



İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİNDE YAPAY ZEKA

**2024
DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

Erhan BUDAK

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. İlhan CEYLAN**

İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİNDE YAPAY ZEKA

Erhan BUDAK

Tez Danışmanı
Prof. Dr. İlhan CEYLAN

T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK
Ocak 2024

Erhan BUDAK tarafından hazırlanan “İKLİMLENDİRMEİNDE SİSTEMLERİNDE YAPAY ZEKA” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İlhan CEYLAN

.....

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 12/01/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Sezayi YILMAZ (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. İlhan CEYLAN (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Ali Etem GÜREL (DÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Volkan KIRMACI (BÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Alper ERGÜN (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Erhan BUDAK

ÖZET

Doktora Tezi

İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİNDE YAPAY ZEKA

Erhan BUDAK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. İlhan CEYLAN

Ocak 2024, 71 sayfa

Enerjiye günümüz yaşamının her alanında ihtiyacı vardır ve bu ihtiyaç her geçen gün dünyanın her yerinde hızla artmaya devam etmektedir. Giderek gelişen ekonomilerin ve endüstriyel fabrikaların üretim alanında enerjiye duyulan ihtiyaç artmaktadır. Bundan dolayıdır ki, enerji tüm işletmelerin temel girdisi durumuna gelmiştir. Günümüzde binalarda kullanılan enerjinin çoğu ısıtma, soğutma ve iklimlendirme amaçlı kullanılmaktadır.

İklimlendirme sistemleri toplam tüketilen enerjinin %30'unu oluşturmaktadır. İklimlendirme sistemlerinde sorunlarından biri mahallerdeki insan sayısı değişmesine rağmen hava debisinin sabit kalmasıdır. Bu çalışmada plakalı ısı geri kazanımlı bir klima santralinin PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrollü bir otomasyon sistemiyle ve bulut tabanlı olarak anlık kontrol edilerek bir sınıf ortamına uygulanmıştır. Sınıf ortamının kuru termometre sıcaklığı, bağıl nemi ve hava kalitesi (ppm) değerleri bulut sisitemi üzerinden gözlenip kontrol edilmiştir.

Sınıf ortamının 0, 25, 50 ve 70 öğrenci varken, CO₂ değerleri sırasıyla 390, 970, 1230 ve 1600 ppm olarak ölçülmüştür. Öğrenci sayılarına göre sıcaklık değerleri 19.5°C ile 22.6 °C arasında, bağıl nem değerleri ise %31.5 Rh ile %42 Rh olarak ölçülmüştür. Farklı öğrenci sayıları ile yapılan deneysel çalışmada ekserji verimi ortalama %42 olarak hesaplanmıştır. Sistemin enerji verimi değişken öğrenci sayılarına göre ortalama %54 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca klima santralinde kullanılan plakalı ısı geri kazanımını net verimliliği ise %60 olarak hesaplanmıştır.

Sınıf ortamının iklimlendirmesi için klima santraline bağlanan sıcaklık, bağıl nem ve CO₂ sensörleri vasıtasıyla bulut sistemi üzerinden ölçümler alınmıştır. Buradan alınan veriler doğrultusunda makine öğrenme yöntemlerinden, Destek Vektör Makineleri (DVM), Gasus Süreç Regrasyonu (GSR), Regresyon Ağaçları (RA) ve Ağaç Toplulukları (AT) ile ayrı ayrı kullanılarak sıcaklık, nem ve iç hava kalitesinin ppm değerleri tahmin edilmiştir. Deney setinde klima santrali çalıştırıldığında sınıf ortamının CO₂ değeri, kuru termometre sıcaklığı ve bağıl nem değerleri makine öğrenmesi yöntemleri ile R² (Determinasyon Katsayısı) değeri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın sonucunda CO₂ miktarının R² değeri GSR yönteminden %99, kuru termometre sıcaklık değeri GSR %93 ve bağıl nem değeri GSR yönteminden %98 olarak elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Makine öğrenmesi, bulut tabanlı, klima santali, enerji, ısı geri kazanım, hava kalitesi, sıcaklık, nem.

Bilim Kodu : 92808

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AIR CONDITIONING SYSTEMS

Erhan BUDAK

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Energy System Engineering**

**Thesis Advisor:
Prof. Dr. İlhan CEYLAN
January 2024, 71 pages**

Energy is required in every aspect of today's life, and this need continues to increase worldwide daily. The requirement for energy in the production areas of increasingly developing economies and industrial factories is growing. Therefore, energy has become the primary input for all enterprises. Most energy consumed in buildings today is used for heating, cooling, and air conditioning.

Air conditioning systems constitute about 30% of the total energy consumption. The main problem in air conditioning systems is that although the number of people in the environment changes, the airflow rate remains constant. This study applied “a plate heat recovery air handling unit” to a classroom environment by instant control with a PID (Proportional-Integral-Derivative) controlled automation system and cloud-based. Dry bulb temperature, relative humidity, and air quality (ppm) values of the classroom environment were observed and managed through the cloud system.

While there were 0, 25, 50, and 70 students in the classroom environment, the CO₂ values were measured as 390, 970, 1230, and 1600 ppm, respectively. For the mentioned numbers of students, temperature values were calculated between 19.5 °C and 22.6 °C, and relative humidity values measurements were 31.5 % Rh and 42% Rh. In the experimental study, the exergy efficiency was calculated as 42% on average when the number of students changed. According to variable student numbers, the system's average energy efficiency was 54%. In addition, the net efficiency of the plate heat recovery used in the air handling unit is calculated as 60 %.

For the air conditioning of the classroom environment, measurements were taken via the cloud system via temperature, relative humidity and CO₂ sensors connected to the air handling unit. In line with the data obtained here, temperature, humidity and the ppm value of indoor air quality were estimated by using machine learning methods such as Support Vector Machines (SVM), Gauss Process Regression (GPR), Regression Trees (RT) and Tree Ensembles (ET) separately. In the experimental setting, the CO₂ value, dry bulb temperature and relative humidity values of the classroom environment -as the air handling unit was operated were compared with the R² (Determination Coefficient) values using machine learning methods. The obtained comparison results are as follows: R² value of the CO₂ amount is 99% from the GPR method, the dry thermometer temperature value is 93% from the GPR method, and the relative humidity value is 98% from the GPR method.

Key Word : Machine learning, cloud-based, air handling unit, heat recovery, indoor air quality, temperature, humidity.

Science Code : 92808

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. İlhan CEYLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde yer alan ve bu çalışmamın başından sonuna kadar tavsiye ve rehberlikleriyle bana yardımcı olan sayın hocalarım Doç. Dr. Volkan KIRMACI ve Doç. Dr. Alper Ergün'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamın deneysel düzeneğinin kurulmasında ve başarılı bir şekilde ilerlemesinde her türlü yardımı veren, Öğr. Gör. Dr. Murat KORKMAZ ve Öğr. Gör. Dr. Ayhan DOĞAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın deney düzeneğindeki malzemelerin satın alınmasında yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Murat YILDIZ'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın oluşumunda maddi ve manevi olarak desteklerini esirgemeyen, KLİSEF Makine ve Havalandırma A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi olarak her türlü yardımı esirgemediğim yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
BÖLÜM 3	9
KLİMA SANTRALLERİ	9
3.1. KLİMA SANTRALLERİ BİLEŞENLERİ	9
3.1.1. Karkas	9
3.1.2. Karışım Hücresi	10
3.1.3. Filtre Hücresi	11
3.1.4. Isıtıcı Hücresi	12
3.1.5. Isı Geri Kazanım Hücresi	13
3.1.6. Fan Hücresi	14
3.1.7. Susturucu Hücresi	14
BÖLÜM 4	15
PID KONTROL VE BULUT SİSTEMİ	15
4.1. PID KONTROL	15

	<u>Sayfa</u>
4.1.1. Oransal Kontrol	16
4.1.2. İntegral Kontrol	17
4.1.3. Türevsel Kontrol.....	18
4.2. BULUT SİSTEMİ	20
4.2.1. Klima Santrallerinde Bulut Sistemi Uygulaması.....	21
 BÖLÜM 5	 22
MAKİNE ÖĞRENME VE METOTLARI	22
5.1. DESTEK VEKTÖR MAKİNELERİ.....	23
5.2. GAUSS SÜREÇ REGRESYON	24
5.3. REGRESYON AĞAÇLARI	24
5.4. AĞAÇ TOPLULUKLARI	25
 BÖLÜM 6	 26
MATARYEL VE METOT	26
6.1. DENEY SİSTEMİ.....	26
6.2. MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMASI	28
6.3. DENEY SİSTEMİNDEKİ ÖLÇÜM ALETLERİ.....	30
6.4 METOT	34
6.5. DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ	34
6.5.1. Enerji Analizi.....	35
6.5.1.1. Plakalı Isı Geri Kazanımlı Klima Santralinin Havaının Hacimsel Debisinin Hesaplanması	35
6.5.1.2. IGK Ünitesinin Enerji Veriminin Hesabı	35
6.5.1.3. Isıtma Kapasitelerinin Hesaplanması.....	36
6.5.1.4 Plug Fan Gücü Hesabı	37
6.5.2. Ekserji Analizi	37
6.5.3. Klima Santrali Enerji Tüketimi	39
6.5.4. Belirsizlik Analizi.....	40
 BÖLÜM 7	 42
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	42

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 8	53
SONUÇLAR	53
KAYNAKLAR	55
EK AÇIKLAMALAR A. DENEY SONUÇLARI.....	60
ÖZGEÇMİŞ	71



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Alüminyum ve çelik profil kesit.	10
Şekil 3.2. İklimlendirme santralinde karışım hücresi.....	11
Şekil 3.3. Döner tip ısı geri kazanımlı ve karışım hücreli klima santrali.....	11
Şekil 3.4. Isı geri kazanım tipleri.	13
Şekil 4.1. PID kontrolün matematiksel kontrol yapısı [30].	16
Şekil 4.2. Oransal bant.	17
Şekil 4.3. Oransal kontrol blok şeması.....	17
Şekil 4.4. Oransal ve integral kontrolü.....	18
Şekil 4.5. Oransal ve integral kontrol blok şeması.....	18
Şekil 4.6. Oransal ve türevsel kontrollü zaman- sıcaklık değişimi.	19
Şekil 4.7. Oransal ve türevsel kontrol blok şeması.	19
Şekil 4.8. Bulut bilişim platformu [39].	20
Şekil 4.9. Bulut tabanlı klima santrali uygulaması.	21
Şekil 5.1. Makine öğrenmesi metotları.	22
Şekil 5.2. Gözetimli ve gözetimsiz makine öğrenmesi alt dalları [42].	23
Şekil 6.1. Plakalı ısı geri kazanımlı klima santrali.....	27
Şekil 6.2. a) Klima santrali, b) Sınıf ortamı.	27
Şekil 6.3. Isı geri kazanımlı klima santralinin otomasyon şeması.	28
Şekil 6.4. Makine öğrenmesi algoritması akış süreci.....	30
Şekil 6.5. Oransal nem ve sıcaklık ölçüm sensörü.....	31
Şekil 6.6. Hava kalite sensörü (CO ₂).	32
Şekil 6.7. VAV cihazı.	32
Şekil 6.8. Üç yollu Vana.	33
Şekil 6.9. Hava hızı ölçüm cihazı ve probu (anemometre).	33
Şekil 6.10. Üç fazlı sayaç.....	34
Şekil 6.11. %100 Taze havalı klima santrali.....	38
Şekil 6.12. Klima santrali ekseji verimliliği.....	39
Şekil 6.13. Klima santralinin farklı öğrenci sayılarında CO ₂ -enerji tüketimi.....	40
Şekil 7.1. Klima santrali kapalı iken ortamdaki CO ₂ yoğunluğunun makine öğrenimi tahmin sonuçları.	43

Sayfa

Şekil 7.2. Klima santrali kapalı iken ortamdaki sıcaklık degerlerin makine öğrenimi tahmin sonuçları.....	44
Şekil 7.3. Klima santrali kapalı iken ortamdaki bağıl degerlerin makine öğrenimi tahmin sonuçları.....	45
Şekil 7.4. Klima santrali çalışırken ortamdaki CO ₂ yoğunluğunun makine öğrenimi tahmin sonuçları.....	47
Şekil 7.5. Klima santrali çalışırken ortam sıcaklık değerinin makine öğrenimi tahmin sonuçları.....	48
Şekil 7.6. Klima santrali çalışırken bağıl nem değerinin makine öğrenimi tahminsonuçları.....	49
Şekil 7.7. Klima santrali çalıştığında sınıf ortamının sıcaklık değişimi.	50
Şekil 7.8. Klima santrali çalıştığında sınıf ortamının bağıl nem değişimi.	51
Şekil 7.9. Klima santrali çalıştığında sınıf ortamının CO ₂ yoğunluğunun değişimi.	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. EN 1886'ya göre klima santralin mekanik performansı.	10
Çizelge 3.2. ISO 16890'a göre verimlilik değerleri ve sınıfları.....	12
Çizelge 6.1. Plakalı ısı geri kazanım santrali otomasyon şemasına bağlı ölçüm sensörleri.	28
Çizelge 6.2. Makine öğrenmesinin deney setinin giriş ve çıkış parametreleri.....	29
Çizelge 6.3. Test cihazında kullanılan ölçüm aletlerinin özellikleri.	31
Çizelge 6.4. Deney setindeki ölçüm aletlerinin belirsizlik ve teknik özellikleri.	41
Çizelge 7.1. Klima santrali kapalıyken ortam CO ₂ yoğunluğunun makine öğrenimi performans ölçüm metrikleri.	42
Çizelge 7.2. Klima santrali kapalıyken ortam sıcaklık değerinin makine öğrenimi performansı ölçüm metrikleri.	44
Çizelge 7.3. Klima santrali kapalıyken ortam bağıl nemin makine öğrenimi performans ölçüm metrikleri.	45
Çizelge 7.4. Klima santrali açıkken ortam CO ₂ yoğunluğunun makine öğrenimi performans ölçüm metrikleri.	46
Çizelge 7.5. Klima santrali açıkken ortam sıcaklık değerinin makine öğrenimi performans ölçüm metrikleri.	49
Çizelge 7.6. Klima santrali açıkken ortamın bağıl nem değerinin makine öğrenimi performans ölçüm metrikleri.	50
Çizelge Ek A.1. Derslikte öğrenci olmadığında ve klima santralinin kapalı olduğu şartlardaki deney sonuçları.	61
Çizelge Ek A.2. Derslikte öğrenci olmadığında ve klima santralinin açık olduğu şartlardaki deney sonuçları.	62
Çizelge Ek A.3. Derslikte 25 öğrenci olduğunda ve klima santralinin kapalı olduğu şartlardaki deney sonuçları.	63
Çizelge Ek A.4. Derslikte 25 öğrenci olduğunda ve klima santralinin açık olduğu şartlardaki deney sonuçları.	64
Çizelge Ek A.5. Derslikte 50 öğrenci olduğunda ve klima santralinin kapalı olduğu şartlardaki deney sonuçları.	65
Çizelge Ek A.6. Derslikte 50 öğrenci olduğunda ve klima santralinin açık olduğu şartlardaki deney sonuçları.	67
Çizelge Ek A.7. Derslikte 70 öğrenci olduğunda ve klima santralinin kapalı olduğu şartlardaki deney sonuçları.	68

Çizelge Ek A.8. Derslikte 70 öğrenci olduğunda ve klima santralinin açık olduğu şartlardaki deney sonuçları.....	69
--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

$\dot{V}_n$	: Kanaldan geçen havanın hacimsel debisi, [m ³ /h]
A	: Kanalın alanı, [m ²]
V	: Havanın hızı, [m/s]
$\dot{V}$	: Klima santralinde havanın hacimsel debisi, [m ³ /h]
$\dot{Q}_I$	: Toplam ısıtma kapasitesi, [kW]
P	: Havanın miktarı, [kg/m ³]
C_p	: Havanın özgül ısısı, [kcal/kg°C]
$t_{üf}$	: Üfleme havasının sıcaklığı, [°C]
$t_{lgkç}$	: Plakalı ısı geri kazanım çıkış sıcaklığı, [°C]
$\dot{n}$	: Klima santralinin ısıtma kapasitesi verimi,
$\dot{Q}_K$	: Klima santralinde fanların harcadığı enerji tüketimi, [kWh]
$\dot{Q}_{KAZ}$	: Kazanın harcadığı enerji tüketimi, [kWh]
q	: Kazanın tükettiği doğalgaz miktarı, [m ³ /h]
C_v	: Doğalgazın alt ısı değeri, [9,59 kW/h]
$\eta_{bürüt}$	: Bürüt verimlilik, [%]
$\dot{m}_{\dot{u}}$	: Üfleme havası çıkışı kütleli debisi, [kg/s]
$\dot{m}_d$	: Dönüş havası çıkışı kütleli debisi, [kg/s]
$\dot{m}_{min}$	: $\dot{m}_{\dot{u}}$ ve $\dot{m}_d$ den hangisi küçük ise kütleli debisi, [kg/s]
θ_{11}	: Dönüş havası sıcaklığı, [°C]
θ_{21}	: Üfleme havası giriş sıcaklığı, [°C]
θ_{22}	: Üfleme havası çıkış sıcaklığı, [°C]
EATR	: Dönüş havasından üfleme havasına by-pass oranı, [%]
$\dot{P}_L$	: Fan gücü, [kW]
ΔP_t	: Toplam diferansiyel fark basınç, [mmSS]
η	: Plug fan verimi,

X_m : Ölçüm değerlerinin aritmetik ortalaması,
 X_i : Ölçüm değerleri,
 A : Hassasiyet değeri,
 N : Toplam ölçüm sayısı,
 S : Varyasyon değeri,
 V : Varyans değeri,
 U : Belirsizlik analizi,

KISALTMALAR

ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ABD Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği)
EN : European Norm (Avrupa Normu)
PM : Partikül madde (Particulate Matter)
IAQ : İç kava kalitesi (Indoor air quality)
AHU : Klima santrali (Air handling unit)
HVAC-R : Isıtma, Havalandırma, İklimlendirme (Heating, Ventilating and Air Conditioning-Refregeraint)
SVM : Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine)
GPR : Gauss İşlem Regresyonu (Gauss Process Regression)
RT : Regresyon Ağaçları (Regression Trees)
ET : Ağaç Toplulukları (Ensembles of Trees)
EATR : Dönüş havasından üfleme havasına by-pass oranı (Exhaust Air Transfer Ratio)
IGK : Plakalı ısı geri kazanım ünitesi
PLC : Programlanabilir Mantıksal Denetleyici (Programmable Logic Controller)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Isıtma, havalandırma, iklimlendirme ve soğutma sistemleri (HVAC-R) günümüzde konutlarda, fabrikalarda, hastanelerde, kapalı yüzme havuzlarında ve alış-veriş merkezlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bundan dolayı HVAC-R sistemleri ülkelerin enerji tüketiminde önemli bir paya sahip oldukları bilinmektedir. ABD Enerji Bakanlığı'nın 2017'de yaptığı araştırmaya göre yıllık enerji tüketimin %30'unu iklimlendirme sistemleri oluşturmaktadır. Bu yüzden her geçen yıl tüketilen enerjinin daha verimli kullanmasının önemi ortaya çıkmaktadır [1].

İklimlendirme sistemlerinde enerjiyi daha verimli kullanmanın birçok yöntemi mevcuttur. Bu yöntemlerden özellikle ısı geri kazanım sistemlerinin kullanımı ön plana çıkmaktadır. Isı geri kazanım yöntemleri ile %45 - %85 arasında enerji geri kazanımı sağlanabilmektedir. Bu sistemler tam bir otomasyon sistemi ile kontrol edilse bile en uygun enerji verimliliği durumunu bilememektedir. Bundan dolayı ısı enerji geri kazanımı yapabilmek için fazladan elektrik enerjisi tüketebilmektedir [2].

Kapalı ortamların iklimlendirmesinde kullanılan sistemlerin özelliklerinin belirlenmesi, insanlar hayatların büyük zamanını kapalı ortamlarda geçirmesinden dolayı önemli bir hale gelmiştir. Bilindiği üzere dış ortam hava kalitesi iç ortam hava kalitesine göre daha yüksektir. Bununla birlikte iç ortamda bulunan insanların sayısı hava kalitesini etkilemektedir. İç hava kalitesi konfor şartlarının altına düştükçe, birçok sağlık problemleri ortaya çıkması beklenmektedir [3,4,5]. Bundan dolayı kapalı ortamlarda tercih edilecek olan cihazların hem enerjiyi verimli kullanması hem de ortamının iklimlendirmesini %100 taze hava ile sağlayabilmesi planlanmalıdır.

Pandemi sürecinde kapalı ortamların şartlandırılmasında %100 taze hava ile çalışan sistemlerin kullanılması özellikle, iç hava kalitesinde değişen CO₂ ppm değerlerinin

istenilen değerlerde tutulabilmesi için daha önemli hale gelmiştir. Bundan dolayı pandemi dönemi ile birlikte iklimlendirme sistemlerinde %100 taze hava ile çalışmayan cihazlara hepa filtre ve UV lamba takılması zorunlu hale getirilmiştir. Ayrıca sistemlerde ısı geri kazanım nitesi varsa kapatılması, egzoz hava debisinin artırılması, bağıl nemin %40 ile %60 arasında tutulması, yazın mahal sıcaklığının 30°C'nin üstünde olmaması, kışın ise 20°C'nin üzerinde olmaması gibi şartlar getirilmiştir. Bununla birlikte kapalı ortamların %100 taze hava ile havalandırmasını en az 5 çevrim yapacak şekilde havalandırma cihazı ya da bunu sağlayacak kadar açılır pencere yapılması gibi durumlar ortaya çıkmıştır. Pandemi dönemi ile iklimlendirme sistemlerinde i ortamlardaki hava kalitesini iyileştirmek için alınan önlemler gerçekleşmediğinde virüslerin çok hızlı bir şekilde yayılacağı ortaya çıkmıştır. Bundan dolayı pandemi dönemi %100 taze hava ile çalışan cihazların ne kadar önemli olduğunu göstermiştir [6,7].

Belirtilen durumlardan yola çıkarak, iç hava kalitesini arttırmak hedefiyle planlanan bu çalışmada, %100 taze hava ile çalışan bir klima santrali ile sınıf ortamının hava kalitesini etkileyen CO₂ ppm, sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin, farklı günlerde dış ortam hava şartlarındaki değişken ğrenci sayılarına göre termal konfor koşulları kontrol edilmiştir. Ayrıca çalışmada, sınıf ortamında farklı ğrenci sayılarında llen CO₂ ppm değerleri, bağıl nem değerleri ve kuru termometre sıcaklık değerleri makine öğrenmesi yöntemlerinden DVM, GSR, RA ve AT ile analizler yapılarak karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İklimlendirme sistemleri, iç hava kalitesi ve makine öğrenmesi ile ilgili yapılan akademik çalışmalar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Noh vd. (2007) yaptıkları çalışmada, bir konferans salonun çalışma koşulları değiştiğinde; termal konforunu, iç hava kalitesi ve konferans salonun soğutma yükünü deneysel ve sayısal olarak araştırmıştır. Bu çalışmada kaset tipi dört yönlü karışım havalı fan coil ünitesi ile farklı çalışma koşullarında hem sıcaklık konforu ve mahalin hava kalitesi istenen şartlarda tutmak için sayısal modelleme oluşturulmuştur. Konferans salonunda belirlenen kişi sayısı ve CO₂ değerleri ölçümlerden gelen değerler ile sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hem sayısal modellemekten hem de dört yöne üflemleri fan coilden alınan değerlere bakıldığında büyük oranda benzerlik görülmüş, sayısal modelin sıcaklık konforu ve mahalin ortam hava kalitesini analiz edecek şartlara haiz olduğu belirtilmiştir [8].

Zhu vd. (2015) yaptıkları çalışmada, değişken soğutuculu akışkan cihazı (VRF) ve değişken hava debisi kontrol ünitesini (VAV) birleştirerek bir klima santralinin maksimum yüklerde enerji verimliliğini ve iç hava kalitesini optimum kontrolünü online bir şekilde yapmışlardır. Kontrol ana komponentleri sadeleştirerek, ilk önce sistemin performansını tahmin edilebilecek bir fonksiyon ile enerji tüketimini ve termal konfor açısından bir maliyet fonksiyonu oluşturmuşlardır. Sonrasında en uygun kontrol durumlarını bulmak için bir genetik algoritma geliştirilmişlerdir. Simülasyon üzerine dayalı iki durumun çalışması test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; hem sıcaklık konforu hem de sisteminin enerji tüketimini etkili bir şekilde azaltacağını belirtilmiştirlerdir [9].

Schito (2018) yaptığı çalışmada iki tane sulu ısıtıcı, sulu soğutucu, buharlı nemlendirici olan bir müzede çalışan klima santralinin, farklı su sıcaklıklarında, farklı iç ortam ve dış ortam şartlarında gözlemlemiştir. Klima santralinde bulunan ısı değiştiriciler uygun NTU modeli seçilerek MATLAB’de modellenerek dinamik olarak simüle edilmiştir. Elde edilen gözlemler ve simüle edilen değerler karşılaştırılmıştır [10].

Turgut ve Çoban (2019) Kompresör, evaporatör, kondenser ve genişleme vanasından oluşan bir soğutma çevriminin dinamik olarak modellenmesini yapmışlardır. Simüle edilen veriler üzerinden yapay sinir ağı oluşturmuşlardır. Elde edilen bu yapay sinir ağı sistemi model olarak kullanılarak soğutma sisteminin en uygun bir şekilde kontrolü gerçekleştirilmişlerdir.[11].

Andrew vd. (2013) Bir klima santralinin veri madenciliği kullanarak enerji tüketimi optimize edilmiştir. Sistem de chiller, pompa, dönüş fanı ve üfleme fanı modellenerek çoklu algılayıcı (multiperceptron) topluluk algoritması kullanılmıştır. Besleme havasının sıcaklığı ve cihaz dışı statik basınç önceden belirlenmiş bir aralıkta tutulurken, klima santralinin toplam enerji tüketimini en aza indirmek için doğrusal olmayan bir model geliştirilmiştir. Önerilen modeli çözmek için dinamik tabanlı, elektromanyetizma benzeri bir algoritma tasarlanmıştır. Önerilen algoritmayı doğrulamada toplamda 200 test veri noktası kullanılmış. Hesaplamalı sonuçlarda, klima santrali tarafından tüketilen enerjinin neredeyse %23 oranında azaldığı gösterilmiştir [12].

