



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MAKİNE ÖĞRENME YÖNTEMLERİNİ KULLANARAK PARALEL
BAĞLI ÜÇ ADET ZİT AKIŞLI RANQUE - HILSCH VORTEKS TÜP
SİSTEM PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI**

VOLKAN DEMİREL

DANIŞMAN

PROF. DR. VOLKAN KIRMACI

İKİNCİ DANIŞMAN

DR. MURAT KORKMAZ

BARTIN-2025



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MAKİNE ÖĞRENME YÖNTEMLERİNİ KULLANARAK PARALEL BAĞLI ÜÇ
ADET ZİT AKIŞLI RANQUE - HILSCH VORTEKS TÜP SİSTEM
PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Volkan DEMİREL

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman :

Üye :

Üye :

BARTIN-2025

KABUL VE ONAY

Volkan DEMİREL tarafından hazırlanan “MAKİNE ÖĞRENME YÖNTEMLERİNİ KULLANARAK PARALEL BAĞLI ÜÇ ADET ZİT AKIŞLI RANQUE - HILSCH VORTEKS TÜP SİSTEM PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI ” başlıklı bu çalışma, 08.08.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :

Üye :

Üye :

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer CEYLAN
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Volkan KIRMACI danışmanlığında hazırlamış olduğum “MAKİNE ÖĞRENME YÖNTEMLERİNİ KULLANARAK PARALEL BAĞLI ÜÇ ADET ZİT AKIŞLI RANQUE - HILSCH VORTEKS TÜP SİSTEM PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

08.08.2025

Volkan DEMİREL

ÖN SÖZ

Bu çalışma süresince her zaman bilgi, tecrübe ve desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Volkan KIRMACI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmanın eksiklerinin tamamlanmasında katkı sağlayan, bilgi ve deneyimleriyle sürece destek veren Dr. Murat KORKMAZ hocama da ayrıca teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışmada kullanılan parçaların talaşlı imalat işlemlerinde sağladıkları teknik destekten dolayı Tarz Makine San. Ltd. Şti. yetkililerine teşekkür ederim.

Volkan DEMİREL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MAKİNE ÖĞRENME YÖNTEMLERİNİ KULLANARAK PARALEL BAĞLI ÜÇ ADET ZIT AKIŞLI RANQUE - HILSCH VORTEKS TÜP SİSTEM PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI

Volkan DEMİREL

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Volkan KIRMACI

İkinci Danışman: Dr. Murat KORKMAZ

Bartın-2025, sayfa: 94

Bu çalışmada, hacimsel debinin kontrolü amacıyla yalnızca bir adet kontrol vanası kullanılarak, hareketli parça içermeyen üç adet karşıt akışlı vorteks tüp kaskad bağlantı yöntemiyle birleştirilmiş ve deneysel sistemi tasarlanmıştır. Sistemdeki nozullar, farklı adetlerde üretilerek monte edilmiş ve değişimlerin tüplerin performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak analiz edilmiştir. Çalışmalar, teorik modellemelerle desteklenen deneysel incelemeleri içermektedir. Vorteks tüplerinin performansı kaskad tipi ile iyileştirileceği amaçlanmaktadır. Çalışmada, vorteks tüplerin termodinamik davranışı birinci ve ikinci yasa çerçevesinde analiz edilmiştir. İkinci yasa kapsamında, giriş basıncının sıcak ve soğuk çıkış akışkanlarının sıcaklıkları üzerindeki etkisini açıklayan teorik modeller oluşturulmuştur. Deneysel sistemden alınan veriler makine öğrenme metotları olan DVM), Regresyon Ağaçları (RA), Elastik Net (EN) ve Hafif Gradyan Artırma Yöntemi (LGBM) analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Kaskad Vorteks Tüpünün (KVT) sıcak akışkan çıkış sıcaklığı ($T_{sıcak}$), soğuk akışkan çıkış sıcaklığı ($T_{soğuk}$), ve sıcaklık farkı ΔT çıktı performanslarını RA, DVM, EN ve LGBM metotları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isıtma, makine öğrenmesi, soğutma, vortex tüp

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

COMPARİSON OF PERFORMANCE OF THREE PARALLEL-CONNECTED OPPOSITE FLOW RANQUE-HILSCH VORTEX TUBE SYSTEMS USING MACHINE LEARNING METHODS

Volkan DEMİREL

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. Volkan KIRMACI

Second Advisor: Dr. Murat KORKMAZ

Bartın-2025, pp: 94

In this research, a novel experimental setup was designed to investigate the thermal behavior of a cascade system composed of three counter-flow Ranque-Hilsch vortex tubes. The system operates without any moving mechanical components, apart from control valves used to regulate the volumetric air flow. Vortex tubes with varying nozzle configurations were employed to assess the influence of nozzle count on cooling performance. Theoretical analyses based on the first and second laws of thermodynamics were conducted to establish the relationship between inlet pressure and the resulting temperature separation. Furthermore, a comprehensive machine learning approach was implemented using Support Vector Machines (SVM), Regression Trees (RT), Elastic Net (EN), and Light Gradient Boosting Machine (LGBM) algorithms to model and predict the hot outlet temperature and the cold-hot temperature differential. The predictive capabilities of the models were comparatively evaluated, highlighting the most effective algorithm for estimating system performance under varying operational parameters.

Keywords: Cooling, heating, machine learning, vortex tube

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME	iii
ÖN SÖZ	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Taraması.....	3
1.1.1 Yurt İçi Çalışmalar	3
1.1.2 Yurt Dışı Çalışmalar	5
1.2 Vorteks Tüp	11
1.2.1 Vorteks Tüp Çeşitleri.....	12
1.2.1.1 Akış Özelliğine Göre RHVT'ler	12
Zıt Akışlı RHVT'ler (Counterflow Vortex Tubes)	12
Paralel Akışlı RHVT 'ler.....	13
1.2.1.2 Tasarımına Göre RHVT 'ler	13
Adyabatik Tüpler	13
Adyabatik Olmayan Tüpler	14
1.2.2 Kullanım Alanları	14
1.2.2.1 Isıtma ve Soğutma Kullanım Alanları.....	15
1.2.2.2 Gazların Sıvılaştırılmasında Kullanım Alanları	17
1.2.2.3 Gaz Ayrıştırılmasında Kullanımı.....	17
1.2.2.4 Gazların Kurutulmasında Kullanımı	18
1.2.2.5 Kimyasal Alanda Kullanımı	19
1.2.2.6 RHVT Tabanlı Enerji Üretimi.....	20
1.2.2.7 RHVT Destekli Yapay Kar Üretimi	20
1.2.2.8 RHVT Teknolojisinin Medikal Uygulamalar	21
1.2.2.9 Diğer Uygulama Alanları.....	22

Vorteks Temizleyiciler (Hidrosiklonlar)	22
Toz Ayırıştırıcısı Olarak Kullanımı	22
Isı Kontrollü Koltuk sistemlerinde Kullanımı	23
1.2.3 Vorteks Tüpün Avantaj ve Dezavantajı.....	23
1.2.3.1 Avantajı	23
1.2.3.2 Dezavantajı.....	24
1.3 Vorteks Tüp Yapısı ve Çalışma Sistemi.....	24
1.3.1 Vorteks Tüp Yapısı	24
1.3.1.1 Gövde	25
Çelik Gövde	25
Pirinç Gövde.....	26
Perspeks Gövde.....	26
Gövde Malzemesinin Vorteks Tüp Performansına Etkisi	26
1.3.1.2 Giriş Lüleleri.....	27
1.3.1.3 Soğuk Uç Orifisi.....	28
1.3.1.4 Sıcak Çıkış Valfi.....	29
1.3.1.5 Filtreler	29
1.3.1.6 Nozullar	29
1.3.1.7 Kurutucu	29
1.3.1.8 Regülatörler	30
1.3.1.9 Susturucular.....	30
1.3.2 RHVT'lerin İşleyiş Mekanizması	30
2. MATERYAL VE YÖNTEM	32
2.1 Materyal	32
2.1.1. DeneySEL Sistem	32
2.1.2 DeneySEL Süreçte Yararlanılan Ölçüm Ekipmanları	34
2.1.2.1 Debimetre	34
2.1.2.2 Manometre	34
2.2 Yöntem	35
2.2.1 RHVT Performans İncelemesi	35
2.2.2 Makine öğrenimi	37
2.2.2.1 Hafif Gradyan Artırma Yöntemi (LGBM)	37
2.2.2.2 Elastic Net	39
2.2.2.3 Regresyon Ağaçları (Kararların Yol Haritası).....	40

2.2.2.4 Destek Vektör Makinesi (DVM)	40
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	42
3.1 RHVT Analizlerine Ait Bulgular	42
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ	94



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Vorteks tüp sistemi (Saidi ve Valipour, 2003).....	6
1.2: Vorteks tüpün geometrisi (Aljuwayhel vd. 2005).....	7
1.3: Karşıt akışlı vorteks tüp (Yılmaz vd., 2007).....	12
1.4: Paralel akışlı sistem (Gao vd. 2005).....	13
1.5: Adyabatik olmayan vorteks tüp (Khodorkov vd., 2003).....	14
1.6: Vakum soğutma uygulama sistemi	16
1.7: Soğutan cihazlar olamadığı zamanda vorteks tüp (Azarov, 2007)	16
1.8: RHVT kaskat sistem (Cockerill, 1998)	17
1.9: RHVT tüp separatörü (URL-2)	19
1.10: Vorteks tüp soğutmalı gazdan nem alma sistemi (Özgür,2001)	20
1.11: Kar üretim sistemi (Nabhani, 1989).....	21
1.12: Rangué-Hilsch karşıt akışlı vorteks tüp (Cebeci, 2013).....	25
1.13: Karşıt akışlı bir vorteks tüpteki akış (Yılmaz vd., 2006)	31
3.1: KRHVT Polyamid $T_{soğuk}$ çıkış sıcaklık grafikleri	42
3.2: KRHVT Pirinç $T_{soğuk}$ çıkış sıcaklık grafikleri.....	43
3.3: KRHVT Alüminyum $T_{soğuk}$ çıkış sıcaklık grafikleri.....	44
3.4: KRHVT Polyamid $T_{sıcak}$ çıkış sıcaklık grafikleri	44
3.5: KRHVT Pirinç $T_{sıcak}$ çıkış sıcaklık grafikleri	45
3.6: KRHVT Alüminyum $T_{sıcak}$ çıkış sıcaklık grafikleri	46
3.7: KRHVT Polyamid ΔT çıkış sıcaklık farkları grafikleri	46
3.8: KRHVT Pirinç $\Delta T_{sıcak}$ çıkış sıcaklık farkları grafikleri	47
3.9: KRHVT Alüminyum ΔT çıkış sıcaklık farkları grafikleri	48
3.10: KRHVT Alüminyum ΔT makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri.....	50
3.11: KRHVT Alüminyum ΔT DVM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği.....	50
3.12: KRHVT Alüminyum ΔT EN determinasyon katsayısı (R^2) grafiği	51
3.13: KRHVT Alüminyum ΔT LGBM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği	52
3.14: KRHVT Alüminyum ΔT RA determinasyon katsayısı (R^2) grafiği	53
3.15: KRHVT Alüminyum $T_{sıcak}$ makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri.....	54
3.16: KRHVT Alüminyum $T_{sıcak}$ DVM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği.....	55
3.17: KRHVT Alüminyum $T_{sıcak}$ EN determinasyon katsayısı (R^2) grafiği.....	56

3.18: KRHVT Alüminyum T _{sıcak} LGBM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	57
3.19: KRHVT Alüminyum T _{sıcak} RA determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	58
3.20: KRHVT Alüminyum T _{soğuk} makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri.....	59
3.21: KRHVT Alüminyum T _{soğuk} DVM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği.....	60
3.22: KRHVT Alüminyum T _{soğuk} EN determinasyon katsayısı (R ²) grafiği.....	60
3.23: KRHVT Alüminyum T _{soğuk} LGBM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	61
3.24: KRHVT Alüminyum T _{soğuk} RA determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	62
3.25: KRHVT Pirinç ΔT makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri.....	63
3.26: KRHVT Pirinç ΔT DVM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	64
3.27: KRHVT Pirinç ΔT EN determinasyon katsayısının (R ²) grafiği	64
3.28: KRHVT Pirinç ΔT LGBM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	65
3.29: KRHVT Pirinç ΔT RA determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	66
3.30: KRHVT Pirinç T _{sıcak} makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri.....	67
3.31: KRHVT Pirinç T _{sıcak} DVM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	68
3.32: KRHVT Pirinç T _{sıcak} EN determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	69
3.33: KRHVT Pirinç T _{sıcak} LGBM determinasyon katsayısının (R ²) grafiği	69
3.34: KRHVT Pirinç T _{sıcak} RA determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	70
3.35: KRHVT Pirinç T _{soğuk} makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri.....	72
3.36: KRHVT Pirinç T _{soğuk} DVM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	72
3.37: KRHVT Pirinç T _{soğuk} EN determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	73
3.38: KRHVT Pirinç T _{soğuk} LGBM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	74
3.39: KRHVT Pirinç T _{soğuk} RA determinasyon katsayısının (R ²) grafiği	74
3.40: KRHVT Polyamid ΔT makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri.....	76
3.41: KRHVT Polyamid ΔT DVM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği.....	77
3.42: KRHVT Polyamid ΔT EN determinasyon katsayısı (R ²) grafiği.....	78
3.43: KRHVT Polyamid ΔT LGBM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	79
3.44: KRHVT Polyamid ΔT RA determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	80
3.45: KRHVT Polyamid T _{sıcak} makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri.....	81
3.46: KRHVT Polyamid T _{sıcak} DVM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği.....	82
3.47: KRHVT Polyamid T _{sıcak} EN determinasyon katsayısı (R ²) grafiği.....	82
3.48: KRHVT Polyamid T _{sıcak} LGBM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	83
3.49: KRHVT Polyamid T _{sıcak} RA determinasyon katsayısı (R ²) grafiği	84
3.50: KRHVT Polyamid T _{soğuk} makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri.....	85
3.51: KRHVT Polyamid T _{soğuk} DVM determinasyon katsayısı (R ²) grafiği.....	86

3.52: KRHVT Polyamid $T_{\text{soğuk}}$ EN determinasyon katsayısı (R^2) grafiği.....	87
3.53: KRHVT Polyamid $T_{\text{soğuk}}$ LGBM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği	87
3.54: KRHVT Polyamid $T_{\text{soğuk}}$ RA determinasyon katsayısı (R^2) grafiği	88



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Sayfa No
3.1: KRHVT Alüminyum ΔT makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü	49
3.2: KRHVT Alüminyum $T_{sıcak}$ makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü	53
3.3: KRHVT Alüminyum $T_{soğuk}$ makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü	58
3.4: KRHVT Pirinç ΔT makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü	62
3.5: KRHVT Pirinç $T_{sıcak}$ makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü	66
3.6: KRHVT Pirinç $T_{soğuk}$ makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü	71
3.7: KRHVT Polyamid ΔT makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü	75
3.8: KRHVT Polyamid $T_{sıcak}$ makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü	81
3.9: KRHVT Polyamid $T_{soğuk}$ makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü	84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

m_c	: Soğuk akışkanın kütleli debisi, kg/s
m_h	: Sıcak akışkanın kütleli debisi, kg/s
m_i	: Giren akışkanın kütleli debisi, kg/s.
y_c	: Akışkanın soğuk kütle debisinin toplam girişteki debiye oranı
T_i	: Giriş akışkanının sıcaklığı
T_c	: Soğuk uçtan çıkan akışkanın sıcaklığı
ΔT_c	: Soğuk akışkan sıcaklık farkı
ΔT_h	: Sıcak akışkan sıcaklık farkı

KISALTMALAR

MAE	: Ortalama Mutlak Hata
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hata
MSE	: Ortalama Kare Hata
R^2	: Belirleme Katsayısı
LGBM	: Hafif Gradyan Artırma Yöntemi
DVM	: Destek Vektör Makinesi
RA	: Regresyon Ağaçları
ΔT	: Sıcaklık farkı
KVT	: Kaskad Vorteks Tüpü
EN	: Elastik Net
IRT	: Kızılötesi Tomografi

1. GİRİŞ

Artan nüfus, hızla gelişen sanayi faaliyetleri ve teknolojiadaki ilerlemeler, enerji talebinin gün geçtikçe yükselmesine neden olmaktadır. Bu enerji talebinin önemli bir kısmı, konfor amaçlı ısıtma ve soğutma sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Ancak yaygın olarak kullanılan geleneksel ısıtma ve soğutma sistemleri genellikle fosil yakıtlara dayalıdır ve yüksek enerji tüketimi ile çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu sistemlerin neden olduğu sera gazı emisyonları, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevre sorunlarını derinleştirmektedir. Bu nedenle, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda, çevre dostu, enerji verimliliği yüksek ve ekonomik alternatif sistemlerin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Bu çerçevede, son yıllarda üzerinde yoğun şekilde çalışılan alternatif teknolojilerden biri vorteks tüpleridir. Vorteks tüpleri, yalnızca yüksek basınçlı hava kullanarak herhangi bir hareketli parçaya ihtiyaç duymadan soğuk ve sıcak hava akımları oluşturabilen termodinamik cihazlardır. Basit yapısı, düşük işletme maliyeti, bakım gerektirmemesi ve çevresel etkilerinin minimal düzeyde olması gibi avantajları, bu tüpleri geleneksel sistemlere karşı cazip bir alternatif haline getirmektedir. Bu özelliklerinden dolayı, özellikle endüstriyel soğutma uygulamaları, elektronik ekipmanların yerel soğutulması, askeri sistemler ve ısı geri kazanım sistemleri gibi birçok alanda kullanılabilir potansiyele sahiptirler. Vorteks tüplerin işleyiş mekanizmasının tam olarak anlaşılması, performanslarının artırılması ve enerji verimliliklerinin değerlendirilmesi için termodinamik analizlerin yapılması büyük önem taşımaktadır.

Vorteks tüpler, basit yapıları, hareketli parça gerektirmeyen tasarımları ve çevre dostu özellikleriyle ısıtma ve soğutma teknolojileri arasında dikkat çeken bir sistemdir. Bilimsel araştırmaların giderek yoğunlaştığı bu sistem, yalnızca basınçlı hava kullanarak aynı anda hem soğutma hem de ısıtma işlevlerini yerine getirebilmesiyle dikkat çekmektedir. Vorteks tüpleri, bu özelliği sayesinde özellikle düşük maliyetli ve çevre dostu soğutma uygulamaları açısından önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu aygıt, ilk kez 1933 yılında Georges J. Ranque tarafından ortaya konmuş; daha sonra 1947 yılında Rudolf Hilsch'in katkılarıyla geliştirilerek daha işlevsel hale getirilmiştir. Bu nedenle literatür de genellikle "Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü (RHVT)" olarak adlandırılmaktadır. Çevreye duyarlı bir teknoloji olmasının yanı sıra, enerji verimliliği, kolay taşınabilirlik ve düşük maliyet gibi avantajları, bu sistemin hem akademik hem de endüstriyel araştırmalar için cazip bir konu

olmasını sağlamıştır. Bu tür sistemler, yenilikçi tasarımlarla performanslarının iyileştirilmesine yönelik birçok çalışma ile geliştirilmekte ve farklı malzeme türleri, basınç aralıkları ve geometrik parametreler altında test edilmektedir.

Bu çalışmada, RHVT'nin performansını değerlendirmek amacıyla tasarlanmış bir deneysel sistem incelenmiştir. Sistem, farklı tasarım parametreleri ve çalışma koşulları altında RHVT'lerin ısıtma ve soğutma performansını ölçmeyi hedeflemektedir. Deneysel düzeneğin kurulması için, her biri 7 mm iç çapa ve 100 mm gövde uzunluğuna sahip üç adet zıt akışlı Ranque-Hilsch vorteks tüpü sistematik olarak paralel biçimde birleştirilmiştir. RHVT'lerin karşıt akışlı konfigürasyonu, sistemin hem ısıtma hem de soğutma performansını optimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Deneysel sistemde kullanılan RHVT'lerde farklı malzemelerden üretilmiş nozullar tercih edilmiştir. Bu nozullar plastik, polyamid, pirinç ve alüminyum gibi farklı termal özelliklere sahip ham maddeler kullanılarak imal edilmiştir.

Sistemin çalışma koşulları, farklı giriş basınçlarında değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, basınçlı hava 150 kPa'dan başlanarak 550 kPa'ye kadar, 50 kPa'lık artışlarla RHVT'nin sistemine uygulanmıştır. Her basınç seviyesinde elde edilen sıcaklık verileri, hem sıcak hem de soğuk çıkışlardan ayrı ayrı alınarak sistemin performansı detaylı şekilde analiz edilmiştir. Böylece, farklı giriş basıncı ve malzeme kombinasyonlarının sistem üzerindeki etkileri hem ısıtma hem de soğutma yönünden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, sistemin termodinamik davranışı termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları çerçevesinde analiz edilmiştir. Termodinamiğin birinci yasası kapsamında, enerjinin korunumu prensibi esas alınarak sistemdeki enerji geçişleri incelenmiştir. Bu analizde, girişten sisteme iletilen enerji ile çıkışlardaki enerji dengesine odaklanılmış ve sistemin enerji verimliliği değerlendirilmiştir. Çevre dostu ısıtma ve soğutma sistemlerinin geliştirilmesi için önemli bir katkı sunmaktadır ve RHVT'nin pratik uygulamalarını daha geniş bir yelpazeye yayma potansiyeli taşımaktadır. Çalışmanın amacı, çevresel açıdan zararsız, yenilikçi bir ısıtma ve soğutma sistemi olan RHVT'nin performansını teorik ve deneysel olarak değerlendirmektir. Bu çalışma, Ranque-Hilsch vorteks tüplerinin teorik ve deneysel analizine katkı sunarken, gelecekteki uygulamalar ve tasarım iyileştirmeleri için önemli bir referans oluşturabilir.

1.1 Literatür Taraması

Literatür taraması, RHVT'lere ilişkin mevcut bilgi birikimini ve araştırma eğilimlerini anlamak amacıyla yurt içi ve yurt dışı çalışmaların detaylı bir şekilde incelenmesiyle gerçekleştirilmiştir.

1.1.1 Yurt İçi Çalışmalar

Türkiye'de yapılan çalışmalar genellikle deneysel sistemlerin geliştirilmesi ve yerli üretim malzemelerin kullanımına odaklanmıştır. Yurt içinde, vorteks tüplerinin farklı boyut ve malzeme türleriyle performansının incelendiği deneysel sistemler geliştirilmiştir. Polimer ve metal bazlı malzemelerin performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Yüksek basınçlı hava kullanılarak sıcaklık farklarının etkisi araştırılmıştır. Enerji tasarrufunun ön planda olduğu çalışmalar, özellikle sanayi proseslerine yönelik uygulamalar geliştirilmesini hedeflemiştir. Üniversitelerde, vorteks tüplerin termodinamik analizleri ve uygulama alanlarına yönelik çeşitli yüksek lisans ve doktora çalışmaları yapılmıştır.

Kırmacı (2006), karşıt akışlı vorteks tüpü üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada farklı gaz türlerinin (O_2 , N_2 ve CO_2) giriş basınçları altındaki performanslarını incelemişlerdir. Bu çalışmada, giriş ve çıkış akışkan sıcaklıklarının, giriş basıncına bağlı olarak nasıl değiştiği deneysel olarak analiz edilmiştir. O_2 , N_2 ve CO_2 gazlarının, havaya kıyasla daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir. Gazlar arasında bir karşılaştırma yapıldığında, CO_2 'nin, diğer gazlara göre minimum soğuk çıkış sıcaklıklarına ve maksimum sıcak çıkış sıcaklıklarına ulaştığı belirlenmiştir. CO_2 'nin vorteks tüpünde enerji ayrıştırma açısından diğer gazlara göre daha etkili olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, farklı gaz türlerinin vorteks tüp performansı üzerindeki etkilerini karşılaştırmak için önemli bir referans niteliğindedir. Özellikle CO_2 'nin yüksek performansı, enerji ayrıştırma uygulamalarında bu gazın kullanım potansiyelini vurgulamaktadır.

Kırmacı (2007), karşıt akışlı vorteks tüpü üzerinde yaptığı çalışmada hava kullanarak, farklı giriş basınçlarının ve soğuk akışkanın kütleli debi oranının sistem performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada, giriş basınçları 150 ile 550 kPa arasında değiştirilmiş ve bu değişim her seferinde 50 kPa'lık artışlarla sağlanmıştır. Soğuk uçtan çıkan akışkan debisinin, toplam giriş debisine oranı (yc) bu çalışmada temel değişken olarak seçilmiş ve

bu oran 0,50'den başlayarak 0,70'e kadar 0,02'lik kademelerle artırılarak kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde, giriş basıncı yükseldikçe sıcak uçtan çıkan gazın sıcaklığında artış, soğuk uçtan çıkan gazın sıcaklığında ise azalma gözlemlenmiştir. Özellikle yc oranı 0,50 ile 0,64 aralığının da kaldığında, artan basınçla birlikte soğuk uç sıcaklığı belirgin biçimde düşmüştür. Ancak yc değeri 0,64'ü aştığında, bu düşüş trendi zayıflamış ve soğuk çıkış sıcaklığında sabitlenme ya da hafif artış eğilimi görülmeye başlanmıştır. Bu bulgular, akışkanın çıkışlara bölünme oranının (yc), tüp içindeki enerji dağılımı ve ısı ayrıştırması üzerinde etkili bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma, vorteks tüp performansının giriş basıncı ve kütleli debi oranı gibi parametrelere bağlı olarak nasıl değiştiğini anlamak için önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Özellikle (yc) oranının etkisi, vorteks tüp uygulamalarında optimum performansı sağlamak için dikkate alınması gereken kritik bir faktör olduğunu göstermektedir.

Kaçmaz (2010), çalışmasında RHVT'de farklı gaz türlerinin termal ve akışsal davranışlarını dijital ortamda modellemiş ve sistemin performansını Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle detaylı biçimde incelemiştir. RHVT'nin iç akış yapısı ve ısı karakteristikleri, sayısal analizler aracılığıyla kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. RHVT üzerinde sayısal yöntemlerle gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında, sıcak ve soğuk akışlar kontrol altına alınarak cihazın ısı performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, RHVT'nin farklı iki giriş sınır koşulunun altında termal davranışı detaylı biçimde incelenmiştir.

Markal (2010), tezinde vorteks tüplerinde nozul yapısı, tüpün gövdesinin uzunluğu, girişteki basıncı ve tapan açısının etkilerini deneysel yöntemlerle araştırmıştır. Çalışma kapsamında yalnızca geometrik ve işletme parametreleri değil; aynı zamanda ortam nemi, dış yalıtım durumu ve çevre sıcaklığı gibi dış etkenlerin de vorteks tüp performansına olan katkısı gözlemlenmiştir. Ayrıca, vorteks tüp yüzeyindeki sıcaklık dağılımını detaylı biçimde ortaya koymak ve akışın durma noktasını belirleyebilmek için termal kamera yardımıyla görsel ve sayısal analizler yapılmıştır.

Danış (2010), yüksek lisans tez çalışmasında, bireylerin çevresel sıcaklık koşullarına bağlı olarak serinleme ya da ısınma gereksinimlerini karşılayabilecek, dış enerji kaynaklarına bağımlı olmayan, tamamen kas gücüyle çalışan yenilikçi bir sistem geliştirmiştir. Bu

sistemin temelini, RHVT oluştururken, üç uzuvlu doğrusal hareket mekanizması ile entegre edilen dizlik ve yelek bileşenleri sayesinde kullanıcı tarafından giyilebilir ve taşınabilir hale getirilmiştir. Tasarım sürecinin ardından, söz konusu sistemin hem işlevsel prototip üretilmiş hem de taşınabilir bir soğutma ve ısıtma çözümü olarak pratiğe dönüştürölmesi sağlanmıştır.

Selek ve arkadaşları (2011), gerçekleştirdikleri çalışmada, torna tezgâhı üzerinde yürütöl deneyssel uygulamalarla, RHVT kullanılarak kesici takım ucunun soğutma performansını değerlendirmiştir. Soğutma etkinliği, kızılöltesi termografi (IRT) yöntemiyle izlenmiş ve görsel sıcaklık dağılımları üzerinden analiz edilmiştir. Deneyssel veriler doğrultusunda, RHVT destekli soğutmanın tornalama işlemi sırasında kesici takımın sıcaklık kontrolöl üzerindeki etkileri ile birlikte, farklı kesme hızları ve derinliklerinin bu soğutma yöntemiyle nasıl etkileşime girdiği ayrıntılı biçimde ortaya anlatılmıştır.

Cebeci (2013), yüksek lisans tezinde, uzunluğu 100 mm ve iç çapı 10 mm Vorteks Tüpü (RHVT) üzerinde deneyssel incelemeler yapmıştır. Poliamid malzemeden imal edilen ve 2 ila 6 nozulla farklı konfigürasyonlarda tasarlanan sistemde, hava ve oksijen (O_2) kullanılmış; girişdeki basınc 150 kPa ile başlayıp 550 kPa'ya kadar 50 kPa artışlarla değerştirilerek soğutma ve ısıtma performansları ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen deneyssel veriler ışığında, RHVT performansının iyileştirilmesine yönelik çeşitli öneriler sunulmuştur.

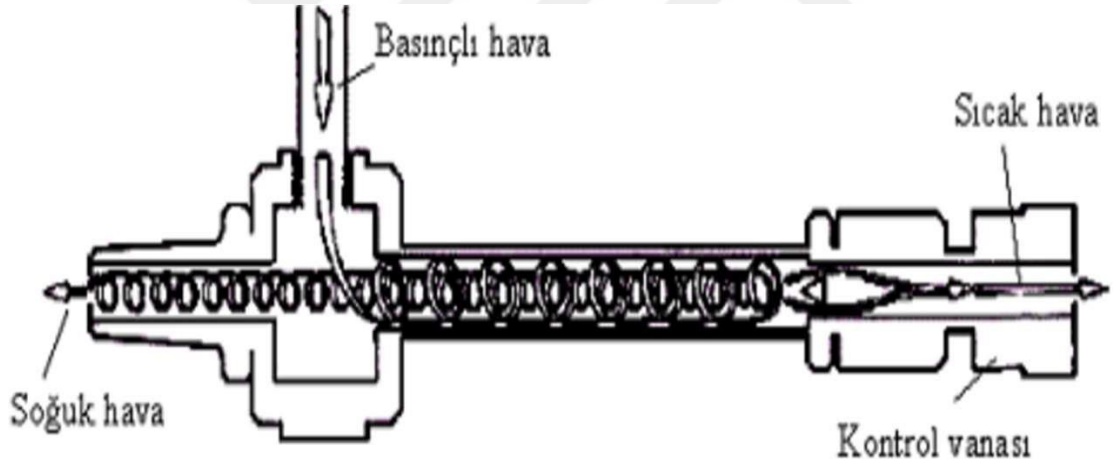
1.1.2 Yurt Dışı Çalışmalar

RHVT'lerin termodinamik prensipleri, tasarım parametrelerinin performansa etkisi ve çeşitli uygulama alanları üzerine yoğunlaşmıştır. Nozul sayısı, gövde uzunluğu ve malzeme seçimi gibi parametrelerin RHVT performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Örneğin, bazı çalışmalar, uzun tüplerin daha yüksek sıcaklık farkları yarattığını göstermiştir. Nozul geometrisinin ve çapının, enerji ayırıtırma verimliliği üzerindeki etkisi detaylı şekilde analiz edilmiştir. RHVT'ler soğutma sistemleri, hava koşullandırma, elektronik cihaz soğutma, ve endüstriyel proseslerde enerji verimliliği sağlama gibi çeşitli alanlarda incelenmiştir. Enerji verimliliği ile kayıpların analizine odaklanan çalışmalarda, özellikle basınçlı hava kullanımıyla kayıpları en aza indirmenin yolları araştırılmıştır. Deneyssel veriler ve sayısal modelleme kullanılarak vorteks akışının ve sıcaklık ayırıtımının detaylı görselleştirilmesi sağlanmıştır.

Ahlborn ve arkadaşları (1996), gerçekleştirdikleri çalışmada, RHVT'nin sıcak ve soğuk uçlarına uygulanan vakum etkisini incelemişlerdir. Bu yöntemle, sıcak ve soğuk taraflarda oluşan sıcaklık farklarının artırılması hedeflenmiş ve böylece sistemin soğutma performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Deneysel sonuçlar, vakum uygulamasının RHVT'nin verimliliğini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur.

Lewins ve Bejan (1999), teorik yaklaşımla gerçekleştirdikleri çalışmalarında, RHVT'nin soğutma verimliliğini artırmak amacıyla yeni bir model geliştirmiştir. Bu modelde, tüpe giren havanın ön soğutma işlemine tabi tutulmasının, cihazın genel soğutma performansını önemli ölçüde iyileştireceği önerilmiştir.

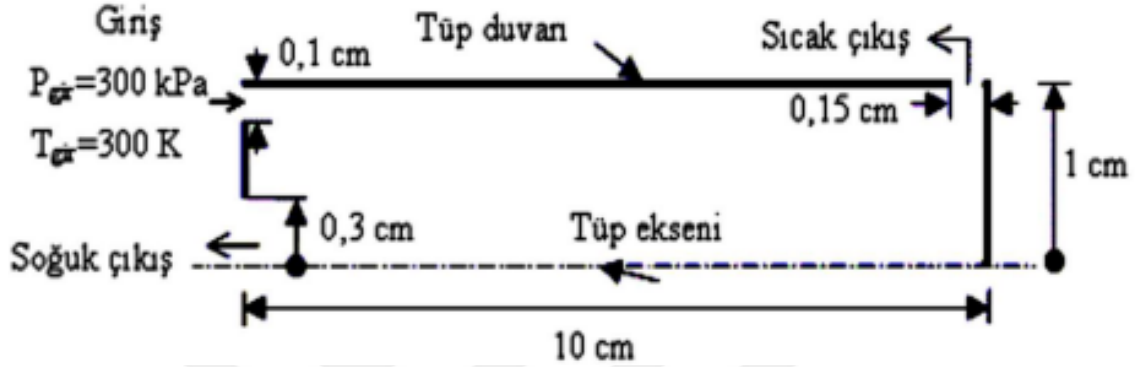
Saidi ve Valipour (2003), çalışmalarında RVHT'lerde sıcaklık ayrışmasına etki eden temel faktörleri kapsamlı bir deneysel analizle incelemiş ve özellikle giriş basıncı, nozul geometrisi ve akış oranlarının sistem verimliliği üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymuştur. (Şekil 1.1)



Şekil 1.1: Vorteks tüp sistemi (Saidi ve Valipour, 2003).

Shannak (2004), RHVT'lerde meydana gelen enerjinin ayrışması ve sürtünmeden kaynaklı kayıpları teorik ve deneysel açıdan ele almıştır. Çalışmada, havanın termodinamiksel karakteristiklerine bağlı olarak sıcak ve soğuk uçlardan çıkan hava sıcaklıkları titizlikle ölçülmüş ve bu deneysel sonuçlar, geliştirdiği matematiksel modelin öngörülerıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler, modelin tahmin ettiği maksimum sıcak ve minimum soğuk hava sıcaklıklarıyla büyük bir uyum sergilemiştir.

Aljuwayhel ve çalışma arkadaşları (2005), RHVT’i iki boyutlu olarak sayısal yöntemlerle modellemiş ve bu amaçla FLUENT akışkanlar dinamiği yazılımını kullanmışlardır. Çalışmada, 300 kPa giriş basıncı ve 300 K giriş sıcaklığı koşulları altında, 10 cm uzunluğa ve 2 cm çapa sahip bir tüp geometri üzerinde, yaklaşık 75.000 hücre içeren bir ağ yapısı üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2: Vorteks tüpün geometrisi (Aljuwayhel vd. 2005).

Kırmacı (2006), vorteks tüplerde enerji ayrışması deneysel olarak beş farklı gaz kullanarak incelemişlerdir. Bu gazlar oksijen, karbondioksit, argon, azot ve hava’dır. Testler sonucunda, hava soğuma verimi diğer gazlara kıyasla daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, en yüksek uygulanan basınç olan 7 bar altında, en düşük sıcaklık değerinin Argon gazında elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Xue ve Arjomandi’nin (2008) çalışması, vortex tüpündeki nozul açılarının performans ve verim üzerindeki etkilerini inceleyen önemli bir deneysel araştırmadır. Çalışmada farklı nozul açılarının, vortex tüpündeki sıcaklık farkı, ısıtma ve soğutma verimi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Küçük nozul açıları, yüksek sıcaklık farkları ve daha yüksek ısıtma sağlamıştır. Girişdeki küçük basınç ve nozul açılarıyla daha yüksek soğutma elde edilmiştir. Çalışma, nozul açıları ile vortex tüpü performansı arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak, bu parametrenin cihazın verimliliğini artırmada kritik bir rol oynadığını göstermiştir. Bu bulgular, vortex tüplerinin endüstriyel uygulamalarda optimum performans için nozul tasarımının nasıl optimize edilebileceği konusunda değerli bilgiler sunmaktadır. Nimbalkar ve Muller’in (2008) çalışması, ters akışlı vortex tüpünde enerji ayrışmasını

etkileyen faktörleri deneysel olarak analiz eden önemli bir araştırmadır. Araştırmada, vortex tüpünün soğuk uç geometrisi, giriş basınçları ve yc değeri (soğuk kütle akış oranı) gibi parametrelerin enerji ayrışması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, vortex tüpünde enerji ayrışmasını, sıcak ve soğuk çıkışlar arasındaki enerji farkı olarak tanımlamış ve bu mekanizmayı detaylı bir şekilde açıklamıştır. Maksimum enerji ayrışmasını sağlamak için optimum bir orifis çapı olduğunu göstermiştir. Orifis çapının, enerji ayrışmasını doğrudan etkilediği ve bu nedenle dikkatle tasarlanması gerektiği vurgulanmıştır. Enerji ayrışmasını etkileyen faktörlerin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuş ve vortex tüpü tasarımında orifis çapı gibi geometrik parametrelerin optimizasyonunun önemini ortaya koymuştur. Bu bulgular, vortex tüplerinin enerji verimliliğini artırmak ve performansını optimize etmek için tasarım parametreleri hakkında değerli bilgiler sunmaktadır.

Xue'nin (2013) çalışması, ters akışlı vortex tüplerinin içindeki akış davranışını ve bu cihazda soğuk ve sıcak akımların nasıl üretildiğini detaylı bir şekilde ele alır. Çalışmada, bir vortex tüpü içindeki akış yapısının ayrıntılı tanımı yapılmış, özellikle soğuk ve sıcak akımların üretimine yönelik mekanizmalar açıklanmıştır. Bu, suyla çalışan bir vortex tüpünde akışın görselleştirilmesi ve hız profillerinin ölçülmesiyle doğrulanmıştır. Farklı deneysel metodolojiler kullanılarak, su ve hava ile çalışan vortex tüplerinde akış davranışları karşılaştırılmıştır. Vortex tüplerindeki zorunlu girdap akışının basınç gradyanına dayalı olarak tahmin edilen teorik sıcaklık düşüşü ile elde edilen deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Bu, sistemin enerji verimliliği hakkında önemli bir bilgi sağlamaktadır. Çalışma, vortex tüplerindeki akış davranışını daha iyi anlamaya yönelik önemli bir katkı sunmuş ve özellikle teorik ve deneysel verilerin nasıl birbirini doğruladığını göstermiştir.

