seçiminde önemli bir etkindir.
- Kolay bulunabilirlik ve düşük maliyet: Soğutmada veya kimya endüstrisinde halihazırda kullanılan sıvıların elde edilmesi daha kolay ve daha ucuzdur.

5. YÖNTEM

Bu tez kapsamında öncelikle incelenecek transformatörler için yıllık güç verileri elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak, transformatörün çalışmasını sürdürebilmesi için transformatörden atılması gereken ısı miktarı hesaplanmıştır. Daha sonra, bu atık ısıyı kullanarak enerji üretecek ORÇ sistemi için termodinamik tasarım yapılarak eleman kapasiteleri, sistem verimi ve bu sistem kullanılarak yıl boyunca üretilebilecek enerji miktarı hesaplanmıştır. Son olarak, sistem maliyeti belirlenmiş ve yatırımın ekonomik değeri incelenmiştir.

5.1. Güç Verilerinin Eldesi

Güç verilerinin elde edilmesinde TEİAŞ'tan temin edilen yük tevzi verileri kullanılmıştır. Yük tevzi, Türkiye'nin elektrik şebekesini modelleme, izleme, raporlama, analiz etme ve ileriye yönelik tahminleme için kullanılmaktadır. Yük tevzi değerleri, elektrik şebekelerinin izlenebilmesi açısından çok önemlidir. Merkezi bir kontrol noktasından geniş bir coğrafi alana yayılmış elektrik şebekelerinin gerçek-zamanlı olarak izlenmesi ve sistem işletme işlevlerini güvenilir, emniyetli ve ekonomik olarak yerine getirme imkânı sunmaktadır.

Bu veriler kullanılarak güç transformatörlerin yıl boyunca hangi dönemlerde veya hangi saat aralıklarında ne kadar güçte çalıştığı belirlenmiştir. Alınan bu veriler, yıllık veriler olup ve 365 gün boyunca 24 saatlik değerler bulunmaktadır. Her bir güç transformatörü için 8760 adet güç verisi incelenmiştir.

5.2. Atık Isıların Temini

Transformatörlerin düzgün çalışabilmesi için transformatörden atılması gereken belirli bir ısı vardır. Transformatörde oluşan toplam kayıplar, yani transformatörün atması gereken toplam ısı miktarı hesaplanan boşa kayıplar ve yükte kayıpların toplamıdır (Bkz. 3.1.1). Bu şekilde hesaplamalar yapılarak atılması gereken toplam atık ısı miktarı belirlenmiştir. Atık ısıların belirlenmesi için TEİAŞ'tan alınan yıllık yük tevzi verileri kullanılmıştır.

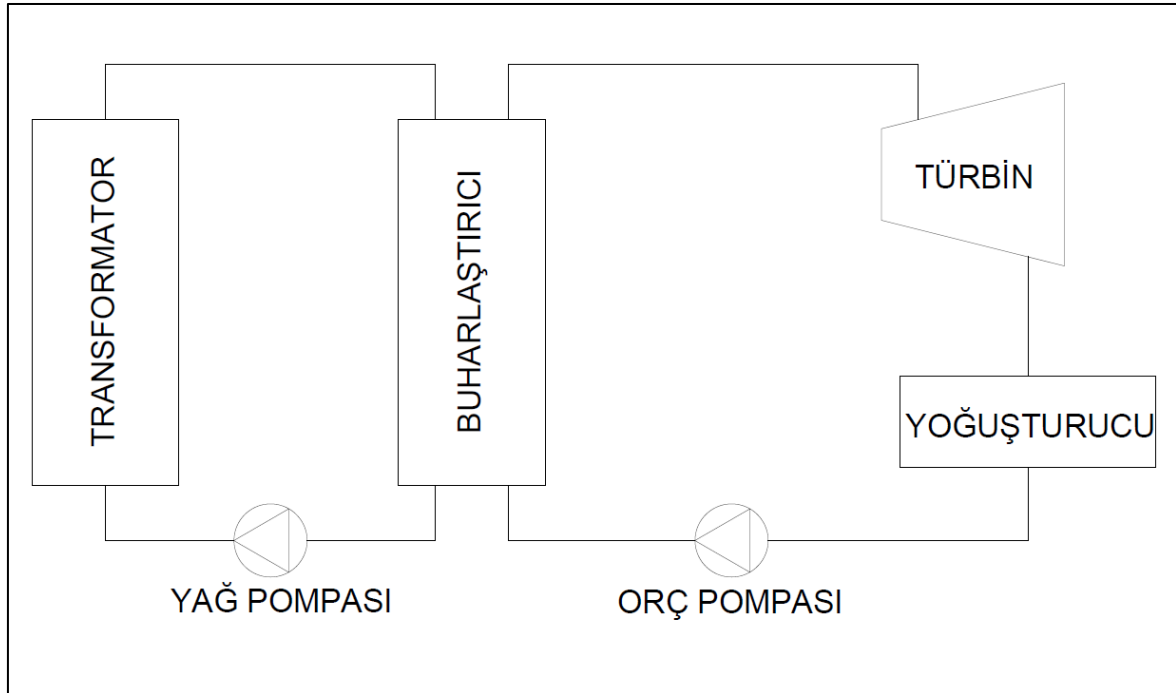
Boşta ve yükte kayıpların toplamı ile elde edilen değerler transformatörün tam yükte çalışması durumunda atacağı atık ısı miktarıdır. Genelde transformatör tam yükte çalışmadığı için daha düşük çıktılar elde edilmektedir. Transformatör tam yükte çalışmadığında ortaya çıkacak olan atık ısı miktarını bulabilmek için Eşitlik 5.1 kullanılmaktadır [32].

$$Atık\ Isı\ Miktarı = \frac{\text{Çalışma Gücü}^2}{\text{Anma Gücü}^2} \times Atık\ Isı\ Miktarı(Tam\ Yükte) \quad (5.1)$$

TEİAŞ'tan temin edilen saatlik yük tevzi verilerinden elde edilen güç değerleri ile Eşitlik 5.1 kullanılarak transformatörlerin çalışma gücüne göre atık ısı miktarları belirlenmiştir. Bu işlem farklı güçteki güç transformatörleri için ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu işlem sayesinde transformatörlerin atmış olduğu atık ısı miktarı yıl boyunca saatlik olarak hesaplanmıştır.

5.3. Termodinamik Tasarım

Çalışma kapsamında transformatörde açığa çıkan atık ısıyı alarak elektrik enerjisi üretecek Organik Rankine Çevrimi tasarlanmıştır. Sistem tasarımı Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Sistemde ısı kaynağı olarak güç transformatörlerinin atık ısısı kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Transformatör atık ısısı kaynaklı ORÇ sistemi

Bu tez kapsamında, çalışma akışkanı olarak ORÇ sistemlerinde yaygın olarak kullanılan R134a, R245fa ve R123 organik akışkanları incelenmiştir. Çizelge 5.1’de tez kapsamında ele alınan soğutucu akışkanların özellikleri ve çevresel etkileri belirtilmiştir. Ayrıca, incelenen organik akışkanlar aşağıda açıklanmıştır [17].

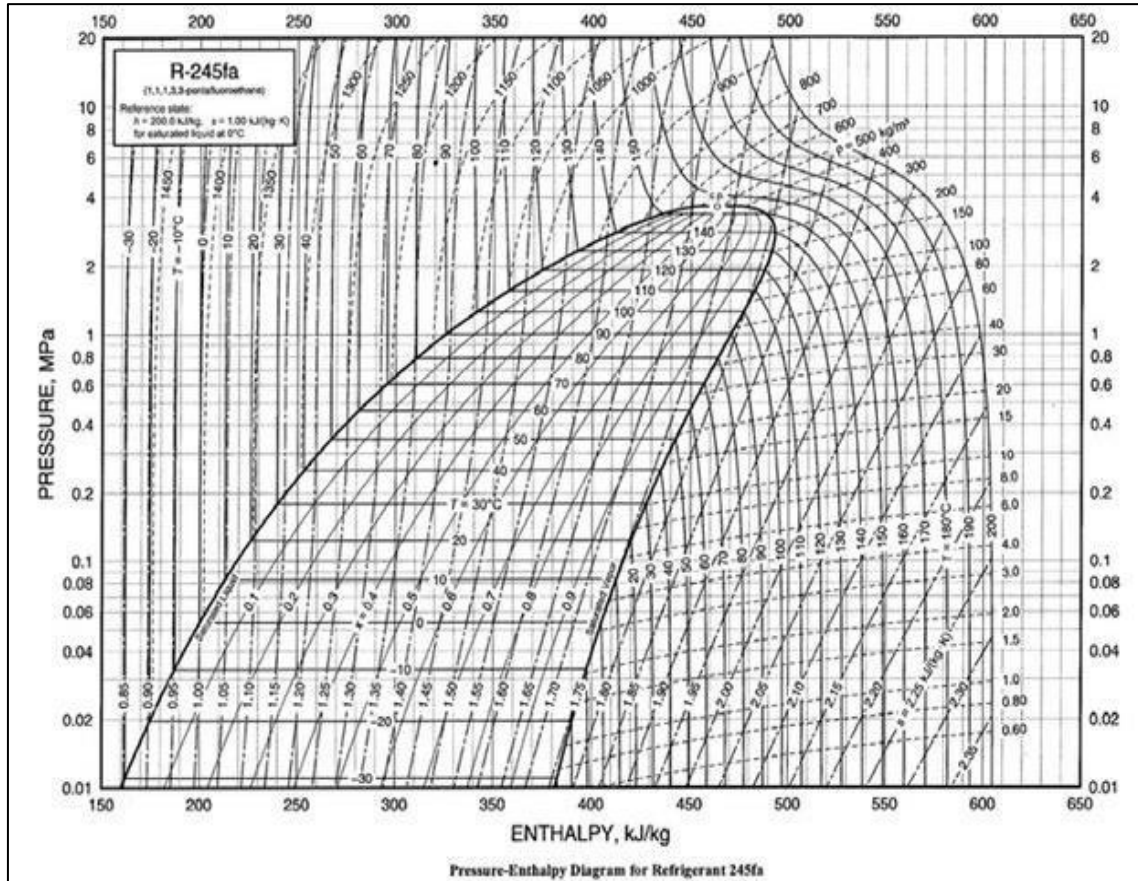
Çizelge 5.1. Tez kapsamında ele alınan akışkanlar

Org. Akışkan	ASHRAE 34 ^a	GWP	ODP	T _c (°C)	P _c (bar)
R245fa	B1	950	0	154,1	36,4
R134a	A1	1300	0	101,1	40,6
R123	B1	76	0,012	183,7	36,68

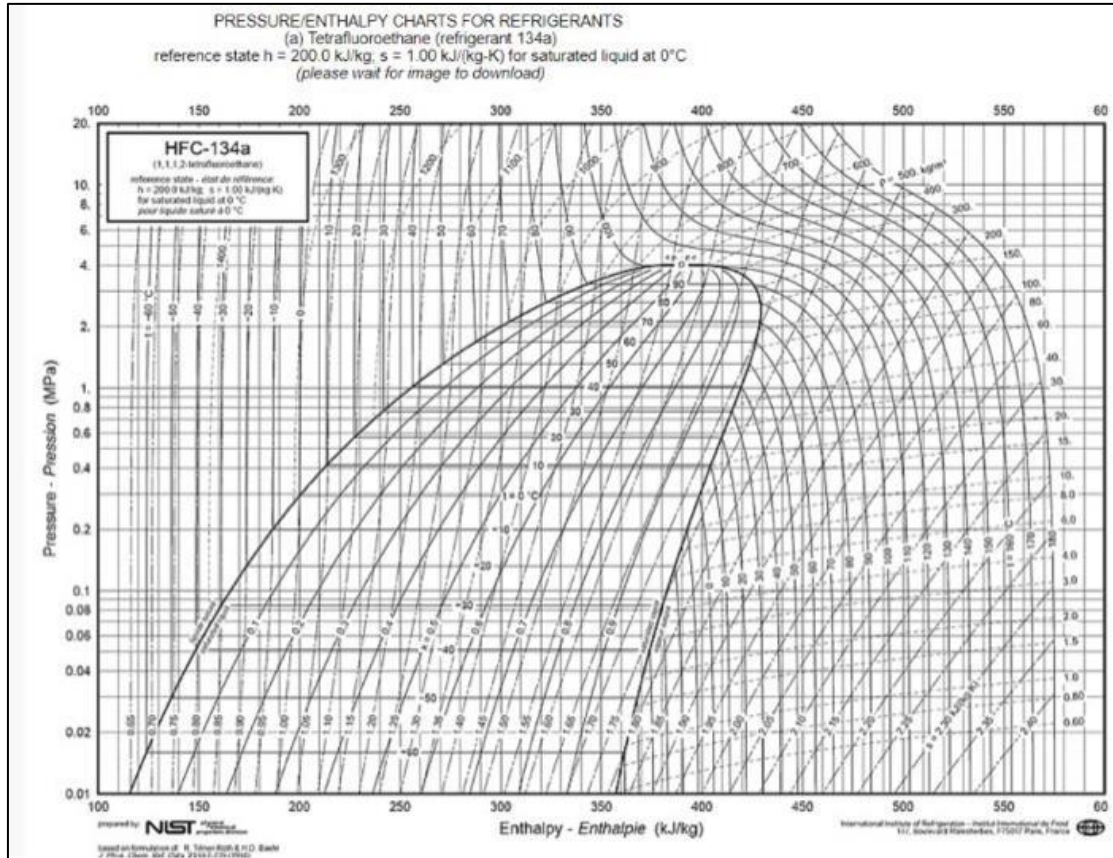
^a ASHRAE Standart 34 – Soğutucu güvenlik sınıflandırması. 1: Yanıcılık eğilimi yok; 2: Daha düşük yanıcılık; 3: Daha yüksek yanıcılık; A: Daha düşük toksisite; B: Daha yüksek toksisite

- R245fa: 1,1,1,3,3-Pentafloropropan (HFC-245fa) olarak da adlandırılır. Bir hidroflorokarbondur. Esas olarak kapalı hücreli sprey köpük yalıtımı için kullanılan renksiz bir gazdır.
- R134a: R134a, soğutucularda kullanılan renksiz inert gaza (belirli şartlar altında kimyasal reaksiyona girmeyen gaz) verilen addır. Tam adı 1,1,1,2-Tetrafloretan olan R134a gazı, 90'lı yıllarda ozon tabakasına zararlı olduğu için birçok ülkede kullanımı yasaklanan R12 (diklordiflormetan) gazının yerine kullanılmak üzere üretilmiştir. Genellikle R134a, Freon 134a, HFC-134a ya da tetrafloretan olarak adlandırılır. Üretim amacına uygun olarak ozon tabakası üzerinde herhangi bir zararlı etkisi yoktur. R134a, taşıt araçlarının iklimlendirme donanımları, konut tipi soğutucular ve orta çaplı işletmeler veya yapılarda su soğutma cihazlarında kullanılır.
- R123: 2,2-Dikloro-1,1,1-trifloroetan veya HCFC-123, düşük basınçlı soğutma ve HVAC sistemlerinde CFC-11'e alternatif olarak kabul edilir. R245fa akışkanının aksine köpük üfleme işlemlerinde kullanılmamalıdır. HCFC-123, büyük tonajlı santrifüj soğutma grubu uygulamalarında kullanılır ve şu anda HVAC uygulamaları için piyasada kullanılan en verimli soğutucudur.

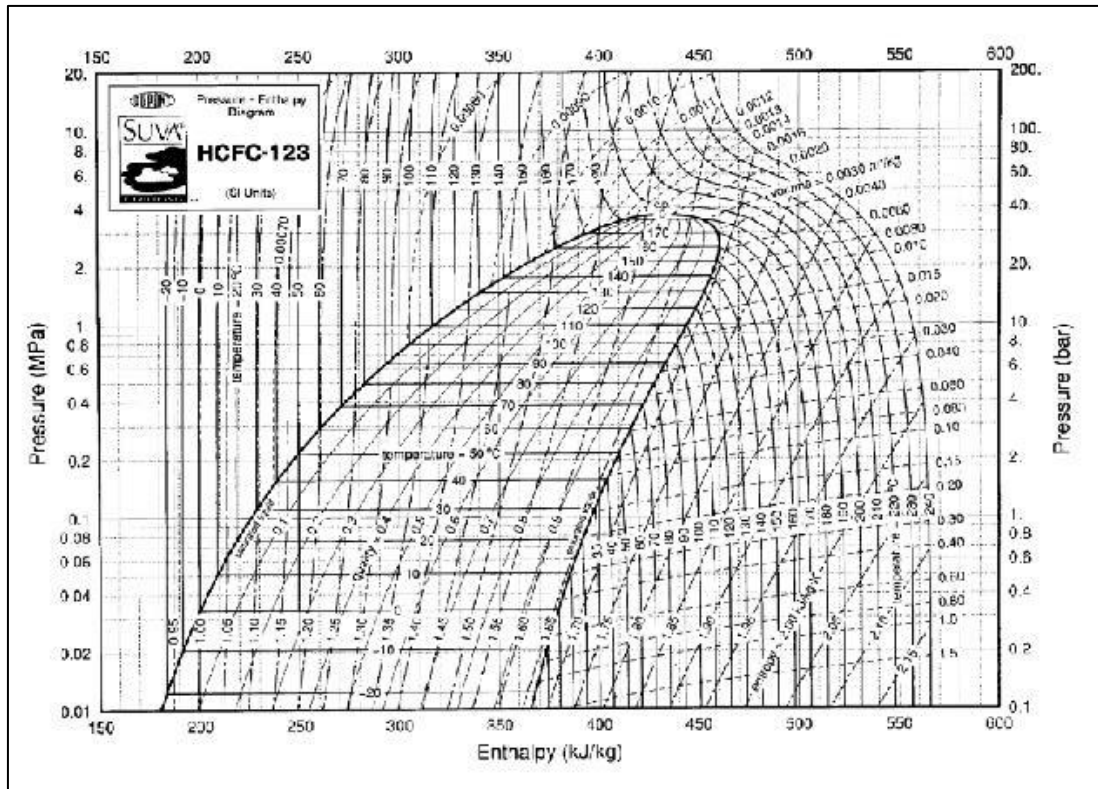
Kullanılan akışkanların Basınç-Entalpi diyagramları aşağıdadır. Bu diyagramlar akışkanların termodinamik özelliklerinin grafiksel bir temsidir. Şekil 5.2 R245fa, Şekil 5.3 R134a ve Şekil 5.4 R123 organik akışkanlarına aittir. Çevrimdeki kabullerle birlikte bu diyagramlar kullanılarak çevrimin alçak ve yüksek basınçları belirlenmiştir. Sonrasında net entalpi değerlerini bulabilmek için REFPROP yazılımı kullanılarak entalpi değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.2. R245fa Basınç-Entalpi diyagramı



Şekil 5.3. R134a Basınç-Entalpi diyagramı



Şekil 5.4. R123 Basınç-Entalpi diyagramı

Bu çalışmada kullanılan çeşitli varsayımlar ve diğer koşullar aşağıda sıralanmıştır;

- Tüm süreçler kararlı durumda (steady state) olarak modellenmiştir.
- Pompadaki sıkıştırma ve türbindeki genişleme adyabatik olarak gerçekleşmektedir.
- Eşanjör ve borulardaki ısı kayıpları ve basınç düşüşleri ihmal edilmiştir.
- Transformatör çıkışındaki yağ sıcaklığı dikkate alınarak buharlaştırıcı çıkış sıcaklığı belirlenmiştir.
- Pompa ve türbinin izentropik verimleri günümüzde ORÇ sistemlerinde kullanılan sistemlerin ortalama verimleri dikkate alınarak belirlenmiştir.
- Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı gövde borulu (shell-and-tube) ısı değiştirici kabul edilecektir.

Transformatör yağına ait sıcaklık değerlerini bulabilmek için transformatörün testi esnasında termal kamera kullanılmıştır. Bu termal kamera sayesinde belirli zaman aralıklarıyla, belirli bölgeler için transformatör içerisindeki yağın sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Elde edilen veriler termodinamik tasarımda kullanılmıştır.

Organik Rankine çevriminin performans analizinde, bireysel sistem bileşenlerinin performansını ve çevrimin ısı verimini bulmak için termodinamiğin birinci kanunu kullanılır. Sistemdeki kütle dengesi Eşitlik 5.2’de gösterilen şekilde yazılabilir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\chi \quad (5.2)$$

Bu eşitlikte $\dot{m}$ kütleli debiyi, alt indis “g” giren kütleli, “ χ ” çıkan kütleli temsil etmektedir. Genel enerji dengesi $E_g = E_\chi$ şeklinde gösterilebilir. Eşitlik 5.3’te gösterilmiştir.

$$Q_{net} + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{W}_{net} + \sum \dot{m}_\chi h_\chi \quad (5.3)$$

Bu eşitlikte Q_{net} sisteme giren net ısıyı, $\dot{W}_{net}$ sistemden elde edilen net işi ve h entalpi değerini göstermektedir.

Buharlaştırıcıya verilen ısı miktarı Q_g olarak belirtilir. Eşitlik 5.4'te belirtildiği gibi hesaplanır.

$$Q_g = \dot{m} \times (h_3 - h_2) \quad (5.4)$$

Yoğuşturucudan ortama verilen ısı ise Q_ϕ olarak belirtilir. Eşitlik 5.5'te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$Q_\phi = \dot{m} \times (h_1 - h_4) \quad (5.5)$$

Türbin ve pompa için elde edilen iş miktarları Eşitlik 5.6 ve Eşitlik 5.7'de belirtilmiştir.

$$W_{t\ddot{u}rbin} = \dot{m} \times (h_3 - h_4) \quad (5.6)$$

$$W_{pompa} = \dot{m} \times (h_2 - h_1) \quad (5.7)$$

Elde edilen net iş miktarı ise bu ikisi arasındaki farka eşittir. Eşitlik 5.8'de gösterilmiştir.

$$W_{net} = (W_{t\ddot{u}rbin} - W_{pompa}) \quad (5.8)$$

Çevrimin verimi net işin giren ısıya oranıdır. Eşitlik 5.9'da gösterilmiştir.

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_g} \quad (5.9)$$

Belirtilen denklemleri kullanabilmek için gerekli olan, çevrimdeki entalpi değerleri belirlenirken şu yollar izlenecektir:

- Kabul edilen sıcaklık değerleri kullanılarak alçak ve yüksek basınçlar (P_1 , P_2 , P_3 ve P_4) belirlenmiştir.
- Yoğuşturucu basıncının belirlenmesi ve yapılan kabuller ile yoğuşturucu çıkışındaki entalpi ve özgül hacim değeri (h_3 ve V_3) hesaplanmıştır.
- Sonrasında Eşitlik. 5.10 kullanılarak pompa çıkışındaki entalpi (h_2) değeri belirlenmiştir.

$$h_2 = h_1 + V_1(P_{buh} - P_{yoğ}) \quad (5.10)$$

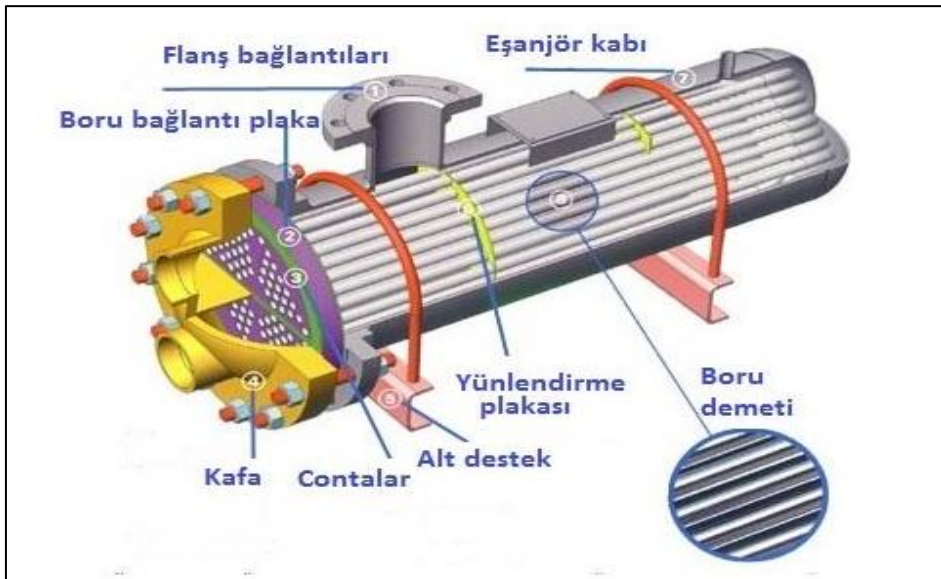
- Yapılan kabuller ile türbin girişindeki entalpi ve entropi değerleri (h_3 ve s_3) hesaplanacaktır. Akışkanın Basınç-Entalpi diyagramı ve REFPROP yazılımı kullanılmıştır.
- Daha sonra, entropi eşitliği kullanılarak türbin çıkışındaki, izantropik durumdaki entalpi (h_{4s}) değeri belirlenmiştir.
- Eşitlik 4.9’da belirtilen türbin verimi kullanılarak türbinin gerçek durumdaki entalpisi (h_{4a}) hesaplanmıştır.

Elde edilen entalpi değerleri kullanılarak çevrimin termal verimi hesaplanırken Eşitlik 5.11 kullanılmıştır.

$$\eta_{th} = \frac{h_3 - h_{4a} - h_2 + h_1}{h_3 - h_2} \quad (5.11)$$

5.3.1. Isı değıştirici tasarımı

Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu gövde borulu (shell-and-tube), ters akışlı ısı değıştirici kabul edilmiştir. Gövde borulu ısı değıştirici Organik Rankine Çevrimi sisteminde en yaygın kullanılan ısı değıştirici çeşididir. Bir akışkan, gövdeye yerleştirilen boru demetleri içerisinde dolanırken, diğer akışkan borular etrafında dolaşarak ısı transferi gerçekleştirilir. Gövde borulu ısı değıştirici yapısı Şekil 5.5’te gösterilmiştir [47].



Şekil 5.5. Gövde borulu ısı değıştirici yapısı

Isı değiştiricilerde hesaplamalar yapılırken Logaritmik Sıcaklık Farkı (LMTD) yöntemi uygulanacaktır. Gövde borulu bir ısı değiştiricisinde, akışkanlar arasında geçen ısı miktarı, toplam ısı transfer katsayısına, ısı transfer alanına ve logaritmik sıcaklık farkına bağlıdır. Akışkanlar arasındaki enerji dengesi zıt akış kabulü yapılarak yazıldığı takdirde logaritmik sıcaklık farkının matematiksel ifadesi Eşitlik 5.12 ve Eşitlik 5.13 kullanılarak çıkarılabilir [48].

$$\delta Q = -C_h \cdot dT_h = -C_c \cdot dT_c \quad (5.12)$$

$$dT_h = \frac{-\delta Q}{C_h} \text{ ve } dT_c = \frac{-\delta Q}{C_c} \quad (5.13)$$

İki akışkan arasında transfer edilen ısı miktarı Eşitlik 5.14'teki gibi de yazılabilir.

$$\delta Q = U \cdot \Delta T \cdot dA \quad (5.14)$$

Burada $\Delta T = T_h - T_c$ olarak yazılabilir. Bu değer akışkanların yerel sıcaklık farkıdır. Yerel sıcaklık farkı Eşitlik 5.15'te olduğu gibi yazılabilir.

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c \quad (5.15)$$

Eşitlik 5.15, Eşitlik 5.12'e taşınarak Eşitlik 5.16 elde edilir.

$$d(\Delta T) = \delta Q \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad (5.16)$$

Eşitlik 5.16'da δQ yerine Eşitlik 5.14 yazılıp integrasyon işlemi yapılırsa Eşitlik 5.17 elde edilir.

$$\int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \cdot \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \cdot \int_1^2 dA$$

$$\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right) = -U \cdot A \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad (5.17)$$

Son olarak eşitlik 5.17’de C_h ve C_c değerleri Eşitlik 5.12’den çekilerek yazılırsa Eşitlik 5.18 elde edilir.

$$\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right) = -U.A\left(\frac{T_{h,i}-T_{h,o}}{Q} + \frac{T_{c,i}-T_{c,o}}{Q}\right) \quad (5.18)$$

Eşitlik 5.18’de $T_{h,i} - T_{c,o}$ ifadesi ΔT_1 , $T_{h,o} - T_{c,i}$ ifadesi ΔT_2 ile ifade edildiği takdirde akışkanlar arasındaki ısı transfer denklemi eşitlik 5.19 ile ifade edilmiştir.

$$Q = -U.A.\left(\frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}\right) \quad (5.19)$$

Eşitlik 5.19’daki $\left(\frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}\right)$ ifadesi logaritmik sıcaklık farkı olarak adlandırılır ve ΔT_{lm} ile gösterilir. Yerine koyulursa Eşitlik 5.20 elde edilir.

$$Q = -U.A.\Delta T_{lm} \quad (5.20)$$

5.4. Termo-Ekonomik Analizler

Bu bölümün amacı, düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklı Organik Rankine Çevrimi çalışma koşulları için alternatif bir optimizasyon önermektir. Maliyet hesaplamaları yapılarak sistem değerlendirilmiştir.

ORC sisteminin ön tasarım ekipman maliyetini göstermek için, kimyasal proseslerin analizi, sentezi ve tasarımında yaygın olarak kullanılan maliyet denklemleri uygulanmaktadır [49]. Ortam işletme basıncında ve karbon çeliği konstrüksiyon kullanılarak satın alınan ekipman maliyetine ilişkin veriler Eşitlik 5.22’de belirtilen şekilde gösterilebilir.

$$\log C_{p,X} = K_{1,X} + K_{2,X} \log Y + K_{3,X} (\log Y)^2 \quad (5.22)$$

Burada Y, ORC sisteminde sırasıyla türbin ve pompanın kapasitesi, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının toplam ısı transfer alanıdır. Ayrıca, K_1 , K_2 ve K_3 ekipman maliyetinin katsayılarıdır. Gövde borulu ısı eşanjörleri ve pompa için maliyet Eşitlik 5.23’te belirtilmiştir.

$$C_{BM,X} = C_{p,X}(B_{1,X} + B_{2,X}F_{M,X}F_{P,X}) \quad (5.23)$$

Burada her ekipman için malzeme faktörü, F_M , B_1 ve B_2 sabitlerdir. Belirli bir ekipman için basınç faktörü, F_P , $F_{P,X}$ olarak gösterilmiştir. Türbin için maliyet Eşitlik 5.24'te belirtilmiştir.

$$C_{BM,tur} = C_{p,tur}(F_{BM}F_{P,tur}) \quad (5.24)$$

Isı eşanjörleri, pompa ve türbin için basınç faktörü (F_P) Eşitlik 5.25'te belirtilmiştir.

$$\log F_{P,X} = C_{1,X} + C_{2,X}\log P + C_{3,X}(\log P)^2 \quad (5.25)$$

Burada C_1 , C_2 ve C_3 basınç faktörünün katsayılarıdır. Ele alınan değerler 2001 yılına ait olduğundan, 2021 yılındaki toplam maliyet Eşitlik 5.26'da belirtilen şekilde hesaplanır. CEPCI değeri 2002 yılında 397 iken, 2021 yılında 596,2'dir.

$$C_{BM,tot,2021} = (C_{BM,ısı\ değ.} + C_{BM,pompa} + C_{BM,tur})_{2001} CEPCI_{2021} / CEPCI_{2001} \quad (5.26)$$

Bu eşitlikte CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index / Kimya Mühendisliği Tesis Maliyet Endeksi), zamanın satın alınan ekipman maliyeti üzerindeki etkisini dikkate alan kimya mühendisliği tesisi maliyet endeksidir.

Beklenmedik durum maliyetleri, maliyet verilerinin güvenilirliğine ve mevcut süreç akış şemasının eksiksizliğine bağlı olarak değişir. Bu faktör, gözden kaçmalara ve hatalı bilgilere karşı bir koruma olarak maliyetin değerlendirilmesine dahil edilir. Aksi belirtilmedikçe, beklenmedik durum maliyetleri toplam maliyetin %18'i olarak kabul edilir. Bu maliyetlerin hesaplanan maliyete eklenmesi toplam modül maliyetini oluşturur. Bu da Eşitlik 5.27'de gösterilmiştir.

$$C_{tot} = 1,18(C_{BM,tot}) \quad (5.27)$$

Hesaplar yapılırken öncelikle K_1 , K_2 , K_3 , F_M , F_{BM} , B_1 , B_2 , C_1 , C_2 , C_3 sabitleri belirlenmiştir. Maliyet denklemleri ve bu sabitler kullanılarak sistemin bileşenleri için maliyet hesaplanmıştır. Ekonomik analiz yapılırken yağ pompası maliyeti ihmal edilmiştir. Buharlaştırıcı, yoğunlaştırıcı, türbin ve pompa için ayrı ayrı maliyet hesabı yapılmıştır. Elde

edilen bu değerler kullanılarak bileşenlerin toplam maliyeti hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değere, beklenmedik durum maliyetleri eklenerek toplam sistemin maliyeti belirlenmiştir. Sistemin termo-ekonomik analizi yapılırken Net Bugünkü Değer (NBD) yöntemi kullanılmıştır.

5.4.1. Net Bugünkü Değer (NBD) yöntemi

NBD, paranın zaman değerini hesaplar. Krediler, yatırımlar, sigorta sözleşmelerinden ödemeler ve diğer birçok uygulamada olduğu gibi, sermaye projelerini veya finansal ürünleri zamana yayılmış nakit akışlarıyla değerlendirmek ve karşılaştırmak için bir yöntem sağlar. Muhtemelen en popüler ve en karmaşık ekonomik değerlendirme tekniği NBD yaklaşımıdır. İnovasyon projesinden kaynaklanan gelecekteki tüm nakit akışlarının (hem giriş hem de çıkış) belirli bir iskonto oranıyla iskonto edilmesinden ve ardından bunların bir araya toplanmasından oluşur. İnovasyonun değeri, ihtiyaç duyulan yatırımdan ekonomik değer yaratılmasına katkısı dikkate alınarak ölçülür. NBD, Eşitlik 5.28’de gösterildiği gibi hesaplanır [50].

$$NBD = \sum_{t=0}^N \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (5.28)$$

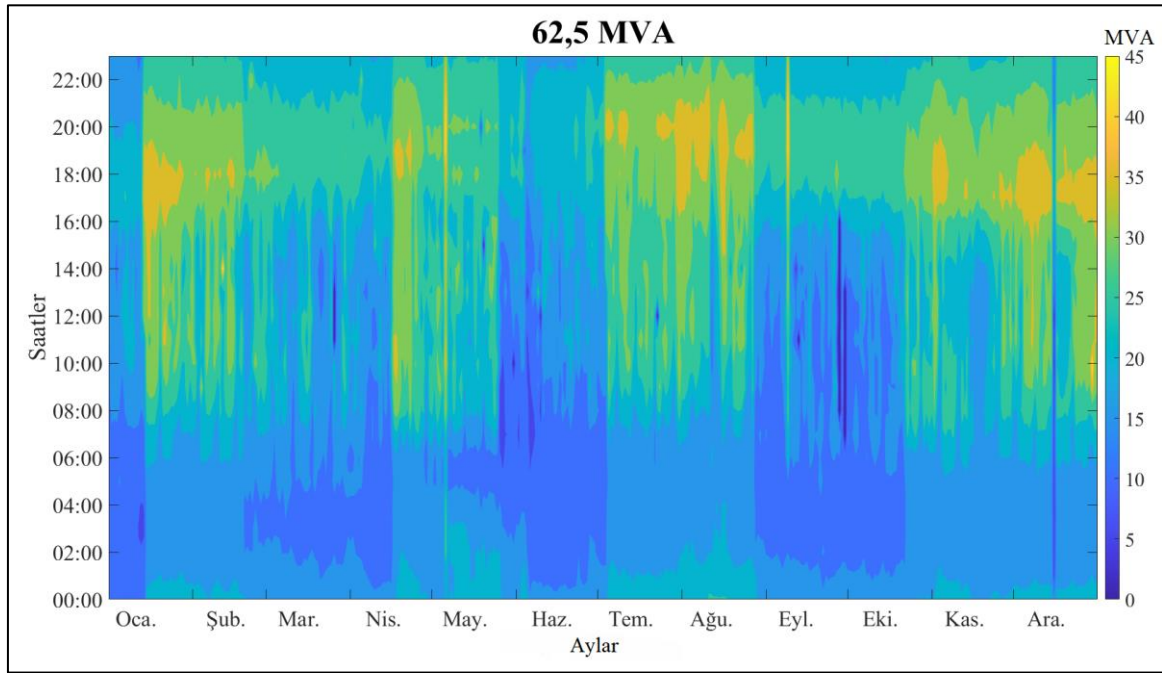
Bu eşitlikte;

- NBD – Net bugünkü değer işlemi
- i – Faiz oranı
- N – Yatırımın gider ve gelirlerinin gerçekleştiği toplam dönem sayısı
- t – Dönem sıra numarası
- R_t – t sıra numaralı dönemde gerçekleşen net para akımı olarak ifade edilir.

