

T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ
ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SOĞUK ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİ İLE 27MnB4, 41Cr4 VE
42CrMo4 ÇELİKLERİNDEN BAĞLANTI ELEMANLARI
ÜRETİMİ VE KARAKTERİSTİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ

Tezi Hazırlayan
Umut BAYDAR

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA

Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

MAYIS 2025

NEVŞEHİR

T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ
ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SOĞUK ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİ İLE 27MnB4, 41Cr4 VE
42CrMo4 ÇELİKLERİNDEN BAĞLANTI ELEMANLARI
ÜRETİMİ VE KARAKTERİSTİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ

Tezi Hazırlayan

Umut BAYDAR

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA

Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

MAYIS 2025

NEVŞEHİR

Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA danışmanlığında Umut BAYDAR tarafından hazırlanan "**Soğuk Şekillendirme Yöntemi İle 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 Çeliklerinden Bağlantı Elemanları Üretimi Ve Karakteristik Davranışlarının İncelenmesi**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji-Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

.../.../20..

JÜRİ

Başkan : Prof. Dr. Murat ESKİL

Üye : Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Serkan DAL

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun.....tarih ve..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../20..

Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Umut BAYDAR



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince bana sağladıkları katkılar ve her türlü destekleri için tez danışmanım Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA'ya, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden, Dr. Öğr. Üyesi Serkan DAL, Prof. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Meslek hayatıma başladığım günden itibaren her koşulda yanımda olan ve hayata, mesleğime dair kazandığım bilgi ve tecrübelerin çoğunu edinmeme yardımcı olan Boztaş Cıvata, TNT Cıvata, Astaş Bağlantı Elemanları, Termosan Isıl İşlem Ailesine ve MATİL Malzeme ve Test İnovasyon Lab. AŞ. ne de teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü desteğiyle her zaman yanımda olan Annem Keziban BAYDAR'a, Babam Recep BAYDAR'a ve Ablam Duygu BAYRAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunar, bu yüksek lisans tezimi çok kıymetli aileme ithaf ederim.

**SOĞUK ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİ İLE 27MnB4, 41Cr4 VE 42CrMo4
ÇELİKLERİNDEN BAĞLANTI ELEMANLARI ÜRETİMİ VE
KARAKTERİSTİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

(Yüksek lisans Tezi)

Mayıs 2025

Umut BAYDAR

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ**

Danışman: Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA

ÖZET

Bu çalışmada, soğuk şekillendirme yöntemi ile 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 çeliklerinden üretilen bağlantı elemanlarının özellikleri ve karakteristik davranışları incelenmiştir. Soğuk şekillendirme işlemi, malzeme üzerinde önemli mekanik özellik değişikliklerine yol açarak, üretilecek bağlantı elemanlarının dayanım, sertlik ve şekil değiştirme kapasitelerini etkileyebilir. Çalışma kapsamında, farklı çelik türlerinin soğuk şekillendirme işlemi sonrasında elde edilen mikro yapısal değişiklikler, mekanik testler (çekme, sertlik, darbe testi vb.) ve yorulma davranışları detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca, her bir çeliğin soğuk şekillendirme sürecindeki tepkileri ve bu çeliklerin bağlantı elemanları üretiminde kullanılabilirliği üzerinde durulmuştur. Elde edilen bulgular, farklı çelik türlerinin mekanik performanslarını karşılaştırarak, bağlantı elemanlarının tasarımında optimal malzeme seçiminde rehberlik sunmayı hedeflemektedir. Bu çalışma, otomotiv, inşaat ve makine sanayi gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılan bağlantı elemanlarının tasarım süreçlerine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar kelimeler; Soğuk şekillendirme, 27Mnb4 çeliği, 41Cr4 çeliği, 42CrMo4 çeliği, Bağlantı elemanları, Mekanik özellikler.

Sayfa adeti:60

**PRODUCTION OF FASTENERS FROM 27MnB4, 41Cr4, AND
42CrMo4 STEELS BY COLD FORMING METHOD AND
INVESTIGATION OF THEIR CHARACTERISTIC
BEHAVIORS.**

(Master Thesis)

Umut BAYDAR

**NEVSEHIR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY INSTITUTE OF
SCIENCES**

MAY 2025

Supervisor: Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA

ABSTRACT

This study investigates the properties and characteristic behaviors of connection elements produced from 27MnB4, 41Cr4, and 42CrMo4 steels using the cold forming process. Cold forming significantly alters the mechanical properties of the material, affecting the strength, hardness, and deformation capacity of the produced connection elements. The research includes a detailed examination of the microstructural changes, mechanical properties (tensile, hardness, impact testing, etc.), and fatigue behavior of each steel after cold forming. Additionally, the study focuses on the response of different steel grades to the cold forming process and their applicability in connection element manufacturing. The findings provide a comparative analysis of the mechanical performance of the steels, offering guidance for optimal material selection in the design of connection elements. This work aims to contribute to the design processes of connection elements used in industrial applications such as automotive, construction, and machinery sectors.

Keywords; Cold forming, 27MnB4 steel, 41Cr4 steel, 42CrMo4 steel, Fasteners, Mechanical properties.

Page number:60

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI.....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
1. BÖLÜM	
GİRİŞ.....	1
2. BÖLÜM	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
2.1.Temel bağlantı elemanları.....	4
2.2.Kalite Standartları ve sertifikasyon.....	5
2.1.1 Uluslararası standartlar.....	5
2.2.2 Türk standartları	5

2.3. Üretim süreçleri.....	6
2.4. Kalite kontrol ve test yöntemleri.....	6
2.5. Kullanım alanları ve seçim kriterleri.....	7
2.6. Karbon çelikleri.....	8
2.7. Alaşımli çelikler.....	9
2.8. Paslanmaz çelikler.....	9
2.9. Alüminyum ve alaşımları.....	10
2.10. Titanyum ve alaşımları.....	10
2.11. Bakır ve alaşımları.....	11
2.12. Plastik ve polimer malzemeler.....	11
2.13. Seramik malzemeler.....	12
2.14. Kullanılan hammaddelerin kıyaslanması.....	12
2.15. Teknik seçim kriterleri.....	13
2.16. Norm ve standartlar.....	13
2.17. Üretim yöntemleri.....	14
2.17.1. Sıcak şekillendirme.....	14
2.17.2. Soğuk Şekillendirme.....	16
3. BÖLÜM	
MATERYAL VE METODLAR.....	27
3.1. Materyal.....	28
3.2. Çekme cihazı.....	28

3.3. Çentik darbe test cihazı.....	30	
3.4. Isıl işlem fırını.....	31	
3.5. Sertlik test cihazı.....	32	
3.5.1. Ölçüm prosedürü.....	34	
4. BÖLÜM		
DENEYSEL SONUÇLAR.....		35
4.1. 27MnB4 Mikroyapı	35	
4.2. 41Cr4 Mikroyapı	38	
4.3. 42CrMo4 Mikroyapı	41	
4.4. Kullanılan çeliklerden üretilen cıvataların ısıl işlem sonuçları.....	43	
4.5. Mekanik kıyaslama.....	51	
5. BÖLÜM		
TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER		55
KAYNAKÇA.....		58

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Kullanılan eliklerin kimyasal bileşimi.....	28
Tablo 4.1 eliklerin ısıı işlem sonucu mekanik sonuçları.....	48
Tablo 4.2 Farklı çeliklere ait mekanik özelliklerin menevişleme sıcaklığına göre değişimi.	53



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Çekilmiş hazırlanmış filmanın hammadde.....	20
Şekil 2.2 soğuk şekillendirme perçin dizilişi.....	21
Şekil 2.3 Dört istasyonda cıvatanın şekillenmesi.....	22
Şekil 2.4 Dört istasyonda cıvatanın şekillenmesi makine görüntüsü.....	23
Şekil 2.5 Cıvataya uygulanan ısıtıl işlemin mikroyapıya etkisi.....	25
Şekil 3.1 Genel akış şeması.....	27
Şekil 3.2 Kullanılan çekme test cihazı.....	29
Şekil 3.3 Çekme testi numuneleri.....	29
Şekil 3.4 Çentik darbe testi cihazı.....	30
Şekil 3.5 Çentik darbe dayanımı testi numune ölçüleri	31
Şekil 3.6 Isıl işlem fırını	32
Şekil 3.7 Sertlik ölçüm cihazı	33
Şekil 3.8 sertlik test numuneleri	33
Şekil 4.1 Isıl işlem öncesi 27MnB4 Mikroyapı görüntüsü	37
Şekil 4.2 Isıl işlem sonrası 27MnB4 Mikroyapı görüntüsü	38
Şekil 4.3 Isıl işlem öncesi 41Cr4 Mikroyapı görüntüsü	40
Şekil 4.4 Isıl işlem sonrası 41Cr4 Mikroyapı görüntüsü	40
Şekil 4.5 Isıl işlem öncesi 42CrMo4 Mikroyapı görüntüsü	43
Şekil 4.6 Isıl işlem sonrası 42CrMo4 Mikroyapı görüntüsü	43
Şekil 4.7 Genel kıyaslama.....	54

Kısaltmalar Listesi

ISO	: International Organization for Standardization
ASTM	: American Society for Testing and Materials
TS	: Türk Standardı
TS EN	: Türk Standardı - Avrupa Standardı (European Norm)
TS EN ISO	: Türk Standardı - Avrupa Standardı - Uluslararası Standardizasyon Örgütü
mm	: milimetre
%	: Yüzde
Mn	: Mangan
Cr	: krom
B	: Bor
Mo	: Molibden
MDF	: Medium Density Fiberboard (Orta Yoğunlukta Lif Levha)
PVC	: Polyvinyl Chloride (Polivinil Klorür)
PTFE	: Polytetrafluoroethylene (Politetrafloroetilen)
ISO	: International Organization for Standardization
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standardizasyon Enstitüsü)
ASME	: American Society of Mechanical Engineers
EMC	: Electromagnetic Compatibility (Elektromanyetik Uyumluluk)
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Bağlantı elemanları, farklı yapıların, makinelerin ve sistemlerin montajında kritik rol oynayan bileşenlerdir. Bu elemanlar, çeşitli parçaların birleştirilmesi, sabitlenmesi veya desteklenmesi için kullanılan, genellikle vidalar, somunlar, cıvatalar, perçinler, pul ve rondelalar gibi küçük ama son derece önemli elemanlardır. Çeşitli endüstriyel sektörlerde, özellikle otomotiv, inşaat, makine ve elektrik mühendisliği gibi alanlarda yaygın olarak kullanılan bağlantı elemanları, iki veya daha fazla parçanın güvenli bir şekilde birbirine bağlanmasını sağlar. Bu sayede, yapının bütünlüğü korunur ve güvenliği sağlanmış olur [1].