Rafiee (2017) araştırması, küresel vanalı vortex tüpleri üzerinde yapılan deneysel bir çalışmayı ele almaktadır. Çalışmanın odak noktası, kontrol vanası tasarımının vortex tüpünün performansı üzerindeki etkileridir. Küresel vanalı bir vorteks tüpü için enjeksiyon basıncı, slot sayısı, durma noktası konumu ve türbülans seviyesinin etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, durma noktası ile kontrol vanası arasındaki mesafenin azaltılmasıyla soğutma kapasitesinin maksimum değere ulaşabileceğini göstermektedir. Li (2018), araştırmada batarya kapasitesi tahmini için bir makine öğrenimi tekniği olan rastgele regresyon önermektedir. Önerilen teknik, akü kapasitesinin şarj voltajı ve kapasite ölçümlerinden

Çıkarılan özelliklere bağımlılığını öğrenebilmektedir. Toplanan ham veriler herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan doğrudan öğretilmiş modele beslenebilir ve bu da düşük bir hesaplama maliyeti sağlar. Özellik seçimi için artımsal kapasite analizi kullanılmıştır. Geliştirilen yöntem, farklı yaşlanma modellerine sahip lityum nikel mangan kobalt oksit piller üzerinde uygulanmış ve doğrulanmıştır. Önerilen tekniğin yapabildiğini göstermektedir. Farklı akülerin sağlık durumlarını çeşitli çevrim koşulları altında %1,3'ten daha az bir kök-ortalama-kare hatası ve düşük bir hesaplama gereksinimi ile değerlendirir. Bu çalışma, batarya kapasitesi tahmininde makine öğrenimi tekniklerinin kullanımını geliştirmiş ve bataryaların sağlık durumlarının doğru şekilde tahmin edilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca, geliştirilen yöntem, düşük maliyet ve yüksek doğruluk sunarak batarya yönetimi sistemlerinin optimizasyonuna katkı sağlamaktadır. Bu bulgular, batarya sağlık durumu değerlendirme süreçlerinde makine öğrenimi yöntemlerinin etkinliğini ve pratikteki uygulamalarını güçlendirmektedir.

Shamsoddini (2018) çalışmasında nozüllerin rolleri incelenerek, nozul sayısının etkisinin azaltılmasına yönelik dairesel bir model tanıtılmış ve sayısal olarak incelenmiştir. Sonuçlar, test edilen modelin nozul sayısının etkisiyle uygun şekilde azaltıldığını doğrulamaktadır.

Kaya (2020) çalışmasında, paralel bağı girdap tüpü sisteminin performansını iyileştirmek için bir optimizasyon prosedürü geliştirilmiştir. Deneylerde, farklı çalışma sıvıları (hava, oksijen, karbondioksit), nozul malzemeleri (pirinç ve poliamid) ve nozul sayıları (3, 4 ve 5) kullanılmıştır. Ayrıca, giriş basıncı 150, 300 ve 450 kPa olarak değiştirilmiştir. Bu parametreler, sistemin performansını etkileyen kontrol parametreleri olarak belirlenmiştir. Deneylerin tasarımında, Taguchi L18 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Bu dizi, farklı parametre kombinasyonlarını etkili bir şekilde incelemeyi sağlamış ve optimizasyon sürecinde parametrelerin etkilerini değerlendirmek için sistematik bir yöntem sunmuştur. Bu çalışma, girdap tüpü sistemlerinin verimliliğini artırmak için hangi parametrelerin öncelikli olarak optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymuş ve Taguchi yönteminin, mühendislik sistemlerinde performans optimizasyonu için etkili bir araç olduğunu göstermiştir.

Liang (2020) çalışmasında, vorteks tüpü kullanılarak hidrasyon geri kazanımı için yeni bir teknik önerilmiştir. Bu teknik, sıkıştırılmış gazın, katı hidratin yerinde ayrıştırılması amacıyla vorteks tüpüne enjekte edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırılmış gaz, vorteks

tüpüne teğetsel olarak enjekte edilerek, sıcak bir akış oluşturulmuş ve bu sayede hidratin sıcaklık ayırma etkisiyle çözünmesi sağlanmıştır. Bu yöntem, özellikle hidratları ayrıştırmak için geleneksel yöntemlere alternatif olarak geliştirilmiştir. Vorteks tüpü kullanılarak yapılan hidrat geri kazanımının, geleneksel yöntemlere göre daha verimli ve daha az bakım gerektiren bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

Chen (2021) çalışmasında, hidrojen yakıt ikmal istasyonlarında yüksek basınçlı hidrojen araçlarına yakıt ikmali için ön soğutma işleminin RHVT ile entegrasyonunun potansiyeli araştırılmıştır. RHVT'nin hidrojen yakıt istasyonlarında soğutma sistemlerine entegre edilmesinin hidrojen yakıt ikmali sürecini daha verimli hale getirebileceğini ve maliyetleri azaltabileceğini ortaya koymaktadır.

Tang (2023) çalışmasında, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından vorteks tüp uygulamalarının akış düzleştirici ile birlikte nasıl daha verimli hale getirilebileceği araştırılmıştır. Kanat sayısı, kanat açısı ve montaj pozisyonu arttıkça soğuk ve sıcak sıcaklık farklarının ve performans katsayısının önce arttığını, ancak daha sonra azaldığını göstermektedir. Ayrıca, akış düzleştiricinin merkezinde bulunan bir deliğin, vorteks tüpünün enerji ayırma performansını zayıflattığı tespit edilmiştir.

Bagre (2023), vorteks tüpünün performansını etkileyen farklı malzemeleri değerlendirmek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, dört farklı malzeme vorteks tüpü ve orifislerini dikkate alarak vorteks tüpü performans artırımını rapor etmektedir. Malzemenin termodinamik özellikleri, çeşitli malzemeler için vorteks tüplerinin performansını analiz etmek için dikkate alınmıştır. Alüminyum vorteks tüpü ve orifisinin diğer tüm malzemeler arasında en yüksek performansı elde ettiği bulunmuştur. Özgül ısı, termal difüzyivite ve termal iletkenliğin VT'nin termal performansını etkileyen önemli özellikler olduğunu göstermektedir.

Guangming (2024) araştırmasında, zıt akış sınırının dağılımını ve spesifik olanı analiz etmek için enterpolasyon probunun ölçüm yöntemini kullanmaktadır. Bu sınırdaki akış parametreleri enerji ayrımını önemli ölçüde etkileyen statik basınç gradyanını, açısal hızı ve statik sıcaklık gradyanını içerir. Ters alandaki kütle akışının ve teğetsel ve eksenel hızların incelenmesi yoluyla vorteks tüpündeki enerji aktarım sürecinin niteliksel bir analizi daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu analiz, sıkıştırma ve genleşme süreçlerinden kaynaklanan

momentum aktarımını, ısı aktarımını ve türbülanslı ısı aktarımı süreçlerini kapsar. Bulgular, vorteks tüplerinin enerji ayırma performansının araştırılmasına yönelik bir araştırma yönü sağlar.

Oberti (2024) çalışmasında, 3B hesaplama akışkanlar dinamiği simülasyonları, temel özellikleri örtük zaman entegrasyonu ve gerçek gaz yoğunluğuna dayalı formülasyon olan açık kaynaklı SU2 çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, literatürde mevcut olan transkritik bir CO₂ nozulundaki basınç ölçümleri, yoğunlaşma başlangıç konumları ve görselleştirmeler üzerinde doğrulama yapılmıştır. Daha sonra, girdap tüpü transkritik CO₂ sıcaklığı, enerji ve faz ayrımlarının yanı sıra viskoz ve ısı dağılımlarından kaynaklanan integral ve yerel entropi oluşumları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sıcaklık ayrımının gerçek gaz etkileri nedeniyle her iki çıkışta da giriş sıcaklığının altında üretildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, ısıtma ve soğutma amaçlı mevcut vorteks tüpü çıkış güçlerinin yanı sıra enerji ayrımının da tersine çevrildiği gösterilmiştir. Bu analiz boyunca, enerji ayrıştırma olayına ilişkin sürtünme teorisi lehine ikna edici argümanlar da açıklanmıştır. Genel olarak, bu çalışma faydalı çalışma kılavuzları sunmakta ve transkritik CO₂ ısı pompaları için bir RHVT'de meydana gelen karmaşık olaylara ışık tutmaktadır.

1.2 Vorteks Tüp

George Joseph Ranque, vorteks tüpünü ilk kez 1931 yılında keşfetmiş ve bu önemli buluşu gerçekleştirmiştir. Bu buluş daha sonra Rudolph Hilsch tarafından geliştirilmiştir (Özkul, 1999). RHVT, boru şeklinde bir malzemeden ve içinde hareket eden herhangi parça bulunmaz. Bu tüp, basınçlı akışkan kullanarak ısıtma ve soğutma işlemleri gerçekleştirebilir (Althouse vd., 1979). Bu tüp, akışkanın spiral bir hareketle dönerek, içindeki enerji ayrımını gerçekleştirir. Bu mekanizma, soğuk ve sıcak akımların birbirinden ayrılmasını sağlar. Vorteks tüpü, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılarak, soğutma ve ısınma ihtiyaçlarını karşılamak için etkili bir yöntem olarak öne çıkmıştır.

RHVT, günümüzde birçok soğutma ve ısıtma sistemleri için popüler bir çözüm olması nedeni kompakt tasarımı, hızla çalışmaya başlayıp ısıyı ayırabilmesi ve dışarıdan bir soğutucu akışkana ihtiyaç duymamasıdır. Ayrıca RHVT, herhangi bir zararlı gaz veya kimyasal kullanmadığı için çevre üzerinde olumsuz bir etkisi yoktur (Balmer 1988).

1.2.1 Vorteks Tüp Çeşitleri

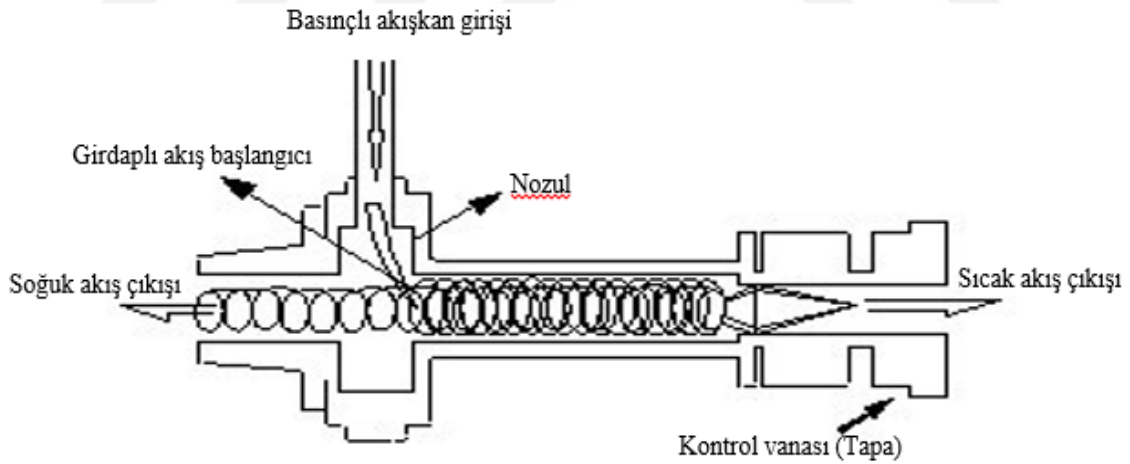
Vorteks tüpler akış özelliği ve tasarlanma özelliklerine göre iki ana kategoriye ayrılabilir. Bu sınıflandırma, tüpün çalışma prensibi ve tasarımında kullanılan farklı parametreleri açıklamaktadır.

1.2.1.1 Akış Özelliğine Göre RHVT'ler

RHVT'ler, akışkanın hareket tarzına bağlı olarak zıt ve paralel olarak kategoride ayrıştırılır.

Zıt Akışlı RHVT'ler (Counterflow Vortex Tubes)

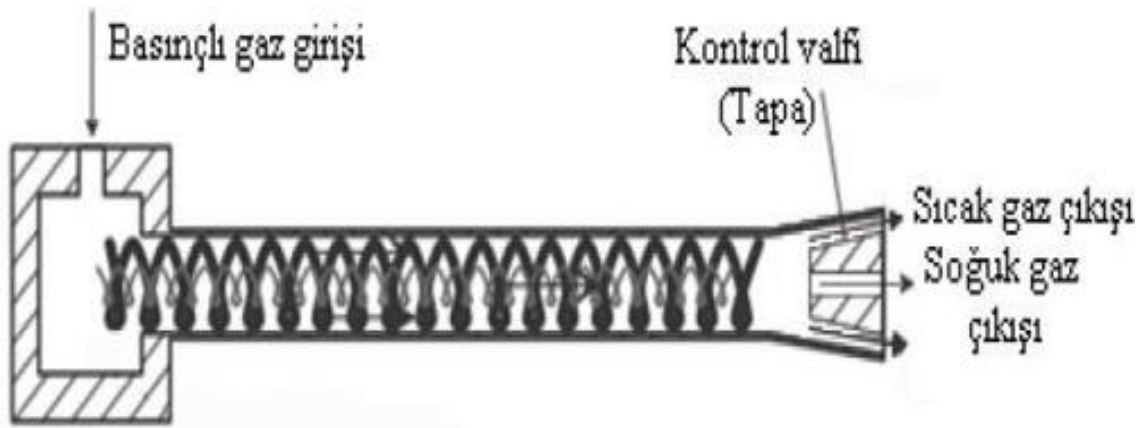
Bu tip RHVT'lerde, soğuk ve sıcak akışlar tüp boyunca zıt yönlerde hareket eder. Genellikle yüksek verimlilik sağlarlar çünkü akışlar arasındaki ısı transferi, tüp boyunca etkili bir şekilde gerçekleşir. Sıcak ve soğuk akışların karşılıklı yönlerde hareket etmesi, sıcaklık farkını artırarak daha verimli bir enerji ayrımı sağlar. Endüstriyel soğutma ve ısıtma sistemleri gibi yüksek performans gereksinimi olan alanlarda kullanılır (Şekil 1.3) (Yılmaz vd, 2007).



Şekil 1.3: Karşıt akışlı vorteks tüp (Yılmaz vd., 2007)

Paralel Akışlı RHVT 'ler

Paralel akış prensibine sahip RHVT'ler, tek bir çıkıştan farklı sıcaklık ve hızlarda iki ayrı hava akışının dışarı verilmesini sağlar. Bu tüplerde sıcak hava, kontrol valfinin dış çevresinden çıkarken, soğuk hava tüpün ortasındaki özel bir delikten ayrılır (Şekil 1.4). Sıcak hava çıkış kesitini ayarlayan valf, hem sıcaklık hem de kütle akış oranlarının hassas kontrolüne olanak tanır. Ancak bu tasarımda sıcak ve soğuk akışkanların karışma ihtimali vardır ki bu durum sıcaklıkların homojen dağılmasını engelleyebilir ve istenen sıcaklık kontrolünü zorlaştırabilir. Bu nedenle, valf ve diğer tasarım bileşenlerinin seçimi sistem performansını optimize etmek için kritik bir rol oynar.



Şekil 1.4: Paralel akışlı sistem (Gao vd. 2005)

1.2.1.2 Tasarımına Göre RHVT 'ler

RHVT, Adyabatik ve Adyabatik Olmayan olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır.

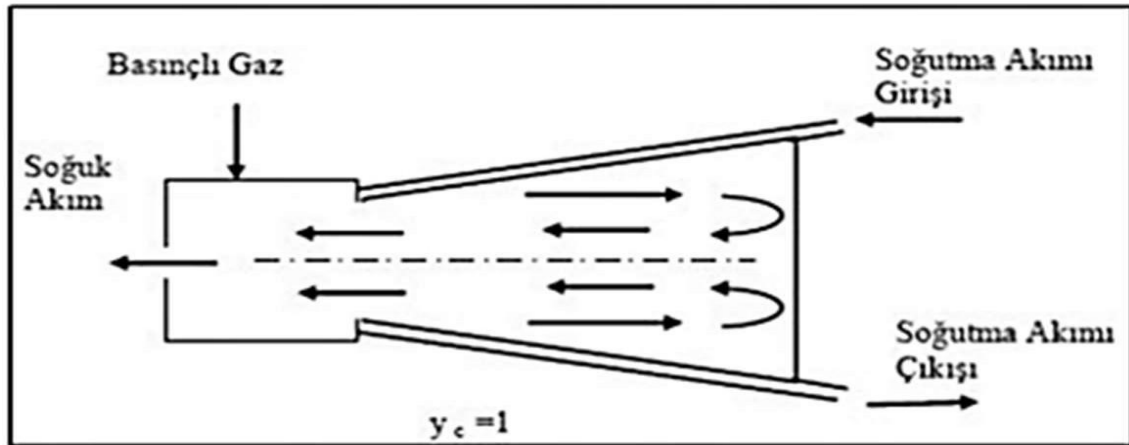
Adyabatik Tüpler

Adyabatik tüpler, ısı kaybının dikkate alınmadığı ve dış yüzeyleri yalıtılmış vorteks tüpleridir. Adyabatik tüpler, ısı alışverişi yapmayan sistemlerdir. Yani, tüp içerisinde herhangi bir dışarıdan ısı girişi veya çıkışı söz konusu değildir. Bu tüplerde çalışma prensibi basınçlı akışkanın, enerji ayrışması sayesinde sıcak ve soğuk akışlara ayrılır. Ancak bu süreç sırasında çevreyle ısı alışverişi olmadığından, yalnızca akışkanın iç enerjisi kullanılarak ayrışma gerçekleşir. Enerji tasarrufu sağlar çünkü dışarıya ısı kaybı yoktur. Yapısal basitlik

sağlar çünkü ek ısıtma veya soğutma elemanları gerektirmez. Daha çok enerji verimliliğinin kritik olduğu sistemlerde tercih edilir.

Adyabatik Olmayan Tüpler

Adyabatik olmayan tüpler, tüp gövdesi üzerinden dış ortama ısı geçişine izin veren yapıya sahiptir. Bu tasarımda, enerji ayrışma işlemi sırasında tüpün çevresiyle ısı alışverişi gerçekleşir. Sistemin tasarımı gövde üzerinden ısı transferine olanak tanır. Bu durum, sıcaklık farklarını artırma veya dengeleme açısından avantaj sağlar. Adyabatik olmayan RHVT'lerin, karşıt akışlı tüplerden en önemli farkı sıcak uç kısmının kapalı olmasıdır. Bu tasarım, enerji ayrışmasını optimize eder. Daha geniş sıcaklık kontrolü gereken uygulamalarda tercih edilir (Şekil 1.5). Bu tür tüpler, hassas sıcaklık yönetimi gereken uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Khodorkov vd., 2003; Cebeci, 2013).



Şekil 1.5: Adyabatik olmayan vorteks tüp (Khodorkov vd., 2003).

1.2.2 Kullanım Alanları

Vorteks tüpler, vorteks tüpler, basit yapıları, hareketli parça içermemeleri ve çevre dostu olmaları sayesinde çok sayıda sektörde tercih edilmektedir (Nabhani, 1989). Öne çıkan bu teknolojinin başlıca kullanım alanları şunlardır:

- Isıtma ve soğutma sistemleri,
- Gazların sıvı hale getirilmesi,

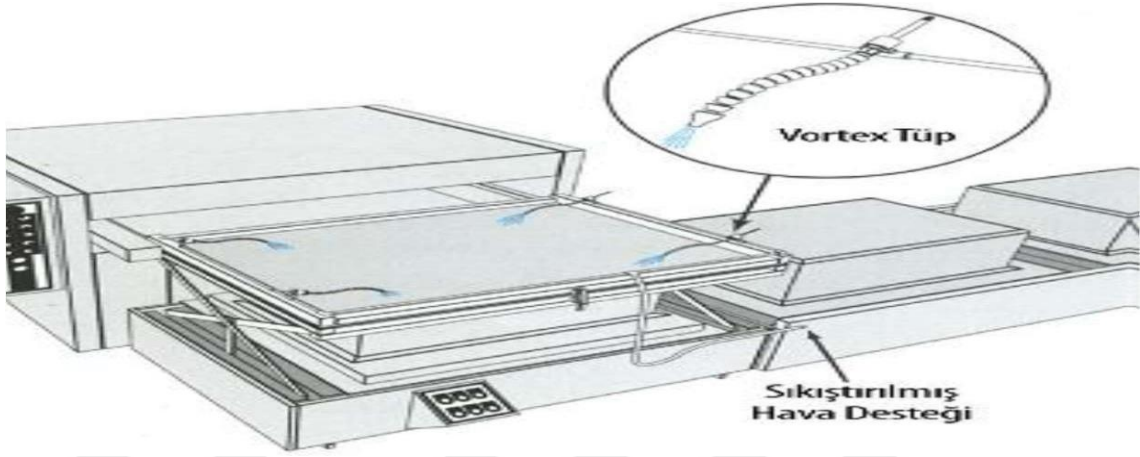
- Gaz karışımlarının ayrıştırılması,
- Gaz kurutma ,
- Kimya sanayii uygulamaları,
- Elektrik enerjisi üretme,
- Kar üretme,
- Tıbbi kullanım alanları,
- Diğer alanlar gibi kullanım alanları mevcuttur (Yılmaz ve ark., 2007c).

1.2.2.1 Isıtma ve Soğutma Kullanım Alanları

RHVT'ler ısıtma ve soğutma sağlayabilen benzersiz yapıları sayesinde çeşitli ısı transferi uygulamalarında kullanılmaktadır. Isıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için ilave soğutucu veya ısıtıcı akışkanlara gerek duymamaları, onları enerji tasarrufu sağlayan ve çevre dostu bir seçenek haline getirmektedir. Basınçlı akışkan kaynağı olan her ortamda, soğutma ve ısıtma sağlama çözümleri bulunmaktadır (Nabhani, 1989 ; Cockerill, 1998; Yılmaz vd., 2007c). Belirli noktada sabit soğutma sağlama yeteneği ile birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Soğutma uygulamalarına ilişkin bazı örnekler şunlardır:

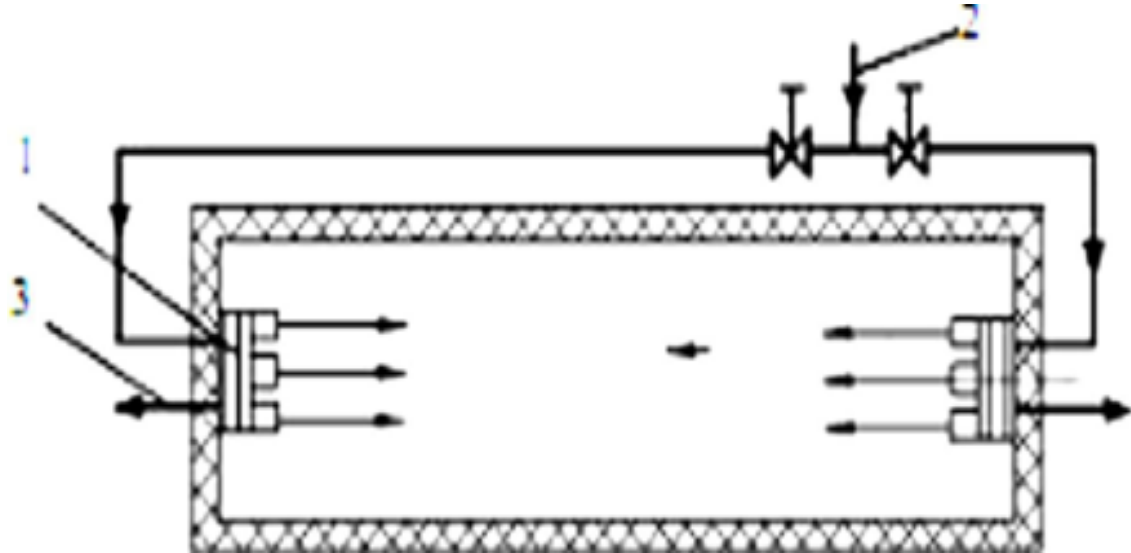
- Kesici ekipmanlar ve taşların ısınmasının önlenmesi,
- Basınçlı hava sistemlerinde havanın nem içeriğinin giderilmesi,
- Kamera lenslerinin soğutması,
- Elektronik devrelerinin soğutulması,
- Üretim makinelerinde meydana gelen sürtünme etkisiyle makinelerin soğutulması,
- Elektronik cihazlar, otomatik üretim hatları ve robot sistemlerindeki ısınan bileşenlerin soğutulması,
- Metal işleme tezgâhlarında üretilen mamul parçalarının köşe bölgelerinin soğutulması,
- İtfaiye ekipmanlarının aşırı ısınmayı engellemek için soğutulması,
- Havacılık, uzay mühendisliği ve madencilikte aşırı ısının kontrol edilmesi,
- Kimyasal testlerde numune sıcaklıklarının sabit tutulmasında,
- Üretim süreçlerinde makinelerin ve ekipmanların soğutulmasında kullanılabilmektedir (Özgür vd., 2001).

RHVT kullanılarak vakum altında şekillendirilen bir parça soğutma uygulaması gösterilmektedir. RHVT'nin sağladığı verimli soğutma, vakumlu ortamda şekillendirme sırasında parçaların aşırı ısınmasını engeller ve kaliteli üretim süreci sağlar (Şekil 1.6).



Şekil 1.6: Vakum soğutma uygulama sistemi

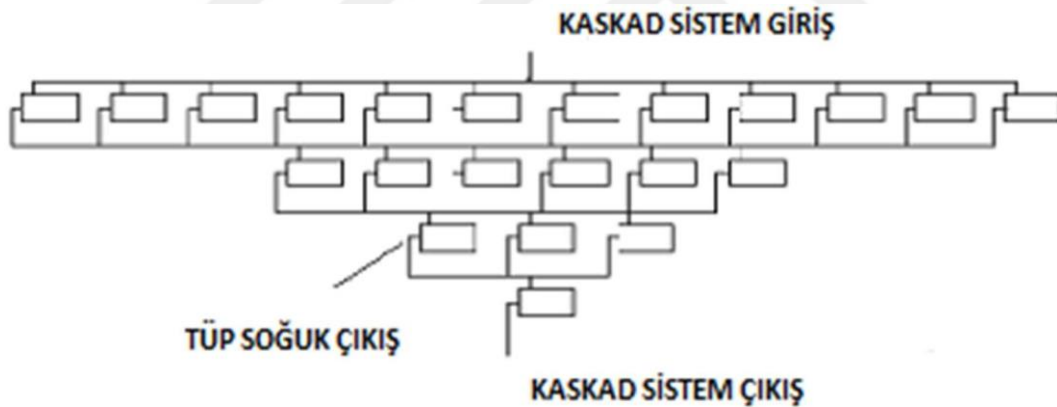
Soğutan cihazlarının olmadığı zamanlarda RHVT kullanılarak gerçekleştirilen soğutma sistemini göstermektedir. Vorteks tüpü, geleneksel soğutma cihazlarına alternatif olarak, düşük maliyetle ve pratik bir çözüm sunar (Şekil 1.7).



Şekil 1.7: Soğutan cihazlar olmadığı zamanda vorteks tüp (Azarov, 2007)

1.2.2.2 Gazların Sıvılaştırılmasında Kullanım Alanları

Gazların sıvılaştırılmasında, RHVT'ler genellikle genleşme etkisi kullanılmaktadır. Sıvılaştırma sistemlerinde düşük performansları nedeniyle tercih edilen bir yöntemdir. Linde prosesine entegre edilen RHVT gaz sıvılaştırma sistemlerinde çok yaygın bir uygulama olup önemli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajların başında, gazların "yapay iyileştirilmiş" izentalpik Joule-Thomson katsayısına sahip olması yer alır. Bu özellik sayesinde, gazın genleşmesi otomatik olarak soğutma etkisi yaratır, bu da ek bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulmadığı anlamına gelir. Kısmi uygulaması tamamen ortadan kaldırılabilir ve yerine RHVT kullanılabilir. Gaz sıvılaştırma verimliliği, basınç oranına bağlı olarak değişir. RHVT'nin ısı ayrışma performansı, basınç oranının logaritmasıyla ilişkilidir. Bu yöntem, gazın çok daha düşük sıcaklıklara ulaşmasını sağlar. Böyle bir kaskat sistemini göstermektedir. Bu tür yapılarda, soğuk akışın bir tüpten çıkıp diğerinin girişine iletilmesiyle çok düşük sıcaklıklar üretilir. Bu yöntem, gaz sıvılaştırma uygulamalarında etkinlik sağlayarak önemli enerji tasarrufları sağlar (Şekil 1.8) (Yılmaz vd., 2007c).



Şekil 1.8: RHVT kaskat sistem (Cockerill, 1998)

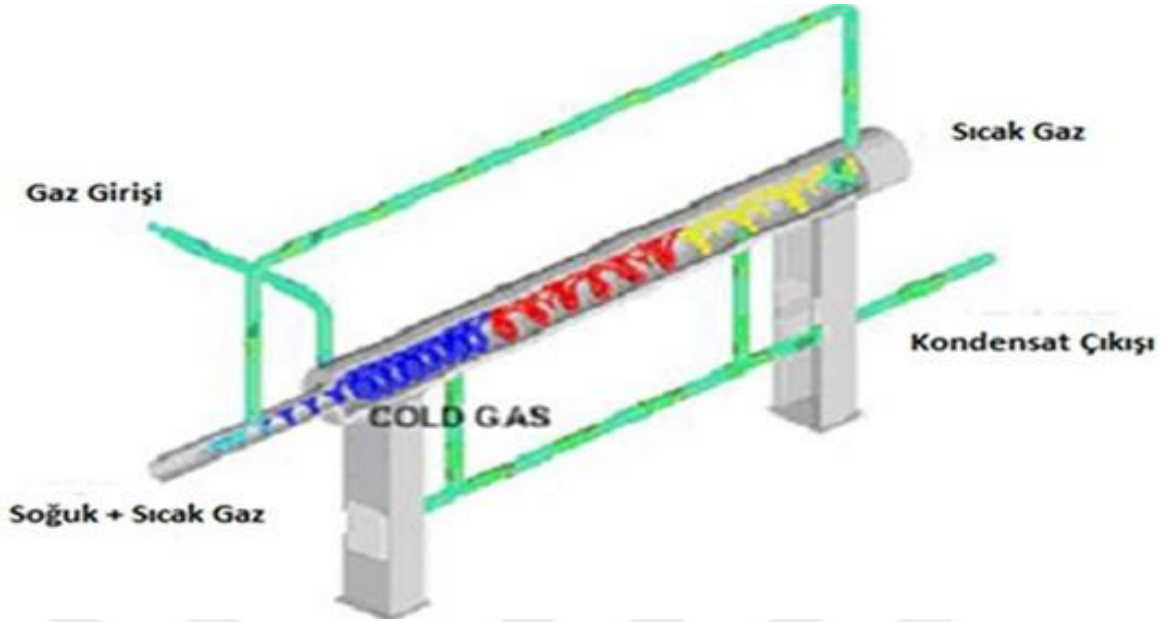
1.2.2.3 Gaz Ayrıştırılmasında Kullanımı

RHVT'ler farklı gazların birbirinden ayrılmasını sağlayan süreçlerde etkili bir araç olarak kullanılır. Bu tüpler özellikle farklı gaz bileşenlerinin farklı sıcaklıklarda ayrılmasına olanak sağlar, çünkü vorteks tüpleri, gazın akışkanın farklı bölümlerinde hız ve sıcaklık farkı oluşturur. Bu özellik sayesinde, gazların bileşenleri birbirinden ayrılabilir. RHVT'nin gaz karışımlarını ayrıştırmadaki kullanımları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Doğal gaz içerisindeki ağır hidrokarbonların seçici olarak ayrılması,
- Ham petrolden propan ve bütan gibi hafif gazların izole edilmesi,
- Havanın ayrıştırılması, Atmosferik havanın temel bileşenlerine (azot, oksijen vb.) ayrıştırılması,
- Karbondioksitin ortamdan uzaklaştırılması veya geri kazanılması,
- İzotopların ayrılarak zenginleştirilmesi,
- Farklı gaz türlerinin bulunduğu karışımların bileşenlerine etkin şekilde ayrılması (Yılmaz vd., 2007c).

1.2.2.4 Gazların Kurutulmasında Kullanımı

Gaz işleme ve imalat tesislerinde, proses akışlarında bulunan hidrokarbonlar ve su buharı bileşenlerinin ortamdan uzaklaştırılması, sistemin verimliliği ve güvenliği açısından kritik bir aşamadır. Bu kapsamda, fiziksel prensiplere dayalı olarak çalışan RHVT temelli Vorteks Tabanlı Separatörler (VTS), gaz kurutma işlemlerinde etkin bir çözüm olarak kullanılmaktadır. Bu teknolojiye temel olarak, gazların sıcaklık ve basınç değişimlerinden yararlanılarak nemin ayrılması hedeflenir. RHVT separatörlerinin çalışma mekanizması, Ranque - Hilsch vorteks etkisi gaz, iç yapıda dönmeye zorlanarak bir vorteks akışı oluşturur. Bu döngüsel hareket sonucunda, akışkan içinde sıcaklık ayrışması meydana gelir. Merkez bölgede yüksek sıcaklık, dış bölgede düşük sıcaklık oluşur. Bu sıcaklık farkı, gaz içindeki su buharının yoğunlaşmasını kolaylaştırır Joule-Thomson Etkisinde gazın genişlemesiyle birlikte ani bir basınç düşüşü yaşanır. Bu düşüşe bağlı olarak sıcaklık azalır ve böylece nemin gaz fazından sıvı faza geçerek ayrılması sağlanır. Bu iki etkinin birleşimiyle çalışan RHVT sistemleri, kimyasal katkı kullanmaksızın, yalnızca fiziksel yollarla nemin uzaklaştırılmasına olanak tanır. Bu iki etkiyi birleştiren RHVT separatörleri, gazların kurutulması ve çığ noktasına getirilmesi için kullanılır. Özellikle gazların nem içeriğini azaltarak, su buharı ve ağır hidrokarbonları ayrıştırarak, gazın daha verimli ve saf hale gelmesine yardımcı olur. Gaz kurutma işlemi için kullanılan RHVT separatörlerinin sistemi belirtilmiştir (Şekil 1.9) (Yılmaz vd., 2007c).



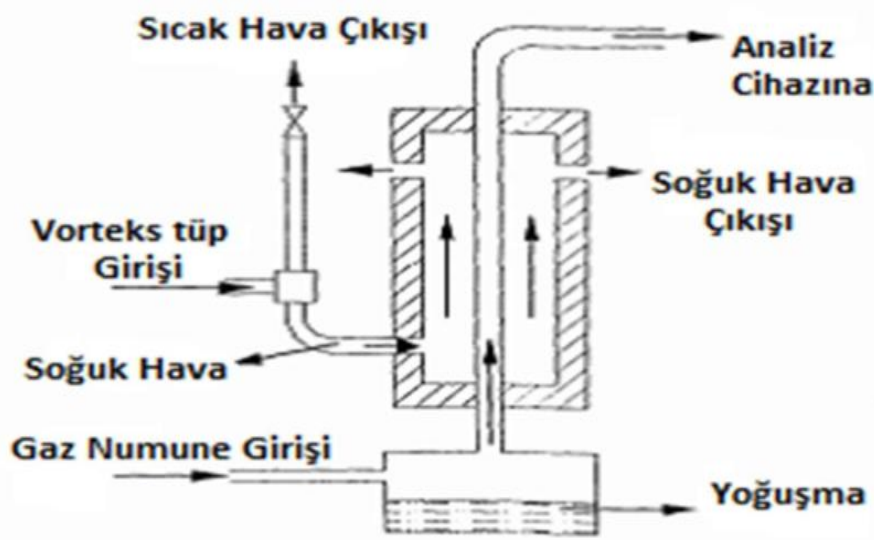
Şekil 1.9: RHVT tüp separatörü (URL-2)

1.2.2.5 Kimyasal Alanda Kullanımı

RHVT 'ler kimyasal alanda tercih edilmesinin temel nedeni, kompakt yapıları ve düşük sıcaklıkta soğutma sağlama kapasitesine sahip olmalarıdır. Bu özellikleri sayesinde, kimyasal analizlerde ve uygulamalarda oldukça faydalıdır. Kimyasal endüstride kullanıldığı bazı alanlar aşağıda belirtilmiştir.

- Gaz kromatografisi gibi orta sıcaklık aralığında çalışan analizlerde sıcaklık stabilizasyonu sağlamak amacıyla kullanılır.
- Kromatografik enjeksiyon şırıngalarının soğutulmasında kullanılarak enjeksiyon doğruluğu ve tekrarlanabilirlik artırılır.
- Farklı kimyasal çözeltilerin hızlı ve enerji verimli şekilde soğutulmasını sağlar.
- Analiz numunelerinin nemden arındırılması için kullanılarak analiz doğruluğu korunur.
- Kızılötesi (IR) spektroskopi uygulamalarında sıcaklık kontrolü sağlayarak spektral veri kalitesini artırır.

RHVT soğutma kullanılarak bir gaz numunesinden nem alma sistemi gösterilmiştir. Bu sistem, gazın nem içeriğini etkili bir şekilde azaltmak amacıyla kullanılır. RHVT, gazın sıcaklık farkını kullanarak nemi ayırma işlemi gerçekleştirir ve bu sayede numune daha doğru analizler için hazırlanır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10: Vorteks tüp soğutmalı gazdan nem alma sistemi (Özgür,2001)

1.2.2.6 RHVT Tabanlı Enerji Üretimi

RHVT, termoelektrik soğutucuların performansını iyileştirmek amacıyla kullanılmıştır. Landecker (1977), termoelektrik jeneratörler aracılığıyla basınçlı doğalgaz enerjisinin, RHVT kullanılarak ısı enerjisiye dönüştürülmesini sağlamıştır. Bu çalışmada, RHVT'ye ait çalışma parametreleri temel alınarak bir hesaplama yöntemi geliştirilmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda hedeflenen elektriksel çıktıyı sağlayabilecek bir termoelektrik sistemin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu sistemde, termoelektrik modüllerin optimum verimlilikle çalışabilmesi için RHVT çıkışındaki sıcak ve soğuk hava akımlarından yararlanılmıştır. Boucher ve Tippetts (2000) tarafından önerilen çalışmada, herhangi bir hareketli mekanik parça içermeyen bir termoelektrik jeneratör sistemi tanımlanmıştır. Bu sistemde, RHVT'den elde edilen sıcak ve soğuk hava akımları doğrudan termoelektrik modüllerin yüzeylerine yönlendirilmiş ve sıcaklık farkı oluşturularak düşük gerilimli doğru akım (DC) üretimi sağlanmıştır. Bu prensibe dayalı olarak tasarlanan sistemlerin düşük güçlü enerji ihtiyacını karşılayabilecek düzeyde elektrik üretimi gerçekleştirdiğini belirtmiştir (Yılmaz vd., 2007c).