Eşitlik 5.28 kullanılarak NBD hesaplamaları yapılmıştır. Yıllık faiz oranı ve elektrik satış fiyatı belirlenerek eşitlik uygulanmıştır. Hesaplanan değerler ile sistemin toplam maliyeti karşılaştırılmıştır. NBD yöntemi ile 5, 10 ve 20 yıl için değerlendirmeler yapılmıştır. Üretilecek elektrikten elde edilen gelirler dikkate alınarak sonuçlar incelenmiştir. Sistemin uygulanabilir olup olmadığı yorumlanmıştır.

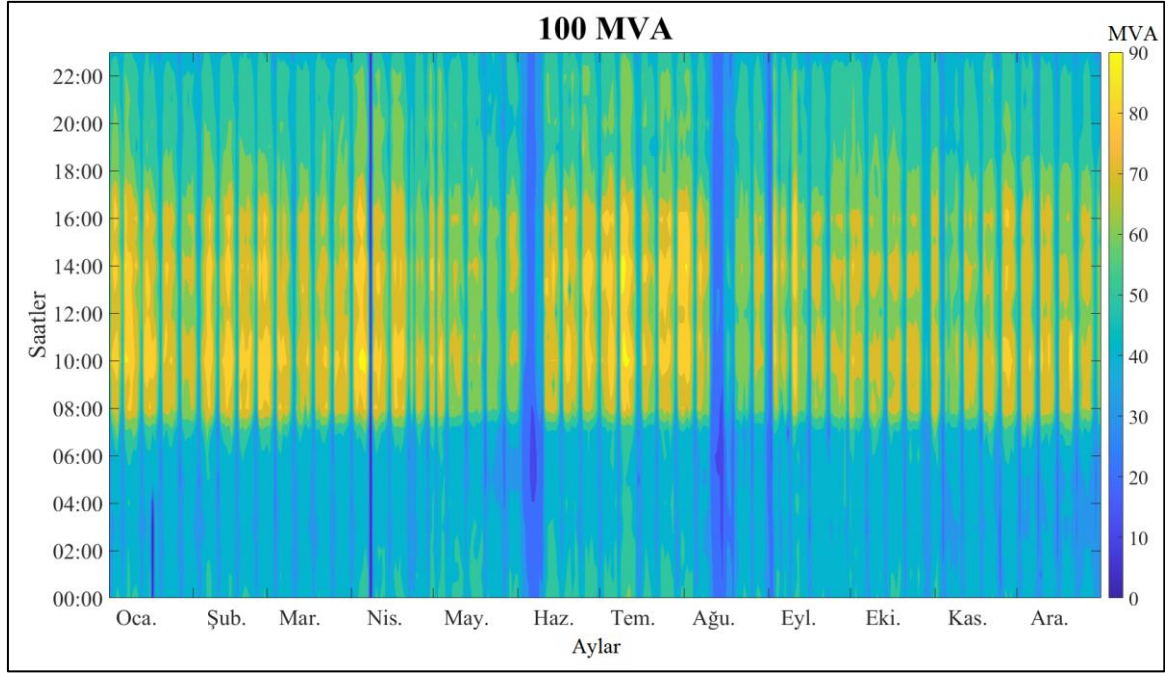
6. BULGULAR VE YORUMLAR

Bu çalışma kapsamında TEİAŞ'tan alınan, Ankara ilinde bulunan bir trafo merkezine ait 62,5 MVA, 100 MVA ve 250 MVA gücündeki güç transformatörleri için yıllık yük tevzi verileri kullanılacaktır. TEİAŞ yıllık yük tevzi verileri kullanılarak MATLAB yazılımı ile yıllık güç grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 6.1'de 62,5 MVA, Şekil 6.2'de 100 MVA, Şekil 6.3'te ise 250 MVA gücündeki transformatörlerin yıllık yük tevzi verileri gösterilmiştir.



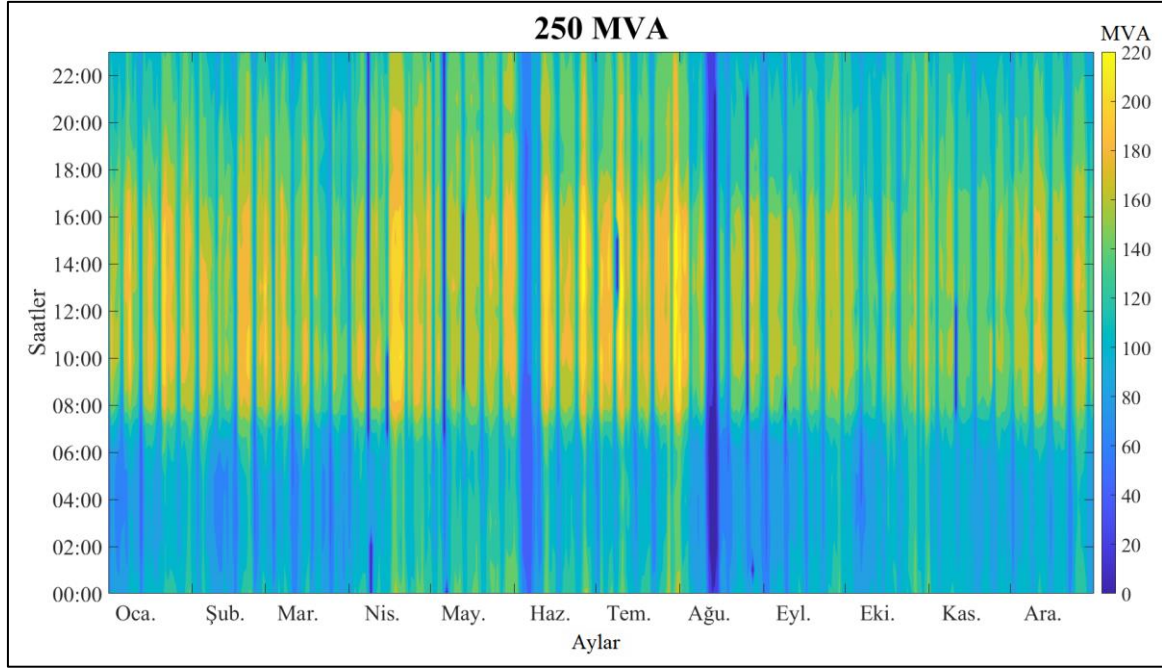
Şekil 6.1. 62,5 MVA yıllık güç değerleri (MVA)

Şekil 6.1'de görüldüğü üzere, 62,5 MVA gücündeki güç transformatörünün yıl içerisinde çok fazla yüklenmediği, maksimum 45 MVA (yaklaşık) gücünde çalıştığı görülmektedir. Yıllık ortalama 22,4 MVA gücünde çalışmıştır. Bu da yılın belirli dönemlerinde gerçekleşmiştir. Ocak ayının sonlarında, Şubat ayının başında, Nisan ayının sonunda, Temmuz ayının sonu ve Ağustos ayının başında, Kasım ve Aralık aylarında belirli dönemlerde akşam saatlerinde (16:00 sonrası), diğer dönemlere oranla yüksek güçte çalıştığı görülmektedir. Ortalama çalışma gücü 20 MVA iken, bu dönemlerde 35-45 MVA aralığında çalıştığı görülmektedir. Bu iklim şartlarıyla ya da kullanıcı profiliyle alakalı olabilir. Grafiğe göre, genel olarak 62,5 MVA gücündeki transformatör yıl içerisinde düşük güçte çalışmıştır. Mart, Nisan, Haziran, Eylül ve Ekim aylarının belirli zamanlarında çok düşük güçte çalışmıştır.



Şekil 6.2. 100 MVA yıllık güç değerleri (MVA)

Şekil 6.2’de görüldüğü üzere, 100 MVA gücündeki güç transformatörünün yıl boyunca mesai saatleri içerisinde (08:00-18:00) yoğun çalıştığı görülmektedir. Yıllık ortalama 55,6 MVA gücünde çalışmıştır. 62,5 MVA ile kıyaslandığında transformatörün çalışma saatleri sabit görülmektedir. Mesai saatleri haricinde transformatör aşırı yüklenmemiştir. 50-60 MVA gücünde çalışmıştır. Grafiğe göre transformatör yaz aylarında (Haziran-Temmuz) diğer aylara göre daha yüksek güçte, daha yoğun çalışmıştır. Nisan ve Haziran ayının başında, Temmuz ayının ortasında transformatörün düşük güçte çalıştığı görülmektedir. Bunun sebebi bakım ya da arıza olabilir. Ek olarak, transformatör hiçbir zaman tam yüklenmemiştir. 100 MVA güç transformatörü, maksimum 90 MVA gücünde çalışmıştır.



Şekil 6.3. 250 MVA yıllık güç değerleri (MVA)

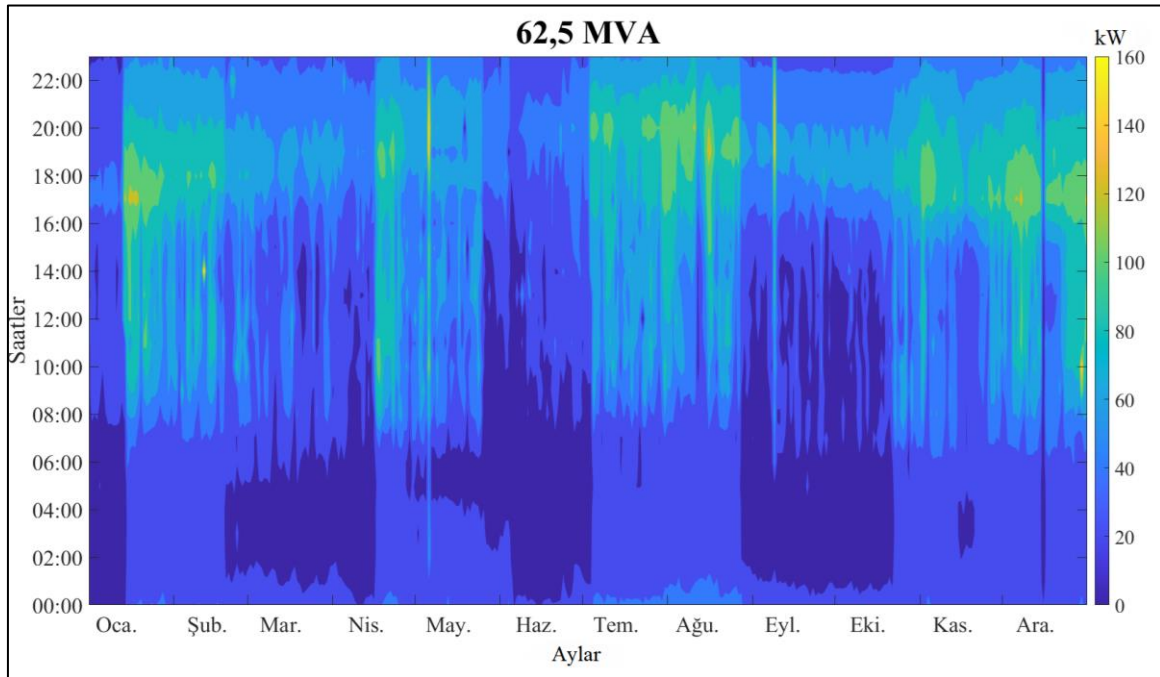
Şekil 6.3'te görüldüğü üzere, 250 MVA gücündeki güç transformatörünün verileri de 100 MVA gücündeki güç transformatörünün verilerine benzerdir. 250 MVA güç transformatörünün de yıl boyunca mesai saatleri içerisinde (08:00-18:00) yoğun çalıştığı görülmektedir. Yıllık ortalama 128,7 MVA gücünde çalışmıştır. 100 MVA güç transformatörü ile kıyaslandığında, mesai saatleri dışında, akşam saatlerinde belirli dönemlerde yoğun çalışmıştır. 100 MVA güç transformatöründe olduğu gibi 250 MVA güç transformatörünün de Nisan ve Haziran ayının başında, Temmuz ayının ortasında arıza ya da bakım sebebiyle düşük güçte çalıştığı görülmektedir. 62,5 MVA ve 100 MVA güç transformatörlerinde olduğu gibi 250 MVA güç transformatörü de yılın hiçbir döneminde tam yüklenmemiştir. 250 MVA güç transformatörü, maksimum 220 MVA gücünde çalışmıştır.

Çizelge 6.1'de tez kapsamında incelenen 3 farklı güç transformatörü, bu transformatörlerin anma güçleri ve transformatörlerin verimli çalışabilmesi için atılması gerekli olan ısı miktarları belirtilmiştir.

Çizelge 6.1. Transformatörlerdeki atık ısı miktarı

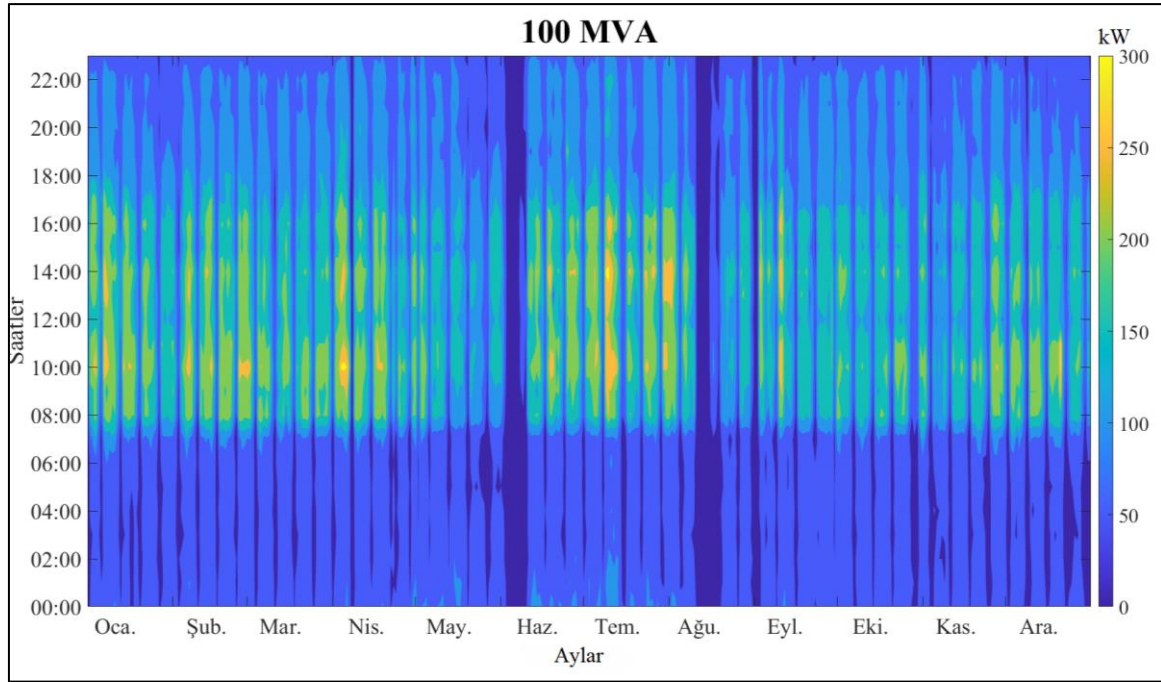
TRANSFORMATÖRÜN ANMA GÜCÜ (MVA)	ATIK ISI MİKTARI (kW)
62,5	316
100	346
250	682

Bölüm 5'te belirtildiği gibi, verilen bu değerler transformatörün tam yüklenmesi durumunda ortaya çıkacak değerlerdir. Eşitlik 5.1 kullanılarak transformatörlerin çalışma gücüne göre saatlik atık ısı miktarları hesaplanmıştır. Yıllık yük tevzi verileri kullanılarak transformatörlerin saatlere göre atık ısı miktarları belirlenmiştir. TEİAŞ yıllık yük tevzi verileri kullanılarak, MATLAB yazılımı ile yıllık atık ısı miktarı grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 6.4 62,5 MVA, Şekil 6.5 100 MVA ve Şekil 6.6 250 MVA gücündeki güç transformatörlerinin yıllık atık ısı miktarlarının dağılımını göstermektedir. Elde edilen bu grafiklerden transformatörlerin yüklenme yoğunluğu hakkında da bilgi sahibi olunmaktadır. Güç grafikleriyle karşılaştırıldığında grafikler benzer özellikler göstermektedir. Transformatörün yüksek güçte çalıştığı dönemlerde doğal olarak transformatörlerde oluşan atık ısı miktarları da yüksek miktardadır.



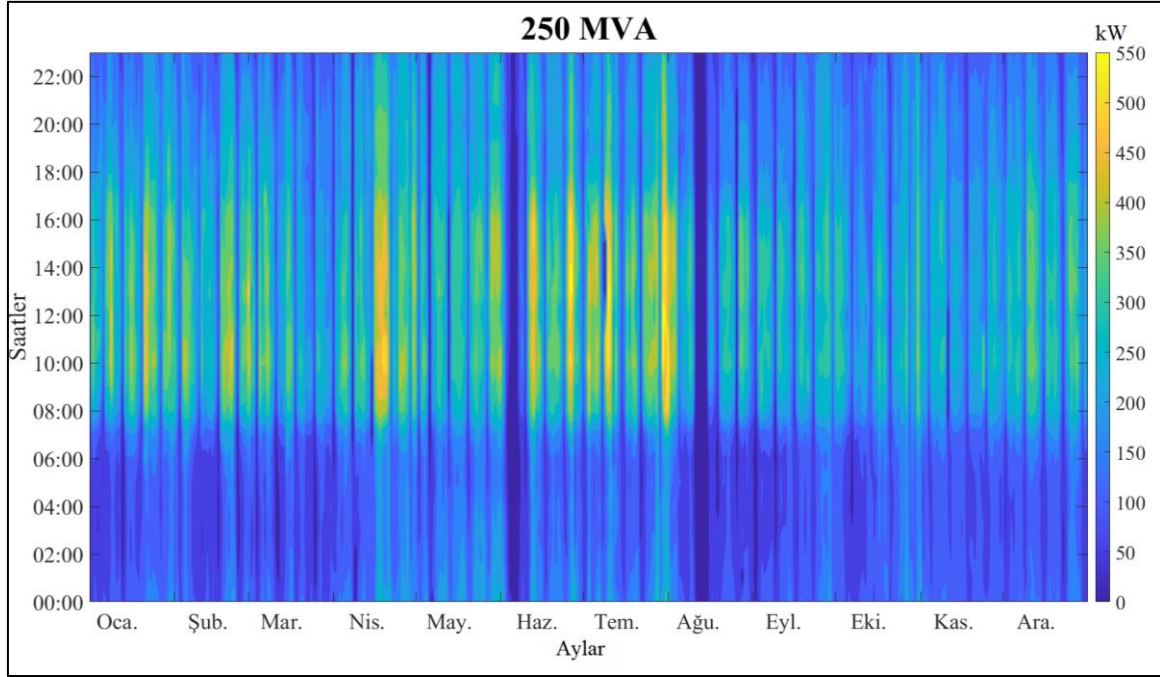
Şekil 6.4. 62,5 MVA yıllık atık ısı miktarı-saatlik (kW)

Şekil 6.4 incelendiğinde, 62,5 MVA gücündeki güç transformatörünün üretmiş olduğu atık ısı miktarı ortalama 44,4 kW'dır. Bunun sebebi transformatörün yük içerisinde genel olarak düşük güçte çalışmasıdır. Transformatör tam yüklendiğinde atık ısı miktarı 316 kW iken yıl içerisinde atık ısı miktarı 160 kW üzerine çıkmamıştır. Belirli dönemlerde, özellikle gece saatlerinde bu transformatörün atık ısı miktarı çok düşük seviyededir (20 kW altı). Transformatörün yıllık toplam atık ısı miktarı 389.150,9 kWh'dir.



Şekil 6.5. 100 MVA yıllık atık ısı miktarı-saatlik (kW)

Şekil 6.5 incelendiğinde, 100 MVA gücündeki güç transformatörünün üretmiş olduğu atık ısı miktarı çalışma gücünde olduğu gibi mesai saatleri içerisinde yüksek miktardadır. Üretilen atık ısı miktarı ortalama 107,3 kW'dır. Nisan ve Haziran ayının başında, Temmuz ayının ortasında güç grafiği de incelendiğinde transformatör düşük güçte çalıştığı için atık ısı miktarı da çok düşük seviyededir. Transformatör tam yüklendiğinde 346 kW atık ısı oluşurken yıl içerisinde maksimum 300 kW atık ısı meydana gelmiştir. Transformatörün yıllık toplam atık ısı miktarı 940.242,3 kWh'dir.

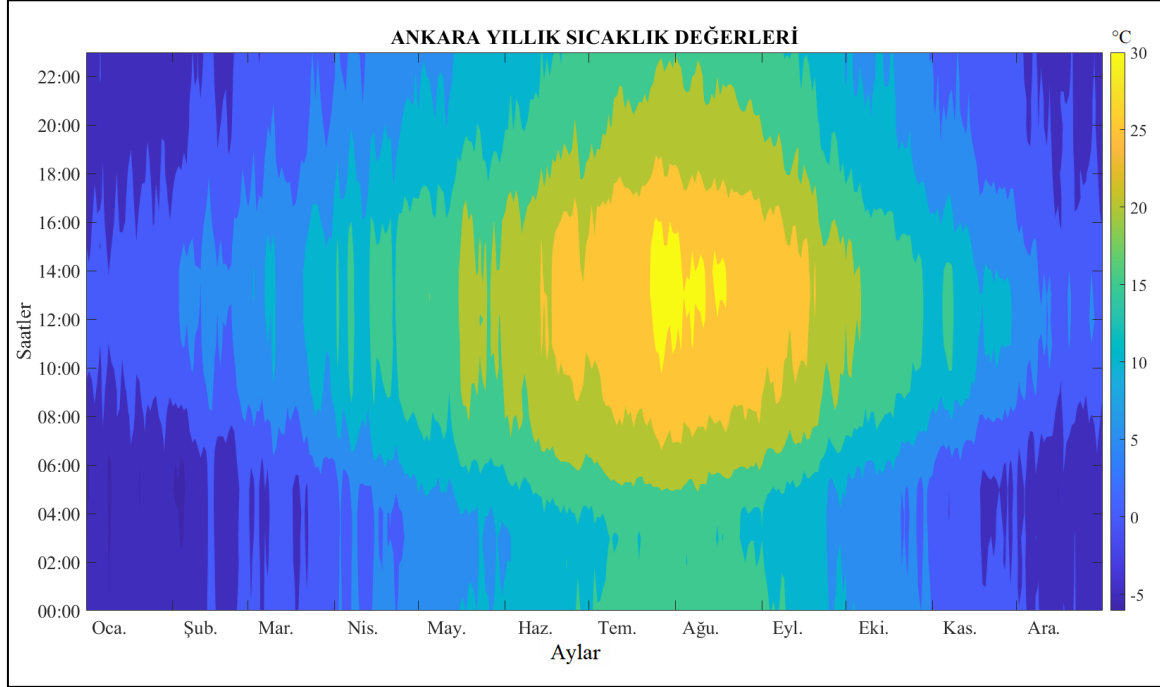


Şekil 6.6. 250 MVA yıllık atık ısı miktarı-saatlik (kW)

Şekil 6.6 incelendiğinde, 250 MVA gücündeki güç transformatörünün üretmiş olduğu atık ısı miktarı, 100 MVA güç transformatörü ile benzer şekilde, mesai saatleri içerisinde yüksek miktardadır. Üretilen atık ısı miktarı ortalama 197 kW'dır. Tam yüklendiğinde 682 kW atık ısı üretecekken grafikte maksimum 550 kW atık ısı üretildiği görülmektedir. Yıl boyunca genel olarak atık ısı miktarı yüksek seviyede değildir. Transformatörün çalışmadığı ya da düşük çalıştığı dönemde (Nisan ve Haziran ayının başında, Temmuz ayının ortasında) atık ısı miktarı da çok düşük seviyededir. Transformatörün yıllık toplam atık ısı miktarı 1.726.387,6 kWh'dir.

Transformatörlere ait toplam atık ısı miktarları belirlendikten sonra bu atık ısılar kullanılarak ORÇ tasarımı yapılmıştır. Tasarımın ilk aşaması çevrim şartlarının belirlenmesidir. Türbin giriş sıcaklığının belirlenmesinde transformatör yağı sıcaklığı, yoğunlaştırıcı sıcaklığının belirlenmesinde ise bölgenin iklim şartları referans alınmıştır. Tez kapsamında örnek olarak, incelenen transformatörler Ankara ilinde bulunduğu için, Ankara ilinin yıllık sıcaklık değerleri dikkate alınmıştır. Şekil 6.7'de Ankara iline ait yıllık sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. En düşük sıcaklık -6 °C, en yüksek sıcaklık ise 32 °C'dir. En yüksek sıcaklık değerleri Temmuz ayı sonu, Ağustos ayı başında, 10:00-16:00 saatleri arasında 30-32 °C olarak görülmektedir. En düşük sıcaklık değerleri ise Aralık ayı sonu ve

Ocak ayının büyük bir bölümünde, 20:00-06:00 saatleri arasında, -5- -7 °C olarak görülmektedir.



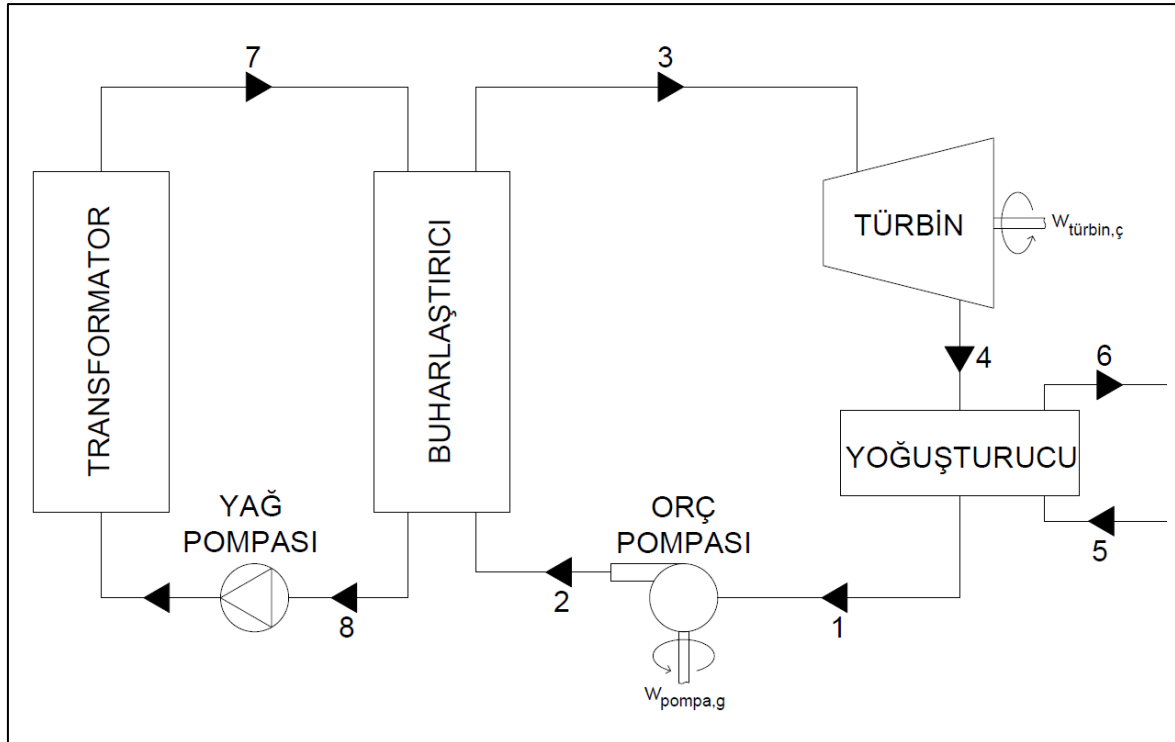
Şekil 6.7 Ankara ili yıllık sıcaklık dağılımı

Transformatördeki yağ sıcaklığını belirleyebilmek için, transformatörün testi esnasında termal kamera ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Ek 1’de 100 MVA gücündeki bir güç transformatörünün test verileri yer almaktadır. Termal kamera ile transformatörün belirli bölgelerinin yağ sıcaklıkları, transformatör çalıştığı sırada belirli zaman aralıklarıyla ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde yağ sıcaklığının 79,1°C-85,1°C arasında olduğu gözlemlenmiştir. Ek 1’de yer alan veriler 100 MVA’ya aittir, 62,5 MVA ve 250 MVA için farklı ölçümler yapılmamıştır. Transformatörün çalışma mantığı aynı olduğundan elde edilen bulgular birbirine çok yakın olacaktır. Transformatör gücünün değişmesi transformatörün ısınmasını etkilemez, transformatörü soğutan akışkan (yağ) değişmediği için, optimum çalışma koşulları aynı olduğu için, dolayısıyla yağ sıcaklığının belirli bir sıcaklığı geçmesi transformatöre zarar vereceğinden, güç değiştiğinde yağ sıcaklığı değişmemektedir. Transformatörlerde buna uygun soğutma yapılmaktadır. Farklı güçteki transformatörlerde, farklı olan anma gücüne bağlı olarak atık ısının miktarıdır, sıcaklıklarda önemli bir fark yoktur.

100 MVA güç transformatörü için yapılan termal kamera ölçümlerine dayanarak yağ çıkış sıcaklığı, 80 °C olarak ele alınmıştır. 62,5 MVA ve 250 MVA gücündeki transformatörler için de yağ çıkış sıcaklığı 80 °C olarak kabul edilmiştir. Buharlaştırıcı çıkış sıcaklığı transformatör yağ sıcaklığından 10 °C düşük olacak şekilde, 70 °C seçilmiştir. Yoğuşturucuya dışarıdan giren havanın sıcaklığı, dış ortam sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Yoğuşturucudan çıkan havanın sıcaklığı, giren havanın sıcaklığından 5 °C fazla olacak şekilde ele alınmıştır. Çevrim tarafında, yoğuşturucu girişi ve çıkışındaki sıcaklık ise bu dış ortam sıcaklığından 10 °C fazla olacak şekilde seçilmiştir. Sisteme ait sıcaklıklar ve değerleri Çizelge 6.2’de gösterilmiştir. Bu çizelgede verilen numaralar ise Şekil 6.8’de sistem tasarımına eklenerek detaylı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. Sistem bileşenlerinin giriş-çıkış sıcaklık değerleri

T_1 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_5 (°C)	T_6 (°C)	T_7 (°C)	T_8 (°C)
$T+10$	70	$T+10$	T	$T+5$	80	60

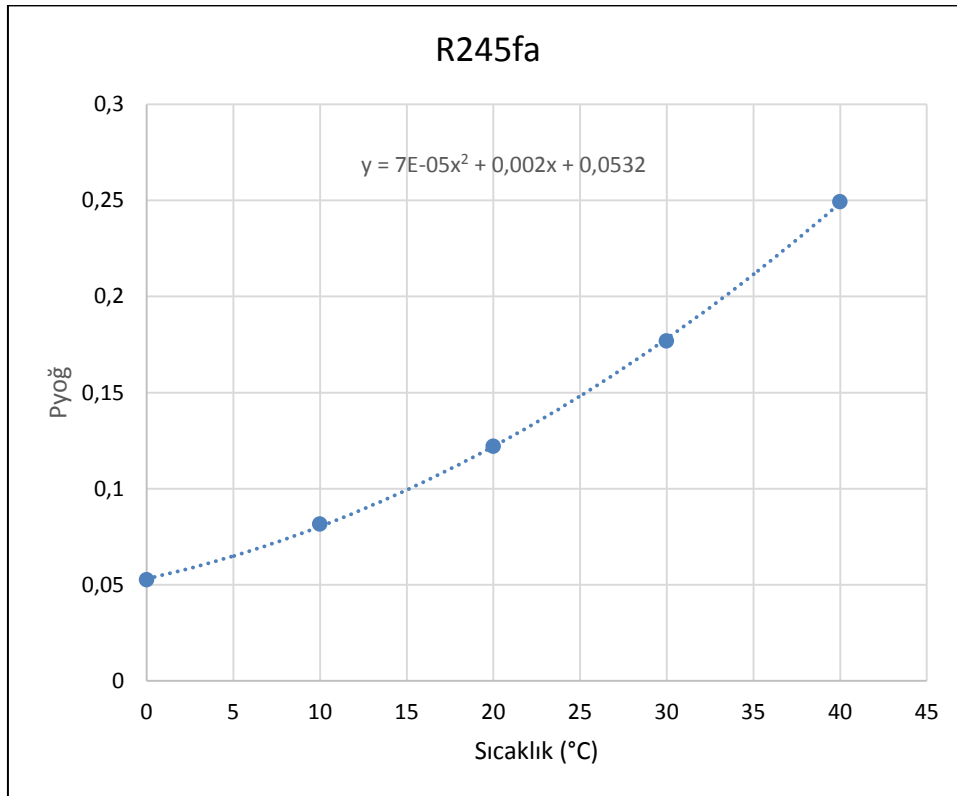


Şekil 6.8. Numaralandırılmış ORÇ sistem tasarımı

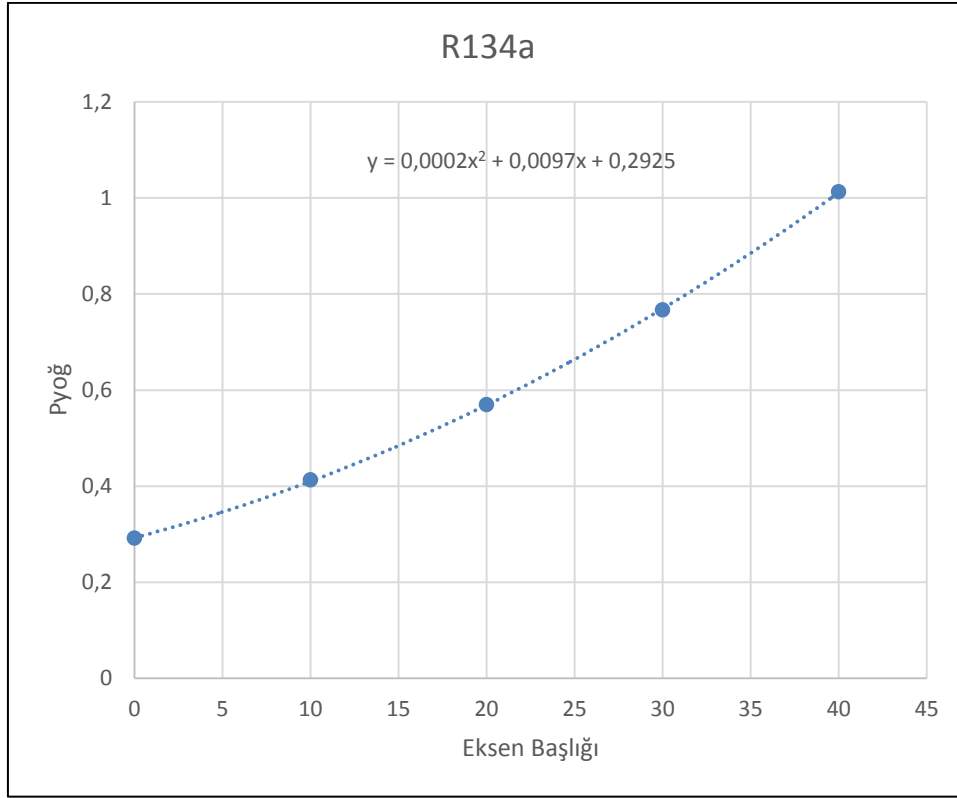
Sıcaklık kabullerine ek olarak;

- Yoğuşturucu çıkışında akışkan doymuş sıvı olarak ($x_1=0$) kabul edilmiştir. Basınç ve entalpi hesabı yapılırken bu değer dikkate alınmıştır.
- Pompa ve türbinin izentropik verimleri $\eta=0.90$ kabul edilmiştir.