Bağlantı elemanlarının doğru seçimi, montajın başarısı için kritik bir faktördür. Yanlış malzeme veya tasarım seçimi, yapının güvenliğini tehlikeye atabilir ve uzun vadede performans kayıplarına yol açabilir. Örneğin, bağlantı elemanlarının dayanıklılığı, uygulama ortamındaki mekanik yükler, sıcaklık değişimleri, titreşim ve korozyon gibi dış etkenlere karşı dirençleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, bağlantı elemanlarının tasarımı, malzeme seçimi ve üretim süreci, yüksek mühendislik bilgisi ve dikkat gerektirir. Bağlantı elemanlarının sadece taşıma kapasitesi değil, aynı zamanda dayanıklılık, aşınma direnci, korozyon direnci ve montaj kolaylığı gibi birçok faktör de göz önünde bulundurularak seçilmelidir [2, 3].

Bağlantı elemanlarının üretimi, kullanılan malzeme ve üretim yöntemine göre farklılık gösterir. Günümüzde, özellikle yüksek mukavemetli bağlantı elemanları için, soğuk şekillendirme gibi gelişmiş üretim yöntemleri tercih edilmektedir. Soğuk şekillendirme, malzemenin oda sıcaklığında şekillendirilmesi ile yapılan bir işlemdir ve genellikle yüksek dayanım ve hassasiyet gerektiren parçaların üretiminde kullanılır. Bu yöntem, metalin plastik deformasyonuna uğratılmadan önce ısı işleme tabi tutulmadan, yüksek gerilmelerle şekillendirilmesini sağlar. Soğuk şekillendirme, özellikle çelik malzemelerde önemli avantajlar sunar. İşlem sırasında malzemenin mikroyapısında oluşan değişiklikler, çeliğin sertliğini ve dayanımını artırarak, bağlantı elemanlarının daha sağlam ve uzun ömürlü olmasını sağlar [4].

Soğuk şekillendirme yöntemi, üretim sürecinde minimum atık ile yüksek verimlilik sağlar, aynı zamanda işlemin hızını artırarak maliyetleri düşürür. Bu yöntem, özellikle yüksek mukavemetli çeliklerin kullanıldığı uygulamalarda oldukça etkilidir. 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 gibi çelikler, soğuk şekillendirme ile yüksek performanslı bağlantı elemanları üretmeye olanak tanır. Bu çelik türleri, özellikle aşırı yük taşıma kapasitesi, yüksek sertlik ve mükemmel yorulma dayanımı gibi özellikleri ile dikkat çeker. Bu özellikler, bağlantı elemanlarının daha uzun süre güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar [5].

Bu çalışmada, soğuk şekillendirme yöntemiyle üretilen 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 çeliklerinin mekanik ve mikro yapısal özellikleri incelenerek, bu çeliklerin bağlantı elemanları üretimindeki performansı değerlendirilecektir. Soğuk şekillendirme işlemi sırasında meydana gelen mikro yapısal değişikliklerin ve bu değişikliklerin mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin araştırılması, daha verimli ve dayanıklı bağlantı elemanlarının üretimine katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak, bu çalışma, endüstriyel uygulamalarda kullanılan bağlantı elemanlarının tasarım ve üretim süreçlerine önemli katkılar sunmayı, aynı zamanda soğuk şekillendirme yönteminin potansiyelini ortaya koymayı hedeflemektedir. Çıkan sonuçlar doğrultusunda değerlendirmeleri yapılacaktır. Bu çalışmanın temel amacı, soğuk şekillendirme yöntemi ile üretilen 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 çeliklerinin, farklı temperleme sıcaklıkları altında sergilediği mekanik özellik değişimlerini incelemektir. Soğuk şekillendirme işlemi, malzemenin mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açmakta ve çeliğin dayanım, sertlik, şekil değiştirme kapasitesi gibi özellikler üzerinde doğrudan etki yapmaktadır. Bu çalışmada, farklı çelik türlerinin aynı bağlantı elemanlarını üretme kabiliyetine sahip olmalarına rağmen, farklı temperleme sıcaklıklarında sergiledikleri farklı mekanik davranışlar ve bu davranışların tasarım sürecine etkileri ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır [6].

Bu bulgular, soğuk şekillendirme işlemi ile üretilen bağlantı elemanlarında malzeme seçiminde ve işlem parametrelerinde dikkat edilmesi gereken önemli noktaları vurgulamaktadır. Aynı tip bağlantı elemanlarının farklı çelik türleriyle üretilmesi, farklı mekanik performanslar sergileyebilir. Bu nedenle, bağlantı elemanlarının tasarımında malzeme seçimi ve işlem parametreleri dikkatlice optimize edilmelidir. Sonuç olarak, bu çalışma, otomotiv, inşaat ve makine sanayi gibi endüstriyel alanlarda kullanılan bağlantı elemanlarının tasarımında, farklı temperleme sıcaklıklarının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini anlamaya yönelik önemli veriler sunmaktadır.

Elde edilen bulgular, tasarımcıların bağlantı elemanlarının dayanıklılığını, güvenliğini ve performansını optimize etmek için malzeme ve işlem seçiminde rehberlik sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında, 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 çeliklerinin soğuk şekillendirme işlemi sonrasında farklı temperleme sıcaklıklarında gerçekleştirilen sertlik testi, çekme testi, akma, uzama, kesit daralması ve çentik darbe testi gibi mekanik testlerle analiz edilmiştir. Bu testler, malzemenin mekanik performansını ve soğuk şekillendirme işlemi sonrasındaki davranışını değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, farklı temperleme sıcaklıklarında bazı mekanik parametrelerde benzerlikler gösterdiğini, ancak bazı parametrelerde belirgin farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, çekme ve akma dayanımı gibi parametreler, farklı temperleme sıcaklıklarında benzer seviyelerde kalırken, sertlik değerlerinde belirli bir yakınsama gözlemlenmiştir. Ancak, çentik darbe testi gibi süneklikle ilişkili özelliklerde, temperleme sıcaklıkları arttıkça belirgin bir düşüş yaşanmıştır. Bu, temperleme sıcaklığının özellikle çentik darbe dayanımı üzerinde belirgin bir etki yaptığını göstermektedir [7].

2. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Temel Bağlantı Elemanları

Bağlantı elemanları, mühendislik yapılarının ve sistemlerinin bütünlüğünü sağlayan temel bileşenlerdir. Bu elemanlar; yapıların güvenliği, dayanıklılığı ve işlevselliği açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Uygun şekilde seçilmiş ve doğru monte edilmiş bağlantı elemanları, yapıların uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar [8].

Vidalar, silindirik bir gövdeye sahip, dış yüzeyinde helisel dişler bulunan bağlantı elemanlarıdır. Dişli yapıları sayesinde iki veya daha fazla parçayı bir arada tutmak için kullanılırlar. Vidalar, baş tipine göre (düz, yıldız, altıgen vb.) ve diş profiline göre (metrik, inç) çeşitli türlerde üretilebilmektedir [9].

Somunlar, genellikle altıgen ya da kare formlarda olan, iç yüzeyinde diş açılmış bağlantı elemanlarıdır. Vidalarla birlikte kullanılarak sağlam ve güvenilir bir bağlantı oluştururlar.

Cıvatalar, vidalara benzer bir dişli yapıya sahip olmakla birlikte, genellikle daha büyük yükleri taşıyabilecek şekilde tasarlanmıştır. Altıgen başlı olup, somun ile birlikte kullanılarak güçlü bağlantılar sağlarlar.

Perçinler, kalıcı bağlantıların oluşturulmasında kullanılan elemanlardır. Genellikle metal parçaları sabitlemek amacıyla tercih edilir ve montaj sırasında plastik deformasyona uğrayarak sabitlenirler.

Kelepçeler, boru ya da benzeri parçaları bir arada tutmak amacıyla kullanılan bağlantı elemanlarıdır. Genellikle sıkma mekanizmasına sahip olup geçici ya da kalıcı bağlantılar oluşturabilirler.

2.2. Kalite Standartları ve Sertifikasyon

Bağlantı elemanlarının kalitesi, çeşitli ulusal ve uluslararası standartlar çerçevesinde belirlenmektedir. Bu standartlar; malzeme özellikleri, mekanik dayanım, boyut toleransları ve yüzey kaplamaları gibi birçok teknik kriteri kapsamaktadır [10].