1.2.2.7 RHVT Destekli Yapay Kar Üretimi

Yapay kar üretim sistemlerinde, ince bir su jetinin püskürtülerek mikron boyutlarında damlacıklara ayrılması ve bu damlacıkların soğuk hava akımıyla temas ettirilmesi sonucu

kar kristalleri oluşturulmaktadır. Bu işlemde, suyun donma noktasının çok daha altına inmesine gerek kalmaksızın kar oluşumu sağlanabilmektedir. Oluşan kar biriktirme tanklarında depolanırken, donma gerçekleşmeyen sistemden su tahliye edilmektedir. Su ve soğuk hava temas ettirilerek kar elde etmeye yönelik çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerden biri sunulmaktadır (şekil 1.11).

Şekil 1.11: Kar üretim sistemi (Nabhani, 1989)

1.2.2.8 RHVT Teknolojisinin Medikal Uygulamalar

- Beyin sıcaklığının düşürülmesi (terapötik hipotermi),
- Vücuttaki belirli bir bölgenin lokal ısı kontrolü,
- Vücuttaki tümör dokularının imha edilmesi,
- Haşere ve parazitlerin imhası,
- Solunum cihazlarıyla entegrasyon yapılarak solunum havasının sıcaklığını kontrol altında tutulmasıdır (Yılmaz vd., 2007c).

1.2.2.9 Diğer Uygulama Alanları

Çeşitli endüstriyel uygulama alanları mevcuttur. Bu uygulamalar, teknik ve pratik avantajları sayesinde geniş bir yelpazeye sahiptir. Aşağıda bu tür bazı uygulama alanları sıralanmıştır.

Vorteks Temizleyiciler (Hidrosiklonlar)

Hidrosiklonlar, süspansiyonların yüksek hızda, teğetsel bir şekilde vorteks odasına girmesiyle çalışır. Akış, vorteks odasında helisel bir hareket kazanır ve konik uca doğru yönelir. Bu sırada, santrifüj kuvvetleri nedeniyle, daha ağır partiküller (kıymık, kum zerreleri, metal partikülleri, talaş gibi) cidara doğru hareket ederken, daha hafif partiküller (örneğin, fiberler) vorteks odasının eksenine yakın bölgelerde kalır. Cidara yakın olan ağır partiküller, vorteks odasından dışarıya doğru çıkarken, eksene yakın bölgede bulunan hafif partiküller ters bir akışla çıkıştan temizleyiciyi terk eder. Bu ayrıştırma süreci, partiküllerin yoğunluk farkları ve santrifüj kuvvetlerinin etkisiyle oldukça verimli bir şekilde gerçekleşir (Skardal, 1980; Cebeci, 2013).

Toz Ayrıştırıcısı Olarak Kullanımı

Endüstriyel tesislerde üretim sırasında ortaya çıkan kirli gazlar, havaya karışmadan önce içerdikleri toz ve zararlı parçacıklardan arındırılmalıdır. Bu amaçla kullanılan cihazlara toz ayırıcılar denir. Bu sistemler, çevreyi korumak, insan sağlığını güvence altına almak ve yasal sınırları karşılamak için uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bu cihazlar, hava kirliliğini önlemek amacıyla çevreye salınan gazlarda bulunan katı partikülleri etkili bir şekilde ayrıştırma işlevi görür. Gaz atıklarının katı partiküllerini ayırmak için siklonlar kullanılmaktadır. Gaz işlem kapasitesi, gaz ayrıştırma yeteneği sıcaklıktan etkilenmemesi olarak çalışabilme özellikleri sayesinde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, siklonlar, 10 µm'den daha küçük partikülleri

içeren tozları ayrıştırmada verimli olamamaktadır. Bu nedenle, bu tip tozları etkili bir şekilde ayırabilmek için daha uygun alternatif cihazlar, örneğin vorteks tüpleri, kullanılabilir (Yılmaz vd., 2007c).

Isı Kontrollü Koltuk sistemlerinde Kullanımı

RHVT sıcak ve soğuk hava akımlarını eşzamanlı olarak üretebilme yeteneğinden yararlanılarak, kullanıcı konforunu artırmaya yönelik klimalı koltuk sistemleri geliştirilmiştir. Bu koltuklar, kullanıcı konforunu artırmak amacıyla tasarlanmış ve çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Tüpün çıkış noktaları ile koltuk modülüne uzanan hava iletim kanalları valfler ile donatılmıştır. Bu tür sistemler, genellikle araç içi konforu artırma amacıyla otomobiller, otobüsler ve uçaklarda kullanılmaktadır (Yılmaz vd., 2007c; Cebeci, 2013).

1.2.3 Vorteks Tüpün Avantaj ve Dezavantajı

RHVT 'ler, soğutma ekipmanlarına kıyasla çeşitli avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Bu avantaj ve dezavantajlar aşağıda belirtilmiştir.

1.2.3.1 Avantajı

RHVT'lerin geleneksel soğutma yöntemlerine kıyasla öne çıkan avantajları;

- RHVT'ler basit bir yapıya sahip olup, imalatları kolaydır,
- Ebatları küçük ve hafif olduğundan taşınabilirlik açısından avantaj sağlar,
- Hareketli parça içermediği için sızdırmazlık elemanına gerek duymaz, bu da bakım ihtiyaçlarını azaltır,
- Hareketli parçaların olmaması nedeniyle minimum aşınma ve uzun ömür sunar,
- Kullanımı emniyetli olup, taşınabilir ve pratik özellikler gösterir,
- Başlangıç yatırımı ve bakım maliyetleri, diğer soğutma sistemlerine göre düşüktür.
- Sistemin çalışmaya başlamasıyla hemen istediğiniz çalışma koşuluna gelir,
- Çevreye zarar vermez,
- Elektrik veya kimyasal enerjiye ihtiyaç duymaz, sadece hava ile çalışır,
- Bu sistemler, düşük bakım gereksinimi ile uzun süre kullanılabilir,

- Sıcaklık ayarı çok kolay yapılabilir, hassas kontrol mümkündür,
- Metal ve paslanmaz malzemeden imal edilerek, plastik içermez, dayanıklıdır olduğu belirtilmiştir. (Nabhani, 1989; Cockerill, 1998; Özgür, 2001; Yılmaz vd., 2006a; Cebeci 2013).

1.2.3.2 Dezavantajı

Rangue-Hilsch vorteks tüplerinin bazı dezavantajları şunlardır;

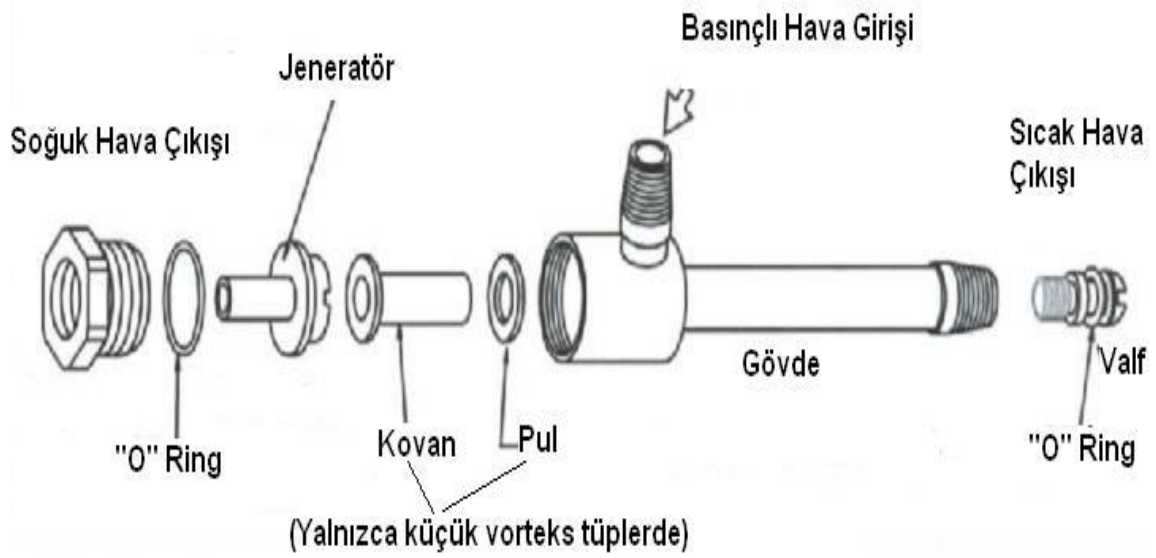
- Vorteks tüpleri, diğer soğutma ekipmanlarına göre daha düşük ısı verimlilik sunar, bu da enerji verimliliği açısından sınırlamalar oluşturur.
- Çalışma sırasında, vorteks tüpleri yüksek ses seviyeleri üretebilir, bu da kullanıcılar ve çevre için rahatsızlık verebilir.
- Vorteks tüplerinin etkin çalışabilmesi için sürekli olarak bir basınçlı gaz kaynağı gereklidir. Bu, özellikle taşınabilirlik veya maliyet açısından bir dezavantaj olabilir.
- RHVT'ler, büyük ölçekli soğutma gereksinimleri için yetersiz olabilir. Bu nedenle, büyük soğutma sistemlerinde verimli bir çözüm sağlamayabilir.
- Bazı uygulamalarda, sıcaklık ayarlarını hassas bir şekilde yapmak zor olabilir, çünkü tüplerin soğutma kapasitesi çevresel koşullara ve sistem parametrelerine duyarlı olarak verilmiştir (Nabhani, 1989; Cockerill, 1998; Yılmaz vd., 2006b).

1.3 Vorteks Tüp Yapısı ve Çalışma Sistemi

RVHT'ler herhangi bir hareketli mekanik parçaya ihtiyaç duymaksızın yalnızca basınçlı gazın kinetik enerjisinden yararlanarak sıcaklık ayrışması gerçekleştiren bir cihazdır.

1.3.1 Vorteks Tüp Yapısı

Vorteks tüpler verimli bir şekilde çalışması için ana bileşenler gereklidir. Bu bileşenler, tüpün işlevselliğini ve verimliliğini doğrudan etkiler. Vorteks tüplerinin ana bileşenleri giriş lüleleri, gövde, sıcak uç kontrol vanası ve soğuk uç orfisidir. Bu elemanların bir arada nasıl işlediğini ve nasıl etkileştiğini gösterilmiştir (Yılmaz vd., 2006b; Cebeci, 2013). Bu elemanlar, vorteks tüplerinin etkin çalışabilmesi için kritik öneme sahiptir ve her biri tüpün performansını iyileştirmeye yönelik olarak tasarlanmıştır (Şekil 1.12).



Şekil 1.12: Rauge-Hilsch karşıt akışlı vorteks tüp (Cebeci, 2013)

1.3.1.1 Gövde

Gövde, farklı malzemeler kullanılarak üretilmekte olup genellikle dairesel yapıda olan cihazlardır. Bu tüplerin gövdesi, kullanım amacına ve çalışma koşullarına bağlı olarak çeşitli malzemelerden imal edilebilir. Malzeme seçimi, tüpün performansını ve dayanıklılığını doğrudan etkiler. Kullanılan malzemelerin yapısı plastikler ve metaller olarak gruplandırılabilir. Perspeks, polistiren ve kaprolan plastik malzemelerde ağırlıklı kullanılırken metal malzemelerde ise alüminyum, çelik, pirinç ve farklı metal alaşımları bulunmaktadır. Malzemelerin düzgün yüzeye sahip olması, ısıyı az iletmesi ve basınca karşı dayanıklı olması önemli özelliklerdendir (Singh, 2005; Azarov, 2004-2007; Yılmaz ve ark., 2006a; Cebeci, 2013).

Çelik Gövde

Yüksek mukavemet ve basınç direnci gerektiren durumlarda kullanılır. Dayanıklı yapıları nedeniyle çelik yapıli vorteksler ticari alanlarda tercih edilmektedir. Ancak, metal malzemelerin yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması sebebiyle, soğuk uçta çevreden ısı alımı, sıcak uçta ise çevreye ısı kaybı nedeniyle tüpün veriminde düşüş gözlemlenebilir. Bu tür ısı kayıplarını önlemek için vorteks tüpü yalıtılarak ,su ceketı ile çevrelenerek sistemin verimi artırılabilir (Cebeci, 2013).

Pirinç Gövde

Pirinç malzeme, genellikle deney çalışmalarında kullanılsa da ticaret alanında tercih edilmez. Bu durumun temel sebebi, yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması nedeniyle çevreye fazla ısı kaybına yol açarak tp verimini düşürmesidir (Cebeci, 2013).

Perspeks Gövde

Perspeks, bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıca sebepleri arasında şeffaf yapısıyla i akışın gözlemlenmesine olanak tanınması, tp içerisindeki akış dinamiklerinin anlaşılmasını sağlaması, yüksek basına dayanıklı olması ve düşük ısı iletim katsayısına sahip olması yer almaktadır (Cebeci, 2013).

Gövde Malzemesinin Vorteks Tüp Performansına Etkisi

Vorteks tüplerin enerji ayırma kapasitesi yalnızca geometrik tasarıma değil, kullanılan gövde malzemesinin fiziksel ve termal karakteristiklerine de önemli ölçüde bağlıdır. Malzeme seçiminde göz önünde bulundurulması gereken temel parametreler aşağıda sıralanmıştır;

- Tp i yüzeyinde bulunan mikroskobik pürüzler, akış hattında türbülans oluşturarak sistemin genel verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Yapılan alışmalar, bu tür pürüzlülüklerin verimde %20'ye kadar azalmaya yol açabildiğini ortaya koymuştur (Parulekar, 1961).
- Enerji verimliliğini artırmak amacıyla, i yüzeyi düzgün ve düşük ısı iletkenliğine sahip malzemelerin kullanımı tavsiye edilmektedir. Bu tür malzemelerle üretilen tüpler, enerji dönüşümünde daha az kayıp yaşanmasını sağlar (Saidi ve Yazdi, 1999).
- PVC gibi düşük iletkenliğe ve daha düzgün i yüzeye sahip polimer esaslı tüplerin, aynı koşullarda elik tüplerden daha verimli çalıştığı belirlenmiştir. Bu durum, akış direncinin azalması ve ısı kayıplarının sınırlandırılmasıyla ilişkilidir (Singh vd., 2004).
- Isıl iletkenliği yüksek olan bakır tüpler, enerji transferini hızlandırmakla birlikte, buharlaşma sürecindeki enerji ayırımını azaltarak toplam verimi düşürebilir. Buna karşılık, perspeks gibi iletkenliği düşük malzemeler daha etkili bir soğuk/sıcak hava ayırımı sağlayabilmektedir (Singh vd., 2004).

- Perspeks malzeme, düşük ısı iletim katsayısıyla avantaj sağlasa da, mekanik mukavemeti düşüktür ve yüksek basınç altında kırılabilir. Pirinç ise bu tür zorlu çalışma koşullarına karşı daha dirençlidir ve iç yüzey pürüzsüzlüğü sayesinde sürtünme kaynaklı kayıpları azaltır. Uzun ömürlü uygulamalar için pirinç, daha uygun bir seçim olarak öne çıkmaktadır (Singh, 2005).
- Gövdenin dış ortamla ısı alışverişini engellemek amacıyla yalıtılması, sistemin genel verimliliğini olumlu etkiler. Deneysel gözlemler, yalıtılmış tüplerde sıcak uçta 2–5 °C, soğuk uçta ise 2–3 °C daha yüksek sıcaklık farklarının elde edilebildiğini göstermiştir (Promvong ve Eiamsa-ard, 2005).
- Tüp gövdesinde tercih edilen malzemenin sadece ısı iletim özellikleri değil, aynı zamanda yüzey kalitesi, mekanik dayanıklılığı ve basınca karşı direnci de göz önünde bulundurulmalıdır. Literatürdeki bulgular, pürüzsüz iç yapıya ve düşük iletkenliğe sahip malzemelerin, yalıtımla desteklendiğinde vorteks tüplerin performansını anlamlı şekilde artırdığını ortaya koymaktadır (Yılmaz vd., 2007c; Cebeci, 2013).

1.3.1.2 Giriş Lüleleri

Vorteks tüplerde yer alan giriş lüleleri, sadece basınçlı gazın içeri aktarılmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda akışkanın hızını artırarak tüp içindeki döngüsel hareketin başlamasında kritik bir rol üstlenir. Lüle çıkışında akış, genellikle ses hızına ulaşmakta ve tüpün silindirik geometrisi ile birleşerek güçlü bir dönme hareketi meydana getirmektedir. Bu yapının performansı, büyük ölçüde lülelerin tasarımına bağlıdır. Sayısı, şekli ve çapı gibi faktörler, sistemin ısıl ayrıştırma kapasitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Konuya ilişkin yapılan çeşitli akademik çalışmalarda şu temel bulgulara ulaşılmıştır (Yılmaz vd., 2006a; 2006b; 2007c):

- Soğuk uçtan elde edilecek en düşük sıcaklığa ulaşılabilmesi için, akışkanın tüpe tamamen teğetsel yönde giriş yapması gerekmektedir. Bu tür bir giriş düzeni, dönme hareketinin daha stabil ve etkili oluşmasını sağlar (Martynovskii ve Alekseev, 1957).
- Gerek vorteks odasının yapısı gerekse lüle geometrisi, sistem verimini belirleyen önemli değişkenlerdendir. Bu doğrultuda; Arşimet spirali biçiminde tasarımlar,

yarıklı geçişler, silindirik yapılar ve dikdörtgen kesitli lüleler üzerinde çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir (Cebeci, 2013).

- Lüle çapı ile tüp çapı arasında doğru bir orantı kurulmalıdır. Tüp çapı büyüdükçe, optimal akış sağlanabilmesi adına lüle çapının da artırılması gerekmektedir (Martynovskii ve Alekseev, 1957).
- Giriş lülesinin etkili yüksekliğinin artması hem sıcak hem de soğuk çıkış akışkanlarının sıcaklıklarında yükselmelere sebep olabilmektedir. Bu durum, sistemin genel ısı ayrımı kapasitesini sınırlandırabilir (Cebeci, 2013).
- Çok sayıda giriş lülesi kullanılması, belirli bir eşiğin üzerinde sistem veriminde düşüşe neden olabilir. Bu nedenle, verimli bir çalışma için uygun lüle sayısının belirlenmesi büyük önem taşır (Saidi ve Valipour, 2003).

Tüm bu değerlendirmeler göstermektedir ki, vorteks tüplerin performansını artırmak amacıyla giriş lülelerinin konumlandırılması, geometrik özellikleri ve sayıları dikkatle tasarlanmalıdır. Akışın yönlendirilme biçimi, ısı ayrım verimi üzerinde doğrudan belirleyici bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

1.3.1.3 Soğuk Uç Orifisi

Düzenekte, gazın giriş yaptığı yerlerde dairesel kesitli orifis bulunmaktadır. Buna karşılık, paralel akışlı düzeneklerde ise, lülelerin yer aldığı uç tamamen kapalıdır ve akışkan, lülelerden uzak olan diğer uçtan çıkış yapar. Soğuk akışkan, tüpün merkezinde konumlanan bu orifisten dışarı atılırken, sıcak akışkan ise çevresel yolları izleyerek tüpü terk eder. Bu orifis, tüp çapına göre daha küçük bir çap değerine sahiptir ve literatürde “soğuk uç orifisi” veya “diyafram” olarak adlandırılır. Genellikle dairesel biçimde tasarlanan bu diyafram, farklı geometrilere sahip eş eksenli veya eksantrik delikli diyaframlar, lüleli diyaframlar ve dairesel olmayan şekillerle kıyaslandığında, daha yüksek sıcaklık farkları yaratmaktadır. Optimum orifis çapının tüp çapına oranı çoğunlukla 0.4 ile 0.6 arasında değişmekte olup, bu aralık sistem performansının artırılmasında kritik bir rol oynar (Yılmaz vd., 2007; Cebeci, 2013).

1.3.1.4 Sıcak Çıkış Valfi

Vorteks tüpünde yer alan sıcak çıkış vanası, sistemin ısıtma ve soğutma performansının düzenlenmesine sağlar. Tüp içerisine giren akışkanın belirli bir bölümü, sıcak çıkış ucunda bulunan ayarlanabilir vana aracılığıyla dış ortama yönlendirilir. Bu vananın konumu değiştirilerek sıcak taraftaki debi kontrol edilebilir; böylece soğuk çıkıştan elde edilen akışkanın hızı ve sıcaklığı istenilen düzeye ayarlanabilir (Cebeci, 2013).

1.3.1.5 Filtreler

Vorteks tüplerine giren basınçlı akışkanda bulunan nem, toz ve yağ partiküllerinin temizlenmesi amacıyla filtre-ayırıcılar ve yağ ayırma elemanları kullanılır. Bu temizleme işlemi, ekipmanın bakım gereksinimini azaltarak, uzun süre boyunca etkili ve kesintisiz çalışmasını sağlar (Yılmaz vd., 2006a; Cebeci, 2013).

1.3.1.6 Nozullar

Vorteks nozuları, sıkıştırılmış gazın tüp içerisine yüksek hızda ve teğetsel olarak girişini sağlayan özel geometrik yapıya sahip bileşendir. İçlerinde bulunan çeşitli kanallar, basınçlı akışkanın yönlendirilmesini sağlayarak tüp içerisindeki dönme hareketinin meydana gelmesine yardımcı olur. Soğuk hava, nozulun merkezindeki delikten geçerek soğuk hava çıkış noktasından dışarı atılır. Basınçlı akışkanın debisini düzenleyen ve değiştirilebilir bir bileşen olan nozüller, tüp içindeki sıcaklık dağılımını da etkiler. Böylece, nozüllerin değiştirilmesiyle RHVT'nin soğutma performansı kolayca kontrol edilebilir (Cebeci, 2013).

1.3.1.7 Kurutucu

Kurutucusuz sistemlerde yoğunlaşmış su bulunma olasılığı yüksektir. Genel olarak, vorteks tüp uygulamalarında kurutucu kullanımı gerekli değildir; ancak, düşük çıkış sıcaklıklarında zaman zaman buzlanma sorunları görülebilir. Bazı durumlarda ise, yoğunlaşmış su ya da buz içermeyen tamamen kuru soğuk hava talebi olabilir. Bu tür durumlarda, soğuk hava akışındaki nem ve buz oluşumunu önlemek amacıyla, sistemin giriş hattına kimyasal kurutucu yerleştirilebilir (Cebeci, 2013). Basınçlı hava hatlarında oluşan pas ve kirler, genellikle hat içerisindeki sudan kaynaklanmaktadır. Bu kirleticiler, 5 mikronluk filtreler aracılığıyla etkili bir biçimde temizlenebilir. Filtrelerin değiştirilme aralıkları ise kullanım

şartlarına bağlı olarak değişmektedir (Cebeci, 2013).

1.3.1.8 Regülatörler

Regülatörler, basınçlı akışkanın ayarlanmasında kullanılır. Sıcaklık kontrolü için bir diğer yöntem ise, RHVT'ye tam basınçla akışkan gönderip ardından termostatik valf aracılığıyla akışını dengelemektedir (Yılmaz vd., 2006a).

1.3.1.9 Susturucular

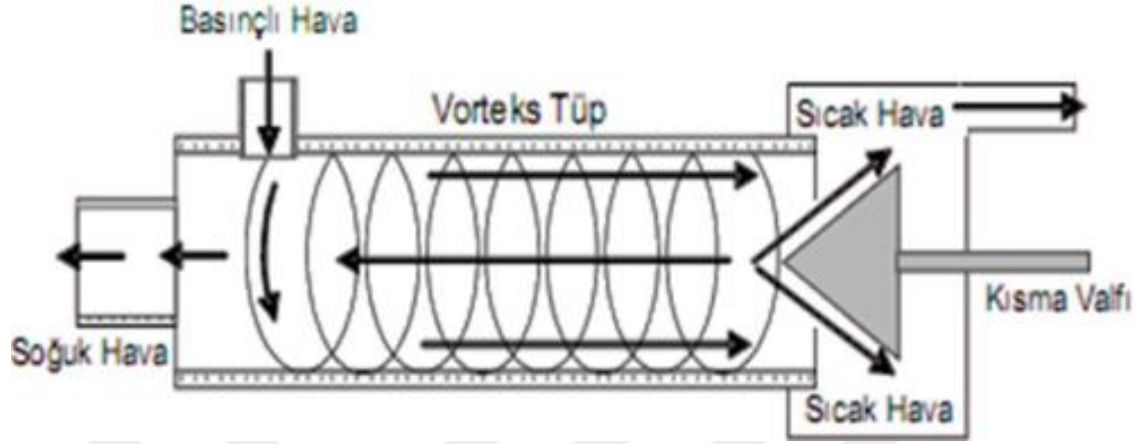
Tüplerden çıkan gaz, her zaman belirgin bir ses dalgası oluşturur. Tüp çalışıkça ortaya çıkan bu gürültü, insan sağlığını olumsuz etkileyebilecek düzeylere ulaşabilir. Akış hızındaki artış, ses seviyesinin yükselmesine sebep olur. Genellikle soğuk olan hava boru ve tüpler aracılığıyla yönlendirilerek gürültü kabul edilebilir seviyelere indirgenir. Sıcak hava ise çoğunlukla düşük miktarlarda dışarı çıkar ve genellikle problem yaratmaz. Sürekli olarak çıkan hava jetleri uzun süreli rahatsızlıklara yol açabilir. Bu rahatsızlıkların azaltılması amacıyla susturucular tercih edilmektedir (Yılmaz vd., 2006a; Cebeci, 2013).

Susturucuların işlevselliğini koruyabilmesi için ne tamamen kapalı ne de aşırı gözenekli bir yapıya sahip olması gerekir. Bu tür susturucuların dar açıklıkları, soğuk hava içinde biriken buz nedeniyle kolayca tıkanabilir. Soğuk hava uygulamalarında, bölmeli susturucular ve ses emici elemanlar daha uygun bir tercih olur. Ayrıca, vorteks tüplerinde yüksek geri basınç yaratabilecek susturucular kullanılmamalıdır. Sıcak hava çıkışında ise plastik veya ısıya dayanıksız malzemelerden yapılan susturucular tercih edilmemelidir; çünkü çıkış sıcaklıkları kolaylıkla 100-150 °C arasında olabilir (Cebeci, 2013).

1.3.2 RHVT'lerin İşleyiş Mekanizması

Vorteks tüpü ilk kez 1931 yılında George Joseph Ranque tarafından keşfedilmiş, 1947'de ise Rudolf Hilsch tarafından geliştirilmiştir. RHVT olarak bilinen bu cihazlar, içinde hareketli parça bulunmayan basit boru şeklindeki yapılardır. Basınçlı akışkan, nozüller yardımıyla tüpe teğetsel giriş yapar ve tüpün silindirik yapısı nedeniyle, girişteki hız ve basınç etkisiyle yüksek hızda dönme hareketi kazanır. Görülebileceği gibi, tüpün iç cidarına yakın olan akışkan, sürtünmeden dolayı merkezdeki akışkana kıyasla daha düşük hızda

hareket eder. Bunun sonucunda, merkezdeki akışkan cidara doğru enerji aktararak zıt yöne hareket ederek akışkanın soğuk çıkıştan çıkması sağlanır. Enerji transferi yapan akışkan soğuk, enerji alan ise sıcak akışkandır (Şekil 1.13) (Dinçer ve Başkaya, 2009).



Şekil 1.13: Karşıt akışlı bir vorteks tüpteki akış (Yılmaz vd., 2006)

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, araştırmanın yürütülmesi sırasında kullanılan materyaller ile deneysel yöntemler kapsamlı olarak tanıtılmaktadır.

2.1 Materyal

Bu çalışmada, zıt akışlı vorteks tüpü'nde Kaskad Rejeneratif Hava Vorteks Tüpü (KRHVT), farklı nozul sayılarına göre değişen giriş basıncında elde edilen soğuk çıkış sıcaklıklarının karşılaştırılması yapılan bu grafikte, farklı nozul sayılarında (2, 3, 4, 5 ve 6 nozul) kullanılan poliamid, alüminyum ve pirinç malzemelerde KRHVT için farklı sıcaklıkların, hava basıncındaki 150–650 kPa aralığında her 50 kPa'da nasıl değiştiği gösterilmiştir.

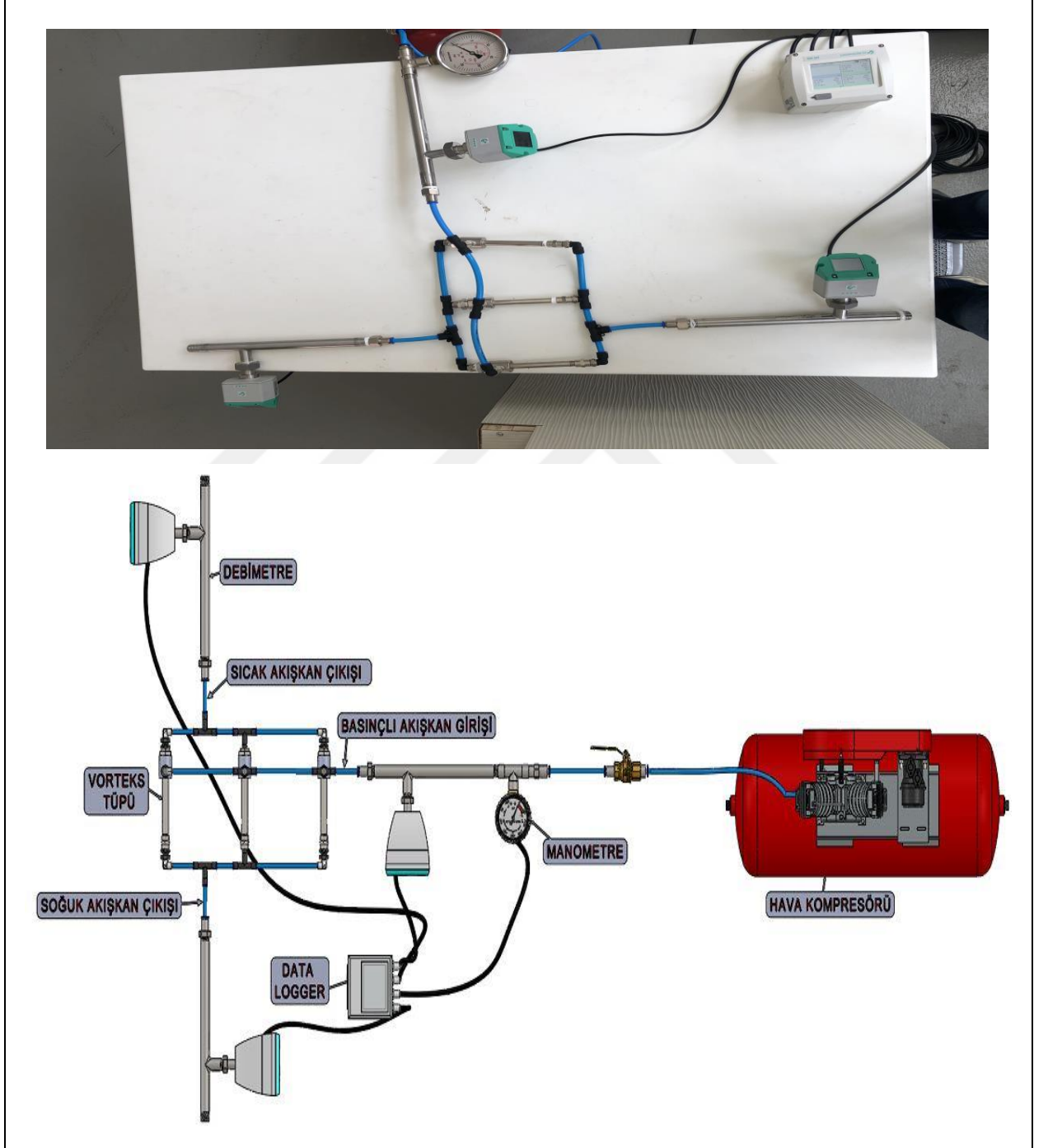
2.1.1. Deneysel Sistem

Sistem, hava kompresörü tarafından sağlanan basınçlı havanın, üç adet paralel zıt akışlı Ranque–Hilsch vorteks tüpüne yönlendirilmesi ile çalışmaktadır. Verilen sistem şeması aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

- Hava Kompresörü: Sisteme gerekli basınçlı havayı sağlar.
- Manometre: Giriş basıncını ölçer.
- Debimetre: Giriş ve çıkış debilerini belirler.
- Vorteks Tüpleri: Termal ayrıştırmayı gerçekleştirir.
- Sıcaklık Sensörleri: Sıcak ve soğuk akışkan çıkış sıcaklıklarını ölçer.
- Data Logger: Tüm verileri gerçek zamanlı olarak toplar ve kaydeder.

Bu kurulum sayesinde, farklı basınç ve debi değerlerinde sistemin soğutma performansı test edilmiş ve bu veriler, modelleme sürecinde kullanılmıştır. RHVT'ler paralel bağlantı yöntemiyle, bir masanın üzerine sabitlenerek yatay pozisyonda bağlanmıştır. Tüplere giriş yapan havanın basıncı, %5 doğrulukta ölçüm yapabilen PAKKENS marka gliserinli manometre ile tespit edilmiştir. Hacimsel debi ölçümleri ise %3 hassasiyetle çalışan markası TSI olan debimetrelerle, vorteks tüplerinin birleşim noktalarına entegre edilerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ilgili debimetrelerin bağlı olduğu noktalardan debi ölçümü yapılabilmektedir. Akışkan çıkışlarının sıcaklıkları ölçüm hassasiyeti ± 1 °C ve dijital olan

termometre ile ölçüm yapılmıştır. Termometre ucuna, vorteks tüplerin çıkışlarından 1 cm uzaklıkta, 1 mm çapta açılmış delikler aracılığıyla tüp merkezine yerleştirilmiş ve uçların çevresi silikonla kaplanarak hava sızıntıları önlenmiştir. Basınçlı hava kompresör aracılığıyla sağlanmış, tüm sistem bileşenleri arasındaki bağlantılar ise yüksek basınca dayanıklı pinomatik boru sistemleri ile kurulmuştur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Deney Sistemi Tasarımı ve Resmi

2.1.2 Deneyisel Süreçte Yararlanılan Ölçüm Ekipmanları

Deneyisel araştırmalarda elde edilen verilerin güvenilirliği, kullanılan ölçüm cihazlarının hassasiyetine ve doğru bir şekilde kalibre edilmiş olmalarına bağlıdır. Bu kapsamda RHVT deney düzeneklerinde, akışkanın debi, basınç ve sıcaklık gibi temel parametrelerinin yüksek doğrulukla belirlenebilmesi için farklı ölçüm ekipmanlarından faydalanılmıştır.

2.1.2.1 Debimetre

RVHT'lerden çıkan akışkanın debi, basınç ve sıcaklık parametrelerinin ölçümünde TSI marka debimetreler kullanılmıştır. Söz konusu ölçüm cihazlarının teknik özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Debi ölçümünde %1 doğruluk oranı (litre/dakika),
- Sıcaklık ölçümünde %1 hassasiyet (°C),
- Basınç ölçümünde %10 tolerans (kPa),
- Debi, sıcaklık ve basınç verilerinin eş zamanlı olarak takip edilmesine olanak tanıyan geniş dijital ekran,
- NIST sertifikalı kalibrasyonla garanti edilen uzun ömürlü ve çevresel faktörlerden etkilenmeyen performans,
- Hava, oksijen ve azot gibi gazlarla uyumlu çalışma yeteneği,
- Analog çıkış opsiyonu ve konfigüre edilebilen RS232 dijital ara yüzü.

Bu özellikler, deneyisel süreçte elde edilen ölçümlerin doğruluğunu artırmakta ve veri güvenilirliğine önemli katkılar sağlamaktadır.

2.1.2.2 Manometre

Deney sistemine giriş yapan akışkanın basınç değerlerinin ölçülmesi amacıyla PAKKENS markalı gliserin dolu manometre kullanılmıştır. Cihazın teknik özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Ölçüm doğruluk oranı %5 olarak belirlenmiştir,
- Kalibrasyonu, uzun süreli kullanımda ve dış etkenlere karşı dayanıklı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir,

- Ölçüm sonuçlarının net şekilde okunabilmesi için 100 mm çapında geniş bir kadrana sahiptir,
- KL 2,5 kalite sınıfında üretilmiştir,
- Bağlantı tipi G 1/2" erkek dişli bağlantı şeklindedir,
- Ölçüm aralığı 0 ile 16 bar arasında değişmektedir,
- Basınç algılayıcı eleman olarak dayanıklı bakır alaşımı malzeme tercih edilmiştir,
- Çalışma ortam sıcaklığı -25 °C ile +60 °C arasında değişkenlik göstermektedir,
- TS EN 837/1 standardına uygun olarak imal edilmiştir.

Bu özellikler doğrultusunda manometre, deneysel basınç ölçümlerinde yüksek hassasiyet ve güvenilirlik sağlamaktadır.

2.2 Yöntem

Çalışmada kullanılan deneysel yöntem ve izlenen adımlar bu kısımda ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

2.2.1 RHVT Performans İncelemesi

Deneysel sistem, üç adet RHVT'nin paralel bağlantısı ile oluşturulmuştur. Sistem girişinden hava kompresörüne kadar olan hat, 10,000 kPa basınç dayanımına sahip pnömomatik hortum ile ve quick kuplin aracılığıyla bağlantı sağlanmıştır. Hava kompresörü devreye alındıktan sonra, akışkan girişindeki vana kontrolüyle deneylerin başlangıç basıncı 150 kPa olarak ayarlanmıştır. Basınç stabilizasyonunun sağlanmasının ardından, sıcak ve soğuk akışkan çıkışlarına yerleştirilen ölçüm cihazlarından sıcaklık değerleri sabitlenene dek, hava kompresörü sabit basınçta akış sağlamaya devam etmiştir.

Deney boyunca, sistem girişindeki basınç, hacimsel debi ile sıcak ve soğuk akışkan çıkışlarındaki sıcaklıklar kaydedilmiştir. Başlangıçta, 150 kPa basınç seviyesindeki deneyler öncesinde, dijital termometrelerle ölçülen sistem girişindeki, soğuk ve sıcak akışkan çıkışlarındaki sıcaklıklar ile ortam sıcaklığı arasındaki denge sağlanana kadar beklenmiştir. Bu sıcaklık değerleri eşitlendiğinde, ilgili basınç seviyesinde deneyler başlatılmıştır. 200 kPa'daki deneylerin tamamlanmasının ardından aynı prosedür izlenerek 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650 ve 700 kPa basınç seviyelerinde; poliamid, pirinç ve alüminyum

malzemelerden farklı nozul tipleri kullanılarak deney sistemi gerçekleştirilmiştir.

