

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOSİL YAKIT VE ELEKTRİK ENERJİSİ TÜKETEN
CAM ÜRETİM PROSESİNE
İLERİ KONTROL SİSTEMLERİYLE AKIL KAZANDIRMA

ÖMER BAYRAKTAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖMER BAYRAKTAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ÖMER BAYRAKTAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. FUAD ALIEW

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**SMARTER PRODUCTION BY ADVANCED
CONTROL TECHNIQUES FOR GLASS
PROCESS CONSUMING FOSSIL FUEL AND
ELECTRIC POWER**

ÖMER BAYRAKTAR

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. FUAD ALIEW

GEBZE
2023

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 09/02/2023 tarih ve 2023/13 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 03/03/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ömer BAYRAKTAR'ın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : DOÇ. DR. Fuad ALIEW

ÜYE

: DR. ÖĞR. ÜYESİ Atilla UYGUR

ÜYE

: DOÇ. DR. Sabri BIÇAKÇI

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Artan nüfus, teknolojideki ilerleme, endüstrideki gelişmeler enerjiye olan talebi arttırmıştır. Cam üretimi yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen enerji yoğun endüstriyel bir süreçtir. Enerjiye olan talebin artması enerji maliyetlerinde artışa neden olmasına ek olarak çevresel etkileri de arttırmıştır.

Cam üretiminde enerjinin büyük bir bölümü yüksek ısıya ihtiyaç duyulan, harmanın ergitildiği ve afinyasyonun gerçekleştiği cam fırınlarında tüketilmektedir. Cam fırınında ergitme ve ısıtma için kullanılan enerji fırına doğrudan fosil yakıt olarak ve/veya elektrik enerjisi ile sağlanmaktadır. Fosil yakıt türü son zamanlarda yaygın olarak doğalgaz olup, LPG veya mazot kullanılan cam fırınları da mevcuttur. Elektrik enerjisi tamamen ergitme için kullanıldığı gibi fosil yakıtı takviye olarak da kullanılabilir. Kullanılan yakıt türü ne olursa olsun cam fırınlarında enerji verimliliği, tasarım, kullanılan hammadde, yakıt verimliliği ve kontrol tekniğiyle doğrudan ilişkilidir.

Cam üretimi, farklı tasarıma sahip fırınlarda üretilebilmektedir. Cam fırın tipleri, yandan veya arkadan ateşlemeli rejeneratif, rekuperatif, oksijen-yakıtlı veya tamamen elektrikli olabilmektedir. Cam fırını tasarımında, üretilecek cam tipi, günlük üretim kapasitesi gibi etkenler belirleyici olmaktadır. Bu çalışmada, şişe üretiminde yaygın olarak kullanılan arkadan ateşlemeli, doğalgaz ve elektrik yakıtlı, rejeneratif bir fırın tipi işletme verileri ile yapay zeka kullanılarak modellenmiştir. Veri setindeki 38 adet değişkenin bir senelik verisi ile modelleme gerçekleştirilmiştir. Python programlama dilinin kullanıldığı çalışmada modelleme tekniği olarak Ridge Regresyon, Lasso Regresyon kullanılmış ayrıca Elastik Net ile regüle edilmiştir.

Sonuç olarak, özgül yakıt tüketimiyle işletme parametreleri arasındaki ilişki yapay zeka ile analiz edilmiştir. Böylece, etkisi yüksek olan verilerin ölçüm teknikleri incelenerek akıllı sensörlerin geliştirilmesi ve ileri seviye kontrol sistemleriyle cam üretim sürecine akıl kazandırmanın ve verimli gerçekleştirilecek üretimin yolu açılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Cam Ergitme, Enerji Verimliliği, Yapay Zeka, Akıllı Sensör, İleri Kontrol, Akıllı Üretim.

SUMMARY

Growing population, technological progress and development in industry increased the demand of energy. The increase of demand caused not only increase of operating costs but also increased negative environmental impact. Glass production is energy intensive process. The developments in energy sector carried the efficiency to the top of targets.

The greater part of energy in glass production is consumed in melting-refinery process where the batch is molten. The energy used in glass furnace is directly transmitted to furnace room as fossil fuel and/or electric power. However, the general type of fossil fuel is natural gas, fuel-oil, LPG or diesel consumed furnaces are available as well. The electric power can be used as full power in furnace or be used as boosting to fossil fuel.

Glass is produced in different design furnaces. The general type of glass furnaces are, regenerative, recuperative, oxy-fuel or electric. In this study, a glass bottle process in back fired regenerative furnace consuming natural gas and electric power was modelled by using artificial intelligence. One year database with 30 variable was used for modelling. Ridge and Lasso used as modelling technique in Python language.

As conclusion, the effect of each parameter to specific fuel consumption analyzed by means of artificial intelligence. Hence, the variables have higher effect can be diagnosed and this will open the way to smart production sensors and advanced control systems. The energy efficiency in production by means of smart sensors and advanced controllers will decrease both product costs and emissions harmful to environment.

Key Words: Glass Melting, Energy Efficiency, Artificial Intelligence, Advanced Control, Smart Production.

TEŞEKKÜR

Öğrenim dönemim ve tez çalışmam süresince desteğini eksik etmeyen ve bu çalışmada bana yol gösterici olan Doç. Dr. Fuad Aliew Hocam'a,

Yoğun çalışma temposuna rağmen, çalışmalarımda bana bilgi ve tecrübesi ile desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Özkan Gül'e,

Zaman ve mekanın bizi ayıramadığı kadim dostum, dert ortağım Dr. Okan Öztutkan'a,

Doğduğum ilk günden itibaren tüm imkanlarıyla bugüne gelmemi sağlayan annem Gülay Bayraktar, babam Hikmet Bayraktar'a,

Çocukluğumdan bugüne varlıklarıyla bana güven veren çok sevdiğim abilerim Engin Bayraktar ve Mesut Bayraktar'a,

Yüksek lisans öğrenciliğim süresince ellerimi hiç bırakmayan, desteğini sürekli hissettiren sevgili eşim Sevinç'e,

ve bana motivasyon kaynağı olan can kızım Yağmur'a

en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. CAM VE CAM ÜRETİMİ	5
2.1. Camın Malzeme Özellikleri	5
2.2. Cam Üretim Süreci	7
2.3 Cam Ergitme Fırınları	9
2.3.1 Rejeneratif Fırınlr ve Enversiyon	10
2.3.2 Cam Fırınlrında Yanma	12
2.3.3 Cam Fırınlrında Elektrik Kullanımı	13
2.3.4 Cam Fırınlrında Kontrol	15
2.3.4.1 Sıcaklık Dağılımı Kontrol	16
2.3.4.2 Fırın İçi Görüntüleme	17
2.3.4.3 Debi Ölçümü	19
2.3.4.4 Fırın İçin Basınç	20
2.3.4.5 Yanan Gazdaki Oksijen Miktarı	20
2.3.4.6 Cam Seviyesi Ölçüm	20
2.3.4.7 Model Tabanlı Kestirimci Kontrol	21
2.4 Cam Üretiminde Enerji Verimliliği	21
3. VERİ BİLİMİ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ	23
3.1. Veri Bilimi	23
3.2. Makine Öğrenmesi	23

3.2.1. Makine Öğrenmesi Çeşitleri	24
3.2.1.1 Denetimli Öğrenme	24
3.2.1.2 Denetimsiz Öğrenme	24
3.2.1.3 Pekiştirmeli Öğrenme	25
4. MODELLEME VE REGRESYON	26
4.1. Regresyon	26
4.2. Çoklu Doğrusal Regresyon	27
4.3. Ridge Regresyon	28
4.4. Lasso Regresyon	29
4.5. Lasso ve Ridge Karşılaştırma	29
4.6. Elastik Net Düzenleme	30
5. KULLANILAN ARAÇLAR	31
5.1. Teknik Çalışma Ortamı	31
5.2. Python Programlama Dili	31
5.3. Veri Seti	32
6. YÖNTEMİN UYGULANMASI	35
6.1. Veri Setinin Oluşturulması	35
6.2. Verilerin Modele Uygun Hale Getirilmesi	36
6.3. Modelin Oluşturulması ve Eğitilmesi	39
7. SONUÇLAR VE YORUMLAR	42
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u> Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
γ	: Akışkan Yoğunluğu
σ	: Varyans
Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
ANN	: Artificial Neural Network (Yapay Sinir Ağı)
CaO	: Kalsiyum Oksit
CO_2	: Karbondioksit
$^{\circ}C$	: Santigrat Derece
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
GJ	: Giga Joule
Hc	: Cam İçin Gerekli Isı Enerjisi
kWh	: Elektrik Enerji Birimi
Lasso	: Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (En Küçük Mutlak Azaltma ve Seçim Operatörü)
LCD	: Liquide Crystal Display (Sıvı Kristal Ekran)
MgO	: Magnezyum Oksit
mol	: Avogadro Sayısı Kadar Atom İçeren Madde
N_2	: Azot
Na_2O	: Soda
nm	: Nano metre
NO_x	: Nitrik Oksit
OLS	: Ordinary Least Squares (En Küçük Kareler)
O_2	: Oksijen
PID	: Proportional Integral Derivative (Oransal-Integral-Türevsel)
Pt	: Platin
Q	: Akışkan Debisi
R^2	: Belirlilik Katsayısı

Rh	: Rodyum
SiO ₂	: Silika
SO _x	: Sülfür Oksit
TDLAS	: Tunable diode laser absorption spectroscopy (Ayarlanabilir Diyot Lazer Absorbsiyon Spektroskobi)
TFT	: Thin Film Transistor (İnce Film Transistör)
Ton/Gün	: Günlük Cam Fırını Çekiři
YSA	: Yapay Sinir Ağı



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Cam üretimi akış şeması.	8
2.2: Regeneratif fırın enversiyon döngüsü.	11
2.3: Yanma olayı ve ısının açığa çıkması.	13
2.4: Cam fırınında ölçüm enstrümanları.	15
2.5: Fırın termal kamera görüntüsü-1.	18
2.6: Fırın termal kamera görüntüsü-2.	19
2.7: Fark basınç ölçüm elemanları.	19
2.8: Üretilen cam için enerji tüketen süreçlerin dağılımı.	22
3.1: Makine öğrenmesi çeşitleri.	24
3.2: Lasso ve Ridge karşılaştırması.	30
6.1: Veri setine göre çalışılan renkler.	36
6.2: Bal rengi için verilerin birbiriyle ilişkisi (güçlü ilişkiler mevcut).	37
6.3: Bal rengi için verilerin birbiriyle ilişkisi (güçlü ilişkili veriler yok edildi).	38
6.4: Yeşil renk için verilerin birbiriyle ilişkisi (güçlü ilişkiler mevcut).	38
6.5: Yeşil renk için verilerin birbiriyle ilişkisi (güçlü ilişkili veriler yok edildi).	37
7.1: Bal rengi için ridge regresyon çıktısı.	42
7.2: Yeşil renk için ridge regresyon çıktısı.	43
7.3: Bal rengi için lasso regresyon çıktısı.	44
7.4: Yeşil renk için lasso regresyon çıktısı.	45
7.5: Bal rengi için elastik net regresyon çıktısı.	46
7.6: Yeşil renk için elastik net regresyon çıktısı.	46

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: En çok üretilen cam tipleri.	5
2.2: Cam renklendirici metal oksitler.	9
2.3: Fırın tipleri ve tipik özellikleri.	10
2.4: IEC 60584 termokupl özellikleri.	16
2.5: Cam ergitme fırınları girdi ve çıktıları.	22
5.1: Veri setindeki değişkenler.	32
6.1: Yeşil renk için regresyon parametreleri.	40
6.2: Bal rengi için regresyon parametreleri.	41
7.1: Yeşil renkte özgül enerji tüketimiyle artı korelasyon çıkan değişkenler.	47
7.2: Yeşil renkte özgül enerji tüketimiyle eksi korelasyon çıkan değişkenler.	47
7.3: Bal renkte özgül enerji tüketimiyle artı korelasyon çıkan değişkenler.	47
7.4: Bal renkte özgül enerji tüketimiyle eksi korelasyon çıkan değişkenler.	48
7.5: Formül 7.1'deki semboller, açıklamaları ve birimleri.	49
7.6: İyileştirme öncesi ve sonrası değerler.	50

1. GİRİŞ

Cam, insanlığın yazılı olarak bilinen varoluş tarihinden daha eski bir malzeme olmasına karşın, neredeyse geçtiğimiz yüzyıla kadar cam ergitmek için sadece küçük potalar kullanılıyordu. Siemens ilk rejeneratif fırını geliştirerek bu alanda büyük bir adım atılmasını sağlamıştır. 19. yüzyıl sonları ve özellikle 20. Yüzyıl başı itibariyle fırın tasarımı, refrakter malzemesi, yakıt, yakma teknolojileri ve kontrol sistemlerinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Günümüzde fırın kapasiteleri günlük 1000 tonu aşmakla kalmamış, aynı zamanda enerji verimliliği, fırın ömrü, ergitme hızı ve çalışma sıcaklığı konularında da büyük ilerlemeler kaydedilmiştir [1], [2].

Cam üretimi enerji yoğun endüstriyel bir süreçtir. Artan nüfus, teknolojiye olan talebi arttırmıştır. Enerji maliyetlerinin artması, çevresel duyarlılık, uluslararası iklim anlaşmaları enerji verimliliği üzerindeki baskıyı arttıran konulardır. Cam ergitilen fırınlarda enerji verimliliğini artırma ve çevresel etkileri azaltma konuları oldukça popüler bir hal almıştır. Yeni cam fırını tasarımlarında farklı yaklaşımlar söz konusu olduğu gibi, yanma işleminin verimliliğini arttırmak da büyük önem kazanmıştır [3]. Cam üretiminde enerji verimliliğini arttıracak temel yapıtaşları olan fırın tasarımı, hammadde ve yakıt verimliliği, ileri kontrol tekniği üzerine yoğun çalışmalar gerçekleştirilmektedir [4].

Cam fırını, içinde çeşitli malzeme ve fazların fiziksel ve kimyasal tepkimesi sonucu, çok sayıda ısı ve kütle transferinin ve kimyasal dönüşümlerin gerçekleştiği bir reaktör olarak tarif etmek mümkündür. Fırın, bir cam üretim tesisinin en önemli ve pahalı kısmını oluşturur. Cam üretiminde tüketilen enerjinin çok büyük bir oranı cam fırınında tüketilmektedir [5]. Birçok cam fırını tipi, yüksek miktarda doğalgaz ve buna takviye olarak da elektrik enerjisi kullanmaktadır.

Cam üretiminde karmaşık ve doğrusal olmayan dinamik davranışlar olması nedeniyle doğru şekilde kontrol etmek oldukça zor bir süreçtir. Birçok fırın geleneksel PID kontrol döngüleriyle hatta operatörler tarafından manuel olarak işletilmektedir. Ancak bu kontrol teknikleri günümüz şartlarında enerji verimliliği açısından yetersiz kalmaktadır. Her ne kadar model tabanlı kestirimci kontrol sistemleri geliştirilmiş ve uygulanıyor olsa da bu konu hala gelişmeye açık bir alan olarak görülmektedir. Sadece kontrol değil aynı zamanda ölçme işlemini

gerçekleştiren sensörlere de akıl kazandırmak bu sürecin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir.

Farklı tipte cam ergitme fırınları mevcut olup ortalama enerji verimlilikleri %50-%60 seviyelerindedir. Cam fırınlarının enerji verimliliği fırın tasarımına bağlı olduğu kadar nasıl işletildiğiyle de doğrudan ilişkilidir.

Bu tez çalışmasında arkadan ateşlemeli, rejeneratif, şişe camı üreten bir fırının 1 senelik işletme verisi yapay zeka algoritmalarıyla analiz edilmiştir. İşletme verisi iki ayrı renk verisini içermektedir. Bu renkler bal ve yeşil renkleridir. Bu sayede renk bazında çalışma yapmak da mümkün olmuştur. Çalışmada, özgül enerji tüketiminin bağlı olduğu değişkenler her iki renk için belirlenmiş ve bu parametrelerin ölçü-kontrol durumları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, fırın işletmesine değer katabilecek sensör ve kontrol elemanlarının geliştirilmesine ışık tutacak bir çalışma ortaya çıkmıştır.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Camdaki ısı transferi, enerji verimliliğiyle doğrudan ilişkilidir. Cam ergitme fırını tasarımındaki ideal yaklaşım fırın ve yakıcı sisteminin iyi bir ısı yayılım profili oluşturacak şekilde olmasıdır [6]. Cam harmanını ergitme ve camı uygun çalışma sıcaklığında tutmak için gerekli ısı enerjisi (H_c), toplam enerji girişinin %25-%35'i seviyesindedir. Dolayısı ile, fırına giren doğalgaz enerjisinin %65-%75 gibi bir oranı proses dışı harcanır veya kaybedilir. Enerji yoğun olan cam ergitme prosesinde enerji verimliliğinin artırılması öncelikli hedefler arasındadır [5]. Bu hedefe ulaşmak için tasarımın yanı sıra fırın işletme performansının da artırılması önemli rol oynamaktadır. İşletme performansının artırılmasının yolu ölçü ve kontrol tekniklerinden geçmektedir. Ölçü enstrümanlarında gerçekleştirilecek iyileşme ve kontrol sistemlerindeki gelişmeler neticesinde enerji verimliliğinde olumlu değişiklikler görmek mümkün olacaktır.

Cam fırınları için gerekli yakıt miktarı, rejeneratif fırınlarda ortalama bir değer olarak Hartford Ortalama Pratik Formülü ile ifade edilebilir [9].

$$F = [50 + 0,6A] + 4,8T \quad (1.1)$$

Burada, F Milyon Btu/gün olarak yakıt gereksinimini, A m² olarak fırının ergitme bölümünün alanını, T ise ton olarak 24 saatte ergitilen cam miktarıdır.

Fırında oluşan yüksek seviyede ısı ve kütle transferleri, sayıca çok kütle hareketleri, yanma süreçleri ve katı-katı, katı-sıvı ve gaz-katı reaksiyonları nedeniyle çok zorlu problemler ortaya çıkmaktadır. Bileşenler arasındaki etkileşimler nedeniyle, cam ergitme süreci çok değişkenli girdi parametrelerine bağlı olarak sürekli değişir ve koşullar aynı olsa bile farklı sonuçlar üretebilir.

Cam üretimi ardışık birçok süreçten oluşmaktadır. Tez içeriğinde, cam fırının genel tasarımını ve işlevselliğini kapsayan bir bölüm mevcuttur. Cam üretimi gerçekleştiren şirketlerin günümüzdeki öncelikli hedefleri arasında cam kalitesini arttırmanın yanı sıra üretim maliyetini düşürmek de bulunmaktadır. Bu amaca hizmet edecek yollar arasında; yakma sisteminin optimizasyonu, fırın tasarımının değiştirilmesi ve ileri kontrol sistemlerinin geliştirilmesi yer almaktadır. İleri kontrol sistemlerini kullanımı fırın prosesini optimize ederek enerjide tasarruf ve cam kalitesinde iyileştirme sağlamaktadır.

Fırındaki cam sıcaklığı, fırın kemer ve taban sıcaklıkları, doğalgaz ve elektrik tüketim değerleri fırının günlük çalışması sırasında işletme personelinin sürekli izlediği önemli değişkenlerdendir. Elde edilen model sonuçlarını kullanarak hedef parametrelerinin belirlenmesi ve tahmin edilmesi üzerine araştırmalara katkı sağlaması da amaçlanmaktadır.