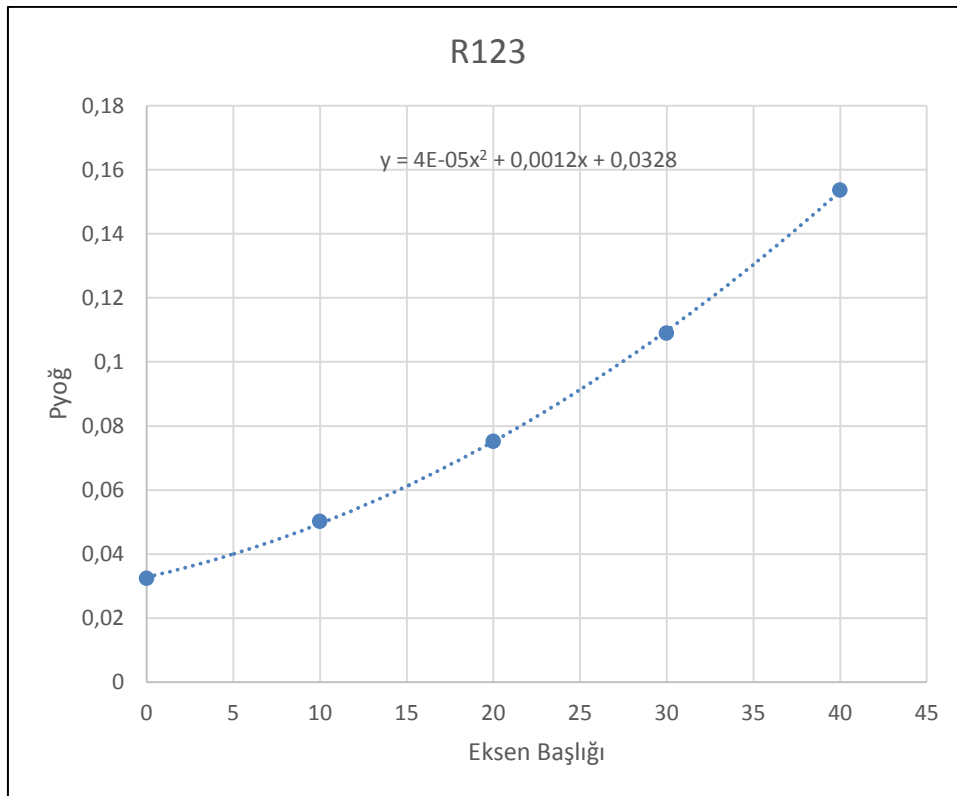
Sistemin alçak ve yüksek basınçlarını belirlemek için REFPROP yazılımı ve organik akışkanların Basınç-Entalpi diyagramları kullanılmıştır. Buharlaştırıcı basıncı için 60 °C'deki doyma basıncı ($P_{\text{sat}@60^\circ\text{C}}$) ele alınmıştır. Yoğuşturucu basıncı ise dış ortam sıcaklığı sabit olmadığı için değişkendir. Yoğuşturucu basıncını belirlemek için dış ortam sıcaklığı düşünülerek, 0, 10, 20, 30 ve 40 °C sıcaklıkları için doyma basınçları ($P_{\text{sat}@[10,20,30,40]^\circ\text{C}}$) belirlenmiştir. Belirlenen bu basınçlar ile Excel programında basınç eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler denkleme aktarılmıştır. Daha sonra bu denklemler kullanılarak yıl boyunca değişen sıcaklık koşullarına uygun olarak yıllık yoğuşturucu basınçları saatlik hesaplanmıştır. Yoğuşturucu basıncı eğrileri ve bu eğrilere ait denklemler, 3 farklı akışkan için Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de gösterilmiştir.



Şekil 6.9. R245fa için yoğuşturucu basınç eğrisi

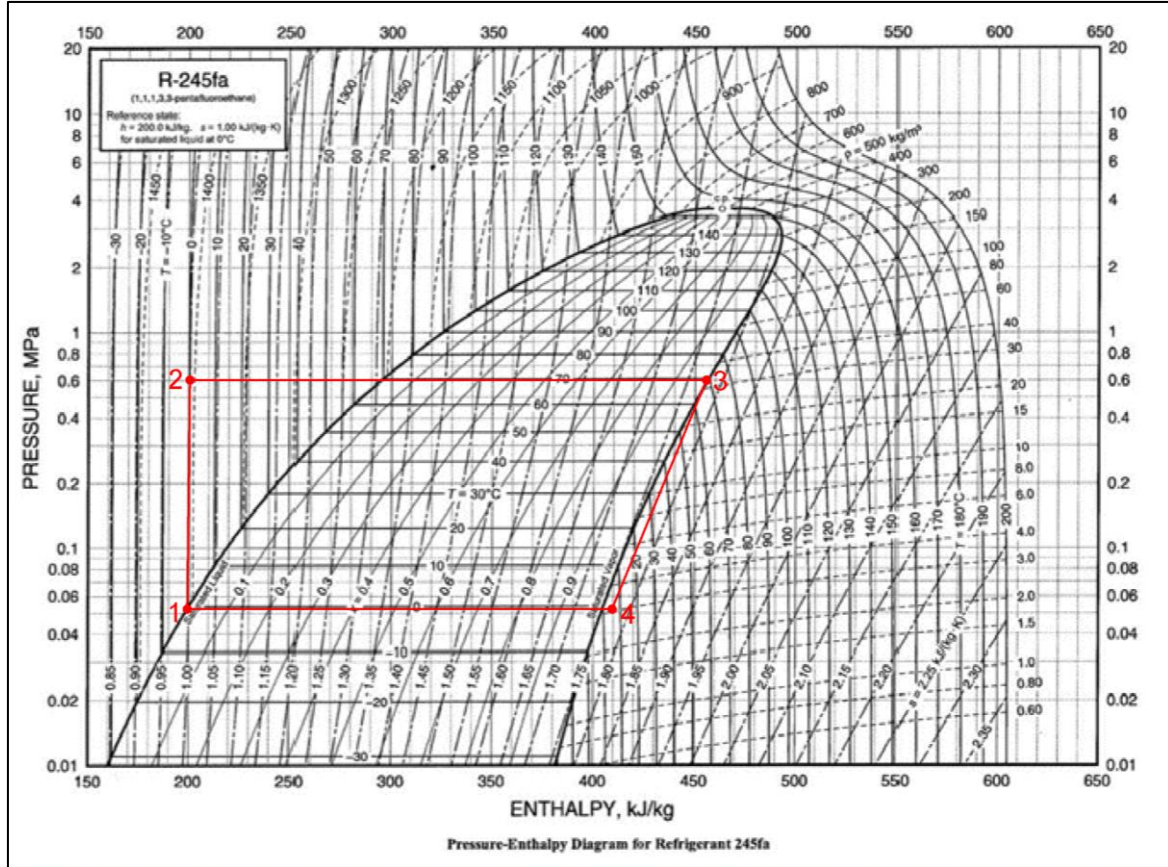


Şekil 6.10. R134a için yoğuşturucu basınç eğrisi



Şekil 6.11. R123 için yoğuşturucu basınç eğrisi

REFPROP yazılımına ek olarak basınç ve entalpilerin belirlenmesinde kullanılan Basınç-Entalpi diyagramlarının kullanımına örnek olarak Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14 gösterilmiştir. Bu diyagramlar ile entalpi ve basınç değerleri belirlenmiştir. Örnek olarak 0 °C ve R245fa, R134a ve R123 organik akışkanları için belirlenen değerler gösterilmiştir. 10, 20, 30 ve 40 °C için de aynı şekilde diyagramlar oluşturulmuştur.

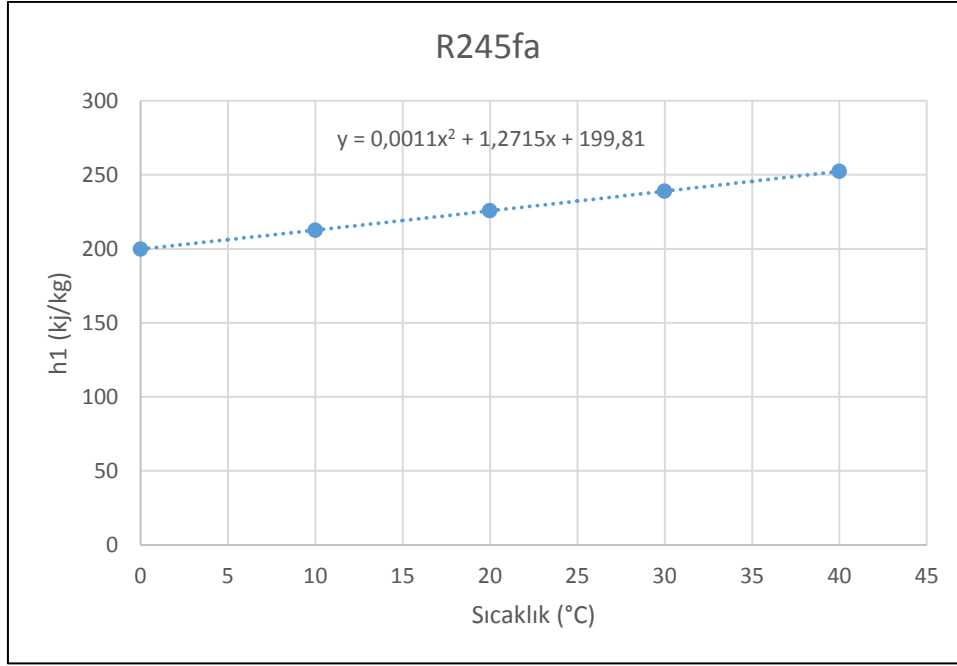


Şekil 6.12. R245fa Basınç-Entalpi diyagramı

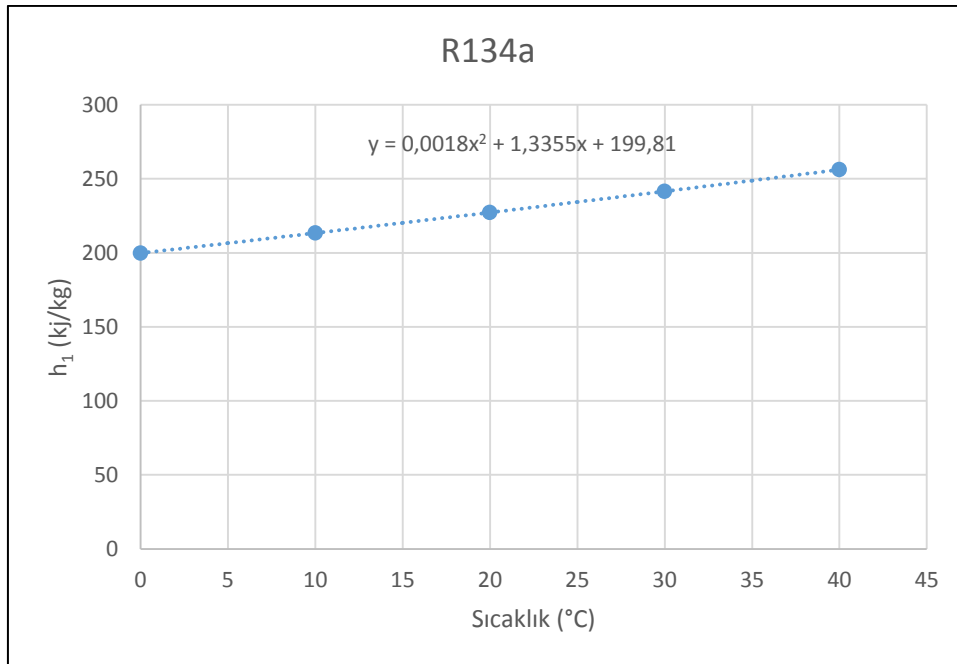
Pressure-enthalpy diagram for HCFC-123. The diagram shows the saturation curve and various thermodynamic properties. The cycle is plotted with points 1, 2, 3, and 4. The cycle is labeled with 'temperature = 20°C' and 'temperature = 50°C'.

Şekil 6.14. R123 Basınç-Entalpi diyagramı

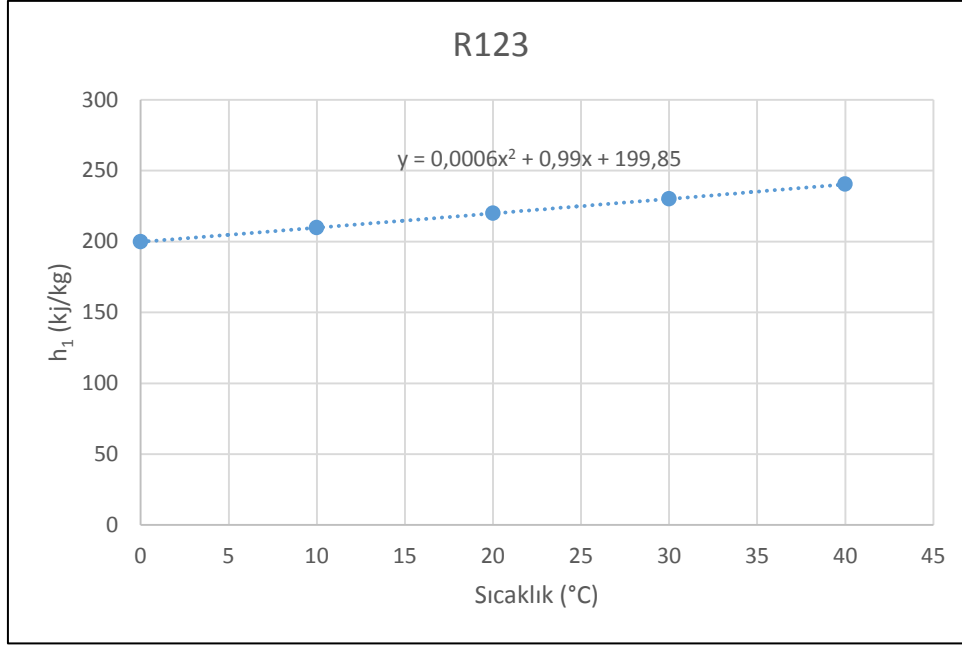
REFPROP yazılımı ve basınç-entalpi diyagramları aracıyla, 0, 10, 20, 30 ve 40 °C sıcaklıkları için hesaplanan h_1 entalpi değerleri ile eğri ve denklemler oluşturulmuştur. Şekil 6.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de gösterilmiştir. Eğriler ve denklemler için Excel programı kullanılmıştır. Bu denklemler yıllık veriler ile kullanılarak yıl boyunca saatlik entalpi (h_1) değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.15. R245fa için h_1 eğrisi



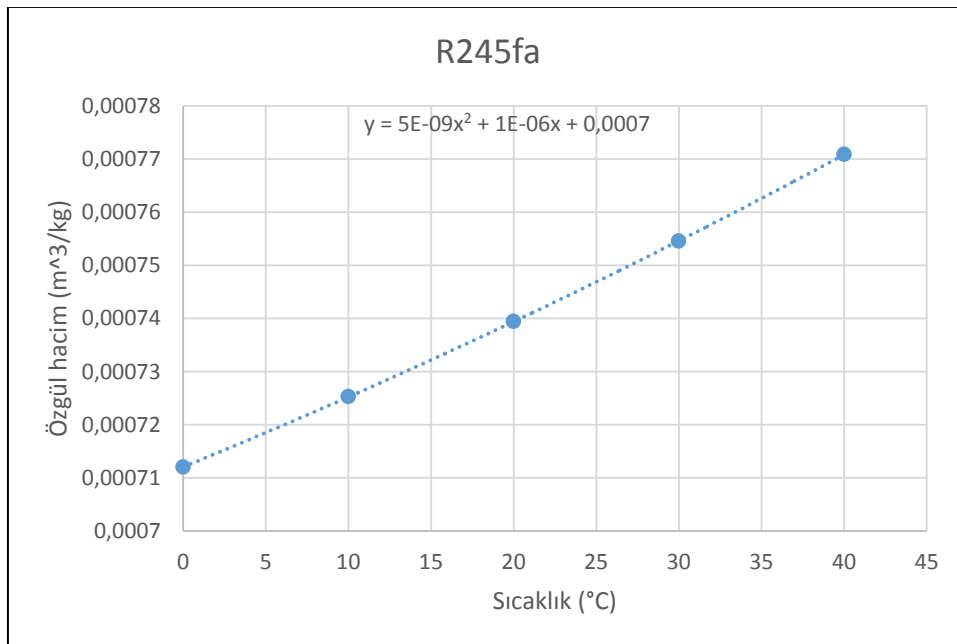
Şekil 6.16. R134a için h_1 eğrisi



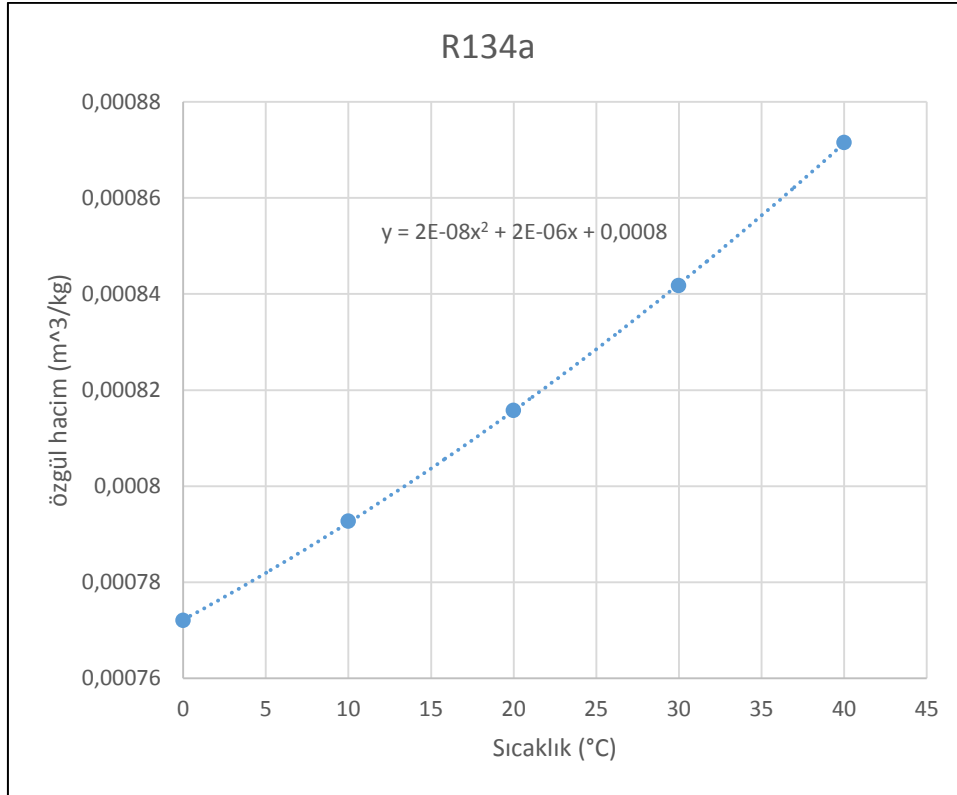
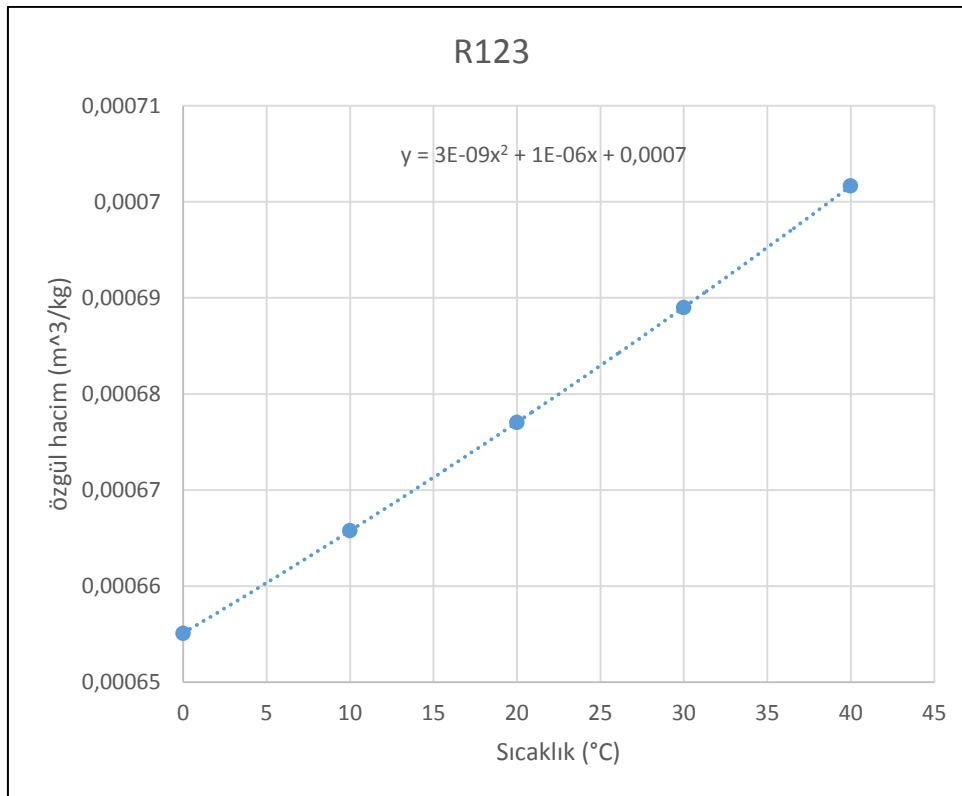
Şekil 6.17. R123 için h_1 eğrisi

Entalpilerin belirlenmesinde REFPOP yazılımı ve yukarıdaki şekillerde bulunan denklemler kullanılmıştır. Belirlenen basınçlar ile yıllık veriler elde edilmiştir.

0, 10, 20, 30 ve 40 °C için özgül hacimler hesaplanmıştır. Özgül hacim eğrileri Şekil 6.18, Şekil 6.19 ve Şekil 6.20’de gösterilmiştir. Daha sonra bu eğriler ve denklemler kullanılarak özgül hacimlerin yıl boyu dağılımı belirlenmiştir.



Şekil 6.18. R245fa v_1 eğrisi

Şekil 6.19. R134a v_1 eğrisiŞekil 6.20. R123 v_1 eğrisi

Örnek olarak 0 °C ve R134a akışkanı için yapılan entalpi hesaplamaları gösterilmiştir. Diğer sıcaklıklar ve diğer akışkanlar için de aynı yol izlenerek entalpi değerleri hesaplanmıştır.

$P_1 = P_{\text{yoğ}} = 0,29122 \text{ MPa}$ ve $x_1 = 0$ kullanılarak $h_1 = 199,8 \text{ kJ/kg}$ ve $v_1 = 0,000772 \text{ (m}^3\text{/kg)}$ değerleri elde edilmiştir.

$P_2 = P_{\text{buh}} = 1,6758 \text{ MPa}$ değeri ve Eşitlik 5.10 kullanılarak h_2 Eşitlik 6.1’de belirtilen şekilde elde edilmiştir;

$$h_2 = 199,8 + 0,000772 \times (1,6758 - 0,29122) = 199,8011 \text{ kJ/kg} \quad (6.1)$$

$P_3 = P_{\text{buh}} = 1,6758 \text{ MPa}$ ve $T_3 = 70^\circ\text{C}$ kullanılarak $h_3 = 428,63 \text{ kJ/kg}$ ve $s_3 = 1,6957 \text{ (kJ/kg.K)}$ değerleri elde edilmiştir.

$P_4 = P_{\text{yoğ}} = 0,29122 \text{ MPa}$ ve $s_3 = s_4$ kullanılarak $h_{4s} = 389,93 \text{ kJ/kg}$ olarak hesaplanmıştır. Türbindeki izantropik verimin 0,90 kabul edilmesiyle, Eşitlik 4.9 kullanılarak h_{4a} Eşitlik 6.2’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır;

$$0,9 = \frac{428,63 - h_{4a}}{428,63 - 389,93} \Rightarrow h_{4a} = 393,8 \text{ kJ/kg} \quad (6.2)$$

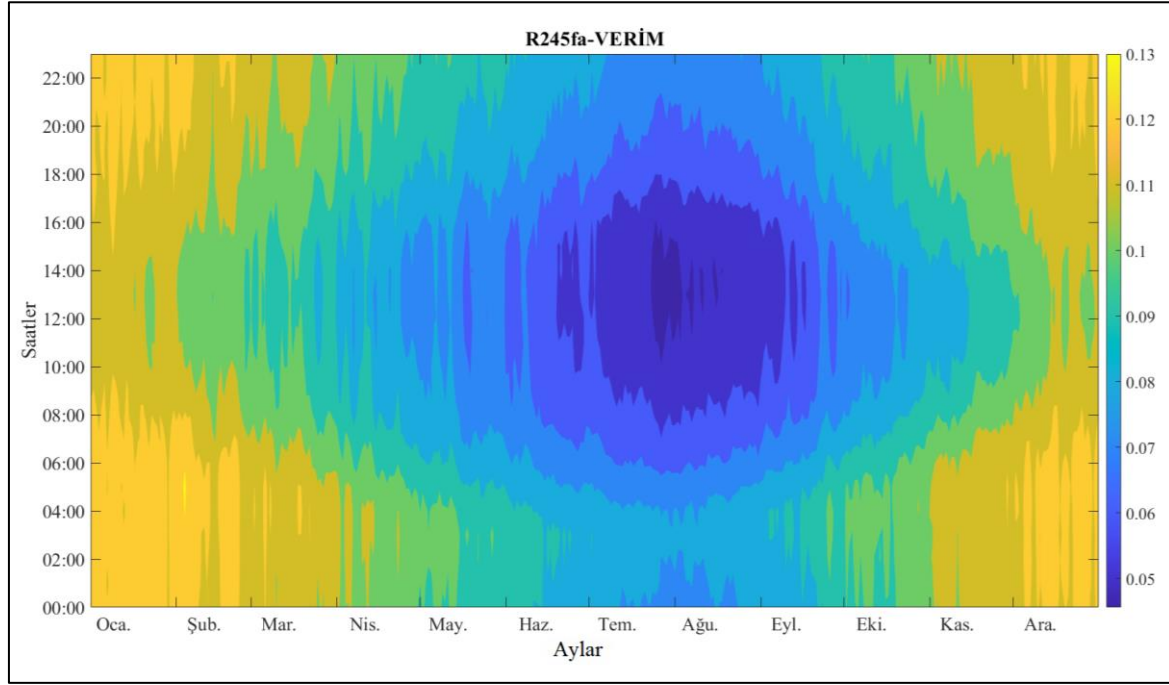
Çizelge 6.3. 0°C ve R134a için çevrimin entalpi değerleri

$h_1 \text{ (kJ/kg)}$	$h_2 \text{ (kJ/kg)}$	$h_3 \text{ (kJ/kg)}$	$h_{4a} \text{ (kJ/kg)}$	$h_{4s} \text{ (kJ/kg)}$
199,8	199,8011	428,63	393,8	389,93

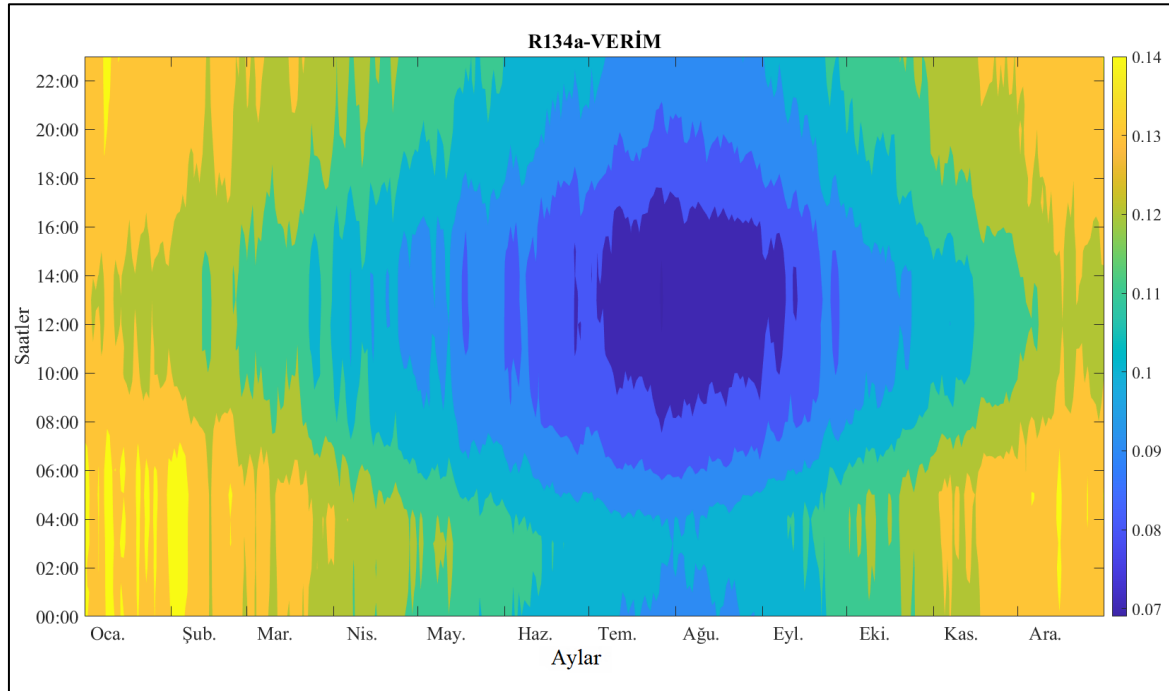
Entalpilerin hesaplanmasıyla Eşitlik. 5.11 kullanılarak çevrimin verimi hesaplanmıştır. Yapılan bu hesap da 0 °C sıcaklık ve R134a akışanı için örnek olarak Eşitlik 6.3’te gösterilmiştir.

$$\eta_{th} = \frac{428,63 - 393,8 - 199,8011 + 199,8}{428,63 - 199,8011} = 0,152205 \quad (6.3)$$

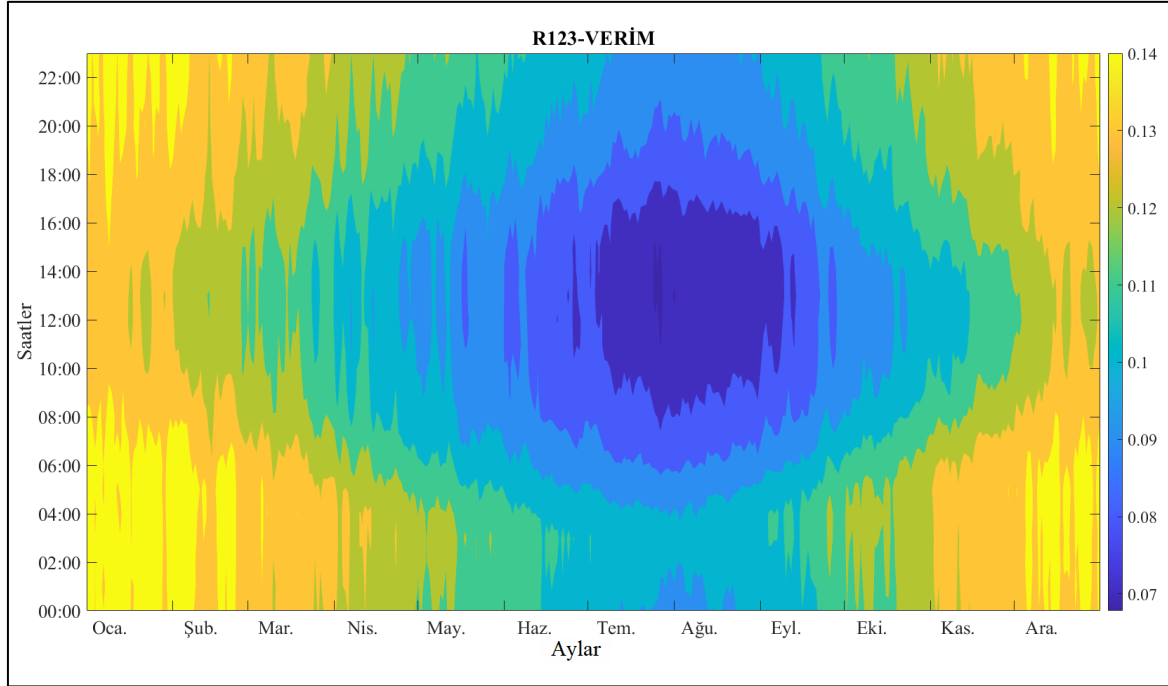
Çevrime ait yıllık verim grafikleri ise Şekil 6.21, Şekil 6.22 ve Şekil 6.23'te gösterilmiştir. İncelenen R245fa, R134a ve R123 organik akışkanları için grafikler incelenmiştir.