Deney sistemi, ortam sıcaklığının 21 °C olarak sabit tutulduğu kontrollü bir ortamda yürütülmüştür. Deneysel sonuçların güvenilirliğini artırmak amacıyla, her test üç kez tekrarlanmış ve elde edilen verilerin ortalaması hesaplanmıştır. RHVT'nin performansını önemli ölçüde etkileyen soğuk akışkanın kütle debisinin, giriş akışkanının kütle debisine oranı y_c olarak tanımlanmış olup, bu oran Eşitlik 2.1'de ifade edilmiştir (Dinçer, 2005).

$$y_c = \frac{m_c}{m_i} \quad (2.1)$$

$$m_g = m_c + m_h \quad (2.2)$$

RHVT'lerde, sıcak akış çıkışındaki vana pozisyonunun değiştirilmesi, akışkanın soğuk kütle debisinin toplam girişteki debiye oranı olan (y_c) parametresini etkileyebilir. Ancak bu çalışmada, sıcak çıkış vanası tam açık konumda sabit tutulduğundan (y_c) oranında herhangi bir değişim meydana gelmemiştir. Giriş akışkanının sıcaklığı (T_i) ile soğuk uçtan çıkan akışkanın sıcaklığı (T_c) arasındaki fark, soğuk akışkanın sıcaklıklarının farkı (ΔT_c) eşitlikte gösterilmiştir:

$$\Delta T_c = T_c - T_i \quad (2.3)$$

Aynı şekilde, giriş akışkanın sıcaklığı (T_i) ile sıcak uçtan çıkan akışkan sıcaklığı (T_h), sıcak akışkan sıcaklık arasındaki fark (ΔT_h) adlandırılmış ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilmiştir:

$$\Delta T_h = T_h - T_i \quad (2.4)$$

Deney düzeneğinin performans değerlendirmesi ise, sıcak ve soğuk akışkan çıkışları arasındaki sıcaklık farkı ΔT kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu değer aşağıdaki eşitlikte 2.5 ile hesaplanmıştır:

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (2.5)$$

2.2.2 Makine öğrenimi

Bu çalışmada, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini öngörebilmek için dört farklı makine öğrenimi algoritmasından faydalanılmıştır. EN, LGBM, DVM ve RA makine öğrenme yöntemlerinden yararlanılmıştır. Her bir yöntem, verinin yapısına duyarlı bir şekilde modellenerek tahmin performansı açısından değerlendirilmiştir. Aşırı öğrenme (overfitting) sorununu minimize edebilmek adına, model eğitim süreci 5 katlı K-fold çapraz doğrulama yöntemi ile desteklenmiştir. Bu yöntem, veri setini rastgele beş alt gruba bölerek her alt grubun bir kez test, diğerlerinin ise eğitim verisi olarak kullanılmasını sağlamış, böylece modelin genelleme kabiliyeti daha sağlıklı bir şekilde ölçülmüştür. Elde edilen tahminlerin doğruluk düzeyi, dört temel performans metriği ile analiz edilmiştir: Bu metrikler aracılığıyla, her bir modelin hem hata oranları hem de veriye ne ölçüde uyum sağladığı nicel olarak değerlendirilmiştir. Böylece, en etkili tahminleme yönteminin belirlenmesine yönelik kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır.

2.2.2.1 Hafif Gradyan Artırma Yöntemi (LGBM)

LGBM Microsoft tarafından 2017 yılında geliştirilen ve özellikle büyük ölçekli veri setlerinde yüksek performans göstermesi amacıyla tasarlanmış gelişmiş bir boosting algoritmasıdır (Ke et al., 2017). Bu model, geleneksel gradient boosting yöntemlerine kıyasla hem eğitim süresini kısaltmak hem de bellek tüketimini azaltmak üzere özel olarak optimize edilmiştir. Bunu, veriyi doğrudan değil, histogram tabanlı bir ayrıştırma tekniği ile işleyerek başarır; bu yaklaşım, veri üzerinde yapılan işlemleri hem daha hızlı hem de daha kaynak dostu hale getirir. LGBM'nin mimarisi, özellikle yüksek boyutlu özellik uzaylarına sahip veri kümeleri üzerinde verimli çalışacak şekilde inşa edilmiştir. Bu nedenle, çok sayıda öznitelik içeren derin öğrenme problemlerinde ya da hızlı yineleme gerektiren modelleme süreçlerinde sıklıkla tercih edilir. LGBM, yalnızca hız ve verimlilik açısından değil, aynı zamanda öngörü gücü açısından da rekabetçidir. Bu yönüyle, sınıflandırma ve regresyon gibi temel makine öğrenimi görevlerinde yaygın bir şekilde kullanılır (Fan et al., 2019).

Özünde LGBM, modern veri biliminde hem hesaplama verimliliğini hem de model doğruluğunu dengeleyebilen nadir algoritmalarından biridir. Bu nedenle, özellikle büyük veri analitiği ve üretim ortamlarında çalışan sistemlerde pratik ve güvenilir bir çözüm sunar. Light Gradient Boosting Machine, makine öğrenmesi alanında son yıllarda parlayan, adeta

“hafif ama vurucu” bir tahminleme algoritmasıdır. Adında geçen “light” kelimesi, yalnızca işlem yükünün azlığını değil; aynı zamanda veriyi işleme biçimindeki zarafeti de simgeler. Geleneksel gradyan artırmalı ağaç modellerinin hantallığına karşın, LGBM daha çevik, daha hızlı ve daha akıllı bir alternatif sunar. Gelişmiş algoritma sayesinde eğitim süresi oldukça kısadır. Leaf-wise strateji sayesinde genellikle daha düşük hata oranları verir. Paralel hesaplama desteği çok çekirdekli işlemcilerde verimli çalışır ve düşük RAM ve CPU kaynak kullanımı optimize edilmiştir.

LGBM, karar ağaçları kullanan gradyan artırmalı (gradient boosting) bir çerçevedir. Geleneksel boosting algoritmalarının geliştirilmiş bir versiyonudur ve Microsoft tarafından geliştirilmiştir. Özellikle büyük boyutlu ve karmaşık veri setlerinde hızlı ve doğru tahminler yapmak amacıyla tasarlanmıştır. Model eğitildikten sonra, hangi giriş değişkenlerinin daha etkili olduğu analiz edilebilir. Diğer birçok algoritmanın aksine, LGBM kategorik değişkenleri ön işlemeye gerek kalmadan doğrudan kullanabilir. LGBM, sunduğu hız, doğruluk ve kaynak verimliliğiyle öne çıkan bir algoritma olsa da, bu gücün beraberinde getirdiği önemli bir zorluk ise öğrenme sırasında ortaya çıkan bir risktir. Aşırı öğrenme, modelin eğitim verisine fazlasıyla uyum sağlaması ve bu nedenle yeni, görülmemiş verilere karşı genel geçer tahmin kabiliyetini kaybetmesi durumudur. Bu sorun özellikle LGBM'de, modelin leaf-wise (yaprak temelli) büyüme stratejisi nedeniyle daha belirgin hale gelebilir. Overfitting riski, özellikle küçük veri setlerinde daha fazladır çünkü yaprak temelli genişleme çok güçlüdür. Hiperparametre ayarlamaları dikkatli yapılmalıdır. Modelin kontrolsüz derinleşmesini engellemek için erken durdurma kullanılmalıdır. LGBM, özellikle yüksek doğruluk istenen büyük veri projelerinde hızlı, esnek ve güçlü bir modelleme aracıdır. Ancak dikkatli parametre ayarlamaları yapılmazsa aşırı öğrenmeye eğilim gösterebilir.

LGBM çalışma sistemi, tahmin hatalarını giderek azaltmaya çalışan bir dizi karar ağacı üretir. Ancak onu farklı ve etkili kılan, bu ağaçları oluştururken kullandığı yaprak temelli (leaf-wise) stratejidir. Bu stratejide, model her adımda en büyük hatayı azaltabilecek yaprağı hedef alarak ağacı genişletir. Bu, sıradan ağaçların “katman katman büyümesine” kıyasla daha derinlemesine ve odaklı bir öğrenme sağlar. LGBM, doğru şekilde eğitildiğinde yalnızca verileri değil, aynı zamanda veriyle birlikte gelen karmaşayı da öğrenir ve sadeleştirir. O, veri bilimcisinin elindeki hassas bir cerrahi alet gibidir, ne kadar dikkatle

kullanılırsa, o kadar etkileyici sonuçlar verir. Tercih edilme nedenlerini aşağıda belirtildiği gibi özetleyebiliriz.

- Hız: Veriyi satır satır değil, blok blok işlediği için eğitimi oldukça hızlıdır.
- Verimli bellek kullanımı: Büyük veri kümeleriyle çalışırken bile RAM'i yormaz.
- Kategorik verilerle dost: Sayısallaştırmaya gerek duymadan, kategorik değişkenlerle doğrudan çalışabilir.
- Yüksek doğruluk: Özellikle karmaşık ilişkilerin olduğu veri setlerinde, oldukça isabetli tahminler üretir.
- Esnek yapı: Parametreleri özelleştirilebilir, bu da onu birçok farklı problem türüne adapte eder.

2.2.2.2 Elastic Net

Hui Zou ve Trevor Hastie tarafından 2005 yılında geliştirilen ve istatistiksel modelleme literatüründe önemli bir boşluğu dolduran bir regresyon tekniğidir. Bu yöntem, Lasso (L1) ve Ridge (L2) regresyonlarının güçlü yönlerini aynı çatı altında birleştirerek, özellikle yüksek boyutlu ve çoklu kolinearite içeren veri kümelerinde etkili sonuçlar üretir (De Mol et al., 2009). Elastic Net'in ayırt edici özelliği, iki farklı düzenleme tekniğini birleştirerek denge kurmasıdır. L1 (Lasso) bileşeni, bazı regresyon katsayılarını sıfıra indirerek modelde değişken seçimi yapar. Bu, modelin yalınlaşmasını sağlar. L2 (Ridge) bileşeni ise değişkenler arasında yüksek korelasyon varsa, bu değişkenlerin katsayılarını birlikte küçültür ve böylece modelin kararlılığını artırır. Bu iki etki bir araya geldiğinde, model hem gereksiz değişkenleri dışlayabilir hem de bilgiyi kaybetmeden genelleme kabiliyeti yüksek bir yapıya kavuşur. Elastic Net, özellikle aşağıdaki durumlar için idealdir:

- Özellik sayısının gözlem sayısından fazla olduğu durumlar (örneğin genetik veriler),
- Yüksek korelasyonlu bağımsız değişkenler içeren veri setleri,
- Lasso'nun bazı önemli değişkenleri dışlaması istenmeyen durumlar,
- Ridge'in tüm değişkenleri dahil edip modelin yorumlanabilirliğini zorlaştırdığı senaryolar.

Elastic net, istatistiksel modellemede “ya Ridge ya da Lasso” ikilemini sona erdiren, esnek ve güçlü bir çözümdür. Özellik fazlalığı, çoklu doğrusal ilişkiler veya yorumlanabilirlik gibi zorluklara karşı, bu yöntem hem istikrarlı hem de yorumlanabilir modeller sunar.

2.2.2.3 Regresyon Ağaçları (Kararların Yol Haritası)

Regresyon Ağaçları (RA), karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri ağaç biçiminde görselleştirerek anlamamıza olanak sağlayan güçlü bir makine öğrenimi yaklaşımıdır. Bu yöntem, bir hedef değişkenin sürekli değerlerini tahmin etmek amacıyla veriyi ardışık karar kurallarıyla alt gruplara ayırır ve her grubun son noktasında tahminler üretir.

RA, bir problemi adım adım basitleştirerek çözer:

- Kök Düğüm: Tüm veri kümesiyle başlar.
- Karar Dğümleri: Belirli bir özelliğe göre veri ikiye bölünür.
- Dallanma: Her bir alt küme için benzer şekilde karar kuralları uygulanır.
- Yaprak Dğümler: Daha fazla bölünemeyen ya da bölünmesi anlamlı olmayan gruplarda, hedef değişkenin ortalaması alınarak tahmin yapılır.

Bu yapı sayesinde RA, tahmin sürecini mantıksal adımlara böler ve karar süreçlerini sezgisel olarak anlaşılır kılar. Değişkenler arasında klasik regresyonun yakalayamayacağı karmaşık ilişkileri modelleyebilir. Her karar açık ve takip edilebilir olduğu için modelin işleyişi kolayca görselleştirilebilir. Önemli özellikler otomatik olarak ön plana çıkar, gereksiz değişkenler geride kalır. Eksik veriye karşı toleranslıdır ve kategorik değişkenlerle rahat çalışır.

2.2.2.4 Destek Vektör Makinesi (DVM)

Sınıflandırma ve regresyon görevlerinde kullanılarak, veriyi anlamlandırma konusunda güçlü bir makine öğrenimi yöntemidir. Temel amacı, farklı veri gruplarını birbirinden ayırırken aralarındaki en geniş boşluğu (marjini) sağlayan optimal bir sınır oluşturmaktır. Regresyon problemine uygulandığında ise, DVM, tahminlerini bu sınıra mümkün olduğunca yakın tutarak, verideki değişimleri hassas şekilde yakalayan bir model ortaya koyar. Böylece, karmaşık verilerde bile dengeli ve tutarlı sonuçlar üretir.

RMSE tahminlerin gerçek değerlerden ne kadar sapma gösterdiğini, büyük hatalara daha fazla ağırlık vererek ölçer. MSE sapmaların karesinin ortalaması, hata büyüklüğünü daha vurgular. MAE tahmin ve gerçek değerler arasındaki mutlak farkların ortalaması, hatanın genel büyüklüğünü sade biçimde gösterir. R^2 modelin veriyi ne kadar iyi açıkladığını, 1'e yaklaştıkça modelin daha başarılı olduğunu gösterir. EN , RMSE ve MAE değerleri orta seviyede (6,65 ve 5,38)'dir. R^2 değeri 0,80'dir. Özellikle doğrusal ilişkilerde dengeli bir performans sergiliyor ancak karmaşık veri yapılarında diğer modellerin gerisinde kalmaktadır. LGBM en düşük RMSE (3,09), MSE (9,55) ve MAE (2,37) değerlerine sahiptir. R^2 değeri 0,96 ile diğer modellerin oldukça üzerindedir. Bu, LGBM'nin veri üzerindeki tahmin performansının çok yüksek ve hata payının oldukça düşük olduğunu gösterir. Karmaşık veri yapılarında hem hız hem doğruluk açısından en başarılı modeldir.

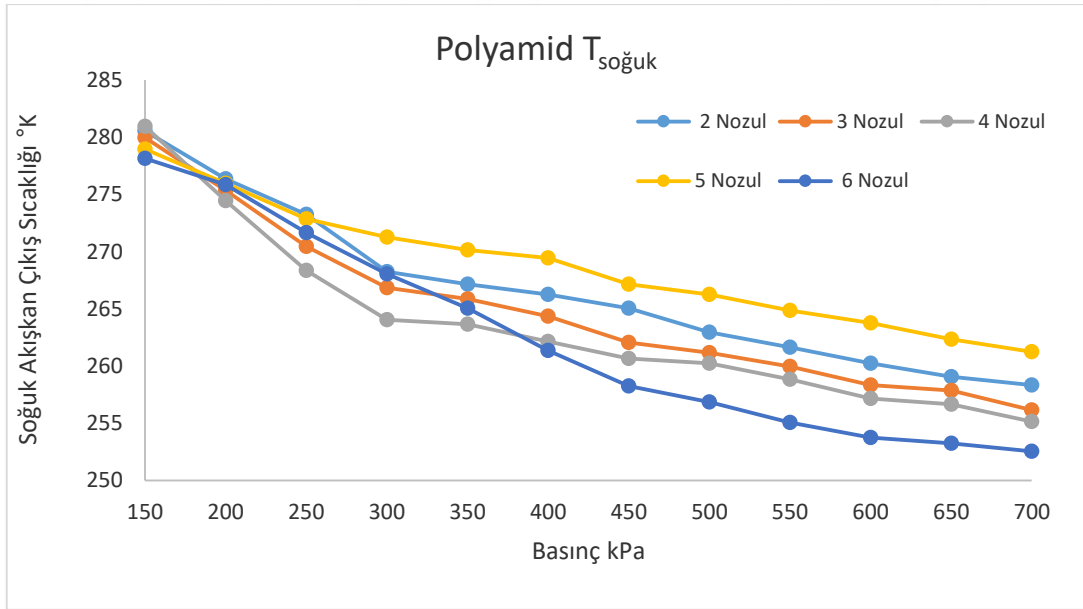
DVM en yüksek hata değerlerine sahip RMSE 10,22, MSE 104,40, MAE 7,22). R^2 değeri 0,52'dir. Bu sonuçlar, DVM'nin burada kullanılan parametrelerle ve veri yapısıyla iyi uyum sağlayamadığını veya modelin optimize edilmesi gerekmektedir. RA, RMSE 4,48 ve MAE 3,54 ile ikinci en iyi performanstır. R^2 değeri 0,91 ile veri varyansının büyük kısmını açıklamaktadır. LGBM, en yüksek doğruluk ve en düşük hata ile bu veri seti için en uygun model olarak öne çıkıyor. RA yorumlanabilirlik avantajıyla ikinci tercih olabilir. EN, özellikle daha basit ve doğrusal ilişkili modeller için uygundur. DVM, bu senaryoda beklenen performansı gösterememiş; hiperparametre ayarı veya farklı kernel fonksiyonları ile iyileştirilebilir. DVM, diğer modellere kıyasla daha yüksek hata değerleri ve düşük R^2 ile daha düşük tahmin doğruluğu sunmuştur. Bu durum, DVM'nin regresyon problemi için burada kullanılan parametrelerle ve veri yapısıyla tam uyum sağlayamadığını gösterebilir. Bu karşılaştırma, farklı makine öğrenimi yöntemlerinin aynı veri setinde nasıl farklı performanslar sergileyebileceğini gözler önüne seriyor. Model seçimi yapılırken, veri setinin özellikleri, problem tipi ve modelin esnekliği mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, karşıt akış prensibine sahip Ranque-Hilsch tipi Kaskad Rejeneratif Hava Vorteks Tüpü (KRHVT) sisteminde, soğuk çıkış sıcaklıklarının farklı nozul sayıları ve malzeme türleri altındaki davranışı incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen veriler, 2, 3, 4, 5 ve 6 nozul kullanımı durumunda sistemin performansını değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Her bir nozul konfigürasyonu için KRHVT tüpü, farklı malzemelerden (poliamid, alüminyum ve pirinç) imal edilmiş versiyonlarla test edilmiştir. Giriş hava basıncı 150 kPa ile 700 kPa arasında, 50 kPa'lık artışlarla değiştirilmiş ve bu basınç seviyelerinde elde edilen soğuk hava çıkış sıcaklıkları karşılaştırılmıştır.

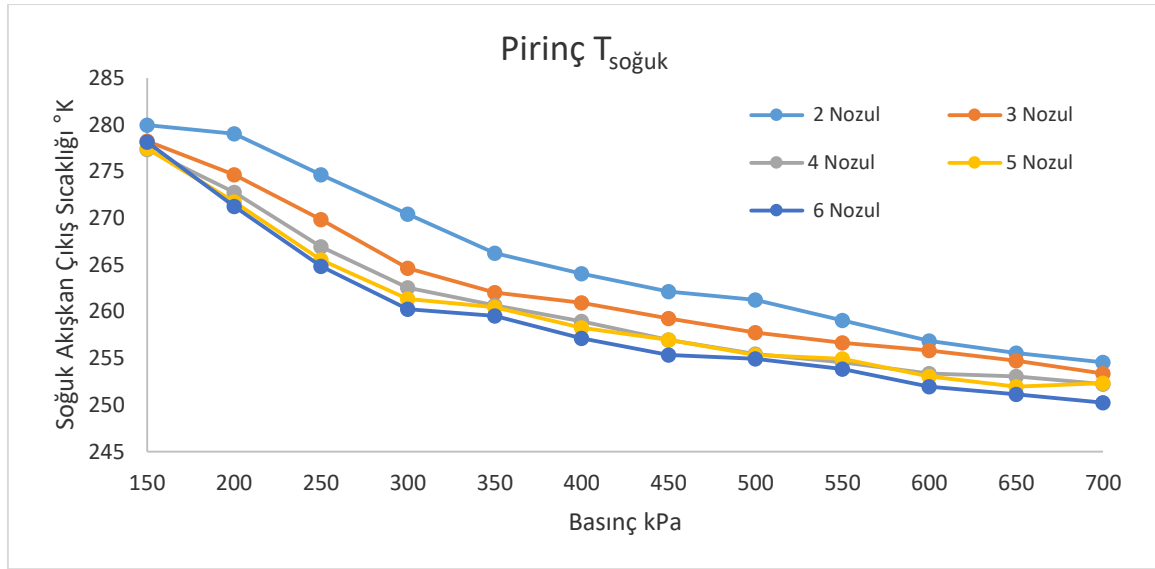
3.1 RHVT Analizlerine Ait Bulgular

Bu kapsamda hazırlanan grafik, hem nozul sayısının hem de malzeme türünün KRHVT'nin soğutma performansı üzerindeki etkisini görselleştirmektedir. Elde edilen sonuçlar, nozul sayısının artmasıyla birlikte soğuk çıkış sıcaklığında belirli bir azalma eğilimi gözlemlendiğini, ancak bu etkinin kullanılan malzemeye göre farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur.



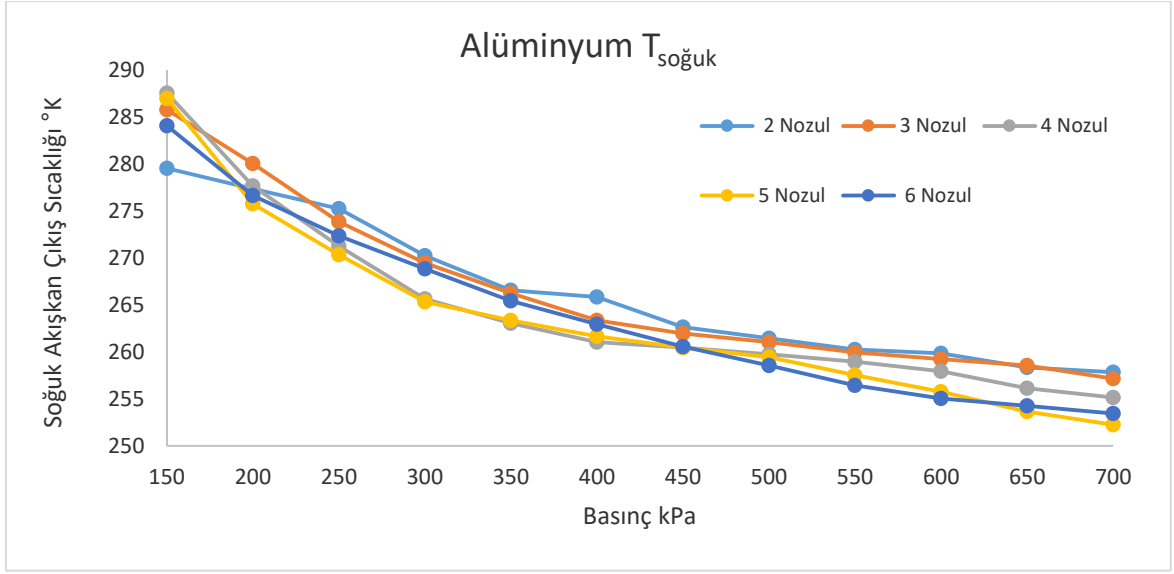
Şekil 3.1: KRHVT Polyamid T_{soğuk} çıkış sıcaklık grafikleri

Poliamid gövdeli karşıt akışlı KRHVT, farklı nozul sayılarına göre değişen giriş basıncında elde edilen soğuk çıkış sıcaklıklarının karşılaştırılması yapılan bu grafikte, farklı nozul sayılarında (2, 3, 4, 5 ve 6 nozul) kullanılan poliamid KRHVT için soğuk çıkış sıcaklığının giriş basıncı (150–700 kPa) arttıkça nasıl değiştiği gösterilmiştir. Nozul sayısı ve giriş basıncı, KRHVT'nin soğutma performansı üzerinde doğrudan ve önemli bir etkiye sahiptir. Daha fazla nozul genellikle daha iyi bir türbülans ve dönme etkisi yaratarak sıcaklık farkını artırmakta; ancak bu etkinin optimum noktası nozul tasarımı, konumu ve akış karakteristiğine göre değişebilir (Şekil 3.1).



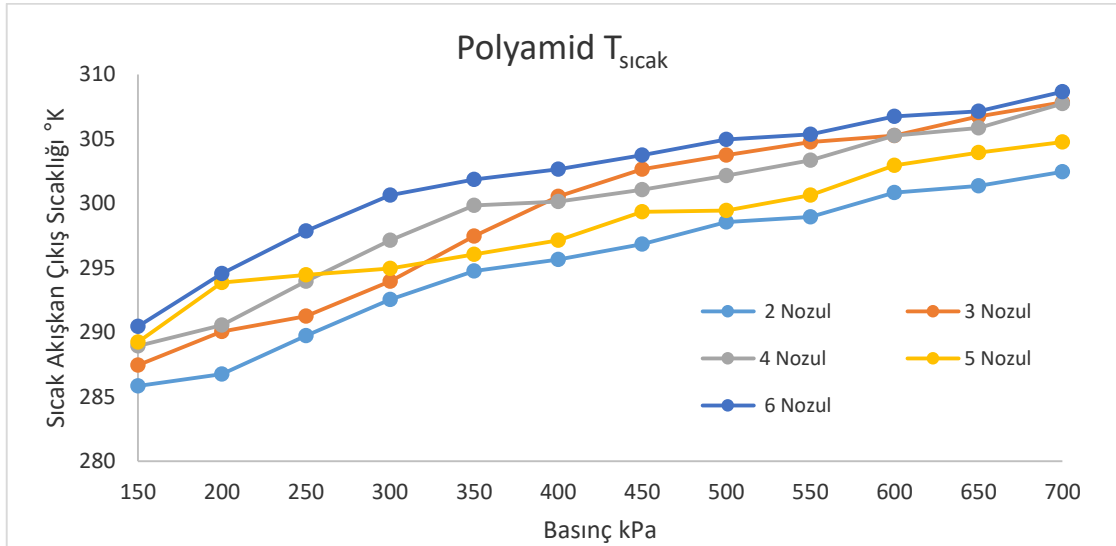
Şekil 3.2: KRHVT Pirinç $T_{soğuk}$ çıkış sıcaklık grafikleri

Giriş basıncı arttıkça tüm nozul konfigürasyonlarında soğuk çıkış sıcaklığının düzenli şekilde azaldığını göstermektedir. Bu durum, artan basınçla birlikte sistem içerisindeki dönme hareketi ve genişleme etkilerinin daha fazla sıcaklık ayrıştırmasına yol açtığını ortaya koymaktadır. Daha önceki Poliamid grafiğiyle karşılaştırıldığında, pirinç malzeme kullanılan KRHVT'lerde genellikle daha düşük sıcaklık değerlerine ulaşıldığı gözlemlenmektedir. Bu, pirincin daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olmasının, vorteks tüpündeki enerji ayrıştırma sürecine olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Giriş basıncı arttıkça tüm konfigürasyonlarda soğuk çıkış sıcaklığı azalmaktadır. Bu nedenle, pirinç KRHVT sistemlerinde optimum nozul sayısının belirlenmesi, sistemin verimliliğini ciddi şekilde artırabilir (Şekil 3.2).



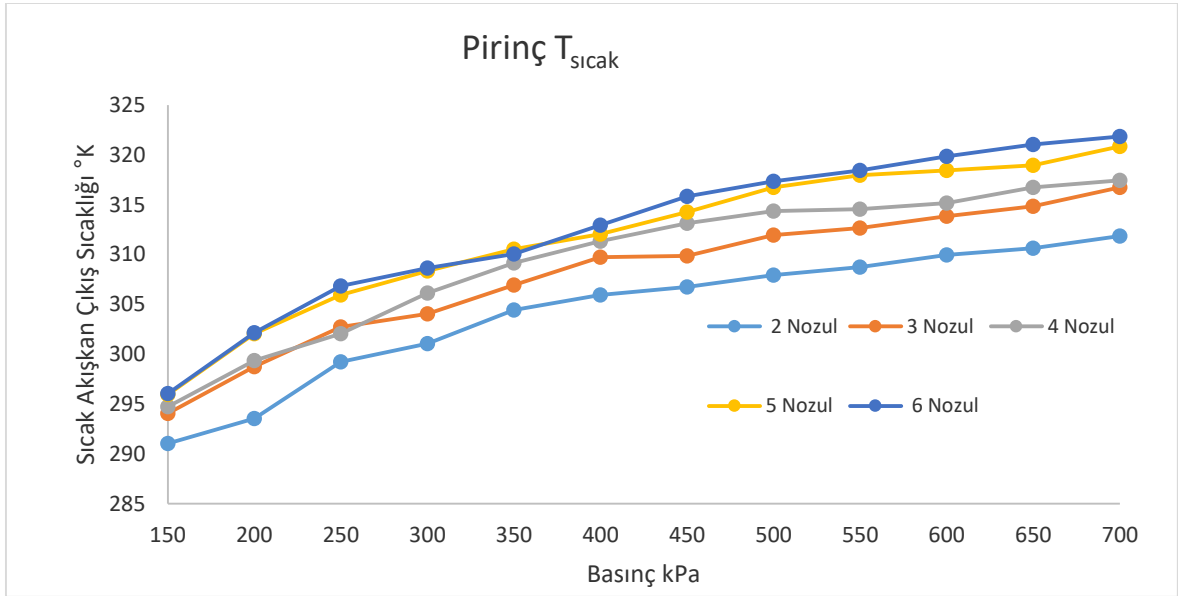
Şekil 3.3: KRHVT Alüminyum $T_{soğuk}$ çıkış sıcaklık grafikleri

Alüminyumun yüksek ısı iletkenliği, sistem içerisindeki ısı transferini kolaylaştırarak, sıcaklık ayrımının daha hızlı gerçekleşmesine olanak sağlamıştır. Önceki polyamid ve pirinç grafiklerine kıyasla, alüminyum öne çıkmakla birlikte, soğuk çıkış sıcaklıkları pirince benzer ancak polyamiden daha düşüktür. Bu durum, alüminyumun performans olarak pirinç ile yakın, polyamiden ise daha üstün olduğunu göstermektedir. Alüminyum KRHVT’de basınç artışıyla birlikte çıkış sıcaklığı önemli ölçüde düşmüştür. Alüminyum malzeme, yüksek ısı iletkenliği sayesinde sistem performansını olumlu yönde etkilemiştir (Şekil 3.3).



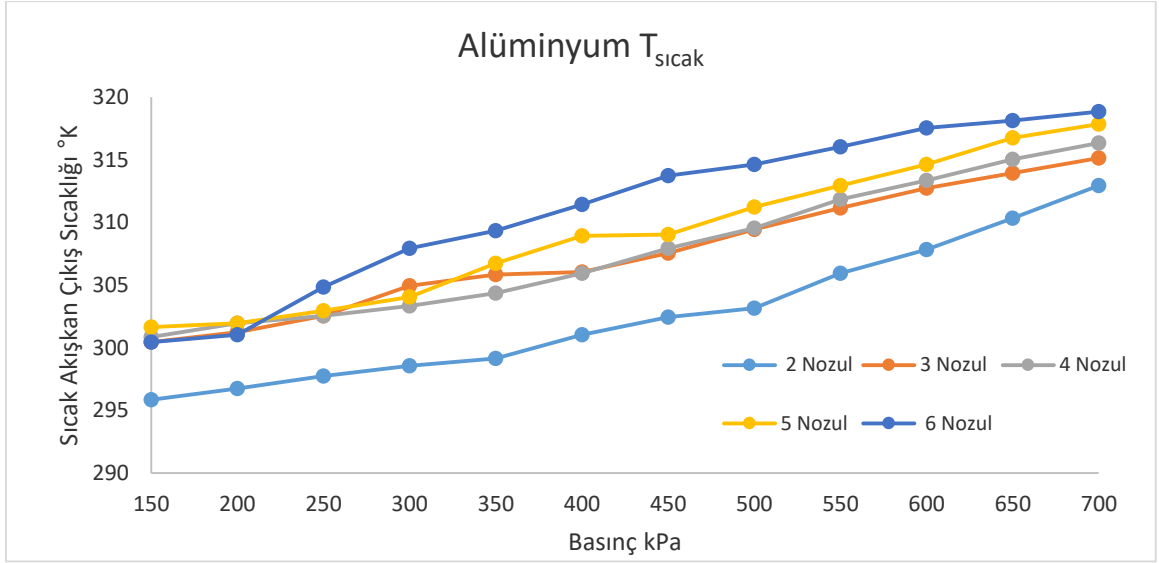
Şekil 3.4: KRHVT Polyamid $T_{sıcak}$ çıkış sıcaklık grafikleri

Polyamid malzemeden yapılmış KRHVT sisteminde, farklı nozul sayılarına (2, 3, 4, 5, 6 nozul) ve giriş basınçlarına (150–700 kPa) bağlı olarak sıcak çıkış sıcaklığının nasıl değiştiğini göstermektedir. Poliamid, düşük ısıl iletkenliğe sahip bir malzemedir. Bu nedenle, pirinç veya alüminyum KRHVT'lere kıyasla daha düşük sıcak çıkış sıcaklıkları vermiştir. Malzemenin ısıyı iyi iletmemesi, sıcak akışkan bileşeninin daha az ısınmasına neden olmuştur. Poliamidin düşük ısıl iletkenliği, sıcak çıkış sıcaklıklarını sınırlamıştır. Pirinç veya alüminyum gibi daha iletken malzemelerle daha yüksek sıcaklık farkları (ΔT) elde edilebilir. Makine öğrenimi modellerinden LGBM ve RA, bu verileri en iyi şekilde tahmin etmiştir. Bu grafik, nozul sayısı ve giriş basıncının KRHVT'nin sıcak çıkış performansını doğrudan etkilediğini ve malzeme seçiminin kritik olduğunu doğrulamaktadır (Şekil 3.4).



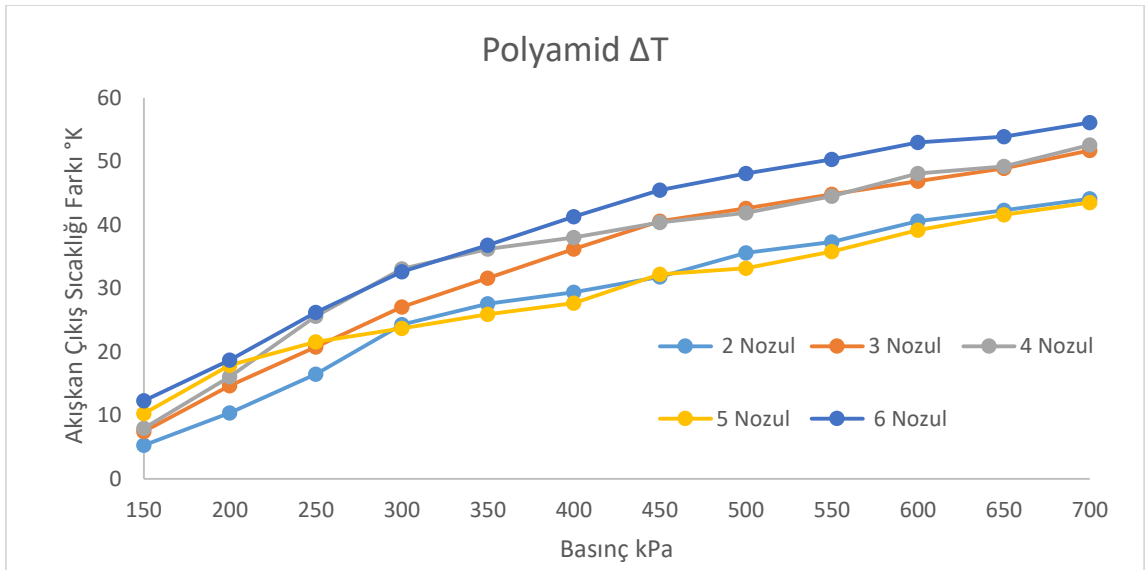
Şekil 3.5: KRHVT Pirinç T_{sıcak} çıkış sıcaklık grafikleri

Pirinç malzemeden yapılmış KRHVT sisteminde, farklı nozul sayılarına (2, 3, 4, 5, 6 nozul) ve giriş basınçlarına bağlı olarak sıcak çıkış sıcaklığının değişimini göstermektedir. Pirinç, yüksek ısıl iletkenliği sayesinde polyamide kıyasla daha etkili bir enerji ayrıştırma performansı sergilemiştir. Tüm nozul konfigürasyonlarında, giriş basıncı arttıkça sıcak çıkış sıcaklığı da artmıştır. Yüksek basınç, vorteks tüpü içinde daha güçlü bir dönme hareketi ve türbülans yaratarak sıcak akışkan bileşeninin daha fazla ısınmasını sağlamıştır. Pirinç, poliamide kıyasla daha iyi performans göstermiştir (Şekil 3.5).



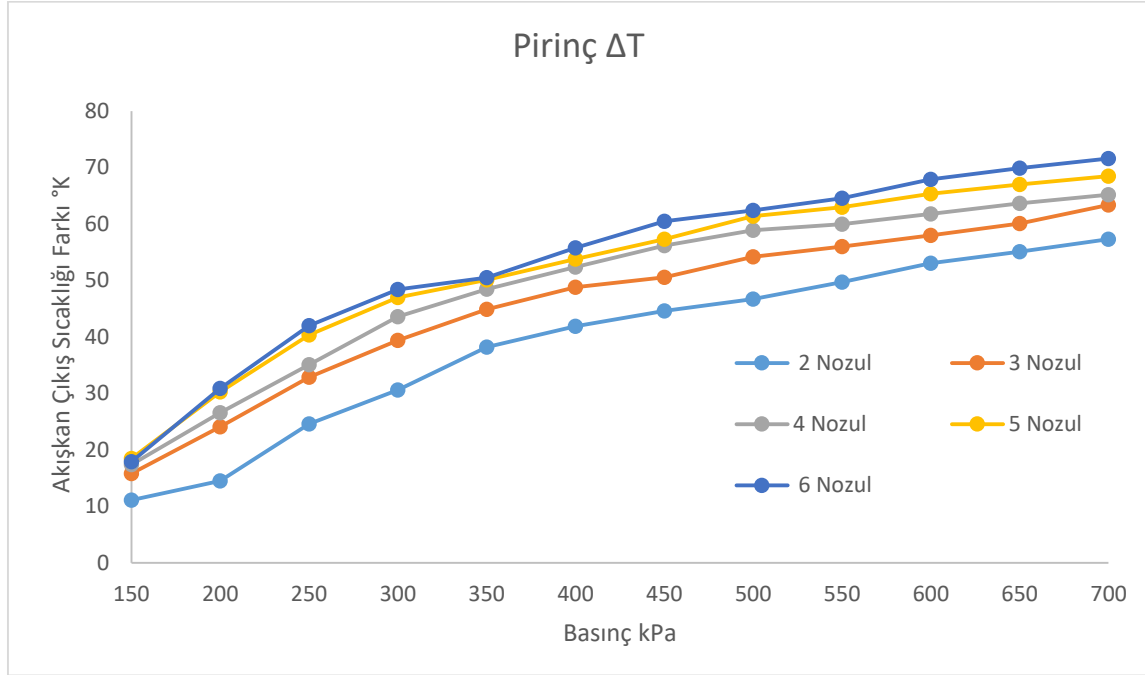
Şekil 3.6: KRHVT Alüminyum $T_{sıcak}$ çıkış sıcaklık grafikleri

Alüminyum malzemeden üretilmiş KRHVT sisteminde, farklı nozul sayıları (2, 3, 4, 5, 6 nozul) ve giriş basınçları (150–700 kPa) altında sıcak çıkış sıcaklığının değişimini göstermektedir. Alüminyumun yüksek ısıl iletkenliği, pirinç ve polyamide kıyasla daha etkili bir enerji ayrıştırma performansı sağlamıştır. Alüminyum, pirinçle benzer yüksek ısıl iletkenliğe sahiptir, bu nedenle sıcak çıkış sıcaklıkları pirinçle karşılaştırılabilir düzeydedir. Polyamide kıyasla daha yüksek sıcaklık farkı (ΔT) sağlamıştır. Alüminyum, pirinçle benzer performans sergilemiş, ancak hafifliği ve işlenebilirliği nedeniyle pratik uygulamalarda avantaj sağlayabilir (Şekil 3.6).



