



**B420C İNŞAAT ÇELİKLERİNİN  
MEKANİK ÖZELLİKLERİ İLE  
KİMYASAL KOMPOZİSYONLARI  
ARASINDAKİ İLİŞKİNİN MODELLENMESİ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Aytuğ KARAMEŞE**

**ESKİŞEHİR, 2023**

**B420C İNŞAAT ÇELİKLERİNİN MEKANİK  
ÖZELLİKLERİ İLE KİMYASAL KOMPOZİSYONLARI  
ARASINDAKİ İLİŞKİNİN MODELLENMESİ**

**Aytuğ KARAMEŞE**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Gürsoy ARSLAN**

**Eskişehir  
Eskişehir Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Ağustos 2023**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Aytuğ Karameşe'nin "B420C İnşaat Çeliklerinin Mekanik Özellikleri ile Kimyasal Kompozisyonları Arasındaki İlişkinin Modellenmesi" başlıklı tezi 03/08/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

<u>Jüri Üyeleri</u>	<u>Unvanı Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Gürsoy ARSLAN	.....
Üye	: Prof. Dr. Rasim CEYLANTEKİN	.....
Üye	: Prof. Dr. Alpagut KARA	.....

**Prof. Dr. Semra KURAMA**  
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü**

.../.../.....

## DANIŞMAN ONAYI

DaniŐmanlıđını yuruttuğum Malzeme Bilimi ve Muehendisliği Yukek Lisans oğrencisi Aytuğ KARAMEŞE, “B420C İnaaat eeliklerinin Mekanik Ozelikleri ile Kimyasal Kompozisyonları Arasındaki İlişkinin Modellenmesi” başlıklı tez ealıŐmasını tamamlamıŐtır. HazırlamıŐ olduğu tez tarafımca incelenmiŐ ve oğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik aeedan uygun gorulmuŐtur.

Tez DaniŐmanı  
Prof. Dr. Gursoy ARSLAN

## ÖZET

# B420C İNŞAAT ÇELİKLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ İLE KİMYASAL KOMPOZİSYONLARI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN MODELLENMESİ

Aytuğ KARAMEŞE

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Enstitüsü, Ağustos 2023

Danışman: Prof. Dr. Gürsoy ARSLAN

Çeliklerde alaşım elementlerinin etkileri ile ilgili çalışmalar ağırlıklı olarak yüksek oranda alaşım elementi içeren çelikler için gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan düşük miktarda alaşım elementi içeren çeliklerin mekanik özellikleri üzerine etkileri ile ilgili çalışmalar sınırlıdır. Düşük alaşımlı bir çelik olan B420C yapı çeliğinin üretimi için hammadde olarak hurda kullanıldığında, kimyasal bileşiminin çok geniş bir aralıkta olmasından dolayı hedeflenen mekanik özelliklerin elde edilmesi için üretim boyunca bileşimi ve bileşimindeki değişimlerin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu durum üretim sürecini zorlaştırmaktadır ve üretim maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Çalışmanın ana konusu, çeliğin bileşiminde yer alan alaşım elementlerinin tür ve miktarının B420C yapı çeliğinin mekanik özelliklerine (akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama miktarı) etkisinin istatistiki yöntemlerle modellenerek belirlenmesidir. Karbon, mangan, krom ve kükürt elementlerinin B420C çeliğinin akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama miktarı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. İstatistiki modelleme yöntemlerinde, mekanik özellikleri etkilemesi nedeniyle; ürünün birim ağırlığı ve soğuma hızı da bağımsız değişkenlere eklenmiştir. İstatistiksel modellemenin sonucunda söz konusu elementler ile ilgili mekanik özelliklerin deneysel yöntemlerle elde edilen sonuçlarla uyumlu olacak şekilde tahmin edilebildiği görülmüştür. Bu çalışma kapsamında geliştirilen modeller kullanılarak, çeşitli kaynaklardan temin edilmeleri nedeniyle kimyasal bileşimi birbirinden farklı olan hurda hammadde olarak kullanıldığında B420C çeliğinin akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama miktarının, deneysel testler gerçekleştirilmeden, ilgili standardın öngördüğü değer aralığında olacak şekilde üretilebileceği ve böylelikle üretim maliyetinin de düşürülebileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** *Düşük Karbonlu Çelikler, İstatistiksel Veri Analizi, Mekanik Özellikler, Kimyasal Kompozisyon*

**ABSTRACT**  
**MODELLING THE EFFECT OF CHEMICAL ELEMENTS ON THE  
MECHANICAL PROPERTIES OF B420C CONSTRUCTION STEELS WITH  
STATISTICAL ANALYSIS**

**Aytuğ KARAMEŞE**

**Material Science and Engineering Program, August 2023**

**Supervisor: Prof. Dr. Gürsoy ARSLAN**

Studies on the effects of alloying elements on the mechanical properties of steels have been carried out mainly for steels containing high amounts of alloying elements. On the other hand, studies on the effects of alloying elements on the mechanical properties of steels containing low amounts of alloying elements are limited. Since its chemical composition changes in a very broad range when scrap is used as a raw material to produce B420C construction steel, which is a low-alloy steel, it is necessary to strictly control the change in chemical composition throughout the production process in order to obtain the targeted mechanical properties, This requirement complicates the production process and causes production costs to increase. The main subject of the study is to determine the effect of the type and amount of alloying elements present in the steel composition on the mechanical properties (yield strength, tensile strength and % elongation) of B420C construction steels by modeling them with statistical methods. It has been determined that carbon, manganese, chromium and sulfur elements have a significant effect on the yield strength, tensile strength and % elongation of B420C construction steels. Because it affects mechanical properties as well, the unit weight and the cooling rate of the product were also added to the list of independent variables in the statistical models. Results obtained indicate that the effects of these elements on the above mentioned mechanical properties can be predicted in a way that is compatible with the results obtained by experimental methods. Using the models developed in this study; it has been found that yield strength, tensile strength and % elongation values of B420C construction steels produced using scrap obtained from various different sources and thus having different chemical compositions can be predicted in compliance with the relevant standard and without performing experimental tests. Thus reducing production costs.

**Keywords:** *Low Alloy Steels, Statistical Analysis, Mechanical Properties, Composition*

## TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezimin şekillenerek bugünkü haline gelmesinde büyük desteği olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren değerli Prof. Dr. Gürsoy ARSLAN'a, Prof. Dr. Yeliz MERT KANTAR'a ve Dr. Öğr. Üyesi İsmail YENİLMEZ'e,

Yüksek lisans tezim süresince ortak bir çalışma yapmama ve alanında uzman olan değerli çalışanları ile fikir alışverişinde bulunmama olanak sağlayan BİLECİK DEMİR ÇELİK San. ve Tic. AŞ'ye,

Tezin olgunlaşması, ön çalışmalarının yapılması ve sonrasında her zaman rahat bir çalışma ortamı sağlayan Bilecik Demir Çelik San. ve Tic. A.Ş. Genel Müdürü Sn. Muammer BİLGİÇ'e,

Birlikte çalışmaktan zevk aldığım ve desteklerini her zaman hissettiğim çalışma arkadaşlarım Bilecik Demir Çelik çalışanlarına,

Ailem oldukları için gurur duyduğum, bugüne gelmemde çok büyük emekleri olan, bana her zaman inanan, güvenen ve destekleyen eşime, anneme, babama ve kardeşime teşekkür ederim.

Aytuğ KARAMEŞE

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmanın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Aytuğ KARAMEŞE

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI .....	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI.....	III
ÖZET .....	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR .....	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER .....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Araştırmanın Amacı .....	3
1.2. Araştırmanın Önemi.....	5
1.3. Araştırmanın Yöntemi.....	6
2. ÇELİK.....	7
2.1. Alaşimsız Çelikler.....	7
2.2. Alaşımlı Çelikler .....	7
2.2.1. Alaşım elementlerinin düşük alaşımli çelikler üzerine etkileri ve karbon eşdeğeri.....	8
2.2.1.1. Mangan (Mn) etkisi .....	8
2.2.1.2. Krom (Cr) etkisi .....	9
2.2.1.3. Kükürt (S) etkisi.....	9
2.2.1.4. Karbon eşdeğeri .....	9
2.3. Düşük Karbonlu Çeliklerde Faz Yapıları.....	10
2.4. Yapı Çelikleri.....	11
2.4.1. Yapı çeliğinin sağladığı avantajlar .....	13
2.4.2. Yapı çeliklerinin mekanik özellikleri .....	14
3. İSTATİSTİKSEL ANALİZ YÖNTEMLERİ.....	16
3.1. Regresyon Analizi.....	16
3.1.1. Basit regresyon yöntemi.....	17

3.1.2. Çoklu regresyon yöntemi.....	17
3.1.2.1. Çoklu regresyon istatistikî göstergeleri.....	18
3.2. Makine Öğrenmesi.....	18
3.2.1. Yapay sinir ağı yöntemi (YSA).....	18
3.2.1.1. Çok katmanlı algılayıcılar yöntemi (ÇKA).....	18
3.2.1.2. Genelleştirilmiş regresyon sinir ağı yöntemi (GRSA).....	20
3.2.1.3. Uzun – kısa süreli bellek yöntemi (UKSB).....	20
3.2.1.4. Geçitli tekrarlayan birim yöntemi (GTB).....	21
3.3. Diğer İstatistiksel Yöntemler.....	22
3.3.1. Z Skor Yöntemi.....	22
3.3.2. Kök Ortalama Kare Hatası Yöntemi (KOKH).....	23
4. B420C İNŞAAT ÇELİĞİ ÜRETİMİ.....	24
4.1. İndüksiyon Ocağı ile Sıvı Çelik Üretimi.....	24
4.2. Pota Ocağı ve İkincil Metalürjik İşlemler.....	26
4.3. Sürekli Döküm Makinesi ve Yarı Ürün Üretimi.....	27
4.4. Haddehane ve B420C İnşaat Çeliğı Üretimi.....	28
4.4.1. Haddehane Ürün Soğutma Süreci.....	30
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	32
5.1. Veri Kümesinin Seçilmesi.....	32
5.2. Regresyon analizi veri çıktıları.....	38
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	40
6.1. Regresyon Analizi Sonuçları.....	40
6.1.1. Regresyon analizi çıktılarının doğrulanması.....	42
6.1.1.1. Regresyon analizi çıktılarının makine öğrenmesi yöntemleri ile doğrulanması.....	42
6.1.1.2. Regresyon analizi çıktılarının kök ortalama kare hatası yöntemi ile doğrulanması.....	43
6.2. Modelleme Uygulamasının Verilerinin Metalürjik Bulgular Işığında İncelenmesi.....	44
6.2.1. Akma ve çekme dayanımı.....	44
6.2.2. Yüzde uzama miktarı.....	45
7. GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	47
7.1. Genel Değerlendirme.....	47

7.2. Öneriler .....	50
KAYNAKÇA.....	51
ÖZGEÇMİŞ	



## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1.</b> İnşaat Yapı Çeliklerinin Mekanik Sınıflandırması [3] .....	12
<b>Tablo 5.1.</b> Veri kümesinde kullanılacak değişkenlerin alt ve üst sınırları .....	32
<b>Tablo 5.2.</b> Üretilen B420C çeliklerin akma dayanımına ilişkin geliştirilen regresyon analiz modelindeki $R^2$ değeri .....	38
<b>Tablo 5.3.</b> Üretilen B420C çeliklerin çekme dayanımına ilişkin geliştirilen regresyon analiz modelindeki $R^2$ değeri .....	38
<b>Tablo 5.4.</b> Üretilen B420C çeliklerin % uzama değerine ilişkin geliştirilen regresyon analiz modelindeki $R^2$ değeri .....	38
<b>Tablo 5.5.</b> Üretilen B420C çeliklerin akma dayanımına ilişkin geliştirilen regresyon analiz modelindeki katsayı ve p-değerleri .....	39
<b>Tablo 5.6.</b> Üretilen B420C çeliklerin çekme dayanımına ilişkin geliştirilen regresyon analiz modelindeki katsayı ve p-değerleri .....	39
<b>Tablo 5.7.</b> Üretilen B420C çeliklerin % uzama miktarına ilişkin geliştirilen regresyon analiz modelindeki katsayı ve p-değerleri .....	39
<b>Tablo 6.1.</b> 2022 yılında üretilen B420C çeliklerin akma dayanımı değerlerine ilişkin makine öğrenmesi modelleme sonuçları .....	42
<b>Tablo 6.2.</b> 2022 yılında üretilen B420C çeliklerin çekme dayanımı değerlerine ilişkin makine öğrenmesi modelleme sonuçları .....	42
<b>Tablo 6.3.</b> 2022 yılında üretilen B420C çeliklerin % uzama değerlerine ilişkin makine öğrenmesi modelleme sonuçları .....	43
<b>Tablo 6.4.</b> 2023 yılında üretilen B420C çeliklerin akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama miktarına ilişkin modelleme ve mekanik test sonuçlarının ortalama ve standart sapma değerlerinin karşılaştırılması .....	43
<b>Tablo 6.5.</b> 2023 yılında üretilen B420C çelikleri akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama miktarına ilişkin kök ortalama kare hatası değerlerinin karşılaştırılması .....	43

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

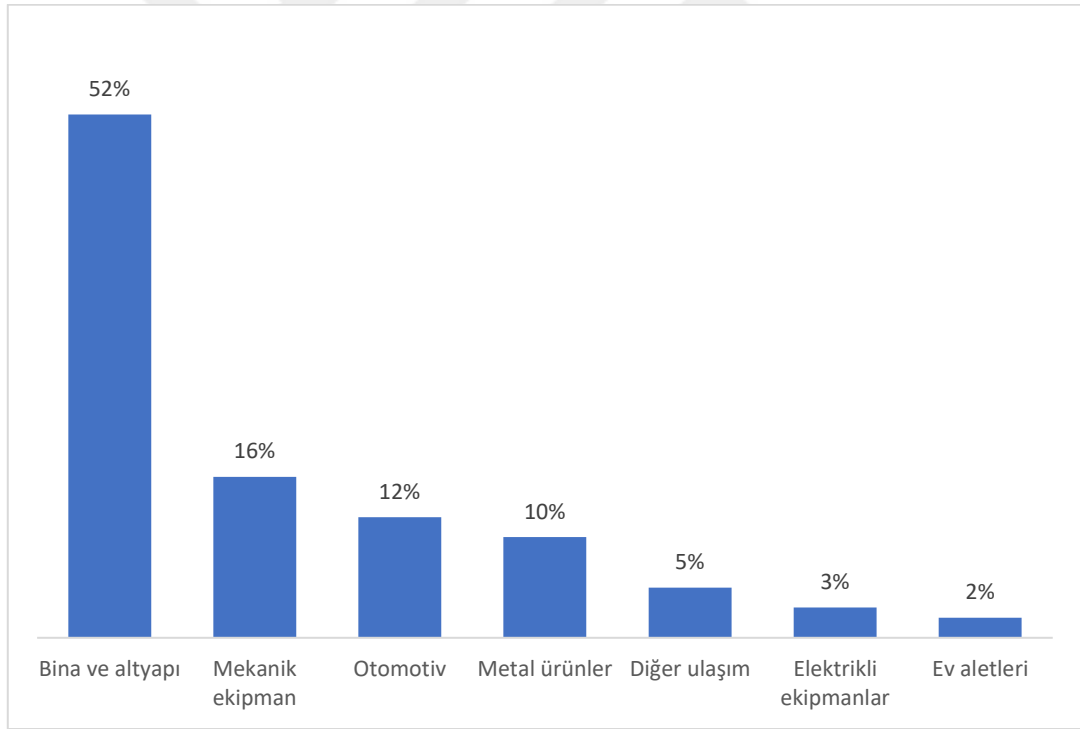
Şekil 1.1. Dünyada çelik tüketiminin sektörlere göre dağılımı (http-1).....	1
Şekil 2.1. Yarı kararlı demir – sementit denge faz diyagramı [10] .....	10
Şekil 2.2. Ötektoid altı çelikler için sıcaklık – süre – dönüşüm diyagramı [11] .....	11
Şekil 2.3. Yüzeylerine göre inşaat çelikleri [3] .....	12
Şekil 2.4. Düşük alaşımlı bir yapı çeliğinin gerilme – gerinme grafiği [13] .....	15
Şekil 3.1. Regresyon analizi sınıflandırma [24] .....	16
Şekil 3.2. Sinir ağının mimarisi [21] .....	19
Şekil 3.3. ÇKA'nın çalışma algoritması [21] .....	19
Şekil 3.4. GRSA'nın çalışma algoritması [22] .....	20
Şekil 3.5. GRSA – UKSB çalışma algoritmaları karşılaştırması [24].....	21
Şekil 3.6. GRSA – GTB çalışma algoritmaları karşılaştırması [25] .....	21
Şekil 3.7. Z skor yöntemi ile sapkın değerlerin tespiti [27] .....	22
Şekil 3.8. KOKH hesaplamasının grafik üzerinde gösterimi [28].....	23
Şekil 4.1. İndüksiyon ocaklı demir çelik fabrikasındaki üretim süreci .....	24
Şekil 4.2. İndüksiyon ocağı gösterimi [29].....	25
Şekil 4.3. Pota ocağının şematik gösterimi [30].....	26
Şekil 4.4. Sürekli döküm makinesinin şematik gösterimi [31].....	27
Şekil 4.5. Haddehanenin şekilsel gösterimi.....	28
Şekil 4.6. İtmeli tip tav fırını [32].....	29
Şekil 4.7. Haddehane soğuma grafikleri ve faz oluşumu [33].....	31
Şekil 5.1. 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerdeki %C dağılımı .....	33
Şekil 5.2. 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerdeki %Mn dağılımı .....	33
Şekil 5.3. 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerdeki %S dağılımı.....	34
Şekil 5.4. 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerdeki %Cr dağılımı .....	34

<b>Şekil 5.5.</b> 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerinin birim ağırlık dağılımı.....	35
<b>Şekil 5.6.</b> 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerin soğutulmasında kullanılan suyun su debisi dağılımı .....	35
<b>Şekil 5.7.</b> 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerin akma dayanımı dağılımı.....	36
<b>Şekil 5.8.</b> 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerin çekme dayanımı dağılımı...	37
<b>Şekil 5.9.</b> 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerin % uzama dağılımı .....	37
<b>Şekil 6.1.</b> Doğrusal regresyon analizi modelinin çıktısı ile akma dayanımı testlerinden elde edilen deneysel sonuçların karşılaştırılması sonucu elde edilen Akma Dayanımı Normal Sapma Grafiği .....	40
<b>Şekil 6.2.</b> Doğrusal regresyon analizi modelinin çıktısı ile çekme dayanımı testlerinden elde edilen deneysel sonuçların karşılaştırılması sonucu elde edilen Çekme Dayanımı Normal Sapma Grafiği.....	41
<b>Şekil 6.3.</b> Doğrusal regresyon analizi modelinin çıktısı ile % uzama testlerinden elde edilen deneysel sonuçların karşılaştırılması sonucu elde edilen % Uzama Normal Sapma Grafiği .....	41
<b>Şekil 6.4.</b> Alaşım elementlerinin faz dönüşümleri üzerindeki etkilerinin şematik gösterimi [34] .....	45

## 1. GİRİŞ

Artan nüfusun gerekliliklerine paralel olarak demir-çelik sektöründeki üretim de hızlı bir artış göstermiştir. Dahası, üretim hızının önümüzdeki yıllarda artmaya devam etmesi öngörülmektedir. Dünyada tüketilen çelik miktarının yarısından fazlası ise inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Çelik tüketim oranlarının yüksek olduğu diğer sektörler otomotiv, makine-donanım ve petrol-doğalgaz olarak sıralanabilir [1].

Küresel ölçüde olduğu gibi yurtiçinde de çelik tüketim talebi ağırlıklı olarak inşaat sektöründen gelmektedir. Örneğin 2022 yılındaki dünyadaki toplam tüketiminin %52'si inşaat sektörüne aittir (Şekil 1.1). Uzun çelik kategorisindeki ürünlerin tamamına yakını yine inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Ayrıca yapı kalitelerinde yapılan değişimler sonucunda yassı çelik ürünleri de inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (http-1).



Şekil 1.1. Dünyada çelik tüketiminin sektörlere göre dağılımı (http-1)

Dünyada ve Türkiye’de üretim ve kullanım oranı çok yüksek olan inşaat çeliklerinin gerek üretim maliyetlerinin düşürülmesi gerekse ilgili mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların artırılması gerekmektedir.

Yapı çeliği üretiminde maliyeti en çok etkileyen girdi olan hurda, üretim süreci ve ürün kalitesi bakımından çok önemli rol oynamaktadır. Öte yandan; yaşam alanlarında ve sanayilerde atık olarak çıkan hurdanın geri kazanımı, çevre ve doğaya verilen zararın azaltılması ile giderek azalan ancak artan hızla tüketilen hammadde kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı bakımından çok önemlidir. Bu nedenlerle tüm hurda türlerinin çeşitli geri kazanım yöntemleri kullanılarak defaten kullanılabilmesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Hurda kullanımında en önemli sınırlayıcı etken hurdanın, çeşitlerine göre, içeriğindeki metalik element miktarlarının birbirinden çok farklı olması ve Türkiye’de oluşturulmuş olan hurdacılık geleneği gereğince sınıflandırma işleminin zor olmasıdır. Etkin bir sınıflandırmanın yapılabilmesi için çok geniş depolama alanları ile çok sayıda iş gücünün temin edilmesi ve maliyetli karakterizasyon test işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Etkin hurda sınıflandırma süreci yüksek maliyetli ve çeşitli teknik zorlukları olan bir süreçtir. Ayrıca bu işlemi tabana yaymak için günümüzde nitelikli bir altyapı bulunmamaktadır. Bu nedenle bu işlem birçok işletmede uygulanmamaktadır.

Sınıflandırılmamış hurda içindeki alaşım elementlerinin cinsi ve miktarı nihai ürünün mekanik özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Bu sebepten dolayı, nihai üründe hedeflenen kimyasal bileşimi sağlayabilmek için hurdanın cinsi önem kazanmaktadır. Bu amaçla işletmeler farklı üretim yöntemleri uygulamak ya da seçkin ve yüksek maliyetli hurda kullanmak zorunda kalmaktadır. Her iki durumda üretim maliyeti artmaktadır.