2.2.1. Uluslararası Standartlar

Bağlantı elemanlarının kalite, güvenlik ve uyumluluğunu sağlamak amacıyla çeşitli uluslararası standartlar geliştirilmiştir:

- **ISO 898-1:** Çelikten imal edilen cıvata ve somunların çekme dayanımı, akma sınırı ve sertlik gibi mekanik özelliklerini tanımlar.
- **ISO 3506:** Paslanmaz çelik bağlantı elemanlarının mekanik özellikleri ile korozyon direnci sınıflandırmalarını kapsar.
- **ISO 965:** Vida dişlerinin tolerans sınıflarını belirleyerek, bağlantı elemanlarının uyumlu çalışmasını sağlar.
- **ASTM A325:** Yapı çeliklerinde kullanılan yüksek dayanımlı cıvataların mekanik özelliklerini içerir.
- **ASTM F3125:** Yüksek dayanımlı yapısal cıvatalar için birleşik bir teknik standarttır.
- **ASTM A193:** Yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışan bağlantı elemanları için uygun malzeme ve performans kriterlerini sunar.

2.2.2. Türk Standartları (TS)

Türkiye'de bağlantı elemanlarına yönelik standartlar, Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından belirlenmiştir:

- **TS EN 24014:** Vida ve somunlar için temel teknik şartları ve ölçü standartlarını içerir.
- **TS EN ISO 898-1:** Çelik bağlantı elemanlarının mekanik özelliklerini tanımlar ve ISO 898-1 ile uyumludur.
- **TS EN ISO 3506:** Paslanmaz çelik bağlantı elemanları için mekanik ve fiziksel gereklilikleri belirler.

2.3. Üretim Süreçleri

Bağlantı elemanlarının üretim süreci, ürünün kalite, dayanım ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla dikkatle planlanan bir dizi teknik adımdan oluşur. Süreç, öncelikle kullanım alanına, çalışma koşullarına ve maliyet-etkinliğe uygun olarak çelik, paslanmaz çelik, alüminyum veya çeşitli alaşımlardan oluşan hammaddenin seçilmesiyle başlar. Bu hammadde, istenilen çap ve yüzey kalitesine ulaşması için tel çekme işlemine tabi tutulur. Bu işlem hem malzemenin boyutsal hassasiyetini artırır hem de iç yapının daha homojen hâle gelmesini sağlar. Tel haline getirilen malzeme, soğuk şekillendirme yöntemiyle oda sıcaklığında kalıplar kullanılarak şekillendirilir. Bu aşamada bağlantı elemanının baş ve gövde kısımları oluşturulur. Soğuk şekillendirme, üretim hızını artırırken aynı zamanda malzeme mukavemetini de iyileştirir. Ancak daha büyük boyutlu ya da karmaşık şekilli parçalarda, malzeme rekristalizasyon sıcaklığının üzerine kadar ısıtılarak sıcak şekillendirme uygulanabilir. Şekillendirilen parçaların dış profilleri genellikle soğuk dış haddelendirme yöntemiyle açılır. Bu yöntem, lif yapısını bozmadan dişleri oluşturarak daha yüksek dayanım sağlar. Hassas toleranslar gerektiğinde ise talaş kaldırarak dış açma yöntemine başvurulabilir. Mekanik özelliklerin istenen değerlere ulaşması amacıyla, malzemeye ısıl işlem uygulanır; böylece sertlik, tokluk ve çekme dayanımı artırılır. Son olarak, ürünler galvanizleme, fosfatlama, krom kaplama veya boyama gibi çeşitli yüzey işlemleri ile hem korozyon direnci artırılır hem de estetik görünüm ve yüzey kalitesi iyileştirilir. Üretim sürecinin sonunda bağlantı elemanları, boyutsal doğruluk, yüzey kalitesi, mekanik performans ve korozyon dayanımı açısından kapsamlı kalite kontrol testlerine tabi tutularak sevkiyata hazır hâle getirilir.

2.4. Kalite Kontrol ve Test Yöntemleri

Bağlantı elemanlarının kalitesi, üretimin her aşamasında gerçekleştirilen çeşitli test ve muayene yöntemleriyle denetlenmektedir.

2.4.1. Mekanik Testler

- **Çekme Testi:** Malzemenin kopma noktasını belirler.
- **Akma Dayanımı Testi:** Elastik sınır değerini ölçer.
- **% Uzama:** Kopma sonrası malzemenin uzama miktarını gösterir.

- **% Kesit Daralması:** Kopma esnasında kesit alanındaki daralmayı ölçer.
- **Çentik Darbe Dayanımı:** Tokluk özelliğini ortaya koyar.
- **Sertlik Testleri:** Yüzey sertliğini belirlemek amacıyla Rockwell veya Brinell yöntemleriyle uygulanır.

2.4.2. Tahribatsız Testler

- **Ultrasonik Test:** Malzeme içerisindeki hataları tespit eder.
- **Manyetik Parçacık Testi:** Yüzey ve yüzey altındaki çatlakları belirler.
- **Görsel Muayene:** Yüzeydeki kusur ve hataları saptamak için yapılır.

2.5. Kullanım Alanları ve Seçim Kriterleri

Bağlantı elemanlarının seçimi, kullanım amacı, maruz kalacağı yükler, çevresel koşullar ve maliyet gibi birçok faktöre bağlıdır. Her uygulama için uygun malzeme ve üretim yöntemi seçilerek, güvenli ve uzun ömürlü bir bağlantı elde edilmesi amaçlanmalıdır. İnşaat sektöründe bağlantı elemanları, yük taşıyan yapı elemanlarının birleştirilmesinde kritik rol oynar. Çelik konstrüksiyon sistemlerinde kolon-kiriş birleşimleri, çatı makaslarının montajı, temel plakalarının sabitlenmesi ve prefabrik yapı elemanlarının sahada birleştirilmesi gibi uygulamalarda cıvata, somun, ankraj ve vida gibi elemanlar tercih edilmektedir. Özellikle deprem gibi dinamik yüklerin etkili olduğu yapılarda, bu elemanların enerji emici ve deformasyonu kontrol edici özellikte olması büyük önem taşır. Otomotiv endüstrisi, yüksek mukavemet, titreşim dayanımı ve hafiflik gibi kriterler doğrultusunda bağlantı elemanlarını seçmektedir. Motor bloğu, süspansiyon sistemi, şasi birleşim noktaları ve gövde panellerinde çeşitli bağlantı tipleri (örneğin flanşlı cıvatalar, yüksek dayanımlı vidalar) kullanılmaktadır. Bu elemanların mekanik ve termal yüklemelere karşı dayanıklı olması beklenirken, sökülebilir olmaları da bakım ve montaj kolaylığı açısından avantaj sağlamaktadır. Makine tasarımında bağlantı elemanları, hareketli ve sabit parçaların güvenli şekilde birleştirilmesini sağlar. Dişli sistemleri, motor-redüktör grupları, taşıyıcı miller ve çerçeve yapılarında hem statik hem de dinamik yükler altında işlevsellik gösteren yüksek dayanımlı elemanlar tercih edilmektedir. Bu uygulamalarda vida sıkma torku, ön gerilmeler ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler bağlantı performansını doğrudan etkilemektedir [11, 12, 13].

Mobilya sektöründe bağlantı elemanları, estetik ve fonksiyonellik dengesi gözetilerek seçilmektedir. MDF, sunta ve masif ahşap gibi malzemelerde vida, eksantrik bağlantı, minifix ve lamello gibi sistemler kullanılarak montaj sağlanmaktadır. Demonte mobilyalarda ise kolay kurulum ve söküm imkânı sunan bağlantı çözümleri tercih edilmektedir. Metal mobilyalarda ise taşınabilirlik ve modülerlik avantajı nedeniyle kaynak yerine cıvatalı bağlantılar öne çıkmaktadır. Elektronik cihazlarda bağlantı elemanları; devre muhafazalarında, bağlantı kutularında, ısı emici bloklarda ve cihaz kasalarının montajında kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda genellikle küçük çaplı, hassas ve paslanmaz özellikli vidalar tercih edilmektedir. Elektriksel iletkenlik, elektromanyetik uyumluluk (EMC) ve ısı iletimi gibi teknik gereksinimler, bağlantı elemanı seçiminde belirleyici olmaktadır.

Havacılık ve uzay sanayinde kullanılan bağlantı elemanları; düşük ağırlık, yüksek mukavemet ve çevresel dayanım gibi kriterlere göre özel olarak tasarlanmaktadır. Titanyum, Inconel ve alüminyum alaşımlarından üretilen bu elemanlar; kabin montajı, motor birleşimi ve gövde panelleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda bağlantı güvenliği hayati önem taşımakta ve tüm bağlantılar sıkı kalite kontrol süreçlerinden geçirilmektedir. Ayrıca vibrasyon, basınç farkları ve sıcaklık değişimlerine karşı üstün performans göstermeleri beklenmektedir [14, 15]. Bağlantı elemanlarının performansı, üretildikleri malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine doğrudan bağlıdır. Kullanım koşulları, maliyet, korozyon direnci, mekanik dayanım ve üretim yöntemleri gibi faktörler malzeme seçiminde belirleyici rol oynar. Bu bölümde bağlantı elemanlarında yaygın olarak kullanılan malzeme türleri ve bu malzemelere ait temel özellikler açıklanmıştır.

2.6. Karbon Çelikleri

Karbon çelikleri, bağlantı elemanlarının üretiminde en yaygın tercih edilen malzeme grubunu oluşturmaktadır. Bu çelikler, içerdikleri karbon oranına göre düşük, orta ve yüksek karbonlu olmak üzere üç ana sınıfa ayrılır. Düşük karbonlu çelikler (örneğin C15, C20), yüksek şekillendirilebilirlikleri ve düşük üretim maliyetleri sayesinde özellikle seri üretim uygulamalarında tercih edilir; ancak mekanik dayanımları sınırlı olup, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda yeterli performans göstermezler.