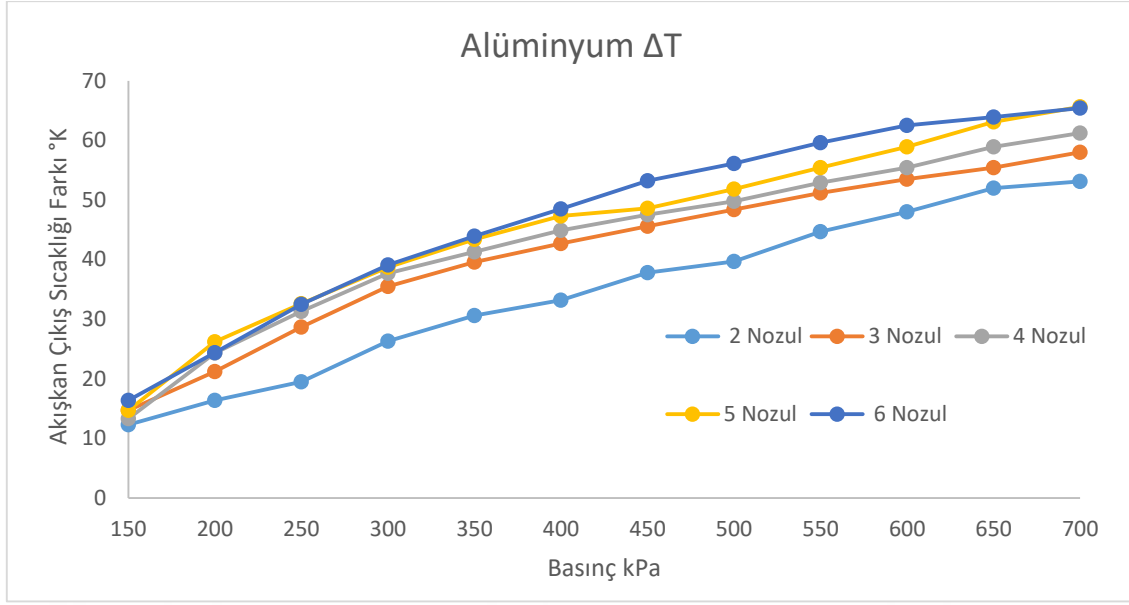
Şekil 3.7: KRHVT Polyamid ΔT çıkış sıcaklık farkları grafikleri

Poliamid malzemeden üretilmiş KRHVT sisteminde, farklı nozul sayıları (2, 3, 4, 5, 6 nozul) ve giriş basınçları (150–700 kPa) altında sıcaklık farkının nasıl değiştiğini göstermektedir. Polyamidin düşük ısıl iletkenliği, pirinç ve alüminyuma kıyasla daha düşük ΔT değerlerine yol açmıştır. Poliamid, düşük maliyetli ve hafif olmasına rağmen, yüksek ΔT gerektiren uygulamalarda yetersiz kalır (Şekil 3.7).



Şekil 3.8: KRHVT Pirinç $\Delta T_{\text{sıcak}}$ çıkış sıcaklık farkları grafikleri

Pirinç malzemeden üretilmiş KRHVT sisteminde, farklı nozul sayıları (2, 3, 4, 5, 6 nozul) ve giriş basınçları (150–700 kPa) altında sıcaklık farkının değişimini göstermektedir. Pirinç, yüksek ısıl iletkenliği sayesinde polyamide kıyasla daha yüksek ΔT değerleri sağlamıştır. Makine öğrenimine göre, LGBM modeli pirinç ΔT tahminlerinde $R^2 = 0.95$ ile en yüksek doğruluğu sağlamıştır. Pirinç, alüminyuma kıyasla daha ağır olmasına rağmen, kimyasal direnci nedeniyle özel uygulamalarda avantaj sağlayabilir (Şekil 3.8).



Şekil 3.9: KRHVT Alüminyum ΔT çıkış sıcaklık farkları grafikleri

Alüminyum malzemeden üretilmiş KRHVT sisteminde farklı nozul konfigürasyonları (2-6 nozul) ve basınç aralığında (150-700 kPa) elde edilen sıcaklık farkı (ΔT) performansını göstermektedir. Alüminyumun üstün ısıl iletkenliği, sistemin pirinç ve polyamide kıyasla en yüksek ΔT değerlerini üretmesini sağlamıştır. Alüminyum KRHVT sistemleri, yüksek basınç ve nozul sayısı kombinasyonlarıyla endüstriyel soğutma uygulamalarında en yüksek termodinamik verimi sunmaktadır. Tasarım optimizasyonu için LGBM modellerinin kullanılması önerilir (Şekil 3.9).

Tüm malzemelerde (polyamid, pirinç, alüminyum) giriş basıncı arttıkça soğuk çıkış sıcaklığının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu, yüksek basınçta daha fazla genleşme ve türbülans etkisiyle sistemin daha iyi soğutma yaptığını göstermektedir. 6 nozul kullanılan sistemler genellikle en düşük soğuk çıkış sıcaklıklarını sağlamıştır. Bu, daha fazla nozulun daha iyi türbülans ve dönme etkisi yarattığını ve sıcaklık farkını artırdığını göstermektedir. 5 nozul kullanılan durumlarda, özellikle poliamid malzemede, performansın diğerlerine göre düşük olduğu görülmüştür. Bu, nozul sayısının optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.

Makine öğrenimi modellerinin performansında ise LGBM tüm malzemeler ve çıkış parametreleri için en yüksek R^2 değerlerini 0.96 sağlamıştır. Bu, LGBM'in bu tür veri setlerinde yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini göstermektedir. RA, LGBM'den sonra en iyi performansı göstermiştir. Özellikle soğuk tahminlerinde R^2 değeri 0.96'ya ulaşmıştır. EN

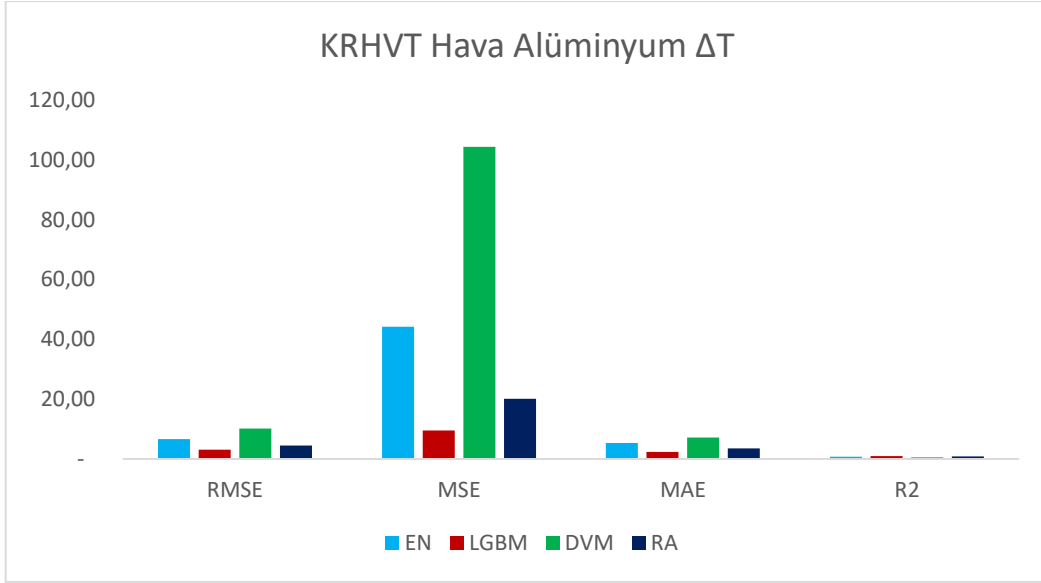
Orta düzeyde performans sergilemiş, özellikle karmaşık veri ilişkilerinde LGBM ve RA kadar başarılı olamamıştır. DVM; diğer modellere kıyasla daha düşük R^2 değerleri -0.52 göstermiştir. Bu, DVM'in bu tür regresyon problemlerinde daha az etkili olduğunu düşündürmektedir. Ölçüm değerleri RMSE, LGBM 3,09 ve RA 4,48 diğer modellere göre daha düşük hata değerleri ve MSE, LGBM 9.55 sunmuştur. Bu, tahminlerin gerçek değerlere daha yakın olduğunu gösterir. MAE, LGBM ve RA, ortalama mutlak hataları en aza indirerek tutarlı bir performans sergilemiştir.

Tablo 3.1: KRHVT Alüminyum ΔT makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü

Model	RMSE	MSE	MAE	R^2
EN	6,65	44,22	5,38	0,80
LGBM	3,09	9,55	2,37	0,96
DVM	10,22	104,40	7,22	0,52
RA	4,48	20,08	3,54	0,91

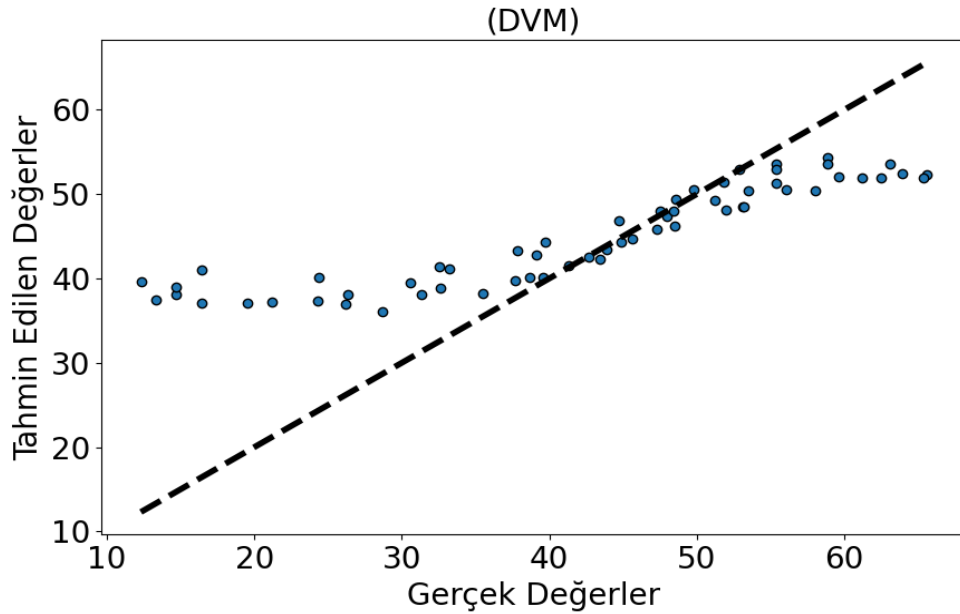
Tüm nozul konfigürasyonlarında, giriş basıncı arttıkça sıcak çıkış sıcaklığı da artmıştır. Bu durum, yüksek basınçta daha güçlü bir vorteks etkisi ve enerji ayrışması olduğunu gösterir. Daha fazla nozul, daha güçlü bir dönme hareketi ve türbülans yaratarak sıcak akışkanın daha fazla ısınmasını sağlamıştır. Bu nedenle, pirinç veya alüminyum KRHVT'lere kıyasla daha düşük sıcak çıkış sıcaklıkları vermiştir. Malzemenin ısıyı iyi iletmemesi, sıcak akışkan bileşeninin daha az ısınmasına neden olmuştur.

Çalışmada kullanılan girdi parametreleri ile elde edilen Tsıcak, Tsoğuk ve sıcaklık farkı (ΔT) değerlerinin, tahmin başarısını artırmak için EN, DVM, LGBM ve RA makine öğrenme metotları kullanılmıştır. Analizler sonucunda en iyi doğruluk katsayısı dört metot arasında LGBM ,0,96 R^2 değeri alüminyum ΔT , Tsıcak, polyamid ΔT ve Tsoğuk nozulları kullanılan malzemeler ile elde edilmiştir. RA modelleri, veriye çok fazla uyum sağlayarak aşırı öğrenmeye (overfitting) eğilim gösterebilir. Bu nedenle ağaç derinliği sınırlandırılmalı, yaprak başına düşen örnek adeti belirlenmeli ve budama (pruning) gibi tekniklerle model sadeleştirilmelidir. Regresyon Ağaçları, karmaşık veriyi dallara ayırarak analitik düşüncüyü yapısal hale getiren bir modeldir.



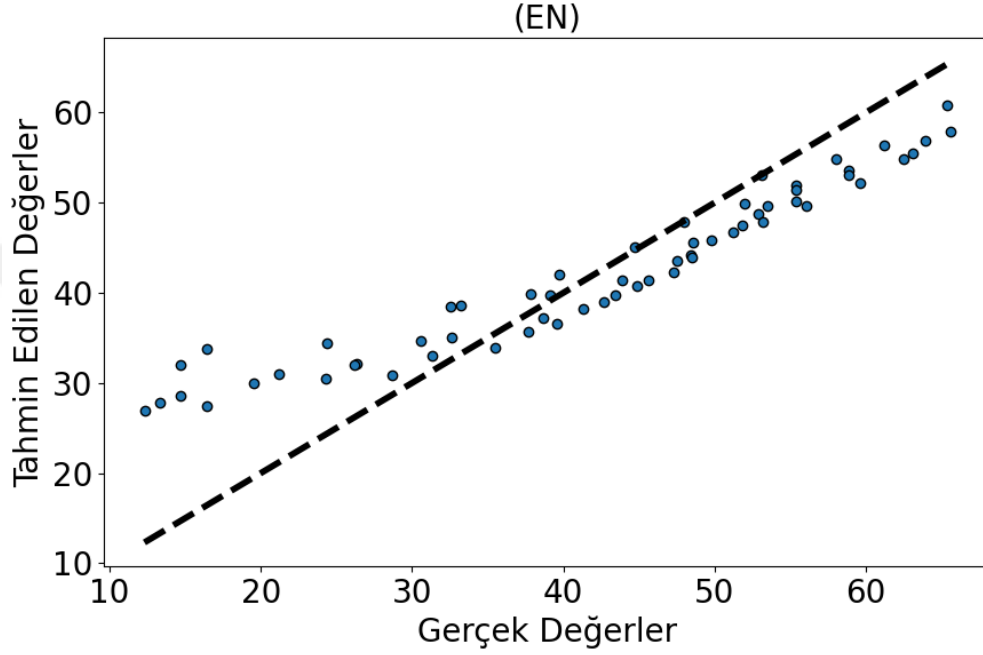
Şekil 3.10: KRHVT Alüminyum ΔT makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri

KRHVT Hava Alüminyum ΔT tahminleri için kullanılan dört farklı makine öğrenimi yönteminin EN, LGBM, DVM, ve RA performans karşılaştırması yapılmıştır. EN ve RA, hem düşük hata oranları hem de yüksek açıklama gücü R^2 ile en başarılı iki yöntem olarak öne çıkmaktadır. DVM ise tüm metriklerde zayıf bir performans göstererek en başarısız yöntem olmuştur. LGBM, makul bir başarı elde etmiş olsa da, EN ve RA'nın gerisinde kalmıştır. EN ya da RA modelleri tercih edilmelidir (Şekil 3.10).



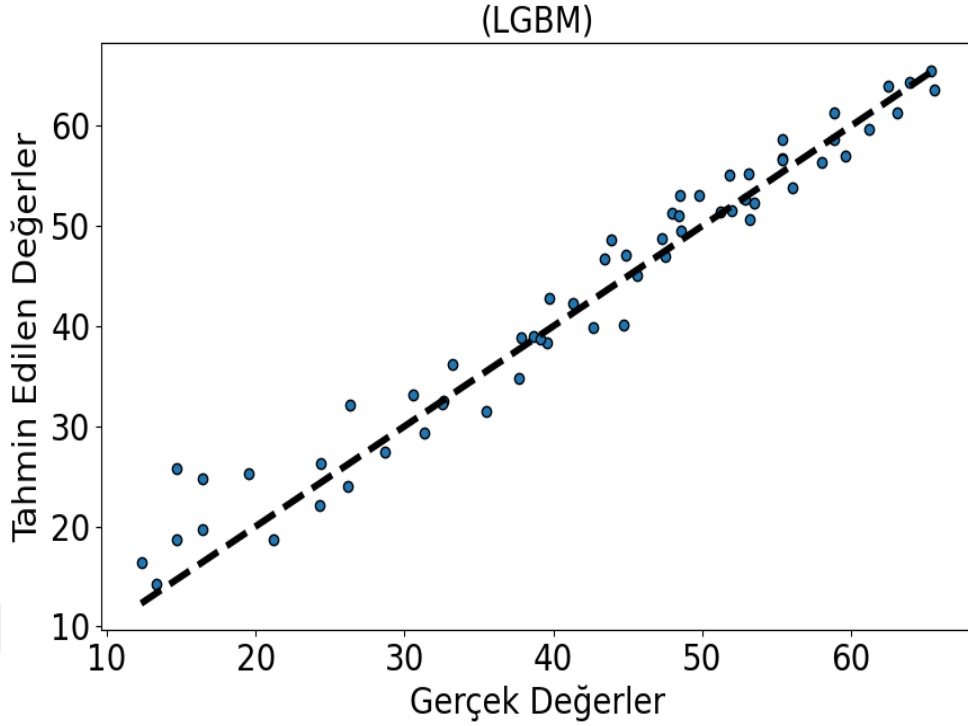
Şekil 3.11: KRHVT Alüminyum ΔT DVM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT Alüminyum ΔT için DVM modelinin tahmin performansını R^2 ve gerçek değerlerle karşılaştırmasını göstermektedir. R^2 , modelin gerçek değerlerdeki varyansı ne kadar açıkladığını gösterir. Grafik, DVM'nin Alüminyum ΔT tahmininde makul bir performans sergilediğini göstermektedir. R^2 değeri 0.6-0.8 aralığında ise model "kabul edilebilir" kabul edilebilir, ancak 0.9+ olmaması, optimizasyon veya alternatif modeller LGBM gibi denenmesi gerektiğine işaret edebilir (Şekil 3.11).



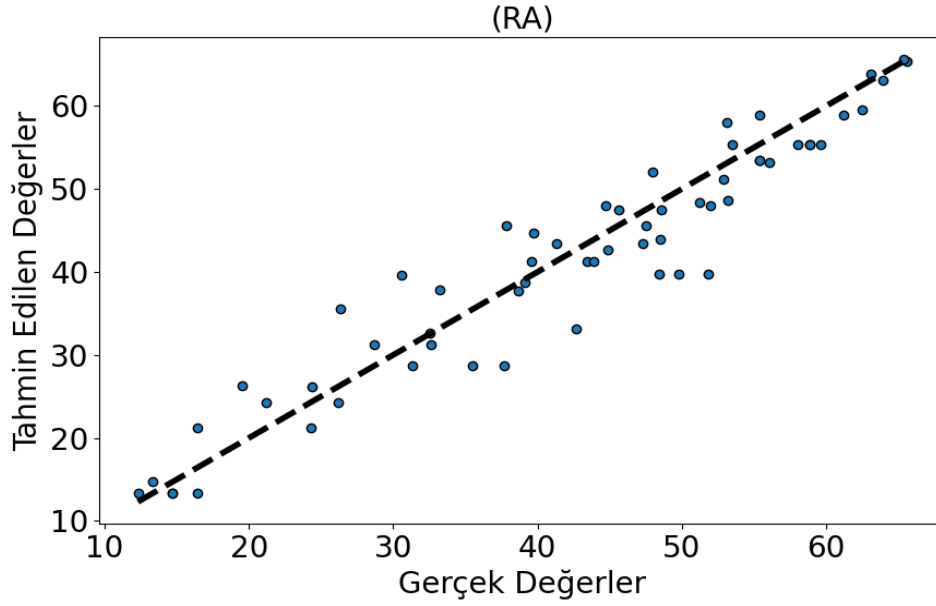
Şekil 3.12: KRHVT Alüminyum ΔT EN determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT Alüminyum ΔT değerlerinin tahmininde kullanılan EN regresyon modelinin performansı analiz edilmiştir. Şekil üzerinde, yatay ekseninde gözlemlenen gerçek ΔT değerleri, dikey ekseninde ise EN modelinin tahmin ettiği karşılıklar sunulmuştur. Veri noktalarının büyük oranda bu referans çizgisine yakın ve simetrik biçimde dağılmış olması, EN modelinin genel olarak yüksek doğrulukla tahmin gerçekleştirdiğini göstermektedir. EN modeli, KRHVT Alüminyum ΔT değişkeninin tahmininde hem doğruluk hem de kararlılık açısından istatistiksel olarak güvenilir bir yaklaşım sunmaktadır. Bu özellikleriyle, ilgili uygulama alanında tercih edilebilecek etkili modellerden biri olarak değerlendirilebilir (Şekil 3.12).



Şekil 3.13: KRHVT Alüminyum ΔT LGBM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT Alüminyum ΔT değişkenine yönelik LGBM modelinin determinasyon katsayısı R^2 temelinde tahmin performansı görselleştirilmiştir. Yatay ekseninde gerçek değerler, düşey ekseninde ise modelin tahmin ettiği değerler yer almakta olup, grafik üzerine eklenen kesikli siyah çizgi “ideal tahmin” durumunu temsil eden doğrusal referans çizgisidir. Özellikle orta ve yüksek değer aralığında model tahminlerinin gerçek değerlere olan yakınlığı, modelin bu bölgelerde daha stabil ve güvenilir çıktılar ürettiğini düşündürmektedir. Bu bağlamda, LGBM modeli KRHVT Alüminyum ΔT tahminlerinde oldukça güçlü bir regresyon performansı sergilemiş, karmaşık ilişkileri öğrenebilme kabiliyeti sayesinde R^2 değeri açısından tatmin edici sonuçlar üretmiştir. Dolayısıyla model, özellikle çok değişkenli ve doğrusal olmayan sistemlerde ΔT tahminleri için tercih edilebilir bir yöntem olarak değerlendirilebilir (Şekil 3.13).



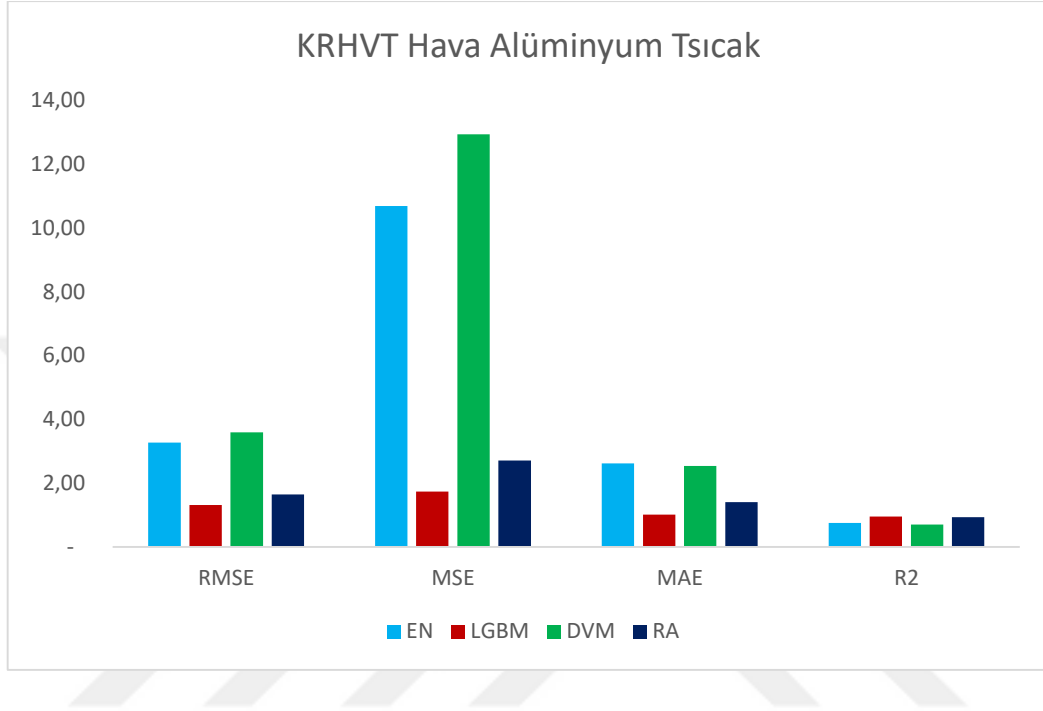
Şekil 3.14: KRHVT Alüminyum ΔT RA determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT sistemine ait Alüminyum ΔT değişkeni için RA algoritmasının determinasyon katsayısı R^2 temelinde tahmin performansını gösteren grafik sunulmaktadır. Grafikteki veri dağılımı, RA modelinin genel itibarıyla güçlü bir tahmin performansı sergilediğini göstermektedir. Modelin yüksek ΔT değerlerine verdiği tepkiler ise oldukça isabetlidir; bu aralıkta tahmin edilen değerlerin gerçek değerlere paralel bir şekilde değiştiği gözlemlenmektedir. Bu bulgu, RA modelinin yüksek ΔT 'de daha tutarlı tahminler üretebildiğini ve değişkenliği iyi yakalayabildiğini göstermektedir. RA modeli, KRHVT sisteminde Alüminyum ΔT değişkeninin tahmininde determinasyon katsayısı açısından tatmin edici bir performans ortaya koymuştur. RA modeli çok değişkenli mühendislik uygulamalarında ΔT tahminleri için güvenilir ve uygulanabilir bir alternatif olarak değerlendirilebilir (Şekil 2.14).

Tablo 3.2: KRHVT Alüminyum $T_{\text{sıcak}}$ makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü

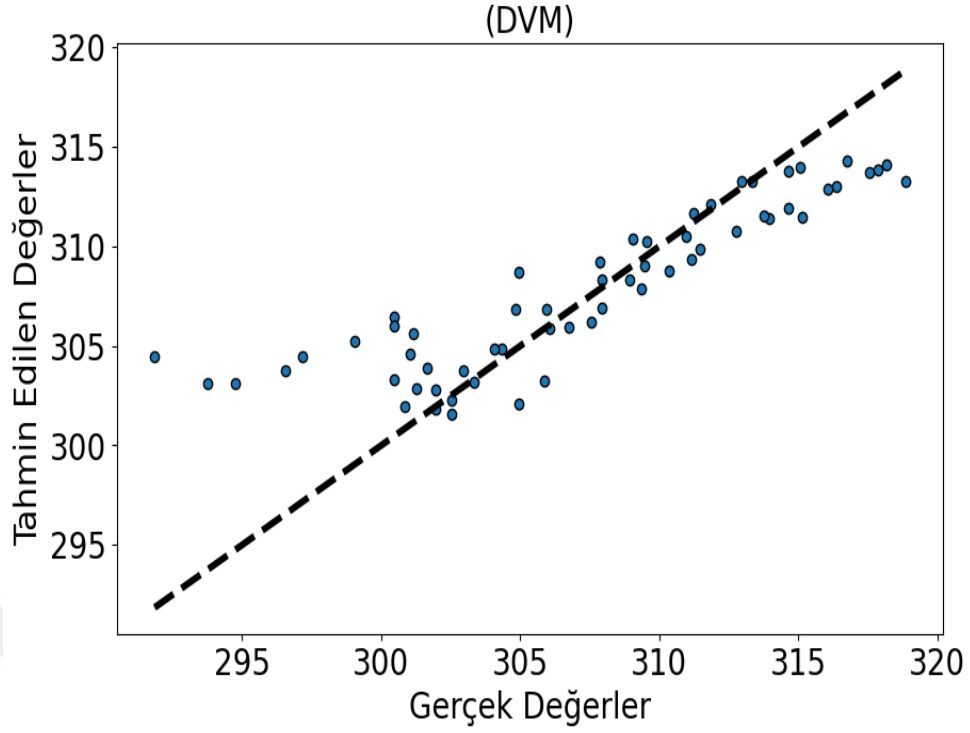
Model	RMSE	MSE	MAE	R^2
EN	3,27	10,69	2,62	0,75
LGBM	1,32	1,74	1,02	0,96
DVM	3,60	12,93	2,54	0,70
RA	1,65	2,71	1,41	0,94

KRHVT Alüminyum $T_{sıcak}$ değerlerinin tahminine yönelik dört farklı makine öğrenimi modelinin karşılaştırmalı performansını göstermektedir. En başarılı sonuçları, düşük hata oranları LGBM , RMSE 1.32, MAE 1.02 ve yüksek açıklayıcılığı R^2 : 0.96 sonucudur. Bu sonuçlara göre, LGBM ve RA, $T_{sıcak}$ tahmininde en uygun modeller olarak öne çıkmaktadır.



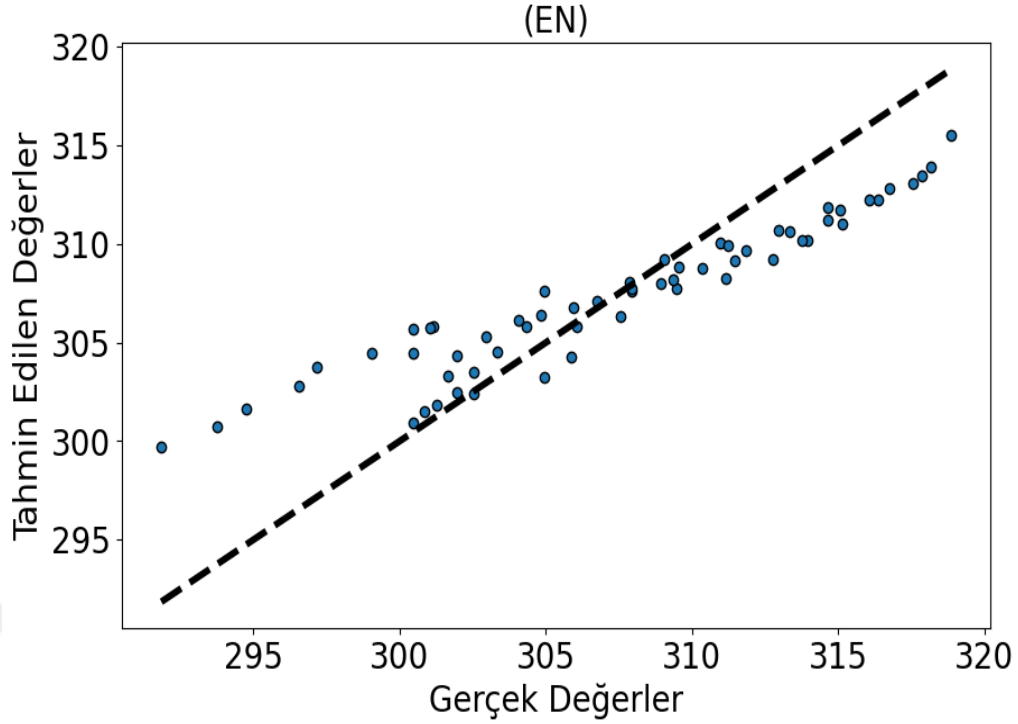
Şekil 3.15: KRHVT Alüminyum $T_{sıcak}$ makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri

KRHVT sisteminde alüminyum malzeme kullanılarak elde edilen hava sıcaklık tahminlerine ait dört farklı makine öğrenmesi algoritmasının performans karşılaştırması yapılmıştır. LGBM algoritması, en düşük RMSE, MSE ve MAE değerlerini göstererek tahmin doğruluğu açısından en başarılı model olmuştur. RA modeli ise en yüksek R^2 skorunu elde ederek sistem davranışını en iyi açıklayan model olarak öne çıkmıştır. Öte yandan, DVM algoritması, özellikle yüksek MSE ve RMSE değerleriyle diğer modellere kıyasla zayıf bir performans sergilemiştir. EN modeli ise hata değerleri açısından dengeli sonuçlar vermiş olsa da, genel doğruluk bakımından LGBM ve RA'nın gerisinde kalmıştır. Bu sonuçlar, alüminyum gövdeye sahip KRHVT sisteminde LGBM'nin öngörüselsel doğruluk açısından en uygun model olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 3.15).



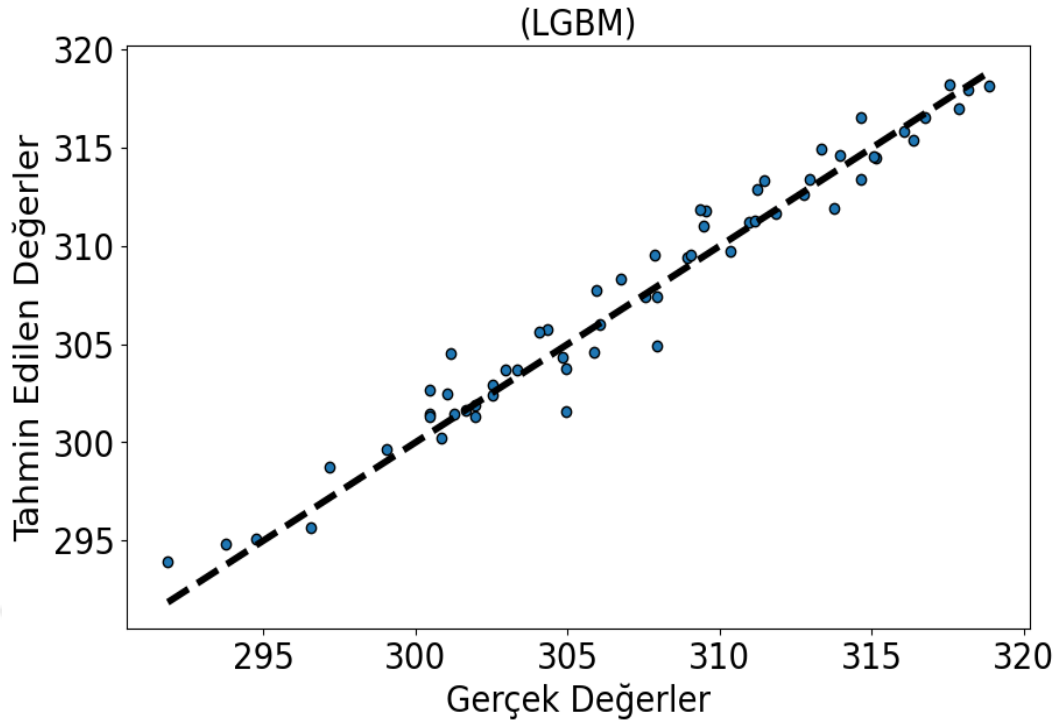
Şekil 3.16: KRHVT Alüminyum $T_{\text{sıcak}}$ DVM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT sisteminde Alüminyum $T_{\text{sıcak}}$ değişkeni için DVM algoritmasının tahmin performansını göstermektedir. Gerçek ve tahmin edilen sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında, modelin özellikle yüksek sıcaklık aralıklarının da 310 ve üzeri referans çizgisine yakın tahminler üretebildiği, ancak düşük sıcaklık segmentlerinde 295–305 değerlerinde belirgin sapmalar sergilediği görülmektedir. Bu durum, DVM'nin düşük sıcaklık değerlerini yeterince doğru tahmin edemediğini ve dar aralıkta düşük varyanslı sonuçlar ortaya koymaktadır. Tahminlerin geneli doğru eğilimi yansıtsa da, bazı öngörü hataları nedeniyle R^2 sınırlı kalmış ve modelin açıklayıcılığı zayıflamıştır. Bu bulgular, DVM'nin dar dağılımlı sıcaklık verileri için hiperparametre optimizasyonu veya alternatif kernel yapıları gibi iyileştirmelere gereksinim duyduğuna işaret etmektedir (Şekil 3.16).



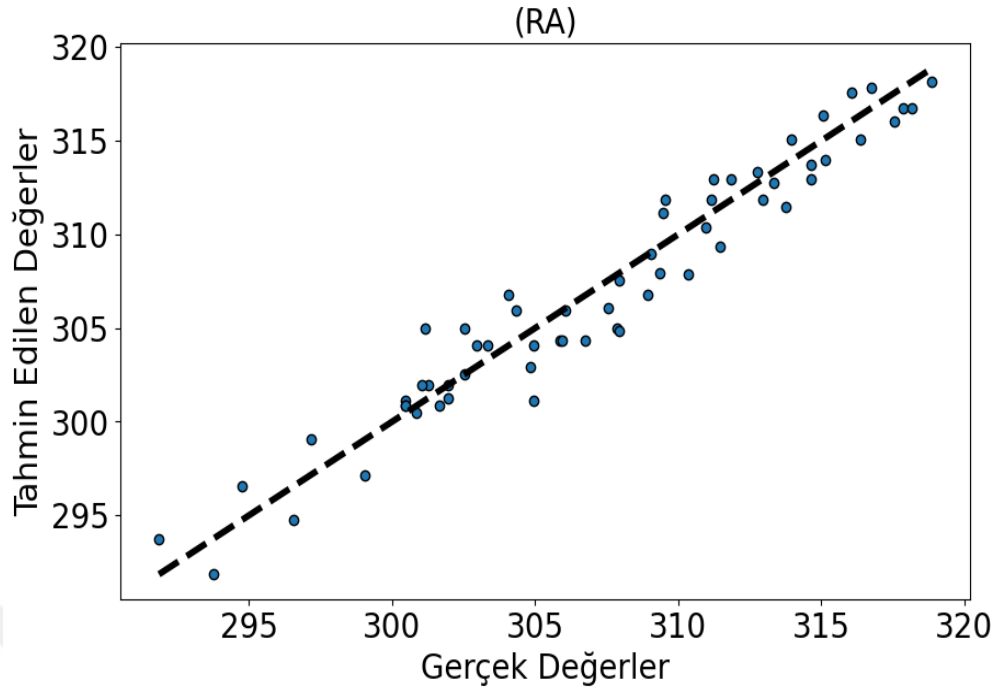
Şekil 3.17: KRHVT Alüminyum $T_{\text{sıcak}}$ EN determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT sisteminde Alüminyum $T_{\text{sıcak}}$ değişkeninin tahmininde EN algoritmasının performansını incelendiğimizde, veri noktalarının genel olarak referans çizgisine yakın konumlandığı, ancak özellikle tahminlerin sistematik olarak alt sınırdaki kaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, modelin gerçek sıcaklık değerlerini çoğu durumda eksik tahmin ettiğini yani negatif sapma eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu, modelin önyargı içerdiğini ve genelleme eğiliminde aşırı sadeleştirme yaptığını düşündürmektedir. EN algoritmasının Alüminyum $T_{\text{sıcak}}$ değişkeni için istikrarlı ancak yetersiz doğrulukta tahminler ürettiğini ortaya koymaktadır. Modelin genel eğilimi doğru bir doğrultuda olsa da, tahminlerin alt sınırdaki yoğunlaşması ve uç değerleri kapsamakta zorlanması, R^2 performansını sınırlamıştır. Bu nedenle, doğrusal varsayımlara dayalı modellerin bu tür fiziksel sistemlerdeki karmaşık ısı değişimleri karşısında sınırlı kalabildiği görülmektedir. EN'in sade yapısına karşın, daha esnek ve öğrenme kapasitesi yüksek modellerin (örneğin LGBM, RA) bu değişken üzerinde daha başarılı performans sergileyebileceği anlaşılmaktadır (Şekil 3.17).