Her ne kadar özel seçim hurdalar tercih edilse de hurda karışımların kimyasal kompozisyonlara göre sınıflandırması için altyapılar yetersizdir; dolayısıyla üretim için temin edilen hurdalardan kaynaklı, hurdanın cinsine göre, belirli elementler belirlenen oransal miktardan farklı değerler içerebilmektedir. Belirlenen miktar aralığının altında olması durumunda cevher ilaveleri ile çözüm üretilebilmektedir. Ancak element miktarlarının belirlenen miktar aralığından yüksek olması durumunda süreç uzamaktadır. Element miktarlarının belirlenen aralığın üzerinde geldiğinin tespiti ancak sıvı çeliğin üretimi sonrasında analiz edilebilmektedir. Bu aşamada sadece ikincil metalürjik işlemlerin kullanılması ile belirlenen kimyasal element miktarı aralıkları elde edilebilmektedir. Bu ikincil metalürjik işlemlerin temelini; istenilen aralığa düşürülmek istenen elementin, farklı dışarıdan ilave edilen bir element ile bileşik oluşturulması sonucunda metalik olmayan farklı yapı olarak sıvı çelikten uzaklaştırılması oluşturmaktadır. En çok kullanılan yöntem ise sıvı çeliğe oksijen elementi ilavesidir.

Oksijen; serbest enerji değişimleri esası ile elik içerisindeki elementler ile bağ yapmaktadır. Oksijen ile bağlanan elementler, oksitli bileşikler oluşturmaktadır. Oksitli bileşikler sıvı çelikten farklı bir yapıya dönüşmesi sonucunda özkütle farkı oluşmaktadır. Sıvı çeliğe göre daha düşük özkütleyle ulaşan oksitli bileşikler zamanla sıvı çeliğin yüzeyine çıkarlar. Sıvı elik üzerinde oluşturulan oksitli bileşiklerden oluşan yapı tümüyle cüruf olarak adlandırılır. Cüruf, işletmelerin ekipman altyapılarına göre farklı fiziksel yöntemler ile atık olarak uzaklaştırılır. İkincil metalürjide oksit ile element uzaklaştırma yöntemini kontrol etmek zordur. Bu sebeple çoğunlukla sıvı elik içerisindeki birçok element, elik içerisinde ihtivası istendiği halde, serbest enerji değişimleri esası nedeniyle oksitlenerek cüruf olarak uzaklaşmaktadır. Daha sonraki süreçlerde sıvı elik içerisinden oksitlenerek cüruf içerisine aktarılan bu elementler cevher olarak ek alım maliyeti getirmektedir. Ayrıca bu ilave süreçleri üretim süresini ve enerji maliyetlerini arttıran yeni işlemlerdir ve çeşitli ek kayıplar meydana getirmektedir. Sonuç olarak; sıvı elik üretiminin ilk aşamasından sonuna kadar sürecin öngörüler altında yönetilebilmesi son derece önemlidir.

Nihai ürünün mekanik özelliklerini koruyarak, daha geniş kimyasal kompozisyon aralıklarında çalışma sağlanması, anlatılan tüm bu maliyetlerin azaltılmasını ve üretim zorluklarının asgari düzeye indirilmesini sağlayabilir. Elementlerin tek başlarına mekanik özellikler üzerin etkileri ile ilgili literatür çalışmaları yaygındır; ancak birden fazla elementin mekanik özellikler üzerine sinerjik etkisi söz konusu olduğunda kimyasal kompozisyon ile mekanik özellikler arasındaki ilişki çok daha karmaşık hale gelmektedir. Bu ilişkinin matematiksel olarak analiz edilebilmesi durumunda, belirlenecek kimyasal element aralıkları genişletilebilir. Bu sayede, birçok metalik hurda cinsinin etkin sınıflandırma yapılmasına gerek duyulmadan kullanılabilir hale getirilme potansiyeli bulunmaktadır.

### **1.1. Araştırmanın Amacı**

Bu araştırmanın amacı, B420C inşaat çeliği üretiminde kullanılan kimyasal elementlerin ferrit matris içindeki tür ve miktarının çeliğin mekanik özelliklerine etkisinin istatistiksel modelleme yöntemleri kullanılarak belirlenmesidir.

B420C inşaat elikleri Türk Standartları Enstitüsü tarafından sınıflandırılmıştır. Mevcut sınıflandırma ürünün mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri olarak 3 grupta değerlendirilmektedir. B420C inşaat çeliği için TS 708 standardına göre [3] asgari akma

dayanımı 420 MPa, çekme dayanımı ise akma dayanımının 1,15 katı ile 1,35 katı aralığında, uzama miktarı ise asgari %12'dir. Diğer mekanik özellik uygunlukları (bükme testi vb.) standart içerisinde ayrıntılandırılmaktadır. B420C inşaat çeliğinin fiziksel özellikleri ise; ürün çapı, ürün ağırlığı, ürün yoğunluğu ve nervürün geometrik özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. B420C inşaat çeliğinin kimyasal özellikleri (ağ. % cinsinden) ise karbon oranı azami 0,22, kükürt oranı azami 0,05, fosfor oranı azami 0,05, azot oranı azami 0,012, bakır oranı azami 0,5 ve karbon eşdeğeri ( $C_{esd}$ ) azami 0,5 olarak tanımlanmıştır.

Malzemenin mekanik özelliklerine etki eden süreç değişkenlerini iki ana başlıkta toplamak mümkündür. Bunlardan ilki çeliğin kimyasal bileşimini oluşturan başlıca elementler iken diğeri ise üretimin süreç değişkenleridir.

Çeliğin mekanik özelliklerini içyapısı belirlemektedir. Bu açıdan hangi fazların oluştuğu ve oluşan fazların miktarı ya da oranı iyi irdelenmelidir. Kimi zaman hedeflenen fazların dışında ara fazlar ya da istenmeyen katışıklar yapı içinde görülebilmektedir. Oluşan fazların cinsleri ve miktarlarını etkileyen birçok değişken bulunmaktadır. Isıl işlem uygulanan çeliğin içerisinde bulunan kimyasal elementler ve miktarları ile çeliğin soğutma koşulları bunlar arasında en önemli olanlarıdır.

Bu çalışmada verileri kullanılan B420C inşaat çelikleri sıcak haddeleme süreci ile üretilmiştir. Sıcak haddeleme sürecinde tav fırınından çıkan ürüne haddeleme sonunda soğutma işlemi uygulanmaktadır. Kütük (yarı ürün) tav fırını içerisinde 3 saat bekletilmektedir ve sırasıyla 800, 900 ve 1050°C'ye birer saat içinde kademeli olarak ısıtılmaktadır. Tavlama işleminin ardından yarı ürünler haddeleme aşamasından geçmektedir. Ortalama 72 saniye süren haddeleme sürecinde, ürün 18 adet hadde merdanesinden oluşan tezgâh sistemi içerisinde geçirilerek üretilmektedir. Haddeleme sonucunda sıcaklığı 900°C olan ürünler, kabuk kısmındaki sıcaklığı bir saniye içinde 250°C'ye düşecek şekilde su ile soğutulmaktadır.

Nihai ürünün mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen ve kontrol edilebilen ana değişkenler alaşım elementlerinin tür ve miktarı ile ürünün birim ağırlığı ve soğutma koşullarıdır. B420C inşaat çeliğinin kimyasal ve üretim verileri değişkenler analiz edilerek tez çalışması kapsamında uygulanacak istatistiksel modellemelerde bu ana değişkenlerden hangilerinin dikkate alınması gerektiği belirlenmiştir. Bu kapsamda her ürün için aynı olan ve/veya üretim sürecinde değerinin ihmal edilebilir derecede değiştiği

bilinen tav fırınında ısı işlem süreci, ürünün soğutulması sürecindeki giriş ve çıkış sıcaklıkları gibi değişkenler dikkate alınmamıştır.

Buna göre istatistiksel çalışma için sürekli bir değişkenlik içinde olan ve mekanik sonuçları belirleyen faz yapısının oluşmasına ve değişmesine doğrudan etkisi olan kimyasal element çeşitleri ve miktarları ile birim ağırlıklar ve soğuma hızı kullanılmıştır. Soğuma hızı ile ilgili değişkenlerin değerlendirilmesi kapsamında gerek veri bütünlüğü gerekse işletme şartlarında denetimi daha kolay olması nedeniyle, ürün ile temas eden su debisi tercih edilmiştir.

İstatistiksel modelleme çalışmalarının sonucunda her bağımsız ana değişken için bir katsayı belirlenerek ilgili her mekanik özellik için ayrı bir denklemin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Elde edilen denklemler sile B420C inşaat çeliğinin kimyasal bileşimi, birim ağırlığı ve soğutma hızı ile ilgili mekanik özellikleri ilişkilendirilerek, nihai ürünlerin ilgili mekanik özelliklerinin üretim sürecinin erken aşamalarında istatistiksel yöntemlerle tahmin edilebilmesi ve böylece, ihtiyaç duyulması halinde, gerekli müdahalelerin üretim süreci henüz tamamlanmadan, zamanında ve maliyet-etkin bir şekilde yapılabilmesi hedeflenmiştir.

Mekanik sonuçların istatistiksel yöntemlerle doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi sağlanarak, B420C inşaat çeliğinin kimyasal bileşiminde yer alan elementlerin tolerans aralıklarının genişletilmesi ve böylelikle hurdanın kullanılabilir kompozisyon aralığı da genişletilerek gerek üretim süreci gerekse hammadde kaynaklı üretim maliyetlerinin düşürülmesi amaçlanmıştır.

## **1.2. Araştırmanın Önemi**

Elde edilen denklemler sonucunda ilgili kimyasal elementlerin tolere edilebilir derişiklik aralıkları daha geniş olacağı için çelik üretiminde hammadde olarak kullanılabilir hurdanın miktarı ve cinsi bağlamındaki bağlayıcılık azalacaktır. Hâlihazırda tedarik edilmesi ucuz olduğu halde, belirli hurdalar içeriğindeki bazı alaşım elementlerinden dolayı kullanımı tercih edilmemektedir. Bu hurdaların kullanım oranı arttığında ise söz konusu elementlerin çelik içerisindeki miktarlarının azaltılması ciddi üretim kayıplarına neden olmaktadır. Bu hurdalar geri kazanım olarak değerlendirilemediği gibi muhafaza edilmesi hem çevre hem de maliyet açısından ciddi kayıplara neden olmaktadır. Girdi fiyatı yüksek olan bu elementlerin ilgili standardın

öngördüğü mekanik özellikleri sağlayacak şekilde çeliğin bileşiminde alaşım elementi kategorisinde değerlendirilebilmesi ilgili sektör açısından büyük öneme sahiptir.

Alaşım elementlerinin yüksek alaşımlı çeliklerin mekanik özelliklerine etkisini irdeleyen bilimsel çalışmalar literatürde yaygın olmakla birlikte, Türkiye’de ve yurt dışında üretilen çelik miktarının çok büyük bir kısmını oluşturmasına ve yapı sektörünün en önemli girdisi olması rağmen düşük alaşımlı inşaat çeliğinin bileşiminde yer alan alaşım elementlerinin ve safsızlıkların bu çeliklerin mekanik özelliklerine etkisini inceleyen bilimsel çalışmalar sınırlıdır. Büyük ekonomik hareketliliğe ve istihdama sahip olan yapı sektörü için maliyet ve kalite kategorisinde yürütülen çalışmalar önem arz etmektedir.

### **1.3. Araştırmanın Yöntemi**

TS708 standardı inşaat çeliklerinin mekanik özelliklerini güvence altına almak için ilgili değerlerine bazı kısıtlar getirmiştir. Bu kapsamda yapı çeliklerinin özellikle akma ve çekme dayanımları ile yüzde uzama değerleri önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, değerlerine standart tarafından sınır getirilen ilgili mekanik özelliklerin çeliğin kimyasal bileşimi ile ilişkisi değerlendirilmiştir. Çeliğin bileşimini oluşturan elementler ve üretim süreciyle ilgili her bağımsız değişkenin çeliğin ilgili mekanik özelliklerinin değerleri üzerinde etkisinin bulunması ve bu etkilere bağlı katsayılar oluşturularak bu mekanik özelliklere ilişkin değerlerin istatistiksel modelleme yöntemleriyle doğru bir şekilde hesaplanabilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla çalışmada, çoklu değişkenler arasındaki ilişkileri ölçmek için regresyon analizi yöntemi kullanılmıştır. Regresyon analizinin bu ilişkileri açıklayabilirliği makine öğrenmesi yöntemleri ile değerlendirilmiş ve ilgili istatistiksel göstergeler ile doğrulanmıştır.

Araştırmanın ilk aşamasında düşük karbonlu inşaat çeliklerinin mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkisi olan kimyasal elementler belirlenmiştir. Belirlenen kimyasal elementlerin tür ve miktarları haricinde ürünün birim ağırlığı ve ürünlerin soğutması için kullanılan suyun debisinden oluşan bağımsız değişkenler ile ürünün ilgili mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler, yukarıda belirtilen yöntemler ile belirlenmiştir. İstatistiksel analizlerde Minitab, Microsoft Office Excel ve Python programları kullanılmıştır. Tüm bağımsız değişkenler belirlendikten sonra regresyon analizi yöntemi ile bu bağımsız değişkenler ile ilgili mekanik özellikler arasındaki ilişki modellenmiş ve modelin doğruluğu güncel üretim verileri ile sınanmıştır.

## 2. ÇELİK

Ham demirin özelliklerinin iyileştirilmesi için farklı ısı işlemler ile yapı içerisine farklı elementlerinin ilavesi sonucunda çelik elde edilmektedir. Çeliğin tanımlanmasında kullanılan en önemli element olan karbon, çeliğin sınıflandırılmasında da kullanılır. Karbonun yanı sıra birçok farklı element de alaşım olarak çelik içerisinde kullanılmaktadır. Hedeflenen çelik özelliğine göre alaşım elementlerinin cinsleri ve miktarları farklılık göstermektedir.

### 2.1. Alaşimsız Çelikler

Alaşimsız çelikler, yapılarında az miktarda elementler bulunduran demir - karbon alaşımlarıdır. Yapısında içerdikleri element miktarına göre mekanik özellikleri değişmektedir. Alaşimsız çeliklerin şekillendirmesi kolaydır. Yapılarındaki karbon oranlarına göre alaşimsız çelikler 3 sınıfta incelenmektedir [4]:

- Düşük karbonlu çelikler: %0,05 – 0,3 karbon içerir.
- Orta karbonlu çelikler: %0,3 – 0,8 karbon içerir.
- Yüksek karbonlu çelikler: %0,8 – 1,7 karbon içerir.

Alaşimsız çeliklerde uygulanacak işlemler içerdikleri karbon oranlarına göre sınırlamalar getirmektedir. Örneğin düşük karbonlu çeliklerde ürünün tümüne sertleştirme işlemi uygulanmaz, bunun yerine ürün yüzeyinde sertleştirme yapılır. Orta karbonlu çeliklerde ise ısı işlem kullanımı yaygındır ve böylece dayanımlarında iyileştirmeler yapılabilir. Yüksek karbonlu çeliklerde işlem uygulanabilmesi için yeterli süneklik yoktur.

### 2.2. Alaşımli Çelikler

Alaşımli çelikler, belirli çelik özelliklerinin etkinliğinin artırılmasının istendiği durumlarda kullanılmaktadır. Bu nedenle alaşimsız çeliklere nikel, krom, molibden, mangan, silisyum, volfram, vanadyum ve bazen de kobalt, bakır ve kurşun alaşım elementleri eklenerek alaşımli çelikler üretilir.

Alaşımli bir çelikte elementlerinin dağılımı ve oluşturdıkları yapılar çeliğin bileşimine göre değişmektedir. Bu elementlerin sayısı ve miktarı arttırıldığında çelik içerisinde etkileşimler ve bunun sonucundaki oluşumlar çok karmaşık olabilmektedir.

Alaşımşız çeliğe üçüncü bir element katıldığında, Fe-Fe<sub>3</sub>C faz diyagramındaki kritik sıcaklıklar, ötektik noktanın konumu ve bazı faz bölgelerinin ( $\alpha$  ve  $\gamma$ ) sınırları değişir. Örnek olarak mangan ve nikel eklentisi, östenit - ferrit dönüşüm sıcaklığını düşürürken molibden, alüminyum, silis, tungsten ve vanadyum elementleri bu sıcaklık değerini yükseltir. Yüksek oranlardaki nikel ve mangan katkısı östenit – ferrit dönüşüm sıcaklığını düşürerek, yavaş soğuma sırasında östenit dönüşümünü önleyebilir. Bu nedenle, nikel ve mangana östeniti stabilize edici elementler adı verilir. Bu elementler sayesinde östenit fazı oda sıcaklığında korunup kararlı duruma getirilebilir. Östenit - ferrit dönüşüm sıcaklığının düşmesi veya yükselmesi, çeliğin son faz yapısının ve üretim süreçlerinin değişmesine neden olur. Alaşım elementlerinin çeliğin fiziksel ve mekanik özelliklerine bazı olumlu etkileri ve üretim sürecindeki sağladığı katkılar sebebiyle kullanılması gerekebilmektedir. Çeliğin son hâlinin istenilen özelliklere sahip olabilmesi için karbon dışında diğer alaşım elementleri ile bir kombinasyon yapılarak; hem istenilen faz yapısı ve sağladığı özellikler, hem de diğer alaşım elementlerin sağladığı özellikler bir arada kullanılabilir.

### **2.2.1. Alaşım elementlerinin düşük alaşımli çelikler üzerine etkileri ve karbon eşdeğeri**

Her ne kadar çelik Fe-C alaşımı olarak tanımlansa da araştırmalar göstermiştir ki diğer elementlerin faz oluşumu üzerinde etkisi C kadar önemlidir.

#### **2.2.1.1. Mangan (Mn) etkisi**

Manganın çeliğin sertliği üzerinde önemli bir etkisi vardır. %1 mangan ilavesi ile çelikte 32 MPa civarında bir akma dayanımı artışı sağlanabilir. Çelik içerisinde mangan artışı çeliğin düşük sıcaklıkta süneklikten gevrekliğe geçiş sıcaklığını her 10 MPa için 3°C azaltmaktadır [5].

Çelikte kırılma dayanımı arttıran mangan, östenit fazından ferrit fazına geçiş sıcaklığını düşürerek tanelerin çözümlenmesine neden olduğu için alaşım elementi olarak sıklıkla kullanılmaktadır [6].

Sıcak haddeleme yöntemi ile üretilen metallerde işletme diliyle kızıl kırılmalık olarak bilinen kükürt kaynaklı metalin gevrek kırılmasına neden olan Demir-Sülfat (FeS) oluşumu manganın kükürt ile bağlanması sonucu azaltılmaktadır.

#### **2.2.1.2. Krom (Cr) etkisi**

Krom ferrit fazını dengede tutmaktadır, ancak bunun yanında faz dönüşüm hızını düşürmektedir. Böylece düşük alaşımlı çeliklerde sertlik ve mukavemet artışı sağlar. Özellikle düşük mangan konsantrasyonlarında çok daha fazla etki göstermektedir [7].

Krom miktarının artışı katı çözeltili sertleşmesine ve karbür oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca çelik içerisindeki krom miktarındaki artış ile oksitlenme ve kimyasal korozyona karşı dayanım da artmaktadır [6].

#### **2.2.1.3. Kükürt (S) etkisi**

Düşük alaşımlı çeliklerde kükürt istenmeyen elementtir. Bunun sebebi kükürt miktarının çelik içerisinde artışı ile çeliğin tokluğunda bir düşüşe neden olması gösterilebilir. Çatlak ilerlemesine ve kırılmalara neden olur. Sünek – gevrek geçiş sıcaklığını arttırır [8].

Kükürt artışı ile tane sınırlarında ya da ferrit içerisinde oluşabilecek sülfür inklüzyonları artmaktadır. Böylece çelikte mukavemet düşüşüne neden olmaktadır.

#### **2.2.1.4. Karbon eşdeğeri**

Diğer birçok çelikte olduğu gibi karbon, çeliğin sertliği ve mukavemeti üzerinde en çok etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Diğer hiçbir alaşım elementi çelik içerisinde bulunmasa bile karbon tek başına çeliğin sertliğini ve mukavemetini direkt ve ciddi olarak bölgesel bir şekilde arttırabilmektedir.

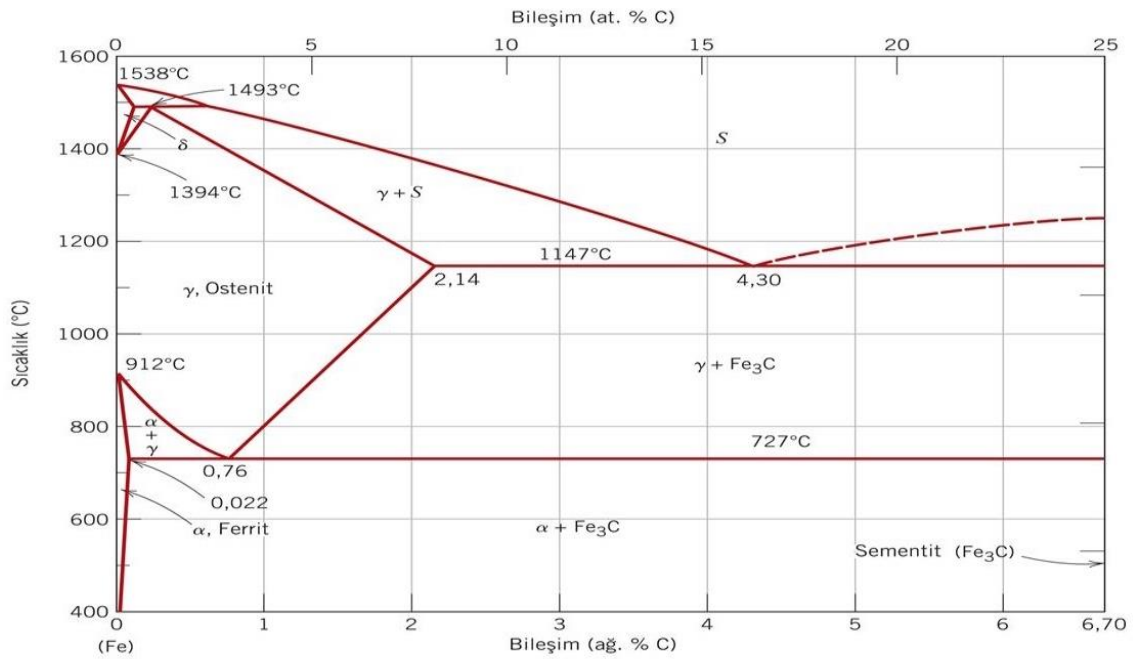
Tüm bunlar ile diğer alaşım elementleri de çelik içerisine ilave edildiğinde karbon dışında kalan elementlerin de çeliğin mukavemeti üzerine etkisi bulunacaktır. Bu etkiyi sayısal bir veriye dönüştürerek değerlendirmek için karbon eşdeğeri formülü kullanılmaktadır [9].