Orta karbonlu çelikler (örneğin C35, C45), ısıtılarak işlenerek mukavemet özellikleri artırılabilen bir yapıya sahiptir. Bu nedenle otomotiv ve makine parçaları gibi hem dayanım hem de işlenebilirlik gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılırlar. Yüksek karbonlu çelikler (örneğin C60, C75) ise yüksek sertlik ve aşınma direnci ile öne çıkar. Bu özellikleri sayesinde yaylar, kesici takımlar ve yüksek dayanımlı cıvatalar gibi aşırı mekanik yüke maruz kalan uygulamalarda tercih edilmektedir. Karbon çeliklerinin en önemli avantajları arasında uygun maliyetli oluşları, kaynaklanabilirlikleri ve geniş bir mekanik mukavemet aralığına sahip olmaları sayılabilir. Ancak, bu malzeme grubunun en belirgin dezavantajı düşük korozyon direncidir. Bu nedenle, dış ortamda kullanılacak bağlantı elemanlarında mutlaka kaplama gibi yüzey koruma işlemleriyle desteklenmeleri gerekmektedir [16, 17].

2.7. Alaşımli Çelikler

Alaşımli çelikler; manganez, krom, molibden, bor ve nikel gibi elementler içeren, yüksek mekanik performans gerektiren uygulamalarda kullanılan malzemelerdir. Bu alaşım elementleri sayesinde çeliklerin mukavemeti, sertleşebilirliği ve aşınma direnci artar. 41Cr4, 42CrMo4 ve 27MnB4 gibi yaygın alaşımlar, uygun ısıtılarak yüksek çekme dayanımı ve darbe direnci kazanır. Ayrıca bu çelikler, soğuk şekillendirme ve diş açma gibi üretim süreçlerine de uygundur. Alaşımli çeliklerin avantajları arasında yüksek dayanım, sertleşebilirlik ve aşınma direnci yer alırken; dezavantajları, karbon çeliklerine göre daha yüksek maliyetli olmaları ve özel ısıtılarak işlenmeleridir [18, 19].

2.8. Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çelikler, yüksek krom içeriği sayesinde özellikle korozyona karşı üstün dayanıklılık gösteren malzeme grubudur. Bu özellikleriyle özellikle nemli, kimyasal veya aşındırıcı ortamlarda tercih edilirler. Paslanmaz çelikler, genellikle AISI (American Iron and Steel Institute) sınıflandırması ile tanımlanır. Örneğin, AISI 304 sınıfı paslanmaz çelikler, iyi korozyon direnci ve şekillendirilebilirlik sunarak geniş bir uygulama alanına sahiptir [20].

Daha zorlu koşullar için tasarlanmış olan AISI 316 ise içerdiği molibden elementi sayesinde deniz suyu ve kimyasal ortamlarda daha yüksek dayanıklılık sağlar. Bunun yanı sıra, AISI 410 ve 420 gibi türler sertleştirilebilir özellik taşımakla birlikte, korozyon direnci 304 ve 316'ya göre daha düşüktür. Paslanmaz çeliklerin başlıca avantajları arasında yüksek korozyon ve sıcaklık dayanımı ile estetik ve parlak görünümleri yer almaktadır. Ancak, bu malzemelerin yüksek maliyetli olması ve bazı türlerinin mıknatıslanabilir olması kullanım alanlarını kısıtlayabilmektedir. Bu nedenle, uygulama gereksinimleri göz önünde bulundurularak doğru paslanmaz çelik türünün seçilmesi önem taşır [21].

2.9. Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, hafifliğin önemli olduğu uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen malzemelerdir. Özellikle 6000 ve 7000 serisi alüminyum alaşımları, bağlantı elemanlarında mekanik dayanımı artırmak için kullanılır. Bu alaşımlar, kendiliğinden oluşan ince bir oksit tabakası sayesinde orta düzeyde korozyon direnci sağlar ve böylece dış etkenlere karşı dayanıklı bir yüzey sunar. Alüminyumun düşük yoğunluğu, malzemenin genel ağırlığını azaltırken işlenebilirliği yüksek olması da üretim süreçlerini kolaylaştırır. Bununla birlikte, alüminyum alaşımlarının mekanik dayanımı çelik ve alaşımlı çeliklere göre daha düşüktür. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda performansları azalır, bu nedenle yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda sınırlı kullanılırlar. Avantajları arasında hafiflik, iyi işlenebilirlik ve yeterli korozyon direnci bulunurken, dezavantajları ise düşük mekanik dayanım ve yüksek sıcaklıklarda zayıf performans olarak öne çıkar [21].

2.10. Titanyum ve Alaşımları

Titanyum ve titanyum alaşımları, özellikle havacılık, uzay ve medikal sektörlerinde sıkça tercih edilen ileri teknoloji malzemelerindendir. Düşük yoğunlukları ve yüksek dayanımları sayesinde yapısal ağırlığın azaltılmasına katkı sağlarlar. Ayrıca biyouyumlu olmaları sebebiyle medikal implantlarda kullanımları yaygındır. Titanyum malzemeler genellikle kullanım amaçlarına göre sınıflandırılır; örneğin, Grade 2 olarak bilinen saf titanyum daha hafif yüklerde tercih edilirken, yüksek dayanım gerektiren

uygulamalarda, özellikle havacılık sektöründe, Grade 5 (Ti-6Al-4V) alaşımı yaygın olarak kullanılır. Titanyumun başlıca avantajları arasında üstün korozyon direnci ve yüksek özgül mukavemet (dayanım/ağırlık oranı) yer alır. Ancak, titanyumun çok yüksek maliyetli olması ve işlenmesinin zorluğu, kullanım alanlarını kısıtlayan önemli dezavantajlardır. Bu özellikler, titanyumu yüksek performans gerektiren özel uygulamalar için ideal kılar [22, 23].

2.11. Bakır ve Alaşımları

Bakır esaslı alaşımlar, elektrik iletkenliğinin önemli olduğu uygulamalarda ve estetik kaygıların ön planda olduğu tasarımlarda sıklıkla tercih edilir. Bu alaşımlar arasında en yaygın olanları pirinç (Cu-Zn) ve bronz (Cu-Sn)dur. Pirinç, parlak yüzeyi ve yüksek korozyon direnci sayesinde dekoratif amaçlı kullanımlarda ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Bronz ise özellikle denizcilik sektöründe yaygın olarak kullanılır; yüksek aşınma ve korozyon direnci, tuzlu su gibi zorlu ortam şartlarına karşı dayanıklılık sağlar. Bu alaşımların avantajları arasında iyi elektriksel iletkenlik ve korozyon direnci bulunurken, mekanik dayanımlarının görece düşük olması önemli bir dezavantajdır. Bu nedenle bakır alaşımları, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda sınırlı kullanılır [20].

2.12. Plastik ve Polimer Malzemeler

Naylon, PVC ve PTFE gibi termoplastik malzemeler, kimyasal dayanımın ve elektrik yalıtımının ön planda olduğu bağlantı elemanı uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir. Bu malzemeler, hafif olmaları ve korozyona karşı dirençli yapıları sayesinde özellikle elektriksel izolasyonun önemli olduğu alanlarda kullanılmaktadır. Termoplastiklerin sunduğu yüksek kimyasal dayanım, agresif ortam koşullarında bile uzun ömürlü performans sağlamalarına olanak tanır. Bununla birlikte, termoplastiklerin dezavantajları arasında düşük sıcaklık dayanımı ve mekanik mukavemetin sınırlı olması yer almaktadır. Bu nedenle, yüksek sıcaklık ve yüksek mekanik yük gerektiren uygulamalarda kullanımları sınırlıdır ve genellikle destekleyici veya tamamlayıcı elemanlar olarak değerlendirilir [11].

2.13. Seramik Malzemeler

Özel uygulamalarda, özellikle yüksek sıcaklık, kimyasal etkiler ve elektriksel izolasyonun kritik olduğu durumlarda belirli malzemeler sınırlı olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, aşırı sıcaklıklara ve zorlu kimyasal ortamlara karşı üstün dayanım sergilerken, aynı zamanda elektriksel yalıtım özellikleriyle de öne çıkar. Ancak, bu tür malzemelerin kırılgan yapısı ve yüksek üretim maliyeti, kullanım alanlarını sınırlayan önemli dezavantajlardır. Bu nedenle, yüksek performans gerektiren ancak maliyet ve dayanıklılık dengesi iyi planlanması gereken uygulamalarda tercih edilmektedir.

2.14. Kullanılan Hammaddelerin Kıyaslanması

27MnB4 çeliği, diğer çeliklere göre daha düşük karbon içeriğine sahiptir. Bu, daha iyi şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirlik sağlasa da, sertleşme kapasitesi daha düşüktür. 41Cr4 ve 42CrMo4, daha yüksek karbon içeriği ile daha sert ve dayanıklı hale gelir, ancak şekillendirme ve kaynak yapılması daha zordur. 27MnB4'te bor ilavesi bulunur, bu da çeliğin sertleşebilirliğini artırırken, 41Cr4 ve 42CrMo4'te krom ve molibden bulunur, bu da yüksek sıcaklık dayanımını ve aşınma direncini artırır [1]. 42CrMo4, molibden içeriği ile daha yüksek sıcaklık ve aşınma direncine sahipken, 41Cr4, krom ile dayanıklılığını artırmış bir çeliktir. 41Cr4 ve 42CrMo4, 27MnB4'e kıyasla daha yüksek dayanım ve sertlik özelliklerine sahip çeliklerdir. 42CrMo4'ün molibden içeriği, yüksek sıcaklık ve ağır yük altında daha iyi performans gösterir.