Fırındaki cam ergitme performansını arttırabilmek için bu sürecin doğru ölçülmesi, analiz edilmesi ve kontrol edilmesi önemli bir husustur. Endüstriyel süreçlerin günlük performansının ölçülmesi için, önemli parametreleri hesaba katarak fiziksel süreçleri tanımlayan matematiksel modeller mevcuttur. Ancak karmaşık bir yapıya sahip olan fiziksel modellerin kullanılması, çok sayıda süreç değişkeni ve uzun iterasyonlar gerektirdiğinden karmaşık yapıya sahip işletmelerde uzun zaman almaktadır [7]. Sonuç olarak, cam ergitme fırınlarını matematiksel olarak simüle etmek ve modellemek karmaşık bir işlemdir. Bu amaçla, bilgisayar tabanlı simülasyon ve tahmin çalışmaları, matematiksel modellere uygulanabilir bir hale getirilmiştir.

Özellikle, yapay zeka modellerini kullanan deneysel araştırmalar, beklenen matematiksel tekniklerin ve sayısal çözümlerin performansını karşılaştırarak ve değerlendirerek literatüre katkıda bulunmaktadır. Yapay sinir ağları, karmaşık ilişkileri bulma ve eşleştirme kapasiteleri, model oluşturmayı hızlandırmaları,

yeniden kalibre etmeyi kolaylaştırmaları faydalı özellikleri arasındadır [8]. Son yıllarda boosting ve yapay sinir ağıları (artificial neural network) algoritmaları sıkça kullanılan popüler yöntemler olmasına karşılık çalışmanın amacı ve/veya veri setlerindeki kısıtlar nedeniyle regresyon modelleri de hala en sık başvurulacak yöntemler arasında yerini korumaktadır. Ancak regresyon belli varsayımlara dayanır. Bu varsayımların sağlanamadığı durumlarda çeşitli alternatif regresyon yöntemleri ele alınabilir. Bu çalışmada çoklu doğrusal bağlantı regresyon yöntemlerinden faydalanılmıştır. Bu yöntemlerden Ridge, etkisi az olan değişkenlerin katsayısını küçültüp sıfıra yaklaştırırken, bir diğer yöntem olan Lasso, etkisi az olan değişkenlerin katsayısını sıfır yaparak ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, Elastic Net yöntemiyle iki regresyonun kombinasyonu olan yönteme başvurulmuştur.

Söz konusu modeller arasındaki karşılaştırmaya ek olarak, makine öğrenme işleminin model performansına olan etkileri de araştırılmıştır. Model sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için, literatürde kabul gören performans kriterleri olan Belirlilik Katsayısı (R^2) kullanılmıştır. İlgili katsayı tüm modeller için hem öğrenme hem test veri setleri için karşılaştırılmıştır.

Bağımsız olarak birbirinden ayrı yürütülen Ridge, Lasso ve Elastik Net modelleri araştırma çıktılarından, kullanılan girdi değerleri ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlara varıldığı görülmüştür. Model çıktılarını karşılaştırabilmek için belirleme katsayısı ve ortalama karekök hata değerlerine bakıldığında modellerin yapmış olduğu hesaplamaların iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Model çalışmasının araç olarak kullanıldığı çalışmada yeni ölçü ve kontrol teknikleri tartışılmıştır.

2. CAM VE CAM ÜRETİMİ

Bu bölümde, cam endüstrisi, camın hayatımızdaki yeri, cam üretim süreci ve cam fırın tipleri özetlenmiştir. Ayrıca cam fırınlarında enerji transferi ve enerji verimliliği üzerine literatür değerlendirmesi yapılmıştır.

2.1. Camın Malzeme Özellikleri

Cam insanlığın hayatına eski çağlarda girmiş ve önemini gün geçtikçe arttırmıştır. Günümüzde şişe, saklama kabı, ev eşyası gibi genel kullanım eşyalarından ev, araba camlarına, yüksek sıcaklığa dayanıklı ecza şişelerine, akıllı telefon camından solar enerji camlarına kadar birçok yerde hayatımızda yer almaktadır. Özetle cam, cam ambalaj, otomotiv, inşaat, elektronik, medikal ve solar enerji başta olmak üzere birçok sektörün vaz geçilmez oyuncusu durumundadır. Camın bilinen diğer malzemelerden farkı ergime sıcaklık noktası değil şekil verilebilecek yumuşama sıcaklık noktasıdır. Bu sayede cam ne tam bir sıvı ne de gerçek bir katı malzeme olarak nitelendirilmektedir. Soğuk haldeyken katı halde olan cam ısıнын artmasıyla birlikte dereceli olarak sıvılaşır, akıcı ve kolayca şekil verilebilen bir madde halini alır [10]. Şekil verilen camın sıcaklığı düştükten sonra bu şekilde kalır.

Cam, yüksek sıcaklıkta ergitilerek rijit koşullarda kristallenme olmaksızın soğutularak üretilmektedir. Camın kimyasal kompozisyonu, yoğun olarak silika (SiO_2) içermektedir. Silika haricinde, sodyum oksit (Na_2O), kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve tipine, rengine bağlı olarak az miktarda farklı içeriklere sahip olabilmektedir. En çok üretilen cam tipleri Tablo 2.1’de verilmiştir [11].

Tablo 2.1: En çok üretilen cam tipleri.

Ana Grup	Uygulama	Karakteristik
Soda-Kireç-Silika	- Düzcam - Cam Ambalaj - Cam Ev Eşyası	- Toplu Üretim - Düşük Maliyet

Tablo 2.1: Devam.

Ana Grup	Uygulama	Karakteristik
Sodyum-Borosilikat	- Laboratuvar Camı - Cam Tencere - Otomobil Farı	- Termal Şok Direnci
E-Cam	- Tekstil fiber cam - Güçlendirici fiber	- Mekanik Kuvvet, - Düşük Elektrik İletkenliği
A-Cam	- Cam Yünü - Cam Fiber	- Düşük Maliyet
Ekran Camı	- TFT, LCD	- Düşük Elektrik İletkenliği - Çok İnce - Yüksek Ergime Sıcaklığı
Kurşun Kristal	- Optik Fiber Cam - Halojen Aydınlatma - Laboratuvar ve Kimya	- Safılık - Yüksek Sıcaklık Direnci - Termal Şok Direnci

Camın bir diğer önemli özelliği rijit olmayı ve elastikliği bir arada sağlamasıdır. Bu özelliği sayesinde cam birçok çelik tipinden daha sert olurken aynı zamanda gevrek de olabilmektedir [12].

Cam, oldukça sağlam ve dirençli bir malzeme olarak nitelendirilebilmektedir. Kimyasal olarak asal bir malzeme olması nedeniyle silikon-oksijen bağlarını tutar, böylece gıda ürünleri için iyi bir muhafaza malzemesi olarak kullanılabilir. Cam, katı haldeyken düşük elektrik iletkenliğine sahip olması sayesinde elektrik yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır. Optik ve radyo frekans uygulamaları için kullanılan bir malzemedir. Cam aynı zamanda geri dönüşümü kolay, çevre dostu bir malzeme olması sebebiyle de hayatımızdaki önemini arttırmaktadır [13].

2.2. Cam Üretim Süreci

Cam üretim sürecinde tüketilen enerjinin büyük bir bölümü cam ergitme ve şartlandırma aşamalarında harcanmaktadır. Bu nedenle, cam üreticileri enerji verimliliği için bu kısım için yoğun çalışmalar gerçekleştirmektedir. Bugün sahip olduğumuz fosil yakıt yakma teknolojisi ve elektrik kullanımının da katkısıyla özgül enerji tüketimi cam ve seramik üretiminde %8 - %37 kadar düşürülebilmektedir. Yol kat edilen yüksek teknoloji ile fırına yakıt ve hava enjekte eden gömülü yakıcılar sayesinde ise bu değerdeki düşüş %38–63 arasını görebilmektedir [14].

Cam üretimindeki temel aşamalar;

- Harmanın hazırlanması,

Harman hazırlama işlemi, cam hammaddelerin ve cam kırığının reçeteye uygun olarak karıştırılması ve fırına nakli ile gerçekleştirilir. Bu işlem genellikle otomatik sistemler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Harmana cam kırığı katılması hem geri dönüşüme katkı sağlamakta hem de enerji tüketiminde ciddi düşüşlere sebep olmaktadır. Harman hazırlandıktan sonra ergitmenin gerçekleştirileceği fırına gönderilir.

- Ergitme ve afinyasyon,

Cam üretim sürecinin ikinci aşamasında camın içine şarj edilmiş olan harman yüksek sıcaklığa sahip ortamda ergitilerek homojen yapıdaki akışkan haline getirilir. Harman fırına harman verici vasıtasıyla yüklendikten sonra fırındaki mevcut eriyik cam yüzeyine yayılır ve harman örtüsünü oluşturur. Harman, yaklaşık 1500°C sıcaklıkta olan fırın atmosferi ile 1350-1400°C olan ergimiş cam arasındadır. Arada kalan harman zamanla sıvı faz ile reaksiyona girer. Sıvı faz, harmanın henüz ergimemiş katı kısımlarından akarak ve harman bileşenleri arasından süzülerek ayrılır ve fırında mevcut ergimiş cam ile karışır. Bu işlem en yoğun ve en kolay olarak harman örtüsünün ucunda gerçekleşir [14].

Camın ergimesi sırasında açığa CO₂ ağırlıklı harman gazı çıkar. Aynı zamanda harmandaki rutubetten kaynaklı su da gaz halinde ortamdaki ayrılır. Hammadde ve cam kırığı içinde hapsolmuş olunan hava da aynı ortama karışmaktadır. Buna karşılık üretilen camda gazların neden olacağı hava kabarcıkları istenmez ve hata

sebebidir. Habbe adı da verilen bu kabarcıklardan camı arındırma işlemine afinasyon adı verilir.

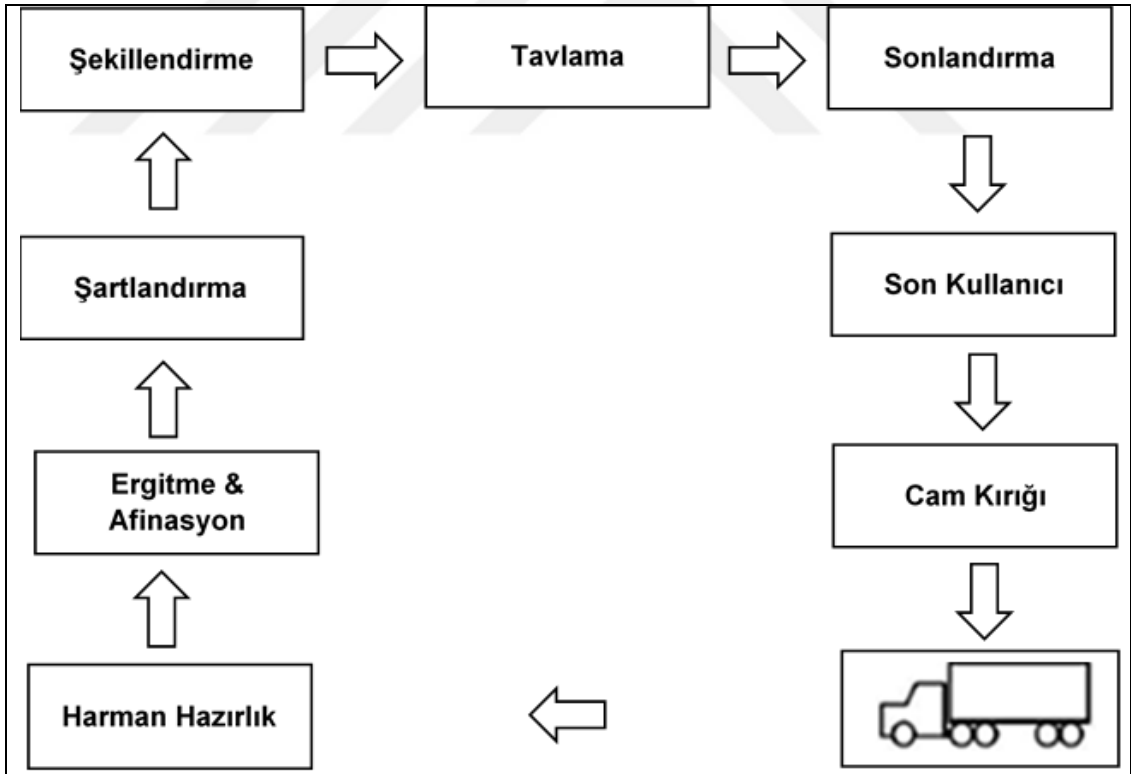
- Şartlandırma,

Ergimiş haldeki, fırın içerisindeki cam şartlandırılmak üzere çalışma havuzu ve forehearth adı verilen haznelere akar. Bu aşamada eriyik camın kimyasal ve termal homojenizasyonu sağlanır, gaz kabarcıklarından arındırılır. Camın şekillendirilebilmesi için uygun sıcaklığa üniform olarak soğutulur.

- Şekillendirme – Tavlama – Sonlandırma

Cama istenilen şeklin verildikten sonra daha dayanıklı bir hal alması için önce ısıtma işlemi gerçekleştirilir. Ardından kontrollü olarak yavaşça soğutulur.

Cam üretimine ilişkin akış şeması Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Cam üretimi akış şeması.

Ayrıca, camları renklendirmek için çeşitli metal oksitler kullanılmaktadır. Cama katılan bu metal oksitler ve verdikleri renk için Tablo 2.2: [15] verilmiştir.

Tablo 2.2: Cam renklendirici metal oksitler.

Metal Oksit	Verdiği Renk
Bakır Oksit	Yeşil – Turkuaz - Mavi
Demir Kobalt	Yeşil – Mavi - Sarı
Kobalt Oksit	Koyu Mavi – Açık Mavi, Mor
Magnezyum Oksit	Mor - Eflatun
Gümüş Oksit	Sarı
Altın	Pembe - Kırmızı
Mangan Oksit	Erguvan - Mor
Çinko, fosfat, kalay oksit	Beyaz - Opal
Antimon	Mat - Kırmızı
Kurşun Oksit	Saydam – Parlak Cam

2.3. Cam Ergitme Fırınları

Cam fırını, harman ve cam kırığının ergitilerek sıvı cam üretildiği tesistir. Üretim süreci yüksek sıcaklığa sahip olan yanma odasında kimyasal tepkimeler gerçekleştirilerek meydana gelir. Fırındaki işlemler sonucunda ergimiş ve afinasyonu tamamlanmış eriyik cam istenilen ürüne göre çeşitli süreçlerden geçirilir.

Tarihin erken dönemlerinde insanlık için camın meydana geldiği hammaddeleri eritmek ve kalıplara dökmek çok kolay olmamıştır. Camın işlenebilir hale geleceği bal kıvamına getirilebilmesi için en az 1250°C ısı gerekmesi ve odun ateşiyle elde edilen 1100°C ısı yetersiz kalıyordu.

Camı eritmek için kullanılan ısıнын elde edildiği alevin varlığını devam ettirmek, sönmesine engel olmak için cam ocakları kullanılmaktaydı. Cam ustaları ve sonrasında cam üreticileri geçmiş dönemden günümüze kadar neredeyse aynı çalışma prensibiyle camı eritmiştir. Tablo 2.3, cam eritme fırın tiplerini ve tipik özelliklerini vermektedir [16].

Tablo 2.3: Fırın tipleri ve tipik özellikleri.

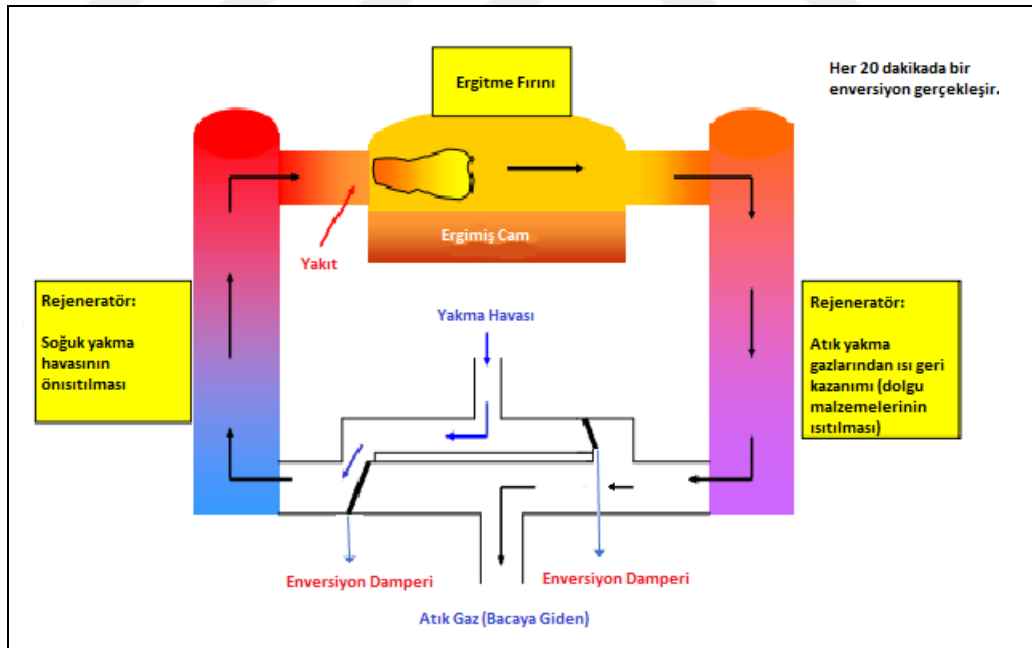
Tanım	Cam Tipi	Kapasite (Ton/Gün)	Alev Yönü	Hava Ön Isıtma Sıc.	Ergitme Enerjisi /Toplam Enerji Oranı
Yandan Ateşlemeli Rejeneratif	Düzcam	500-1000	Cam Akışın a Dik	Rejeneratör 1100-1350°C	%50-65
Yandan Ateşlemeli+Throat	Ambalaj , Ampul, TV	100-600	Cam Akışın a Dik	Rejeneratör >1100-1350°C	%50-65
Arkadan Ateşlemeli	Ambalaj	100-600	U-Şekli, Cam Akışın a Paralel	Rejeneratör >1200-1400°C	%35-55
Yandan Ateşlemeli Reküperatif	Teknik Cam, Cam Ev Eşyası	20-400	Cam Akışın a Dik veya Paralel	Rekuperatör 600-700°C	%20-40
Oksi-Yakıtlı	Borcam, Elyaf, TV	1-800	Cam Akışın a Paralel		%50-65

2.3.1. Rejeneratif Fırınlar ve Enversiyon

Bu tez çalışmasında, arkadan ateşlemeli, rejeneratif tipte şişe üretimi gerçekleştirilen bir hattaki cam fırını verileri kullanılmıştır. Fırında doğalgaz ve doğalgaza takviye olarak elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Doğalgaz ve hava fırın içinde buluşur ve yanma işlemi burada gerçekleşir. Fırının yüzey alanı 150-160 metrekare arasındadır. Yakma işlemi port adı verilen yakıcı boşluklarına yerleştirilmiş yakıcılar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Fırının sağında ve solunda simetrik olarak konumlandırılan portlar sırasıyla yanmaktadır. Portlar arasındaki görev değişimi enversiyon işleminde gerçekleştirilmektedir [17]. Enversiyon işlemi rejeneratif tipte fırınlarda kullanılmaktadır. Sözlük anlamı, tersine çevirme olan enversiyon, rejeneratif tipte cam ergitme fırınlarında enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Enversiyondaki temel amaç, açığa çıkan baca gazı ısını

geri kazanmak ve ısınan havayı bir sonraki yanma işleminde yakma havası olarak kullanmaktır.