Birçok karbon eşdeğeri formülü olmasına karşın en çok kullanılan ve düşük alaşımlı çeliklerdeki sertlik ve mukavemet artışını en iyi ifade eden formül Denklem 2.1'de görülmektedir [9].

$$\text{Karbon Eşdeğeri: } \%C + \left(\frac{\%Mn}{6}\right) + \left(\frac{\%Cu+\%Ni}{15}\right) + \left(\frac{\%Cr+\%Mo+\%V}{5}\right) \quad (2.1)$$

### 2.3. Düşük Karbonlu Çeliklerde Faz Yapıları

Çeliklerde faz yapıları genel olarak Fe-C faz diyagramı üzerinden izah edilmektedir (Şekil 2.1). Bu çalışmada değerlendirilen ürünler ötektoid nokta olan ağırlıkça karbon miktarı 0,76 altında kalan ve ferrit fazının maksimum çözebileceği miktar olan 0,022 karbon arasında kalan bölgede bulunmaktadır.

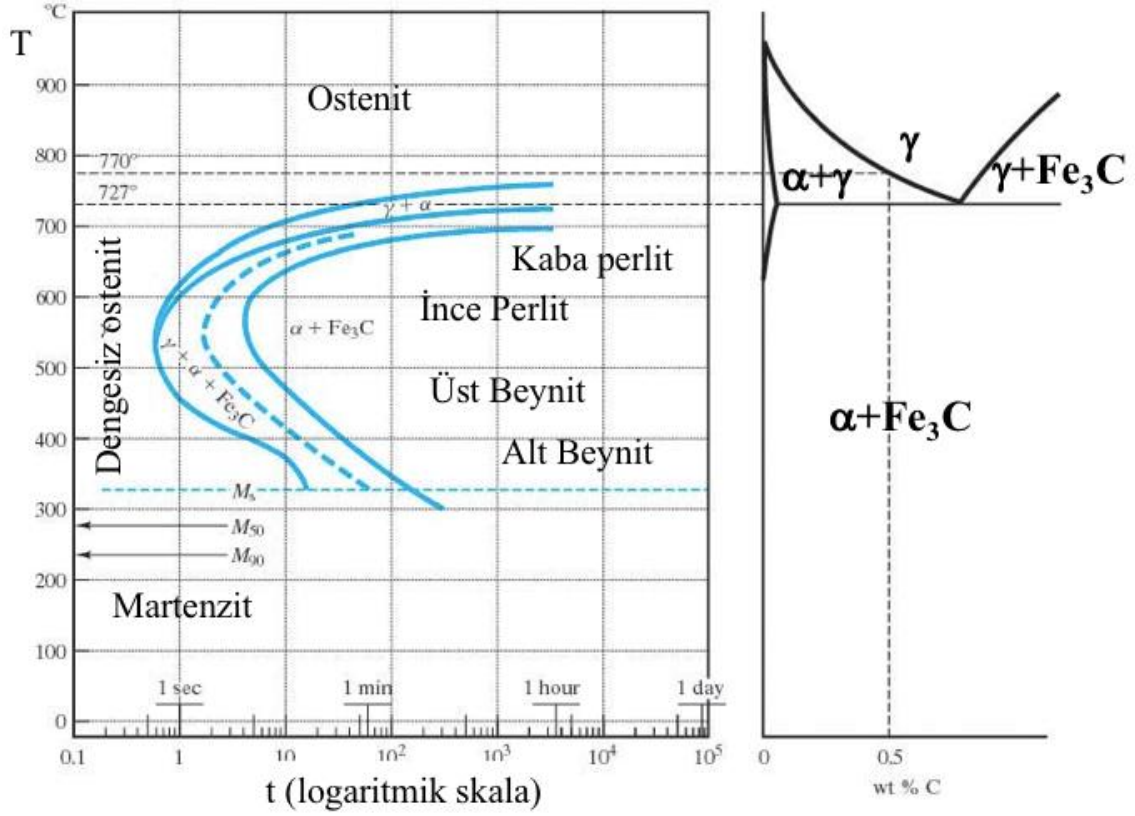


Şekil 2.1. Yarı kararlı demir – sementit denge faz diyagramı [10]

0,022 – 0,76 karbon aralıklarının oluşturduğu bölgede (ötektoid altı); östenit (γ) fazından dönüşüm, dengeli bir soğutma altında, ferrit (α) ve ferrit + sementit (Fe<sub>3</sub>C) formunda perlit fazı şeklindedir. Ancak bazen fazların dönüşüm başlangıç ve bitiş sıcaklıkları ya da dönüşüm için yeterli sürenin olmaması benzeri durumlar altında denge dışı bir soğutma yöntemi gelişmektedir. Bu şartlar altında dönüşüm serbest enerji koşullarını sağlamak için farklı fazlar oluşturmaktadır [10].

Faz yapılarının oluşumları sıcaklık – süre – dönüşüm diyagramları ile yorumlanmaktadır. Şekil 2.2' ötektoid altı çelikler için faz dönüşüm diyagramı görülmektedir. Östenit fazından dönüşüm ilk olarak ferrit oluşumu ile başlamaktadır.

Sıcaklık düşüşü devam etmesiyle birlikte sementit fazı oluşmaktadır. Eğer soğuma hızlı gerçekleşir ve karbonun difüzyonu için yeterli süre tanınmazsa martenzit fazı, izotermal bir soğutma ile beynit fazı oluşacaktır.



Şekil 2.2. Ötektoid altı çelikler için sıcaklık – süre – dönüşüm diyagramı [11]

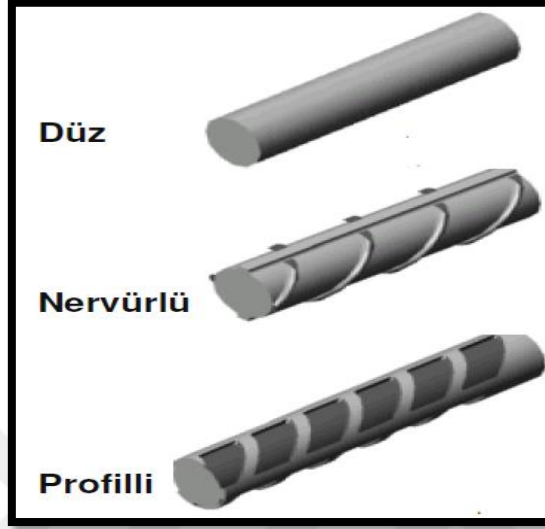
#### 2.4. Yapı Çelikleri

Betonda oluşan çekme kuvvetlerinin şiddeti yükseldikçe beton bu yükleri karşılayamamakta ve çatlamaktadır. Daha yüksek şiddetteki bu kuvvetleri karşılamak ve çatlak ilerlemesini sınırlamak amacıyla çekme bölgelerine çelik çubuklar konulmaktadır.

Ayrıca; sargı donatısı olarak ve bazen basınç kuvveti almak için de çelik çubuklar kullanılmaktadır. Yapı çeliklerine inşaat çeliği, beton çeliği, betonarme çeliği, donatı çeliği denildiği gibi donatı da denilmektedir.

Çelik çubuklar dairesel kesitli olup yüzeyleri düz veya girintili – çıkıntılı olacak şekilde üretilirler. Yüzeyi çıkıntılı olana “nervürlü”, girintili olana profilli çelik denir (Şekil 2.3) [3]. Nervürlü çeliğin dayanımı yüksektir ve beton ile daha iyi kenetlenir. Nervürler bir olta gibi davranarak çeliğin beton içinden sıyrılmasını zorlaştırır. Düz

yüzeyle çeliğin ise dayanımı düşüktür ve beton ile kenetlenmesi iyi değildir; kolayca sıyrılır. Bu nedenle 2007 yılından itibaren kiriş, kolon ve perdelerin uçlarında kullanımı yasaklanmıştır.



Şekil 2.3. Yüzeylerine göre inşaat çelikleri [3]

Yapı çeliklerinin mekanik dayanımına göre sınıflandırılması TS708 [3] standardına göre yapılmaktadır, Tablo 2.1’de görülmektedir.

Tablo 2.1. İnşaat Yapı Çeliklerinin Mekanik Sınıflandırması [3]

Tip	Düz	Nervürlü					Profilli
	Yüzeyle						
Sınıf	S 220	S 420	B 420B	B 420C	B 500B	B 500C	B 500A
Akma dayanımı (en az) $R_e$ (N/mm <sup>2</sup> - MPa)	220	420	420	420	500	500	500
Çekme dayanımı (en az) $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> - MPa)	340	500	-	-	-	-	550
Çekme dayanımı / akma dayanımı oranı $R_m/R_e$	1,20 (en az)	1,15 (en az)	1,08 (en az)	$\geq 1,15$ $< 1,35$	1,08 (en az)	$\geq 1,15$ $< 1,35$	-
Kopma uzaması (en az) $A_5$ (%)	18	10	12	12	12	12	5

Yapı çeliğinde kullanılacak karbon oranı; ürünün sertliğini ve mukavemetini arttırmaktadır. Ancak şekil değiştirme kabiliyetini ve kaynaklanabilirliğini azalttığı için belli bir oranın üstünde olmaması gerekmektedir [4].

#### **2.4.1. Yapı çeliğinin sağladığı avantajlar**

Mimari açıdan üstünlükleri sıralanacak olursa, çelik yapı tasarımı estetik ve yaratıcılığa açıktır. Çeliğin şekil değiştirme olanağı yüksek olduğu için taşıyıcı yapıda çok çeşitli şekillerde kullanılabilir. Yapısal çelik fabrikada çok değişik şekillerde işlenebildiğinden tasarımcılar için sınırsız yaratıcı olanaklar sağlar. Yapıda, doğru hesaplanmak koşuluyla büyütme veya tadilat yapılmak istendiğinde kolaylıkla yapılabilir. Sürdürülebilir yapılaşma için gerekli olan yapı malzemesidir. Çelik dünyanın en çok ve %100 olarak geri dönüştürülebilir malzemesidir. Çelik hurda %100 çeliğe dönüşür ve doğru yapılırsa kalite ve güvenilirlik kaybı olmaz. Yapılarda çelik kullanmak tasarımcılar için çevre bilinci fırsatı ve çevreye karşı sorumluluklarını yerine getirme olanağı sağlar. Çelik yapı söküldüğü zaman bile geriye atık malzeme bırakmaz. Yapısal çelik malzemeler, çeşitli kesit ve yüksek dayanımlı çelik kaliteleriyle sınırsız çözüm olanakları, daha az malzeme kullanımı daha az ağırlık sağlar. Bu da en iyi ve en ekonomik çözümün elde edilmesi demektir.

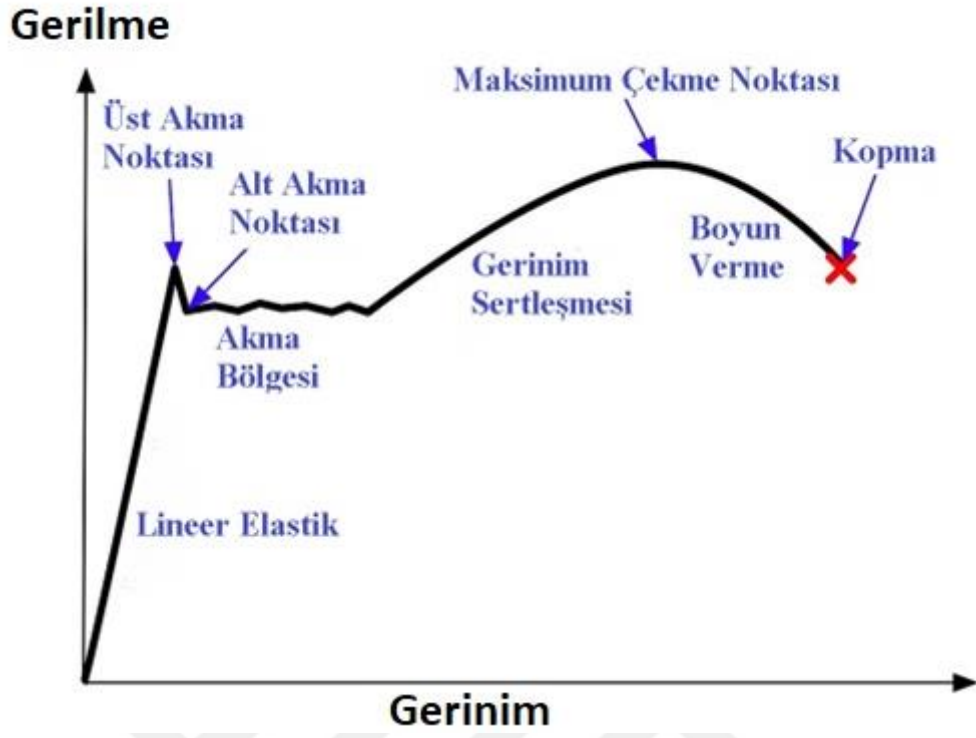
Taşıyıcı sistem yönünden üstünlükleri ise yüksek mukavemetli bir malzeme olan çeliğin öz ağırlığının taşıdığı yüke oranı çok düşüktür, bu da yapıda hafiflik getirmektedir. Böylelikle daha az malzeme kullanılır, yapının çekirdeği %30-40 hafifler, temel maliyetleri yaklaşık %15-25 azalır, daha az taşıma yapılır. Bu da daha düşük yapı maliyeti, daha az çevre aşınması, daha az kirlilik ve daha az toplumsal maliyet demektir. Çelik yapıların ağırlıkları, betonarme yapılara göre %50 daha az olması nedeniyle zayıf zeminlerde çelik yapı yapılması tercih nedenidir. Yapı çeliğinin sünek bir malzeme oluşu ve çelik yapıların hafifliği depreme dayanımlarını artırır. Deprem etkileri altındaki bir yapının enerjisi sönümlendirmesi için, yapı malzemesinin sünek davranışı gereklidir. Çelik taşıyıcı yapı elemanları sünek olduğundan üzerlerine düşen enerjisi çok iyi sönümlerler, bunu yaparken taşıyıcı yeteneklerini ve duyarlılıklarını kaybetmezler. Aynı zamanda deprem etkilerinin kütlelerle, dolayısıyla ağırlıkla orantılı olması nedeniyle, çelik yapıların hafifliği de yapıya etkiyen deprem yüklerini azaltmaktadır [12]. Yapının kullanım ömrü boyunca, çelik malzemenin özellikleri sabittir, boyutlarında küçülme ve

çekme olmaz. Dayanım açısından da korozyon ve yangına karşı gerekli önlemler alınır, işlev ve dayanımından bir şey yitirmez, uzun ömürlüdür.

Uygulama ve inşaat açısından üstünlükleri; çelik taşıyıcı sistem fabrikada, ön-üretimli olarak standart ve yönetmeliklere uygun olarak kontrol edilir ve üretilir. Dolayısıyla çelik taşıyıcılı yapılar endüstriyel kalite güvencesi içerir. Tüm yapısal çelik elemanlar yapım sırasında, yapı bittikten sonra ve yapı kullanılırken görünebilir ve kontrol edilebilir. Üretimde toleranslar mm mertebesinde olduğundan tüm elemanlar kesin ölçüsünde, montaj sorunsuz ve kusuruzdur. Çelik taşıyıcı elemanlar atölyede işlendiğinden, montaj aşamasında hava koşullarından etkilenmezler dolayısıyla inşaat süresi kısalır. Çelik bir yapı, inşaatının daha hızlı olması sonucunda, çok daha erken kullanılabilir duruma gelerek daha erken gelir sağlayabilir. Uygulamada kalıp kullanılmadığından ölü malzeme maliyeti yoktur. Mekanik ve elektrik tesisat kanalları, döşeme iç hacimleri boş olduğundan bu boşluklardan geçirilebilir, böylelikle kat yüksekliğinden kayıp verilmez. Çelik yapıda tesisat bölgelerine kolay ulaşılır, bakım ve yenileme çok kolay yapılır.

#### **2.4.2. Yapı çeliklerinin mekanik özellikleri**

Standart bir düşük alaşımlı çeliğin çekme testi sonucundaki gerilim – gerinim eğrisi Şekil 2.4’te görülmektedir. Akma noktasına ( $\sigma_y$ ) kadar doğrusal bir artış görülür. Akmanın ilk gerçekleştiği bölgeye kadar olan gerilim – gerinim çizgisinin gerinim ile yaptığı açı, çeliğin elastisite modülünü (E) vermektedir. Akma işlemi gerçekleştikten sonra gerilme artmadan uzama hızla artmaktadır, daha sonra eğride yukarıya doğru doğrusallıktan sapan gerilmenin de arttığı bir hareket görülür. Akma anında ölçülen gerilmeye ( $\sigma_y$ ) akma gerilmesi ya da akma dayanımı denilmektedir. Akma noktasından sonraki kısımda pekleşme nedeniyle oluşan gerilme artışının en üst noktasına karşılık gelen gerilmeye çekme gerilmesi ya da çekme dayanımı ( $\sigma_{UTS}$ ) denilmektedir. Çelik çekme dayanımına ulaştıktan sonra hızla uzayarak kopar. Koptuğu andaki birim uzamaya kopma birim uzaması ( $\epsilon_f$ ) denilmektedir [13].

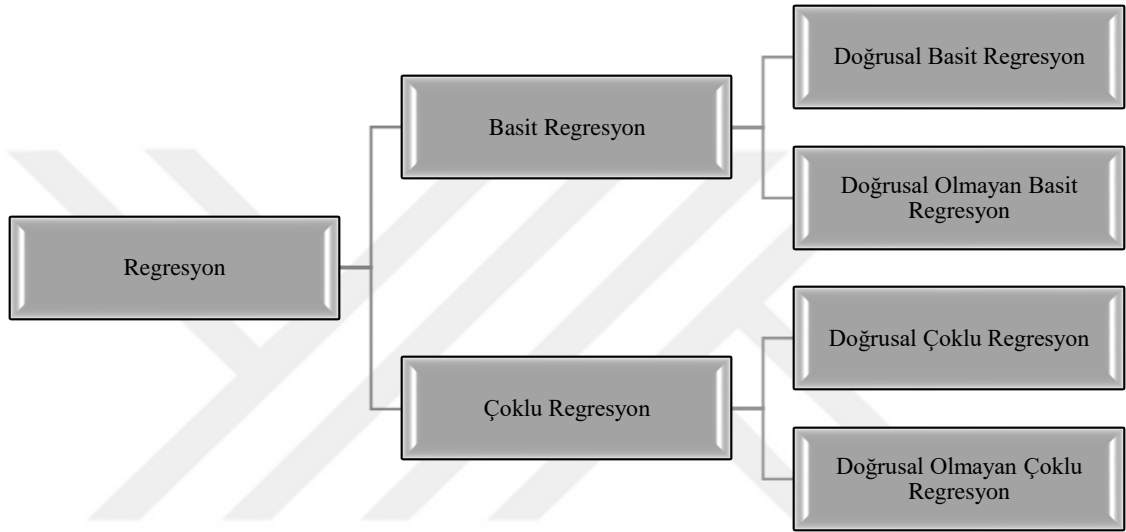


Şekil 2.4. Düşük alaşımlı bir yapı çeliğinin gerilme – gerinme grafiği [13]

### 3. İSTATİSTİKSEL ANALİZ YÖNTEMLERİ

#### 3.1. Regresyon Analizi

Regresyon terimi ilk kez Francis Galton (1886) tarafından kullanılmıştır. Regresyon analizini bir bağımlı değişkenin bir veya birden fazla bağımsız değişken tarafından tahmin edilmesi şeklinde tanımlayabiliriz. Regresyon analizi basit ve çoklu olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 3.1) [14].



Şekil 3.1. Regresyon analizi sınıflandırma [24]

Kurulan regresyon modeli, ilgilenilen probleme ait seçilen gözlem değerleri kullanılarak hesaplanmaya çalışılır. Bu nedenle kurulan modeldeki değerler tahmini değerlerdir.

Tahmin sonrası açıklanmaya çalışılan değerler ile bunu açıklayan değerler şapka (^) ile yazılarak regresyon tahmin modeli elde edilir. Tahmin modelinin kurulmasının ardından tahmin edilen katsayıların güvenilirliği, diğer bir ifadeyle gözlem verilerini temsil etme düzeyi test edilmelidir çünkü bu katsayılar ilgili bağımsız değişkenin bağımlı değişkeni ne oranda açıkladığını gösterir. Tahmin edilen katsayıların ve değişkenlerin hesaplanması için geliştirilen ve gerçek katsayılara en yakın sonuçları veren yöntemlerden bir tanesi en küçük kareler (EKK) yöntemidir. Bir diğer ifade ile regresyon modelindeki hata oranının düzeyinin asgari düzeyde olması EKK yöntemi ile sağlanmaktadır [15].

### 3.1.1. Basit regresyon yöntemi

Basit Regresyon, bağımlı değişkendeki değişmelerin, sadece bir bağımsız değişken tarafından açıklanabildiği durum olup, Denklem 3.1 ile ifade edilir [15].

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + u \quad (3.1)$$

Burada; X bağımsız değişken, Y bağımlı değişken,  $\beta_0$  sabit terim,  $\beta_1$  bağımsız değişken katsayısı, u ise hata terimidir.

### 3.1.2. Çoklu regresyon yöntemi

Bağımsız değişken sayısının birden fazla olduğu regresyon modellerine çoklu regresyon modelleri denir. Çoklu regresyon çözümlemesinde, bir bağımlı değişken ve bu bağımlı değişkeni etkilediği düşünülen birden çok bağımsız değişken söz konusudur. Kısaca, çoklu regresyon analizi, basit doğrusal regresyonun genişletilmiş şekli olarak düşünülebilir. Buna ek olarak ise kısmi korelasyon analizini kullanır (Denklem 3.2).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i + u_i \quad (3.2)$$

Buradaki modele göre Y bağımlı değişkeni,  $X_1, X_2, \dots, X_i$  bağımsız değişkenleri tarafından açıklanmaktadır.  $\beta_0$  sabit katsayı olup  $X_1, X_2, \dots, X_i$  bağımsız değişkenleri sıfır değerini aldığı anda, Y bağımlı değişkeninin alacağı değeri ifade etmektedir. Bağımsız değişkenlerin katsayıları olan  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i$  ise bağımsız değişkenlerdeki artış ya da azalışın Y bağımlı değişkenini hangi ölçüde etkileyeceğini ifade eder. Yani  $X_1$  bağımsız değişkenindeki bir birim artış ya da azalış Y'yi diğer bağımsız değişkenlerin değeri sabitken  $\beta_1$  kadar arttıracak veya azaltacaktır.  $\beta$  katsayılarının işaretleri de değişimin yönünün belirlenmesi açısından önemlidir. Burada  $u_i$  hata terimidir ve değişimin açıklanamayan kısmını ifade eder. Gözlem değerleri ile tahmin değerleri arasındaki farka hata denir. En küçük kareler yöntemi, hataların karelerinin toplamını en aza indirmeyi amaçlar. Gözlem değerleri ile tahmin değerleri arasında bir fark yani hata olması kaçınılmazdır. Başlıca hata nedenleri; ölçüm hataları ve modele dahil edilemeyen nitel değişkenlerin etkileridir [16].