27MnB4 daha düşük dayanım sunarken, ısıl işleme daha yüksek sertlik elde edilebilecek bir çelik değildir [1, 25, 21]. 27MnB4, daha düşük sertlik gerektiren ve iyi şekillendirilebilirlik isteyen otomotiv ve makine parçalarında kullanılır. 41Cr4 ve 42CrMo4, daha sert ve dayanıklı olmasının gerektiği, ağır makinelerde, dişlilerde, şaftlarda ve diğer yüksek performans gerektiren parçalarda tercih edilir [1]. Bu çelikler, her biri farklı kimyasal bileşimlere sahip olup, farklı mekanik özellikler ve kullanım alanları sunar. 27MnB4, daha düşük karbon içeriği ve bor alaşımı ile iyi şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirlik sağlarken, 41Cr4 ve 42CrMo4, yüksek dayanım ve sertlik gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. 42CrMo4, molibden içeriği ile daha iyi sıcaklık ve aşınma dayanımı sağlarken, 41Cr4, krom sayesinde dayanıklılığını artırır [24].

2.15. Teknik seçim kriterleri

Bağlantı elemanının taşınması beklenen maksimum yük, tasarımın temel belirleyicisidir. Statik yükler, uzun süreli sabit kuvvet uygulamalarını ifade ederken; dinamik yükler, titreşim ve darbe gibi zamanla değişen kuvvetleri kapsar. Bu nedenle malzeme dayanımı, çap seçimi ve uygulanan sıkma torku gibi unsurlar dikkatle değerlendirilmelidir. Uluslararası standartlara (örneğin ISO 898, DIN, ASME) uygun bağlantı elemanları, montaj sürecinde kolaylık ve uyumluluk sağlar. Ancak özel projelerde, yük taşıma kapasitesi veya yapısal sınırlamalar nedeniyle özel ölçülere sahip elemanların üretilmesi gerekebilir. Bağlantı elemanlarının kullanılacağı ortamın kimyasal ve fiziksel özellikleri, malzeme seçiminde belirleyici olur. Deniz suyu, asidik atmosfer, yüksek nem gibi korozyona neden olabilecek koşullarda yüzey kaplama (örneğin galvaniz, Dacromet) veya korozyona dayanıklı alaşımlar tercih edilmelidir. Bağlantı elemanlarının montaj ve demontaj işlemlerinin kolay olması, özellikle periyodik bakım gerektiren sistemlerde büyük avantaj sağlar. Ulaşılması zor bölgelerde kullanılan bağlantı elemanlarının, özel takımlar veya otomasyon sistemleriyle uyumlu olması beklenir. Malzeme, üretim yöntemi ve kaplama işlemleri gibi faktörler bağlantı elemanının maliyetini belirler. Yüksek maliyetli ürünlerde, dayanıklılık ve uzun ömür gibi faktörler gözetilerek optimum seçim yapılmalıdır. Ekonomik verimlilik, seri üretim ve stok yönetimi açısından da dikkate alınmalıdır. Sürekli hareket eden veya titreşime maruz kalan bağlantı noktalarında, sürtünmeye ve aşınmaya dayanıklı malzemelerin kullanılması gerekir. Bu tür uygulamalarda yüzey sertliği yüksek, kaplama ile güçlendirilmiş veya alaşımlı çelik elemanlar tercih edilir [25, 26, 27].

2.16. Norm ve Standartlar

Bağlantı elemanlarının belirli kalite standartlarına uygunluğu, güvenliğin ve performansın teminatı niteliğindedir. ISO, DIN, ASTM ve SAE gibi standartlar; ölçü toleransları, mekanik özellikler ve malzeme tanımlarını belirler. Kalite kontrol süreçlerinde bu standartlara uygunluk mutlaka denetlenmelidir [28].

2.17. Üretim Yöntemleri

2.17.1. Sıcak Şekillendirme

Sıcak şekillendirme, metal veya alaşımların yüksek sıcaklıklarda (genellikle rekristalizasyon sıcaklığının üzerinde, çelik için yaklaşık 900–1250°C arası) işlenerek istenilen geometrik şekil ve mekanik özelliklere ulaşmasını sağlayan kritik bir üretim yöntemidir. Bu işlem sırasında malzemenin tane küçülmesi ve homojen bir mikroyapı elde edilmesi sağlanarak ürünün dayanıklılığı ve mukavemeti artırılır. Sıcak şekillendirme, yüksek üretim adetleri ve karmaşık geometrik formlar için uygundur [29].

Avantajları:

- Yüksek şekil verme kabiliyeti
- Düşük şekil verme kuvvetleri
- Homojen mikroyapı ve mekanik özellikler
- Yüzey kusurlarının azalması

Dezavantajları:

- Enerji maliyetlerinin yüksek olması
- Malzeme yüzeyinde oksitlenme oluşabilmesi
- İşlem sonrası yüzey kalitesinde bozulma riski

Sıcak şekillendirmede kullanılan hammaddeler genellikle çelik, alüminyum ve bu metallerin çeşitli alaşımlarından oluşur. Hammadde seçimi, ürünün kullanım alanı ve gereksinimlerine göre yapılır.

Hammaddenin işleme başlamadan önce standart boyutlarda ve şekillerde (rulo, çubuk, levha vb.) olması, işlem verimliliğini artırır. Malzemenin sıcak şekillendirme sırasında akışkanlığı, deformasyon dayanıklılığı ve çatlama eğilimi analiz edilir. Bu parametreler şekillendirme hızını, basıncını ve sıcaklık aralığını belirler.

Ayrıca, yüzeydeki pas, yağ ve diğer kirleticilerin temizlenmesi, oksit tabakalarının giderilmesi gereklidir. Gerekli durumlarda malzeme ön ısıtması uygulanabilir. Hammadde, istenen boyutlara getirilebilmesi için çeşitli kesme yöntemleri kullanılır makaslama, lazer kesim, plazma kesim, su jeti kesim vb. Kesim işlemlerinde tornalar, frezeler, presler ve özel kesme makineleri tercih edilir. Kesilen parçaların boyutları, kenar pürüzlülüğü, toleransları ve yüzey kalitesi kontrol edilir. Eğer çapak veya pürüz varsa giderilir. Malzemenin kısa sürede homojen ısıtılması için indüksiyon yöntemi kullanılır. Manyetik alan etkisiyle hızlı ve kontrollü ısıtma sağlanır. Isı seviyesi, malzemenin kimyasal bileşimi ve kalınlığına göre hassas şekilde ayarlanır. Aşırı ısınma çatlak ve malzeme bozulmasına yol açabilir. Isıtma süresi optimize edilerek üretim verimliliği maksimize edilir ve sıcaklık sensörlerle izlenir.

Sıcak veya soğuk pres makineleri kullanılarak malzeme yüksek basınç altında istenilen şekle getirilir. Basınç, sıcaklık ve uygulama süresi kontrol edilerek malzemenin elastik sınırları aşılmadan kalıcı şekil verilmesi sağlanır. Üretilen parçaların ölçüleri, yüzey kalitesi ve mekanik özellikleri test edilir; deformasyon veya çatlak görülen ürünler üretim hattından çıkarılır. Presleme ve şekillendirme sonrası parçaların son ölçülerine getirilmesi için frezeleme, tornalama ve delme gibi talaş kaldırma işlemleri uygulanır. Kesici takımların malzeme türüne uygun sertlik ve geometriye sahip olması, işleme kalitesini ve takım ömrünü etkiler. İşlem sonrası yüzey pürüzlülüğü ve toleranslar kontrol edilir [8]. Bağlantı elemanlarının vida dışı formunu oluşturmak için uygulanan soğuk şekillendirme işlemidir. Talaş kaldırmadan malzemenin plastik deformasyonu ile dişler oluşturulur.

Talaşsız üretim yöntemleri, malzeme israfını azaltması nedeniyle üretim süreçlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemler sayesinde, parçaların yüzey sertliği ve dayanıklılığı artarken dişlerin mekanik dayanımı da yüksek düzeyde sağlanır. Özellikle ovalama işlemi sonrası, diş profilinin ölçümleri ve yüzey düzgünlüğü detaylı bir şekilde incelenir; çünkü bu kontroller montaj kolaylığı ve bağlantı elemanlarının işlevselliği açısından kritik öneme sahiptir. Üretim sonrasında, parçaların mekanik özelliklerini geliştirmek, iç gerilmeleri azaltmak ve malzemenin homojen yapısını sağlamak amacıyla ısıtma işlemleri uygulanır. Tavlama işlemi, malzemenin yumuşatılması ve iç gerilmelerin giderilmesi için yapılırken, temperleme sertliği azaltmadan tokluğun artırılmasını sağlar.

Normalizasyon işlemi ise mikroyapının dengelenmesine yönelik olup, bu işlemde ısı seviyesi, tutma süresi ve soğutma hızı gibi parametreler titizlikle kontrol edilir. İşlem tamamlandığında sertlik, mukavemet ve süneklik değerleri test edilerek istenilen mekanik özelliklerin sağlandığı doğrulanır. Bu ısıl işlemler, bağlantı elemanlarının performansını artırmak ve kullanım ömrünü uzatmak açısından büyük önem taşır. Bağlantı elemanlarının korozyon dayanımını artırmak için çeşitli kaplama yöntemleri uygulanır: galvanizleme (çinko kaplama), krom kaplama, pasivasyon, elektro kaplama vb. Kaplama, özellikle dış ortam, deniz suyu veya kimyasal ortamlarda kullanılan parçaların ömrünü uzatır. Ayrıca estetik görünüm ve sürtünme katsayısı gibi işlevsel özellikleri de iyileştirir. Kaplama kalınlığı, yapışma gücü, yüzey pürüzlülüğü ve renk tutarlılığı detaylı kalite kontrol testlerinden geçirilir [30].