Şekil 6.21. R245fa çevrim yıllık verim grafiği



Şekil 6.22. R134a çevrim yıllık verim grafiği



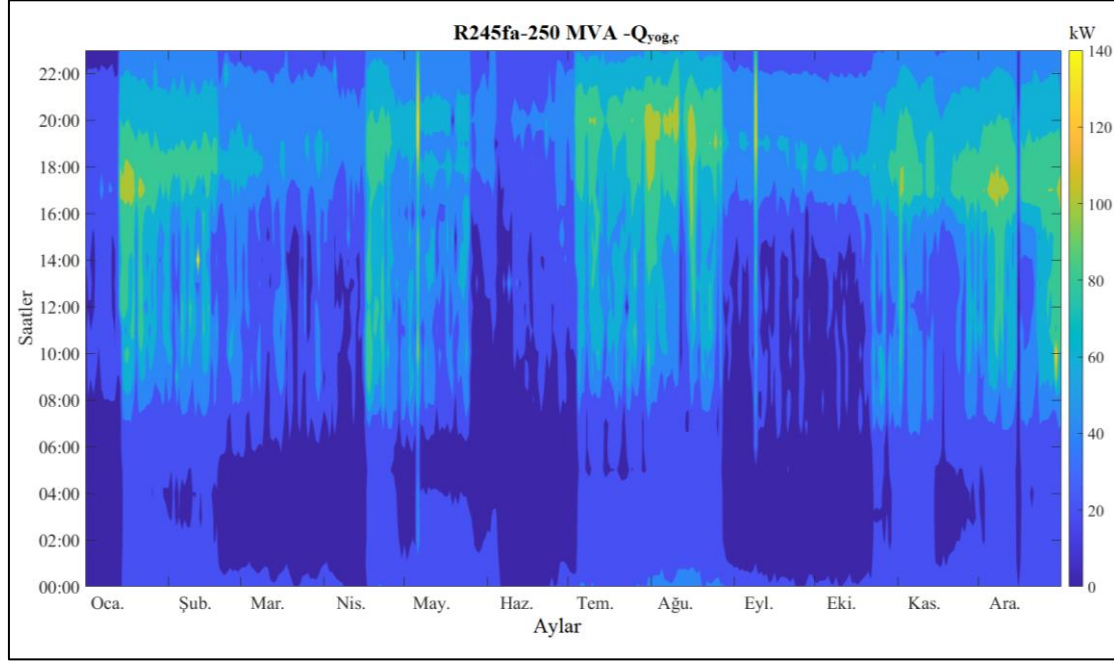
Şekil 6.23. R123 çevrim yıllık verim grafiği

Verim grafiklerinde, 3 akışkan için de değerler incelenmiştir. R245fa akışkanı için en yüksek verim yaklaşık 0,13, en düşük verim ise yaklaşık 0,04'tür. R134a akışkanı için, benzer şekilde en yüksek verim yaklaşık 0,14, en düşük verim yaklaşık 0,07'dir. R123 akışkanı için, en yüksek verim yaklaşık 0,14, en düşük verim yaklaşık 0,07'dir. Yaz aylarında, dış ortam sıcaklığının artması sebebiyle özellikle mesai saatleri içerisinde verim düşük seviyededir 0,07-0,09 arası).

Sonraki aşamada, çevrimde dolaşan akışkanın kütleli debisi hesaplanmıştır. Buharlaştırıcıya giren ısı miktarı TEİAŞ yük tevzi verilerinden hesaplanmıştır. h_3 ve h_2 değerlerinin belirlenmesiyle Eşitlik 5.4 kullanılarak kütleli debi saatlik olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan kütleli debiler MATLAB yazılımı kullanılarak oluşturulan yıllık grafikler ile gösterilmiştir. Grafikler Ek-6'da belirtilmiştir. Grafikler incelendiğinde farklı akışkanlar için aynı güç verilerinde debiler birbirine çok yakındır. En yüksek kütleli debi değerinin 62,5 MVA için 0,7-0,8 kg/s, 100 MVA için 1,4-1,8 kg/s, 250 MVA için 2,5-3 kg/s olduğu gözlemlenmiştir.

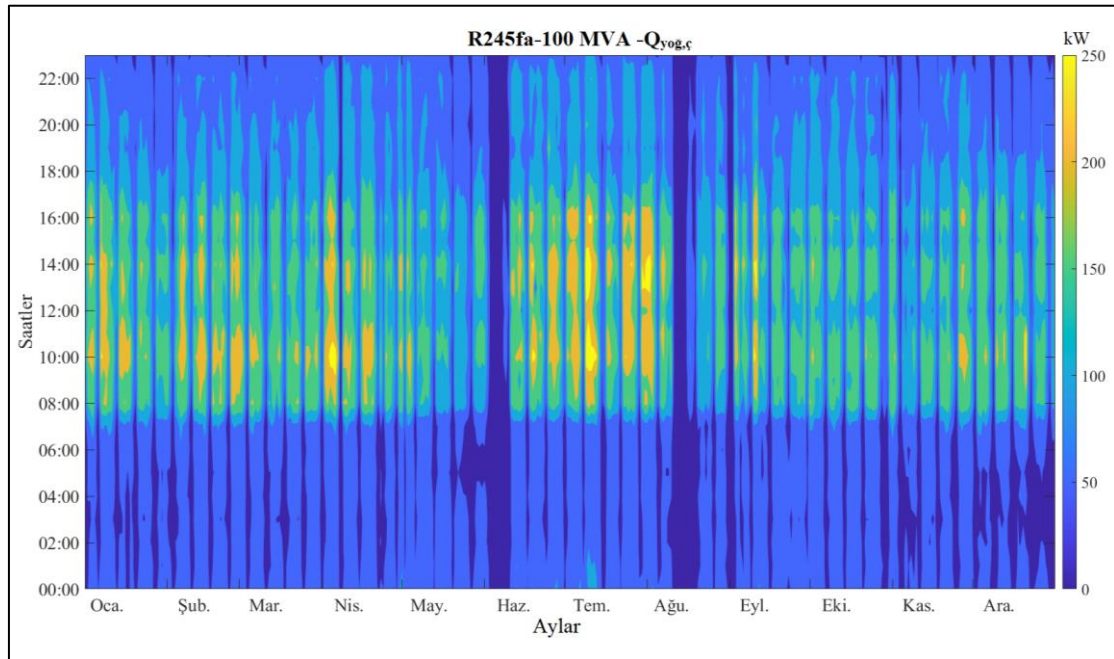
Sistemden atılan ısı miktarını ve sistemin ürettiği elektrik miktarını belirleyebilmek için yıllık $Q_{\text{yoğ,ç}}$ ve $W_{\text{türbin,ç}}$ değerleri hesaplanmıştır. Yukarıda belirtilen denklemler, eğriler ve elde edilen veriler kullanılarak termodinamik hesaplamalar yapılmıştır. Farklı organik

akışkanlar için farklı güçteki transformatörlere ait yıllık $Q_{yog,ç}$ grafikleri Şekil 6.24-Şekil 6.32’de gösterilmiştir.



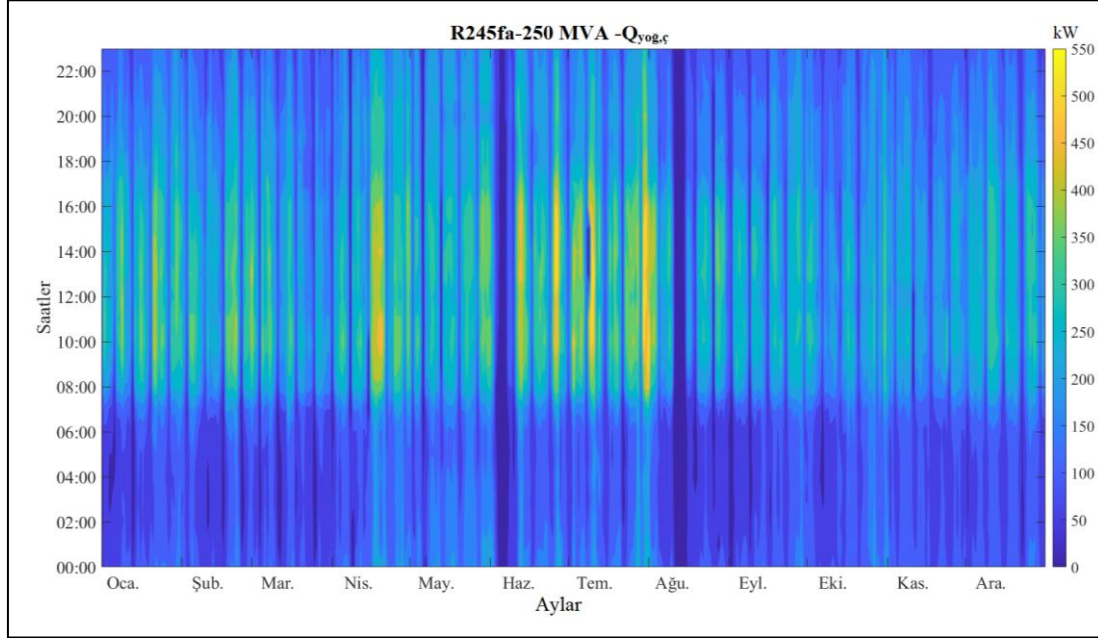
Şekil 6.24. 62,5 MVA R245fa yıllık $Q_{yog,ç}$ grafiği

62,5 MVA ve R245fa akışkanına ait diyagram incelendiğinde $Q_{yog,ç}$ ’ın en yüksek 140 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 60-80 kW arasındadır.



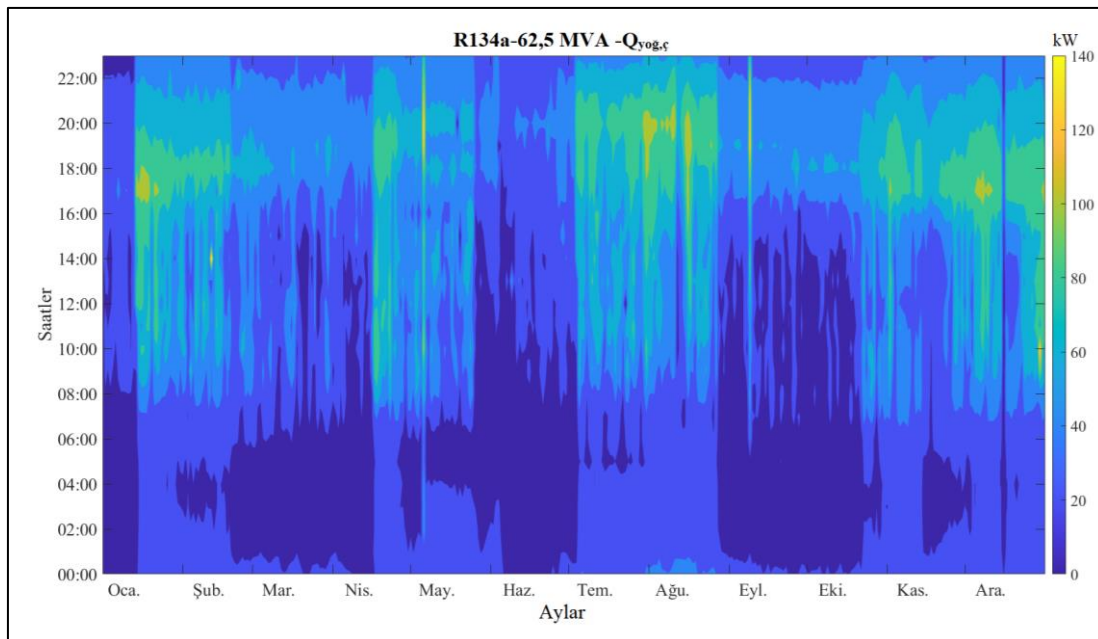
Şekil 6.25. 100 MVA R245fa yıllık $Q_{yog,ç}$ grafiği

100 MVA ve R245fa akışkanına ait diyagramda $Q_{yog,\zeta}$ 'in en yüksek 250 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 180-230 kW arasındadır.



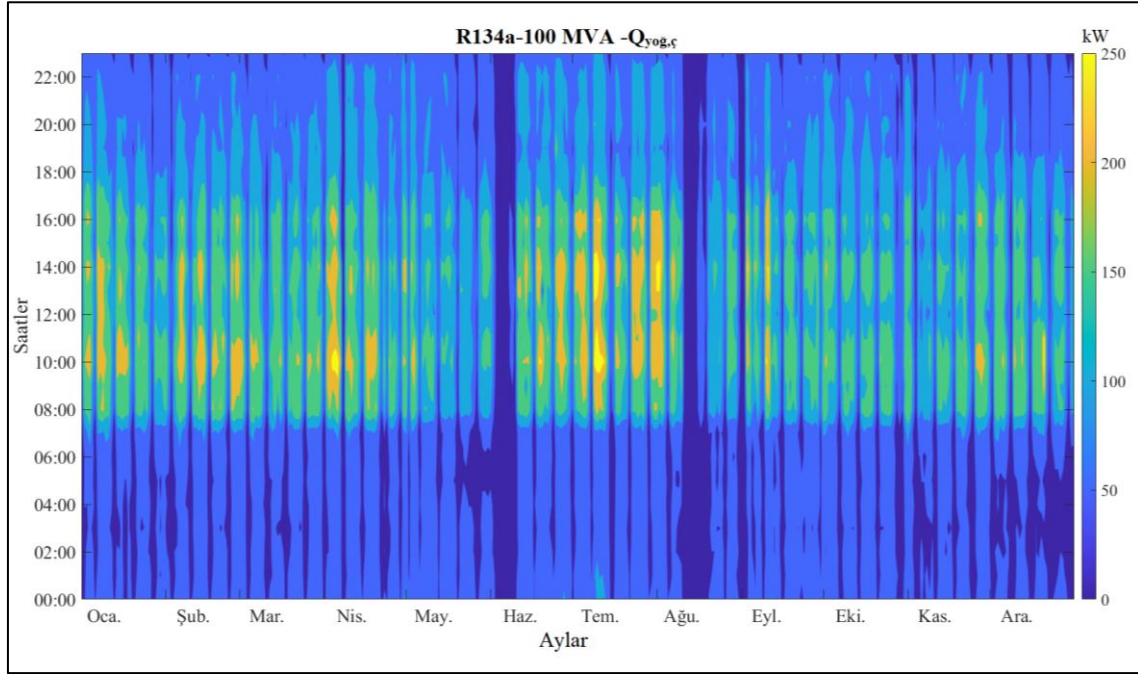
Şekil 6.26. 250 MVA R245fa yıllık $Q_{yog,\zeta}$ grafiği

250 MVA ve R245fa akışkanına ait diyagram incelendiğinde $Q_{yog,\zeta}$ 'in en yüksek 550 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 300-350 kW arasındadır.



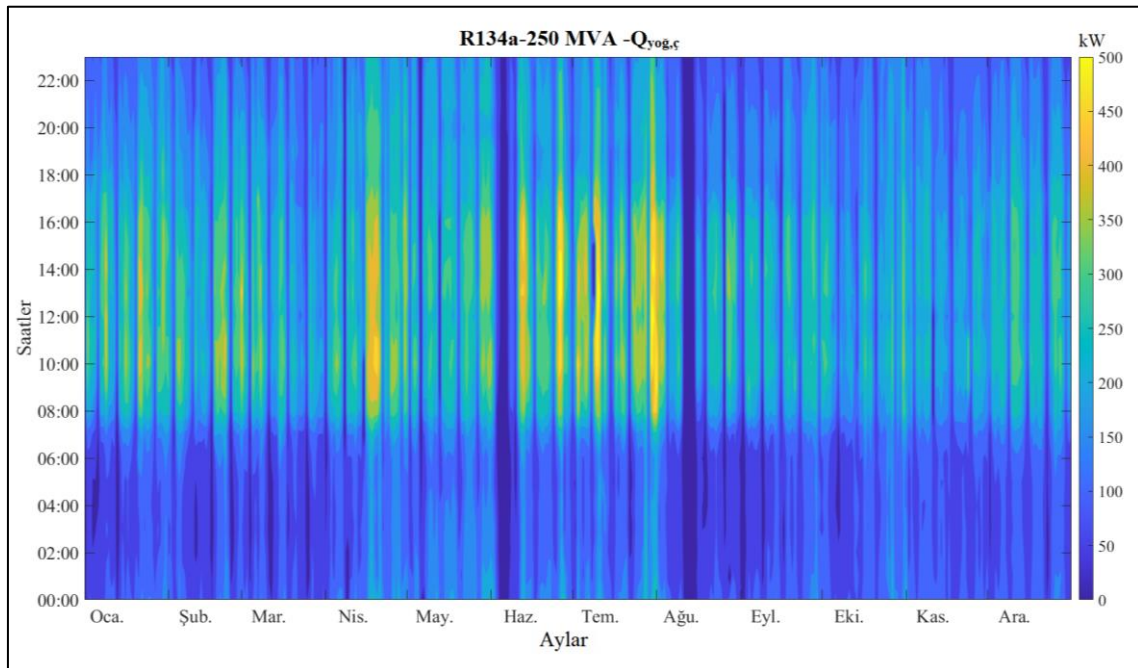
Şekil 6.27. 62,5 MVA R134a yıllık $Q_{yog,\zeta}$ grafiği

62,5 MVA ve R134a akışkanına ait diyagram incelendiğinde $Q_{yog,\zeta}$ 'in en yüksek 140 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 60-80 kW arasındadır.



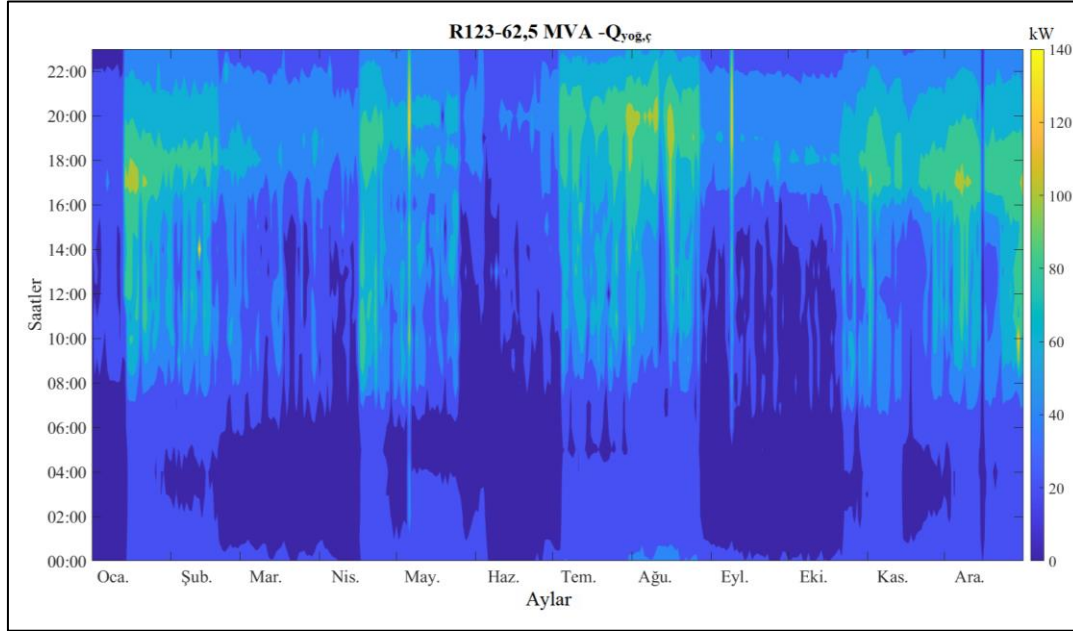
Şekil 6.28. 100 MVA R134a yıllık $Q_{yog,\zeta}$ grafiği

100 MVA ve R134a akışkanına ait diyagramda $Q_{yog,\zeta}$ 'in en yüksek 250 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 150-200 kW arasındadır.



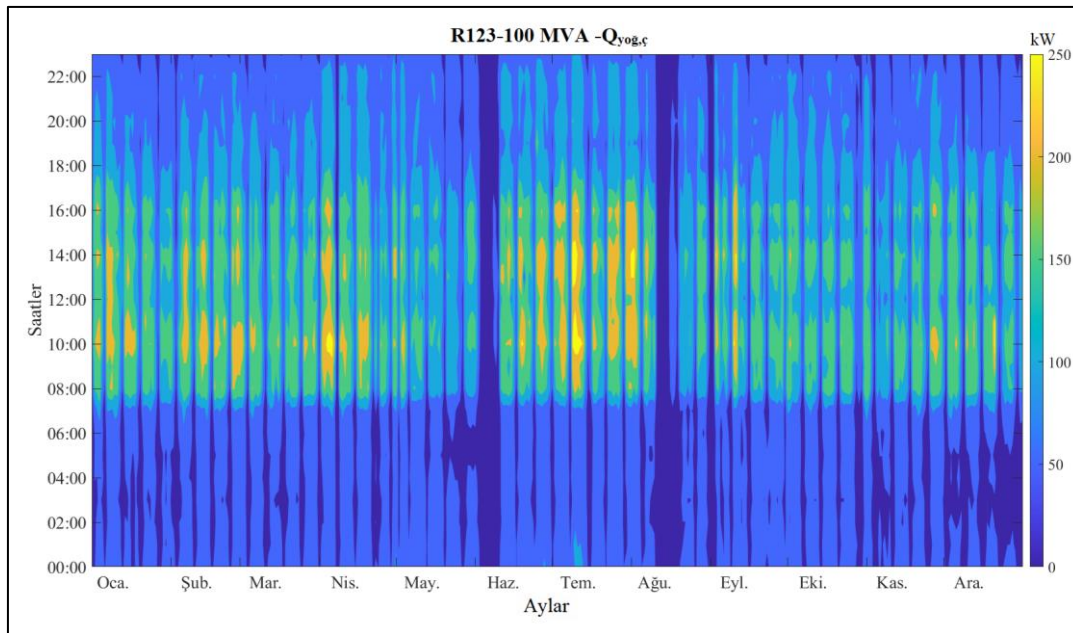
Şekil 6.29. 250 MVA R134a yıllık $Q_{yog,\zeta}$ grafiği

250 MVA ve R134a akışkanına ait diyagram incelendiğinde $Q_{yog,\zeta}$ 'ın en yüksek 500 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 300-350 kW arasındadır.



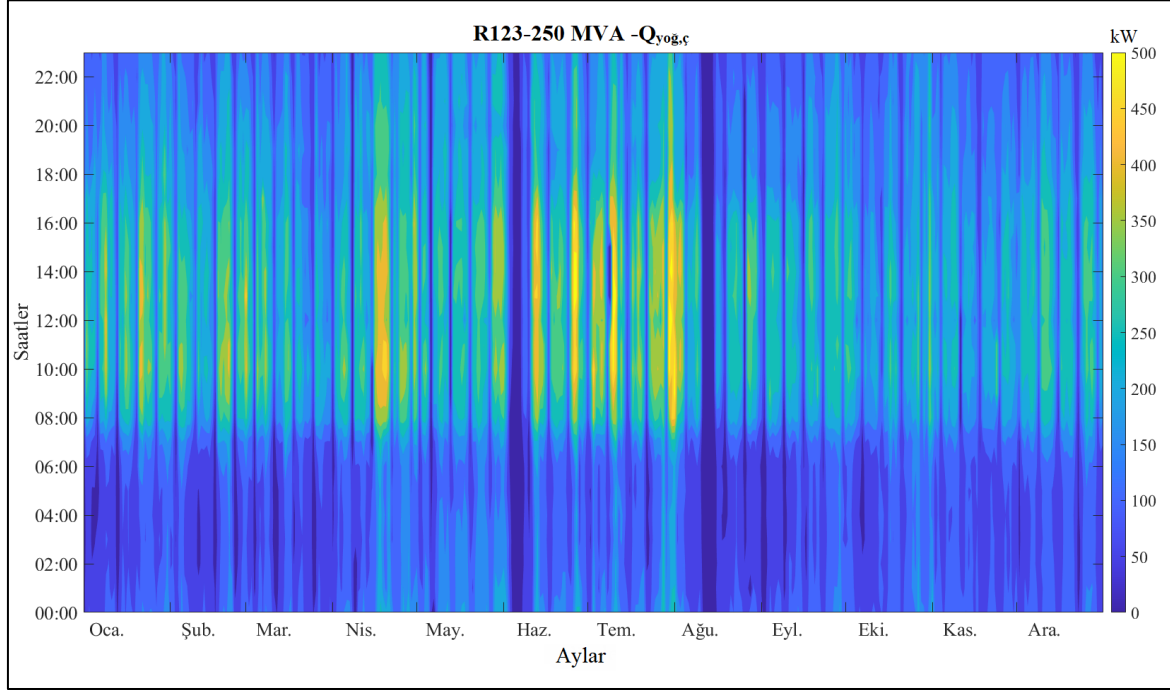
Şekil 6.30. 62,5 MVA R123 yıllık $Q_{yog,\zeta}$ grafiği

62,5 MVA ve R123 akışkanına ait diyagram incelendiğinde $Q_{yog,\zeta}$ 'ın en yüksek 140 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 60-80 kW arasındadır.



Şekil 6.31. 100 MVA R123 yıllık $Q_{yog,\zeta}$ grafiği

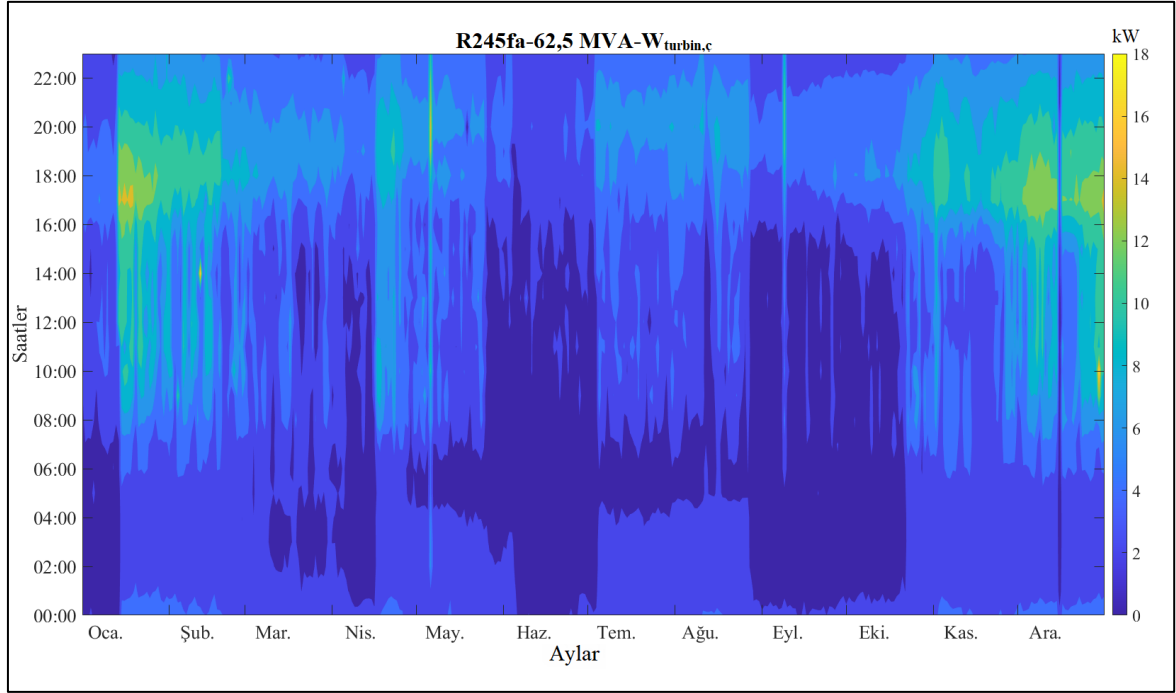
100 MVA ve R123 akışkanına ait diyagramda $Q_{yog,\zeta}$ 'ın en yüksek 250 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 150-200 kW arasındadır.



Şekil 6.32. 250 MVA R123 yıllık $Q_{yog,\zeta}$ grafiği

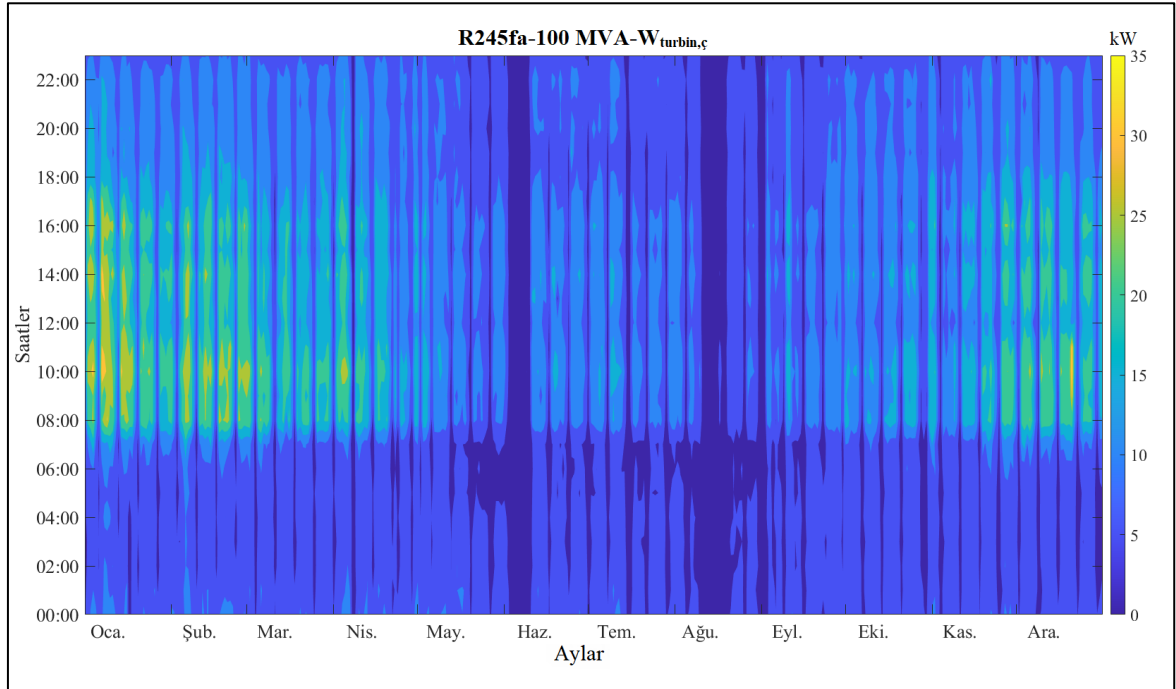
250 MVA ve R123 akışkanına ait diyagram incelendiğinde $Q_{yog,\zeta}$ 'ın en yüksek 500 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 300-350 kW arasındadır.

$Q_{yog,\zeta}$ diyagramlarına benzer şekilde, üretilen elektrik miktarını hesaplayabilmek için $W_{türbin,\zeta}$ diyagramları da oluşturulmuştur. Farklı organik akışkanlar için farklı güçteki transformatörlere ait yıllık $W_{türbin,\zeta}$ grafikleri Şekil 6.33-Şekil 6.41'de gösterilmiştir.



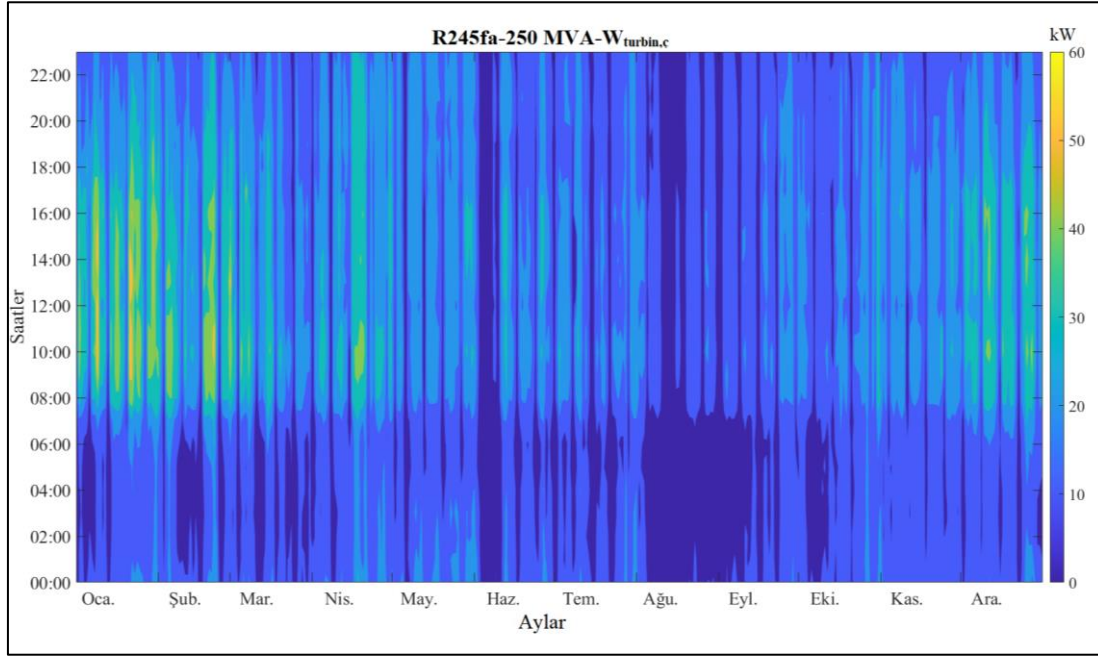
Şekil 6.33. 62,5 MVA R245fa yıllık $W_{\text{türbin,ç}}$ grafiği

62,5 MVA ve R245fa akışkanına ait diyagram incelendiğinde $W_{\text{türbin,ç}}$ 'in en yüksek 18 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 6-10 kW arasındadır.