Çoklu regresyon analizini tercih etmenin iki ana amacı olabilir [16]. Bunlardan ilki kolay elde edilebilir bağımsız değişkenler yardımıyla bağımlı değişken değerini hesaplamaktır. Diğer ise bağımsız değişkenlerden hangisinin veya hangilerinin bağımlı değişkeni daha çok etkilediğini belirlemektir.

### 3.1.2.1. Çoklu regresyon istatistikî göstergeleri

Yapılmış olan regresyon analizinin doğrulunun ve tutarlılığının değerlendirilmesinde 7 farklı istatistikî gösterge kullanılabilir. Bu istatistikî göstergelerin gösterimleri ve açıklamaları aşağıdaki gibidir [17].

- **p**: Regresyon katsayılarının anlamlılığına ilişkin p olasılığı. Örneğin, alfa yanılma düzeyi 0,05 alınırsa,  $p < 0,05$  koşulunu sağlayan p değerlerine sahip katsayıların modele katkısının anlamlı olduğu söylenebilmektedir.
- **R**: Çoklu korelasyon katsayısı (Multiple R). Bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki ilişkinin derecesini verir.
- **R<sup>2</sup>**: Çoklu açıklayıcılık katsayısı (R<sup>2</sup>). Çoklu korelasyon katsayısının karesidir. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni ne oranda açıkladığını gösterir. R<sup>2</sup>, 1'e yaklaştıkça modelin uygunluğu artar.  $0 \leq R^2 \leq 1$  ise modelde dışlanan değişken yoktur.

## 3.2. Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi; büyük ölçekli gözlemler içeren sistemler için bilgi edinmeyi ve bütünleştirmeyi sağlayarak bu bilgileri açıklarken önce yeni bilgiler öğrenerek kendini geliştirme ve genişletme beceresi olan sistem olarak ifade edilir [18].

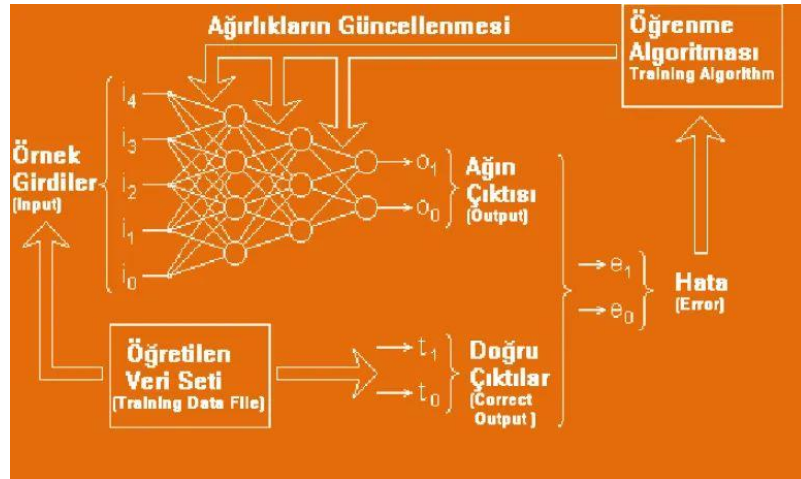
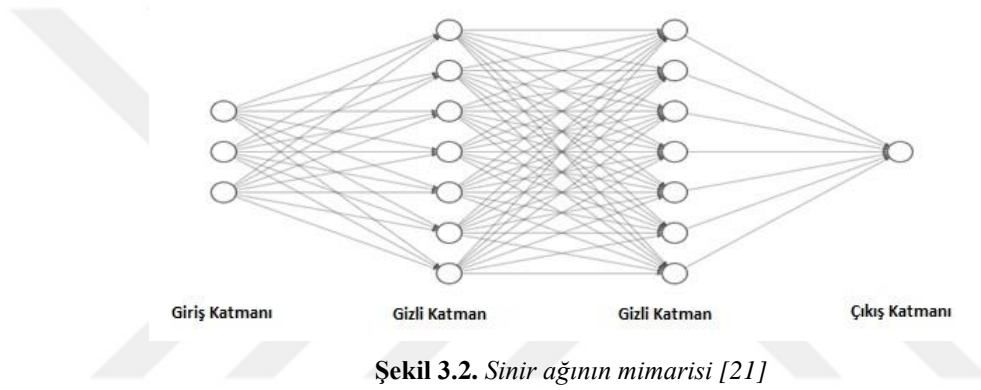
### 3.2.1. Yapay sinir ağı yöntemi (YSA)

Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi, insan beyninin yapısını ve işlevini taklit eden makine öğrenimi yöntemidir. YSA'lar, verileri işleyen ve gönderen yapay nöronlar adı verilen birbirine bağlı düğümlerden oluşur [19]. YSA'ları eğitmek için büyük miktarda veri ve algoritmalar kullanılır. Böylece, nöronlar arasındaki bağlantıların gücü ayarlanarak ağı öğrenmesine ve tahminler veya yargılarda bulunmasına olanak tanınır [19].

#### 3.2.1.1. Çok katmanlı algılayıcılar yöntemi (ÇKA)

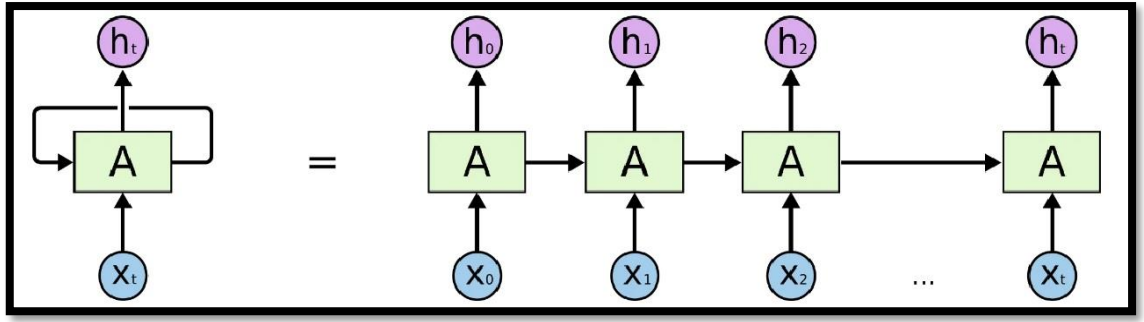
Çok Katmanlı Algılayıcılar (ÇKA) yöntemi, YSA yönteminin bir farklı türüdür. ÇKA, birbirine bağlı düğümlerin veya yapay nöronların birçok katmanından oluşan ileri beslemeli bir sinir ağıdır [20]. Girdi Katmanı girdi verilerini alırken, Gizli Katman doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları ile nöronlar aracılığıyla bilgiyi işler. Çıktı

Katmanı da ağıın tahminlerini hesaplar. Alıştırma sırasında ÇKA, parametrelerin birbirileri ile bağlantılarının modellemeyi açıklamada etki oranlarını hesaplamak ve tahminlerini iyileştirmek için Geri Yayılım adı verilen denetimli bir öğrenme yaklaşımı kullanır [21]. Doğrusal algılayıcılardan farklı olarak, ÇKA'nın çoklu katmanları ve doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları vardır. Bu durum ÇKA'nın verilerdeki doğrusal olarak ayıramayan karmaşık kalıpları tanımlamasına olanak tanır. Üç düğümlü Giriş, yedi düğümlü iki Gizli ve tek düğümlü Çıktı Katmanından oluşan örnek bir sinir ağıının mimarisi ile çalışma algoritması sırasıyla Şekil 3.2'de ve Şekil 3.3'te sunulmuştur [21].



### 3.2.1.2. Genelleştirilmiş regresyon sinir ağı yöntemi (GRSA)

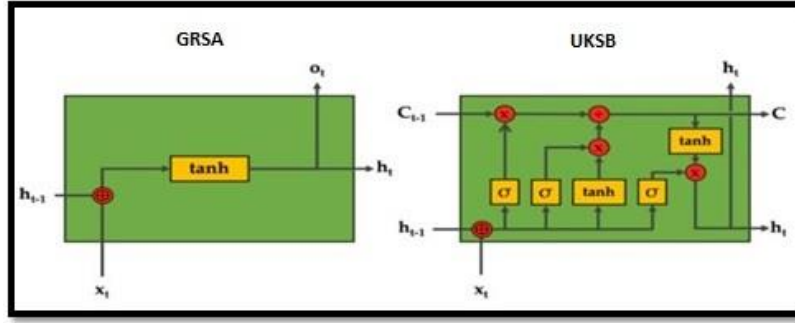
Genelleştirilmiş Regresyon Sinir Ağı (GRSA), Giriş, Gizli ve Çıkış katmanlarından oluşan üç katmanlı ve radyal tabanlı sinir ağıdır. Veriler ve çıktılar arasında sırasıyla ilişki kurulur ve bu kurulan ilişki matematiksel olarak anlamlandırılır [22]. Sistem her bir veriyi sırasıyla analiz etmeye devam eder, ancak farklı olarak bir sonraki veri değerlendirmesine geçerken bir önceki değerlendirmeyi hatırlar ve ilişkiler bütünü kurar [22]. Yapılan çalışmalar GRSA'nın diğer doğrusal olmayan regresyon yaklaşımlarından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir [23]. Çalışma algoritmasının gösterimi Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4. GRSA'nın çalışma algoritması [22]

### 3.2.1.3. Uzun – kısa süreli bellek yöntemi (UKSB)

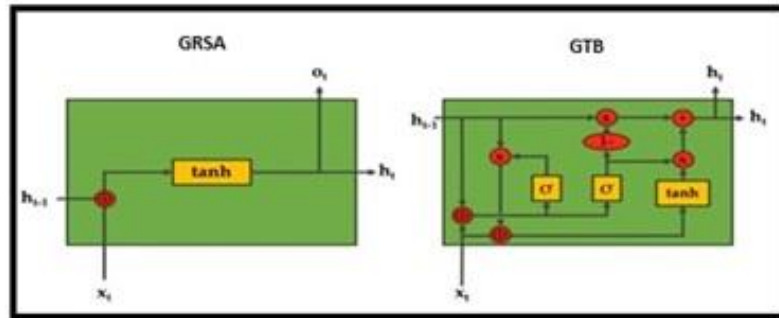
UKSB, düzenli sinir ağı katmanları yerine uzun ve kısa süreli hücre bloklarını kullanan bir tür tekrarlayan sinir ağıdır [24]. UKSB hücreleri, Giriş, Unutma ve Çıkış geçitlerinden oluşur. Giriş, bir tanh etkinleştirme işlevi kullanılarak -1 ile 1 arasında sıkıştırılır. GRSA benzeri veriler ile çıktılar arasında kurulan ilişki bir sonraki veri satırlarına aktarılır; ancak GRSA yönteminden farklı olarak ilişkinin doğruluğu kısa ve uzun veri ağında tekrar sorgulanır. Sistem, uzun veri ağında aktarılan ilişki hikayesini doğrulayamazsa aktarımı durdurur. Doğruladığı ilişki hikayelerini ise aktarmaya devam eder. Böylece veriler arasında bilgi akışının kaybolması önlenir [24]. UKSB çalışma algoritması Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5. GRSA – UKSB çalışma algoritmaları karşılaştırması [24]

#### 3.2.1.4. Geçitli tekrarlayan birim yöntemi (GTB)

Geçitli tekrarlayan birim (GTB) yöntemi, kaybolan gradyan problemini ele alan ve sıralı verilerde uzun vadeli bağımlılıkların daha iyi öğrenilmesini sağlayan bir tür tekrarlayan sinir ağı (TSA) mimarisidir. GTB yöntemleri, ağ içindeki bilgi akışını kontrol etmek için geçiş mekanizmalarını içeren geleneksel TSA yöntemlerinin bir uzantısıdır. GTB algoritması iki ana kapıdan oluşur; Sıfırlama Kapısı ve Güncelleme Kapısı. Bu kapılar, ağ üzerinden bilgi akışını düzenleyerek GTB algoritmasının önceki zaman adımlarından gelen bilgileri seçerek tutmasına veya atmasına izin verir. Sıfırlama Kapısı, önceki gizli durumun ne kadarının unutulması gerektiğini belirlerken, Güncelleme Kapısı mevcut gizli duruma dahil edilecek yeni bilgi miktarını kontrol eder [25]. UKSB yöntemine benzer bir şekilde çalışır. Ancak UKSB yönteminden farklı olarak ayrıca sıfırlama ve güncelleme yapar. Genel hikâyede unutulmuş bir ilişkiyi sisteme yeni veri girdikçe tekrar denetler ve gerektiğinde bu ilişkiyi sisteme tekrar dahil eder. Eğer yeni verilerde bu ilişki görülmezse, söz konusu ilişkiyi tekrar sıfırlar [25]. GTB çalışma algoritması Şekil 3.6’da görülmektedir.



Şekil 3.6. GRSA – GTB çalışma algoritmaları karşılaştırması [25]

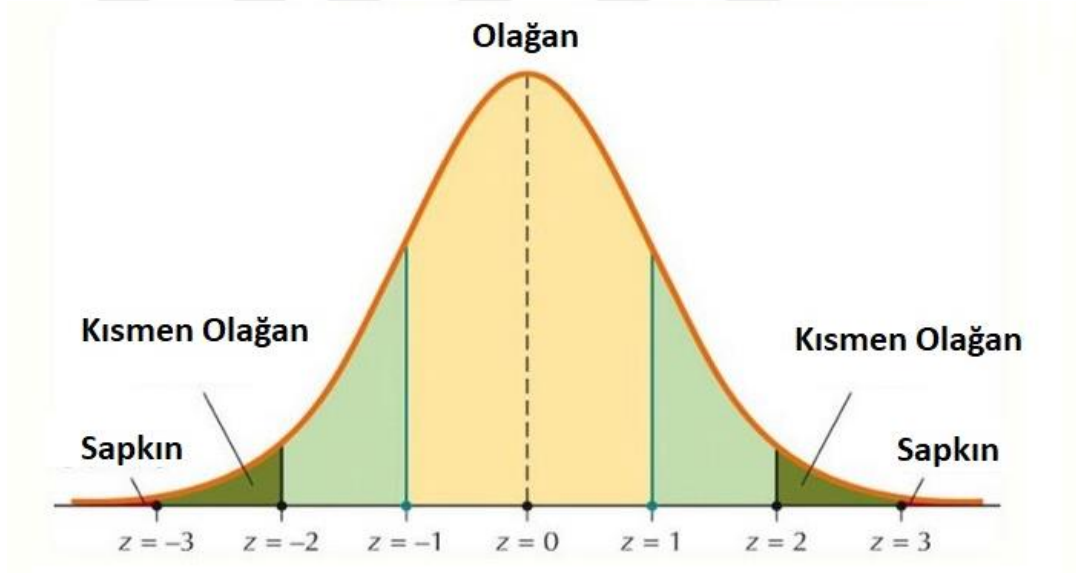
### 3.3. Diğer İstatistiksel Yöntemler

#### 3.3.1. Z Skor Yöntemi

Belirli bir gözlem kümesi içerisindeki aykırı gözlemlerin tespiti ve gözlem kümesinin eniyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Denetlenecek değerin gözlem ortalaması ile farkının gözlemlerin standart sapmasına oranı ile bulunur. Z skor değeri eksi ya da artı bir değer olarak hesaplanabilir. Formül 3.3’de Z skor hesaplama yönteminin matematiksel ifadesi görülmektedir [26].

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3.3)$$

Burada; x dönüştürülmek istenen değeri,  $\mu$  gözlemin aritmetik ortalamasını,  $\sigma$  gözlemin standart sapmasını ifade etmektedir.



Şekil 3.7. Z skor yöntemi ile sapkın değerlerin tespiti [27]

Normal bir dağılım için temsil kuramı kullanılmaktadır. Mükemmel Z skor aralığı  $\pm 3$  olarak hesaplanmaktadır. -3’ten küçük, +3’ten büyük bir Z skor değerine sahip verilerin dağılım dışında olduğu kabul edilerek veri kümesi dışına taşan saplamalar olarak değerlendirilir [27]. Şekil 3.7’de Z skor yöntemi ile dağılımın eniyileştirilmesi görsel olarak ifade edilmiştir.

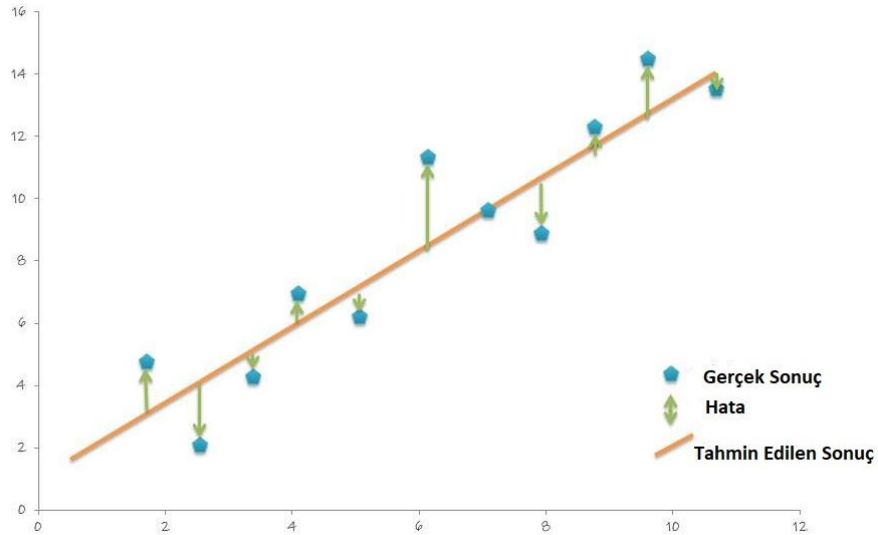
### 3.3.2. Kök Ortalama Kare Hatası Yöntemi (KOKH)

Her istatistiksel ölçüm çok sayıda veriyi yoğunlaştırarak tek bir değere dönüştürür, ancak bunu istatistiksel yöntem sınırlarında tek bir öngörü üzerinden yapmaktadır. Dolayısıyla modelleme başarımının hata düzeyini ve yapısını kendi yöntemi ile irdelemektedir. Kök Ortalama Kare Hatası yöntemi, model başarımının değerlendirilmesinde kullanılan modellemeden bağımsız standart bir ölçüm yöntemidir. Bir modelleme sonucunda elde edilen sonuçlar ile gerçek sonuçlar matematiksel olarak karşılaştırılır ve sapma farkı değerlendirilir. Formül 3.4'de hesaplama yönteminin matematiksel ifadesi gösterilmektedir [28].

$$KOKH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.4)$$

Burada; n veri hacmini,  $y_i$  modelleme sonucunu,  $\hat{y}_i$  gerçek bilinen sonucu ifade etmektedir.

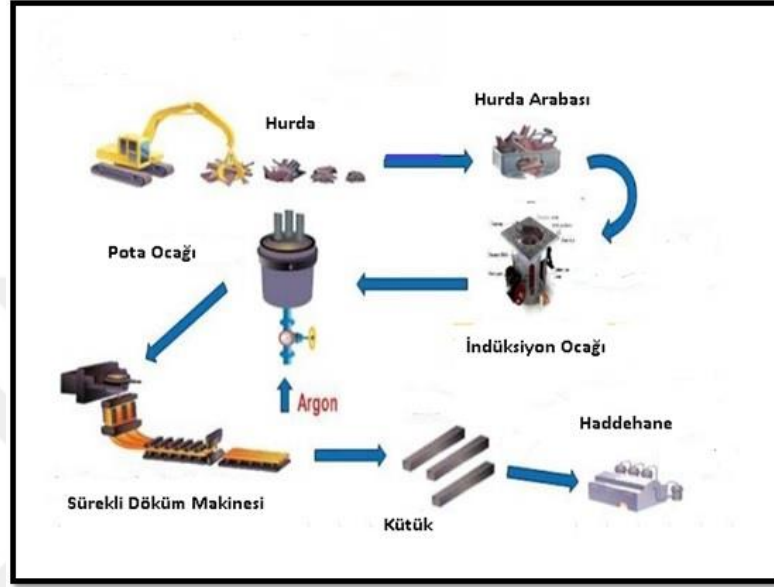
Çıkan sonuç sıfıra ne kadar yakın ise sapmanın da o oranda az olduğu, dolayısıyla modellemenin de bu oranda başarılı olduğu değerlendirilir (Şekil 3.8) [28].



Şekil 3.8. KOKH hesaplamasının grafik üzerinde gösterimi [28]

#### 4. B420C İNŞAAT ÇELİĞİ ÜRETİMİ

Bu çalışmada değerlendirilen B420C inşaat çeliği üretimi; indüksiyon ocağı, pota ocağı, sürekli döküm makinesi ve haddehane olmak üzere 4 aşamaya ayrılmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. İndüksiyon ocaklı demir çelik fabrikasındaki üretim süreci

##### 4.1. İndüksiyon Ocağı ile Sıvı Çelik Üretimi

Sıvı çelik elde edilmesinde hammadde kaynağı olarak hurda kullanılmaktadır. Farklı kaynaklardan tedarik edilen hurdalar üretim koşulları gereğince belirli oranlarda karıştırılarak indüksiyon ocaklarına şarj edilir. Ocağın içindeki çelik tamamen sıvı hale geldiğinde ergitme tamamlanır ve bir sonraki üretim aşaması olan pota ocağına aktarılır.

Bu aşamanın en önemli iki ögesi olan hurda ve indüksiyon ocağının tanımları aşağıdaki gibidir.