2.17.2. Soğuk Şekillendirme

Soğuk şekillendirme, metal malzemelerin yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmadan, genellikle oda sıcaklığında veya düşük seviyede ısıtılarak (genellikle 100°C'nin altında) şekillendirilmesi işlemidir. Bu yöntem, özellikle bağlantı elemanları, vidalar, somunlar ve benzeri küçük ama yüksek hassasiyet gerektiren ürünlerin seri üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir. Soğuk şekillendirme, üretim hızı, malzeme verimliliği ve yüzey kalitesi açısından büyük avantajlar sunar. Soğuk şekillendirme, malzemenin plastik deformasyon sınırları içinde kalacak şekilde kontrollü kuvvetlerin uygulanmasıyla gerçekleştirilir. İşlem, metalin akışkanlık özelliklerinden yararlanarak istenilen formun elde edilmesini sağlar. Burada önemli olan, malzemenin elastik deformasyon sınırı aşılmadan plastik deformasyona ulaşmasıdır. Bu sayede şekillendirme sırasında malzemenin iç yapısı zarar görmeden şekil değişimi sağlanır [31, 32].

- **Plastisite ve Akışkanlık:** Malzemenin plastik deformasyon kapasitesi, yani şekil değişimine direnç göstermeden kalıcı olarak şekil alabilme yeteneği, soğuk şekillendirme sürecinin temelini oluşturur. Soğuk şekillendirme sırasında tane yapısı sıkışır, dislokasyon yoğunluğu artar ve böylece malzemenin mukavemeti yükselir (soğuk sertleşme) [31].

- **Mikroyapısal Değişiklikler:** Soğuk şekillendirme işlemi, metalin kristal yapısında plastisite sınırları içinde yeniden düzenlemeler yaratır. Bu durum tane boyutlarının küçülmesine ve dislokasyonların birikmesine neden olarak mekanik dayanımı artırırken sünekliği bir miktar azaltabilir [6].
- **Hammadde Hazırlığı:** Soğuk şekillendirmede kullanılacak metal çubuk, tel veya levhalar yüzey temizliği ve kontaminasyonlardan arındırma işlemlerinden geçirilir. Yüzeydeki yağ, pas ve kirler kaldırılır [4].
- **Kesme ve Ölçülendirme:** Hammadde, işlem için uygun boyutlarda kesilir. Kesilen parçaların toleransları sıkı bir şekilde kontrol edilir.
- **Şekillendirme İşlemi:** Presleme, dövme ve ovalama yöntemleri ile metal malzeme yüksek basınç altında kalıcı deformasyona uğratılır. Bu aşamada talaş kaldırılmaz; malzeme plastik deformasyonla şekil değiştirir.
- İşlem adımları genellikle çok kademelidir; her aşamada malzeme istenilen formda biraz daha şekillenir [25].
- **Mikrosertleşme ve Soğuk Sertleşme:** Soğuk şekillendirme, malzemenin mekanik dayanımını artıran bir soğuk sertleşme etkisi oluşturur. Bu nedenle, işlem sonrası genellikle ısıl işlemle (örneğin tavlama) malzeme özellikleri optimize edilir [31].
- **Yüzey Kalitesi ve Toleranslar:** Soğuk şekillendirme yöntemi, yüksek yüzey kalitesi ve sıkı toleransların elde edilmesine olanak tanır. Bu da ek işlemlere duyulan ihtiyacı azaltır [31].

Soğuk şekillendirme yönteminin en önemli avantajlarından biri, yüksek üretim hızına sahip olmasıdır; bu da yöntemi seri üretim için oldukça uygun hale getirir ve otomasyon sistemleriyle entegrasyonunu kolaylaştırır. Ayrıca, bu yöntem talaş kaldırma işlemi gerektirmediği için hammadde israfı minimuma iner, böylece malzeme tasarrufu sağlanır. Üretilen parçalar, pürüzsüz ve işlenmiş yüzeye sahip olurken, soğuk sertleşme etkisi sayesinde mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklerde belirgin bir artış görülür. Soğuk şekillendirme, dar tolerans aralıklarında boyutsal hassasiyetle üretim yapılabilmesine olanak tanıdığı gibi, sıcak şekillendirmeye kıyasla daha az enerji tüketmesi nedeniyle enerji tasarrufu açısından da avantaj sağlar [32].

Bununla birlikte, bu yöntemin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Çok yüksek sertlikteki malzemeler veya kalın kesitler için soğuk şekillendirme uygulaması kısıtlıdır ve malzeme yorulması sorunu ortaya çıkabilir; işlem sırasında dislokasyon

yoğunluğunun artması nedeniyle malzemenin sünekliği azalabilir, bu durum bazı durumlarda kırılma riskini artırır.

Ayrıca, mekanik özelliklerin optimize edilmesi amacıyla işlem sonrası çoğunlukla tavlama veya temperleme gibi ısı işlemler gereklidir. Soğuk şekillendirme işlemi, tek seferde çok büyük şekil değişimlerine olanak tanımaz; bu nedenle karmaşık veya büyük şekil değişiklikleri için çok aşamalı işlemler uygulanması gerekir. Tüm bu avantaj ve dezavantajlar göz önüne alınarak, soğuk şekillendirme yöntemi uygun uygulama alanlarında verimli ve ekonomik çözümler sunmaktadır [33].

Malzeme Seçimi Bağlantı elemanları için genellikle çelik, alüminyum ve bakır alaşımı gibi metal malzemeler tercih edilir. Bu malzemelerin mekanik özellikleri, soğuk şekillendirme sırasında önemli bir rol oynar. Soğuk şekillendirme işlemleri, malzemenin mekanik özelliklerinin belirli bir düzeyde olmasını gerektirir. Bu özellikler, şekillendirme sırasında malzemenin deformasyon kapasitesini etkileyen önemli faktörlerdir. Soğuk şekillendirmenin etkin ve düzgün bir şekilde yapılabilmesi için, malzemenin iç yapısında belirli bir düzenin ve homojenliğin sağlanması gerekmektedir. Aynı zamanda, soğuk şekillendirme işlemi sırasında malzemenin çatlama riskini önlemek için, şekillendirilecek malzemeye önceden ısı işlem uygulanması yaygın bir tekniktir. Bu işlem, malzemenin iç yapısındaki gerilmeleri ve tahribatı azaltarak şekillendirme sırasında oluşabilecek çatlakların önüne geçilmesini sağlar.

Küreselleştirme tavlama, soğuk şekillendirmede yaygın olarak tercih edilen ısı işlemlerden biridir. Bu işlem, özellikle demirli ve demir dışı alaşımlarda, malzemenin mikroyapısındaki ince ve dağılmış yapıların küresel bir formda yeniden düzenlenmesini hedefler. Küreselleştirme tavlama, genellikle düşük sıcaklıklarda, belirli bir süre boyunca yapılan tavlama işlemiyle gerçekleştirilir. Bu işlem, malzemenin sertliğini düşürerek plastik şekil değişimini kolaylaştırır. Ayrıca, malzeme içinde mikro çatlakların oluşmasını engellemeye yardımcı olur. Tavlama işlemi sırasında, malzeme daha homojen bir yapıya kavuşarak, mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanır. Özellikle çelik ve alaşımlarında, bu işlem daha az keskin mikro yapıların oluşmasını ve böylece çatlama riskinin azalmasını sağlar.

Küreselleştirme tavlama sırasında, malzemenin ısı işleme tabi tutulduğu sıcaklık ve süre oldukça önemlidir. Eğer sıcaklık çok düşükse, malzemenin mikro yapısında istenilen küresel form oluşturulamaz.

Çok yüksek sıcaklıklar ise malzemenin aşırı yumuşamasına neden olabilir. Bu nedenle, küreselleştirme tavlama başarısı, uygulanan sıcaklık ve süre parametrelerinin dikkatlice optimize edilmesine dayanır.

Sonuç olarak, bu işlem malzemenin daha homojen bir yapıya sahip olmasını ve soğuk şekillendirme sırasında daha yüksek deformasyon kapasitesine ulaşmasını sağlar. Bu sayede, hem şekillendirme işlemi daha verimli hale gelir hem de malzemenin mekanik özellikleri korunmuş olur. Filmaşın olarak temin edilen hammadde, sırasıyla ısıtma işlemi, çekim, fosfatlama ve benzeri işlemlerden geçirilir. Bu işlemler, malzemenin nihai kullanım amacına uygun hale gelmesini sağlamak için gereklidir. M20 cıvata üretimi için kullanılan hammadde, genellikle Ø20 mm çapında filmaşın şeklinde temin edilir. İlk aşamada, bu filmaşın küreselleştirme tavlama tablasına tabi tutulur. Küreselleştirme tavlama, malzemenin iç yapısının homojenleşmesini ve mikro yapıdaki gerilmelerin azaltılmasını sağlar. Bu işlem, malzemenin plastik şekil değiştirme kapasitesini artırarak soğuk şekillendirme işlemlerinde çatlama riskini minimize eder [34].