Yao vd. (2015) Buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemi için geçici bir yanıt modeli (a transient response model) geliştirilmiştir. Sistem modelinde kondenser, evaporatör, kompresör ve elektronik genişleme valfini (EGV) temsil eden dört alt model bulunmaktadır. Kondenser ve evaporatör hareket eden sınır formülasyonuna dayanılarak geliştirilmiştir. Linerearizasyon yoluyla, bu dinamik modeller matris biçiminde ifade edilen uzay-durum temsiline dönüştürülmüştür. Kompresör ve EGV sabit modeller olarak kabul edilmiştir. Çünkü termal ataletleri ısı eşanjörlerine (kondenser ve evaporatör) kıyasla çok daha küçüktür. Sistem modeli, EGV açma derecesi ve ısı yükünün kademeli değişimi ve kondenserin soğutucu yağının giriş

sıcaklığının artışı bu deney ile doğrulanmıştır. Sonuçlar model simülasyonlarının deneysel verilerle iyi bir uyumaya sahip olduğunu göstermiştir. Simülasyon hataları deneysel verilerle karşılaştırıldığında çoğunlukla %10'dan daha azdır. Bu çalışmada önerilen model durum-uzay matrisi şeklinde ifade edildiğinden, güçlü taşınabilirlik ve yüksek hesaplama verimliliği ile öne çıkarılmıştır. Herhangi bir karmaşık koşulda bir soğutma sisteminin termal dinamik özelliklerini araştırılmasını ve mükemmel kontrol şemaları oluşturulması sağlanmıştır [13].

KiJeon Nama vd. (2020) Bu çalışmada, yeraltı metro istasyonundaki yolcuların doğrudan ya da dolaylı olarak toza maruz kalmışlardır. Yeraltı metro istasyonların hem havalandırılması hem de iklimlendirilmesi için yüksek enerji kaybına sahip havalandırma sistemi kurulmuştur. Metro istasyonunun çevresi ile sürekli değişen dış hava kalitesi arasında ilişki karmaşık olduğundan iç hava kalitesi dinamik olarak oluşturulmasında bir hayli zorlanmışlardır. Bu nedenle, interaktif yapay zeka programı ve derin öğrenme temeline dayanarak hem enerji verimliliğini hem de havalandırma sistemini optimize etmek için bir model geliştirmişlerdir. Derin öğrenme modeli kullanılarak metro istasyonunun gelecek 24 saatlik çevresel durumunu tahmin etmişlerdir. İnteraktif yapay zeka ile dinamik olarak programlanarak aynı durumlar için havalandırma debisi parça parça araştırılmıştır. Sonuç olarak enerji verimliliği % 8.68, optimal havalandırma ve iklimlendirme yapılarak senelik 4217 dolar tasarruf edilebileceğini vurgulamışlardır [14].

Erdi (2022) Bu çalışmada belli bir demiryolu hattındaki ray sıcaklıklarının değişimleri ve belirlenen demir yolu hattındaki trenlerin hızları nesnelerinin interneti vasıtasıyla gözlenmiş ve gerekli olan datalar toplanmıştır. Elde edilen veriler ile makine öğrenmesinin bir dalı olan derin öğrenme kullanılarak zamana dayalı demir yolu ray sıcaklığı tahmin etmiştir. Demir raylar üzerine konan sıcaklık sensörleri sinyallerin ölçümleri mikro işlemci üzerinden veri tabanı bulut üzerinden anlık olarak oluşturulmuştur. Aynı zamanda internet üzerinden meteorolojik veriler veri tabına eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Elde edilen veriler ile derin öğrenme algoritması kullanarak web tabanlı ray sıcaklığı tahmini yapan sistem oluşturmuştur [15].

Özdemir (2019) Ev tipi spilt klima cihazının 4 farklı dış ortam sıcaklıklarına göre kapasite ve güç tüketimi belirlemiştir. Cihazın hem iç ünite hem de dış ünite fan hızları, EEV (Electronic expansion valve) açılma açıklığı, kompresör dönme hızı ve belirlenen dış ortam sıcaklığına bağlı olarak bir optimizasyon yazılımı geliştirilmiştir. Deney seti için 158 adet veri 4 farklı ortam koşullarda makine öğrenme tekniklerinden doğrusal regrasyon, çok terimli regrasyon, rassal orman ve yapay sinir ağları olmak üzere 4 farklı model için kodlar oluşturmuştur. Makine öğrenme metotlarıyla SEER değeri 6.689'dan 6.767 'ye yükselmiş, cihazın yıllık enerji tüketimi 183.14 kW'tan 181.02 kW değerine düşülmüştür [16].

Ruoxi vd. (2019) Bu çalışmada, bina kontrol verilerinin etkileşiminden insanların konforu sağlamak ve enerji tüketimini düşürmek için optimum kontrol stratejisiyle öğrenen, bir uçtan bir uca pekiştirmeli derin öğrenme paradigmasını araştırmışlardır. Sanal ortamda geliştirilen pekiştirmeli derin öğrenme deneysel olarak doğrulanmıştır [17].

Dasheng ve Fu-Po (2020) Bu çalışmada spilt klima cihazını bulut tabanlı yapay zeka ile çalıştırılması geliştirilmiştir. Bulut tabanlı yapay zeka kontrol sistemini geliştirebilmek ve yüksek enerji verimi elde edebilmek için, bulanık kontrol + PID kontrol ve model tabanlı tahmin kontrolü seçilmiştir. Bulanık kontrol+PID kontrol da enerjiden kar edilmemiş fakat model tabanlı kontrolde EER değeri %9.12 artırılmıştır. Cihazın CSPF (Cooling season power factor) Bulut+PID control ile sezonluk güç faktörü %3.46'ya kadar, model tabanlı kontrolde ise %7.37 enerji verimi elde etmişlerdir [18].

Zhijie vd. (2020) Klima santrallerinde hatalı montaj ya da eksik bakımdan dolayı çeşitli arızalar meydana gelmesinden dolayı, çeşitli arıza tespit ve teşhis yöntemleri geliştirmişlerdir. Deneysel veriler yetersizliğinden dolayı, makine öğrenime dayalı protokoller oluşturarak, sınırlı deney verileri sayılarını artırmışlardır. Çeşitli koşullar altında farklı senaryoların simülasyon verilerini oluşturmak için makine öğrenimi ile geliştirilmiş tersine modelleme yapmışlardır. Bu geliştirilen makine öğrenme modelin kümelemesini farklı koşullar altında sınıflandırarak dengelemesi sağlanmıştır. Ayrıca daha geniş çalışma koşullarında parçacık sürü optimizasyonu kullanmışlardır.

Geliştirilen makine öğrenme modelleri hem değişken hızlı hem de sabit hızlı çalışan verilerin tahminlerinin doğruluğunun kontrolünü yapmışlardır [19].

Xin vd. (2021) yaptıkları çalışmada aynı şartlarda çalışan klima cihazını 5 farklı (aşırı gradyan artırma, lojistik regrasyon, rastgele orman, destek vektör sınıflandırılması ve en yakın komşu) makine öğrenimi yöntemiyle davranışı tahmin etmeye çalışmışlardır. Ayrıca önem sıralama yöntemi ile makine öğrenim algoritmaları arasındaki ilişkide tartışılmıştır. Sonuç olarak açık ofislerde çalışan klima cihazların çalışması makine öğrenim algoritmalarıyla tahmin edebilmek için insan davranışlarının etkisinde ele alınması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır. [20].

Kuan-Heng vd. (2021) Bu çalışmada pekiştirmeli öğrenmede derin öğrenme vasıtasıyla egzoz fanı ve klima santralinin enerji tüketimini optimize etmek için bir kontrol algoritması geliştirmişlerdir. İlk olarak benzer ortam şartlarında simülasyon oluşturmuşlardır. Sonrasında 72 kişilik bir sınıf da testi yapmışlardır. Bir ay boyunca hem dış ortam koşulları hem de iç ortam koşulların etkilerinin enerji tüketimi ve hava kalitesini detaylı olarak incelemişlerdir. Klimayı 25°C’de sabitleyerek geliştirdikleri algoritma ile karşılaştırma yaparak %43 enerji tasarrufu elde etmişlerdir. Ayrıca ortamın CO₂ miktarını da %24 azalttığı sonucuna ulaşmışlardır. Klimayı 26°C’de egzoz fanını sabitlediklerinde ise %15 enerji tasarrufu ve %13 CO₂ miktarının azaldığı sonucunu bulmuşlardır [21].

Yuzgen vd. (2018) Bu çalışma bina sakinlerinin davranışlarını gerçek zamanlı olarak HVAC sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak için araştırmışlardır. Bir ofis binası içerisindeki insanların stokastik davranışlarını derinlemesine incelemişlerdir. Bina sakinlerinin benzer statik soğutma için, mevcut oda sıcaklıklarını korumak ve enerji tüketimini düşürmek için otomatik olarak cevap veren kontrol stratejisi önermişlerdir. Bu kontrol stratejisiyle makine öğrenme metotlarından gözetimli öğrenme ve gözetimsiz öğrenme bina sakinlerinin davranışları için uygulanmıştır. Ofis alanını soğutmak için kullanılan sisteme gerçek zamanlı oda sıcaklık set değerlerini belirlenen kuralları uygulatarak ve algoritma yapılarak bilgiler öğretilmiştir. Böylelikle soğutma sisteminin kontrolünde insan davranışlarındaki ihtiyacını azaltmak için makine

öğrenimi dayalı yaklaşımı oluşturmuşlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda %7 ile %52 arasında enerji tasarrufu sağlamışlardır [22].

Paige vd. (2019) Kullanım aktivitelerinin doğru olarak tahmini sağlamak ve bina yönetim sistemiyle entegre olabilen talebe dayalı derin öğrenme çerçevesinde yapılan bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada yapay zekalı bir kamera ve derin öğrenme algoritması kullanılarak geliştirmişlerdir. Bina içindeki aktiviteleri tahmin edebilmek için test ortamı oluşturmuşlardır. Bu aktiviteleri oturmak, kalkmak, yürümek ve uyuklamak olarak belirlemişlerdir. Derin öğrenme metodu kullanılarak geliştirilen modelin ve statik olarak duran bir kişi ile karşılaştırıldığında %30.56 ısı enerji elde edilmişlerdir [23].

BÖLÜM 3

KLİMA SANTRALLERİ

Klima santrelleri dış ortamdan aldığı taze havayı; temizleyip, şartlandırıp iç mahale hava kanalları vasıtasıyla gönderilmesini sağlayan havalandırma ve iklimlendirme cihazlarıdır. Bu cihazların kullanım amaçları kapalı ortamdaki havanın nemini, sıcaklığını ve hava debisini istenilen şartlarda sabit tutarak konfor sağlamaktır. Klima santralinin üretiminde hava dört farklı şekilde şartlandırılabilir. Bunlar ısıtma, soğutma, nem alma, nemlendirme olarak bilinmektedir. Ayrıca dış ortamdan alınan taze hava içerisinde katı parçacıklar, gazlar, mikroorganizmalar filtreler vasıtasıyla tutarak havanın temizlenmesini sağlanmaktadır [22].

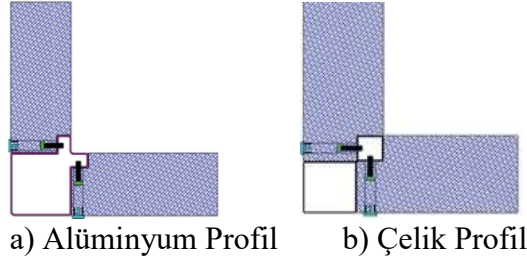
Klima santrali üretimindeki farklılık, gövde yapısındaki kullanılan malzemenin kalınlığı, ısı iletimi katsayısı ve ısı taşınım katsayısından meydana gelmektedir. Ayrıca klima santrali kullanılan diğer komponentlerden (fan, motor, soğutucu ve ısı değiştiricilerden) oluşmaktadır. Klima santrallerinde gövdenin mekanik özelliklerini inceleyen EN 1886 ve kullanılan komponentlerin performansı ile seçim programı doğruluğunu inceleyen EN 13053 olmak üzere iki temel Avrupa (EN) standardı bulunmaktadır. Ayrıca hijyenik klima santrallerin cihaz içerisinde kullanılan komponentler için DIN 1946-4, VDI 6022-1, VDI 3803, DIN EN 13053 ve ISO 846 standartları vardır. Kapalı yüzme havuzlarının nem alma kapasitelerini ise VDI 2089 standardı ile belirlenmektedir.

3.1. KLİMA SANTRALLERİ BİLEŞENLERİ

3.1.1. Karkas

Klima santrali içerisindeki havanın sıcaklığı ve nemi dış ortamdan farklıdır, bundan dolayı mahal havası ile dış ortam havası arasındaki ısı transferinin minum düzeyde olması enerji tasarrufu açısından çok önemlidir. Klima santrallerin karkası genellikle

alüminyum ya da çelik profilden imal edilmektedir. Şekil 3.1’de profil eksitleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Alüminyum ve çelik profil kesit.

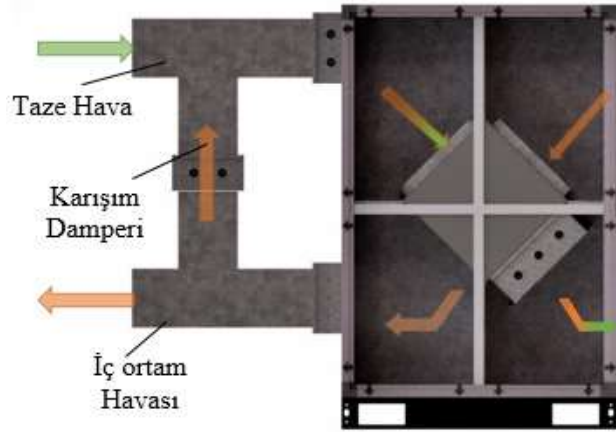
Klima santrallerinde kullanılan panellerin ısı direnci yüksek olmalı bu aynı zamanda hem ısı kaybını hem de santralin yüzeyinde yoğuşmayı önlemektedir. Klima santralinin hangi iklim şartlarında çalışacak ise ısı geçirgenliği ve ısı köprüleme değerlerine bakılarak belirlenmelidir. Çizelge 3.1’de EN 1886 ‘ya göre ısı geçirgenlik ve ısı köprüleme değerleri verilmiştir [23].

Çizelge 3.1. EN 1886’ya göre klima santralin mekanik performansı.

EN 1886 'ya Göre Teknik Özellikler					
Isıl iletkenlik sınıfı		T4	T3	T2	T1
Isıl iletkenlik değeri (U) [$W / m^2 \text{ } ^\circ C$]		$1,4 < U \leq 2,0$	$1,0 < U \leq 1,4$	$0,5 < U \leq 1$	$U \leq 0,5$
Isıl köprüleme sınıfı		TB4	TB3	TB2	TB1
Isıl köprüleme değeri (Kb)		$0,30 \leq Kb < 0,45$	$0,45 \leq Kb < 0,60$	$0,60 \leq Kb < 0,75$	$0,75 \leq Kb < 1,0$
Filtre by-pass kaçağı sınıfı	G1-F5	F6	F7	F8	F9
Filtre by-pass kaçağı değeri (%)	6	4	2	1	0,5
Gövde kaçak sınıfı			L3	L2	L1
Gövde kaçak değeri (f) [$lt / s \text{ } m^2$]			$1,90 \leq f < 0,63$	$0,63 \leq f < 0,22$	$f \leq 0,22$
Gövde mukavemeti sınıfı			D3	D2	D1
Gövde mukavemeti değeri (d) [mm/m]			$10 \leq d$	$10 \leq d < 4$	$d \leq 4$

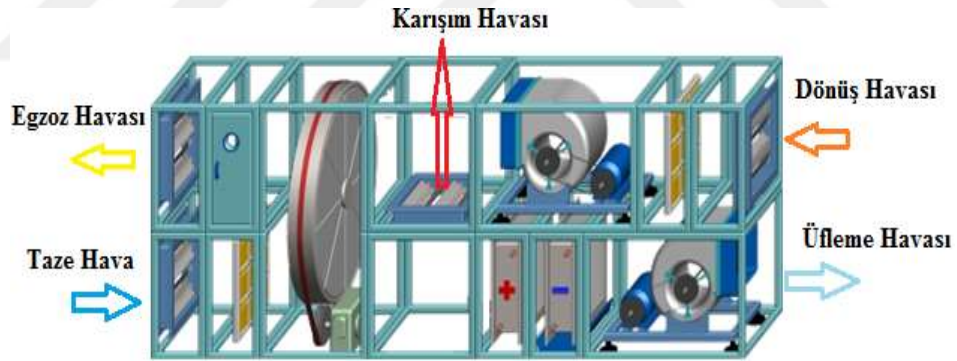
3.1.2. Karışım Hücresi

Hem taze havadan hem de iç ortamdan gelen havanın ısınısını istenen miktarlarda havayı damperler vasıtasıyla karıştırılarak yapılan yöntemdir. Klima santrallerinde karışım hücresi ısı enerjisinin doğrudan geri kazanımını sağlamaktadır. İster klima santralin bir ünitesi olsun isterse klima santralinin bir parçası olmadan da yapılabilir. Şekil 3.2’de iklimlendirme santralinde uygulaması belirtilmiştir.



Şekil 3.2. İklimlendirme santralinde karışım hücresi.

Bazı uygulamalarda hem ısı geri kazanım ünitesi hem de karışım hücresi uygulanmaktadır. Çünkü her zaman ısı geri kazanım şartları uygun olmayabilmektedir. Bu yüzden ısı geri kazanımını by-pass etmek gerekmektedir. By-pass yönetimiyle cihazın toplam enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır. Şekil 3.3’ de hem ısı geri kazanımlı hem de karışım havalı klima santrali gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Döner tip ısı geri kazanımlı ve karışım hücreli klima santrali.

3.1.3. Filtre Hücresi

İklimlendirilecek olan mahalin ihtiyacına göre, klima santralin konfigürasyonunda bir kademededen dört kademeye göre filtreleme seviyeleri kullanılırlar. Filtrelerinin verimlilikleri ISO 16890 göre belirlenmektedir. ISO 16890 standartı $0,3\ \mu\text{m}$ ile $10\ \mu\text{m}$ arasında parçacık boyutunda sınıflandırmak yapmaktadır. $0,3 - 1\ \mu\text{m}$ (kurum parçacık, virüs) parçacık boyut aralığına kadar ePM1, $0,3 - 2,5\ \mu\text{m}$ (organik bileşenler) parçacık boyut aralığına kadar ePM2, $0,3 - 10\ \mu\text{m}$ (toz, polen) parçacık boyut

aralığına kadarsa ePM10 olarak verimlilikleri hesaplanmaktadır. Çizelge 3.2’de 16890 ‘a göre verimlilik değerleri ve sınıfları gösterilmektedir [24].

Çizelge 3.2. ISO 16890’a göre verimlilik değerleri ve sınıfları.

PM1 (0,3 ≤ x ≤ 1 µm)		PM2,5 (0,3 ≤ x ≤ 2,5 µm)		PM10 (0,3 ≤ x ≤ 10µm)		Kaba (<%50 of PM10)	
ePM1 %95	F9	ePM2,5 %95	F7	ePM10 %95	M6	Kaba %95	G4
ePM1 %90		ePM2,5 %90		ePM10 %90		Kaba %90	
ePM1 %85		ePM2,5 %85		ePM10 %85		Kaba %85	
ePM1 %80		ePM2,5 %80		ePM10 %80		Kaba %80	
ePM1 %75	F8	ePM2,5 %75	F7	ePM10 %75	M6	Kaba %75	
ePM1 %70		ePM2,5 %70		ePM10 %70		Kaba %70	
ePM1 %65	F7	ePM2,5 %65	M6	ePM10 %65	M5	Kaba %65	G3
ePM1 %60		ePM2,5 %60		ePM10 %60		Kaba %60	
ePM1 %55		ePM2,5 %55		ePM10 %55		Kaba %55	
ePM1 %50		ePM2,5 %50		ePM10 %50		Kaba %50	
						Kaba %45	
						Kaba %40	
						Kaba %35	G2
						Kaba %30	

Çizelge 3.2’de görülmek üzere verimlilik alt değeri %50 dir. Bir filtre PM1 parçacıkların %50’ sinden fazlasını tutabiliyorsa bu filtrenin verimliliği ISO ePM1 olarak ifade edilir. PM10 büyüklüğündeki parçacıkların %50’ sinden daha azını tutuyorsa ISO Coarse (Kaba) olarak sınıflandırılmaktadır. Hepa filtreler ve ulpa filtreler bu sınıflandırmanın dışında kalmaktadır [25].

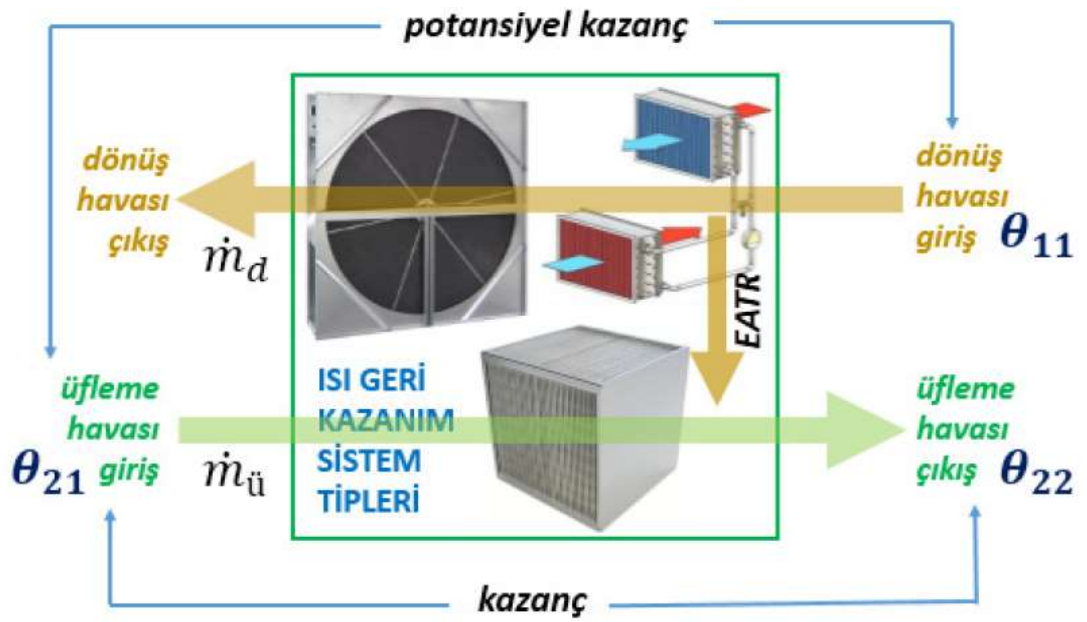
3.1.4. Isıtıcı Hücresi

Klima santrallerinde kullanım alanlarına göre ısıtıcılar; sıcak sulu ısıtıcı, buharlı ısıtıcı, elektrikli ısıtıcı, doğal gazlı ısıtıcı ve ısı pompalı ısıtıcı olmak üzere beş farklı şekilde imal edilmektedir. Bu ısıtıcılar ön ısıtıcı ya da son ısıtıcı olarak çalışabilmektedirler. Sulu ve buharlı ısıtıcılar genellikle bakır boru alüminyum kanttan ya da çelik boru çelik kanttan imal edilmektedirler. Elektrikli ısıtıcılar su, buhar ve doğal gazın olmadığı yerlerde ve düşük kapasite ihtiyacı olan mahaller için tercih edilmektedir. Doğal gazlı ısıtıcı klima santrali içerisinde bir bileşen olarak yerleştirilebilmektedir. Bu ısıtıcıların baca ve yoğunlaşma suyu ile temasta olan yüzeyleri AISI 430 paslanmaz malzemeden imal edilmektedir. Isı pompalı (heat pump) ısıtıcılar ise

evaporatör, kondenser, kompresör ve genişleme valfinden oluşan klima santrali içinde kurulan bir sistemdir.

3.1.5. Isı Geri Kazanım Hücresi

İklimlendirme sistemlerinde havadan havaya ısı geri kazanım (IGK) üniteleri plakalı, tamburlu, ısı borulu ve run around loop (sudan havaya ısı geri kazanım) tiplerinden oluşmaktadır. Şekil 3.4’de IGK tipleri gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Isı geri kazanım tipleri.

IGK ünitelerin verimlilikleri TS EN 308 göre Eşitlik 3.1, Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3’ten verilen formüller ile hesaplanmaktadır [26, 27].

$$\eta = \frac{\dot{m}_{\dot{u}} (\theta_{22} - \theta_{21})}{\dot{m}_{min} (\theta_{11} - \theta_{21})} \quad (3.1)$$

$$\eta_{b\ddot{u}r\ddot{u}t} = \frac{(\theta_{22} - \theta_{21})}{(\theta_{11} - \theta_{21})} \quad (3.2)$$

$$\eta_{net} = \frac{\left(\frac{(\theta_{22} - EAT \cdot \theta_{11})}{1 - EAT} \right) - \theta_{21}}{(\theta_{11} - \theta_{21})} \quad (3.3)$$

Burada;

- η : Verimlilik, [%]
 $\eta_{b\ddot{u}r\ddot{u}t}$: Bürüt verimlilik, [%]
 $\dot{m}_{\ddot{u}}$:  fleme havası çıkışı kütlesel debisi, [kg/s]
 $\dot{m}_{min}$: $\dot{m}_{\ddot{u}}$ ve $\dot{m}_d$ den hangisi küçük ise kütlesel debisi, [kg/s]
 θ_{11} : Dönüş havası sıcaklığı, [ C]
 θ_{21} :  fleme havası giriş sıcaklığı, [ C]
 θ_{22} :  fleme havası çıkış sıcaklığı, [ C]
EATR : Dönüş havasından üfleme havasına by-pass oranı, [%]

3.1.6. Fan Hücresi

Klima santrallerinde kullanılan fanlar  ne   ik sık kanatlı (forward curved) santrif   (radyal) fanlar, geri   ik seyerek kanatlı (backward curved) santrif   (radyal) fanlar, plug aksiyal (eksenel) fanlardır.  ne   ik   ik kanatlı fanların verimleri %45-%65 arasındadır ve yüksek basınçlarda g   tüketime fazladır. Geri   ik kanatlı fanların verimleri %65-%80 arasındadır ve fan devri  ne   ik kanatlı fanlara göre yaklaşık iki kat daha yüksektir. Plug fanlar karakteristik olarak radyal fanlar gibi hareket ederler. Bunun yanı sıra verimleri %80'e kadar çıkabilmektedir, daha homojen bir hava akışı sa lar, frekans invertörü kullanarak hava debisinin kontrolü sağlamaktadır. Ayrıca temizliği kolay olduğundan hijyenik klima santralinde de kullanılmaktadır [28,29].