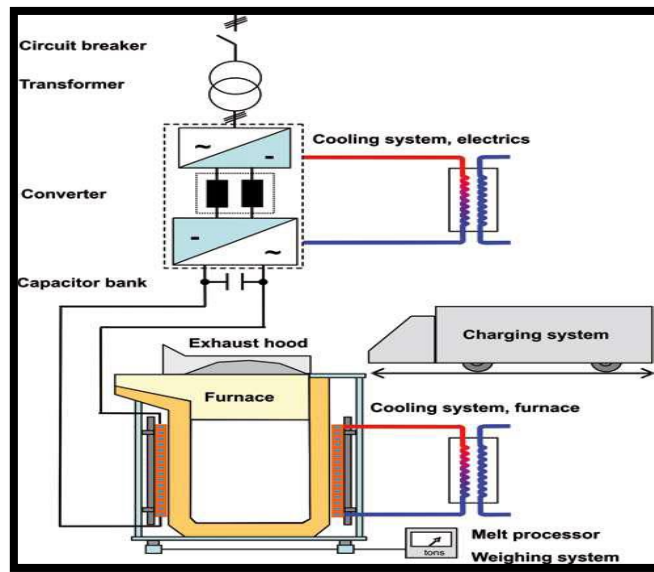
Hurda; eski, kırık, bozuk, hasarlı ve kullanılması ekonomik olmayan makine, tezgâh, ekipman, iş makinesi, kamyon, otomobil, gemi, uçak, demiryolu malzemelerinden mermi ve iğneye kadar uzanan her türlü sanayi ürünü ile bu ürünlerin üretimi sürecinde elde edilen arayış, talaş, imalat artığı vb. olduğu gibi kullanılmayan eski ve yeni maddelerdir.

İndüksiyon ocağı; çeliğin ergitilmesinde kullanılmaktadır. Ana bileşenleri güç kaynağı, ergitmenin yapıldığı pota, şarj sistemi, güç kaynağı, bakır bobinleri soğutma

sistemi ve duman özütleme ekipmanları olarak gruplandırılmaktadır. Ergitmenin yapıldığı potanın iç kısmı ısı ve mekanik yalıtımı sağlayan refrakter malzeme ile kaplıdır. Potanın etrafı ergitme için enerjiyi sağlayacak olan bobinler ile sarılıdır. Alternatif akım, bobinler içerisinde akarak bir elektromanyetik alan oluşturmaktadır. Joule Kanunu gereğince, elektromanyetik alanın oluşturduğu etkiden elde edilen Eddy akımları ile pota içerisindeki iletken metal ısıtılmaktadır. Yeterli sıcaklığa ulaşıldığında ise metal erimektedir. Elektromanyetik kuvvet alanı, ayrıca sıvı metalde karıştırma etkisi oluşturur. Ergitme için kullanılan hurdanın kalitesine göre 1 ton çelik üretiminde 0,5 – 1 kg toz çıkışı ve 10-15 kg cüruf oluşmaktadır [29].

Standart indüksiyon ocağı bölümleri sırasıyla şöyledir (Şekil 4.2) [29]:

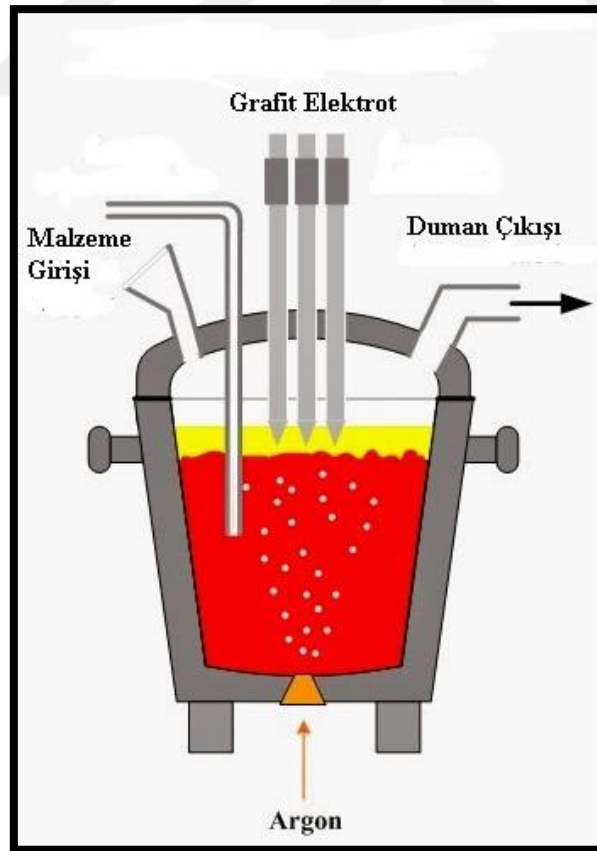
- Kesici (Circuit Breaker)
- Trafo (Transformer)
- Dönüştürücü (Converter)
- Soğutma (Cooling System Electrics – Furnace)
- Kapasitör Sırası (Capacitor Bank)
- Davlumbaz (Exhaust Hood)
- Ocak (Furnace)
- Hurda Şarj Arabası (Charging System)
- Eriyik İşlemcisi ve Tartma Düzenegi (Melt Processor, Weighing System)



Şekil 4.2. İndüksiyon ocağı gösterimi [29]

## 4.2. Pota Ocağı ve İkincil Metalürjik İşlemler

Ergimiş çelik pota ocağına, ısıtma ve ikincil metalürjik işlemler için üç fazlı ark sağlayan üç adet grafit elektrota sahip bir kapağın bulunduğu pota ocağında transfer edilir. Potanın altında, argon üfleme için gözenekli bir refrakter tıkaç bulunur. Ayrıca kapağın üst kısmında alaşımlama elementlerinin ve kükürt giderici maddelerin ilave edildiği bir kapak bulunur. Operasyon esnasında oluşan duman, kapak kısmında bulunan davlumbaz ile toz toplama tesisine alınmaktadır. Pota ocağında işlem gören ergimiş çelik, bir kükürt giderme cürufu ile kaplanır. Grafit elektrotlar cürufa daldırılır ve bu sayede elektrik kıvılcımıyla oluşan aşırı ısıdan pota astarının korunması da sağlanır. Alaşımlama elementleri ve/veya cüruf bileşenleri sıvı çelik içerisine üst kapaktan ilave edilir. Yoğun bir kükürt giderme işleminin uygulanması gerektiğinde sıvı çeliğe kükürt giderici maddeler ilave edilir. Gerekli malzemelerin ilavesinden sonra, çeliğin türdeş bir yapıya sahip olması için karıştırma işlemi yapılır. Bu karıştırma işlemi argon gazı ile yapılmaktadır. Pota ocağının şematik görünümü Şekil 4.3'te verilmiştir.



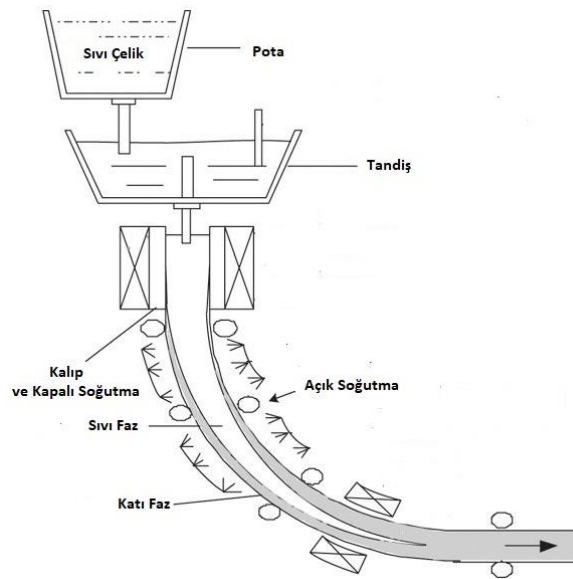
Şekil 4.3. Pota ocağının şematik gösterimi [30]

Özet olarak pota ocağında gerçekleşen olaylar;

- Kükürt giderimi
- Elektrikle kontrollü ısıtma
- Alaşımlama
- Metalik olmayan katışıkların giderilmesi
- Kimyasal homojenizasyon

### 4.3. Sürekli Döküm Makinesi ve Yarı Ürün Üretimi

İkincil metalürjik işlemlerden gelen sıvı metal belli şekil, ölçü ve ağırlıklara göre dökülür. Sürekli döküm sırasında, sıvı çelik döküm potasından nozul içerisinden dökülerek tandişe aktarılır. Akış hızı, döküm potasının altına yerleştirilmiş olan piston valfi vasıtası ile ayarlanır. Tandiş, refrakter bazlı olup kapasitesi 5-6 ton civarındadır. Çelik; tandiştan dökülerek, ön ısıtılmış nozullardan döküm hattının suyla soğutulmuş bakır kalıplarına iletilir. Bu akış hızı ve devamlılığı nozul mekanizması ile kontrol edilir. Nozul sistemi hidrolik sistem ile çalışır ve nozulların, dökümün devamlılığı durdurulmadan, değişimi sağlanır. Nozul çaplarına göre döküm hızı ayarlanabilir, böylece; tandiş içerisindeki sıvı çeliğin sıcaklığı ve döküm hızına bağlı olarak yarı-ürünün soğuma hızı kontrol edilebilir. Şekil 4.4'te sürekli döküm makinesinin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 4.4. Sürekli döküm makinesinin şematik gösterimi [31]

Kalıbın şekli, sürekli döküm ürünü olan yarı-ürünün şeklini de belirler. Kalıbın iç kısmı sıvı çeliğin sıcaklığına dayanıklı krom tabaka ile kaplıdır, dış tarafı ise ısı iletkenliğin sağlanabilmesi için bakır ile kaplıdır. Kalıp etrafında yüksek debilerde su dolaştırılarak elde edilecek olan yarı ürünün ilk katı kabuk kısmı elde edilir. Yarı ürün kalıp içerisinden çıktıktan hemen sonra ikinci soğutma işlemi başlamaktadır. Üç kademeli olarak yarı ürünün üzerine püskürtme şeklinde su ile soğutma işlemi yapılmaktadır. Tüm bu süreç boyunca yarı-ürünün fiziksel ve metalürjik olarak homojen ve dengeli soğutulduğu kontrol edilir. Su ile soğutma işlemi bittikten sonra yarı ürünler uygun boylarda kesilir ve hava ile soğutma işlemi yapılır.

#### 4.4. Haddehane ve B420C İnşaat Çeliği Üretimi

Çelikhanede üretilen ve dökümü yapılan çelik ki buna yarı ürün adı verilir, o haliyle son kullanım yeri için gerekli boyutsal ve mekanik özellikleri göstermez. Son şeklini, ebatlarını ve kullanıcı tarafından istenen mekanik özelliklerini elde etmek için çelik, daha ileri şekillendirme işlemlerine tabi tutulmaktadır. Çeliğin ilk şekillendirilmesi sürekli döküm sürecinde gerçekleşen malzemenin sıvı halden ilk katılaşmış haline geçtiği aşamadır. Burada sıvı çelik artık yarı mamul kütük haline dönüşmüştür. İkinci şekillendirme aşaması ile bu orijinal şekilden bitmiş ürün haline getirilmesidir. İkinci şekillendirme diye adlandırdığımız ve çelik fabrikalarında en fazla işlem basamağına sahip olan bu süreç haddeleme olarak bilinmektedir. Şekil 4.5'te genel haddehane şekilsel gösterimi görülmektedir.

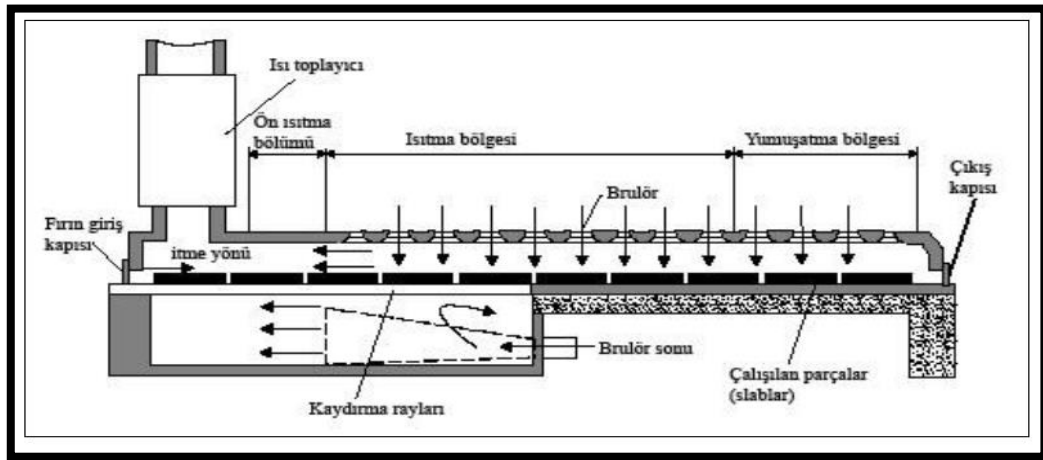


Şekil 4.5. Haddehanenin şekilsel gösterimi

Haddeleme sürecinde çeliğin plastik şekil değişimi gerçekleşmektedir. Çeliğin plastik şekil değişimi ile hangi seviyeye kadar şekil değiştirebileceğini etkileyen ana çarpan, onun şekil değişimine karşı dayanımıdır. Haddehanede şekil verme işlemi iki farklı yaklaşımla yapılabilmektedir. Bunlar sıcak ve soğuk şekil verme olarak adlandırılmaktadır. Bu iki yöntem arasındaki farklılığı belirten temel ölçü sıcaklıktır. Sıcak şekil vermede işlem malzemenin yeniden örütlenme sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta, genellikle 900°C ile 1250°C arasında, uygulanmaktadır. Metallerin şekil değişimine karşı dayanımı yüksek sıcaklıklarda daha düşüktür. Bu yüzden de yüksek sıcaklıklarda plastik şekil verme işlemi daha düşük kuvvetlerle ve daha az tekrar ile gerçekleştirilebilmektedir. Soğuk şekil verme işleminde ise herhangi bir ısı uygulaması yoktur ve çeliğin şekillendirilmesi esnasında şekil değişiminden kaynaklanan deformasyon sertleşmesi ile istenilen özellikler elde edilmektedir.

Sıcak haddelemede yarı mamul olan kütüklerin boyut, şekil ve metalürjik özellikleri; sıcak metal uygun tav sıcaklığında iken, elektrik tahrikli merdaneler arasında ezilmesi ile değiştirilmektedir. Genel olarak sıcak haddehanelerde aşağıdaki süreç adımları kullanılmaktadır:

- Fırın bölgesi (haddeleme sıcaklığına kadar ısıtma)
- Haddeleme (hadde gruplarında, genişliğin azaltılması da dâhil olmak üzere kaba hadde, nihai boyut ve özelliklere kadar haddeleme)
- Hazırlama ve bitirme bölümü, platform (baş ve sondaki bozuk kısımları kırma, kesme, dilme)



Şekil 4.6. İtmeli tip tav fırını [32]

Şarj edilen yarı ürünler haddeleme öncesinde  $\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 'de homojen bir şekilde ısıtılarak haddeleme için uygun bir hale getirilmektedir. Bu ısıtma işlemi tavlama ve ısıtma işlemi fırını olarak da adlandırılan, haddehane tav fırınlarında gerçekleştirilmektedir. Tavlama işlemi bu üretimde itmeli tip fırınlarda yapılmaktadır (Şekil 4.6).

Isıtma işlemi için doğalgaz kullanılmaktadır. Fırın içerisindeki bölgelerin sıcaklıkları, kütüklerin fırından çıkış sıcaklıkları, tüketilen gaz miktarları sürekli olarak kayıt altına alınmaktadır. Yarı ürünler itici pistonlar kullanılarak diğer malzeme yardımıyla fırına itilmektedir. Sürekli şarj kullanılmaktadır.

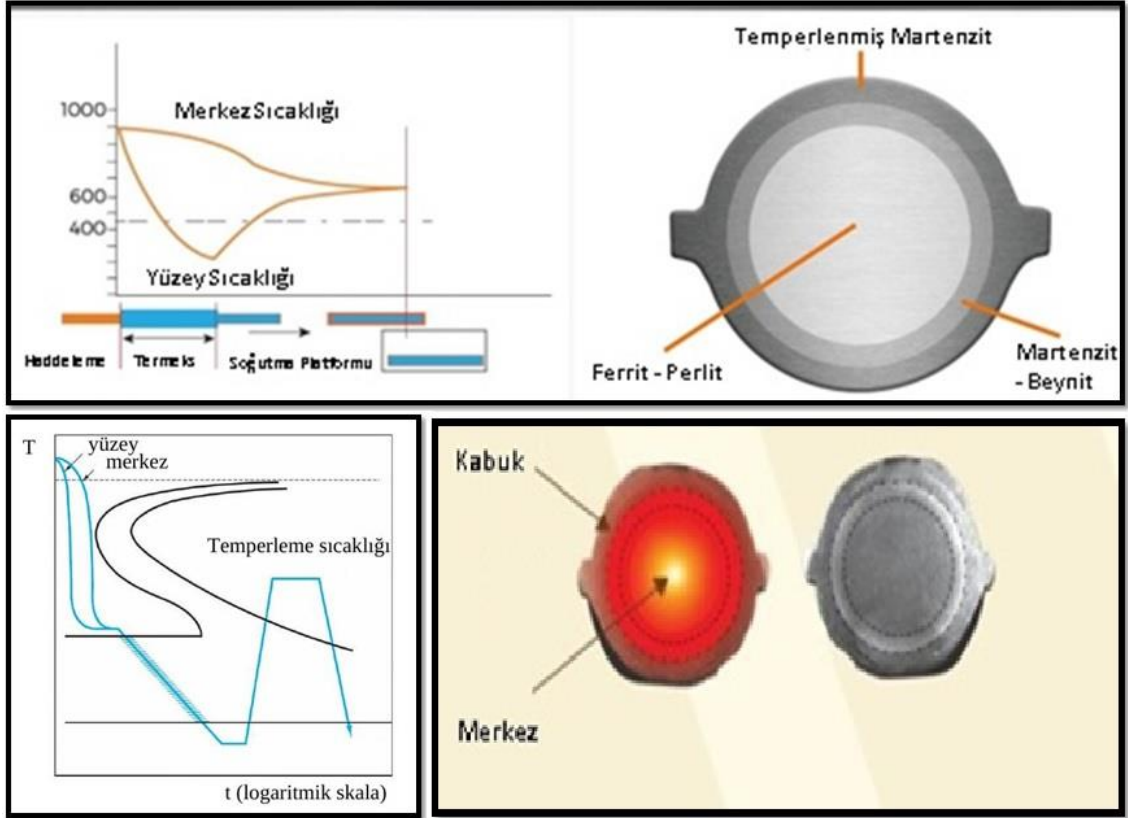
Çeliğin hadde işlemi ile şekillendirilmesi farklı yönlerde dönen iki paralel merdanenin baskısıyla gerçekleştirilir. Çelik, merdanelerin arasından geçirilerek ve yüksek baskı kuvvetleri sonucu, boyuna doğru, tüm kesit boyunca aynı indirgenme oranı ile uzatılmaktadır. Şekillendirmenin seviyesi her bölgedeki indirgenme oranı ile veya her bölgedeki kesit değişimi ile karakterize edilir.

#### **4.4.1. Haddehane Ürün Soğutma Süreci**

B serisi yapı çeliklerinde soğutma için patentli bir teknoloji olan THERMEX yöntemi kullanılmaktadır [33]. Haddeleme süreci sonunda fiziksel olarak nihai şeklini almış ürünler yüksek basınçlı su ile doldurulmuş boruların içerisinden geçerek arzu edilen sıcaklığa soğutulmaktadır.

Soğutma işlemi sonrasında ürünün kabuk kısmında martenzit fazı elde edilirken iç kısımda ferrit ve perlit fazı oluşmaktadır. Martenzit fazı ile ferrit-perlit fazı arasındaki geçiş bölgesinde ise beynit fazı oluşmaktadır. Ürünün kimyasal özelliklerine, soğutma şiddetine ve hızına bağlı olarak fazların dağılımı ve miktarları değişkenlik göstermektedir.

Soğutma grafiği ve dağılımı sonucunda ürünün faz değişimi Şekil 4.7'de görülmektedir [33].



Şekil 4.7. Haddehane soğuma grafikleri ve faz oluşumu [33]

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 5.1. Veri Kümesinin Seçilmesi

Yapılan istatistiksel modelleme çalışmasında veri kaynağı olarak kullanılan örnekler, farklı çaplarda nervürlü inşaat çeliği üretimi yapan bir demir çelik firmasından temin edilmiştir. Modelleme için kullanılan tüm veriler işletmenin üretim koşulları sonucunda oluşan verilerdir. Verilerin doğruluğu ve tutarlılığı fabrika yönetim sistemleri ile kontrol edilmiştir. Fabrika yönetim sistemleri uluslararası akredite kuruluşlar ve kamu denetim mekanizmaları tarafından periyodik olarak denetlenmektedir.

Elde edilen modelleme için kullanılan veriler, 2022 yılı boyunca işletmede üretilen ürünlere ait verilerdir. 2023 yılının ilk 6 ayında elde edilen veriler ise geliştirilen modellerin tutarlılığının değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

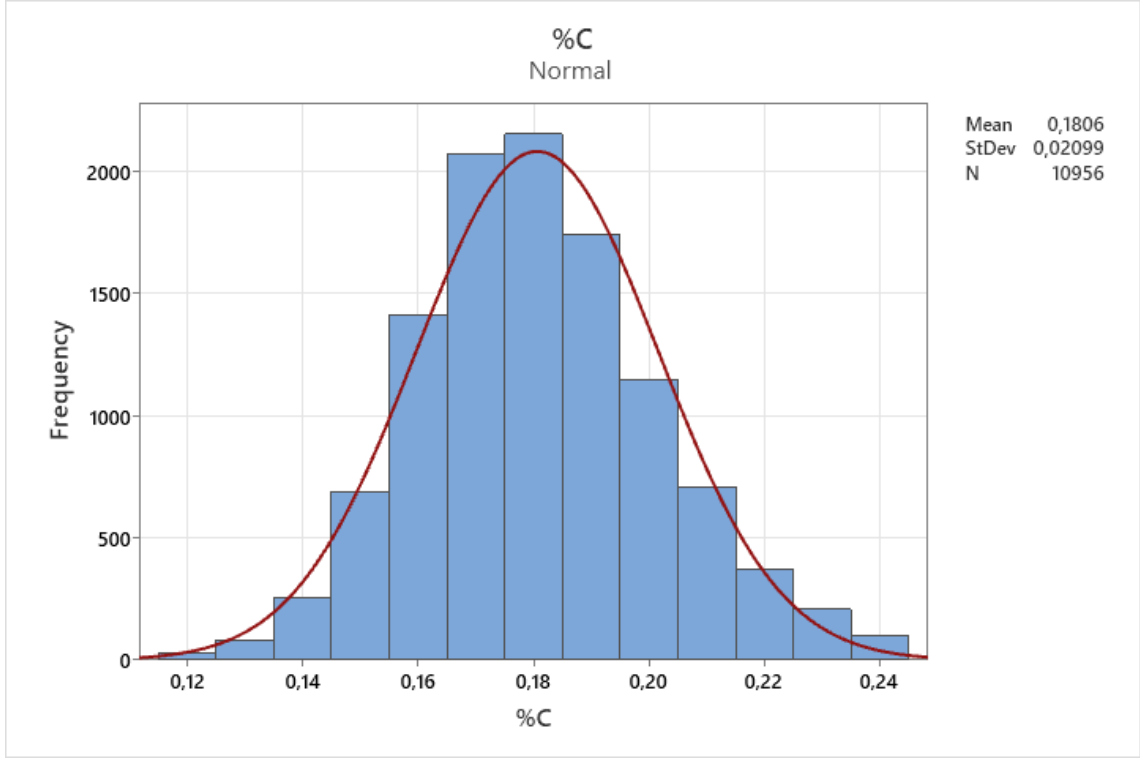
İlk aşamada modellemede girdi olarak kullanılacak değişkenler belirlenirken, ürünlere ilişkin özelliklerin ilgili mekanik özelliklere etkileri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda ana değişkenler çeliğin kimyasal bileşiminde bulunan karbon (C), mangan (Mn), kükürt (S) ve krom (Cr) elementlerinin miktarları ile çap etkisini belirleyen birim ağırlık ve soğutma hızının etkisini belirleyen soğutma suyu debisi olarak belirlenmiştir.