Camın ergitilmesi için alev sıcaklığının 1850°C seviyelerine ulaşması gerekmektedir. Alevin bu sıcaklıklara ulaşması sonucunda fırındaki atmosferde 1300°C sıcaklıkta baca gazı oluşmaktadır. Yakıt tasarrufu sağlayarak enerji verimini arttırmak amacıyla açığa çıkan bu baca gazı ısısını geri kazanmak üzere fırının iki tarafında rejeneratör adı verilen yapılar bulunmaktadır. İçi refrakter ile dolu olan bu yapılar ilk döngüde baca gazı ısısını tutmakta ve ikinci döngüde soğuk yakma havası rejeneratör içinde geçirilerek ısıtılmaktadır. Damperler vasıtasıyla atık gazın yönlendirildiği bu döngülerin her birine enversiyon adı verilir. Her bir enversiyon yaklaşık olarak 20 dakika sürmektedir. İlk enversiyonda fırının bir tarafındaki yakıcılar yanarken 20 dakika sonra 1 dakika boyunca söner ve ardından diğer taraftaki yakıcılar ateşlenir. Bu döngü fırın ömrü boyunca ardışık olarak kesintisiz devam eder. Bu sayede bir önceki döngüdeki atık gazın ısısı sonraki yakma havasının sıcaklığını arttırmak üzere kullanılabilir [17]. Şekil 2.2 Rejeneratif bir fırında enversiyon döngüsünü görsel olarak göstermektedir.



Şekil 2.2: Rejeneratif fırın enversiyon döngüsü.

Enversiyon geçişlerinde yani alevsiz durumda oksijen değeri hızla yükselirken atık gazdaki NOx değeri hızla düşmektedir. Yüksek oksijene göre yapılan oksijen

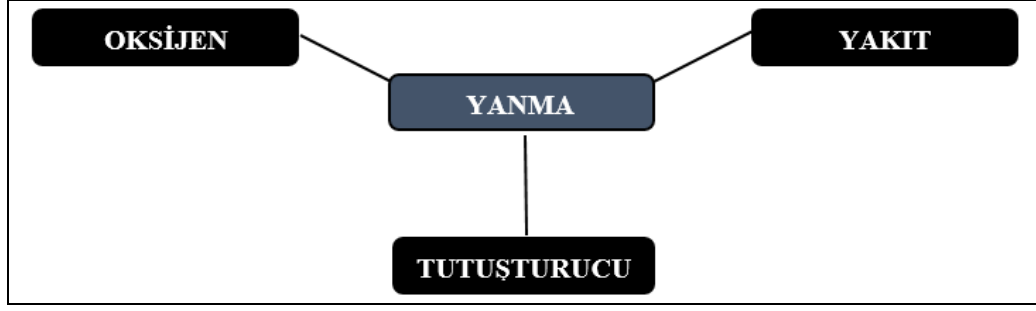
düzeltilmesi gerçeği yansıtmayacağından 20 dakikalık her enversiyon sonrası ilk 5 dakikanın dikkate alınmaması ölçü ve kontrol adına daha doğru sonuçlar verecektir.

2.3.2. Cam Fırınlarında Yanma

Soluduğumuz kuru hava, mol oranı olarak %20,9 oksijen, %78,1 oranında azot, %0,9 oranında argon ve eser miktarda karbondioksit, helyum, neon ve hidrojen içermektedir. Yanma işlemini formülleştirirken, argon gazı azot gazıyla birlikte düşünülür ve eser miktarda bulunan diğer gazlar da ihmal edilebilir. Bu varsayımlarla kuru havanın %21 oksijen, %79 azot içerdiğini söyleyebiliriz. Yani, yakılan her bir mol oksijen ile birlikte 3,76 mol ($0,79 / 0,21=3,76$) azot bulunur diyebiliriz. Normal yanma sıcaklıklarında azot asal (inert) bir gazdır ve diğer kimyasal elementlerle reaksiyona girmez. Buna karşılık azot, yanmanın sonu halini önemli ölçüde etkiler. Bunun sebebi büyük miktarda azotun yanma işlemine düşük bir sıcaklıkta girmesi ve yüksek bir sıcaklıkta çıkmasıdır. Sonuç olarak, yanma işleminden açığa çıkan enerjinin büyük bir bölümü, azotun sıcaklığını arttırmak için kullanılmıştır [18].

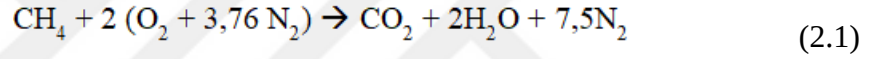
Yanma, yakıtın oksijenle birleştiği ve büyük miktarda enerjinin açığa çıktığı bir kimyasal reaksiyondur. Yanma için gerekli olan oksijen havadan sağlanır. Yanma, özetle yakıtın hızlı oksidasyon reaksiyonuna denmektedir. Yanmanın gerçekleşmesi için yanabilir karışım sınırları içinde yakıt ve yakıcının bir ateşleyici kaynağı ile buluşması gerekir. Isı karbon ve hidrojenin bağ enerjilerinin daha düşük enerji seviyeli bağlara dönüşmesi sonucu salıverilir. Yanma reaksiyonunun ısısı yakıtın tamamen yanması sonucu birim kütle başına salıverilen ısı enerjisidir.

Tamamen yanan herhangi bir yakıt türünün birim miktarı tarafından üretilen ısı miktarına kalorifik değer adı verilir. Kalorifik değer çeşitli yollarla ifade edilebilir ancak genellikle katı yakıtlar için kJ/kg, gaz yakıtlar için MJ/m³ ve sıvı yakıtlar için MJ veya kW_s/l birimleri kullanılır. Kalorifik değer, brüt ya da net olarak ifade edilir. Net değer, elde edilen toplam değerden suyun buharlaşan ısısının çıkarılması ile bulunan değerdir [18].



Şekil 2.3: Yanma olayı ve ısının açığa çıkması.

Doğalgazın içeriğinde metan, propan, bütan ve benzeri gazlardan oluşan karışım vardır. Ancak genellikle bu bileşenlerde metan gazının bulunma oranı diğerlerine oranla daha fazla olduğu için, doğal gaz genellikle metan gazından ibaret olarak dikkate alınmaktadır. Formül 2.1’de metanın (CH₄) teorik yanma denklemi ve yanma ürünleri gösterilmiştir [18].



Formül incelendiğinde, yanmanın sonucundaki ürünler arasında yanmamış olan metan (CH₄), karbon (C), hidrojen (H₂), karbon-monoksit (CO), hidroksil (OH) veya serbest halde oksijen (O₂) bulunmamaktadır. Yanma işleminde yakılan doğal gaz bacadan oldukça temiz bir gaz olarak atılmaktadır. Aynı zamanda, doğal gazın içeriğinde diğer yakıtlar içerisinde eriyik camla tepkimeye girecek maddeler bulunmadığından renk ve şekil bakımından istenen hal cama verilebilmektedir [18]. Bu özellikleri sayesinde doğalgaz, cam ergitme fırınlarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

2.3.3. Cam Fırınlarında Elektrik Kullanımı

Eriyik camın elektrik akımını ileterek ısınması, camdaki alkali ve toprak alkaliye bağlı olarak iyonik iletkenliğin sayesinde sağlanmaktadır. Cam içindeki en zayıf bağa sahip iyonlar alkali iyonlardır ve bu sayede elektrik akımını taşımada başrol oynarlar. Camın sıcaklığının artması sonucu viskozitesi azalır ve cam içindeki iyonların hareketliliği artar. İyonların hareketliliği ile birlikte camın elektriksel iletkenliği artar [31].

Üzerinden elektrik akımı geçen malzemeler ısınmaktadır. Bu olaya Joule etkisi ile ısınma adı da verilmektedir. Joule kanununa göre oluşan enerji, uygulanan akım, direnç ve zamanla doğru orantılıdır.

Daha önceki bölümlerde camın malzeme özellikleri arasında elektriksel olarak iyi bir yalıtkan olduğundan bahsedilmişti. Katı haldeki camın çok iyi bir yalıtkan olduğu kadar eriyik ve yüksek sıcaklıktaki camın da bir o kadar iyi bir iletken olduğunu söylemek mümkündür. Camdaki elektrik iletimi iyonik olup, Joule etkisi ile ergitilmesi veya ısıtılması mümkündür. Eriyik cam içindeki güç Joule kanuna göre yayılır. ($P = I^2R$). Camın iletkenliği bileşimindeki alkali iyonunun bir fonksiyonudur. Alkali olmayan durumlarda iletkenlik Ca^{2+} ve Mg^{2+} gibi iyonlar tarafından sağlanır.

Bileşimindeki sodyum-oksit (Na_2O) oranı %10-%20 arasındaki camlar için; sodyum-oksit içeriği %m olan bir soda-kireç-silika camının direnci ρ_m , alkali içeriği %n, direnci ρ_n bilinen bir cam yardımı ile;

$$\rho_m = \rho_n \left(\frac{n}{m} \right) \quad (2.2)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir. Eğer bileşimde Na_2O yanında K_2O da varsa, camın alkali eşleniği (A), K^+ iyonunun çapı Na^+ iyonunun yaklaşık iki katı olduğu için,

$$A = \%Na_2O + \left(\frac{K_2O}{2} \right) \quad (2.3)$$

olarak kabul edilir [19]

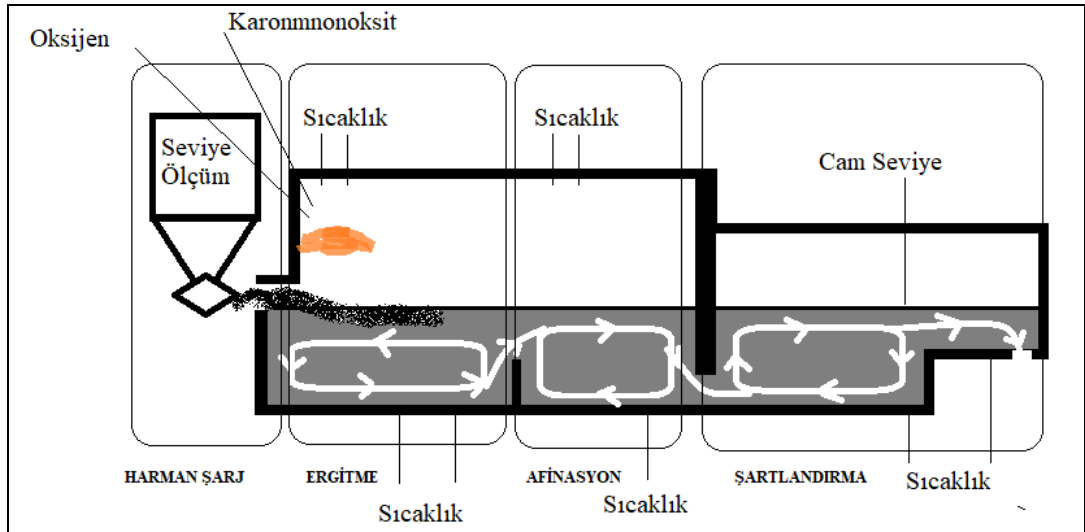
Cam sıcak ve eriyik durumda iyi bir iletken olsa da direnci bileşimine ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Cam üretiminde kullanılacak elektrik sisteminin tasarımı ve işletilmesi için camın direnç-sıcaklık eğrisinin bilinmesi önemlidir. Cama bir gerilim uygulandığında geçen akım, sıcaklığı arttıkça direncin azalmasına bağlı olarak artar. Akımın artması sıcaklığın artmasına neden olur. Ancak bu döngü camın kontrolünün kaybedilmesine neden olacaktır. Tersisi durumda ise, camdan geçen akımın yetersizliği halinde, cam soğuyacağı için direnci artacak ve geçen akım daha fazla azalacaktır. Bu durumlar camda elektrik kullanımında istenmemektedir [22].

Bazı fırın ve cam tiplerinde doğalgaza takviye olarak elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Elektrik enerjisi cama batık elektrotlar üzerinden doğrudan cama aktarıldığından enerjinin %90'dan fazlası cama verilmektedir. Elektrik kullanımı özellikle renkli camlarda hızlı tepki almak ve enerjinin cama verimli olarak aktarılması için kullanılmaktadır. Böylece, fırın işletmesi enerji kullanımında esneklik, verimlilik ve cam üretiminde homojenlik elde edebilmektedir.

2.3.4. Cam Fırınlarında Kontrol

Cam ergitme fırınında satılabilir kalitede ürün üretmek, enerji tüketimini optimize etmek, çevre etkisini en aza indirmek için kontrol edilmesi gereken parametreler söz konusudur:

- Sıcaklık dağılımının kontrolü,
- Fırın içindeki basıncın kontrolü,
- Atık gazların içerdiği oksijen miktarı,
- Camın derinliği



Şekil 2.4: Cam fırınında ölçüm enstrümanları,

2.3.4.1. Sıcaklık Dağılımı Kontrol

Endüstride kontrol alanında ölçülen en önemli fiziksel büyüklüklerden biri sıcaklıktır. Termodinamiğin ikinci kanununa göre ısı, sıcaklık ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla ısı kontrolü için sıcaklık ölçümü önemli bir veridir. Malzemelerin hacim, basınç, elektrik iletkenliği, genleşme katsayıları sıcaklıkla ilişkilidir. Fırındaki yanma atmosferinin sıcaklığı, refrakter sıcaklığı, cam sıcaklığı ölçülen önemli sıcaklıklardır. Sıcaklık, süreci ya doğrudan ya da dolaylı olarak etkilemektedir. Çalışmamızda kullanılan veri setinde birçok sıcaklık verisi bulunmaktadır.

Cam ergitme fırınlarında sıcaklık, farklı enstrümanlarla ölçülebilmektedir ancak genellikle termokupl tercih edilmektedir. Kelime karşılığı “ısı çifti” olsa da Türkçe dilinde yaygın olarak termokupl olarak kullanılmaktadır. Yapısında iki ayrı alaşıma sahip metal bulunduran termokupllar -200°C ile $+2300^{\circ}\text{C}$ arasında geniş bir ölçüm aralığında kullanılabilir. Yapısındaki metallerin uçları bir tarafta kaynatılır ve diğer ucunda açık bir elektrik devresi oluşturulur. Kaynatılmış olan uçtaki sıcaklık değişiminden dolayı açık uçlarda bir gerilim oluşur. Termokupllarda kullanılan metal çiftlerin alaşımı termokupl tipini belirlemektedir. Termokupl tipine göre sıcaklık ölçüm aralığı da değişmektedir [27]. Termokupl maliyetleri düşük olabilmekle beraber içeriğinde platin ve rodyum gibi değerli metal olanların maliyetleri yükselebilmektedir. Cam ergitme fırınlarında yaygın olarak kullanılan termokupl tipleri, K, B, R veya S tipleridir. Tablo 2.4’te IEC 60584’e göre termokupl özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.4: IEC 60584 Termokupl özellikleri.

Tip	Termal çift	Malzeme (% ağırlık, çoğunluk malzeme italik harfli)		Sıcaklık aralığı $^{\circ}\text{C}$
		Artı Kutup	Eksi Kutup	
B	Pt%30Rh	Platin	Platin	0
	Pt%6Rh	%30 Rodyum	%6 rodyum	1820
E	Cr	Nikel	Nikel	-270
	Const	%10 krom (Kromel)	%45Bakır	1000
K	Cr	Nikel	Nikel	-270
	Al	%10 krom (Kromel)	%5 alüminyum	1372

Tablo 2.4: Devam.

Tip	Termal çift	Malzeme (% ağırlık, çoğunluk malzeme italik harfli)	Sıcaklık aralığı °C	Tip
N	Nikrosil Nisil	Nikel %14 Krom %1,5 silikon	Nikel %4,5 silikon %0,1 magnezyum	-270 1300
R	Pt %13RhPt	Platin %13 rodyum	Platin	-50 1768
S	Pt %10RhPt	Platin %10 rodyum	Platin	-50 1768
T	Cu Const	Bakır	Nikel %45 bakır	-270 400

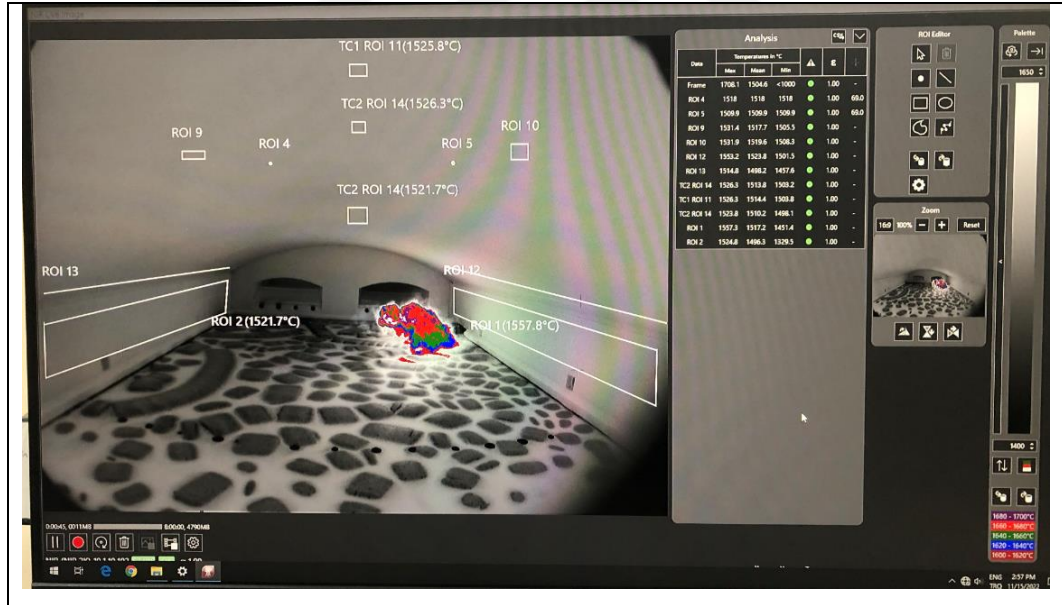
K tipi termokupllar oksidan ve asal ortamlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Cam fırınlarında 1200°C sıcaklığa kadar kullanım alanı bulmaktadır. B, R veya S tipi termokupllar cam fırınlarında yine aynı ortamlarda kullanılmaktadırlar. Fırın kemeri, fırın tabanı, fırındaki cam sıcaklığının ölçümünde bu tip termokupllar kullanılabilir.

Cam fırınlarında sıcaklık ölçümü için kullanılan bir diğer enstrüman ise pirometredir. Pirometreler sıcaklığı temassız olarak ölçmektedir. Pirometre ile sıcaklık ölçümü, cisimlerin yaydığı ısı ışınımından faydalanılarak gerçekleştirir. Mutlak sıfır sıcaklığının üstünde cisimler ışıyım yayar ve pirometreler bu ışıyım enerjisini alırlar. Sıcaklıktan kaynaklı olarak cisimlerden yayılan elektromanyetik dalga bu ışıyımdır. Pirometre ile sıcaklık ölçümünü malzemenin yayma kuvveti (emisivitesi) ve malzemeye olan uzaklık etkilemektedir. Dolayısıyla cisme yaklaşmak ölçüm doğruluğunu arttırmaktadır. Doğru cisim için doğru pirometre seçimi de önemli bir husustur [32].