3.1.7. Susturucu Hücresi

 klimlerlendirme sistemlerinde meydana gelen gürültü mekanizmaları, klima santralinin bileşenlerinden, kanallardan oluşmaktadır. Ses kaynağından oluşan akustik basıncı ölçmek için ses basıncı kullanılır ve ses kaynağından olan uzaklığına göre de i ir. Bu insan kulağı tarafından duyulandır. Ses gücü ise ses kaynağından yayılan ak stik gücü ifade eder. Kaynaktan uzaklığa bağlı olarak değişmez. Odada oluşan gürültüyü veya akusti i azaltmak için susturucu kullanılır [28].

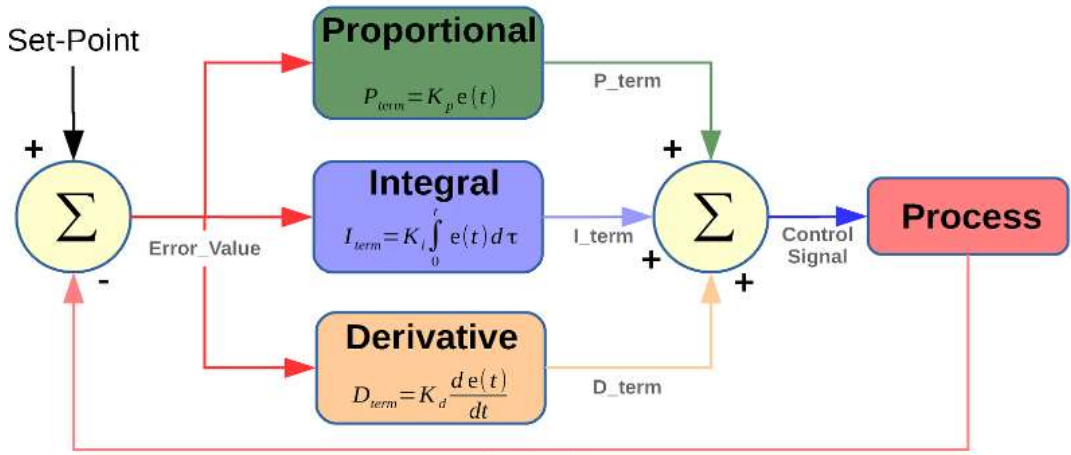
BÖLÜM 4

PID KONTROL VE BULUT SİSTEMİ

İklimlendirme sistemlerinde kullanılan fan, motor, üç yollu vana, sıcaklık sensörü, nem sensörü ve CO₂ sensörü gibi ekipmanların bir otomasyon sistemine bağlantısı yapılmaktadır. Kullanılan ekipmanların kontrolünün belli bir hassiyette çalışması beklenmektedir. Anlık ölçülen değer ile istenen değer arasındaki hata oranını azaltmak için, oransal, integral, türevsel kontrol ya da tüm bu kontrollerin aynı anda kombinasyonu tercih edilebilmektedir. Bu bölümde otomasyon sistemlerinin kontrol türleri hakkında bilgi verilmiştir.

4.1. PID KONTROL

PID sistemler elektronik, mekanik ve pnömatik olarak çalışan cihazların döngüsel olarak kontrol eden bir mekanizmadır. Ölçüm cihazlarından gelen sinyaller vasıtasıyla giriş sinyali ile dönüş sinyalini karşılaştırarak hata miktarını en az indirgiyen bir kontroldür. Bir otomasyon sisteminde kontrol edilecek sıcaklık, basınç ve hava debisi gibi değerlerin sapmalarındaki hassasiyet düzeyini PID sistem ile giderilebilir. PID kontrol, Oransal (Proportional), İntegral (Integral), Türev (Derivative) için kullanılan kısaltmadır. Şekil 4.1’de matematiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1. PID kontrolün matematiksel kontrol yapısı [30].

4.1.1. Oransal Kontrol

Oransal kontrol birçok çeşitli sistem için basit ve yaygın olarak kullanılan bir kontrol yöntemidir. Oransal bir kontrolde enerjinin 0 voltan'dan 10 volta kadar ayarlanabildiği, sıcaklık aralığına oransal bant (0-10 V) denir. Bu bant kontrol edilen değerin bir yüzdesi olarak tanımlanır ve set değeri etrafında eşit olarak tanımlanır. Oransal kontrolün matematiksel olarak ifadesi aşağıdaki Eş.4.1'de gösterilmiştir [31,32].

$$P_{term} = K_p e(t) + b \quad (4.1)$$

Burada;

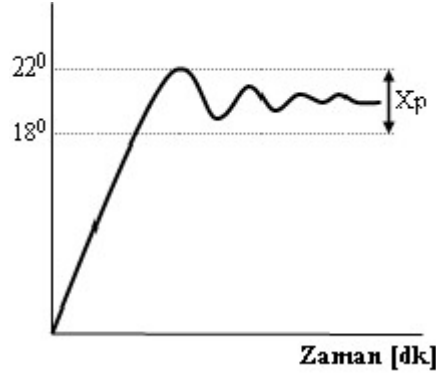
P_{term} : Oransal kontrol çıkışı

K_p : Oransal kazanç

$e(t)$: Referans sinyal ile çıkış sinyali arasındaki farkın hata sinyali

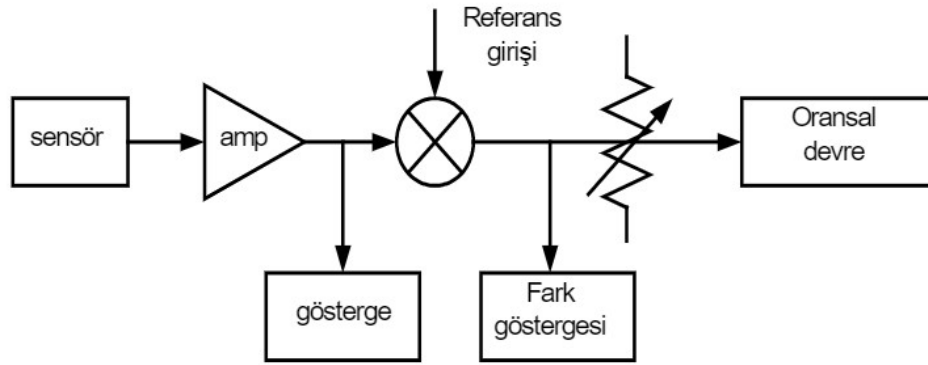
b : Sapma ayar parametresi

Oransal kontrolde gerçek değer ile set ile değer arasında bir ölü bant değeri olan bir fark oluşmaktadır. Oransal kontrolde bu ölü bant değerini önlemek için ya prosete değişiklik yapılmalı ya da cihazın ölü bant değeri dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Şekil 4.2 de oransal bant gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Oransal bant.

Oransal kontrol cihazı prosesten talep edilen enerjiyi sürekli ayarlayarak bir dengede karar verir. Şekil 4.3’de Oransal kontrol blok şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Oransal kontrol blok şeması.

4.1.2. İntegral Kontrol

İntegral kontrol (sıfırlama kontrolü olarak da adlandırılmaktadır.) oransal bir kontrole sahip bir proseste kabul edilmez miktarda kayma (offset) meydana geldiğinde kullanılır. İntegral kontrol, kontrol edilen değişken değerini istenilen set noktasını getirmek için kullanılır. Bu kontrol modu çoğunlukla oransal kontrol ile birlikte kullanılır. İntegral kontrolün matematiksel olarak ifadesi Eşitlik 4.2’ de gösterilmiştir [33].

$$I_{term} = K_i e(t) + \frac{K_i}{\tau_I} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (4.2)$$

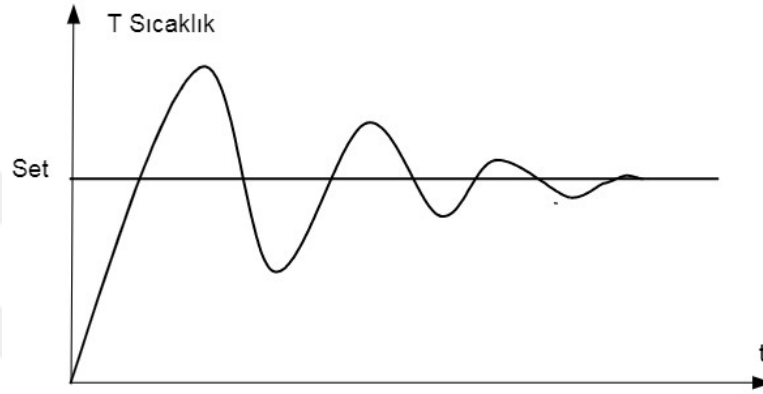
Burada;

I_{term} : Oransal ve integral fonksiyonların toplamı

K_i : Oransal kazanç

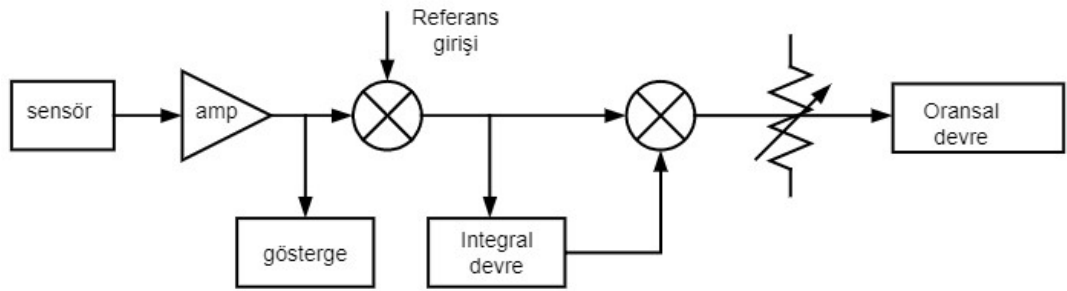
$e(t)$: Referans sinyal ile çıkış sinyali arasındaki farkın hata sinyali

τ_I : İntegral zaman sabiti



Şekil 4.4. Oransal ve integral kontrolü.

Oransal ve integral kontrol mekanizması istenilen set değerinde ilk başta bir miktar salınım yaptıktan sonra istenilen değere ulaşmaktadır. Şekil 4.4'te oransal ve integral kontrolü ve Şekil 4.5'de oransal ve integral kontrol blok şeması gösterilmiştir [35].



Şekil 4.5. Oransal ve integral kontrol blok şeması.

4.1.3. Türevsel Kontrol

Türevsel kontrolün temel amacı prosesin başlangıcında meydana gelen salınımların etkisini azaltmak için kullanılır. Şekil 4.6' da Oransal ve türevsel kontrollü zaman-

sıcaklık değişimi gösterilmektedir. Türev alma sistemin daha dar bir oransal bant oluşturacak ve kararlı bir ölçme oluşturacaktır. Eşitlik 4.3'te türevsel kontrolün matematiksel olarak ifadesi verilmiştir [33].

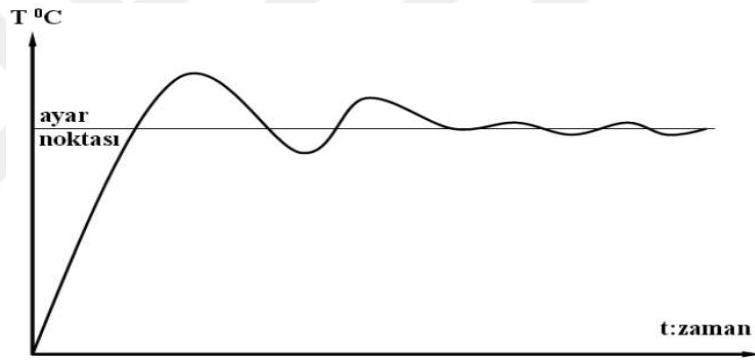
$$D_{term} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.3)$$

Burada;

D_{term} : Oransal kontrol çıkışı

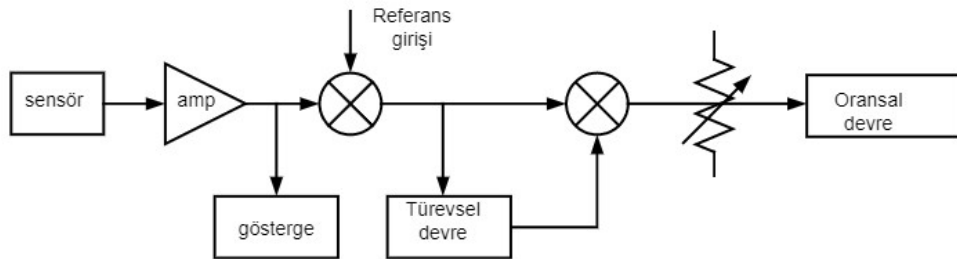
K_d : Oransal kazanç

$\frac{de(t)}{dt}$: Hata sinyalinin zamana bağlı olarak değişimi



Şekil 4.6. Oransal ve türevsel kontrollü zaman- sıcaklık değişimi.

Oransal ve türevsel kontrol sistemi ölü bant durumunu tamamen ortadan kaldıramamaktadır. Burada oransal ve türevsel kontroldeki salınım belirli bir aralıkta sürmektedir. Şekil 4.7'de oransal ve türevsel kontrol blok şeması gösterilmektedir.

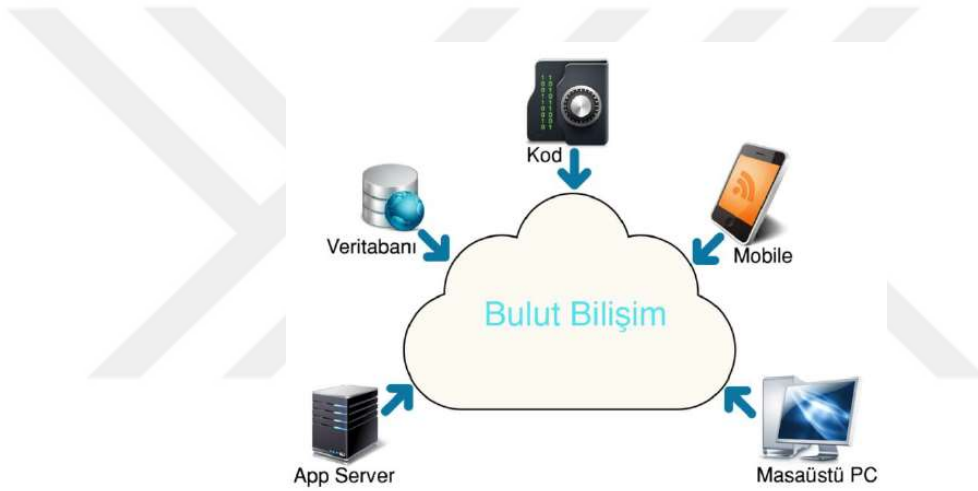


Şekil 4.7. Oransal ve türevsel kontrol blok şeması.

Bir proste hassasiyet ve kontrollünde zorluklar var ise oransal, integral ve türevsel (PID) kontrol mekanizması seçilmelidir [34].

4.2. BULUT SİSTEMİ

Bulut tabanlı kontrol platformu, sistemden gelen taleplere göre seçmek ve önceden tanımlanan bilgilerden oluşan bilgi işlem, ağ, depolama alanı ve diğer kaynaklardan oluşan bir prosedür. Bu platform bilgisayar, akıllı telefon, tablet gibi günümüz teknolojileriyle yazılım olmadan ve bilgi depolamaya ihtiyaç duymaksızın internet üzerinden kullanılabilir. Şekil 4.8’de bulut bilişim platformu gösterilmiştir [36].

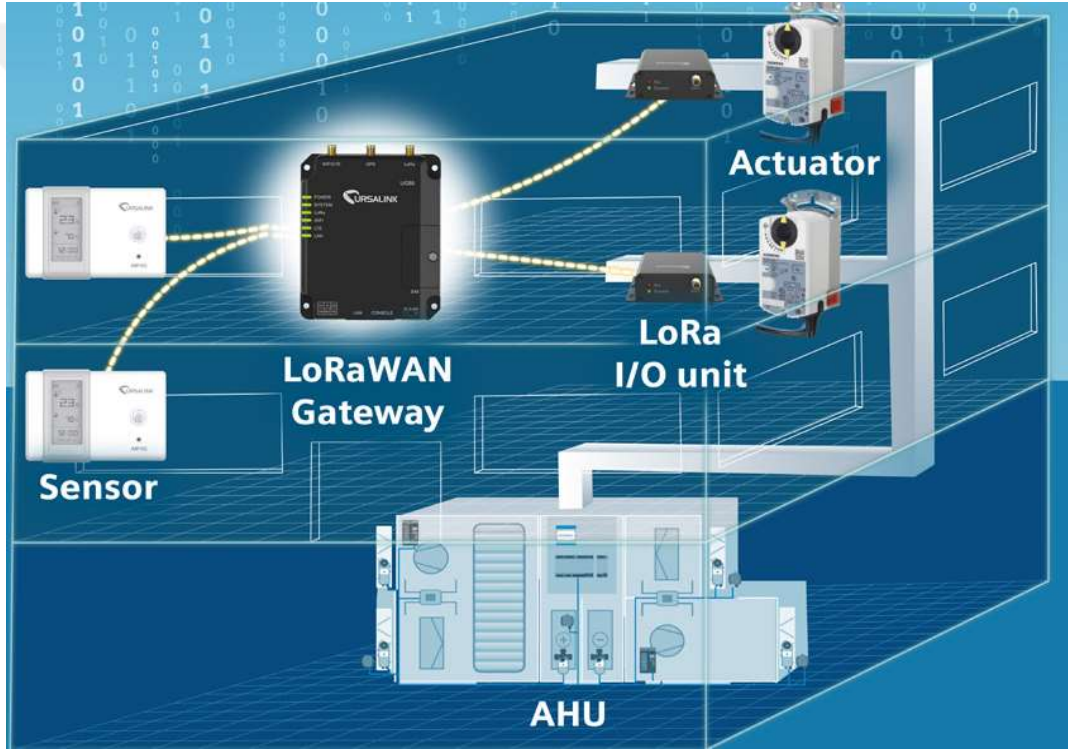


Şekil 4.8. Bulut bilişim platformu [39].

Bulut platformuna her tür dosya yüklenebilmekte ve bu dosyalar ihtiyaç duyulan durumlarda internet aracılığıyla erişilebilmektedir. Ayrıca yazılım güncellemeleri, enerji tasarrufu ve maliyet bakımından avantajlar getirmektedir. Aynı zamanda bulut platformu olan cihazlar sağlıklı binaların olmasını sağlamaktadır [37,38].

4.2.1. Klima Santrallerinde Bulut Sistemi Uygulaması

Klima santralinde kullanılan mikro işlemcinin (PLC) içine sistemin çalışma koşullarını sağlayan otomasyon yazılımı yapılır. Yazılım bulut platformu ile ilişkilendirilir. Bulut platformu klima santralinde bağlı bulunan sensörlerden gelen verilerle geçmiş kayıtları, anlık veri aktarımını ve anlık performansı kayıt altına almaktadır. Ayrıca bulut platformu klima santralinin otomasyonu için kullanılan ekipmanların optimizasyonu ve raporlamasını da sağlamaktadır. Şekil 4.9’da bulut tabanlı klima santralinin çözümü gösterilmektedir [39].



Şekil 4.9. Bulut tabanlı klima santrali uygulaması.

Şekil 4.9’da Damper motoru (damper actuator) ve sensör bulut sistemine, LoRa I/O modül (Long Range Input/Output) ve gateway vasıtasıyla entegre edilmiştir. Havalandırmayı optimize etmek için buluttan alınan veriler klima santralinin algoritması tarafından işlenmektedir [40].

BÖLÜM 5

MAKİNE ÖĞRENME VE METOTLARI

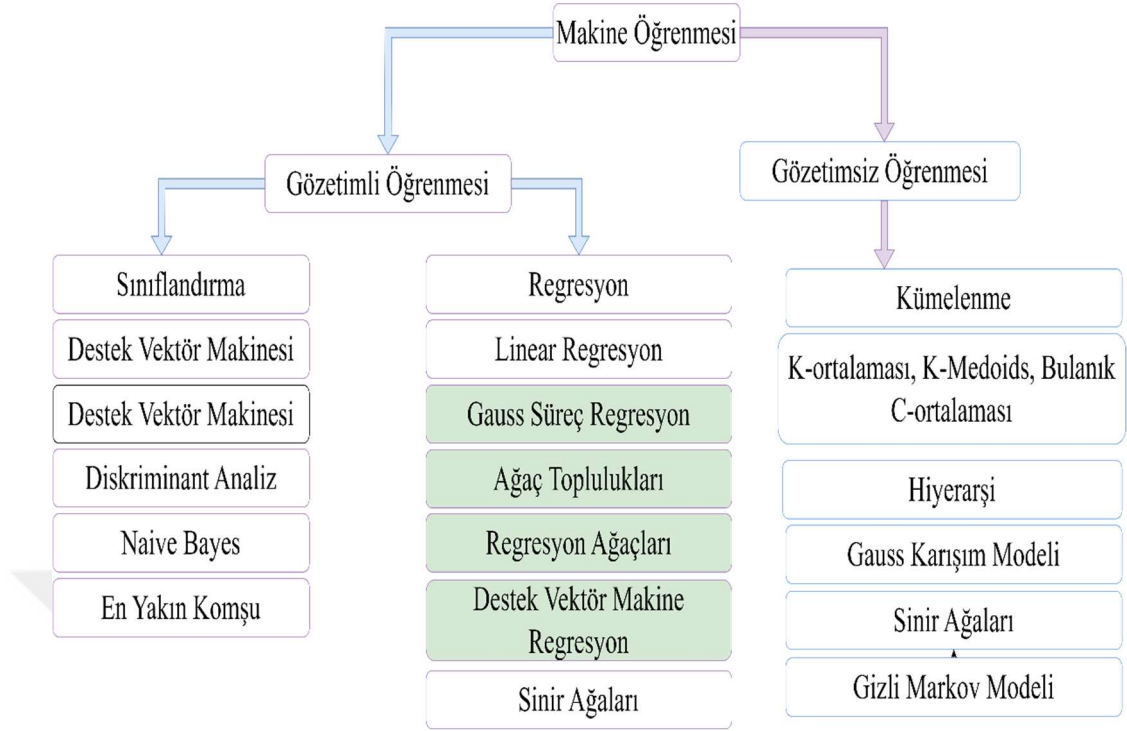
Çeşitli problemleri çözen ve bu probleme ait verileri bilgisayarda modelleyerek eğiten bir algoritma yöntemi makine öğrenmesidir. Makine öğrenme metotları üç ana grupta tanımlanır. Bunlar gözetimli öğrenme, gözetimsiz öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme yöntemleridir. Şekil 5.1’de makine öğrenmesi metotları gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Makine öğrenmesi metotları.

Gözetimli modelde, geçmiş verilerin çıktılarını kullanılarak gelecekteki sonuçları tahmin etme metotudur. Gözetimsiz öğrenme, hiçbir modelin belirlenmediği ve hiçbir özelliğin önemli olmadığı tanımlayıcı modelleri eğitmek için kullanılır. Pekiştirmeli öğrenme ise makinenin verimliliğini en üst düzeye çıkartmak için tek bir duruma göre gereksinimlerine dayalı olarak belirli kararlar almak üzere verilerin eğitildiği bir makine öğrenmesi metotudur [41].

Yukarıda bahsedilen makine öğrenmesi metotların alt öğrenme metotları da vardır. Bu metotlar Şekil 5.2’de gözetimli ve gözetimsiz makine öğrenmesi alt dalları gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Gözetimli ve gözetimsiz makine öğrenmesi alt dalları [42].

Deneysel verilerden elde edilen mevcut veriler, çözümde kullanılan model ve algoritma sayesinde en iyi performansı verecek şekilde tasarlanır. Deney sisteminde kullanılan Gauss Süreç Regresyon, Ağaç toplulukları, Regresyon Ağaçları, Destek Vektör Makine öğrenmeleri aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

5.1. DESTEK VEKTÖR MAKİNELERİ

Destek vektör makine öğrenimi (DVM'ler), 1990'larda Vapnik aracılığıyla geliştirilmiştir [43]. DVM, verinin birleşik dağılım fonksiyonu bilgisi gerekmediğinden, dağıtım fonksiyonuna ihtiyaç duymadan çalışabilir [43]. DVM, sınıfları birbirinden ayırmak için kullanılır. Bu nedenle en uygun ayırma düzlemini (hiper düzlem) bulmak için analizler yapılmıştır. DVM'ler diğer sinir ağı yöntemlerini bir arada kullandıkları gibi yüksek genelleme yeteneğine sahip oldukları için yüz algılama, ses algılama ve metin sınıflandırma gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaktadırlar [44,45,46]. DVM ilk olarak lineer verileri iki sınıfa ayırmak için kullanılırken, günümüzde lineer olmayan ve çok sınıflı veriler birçok alanda tahmin

elde etmek için kullanılmaktadır. DVM’de en uygun hiper düzlemi hesaplamak için Eşitlik 5.1 ve 5.2’de verilmiştir.

$$w \cdot x_i + b \geq +1, y = +1 \quad (5.1)$$

$$w \cdot x_i + b \leq -1, y = -1 \quad (5.2)$$

Burada $x \in R^N$ N-boyutlu uzayı, $y \in \{-1, +1\}$ sınıf etiketlerini, w ağırlık vektörünü, b eğilim değerini gösterir [47].