İkinci aşamada ise bu ana değişkenlerin veri dağılımları incelenmiştir. Verilerin Z skor değerlerine bakılarak  $\pm 3$  aralığının dışarısında kalan veriler sapmayı azaltmak için çıkarılmıştır. Toplamda 10.956 farklı numuneye ait ölçümler veri kümesine alınmıştır. Veri kümesinin istatistiksel ölçütler temelinde eniyileştirilmesi sonucunda Tablo 5.1’de görülen alt ve üst sınır değerleri oluşturulmuştur.

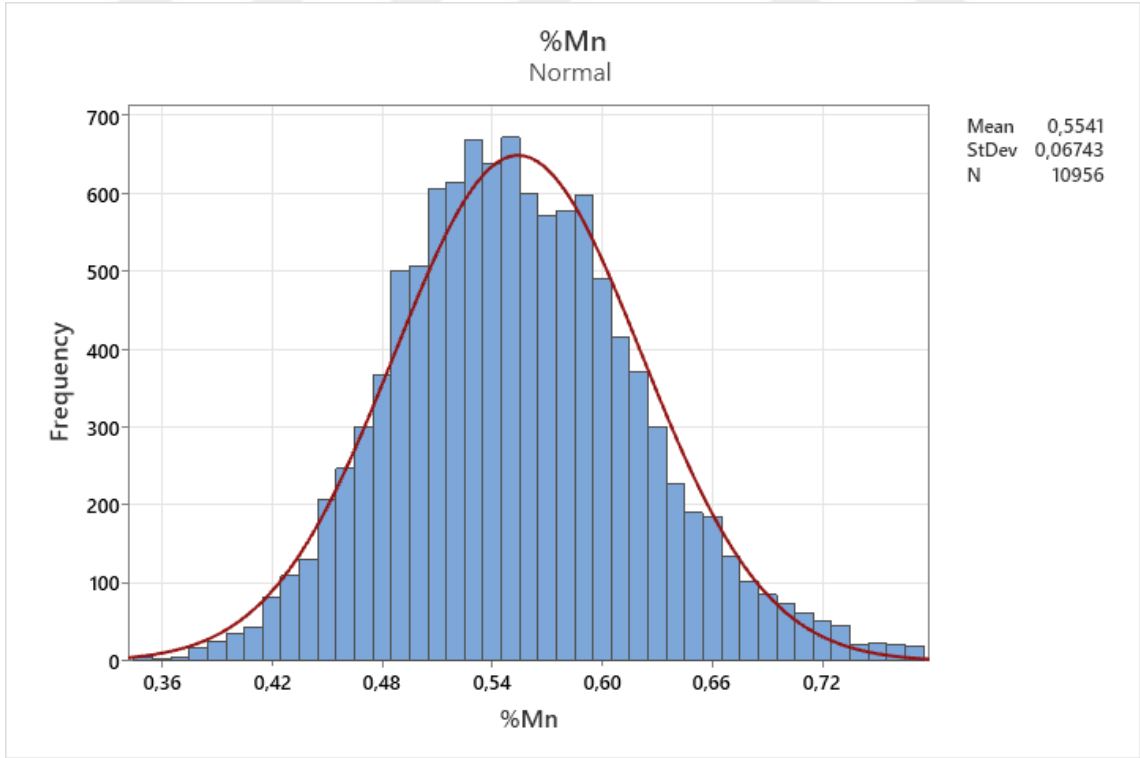
**Tablo 5.1.** Veri kümesinde kullanılacak değişkenlerin alt ve üst sınırları

Kavram	%C	%Mn	%S	%Cr	Birim Ağırlık (kg/m)	Su Debisi (m <sup>3</sup> )	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
Alt Değer	0,12	0,35	0,006	0,14	0,820	217	428	510	14,1
Üst Değer	0,24	0,77	0,070	0,55	2,559	772	521	643	24,1

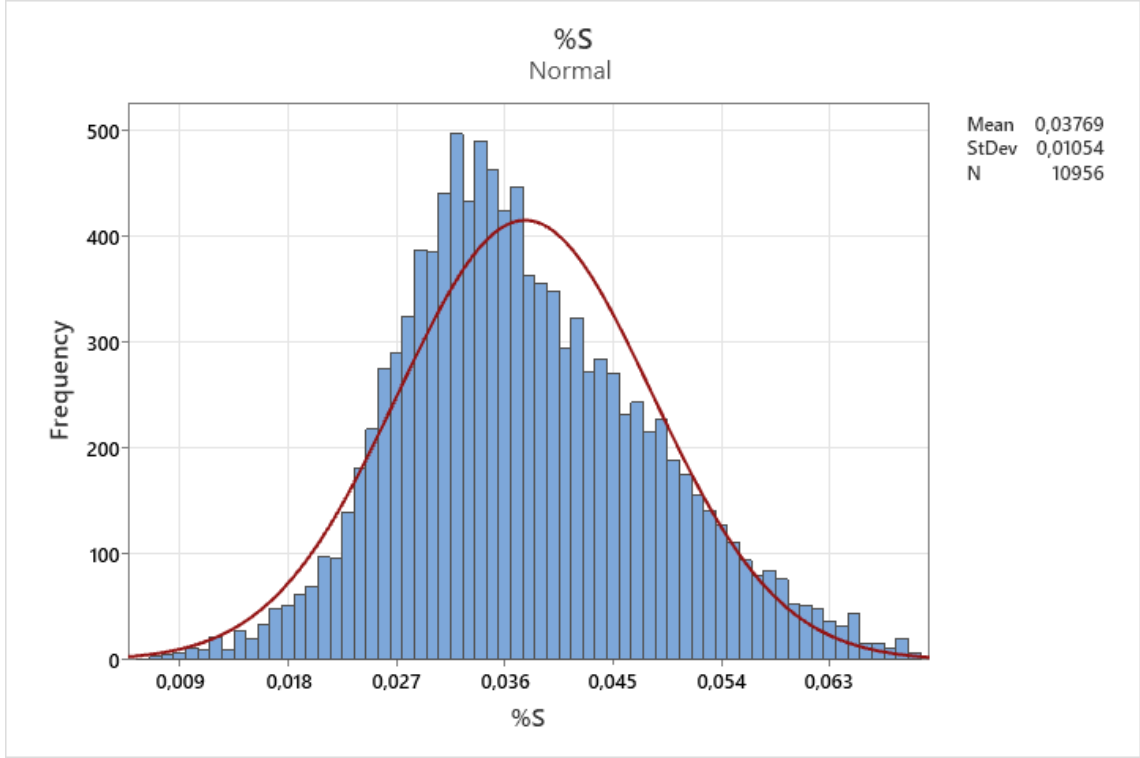
Modellemede kullanılan girdi değişkenlerinin histogram grafikleri Şekil 5.1 - Şekil 5.6’da ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



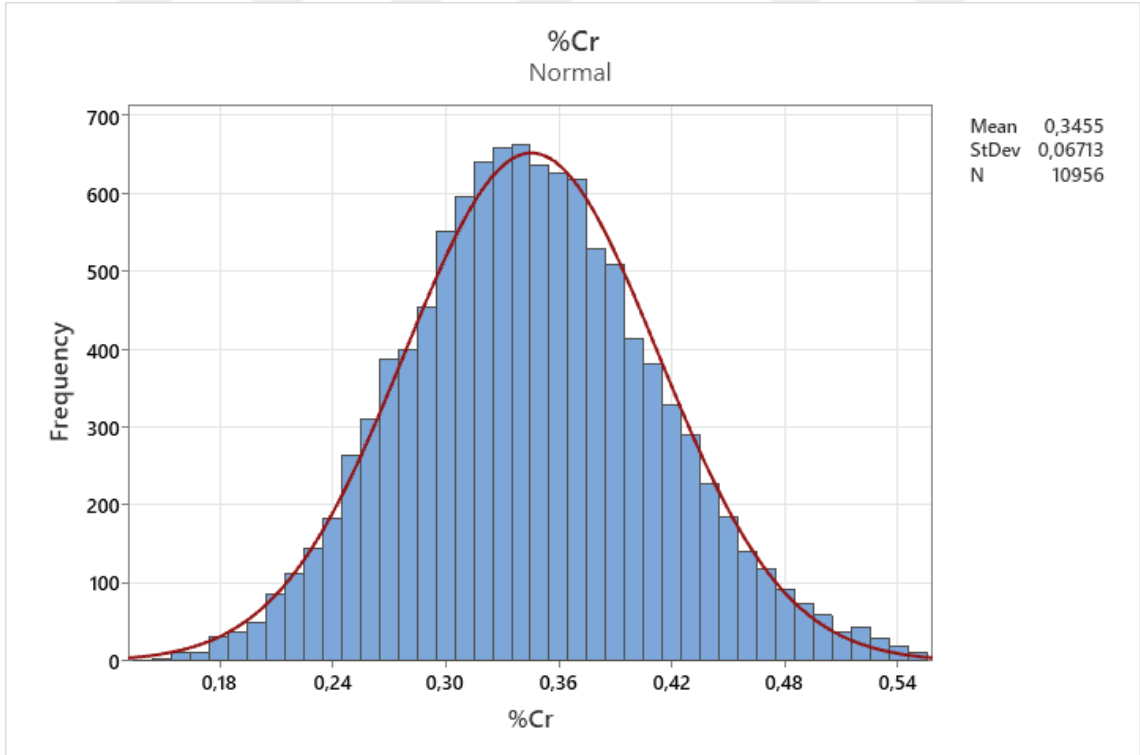
**Şekil 5.1.** 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerdeki %C dağılımı



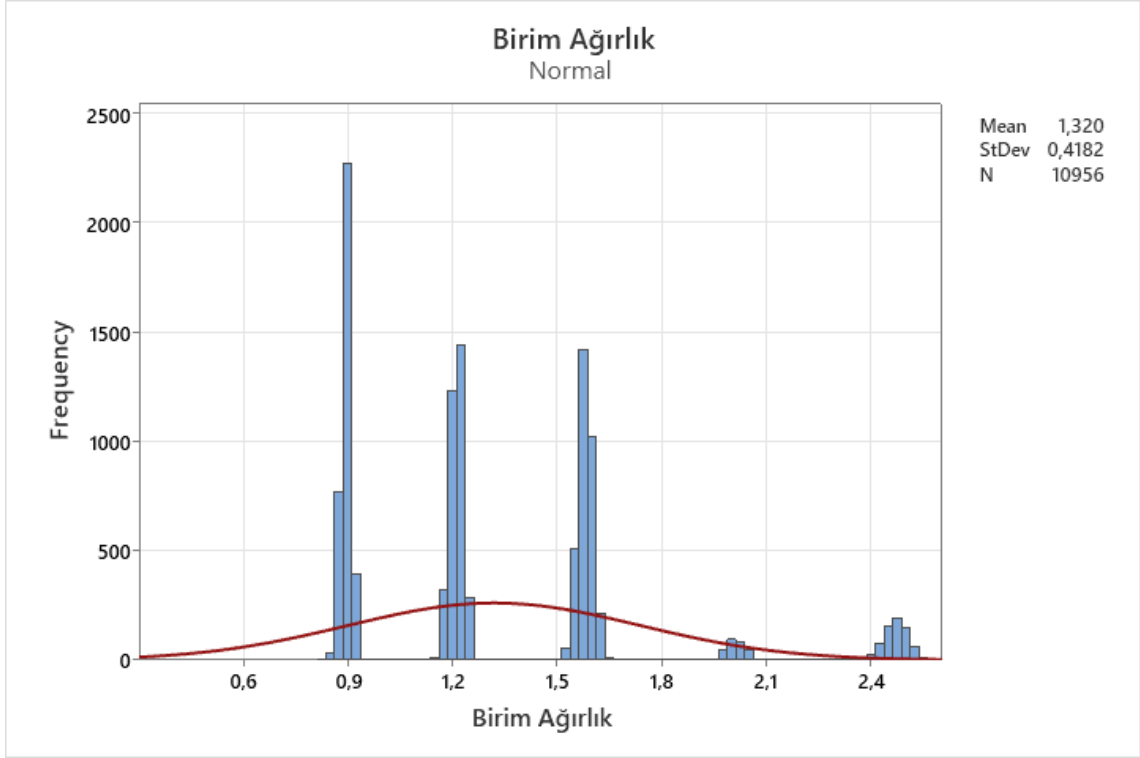
**Şekil 5.2.** 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerdeki %Mn dağılımı



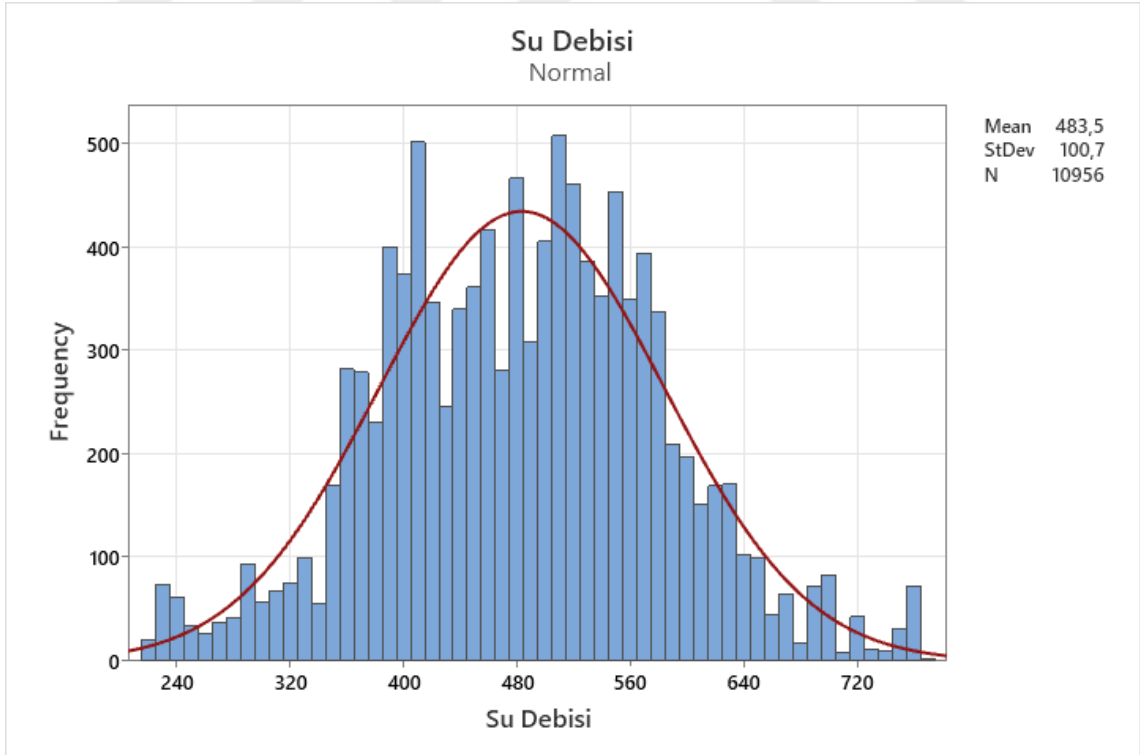
**Şekil 5.3.** 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerdeki %S dağılımı



**Şekil 5.4.** 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerdeki %Cr dağılımı



Şekil 5.5. 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerinin birim ağırlık dağılımı

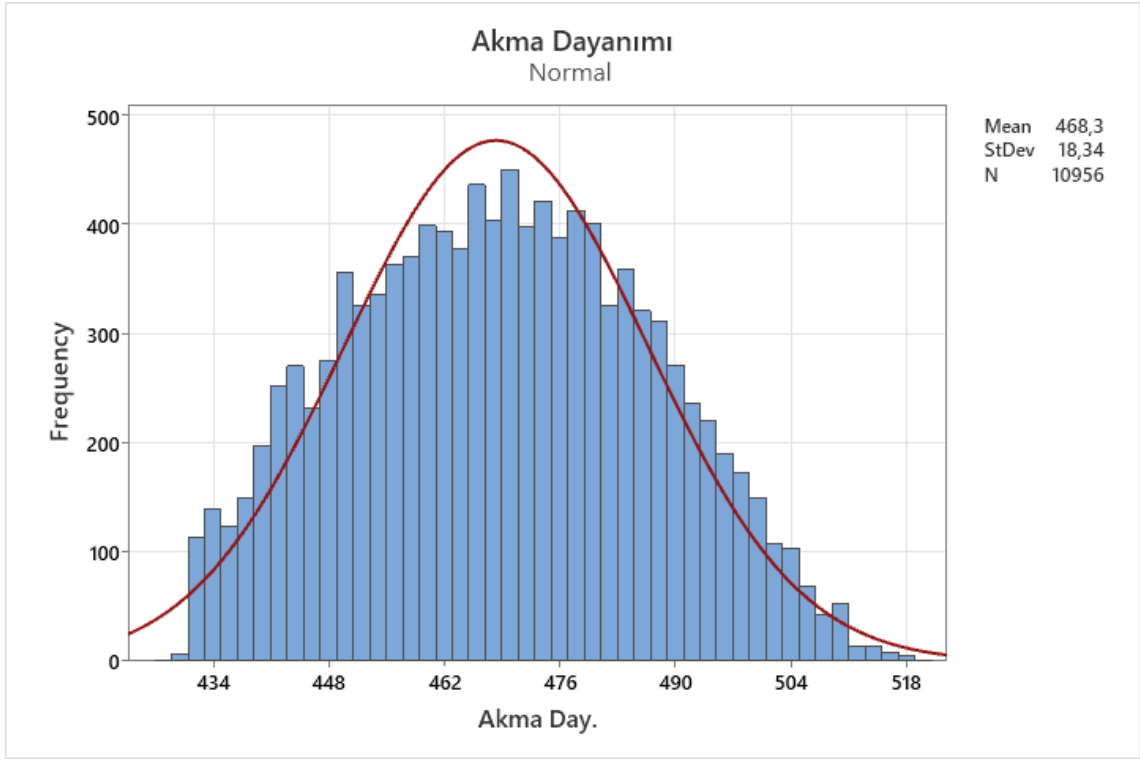


Şekil 5.6. 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerin soğutulmasında kullanılan suyun su debisi dağılımı

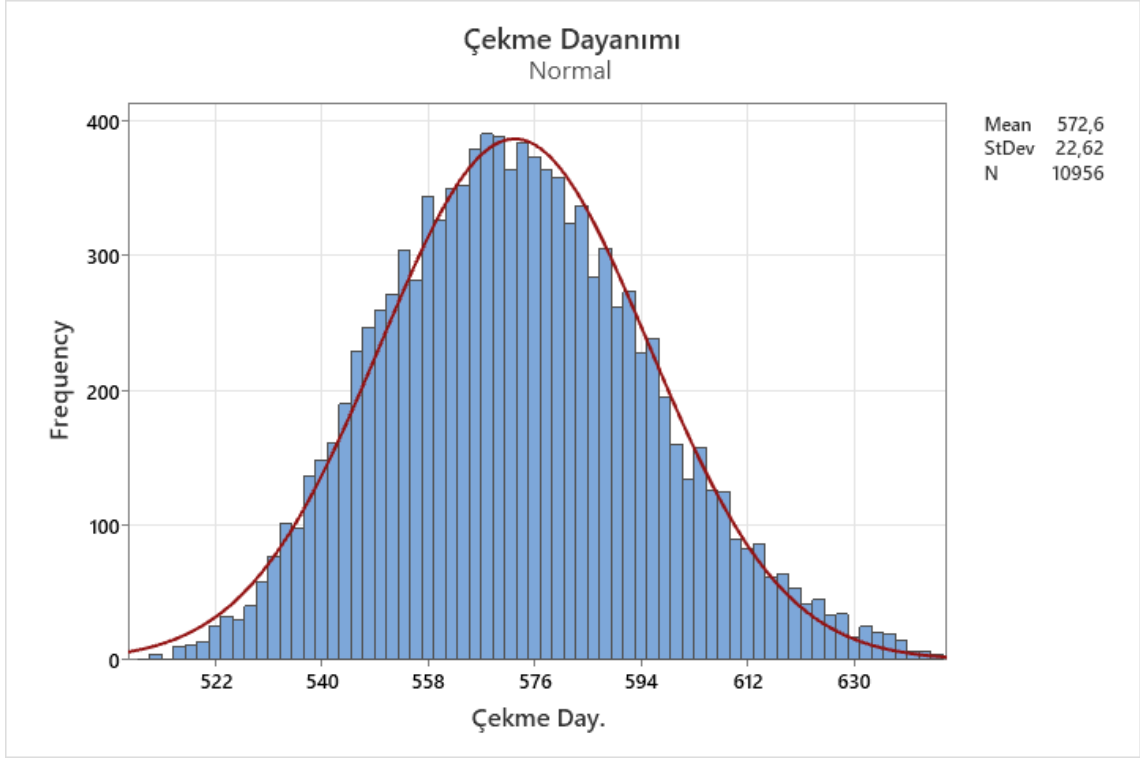
İstatistiksel çalışma için girdi değişkenleri belirlendikten sonra modelleme için kullanılacak olan çıktıların genel durumu değerlendirilmiştir. Çıktıların dağılımı Şekil 5.7 - Şekil 5.9’da gösterilmektedir.