Küreselleştirme tavlama sonrası, filmaşın Ø19,60 mm'lik final çapa çekilerek üretime uygun hale getirilir. Çekim işlemi, malzemenin istenilen boyut ve düzgünlükte şekillendirilmesini sağlar. Bu aşamada her türlü hatanın engellenmesi için malzeme dikkatle izlenir ve gerekli kontroller yapılır. Sonraki aşama, malzemenin soğuk şekillendirmeye uygun olup olmadığının test edilmesidir. Soğuk şekillendirme işlemi, malzemenin düşük sıcaklıklarda şekil almasını sağlamak için yapılır ve bu işlem, malzemenin deformasyon kapasitesine dayalı olarak verimli bir şekilde yapılmalıdır. Malzeme, bu testlerden geçtikten sonra uygun bulunursa fosfatlama işlemine geçilir.

Fosfatlama, malzemenin yüzeyine ince bir fosfat kaplama tabakasının uygulanması işlemidir ve genellikle çelik ve alaşımları üzerinde yapılır. Bu kaplama, malzemenin paslanmasını engellemeye yardımcı olur çünkü nemin, oksijenin ve diğer dış etkenlerin ulaşmasını zorlaştırır. Ayrıca, fosfat kaplama malzemenin dayanıklılığını artırır. Özellikle, soğuk şekillendirme gibi aşamalarda meydana gelebilecek mikro çatlakların ve deformasyonların önlenmesine yardımcı olur.

Fosfatlama işlemi sırasında, kaplama tabakası genellikle yüksek sıcaklıkta ve belirli bir kimyasal çözeltide malzemenin batırılmasıyla elde edilir. Fosfat banyosunda, hammadde üzerindeki metal yüzey, fosfat iyonları ile reaksiyona girerek kaplama oluşumunu sağlar [14].

Son olarak, fosfatla kaplanmış filmaşın kullanıma hazır hale getirilir. Fosfat kaplama sonrasında, filmaşınlar düzgün bir şekilde sarılarak kangal haline getirilir ve paketlenir. Bu işlem, filmaşınların taşınabilirliğini ve depolama koşullarını iyileştirirken, aynı zamanda malzemenin bozulmadan üretim hattına sevk edilmesini sağlar.

Soğuk şekillendirme işlemi, özel olarak tasarlanmış ve yeterli kapasiteye sahip makineler aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu işlemde kullanılan makineler genellikle dört ya da beş istasyonlu soğuk dövme makineleridir. Her bir istasyon, cıvatanın hedeflenen ölçü ve formuna göre özel olarak tasarlanmış kalıplarla donatılmıştır. Cıvatanın her bir aşamada doğru biçimde şekillendirilmesini sağlamak amacıyla, her istasyona özgü kalıp tasarımları yapılmaktadır. Bu tasarımlar sayesinde, cıvatanın nihai geometrisine ulaşana kadar her istasyon kendi işlevini en verimli biçimde yerine getirir. İlk istasyonda, hammadde olan filmaşın tel belirli boyutlarda kesilerek işlemeye hazır hale getirilir (Şekil 2.1). Bu kesme işlemi, cıvatanın hem istenilen uzunlukta olmasını sağlar hem de sonraki şekillendirme işlemleri için uygun ölçüleri oluşturur.

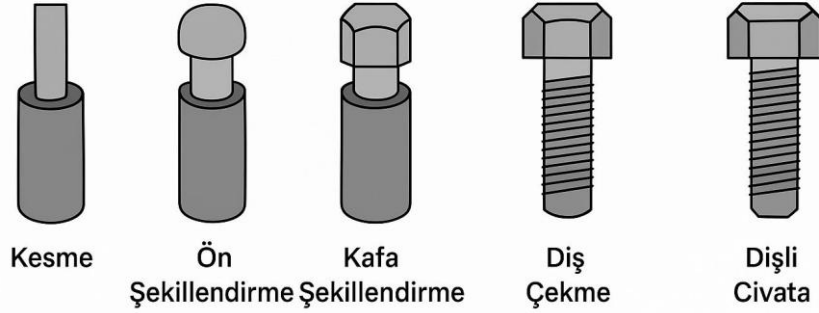


Şekil 2.1. Çekilmiş hazırlanmış filmaşın hammadde.

İkinci istasyonda, cıvatanın baş kısmının şekillendirilmesi için ön form verme işlemi gerçekleştirilir. Bu istasyonda yapılan işlem, baş kısmın son hâlini alabilmesi için gerekli temel geometriyi oluşturur. Bu süreçte şekillendirme yapılan parçaların düzenli ve sıralı ilerleyişi, üretim verimliliği açısından önem arz eder (Şekil 2.2).

Üçüncü istasyona geçildiğinde, cıvatanın baş formu yaklaşık %80 oranında tamamlanır ve diş açılacak bölümün çapında küçültme (redüksiyon) işlemi yapılır. Bu işlem sayesinde, hem baş kısmın şekli neredeyse tamamlanmış olur hem de vida dişi açılması için uygun bir zemin hazırlanır. Dördüncü istasyonda ise baş kısmı nihai formuna ulaşır ve cıvata, diş açma işlemine geçebilecek duruma getirilir. Böylece, şekillendirme süreci tamamlanmış olur (Şekil 2.3). Son aşama olarak, şekillendirilmiş cıvatalar diş çekme istasyonuna yönlendirilir. Bu istasyonda, cıvataların yüzeylerine vida dişleri açılır ve ürünler montaj için uygun hâle getirilir. Tüm bu istasyonlarda kullanılan kalıp tasarımları, malzemenin homojen biçimde şekillendirilmesini sağlamak üzere optimize edilmiştir. Kalıplar, şekillendirme sırasında oluşabilecek deformasyonları önleyecek şekilde ve hedef ölçülerin tam olarak elde edilmesine olanak verecek hassasiyette tasarlanmıştır. Böylece, her bir istasyonun işlevini eksiksiz yerine getirmesi sağlanarak, yüksek kalite standartlarına sahip bağlantı elemanları üretimi mümkün hale gelir.

Şekillendirme İşlemleri



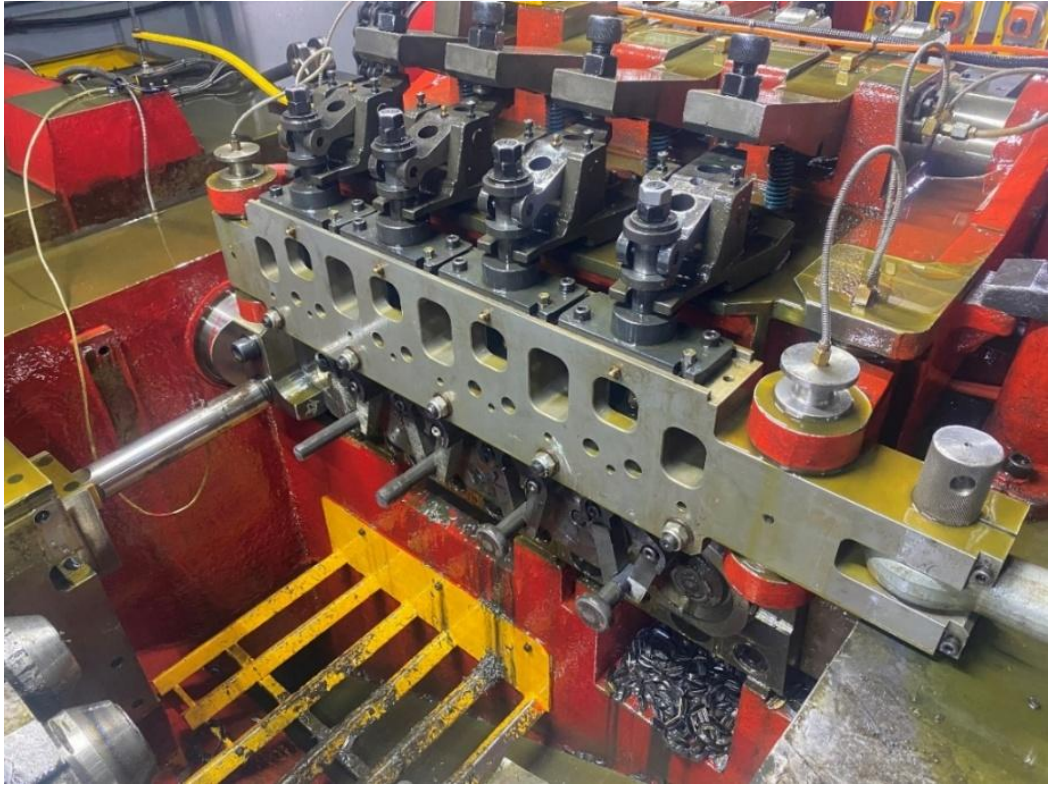
Şekil 2.2. Soğuk şekillendirme perçin dizilişi.



Şekil 2.3. Dört istasyonda cıvatanın şekillenmesi.