5.2. GAUSS SÜREÇ REGRESYON

Gauss süreç regresyonu (GSR), esas olarak doğrusal olmayan regresyon problemlerini çözmek için kullanılır. Parametrik olmayan, olasılıksal durumlarda tercih edilir [48]. GSR Bayesian fonksiyon yaklaşıma sahiptir ve küçük veri setleriyle bile başarılı sonuçlar alınabilir. GSR’de en doğru seçeneği tanımlamak için çeşitli kovaryans fonksiyonları kullanılabilir [49]. Gauss süreç fonksiyonu Eşitlik 5.3’de $f(x)$ olarak gösterilmiştir [50].

$$f(x) = GP(m(x), k(x, x')) \quad (5.3)$$

Eşitlikte, $k(x, x')$ kovaryans fonksiyonudur ve $m(x)$ ortalama fonksiyondur. Eşitlik 5.4’de kovaryans fonksiyonu belirtilirken, Eşitlik 5.5’de ortalama fonksiyon yer almaktadır.

$$m(x) = E[f(x)] \quad (5.4)$$

$$k(x, x') = E[(f(x) - m(x))(f(x') - m(x')))] \quad (5.5)$$

5.3. REGRESYON AĞAÇLARI

Regresyon ağaçları, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için topluluk üyelerini eşit alt sınıflara bölen bir makine öğrenimi modelidir. Bu metot

kök düğümü oluşturur ve dallanma işlemi gerçekleşir. Ayrıca, bu yöntem parametrik değildir. Yöntemler aracılığıyla, önce kök düğüm oluşturulur ve ardından dallanma işlemine geçilir. Bu yöntemde ağacın budanması ve oluşumu için en uygun ağaç yapısı seçilir [51]. Bu nedenle RA yönteminde yüksek hata ve düşük hataya sahip dalların çıkarılmasına budama denir.

Bu yöntem, dallanma ve büyümeyi ortaya çıkarmak için tahmin değerlerinin ortalama kare hatasını en aza indirecek sektörleri hesaplar.

5.4. AĞAÇ TOPLULUKLARI

Zaman içinde birçok ağaçtan kademeli olarak bilgi toplayan bir makine öğrenimi modeline Ağaç Toplulukları (ET) denir. Bu yöntem, her t'yi kendisinden önce geliştirilen ağaçtan veri olarak üretir. Özellikle, sürenin tutarlı bir şekilde güncellenmesi, önceki modelin kalıntıları üzerine AT yerleştirilerek elde edilir. Bu şekilde, modelin kalıntılarına ve onu güncelleme işlevine yeni bir ağaç eklenir. Sonuç değişkeni, tüm ağaçlardan gelen bilgiler ışığında tahminde bulunur. Ağaç toplulukları, makine öğrenme yöntemlerinde topluluk sınıflandırıcı sistemler olarak kullanılır. Çalışmalar, birçok kararsız sınıflandırıcının tek bir toplu sınıflandırıcıda birleştirilmesinin, tek bir sınıflandırıcıdan tahmin sonuçlarından çok daha iyi performans verdiğini belirtmiştir [52, 53,54].

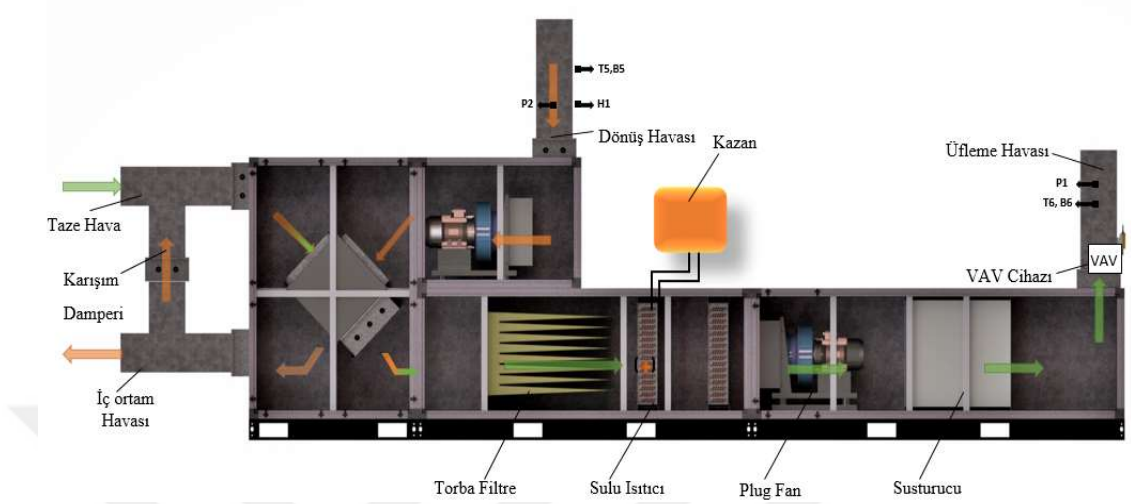
BÖLÜM 6

MATARYEL VE METOT

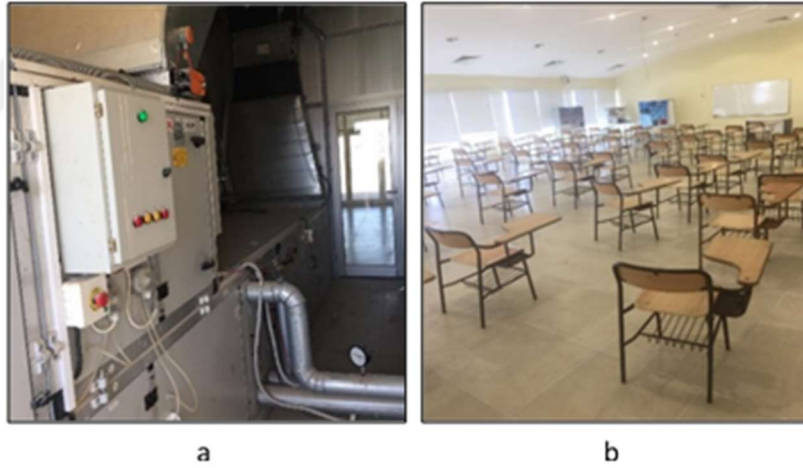
6.1. DENEY SİSTEMİ

Bu çalışmada, bir sınıf ortamının iklimlendirmesi sağlamak için klima santrali kurularak deney düzeneği oluşturulmuştur. Klima santralinde plakalı bir ısı geri kazanım ünitesi bulunmakla birlikte, sistem hem %100 taze havalı hem de karışım havalı çalışabilmektedir. Sınıf ortamının şartlandırılması ve kontrolü sağlayabilmek için sıcaklık sensörleri, fark basınç sensörleri, fan motorunun kontrolü için invertörler, bağıl nem sensörleri, CO₂ sensörü ve hava debisinin kontrolü içinde VAV ünitesi bağlanmıştır. Klima santraline bağlanan sensörler ile PID sistemiyle fanlar, damperler, invertörler ve 3 yollu vana kontrollü gerçekleştirilmiştir. PID sistemindeki yazılım bulut sistemine adapte edilmiştir. Deney sistemin çalışmasında Siemens firmasının Climatix IC bulut platformu kullanılmıştır. Sistemdeki işlemlerin başlatılması için deney düzeneği oluşturulmuş ve bu düzenekteki gerekli veriler (sıcaklık, bağıl nem, CO₂ değeri) bulut sisteminde toplanmaya başlanmıştır. Deney sistemi ile alınan veriler termal konfor ve hava kalitesini tahmin etmek için farklı makine öğrenme yöntemleri ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Sıcaklık, bağıl nem ve CO₂ değerinden gelen sayısal değerler makine öğrenme metotları içerisinde hatalardan kaynaklanan değerlerden ayıklanarak veriler düzenlenmiştir. Düzenlenen veriler, makine öğrenim metotlarında kullanılmak üzere matematiksel modeller izlenerek sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Sayısal ve matematiksel modellere dönüşen değerlerin, makine öğrenmesi yöntemlerinde doğru kullanabilmesi için veriler standardize edilmiştir. Standardize edilen veriler eğitim ve test verileri olmak üzere iki grupta kullanılmıştır. Bu çalışmada, eğitim verileri için verilerin %80'ni ve test verileri için ise verilerin %20'si kullanılmıştır. Makine öğrenme metotları içerisinde DVM, GSR, RA ve AT olmak üzere dört farklı makine öğrenmesi metotları kullanılarak tahminler yapılarak kendi içerisinde karşılaştırmalar yapılmıştır.

Deneyisel olarak farklı makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanıldığı sistemler, klima santrali ve sınıf ortamı Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

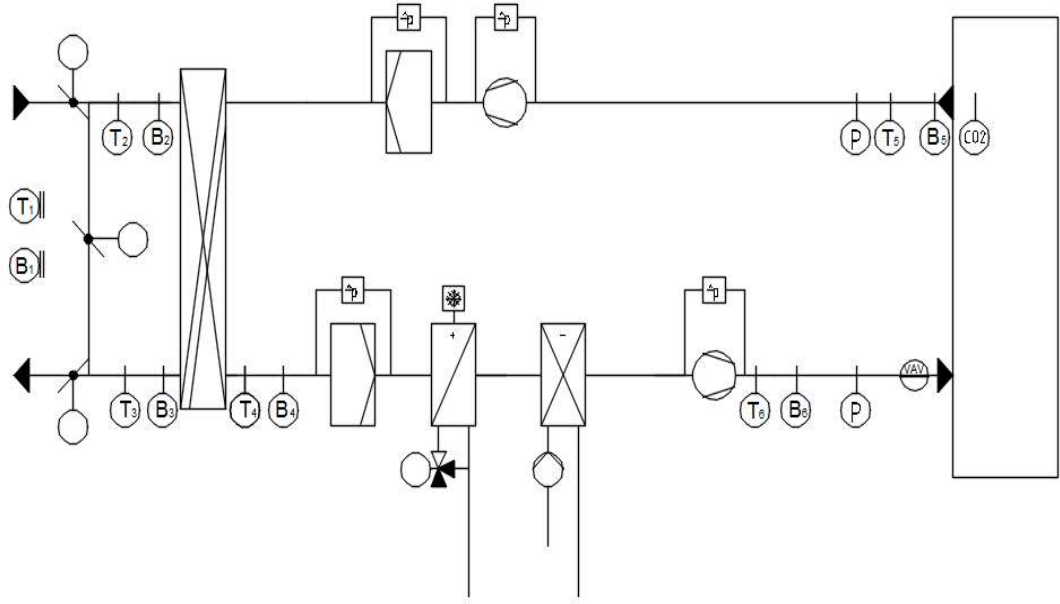


Şekil 6.1. Plakalı ısı geri kazanımlı klima santrali.



Şekil 6.2. a) Klima santrali, b) Sınıf ortamı.

Klima santralinde kullanılan otomasyon sistemindeki sensörlerin tanımlanması Çizelge 6.1’de belirtilmiştir. Ayrıca Şekil 6.3’te ise klima santralinin otomasyon bağlantı şeması gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Isı geri kazanımlı klima santralinin otomasyon şeması.

Çizelge 6.1. Plakalı ısı geri kazanım santrali otomasyon şemasına bağlı ölçüm sensörleri.

T₁	Dış ortam giriş sıcaklık portu,	B₁	Dış ortam giriş bağıl nem portu,
T₂	IGK giriş sıcaklık portu,	B₂	IGK giriş bağıl nem portu,
T₃	Egzoz atış havası çıkış sıcaklık portu,	B₃	Egzoz atış havası çıkış bağıl nem portu,
T₄	IGK çıkış sıcaklık portu,	B₄	IGK çıkış bağıl nem portu,
T₅	Mahal dönüş havası giriş sıcaklık portu,	B₅	Mahal dönüş havası giriş bağıl nem portu,
T₆	Mahal üfleme havası çıkış sıcaklık portu,	B₆	Mahal üfleme havası çıkış bağıl nem portu
H₁	Hava kalite sensörü (CO ₂) ,	P₁	Üfleme havası fark basınç sensörü,
P₂	Dönüş havası diferansiyel fark basınç sensörü,		

6.2. MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMASI

Çeşitli problemleri çözen ve bu probleme ait verileri bilgisayarda modelleyerek eğiten bir algoritma yöntemi makine öğrenmesidir. Deneyisel verilerden elde edilen mevcut veriler, çözümde kullanılan model ve algoritma sayesinde en iyi performansı verecek şekilde tasarlanır. Makine öğrenmesi modelleri arasında k-en yakın komşu algoritması, gauss süreç regresyon, ağaç toplulukları, lineer regresyon, destek vektör makineleri, regresyon ağaçları ve k-means algoritması kullanılan yöntemlerden

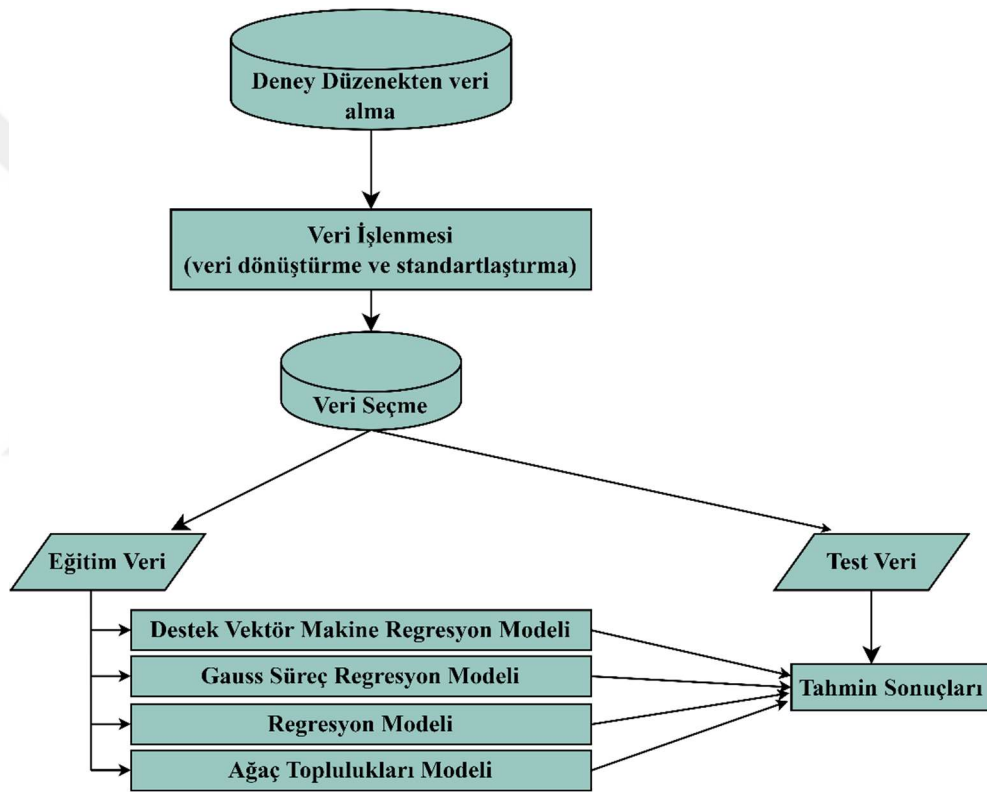
bazılarıdır. Makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak tahmin, kümeleme ve sınıflandırma için kullanılırlar. Bu çalışmada, bir sınıf ortamı için bulut tabanlı ve PID kontrollü plakalı ısı geri kazanımlı klima santrali kullanılarak yapılan deney sonuçlarından elde edilen verilerle, sınıf ortamının konfor koşulları dört farklı makine öğrenmesi yöntemiyle tahmin edilmiştir. Makine öğrenmesi yöntemlerinde kullanılan gerçek test sonuçlarındaki girdi ve çıktı değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Makine öğrenmesinin deney setinin giriş ve çıkış parametreleri.

Klima Santralinin Durumu	Giriş Parametreleri						Çıkış parametreleri
	Zaman [Dakika]	Öğrenci [Sayı]	Dış Ortam Sıcaklığı, [°C]	Dış Ortam Bağlı nem [%]	Üfleme Hava Sıcaklığı [°C]	Üfleme Hava Bağlı Nem [%]	
Klima santrali kapalı	3-180	0-25-50-70	√	√	√	√	Sınıf ortamı CO ₂ yoğunluğu [ppm]
	3-180	0-25-50-70	√		√		Sınıf ortamı sıcaklığı [°C]
	3-180	0-25-50-70		√		√	Sınıf ortamının bağlı nemi [%]
Klima santrali açık	3-150	0-25-50-70	√	√	√	√	Sınıf ortamı CO ₂ yoğunluğu [ppm]
	3-150	0-25-50-70	√		√		Sınıf ortamı sıcaklığı [°C]
	3-150	0-25-50-70		√		√	Sınıf ortamının bağlı nemi [%]

Makine öğrenmesi algoritmanın süreçlerin akış şeması Şekil 6.4’te verilmiştir. Süreç önce verilerin toplanmasıyla başlar, ardından deney düzeneği kurulur. Toplanan verilerin doğal haline dönüştürülmesi için olası ölçüm ve diğer hatalar ortadan kaldırılır. Bununla, veriler makine öğrenimi uyumluluğu için düzenlenir. Aynı

zamanda istenilen sayısal değere sahip olmayan veriler makine öğrenmesi için sayısal kodlara dönüştürülür. Elde edilen verilerin standartlaştırılması, makine öğrenme yöntemlerinde sayısal değerlerin kullanımını düzeltmelidir. Tüm bu işlemlerin sonunda, verilerin bir kısmı eğitim verisi, bir kısmı da test verisi olarak kullanılır. Bu çalışmadaki işlemler, tüm verilerin %80'i eğitim amaçlı, %20'si ise test verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma GSR, RA, AT, DVM gibi eğitim verileri ve makine öğrenmesi yöntemleri ile eğitim süreci gerçekleştirilmiştir. Test verileri ile de tahminler yapılmıştır.



Şekil 6.4. Makine öğrenmesi algoritması akış süreci.

6.3. DENEY SİSTEMİNDEKİ ÖLÇÜM ALETLERİ

Deney sistemideki klima santral cihazındaki ve hava kanallarında kullanılan ölçüm aletlerinin çalışma aralığı, hassasiyet gibi özelliklikleri ayrıca kullanılan ölçüm aletlerinin amaçlarıyla ilgili bilgiler bu bölümde belirtilmiştir. Çizelge 6.3'te test edilen cihazda kullanılan ölçüm cihazların özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 6.3. Test cihazında kullanılan ölçüm aletlerinin özellikleri.

Ölçüm Cihazları	Sıcaklık [°C]	Bağıl Nem [Rh %]	Hava Kalite Sensörü [ppm]	Hava Debisi ölçer [m/s]	Makel trifaze elektrik sayacı
Çalışma Aralığı	0,+50°C ve -35,+35°C	-40,70°C ve 0- 95% r.h.	AC24, DC 15-35V ve 0-2000ppm	0,1-2,5 m/s	-40°C,+80°C
Duyarlılık	At 0...95 % r.h. ve 23 °C: ±5 %,	At30...70 % r.h. ve 23 °C: ±3 %	23°C'de, 1013 hPa, ± 90 ppm,	±%5+0,03m/s	
Anma Akımı					3x10(60)A, 3x10(100)a
Anma Gerilimi					3x220/380V
Sayaç Sabiti					1000imp/kWh, 5000imp/kWh- Doğruluk

Nem ve Sıcaklık Ölçüm Sensörü

Klima santralinin; dönüş mahal havasına, taze hava kanal girişine, mahal üfleme havasına, egzoz havası çıkışına, IGK ünitesinin giriş ve çıkışının bağlantı portlarına sıcaklık ve nem ölçüm cihazları takılarak veriler oransal olarak alınmıştır. Şekil 6.5' te nem ve sıcaklık ölçüm cihazı gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Oransal nem ve sıcaklık ölçüm sensörü.

Hava Kalite Sensörü (CO₂)

Klima santralinde sınıf ortamın ppm değerini ölçmek için CO₂ sensörü dönüş havası çıkışına bağlanarak ortamdaki öğrenci sayılarındaki değişimlere göre ölçüm alınmıştır. Şekil 6.6' da CO₂ sensörü belirtilmiştir.



Şekil 6.6. Hava kalite sensörü (CO₂).

Değişken Hava Debisi Ölçüm Cihazı (VAV)

Klima santralinin üfleme havasının bağlandığı kanala değişken hava debisi ölçüm aleti (VAV) takılmıştır. Böylelikle klima santralinin hem hava debisi doğrulanmıştır hem de klima santralinin hava debisi akışını kontrol altına almak için kullanılmıştır. Şekil 6.7’de VAV cihazı belirtilmiştir.



Şekil 6.7. VAV cihazı.

Üç Yollu Oransal Vana

Mahal sıcaklığını istenilen set sıcaklığına tutmak için üç yollu oransal vana kullanılmıştır. Ayrıca kazadan gelen sıcak suyu da kontrol ederek de sistemin verimli çalışması sağlanmıştır. Şekli 6.8’de üç yollu vana gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Üç yollu Vana.

Anemometre (Hava Debisi Ölçüm Cihazı)

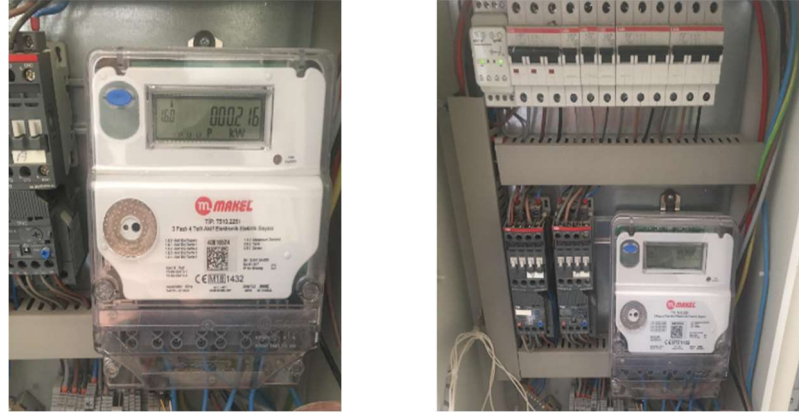
Klima santralinin hava debisini doğrulamak için üfleme kanalından TS ISO 5521 standartına göre, hava hızı ölçümü yapabilmek için anemometre kullanılmıştır. Şekil 6.9’da hava hızı ölçüm cihazı (anemometre) belirtilmiştir. [55].



Şekil 6.9. Hava hızı ölçüm cihazı ve probu (anemometre).

Üç Fazlı Sayaç

Klima santralinde bulunan sulu ısıtıcı için, kazanın sağladığı sıcak su kısımdaki enerji tüketimlerini belirlemek için üç fazlı sayaç bağlanmıştır. Sayacın teknik özellikleri Çizelge 6.3’de belirtilmiştir. Kullanılan sayaç Şekil 6.10’da gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Üç fazlı sayaç.

6.4 METOT

Deneysel çalışmada, bulut tabanlı ve PID kontrollü bir plakalı ısı geri kazanımlı klima santrali ve bir üniversitedeki sınıfının konfor koşulları makine öğrenmesi yöntemleri ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Sınıfta deneyler farklı sayıdaki öğrencilere (0,25,50,70) ayrı ayrı uygulanmış olup, CO₂ miktarı, sıcaklık ve bağıl nem değerleri üçer kez tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır. Deneyler sırasında klima santrali kapalıyken farklı öğrenci sayıları ile 180 dakika süreyle veriler alınmıştır. Daha sonra klima santrali açılarak ortamın konfor değerlerindeki değişim tekrar 150 dakika izlenmiştir. Makine öğrenmesi yöntemleri ile klima santrali kapalıyken konfor koşulları analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca klima santrali açıkken alınan değerler makine öğrenmesi yöntemleri ile ayrı ayrı analiz edilerek karşılaştırılmıştır.

Çalışmada makine öğrenimi yöntemlerinden GSR, DVM, RA ve AT yöntemleri kullanılmış olup, eğitim verilerinin %80'i ve test verilerinin %20'si kullanılarak modelleme yapılmıştır. Modelleme sonucunda sınıftaki CO₂ miktarı, sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin R² belirleme katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır.

6.5. DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ

Deney sisteminden elde edilen verilerle klima santralinin hava debisi, plakalı ısı geri kazanımın verimi, ısıtma kapasitesi, fan gücü hesabı, enerji analizi ve belirsizlik analizi hesapları yapılmıştır.