Şekil 3.18: KRHVT Alüminyum Tsıcak LGBM determinasyon katsayısı (R^2) grafiğı

LGBM modeline ait R^2 grafiğı, modelin KRHVT sisteminde Alüminyum $T_{sıcak}$ parametresine yönelik oldukça yüksek doğrulukla tahminlerde bulunduğunu ortaya koymaktadır. Veri noktalarının büyük ölçüde referans çizgisi üzerinde veya yakınında kümelenmesi, LGBM algoritmasının öğrenme kapasitesinin yüksek olduğunu ve modelin hem düşük sapma hem de düşük varyans özellikleri sergilediğini göstermektedir. Modelin tüm sıcaklık aralığında tutarlı ve sistematik bir tahmin performansı ortaya koyması, regresyon problemlerinde LGBM'nin güçlü genelleme yeteneğini doğrular niteliktedir. Bu doğrultuda, LGBM algoritması, doğrusal olmayan ilişkileri başarıyla modelleyerek Alüminyum $T_{sıcak}$ değişkeninin öngörüsünde üstün bir performans sergilemiştir. Bu sonuç, LGBM'nin söz konusu parametre için tercih edilebilir ve güvenilir bir tahminleme yöntemi olduğunu akademik olarak desteklemektedir (Şekil 3.18).



Şekil 3.19: KRHVT Alüminyum $T_{sıcak}$ RA determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

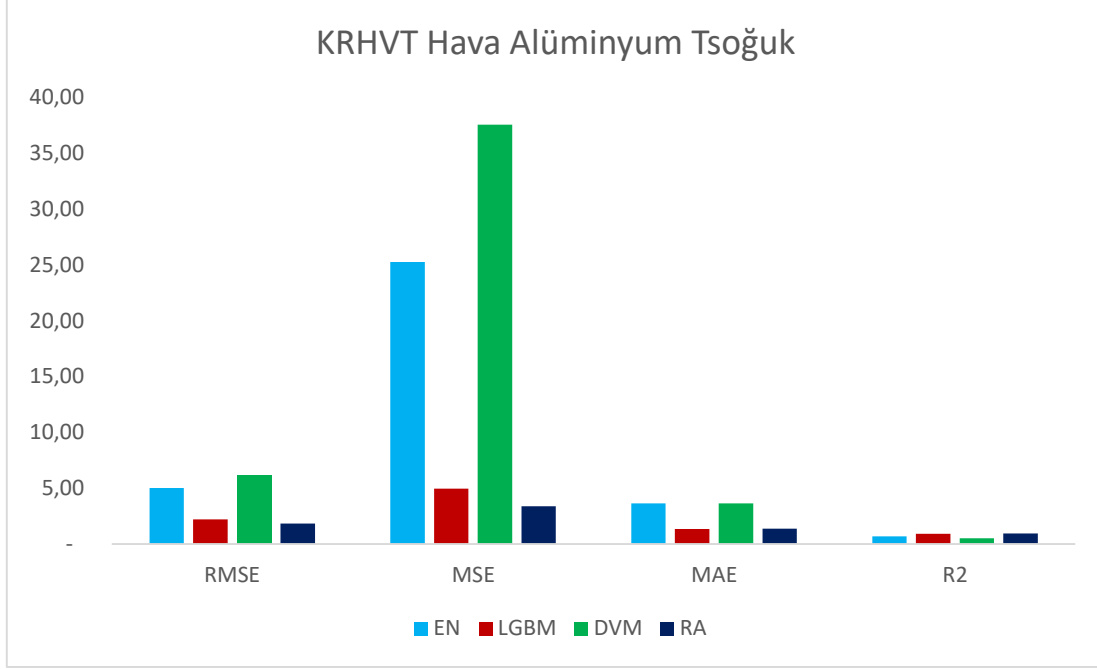
RA modelinin KRHVT sisteminde Alüminyum $T_{sıcak}$ parametresine yönelik tahmin performansını incelendiğinde modelin gerçek ve tahmin edilen değerler arasında yüksek derecede korelasyon sağladığını göstermekte olup, R^2 güçlü bir açıklayıcılığa sahip olduğunu işaret etmektedir. Değişkenler arasında çoklu bağlantının bulunduğu durumlarda bile model, öğrenme kapasitesini bozmadan dengeli tahminler üretebilmiştir (Şekil 3.19).

Tablo 3.3: KRHVT Alüminyum $T_{soğuk}$ makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü

Model	RMSE	MSE	MAE	R^2
EN	5,02	25,24	3,65	0,69
LGBM	2,23	4,96	1,36	0,94
DVM	6,13	37,53	3,64	0,53
RA	1,84	3,39	1,38	0,96

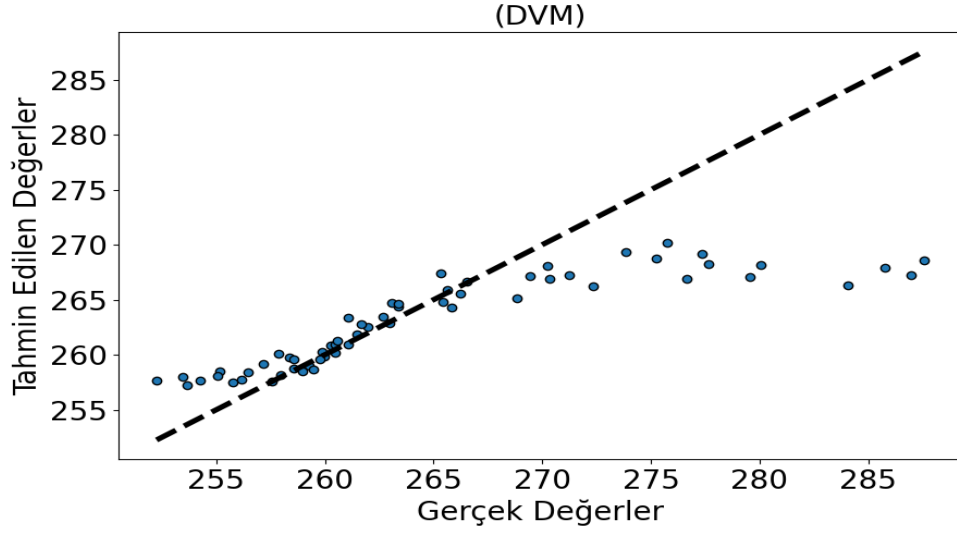
RA modelinin, KRHVT alaşımlı alüminyumun soğuk deformasyon tahmini için en yüksek performansı sergilediğini ortaya koymaktadır. LGBM modeli de RA'ya yakın bir performans göstererek alternatif bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Öte yandan, EN ve

DVM modellerinin tahmin performansları, sırasıyla orta ve düşük düzeyde kalmıştır. Bu modellerin, mevcut veri seti üzerinde daha fazla optimizasyon gerektirdiği veya farklı mühendislik problemlerinde daha uygun olabileceği değerlendirilmektedir.



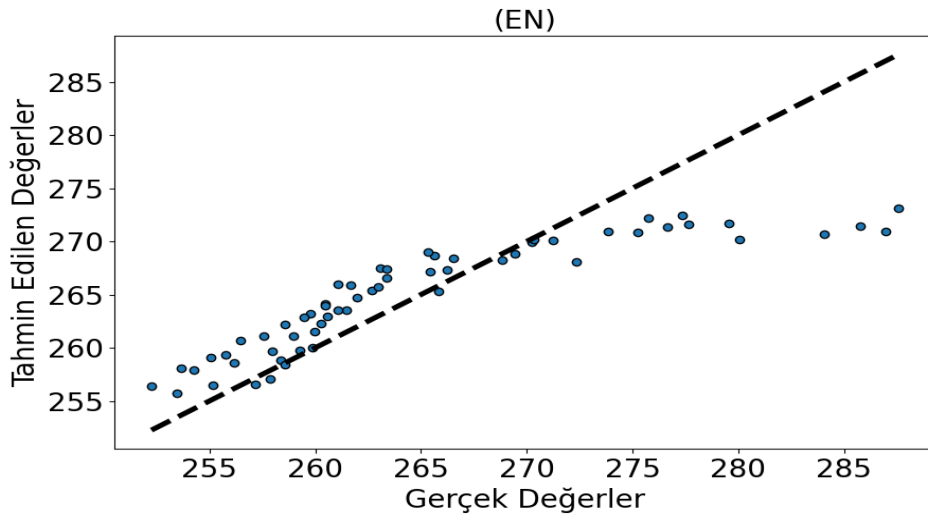
Şekil 3.20: KRHVT Alüminyum T_{soğuk} makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri

KRHVT sisteminde alüminyum gövde kullanılarak elde edilen soğuk çıkış sıcaklığı tahminlerinin test sonuçları sunulmuştur. Dört farklı makine öğrenmesi algoritmasının performansı değerlendirildiğinde, LGBM ve RA modellerinin düşük hata oranlarıyla öne çıktığı, buna karşılık DVM modelinin özellikle MSE metriğinde yüksek hata değerleri göstererek zayıf bir performans sergilediği görülmektedir. EN modeli ise genel olarak yüksek hata değerleriyle düşük başarı sağlamıştır. Bu bulgular, alüminyum malzeme altında soğuk çıkış tahminlerinde LGBM ve RA algoritmalarının daha güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir (Şekil 2.20).



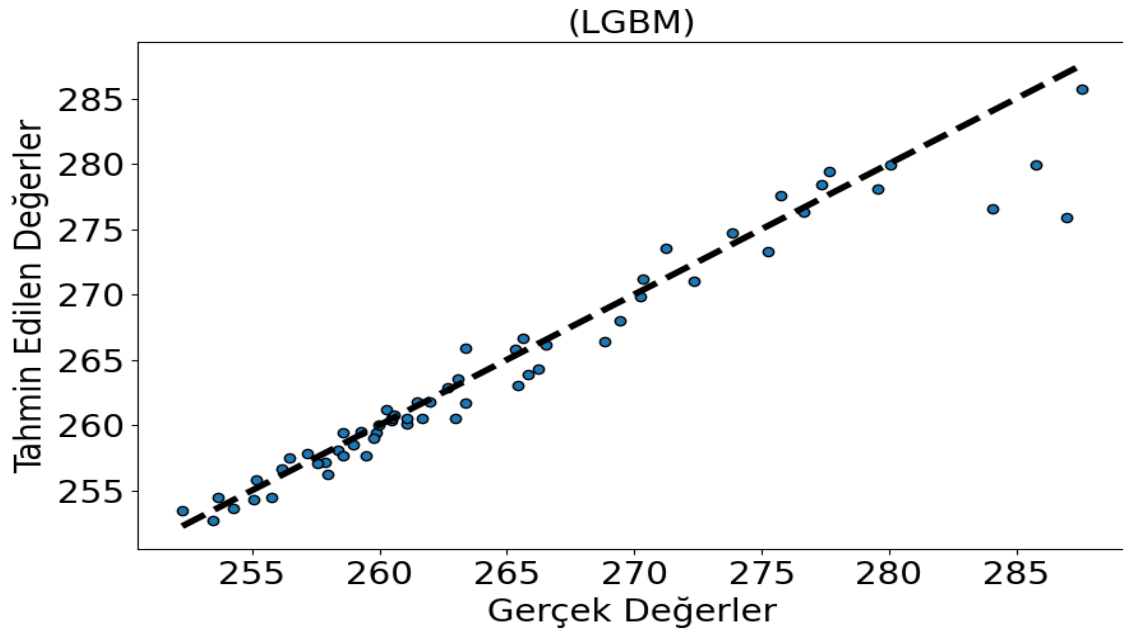
Şekil 3.21: KRHVT Alüminyum T_{s10ğuk} DVM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT sisteminde Alüminyum T_{s10ğuk} değişkeninin DVM ile tahmin performansını göstermektedir. Grafikte, modelin ideal doğrusal ilişkiyi yakalayamadığı ve özellikle yüksek sıcaklıklarda tahminlerin dar bir aralıkta yoğunlaştığı, yani doygunluk eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu durum, DVM'nin yüksek değerleri ayırt etmede başarısız olduğunu ve genel doğruluk seviyesinin düştüğünü ortaya koymaktadır. Düşük determinasyon katsayısı (R^2) ise modelin verideki varyansın büyük kısmını açıklayamadığını ve tahmin hatalarının ciddi olduğunu işaret etmektedir. Bunun sebepleri arasında uygun çekirdek fonksiyonunun seçilmemesi, parametre optimizasyonunun yetersizliği veya verinin DVM ile uyumsuzluğu sayılabilir. DVM bu problemde güvenilir tahminler sunamamıştır (Şekil 3.21).



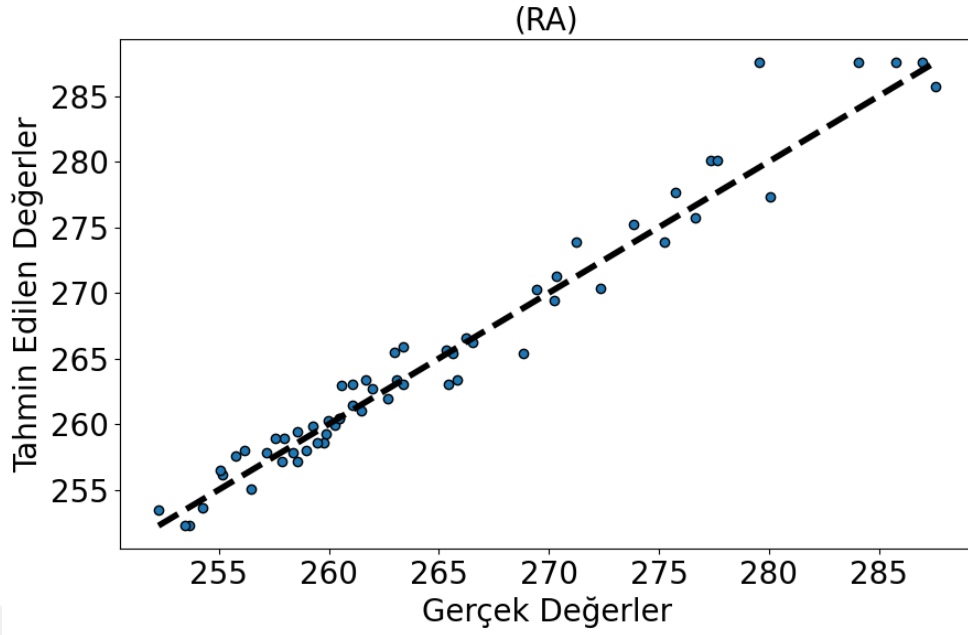
Şekil 3.22: KRHVT Alüminyum T_{s10ğuk} EN determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT sisteminde Alüminyum $T_{soğuk}$ parametresinin EN modeli ile tahmin performansını göstermektedir. Model genel olarak orta düzeyde tahmin başarısı sergilemekle birlikte, özellikle yüksek sıcaklıklarda tahminlerde belirgin sapmalar gözlenmiştir. Bu, EN'nin uç değerlerde genelleme yeteneğinin sınırlı olduğunu ve varyansı yeterince temsil edemediğini göstermektedir. L1 ve L2 düzenlileştirmeye rağmen, doğrusal olmayan ve yüksek varyanslı verilerde performansı düşmüştür (Şekil 3.22).



Şekil 3.23: KRHVT Alüminyum $T_{soğuk}$ LGBM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT sisteminde Alüminyum $T_{soğuk}$ parametresinin tahmininde LGBM modelinin performansını göstermektedir. Veri noktalarının ideal doğrusal çizgi çevresinde sıkı şekilde toplanması, LGBM'nin yüksek tahmin doğruluğu ve güçlü genelleme yeteneği sergilediğini ortaya koymaktadır. Model, karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri etkili şekilde yakalamakta, uç değerlerde dahi tahminleri referans çizgisine yakın tutmaktadır. Yüksek R^2 , LGBM'nin KRHVT sürecindeki Alüminyum $T_{soğuk}$ parametresi tahmininde güvenilir ve tutarlı bir performans sunduğunu doğrulamaktadır (Şekil 3.23).



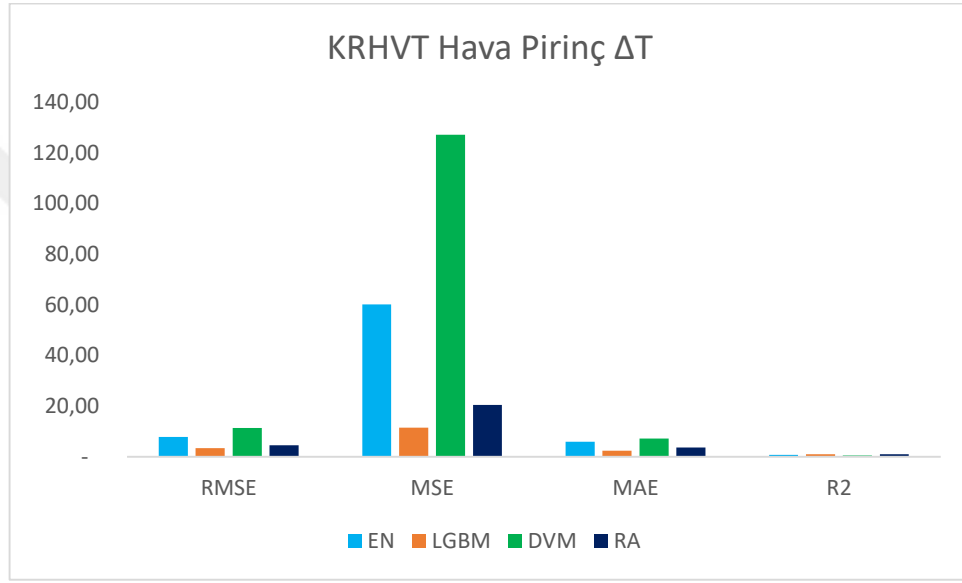
Şekil 3.24: KRHVT Alüminyum $T_{soğuk}$ RA determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT sisteminde Alüminyum $T_{soğuk}$ sıcaklık değerlerinin RA yöntemiyle tahmin performansını göstermektedir. Veri noktalarının ideal doğrusal çizgi etrafında yoğunlaşması, RA modelinin yüksek doğruluk ve güçlü determinasyon katsayısı R^2 ile başarılı bir tahmin sunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle düşük ve orta sıcaklıklarda isabet oranı yüksek olup, üst seviyelerdeki hafif sapmalar genel performansı etkilememektedir. L2 regülasyon bileşeni sayesinde aşırı öğrenme engellenmiş ve modelin genelleme kapasitesi artırılmıştır. RA'nın doğrusal ilişkilerin baskın olduğu ve değişkenler arası çoklu bağlantının bulunduğu sistemlerde, düşük varyans ve yüksek kararlılık sağlayarak güvenilir tahminler sunduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, RA'nın KRHVT sistemindeki Alüminyum $T_{soğuk}$ parametresi için etkili ve uygulanabilir bir model olduğunu göstermektedir (Şekil 3.24).

Tablo 3.4: KRHVT Pirinç ΔT makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü

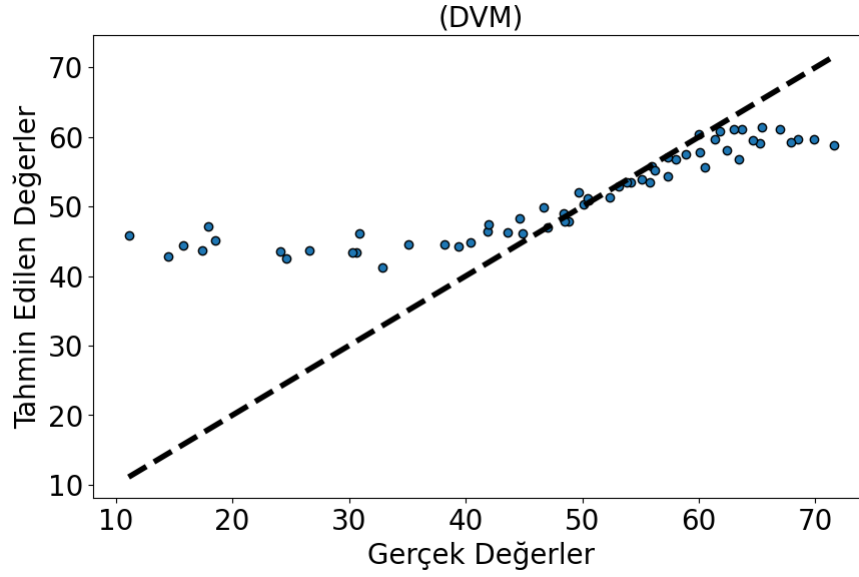
Model	RMSE	MSE	MAE	R^2
EN	7,76	60,21	5,86	0,76
LGBM	3,38	11,40	2,31	0,95
DVM	11,28	127,14	7,15	0,49
RA	4,52	20,39	3,56	0,92

KRHVT sisteminde alaşımlı alüminyumun sıcaklık değişimi ΔT tahmininde kullanılan çeşitli makine öğrenimi modellerinin performans karşılaştırmasını sunmaktadır. Analizler, LGBM modelinin en yüksek doğruluk ve en düşük hata oranlarıyla üstün performans sergilediğini göstermektedir. RA, LGBM’yi takip ederek güçlü bir alternatif oluştururken, EN orta düzeyde, DVM ise düşük performans göstermiştir. Özellikle ilişkileri etkili şekilde yakalayan ağaç tabanlı LGBM algoritmasının, alüminyum alaşımlarının termal davranış tahmininde en uygun yöntem olduğunu ortaya koymakta ve makine öğrenimi tekniklerinin malzeme bilimi uygulamalarındaki potansiyelini vurgulamaktadır.



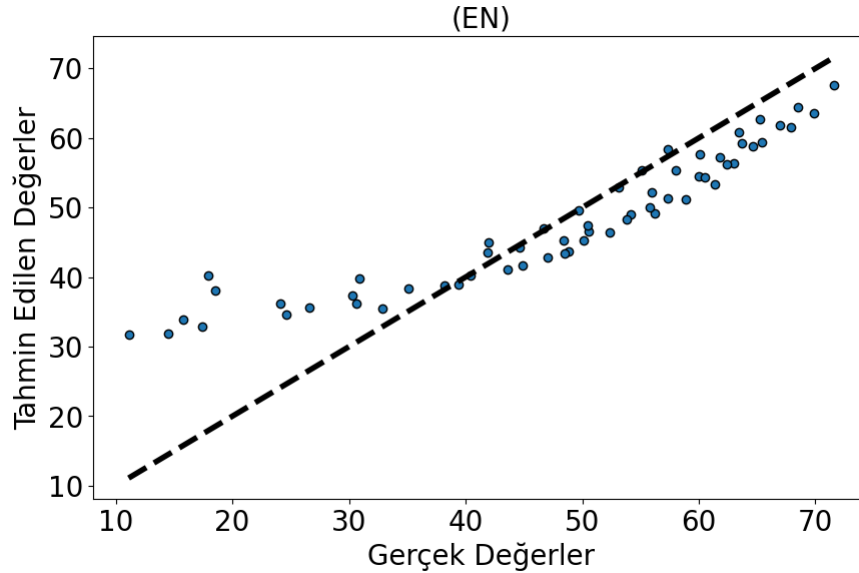
Şekil 3.25: KRHVT Pirinç ΔT makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri

KRHVT sisteminde Pirinç malzemeye ait ΔT tahmininde kullanılan EN, LGBM, DVM ve RA algoritmalarının performanslarını kapsamlı bir şekilde karşılaştırmaktadır. Elde edilen sonuçlar, LGBM modelinin tüm hata metriklerinde RMSE, MSE, MAE üstün başarı gösterdiğini ve yüksek R^2 değeri ile veri varyansını etkin biçimde açıkladığını ortaya koymaktadır. RA ve EN modelleri orta düzey performans sergilerken, DVM’nin yüksek hata oranları ve düşük R^2 değeri, modelin bu problem bağlamında yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu bulgular, doğrusal olmayan ve karmaşık ilişkilerin yoğun olduğu veri setlerinde, ağaç tabanlı LGBM algoritmasının daha yüksek öngörü doğruluğu ve kararlılık sağladığını vurgulamaktadır. Pirinç ΔT tahmini için LGBM, hem tahmin doğruluğu hem de model kararlılığı açısından en uygun yöntem olarak önerilmektedir (Şekil 3.25).



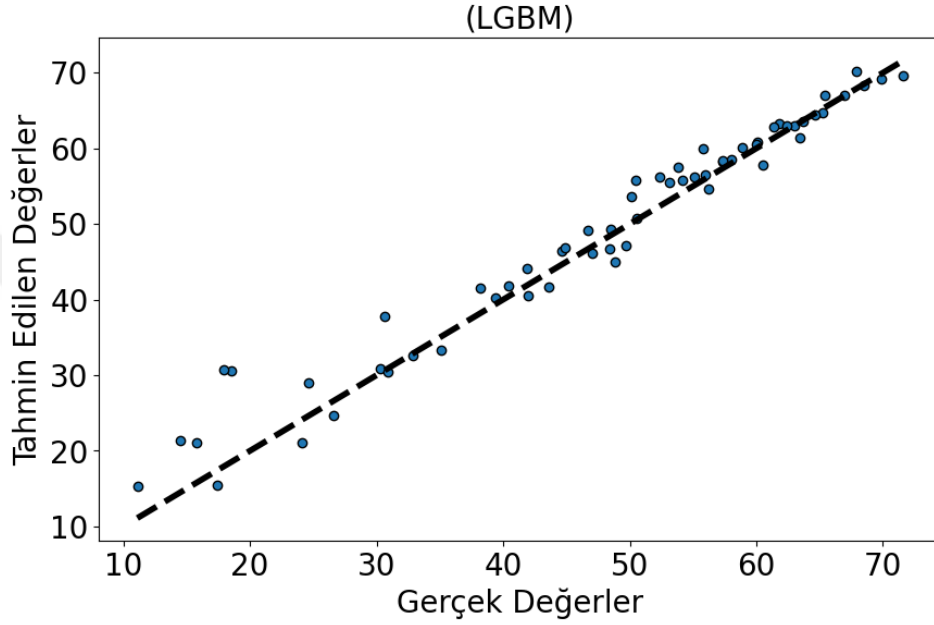
Şekil 3.26: KRHVT Pirinç ΔT DVM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT sisteminde pirinç malzemenin ΔT tahmininde DVM modelinin performansını göstermektedir. Grafik, DVM'nin özellikle düşük ve orta ΔT değerlerinde sınırlı varyasyon göstererek tahminlerini sabit bir aralıkta yoğunlaştırdığını ortaya koymaktadır. Gerçek değerlerin artış eğilimini yeterince takip edememesi ve tahminlerin gerçek veriler etrafında dağılmaması nedeniyle modelin R^2 değeri oldukça düşüktür. DVM'nin sınırlı öğrenme ve genelleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, DVM modeli pirinç ΔT tahminlerinde uygun bir seçenek değildir (Şekil 3.26).



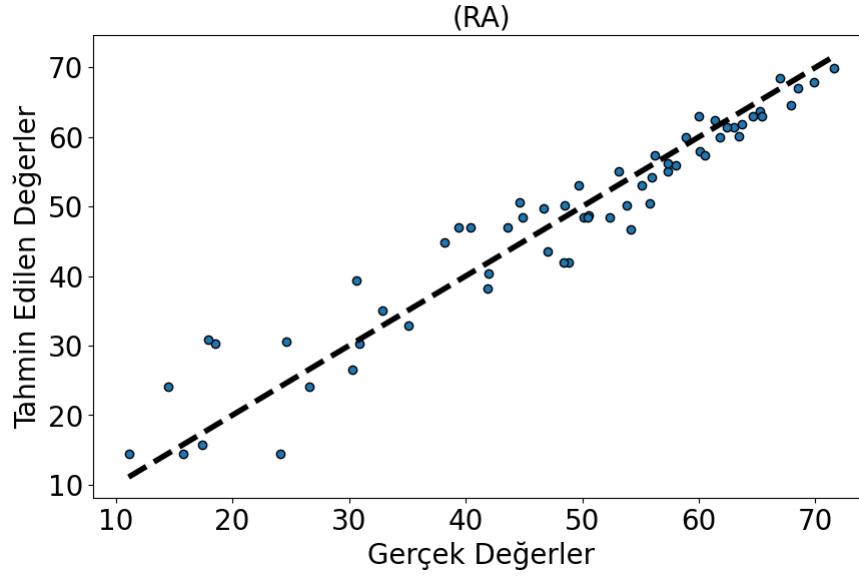
Şekil 3.27: KRHVT Pirinç ΔT EN determinasyon katsayısının (R^2) grafiği

KRHVT sisteminde pirinç malzemeye ait ΔT tahmininde EN modelinin performansını göstermektedir. Model, orta ve yüksek ΔT değerlerinde gerçek değerlerle uyumlu tahminler yaparak genel eğilimi başarılı şekilde yakalamış; ancak düşük ΔT aralığında sistematik sapmalar ve aşırı düzeltirme nedeniyle tahmin doğruluğu azalmıştır. Bu sonuçlar, EN modelinin uç değerlerde sınırlı genelleme kapasitesine sahip olduğunu ve daha karmaşık modellerle karşılaştırıldığında performansının orta düzeyde kaldığını ortaya koymaktadır (Şekil 3.27).



Şekil 3.28: KRHVT Pirinç ΔT LGBM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT sisteminde pirinç malzemenin sıcaklık ΔT tahmininde LGBM modelinin yüksek doğruluk ve güçlü genelleme performansını göstermektedir. Model, geniş veri aralığında gerçek değerlerle yüksek uyum sergileyerek hem düşük hem de yüksek ΔT değerlerini başarılı şekilde tahmin etmiştir. Düşük değerlerdeki sınırlı ve rastlantısal sapmalar genel performansı etkilememiştir. LGBM'nin karmaşık ve doğrusal olmayan veri ilişkilerini etkin öğrenme yeteneği, modelin üstün performansının temel nedenidir. Bu kapsamda LGBM, hem doğruluk hem de genelleme kapasitesi açısından, incelenen yöntemler arasında öne çıkan bir performans sergilemiştir. (Şekil 3.28).



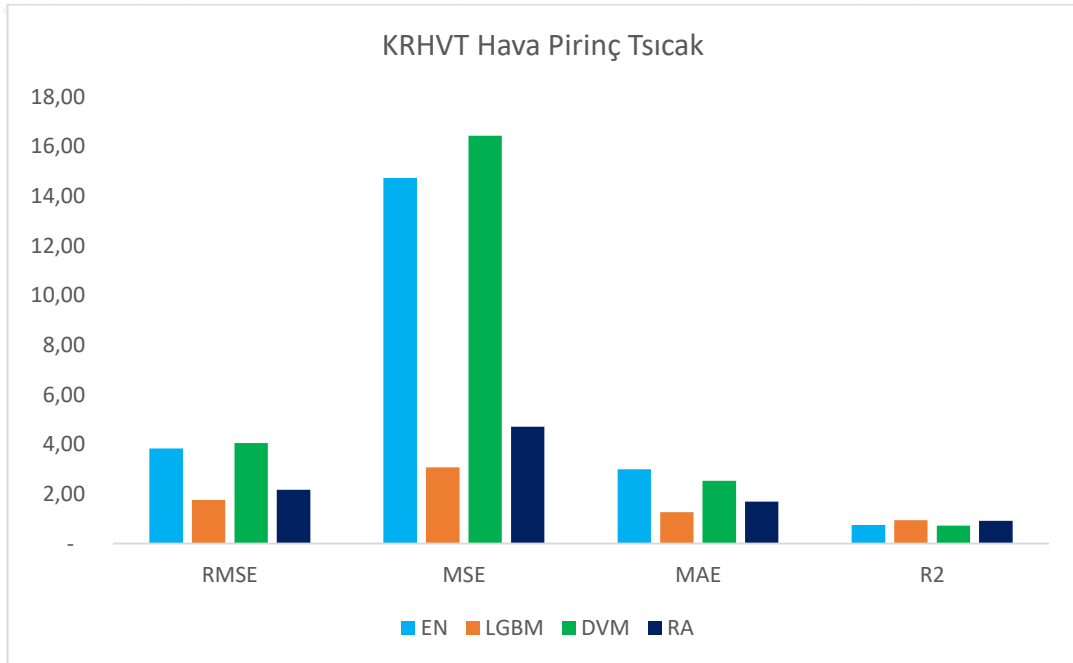
Şekil 3.29: KRHVT Pirinç ΔT RA determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT sisteminde pirinç malzemeye ait ΔT tahmininde RA algoritmasının performansını göstermektedir. Model, genel olarak gerçek değerlerle yüksek uyum sergileyerek özellikle orta ve yüksek ΔT aralıklarında başarılı tahminler yapmıştır. Düşük ΔT değerlerinde bazı sapmalar gözlenmekle birlikte, bunlar modelin genel performansını önemli ölçüde etkilememiştir. RA'nın karmaşık veri yapılarında güçlü öğrenme kapasitesi, modelin yüksek determinasyon katsayısı R^2 ile desteklenmektedir. RA modeli, özellikle çok sayıda özelliğe sahip karmaşık veri yapılarında etkili tahmin gücüyle öne çıkmakta; ancak bazı düşük değerli bölgelerdeki sapmalar, modelin bu bölgelerde daha fazla optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Buna rağmen, RA modeli genel doğruluk açısından güvenilir ve uygulanabilir bir tahmin aracı olarak değerlendirilebilir (Şekil 3.29).

Tablo 3.5: KRHVT Pirinç $T_{sıcak}$ makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü

Model	RMSE	MSE	MAE	R^2
EN	3,84	14,74	2,99	0,75
LGBM	1,75	3,07	1,26	0,95
DVM	4,05	16,43	2,53	0,72
RA	2,17	4,70	1,69	0,92

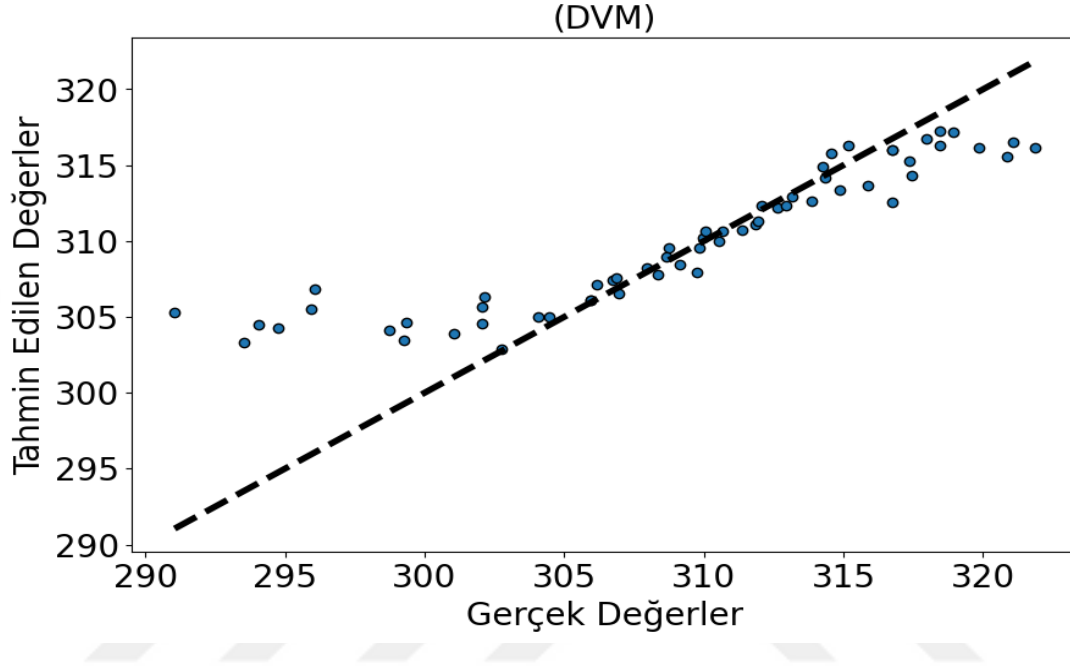
KRHVT sisteminde pirinç alaşımlarının sıcaklık tahmininde LGBM modeli en yüksek doğruluk ve kararlılığı sağlamış, %95 veri varyansını açıklamıştır. RA modeli güçlü lineer performans sergilerken, EN ve DVM modelleri daha düşük başarı göstermiştir. Bulgular, pirinç alaşımlarının termal davranışında non-lineer ilişkileri LGBM'nin etkin şekilde yakaladığını ve bu modelin endüstriyel uygulamalarda tercih edilebileceğini ortaya koymaktadır. Endüstriyel ölçekte termal yönetim sistemlerinin optimizasyonu için pratik bir model önermiştir. LGBM tabanlı yaklaşımın hem akademik çalışmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda pirinç alaşımlarının termal davranışının tahmininde güvenle kullanılabileceği kanıtlanmıştır.



Şekil 3.30: KRHVT Pirinç Tıscak makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri

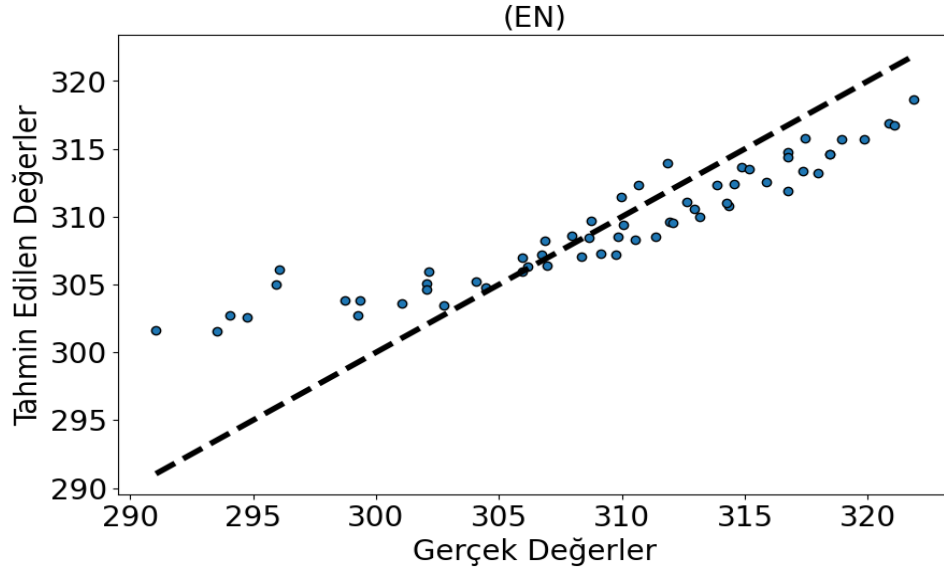
KRHVT sisteminde pirinç malzemeye ait Tıscak tahmin performansını gösteren dört makine öğrenimi algoritmasının temel regresyon metrikleri karşılaştırılmıştır. LGBM modeli, tüm hata metriklerinde RMSE, MSE, MAE en düşük değerleri vererek üstün doğruluk ve kararlılık sergilemiş, ayrıca R^2 değerinde en yüksek performansı göstermiştir. RA modeli, LGBM'den sonra iyi performans sergileyerek özellikle R^2 değerinde yüksek doğruluk sağlamıştır. EN modeli, orta seviyede hata değerleri ve R^2 ile ara performans

sunarken, DVM modeli, özellikle MSE ve RMSE’de yüksek hata değerleri ile en düşük performansa sahip olup, modelin genelleme kapasitesinin sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. KRHVT sisteminde pirinç malzeme sıcaklık tahmininde makine öğrenimi modellerinin karşılaştırmalı performansını ortaya koymakta ve LGBM tabanlı modellerin endüstriyel uygulamalarda öncelikli tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir (Şekil 3.30).