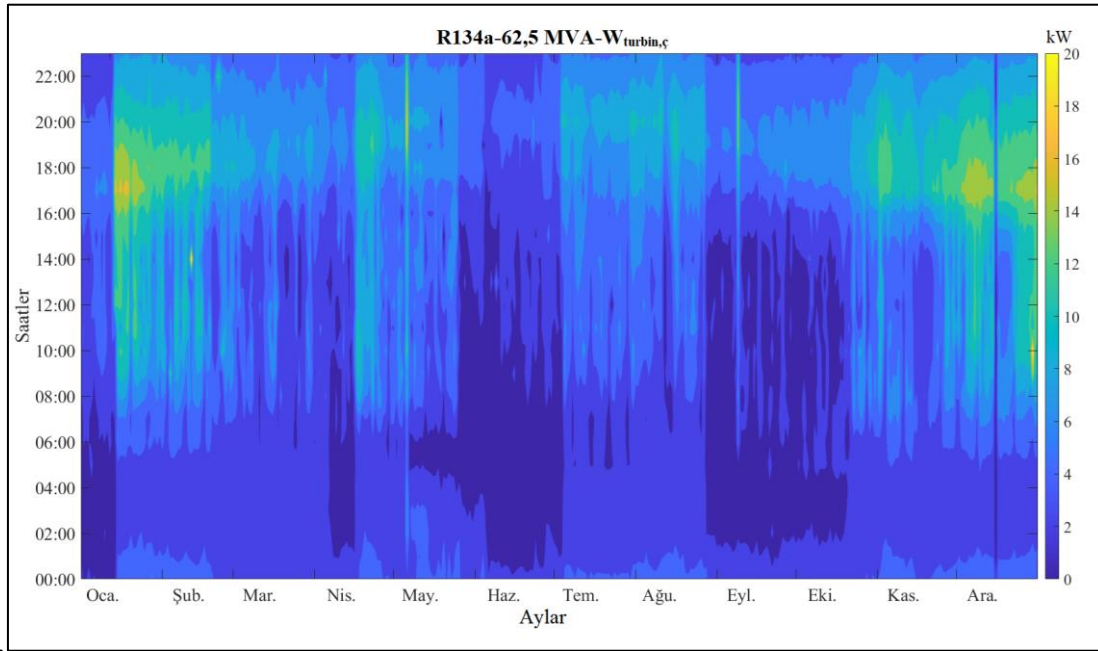
Şekil 6.34. 100 MVA R245fa yıllık $W_{\text{türbin,ç}}$ grafiği

100 MVA ve R245fa akışkanına ait diyagram incelendiğinde $W_{\text{türbin},\text{ç}}$ 'in en yüksek 35 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 15-20 kW arasındadır.



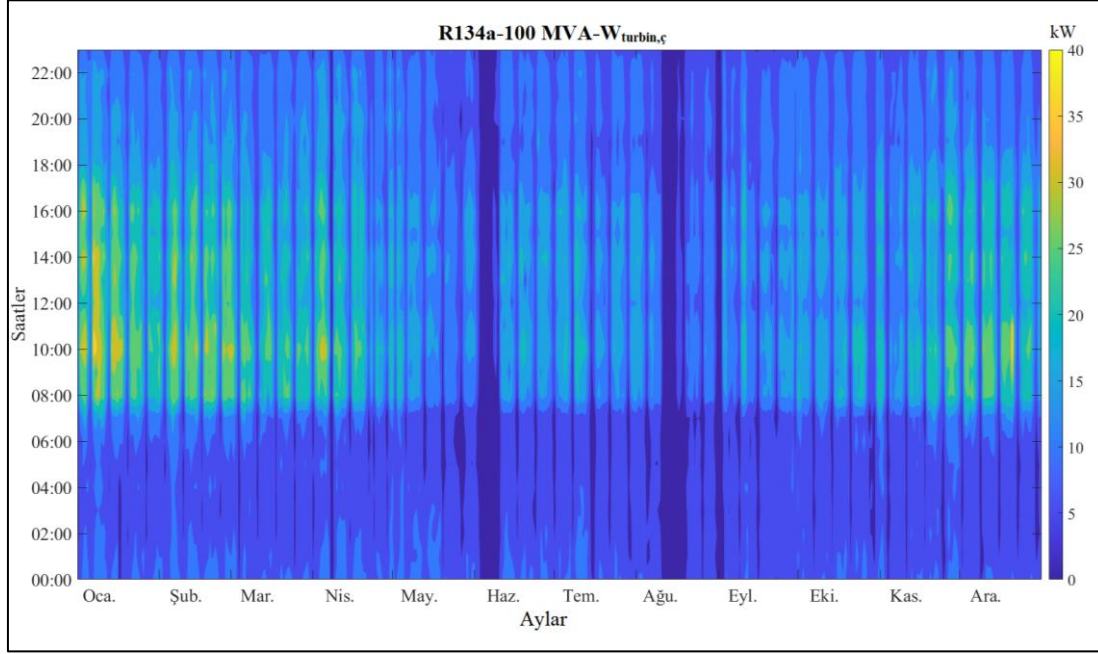
Şekil 6.35. 250 MVA R245fa yıllık $W_{\text{türbin},\text{ç}}$ grafiği

250 MVA ve R245fa akışkanına ait diyagram incelendiğinde $W_{\text{türbin},\text{ç}}$ 'in en yüksek 60 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 30-40 kW arasındadır.



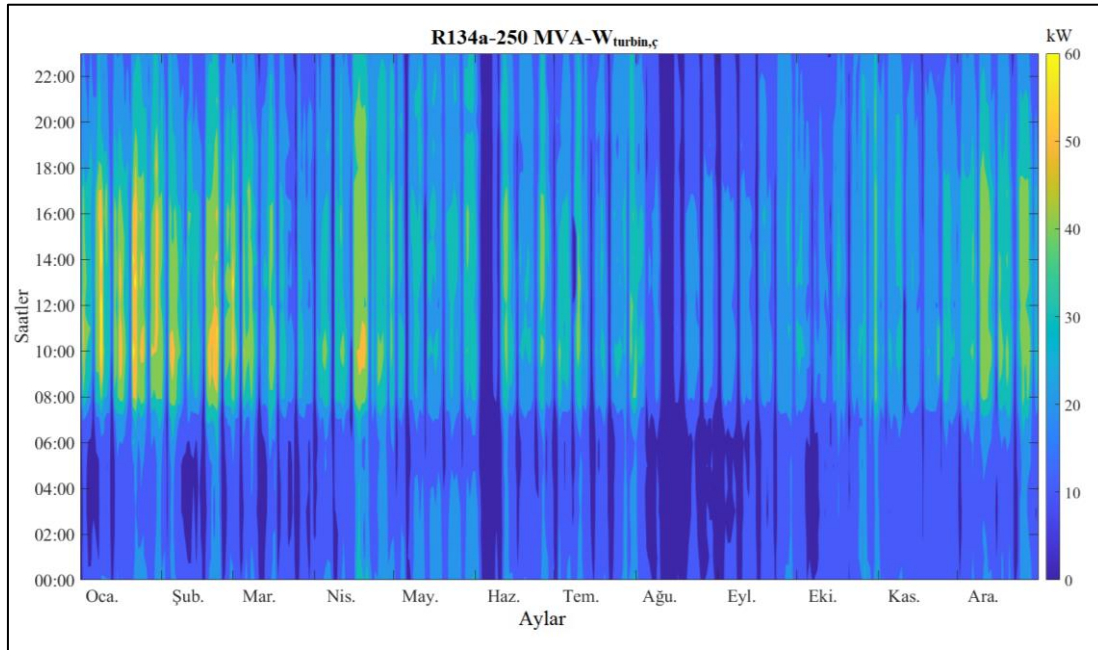
Şekil 6.36. 62,5 MVA R134a yıllık $W_{\text{türbin},\text{ç}}$ grafiği

62,5 MVA ve R134a akışkanına ait diyagram incelendiğinde $W_{\text{türbin},\text{ç}}$ 'in en yüksek 20 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 10-12 kW arasındadır.



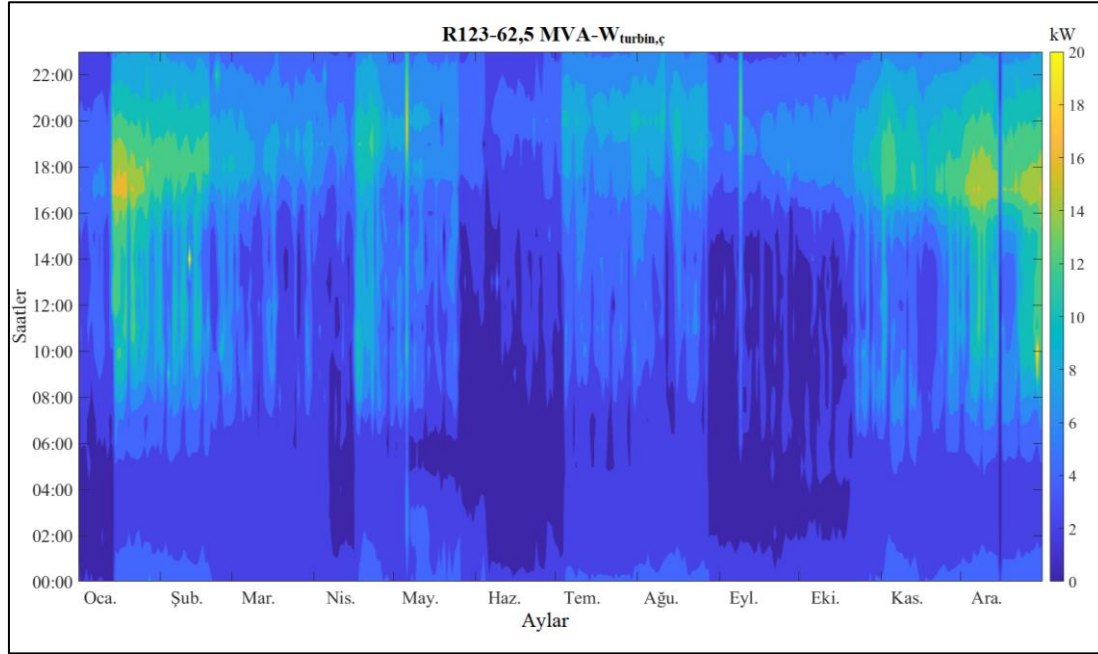
Şekil 6.37. 100 MVA R134a yıllık $W_{\text{türbin},\text{ç}}$ grafiği

100 MVA ve R134a akışkanına ait diyagram incelendiğinde $W_{\text{türbin},\text{ç}}$ 'in en yüksek 40 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 20-25 kW arasındadır.



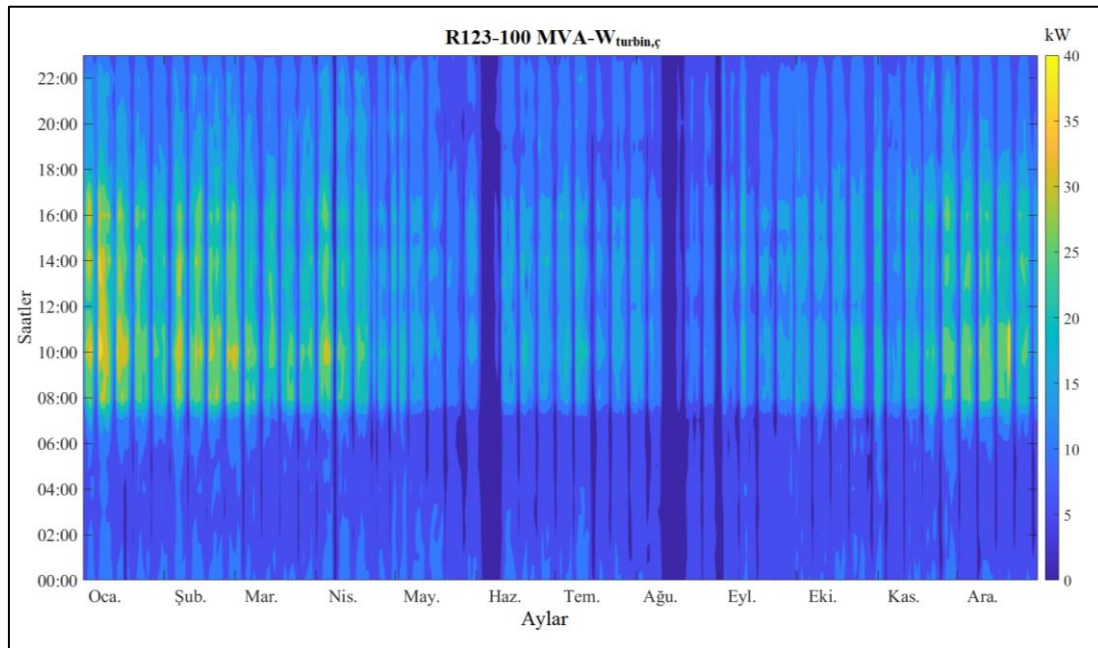
Şekil 6.38. 250 MVA R134a yıllık $W_{\text{türbin},\text{ç}}$ grafiği

250 MVA ve R134a akışkanına ait diyagram incelendiğinde $W_{\text{türbin},\text{ç}}$ 'in en yüksek 60 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 30-40 kW arasındadır.



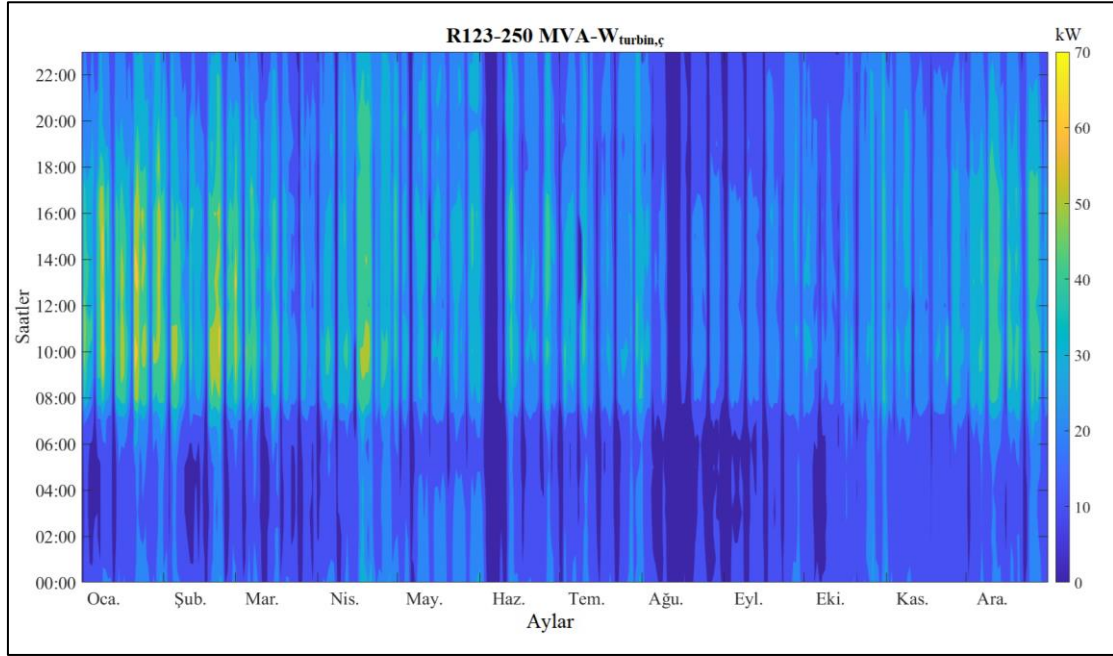
Şekil 6.39. 62,5 MVA R123 yıllık $W_{\text{türbin},\text{ç}}$ grafiği

62,5 MVA ve R123 akışkanına ait diyagram incelendiğinde $W_{\text{türbin},\text{ç}}$ 'in en yüksek 20 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 10-12 kW arasındadır.



Şekil 6.40. 100 MVA R123 yıllık $W_{\text{türbin},\text{ç}}$ grafiği

100 MVA ve R123 akışkanına ait diyagram incelendiğinde $W_{\text{türbin},\zeta}$ 'ın en yüksek 40 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 20-25 kW arasındadır.



Şekil 6.41. 250 MVA R123 yıllık $W_{\text{türbin},\zeta}$ grafiği

250 MVA ve R123 akışkanına ait diyagram incelendiğinde $W_{\text{türbin},\zeta}$ 'ın en yüksek 70 kW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Yıl genelinde değerler ortalama 35-45 kW arasındadır.

62,5 MVA, 100MVA ve 250 MVA güç transformatörleri için toplam elektrik üretim miktarları eleman kapasiteleri kullanılarak hesaplanmıştır. 62,5 MVA, 100 MVA ve 250 MVA güç transformatörleri için hesaplanan yıllık toplam $W_{\text{türbin},\zeta}$ miktarı Çizelge 6.4'te gösterilmiştir. 3 farklı organik akışkan için hesaplanan yıllık toplam elektrik üretim miktarları incelenmiştir. R123 için hesaplanan toplam elektrik üretimi maksimum miktardayken, en az değer R245fa için hesaplanmıştır.

Çizelge 6.4. Yıllık toplam elektrik üretim miktarı

	R134a	R245fa	R123
62,5 MVA	43.367 kWh	36.773 kWh	44.091 kWh
100 MVA	103.083 kWh	85.731 kWh	104.701 kWh
250 MVA	188.871 kWh	156.961 kWh	191.808 kWh

Eleman kapasitelerinin belirlenmesinden sonra buharlaştırıcı ve yoğuşturucu tasarımı yapılmış ve bu elemanların toplam ısı transferi alanları belirlenmiştir. Alanların belirlenmesinde LMDT yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde ilk olarak yoğuşturucu ve buharlaştırıcı içerisindeki toplam ısı transfer katsayıları belirlenmiştir. Çizelge 6.5'te buharlaştırıcı ve yoğuşturucu için öngörülen toplam ısı transfer katsayıları verilmiştir. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu için toplam ısı transfer katsayıları literatürden yararlanılarak seçilmiştir [51].

Çizelge 6.5. Isı değiştiricilerin toplam ısı transfer katsayısı

Bileşen	Toplam Isı Transfer Katsayısı ($W/m^2.K$)
Buharlaştırıcı	1000
Yoğuşturucu	1200

Buharlaştırıcı ve yoğuşturucunun alanı hesaplanırken Bölüm 4'te bulunan Eşitlik 4.18 kullanılmıştır. Burada $\dot{Q}$ değeri buharlaştırıcı için, elde edilen debi ve entalpiler kullanılarak hesaplanan maksimum $\dot{Q}_{in}$, yoğuşturucu için ise, elde edilen debi ve entalpiler kullanılarak hesaplanan maksimum $\dot{Q}_{yoğ,ç}$ değeridir. Hesaplanan bu değerler farklı transformatörler ve farklı akışkanlar için Çizelge 6.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.6. Transformatörler için $\dot{Q}$ değerleri

		R245fa	R134a	R123
62,5 MVA	$\dot{Q}_{buh,g}$ (kW)	176,2	176,2	176,2
	$\dot{Q}_{yoğ,ç}$ (kW)	158,2	155,2	154,7
100 MVA	$\dot{Q}_{buh,g}$ (kW)	315,7	315,7	315,7
	$\dot{Q}_{yoğ,ç}$ (kW)	299,2	292	292,3
250 MVA	$\dot{Q}_{buh,g}$ (kW)	580,8	580,8	580,8
	$\dot{Q}_{yoğ,ç}$ (kW)	550,7	537,5	538

Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'da verilen değerler ve Bölüm 5.3.1'de bulunan Eşitlik 5.18 kullanılarak buharlaştırıcı ve yoğuşturucu alanları bulunmuştur. Örnek olarak R134a

akışkanı ve 100 MVA gücündeki güç transformatörü için yapılan hesaplamalar gösterilmiştir.

İlk olarak buharlaştırıcı için yapılan hesaplar gösterilmiştir. Yıllık yük tevzi verileri kullanılarak ulaşılan değerlerde buharlaştırıcıya verilen ısı miktarının en yüksek değeri $Q_{buh,g} = 315,725 \text{ kW}$ 'dır. Bu değer için sıcaklık değerleri ise $T_2=40^\circ\text{C}$, $T_3=70^\circ\text{C}$, $T_7=80^\circ\text{C}$ ve $T_8=60^\circ\text{C}$ olarak ele alınmıştır. Eşitlik 5.20 kullanılarak ΔT_{lm} Eşitlik 6.4'te gösterilen şekilde hesaplanmıştır;

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_7 - T_3) - (T_8 - T_2)}{\ln\left(\frac{T_7 - T_3}{T_8 - T_2}\right)} = \frac{(80 - 70) - (60 - 40)}{\ln\left(\frac{80 - 70}{60 - 40}\right)} = 14,42695^\circ\text{C} \quad (6.4)$$

Logaritmik sıcaklık farkının hesaplanmasıyla Eşitlik 5.21 kullanılarak buharlaştırıcı alanı hesabı Eşitlik 6.5'te belirtilmiştir.

$$(315,725 \text{ kW}) \times \left(\frac{1000W}{1kW}\right) = (1000W) \times A \times (14,42695^\circ\text{C}) \Rightarrow A = 21,88 \text{ m}^2 \quad (6.5)$$

Daha sonra yoğunlaştırıcı için yapılan hesaplar gösterilmiştir. Yıllık yük tevzi verileri kullanılarak ulaşılan değerlerde yoğunlaştırıcıdan atılan ısı miktarının en yüksek değeri $Q_{yoğ,\phi} = 292 \text{ kW}$ 'dır. Bu değer için sıcaklık değerleri ise $T_1=39,31^\circ\text{C}$, $T_4=39,31^\circ\text{C}$, $T_5=29,31^\circ\text{C}$ ve $T_6=34^\circ\text{C}$ olarak ele alınmıştır. Eşitlik 5.20 kullanılarak ΔT_{lm} Eşitlik 6.6'da gösterilen şekilde hesaplanmıştır;

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_4 - T_6) - (T_1 - T_5)}{\ln\left(\frac{T_4 - T_6}{T_1 - T_5}\right)} = \frac{(39,31 - 34) - (39,31 - 29,31)}{\ln\left(\frac{39,31 - 34}{39,31 - 29,31}\right)} = 7,4099^\circ\text{C} \quad (6.6)$$

Logaritmik sıcaklık farkının hesaplanmasıyla Eşitlik 5.21 kullanılarak buharlaştırıcı alanı hesabı Eşitlik 6.7'de belirtilmiştir.

$$(292 \text{ kW}) \times \left(\frac{1000W}{1kW}\right) = (1000W) \times A \times (7,4099^\circ\text{C}) \Rightarrow A = 32,84 \text{ m}^2 \quad (6.7)$$

100 MVA güç transformatörü ve R245fa ve R123 için, 6,5 MVA ve 250 MVA güç transformatörleri ve R134a, R245fa ve R123 akışkanları için alan hesaplamaları da aynı şekilde yapılmıştır. Hesaplanan alanlar Çizelge 6.7'de belirtilmiştir.

Çizelge 6.7. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu alanları

		R134a	R245fa	R123
Buharlaştırıcı	62,5 MVA Alan (m ²)	12,21	12,21	12,21
	100 MVA Alan (m ²)	21,88	21,88	21,88
	250MVA Alan (m ²)	40,26	40,26	40,26
Yoğuşturucu	62,5 MVA Alan (m ²)	17,60	17,94	17,54
	100 MVA Alan (m ²)	32,84	33,65	32,87
	250MVA Alan (m ²)	59,29	60,75	59,34

ORÇ sistemi elemanlarının kapasite ve boyutlarının belirlenmesinden sonra termo-ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Bölüm 5.4'te belirtilen, termo-ekonomik analizler için gerekli olan denklemler kullanılarak termo-ekonomik hesaplamalar yapılmıştır. Çizelge 6.8, Çizelge 6.9 ve Çizelge 6.10'da 62,5 MVA, 100 MVA ve 250 MVA güç transformatörleri için bileşenlerin kapasiteleri belirtilmiştir. Kullanılan organik akışkana göre bu değerler farklılık göstermektedir. Tez kapsamında ele alınan akışkanlara göre değerler de çizelgelerde yer almaktadır. Pompa ve türbin için belirlenen kapasiteler de TEİAŞ yük tevzi verilerine göre belirlenmiştir. Pompa ve türbin için hesaplanan maksimum iş miktarı dikkate alınmıştır.

Çizelge 6.8. 62,5 MVA için bileşen kapasiteleri (Y)

	R134a	R245fa	R123
Buharlaştırıcı	12,21	12,21	12,21
Yoğuşturucu	17,60	17,94	17,55
Pompa	0,85	0,20	0,13
Türbin	21,10	18,02	21,49

Çizelge 6.9. 100 MVA için bileşen kapasiteleri (Y)

	R134a	R245fa	R123
Buharlaştırıcı	21,88	21,88	21,88
Yoğuşturucu	32,84	33,64	32,87
Pompa	1,53	0,40	0,23
Türbin	40,4	35,4	41,4

Çizelge 6.10. 250 MVA için bileşen kapasiteleri (Y)

	R134a	R245fa	R123
Buharlaştırıcı	40,26	40,26	40,26
Yoğuşturucu	59,29	60,75	59,34
Pompa	2,82	0,7	0,42
Türbin	68,9	60	70,7

Çizelge 6.11’de termo-ekonomik analiz bölümünde belirtilen denklemlerde kullanılacak olan parametreler gösterilmiştir. Bu parametreler belirlenirken bileşenlerin boyutu, bileşenlerde kullanılan malzemeler ve bileşen tipleri dikkate alınmıştır [52].

Çizelge 6.11. Bileşen maliyet parametreleri

X	Y	$C_{1,X}$	$C_{2,X}$	$C_{3,X}$	$B_{1,X}$	$B_{2,X}$	$F_{M,X}$	F_{BM}	$K_{1,X}$	$K_{1,X}$	$K_{1,X}$
Buharlaştırıcı	$A_{BUH}(m^2)$	4,3247	-0,303	0,1634	1,63	1,66	1,4	-	0,0388	-0,1127	0,08183
Yoğuşturucu	$A_{YOG}(m^2)$	4,3247	-0,303	0,1634	1,63	1,66	1,4	-	0	0	0
Pompa	W_P	3,3892	0,0536	0,1538	1,89	1,35	1,6	-	0	0	0
Türbin	W_T	2,7051	1,4398	-0,1776	-	-	-	3,4	0	0	0

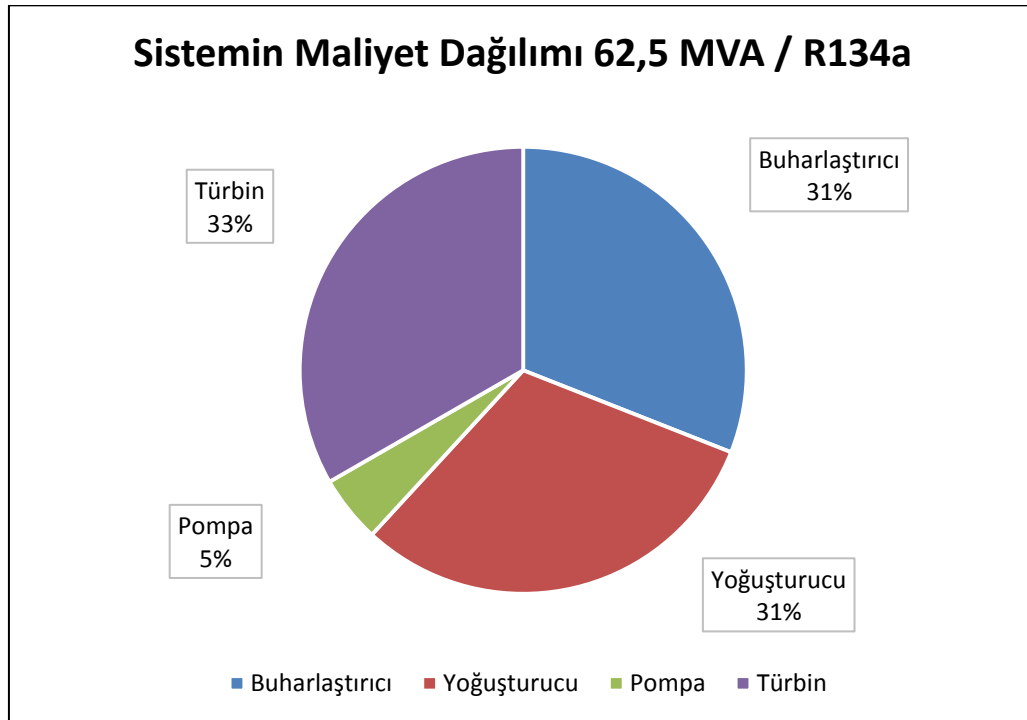
Çizelgelerdeki değerlerin Bölüm 5.4’te verilen eşitliklerde yerine koyulması ile sisteme ait toplam maliyet hesabı yapılmıştır. Eşitlik 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 ve 5.27 kullanılmıştır. 62,5 MVA, 100 MVA ve 250 MVA güç transformatörlerinin toplam maliyetleri R134a, R245fa ve R123 organik akışkanları için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 6.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.12. Toplam maliyet (\$)

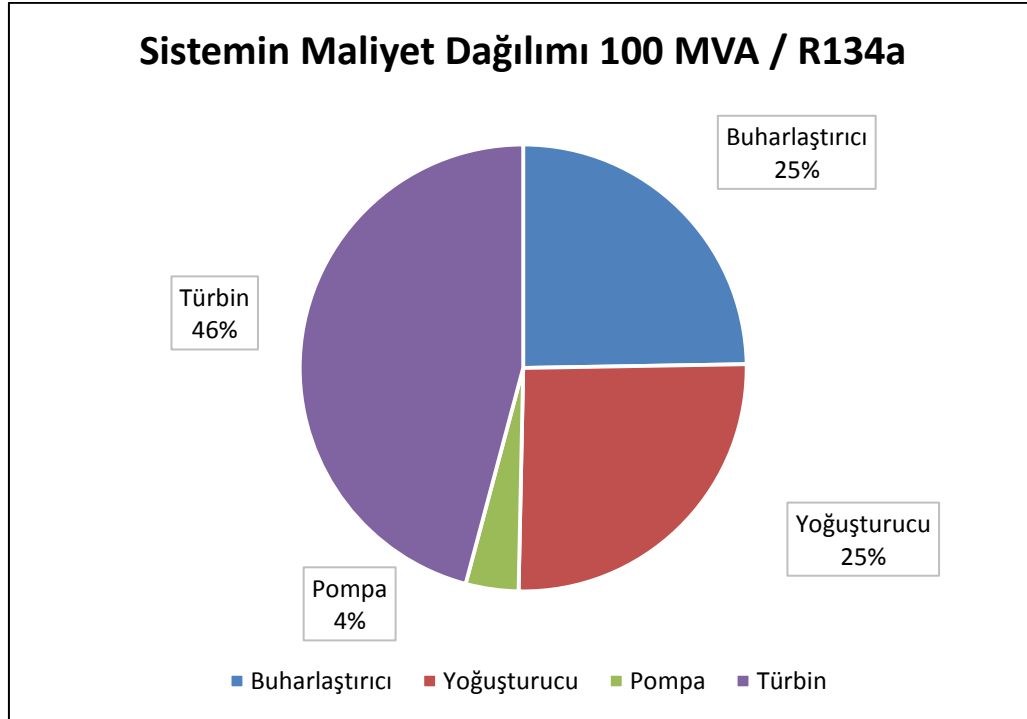
	R134a	R245fa	R123
62,5 MVA	\$ 360.439	\$ 341.838	\$ 363.302
100 MVA	\$ 476.750	\$ 449.129	\$ 478.996
250 MVA	\$ 631.684	\$ 590.394	\$ 632.979

Farklı güçler için hesaplanan toplam maliyetler, incelenen 3 organik akışkan için de birbirine yakın değerlerdir. Bu maliyetlerin bileşenlere göre dağılımı grafiklerde gösterilmiştir. Bu grafikler, beklenmedik durum maliyetleri hesaba katılmadan (Eşitlik 5.27), toplam bileşen maliyetleri düşünülerek oluşturulmuştur.

Şekil 6.42 62,5 MVA, Şekil 6.43 100 MVA ve Şekil 6.44 250 MVA gücündeki güç transformatörlerine ait olup R134a organik akışkanına ait maliyet dağılım grafikleridir. Şekil 6.42’de görüldüğü gibi maliyetin büyük bir kısmını, \$101.759 ile türbin oluşturmaktadır. Buharlaştırıcı maliyeti \$94.617, yoğuşturucu maliyeti \$94.281 ve pompa maliyeti \$14.799 olarak hesaplanmıştır.