6.5.1. Enerji Analizi

6.5.1.1. Plakalı Isı Geri Kazanımlı Klima Santralinin Havasının Hacimsel Debisinin Hesaplanması

Klima santralin hacimsel debisi, üfleme kanalından TS ISO 5522 göre geçen havanın hızı log-dogrusal metot ile hesaplanmıştır. Buradaki dikdörtgen kesitin en kesit oranı 1,5’u geçmediği durumlar için uygundur. Eş. 6.1’de dikdörtgen kesitte havanın hacimsel debisinin denklemi tanımlanmıştır [55].

$$\dot{V}_n = AxV \quad (6.1)$$

Burada;

$\dot{V}_n$: Kanaldan geçen havanın hacimsel debisi [m^3/s]

A : Kanalin alanı [m^2]

V : Havanın hızı [m/s]

6.5.1.2. IGK Ünitesinin Enerji Veriminin Hesabı

İklimlendirme sistemlerinde havadan havaya ısı geri kazanım üniteleri plakalı, tamburlu, ısı borulu ve run around loop (sudan havaya ısı geri kazanım) tiplerinden oluşmaktadır. Klima santralindeki ısı geri kazanım verimlilikleri TSE EN 308 göre kütlelesel, net ve brüt olarak Eş. 6.2, Eş. 6.3 ve Eş.6.4’de verilmiştir.

$$\eta = \frac{\dot{m}_u (\theta_{22} - \theta_{21})}{\dot{m}_{min} (\theta_{11} - \theta_{21})} \quad (6.2)$$

$$\eta_{brüt} = \frac{(\theta_{22} - \theta_{21})}{(\theta_{11} - \theta_{21})} \quad (6.3)$$

$$\eta_{net} = \frac{\left(\frac{(\theta_{22} - EATR \cdot \theta_{11})}{1 - EATR} \right) - \theta_{21}}{(\theta_{11} - \theta_{21})} \quad (6.4)$$

Burada;

η : Verimlilik [%]

$\eta_{b\ddot{u}r\ddot{u}t}$: Bürüt verimlilik [%]

$\dot{m}_{\ddot{u}}$:  fleme havası çıkışı kütlesel debisi [kg/s]

$\dot{m}_{min}$: $\dot{m}_{\ddot{u}}$ ve $\dot{m}_d$ den hangisi küçük ise kütlesel debisi [kg/s]

θ_{11} : Dönüş havası sıcaklığı [ C]

θ_{21} :  fleme havası giriş sıcaklığı [ C]

θ_{22} :  fleme havası çıkış sıcaklığı [ C]

EATR : Dönüş havasından üfleme havasına by-pass oranı [%]

6.5.1.3. Isıtma Kapasitelerinin Hesaplanması

Sistemdeki sulu ısıtıcının ısıtma kapasitesi E .6.5'den bulunabilir.

$$\dot{Q}_I = \dot{V} x \rho x C_p x |t_{\ddot{u}f} - t_{lgk\check{c}}| \quad (6.5)$$

Klima santralini cihazın toplam ısıtma verimili i ise Eşitlik 6.6'dan hesaplanabilmektedir.

$$\eta = \frac{(\dot{Q}_I + \dot{Q}_{ISGK})}{\dot{Q}_K + \dot{Q}_{KAZ} + q x C_v} \quad (6.6)$$

Burada;

$\dot{V}$: Klima santralini havasının hacimsel debisi [m³/h]

$\dot{Q}_I$: Toplam ısıtma kapasitesi [kW]

ρ : Havanın yoğunluğu [kg/m³]

C_p : Havanın  zg l ısısı [kJ/kg C]

$t_{\ddot{u}f}$:  fleme havasının sıcaklığı [ C]

$t_{lgk\check{c}}$: Plakalı ısı geri kazanım çıkış sıcaklığı [ C]

η : Klima santralini ısıtma kapasitesi verimi

$\dot{Q}_K$: Klima santralinde fanların harcadığı enerji (kW)

$\dot{Q}_{KAZ}$: Kazanın harcadığı enerji (kW)

q : Kazanın harcadığı doğalgaz miktarı (m³/h)

C_v : Doğalgazın alt ısı değeri (8250 kcal/m³)

6.5.1.4 Plug Fan Gücü Hesabı

Sistemdeki plug fanların çektiği güç aşağıdaki Eş.6.7'den hesaplanabilir [56].

$$\dot{P}_L = \frac{\dot{V} \cdot \Delta P_t}{3600 \cdot 102 \cdot \eta} \quad (6.7)$$

Burada;

$\dot{P}_L$: Fan gücü [kW]

$\dot{V}$: Hava debisi [m³/h]

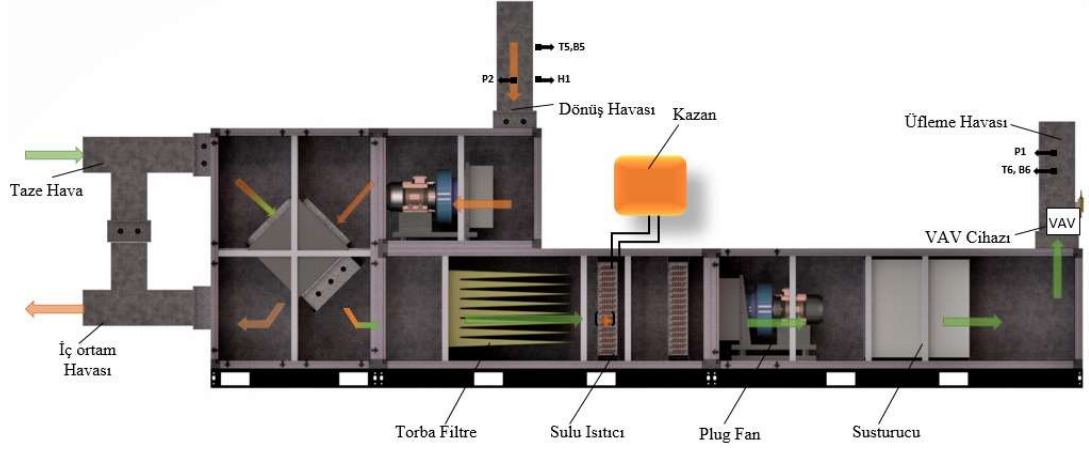
ΔP_t : Toplam diferansiyel fark basınç [mmSS]

η : Plug fan verimi

Olarak alınmıştır.

6.5.2. Ekserji Analizi

Şekil 6.11'de %100 taze havalı olarak çalışan klima santrali gösterilmiştir. Deney setindeki 25, 50 ve 70 öğrenciye göre ekserji hesaplamaları aşağıdaki eşitliklerden hesaplanmıştır. Burada yapılan ekserji analizi sıcaklığa göre yapılmıştır. TA: Taze hava sıcaklığı, İA: İç ortam havası sıcaklığı, KA: Isı geri kazanım çıkış sıcaklığı olarak alınmıştır.



Şekil.6.11. %100 Taze havalı klima santrali.

Ekserji dengesi (termodinamiğin 2. yasası):

$$\dot{Ex}_{TA} + \dot{Ex}_{iA} - \dot{Ex}_{KA} = \dot{Ex}_{yok\ olan} \quad (6.8)$$

Burada;

$\dot{Ex}_{TA}$: Ekseji taze hava sıcaklığı [°C]

$\dot{Ex}_{iA}$: Ekseji iç hava sıcaklığı [°C]

$\dot{Ex}_{KA}$: Ekseji ısı geri kazanım çıkış hava sıcaklığı [°C]

Enerji verimi (termodinamiğin 1. yasası):

$$\eta = \frac{h_{KA} \times \dot{m}_{h,KA}}{h_{TA} \times \dot{m}_{h,TA} + h_{iA} \times \dot{m}_{h,iA}} \quad (6.9)$$

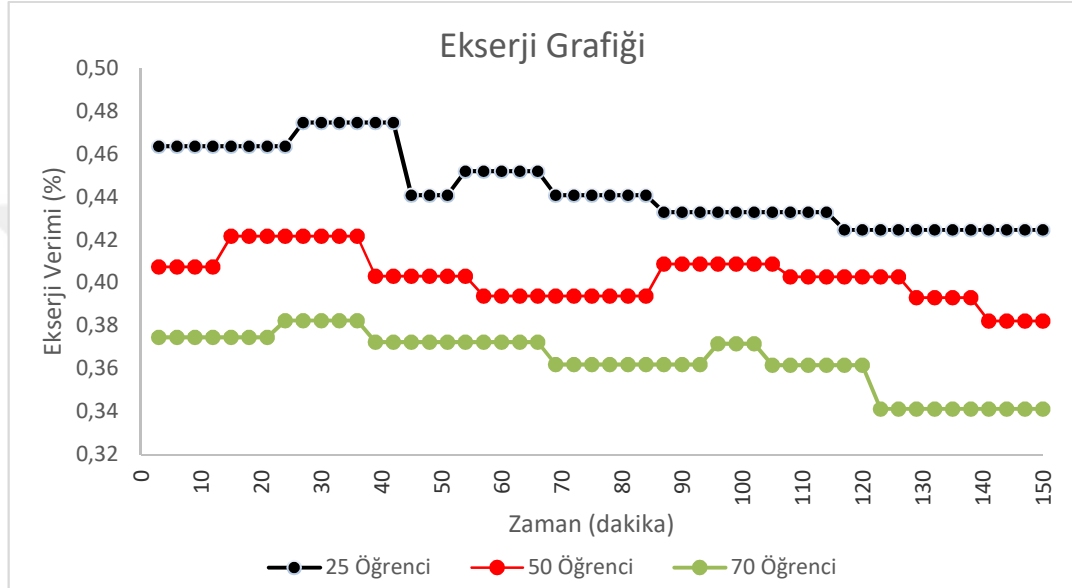
Ekserji verimi (termodinamiğin 2. yasası) [57].

$$\psi = \frac{\dot{Ex}_{KA}}{\dot{Ex}_{TA} + \dot{Ex}_{iA}} \quad (6.10)$$

Karışımın Sıcaklığı:

$$T_{MA} = \frac{\dot{m}_{TA} \times T_{TA} + \dot{m}_{iA} \times T_{iA}}{\dot{m}_{TA} + \dot{m}_{iA}} \quad (6.11)$$

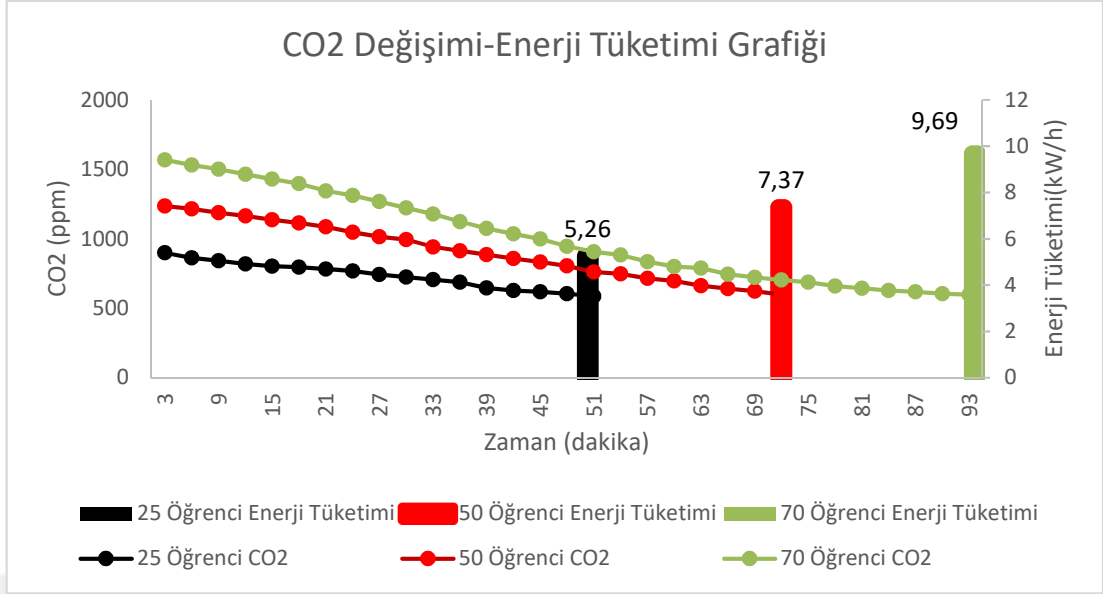
Sıcaklığa göre yapılan ekseji analizinde; sınıfta 25 öğrenci var iken %47, 50 öğrenci var iken %42, 70 öğrenci var iken de en yüksek %38 verim elde edilmiştir. Şekil 6.12’de klima santralinin ekseji verimliliği gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Klima santrali ekseji verimliliği.

6.5.3. Klima Santrali Enerji Tüketimi

Klima santralinin %100 taze havalı olarak, öğrenci sayısına ve mahalın set edilen durumlarına göre enerji değişimi Şekil 6.13’de gösterilmiştir. Enerji tüketimi hesabı yapılırken farklı öğrenci sayılarında sınıfın CO₂ miktarı 600 ppm değerinde sabit ayarlanmıştır. Klima santrali 150 dakika süresince çalıştığında yaklaşık olarak 16 kW/h enerji tüketmektedir. Derslikte deneyler alınırken 25, 50 ve 70 öğrenci sayılarında klima santrali kapalı olduğundaki artan CO₂ miktarları, 600 ppm değerine gelene kadar klima santralinin enerji tüketim değerleri kaydedilmiştir. Daha sonra yapılan hesaplamalar sonucunda klima santralinin 25 öğrenci var iken %68, 50 öğrenci var iken %54, 70 öğrenci var iken de yaklaşık olarak da %40 toplam enerji tüketimine göre daha az enerji harcadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6.13. Klima santralının farklı öğrenci sayılarında CO₂-enerji tüketimi.

6.5.4. Belirsizlik Analizi

Deneyisel sonuçlar bazı nedenlerden dolayı hatalara neden olabilir. Kullanılan ölçme araçlarına, okuma deneyimine ve deneyisel koşullara göre belirlenir. Önemli olan uygun ölçüm aletlerini kullanmak ve ölçüm parametrelerini dikkate almaktır. Hatalar hedeflenerek belirlenmelidir. Bu nedenle deneylerin hata oranlarını değerlendirmek için belirsizlik analizi kullanılmıştır. CO₂ ve Sıcaklık-Nem ölçümlerindeki hata oranlarını tanımlamak için belirsizlik analizi değerlendirmesi “Eşitlik 6.7 ve 6.12 arası” ve Çizelge 6.4’de gösterilmektedir.

$$X_m = \frac{1}{N} \sum X_i \quad (6.8)$$

$$V = \frac{1}{(N-1)} \sum (X_i^2 - X_m^2) \quad (6.9)$$

$$S = \sqrt{V} \quad (6.10)$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (6.11)$$

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^R a_i^2 \cdot s_i^2} \quad (6.12)$$

Buradaki eşitliklerde X_m ölçülen sonuçların matematiksel ortalaması, X_i ölçülen sonuçlar, a duyarlılık değeri, N toplam ölçüm sayısı, S varyasyon değeri, V varyans değeri ve U ise belirsizlik değeridir [58, 59]. Deney setinde kullanılan ölçme cihazlarının belirsizlik analizleri Çizelge 6.4'te belirtilmiştir.

Çizelge 6.4. Deney setindeki ölçüm aletlerinin belirsizlik ve teknik özellikleri.

Ölçüm Aletleri	Çalışma Aralıkları	Hassiyet	Belirsizlik(U)
Sıcaklık	0,+50°C and -35,+35°C	At 0...95 % r.h. and 23 °C: ±5 %,	±0,21°C
Nem Sensörü	-40,70°C and 0- 95% r.h.	At30...70 % r.h. and 23 °C: ±3 %	±0,44%
CO ₂ Sensör	AC24, DC 15-35 V and 0-2000ppm	23°C, 1013 hPa, ± 90 ppm,	±14,50 ppm

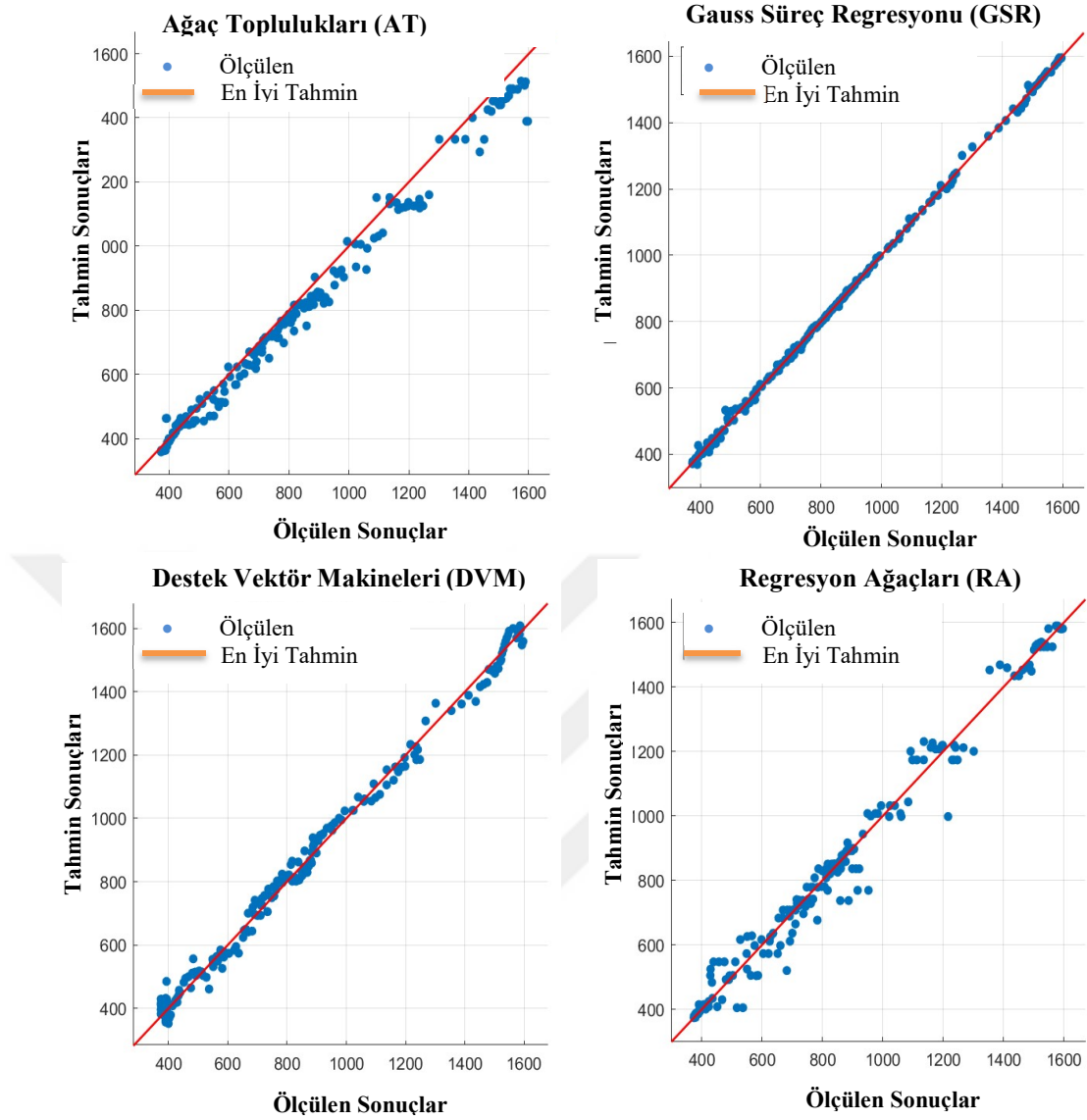
BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Sınıftaki CO₂ miktarındaki değişim makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak analiz edildiğinde, R² değerleri arasında GSR, DVM ve RA yöntemleri 0.99 ile en iyi sonucu vermiştir. Aynı zamanda klima santrali kapatılmıştır. Aynı zamanda AT yöntemi üç yönteme yakın 0.98 değerini vermiştir. Analizler, sınıfta klima santrali kapalıyken CO₂ miktarının R² değerleri karşılaştırıldığında dört makine öğrenme metodlarının rahatlıkla kullanılabileceği görülmektedir. Çizelge 7.1’de klima santrali kapalı olduğundaki performans ölçüm metrikleri belirtilmiş olup, Şekil 7.1’de klima santrali kapalı iken ortamdaki CO₂ yoğunluğunun makine öğrenme metodlarının tahmin sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. Klima santrali kapalıyken ortam CO₂ yoğunluğunun makine öğrenimi performans ölçüm metrikleri.

	DVM	GSR	AT	RA
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	27,68	8,19	49,81	44,58
Determinasyon Katsayısı (R²)	0,99	0,99	0,98	0,99
Ortalama Kare Hata (MSE)	766,09	67,06	2.480,83	1.987,66
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	22,73	4,74	38,08	26,56

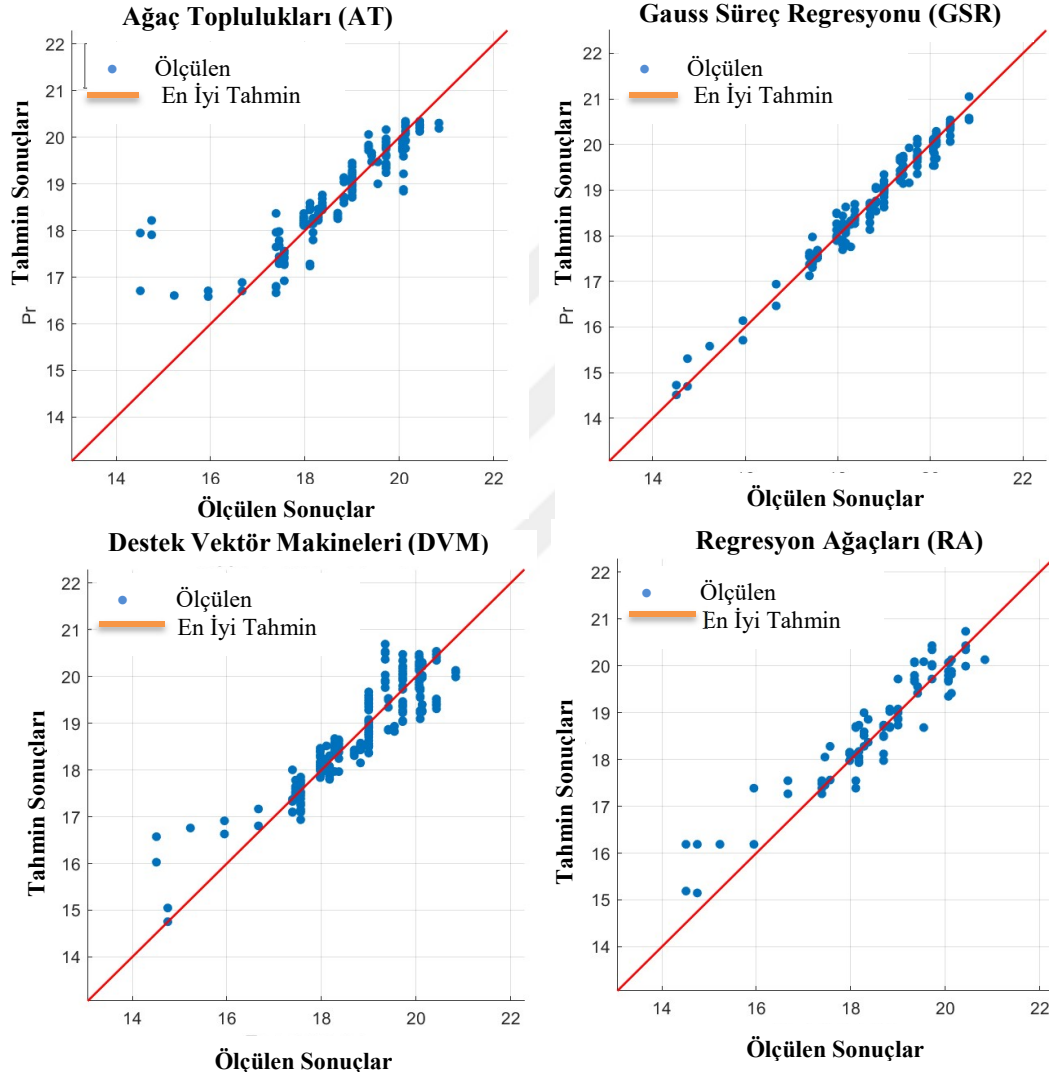


Şekil 7.1. Klima santrali kapalı iken ortamdaki CO₂ yoğunluğunun makine öğrenimi tahmin sonuçları.

Klima santrali kapalıyken sınıftaki sıcaklık değişimi makine öğrenmesi yöntemleri ile analiz edildiğinde, R^2 değerlerinden en iyi tahmin sonucu 0.98 ile GSR metodu ile bulunmuş, diğer metodların R^2 değerleri sırasıyla RA 0.92, DVM 0.84 ve AT 0.80 olarak Çizelge 7.2’de belirtilmiştir. Yapılan analizler ışığında sınıf içerisinde klima santrali kapalıyken sıcaklık değişiminin R^2 değerleri karşılaştırıldığında GSR metodunun kullanılmasının diğer metodlara göre daha doğru sonuçlar vereceği anlaşılmıştır. Şekil 7.2’de klima santrali kapalı iken ortamdaki sıcaklık değerlerinin makine öğrenimi tahmin sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 7.2. Klima santrali kapalıyken ortam sıcaklık değerinin makine öğrenimi performansı ölçüm metrikleri.

	DVM	GSR	AT	RA
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	0,46	0,18	0,52	0,32
Determinasyon Katsayısı (R^2)	0,84	0,98	0,80	0,92
Ortalama Kare Hata (MSE)	0,21	0,03	0,27	0,10
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	0,34	0,11	0,28	0,16



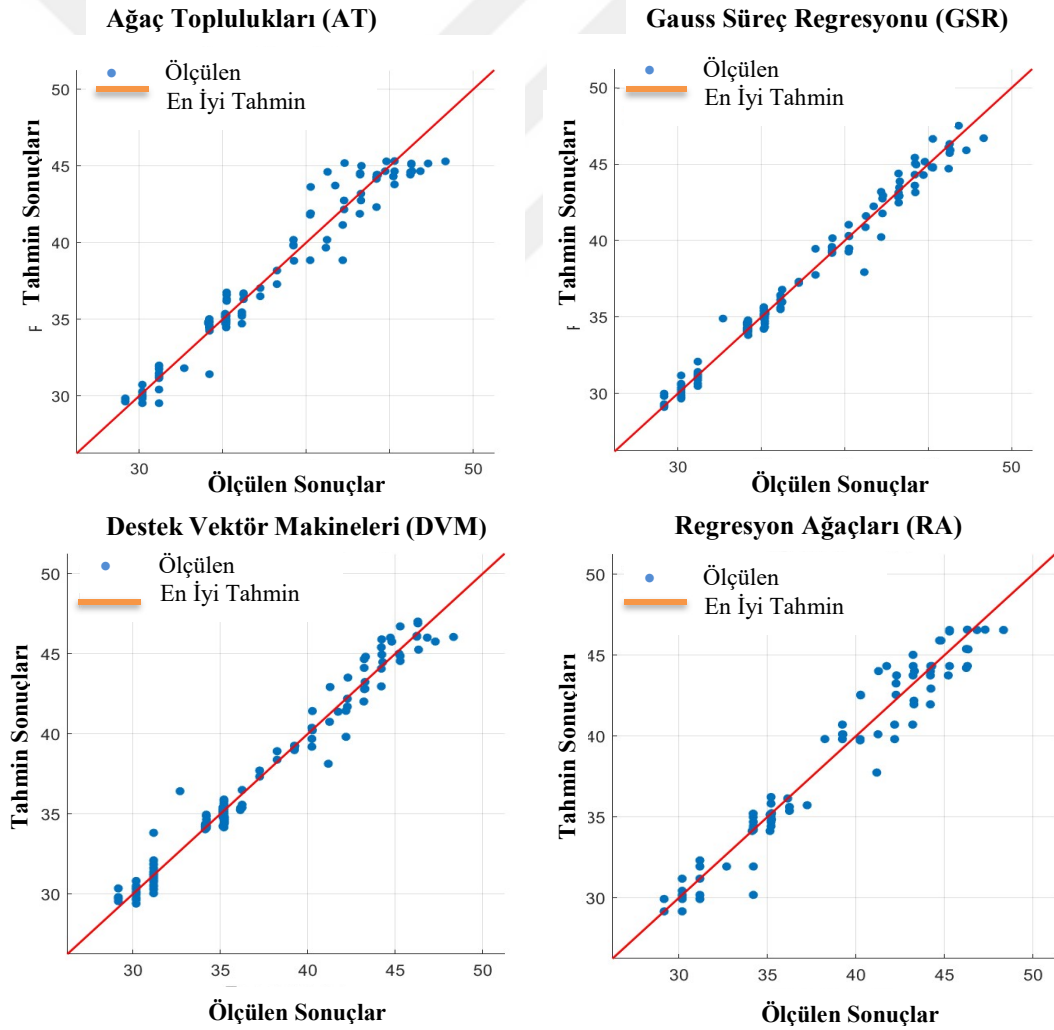
Şekil 7.2. Klima santrali kapalı iken ortamdaki sıcaklık değerlerin makine öğrenimi tahmin sonuçları.