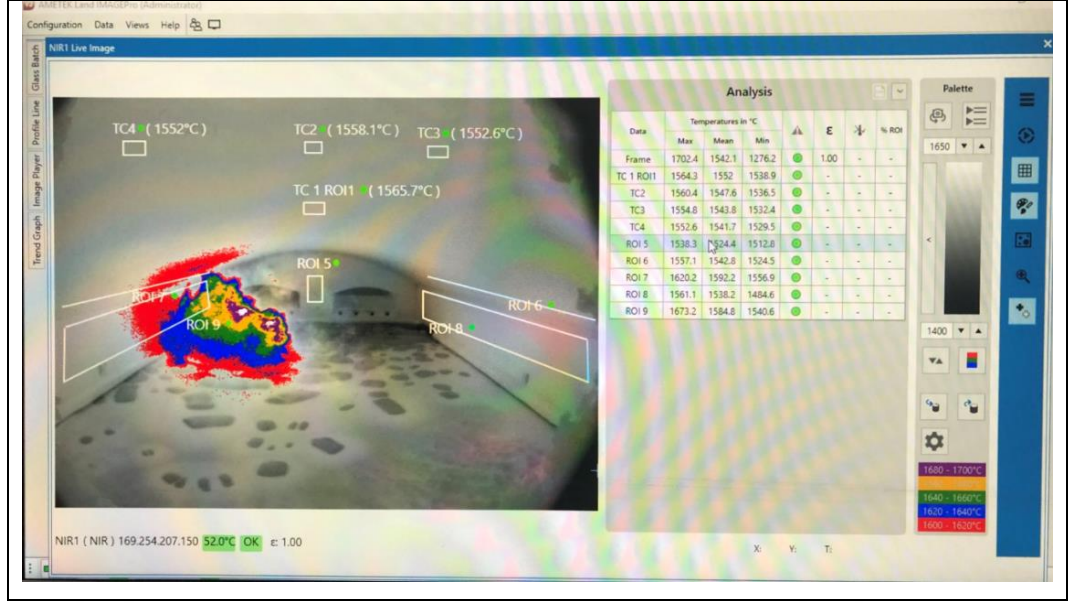
2.3.4.2. Fırın İçi Görüntüleme

Fırın içindeki durumun gözlemlenmesi fırın işletmesi için önemli bir parametredir. Bu işlem gözetleme deliklerinden gözle veya sabit kameralarla

gerçekleştirilebilmektedir. Yakın zamana kadar geleneksel görüntüye sahip kameralar fırınlarda yaygın olarak kullanılmaktaydı. Ancak kızıl ötesine yakın dalga boylarını ölçen termal kameraların fırın kamerası olarak kullanılmasıyla birlikte standart kameraların yerini termal kameralar almaya başlamıştır. Termal kameralar sadece görüntü vermekle kalmayıp, pirometrelerle aynı yöntemi kullanarak sıcaklık bilgisi de vermektedir. Sıcaklık ölçümü yapılmak istenen noktalar veya alanlar belirlenerek ölçüm gerçekleştirilmektedir. Bu özelliği sayesinde sıcaklık profili oluşturulabilmekte ve fırın kontrol sistemine veriler aktarılabilir. Pirometrelerde olduğu gibi, termal kameralarda da ölçülecek malzemenin emisivite değeri etkili olmaktadır. Cam fırınlarında ölçülen kameraların dalga boyu aralığı 700nm ile 1100nm arasındadır. Kameranın yapmış olduğu termal ölçümlerin verisi çeşitli haberleşme protokolleriyle fırın kontrol sistemine aktarılabilir. Bu sayede gerek fırın işletme gerekse veri analizi için değerli bir veri elde edilebilmektedir.



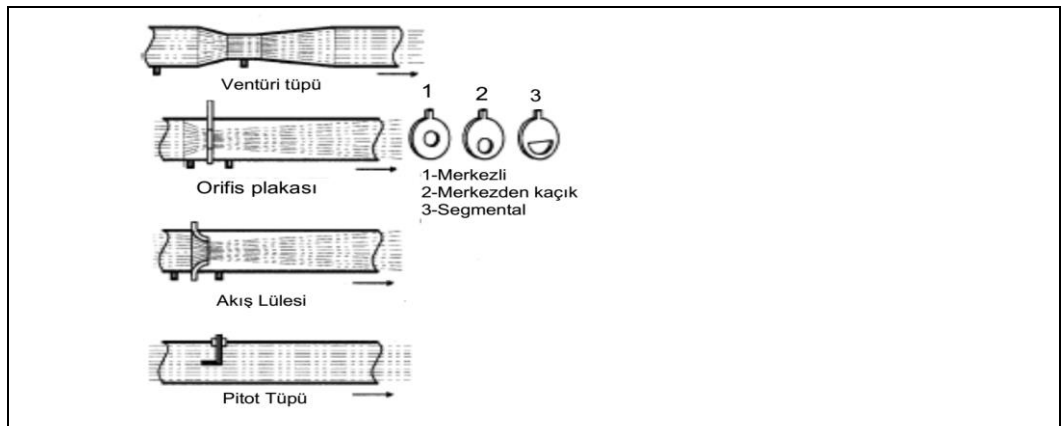
Şekil 2.5: Fırın termal kamera görüntüsü-1.



Şekil 2.6: Fırın termal kamera görüntüsü-2.

2.3.4.3. Debi Ölçümü

Fırında tüketilen enerjinin ölçülmesi için yakıt ve hava miktarının doğru şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Bu ölçümler sürekli ölçüm yapan enstrümanlarla gerçekleştirilmektedir. Akış, kütle veya hacimle hesaplanmaktadır. Doğalgaz veya hava hatlarındaki akışın ölçülmesinde kullanılan en yaygın teknik, fark basıncını kullanarak gerçekleştirilen tekniktir. Bu yapıda basınç farkı oluşturacak eleman ve bu farkı ölçecek enstrüman mevcuttur. Fark basıncını oluşturmak için kullanılabilecek elemanlar arasında, orifis plakası, ventüri tüpü, rotametre mevcuttur.



Şekil 2.7: Fark basınç ölçüm elemanları.

2.3.4.4. Fırın İç Basınç

Fırında yanma işleminin gerçekleştiği ortamın basıncı atmosfer basıncına çok yakın olmalıdır. Özellikle fırın çevresindeki kaçakların önlenmesi iç basınç kontrolünün sağlanması açısından önemlidir. Fırın iç basıncının atmosfer basıncından düşük olması durumunda yanma ortamına ön ısıtılmalı hava yerine soğuk hava karışacaktır. Bu da NO_x salımını arttıracaktır. Ters durumdaysa fırın içindeki ısı kaybı yaşanacaktır. Bu ısı enerji kaybına neden olabileceği gibi fırın üst yapısına da zarar verecektir.

Fırın iç basıncının ölçüm yöntemlerinden biri fırın yan duvarından sokulan prop (sonda) vasıtasıyla referans ortamı arasındaki basıncın farkının ölçülmesidir. Basınç ölçüm sensörü cam seviyesinin 1-2 m yukarısında konumlandırılır. Fırın içindeki hızlı hava akışları sebebiyle, ortamdaki basınç her yerde sabit ve aynı değildir. Dolayısıyla salınımlar söz konusu olmaktadır.

2.3.4.5. Yanan Gazdaki Oksijen Miktarı

Yanma işleminin iyi bir şekilde gerçekleşmesi için yakıtla birlikte ortama hava da üflenmektedir. Hava, bek (yakıcı) adı verilen ekipmanlardan yakıt ile birlikte verilmektedir. Yanan gazdaki oksijen miktarının %4 - %12 olması amaçlanmaktadır. Yanan gazdaki oksijen miktarı, yanma beklerinin bulunduğu portlardan veya rejeneratörden ölçülebilmektedir. Rejeneratör kemerinden ölçüm yapan sensörler ZnO_2 (çinko oksit) proplarla daldırılmaktadır. Bir diğer ölçüm yöntemi ise portlardan gönderilen lazerle yapılan temassız ölçüm yöntemidir. TDLAS prensibiyle ölçüm yapan bu yöntemde oksijenle birlikte H_2 ve CO_2 de ölçülebilmektedir [17].

2.3.4.6. Cam Seviyesi Ölçüm

Fırındaki cam seviyesi iki farklı yöntemle ölçülebilmektedir. Bu yöntemler temel olarak, cama temas eden veya etmeyenler olarak iki çeşittir. Cam seviyesindeki değişimi algılayarak analog sinyal oluşturan seviye sensörü, fırın kontrol

sistemindeki algoritmaya uygun olarak harman vericiyi kontrol eder. Böylece, cam seviyesi kararlı bir şekilde sabit tutulur.

2.3.4.7. Model Tabanlı Kestirimci Kontrol

Model tabanlı kestirimci kontrol (MPC), cam üretiminde uygulanan çok değişkenli bir ileri kontrol sistemidir. Matematiksel modele dayalı bu kontrol sistemi, akan camın ısı transferine dayalı olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) modelini kullanır. Model eriyik cam üretiminde kullanılan sıcaklıkları mevcut proses kontrol modeliyle birlikte tahmin edebilmektedir. Geleneksel PID kontrol döngülerine göre daha hızlı tepki vermesi sayesinde daha az yakıt tüketilerek hedef sıcaklığa ulaşılmasını sağlayabilmektedir. Bu sayede, enerji verimliliğinde artış elde edilebilmektedir.

2.4. Cam Üretiminde Enerji Verimliliği

Tüm cam üretim süreçleri fosil yakıt ve/veya elektrik enerjisi tüketen ergitme fırınlarına sahiptir. Her ne kadar tüm süreçler enerji tüketse de cam ergitme süreci en yüksek enerji tüketimine sahip kısımdır. Cam üretiminde ergitme süreci, 3.5 - 6 GJ/ton arasında enerji tüketmektedir. Yani 1000 kg eriyik cam için 3.5 - 10 GJ arasında enerji ihtiyacı fosil yakıt ve/veya elektrik enerjisinden karşılanmaktadır [16]. Tablo 2.3'te cam ergitme fırınlarının enerji tüketimleri de belirtilmiştir [20].

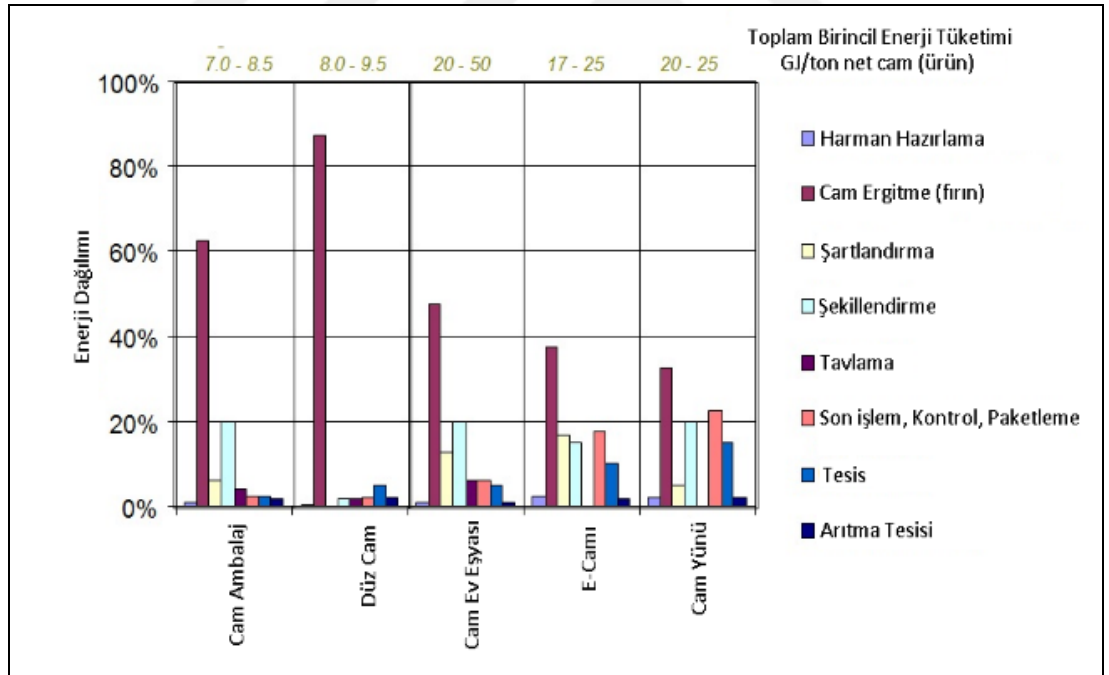
Soda kireç camlarını, camın hammaddelerinden ergitmek ve 1300 °C sıcaklığa çıkartmak için gerekli ısı ihtiyacı 2,15 GJ/ton: (Camın aldığı ısı: 600kWh/Ton ~ 2,15 GJ/Ton) civarındadır [16]. Cam üretiminde en fazla enerji tüketilen proses aşaması ergitme prosesi olup endüstri ortalamasına göre toplam enerji tüketiminin %65-%70'ini teşkil etmektedir. Birincil (primer) enerji tüketimi tüketilen enerjinin doğal halinde çevrime uğramamış karşılığıdır. Örneğin, elektrik enerjisi genellikle fosil yakıtlardan yaklaşık %35-%40 verimlilikle elde edilmektedir. Dolayısı ile 1 kWh elektrik enerjisi 9 MJ birincil enerji olarak hesaplanır. Bu verimlilik rakamı her ülke için enerji üretim karışımına göre değişiklik gösterir [21].

Cam üretiminde enerjinin büyük bölümü camı ergitmek ve afinyasyon için tüketilmektedir. Şekil 2.4 farklı cam türlerinde enerjinin tüketildiği kısımlara göre

dağılımını veren grafik mevcuttur. Cam ergitme fırınlarındaki girdi ve çıktılar Tablo 2.5'te verilmiştir [20], [22].

Tablo 2.5: Cam ergitme fırınları girdi ve çıktılar.

Girdiler	Birim/Ton.Ergiyen Cam	Aralık (Ortalama Değer)
Cam Kırığı	GJ	4 – 14 (6.5)
Enerji, Yakıt/Gaz	GJ	0.6 – 1,5 (0.8)
Çıktılar		
Satılabilir Ürün	Ton	0.75 – 0.97 (0.91)
CO ₂	kg	300 – 1000 (430)
NO _x	kg	0.2 – 4.4 (2.0)
SO _x	kg	0.2 – 4.1 (1.3)



Şekil 2.8: Üretilen cam için enerji tüketen süreçlerin dağılımı.

3. VERİ BİLİMİ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ

3.1. Veri Bilimi

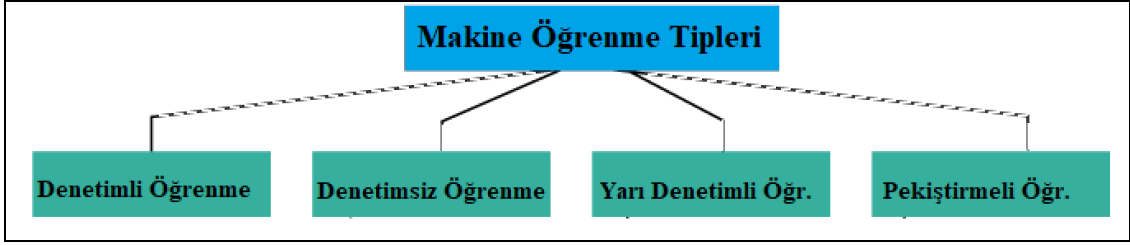
Verilerin toplanması ve saklanması alanındaki teknolojik gelişmeler bu verilerin üstel şekilde artmasına neden olmuştur. Bu gelişmeyle birlikte, dijital hayatın hızlanıyor olması, internetin yaygınlaşması, bulut teknolojisinin kolay erişilebilir hale gelmesi veri havuzlarının boyutlarını büyötmüştür.

Veri bilimi, yapılandırma işlemi uygulanmış veya uygulanmamış eldeki verilerden yola çıkarak bilimsel yöntemlerin, algoritmaların ve sistemlerin kullanılmasıyla bilgi ve tahmin elde eden farklı disiplinlerden meydana gelmiş bir alandır. Yaşanan gerçek olayları verilerle anlamak ve yorumlayabilmek için istatistikleri, veri analizini, makine öğrenimini ve ilgili yöntemlerini birleştiren bir kavramdır. Matematik, istatistik, bilgisayar gibi çeşitli disiplinlerden birçok teknik ve teori veri biliminde kullanılmaktadır. Eldeki ham verilerden anlam çıkarmak için alan bilgisini kullanma işlemine Özellik Mühendisliği (Feature Engineering) adı verilmektedir. Elde edilen özellikler, tahmine dayalı modeller tarafından kullanılır ve sonuçları etkiler [23].

3.2. Makine Öğrenmesi

Üretilen ilk bilgisayardan itibaren, insanlar kadar hızlı ve etkin öğrenebilen bilgisayarların geliştirilmesi sürekli tartışılan bir konu olmuştur. Makine öğrenmesi, bilgisayarların onlara sağlamış olduğumuz verilerden öğrenebilmeleri için programlandığı bilim dalıdır. Makineler öğrenirken, insanların öğrenme şeklini taklit edebilmesi için veri ve algoritmaları kullanırlar. Makineler, öğrendiklerinin doğruluğunu arttırarak öğreniyorsa buna da Yapay Zeka Bilim Dalı denmektedir [24].

3.2.1. Makine Öğrenmesi Çeşitleri



Şekil 3.1: Makine öğrenmesi çeşitleri.

3.2.1.1. Denetimli Öğrenme

Etiketlenmiş veri kümelerini bağımlı ve bağımsız değişkenleri kullanarak işleme alan makine öğrenmesi algoritmalarını içeren öğrenme şeklidir. Denetimli öğrenme modeli, sınıflarıyla birlikte birçok örnek veri ile eğitilir ve okunan verilerin nasıl sınıflandırılacağına karar vermek için öğrenmektedir [25].

Denetimli öğrenme algoritmaları;

- K-En Yakın Komşu
- Doğrusal Regresyon
- Lojistik Regresyon
- Destek Vektör Makineleri
- Karar Ağaçları ve Rastgele Orman
- Sinir Ağları

3.2.1.2. Denetimsiz Öğrenme

Bu öğrenme şeklinde makineye öğrenmesini sağlayan algoritmalar kullanılarak etiketlenmiş veya etiketlenmemiş veriler kümelenir ve analiz edilebilmektedir. Kullanılan algoritmalar, dışarıdan insan müdahalesine ihtiyaç duymaksızın içerikteki gizli kalıpları veya seri gruplamaları seçebilmektedir [24].

Denetimsiz öğrenmeyi, kümeleme, yoğunluk tahmini ve temsili öğrenme görevlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Küme sayısının bilinmediği ve etiketli eğitim verisinin bulunmadığı durumlarda kullanılabilir [25].

3.2.1.3. Pekiştirmeli Öğrenme

Pekiştirmeli öğrenmede amaca yönelik ajanların açık hedefler belirleyerek öğrenme işlemini gerçekleştirdiği öğrenme çeşididir. Ajan, verilen modelin çevresiyle etkileşiminden geri dönen bildirimleri kullanarak deneme-yanılma yöntemiyle etkileşimli bir ortamda öğrenir. Pekiştirmeli öğrenme, çevreyi gözlemleyebilir, eylemleri seçip gerçekleştirebilir ve karşılığında ödül veya ceza uygulayabilir [23].

4. MODELLEME VE REGRESYON

Makine öğrenmesinde modeller veriye oturtulup kayıp fonksiyonu minimize edilmeye çalışılır. Eğer kayıp fonksiyonu sıfıra çok yakınsa modelin aşırı öğrenme durumu, sıfıra çok uzaksa eksik öğrenme durumu oluşabilmektedir. Yani, modeldeki örüntüyü tespit etmek yerine ezberlemeye çalıştığı için tahmin değerleri gerçek değere çok yakın çıkacaktır. Dolayısıyla kayıp fonksiyonunun aşırı küçük gelmesi muhtemel olacaktır [26].

Uygulamalı bilim dallarında yapılan bir çalışmadaki problemi etkileyen birden çok sayıda değişken olabilmektedir. Bu değişkenlerin bir veya birden fazlasının başka bir veya daha fazla değişkeni ne kadar etkilediğini analiz etmek için çeşitli istatistiksel modeller kullanılmaktadır [27]. Tüm değişkenlerin araştırmaya dahil edilmesi daha güvenilir ve tutarlı sonuçlar elde edilmesi için faydalı olabilmektedir. Yapılan analizde değişkenlerin birbiri arasındaki işlevsel ilişkiyi anlamak için başvurulmuş matematiksel modele regresyon modeli denmektedir [28], [29].