Modellemenin çıktıları olarak kullanılan akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama değerlerine herhangi bir veri iyileştirme süreci uygulanmamıştır. Z skor değerleri incelendiğinde tüm numunelere ilişkin ilgili değerlerin  $\pm 3$  aralığı içerisinde olduğu görülmüştür.

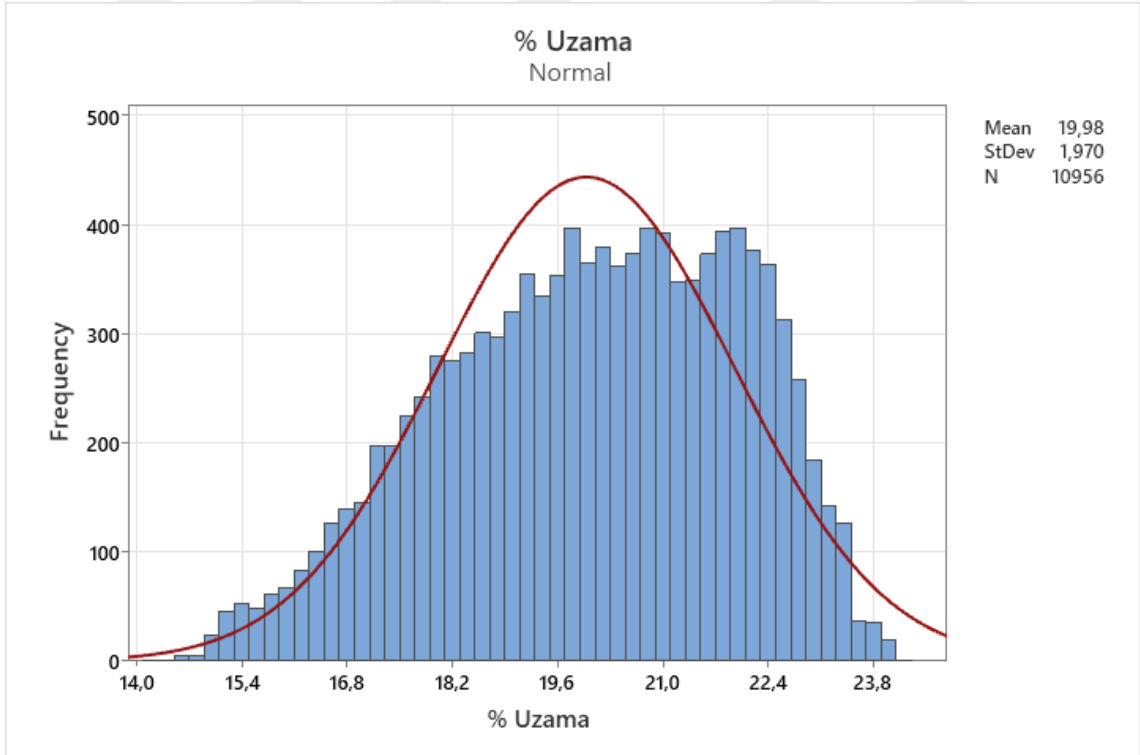
10.956 adet numuneye ait veriler sıra ve döküm numaraları ile işaretlenerek tasniflenmiştir. Mevcut veriler belirlendikten sonra analiz çalışmalarına başlanmıştır.



Şekil 5.7. 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerin akma dayanımı dağılımı



**Şekil 5.8.** 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerin çekme dayanımı dağılımı



**Şekil 5.9.** 2022 yılı boyunca üretilen B420C çeliklerin % uzama dağılımı

## 5.2 Regresyon analizi veri çıktıları

Regresyon analizi Minitab yazılımı üzerinden yapılmıştır. “Fit Regression Model” kullanılarak oluşturulan modellemede çift taraflı yaklaşım ve %95 güvenilirlik seçilmiştir. Adımsal yöntem (stepwise) ve te katsayı kullanımı modellemede tercih edilen diğer istatistiksel ölçütlerdir.

Regresyon analizlerinde karşılaştırmalı yöntem tercih edilmemiştir. Bunun yerine, 2023 yılına ait üretim verileri kullanılarak geliştirilen modellemeler ile yapılan hesaplama sonuçları numunelerin deneysel ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. 2023 yılına ait veriler ile doğrulamanın ayrıntıları 6.1.1 başlığında açıklanmıştır.

Akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama miktarı için yapılan regresyon analizlerinin açıklayabilirlik ( $R^2$ ) sonuçları sırasıyla Tablo 5.2, Tablo 5.3 ve Tablo 5.4’te gösterilmiştir.

**Tablo 5.2.** Üretilen B420C çeliklerin akma dayanımına ilişkin geliştirilen regresyon analiz modelindeki  $R^2$  değeri

$R^2$
13,40%

**Tablo 5.3.** Üretilen B420C çeliklerin çekme dayanımına ilişkin geliştirilen regresyon analiz modelindeki  $R^2$  değeri

$R^2$
38,36%

**Tablo 5.4.** Üretilen B420C çeliklerin % uzama değerine ilişkin geliştirilen regresyon analiz modelindeki  $R^2$  değeri

$R^2$
20,42%

Modellemede girdi verisi olarak kullanılan değişkenler ve katsayılara ait çıktılar ile p-değerleri sırasıyla Tablo 5.5, Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’de gösterilmektedir. Mevcut veriler sonucunda elde edilen katsayılar modelleme içerisinde kullanılarak mekanik sonuçların önceden tahmin edilmesi sağlanmıştır. Katsayılar kullanılarak oluşturulan modellemeler 6.1 numaralı başlıkta sunulmuştur.

**Tablo 5.5.** Üretilen B420C çeliklerin akma dayanımına ilişkin geliştirilen regresyon analiz modelindeki katsayı ve p-değerleri

Değişken	Katsayı	P-Değeri
Sabit	401,60	0,000
%C	217,40	0,000
%Mn	28,31	0,000
%S	-294,3	0,000
%Cr	42,25	0,000
Birim Ağırlık	2,317	0,000
Su Debisi	0,01073	0,000

**Tablo 5.6.** Üretilen B420C çeliklerin çekme dayanımına ilişkin geliştirilen regresyon analiz modelindeki katsayı ve p-değerleri

Değişken	Katsayı	P-Değeri
Sabit	405,01	0,000
%C	518,65	0,000
%Mn	81,53	0,000
%S	-160,3	0,000
%Cr	62,32	0,000
Birim Ağırlık	5,403	0,000
Su Debisi	0,01270	0,000

**Tablo 5.7.** Üretilen B420C çeliklerin % uzama miktarına ilişkin geliştirilen regresyon analiz modelindeki katsayı ve p-değerleri

Değişken	Katsayı	P-Değeri
Sabit	19,788	0,000
%C	-5,287	0,000
%Mn	-1,348	0,000
%S	2,57	0,114
%Cr	-4,243	0,000
Birim Ağırlık	1,7185	0,000
Su Debisi	0,002068	0,000

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 6.1. Regresyon Analizi Sonuçları

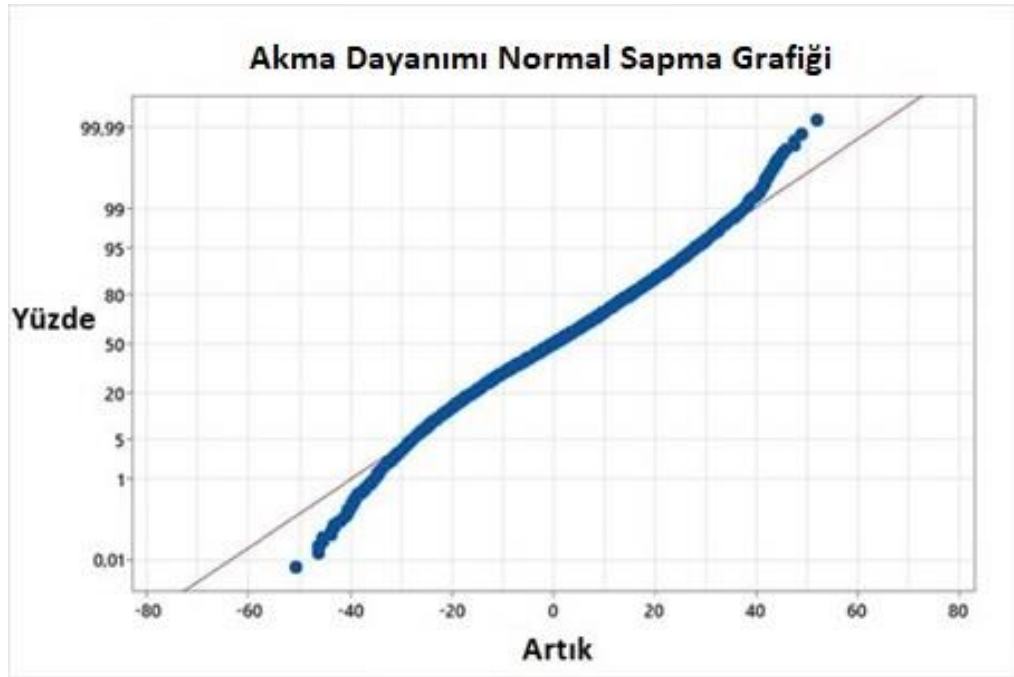
Geliştirilen istatistiki modeller ışığında sırasıyla akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama miktarı değerlerinin ilgili mekanik test sonuçlarıyla uyumlu olacak şekilde öngörülmesini sağlayacak 3 ayrı matematiksel eşitlik (Denklem 6.1, 6.2, 6.3) elde edilmiştir.

$$\sigma_y = 401.6 + (217.4 \times \%C) + (28.31 \times \%Mn) + (-294.3 \times \%S) + (42,25 \times \%Cr) + (2.317 \times \text{Birim ağırlık}) + (0.01073 \times \text{Su debisi}) \quad (6.1)$$

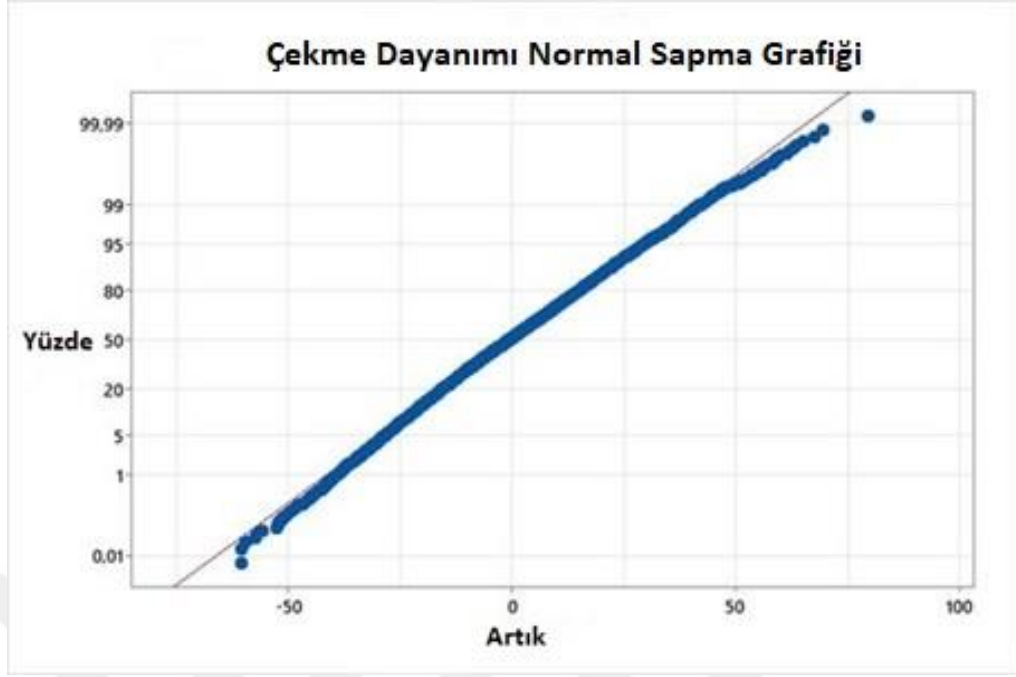
$$\sigma_{UTS} = 405.01 + (518.65 \times \%C) + (81.53 \times \%Mn) + (-160.3 \times \%S) + (62.32 \times \%Cr) + (5.403 \times \text{Birim ağırlık}) + (0,01270 \times \text{Su debisi}) \quad (6.2)$$

$$\varepsilon_f = 19.788 + (-5.287 \times \%C) + (-1.348 \times \%Mn) + (2.57 \times \%S) + (-4.243 \times \%Cr) + (1.7185 \times \text{Birim ağırlık}) + (0,002068 \times \text{Su debisi}) \quad (6.3)$$

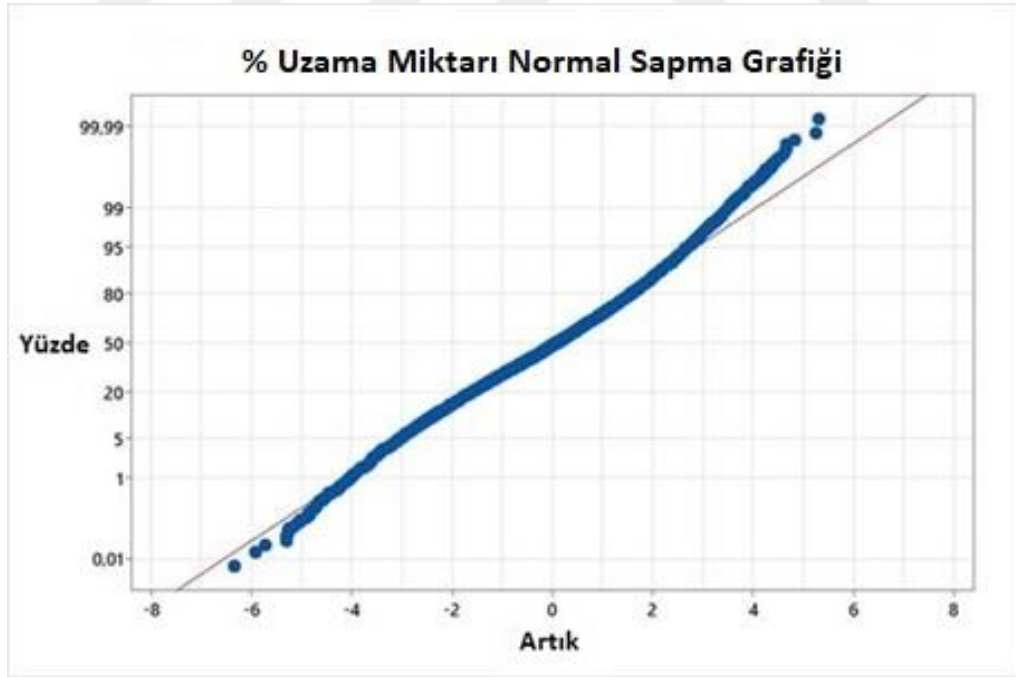
Oluşturulan doğrusal regresyon analiz modellerinin çıktıları ile ilgili mekanik testlerin deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırılmış ve elde edilen ilgili normal sapma denklemi Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te sunulmuştur.



Şekil 6.1. Doğrusal regresyon analizi modelinin çıktısı ile akma dayanımı testlerinden elde edilen deneysel sonuçların karşılaştırılması sonucu elde edilen Akma Dayanımı Normal Sapma Grafiği



Şekil 6.2. Doğrusal regresyon analizi modelinin çıktısı ile çekme dayanımı testlerinden elde edilen deneysel sonuçların karşılaştırılması sonucu elde edilen Çekme Dayanımı Normal Sapma Grafiği



Şekil 6.3. Doğrusal regresyon analizi modelinin çıktısı ile % uzama testlerinden elde edilen deneysel sonuçların karşılaştırılması sonucu elde edilen % Uzama Normal Sapma Grafiği

## 6.1.1. Regresyon analizi çıktılarının doğrulanması

### 6.1.1.1. Regresyon analizi çıktılarının makine öğrenmesi yöntemleri ile doğrulanması

Akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama miktarı değerleri, makine öğrenmesi yöntemlerinden olan çok katmanlı algılama (ÇKA), genelleştirilmiş regresyon sinir ağı (GRSA), uzun – kısa süreli bellek (UKSB) ve geçitli tekrarlayan birim (GTB) yöntemleri ile de modellenerek regresyon analizi çıktılarının doğrulanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda 2022 yılına ait veriler kullanılarak geliştirilen modeller, yine aynı işletmeye ait ve aynı koşullarda üretimi ve deneyleri yapılmış olan 2023 yılının ilk 6 ayında üretilen 5.437 numunenin ilgili değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılmıştır.

Modelleme sonuçlarının doğruluk ve açıklayabilirlik karşılaştırmaları Tablo 6.1’de, Tablo 6.2’de ve Tablo 6.3’te görülmektedir. Makine öğrenmesi sonuçları incelendiğinde ÇKA ve GRSA gibi daha düşük boyutlu yöntemlerin açıklayabilirlik bakımından daha iyi bir başarımlar sergiledikleri KOKH ve R<sup>2</sup> sonuçlarından anlaşılmaktadır. Buna karşın, daha ayrıntılı ve veri kümesi içerisinde karmaşık ilişkiler kuran gelişmiş yöntemler olan UKSB ve GTB yöntemlerinin açıklayabilirlik bakımından ÇKA ve GRSA yöntemlerinin gerisinde kaldıkları görülmektedir.

**Tablo 6.1.** 2022 yılında üretilen B420C çeliklerin akma dayanımı değerlerine ilişkin makine öğrenmesi modelleme sonuçları

Model	KOKH	R <sup>2</sup>
ÇKA	2,642	0,998
GRSA	2,981	0,987
UKSB	69,887	0,630
GTB	184,248	0,323

**Tablo 6.2.** 2022 yılında üretilen B420C çeliklerin çekme dayanımı değerlerine ilişkin makine öğrenmesi modelleme sonuçları

Model	KOKH	R <sup>2</sup>
ÇKA	3,332	0,991
GRSA	3,701	0,982
UKSB	74,815	0,591
GTB	106,443	0,428

**Tablo 6.3.** 2022 yılında üretilen B420C çeliklerin % uzama değerlerine ilişkin makine öğrenmesi modelleme sonuçları

Model	KOKH	R <sup>2</sup>
ÇKA	2,109	0,999
GRSA	2,591	0,998
UKSB	53,012	0,872
GTB	66,018	0,549

#### 6.1.1.2. Regresyon analizi çıktılarının kök ortalama kare hatası yöntemi ile doğrulanması

2022 yılına ait veriler kullanılarak geliştirilen modellemeler, yine aynı işletmeye ait ve aynı koşullarda üretimi ve deneyleri yapılmış olan 2023 yılının ilk 6 ayında üretilen numunelerin ilgili mekanik özelliklerine ilişkin değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Bu kapsamda 5437 adet numunenin ilgili mekanik değerlerine ilişkin gerek deneysel test sonuçlarının gerekse de modelleme sonuçlarının ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 6.4’te sunulmuştur.

**Tablo 6.4.** 2023 yılında üretilen B420C çeliklerin akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama miktarına ilişkin modelleme ve mekanik test sonuçlarının ortalama ve standart sapma değerlerinin karşılaştırılması

		Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
Modelleme Sonuçları	Ortalama	468	573	19,8
	Standart Sapma	7	15	0,8
Deney Sonuçları	Ortalama	466	567	20,0
	Standart Sapma	17	22	1,8

Geliştirilen modelin doğruluğu, 2023 yılında üretilen B420C çeliklerin ilgili mekanik özellikleri deneysel test ve modelleme sonuçları kullanılarak hesaplanan kök ortalama kare hatası (root mean square error) değerleri ile test edilmiştir (Tablo 6.5).

**Tablo 6.5.** 2023 yılında üretilen B420C çelikleri akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama miktarına ilişkin kök ortalama kare hatası değerlerinin karşılaştırılması

	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Yüzde Uzama
Kök Ortalama Kare Hatası	0,18	0,20	0,02

## 6.2. Modelleme Uygulamasının Verilerinin Metalürjik Bulgular Işığında İncelenmesi

### 6.2.1. Akma ve çekme dayanımı

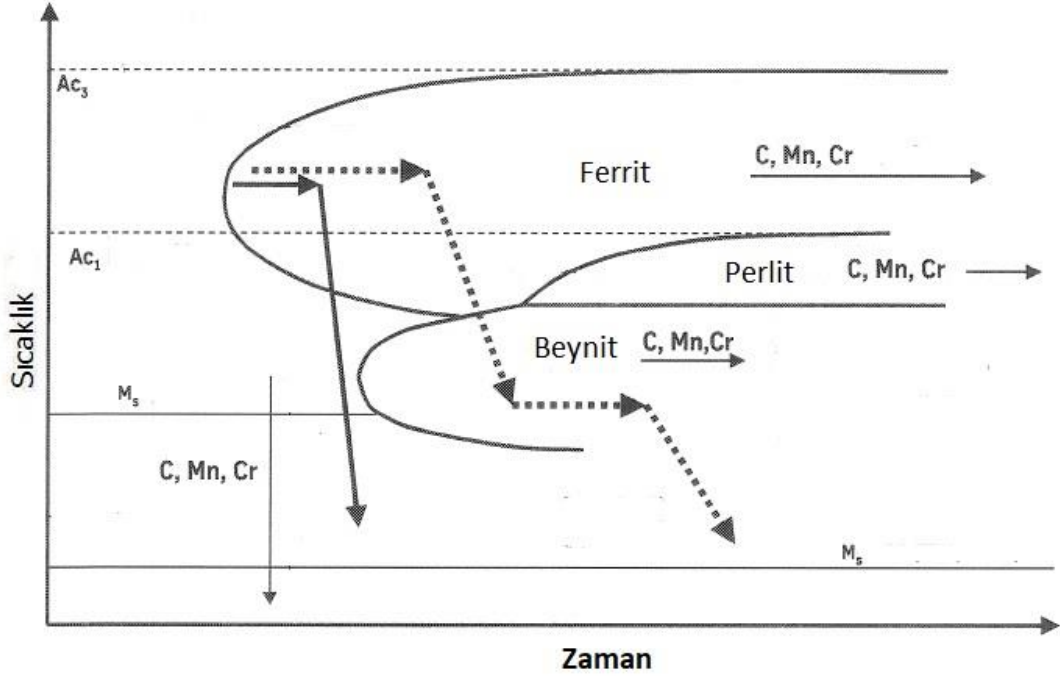
Regresyon analizi sonucunda akma dayanımı ve çekme dayanımı modellerinde p-değerleri incelendiğinde, veri kümesindeki tüm girdi değişkenlerinin ilgili mekanik özelliklere ilişkin sonuç değerleri üzerindeki açıklama etkisinin yüksek olduğu görülmektedir.