Farklı öğrenci sayılarına sahip sınıfın bağıl neminin doğruluğunun belirleme katsayısı olan R^2 değeri, klima santrali kapalıyken makine öğrenmesi yöntemleri ile karşılaştırıldığında en iyi sonuç 0.99 ile GSR yöntemi ile elde edilmektedir. Yapılan analiz sonucunda Çizelge 7.3'te üç yöntemin R^2 değerlerinin GSR yöntemine çok

yakın değerler verdiği görülmektedir. Bu nedenle klima santralleri kapalı konumunda sınıfın bağıl neminin makine öğrenmesi yöntemleri ile analiz edildiğinde R^2 değerleri karşılaştırıldığında dört yönteminde kullanılabileceği görülmektedir. Şekil 7.3’de klima santrali kapalı iken ortamdaki bağıl nem değerlerinin makine öğrenme metodlarının tahmin sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 7.3. Klima santrali kapalıyken ortam bağıl nemin makine öğrenimi performans ölçüm metrikleri.

	DVM	GSR	AT	RA
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	0,67	0,48	0,84	0,79
Determinasyon Katsayısı (R^2)	0,98	0,99	0,96	0,97
Ortalama Kare Hata (MSE)	0,45	0,23	0,7	0,62
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	0,43	0,26	0,53	0,39

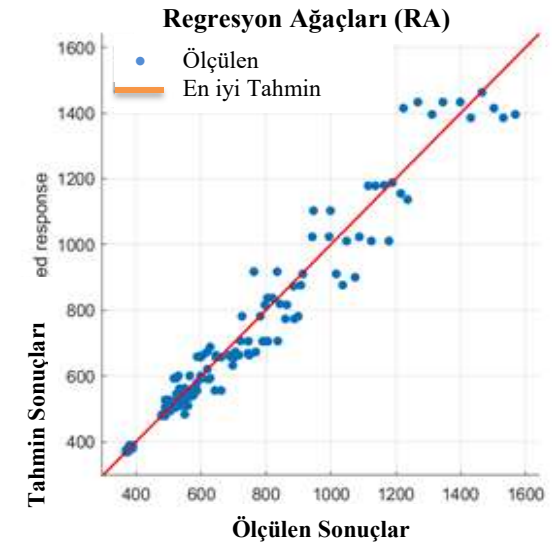
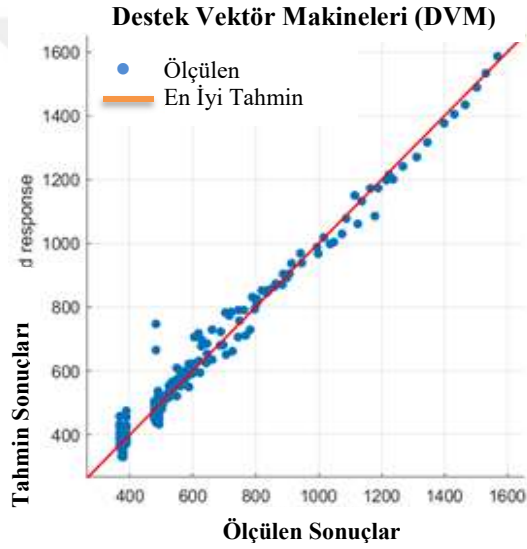
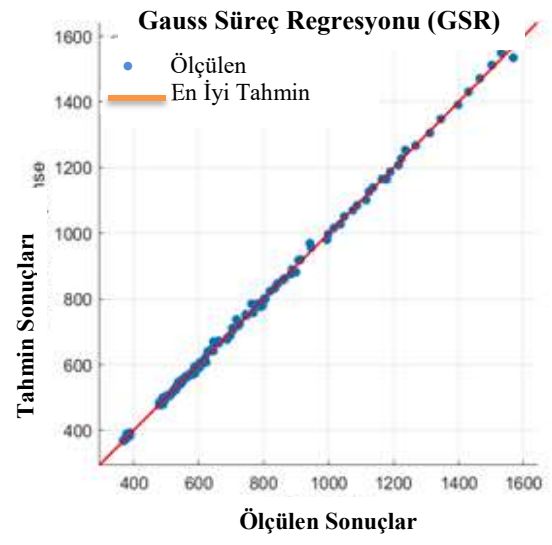
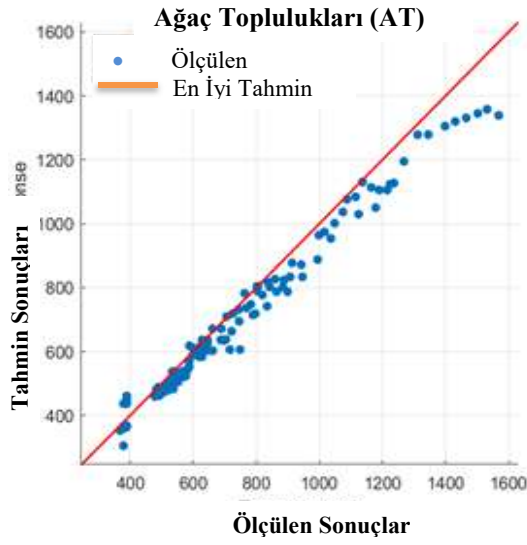


Şekil 7.3. Klima santrali kapalı iken ortamdaki bağıl değerlerin makine öğrenimi tahmin sonuçları.

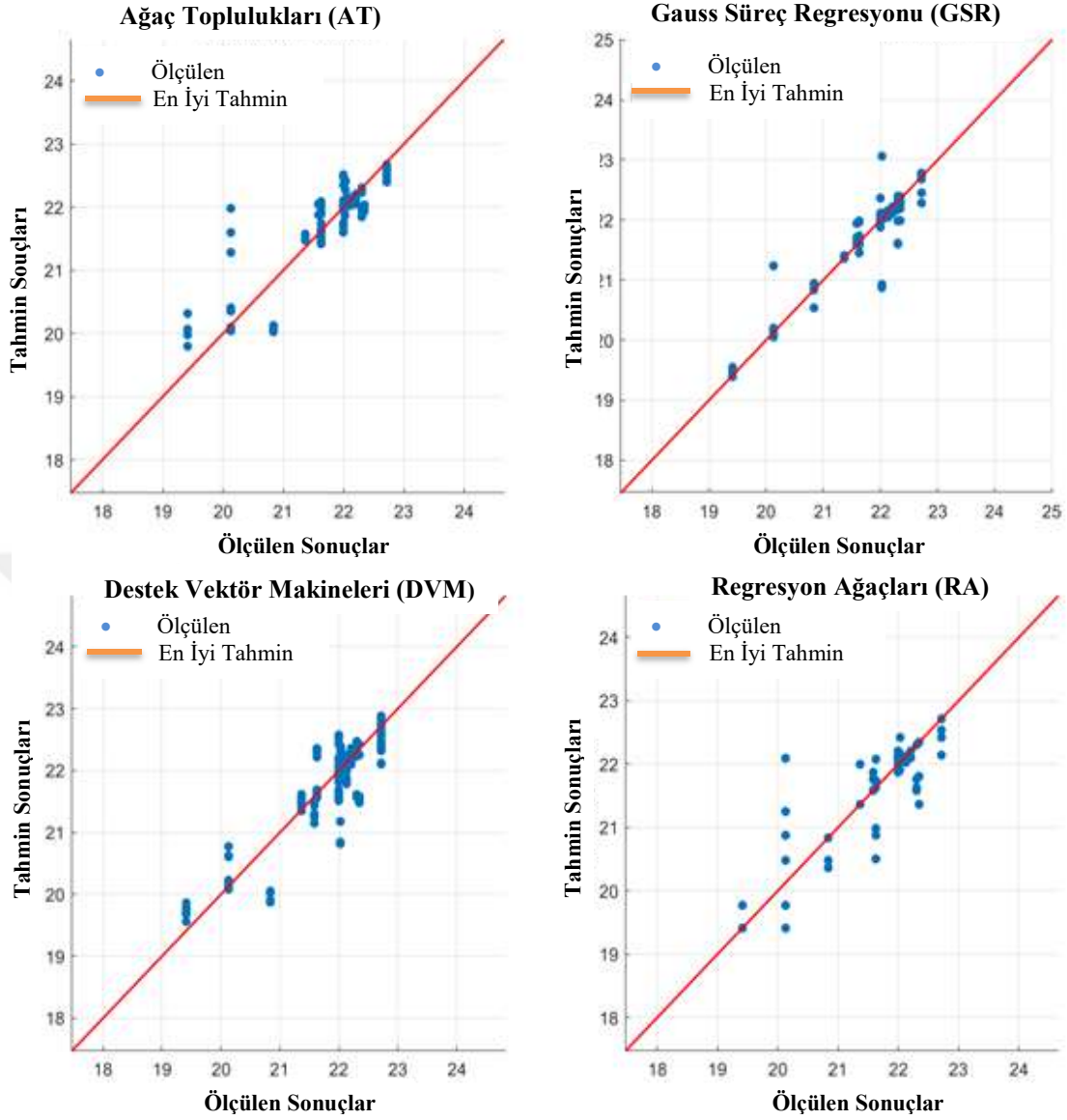
Klima santrali çalıştırıldıktan sonra farklı öğrenci sayıları ile sınıfta makine öğrenmesi testlerinde yapılan eğitimden elde edilen modeller sonucunda CO₂ miktarının R² değerleri; GSR yönteminde 0.99, DVM yönteminde 0.98, RA yönteminde 0.96 ve AT yönteminde 0.97 olarak bulunmuştur. Çizelge 7.4’de değerler gösterilmiştir. Aynı zamanda Şekil 7.4’de görüldüğü gibi gerçek test sonuçları ve makine öğrenmesi yöntemlerinde kullanılan yöntemlerden elde edilen tahmin sonuçları en iyi tahmin eğrisi etrafında kümelenmiştir. Ayrıca GSR metodundan elde edilen gerçek test ve tahmin sonuçlarının en iyi tahmin eğrisi üzerinde olduğu anlaşılmıştır. Sınıftaki CO₂ miktarının makine öğrenimi yöntemlerinde kullanılan dört yöntemin R² değerleri birbirine çok yakın ve yüksek doğruluk değeri vermiştir.

Çizelge 7.4. Klima santrali açıkken ortam CO₂ yoğunluğunun makine öğrenimi performans ölçüm metrikleri.

	DVM	GSR	AT	RA
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	39,09	6,98	50,18	52,42
Determinasyon Katsayısı (R²)	0,98	0,99	0,97	0,96
Ortalama Kare Hata (MSE)	1.528,16	48,74	2.517,62	2.747,90
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	26,4	4,5	36,54	30,02



Şekil 7.4. Klima santrali çalışırken ortamdaki CO₂ yoğunluğunun makine öğrenimi tahmin sonuçları.

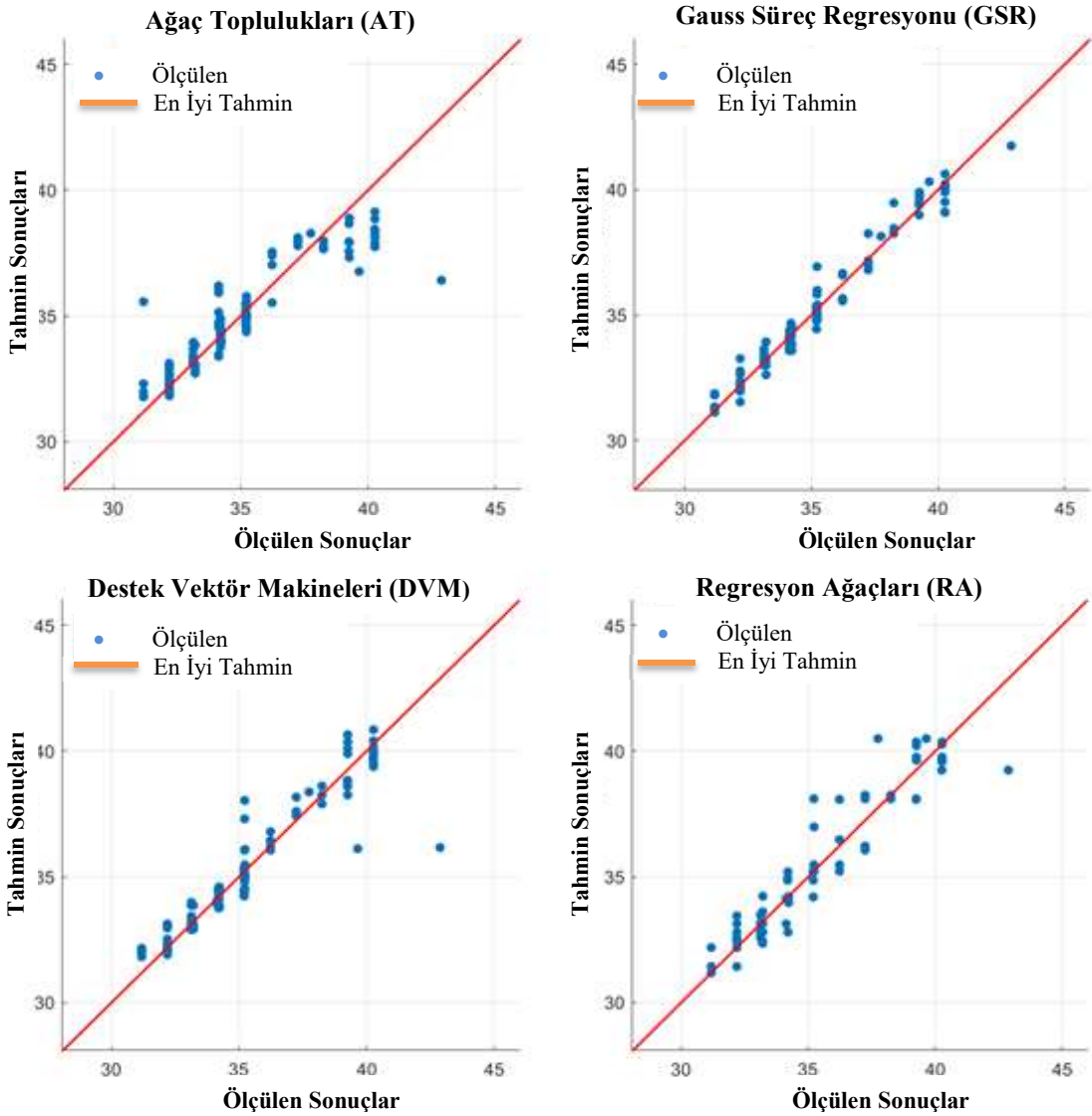


Şekil 7.5. Klima santrali çalışırken ortam sıcaklık değerinin makine öğrenimi tahmin sonuçları.

Deneylerde klima santrali çalıştırıldığında farklı sayıda öğrenci ile sınıftaki sıcaklık değişiminin makine öğrenmesi yöntemleri ile elde edilen analizler sonucunda R^2 değerleri GSR yönteminde 0.93, DVM yönteminde 0.78, RA yönteminde 0.84 ve AT yönteminde 0.80 olarak bulunmuştur. Çizelge 7.5’de makine öğrenimi performans ölçüm metrikleri verilmiştir. Ayrıca Şekil 7,5’deki gerçek deneysel sonuçlar ile makine öğrenmesi yöntemlerinde kullanılan analizlerden elde edilen tahmin sonuçları karşılaştırıldığında en iyi tahmin eğrisine GSR yöntemi ile ulaşılmıştır.

Çizelge 7.5. Klima santrali açıkken ortam sıcaklık değerinin makine öğrenimi performans ölçüm metrikleri.

	DVM	GSR	AT	RA
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	0,33	0,19	0,31	0,28
Determinasyon Katsayısı (R^2)	0,78	0,93	0,8	0,84
Ortalama Kare Hata (MSE)	0,11	0,04	0,1	0,08
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	0,21	0,06	0,19	0,11



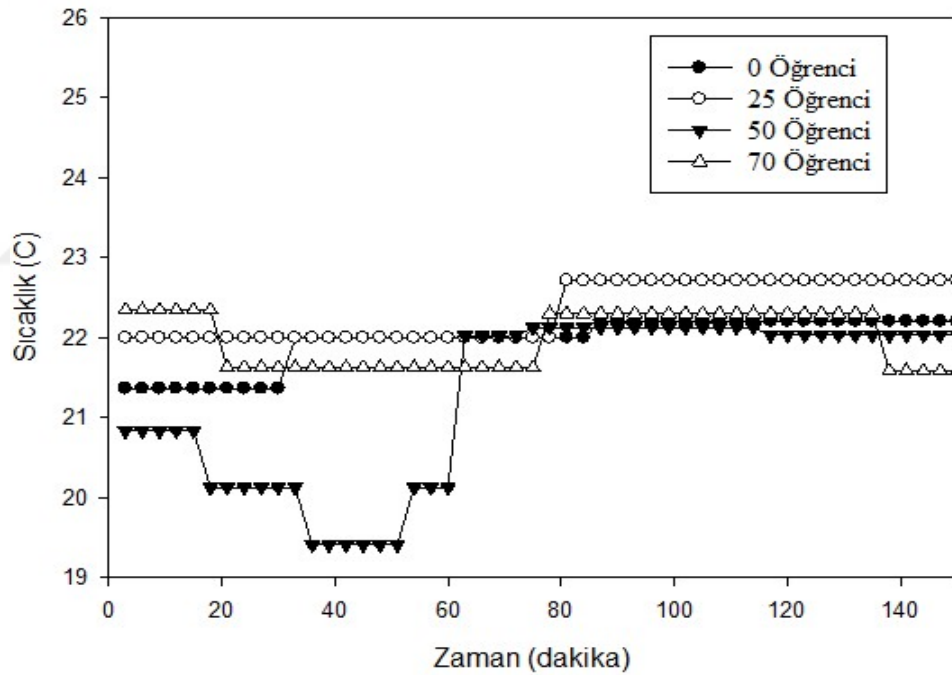
Şekil 7.6. Klima santrali çalışırken bağıl nem değerinin makine öğrenimi tahmin sonuçları.

Sınıfta klima santrali çalışırken bağıl nem değerindeki değişim makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak analiz edildiğinde en iyi R^2 değeri 0.94 ile GPR yönteminden elde edilmiştir. Aynı zamanda diğer makine öğrenme yöntemleri ile bağıl nemdeki

değişimlerin analizleri sonucundaki R^2 değerleri DVM ile 0.90, RA ile 0.93 ve AT ile 0.84 olarak hesaplanmış olup, Çizelge 7.6'da verilmiştir. Ayrıca Şekil 7.6'de görüldüğü gibi gerçek test sonuçları ile makine öğrenmesi yöntemlerinde kullanılan yöntemlerden elde edilen tahmin sonuçları arasında en iyi tahmin eğrisi GSR yöntemiyle elde edilmiştir.

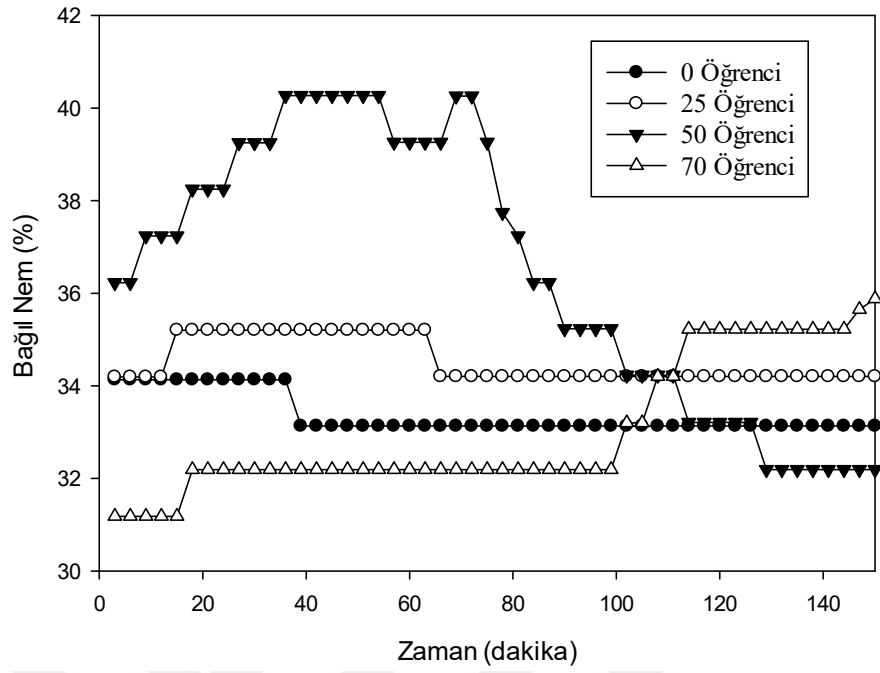
Çizelge 7.6. Klima santrali açıkken ortamın bağıl nem değerinin makine öğrenimi performans ölçüm metrikleri.

	DVM	GSR	AT	RA
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	0,73	0,34	0,92	0,61
Determinasyon Katsayısı (R2)	0,9	0,98	0,84	0,93
Ortalama Kare Hata (MSE)	0,53	0,12	0,84	0,37
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	0,38	0,2	0,52	0,3



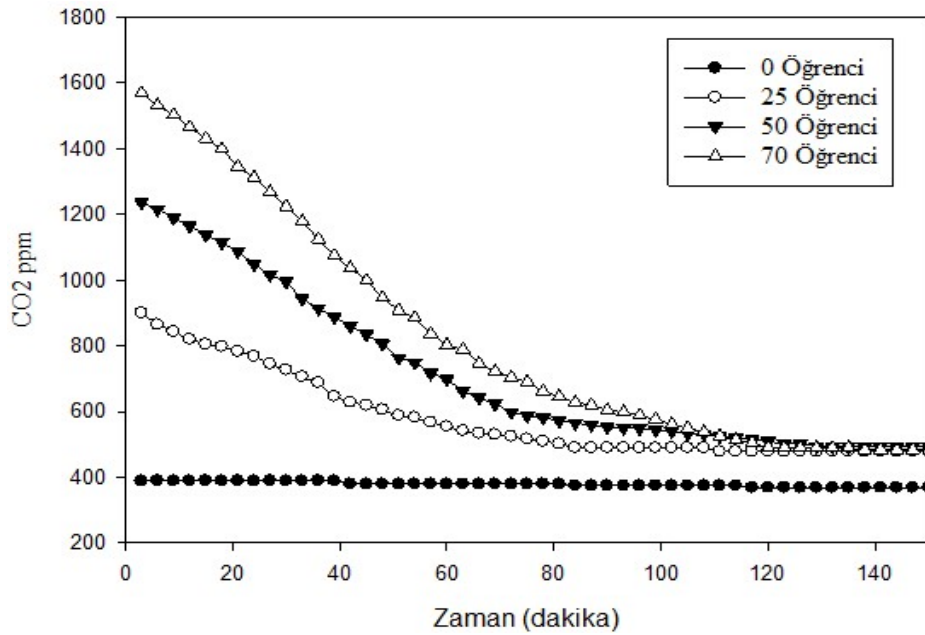
Şekil 7.7. Klima santrali çalıştığında sınıf ortamının sıcaklık değişimi.

Sınıfta klima santrali çalıştırıldığında farklı sayıda öğrencide CO_2 miktarındaki değişim, sıcaklık değişimi ve bağıl nem değişimi Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da gösterilmektedir. Şekil 7.7'de sıcaklık değişim grafiği gösterilmektedir. Sınıfta 50 öğrenci varken 35 ile 55 dakika arasında sınıf sıcaklığının $19.5^{\circ}C$ olduğu görülmüştür. Ayrıca sınıfta 25 öğrenci varken sıcaklık değerlerinin $23^{\circ}C$ civarında, 80 ile 150 dakika arasında olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7.8. Klima santrali çalıştığında sınıf ortamının bağıl nem değişimi.

Şekil 7.8’de sınıftaki farklı öğrenci sayılarındaki bağıl nem değişimleri incelendiğinde, sınıfta 50 öğrenci varken bağıl nem değerlerinin ilk 50 dakikada %42’ye ulaştığı ve ardından bağıl nem değeri %32’ye düştüğü görülmüştür. Sınıfta 70 öğrenci varken, klima kontrol ünitesi çalışırken bağıl nem değerinin %31,5’ten %35’e çıktığı gözlemlendi.



Şekil 7.9. Klima santrali çalıştığında sınıf ortamının CO₂ yoğunluğunun değişimi.

Şekil 7.9’da klima santrali çalışmaz iken ve çalışırken CO₂ miktrının değerlerinin değişimi incelenmiştir. %100 taze havalı olarak klima santrali çalıştığında öğrenci yok iken CO₂ yoğunluğu 398.2 ppm’den 368.2 ppm’e düştüğü ölçülmüştür. Sınıfta 70 öğrenci var iken ve çalışmazken CO₂ miktarı 1568 ppm’dir. Klima santrali 60 dakika çalıştığında ve sınıfta 70 öğrenci var iken ölçülen CO₂ miktarı 1.568 ppm’den 1.000 ppm’nin altına düştüğünü göstermektedir. Sınıfta 70 öğrenci var iken 150’inci dakkiya geldiğinde CO₂ değeri yaklaşık 470 ppm değerine ulaştığı gözlenmiştir. Sınıfta 50 öğrenci var iken ve klima santrali çalışmazken CO₂ değeri 1286 ppm olarak ölçülmüştür. Klima santrali çalıştığında ve 50 öğrenci var iken yaklaşık 30 dakikada CO₂ değerin 1.286 ppm’den 1.000 ppm’in altına düşmüştür. 25 öğrenci sınıfta iken ve klima santrali çalışmaz iken CO₂ değerin 1000 ppm değerinin altında olduğu ölçülmüştür. Şekil 7.6’dan anlaşılacağı üzere sistem 150 dakika boyunca çalıştığında tüm öğrenci grublarında CO₂ miktarı 470 ppm değerine kadar ulaştığı ölçülmüştür.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, bulut tabanlı PID kontrollü plakalı ısı geri kazanımlı klima santrali kullanılarak bir sınıf ortamı için deneyler yapılmıştır. Sınıf ortamında 0, 25, 50 ve 70 öğrenci varken, CO₂ değerleri sırasıyla 390, 970, 1230 ve 1600 ppm olarak ölçülmüştür. Öğrenci sayılarına göre yine sıcaklık değerleri 19.5°C ile 22.6 °C arasında, bağıl nem değerleri ise %31,5 Rh ile %42 Rh olarak ölçülmüştür. Bu ölçülen değerler ile dört makine öğrenme yöntemi kullanılarak üniversite dersliğindeki farklı sayıdaki öğrenciler için konfor koşulları incelenmiştir. Deneysel sonuçlardan elde edilen veriler, makine öğrenmesi yöntemlerinde % 80 eğitim verisi ve % 20 test verisi olarak kullanılmıştır. Dört farklı makine öğrenme modeli (DVM, GSR, RA, AT) kullanılarak yapılan eğitim ve testler sonucunda sınıfın konfor koşullarının (sıcaklık, bağıl nem ve CO₂) (R², RMSE, MSE, MAE) elde edilmiştir. Modellerden elde edilen R² değerleri, gerçek test sonuçları ve makine öğrenmesi yöntemlerinden elde edilen tahmin sonuçlarının birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırmanın sonucunda CO₂ miktarının R² değeri GSR yönteminden %99, kuru termomtere sıcaklık değeri GSR %93 ve bağıl nem değeri GSR yönteminden %98 olarak elde edilmiştir.