Bu çalışmada faydalanan yöntemler çoklu doğrusal bağlantı regresyon yöntemleridir. Bu yöntemlerden Lasso, etkisi az olan değişkenlerin katsayısını sıfır yaparak değişkeni ortadan kaldırır, diğer yöntem olan Ridge ise etkisi az olan değişkenleri korur ancak yine de katsayılarını sıfıra yaklaştırmaktadır. Ayrıca, Elastic Net yöntemi iki regresyonun kombinasyonu olarak değerlendirilebilmektedir. Yani Lasso gibi otomatik veri seçimi yapar, Ridge gibi etkisi düşük parametrelerin katsayılarını korur.

4.1. Regresyon

Regresyon, yaygın olarak kullanılan bir modelleme tekniğidir. Bağımsız değişkenin rastgele değişkenleri temsil ettiği ve belli sayıdaki değişkenlerin doğrusal olan kombinasyonunu belli bir düzen olmaksızın gözlemleyen hatayı bulma yöntemidir. Ortalaması sıfır olan, varyansı σ^2 olan normal dağılımdan gelmektedir. Buradaki amaç, bilinmeyen parametreleri tahmin etmektir.

Regresyonla ilgili temel bazı ifadeler aşağıda verilmektedir;

- Yanlılık (bias), oluşturulan modelin ortalama tahmin ile gerçek değer arasında oluşan farka verilen isimdir. Modelin yüksek yanlılığa sahip olması durumunda eğitim verisi fazla basitleştirilmiş diyebiliriz. Yani eğitim ve test verisinde elde edilen hata yüksek olacaktır [33].
- Varyans (variance), model tahmini değişkenliğini veya verilerin yayılmasını belirli bir veri noktası için ifade eden değerdir. Modelin yüksek varyansa sahip olması öğrenme setinde genelleme yapabileceği bir örüntüyü bulmak yerine ezberlemeye çalışmasını sağlayacaktır. Dolayısıyla aşırı öğrenme gerçekleşeceğinden eğitim verisi düşük hatalı olmasına rağmen test verisinde hata oluşacaktır [33].
- Doğrusallık (Linearity), Elimizdeki modelin bağımlı değişkeninin rassal bir değişkenin doğrusal fonksiyonu olduğunu ifade etmektedir.
- Sapmasızlık, ortalamanın verideki gerçek değerine eşit olmasını ifade eder [33].
- En iyilik, en düşük varyansa sahip olan doğrusal sapmasız tahmin edicidir [33].

4.2. Çoklu Doğrusal Regresyon

Regresyon modeliyle, birbirleri arasında etkileşim olan bağımsız bir değişkenin başka bir bağımsız değişken üzerinden tahmin edilebilmesi amaçlanmaktadır. Örnek verecek olursak, bir cam fırınında sıcaklık, cam kırığı oranı, kompozisyon bilgisinden özgül enerji tüketiminin tahmin edilmesi buna örnek olarak verilebilir. Gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmada bu işlem ele alınmış, değeri bilinen bir çok veriyle bilinmeyen bir verinin değeri tahmin edilmiştir. Bilinmeyen veriye en çok etkisi olan değişkenler belirlenmiştir.

Ancak regresyon modelleri belli varsayımlara dayanır. Bu nedenle çoklu doğrusal bağlantı (multicollinearity) problemleri ile karşılaşmaktadır [30]. Çoklu doğrusal bağlantı problemi, regresyon modelinde bağımsız değişkenlerin ikiden fazlasının doğrusal veya doğrusala yakın ilişki göstermesi durumunda ortaya

çıkılmaktadır. Bu problem nedeniyle, parametreler gerçekten uzak, aşırı büyük veya aşırı küçük zıt değerler alması, belirlilik katsayısı değerinin olması gerekenden yüksek çıkması, parametrelerin varyanslarının ciddi anlamda artması, bunun sonucunda parametrelerin önemsiz çıkması şeklinde sorunlar ortaya çıkarabilmektedir [30].

Ne kadar fazla parametre varsa modelin karmaşıklığı o kadar artmaktadır. Modelin karmaşılaşması yüksek varyans düşük yanlılığa sahip olur. Tersi durumdaysa yüksek yanlılık düşük varyans olmaktadır. Burada kritik olan nokta, modelin aynı anda hem çok fazla karmaşık hem çok az karmaşık olamayacağıdır. Modele yeni değişkenler eklendikçe daha karmaşık bir hal almaktadır. Bu şekilde, yani beklenen varsayımların gerçekleştirilemediği durumlarda farklı yöntemler ele alınmaktadır. Çoklu doğrusal bağlantı problemiyle karşılaşılan durumlarda kullanılabilecek yöntemler Lasso, Ridge veya ikisinin kombinasyonu olarak nitelendirilebilecek Elastic Net yöntemidir [23].

4.3. Ridge Regresyon

Ridge regresyon, çoklu doğrusal regresyondan elde edilen verileri analiz etmek için kullanılmaktadır. Buradaki amaç, hata kareler toplamını en aza indiren katsayıları bu katsayıları ceza uygulayarak bulmaktır. Dolayısıyla Ridge Regresyon, aşırı öğrenmeye karşı direnç göstermektedir. Tüm değişkenler ile model kurar, etkisi olmayan değişkenlerin katsayılarını sıfıra yaklaştırır ancak ortadan kaldırmaz. Yani sonuca etki etmeyen verileri tespit etmekte ancak ortadan kaldırmadan katsayısını minimize etmektedir. Ridge regresyon modelinde ceza değerinin iyi belirlenmesi kritiktir.

Model çalıştırıldığında (β_0, β_1) parametreleri elde ediliyor olsun. Modeldeki örnek sayısı arttıkça ve model tekrar çalıştırılırsa çeşitli (β_0, β_1) parametreleri elde edilecektir. Yüksek varyans durumuyla karşı karşıya kalınırsa bulunan (β_0, β_1) eşleri birbirinden çok uzak olur. Bu uzaklık ortaya çıktığında hangisinin gerçek değere daha yakın olduğu tahmin edilemez. Ridge regresyon tam olarak burada devreye girer ve sapmasızlık (unbiased) kavramından ödün vererek en küçük varyanslı (β_0, β_1) parametre çiftini bulmaya çalışır. Burada, ikiden fazla değişkenimiz olsun. Değişken

sayısı kadar da β parametresi olacaktır. Bu parametreler bulunurken bu parametrelerin sınırsız büyümesi istenmez.

4.4. Lasso Regresyon

Lasso Regresyon, Ridge Regresyona benzetilmektedir. Aralarındaki en önemli fark, Ridge regresyon etkisi az olan değişkenlerin katsayısını sıfıra çok yaklaştırıp ortadan kaldırmazken, Lasso önemsiz gördüğü değişkenlerin katsayılarını sıfır yaparak ortadan kaldırmaktadır.

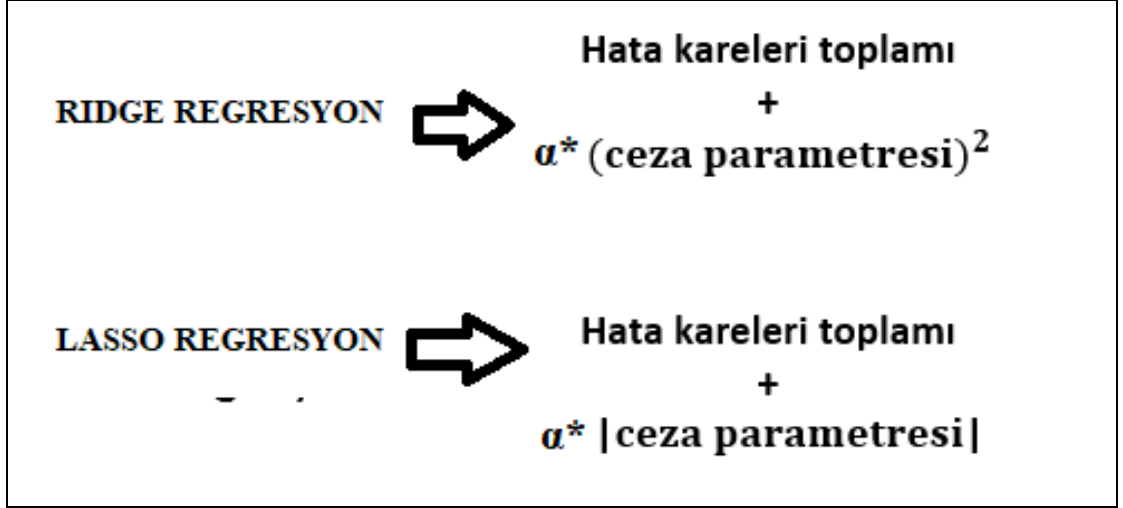
Lasso sayesinde eş zamanlı tahminler yürütülebilmektedir. İstatistiksel modelleme yöntemlerindeki hedeflerinden biri yüksek doğrulukta tahmin diğeri bağımlı tahmin değişkenlerinin tespit edilmesidir [34].

Lasso regresyon, çoklu doğrusal bağlantı olan ve aşırı öğrenme sorunlarına karşı tercih edilmektedir. Bu regresyonla değişkenin seçimi ve düzenlenmesi aynı anda gerçekleştirilebilmektedir. Büyük veri setlerinde tercih edilmesinin en büyük sebebi etkili ve hızlı sonuçlar verebilmesidir. Lasso Regresyon'da da Ridge Regresyon'da olduğu gibi bir ceza terimi kullanılır ve değişkenlerin katsayıları sıfır yapılmaya doğru yönlendirilir. Ceza teriminin sahip olduğu değer, regresyon katsayılarına uygulanacak miktarı belirler. En Küçük Kareler yöntemini minimize edecek katsayıları bulmaya çalışır. Yine aynı amaca uygun şekilde formüle ceza parametresi ekler.

En Küçük Kareler ile aynı sonucun elde edileceği durum regresyondaki α değerinin sıfıra eşit olması durumudur. α yeterince büyük olduğu zaman bazı katsayılar tam olarak sıfıra eşit olmaya yönlendirilir. Bu sayede değişken seçimi Lasso aracılığıyla gerçekleştirilmiş olur.

4.5. Lasso ve Ridge Karşılaştırma

Lasso Regresyon ve Ridge Regresyon uygulamamızda karşılaştırılmıştır. Çalışma yöntemleri birbirine çok yakındır. İki regresyon da ceza parametresi ile yanlı ancak düşük varyanslı modeller kurmaktadır. Ridge Regresyon ceza parametresi α^* katsayısının karesini kullanır. Lasso Regresyon ise α^* katsayısının mutlak değerini kullanır.



Şekil 3.2: Lasso ve Ridge karşılaştırması.

Ridge Regresyon’da değişken seçimi yapılmaz yani herhangi bir parametre sıfıra eşitlenmez. Buna karşılık, Lasso Regresyon değişken seçimi yapma özelliği sayesinde sade modeller sunabildiği için yorumlanması daha basittir. Verideki bütün değişkenlerin mutlaka kullanılması gerekmesi durumunda ise Ridge Regresyon daha iyi bir tercih olacaktır. Lasso Regresyon ve Ridge Regresyon birbiriyle özellik olarak benzer davranışlar sergilemektedir. Bunun nedeni α değeri arttıkça varyansın azalması ve yanlılığın artmasıdır. Lasso Regresyon, bir tahmin alt kümesini içeren daha basit ve yorumlanabilir modeller sunması açısından Ridge Regresyon’a göre bu tarz durumlarda daha iyi konumdadır.

4.6. Elastik Net Düzenleme

Daha güncel bir düzenleme yöntemi olan Elastik Net Düzenleme, tıpkı Lasso gibi eş zamanlı olarak otomatik veri seçimini gerçekleştirmektedir, yani sürekli olarak katsayı düşürme yapıp birbiriyle ilişkili değişkenleri gruplandırmaktadır. Yapılmış olan modelleme çalışmaları ve gerçek örnekler Elastik Net’in Ridge ve Lasso’ya nispeten daha doğru tahmin yürüttüğü görülmüştür [21].

Elastik Net için, Lasso ve Ridge kombinasyonu diyebiliriz. Özellikle çok fazla seviyede birbiriyle ilişkili bağımsız değişken olması durumunda Ridge ve Lasso’ya Elastik Net tercih edilebilecek bir araçtır.

5. KULLANILAN ARAÇLAR

5.1. Teknik Çalışma Ortamı

Google Collaboratory platformuna kodlar Python dilinde yüklenerek modeller çalıştırılmıştır. Açık kodları mevcut olan çalışmanın kodları ve çıktıları çalışmaya ek olarak eklenmiştir.

5.2. Python Programlama Dili

Python, genel amaçlı bir programlama dilidir. Dinamik bir dil olan Python, daha çok nesne tabanlı programlama yaklaşımlarını ve fonksiyonel programlarını desteklemektedir. Python dilinin çalışmada seçilmiş olmasındaki etkenler, yaygın olarak kullanılması, yazım dilinin basit olması, kullanıcı dostu olması, geniş bilgi kaynağı olması olmuştur.

Python’da kullanılan paketler;

- NumPy

Bu kütüphane dizi oluşturma, vektörleştirme, dilimleme, matrisler ve lineer cebir işlemleri için yüklenmiştir.

- Pandas

Yapılacak veri ön işleme için kullanışlı olan Pandas kodları kullanılmıştır. Veri analizi ve veri ön işlemeyi kolaylaştıran açık kaynak kodlu bir Python kütüphanesidir. Veri manipülasyonunda kullanılan etkin işlemler içermektedir. CSV, metin dosyaları, Excel, SQL veri tabanlarından veri okuma özellikleri vardır. Çalışmada veriler Excel dosyasından okunmuştur.

- Matplotlib

Veri görselleştirme ve çizim amaçlı kullanılan kütüphanedir.

- Scikit-learn

Python için ücretsiz bir yazılım makinesi kütüphanesidir.

- GridSearch CV

Karar ağaçları, rastgele orman gibi temel yöntemleri içerir. Bu kitaplıktaki; linear_model, LinearRegression, Ridge, Lasso, GridSearch CV kullanılmıştır.

5.3. Veri Seti

Çalışmada, arkadan ateşlemeli, rejeneratif tipte, doğalgaz ve elektrik enerjisi tüketen bir ergitme fırınına ait 1 senelik veri kullanılmıştır. Bu 1 senelik süre içerisinde cam fırını hem yeşil hem bal renk cam harmanı ergitmiştir. Bu sayede renk bazında da çalışma yapma imkanı sağlanmıştır. 38 adet değişkenin 1 senelik verisinden toplam 13908 veri elde edilmiştir. Veri setindeki değişkenler Tablo 5.1’de açıklanmıştır.

Tabloda 0 ile 39 arasında toplam 40 adet değişken verilmiştir. Bu değişkenlerin her biri tabloda bir sütunda temsil edilmektedir. Bu sütunlardan 0 ve 1 tarih ve cam rengini temsil ettiğinden regresyon çalışmasına dahil edilmemiştir. Son sütundaki “SPEC” ise özgül enerji tüketimini vermekte olup diğer değişkenlerin bu değişkene etkisi araştırılmıştır. Satırlar ise her gün kaydedilen ilgili değişkene ilişkin değeri vermektedir. Bu şekilde 40 sütun, 367 satırdan oluşan bir tablo veri seti olarak kullanılmıştır.

Tablo 5.1: Veri setindeki değişkenler.

Veri No	Veri Setindeki Tanımı	Birim	Açıklama
0	Date		Tarih
1	Color		Ergitilen cam rengi bilgisi
2	Pull	Ton/Gün	Fırının 1 günde ergittiği harman miktarı
3	Cullet	%	Cam harmanındaki cam kırığı oranı
4	Batch_Humid	%	Cam harmanı nem oranı
5	Batch_Temp	°C	Cam harmanı sıcaklığı

Tablo 5.1: Devam.

Veri No	Veri Setindeki Tanımı	Birim	Açıklama
6	Furnace_Inlet_Press	mmH ₂ O	Fırın iç basıncı
7	O ₂ _Left	%	Sol taraf oksijen oranı
8	O ₂ _Right	%	Sağ taraf oksijen miktarı
9	Nat_Gas_Cons	kcal/kg	Doğalgaz tüketim miktarı
10	AF_Ratio		Hava / Yakıt oranı
11	Boost_Ratio	%	Elektrik kullanım yüzdesi
12	Reg_Tem_Left	°C	Sol rejeneratör sıcaklığı
13	Reg_Tem_Right	°C	Sağ rejeneratör sıcaklığı
14	TC_801	°C	Kemer termokupl sıcaklığı
15	TC_803	°C	Kemer termokupl sıcaklığı
16	TC_804	°C	Kemer termokupl sıcaklığı
17	TC_811	°C	Taban termokupl sıcaklığı
18	TC_812	°C	Taban termokupl sıcaklığı
19	TC_813	°C	Taban termokupl sıcaklığı
20	TC_815	°C	Taban termokupl sıcaklığı
21	TC_815_A	°C	Taban termokupl sıcaklığı
22	TC_816_A	°C	Taban termokupl sıcaklığı
23	TC_820	°C	Taban termokupl sıcaklığı
24	FluGasCh_Temp	°C	Atık gaz sıcaklığı
25	Riser_Temp	°C	Fırından çıkış yapan camın sıcaklığı
26	Glass_Surf_Temp	°C	Cam yüzey sıcaklığı
27	SiO ₂	%	Cam harmanındaki silika oranı

Tablo 5.1: Devam.

Veri No	Veri Setindeki Tanımı	Birim	Açıklama
28	Al ₂ O ₃	%	Cam harmanındaki alüminyum oksit oranı
29	Fe ₂ O ₃	%	Cam harmanındaki demir oksit oranı
30	TiO ₂	%	Cam harmanındaki titanyum oksit oranı
31	CaO	%	Cam harmanındaki kalsiyum oksit oranı
32	MgO	%	Cam harmanındaki magnezyum oksit oranı
33	Na ₂ O	%	Cam harmanındaki sodyum oksit oranı
34	K ₂ O	%	Cam harmanındaki potasyum oksit oranı
35	SO ₃	%	Cam harmanındaki kükürt trioksit oranı
36	Cr ₂ O ₃	%	Cam harmanındaki krom oksit oranı
37	Pb	%	Cam harmanındaki kurşun oranı
38	CoO	%	Cam harmanındaki kobalt oksit oranı
39	SPEC	kcal/kg.cam	Özgül enerji tüketimi

6. YÖNTEMİN UYGULANMASI

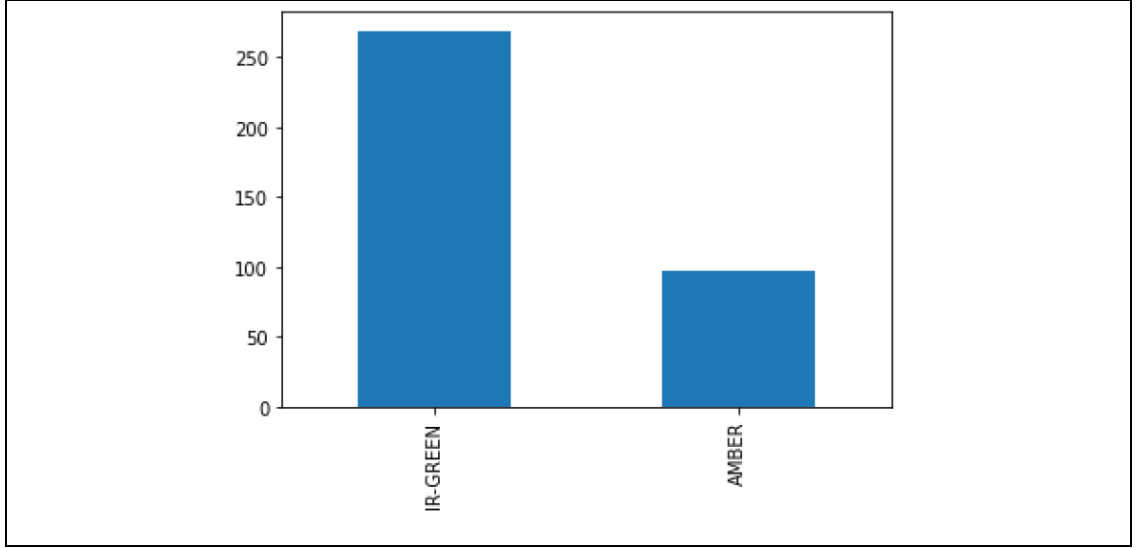
Çalışmadaki amaç, üzerinde çalışılan cam ergitme fırınına ait işletme parametrelerinin oluşturulan yapay zeka modeli tarafından öğrenilmesi ve bu verilerin özgül enerji tüketimiyle ilişki analizinin yapılmasıdır. Bu amaçla, farklı regresyonlar uygulanarak çeşitli istatistiksel modeller geliştirilmiştir. Cam fırınında birbiriyle etkileşimli birçok bağımsız değişken olması sebebiyle istatistiksel modelleme yöntemlerinden Lasso, Ridge ve Elastik Net'e başvurulmuştur.