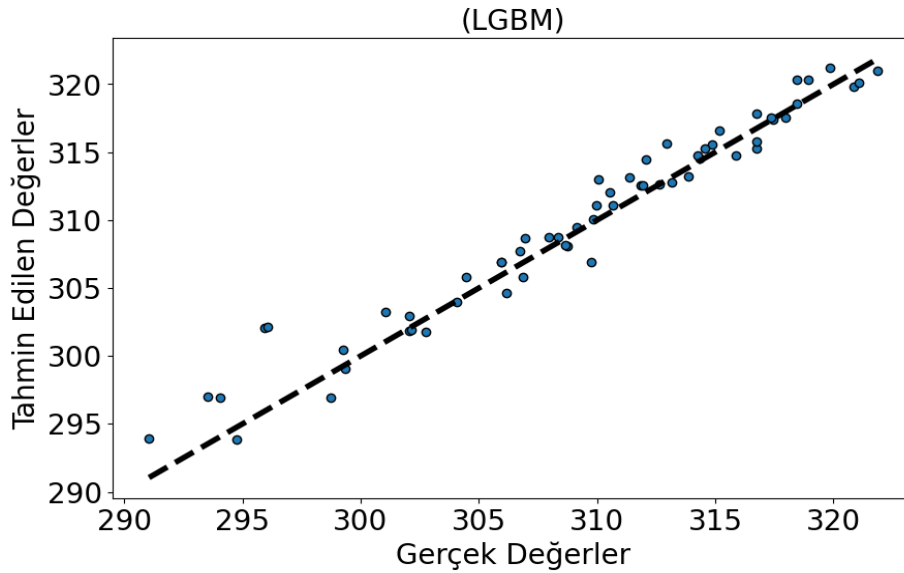
Şekil 3.31: KRHVT Pirinç $T_{\text{sıcak}}$ DVM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

DVM modelinin KRHVT pirinç alaşımının sıcaklık tahmin performansını gerçek ve tahmin değerleri üzerinden analiz etmektedir. Model, özellikle yüksek sıcaklıklarda (305–315°C) sistematik alt tahminler yapmış ve mutlak hata 5–25°C arasında değişmiştir. Hesaplanan R^2 yaklaşık 0.65 olup, modelin varyansın sadece %65’ini açıklayabildiğini göstermektedir. DVM bu problem için optimal olmamakla birlikte, uygun optimizasyonlarla R^2 yaklaşık 0.85 seviyelerine ulaşabilir. Bulgular, malzeme karakterizasyonunda model seçiminde hem istatistiksel performans hem de fiziksel uyumun önemini vurgulamaktadır (Şekil 3.31).



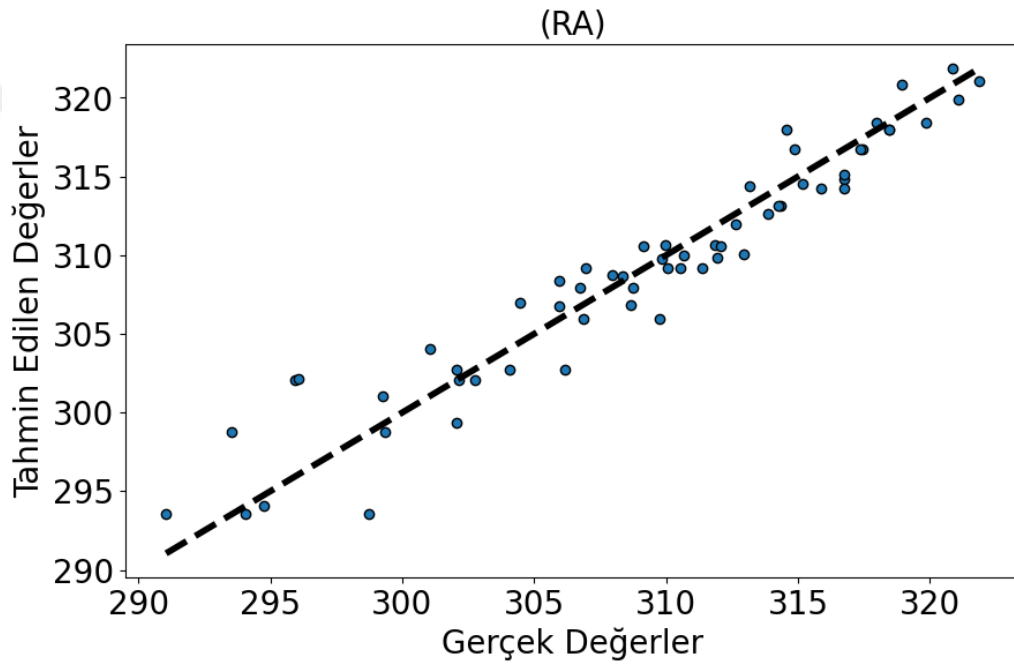
Şekil 3.32: KRHVT Pirinç $T_{sıcak}$ EN determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT sisteminde pirinç malzemenin $T_{sıcak}$ değerlerine ilişkin tahminlerin, EN regresyon modeliyle elde edilen sonuçları sunulmaktadır. EN modeli, pirinç malzeme sıcaklık tahminlerinde dengeli fakat sınırlı bir performans sergilemektedir. EN'nin KRHVT sisteminde pirinç malzeme sıcaklığı tahmininde kısmen başarılı olduğunu, ancak düşük sıcaklık aralıklarında sapmalar ürettiğini ortaya koymaktadır (Şekil 3.32).



Şekil 3.33: KRHVT Pirinç $T_{sıcak}$ LGBM determinasyon katsayısının (R^2) grafiği

LGBM algoritmasının KRHVT pirinç alaşımı sıcaklık tahmin performansını, gerçek değerler ile tahmin edilen değerlerin dağılımı üzerinden değerlendirmektedir. Gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki mutlak sapma 0 ile 5°C arasında değişmekte olup, özellikle 290°C’de tam uyum sağlanmıştır. Kritik noktalarda ise; 315°C’de yaklaşık 2°C alt tahmin ve 320°C’de 3°C üst tahmin gözlemlenmiştir. Model geliştirme sürecinde fiziksel temelli kısıtlamaların (örneğin Fourier ısı iletim yasası) entegrasyonu, çoklu ölçekli (mikroyapı-özellik) modelleme ve dinamik termal davranış tahmini için zaman serisi analizlerinin uygulanması önerilmektedir. LGBM algoritmasının malzeme biliminde termal tahminlerde altın standart olarak konumlanabileceğini göstermektedir (Şekil 3.33).



Şekil 3.34: KRHVT Pirinç $T_{\text{sıcak}}$ RA determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

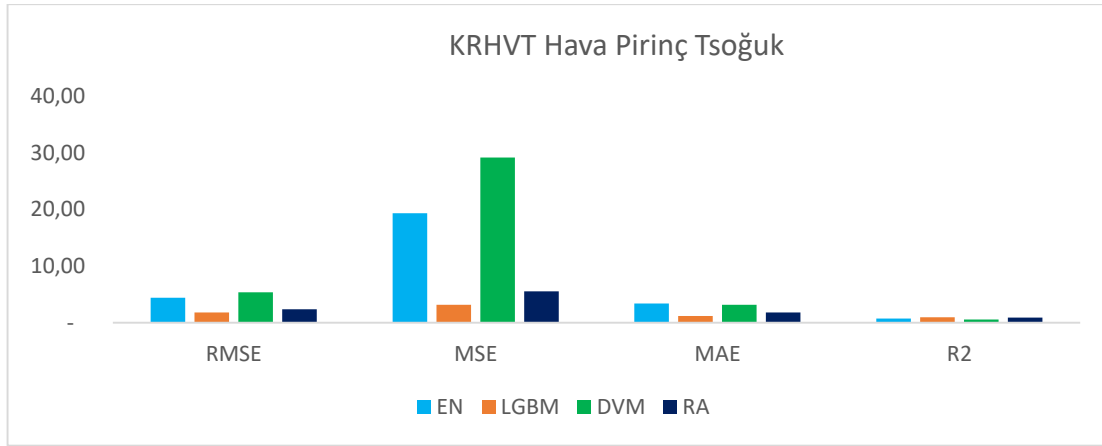
RA modelinin KRHVT pirinç alaşımının sıcaklık tahmin performansını, gerçek ve model tarafından tahmin edilen değerler arasındaki ilişkinin görsel temsili üzerinden değerlendirmektedir. RA modeli, pirinç alaşımının sıcaklık tahmininde %89-92 arasında değişen determinasyon katsayısı (R^2) ile orta-yüksek doğrulukta sonuçlar vermektedir. Model, 290-320°C aralığında 2-8°C arasında tahmin sapmaları göstermekte, özellikle 290°C’de tam uyum sağlamakla birlikte, 305°C ve 320°C’de sistematik olarak alt tahmin yapmaktadır. MAE yaklaşık 3.2°C’dir. 310-320°C yüksek sıcaklık aralığındaki non-lineer termal etkileşimler ve faz geçişlerini yeterince yakalayamamaktadır. Ayrıca, bu yüksek sıcaklık bölgesinde veri azlığı ve yüzey-altı sıcaklık gradyanlarının modele dahil edilmemesi

modelin performansını sınırlandırmaktadır. RA modeli düşük ve orta sıcaklıklarda iyi tahmin yaparken, yüksek sıcaklıklardaki karmaşık ve non-lineer süreçleri modellemek için geliştirmeye ihtiyaç duymaktadır (Şekil 3.34).

Tablo 3.6: KRHVT Pirinç $T_{soğuk}$ makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü

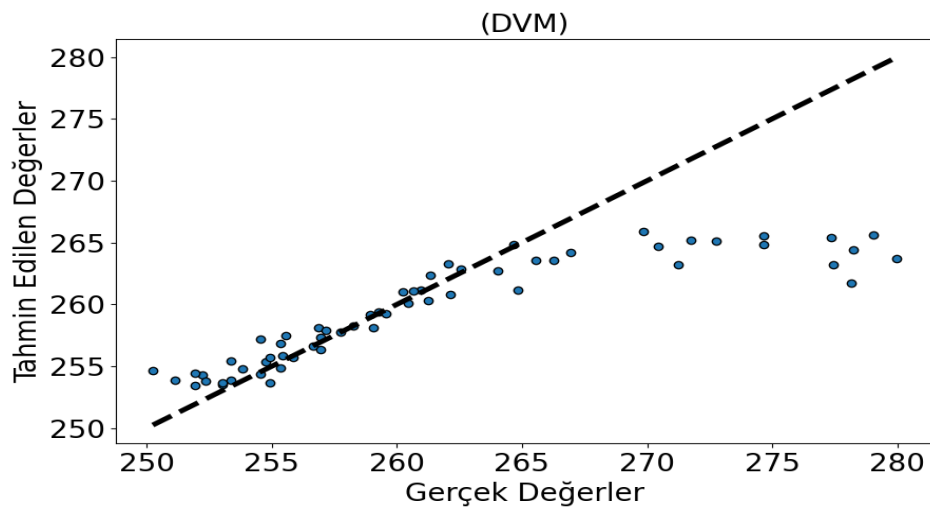
Model	RMSE	MSE	MAE	R^2
EN	4,40	19,38	3,39	0,72
LGBM	1,79	3,20	1,21	0,95
DVM	5,41	29,23	3,17	0,57
RA	2,36	5,57	1,81	0,92

KRHVT pirinç alışıminın soğuk sıcaklık tahmininde kullanılan dört farklı makine öğrenimi modeline ait test seti performans sonuçlarını kapsamaktadır. Performans ölçütleri arasında RMSE, MSE, MAE ve R^2 bulunmaktadır. LGBM en iyi performansı göstermiştir; RMSE 1.79, MAE 1.21 ve R^2 0.95 ile sistemdeki sıcaklık varyansının %95'inden fazlasını açıklamaktadır. Hem hata değerleri düşük hem de tahmin doğruluğu yüksektir. RA ikinci en başarılı model olup, RMSE 2.36, MAE 1.81 ve R^2 0.92 ile doğrusal modeller arasında en iyi stabiliteyi sağlamaktadır. EN orta düzeyde performans göstererek, varyansın %72'sini açıklamış ve hata metrikleri açısından daha düşük başarı sağlamıştır. DVM ise en düşük performansla RMSE 5.41, MAE 3.17 ve R^2 0.57 değerlerine ulaşmış, karmaşık termal ilişkileri yeterince modelleyememiştir. LGBM en üstün sonuçları verirken, RA doğrusal modeller arasında güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır; EN ve DVM ise daha düşük doğruluktadır.



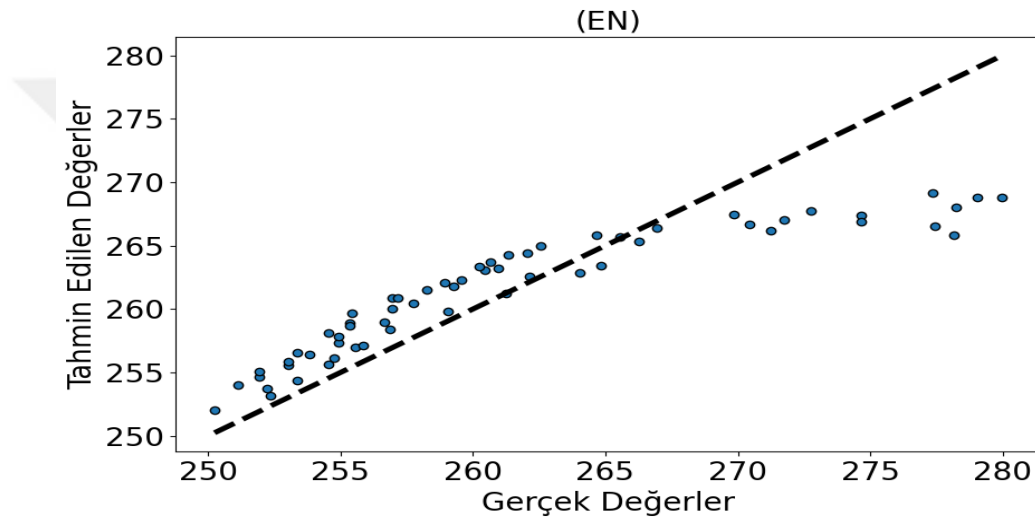
Şekil 3.35: KRHVT Pirinç $T_{soğuk}$ makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri

KRHVT pirinç alaşımının soğuk işlem koşullarındaki termomekanik davranışını tahmin etmek üzere dört farklı makine öğrenimi algoritmasının performans metrikleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Sunulan grafiksel temsilde, modellerin Kök Ortalama RMSE, MSE ve R^2 değerlerindeki farklılıklar net biçimde ortaya konulmaktadır. LGBM modeli, test verisi üzerinde en düşük RMSE değeri (yaklaşık 2.3 birim) ile üstün performans göstermiştir. RA ise orta düzeyde bir hata oranı ile takip ederken, EN ve DVM modelleri göreceli olarak daha yüksek hata oranlarına sahip olmuştur. MSE kriterine göre modellerin performans sıralaması $LGBM < RA < EN < DVM$ şeklinde belirlenmiştir. KRHVT pirinç alaşımının soğuk işlem koşullarındaki davranış tahmininde LGBM algoritmasının üstün bir modelleme aracı olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 3.35).



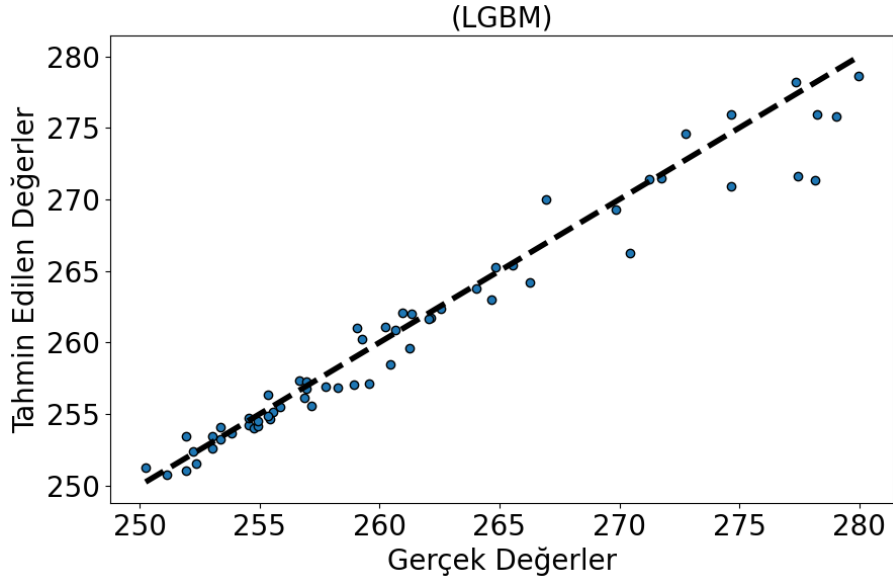
Şekil 3.36: KRHVT Pirinç $T_{soğuk}$ DVM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT pirinç alaşımının soğuk işlem koşullarında Destek Vektör Makineleri (DVM) algoritmasıyla yapılan tahminlerin başarımını değerlendirmek amacıyla oluşturulmuştur. Tahmin edilen değerler yaklaşık 250–275°C aralığında, gerçek değerler ise 250–280°C arasında yoğunlaşmıştır. Noktaların büyük çoğunluğunun referans çizgisi civarında kümelenmiş olması, modelin genel olarak yüksek bir doğrulukla tahmin gerçekleştirdiğini göstermektedir. DVM, sınırlı ve dar sıcaklık aralıklarında stabil tahminler sunarken, daha geniş sıcaklık varyasyonlarında performansının yeniden değerlendirilebilir. DVM soğuk işlem koşullarında kontrollü sıcaklık aralıkları için uygun ve potansiyel olarak faydalı bir tahmin aracıdır (şekil 3.36).



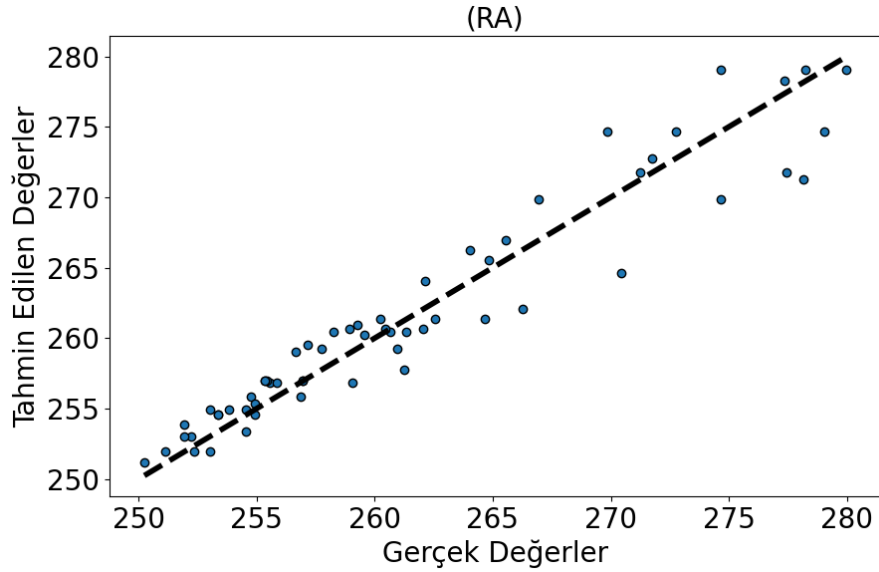
şekil 3.37: KRHVT Pirinç $T_{soğuk}$ EN determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT pirinç alaşımının soğuk işlem koşulları altında EN regresyon modeliyle yapılan tahminlerinin doğruluğunu, gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi göstererek sunmaktadır. Grafik, modelin determinasyon katsayısını görselleştirerek EN algoritmasının kestirim gücünü niceliksel olarak değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır. EN modeliyle elde edilen tahminler, genel olarak 250–280°C aralığında toplanmış, ancak önemli bir kısmı referans çizgisinden sapma göstermiştir. EN modelinin veri setindeki toplam varyansın yalnızca %72'sini açıklayabildiğini göstermektedir. Bu durum, modelin doğrusal kombinasyonlar üzerinden kurduğu yapının, pirinç alaşımının karmaşık termomekanik davranışlarını tam anlamıyla temsil etmekte yetersiz kaldığını göstermektedir (şekil 3.37).



Şekil 3.38: KRHVT Pirinç $T_{soğuk}$ LGBM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT pirinç alaşımının soğuk işlem koşullarında LGBM algoritmasıyla tahmin edilen değerler ile gerçek ölçüm değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. LGBM modeli, 250–265°C aralığında yüksek doğrulukla tahminler yapmış ve genel olarak gerçek ölçümlerle çok iyi uyum sağlamıştır. Tahmin sapmaları düşük ve sistematik hata gözlenmemektedir. Model hem doğrusal hem de non-lineer ilişkileri etkin şekilde yakalayarak, kompleks malzeme davranışlarını başarılı biçimde temsil etmiştir. LGBM, soğuk işlem sürecindeki sıcaklık tahminleri için üstün bir model olarak öne çıkmaktadır (Şekil 3.38).



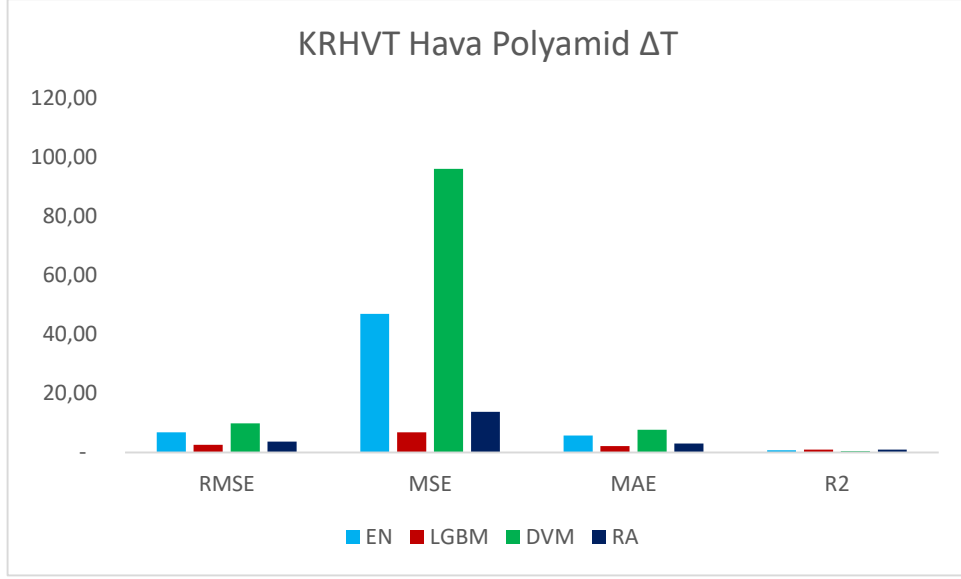
Şekil 3.39: KRHVT Pirinç $T_{soğuk}$ RA determinasyon katsayısının (R^2) grafiği

Ridge Regresyon (RA) modelinin KRHVT pirinç alaşımlarının soğuk işlem sıcaklık tahminlerindeki performansını gerçek ve tahmin edilen değerlerin dağılımı üzerinden sunmaktadır. Veri noktalarının ideal regresyon çizgisine ($y=x$) göre konumlanması, modelin tahmin kapasitesini niceliksel olarak yansıtmaktadır. MAE yaklaşık 4.2°C 'dir. Model, soğuk işlem davranışındaki varyansın ~%84'ünü açıklayabilmektedir. Ridge Regresyon'un KRHVT pirinç alaşımlarının soğuk işlem tahminlerinde özellikle orta sıcaklık aralığında kullanılabilir bir seçenek olduğunu göstermektedir. Ancak kompleks deformasyon mekanizmaları için LGBM gibi non-lineer modellerin tercih edilmesi önerilmektedir (Şekil 3.39).

Tablo 3.7: KRHVT Polyamid ΔT makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü

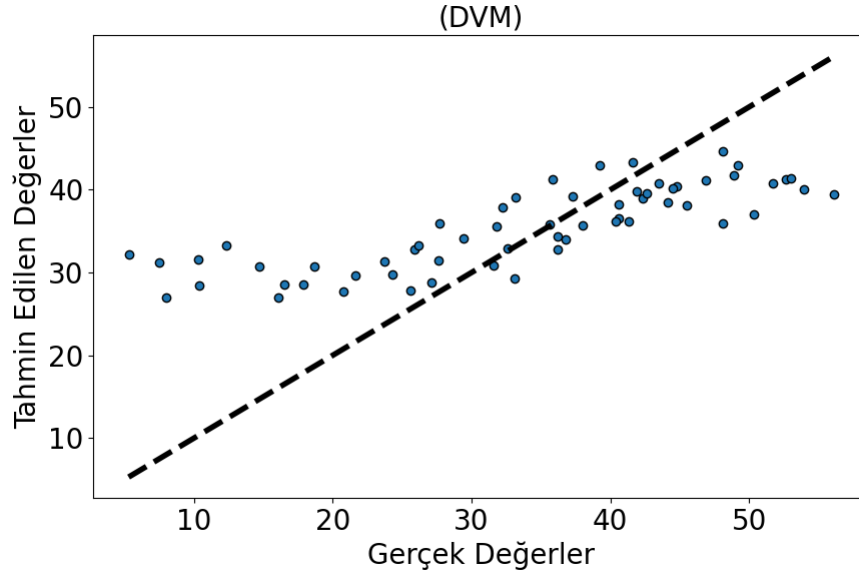
Model	RMSE	MSE	MAE	R ²
EN	6,85	46,90	5,77	0,73
LGBM	2,61	6,80	2,14	0,96
DVM	9,80	96,03	7,65	0,45
RA	3,71	13,79	3,03	0,92

LGBM en iyi genel performansı göstermektedir. Hem hata metrikleri düşük hem de açıklayıcılığı çok yüksektir. EN doğrusal temelli olup, RA'ya kıyasla biraz daha düşük başarı göstermiştir. RA doğrusal ve basit yapısıyla, özellikle LGBM'nin aşırı öğrenme riski olduğu durumlarda iyi bir alternatif olabilir. DVM en düşük performansı göstermiştir ve ayarlarının uygun yapılmaması performans kaybına neden olmuştur. LGBM doğruluk ve genelleme kapasitesi açısından en uygun model olup, diğer modellerin performansı geliştirilebilir.



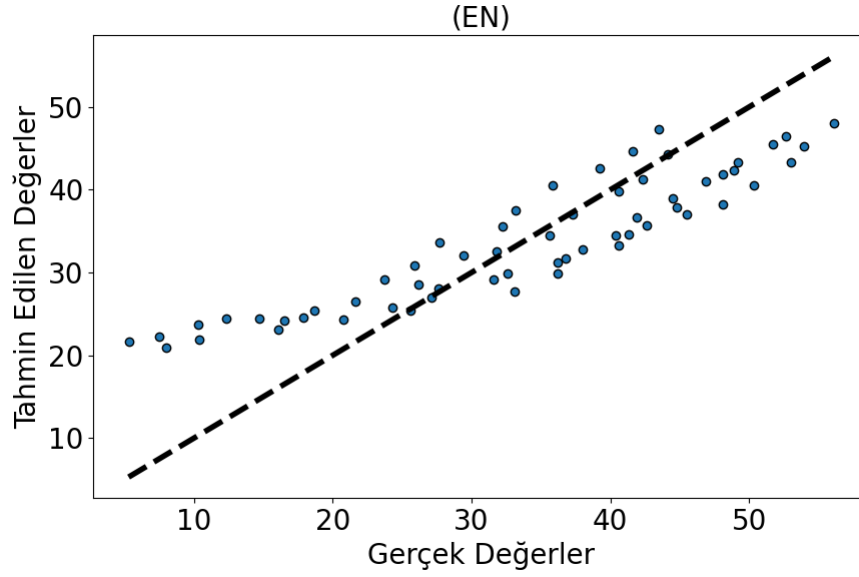
Şekil 3.40: KRHVT Polyamid ΔT makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri

RMSE, MSE ve MAE değerlerinin üst kısımlarda (örneğin 100–120 civarında) konumlandığı gözlemlenen modeller, daha yüksek hata oranlarına sahiptir. Bu durum özellikle EN modelinin tüm hata metriklerinde zayıf performans sergilediğini ve diğer modellere kıyasla başarısız olduğunu göstermektedir. RA en düşük hata değerlerine 20–40 aralığının da RMSE, MSE, MAE sahip olup, en yüksek tahmin doğruluğunu ve güvenilirliği göstermektedir. LGBM ve DVM modelleri orta düzeyde hata metrikleri (40–80 aralığında) ile RA'ya kıyasla daha yüksek ancak EN'ye göre daha iyi performans sergilemektedir. EN, tüm hata metriklerinde en yüksek değerleri göstererek en zayıf model olarak öne çıkmaktadır. R^2 değerleri grafik üzerinde açık olmasa da, hata metrikleriyle tutarlı şekilde RA'nın yüksek açıklayıcılığa sahip olduğu değerlendirilmektedir. RA modeli Polyamid ΔT tahmininde en başarılı ve güvenilir model olarak öne çıkmakta, LGBM ve DVM ise orta düzeyde performans göstermektedir. EN modeli ise performans açısından yetersiz kalmaktadır (Şekil 3.40).



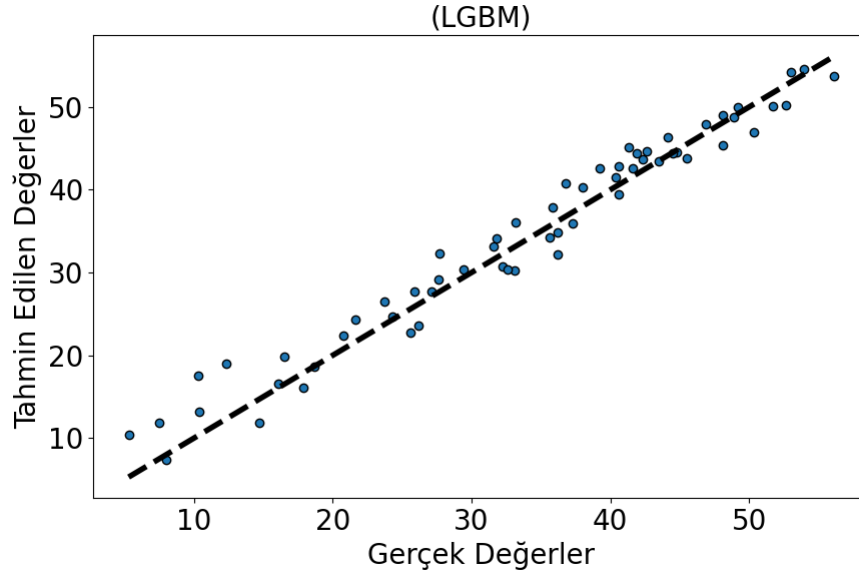
Şekil 3.41: KRHVT Polyamid ΔT DVM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

Modelin tahmin performansı, tahmin edilen ve gerçek değerlerin dağılımı üzerinden değerlendirilmiştir. Model tahminleri ile gerçek değerler arasında pozitif doğrusal bir ilişki gözlemlenmektedir. DVM modeli, tahmin edilen ve gerçek değerler arasında genel olarak pozitif ve güçlü bir ilişki kurmuştur. Model, özellikle **20–40°C** aralığında yüksek doğruluk sağlamış; ancak uç değerlerde (10°C ve 50°C civarı) sapmalar görülmüştür. Bu sapmalar, hiperparametre (kernel, C, gamma) ayarlarının iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Performans açısından DVM, RA ve LGBM'ye göre daha zayıf, ancak EN modelinden belirgin şekilde daha iyi sonuç vermiştir. Genel olarak, DVM orta düzeyde başarılı ve istikrarlı bir model olup, dikkatli ayarlarla bazı uygulamalarda kullanılabilir hale getirilebilir (Şekil 3.41).



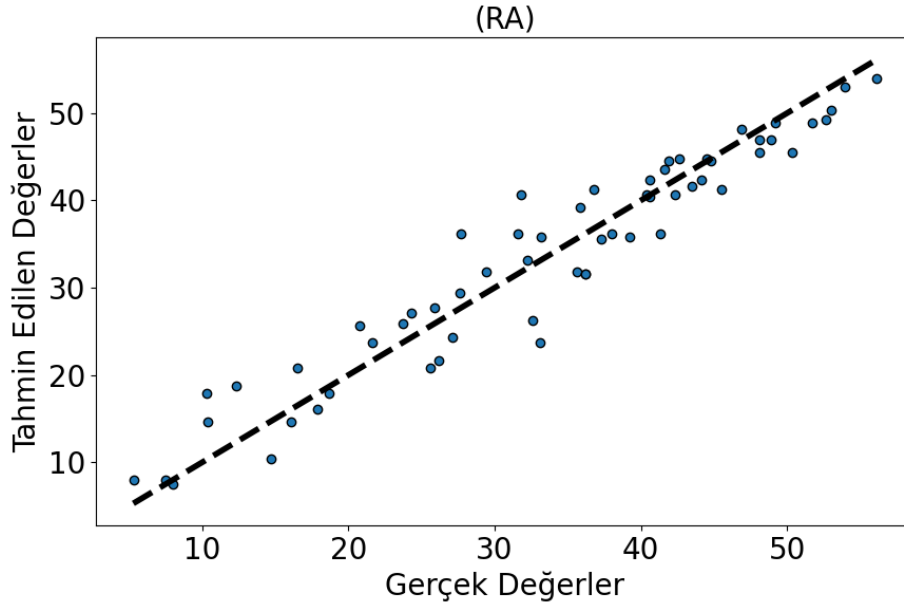
Şekil 3.42: KRHVT Polyamid ΔT EN determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

EN modelinin Polyamid ΔT değişkeni için gerçekleştirdiği tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırmalı dağılımını göstermektedir. Grafik üzerinde veri noktalarının 45° referans çizgisinden belirgin biçimde uzaklaşması, modelin tahmin başarısının düşüklüğünü ortaya koymaktadır. R^2 değeri belirtilmemekle birlikte, dağılım yapısına bakıldığında bu değer 0.50 'nin altında olduğu öngörülmektedir. Bu durum, EN modelinin varyansı sınırlı düzeyde açıklayabildiğini ve model uyumunun zayıf olduğunu göstermektedir. EN modelinin tüm ölçütlerde en yüksek sapma değerlerini verdiği görülmektedir. Bu bulgular, modelin genel olarak zayıf tahmin performansı sergilediğini, özellikle karmaşık veri yapılarında yetersiz kaldığını göstermektedir. EN modeli, KRHVT Polyamid ΔT tahmininde zayıf bir genel performans sergilemiştir (Şekil 3.42).



Şekil 3.43: KRHVT Polyamid ΔT LGBM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

LGBM algoritmasının KRHVT poliamid malzemesinin ΔT tahmin performansını gerçek ve tahmin edilen değerlerin dağılımı üzerinden sunmaktadır. Veri noktalarının geniş bir aralıkta (-20°C ile 200°C) dağılım göstermesi, modelin çeşitli termal koşullardaki davranışını yansıtmaktadır. LGBM'nin poliamid termal davranışında geniş sıcaklık aralığında başarılı olmuştur. Endüstriyel proses kontrolü için uygun bir tahmin aracıdır. Bu analiz LGBM'nin poliamid malzemelerin termal davranış tahmininde güvenilir bir araç olduğunu göstermektedir. Özellikle polimerik malzemelerin kompleks termal özelliklerinin modellenmesinde makine öğrenmesi yaklaşımlarının potansiyelini ortaya koymaktadır (Şekil 3.43).



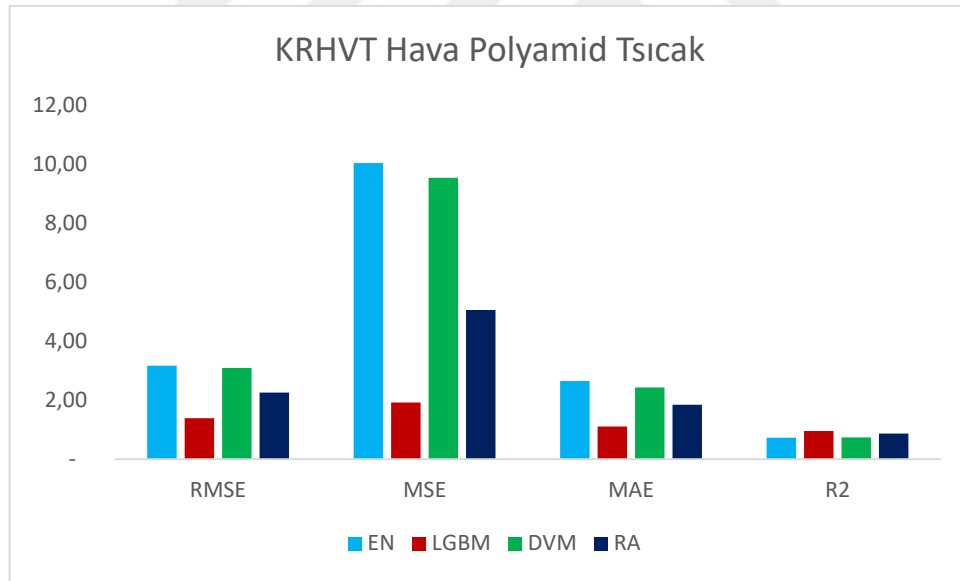
Şekil 3.44: KRHVT Polyamid ΔT RA determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

RA modeline ait tahmin sonuçları ile gerçek ölçüm değerleri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Veri noktalarının 45° referans çizgisi boyunca yoğun ve düzenli biçimde hizalanması, modelin yüksek tahmin doğruluğunu ortaya koymaktadır. Özellikle $20\text{--}40^\circ\text{C}$ aralığında tahminlerin neredeyse kusursuz olduğu, uç değerlerde ise yalnızca sınırlı düzeyde sapmaların gözlemlendiği belirtilmiştir. Bu durum, modelin hem doğruluk hem de genelleme açısından güçlü bir yapı sergilediğini göstermektedir. Ancak, bu yüksek performansın aşırı öğrenme riski taşıyabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle modelin güvenilirliği, çapraz doğrulama ve test verisinde elde edilen hata metrikleriyle desteklenerek doğrulanmalıdır. RA modeli, Polyamid ΔT tahmininde en yüksek açıklayıcılık ve en düşük tahmin hatalarıyla öne çıkmakta; endüstriyel uygulamalarda güvenle kullanılabilecek nitelikte bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. RA Modeli, Polyamid ΔT tahmini için ideal seçimdir. Yüksek R^2 ve düşük hatalar, endüstriyel uygulamalarda güvenle kullanılabileceğini gösteriyor (Şekil 3.44).