Klima santralının açık veya kapalı olduğu bir üniversite sınıfından elde edilen veriler makine öğrenmesi yöntemleri ile analiz edildiğinde en iyi R² değerleri GSR yöntemi ile elde edilmiştir. Klima santrallerinin ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olduğu bilinmektedir. Deneysel çalışmada görüldüğü gibi klima santrallerinin konfor koşullarının makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak önceden tahmin edilmesinin sistemin ilk kurulum maliyetlerini önemli ölçüde azalttığı anlaşılmıştır. Tüm çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, klima santralının konfor koşullarını tahmin etmek için GSR yöntemi dışında üç yöntemin daha kullanılabileceği görülmüştür.

Deneyisel çalışmada sıcaklık olarak ekserji analizinde sınıfta 25 öğrenci var iken %47, 50 öğrenci var iken %42, 70 öğrenci var iken de en yüksek %38 verim elde edilmiştir.

Öğrenci sayılarına bağlı olarak toplam enerji analizi yapıldığında, 25 öğrenci var iken %68, 50 öğrenci var iken %54, 70 öğrenci var iken ise %40 verim elde edilmiştir.

Ayrıca klima santralinde kullanılan plakalı ısı geri kazanımını net verimliliği ise %60 olarak hesaplanmıştır.

Bulut tabanlı PID kontrollü plakalı ısı geri kazanımlı klima santrallerinin deneyisel sistemlerinden elde edilen verilerin makine öğrenmesi modelleriyle karşılaştırılması sonucunda yüksek R^2 değerlerinin çıkmasından dolayı bu ve benzer sistemlerin kurulmadan önce makine öğrenme modelleri ile karşılaştırılması hem kurulum maliyetini hem de zaman kaybını en aza indirebileceğini göstermektedir. Bu çalışma özellikle deney seti kurulumunun çok yüksek olduğu klima santrali sistemlerinin ve deneyisel farklı multidisipliner çalışmaların performans analizlerini görmek için makine öğrenmesi metotlarının kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

1. Goetzler, W., Shandross, R., Young, J., Petritchenko, O., Ringo, D. and McClive, S., “Energy Savings Potential and RD&D Opportunities for Commercial Building HVAC Systems, US Department of Energy”, Massachussets, USA (2017).
2. ASHRE Handbook, “HVAC systems and equipments, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers”, Chapter26, ASHRE Atlanta, USA (2016).
3. Righi, E., Aggazzotti, G., Fantuzzi, G., Ciccarese, V., and Predieri, G., “Air quality and well-being perception in subjects attending university libraries in Modena (Italy)”, *Science of The Total Environment*, 286(1-3): 41-50, (2002).
4. Yrieix, C., Dulaurent, A., Laffargue, C., Maupetit, F., Pacary, T. and Uhde, E., “Characterization of VOC and formaldehyde emissions from a wood based panel: Results from an inter-laboratory comparison. *Chemosphere*, 79(4): 414-419, (2010).
5. Watson, A., Obselete: Indoor Air Quality in Industrial Nations, (2014).
6. Ulu,S.,“Pandemide mevcut binalarda İklimlendirme ve havalandırma sistemlerinin işletme ve bakım yönünden alınması gereken genel tedbirler” *Mühendis ve Makine* , (50): 28-34 (2021).
7. Göker, T. M., “Pandeminin iklimlendirme sistmlerine üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi *Karabük Üniversitesi Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, 1-80 (2023).
8. Noh, K., Jang, J., Oh, M., “Thermal comfort and indoor air quality in the lecture room with 4-way cassette air-conditioner and mixing ventilation system” *Building and Environment*, (42): 689-698 (2007).
9. Zhu, Y., Jin, X., Du, Z., Fang, X., “Online optimal control of variable refrigerant flow and variable air volume combined air conditioning system for energy saving”, *Applied Thermal Engineering*, (80): 87-96 (2015).
10. Schito,E., “Dynamic simulation of an air handling unit and validation through monitoring data” *Energy Procedia*, 148 : 1206-1213 (2018).
11. Turgut, M,S.,ve Çoban, T, M., “Neural Network Predictive Control Of A Vapor Compression Cycle” Check for updates, (2019).
12. Andrew, K., Yaohui, Z., Guanglin X., “Minimizing Energy Consumption Of An Air Handling Unit With A Computational Intelligence Approach” *Energy and Buildings*, 60 : 355–363 (2013).

13. Yao, Y., Wang, W. And Huang, M., “A State-Space dynamic model for vapor compression refrigeration system based on moving-boundary formulation” *International Journal of Refrigeration*, 60:174-189 (2015).
14. KiJeon Nama et all “A Proactive energy-efficient optimal ventilation system using artificial intelligent under outdoor air quality conditions” *Applied Energy* 266 : 114893 (2020).
15. Erdi, E., “Demiryolları için nesnelerin interneti ile uzaktan izlenebilen ray sıcaklığı ve tren hızı ölçüm sistemi tasarımı ve meteoroloji ile saha verisi üzerinden makine öğrenmesi/derin öğrenme ile zamana dayalı ray sıcaklığı”, Yüksek Lisans *Tezi Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 1-72 (2022).
16. Özdemir, S. E., “Makine öğrenmesi kullanımıyla ev tipi klimalarda parametre ve enerji verimliliği optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü*, İstanbul, 1-27 (2019).
17. KiJeon Nama et all “Advanced building control via deep reinforcement learning” *Energy Procedia* 158: 6158-6163 (2019).
18. Dasheng, L., and Fu-Po, T, “Air conditioning energy saving from cloud-based artificial intelligence : case study of a split-type air conditioner” *Energies* (2020).
19. Zhijie, C., et all, “Machine learning enhanced inverse modeling method for variable speed air conditioning systems” *International Journal of Refrigeration* 118 : 311-324 (2020).
20. Xin, Z., et all, “Comparison of different machine learning algorithms for predicting air-conditioning operating behavior in open-plan offices” *Energy and Buildings* 251 (2021).
21. Kuan-Heng, Y., et all, “Optimization of thermal comfort, indoor quality and energy-saving in campus classroom through deep Q learning” *Thermal Engineering* 24 100842 (2021).
22. Yuzgen, P., et all., “Using machine learning techniques for occupancy-prediction-based cooling control in office buildings” *Applied Energy* 211: 1343-1358 (2018).
23. Paige, W, T., et all, “ A deep learning framework energy management and optimisation of HVAC systems” *International Conference on Sustainable Energy and Green Technology* (2019).
24. Yamankaradeniz, Y., Horoz, İ., Çoşkun, S., Kaynaklı, Ö. ve Yamankaradeniz, N., “İklimlendirme Esasları ve Uygulamaları”, Bursa, 251-252 (2012).
25. EN 1886 Standard, “Hava işleme ünitelerin mekanik performansı”, EN 1886, Europe, 1-20 (2007).

26. ISO 16890-1 Standard, “Genel havalandırma için filtreleri-Bölüm1: Parçacık madde verimliliğine (ePM) dayanan teknik şartnameler, gereklilikler ve sınıflandırma sistemi”, ISO, Europe, 1-80 (2016).
27. Bayram, B., “Hastanelerde sars cov-2 (covid-19) virüsünün yayılımını etkileyen iklimlendirme sistemleri ve parametrelerin değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 11-15 (2022).
28. TS EN 308 Standardı, “Isı eşanjörleri - havadan havaya veya atık gazlardan ısı kazanımı cihazlarının performansının tayini için deney metotları”, TSE, Ankara, 1-10(1997).
29. Lawrance, W, and Schreck, T, “Rotary heat exchangers save energy and prevent a need for recirculation which contributes to the decrease the risk of covid-19 transfer”, *Rehva* (2020).
30. Uralcan, Y.İ., “Klima Tesisatı”, MMO/295/-5, İstanbul 30-64, 296-299 (2009).
31. Ingard, U., “Noise reduction analysis”, USA 7-139 (2010).
32. Aki, K., ve Dirik, E.A., “Derin öğrenme tabanlı ve pid kontrol tabanlı sürücüsüz araç sistemleri” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 8(5): 306-316 (2020).
33. Tehrani, A.K., and Mpanda. A., “PID control theory”, Section-9 Cortia (2012).
34. Yrd. Doç. Dr. Bulgurcu, H., “İklimlendirme ve soğutma sistemlerinde otomatik kontrol” Balıkesir, 1-30 (2005)
35. Yurdakul, S.S., ve Eker, İ., “Kendinden ayarlamalı pid kontrol ve deneysel uygulamaları” Çukurova Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü Balcalı, Adana, (2020).
36. Wang, L., “Basic of pid control”, Chapter -1 RMIT University (2020).
37. Kaçar, S., Boz, F.A., Arıcioğlu, B., Tekin, H., “PID denetleyici uygulamaları için yeni bir online deney seti tasarımı”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* (2016).
38. İnternet: “Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu-Bulut Bilişim”, <https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/slug/bulut-bilisim.pdf> (2013).
39. Çelik, K., “Bulut bilişiminde temel konular”, *Uluslararası Batı Karadeniz Sosyal ve Beşeri Bilimler Dergisi* 5(2): 236-250 (2021).
40. Siemens., “Commercial benefits of cloud solutions for HVAC OEMs and installers”, Siemens., İstanbul (2020).
41. Siemens webinar., “Using historical data to gain predictive insights...the story continued...”, Siemens., İstanbul (2020).

42. Kavazoğlu, T., ve Şahin, K.E., “Bulut bilişim teknolojisi ve bulut cbs uygulaması”, *Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu.*, Zonguldak (2012).
43. İnternet: “Machine Learning Basics for a newbie”, <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2015/06/machine-learning-basics/>, 2015.
44. İnternet: “Machine Learning Summarized in One Picture”, <https://www.datasciencecentral.com/machine-learning-summarized-in-one-picture/> 2017.
45. Vapnik, V., *The Nature of Statistical Learning Theory*, NY: Springer-Verlag, 1995.
46. Soman, K. P., Loganathan, R. and Ajay, V., “Machine Learning with SVM and Other Kernel Methods”, PHI Learning Pvt. Ltd., 2009.
47. Haykin, S., *Neural Networks, “A Comprehensive Foundation*, Prentice-Hall Inc, Upper Saddle River”, New Jersey, vol. 7458, pp. 161–75, 1999.
48. Schölkopf, B., Christopher, J. C. B. and Smola, J. A., “Advances in Kernel Methods, Support Vector Learning”, Cambridge, England: The MIT Press, 1999.
49. Cristianini, N. and Shawe-Taylor, J., “An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-Based Learning Methods”, Cambridge university press, 2000.
50. Huang, S., Cai, N., Pacheco, P. P., Narrandes, S., Wang, Y. and Xu, W., “Applications of support vector machine (svm) learning in cancer genomics”, *Cancer Genomics & Proteomics*, vol. 15, no. 1, pp. 41–51, 2018.
51. Liu, K., Hu, X., Wei, Z., Li, Y. and Jiang, Y., “Modified gaussian process regression models for cyclic capacity prediction of lithium-ion batteries” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 1225–36, 2019.
52. Heo, Y. and Zavala, V. M., “Gaussian Process Modeling for Measurement and Verification of Building Energy Savings”, *Energy and Buildings*, vol. 53, pp. 7–18, 2012.
53. Rasmussen, C. E. and Williams, C. K. I., “Gaussian Processes Formachine Learning”, USA: MIT Press, 2006.
54. Mendes, M., Akkartal, E., “ Regression tree analysis for predicting slaughter weight in broilers”, *Italian Journal of Animal Science* 8(4), pp.615-624, 2009.
55. Rokach, L. and Maimon, O. Z., “Data Mining with Decision Trees: Theory and Applications”, *World scientific*, 2014.

56. Schiltz, F., Masci, C., Agasisti, T. and Horn, D., “Using regression tree ensembles to model interaction effects: a graphical approach”, *Applied Economics*, vol. 50, no. 58, pp. 6341–54, 2018.
57. TS ISO 5221 Standardı, “Havalandırma-hava dağıtımı ve yayılımı-hava kanallarındaki hava debisinin ölçülmesi için deney kuralları”, TSE, Ankara, 1-44 (1997).
58. Budak, E., “Rotorlu Tip Isı Geri Kazanım Cihazının Deneysel Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-98 (2017).
59. Korkmaz, M., “CO₂ miktarına bağlı modülasyon kontrolü yapabilen klima santralinin deney sel analizi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-71 (2021).
60. Gurel, A., Ceylan, I. and Yilmaz, S., “Experimental analyses of heat pump and parabolic trough solar fluidized bed dryer”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, vol. 35, no. 1, pp. 107–15, 2015.
61. Güngör, A., Karaçaylı, İ., Şimşek, E. and Canlı, Y., “Geri dönüş havalı iklimlendirme sistemlerinde enerji ve ekserji analizi”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3): 19-29 (2017).



EK AÇIKLAMALAR A.

DENEY SONUÇLARI

Çizelge Ek A.1. Derslikte öğrenci olmadığında ve klima santralinin kapalı olduğu şartlardaki deney sonuçları.

Zaman (dakika)	Öğrenci Sayısı	Üfleme Havası Bağıl Nem (%)	Dış Hava Bağıl Nem (%)	Dış Hava Sıcaklık (°C)	Üfleme Havası Sıcaklık (°C)	Dönüş Havası Bağıl Nem (%)	Dönüş Havası Sıcaklık (°C)	CO ₂ (ppm)
3	0	39,12	51,60	13,90	16,25	36,14	18,37	374,20
6	0	39,12	50,60	14,40	16,25	36,14	18,37	374,20
9	0	39,12	50,60	14,40	16,25	36,14	18,37	374,20
12	0	39,12	49,59	14,92	16,25	36,14	18,37	374,20
15	0	39,12	48,58	14,92	16,25	36,14	18,37	374,20
18	0	39,12	48,58	14,92	16,25	36,14	18,37	379,20
21	0	39,12	48,58	15,42	16,25	35,14	18,37	379,20
24	0	39,12	47,57	15,42	16,25	35,14	18,37	384,20
27	0	39,12	47,57	15,42	16,25	35,14	18,37	384,20
30	0	39,12	47,57	15,42	16,25	35,14	18,37	384,20
33	0	39,12	47,57	15,42	16,25	35,14	19,00	384,20
36	0	39,12	47,57	15,42	16,25	35,14	19,00	389,20
39	0	39,12	47,57	15,42	16,25	35,14	19,00	389,20
42	0	39,12	47,57	16,17	16,25	35,14	19,00	389,20
45	0	39,12	46,57	16,17	16,25	35,14	19,00	389,20
48	0	39,12	46,57	16,17	16,25	35,14	19,00	389,20
51	0	39,12	46,57	16,17	16,25	35,14	19,00	389,20
54	0	39,12	46,57	16,17	16,25	35,14	19,00	389,20
57	0	39,12	46,57	16,67	16,25	35,14	19,00	389,20
60	0	39,12	46,57	16,67	16,25	35,14	19,00	389,20
63	0	39,12	46,57	16,67	16,97	35,14	19,00	389,20
66	0	39,12	46,57	16,67	16,97	35,14	19,00	389,20
69	0	39,12	46,57	16,67	16,97	35,14	19,00	390,50
72	0	39,12	46,57	16,67	16,97	35,14	19,00	390,50
75	0	39,12	46,57	16,67	16,97	35,14	19,00	390,50
78	0	39,12	46,57	16,67	16,97	35,14	19,00	390,50
81	0	39,12	45,56	17,39	16,97	35,14	19,00	390,50
84	0	39,12	45,56	17,39	16,97	35,14	19,00	390,50
87	0	39,12	44,55	17,39	16,97	35,14	19,00	390,50
90	0	39,12	44,55	17,39	16,97	35,14	19,72	390,50
93	0	39,12	44,55	17,39	16,97	35,14	19,72	390,50
96	0	39,12	44,55	17,39	16,97	35,14	19,72	390,50
99	0	39,12	44,55	17,39	16,97	35,14	19,72	390,50
102	0	39,12	44,55	18,10	16,97	35,14	19,72	390,50
105	0	39,12	43,55	18,10	16,97	35,14	19,72	390,50
108	0	39,12	43,55	18,10	16,97	35,14	19,72	390,50
111	0	39,12	43,55	18,10	16,97	35,14	19,72	390,50
114	0	39,12	43,55	18,10	16,97	35,14	19,72	390,50
117	0	39,12	44,55	18,10	17,69	35,14	19,72	390,50
120	0	39,12	44,55	18,10	17,69	35,14	19,72	391,40
123	0	39,12	44,55	18,10	17,69	35,14	19,72	391,40
126	0	39,12	44,55	18,10	17,69	35,14	19,72	391,40
129	0	39,12	44,55	18,10	17,69	35,14	19,72	391,40
132	0	39,12	44,55	18,10	17,69	35,14	19,72	391,40
135	0	39,12	44,55	18,10	17,69	35,14	19,72	391,40
138	0	39,12	44,55	18,10	17,69	35,14	19,72	391,40
141	0	39,12	44,55	18,10	17,69	35,14	19,72	391,40
144	0	39,12	44,55	18,10	17,69	35,14	19,72	391,40
147	0	38,12	44,55	18,10	17,69	35,14	19,72	391,40

Çizelge Ek A.1. (devam ediyor).

150	0	38,12	44,55	18,10	17,69	34,13	20,43	391,40
153	0	38,12	44,55	18,10	17,69	34,13	20,43	394,20
156	0	38,12	44,55	18,10	17,69	34,13	20,43	394,20
159	0	38,12	44,55	18,10	17,69	34,13	20,43	394,20
162	0	38,12	44,55	18,10	17,69	34,13	20,43	394,20
165	0	38,12	43,55	18,10	17,69	34,13	20,43	394,20
168	0	38,12	43,55	18,10	17,69	34,13	20,43	394,20
171	0	38,12	44,55	18,10	18,43	34,13	20,43	394,20
174	0	38,12	44,55	18,10	18,43	34,13	20,43	394,20
177	0	38,12	44,55	18,10	18,43	34,13	20,43	394,20
180	0	38,12	44,55	18,10	18,43	34,13	20,43	394,20

Çizelge Ek A.2. Derslikte öğrenci olmadığında ve klima santralinin açık olduğu şartlardaki deney sonuçları.

Zaman (dakika)	Öğrenci Sayısı	Üfleme Havası Bağıl Nem (%)	Dış Hava Bağıl Nem (%)	Dış Hava Sıcaklık (°C)	Üfleme Havası Sıcaklık (°C)	Dönüş Havası Bağıl Nem (%)	Dönüş Havası Sıcaklık (°C)	CO ₂ (ppm)
3	0	37,09	44,55	17,39	25,25	34,13	21,37	389,20
6	0	37,09	44,55	17,39	25,25	34,13	21,37	389,20
9	0	37,09	44,55	17,39	25,25	34,13	21,37	389,20
12	0	37,09	45,55	17,39	25,25	34,13	21,37	389,20
15	0	37,09	44,53	17,39	25,25	34,13	21,37	389,20
18	0	37,09	44,53	17,39	25,25	34,13	21,37	389,20
21	0	37,09	44,53	17,39	25,25	34,13	21,37	389,20
24	0	37,09	44,53	17,39	25,25	34,13	21,37	389,20
27	0	37,09	45,54	17,39	25,25	34,13	21,37	389,20
30	0	37,09	45,54	17,39	25,25	34,13	21,37	389,20
33	0	37,09	46,56	16,67	25,25	34,13	22,00	389,20
36	0	37,09	46,56	16,67	25,25	34,13	22,00	389,20
39	0	37,09	46,56	16,67	25,25	33,13	22,00	389,20
42	0	37,09	46,56	16,67	25,25	33,13	22,00	379,20
45	0	37,09	46,56	16,67	25,25	33,13	22,00	379,20
48	0	37,09	46,56	16,67	25,25	33,13	22,00	379,20
51	0	37,09	46,56	16,67	25,25	33,13	22,00	379,20
54	0	37,09	46,56	16,67	25,25	33,13	22,00	379,20
57	0	36,09	46,56	16,67	25,25	33,13	22,00	379,20
60	0	36,09	46,56	16,67	25,25	33,13	22,00	379,20
63	0	36,09	46,56	16,67	25,97	33,13	22,00	379,20
66	0	36,09	47,56	16,67	25,97	33,13	22,00	379,20
69	0	36,09	47,56	16,67	25,97	33,13	22,00	379,20
72	0	36,09	47,56	15,95	25,97	33,13	22,00	379,20
75	0	36,09	48,58	15,95	25,97	33,13	22,00	379,20
78	0	36,09	50,08	15,23	25,97	33,13	22,00	379,20
81	0	36,09	50,58	15,23	25,97	33,13	22,00	379,20
84	0	36,09	49,58	15,23	25,97	33,13	22,00	374,20
87	0	36,09	49,58	15,23	25,97	33,13	22,21	374,20
90	0	36,09	49,58	15,23	25,97	33,13	22,21	374,20
93	0	36,09	48,56	15,23	25,97	33,13	22,21	374,20
96	0	36,09	49,57	15,23	25,97	33,13	22,21	374,20
99	0	36,09	49,57	15,23	25,97	33,13	22,21	374,20
102	0	36,09	49,57	15,23	25,97	33,13	22,21	374,20
105	0	36,09	49,57	15,23	25,97	33,13	22,21	374,20

Çizelge Ek A.2. (devam ediyor).

108	0	36,09	49,57	15,23	25,97	33,13	22,21	374,20
111	0	36,09	49,57	15,23	25,97	33,13	22,21	374,20
114	0	36,09	49,57	15,23	25,97	33,13	22,21	374,20
117	0	36,09	50,59	15,23	26,01	33,13	22,21	368,20
120	0	36,09	50,59	15,23	26,01	33,13	22,21	368,20
123	0	36,09	50,59	15,23	26,01	33,13	22,21	368,20
126	0	36,09	50,59	15,23	26,01	33,13	22,21	368,20
129	0	36,09	50,59	14,51	26,01	33,13	22,21	368,20
132	0	36,09	50,59	14,51	26,01	33,13	22,21	368,20
135	0	36,09	51,61	14,51	26,01	33,13	22,21	368,20
138	0	36,09	51,61	14,51	26,01	33,13	22,21	368,20
141	0	36,09	51,61	14,51	26,01	33,13	22,21	368,20
144	0	36,09	51,61	14,51	26,01	33,13	22,21	368,20
147	0	36,09	51,61	13,99	26,01	33,13	22,21	368,20
150	0	36,09	51,61	13,99	26,01	33,13	22,21	368,20

Çizelge Ek A.3. Derslikte 25 öğrenci olduğunda ve klima santralinin kapalı olduğu şartlardaki deney sonuçları.

Zaman (dakika)	Öğrenci Sayısı	Üfleme Havası Bağıl Nem (%)	Dış Hava Bağıl Nem (%)	Dış Hava Sıcaklık (°C)	Üfleme Havası Sıcaklık (°C)	Dönüş Havası Bağıl Nem (%)	Dönüş Havası Sıcaklık (°C)	CO ₂ (ppm)
3	25	38,00	72,54	5,11	15,05	34,20	17,56	399,90
6	25	38,00	72,54	5,11	15,05	34,20	17,56	402,40
9	25	38,00	72,54	5,11	15,05	34,20	17,56	407,40
12	25	38,00	71,53	5,11	15,05	34,20	17,56	413,40
15	25	38,00	71,53	5,11	15,05	34,20	17,56	413,40
18	25	39,01	71,53	5,63	15,05	34,20	17,56	418,40
21	25	39,01	71,53	5,63	15,05	34,20	17,56	423,40
24	25	39,01	71,53	5,63	15,05	34,20	17,56	428,60
27	25	39,01	71,53	5,63	15,05	34,20	17,56	433,80
30	25	39,01	71,53	5,63	15,05	34,20	17,56	439,20
33	25	39,01	70,53	5,63	15,05	34,20	17,56	457,10
36	25	39,01	70,53	5,63	15,05	34,20	17,56	475,30
39	25	39,01	70,53	6,14	15,05	34,20	17,56	492,40
42	25	39,01	70,53	6,14	15,05	35,20	17,56	511,30
45	25	40,03	70,53	6,14	15,05	35,20	17,56	527,80
48	25	40,03	69,53	6,14	15,05	35,20	17,56	550,80
51	25	40,03	69,53	6,14	15,05	35,20	17,56	581,30
54	25	40,03	68,53	6,88	15,05	35,20	17,56	598,20
57	25	40,03	67,50	6,88	15,05	35,20	17,56	627,60
60	25	40,03	65,47	8,27	15,05	35,20	18,28	654,70
63	25	40,03	61,95	9,38	15,77	35,20	18,28	668,50
66	25	40,03	60,42	9,38	15,77	35,20	18,28	684,10
69	25	40,03	59,40	9,38	15,77	35,20	18,28	691,20
72	25	40,03	60,40	9,38	15,77	35,20	18,28	700,30
75	25	40,03	60,40	9,38	15,77	35,20	18,28	714,60
78	25	40,03	60,40	9,38	15,77	35,20	18,28	721,30
81	25	40,03	60,40	8,64	15,77	35,20	18,28	737,00
84	25	41,04	61,41	8,64	15,77	35,20	18,28	748,20
87	25	41,04	61,41	8,64	15,77	35,20	18,28	756,30
90	25	41,04	60,38	8,64	15,77	35,20	18,28	762,90
93	25	40,04	60,38	8,64	15,77	35,20	18,28	768,90

Çizelge Ek A.3. (devam ediyor).