Elde edilen sonuçlar kullanılarak cam fırınında özgül enerji tüketimine etki eden değişkenlerin ölçü ve kontrol teknikleri değerlendirilmiştir.

6.1. Veri Setinin Oluşturulması

Veriler, fırın kontrol sisteminden ve elle girilen tablolardan derlenmiştir. Oluşturulan tablo düzenlenerek veri seti oluşturulmuştur. Fırındaki ergitme ve afinyasyonla ilişkili olan bu verilerin özgül yakıt tüketimiyle ilişkisi incelenmiştir. Cam fırınında ayrıca renk değişimi gerçekleşmiştir. 1 Ocak 2020 ile 18 Mayıs 2020 ayları arasında yeşil renk çalışılmış, 19 Mayıs 2020 ile 23 Ağustos 2020 tarihleri arasında bal rengine geçilmiş ve bu tarihte tekrar yeşil renge geçerek sene sonuna kadar bu şekilde çalışılmıştır. Toplamda 269 gün yeşil, 97 gün bal rengi çalışılmıştır.

Renk değişimi olması nedeniyle modelleme çalışmaları her iki renk için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.1, 1 sene içerisinde çalışılan renklerin gün sayısı grafiğini vermektedir. Grafik, veriler veri tabanından okunduktan sonra renge göre verileri ayıran kod aracılığıyla oluşturulmuştur.



Şekil 6.1: Veri setine göre çalışılan renkler.

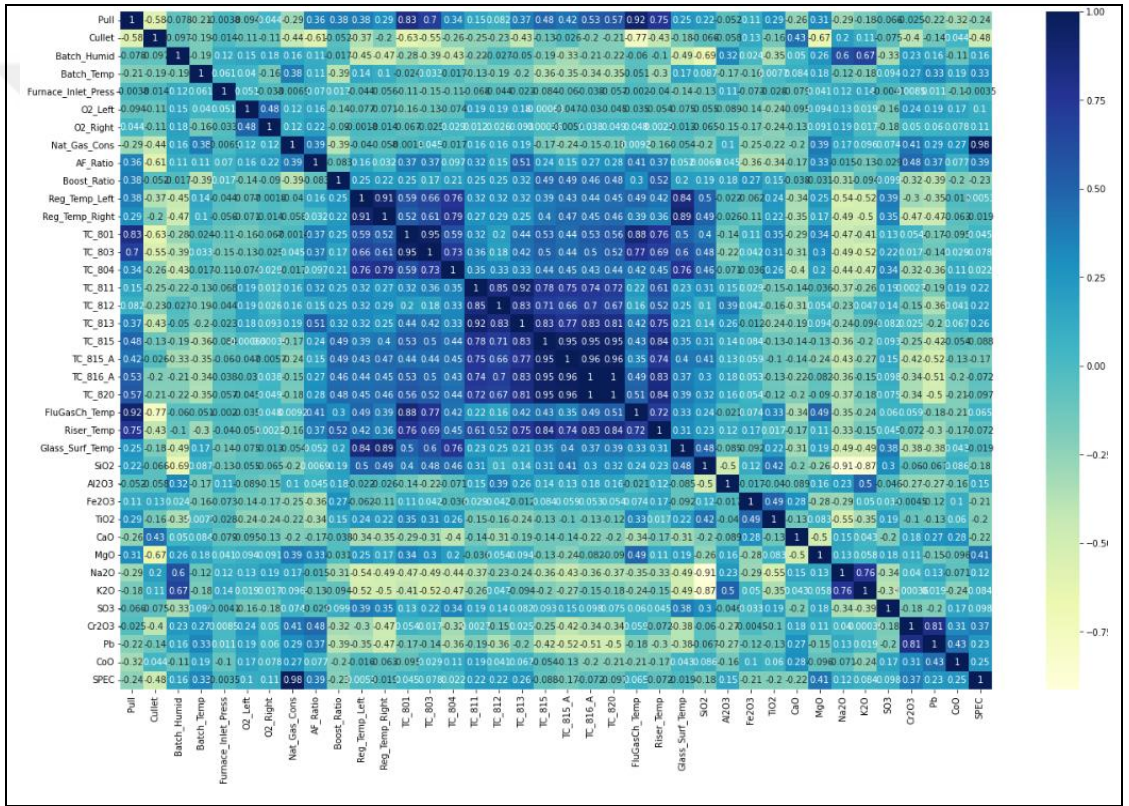
6.2. Verilerin Modele Uygun Hale Getirilmesi

Oluşturulan veri seti gözden geçirilmiş, gereksiz ve bilgi niteliği olmayan verilerden arındırılmıştır. Hatalı olarak girilmiş, gerçekten uzak veriler gereksiz ve bilgi niteliği olmayan olarak değerlendirilmiştir. Ardından, tarih, metin, sayı gibi formatta olan veriler kontrol edilerek gerekli veri tipi dönüşümü gerçekleştirilmiştir.

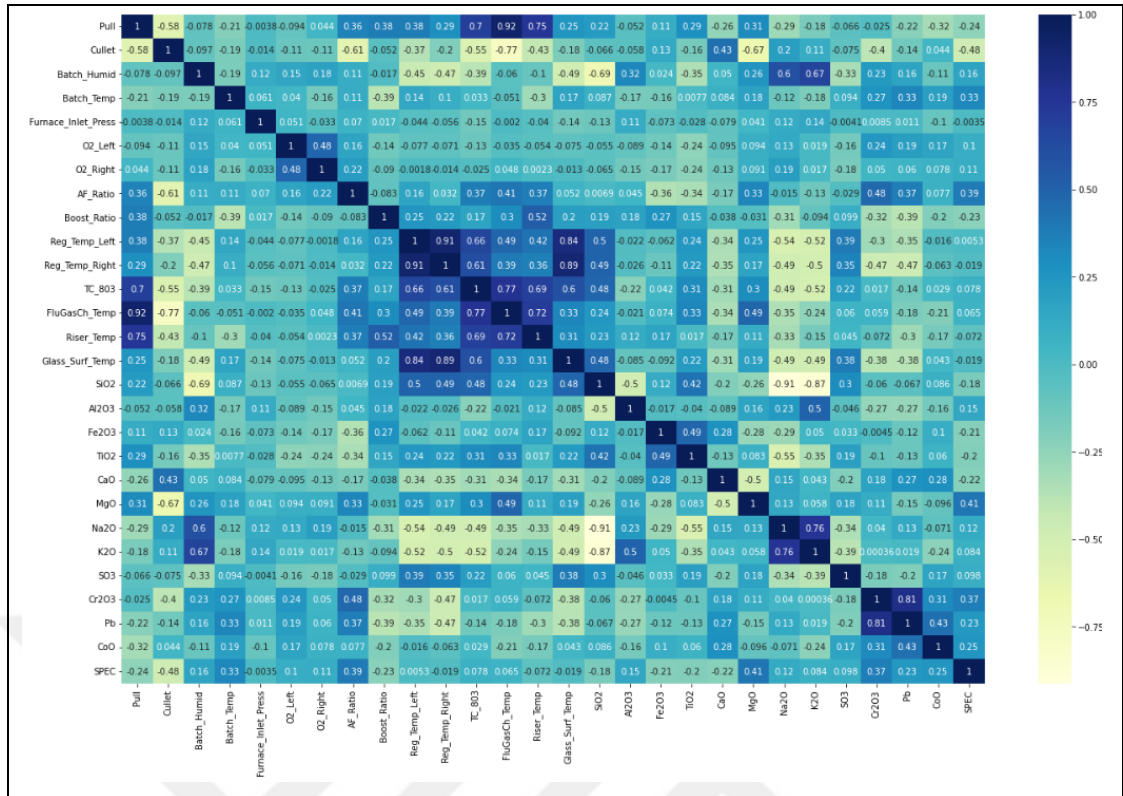
Uygulamadaki karmaşıklığı ortadan kaldırmak ve kolaylık sağlamak adına elde edilen veri seti “pickle” dosyası olarak kaydedilmiştir. Bu şekilde veri seti tekrar tekrar değişikliğe uğramadan defalarca kullanılabilecektir. Yeşil renk için “IRGREEN_Clean.pk”, bal renk için “AMBER_Clean.pk” dosyaları oluşturulmuştur.

Fırın verileri arasında, fırında günlük ergitilen cam miktarı, cam kırığı oranı, harman nemi, harman sıcaklığı, fırın iç basıncı, sol ve sağ rejeneratör sıcaklıkları, doğalgaz tüketimi, hava-yakıt oranı, fırın taban ve fırın kemer sıcaklık değerleri, fırına verilen harmandaki hammadde oranları gibi değişkenler mevcuttur. Verilerle çalışmaya başlamadan önce verilerin modele uygun hale getirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, verilerin birbirleri arasındaki ilişkiyi ortaya çıkaran ısı haritası oluşturulmuştur. Isı haritası, tüm değişkenlerin birbirleri arasındaki korelasyona göre oluşturularak görselleştirilmiştir. Isı haritası görsel olarak Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’teki şekilde çizdirilmiştir. Şekillerde görüleceği gibi, hem bal hem yeşil renk için ikişer harita mevcuttur. Bu haritalardan ikisi değişkenler

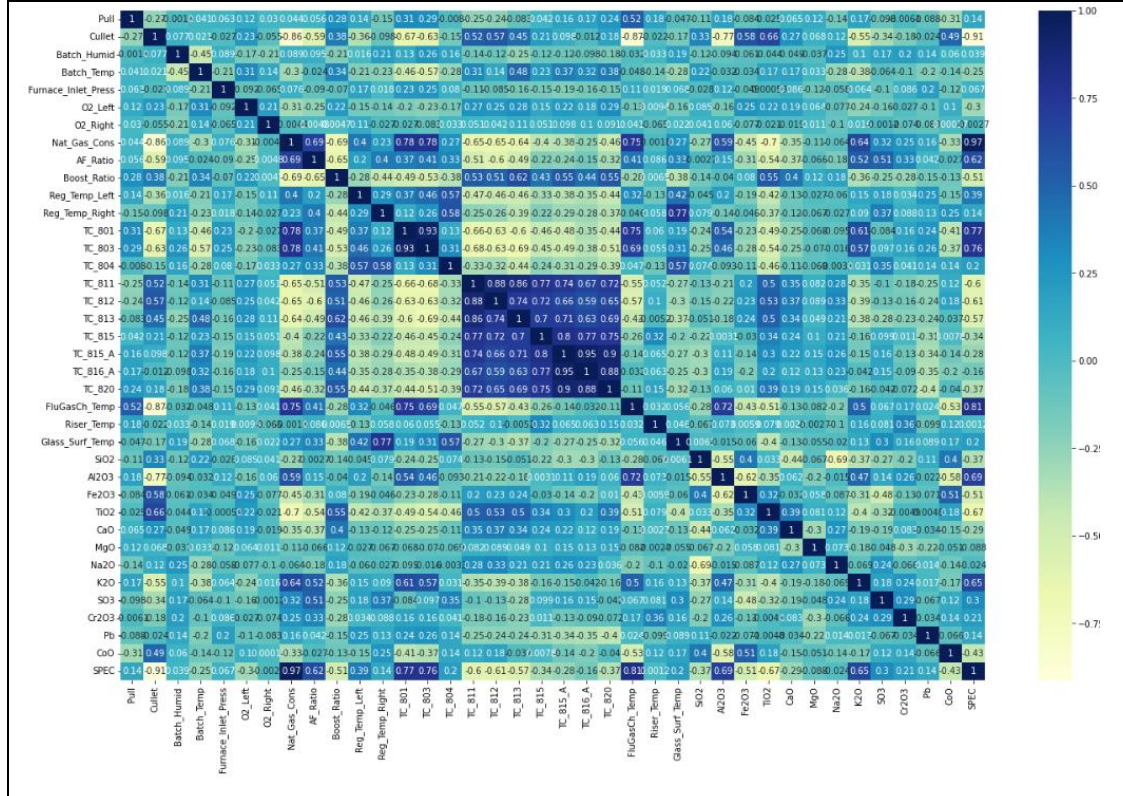
arası güçlü ilişki olanların elendiği haritadır. Özellikle ısı haritasının ortasında birbiriyle güçlü ilişkiye (highly correlated) sahip veriler tespit edilmiştir. Birbirinden bağımsız olan bu verilerin güçlü ilişkili olması yani birbirlerini etkilemesi model sonucunun hatalı olmasını sağlayacağından ortadan kaldırılmıştır. Bu verilerin ortadan kaldırılması veride veya modelde dikkate değer bir etki yaratmayacağı ön görülmüştür. Isı haritasında koyu renkli olarak görüntülenen “Nat_Gas_Cons”, “TC_801”, “TC_804”, “TC_811”, “TC_812”, “TC_813”, “TC_815”, “TC_815_A”, “TC_816_A”, “TC_820” değişkenleri modelden çıkarılarak ısı haritası tekrar oluşturulmuştur.



Şekil 6.2: Bal rengi için verilerin birbiriyle ilişkisi (güçlü ilişkiler mevcut).



Şekil 6.3: Bal rengi için verilerin birbiriyle ilişkisi (güçlü ilişkili veriler yok edildi).



Şekil 6.4: Yeşil renk için verilerin birbiriyle ilişkisi (güçlü ilişkiler mevcut).

Verilerin modele uygun hale getirilmesi için yapılan bir diğer işlem özellik ölçekleme (Feature Scaling) olmuştur. Özellik ölçekleme için kullandığımız yöntem normalize etme olmuştur. Yani değerler 0 ile 1 arasına çekilmiştir. Normalize etmek için $(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$ formülü tüm değişkenlere uygulanmıştır. Veri işleme olarak da bilinen özellik ölçekleme işlemi sonrasında veriler modele uygun hale getirilmiştir.

6.3. Modelin Oluşturulması ve Eğitilmesi

Bir sonraki adımda, bağımsız değişkenler özellik (X), SPEC değişkeni etiket (y) olarak formül edilmiştir. Elde edilen model içi boş ve eğitmeye hazır hale getirilmiştir. Bu aşamadan sonra modelin eğitilmesine geçilebilecektir. Modelin eğitilmesi için veri setinin %80'i ayrılmıştır. Kalan %20'lik kısım ise test için ayrılmıştır. Böylece, eğitim amaçlı ayrılan verinin büyüklüğü (66, 27), test amaçlı ayrılan verinin büyüklüğü (17, 27) olmuştur. Modelin eğitim başarısının değerlendirilmesi için R^2 skoruna değerlendirmeye alınmıştır.

İlk olarak, Ridge Regresyon ile modelleme gerçekleştirilmiştir. Modelimizin veri setimizdeki analizimizin nasıl sonuç vereceğini doğrulamak amacıyla çapraz doğrulama (cross validation) kullanılmıştır. Bu amaçla, “alpha” değerine sırasıyla “0.0001, 0.001, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 20, 50, 100, 500, 1000) atanmıştır. Atanan her bir değer için veri seti 10 parçaya bölünmüş ve her bir bölüm için sonuçlara tek tek bakılmıştır. Bu işlem sonucunda en iyi sonuç veren “alpha” değeri bulunmuştur. Bulunan “alpha” değeri kullanılarak RMSE ve R^2 değerleri hesaplatılmıştır. Ridge regresyon işlemi sonucunda, yeşil renk için en iyi sonuç veren “alpha” değeri 0.6 bulunurken bal renk için 0.1 bulunmuştur. Bulunan “alpha” değerleri kullanılarak iki farklı renk için RMSE, R^2_{train} , R^2_{test} değerleri hesaplanmıştır. Yeşil renk için 9.68 hesaplanan RMSE değeri bal renk için 19.24 hesaplanmıştır. Yeşil renkteki eğitim verisi için R^2_{train} değeri 0.95, test verisi için R^2_{test} değeri 0.85 hesaplanmıştır. Bal renkteki eğitim verisi için R^2_{train} değeri 0.84, test verisi için R^2_{test} değeri 0.74 hesaplanmıştır.

İkinci uygulanan regresyon yöntem olan Lasso ile modelleme yöntemidir. Ridge modelinde olduğu gibi yine modelimizin veri setimizdeki analizimizin nasıl

sonuç vereceğini doğrulamak amacıyla çapraz doğrulama (cross validation) kullanılmıştır. Bu amaçla, “alpha” değerine sırasıyla “0.0001, 0.001, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 20, 50, 100, 500, 1000) atanmıştır. Atanan her bir değer için veri seti 10 parçaya bölünmüş ve her bir bölüm için sonuçlara tek tek bakılmıştır. Bu işlem sonucunda en iyi sonuç veren “alpha” değeri bulunmuştur. Bulunan “alpha” değeri kullanılarak RMSE ve R^2 değerleri hesaplatılmıştır. Lasso regresyon işlemi sonucunda, yeşil renk için en iyi sonuç veren “alpha” değeri bal renk için de 0.1 olarak bulunmuştur. Bulunan “alpha” değerleri kullanılarak iki farklı renk için RMSE, R^2 .train, R^2 .test değerleri hesaplanmıştır. Yeşil renk için 9.82 hesaplanan RMSE değeri bal renk için 18.13 hesaplanmıştır. Yeşil renkteki eğitim verisi için R^2 .train değeri 0.95, test verisi için R^2 .test değeri 0.86 hesaplanmıştır. Bal renkteki eğitim verisi için R^2 .train değeri 0.86, test verisi için R^2 .test değeri 0.87 hesaplanmıştır.

Üçüncü ve son olarak Elastik Net yöntemi uygulanmıştır. Daha önceki modellemelerde yapıldığı gibi “alpha” değerine sırasıyla “0.0001, 0.001, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 20, 50, 100, 500, 1000) atanmıştır. Atanan her bir değer için veri seti 10 parçaya bölünmüş ve her bir bölüm için sonuçlara tek tek bakılmıştır. Bu işlem sonucunda en iyi sonuç veren “alpha” değeri bulunmuştur. Elastik Net regresyon işlemi sonucunda, yeşil renk için en iyi sonuç veren “alpha” değeri 0.1 bulunurken bal renk için de aynı şekilde 0.1 bulunmuştur.

Bulunan “alpha” değerleri kullanılarak iki farklı renk için RMSE, R^2 .train, R^2 .test değerleri hesaplanmıştır. Yeşil renk için 9.83 hesaplanan RMSE değeri bal renk için 22.67 hesaplanmıştır. Yeşil renkteki eğitim verisi için R^2 .train değeri 0.95, test verisi için R^2 .test değeri 0.78 hesaplanmıştır. Bal renkteki eğitim verisi için R^2 .train değeri 0.85, test verisi için R^2 .test değeri 0.61 hesaplanmıştır.