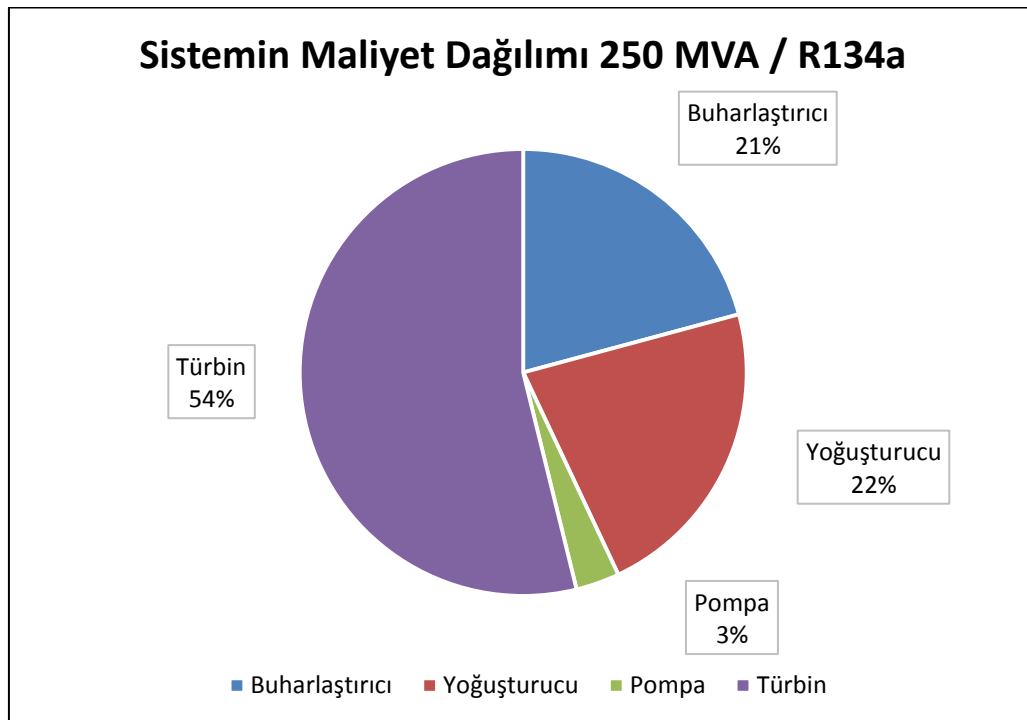


Şekil 6.42. 62,5 MVA / R134a maliyet dağılımı



Şekil 6.43. 100 MVA / R134a maliyet dağılımı

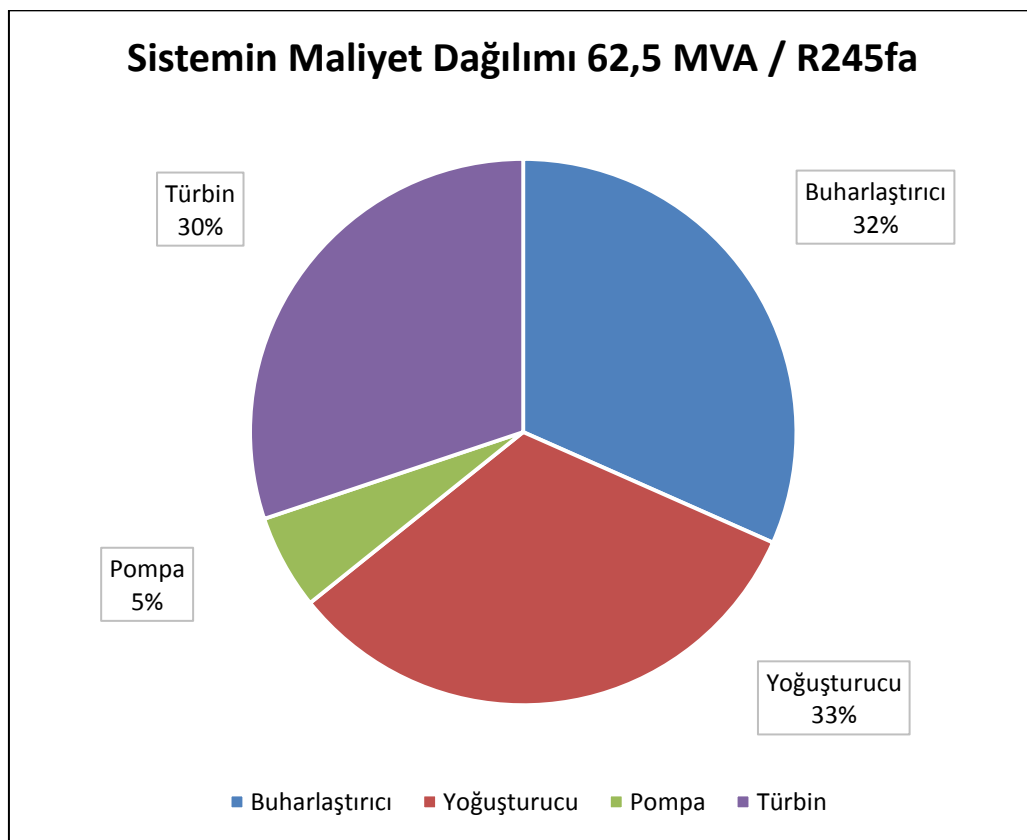
Şekil 6.43'te görüldüğü gibi maliyetin büyük bir kısmını, \$185.250 ile türbin oluşturmaktadır. Buharlaştırıcı maliyeti \$99.924, yoğuşturucu maliyeti \$103.420 ve pompa maliyeti \$15.431 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.44. 250 MVA / R134a maliyet dağılımı

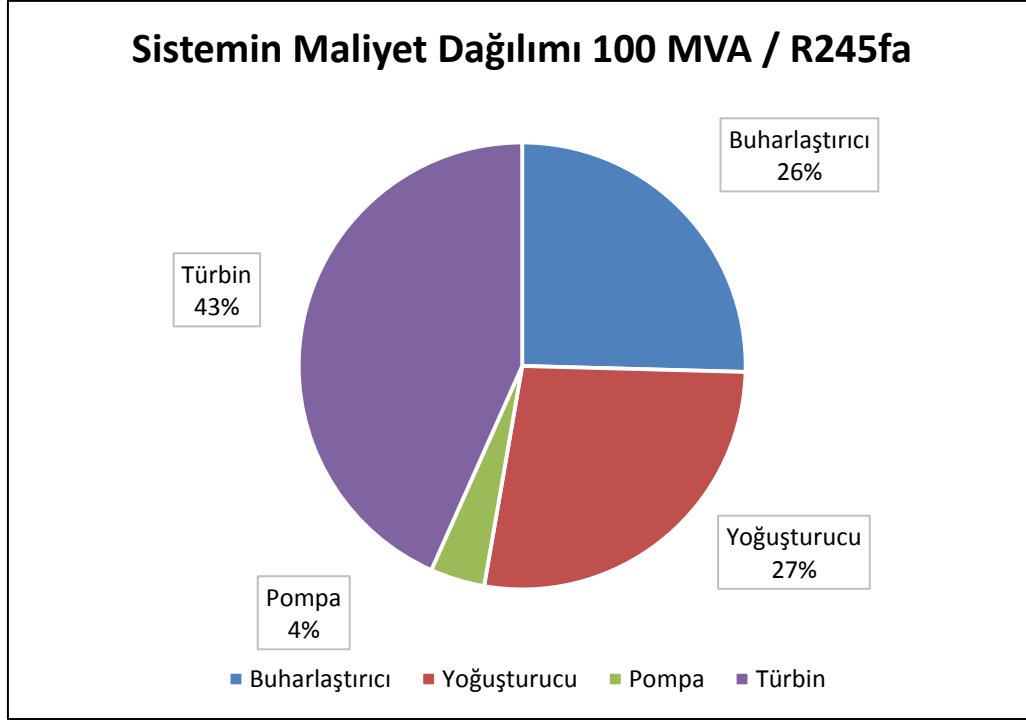
Şekil 6.44'te görüldüğü gibi maliyetin büyük bir kısmını, \$288.223 ile türbin oluşturmaktadır. Buharlaştırıcı maliyeti \$111.390, yoğuşturucu maliyeti \$118.785 ve pompa maliyeti \$16.926 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 6.45 62,5 MVA, Şekil 6.46 100 MVA ve Şekil 6.47 250 MVA gücündeki güç transformatörlerine ait olup R245fa organik akışkanına ait maliyet dağılım grafikleridir. Şekil 6.45'te görüldüğü gibi, türbinin maliyeti \$87.334, buharlaştırıcı maliyeti \$91.632, yoğuşturucu maliyeti \$94.474 ve pompa maliyeti \$16.252 olarak hesaplanmıştır.



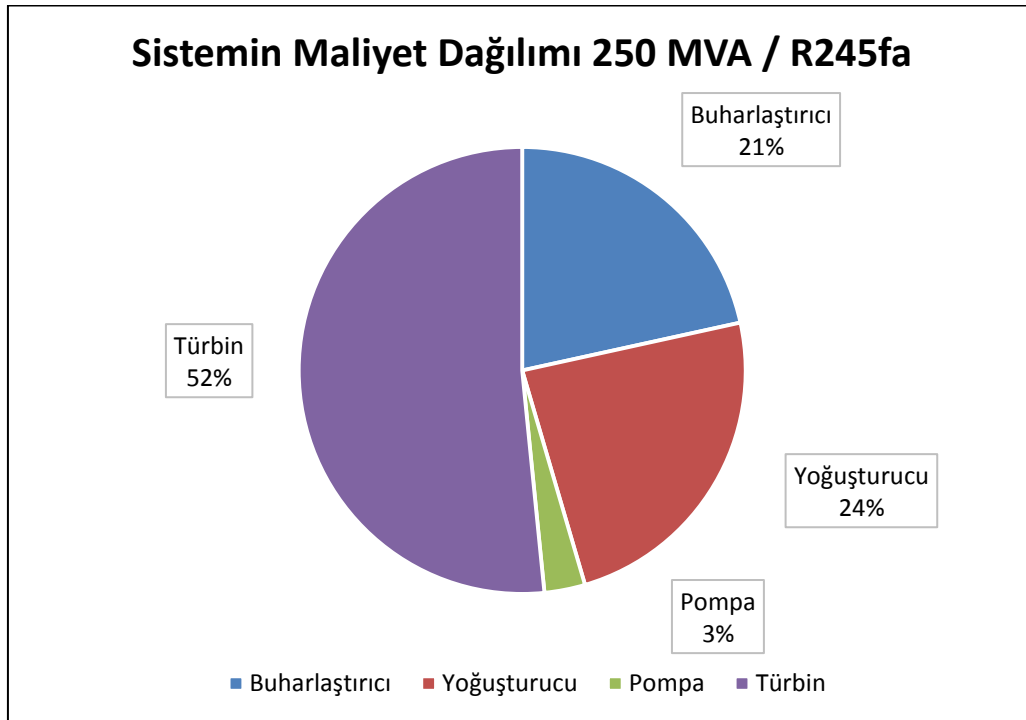
Şekil 6.45. 62,5 MVA / R245fa maliyet dağılımı

Şekil 6.46'da görüldüğü gibi, maliyetin büyük bir kısmını, \$164.930 ile türbin oluşturmaktadır. Buharlaştırıcı maliyeti \$96.773, yoğuşturucu maliyeti \$103.907 ve pompa maliyeti \$15.006 olarak hesaplanmıştır.



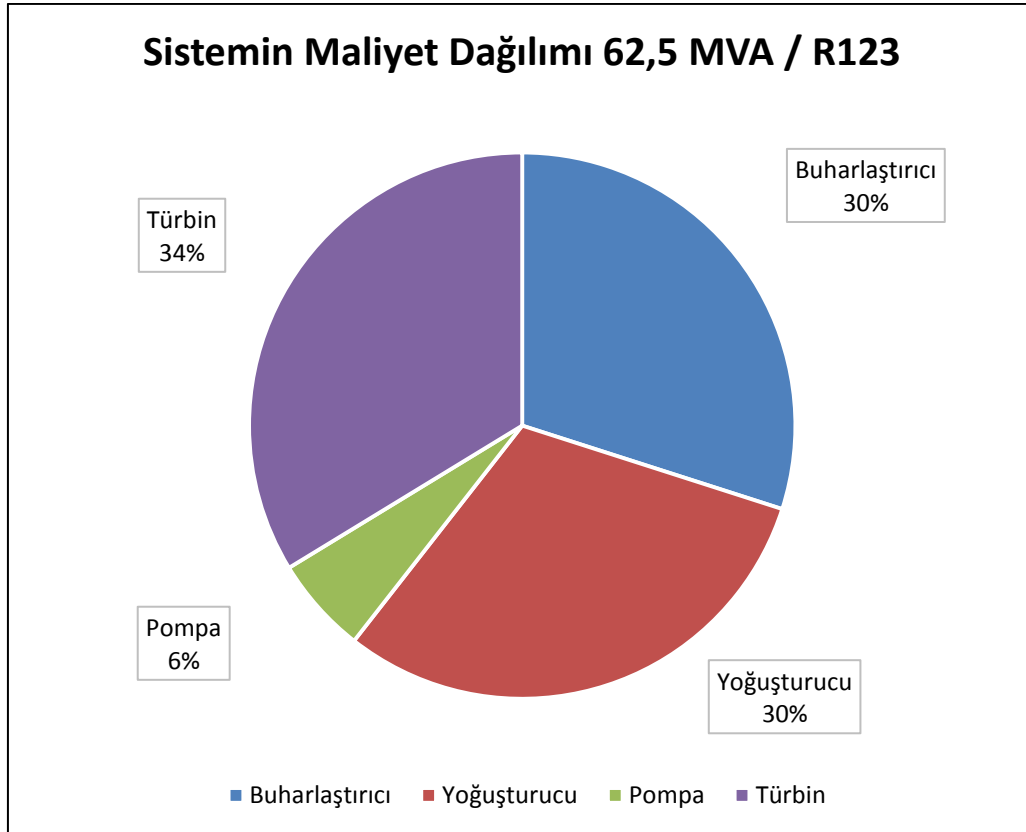
Şekil 6.46. 100 MVA / R245fa maliyet dağılımı

Şekil 6.47’de görüldüğü gibi, maliyetin büyük bir kısmını, \$258.120 ile türbin oluşturmaktadır. Buharlaştırıcı maliyeti \$107.878, yoğuşturucu maliyeti \$119.590 ve pompa maliyeti \$14.744 olarak hesaplanmıştır.



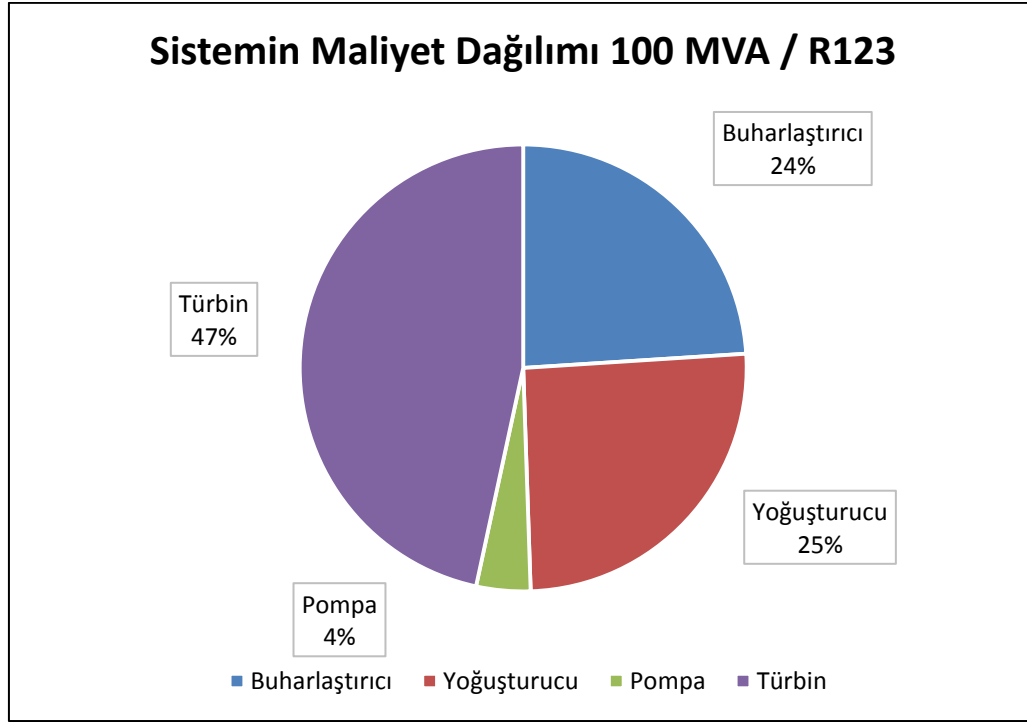
Şekil 6.47. 250 MVA / R245fa maliyet dağılımı

Şekil 6.48 62,5 MVA, Şekil 6.49 100 MVA ve Şekil 6.50 250 MVA gücündeki güç transformatörlerine ait olup R123 organik akışkanına ait maliyet dağılım grafikleridir. Şekil 6.48’de görüldüğü gibi maliyetin büyük bir kısmını, \$103.800 ile türbin oluşturmaktadır. Buharlaştırıcı maliyeti \$92.188, yoğuşturucu maliyeti \$94.253 ve pompa maliyeti \$17.640 olarak hesaplanmıştır.



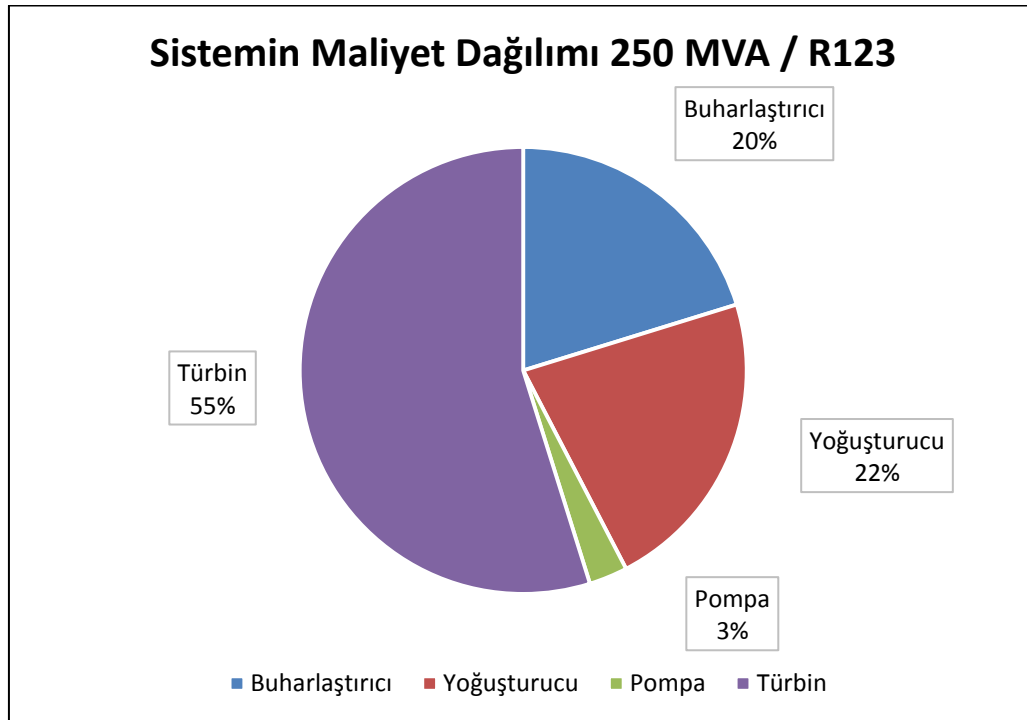
Şekil 6.48. 62,5 MVA / R123 maliyet dağılımı

Şekil 6.49’da görüldüğü gibi maliyetin büyük bir kısmını, \$189.220 ile türbin oluşturmaktadır. Buharlaştırıcı maliyeti \$97.358, yoğuşturucu maliyeti \$103.438 ve pompa maliyeti \$15.911 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.49. 100 MVA / R123 maliyet dağılımı

Şekil 6.50’de görüldüğü gibi, maliyetin büyük bir kısmını, \$294.116 ile türbin oluşturmaktadır. Buharlaştırıcı maliyeti \$108.530, yoğuşturucu maliyeti \$118.816 ve pompa maliyeti \$14.958 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.50. 250 MVA / R123 maliyet dağılımı

Sistemin maliyet dağılım grafikleri incelendiğinde en pahalı bileşen türbindir. Transformatör kapasitesi arttıkça, türbin maliyetinin toplam bileşen maliyetine oranının da artış gösterdiği görülmektedir. Grafiklere göre 62,5 MVA gücündeki transformatörler incelendiğinde türbin maliyeti toplam maliyetin yaklaşık %30-34'ü, 100 MVA gücündeki transformatörler incelendiğinde türbin maliyeti toplam maliyetin yaklaşık %43-47'si, 250 MVA gücündeki transformatörler incelendiğinde türbin maliyeti toplam maliyetin yaklaşık %52-55'i olarak hesaplanmıştır.

Sistemin termo-ekonomik analizi yapılırken Net Bugünkü Değer (NBD) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile, sistemin uygulanabilir kabul edilebileceği yatırım maliyetinin bugünkü değeri hesaplanmıştır. Termo-ekonomik analiz yapılırken şu varsayımlar ele alınmıştır;

- 5, 10 ve 20 yıl için değerlendirmeler yapılmıştır.
- NBD hesaplamalarında yıllık faiz oranı %15 olarak ele alınmıştır.
- Elektrik satış fiyatı 2 TL/kWh olarak kabul edilmiştir.

Üretilen toplam kWh miktarı belirlenerek yapılan termodinamik analiz neticesinde sonuçlara ulaşılmıştır. 62,5 MVA, 100 MVA ve 250 MVA gücündeki güç transformatörleri için hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken farklı organik akışkanlar değerlendirilmiştir. Üretilen toplam elektriğin satışı düşünülerek elde edilecek gelir belirlenmiştir. 5, 10 ve 20 yıl için ulaşılan sonuçlar aşağıdaki çizelgelerde gösterilmiştir. Elde edilen değerler belirtilen sürelerde sistemin kendini amorti edebilmesi için gerekli olan maksimum yatırım maliyetleridir. Çizelge 6.13'te 62,5 MVA, Çizelge 6.14'te 100 MVA ve Çizelge 6.15'te 250 MVA gücündeki güç transformatörleri için ulaşılan NBD hesapları gösterilmiştir.

Çizelge 6.13. 62,5 MVA için NBD hesapları

62,5 MVA	5 yıl	10 yıl	20 yıl
R134a	\$ 14.500	\$ 29.000	\$ 58.000
R245fa	\$ 18.500	\$ 37.000	\$ 74.000
R123	\$ 22.500	\$ 45.000	\$ 90.000

Çizelge 6.14. 100 MVA için NBD hesapları

100 MVA	5 yıl	10 yıl	20 yıl
R134a	\$ 34.750	\$ 69.500	\$ 139.000
R245fa	\$ 43.750	\$ 87.500	\$ 175.000
R123	\$ 53.500	\$ 107.000	\$ 214.000

Çizelge 6.15. 250 MVA için NBD hesapları

250 MVA	5 yıl	10 yıl	20 yıl
R134a	\$ 96.500	\$ 193.000	\$ 386.000
R245fa	\$ 80.250	\$ 160.500	\$ 321.000
R123	\$ 98.000	\$ 196.000	\$ 392.000

Çizelgelerde gösterilen değerler, sistemin uygulanabilir kabul edilebileceği maksimum yatırım maliyetleridir. Örnek olarak, Çizelge 6.14'te bulunan 100 MVA güç transformatörü ve R134a organik akışkanı incelendiğinde, sistemin uygulanabilir kabul edilebilmesi için, 5 yıl düşünüldüğünde toplam maliyetin \$34.750, 10 yıl düşünüldüğünde toplam maliyetin \$69.500 ve 20 yıl düşünüldüğünde toplam yatırım maliyetinin \$139.000'ı aşmaması istenmektedir.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında ORÇ sistemi kullanılarak transformatörde atık ısının geri kazanımı incelenmiştir. 62,5 MVA, 100 MVA ve 250 MVA gücündeki güç transformatörleri örnek olarak değerlendirilmiştir. R134a, R245fa ve R123 organik akışkanları ele alınmıştır. TEİAŞ'tan alınan yıllık yük tevzi verileri kullanılarak termodinamik ve termo-ekonomik analizler yapılmıştır.

Yapılan termodinamik analizler sonucunda R134a, R245fa ve R123 organik akışkanları için verim değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu verim değerlerini 3 farklı akışkan için de birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür. R134a akışkanı için, iklim ve iklime bağlı olarak değişen yoğunlaştırıcı sıcaklığına göre, en yüksek verim değeri yaklaşık 0,14, en düşük verim değeri yaklaşık 0,07'dir. R245fa akışkanı için en yüksek verim değeri yaklaşık 0,13, en düşük verim değeri ise yaklaşık 0,04'tür. R123 akışkanı için, en yüksek verim değeri yaklaşık 0,14, en düşük verim değeri yaklaşık 0,07'dir. İncelenen bu üç organik akışkan kıyaslandığında, çevrimde R134a ve R123 organik akışkanlarının kullanımı ile R245fa organik akışkanının kullanımına kıyasla daha verimli sonuçlara ulaşılmıştır. Buharlaştırıcıdan atılan yıllık ısı miktarı ve türbinde gerçekleşen yıllık iş miktarı hesaplanmıştır. Bu hesaplar sonucunda yıllık elektrik üretim miktarı 62,5 MVA güç transformatörü ve R134a akışkanı için 43.367 kWh, 62,5 MVA güç transformatörü ve R245fa akışkanı için 36.773 kWh, 62,5 MVA güç transformatörü ve R123 akışkanı için 44.091 kWh, 100 MVA güç transformatörü ve R134a akışkanı için 103.083 kWh, 100 MVA güç transformatörü ve R245fa akışkanı için 85.731 kWh, 100 MVA güç transformatörü ve R123 akışkanı için 104.701 kWh, 250 MVA güç transformatörü ve R134a akışkanı için 188.871 kWh, 250 MVA güç transformatörü ve R245fa akışkanı için 156.961 kWh, 250 MVA güç transformatörü ve R123 akışkanı için 191.808 kWh olarak hesaplanmıştır. Aynı güç değerleri ele alınarak sonuçlar kıyaslandığında, en yüksek elektrik üretimi R123 akışkanı için hesaplanmıştır.

Termodinamik analizler sonucunda termo-ekonomik analizler yapılmıştır. 62,5 MVA, 100 MVA ve 250 MVA gücündeki transformatörler için R134a, R245fa ve R123 organik akışkanları düşünülerek sistemlerin toplam maliyeti hesaplanmıştır. Bu değerler ile fizibilite çalışması yapılmıştır. Sistemlerin uygulanabilirliğini değerlendirmek için yatırım değerlendirmede en yaygın kullanılan yöntem olan Net Bugünkü Değer (NBD) yöntemi

uygulanmıştır. Toplam maliyet değerleri 62,5 MVA güç transformatörü ve R134a akışkanı için \$360.439, 62,5 MVA güç transformatörü ve R245fa akışkanı için \$341.838, 62,5 MVA güç transformatörü ve R123 akışkanı için \$363.302, 100 MVA güç transformatörü ve R134a akışkanı için \$476.750, 100 MVA güç transformatörü ve R245fa akışkanı için \$449.129, 100 MVA güç transformatörü ve R123 akışkanı için \$478.996, 250 MVA güç transformatörü ve R134a akışkanı için \$631.684, 250 MVA güç transformatörü ve R245fa akışkanı için \$590.394, 250 MVA güç transformatörü ve R123 akışkanı için \$632.979 olarak hesaplanmıştır.

Sistemin uygulanabilirliğinin değerlendirilebilmesi için NBD yöntemi kullanılmıştır. Farklı kapasitedeki güç transformatörleri ve farklı organik akışkanlar düşünülerek tasarımları yapılan sistemlerin toplam maliyet değerleri ile NBD hesaplamaları sonucunda ulaşılan maksimum yatırım maliyetleri karşılaştırılmıştır. Örnek olarak, toplam yatırım maliyeti \$476.750 olan, çevrimde organik akışkanın R134a olduğu 100 MVA güç transformatörü incelendiğinde, yapılan termo-ekonomik analizler sonucunda, NBD 5 yıl için \$34.750, 10 yıl için 69.500 ve 20 yıl için \$139.000 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan toplam yatırım maliyeti, elde edilen NBD değerlerinin çok üzerindedir. Süre 20 yıl olarak düşünüldüğünde bile maliyetler arasında çok büyük bir fark vardır. Bu değerlendirmeler diğer tasarımlar için de yapılmıştır. Sonuç olarak, toplam maliyet değerleri hesaplanan maksimum yatırım maliyet değerlerinden (NBD) oldukça yüksektir. Yatırım maliyetinin hesaplanan NBD değerlerinin altında olması durumunda sistem uygulanabilir.

Bu tez kapsamında yapılan hesaplamalar ve ulaşılan sonuçlar değerlendirildiğinde, transformatörde ORÇ kullanımı ile enerji üretimi her ne kadar mümkün olsa da tasarlanan sistemin yüksek maliyetleri nedeniyle yatırımın uygulanabilir olmadığı belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Karaaslan, A. ve Gezen, M. (2022). The evaluation of renewable energy resources in Turkey by integer multi-objective selection problem with interval coefficient. *Renewable Energy*, 182 (1), 842-854.
2. Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y. ve Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59 (692), 86-114.
3. Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L. F. and Lävemann, E. (2015). Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation Technologies. *Applied Energy*, 151 (1), 157-167.
4. Hettiarachchi, H. M., Golubovic, M., Worek, W. M. and Ikegami, Y. (2007). Optimum design criteria for an Organic Rankine Cycle using low-temperature geothermal heat sources. *Energy*, 32(9), 1698-1706.
5. Liu, B., Chien, K. and Wang C. (2004). Effect of working fluids on Organic Rankine Cycle for waste heat recovery. *Energy*, 29 (8), 1207-1217.
6. Wang, E., Zhang, H., Fan, B., Ouyang, M., Zhao, Y. and Mu, Q. (2011). Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery. *Energy*, 36 (5), 3406-3418.
7. Pulyaev, S., Akgöz, O., Çetin, B. (2013, 9-12 Eylül). *Enerji santrallerinde Organik Rankine Çevrimi kullanılarak atık ısının geri kazanımı*. ULIBTK’13 19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Samsun, 978-982.
8. Ergün, A., Özkaymak, M. ve Kılıçaslan, E. (2016). Organik Rankine Çevrimi prensibi ile düşük sıcaklıktaki kaynaklardan elektrik üretim uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 686-696.
9. Calise, F., d’Accadia, M., Vicidomini, M. and Scarpellino, M. (2015). Design and simulation of a prototype of a small-scale solar CHP system based on evacuated flat-plate solar collectors and Organic Rankine Cycle. *Energy Conversion and Management*, 90 (1), 347-363.
10. Cihan, E. (2014). Organik Rankine Çevrimi ile çalışan atık ısı kaynaklı bir soğutma sisteminin performansının araştırılması. *Isı Bilimi ve Teknoloji Dergisi*, 34 (1), 101-109.
11. Kurbanoglu, A. (2017). *Demir çelik sektöründe tav fırını atık ısını ısı kaynağı olarak kullanan Organik Rankine Çevriminin termodinamik analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
12. Önal, S., Etemoğlu, A. ve Can, M. (2017). Düşük sıcaklıklı atık akışkan destekli Organik Rankine Çevrimlerinin optimizasyonu. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(2), 35-52.

13. Tian, H., Gequn, S., Wei, H., Liang, X. and Liu, L. (2012). Fluids and parameters optimization for the organic Rankine cycles (ORCs) used in exhaust heat recovery of Internal Combustion Engine (ICE). *Energy*, 47 (1), 125-136.
14. Minea, V. (2014). Power generation with ORC machines using low-grade waste heat or renewable energy. *Applied Thermal Engineering*, 69 (1-2), 143-154.
15. Quoilin, S., Van Den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P. and Lemort, V. (2013). Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22 (1), 168-186.
16. Lecompte, S., Lemmens, S., Huisseune, H., Van Den Broek, M. and De Paepe, M. (2015). Multi-Objective Thermo-Economic Optimization Strategy for ORCs Applied to Subcritical and Transcritical Cycles for Waste Heat Recovery. *Energies Dergisi*, 8 (1), 2714-2741.
17. Yang, M. and Yeh, R. (2015). Thermo-economic optimization of an organic Rankine cycle system for large marine diesel engine waste heat recovery. *Energy*, 82 (1), 256-268.
18. Quoilin, S., Declaye, S., Tchanche, B. and Lemort, V. (2011). Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles. *Applied Thermal Engineering*, 31 (14-15), 2885-2893.
19. Song, J., Loo, P., Teo, J. and Markides, C. (2020). Thermo-economic optimization of organic Rankine cycle (ORC) systems for geothermal power generation: a comparative study of system configurations. *Frontiers Energy Research*. 8 (6), 1-14.
20. Delgado-Torres, A. M. and García-Rodríguez, L. (2010). Analysis and optimization of the low-temperature solar organic Rankine cycle (ORC). *Energy Conversion and Management*, 51 (12), 2846–2856.
21. García-Afonso, O., Delgado-Torres, A.M. and González-Díaz, B. (2021). Potential of organic Rankine cycle for waste heat recovery from piston engine-based power plants in isolated power systems. *Applied Thermal Engineering*, 203 (1), 117815.
22. Ramirez, M., Epelde, M., Gomez de Arteche, M., Panizza, A., Hammerschmid, A., Baresi, M. and Monti, N. (2017). Performance evaluation of an ORC unit integrated to a waste heat recovery system in a steel mill. *Energy*, 129 (1), 535-542.
23. Gomaa, M. R., Mustafa, J., Al-Dhaifallah, M. and Rezk, H. (2020). A low-grade heat organic Rankine cycle driven by hybrid solar collectors and a waste heat recovery system. *Energy Reports*, 6 (1), 3425-3445.
24. Wang J., Yan Z., Wang M., Li M. and Dai Y. (2013). Multi-objective optimization of an organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using evolutionary algorithm. *Energy Conversion and Management*, 71 (1), 146–158.
25. Uusitalo, A., Honkatukia, J. and Turunen-Saaresti, T. (2017). Evaluation of a small-scale waste heat recovery organic Rankine cycle. *Applied Energy*, 192, 146-158.

26. Yue, C., Tong, L. and Zhang, S. (2019). Thermal and economic analysis on vehicle energy supplying system based on waste heat recovery organic Rankine cycle. *Applied Energy*, 248, 241-255.
27. Mahmoudi, A., Fazli, M. and Morad, M.R. (2018). A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, 143, 600-675.
28. Wei, D., Lu, X., Lu, Z. and Gu, J. (2007). Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 48 (4), 1113-1119.
29. Hung, T. (2001). Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids. *Energy Conversion and Management*, 42 (5), 539-553.
30. Sprouse, C. and Depcik, C. (2013). Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 51 (1-2), 711-722.
31. Dai, Y., Wang, J. and Gao, L. (2009). Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 50 (3), 576-582.
32. Loni, R., Najafi, G., Bellos, E., Rajee, F., Said, Z. and Mazlan, M. (2021). A review of industrial waste heat recovery system for power generation with Organic Rankine Cycle: Recent challenges and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125070.
33. Lecompte, S., Huisseune, H., Broek, M., Vanslambrouck, B. and Paepe, M. (2015). Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 448-461.
34. Hoang, A. (2018). Waste heat recovery from diesel engines based on Organic Rankine Cycle. *Applied Energy*, 231, 138-166.
35. Carcasci, C., Ferraro, R. and Miliotti, E. (2014). Thermodynamic analysis of an organic Rankine cycle for waste heat recovery from gas turbines. *Energy*, 65, 91-100.
36. Altıntaş, A. (2008). Üç fazlı transformatör tasarımı için bir arayüz programı. *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 02 (1), 37-45.
37. Alstom, G. (2012). *Power Transformers Vol.1 Fundamentals*. (Second edition). Paris: La Défense, 15-19.
38. Salah, W., Gad, M., Attia, M., Eldebeikay, S. and Salama, A. (2022). Design of a compact ultra-high frequency antenna for partial discharge detection in oil immersed power transformers. *Ain Shams Engineering Journal*. 13 (6), 101568.
39. Banovic, M. and Sanchez, J. (2014). Classification of Transformers Family. *Transformers Magazine*. 1 (1), 26-33.
40. Alstom, G. (2012). *Power Transformers Vol.1 Fundamentals*. (Second edition). Paris: La Défense, 84-89.

41. Stebel, M., Kubiczek, K., Rodriguez, G., Palacz, M., Garelli, L., Melka, B., Haida, M., Bodys, J., Nowak, A., Lasek, P., Stepien, M., Pessolani, F., Amadei, M., Granata, D., Storti, M. and Smolka, J. (2022). Thermal analysis of 8.5 MVA disk-type power transformer cooled by biodegradable ester oil working in ONAN mode by using advanced EMAG–CFD–CFD coupling. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 136 (1), 107737.
42. Alstom, G. (2012). *Power Transformers Vol.1 Fundamentals*. (First edition). Paris: La Défense, 90.
43. Areva. (2008). *Power Transformers Vol.2 Expertise*. (First edition). Paris: La Défense, 45-50.
44. L. Albright, L. Angenent, F. Vanek. (2015). "Stationary Combustion Systems" in *Energy Systems Engineering*. (Second edition). New York: McGraw Hill, 161-167.
45. Boles, M., Çengel, Y. (2011). *Thermodynamics: an engineering approach*. (Seventh edition). New York: McGraw-Hill, 553-559.
46. Quoilin, S. (2011). *Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications*. PhD Thesis, Faculty of Applied Science of the University of Liège, Liège (Belgium).
47. Astolfi, M., Romano, M. C., Bombarda, P. and Macchi, E. (2014). Binary ORC (organic Rankine cycles) power plants for the exploitation of medium low temperature geothermal sources part a: thermodynamic optimization. *Energy*, 66 (1), 423-434.
48. Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals Of Heat And Mass Transfer* (Sixth Ed.), New Jersey: John Wiley & Sons, 669-705.
49. Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B. (2013) *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. (Fourth edition). New Jersey: Prentice Hall PTR, 211-246.
50. Žižlavský, O. (2014). Net present value approach: method for economic assessment of innovation projects. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 156 (1), 506-512.
51. Çengel, Y. A., Ghajar, A. J., 2015. *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*, (Beşinci Baskı). New York: McGraw Hill, 649-695.
52. Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B. (2013) *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. (Fourth edition). New Jersey: Prentice Hall PTR, 879-902.

EKLER

EK-1. 100 MVA Transformatörüne ait sıcaklık artış deneyi sonuçları

Yeni rapor

Firma ASTOR A.Ş.