96	25	40,04	59,35	9,38	15,77	35,20	18,28	784,50
99	25	40,04	57,31	10,47	15,77	35,20	18,28	797,10
102	25	40,04	53,77	11,55	15,77	35,20	18,28	806,80
105	25	40,04	52,26	12,53	15,77	35,20	18,28	812,50
108	25	40,04	50,74	12,79	15,77	35,20	18,28	817,60
111	25	40,04	49,22	13,51	15,77	35,20	18,28	825,20
114	25	40,04	49,22	13,51	15,77	35,20	18,28	830,70
117	25	40,04	49,22	13,51	15,77	35,20	18,28	837,20
120	25	40,04	48,20	14,23	15,77	35,20	18,28	841,00
123	25	40,04	48,20	14,23	15,77	35,20	18,28	849,60
126	25	39,04	48,20	14,23	15,77	35,20	18,28	854,00
129	25	39,04	48,20	14,23	15,77	35,20	18,28	857,10
132	25	39,04	48,20	14,23	15,77	35,20	18,28	861,00
135	25	39,04	47,19	14,23	15,77	35,20	18,28	864,10
138	25	39,04	47,19	14,23	15,77	35,20	18,28	868,20
141	25	39,04	48,19	14,23	16,49	35,20	19,00	873,50
144	25	39,04	48,19	14,23	16,49	34,19	19,00	876,90
147	25	39,04	49,20	14,23	16,49	34,19	19,00	880,10
150	25	39,04	49,20	14,23	16,49	34,19	19,00	882,60
153	25	39,04	50,21	13,51	16,49	34,19	19,00	884,30
156	25	38,02	49,21	13,51	16,49	34,19	19,00	887,60
159	25	38,02	49,21	13,51	16,49	34,19	19,00	889,40
162	25	38,02	49,21	13,51	16,49	34,19	19,00	892,30
165	25	38,02	50,21	13,51	16,49	34,19	19,00	895,00
168	25	38,02	50,21	13,51	16,49	34,19	19,00	896,30
171	25	38,02	49,21	13,51	16,49	34,19	19,00	898,10
174	25	38,02	49,21	13,51	16,49	34,19	19,00	900,10
177	25	38,02	49,21	13,51	16,49	34,19	19,00	902,70
180	25	38,02	49,21	13,51	16,49	34,19	19,00	905,00

Çizelge Ek A.4. Derslikte 25 öğrenci olduğunda ve klima santralinin açık olduğu şartlardaki deney sonuçları.

Zaman (dakika)	Öğrenci Sayısı	Üfleme Havası Bağıl Nem (%)	Dış Hava Bağıl Nem (%)	Dış Hava Sıcaklık (°C)	Üfleme Havası Sıcaklık (°C)	Dönüş Havası Bağıl Nem (%)	Dönüş Havası Sıcaklık (°C)	CO ₂ (ppm)
3	25	38,02	49,21	13,51	25,49	34,19	22,00	899,10
6	25	38,02	49,21	13,51	25,49	34,19	22,00	864,10
9	25	38,02	49,21	13,51	25,49	34,19	22,00	842,30
12	25	38,02	49,21	13,51	25,49	34,19	22,00	819,50
15	25	38,02	49,21	13,51	25,49	35,20	22,00	804,20
18	25	38,02	50,23	13,51	25,49	35,20	22,00	796,70
21	25	39,02	50,23	13,51	25,49	35,20	22,00	782,30
24	25	39,02	50,23	13,51	25,49	35,20	22,00	768,10
27	25	39,02	51,23	13,51	25,49	35,20	22,00	744,30
30	25	39,02	51,23	13,51	25,49	35,20	22,00	726,10
33	25	39,02	51,23	13,51	25,49	35,20	22,00	705,60
36	25	39,02	51,23	13,51	25,49	35,20	22,00	687,20
39	25	39,02	51,23	13,51	25,49	35,20	22,00	645,60
42	25	38,02	51,23	13,51	25,49	35,20	22,00	627,90
45	25	38,02	51,23	13,51	25,49	35,20	22,00	618,40
48	25	38,02	51,23	13,51	25,49	35,20	22,00	605,10
51	25	38,02	51,23	13,51	26,21	35,20	22,00	587,40

Çizelge Ek A.4. (devam ediyor).

54	25	38,02	52,24	13,51	26,21	35,20	22,00	581,20
57	25	38,02	52,24	13,51	26,21	35,20	22,00	567,10
60	25	38,02	52,24	13,51	26,21	35,20	22,00	554,30
63	25	38,02	52,24	13,51	26,21	35,20	22,00	541,20
66	25	38,02	52,24	13,51	26,21	34,20	22,00	533,40
69	25	38,02	52,24	13,51	26,21	34,20	22,00	530,10
72	25	38,02	53,24	12,79	26,21	34,20	22,00	524,20
75	25	38,02	53,24	12,79	26,21	34,20	22,00	516,30
78	25	38,02	54,24	12,79	26,21	34,20	22,00	509,40
81	25	38,02	54,24	12,79	26,21	34,20	22,72	501,30
84	25	38,02	54,24	12,79	26,21	34,20	22,72	489,20
87	25	38,02	55,27	12,79	26,21	34,20	22,72	489,20
90	25	38,02	55,27	12,79	26,21	34,20	22,72	489,20
93	25	38,02	55,27	12,79	26,21	34,20	22,72	489,20
96	25	38,02	55,27	12,79	26,21	34,20	22,72	489,20
99	25	38,02	55,27	12,79	26,21	34,20	22,72	489,20
102	25	38,02	55,27	12,79	26,21	34,20	22,72	489,20
105	25	38,02	55,27	12,79	26,21	34,20	22,72	489,20
108	25	38,02	56,27	12,07	26,21	34,20	22,72	489,20
111	25	38,02	56,27	12,07	26,21	34,20	22,72	478,30
114	25	38,02	56,27	12,07	26,21	34,20	22,72	478,30
117	25	38,02	56,27	12,07	26,21	34,20	22,72	478,30
120	25	38,02	56,27	12,07	26,21	34,20	22,72	478,30
123	25	38,02	56,27	12,07	26,21	34,20	22,72	478,30
126	25	38,02	56,27	12,07	26,21	34,20	22,72	478,30
129	25	38,02	56,27	12,07	26,21	34,20	22,72	478,30
132	25	38,02	57,27	12,07	26,21	34,20	22,72	478,30
135	25	38,02	57,27	12,07	26,21	34,20	22,72	478,30
138	25	38,02	57,27	12,07	26,93	34,20	22,72	478,30
141	25	38,02	57,27	12,07	26,93	34,20	22,72	478,30
144	25	38,02	57,27	12,07	26,93	34,20	22,72	478,30
147	25	38,02	57,27	12,07	26,93	34,20	22,72	478,30
150	25	38,02	57,27	12,07	26,93	34,20	22,72	478,30

Çizelge Ek A.5. Derslikte 50 öğrenci olduğunda ve klima santralinin kapalı olduğu şartlardaki deney sonuçları.

Zaman (dakika)	Öğrenci Sayısı	Üfleme Havası Bağıl Nem (%)	Dış Hava Bağıl Nem (%)	Dış Hava Sıcaklık (°C)	Üfleme Havası Sıcaklık (°C)	Dönüş Havası Bağıl Nem (%)	Dönüş Havası Sıcaklık (°C)	CO₂ (ppm)
3	50	44,14	58,60	10,47	15,47	41,17	18,45	422,90
6	50	45,15	56,58	10,83	14,86	42,18	17,45	435,73
9	50	46,17	55,08	11,55	14,86	42,18	17,45	451,53
12	50	46,17	53,56	11,55	14,86	43,20	17,45	467,47
15	50	47,17	53,56	11,55	14,86	44,20	17,45	480,10
18	50	48,17	53,56	12,27	14,86	44,20	17,45	490,10
21	50	49,19	53,56	12,27	14,86	44,20	17,45	503,00
24	50	49,19	53,56	12,27	14,86	45,21	17,45	548,80
27	50	50,19	53,56	12,27	14,86	46,23	17,45	566,30
30	50	51,20	55,08	12,27	14,86	46,23	17,45	586,50
33	50	51,20	55,58	12,27	15,36	44,72	17,45	604,00
36	50	51,20	55,58	12,27	15,36	44,22	18,17	621,50
39	50	50,20	56,59	12,27	15,36	43,22	18,17	636,70
42	50	50,20	55,09	12,27	15,36	43,22	18,17	651,75

Çizelge Ek A.5. (devam ediyor).

45	50	50,20	54,58	11,55	15,36	44,23	18,17	669,40
48	50	49,19	56,09	11,55	15,36	43,23	18,17	682,00
51	50	47,67	56,59	11,55	15,36	41,73	18,17	690,20
54	50	46,16	56,59	11,55	16,08	40,23	18,17	700,40
57	50	45,15	56,59	11,55	16,08	39,23	18,69	710,60
60	50	45,15	56,59	11,55	16,08	39,23	18,69	710,60
63	50	45,15	56,59	12,27	16,08	39,23	18,69	715,60
66	50	45,15	55,58	12,27	16,08	39,23	18,69	723,50
69	50	45,15	56,09	12,27	16,08	39,23	18,69	744,10
72	50	45,15	55,58	12,27	16,08	40,23	18,69	754,10
75	50	46,16	54,58	12,27	16,08	40,23	18,69	761,60
78	50	46,16	53,58	12,27	16,08	41,24	17,97	766,60
81	50	47,16	53,58	12,79	16,08	42,26	17,97	774,30
84	50	47,16	52,07	13,51	16,08	42,26	17,97	786,80
87	50	47,16	50,52	14,23	16,08	43,27	17,97	799,90
90	50	47,16	49,51	14,95	16,08	43,27	17,97	812,80
93	50	48,17	49,51	14,95	16,08	44,28	17,97	825,40
96	50	48,17	48,49	14,95	16,08	45,28	17,97	838,00
99	50	48,17	48,49	15,66	16,08	45,28	17,97	850,50
102	50	49,18	46,98	15,66	16,08	45,28	17,97	860,60
105	50	49,18	46,48	15,66	16,08	46,29	17,97	870,70
108	50	49,18	46,48	15,66	16,08	46,29	17,97	883,20
111	50	49,18	47,50	14,95	16,08	47,29	17,97	899,07
114	50	50,19	49,00	14,95	16,08	48,33	17,97	911,80
117	50	51,20	50,50	14,23	16,08	46,83	17,97	921,90
120	50	51,20	51,50	14,23	16,08	46,33	18,69	934,40
123	50	51,20	51,99	14,23	16,80	44,80	19,41	949,60
126	50	50,20	51,47	14,23	16,80	43,30	19,41	960,40
129	50	49,19	50,43	14,23	16,80	42,29	19,41	975,50
132	50	48,17	50,43	14,23	17,32	41,27	19,41	994,60
135	50	47,17	51,43	14,23	17,32	40,26	19,41	1021,30
138	50	46,17	51,93	13,51	17,32	40,26	19,41	1039,70
141	50	45,12	51,41	14,23	17,32	39,26	20,13	1061,40
144	50	44,12	49,90	14,95	17,32	38,24	20,13	1084,30
147	50	43,09	47,88	14,95	17,32	38,24	20,13	1098,20
150	50	42,07	46,37	14,95	17,32	37,24	20,13	1113,10
153	50	42,07	47,87	14,95	18,04	37,24	20,13	1135,80
156	50	41,07	48,37	14,95	18,04	36,24	20,13	1159,40
159	50	40,07	48,87	14,95	18,04	36,24	20,13	1175,30
162	50	40,07	49,37	14,23	18,04	36,24	20,13	1187,20
165	50	39,07	50,39	14,23	18,04	35,23	20,13	1196,70
168	50	39,07	51,40	14,23	18,04	35,23	20,13	1216,40
171	50	39,07	49,89	14,23	18,04	35,23	20,13	1230,10
174	50	39,07	47,82	14,95	18,04	35,23	20,84	1235,20
177	50	39,07	46,26	14,95	18,04	35,23	20,84	1241,00
180	50	39,07	45,25	15,66	18,04	35,23	20,84	1247,80

Çizelge Ek A.6. Derslikte 50 öğrenci olduğunda ve klima santralinin açık olduğu şartlardaki deney sonuçları.

Zaman (dakika)	Öğrenci Sayısı	Üfleme Havası Bağıl Nem (%)	Dış Hava Bağıl Nem (%)	Dış Hava Sıcaklık (°C)	Üfleme Havası Sıcaklık (°C)	Dönüş Havası Bağıl Nem (%)	Dönüş Havası Sıcaklık (°C)	CO ₂ (ppm)
3	50	39,07	45,25	16,12	25,04	36,23	20,84	1236,40
6	50	39,07	43,24	16,67	25,04	36,23	20,84	1215,10
9	50	40,07	42,72	16,67	25,04	37,24	20,84	1189,30
12	50	40,07	42,21	16,67	25,04	37,24	20,84	1164,20
15	50	41,07	43,22	15,95	25,04	37,24	20,84	1136,70
18	50	41,07	43,22	15,23	25,04	38,25	20,13	1114,90
21	50	41,07	44,74	15,23	25,04	38,25	20,13	1087,50
24	50	42,07	44,75	15,23	25,04	38,25	20,13	1048,10
27	50	42,07	43,76	15,23	25,04	39,25	20,13	1016,30
30	50	42,07	44,27	15,23	25,04	39,25	20,13	994,50
33	50	42,07	44,27	15,23	25,04	39,25	20,13	942,60
36	50	43,07	44,27	15,23	24,84	40,27	19,41	913,40
39	50	43,07	45,29	15,23	24,84	40,27	19,41	887,20
42	50	44,07	44,28	15,23	24,84	40,27	19,41	859,50
45	50	44,07	45,30	15,23	24,84	40,27	19,41	834,20
48	50	44,07	45,30	15,23	24,84	40,27	19,41	805,30
51	50	45,08	45,30	15,23	24,84	40,27	19,41	762,80
54	50	45,08	47,33	15,23	25,36	40,27	20,13	748,40
57	50	45,08	45,82	15,23	25,36	39,26	20,13	716,20
60	50	45,08	46,88	14,51	25,36	39,26	20,13	697,30
63	50	45,08	47,38	13,99	25,36	39,26	22,02	661,80
66	50	45,08	47,38	13,99	25,36	39,26	22,02	642,30
69	50	45,08	47,38	13,27	25,36	40,26	22,02	623,10
72	50	45,08	49,40	13,27	26,04	40,26	22,02	598,20
75	50	44,08	51,43	13,27	26,04	39,26	22,13	587,20
78	50	43,08	52,44	13,27	26,04	37,75	22,13	580,30
81	50	42,07	51,94	13,27	26,04	37,24	22,13	571,90
84	50	41,07	53,10	13,27	26,04	36,23	22,13	564,80
87	50	40,07	53,95	12,55	26,04	36,23	22,13	559,60
90	50	40,07	54,49	12,55	26,04	35,23	22,13	552,40
93	50	39,06	55,01	12,55	26,04	35,23	22,13	549,40
96	50	39,06	52,94	12,55	26,04	35,23	22,13	549,40
99	50	39,06	53,94	12,55	26,04	35,23	22,13	544,40
102	50	38,06	53,92	12,55	26,04	34,23	22,13	539,40
105	50	38,06	53,07	12,55	26,04	34,23	22,13	531,90
108	50	37,05	53,91	12,55	26,04	34,23	22,13	531,70
111	50	37,05	54,77	12,55	26,04	34,23	22,13	524,20
114	50	37,05	55,44	12,55	26,24	33,21	22,13	519,20
117	50	36,05	54,90	12,55	26,24	33,21	22,03	514,20
120	50	36,05	54,40	12,55	26,24	33,21	22,03	509,20
123	50	36,05	54,40	12,55	26,24	33,21	22,03	501,50
126	50	36,05	55,09	12,55	26,24	33,21	22,03	501,50
129	50	36,05	55,43	12,55	26,24	32,19	22,03	494,00
132	50	36,05	55,43	12,55	26,24	32,19	22,03	493,20
135	50	36,05	54,43	12,55	26,24	32,19	22,03	493,20
138	50	35,04	55,43	11,83	26,24	32,19	22,03	493,20
141	50	35,04	56,44	11,83	26,24	32,19	22,03	493,20
144	50	35,04	55,39	11,83	26,24	32,19	22,03	493,00
147	50	35,04	54,39	11,83	26,24	32,19	22,03	493,00
150	50	35,04	55,90	11,83	26,24	32,19	22,03	493,00

Çizelge Ek A.7. Derslikte 70 öğrenci olduğunda ve klima santralinin kapalı olduğu şartlardaki deney sonuçları.

Zaman (dakika)	Öğrenci Sayısı	Üfleme Havası Bağıl Nem (%)	Dış Hava Bağıl Nem (%)	Dış Hava Sıcaklık (°C)	Üfleme Havası Sıcaklık (°C)	Dönüş Havası Bağıl Nem (%)	Dönüş Havası Sıcaklık (°C)	CO ₂ (ppm)
3	70	38,03	53,22	11,19	17,73	34,20	14,75	390,70
6	70	38,03	52,21	12,27	17,73	34,20	14,75	393,20
9	70	39,55	53,04	10,14	19,17	32,69	14,51	429,37
12	70	39,05	61,05	7,72	19,89	31,18	14,51	483,38
15	70	38,01	66,13	6,32	19,89	31,18	15,23	516,76
18	70	38,01	67,64	6,32	19,89	31,18	15,95	536,80
21	70	37,01	67,64	6,32	19,89	31,18	15,95	550,30
24	70	35,99	67,64	6,32	19,89	31,18	16,67	562,80
27	70	35,99	67,64	6,32	19,89	31,18	16,67	575,40
30	70	35,99	68,65	6,32	19,89	31,18	17,39	585,50
33	70	35,99	68,65	7,05	19,89	31,18	17,39	625,10
36	70	34,98	67,64	7,05	19,89	31,18	17,39	660,80
39	70	34,98	66,60	7,79	19,89	31,18	17,39	692,50
42	70	34,98	66,60	7,79	19,89	31,18	17,39	734,10
45	70	34,98	66,60	7,79	20,60	31,18	17,39	783,20
48	70	34,98	65,60	7,79	20,60	31,18	18,10	817,30
51	70	33,97	65,60	7,79	20,60	31,18	18,10	859,20
54	70	33,97	64,59	8,53	20,60	31,18	18,10	886,80
57	70	33,97	64,59	8,53	20,60	31,18	18,10	916,70
60	70	33,97	64,59	8,53	20,60	31,18	18,10	952,60
63	70	33,97	63,58	8,53	20,60	31,18	18,10	983,40
66	70	33,97	62,58	9,26	20,60	31,18	18,82	1024,10
69	70	33,97	61,58	10,00	20,60	31,18	18,82	1058,70
72	70	32,97	59,67	10,80	20,60	31,18	18,82	1092,40
75	70	32,97	55,85	11,79	20,60	31,18	18,82	1136,20
78	70	32,97	57,38	11,07	20,60	31,18	18,82	1165,10
81	70	32,97	58,80	11,07	20,60	31,18	18,82	1198,60
84	70	32,97	57,07	11,07	20,60	31,18	19,54	1236,30
87	70	32,97	54,85	12,31	21,31	31,18	19,54	1267,50
90	70	31,96	53,17	11,95	21,31	31,18	20,09	1301,40
93	70	31,96	59,33	11,09	21,31	31,18	20,09	1354,20
96	70	31,96	58,14	11,34	21,31	31,18	20,09	1388,60
99	70	31,96	57,13	11,09	21,31	31,18	20,09	1412,30
102	70	31,96	58,15	11,09	21,31	30,18	20,09	1436,50
105	70	31,96	55,08	12,77	21,31	30,18	20,09	1451,20
108	70	31,96	51,03	14,47	21,31	30,18	20,09	1463,10
111	70	31,96	49,50	15,54	21,31	30,18	20,09	1475,20
114	70	31,44	51,48	13,95	21,31	30,18	19,35	1480,40
117	70	31,94	53,70	13,75	21,31	30,18	19,35	1486,30
120	70	31,94	49,16	15,12	21,31	30,18	20,06	1492,70
123	70	31,94	47,63	15,12	21,31	30,18	20,06	1501,30
126	70	31,94	47,63	15,84	21,31	30,18	20,06	1507,20
129	70	31,94	46,63	15,84	21,31	30,18	20,06	1513,10
132	70	31,94	46,63	15,84	21,31	30,18	20,06	1519,80
135	70	31,94	46,63	15,84	21,31	29,16	20,06	1522,30
138	70	31,94	47,65	15,84	21,31	29,16	20,06	1525,60
141	70	31,94	47,65	15,84	21,31	29,16	20,06	1529,40
144	70	31,94	47,65	15,84	21,31	29,16	20,06	1533,70
147	70	31,94	47,65	15,84	21,31	29,16	20,06	1537,20
150	70	31,94	47,65	15,84	21,31	29,16	20,06	1541,10

Çizelge Ek A.7. (devam ediyor).

153	70	31,94	47,65	15,84	21,31	29,16	20,06	1545,60
156	70	31,94	47,65	15,84	21,31	29,16	20,06	1549,10
159	70	31,94	47,65	15,84	21,31	29,16	20,06	1562,30
162	70	32,95	46,65	16,56	21,31	29,16	20,06	1574,30
165	70	32,95	46,65	16,56	21,31	30,18	19,35	1579,60
168	70	32,95	46,65	16,56	21,31	30,18	19,35	1584,50
171	70	32,95	46,65	16,56	21,31	30,18	19,35	1586,10
174	70	32,95	46,65	16,56	21,31	30,18	19,35	1589,40
177	70	32,95	46,65	17,06	20,60	30,18	19,35	1592,30
180	70	32,95	46,65	17,06	20,60	31,18	19,35	1596,70

Çizelge Ek A.8. Derslikte 70 öğrenci olduğunda ve klima santralinin açık olduğu şartlardaki deney sonuçları.

Zaman (dakika)	Öğrenci Sayısı	Üfleme Havası Bağıl Nem (%)	Dış Hava Bağıl Nem (%)	Dış Hava Sıcaklık (°C)	Üfleme Havası Sıcaklık (°C)	Dönüş Havası Bağıl Nem (%)	Dönüş Havası Sıcaklık (°C)	CO ₂ (ppm)
3	70	33,96	46,65	17,06	26,60	31,18	22,35	1568,2
6	70	33,96	47,67	16,56	26,60	31,18	22,35	1531,2
9	70	33,96	47,67	16,56	26,60	31,18	22,35	1502,1
12	70	33,96	48,68	15,84	26,60	31,18	22,35	1465,3
15	70	33,96	48,68	15,84	26,60	31,18	22,35	1430,7
18	70	33,96	48,68	15,84	26,60	32,19	22,35	1398,4
21	70	33,96	49,68	15,84	26,60	32,19	21,63	1345,1
24	70	33,96	49,68	15,84	26,60	32,19	21,63	1311,6
27	70	33,96	49,68	15,84	26,60	32,19	21,63	1267,8
30	70	33,96	49,68	15,84	26,60	32,19	21,63	1223,4
33	70	33,96	49,68	15,84	25,89	32,19	21,63	1178,5
36	70	33,96	49,68	15,84	25,89	32,19	21,63	1124,3
39	70	33,96	50,68	15,84	25,89	32,19	21,63	1074,3
42	70	33,96	50,68	15,84	25,89	32,19	21,63	1036,2
45	70	33,96	49,68	15,84	25,89	32,19	21,63	998,5
48	70	33,96	49,68	15,84	25,89	32,19	21,63	946,3
51	70	33,96	49,68	15,84	25,89	32,19	21,63	907,2
54	70	33,96	49,68	15,84	25,89	32,19	21,63	884,3
57	70	33,96	50,68	15,84	25,89	32,19	21,63	836,1
60	70	33,96	50,68	15,84	25,89	32,19	21,63	801,9
63	70	33,96	50,68	15,12	25,89	32,19	21,63	789,3
66	70	33,96	51,68	15,12	25,89	32,19	21,63	745,6
69	70	33,96	51,68	15,12	25,89	32,19	21,63	721,8
72	70	33,96	51,68	15,12	26,60	32,19	21,63	703,5
75	70	33,96	51,68	15,12	26,60	32,19	21,63	689,2
78	70	33,96	51,68	15,12	26,60	32,19	22,30	661,4
81	70	33,96	52,71	15,12	26,60	32,19	22,30	645,3
84	70	33,96	53,72	14,40	26,60	32,19	22,30	627,6
87	70	33,96	53,72	14,40	26,60	32,19	22,30	619,4
90	70	33,96	53,72	14,40	26,60	32,19	22,30	604,3
93	70	33,96	53,72	14,40	26,60	32,19	22,30	598,2
96	70	33,96	53,72	14,40	26,60	32,19	22,30	588,1
99	70	34,97	54,72	14,40	26,60	32,19	22,30	576,2
102	70	34,97	54,72	14,40	26,60	33,20	22,30	561,5
105	70	34,97	54,72	14,40	26,60	33,20	22,30	549,3
108	70	35,97	55,72	14,40	26,60	34,20	22,30	537,2

Çizelge Ek A.8. (devam ediyor).

111	70	35,97	55,72	13,68	26,60	34,20	22,30	524,9
114	70	36,97	55,72	13,68	26,60	35,22	22,30	512,8
117	70	36,97	55,72	13,68	26,60	35,22	22,30	504,1
120	70	36,97	55,72	13,68	26,60	35,22	22,30	489,6
123	70	37,98	56,72	13,68	26,60	35,22	22,30	489,6
126	70	37,98	56,72	13,68	26,60	35,22	22,30	489,6
129	70	37,98	57,72	12,96	26,60	35,22	22,30	489,6
132	70	37,48	57,72	12,96	25,89	35,22	22,30	489,6
135	70	37,48	57,72	12,96	25,89	35,22	22,30	489,6
138	70	39,00	57,72	12,96	25,89	35,22	21,58	483,2
141	70	40,00	57,72	12,96	25,89	35,22	21,58	483,2
144	70	41,00	57,72	12,96	25,89	35,22	21,58	483,2
147	70	43,02	58,73	12,96	25,89	39,66	21,58	483,2
150	70	45,02	58,73	12,96	25,89	42,88	21,58	483,2

ÖZGEÇMİŞ

Erhan BUDAK ilk ve orta öğrenimini Ankara şehrinde tamamladı. 1998 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Tesisat Öğretmenliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2002 yılında mezun oldu. 2004-2005 GönkaA.Ş'de Kalite Kontrol Yöneticisi olarak görev yaptı. 2005-2018 yılların da Üntes A.Ş de Ar-Ge Mühendisi ve Paket Klima Üretim Müdürü çalıştım. 2019-2021 arası Doğu İklimlendirme A.Ş'de Ar-Ge Müdürü olarak çalıştım. 2021 yılından itibaren Klisef Havalandırma A.Ş'de Fabrika müdürü olarak devam etmektedir. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programına 2017 yılında mezun oldum. 2017 yılında Karabük Üniversitesine Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimine başladı.