Tablo 6.1: Yeşil renk için regresyon parametreleri.

IR-Yeşil	Lineer	Ridge	Lasso	Elastik
α	X	0.6	0.1	0.01
RMSE	9.24	9.68	9.82	9.83
R^2 .Train	0.95	0.95	0.95	0.95
R^2 .Test	0.86	0.85	0.86	0.85

Tablo 6.2: Bal rengi için regresyon parametreleri.

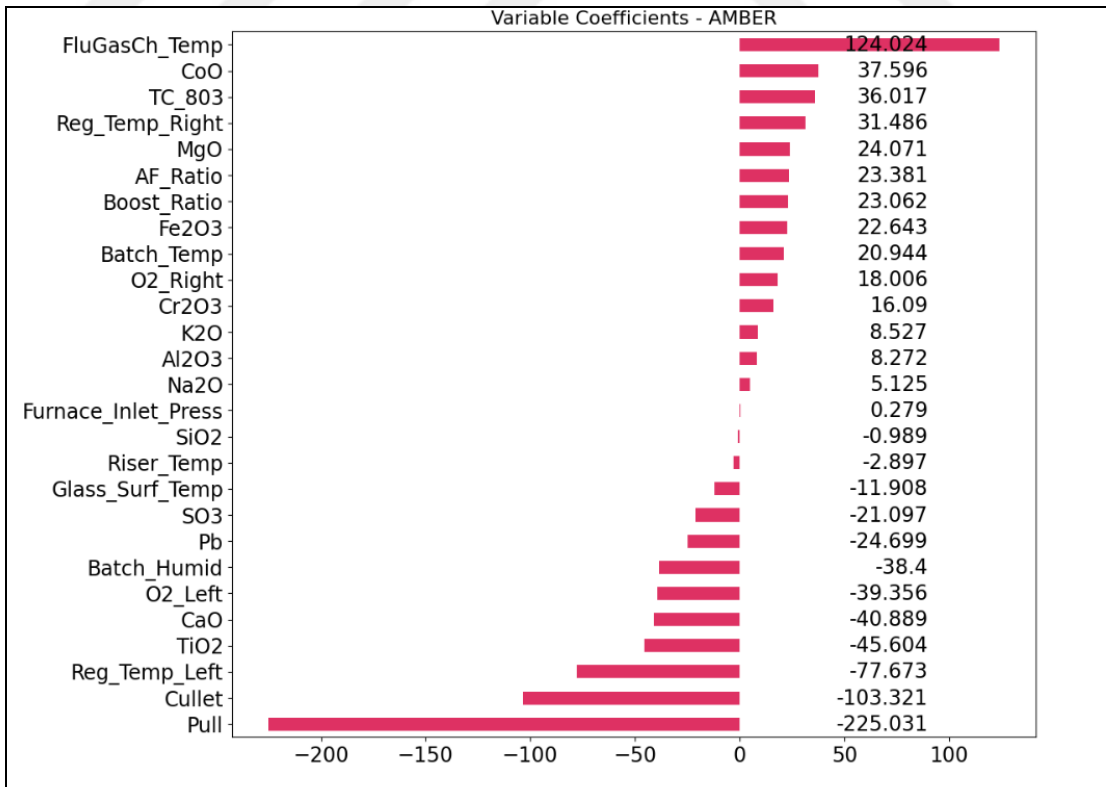
Bal (Amber)	Lineer	Ridge	Lasso	Elastik
α	X	0.1	0.1	0.1
RMSE	17.32	19.24	18.13	22.67
R ² .Train	0.87	0.84	0.86	0.78
R ² .Test	0.74	0.74	0.77	0.61

7. SONUÇLAR VE YORUMLAR

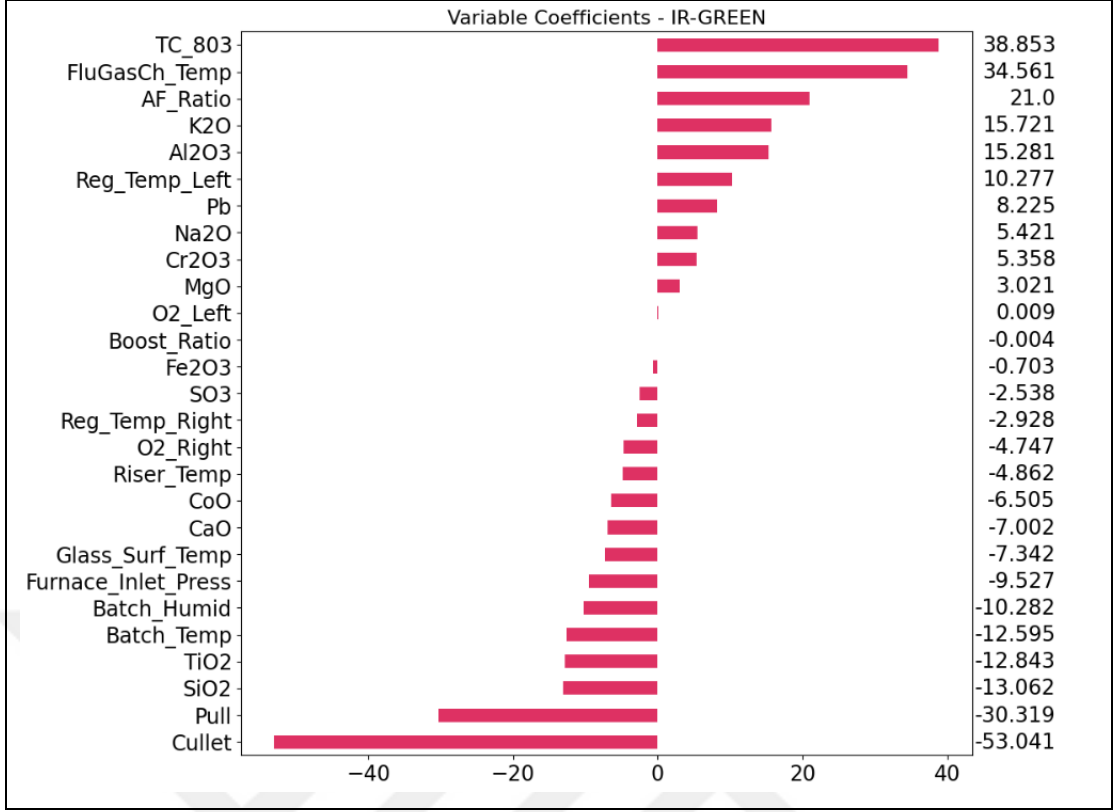
Ridge regresyon işlemi sonucunda bal ve yeşil renkte “SPEC” parametresine etkisi olan değişkenlerin katsayılarına ilişkin grafik çizdirilmiştir. Grafikte göze çarpan ilk unsur, hiçbir değişkenin yok edilmemesidir. Bal renkte fırın iç basınç değeri, yeşil renkte elektrik kullanım oranı katsayıları sıfıra çok yaklaştırılmış ancak sıfır yapılmamıştır. Bu durum Ridge regresyonun özelliğinin bir sonucudur.

Grafikte bal rengi çalışılan fırın koşulları verilerinden elde edilen model sonuçlarına göre, özgül yakıt tüketimiyle artı korelasyon ve eksi korelasyona sahip değişkenler gösterilmektedir. Artı korelasyon yani değeri arttıkça özgül yakıt tüketimi artan değişkenlerden atık gaz sıcaklığı en yüksek korelasyona sahip değişken olarak görülmektedir.

Ridge regresyon, yeşil renk bazındaki grafik incelendiğinde artı korelasyona sahip değişkenler, kemer termokupl sıcaklığı, atık gaz sıcaklığı, hava-yakıt oranı, sol rejeneratör sıcaklığı olarak görülürken, eksi korelasyona sahip değişkenler günlük üretim miktarı, cam kırığı oranı ve harman nemi olarak görülmektedir.



Şekil 7.1: Bal rengi için ridge regresyon çıktısı.



Şekil 7.2: Yeşil renk için ridge regresyon çıktısı.

Lasso regresyon işlemi sonucunda bal ve yeşil renkte “SPEC” parametresine etkisi olan değişkenlerin katsayılarına ilişkin grafik çizdirilmiştir. Ridge regresyondan farklı olarak, katsayısı sıfır yapılan değişkenler görülmektedir.

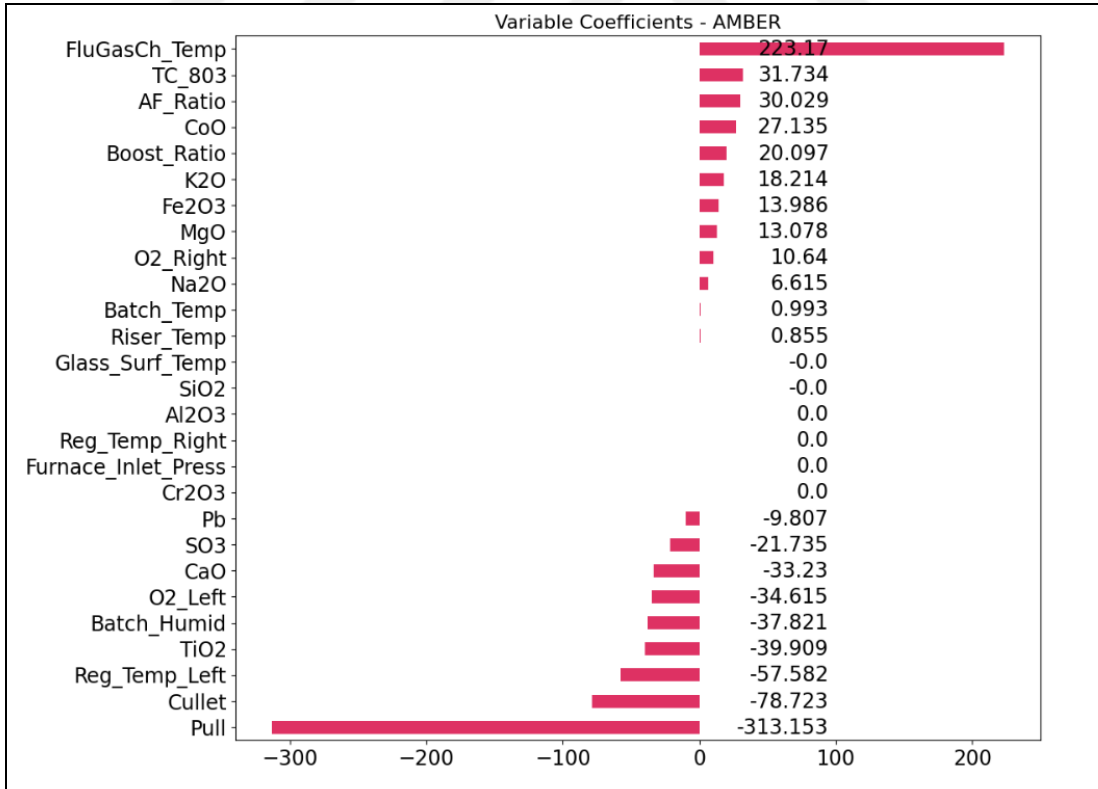
Grafikte bal rengi çalışılan fırın koşulları verilerinden elde edilen model sonuçlarına göre, özgül yakıt tüketimiyle artı korelasyon ve eksi korelasyona sahip değişkenler gösterilmektedir. Artı korelasyon yani değeri arttıkça özgül yakıt tüketimi artan değişkenlerden atık gaz sıcaklığı en yüksek korelasyona sahip değişken olarak görülmektedir. Atık gaz sıcaklığını düşürebilecek hamlelerim özgül yakıt tüketiminin de düşmesinde etkili olacağı şeklinde yorumlanabilmektedir. Özgül yakıt tüketimine artı korelasyonlar etki eden diğer değişken kemer termokupl sıcaklığıdır. Kemer sıcaklığının doğru işletme yöntemleriyle düşürülebilmesi özgül yakıt tüketiminin de düşmesi anlamına gelecektir. Rejeneratör sıcaklığı, hava-yakıt oranı, elektrik takviye kullanım oranı, sağ rejeneratör oksijen değeri yine özgül yakıt tüketimiyle artı korelasyona sahip değişkenler olarak sonuca yansımıştır. Eksi korelasyon yani değeri arttıkça özgül yakıt tüketimi düşen değişkenlerden günlük üretim miktarı en yüksek korelasyona sahip değişken olarak görülmektedir. Yani aynı fırın geometrisinden daha fazla cam ergitildiğinde özgül yakıt tüketimi doğal

olarak düşecektir. Bir diğer en yüksek eksi korelasyona sahip değişken olan cam kırığı oranının artması da özgül yakıt tüketimini düşürecek bir parametredir. Ek olarak, harman nemi, titanyum oksit miktarı da bal renkte eksi korelasyona sahip değişken olarak görülmektedir.

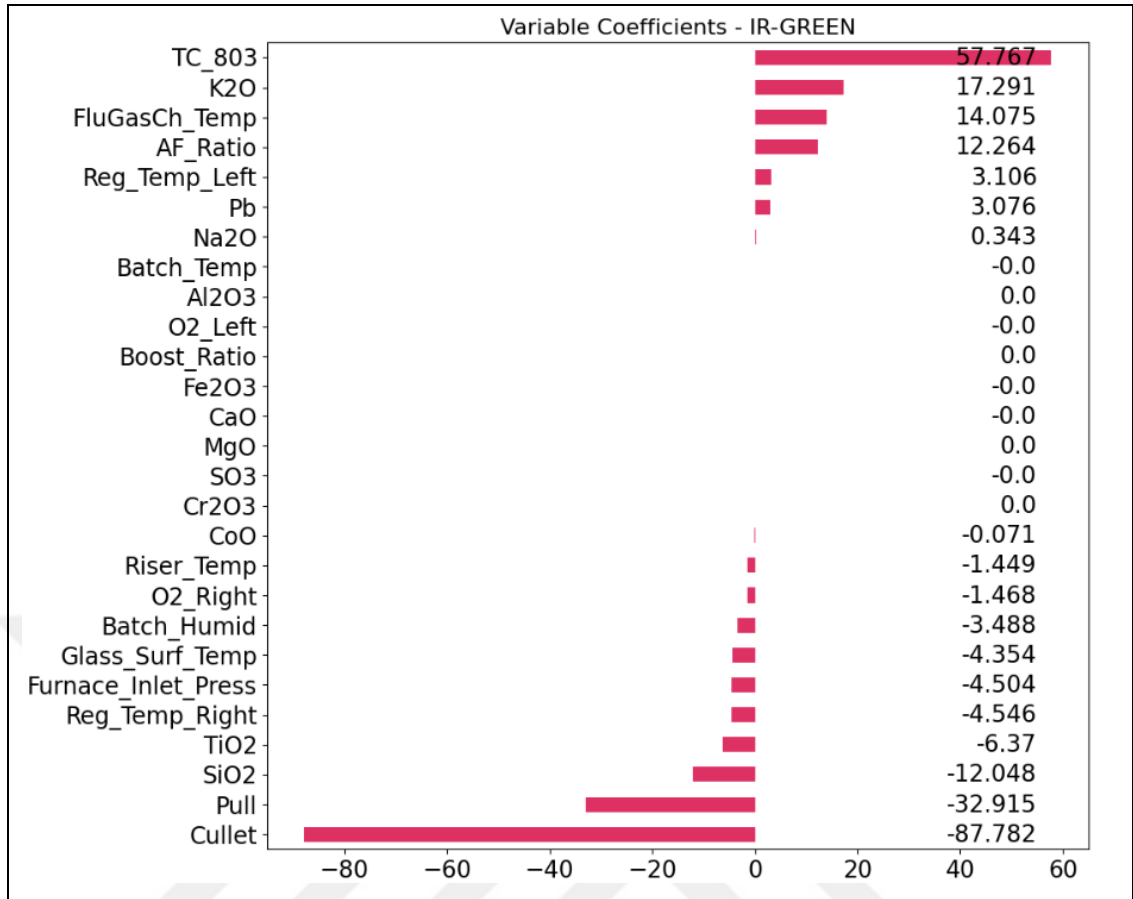
Lasso regresyon, yeşil renk bazındaki grafik incelendiğinde artı korelasyona sahip değişkenler, kemer termokupl sıcaklığı, atık gaz sıcaklığı, hava-yakıt oranı, sol rejeneratör sıcaklığı ve potasyum oksit miktarı olarak görülürken, eksi korelasyona sahip değişkenler günlük üretim miktarı, cam kırığı oranı, fırın iç basıncı ve sağ rejeneratör sıcaklığı olarak görülmektedir.

Gerek bal gerekse yeşil renk bazında model sonuçları incelendiğinde Ridge regresyonda elde edilen sonuçların Lasso ile elde edilen sonuçlara çok benzediği söylenebilir.

Beklenildiği üzere, Ridge regresyon etkisi az olan değişkenlerin katsayılarını çok küçültmesine rağmen yok etmezken Lasso etkisi düşük olan değişkenlerin katsayısını sıfır yapmıştır. Bu da grafiklerde görülmektedir.

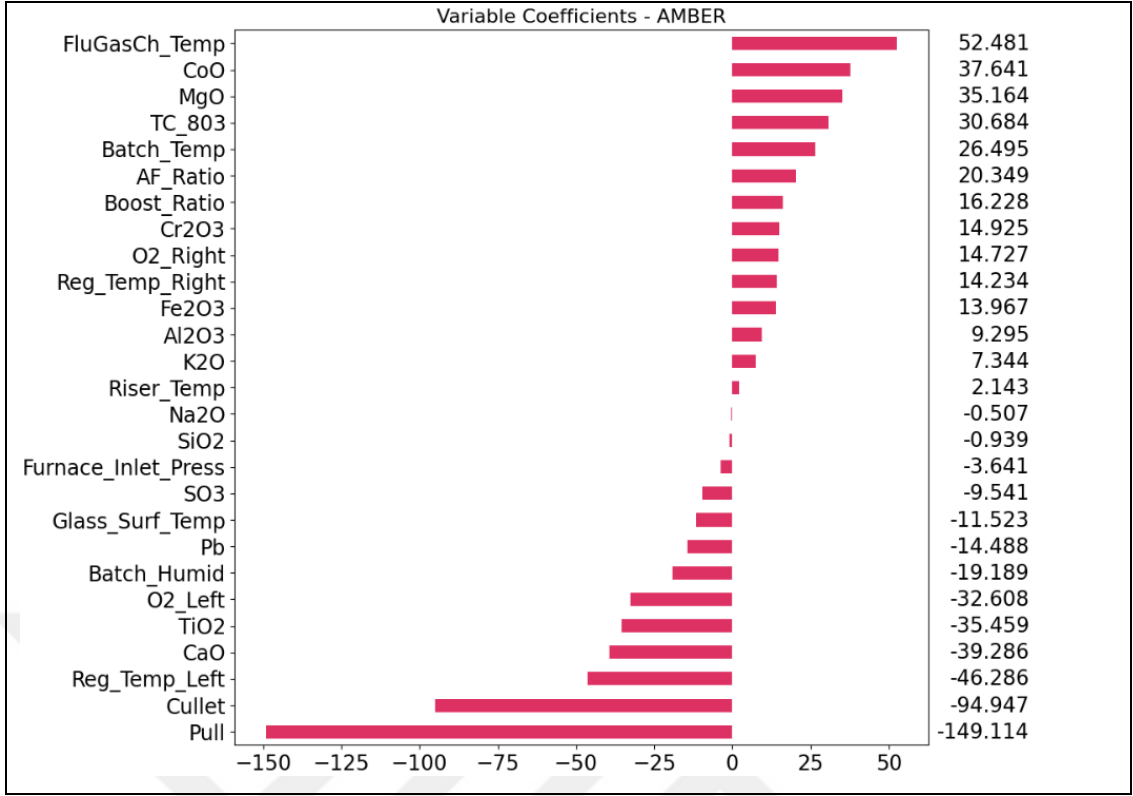


Şekil 7.3: Bal rengi için Lasso regresyon çıktısı.