Cihaz testo 875-2

Seri No.: --
Objektif: 32° x 23°

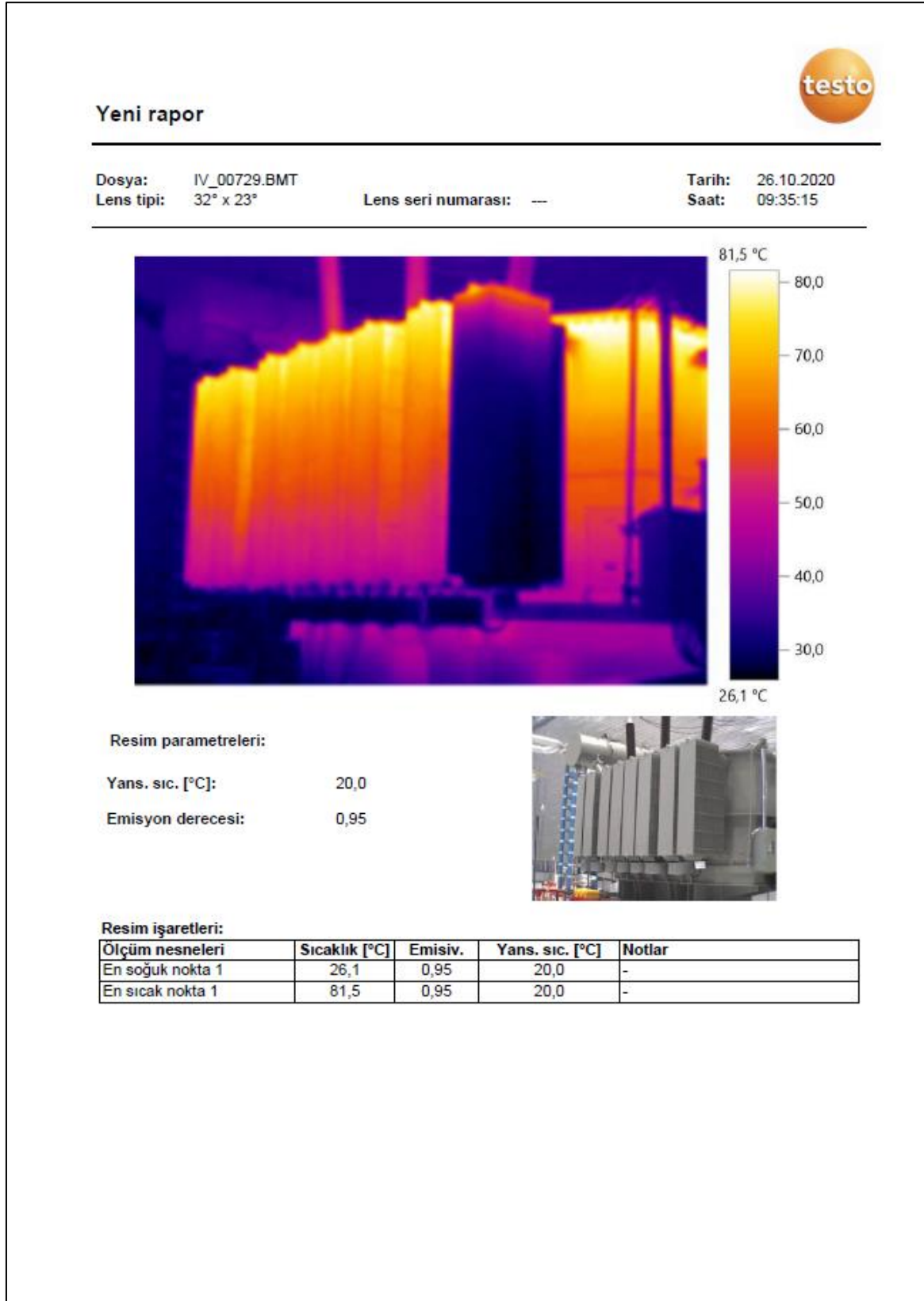
İş emrini veren

Ölçüm yeri:

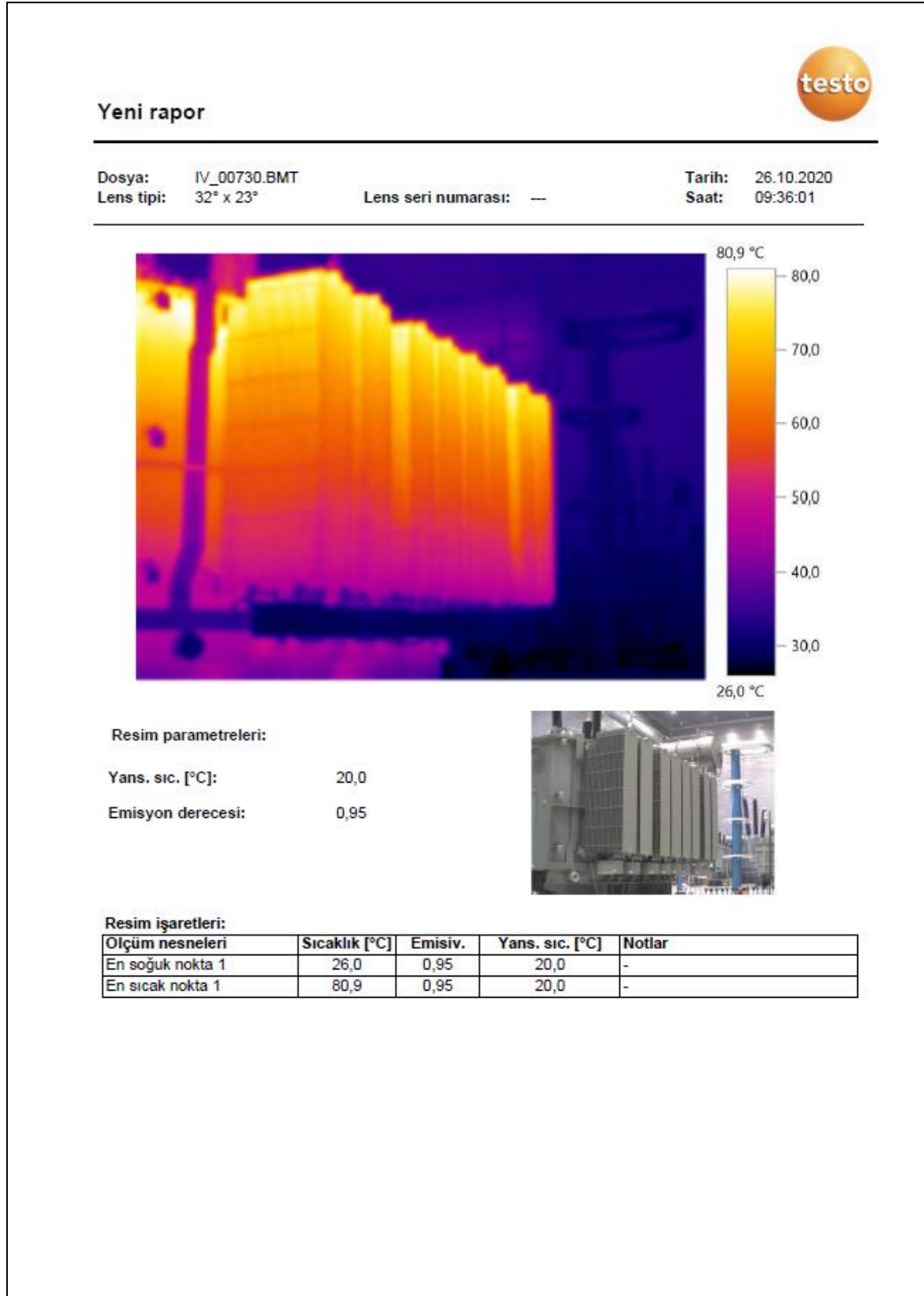
Görev 50498 100MVA sıcaklık artış deneyi

Bu inceleme, EN 13187'ye göre, bir termal görüntüleme cihazı kullanılarak yapılmıştır.

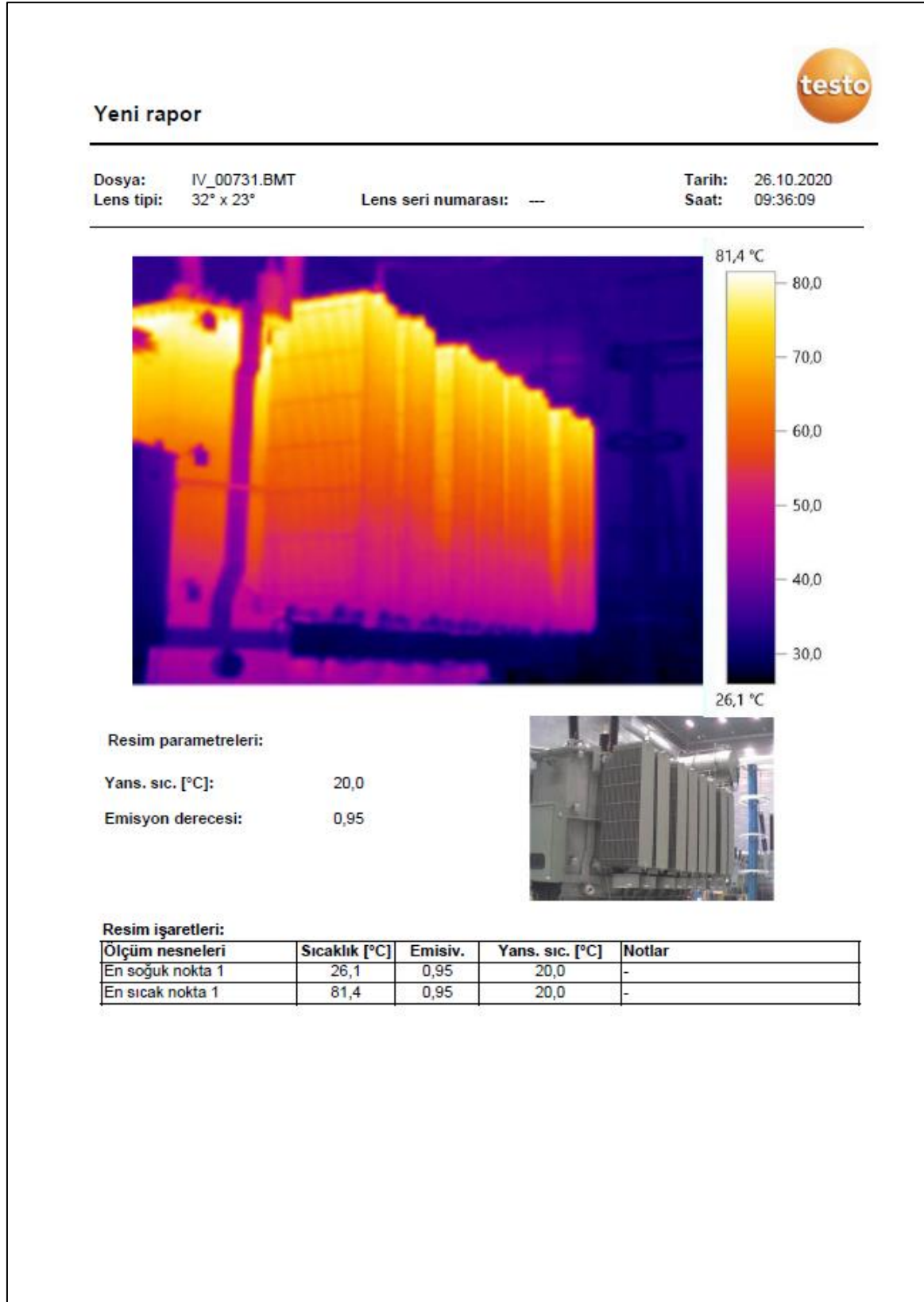
EK-1. (devam) 100 MVA Transformatörüne ait sıcaklık artış deneyi sonuçları



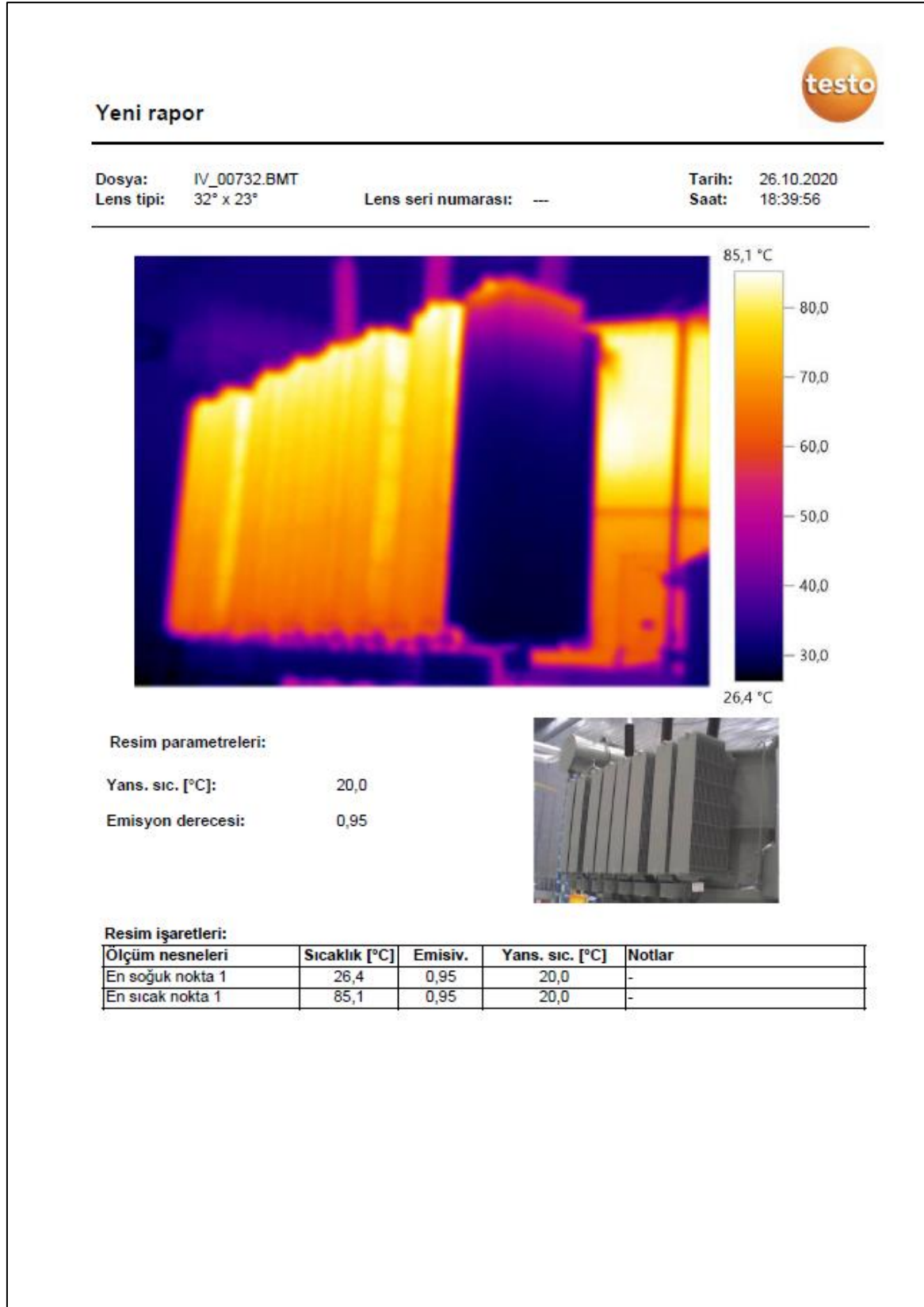
EK-1. (devam) 100 MVA Transformatörüne ait sıcaklık artış deneyi sonuçları



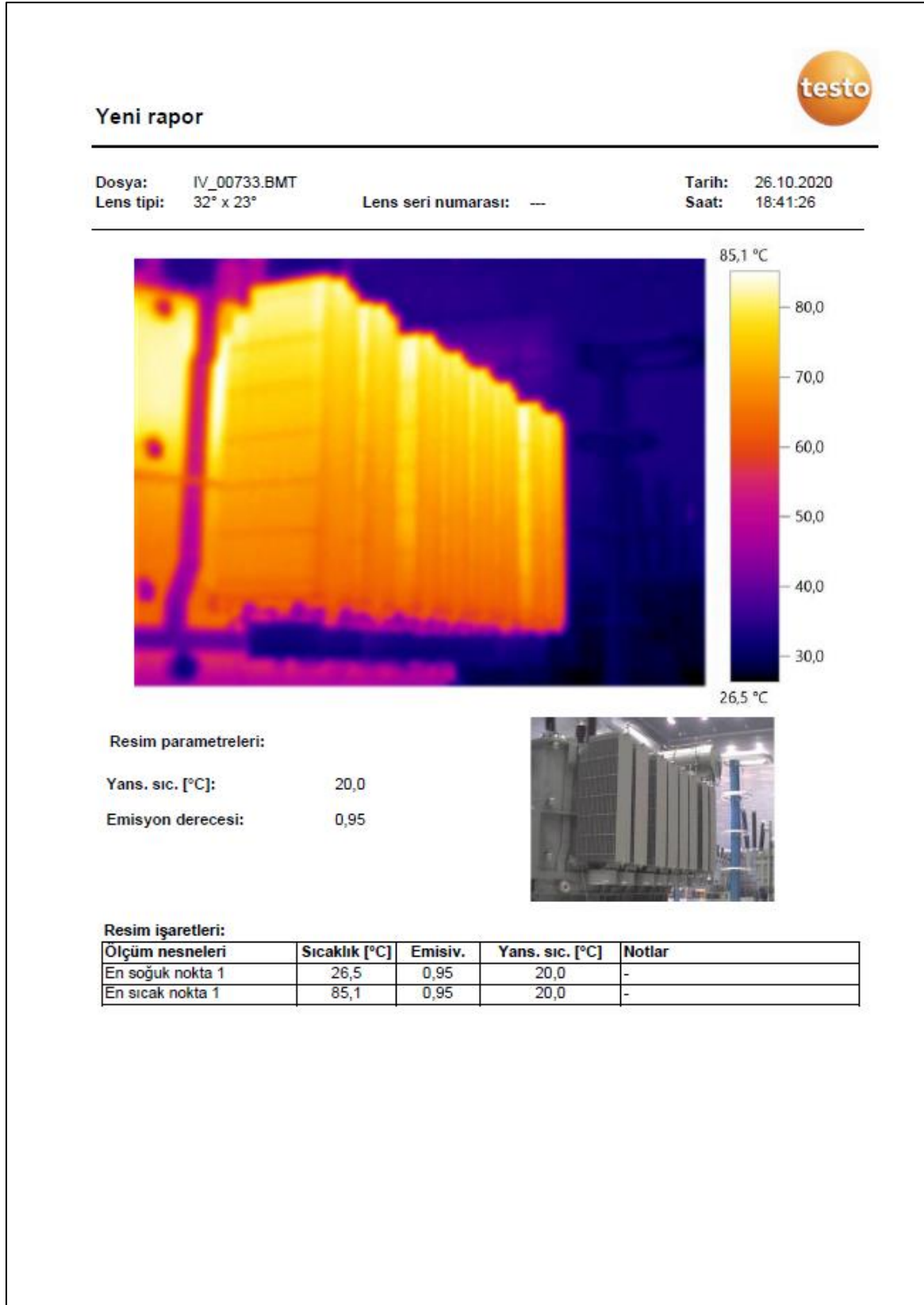
EK-1. (devam) 100 MVA Transformatörüne ait sıcaklık artış deneyi sonuçları



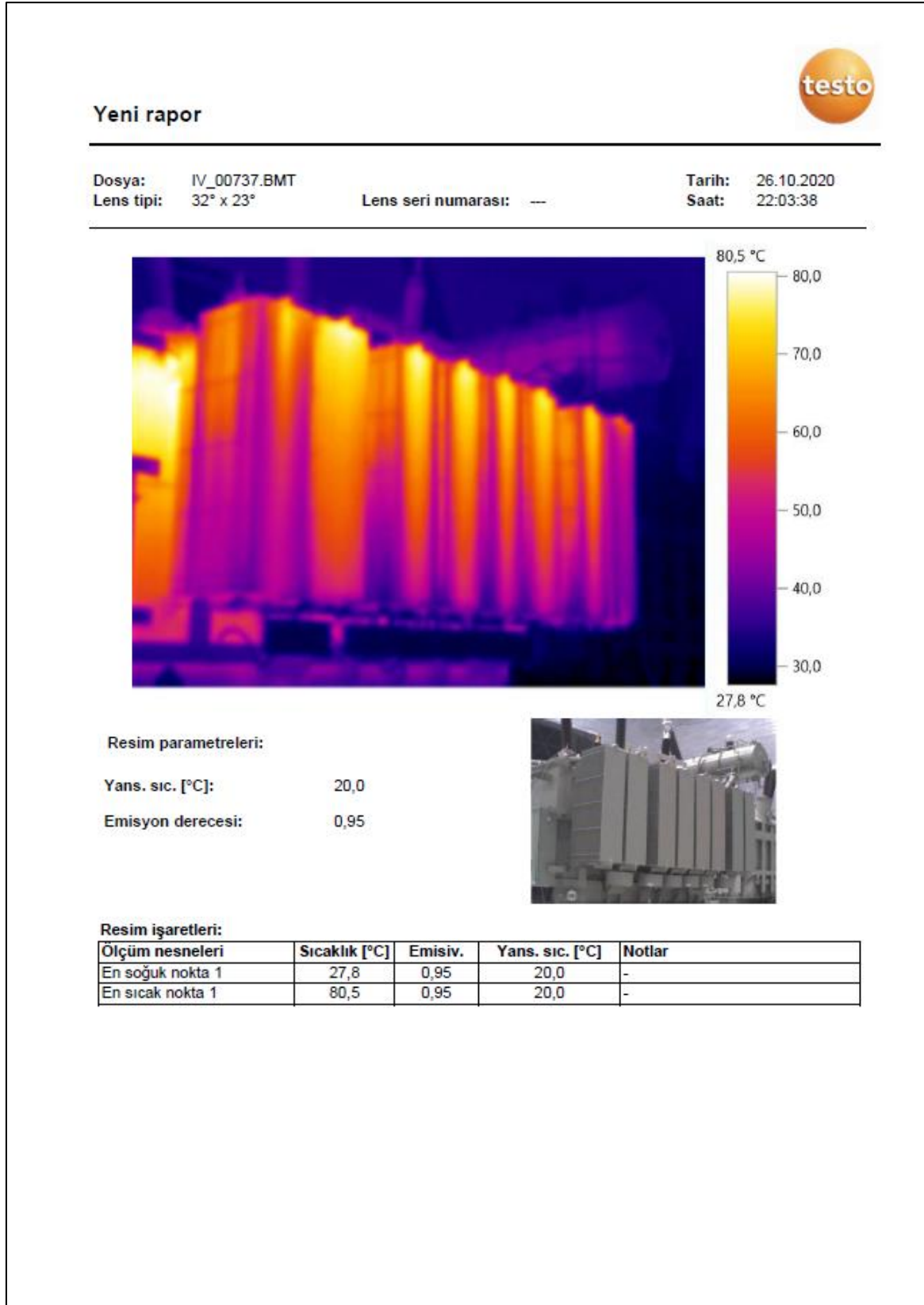
EK-1. (devam) 100 MVA Transformatörüne ait sıcaklık artış deneyi sonuçları



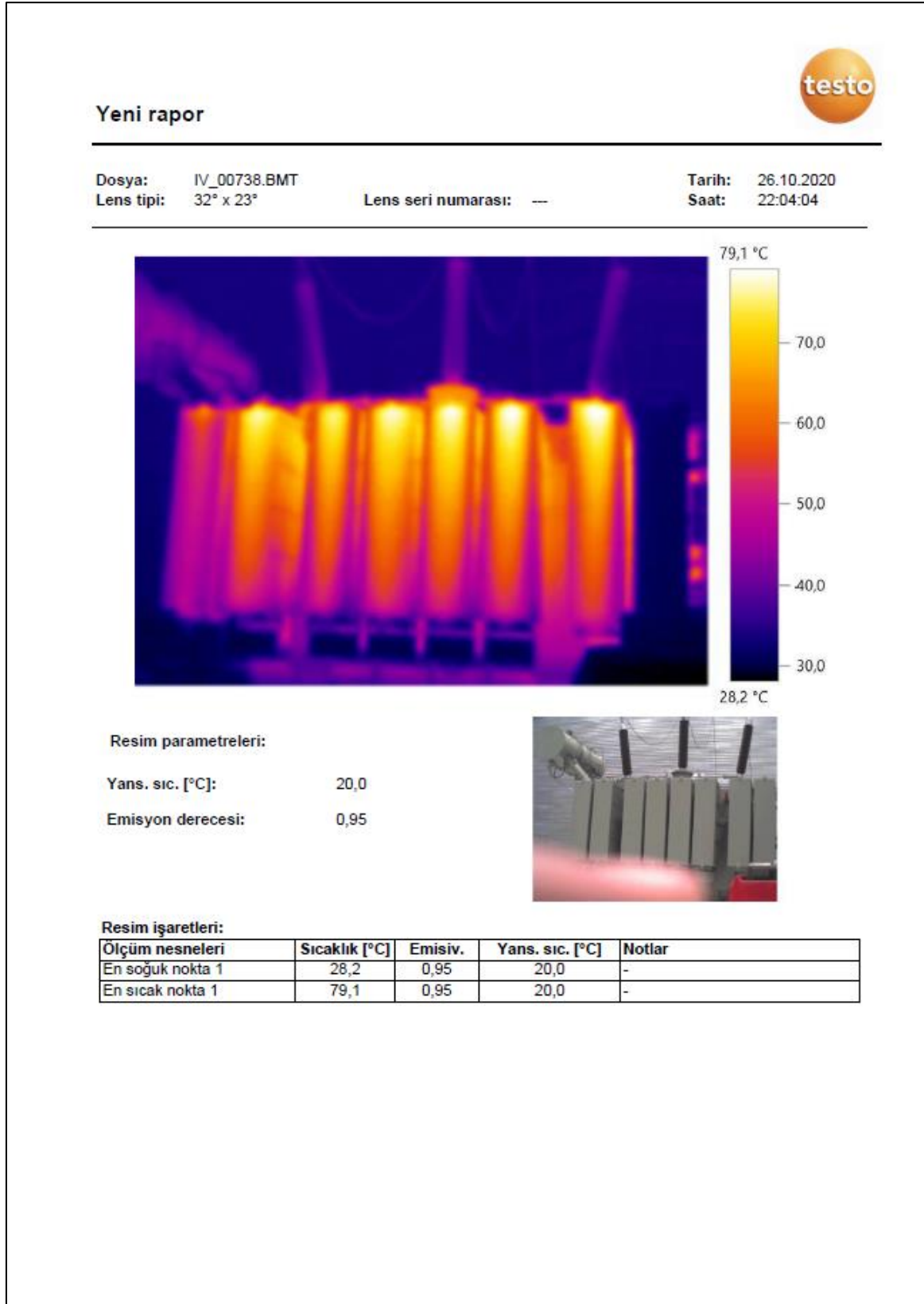
EK-1. (devam) 100 MVA Transformatörüne ait sıcaklık artış deneyi sonuçları



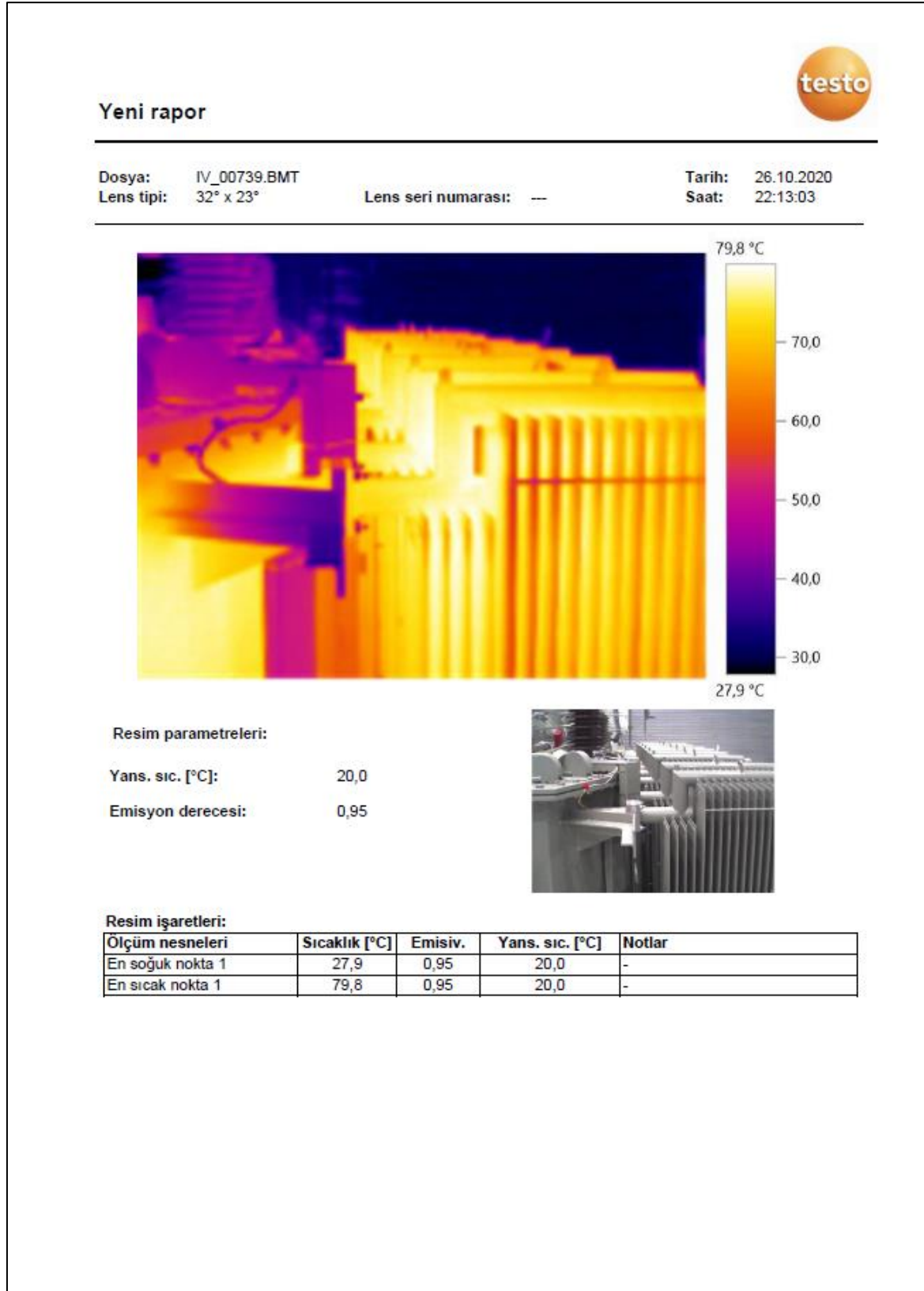
EK-1. (devam) 100 MVA Transformatörüne ait sıcaklık artış deneyi sonuçları



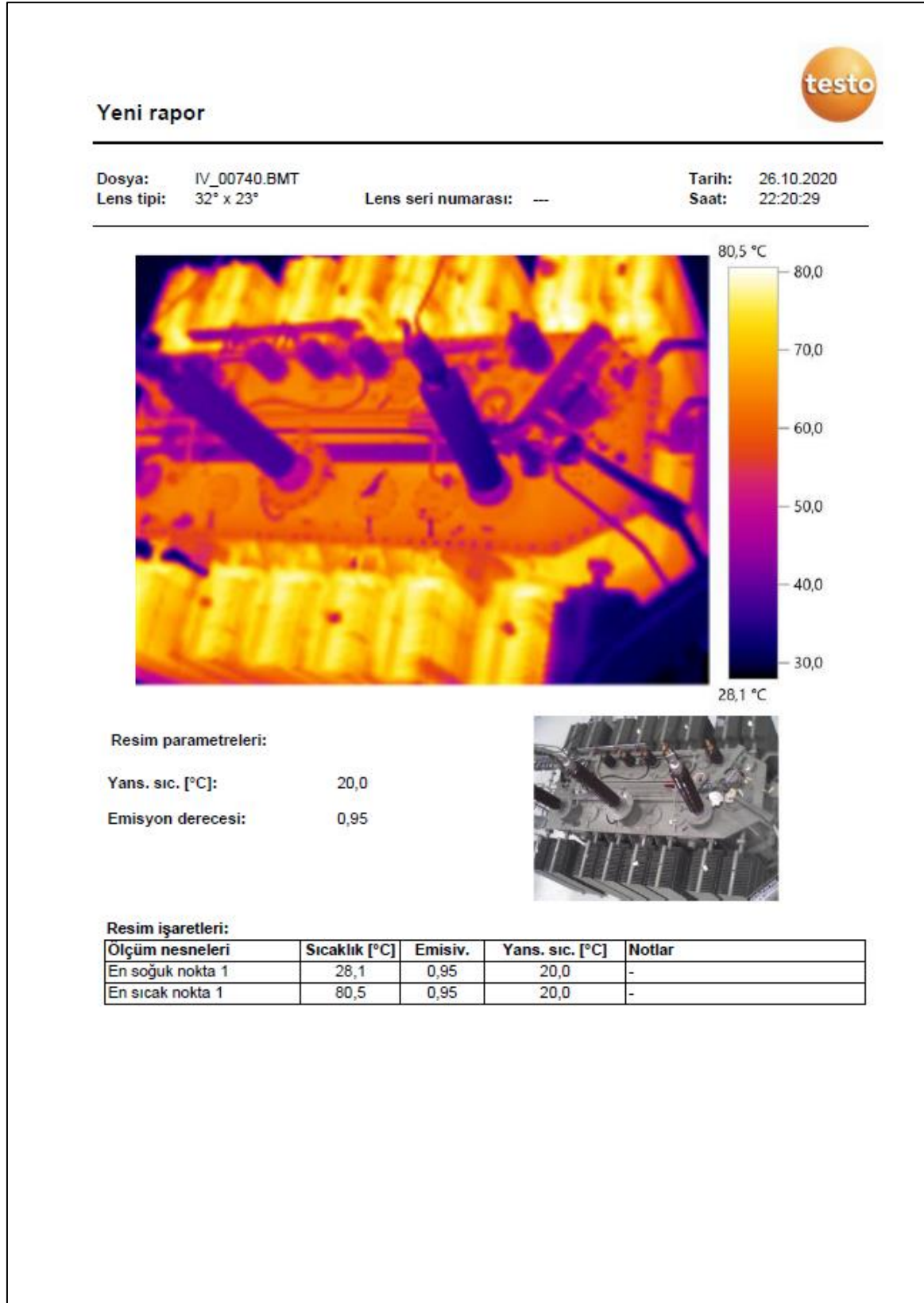
EK-1. (devam) 100 MVA Transformatörüne ait sıcaklık artış deneyi sonuçları