Tablo 3.8: KRHVT Polyamid T_{sıcak} makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü

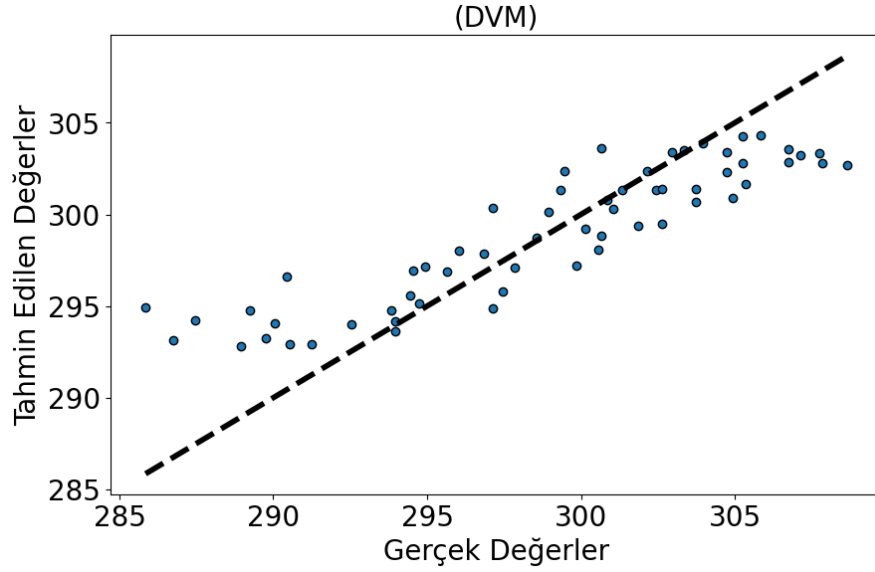
Model	RMSE	MSE	MAE	R ²
EN	3,17	10,02	2,64	0,72
LGBM	1,38	1,92	1,10	0,95
DVM	3,09	9,53	2,42	0,73
RA	2,25	5,04	1,84	0,86

KRHVT poliamid malzemesinin sıcaklık tahmini için dört farklı makine öğrenmesi algoritmasının performans metriklerini sunmaktadır. KRHVT poliamid malzemesinin sıcaklık tahmini için en başarılı makine öğrenmesi modeli LGBM olmuştur. Bu model, en düşük hata oranları (RMSE, MSE, MAE) ve en yüksek R² skoru (0,95) ile öne çıkmaktadır. EN ve DVM modelleri ise daha düşük başarı göstermektedir. RA modeli dengeli bir performans sergileyerek alternatif bir seçenek sunmaktadır.



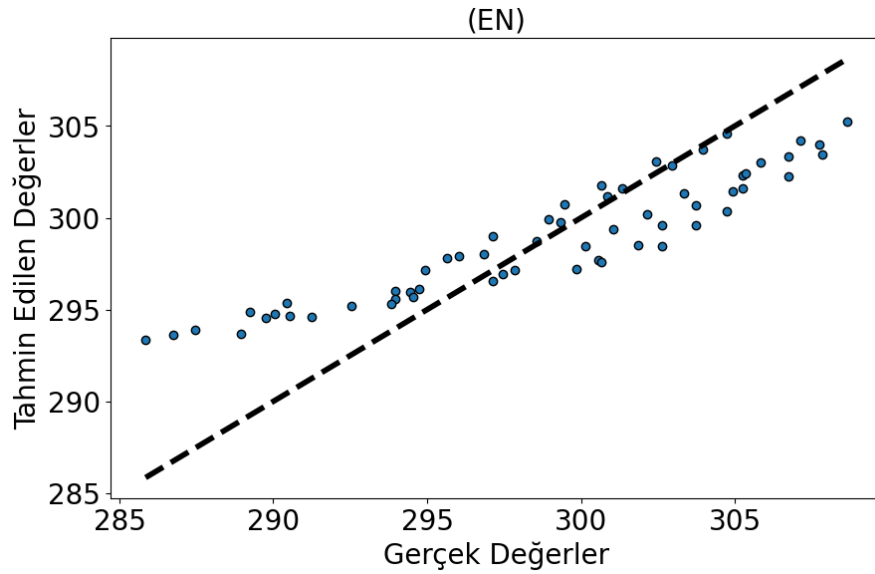
Şekil 3.45: KRHVT Polyamid T_{sıcak} makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri

KRHVT Polyamid T_{sıcak} tahmini amacıyla geliştirilen farklı makine öğrenimi modellerinin performansını değerlendirmek için kullanılan dört temel ölçüm metriğini RMSE, MSE, MAE ve R² grafiksel olarak sunmaktadır (Şekil 3.45).



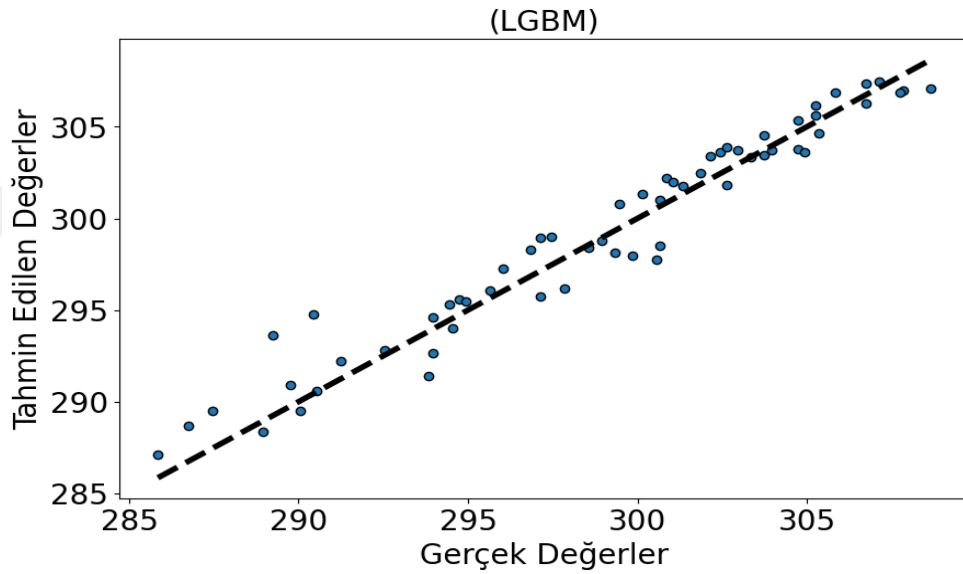
Şekil 3.46: KRHVT Polyamid $T_{\text{sıcak}}$ DVM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT Polyamid sıcaklık tahmini için kullanılan dört makine öğrenmesi modelinin EN, LGBM, DVM, RA performansını dört metrik üzerinden karşılaştırmaktadır: RMSE, MSE, MAE ve R^2 . LGBM modeli, tüm hata metriklerinde RMSE, MSE, MAE en düşük değerlere ve R^2 skorunda en yüksek değere 0,95 'e ulaşarak en başarılı model olarak öne çıkmaktadır. RA modeli ise LGBM'ye yakın, dengeli ve güçlü bir performans sergilemiştir. DVM orta düzeyde performans gösterirken, EN modeli en yüksek hata değerleri ve en düşük R^2 ile zayıf bir sonuç ortaya koymuştur (Şekil 3.46).



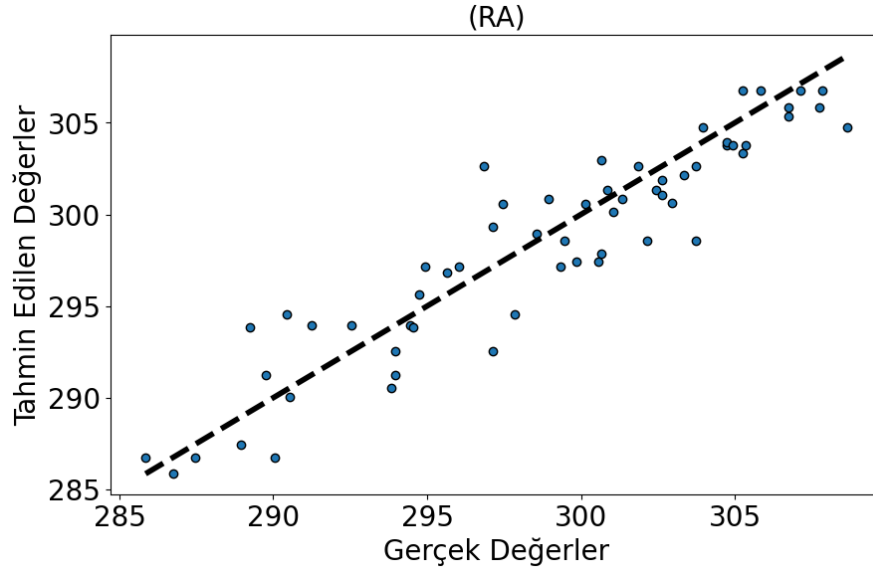
Şekil 3.47: KRHVT Polyamid $T_{\text{sıcak}}$ EN determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT modeli kapsamında Polyamid malzemesi için kullanılan EN (Ensemble – topluluk) öğrenme yöntemiyle elde edilen tahmin değerlerinin, gerçek değerlerle karşılaştırıldığı bir dağılım grafiği sunulmuştur. EN yönteminin Polyamid için sıcaklık tahmininde istatistiksel olarak anlamlı ancak DVM yöntemine kıyasla biraz daha düşük bir performans sergilediği yönündedir. EN modeli çoklu tahminleyicilerden oluştuğundan genellikle genelleme kabiliyeti yüksek olsa da, DVM'nin daha güçlü bir deterministik yapı sunduğu izlenimi edinilmektedir (Şekil 3.47).



Şekil 3.48: KRHVT Polyamid $T_{\text{sıcak}}$ LGBM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

LGBM algoritmasıyla yapılan sıcaklık tahminlerinin gerçek değerlere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Veri noktalarının büyük kısmı ideal $y = x$ çizgisi etrafında yoğunlaşmıştır; bu da modelin yüksek doğrulukla tahmin yaptığını gösterir. Özellikle orta ve yüksek sıcaklık aralıklarında tahminlerin isabetli olduğu dikkat çekmektedir. Bu güçlü performans, LGBM'nin hızlı ve verimli karar ağacı tabanlı yapısından, düşük hesaplama maliyetinden ve overfitting'i önleyebilme yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, LGBM modeli, KRHVT kapsamında Polyamid sıcaklık tahminlerinde en güvenilir ve etkili yöntem olarak öne çıkmaktadır (Şekil 3.48).



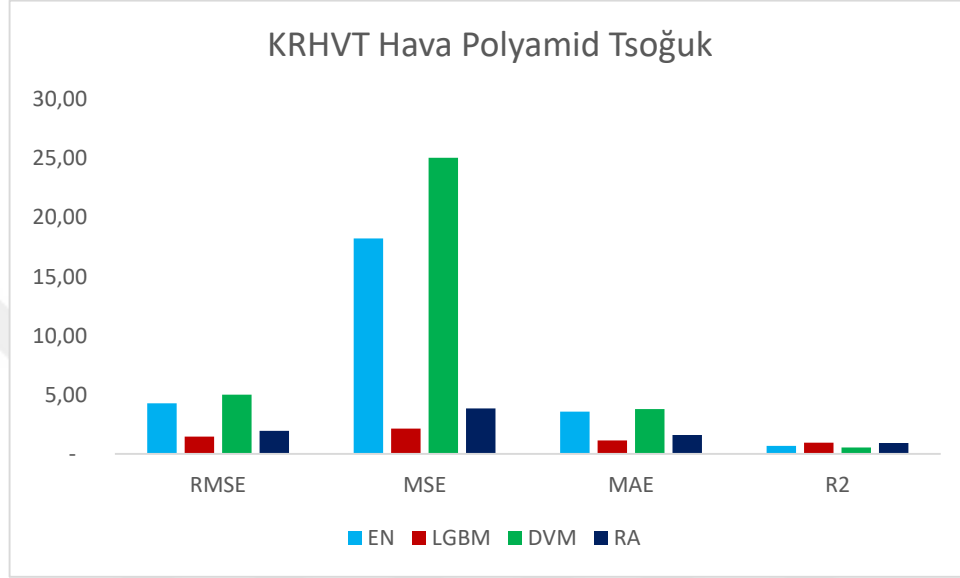
Şekil 3.49: KRHVT Polyamid $T_{sıcak}$ RA determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

RA algoritmasının Polyamid sıcaklık tahminlerinde genel olarak başarılı ancak tutarsız bir performans sergilediğini göstermektedir. Veri noktaları düşük ve orta sıcaklık değerlerinde gözlenen sapmalar modelin homojen bir doğruluk sağlayamadığını ortaya koymaktadır. RA modeli, birden fazla karar ağacının ortalamasına dayandığı için genellikle overfitting'e karşı dirençlidir ve genelleme kabiliyeti yüksektir. Ancak bu çalışmada, LGBM ve DVM modellerine kıyasla daha düşük bir doğruluk düzeyi sunmuştur. Bu durum, R^2 değerinin görece daha düşük olmasına da yansımıştır. Özetle, RA algoritması Polyamid sıcaklık tahmininde makul düzeyde güvenilir olsa da, en yüksek doğruluk LGBM modelinde görülmektedir (Şekil 3.49).

Tablo 3.9: KRHVT Polyamid $T_{soğuk}$ makine öğrenimi yöntemlerine ait test ölçümü

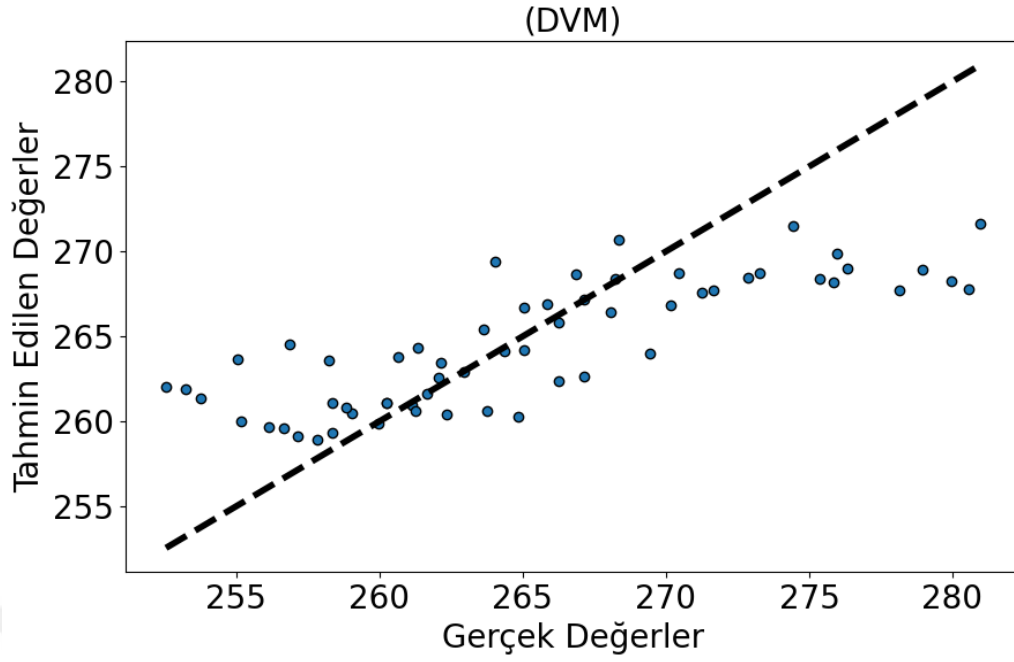
Model	RMSE	MSE	MAE	R^2
EN	4,27	18,25	3,57	0,67
LGBM	1,46	2,13	1,14	0,96
DVM	5,01	25,07	3,78	0,55
RA	1,96	3,85	1,59	0,93

Test sonuçlarına göre, KRHVT modeli kapsamında Polyamid malzemesi için $T_{soğuk}$ parametresinin tahmininde en başarılı makine öğrenimi yöntemi LGBM olmuştur. LGBM düşük hata ve yüksek R^2 en başarılı model olmuştur. RA dengeli ve yüksek doğruluk ile alternatif güçlü model olabilir. En modeli kısmen başarılıdır. Fakat DVM yüksek hata ve düşük güvenilirliği ile zayıf performans göstermiştir.



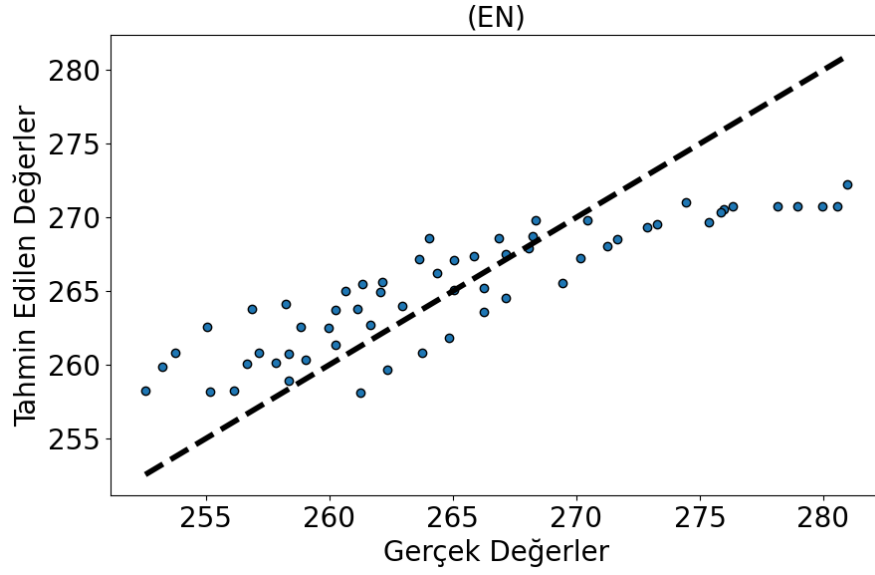
Şekil 3.50: KRHVT Polyamid Tsoğuk makine öğrenimi yöntemiyle ölçüm grafikleri

KRHVT (Kararlı Reaksiyon Hızı ve Viskozite Tahmini) kapsamında Polyamid malzemesi için $T_{soğuk}$ parametresine ilişkin farklı makine öğrenimi modellerinin performansını dört temel ölçüm metriği açısından karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. LGBM, tüm hata metriklerinde RMSE, MSE, MAE en düşük değerlere ve R^2 en yüksek açıklayıcılığa sahiptir. Bu, modelin en doğru ve güvenilir tahminleri yaptığını göstermektedir. RA ,LGBM'den sonra en iyi performansı sergilemiştir. R^2 'nin hata oranları oldukça düşüktür. Bu da RA'yı etkili bir alternatif haline getirir. EN, orta düzeyde bir performans göstererek sınırlı açıklayıcılık ve görece yüksek hata oranları ile dikkat çekmiştir. DVM en yüksek hata değerlerine ve en düşük R^2 değerine sahiptir. Bu durum, DVM'nin bu problem için uygun bir model olmadığını açıkça göstermektedir. Grafik, LGBM'nin açık ara en başarılı model olduğunu, RA'nın ise güçlü bir ikinci seçenek olduğunu net şekilde ortaya koymaktadır. EN sınırlı; DVM ise başarısız bir yöntemdir (Şekil 3.50).



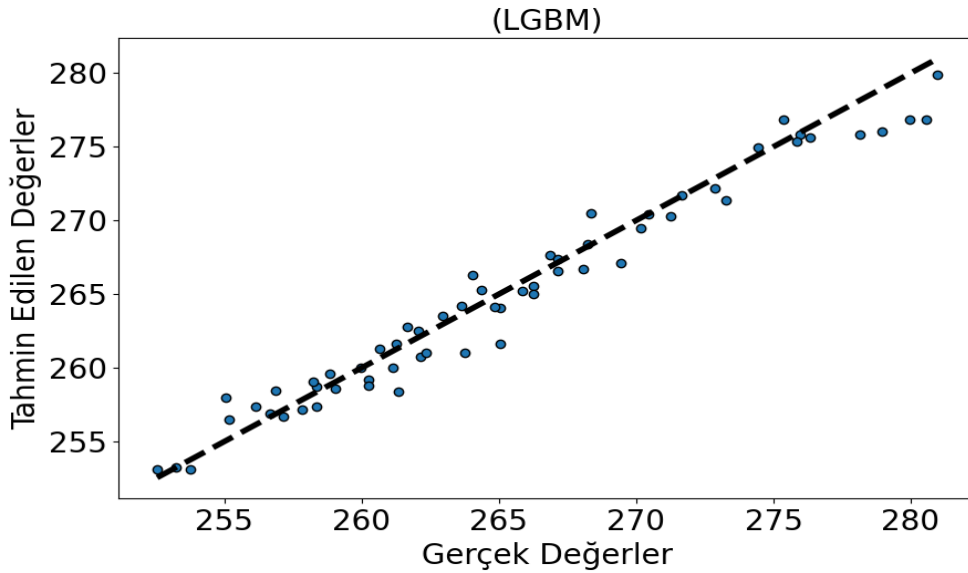
Şekil 3.51: KRHVT Polyamid $T_{soğuk}$ DVM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

DVM algoritmasının, KRHVT sisteminde Polyamid malzemesi için $T_{soğuk}$ parametresi üzerindeki tahmin performansını yansıtmaktadır. Grafik, modelin tahmin ettiği değerlerle gerçek ölçüm değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. DVM modelinin KRHVT sisteminde Polyamid $T_{soğuk}$ parametresi için güvenilir bir tahmin aracı olmadığını ortaya koymaktadır. Düşük R^2 değeri ve referans çizgiden uzaklaşan tahminler, bu modelin bu veri seti ve problem tipi için yeterli olmadığını göstermektedir. Alternatif olarak LGBM ya da RA gibi daha güçlü modelleme yöntemlerinin tercih edilmesi önerilmektedir (Şekil 3.51).



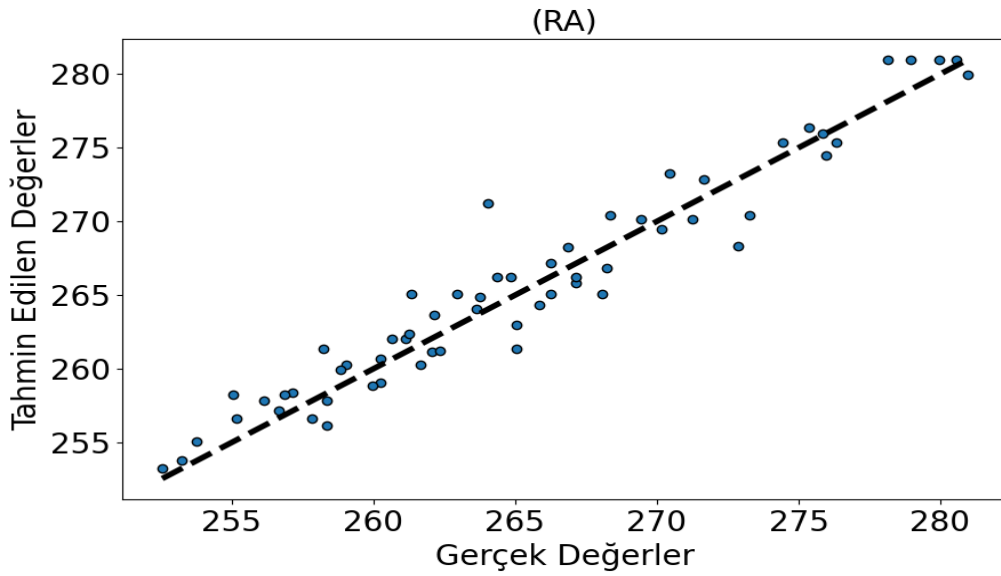
Şekil 3.52: KRHVT Polyamid $T_{soğuk}$ EN determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT Polyamid $T_{soğuk}$ EN modelinin tahmin edilen değerleri ile gerçek değerler arasındaki ilişkiyi gösteren bir R^2 grafiğidir. KRHVT Polyamid $T_{soğuk}$ k EN modelinin tahminleri genel olarak gerçek değerlerle uyumlu olmakla birlikte, bazı sapmalar mevcuttur. Bu durum modelin yeterince doğru tahminler yapabildiğini, ancak performansın daha da iyileştirilebileceğini göstermektedir. R^2 tam olarak belirtilmemekle birlikte, grafik üzerinden modelin kabul edilebilir bir başarı düzeyine sahip olduğu söylenebilir. Modelin doğruluğunu artırmak için ek iyileştirmeler ve optimizasyonlar yapılabilir (Şekil 3.52).



Şekil 3.53: KRHVT Polyamid $T_{soğuk}$ LGBM determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT Polyamid $T_{soğuk}$ veri seti üzerinde eğitilmiş LGBM modelinin tahmin performansını gösteren R^2 grafiğidir. LGBM algoritması KRHVT Polyamid $T_{soğuk}$ veri setinde güçlü bir regresyon performansı sergilemiş, veri örüntülerini etkin şekilde öğrenmiş ve hem eğitim hem de test verileri üzerinde güvenilir tahminler yapabilecek bir model ortaya koymuştur. Model, veri içindeki örüntüleri başarılı şekilde öğrenmiş, sistematik hata yapmadan genel eğilimleri doğru yakalamıştır. Küçük ve rastlantısal sapmalar dışında tahmin performansı oldukça iyidir. Bu da LGBM modelinin hem eğitim hem de test verilerinde sağlam ve tutarlı sonuçlar verdiğini, gerçek dünya uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir (Şekil 3.53).



Şekil 3.54: KRHVT Polyamid $T_{soğuk}$ RA determinasyon katsayısı (R^2) grafiği

KRHVT Polyamid $T_{soğuk}$ veri seti üzerinde RA modelinin tahmin performansını göstermektedir. Grafik, modelin makul düzeyde tahminler yaptığını ancak LGBM modeline kıyasla daha yaygın ve tutarsız dağılım sergilediğini ortaya koymaktadır. RA modeli, uç değerlerde daha fazla sapma yaparak tahminlerde istikrar açısından LGBM'nin gerisinde kalmaktadır. Determinasyon katsayısının orta-yüksek (yaklaşık 0.70–0.90) olduğu tahmin edilmekte olup, modelin doğruluğu kabul edilebilir seviyededir ancak iyileştirmeye açıktır. Genel olarak, LGBM modeli RA modeline göre daha doğru ve tutarlı tahminler sağlamaktadır (Şekil 3.54).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırmada, karşı akış prensibiyle çalışan KRHVT sisteminin soğutma performansı, farklı nozul sayıları ve çeşitli yapı malzemeleri temelinde incelenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında; 2, 3, 4, 5 ve 6 adet nozul içeren farklı konfigürasyonlara sahip vorteks tüpleri değerlendirmeye alınmıştır. Her konfigürasyon, üç ayrı malzeme poliamid, alüminyum ve pirinç kullanılarak imal edilen KRHVT prototipleriyle test edilmiştir. Sisteme uygulanan giriş hava basıncı, 150 kPa'dan başlayarak 700 kPa'a kadar, 50 kPa'lık artışlarla kademeli olarak değiştirilmiş ve her basınç düzeyinde elde edilen soğuk çıkış sıcaklıkları, sıcak çıkış sıcaklıkları ve sıcaklık farkları kaydedilmiştir. Bu sayede, hem nozul sayısının hem de malzeme türünün soğutma performansına, ısıtma performansına ve sistem performansına olan etkileri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Bu çalışmada, üçlü paralel bağlı zıt akışlı Ranque–Hilsch vorteks tüp sisteminin soğutma performansı, ısıtma performansı ve sistemin sıcaklık performansı deneysel veriler ile desteklenmiş ve çeşitli makine öğrenme algoritmaları ile modellenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre:

- Makine öğrenme algoritmaları vorteks tüp sistemlerinin sıcaklık tahmininde yüksek başarı göstermektedir.
- Paralel bağlanmış çoklu tüpler, tekil tüplere kıyasla sistemin genel soğutma etkisini önemli ölçüde artırmaktadır.
- KRHVT sisteminde kullanılan nozul sayısı ve malzeme türü, soğuk çıkış sıcaklığı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.
- Alüminyum malzeme ve 4-5 nozul konfigürasyonları, optimum soğutma performansı açısından en başarılı kombinasyonlar olarak öne çıkmaktadır.
- Gelecekteki çalışmalarda, farklı türde makine öğrenme algoritmaları (örneğin derin öğrenme, genetik algoritmalar) ile modelleme derinleştirilebilir.
- Sıcaklık dışında diğer performans kriterleri (enerji tüketimi, debi kontrolü vb.) de modele dahil edilerek sistemin çok yönlü bir analizi yapılabilir.
- Farklı gazlar kullanılarak (örneğin CO₂, Azot) sistemin performans değişkenliği incelenebilir.
- Gerçek zamanlı kontrol sistemleri entegre edilerek, elde edilen makine öğrenme modelleri sahada kullanılabilir hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

- Ahlborn, B., Camire, J., Keller, J. U., (1996). Low-Pressure Vortex Tubes, J Phys. D: Appl. Phys., 29, 1469-72.
- Aljuwayhel, N. F., Nellis, G. F., Klein, S. A., (2005). Parametric and Internal Study of The Vortex Tube Using A Cfd Model, Int J Refrigeration, 28 (3), 442-50.
- Althouse, A. D., Turnquist, C. H., Bracciano, A. F., (1979), Modern Refrigeration and Air Conditioning, The Goodheart-Willcox Company Inc., South Holland, Pp. 633.
- Arkharov, I. A., Navasardyan, E. S., Luckyanov, P. A., (2001). Equipment For Biomaterial Storage Systems, Chemical And Petroleum Engineering, 37(7-8), 428-33.
- Aydin, O., ve Baki, M., (2006). An Experimental Study on the Design Parameters of a Counterflow Vortex Tube, Energy, 31, 2763-2772.
- Azarov, A. I., (1998). Qulaimetric Method of Comprasion of Refrigerating Systems According To The Totality of Their Technological and Operational Characteristics, Int Conf. Ressourcessaving İn Foodindustry, 143 – 144.
- Azarov, A. I., (2004). Ways of Improving Commercial Vortex Tubes, Chemicaland Petroleum Engineering, 40 (7-8), 411-416.
- Azarov, A.I., (2007). Modular multi-chambers vortex tubes. Available at [<https://ecoteco.ru/id158/>].
- Azeez, N.T., Al-Barwari, R.R., Talabani, Z.J., (2010). An Experimental Investigation of The Geometric Parameters on The Performance for The Counter-Flow Vortex Tubes, International Conference on Mechanical and Electrical Technology, 467- 470.
- Balmer, R., (1988). Pressure Driven Ranque-Hilsch Temperature Seperation in Liquids, Journal Of Fluids Engineering-Trans. of Asme, 110, 2, Pp.161-164. 60.
- Boucher, R. F, Tippetts, J. R., (2000). Vortex-Tube-Driven Thermo-Electricity. Sixth Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, Sherbrooke- Canada, Paper 50.
- Cockerill, T. T., (1998). Thermodynamics and Fluid Mechanics of A Ranque-Hilsch Vortex Tube, Phd Thesis, University of Cambridge.
- Danış, A., (2010). Kas Kuvveti İle Çalıştırılan Vorteks Tüplerinin Soğutma-Isıtma Amaçlı Kullanılmasında Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük 53.
- Dinçer, K., (2011). Experimental investigation of the effects of threefold type Ranque–Hilsch vortex tube and six cascade type Ranque–Hilsch vortex tube on the performance of counter flow Ranque–Hilsch vortex tubes, Gazi Üniv. Müh. Mim.

Fak. Ankara.

- Gao, C. M., Bosschaart, K. J., Zeegers, J. C., de Waele, A.T.A.M. (2005). Experimental Study on A Simple Ranque-Hilsch Vortex Tube, *Cryogenics*, 45, 173-183.
- Kaçmaz, H., (2010). Bir Vorteks Tüpünde Farklı Gazların Isıl Ve Akış Performanslarının Sayısal İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Khordokov, I. L., Poshernev, N. V., Ve Zhidkov, M. A., (2003). The Vortex Tube - A Universal Device For Heating, Cooling, Cleaning, and Drying Gases and Separating Gas Mixtures. *Chemical And Petroleum Engineering*, 39(7-8), 409- 415.
- Kırmacı, V., Usta H., Menlik, T., (2006). Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Hava Oksijen Karbondioksit Azot Ve Argon Kullanılarak Isıtma-Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak Karşılaştırılması, *Saü Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 10. Cilt, 2. Sayı S. 39-44.
- Kırmacı, V., (2007). Altı Nozullu Vorteks Tüpünün Soğutma-Isıtma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, Cilt:10 Sayı: 4 S.377-381.
- Kırmacı, V., (2008). Akışkan Olarak Hava Oksijen Karbondioksit Azot Argon Ve Karışım Gazı Kullanılan Vorteks Tüpünde Soğutma-Isıtma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi, *Fırat Üniv. Fen Ve Müh. Bil. Dergisi* 20 (2), 345-354.
- Kırmacı, V., Uluer, O. (2008). The effects of orifice nozzle number on heating and cooling performance of vortex tubes: an experimental, *Instrumentation Science and Technology*, Vol. 32, N.5 493-502.
- Kırmacı, V. Uluer, O., ve Dincer, K. (2010). An Experimental Investigation of Performance and Exergy Analysis of A Counterflow Vortex Tube Having Various Nozzle Numbers At Different Inlet Pressure of Air, Oxygen, Nitrogen, and Argon, *Journal of Heat Transfer*, Vol.132, N.12. 62.
- Köse, D. (2014). Doğal gaz basınç düşürme istasyonlarında enerji geri kazanımının teknik ve ekonomik analizi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne. 54.
- Lewins, J, Bejan, A., (1999). Vortex Tube Optimization Theory, *Energy*, 24, 931-43.
- Markal, B., (2010). Ranque-Hilsch Vorteks Tüpünde Enerji Ayrışmasının Deneysel Ve Termodinamik İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Martynovskii, V.S., and Alekseev, V.P. (1957). Investigation of The Vortex Thermal Separation Effect For Gases and Vapors, *Soviet Physics:Technical Physics*, 26(2), 2233-2243.

- Selek, M., Taştemir, S., Dinçer, K., Başkaya, T. (2011). Experimental examination of the cooling performance of Ranque-Hilsch vortex tube on the cutting tool nose point of the turret lathe through infrared thermography method, *International Journal of Refrigeration*, Vol.34, N.3 807–1815.
- Nabhani, N. (1989). Hot – Wire Anemometry study of Confined Turbulent Swirling Flow, Phd Thesis, Bradford University, Bradford, U.K.
- Özkul, N., (1999). “Uygulamalı Soğutma Tekniği”, Makina Mühendisleri Odası, Yayın No:115, Ankara, S. 24-25.
- Özgür, A.E., Selbaş, R., Üçgül, İ. (2001). Vorteks Tüpler ile Soğutma Uygulamaları, V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 387-397.
- Özgür, A.E. (2001). Vorteks Tüplerin Çalışma Kriterlerine Etki Eden Faktörlerin ve Endüstrideki Kullanım Alanlarının Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Parulekar, B.B., (1961). The Short Vortex Tube, *Journal of Refrigeration*, 4, 74-80.
- Promvong, P., Eiamsa-Ard S. (2005). Investigation On The Vortex Thermal Separation In A Vortex Tube Refrigerator, *Science Asia*, 31, 215-223. 63.
- Saidi, M.H., Yazdi, R.A., (1999). Exergy Model of A Vortex Tube System With Experimental Results, *Energy*, 24, 625-632.
- Saidi, M.H., Valipour M.S., (2003). Experimental Modeling of Vortex Tube Refrigerator, *Applied Thermal Engineering*, 23, 1971-1980.
- Singh, P.K., Tathgir, R.G., Gangacharyulu, D., and Grewal G.S., (2004). An Experimental Performance Evaluation of Vortex Tube, *Indian Journal - Mechanical Engineering*, 84, 149-153.
- Singh, K. (2005). Ranque-Hilsch Vortex Tube Online, Available: [Http://Sps.Nus.Edu.Sg](http://Sps.Nus.Edu.Sg), 20 October 2005.
- Skardal, K.A. (1980). Vortex Cleaner, United States Patent, 4 224 145.
- URL-1. <http://www.exair.com>, Exair Corporation Vortex Tubes and Spot Cooling Products.
- URL-2. <https://ssl.arcsec-secure.de/filtan.de/ENGLISH/VTSA.htm>, The Vortex Tube Separator.
- Xue, Y, ve Arjomandi, M. (2008). The Effect of Vortex Angle on the Efficiency of the Ranque-Hilcsh Vortex Tube, *Exp. Thermal and Fluid Science*, 33, 54-57.
- Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., Kaya, M., Karşlı, S. (2006a). Vorteks Tüpleri: 1 Teknolojik Gelişim, *Mühendis ve Makina*, 47 (553), 46-54.
- Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., Kaya, M., Karşlı, S. (2006b). Vorteks Tüpleri: 2 Enerji Ayırışma Mekanizması ve Performans Karakteristikleri, *Mühendis ve Makina*, 47 (554), 42-51.

- Yılmaz, M., Kaya, M., Karagöz, Ş., Erdoğan, S. (2007a). Vorteks Tüp Tasarımı- I. Bölüm. Makine Tek Dergisi, 116, 100-106.
- Yılmaz, M, Kaya, M, Karagöz, Ş ve Erdoğan, S. (2007b). Vorteks Tüp Tasarımı- Iı. Bölüm. Makine Tek Dergisi, 117, 102-107.
- Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., Özyurt, Ö., Erdoğan, S., Bakırcı, K., Kaya M., Karagöz Ş. (2007c). Vorteks Tüplerin Soğutma Tekniğinde Kullanılması, Tübitak Proje No: 105m028, Ankara.
- Yüksel, S., (2014). Cnc Tornalamada Vorteks Tüplü Soğutma Sistemi Performansının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Volkan Demirel
Doğum Yeri ve Tarihi :

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :
Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Makine Mühendisliği
Bildiği Yabancı Diller :
Bilimsel Faaliyet/Yayınlar : 9.Selçuk Uluslararası Konferansı
S700 Çeliğinin ve Hardox 450 Çeliklerinin, Robotik
Kaynak Teknolojisiyle, ER110 SG Tel ile Birleştirilmesi
ve Kaynak Kabiliyetlerinin İncelenmesi
Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar :
Projeler ve Kurs Belgeleri :
Çalıştığı Kurumlar :

İletişim

E-Posta Adresi :

Tarih : 08/08/2025 (Tez Savunma Tarihi)