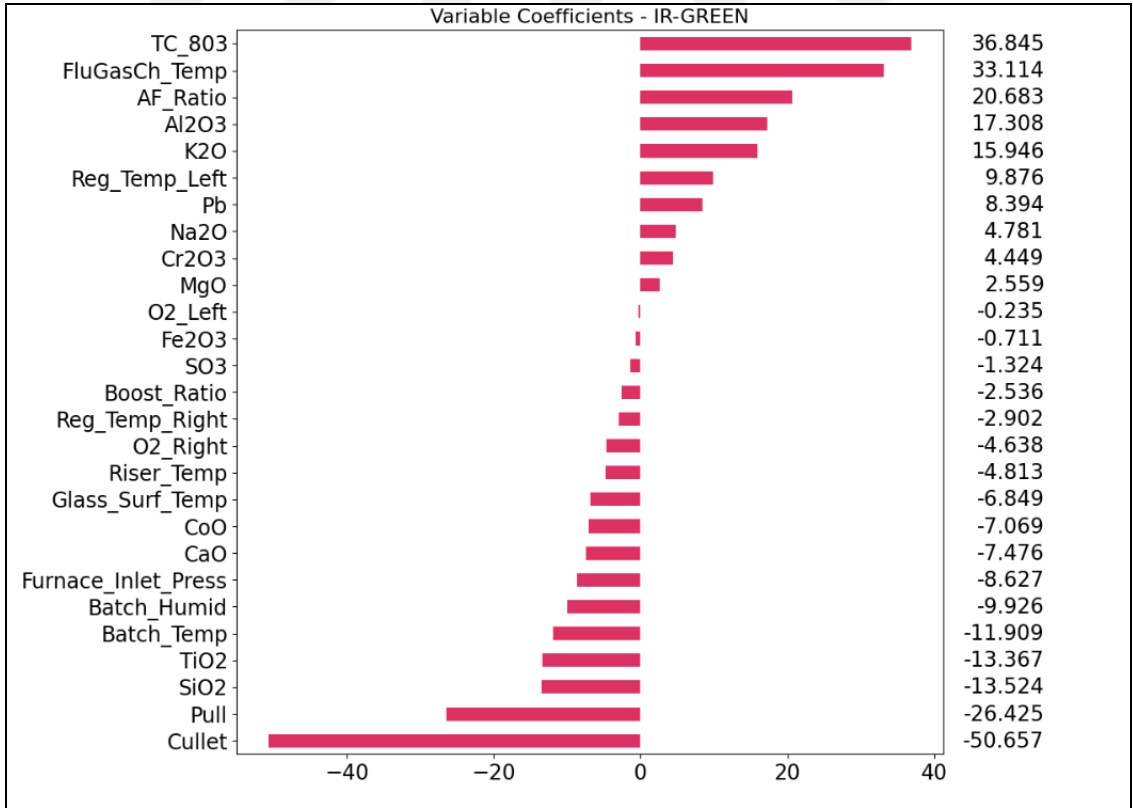


Şekil 7.4: Yeşil renk için Lasso regresyon çıktısı.

Elastik Net regresyon işlemi sonucunda bal ve yeşil renkte “SPEC” parametresine etkisi olan değişkenlerin katsayılarına ilişkin grafik çizdirilmiştir. Elastik Net’ten elde edilen sonuçların da Ridge ve Lasso ile çok benzediği görülmüştür. Elastik Net’in de Ridge’e benzer şekilde davrandığı yani etkisi düşük olan değişkenleri yok etmeyerek katsayılarını çok azalttığı grafiklerden görülebilmektedir.



Şekil 7.5: Bal rengi için elastik net regresyon çıktısı.



Şekil 7.6: Yeşil renk için elastik net regresyon çıktısı.

Atık gaz sıcaklığını düşürebilecek hamlelerin özgül yakıt tüketiminin de düşmesinde etkili olacağı şeklinde yorumlanabilmektedir. Özgül yakıt tüketimine artı korelasyonlar etki eden diğer değişken kemer termokupl sıcaklığıdır. Kemer sıcaklığının doğru işletme yöntemleriyle düşürülebilmesi özgül yakıt tüketiminin de düşmesi anlamına gelecektir. Rejeneratör sıcaklığı, hava-yakıt oranı, elektrik takviye kullanım oranı, sağ rejeneratör oksijen değeri yine özgül yakıt tüketimiyle artı korelasyona sahip değişkenler olarak sonuca yansımıştır. Eksi korelasyon yani değeri arttıkça özgül yakıt tüketimi düşen değişkenlerden günlük üretim miktarı en yüksek korelasyona sahip değişken olarak görülmektedir. Yani aynı fırın geometrisinden daha fazla cam eritildiğinde özgül yakıt tüketimi doğal olarak düşecektir. Bir diğer en yüksek eksi korelasyona sahip değişken olan cam kırığı oranının artması da özgül yakıt tüketimini düşürecek bir parametredir.

Tablo 7.1 Yeşil renkte özgül enerji tüketimiyle artı korelasyon çıkan değişkenler.

Ridge	Lasso	Elastik
Kemer Termoupl Sıc.	Kemer Termoupl Sıc.	Kemer Termoupl Sıc.
Atık Gaz Sıcaklığı	Atık Gaz Sıcaklığı	Atık Gaz Sıcaklığı
Hava-Yakıt Oranı	Hava-Yakıt Oranı	Hava-Yakıt Oranı
K2O	K2O	K2O
Sol Rejeneratör Sıcaklığı	Sol Rejeneratör Sıcaklığı	Sol Rejeneratör Sıcaklığı

Tablo 7.2 Yeşil renkte özgül enerji tüketimiyle artı korelasyon çıkan değişkenler.

Ridge	Lasso	Elastik
Günlük Üretim	Günlük Üretim	Günlük Üretim
Cam Kırığı Oranı	Cam Kırığı Oranı	Cam Kırığı Oranı
SiO2	Fırın İç Basınç	Fırın İç Basınç
TiO2	Sağ Rejeneratör Sıcaklığı	TiO2
Harman Nemi	Cam Yüzeyi Sıcaklığı	Harman Nemi

Tablo 7.3: Bal renkte özgül enerji tüketimiyle artı korelasyon çıkan değişkenler.

Ridge	Lasso	Elastik
Atık Gaz Sıcaklığı	Atık Gaz Sıcaklığı	Atık Gaz Sıcaklığı

Tablo 7.3: Devam.

Ridge	Lasso	Elastik
CoO	CoO	CoO
Kemer Termoupl Sıc.	Kemer Termoupl Sıc.	MgO
Hava-Yakıt Oranı	Hava-Yakıt Oranı	Kemer Termoupl Sıc.
Harman Sıcaklığı	Harman Sıcaklığı	Harman Sıcaklığı

Tablo 7.4 Bal renkte özgül enerji tüketimiyle eksi korelasyon çıkan değişkenler.

Ridge	Lasso	Elastik
Günlük Üretim	Günlük Üretim	Günlük Üretim
Cam Kırığı Oranı	Cam Kırığı Oranı	Cam Kırığı Oranı
Sol Rejeneratör Sıcaklığı	Sol Rejeneratör Sıcaklığı	Sol Rejeneratör Sıcaklığı
TiO	TiO	TiO
Harman Nemi	Harman Nemi	Oksijen Miktarı

Gerek bal gerekse yeşil renk bazında model sonuçları incelendiğinde atık gaz sıcaklığı, kemer termokupl sıcaklığı, sol rejeneratör sıcaklığı, elektrik kullanım oranı, kobalt oksit miktarı ve potasyum miktarı değerlerinin azaltılması özgül yakıt tüketimini azaltacaktır. Tersî şekilde, günlük üretim miktarı, cam kırığı oranı, harman nemi, silisyum oksit miktarı, titanyum oksit miktarı değerlerinde artış sağlamak özgül akıt tüketimini azaltacaktır. Bu değişkenlerin detaylı incelenerek üzerinde çalışılması, olası sensör geliştirme ve kontrol stratejileri oluşturma sürece artı değer katacaktır.

Cam üretim süreci çok değişkenli girdi etkenlerine bağlı olarak sürekli değişir. Şartlar birbirine yakın olmasına rağmen süreçte farklı sonuçlar görülebilmektedir çünkü sistem bileşenler arasında etkileşimler mevcuttur. Fırın içinde meydana gelen birlikte gerçekleşen kütleli hareketler, yanma işlemi, yüksek sıcaklık, fiziksel ve kimyasal tepkimeler nedeniyle süreç zorlu bir hale dönüşür. Çalışmada, birbiriyle etkileşen bu parametreler arasındaki ilişkiyi özellikle özgül yakıt tüketimine olan etkisini tespit etmek üzerinde durulmuştur.

Veri setinde bulunan değişkenlerin tamamının Ridge regresyonda kalmaya devam ettiği yani hiç eksilmediği görülmüştür. Buna karşılık, Lasso regresyondaki alfa parametre değeri arttıkça değişken sayısının azaldığı görülmüştür. Özellik seçimi

Lasso tarafından gerçekleştirildiği görülmüştür. Lasso regresyonda alfa 1.0 değerindeyken katsayılar düşük çıkmıştır. Bunun sebebi fazla sayıda eleme yapmış ve eksik öğrenme gerçekleştirmiş olmasıdır. Tersine şekilde, alfa sayısı arttığında aşırı öğrenme gerçekleştiğinde alfa değerinin düşürülmesi gerektiği açıkça görülmüştür. Alfa değeri küçüldükçe lineer regresyona katsayısına yaklaşıldığı tespit edilmiştir.

Özgül enerji tüketimi “SPEC” verisinde en çok hava-yakıt oranı, harman sıcaklığı, fırın çekiş miktarı katsayılarının etkili olduğu gözlemlenmiştir. Hava miktarı, yakıt miktarı ölçümü, harman sıcaklığı ölçümünde doğruluğu arttıracak akıllı sensörlerin fırındaki cam eritme için harcanan enerji miktarının azaltılmasında etkili olacaktır. Yine bu değerlerin ileri kontrol, model tabanlı kestirimci kontrol sistemleriyle tahmin edilerek fırının işletilmesi tüketimin azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması için atılabilecek önemli adımlar olarak öne çıkmıştır.

Elde edilebilecek kazanımın anlaşılabilmesi adına rakamlarla ifade edilmesinde fayda vardır. Her ne kadar veri seti içerisindeki değerler gizlilik gereği paylaşılamasa da, özgül yakıt tüketiminde azalma elde edilmesi durumunda sağlanabilecek tahmini kazanç hesaplanabilmektedir. Hesaplama için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$M_{ERG} = \frac{(E \times M_E) + [DG \times M_{DG} \times (\frac{CV_{net}}{CV_{ref}})]}{\text{ÇEKİŞ}} \quad (7.1)$$

Formüldeki sembollere ilişkin açıklama ve birimler Tablo 7.5’te verilmiştir.

Tablo 7.5: Formül 7.1’deki semboller, açıklamaları ve birimleri.

Sembol	Açıklama	Birim
M_{ERG}	Cam Eritme Enerji Maliyeti	TL/kg.cam
E	Tüketilen Elektrik Enerjisi	kWh
M_E	Birim Elektrik Maliyeti	TL/kWh
DG (@ref)	Tüketilen Doğal Gaz Enerjisi	Sm ³ @ 15°C
M_{DG}	Birim Doğal Gaz Maliyeti	TL/Sm ³
LHV _{DG}	Kullanılan Doğal Gaz Kalorifik Değer	kcal/Sm ³
LHV _{ref}	Doğal Gaz Net Kalorifik Değer	kcal/Sm ³
ÇEKİŞ	Cam Çekiş Miktarı	ton/gün

2022 senesi için ortalama doğalgaz birim maliyeti 13,5TL/Sm³, elektrik birim maliyeti 2TL/kWh olarak alınmıştır. Veri setimizdeki ortalama değerler, kullanılan doğalgazın kalorifik değeri, elektrik ve doğalgaz birim maliyetler formüle yerleştirildiğinde Tablo 7.6'daki değerler elde edilmektedir.

Tablo 7.6: İyileştirme öncesi ve sonrası değerler.

Sembol	Birim	İyileşmeden Önce	İyileşmeden Sonra (Binde 1)
E	kWh	1563.5	1561.9
M _E	TL/kWh	2	2
DG	Sm ³ @ 15°C	1807.0	1805.2
M _{DG}	TL/Sm ³	13.5	13.5
LHV _{DG}	kcal/Sm ³	8450	8450
LHV _{ref}	kcal/Nm ³	8250	8250
ÇEKİŞ	ton/gün	500	500
M _{ERG}	TL/kg.cam	1,3494	1,3480

İyileşmeden önce 1 kilogram camın ergitilmesi için 1,3494TL enerji maliyeti varken, binde birlik iyileşme sağlanması durumunda bu maliyet 1,3480TL'ye düşmektedir. Yani 365 gün boyunca her gün 500.000kg cam üreten fırında her bir kilogramının ergitilmesi için saat başına 0.0014TL kazanç sağlanacaktır. Her ne kadar düşük bir değer olarak görülse de, günlük 500 ton üretimde, 7 gün 365 saat ve 13 sene boyunca üretim yapacak bir fırın için, günde 16.800TL, senede 6.136.000TL, fırın ömrü boyunca 80.000.000TL kazanç elde edilebilecektir.

Hesaplamalar açıkça gösteriyor ki, yüksek ısıya sahip enerji yoğun cam ergitme fırınlarında enerji yönetimi yüksek öneme sahip olmalıdır. Enerji maliyetlerinin düşürülmesinde yapay zeka ve modellemenin araç olarak kullanılması sonucu elde edilen kazanımların sensör ve kontrol tekniklerinin geliştirilmesi artı değer katacaktır. Böylece, fırın tasarımı ve işletmesine değer katılacaktır. Sonuç olarak, enerji maliyetlerinde ve çevre etkisinde azalma, kalitede artış sağlayacak hamleler yapılmasının yolu açılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Pike W. G., Shea J. J., & McCoy L. R., (1992), “The Evolution of Float Glass Furnaces”, DMG Business Media, Redhill, 69 (2), 65-69.
- [2] Barton J. L., (1993), “Innovation in Glass Melting”, Glass Technology, 34 (5), 170-177.
- [3] Saygın D., Patel M. K., Gielen, D. J., “Global Industrial Energy Efficiency Benchmarking”, Technical Report No: NL11E0613, United Nations Industrial Development Organization, Netherlands.
- [4] Web 1, (2019), <http://ietd.iipnetwork.org/content/glass#technology-resources>, (Erişim Tarihi: 20/03/2019).
- [5] Kocabağ D., (2000), “Cam Fırınları: Malzemeler. Teknolojiler, Prosesler”, 1. Baskı, ETAM A.Ş. Matbaa Tesisleri.
- [6] Mullinger P., Jenkins B., (2008), “Furnace Control and Safety; Industrial and Process Furnaces”, 3rd Edition, Butterworth-Heinemann.
- [7] Bhambare K. S., Mitra S. K., Gaitonde U. N., (2007), “Modeling of a Coal-Fired Natural Circulation Boiler”, Journals of Energy Resources Technology, 129 (2), 159-167.
- [8] Ustaoglu B., Cigizoglu, H. K., Karaca M., (2008), “Forecast of Daily Mean, Maximum and Minimum Temperature Time Series by Three Artificial Neural Network Methods”, Royal Meteorological Society, 15, 431-445.
- [9] Lester W. R., (1963), “Average Practice Fuel Formula for Glass Melting Furnaces”, Glass Ind, 44, 260.
- [10] Küçükerman Ö., (1985), “Art of glass and traditional Turkish glassware”. Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları.
- [11] Web 2, (2015), https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture01_Hubert_Comm_glasses_and%20Raw_Matls.pdf, (Erişim Tarihi: 20/10/2022).
- [12] Web 3, (2011), <https://www.technologyreview.com/2011/01/11/197657/glass-thats-stronger-than-steel>, (Erişim Tarihi: 20/10/2022).
- [13] Morse D. L., Evenson J. W., (2016), “Welcome to the glass age”, International Journal of Applied Glass Science, 7(4), 409-412.
- [14] Beltramo M. A., (1989), “Modelling fuel-switching between natural gas and fuel oil in US manufacturing”, Energy economics, 11(1), 70-78.

- [15] Özgümüş Ü., (2013), “Çağlar boyu cam tasarımı”, Arkeoloji ve Sanat Yayınları.
- [16] Roudier S., Sancho L. D., Scalet B., Muñoz M. G., (2013), “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass”, Technical Report No: JRC 78091, European Commission Joint Research Centre, Spain.
- [17] Web 4, (2015), https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture02_Hubert_Melting%20and%20fining%20processes.pdf, (Erişim Tarihi: 10/01/2022).
- [18] Chigier N.A., (1981), “Energy, combustion, and environment”, McGraw-Hill.
- [19] Steitz W. R., Hibscher C. W., (1980), “Proceedings of the 40th Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings”, Vol. 1, Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc..
- [20] Ecofys, (2009), “Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012”, Technical Report No: PECSNL082164, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Germany.
- [21] Zou H., Hastie T., (2005), “Regularization and variable selection via the elastic net”, Journal of the royal statistical society: series B (statistical methodology).
- [22] Web 5, (2012), https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-11/bm_study-glass_en.pdf, (Erişim Tarihi: 18/03/2021).
- [23] Géron A., (2022), “Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow.” O'Reilly Media, Inc.
- [24] Web 6, (2018), <https://stanford.edu/~shervine/teaching/cs-229/>, (Erişim Tarihi: 16/05/2020).
- [25] Glymour C., Madigan D., Pregibon D., Smyth P., (1997), “Statistical themes and lessons for data mining.”, Data mining and knowledge discovery, 1, 11-28.
- [26] Gujarati N. D., (2009), ”Temel Ekonometri” , 5. Baskı, Literatür Yayıncılık-İstanbul.
- [27] Noltingk B., (1994), “Sıcaklık ve Kimyasal Bileşenlerin Ölçümü”, MEB, Eskişehir.
- [28] Neter J., Kutner M. H., Nachtsheim C. J., Wasserman W., (1996), “Applied linear statistical models”, Fourth Edition, McGraw-Hill.
- [29] Serper Ö., (2004), “Uygulamalı İstatistik 1”, Ezgi Kitabevi.
- [30] Web 7, (2018), <https://www.datacamp.com/tutorial/towards-preventing-overfitting-regularization>, (Erişim Tarihi: 20/09/2022).

- [31] Trier W., Loewenstein K. T., (1987), “Glass furnaces: design construction and operation”, 1st Edition, Society of Glass Technology,
- [32] Genceli O. F., (1995), “Ölçme Tekniği”, Birsen yayınevi.
- [33] Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. H., Friedman J. H., (2009), “The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction.”, Vol. 2., New York: springer,
- [34] Fan J., Li R., (2001), “Variable selection via nonconcave penalized likelihood and its oracle properties”, Journal of the American statistical Association, 96(456), 1348-1360.



ÖZGEÇMİŞ

Ömer Bayraktar, lisans öğrenimini Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Güç Elektroniğı, Kağıt, Demir Çelik ve Cam üretim firmalarında mühendis, uzman ve şef olarak görev yapmıştır. 2017 senesinden beri Şişecam Ar-Ge ve Kalite biriminde ölçü ve kontrol alanında Yönetmen Uzman olarak görev yapmaktadır.

Özellikle yüksek sıcaklığa sahip proseslerde enerji verimliliğı, proses optimizasyonu üzerine projeler geliştirmiştir. Uzmanlık alanları, kontrol sistemleri, sensör teknolojileri, SCADA, endüstriyel haberleşme ve akıllı kontrol sistemleridir.