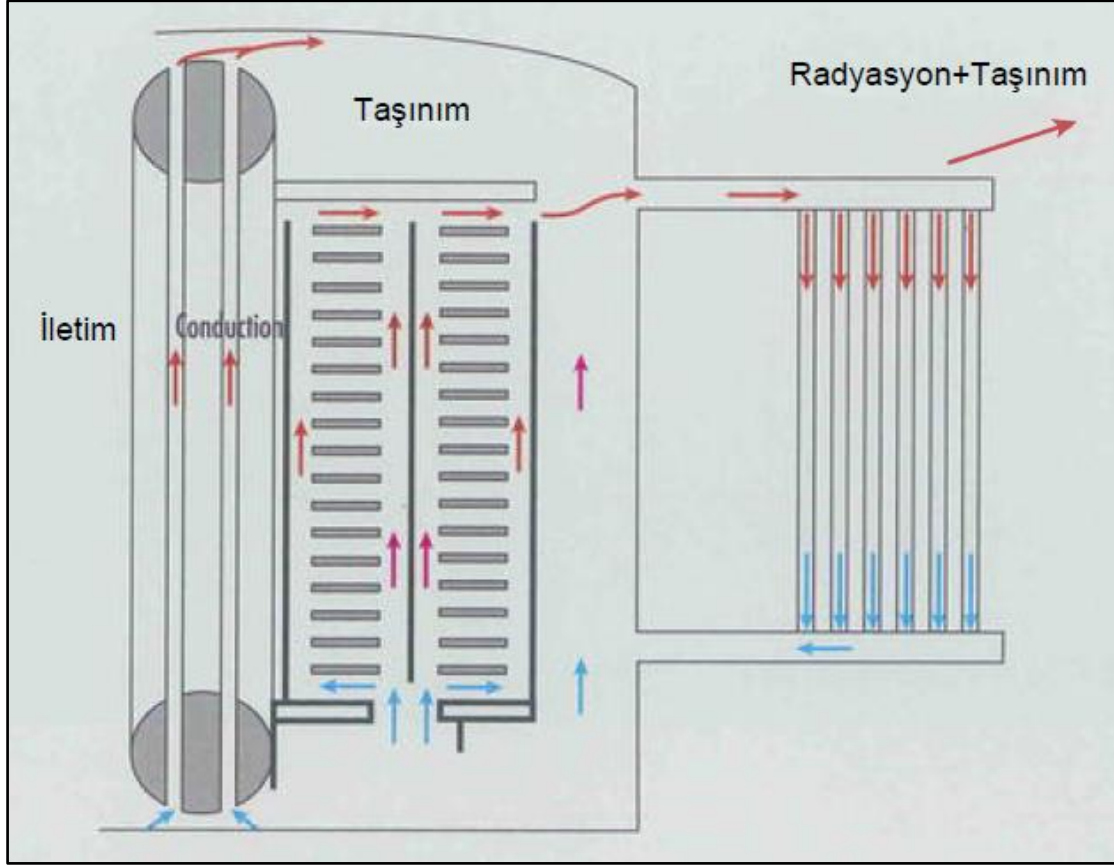
EK-1. (devam) 100 MVA Transformatörüne ait sıcaklık artış deneyi sonuçları



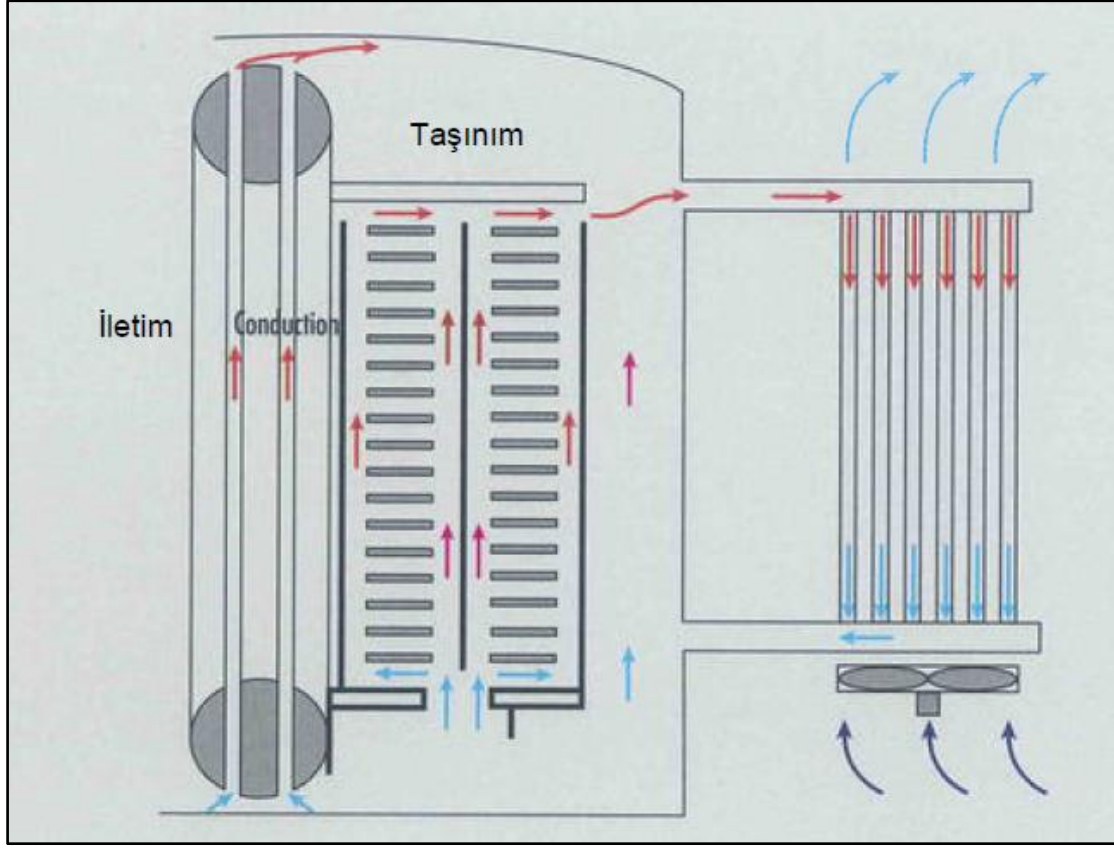
EK-1. (devam) 100 MVA Transformatörüne ait sıcaklık artış deneyi sonuçları



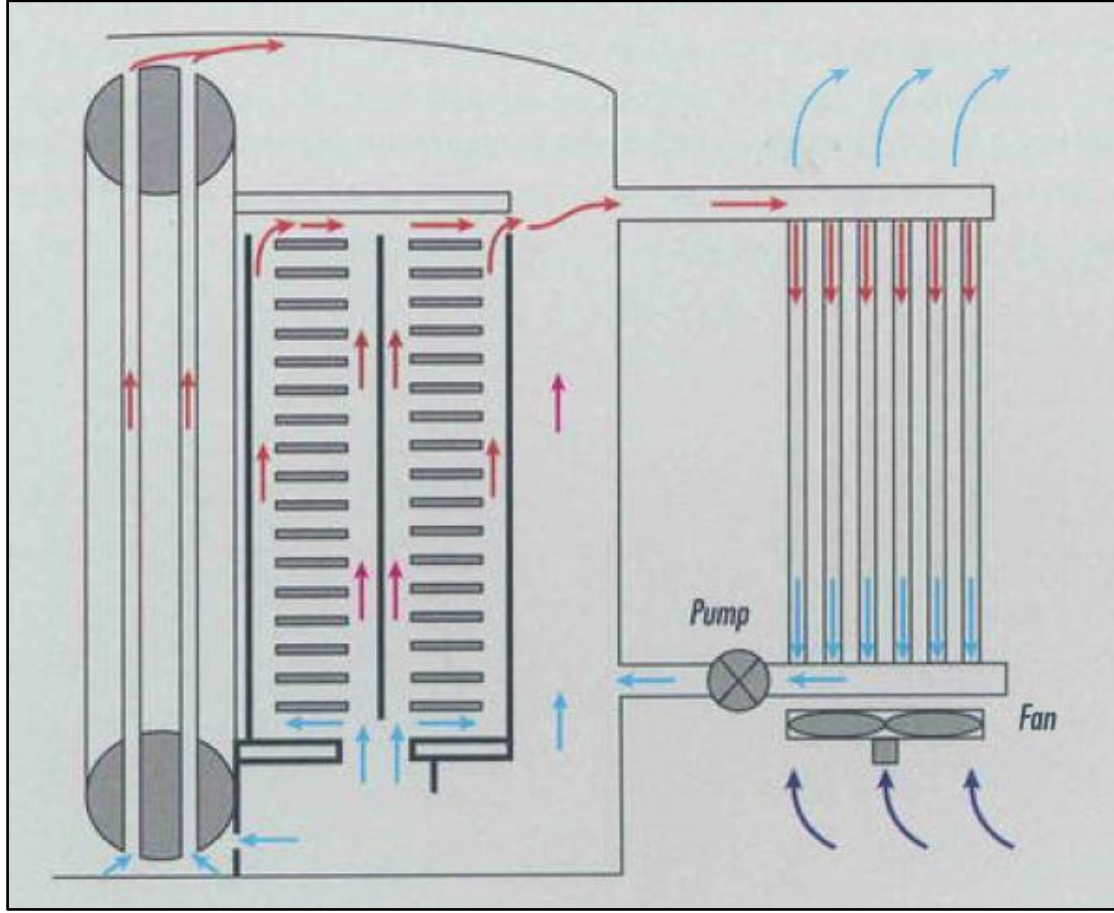
EK-2. ONAN soğutma diyagramı



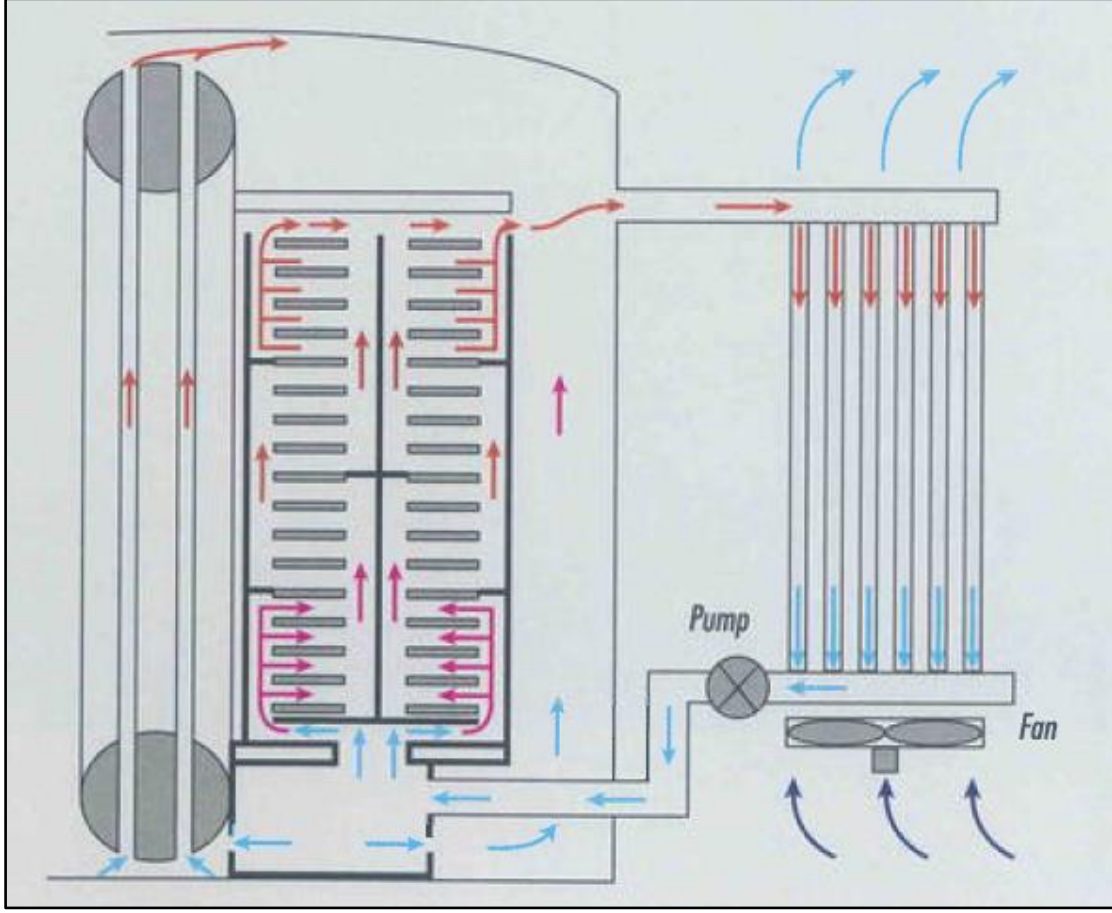
EK-3. ONAF soğutma diyagramı



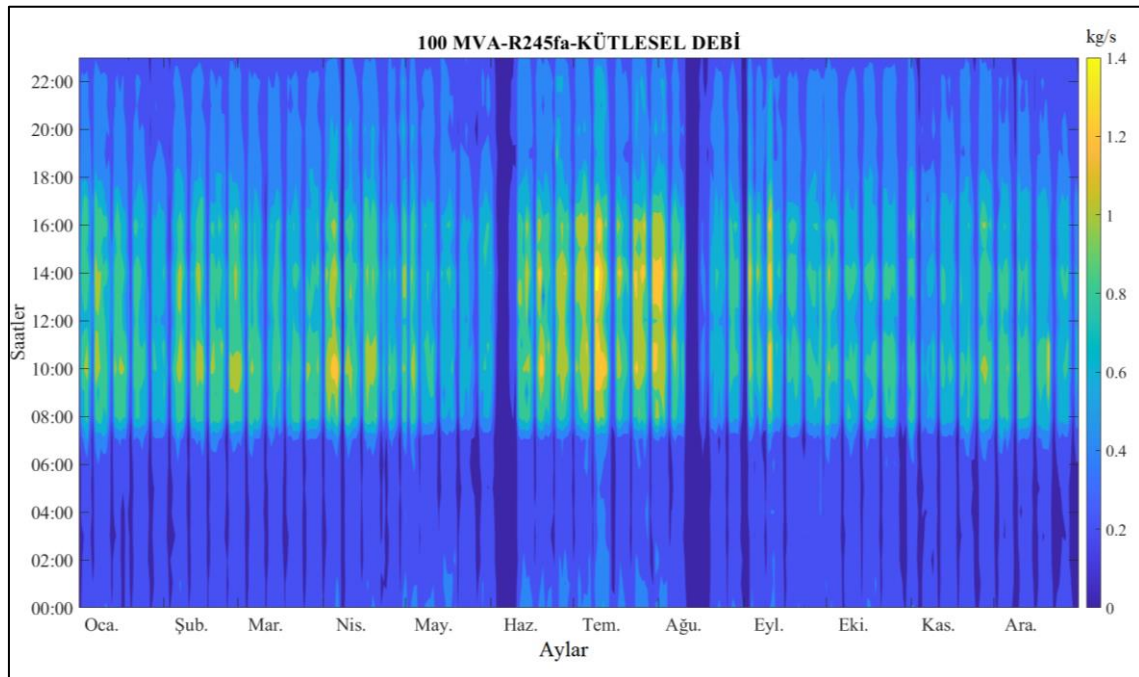
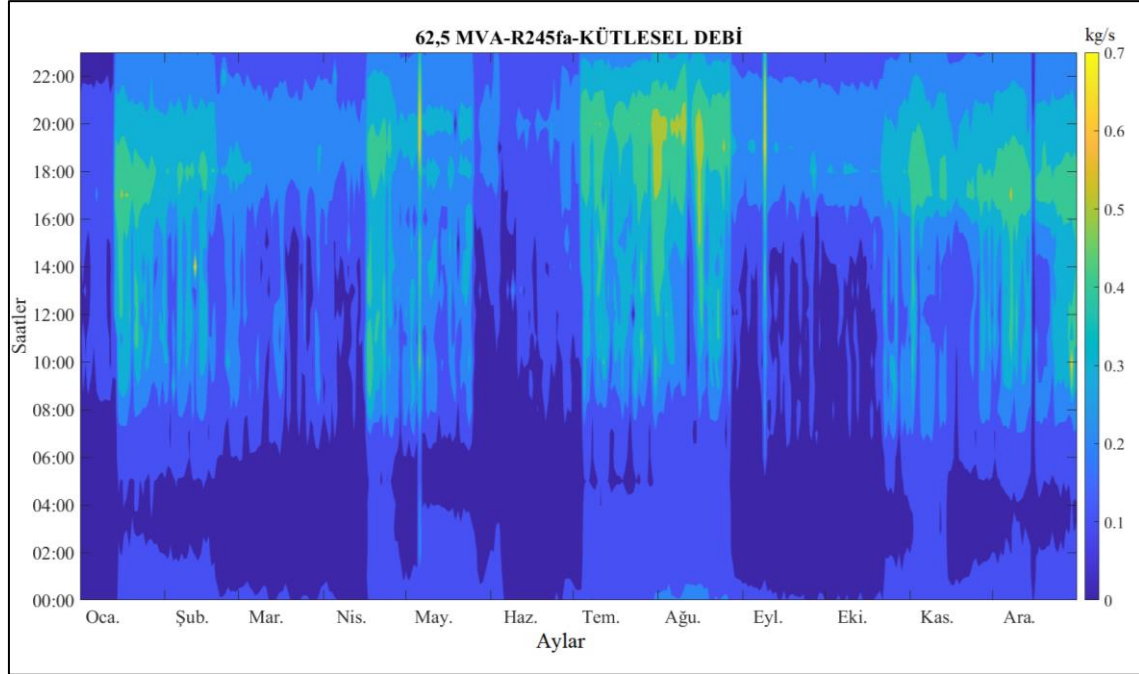
EK-4. OFAF soğutma diyagramı



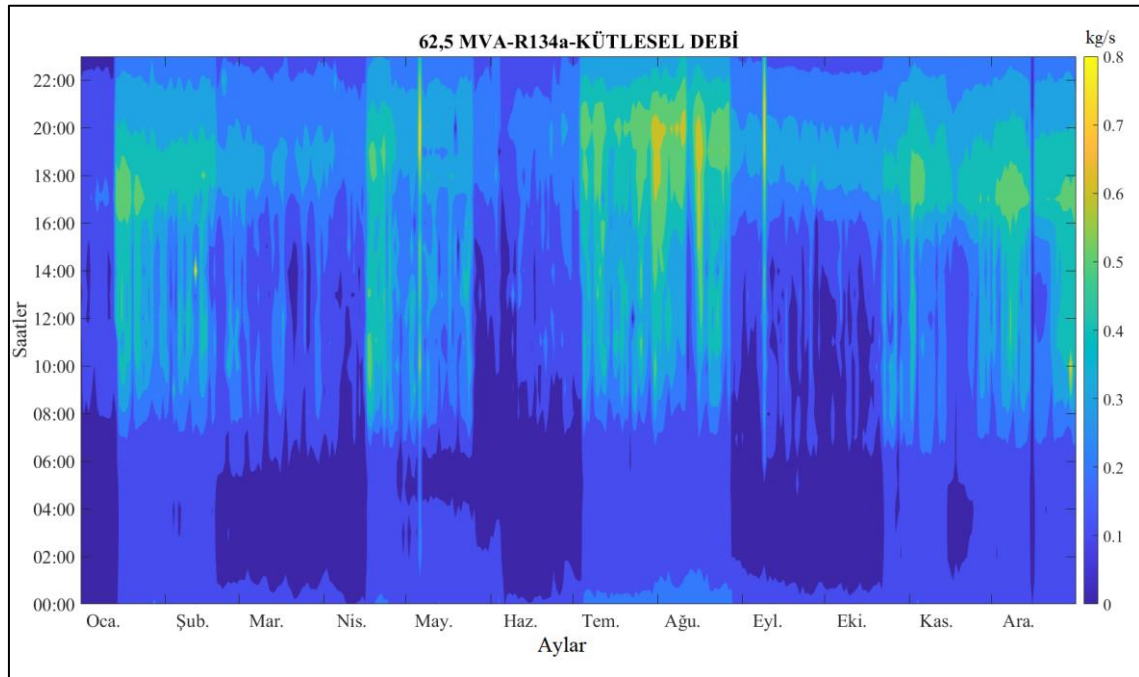
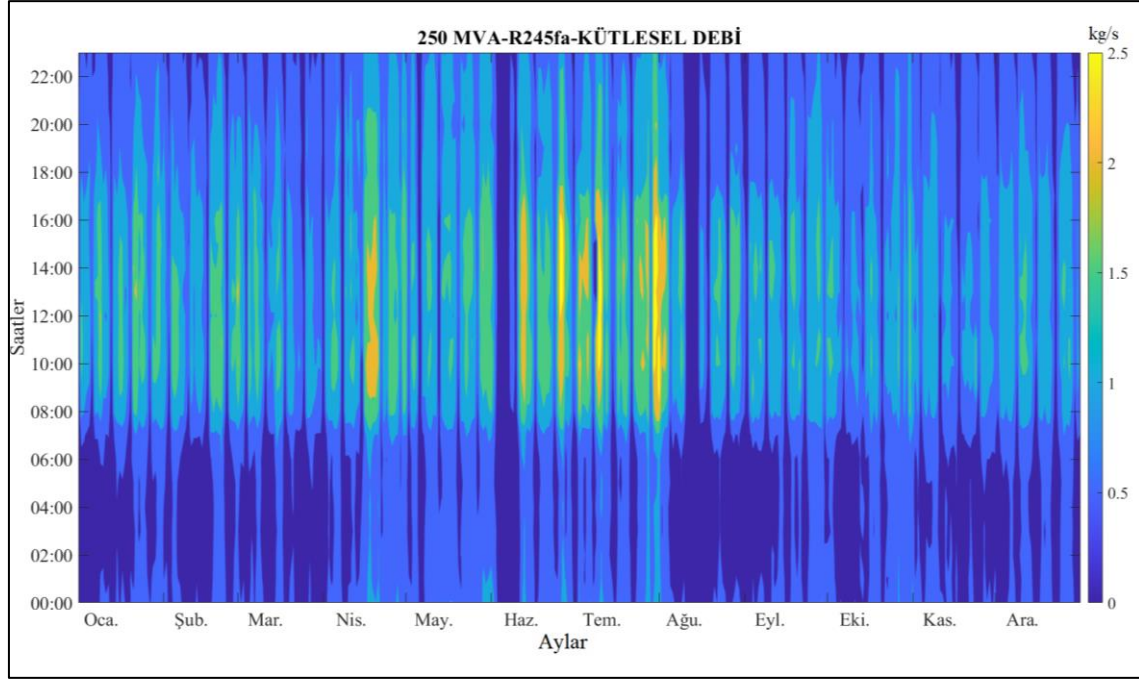
EK-5. ODAF soğutma diyagramı



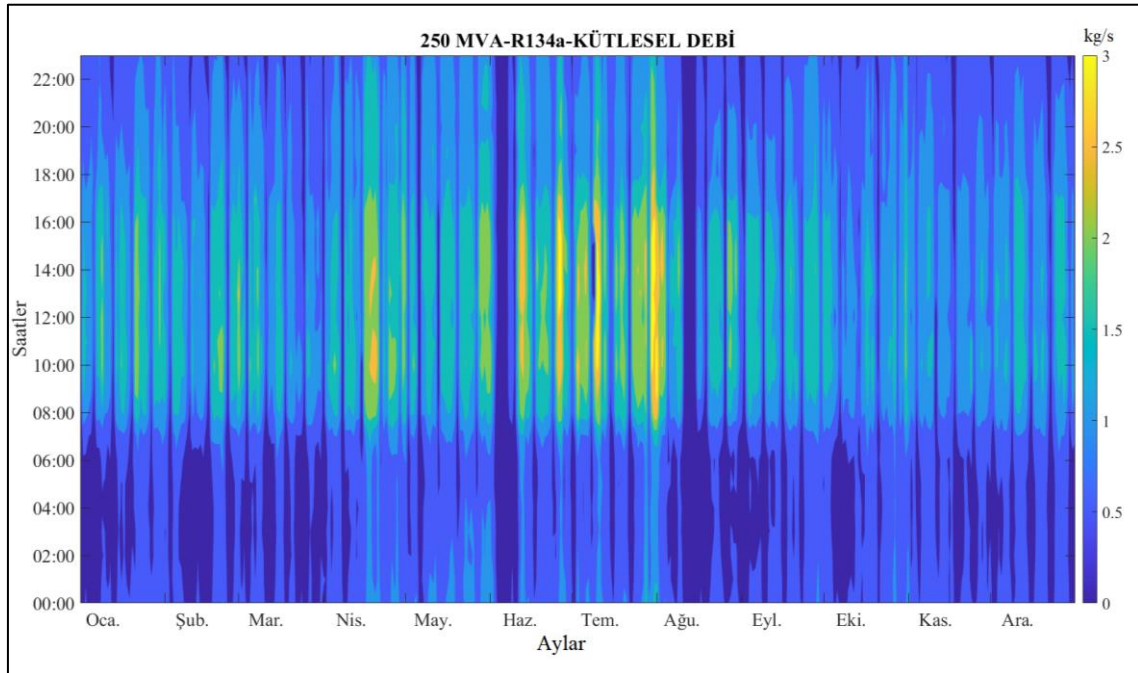
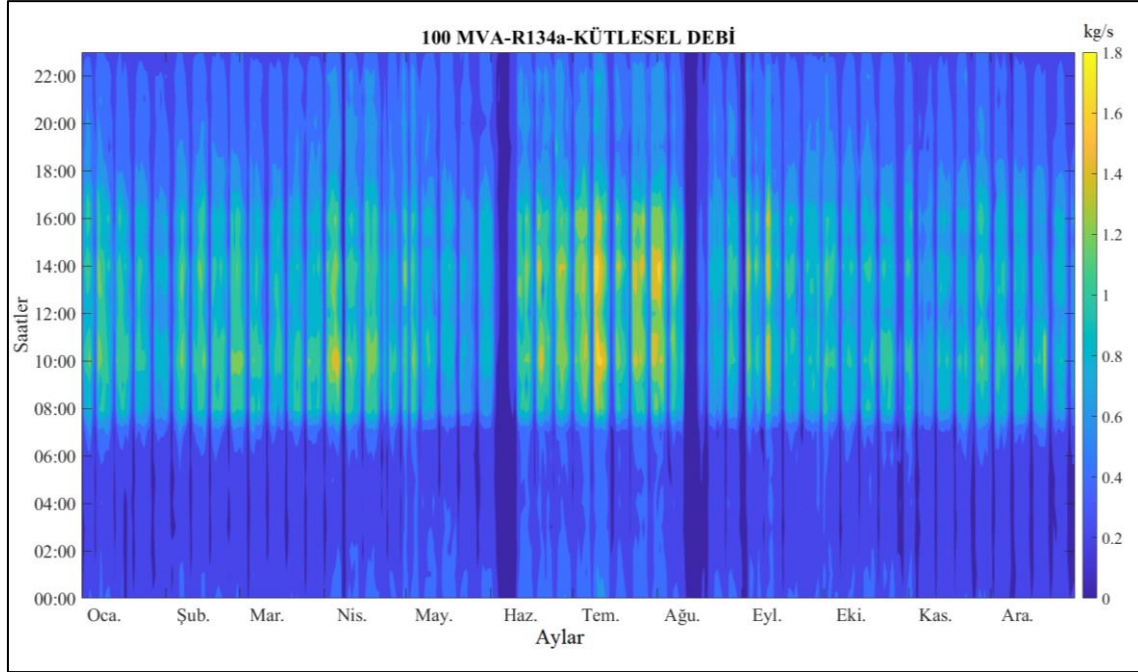
EK-6. Yıllık kütleli debi değerleri (kg/s)



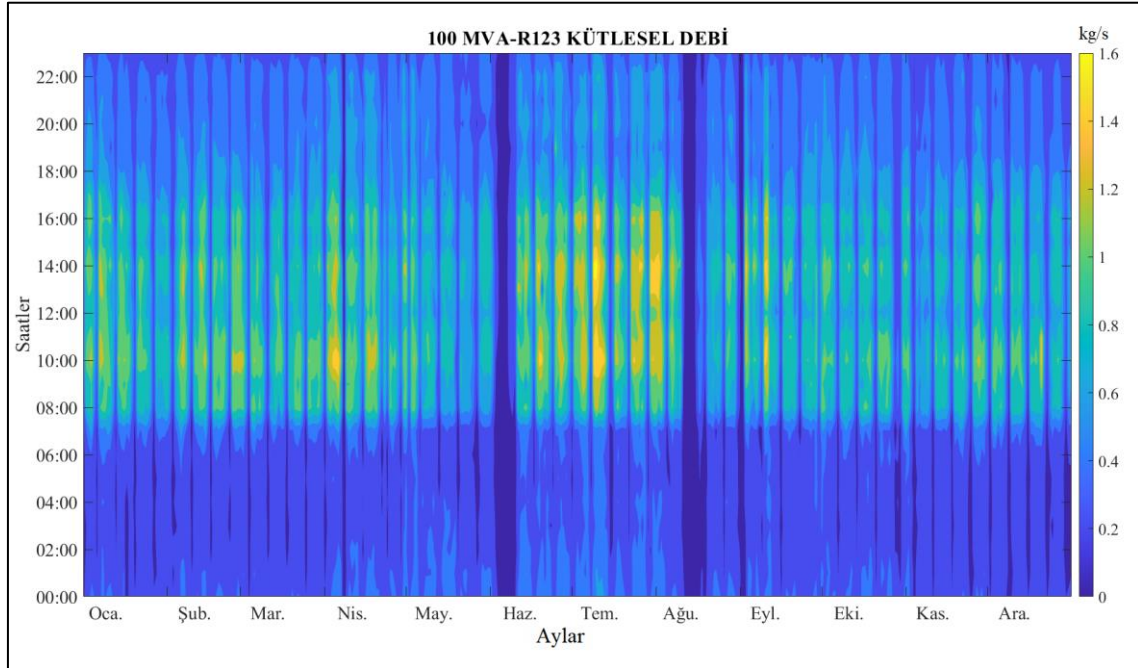
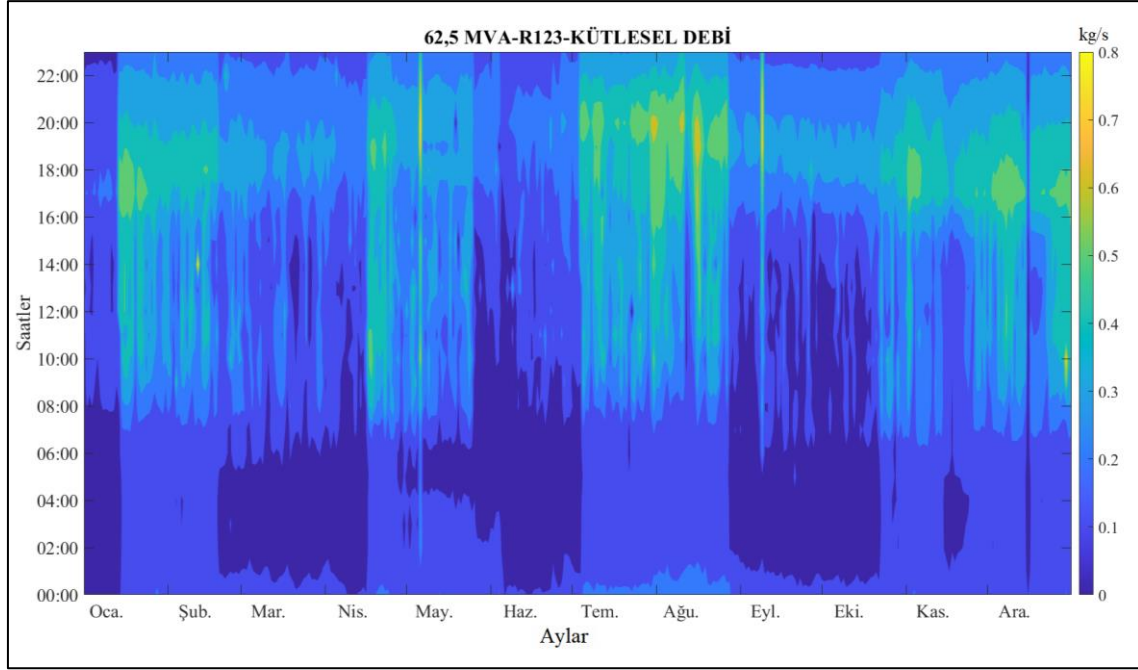
EK-6. (devam) Yıllık kütleli debi değerleri (kg/s)



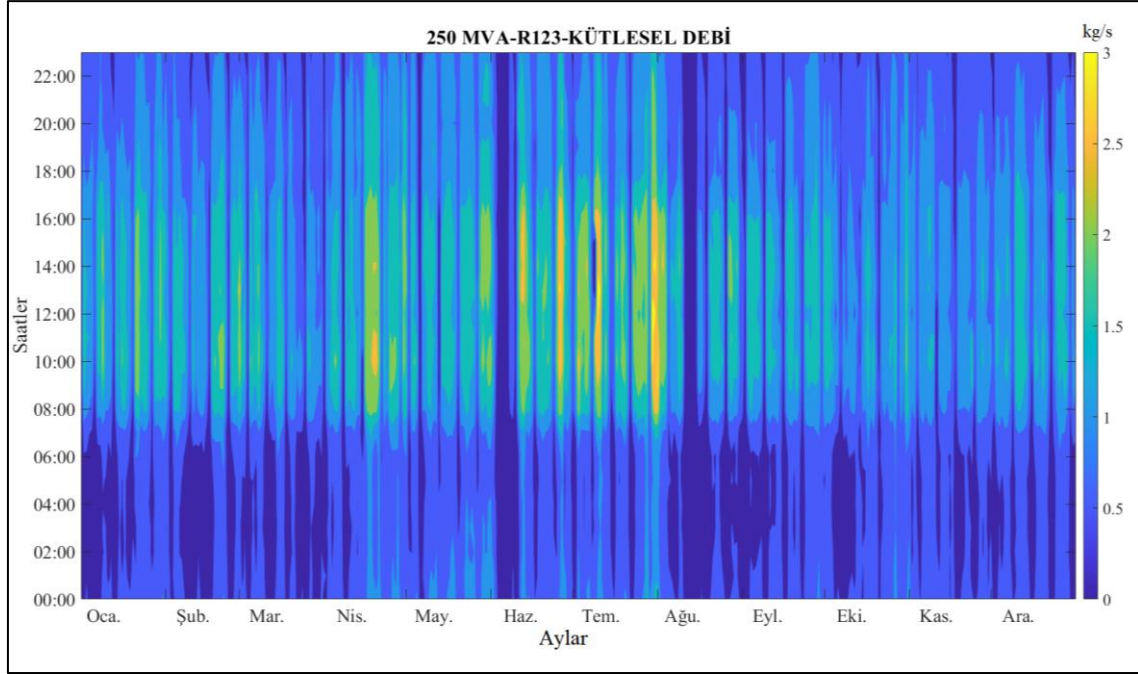
EK-6. (devam) Yıllık kütleli debi değerleri (kg/s)



EK-6. (devam) Yıllık kütleli debi değerleri (kg/s)



EK-6. (devam) Yıllık kütleli debi değerleri (kg/s)





GAZİ GELECEKTİR..