Modelleme katsayılarına göre artan C, Mn ve Cr miktarı, artan birim ağırlık ve su debisi ile akma ve çekme dayanımı değerlerinin arttığı; artan S miktarı ile akma ve çekme dayanımı değerlerinin ise azaldığı görülmüştür. Yine modelleme katsayılarına göre en yüksek etkiyi C ve S elementlerinin yaptıkları görülmektedir.

2.2 numaralı alt başlıkta elementlerin etkilerinden ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Şekil 6.4'te görüleceği gibi %C, %Mn ve %Cr miktarındaki artış, ferrit, perlit ve beynit fazların oluşumu için gerekli soğutma sürelerini ve martenzit fazının oluşum sıcaklık değerini ( $M_s$  sıcaklığı) düşürerek östenitin ilgili fazlara dönüşebilmesini kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla, aynı soğutma hızı ve aralıklarında; daha yüksek oranda (ağırlıkça %) C, Mn ve Cr elementi içeren B420C çelik ürünlerinin, bu elementleri daha az oranda içeren ürünlere kıyasla içyapılarında daha fazla martenzit ve/veya perlit fazı içerir [34]. Bu nedenle mekanik dayanımı olumlu yönde etkileyen martenzit ve/veya perlit faz oranı arttıkça akma ve çekme dayanımı da artmaktadır. Özetle, geliştirilen istatistiksel modelin alaşım elementi miktarı ile akma ve çekme dayanımı arasındaki ilişkiye ilişkin öngörüler, bilimsel mekanizma ve bulgularla uyumludur.

Su debisinin artışı ile ürünlerin soğuma hızının artışı doğru orantılıdır. Dolayısıyla Şekil 6.4'te de görüleceği gibi soğuma hızının artışı ile beynit ve martenzit gibi daha yüksek mukavemetli fazların miktarında da artış olmaktadır. Regresyon analizi sonuçları da su debisindeki artışın akma ve çekme dayanımı değerlerini arttırdığını öngörmektedir.

Birim ağırlık miktarının artmasıyla ürünün su ile temas eden yüzey alanı artmaktadır. Böylece ürünün dış çeperinde oluşan martenzit çeperi genişlemektedir. Martenzit fazının miktarı ile çelik mukavemeti arasında doğrusal bir orantı bulunmaktadır. Martenzit fazının artışı ile akma ve çekme dayanımı değerleri de artmaktadır.



Şekil 6.4. Alaşım elementlerinin faz dönüşümleri üzerindeki etkilerinin şematik gösterimi [34]

Öte yandan, artan S miktarı ile akma ve çekme dayanımı kötüleşmektedir. 2.2.1.3 numaralı alt başlıkta S'nin mekanik özelliklere etkisi açıklanmıştır. S miktarının artışı ile çeliğin içyapısındaki safsızlıkların miktarı da artmaktadır. Safsızlık miktarının artışı akma ve çekme dayanımını olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla, geliştirilen istatistiksel modelin S miktarı ile akma ve çekme dayanımı arasındaki ilişkiye ilişkin öngörülere de ilgili bilimsel mekanizma ve bulgularla uyumludur.

## 6.2.2. Yüzde uzama miktarı

Yüzde uzama değerlerinin modellenmesi bağlamında p-değerleri incelendiğinde, S elementi haricindeki elementlerin % uzama değerlerini açıkladığı görülmektedir. S elementinin p-değerinin yüksek olması, S miktarı ile yüzde uzama miktarı arasında istatistiki açıdan anlamlı bir ilişkinin kurulamayacağına işaret etmektedir.

Yüzde uzama miktarının modellenmesinde hesaplanan katsayılar değerlendirildiğinde C, Mn ve Cr elementlerinin yüzde uzama değerini düşürdüğü görülmektedir. 6.2.1 numaralı alt başlıkta da belirtildiği üzere; artan C, Mn ve Cr oranı, sünekliliği düşürme etkisi olan martenzit ve/veya perlit fazlarının miktarında artışa neden olmaktadır. Bu nedenle söz konusu bulgular, beklendiği gibi yukarıda özetlenen mekanizma ve uygulamalardaki gözlemler ile de uyumludur.

Öte yandan, artan S miktarı ile çeliğin gevrekliği de arttığından, % uzama değerinin de azalması gerektiği bilinmektedir. Dolayısıyla % uzama miktarının artan S miktarı ile artıyor olması, söz konusu mekanizma ve uygulamalardaki gözlemlerle uyumsuzdur. Bununla birlikte, S miktarı ile % uzama değeri arasındaki ilişkinin modellenmesinde elde edilen p-değerinin kabul edilebilir aralığın dışında (üstünde) olması, bu ilişkinin istatistiksel açıdan güvenilir olmadığına ve S'nin % uzama değerine etkisinin diğer bağımsız değişkenlerin etkisine kıyasla daha karmaşık olduğuna işaret etmektedir.



## 7. GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

### 7.1. Genel Değerlendirme

Çalışmanın ilk aşamasında modelleme için kullanılacak veri kümesi belirlenmiştir. İncelenecek ürün grubunu üreten bir tesisten alınan 2022 yılına ait üretim verileri istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Bu kapsamda ana girdi değişkenleri olarak %C, %Mn, %S ve %Cr elementlerinin miktarı ile ürünün soğutma sürecini etkilemesi nedeniyle ürünün birim ağırlığı ve soğutma suyunun debisi seçilmiştir. Hangi elementlerin değişkenler listesine dahil edileceğinin belirlenmesinde, o elementin ürün içerisindeki oranı ve oranındaki standart sapma değeri dikkate alınmıştır.

Verilerin eniyileştirilmesinde z-skor yöntemi kullanılmıştır. Z skor yöntemi ile uygun bir dağılım eğrisinin oluşturulduğu gözlenmiştir. Z skor yönteminden sonra modellemenin oluşturulması için 10.956 adet ürünün ilgili değerleri kullanılmıştır.

İstatistiksel modelleme için Minitab yazılımı kullanılarak ürünlerin sırasıyla deneysel akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama miktarları ile girdi değişkenleri arasındaki ilişki çözümlenmiştir.

Modelleme çıktılarının girdi değişkenlerinin ilgili mekanik özelliklere etkisini öngörebilme yetkinliği p-değerleri üzerinden irdelenmiştir. Doğrusal regresyon yönteminin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar deneysel testlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak uyumlu oldukları gözlenmiştir. Makine öğrenmesi yöntemi ile geliştirilen regresyon analizi modellemelerinin girdi değerleri ile çıktı değerleri arasındaki ilişkiyi çözümlenebilirlik yetkinlikleri değerlendirilmiş ve teyit edilmiştir. Hesaplanan  $R^2$  değerlerinin modelleme karmaşıklığı arttıkça düştüğü görülmüştür. Bunun üzerine uygulanacak modelleme yöntemlerini belirlemek ve aynı zamanda bunların doğruluğunu tespit etmek üzere Kök Ortalama Kare Hatası (KOKH) yöntemi kullanılmıştır. Oluşturulan modellemelerin doğruluğunun KOKH yöntemi ile kanıtlayabilmek amacıyla yine aynı tesisten 2023 yılının ilk 6 ayına ait 5.437 adet ürünün ilgili üretim verileri kullanılmıştır. Bu verilerin akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama miktarı sonuçları, 2022 yılına ait üretim verileri kullanılarak elde edilen modellemeler ile tekrar hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonuçları ile deney sonuçları KOKH yöntemi ile karşılaştırılarak modellerin tekrarlanabilir ve güvenilir sonuçlar ürettiği ve ürünlere uygulanan ilgili mekanik testlerden elde edilen sonuçlarla oldukça

uyumlu olduğu gözlenmiştir. KOKH değeri; akma dayanımı için 0,18, çekme dayanımı için 0,20 ve yüzde uzama miktarı için 0,02 olarak hesaplanmıştır.

Aynı zamanda modelleme çıktıları metalürjik literatürde yer alan ilgili mekanizma ve/veya bulgular açısından değerlendirilmiştir.

Denklem 6.1 ve 6.2, karbon, mangan ve krom miktarlarındaki değişim ile akma ve çekme dayanımı değerlerindeki değişimin doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Akma ve çekme dayanımları ile karbon, mangan ve krom elementlerinin miktarları arasındaki ilişkinin metalürjik değerlendirmesi şöyle yapılabilir.

Karbon; çeliğin mukavemeti üzerinde en çok etkiye sahip olduğu bilinen bir elementtir. Diğer hiçbir alaşım elementi çelik içerisinde bulunmasa bile karbon elementi tek başına çeliğin mukavemetini doğrudan ve belirgin oranlarda arttırabilmektedir [9]. Karbon elementinin akma ve çekme dayanımı üzerindeki artış etkisi çelik içerisinde oluşan faz yapılarının özellikleri ile ilişkilidir. Ötektoid altı çeliklerde, karbon miktarının artışı ile çelik içerisinde ferrit fazı oranı azalırken perlit fazı oranı artmaktadır. Perlit fazı oranının artışı ile akma ve çekme dayanımında artış görülmektedir [10].

Mangan miktarının artışı ile ötektoid çelik içerisindeki faz geçiş sıcaklıkları düşmektedir, böylece östenit fazı tanelerinin çözünebilirliğine neden olarak aynı koşullarda perlit fazı oluşum oranını arttırmaktadır [6].

Krom faz dönüşüm hızını düşürmektedir. Yavaşlayan dönüşüm hızı, karbonun fazların birbiri içerisinde yer değişim oranını azaltmaktadır ve perlit fazının oranında artışa neden olmaktadır; böylece ötektoid altı çeliklerde mukavemet artışı sağlamaktadır [7].

Tüm bunlara ek olarak ötektoid altı çeliklerde karbon, mangan ve krom miktarının artışı ile, denge dışı soğutma koşullarında ortaya çıkan martenzit ve beynit fazlarının oluşumu için gerekli olan faz dönüşüm sıcaklık aralıklarını ve faz oluşum sürelerini arttırmaktadır [34]. Daha geniş faz dönüşüm sıcaklık aralığı ve daha uzun soğuma hızı sınır değerlerinin oluşmasıyla birlikte aynı koşullarda soğutulan çeliklerde; daha yüksek karbon, mangan ve krom ihtiva etmesi durumunda martenzit ve beynit fazları oluşum oranları artmaktadır (Şekil 6.4) [34]. Ötektoid altı çeliklerdeki martenzit ve beynit fazlarının oluşum oranları arttıkça mukavemet miktarı da artmaktadır [11].

Akma dayanımı (Denklem 6.1) ve çekme dayanımına (Denklem 6.2) ilişkin istatistiksel modelleme sonuçlarının yukarıda özetlenen bulgu ve bilgilerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Diğer bir modelleme girdisi olan kükürt elementinin metalürjik etkisi incelendiğinde, literatürde kükürt elementinin akma ve çekme dayanımlarını düşürdüğü görülmektedir. Ötektoid altı çeliklerde kükürt miktarının artışı ile faz geçiş sıcaklıkları ile daha yüksek mukavemet sağlayan perlit fazı yerine ferrit fazının oluşum oranı artmaktadır. Ek olarak, kükürt miktarındaki artış istenmeyen bir katışkı olan demir-kükürt bileşiğinin oluşuma neden olur. Ötektoid çelik içerisinde demir-kükürt miktarının artışı ile çatlak ilerlemesi için gerekli olan enerji ve mukavemet eşiği düşmektedir [8]. Denklem 6.1 ve 6.2 incelendiğinde kükürt miktarının artışı ile akma ve çekme dayanımlarının düştüğü görülmektedir. Dolayısıyla kükürt elementinin akma ve çekme dayanımları modellemesi metalürjik literatür ile uyumludur.

Denklem 6.3 ile ifade edilen % uzama miktarı modellemesi de ilgili metalürjik literatür ışığında değerlendirilmiştir. Akma ve çekme dayanımlarının metalürjik olarak değerlendirmesinde de ifade edildiği şekilde karbon, mangan ve krom elementlerinin ötektoid altı çelik içerisinde miktarları arttıkça akma ve çekme dayanımının arttığı bilinmektedir [6, 7, 9, 10, 11, 34]. Ötektoid altı çelik mukavemetindeki artış ile süneklik azalmaktadır. Dolayısıyla % uzama miktarı da azalmaktadır [13]. Denklem 6.3'teki karbon, mangan ve krom elementlerinin katsayılarının eksi değerde olması literatür ile uyum göstermektedir.

Denklem 6.3'te yer alan kükürt elementi miktarı ile % uzama değeri arasındaki ilişkinin ilgili metalürjik literatürdeki bulgu ve bilgilerle uyumlu olmadığı tespit edilmiştir. Ötektoid altı çeliklerde artan kükürt miktarı ile çatlağın ilerleme hızı artmakta; dolayısıyla çeliğin kırılma tokluğu ve % uzama değeri düşmektedir [8]. Ancak denklem 6.3'te artan kükürt miktarı ile % uzama miktarının artması öngörülmektedir. Bu uyumsuzluk istatistiksel modellemenin bir diğer çıktısı olan, girdilerinin sonuçlar üzerinden anlamlı olup olmadığını ifade eden, p-değerinin yüksek olmasından da anlaşılmaktadır. Girdinin, sonucu doğru açıklayıp açıklamadığı p-değerinin 0,05'in altında olması ile analiz edilmektedir [17]; istatistiksel modelleme sonucunda elde edilen denklem 6.1'de kükürt elementi için p-değerinin 0,114 olduğu görülmektedir (Tablo 5.7). Bir diğer deyişle kükürt elementinin, % uzama modellemesindeki katsayısı metalürjik literatür ile uyumsuz olmakla birlikte, regresyon analizi yönteminin de bu uyumsuzluğa hesaplanan yüksek p-değeri ile işaret ettiği değerlendirilmiştir.

## 7.2. Öneriler

İstatistiksel modellemelerin yapılması için kullanılan değişkenler ve değer aralıkları Tablo 5.1’de görülmektedir. İstatistiksel çalışmalar ve modelleme ile ilgili tüm yorumlar bu değer aralıkları içerisinde anlamlıdır. Bunun yanında, bu çalışmanın yapılmasındaki temel amaç akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama miktarlarında değişiklik olmadan girdi değişkenlerinin değer aralıklarının genişletilebilmesidir. Bu çalışma ile aralıkların genişletilebileceği görülmüştür ve hem istatistiksel yöntemler hem de uygulamalı yöntemler ile uygunluğu doğrulanmıştır. Benzer yöntemin etkinliğinin artırılması için bu çalışmada kullanılan daha geniş değer aralıkları değişken olarak seçilerek modellemeler iyileştirilebilir. Böylece üretim faaliyetlerindeki maliyetler, herhangi bir uygunsuzluk olmadan daha da düşürülebilir.

Başlık 6.2’de ötektoid altı çelikler için metalürjik literatür çalışmaları ve modellemeler ilişkilendirilmiştir. İlişkilendirme ötektoid altı çeliklerde oluşan faz yapıları ile açıklanmıştır, ancak faz oluşum oranları tespit edilerek modellemedeki ana değişkenlere dahil edilmemiştir. Fazların yapı ve oranları modellemenin bir diğer çıktısı olarak veri setine eklenebilir. Böylece açıklama oranları ( $R^2$ ) iyileştirilerek modellemenin sonuçlar üzerindeki açıklama gücü artırılabilir. Bu çalışma kapsamında literatür ile uyumlu istatistiksel sonuçlar elde edilmiş olsa da hassasiyet ve sapma payları daha da aşağıya çekilerek benzer modellemeler iyileştirilebilir.

Tablo 5.7 ve Denklem 6.3 kapsamında; başlık 6.2.2’de kükürt elementinin % uzama modellemesi içerisinde hem istatistiksel olarak ( $p$ -değeri), hem de metalürjik olarak sonuçları açıklama konusunda uyumsuz olduğu ifade edilmektedir. % uzama miktarının hesaplanmasında kullanılan Denklem 6.3 modellemesinin iyileştirilmesi için, kükürt elementinin ötektoid altı çeliklerdeki etkilerinin daha geniş kapsamda değerlendirilmesini sağlamak adına mikroyapı ve makroyapı incelemeleri yapılabilir. Mikroyapı ve makroyapı incelemeleri sonucunda elde edilecek yeni bulgular ışığında metalürjik ilişkiler kurularak modellemelere yeni bağımsız değişkenler dahil edilebilir. Bu şekilde % uzama miktarı için oluşturulan istatistiksel modelleme iyileştirilebilir ve bu çalışmada tespit edilen uyumsuzluklar giderilebilir.

## KAYNAKÇA

- [1] B. Çevik, Demir Çelik Sektörü, İktisadi Araştırmalar Bölümü, Türkiye İş Bankası, Şubat 2017, p. 4-5
- [2] Salah M. El Haggag, (2005), Environmental Solutions, Chapter 13 - Rural and Developing Country Solutions, Editor(s): Franklin J. Agardy, Nelson Leonard Nemerow, Academic Press, p. 313-400
- [3] Türk Standartları Enstitüsü, TS708 Standardı, Çelik – Betonarme için – Donatı Çeliği, Ankara, Mart 2016, p. 4-9
- [4] I. Bringas, John E, Steel, Standards (1953), Handbooks, manuals, etc., 2. Steel alloys Standards, Handbooks, manuals, etc., II. ASTM data series publication; DS 67A., p. 21-43
- [5] G. M. Evans and N. Bailey, Metallurgy of basic weld metal, Abington Publishing, 1999, p. 23-36
- [6] ASM International, Weld Integrity and Performance, S. Lampman Tech. Ed., 1997, p. 217-249
- [7] V. N. Zikeev (1972)., Modern structural steels for machine construction,” Metal. i Term. Obrabotka Metal., p. 5–8
- [8] S. I. Rudyuk, E. I. Feldman, E. I. Chernov and V. F. Korobeinik, Effect of sulfur and phosphorus on the properties of steel 18B, Plenum Publisher, 1975, p. 1056-1059
- [9] D. Gandy, Carbon Steel Handbook, Electric Power Research Institute, Mart 2007, p. 4-3
- [10] T. B. Massalski, Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd edition Vol.1, Editor, ASM International, Metals Park, 1990, p. 450-470
- [11] Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams, ASM International, Materials Park, p. 1977, 369
- [12] J. C. Smith, Structural Steel Design, John Wiley & Sons Inc, 1996, p. 13-15
- [13] W. F. Hosford, Iron and Steel, University of Michigan, Cambridge University Press, 2012, p. 35-50
- [14] M. Karadaş, M. Çelik, M. Toksoy ve G. Gökçen, Regresyon Analizi ile Bir Jeotermal Santralin Performans Modellemesi, 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17/20 Nisan 2013, p. 198-199
- [15] J. O. Rawlings, S. G. Pantula, D. A. Dickey, Applied Regression Analysis: A Research Tool, Second Edition, Library of Congress Cataloging in Publication Data, 1932, p. 2-29

- [16] S. Chatterjee, A. S. Hadi, *Sensitivity Analysis in Linear Regression*, Wiley, 1988, p. 232-242
- [17] A. F. G. Seber, A. J. Lee, *Linear Regression Analysis*, Wiley, 2003, p. 119-139
- [18] M. Kaufmann, *Machine Learning*, Beverly Park Woolf, 2009, Chapter 7
- [19] B. Sana, S. Nejib and G. Mahmoud, "The Box-Jenkins analysis and neural networks: prediction and time series modeling," *ELSEVIER*, 2003, p. 805–815
- [20] M. Shiblee, P. Kalra and B. Chandra, "Time Series Prediction with Multilayer Perceptron (MLP): A New Generalized Error Based Approach. In *Computer Vision*," Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009, p. 37–44
- [21] H. Zahra and K. Mehdi, "Weighted MLP-ARIMA series hybrid model for time series forecasting," *JIEMS*, 2020, p. 187-201
- [22] M. Francisco, C. Francisco, p. F. Maria and M. Ana, "Strategies for time series forecasting with generalized regression neural networks," *ELSEVIER*, 2021, p. 509-521
- [23] D. F. Spetcht, "A General Regression Neural Network," *IEEE Xplore*, vol. 2, 1991, p. 568-576
- [24] K. Fazle, M. Somshubra and D. houshang, "LSTM Fully Convolutional Networks for Time Series Classification," *IEEE explore*, 2017, p. 1662-1669
- [25] G.E. Hinton et al., A Fast Learning Algorithm for Deep Belief Nets, *Neural Comput.*, 2006, p. 1527–1554
- [26] Thompson, W. R., On a criterion for the rejection of observations and the distribution of the ratio of deviation to sample standard deviation, *The Annals of Mathematical Statistics*. 6, 1935, p. 215-219
- [27] Behboodian, J & Asgharzadeh, Akbar, On the distribution of Z-scores. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction A*. 32, 2008, p. 71-78
- [28] Hodson, T. O.: Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not, *Geosci. Model Dev.*, 15, 2022, p. 5481–5487
- [29] M. Chaabet, E. Dötsch, *Steelmaking Based on Inductive Melting*, *Induction Technology Reports, Heat Processing*, 2012, p. 49-58
- [30] Levi, Elisa & Sgarbi, Simona & Piana, Edoardo. (2021). Acoustic Characterization of Some Steel Industry Waste Materials. *Applied Sciences*. 11. 5924. 10.3390/app11135924, p. 96-117
- [31] Wu, Dongsheng & Ji, Zhenping & Yang, Jian & Gao, Hongwei & Yu, Jiahui & Ju, Zhaojie. (2020). Coordinated Optimal Control of Secondary Cooling and Final Electromagnetic Stirring for Continuous Casting Billets. *Journal of Control Science and Engineering*. 2020, 10.1155/2020/6502028, p. 1-9

- [32] O. Taylan, Endüstriyel Tav Fırınlarında Enerji Tasarrufu ve Emisyon Azaltım Fırsatları, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 29, No 4, 2014, p. 735-743
- [33] Kabir, M.S., Islam, M.M., & Bepari, M.A. (2020). Impact Toughness of Concrete Reinforcement Bars Produced by the THERMEX Process and Ordinary Rolling Process, p. 53-59
- http-1:** <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2023>, (Erişim tarihi: 07.09.2023)



## ÖZGEÇMİŞ

ORCID ID : 0009-0000-5627-5781  
Adı Soyadı : Aytuğ KARAMEŞE  
Yabancı Dil : İngilizce

### Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2013, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
- 2015 – devam ediyor, Müşteri İlişkileri ve Kalite Müdürü, Bilecik Demir Çelik, Kalite