Diş çekme işlemi, ovalama yöntemiyle yapılmaktadır ve bu işlem, özel olarak tasarlanmış otomatik ovalama makineleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bu makineler, her metrik ölçü için özel olarak üretilmiş ovalama kalıpları sayesinde, diş çekme işlemini yüksek hassasiyetle ve verimli bir şekilde tamamlar. Cıvatanın boyutuna göre, uygun makine ve kalıp seçimi yapılır. Bu seçim, her bir cıvatanın boyutlarına ve özelliklerine göre optimize edilir, böylece işlemin verimliliği artırılır. Makine ve kalıp seçimi yapıldıktan sonra, üretim sisteminde gerekli tüm hassas ayarlamalar titizlikle gerçekleştirilir. Bu ayarlamalar, özellikle cıvatanın diş çekme işleminde doğru diş profilini elde edebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Doğru yapılan ayarlamalar, cıvatanın mekanik performansını ve montaj uyumunu doğrudan etkileyen diş geometrisinin istenilen şekilde oluşmasını sağlar. Şekillendirme işleminin ardından, cıvatalar ovalama yöntemiyle diş çekme işlemine tabi tutulur. Ovalama yöntemi, dişlerin hem istenilen boyut hem de doğru formda üretilmesini sağlayan etkili bir soğuk işleme tekniğidir. Bu yöntemle, diş profili yüzeyden talaş kaldırılmadan, malzeme üzerinde plastik deformasyonla oluşturulur. Böylece hem üretim sırasında herhangi bir malzeme kaybı yaşanmaz hem de yüzey kalitesi yüksek olur. Ovalama yöntemi ile gerçekleştirilen diş çekme işlemi, seri üretime olanak tanıyan hızlı bir süreçtir. Bu sayede hem üretim süresi kısaltılır hem de yüksek hacimli üretimlerde verimlilik

sağlanır. Tüm bu işlemler, cıvatanın dört istasyondan geçerek şekillendiği makine düzeniyle entegre şekilde yürütülmektedir (Şekil 2.4). Isıl işlem, cıvatanın karakteristik özelliklerini geliştiren kritik bir işlemdir. Cıvata şekillendirildikten sonra, hammaddenin alaşım elementlerine bağlı olarak sertleştirilebilirlik kapasitesi belirlenir. Alaşım elementleri, malzemenin sertleştirilebilirliğini etkileyen faktörlerin başında gelir ve aynı zamanda sertleştirilmiş malzemenin mekanik özelliklerini de şekillendirir. Bazı alaşımlar, sertleştirilebilirliği artırırken, darbe dayanımı gibi diğer mekanik özelliklerde olumsuz etkiler yaratabilir. Bu yüzden, her alaşım türü için uygun ısıl işlem parametrelerinin dikkatlice seçilmesi gerekmektedir. Isıl işlemde cıvata, ilk olarak tavlama işlemine tabi tutulur. Tavlama, cıvatanın östenit sıcaklığına ısıtılmasıyla başlar ve bu işlem genellikle 1-1,5 saat süreyle sürdürülür. Tavlama işlemi sırasında, cıvata homojen bir ısıl işleme tabi tutulur ve ardından hızlı bir şekilde soğutulur. Bu soğutma işlemi, genellikle su veya yağ banyosu kullanılarak gerçekleştirilir. Tavlama işlemi ile cıvata, ulaşabileceği maksimum sertliğe ulaşır ve mikro yapısı martenzitik bir yapıya dönüşür. Bu, cıvatanın yüksek sertliğe sahip olmasını sağlar.



Şekil 2.4. Dört istasyonda cıvatanın şekillenmesi makine görüntüsü.

Ancak, bu aşamada cıvata kırılğan hale gelebilir. Bu kırılğanlığı azaltmak ve malzemenin mekanik özelliklerini daha dengeli hale getirmek için temperleme (veya meneviş) işlemleri yapılır. Temperleme işlemi, cıvata içerisindeki gerilmeleri ortadan kaldırarak, malzemenin daha kararlı bir yapıya ulaşmasını sağlar. Bu işlemde, cıvata belirli bir sıcaklıkta tutulur ve ardından kontrollü bir şekilde soğutulur. Temperleme, cıvatanın kırılğanlığını azaltırken, dayanımını artırır ve nihayetinde istenilen mekanik özelliklere ulaşmasını sağlar.

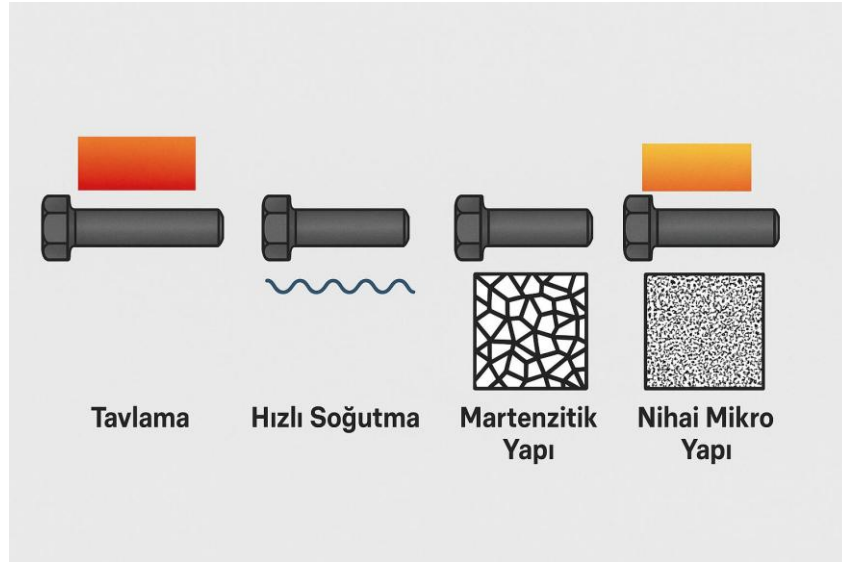
Sonuç olarak, ısıl işlem, cıvatanın hem sertliğini hem de mekanik dayanımını artıran bir yöntemdir. Tavlama ve temperleme işlemleri, cıvatanın yüksek kaliteli ve dayanıklı olmasını sağlayarak, üretimdeki verimliliği ve ürün kalitesini artırır.

Soğuk şekillendirme işlemi, metal malzemenin iç yapısında bulunan kristal yapıların sıkıştırılmasıyla daha yoğun bir hale gelmesini sağlar. Bu sıkışma, malzemenin mikro yapısında belirgin bir iyileşme meydana getirir ve bunun sonucunda mekanik dayanıklılığı önemli ölçüde artar. Özellikle soğuk şekillendirme sürecinde, metalin içerisindeki dislokasyon yoğunluğu artar. Bu artış, malzemenin deformasyona karşı daha fazla direnç göstermesine neden olur ve dolayısıyla daha yüksek mekanik özelliklere sahip olması sağlanır. Bu durum, özellikle yüksek mukavemetin ve dayanıklılığın gerekli olduğu cıvata, vida gibi bağlantı elemanları için büyük avantajlar sunar [35].

Soğuk şekillendirme ile elde edilen sertlik artışı, bu parçaların yük altında şekil değiştirmesini sınırlar ve uzun ömürlü kullanım sağlar. Aynı zamanda, işlem sırasında ortaya çıkan sertleşme, malzemenin gerilmelere karşı dayanımını artırır. Bu da mekanik yorgunluk, sürtünmeye bağlı aşınma gibi olumsuz etkilerin önlenmesine katkıda bulunur.

Soğuk şekillendirme sonrası uygulanan ısıl işlem ise, bu iyileştirmeleri daha da ileri taşımakta ve mikroyapı üzerinde olumlu etkiler göstermektedir. Isıl işlemle birlikte, tane yapısı homojen hale gelir ve iç gerilmeler azaltılır. Bu sürecin mikroyapı üzerindeki etkisi Şekil 2.5'te açıkça görülmektedir. Görselde, soğuk şekillendirme sonrası uygulanan ısıl işlemin cıvatanın iç yapısını nasıl düzenlediği ve mukavemet kazandırdığı net biçimde ifade edilmektedir. Soğuk şekillendirme, ısıl işlem gerektirmeyen bir süreçtir. Bu da sıcak şekillendirmeye kıyasla daha düşük enerji tüketimi anlamına gelir. Isıtma aşamasının olmadığı bu işlem, malzemenin şekillendirilmesi sırasında enerji kaybını minimuma indirir ve böylece enerji

maliyetlerini düşürür. Ayrıca, bu durum çevresel etkileri de azaltarak daha sürdürülebilir bir üretim süreci sunar. Enerji verimliliği, özellikle büyük ölçekli üretimlerde önemli maliyet tasarruflarına yol açar. Soğuk şekillendirme, sürekli bir üretim süreci sağlar. Bu, yüksek üretim hızları elde edilmesini mümkün kılar. Süreç, makineler arasındaki döngüsel bir akışla devam edebilir ve bu da kesintisiz üretim yapma imkânı sunar. Üretim hattı, büyük miktarlarda malzeme ile hızlı bir şekilde çalışabilir ve böylece üretim kapasitesini önemli ölçüde artırır. Bu hız, özellikle endüstriyel üretimlerde zaman ve maliyet açısından büyük avantajlar sağlar. Ayrıca, otomatikleştirilmiş sistemler sayesinde, hata payı minimum seviyeye çekilerek üretim verimliliği daha da artırılabilir. Soğuk şekillendirme, oldukça yüksek hassasiyetle ve dar toleranslarla parçaların üretilmesine olanak tanır. Bu süreç, parçaların boyutlarının ve şekillerinin çok yüksek doğrulukla elde edilmesini sağlar. Üretimdeki bu hassasiyet, özellikle otomotiv, havacılık ve elektronik gibi endüstrilerde, parça uyumu ve montajda hatasız sonuçlar elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, soğuk şekillendirme sırasında, genellikle daha az malzeme kaybı olur ve böylece israf minimize edilir. Bu yüksek hassasiyet, sadece üretim aşamasında değil, aynı zamanda sonrasında yapılacak montaj ve işleme işlemlerinde de büyük avantajlar sağlar.



Şekil 2.5. Cıvataya uygulanan ısı işleminin mikroyapıya etkisi

Sonuç olarak, soğuk şekillendirme hem üretim verimliliğini artıran hem de nihai ürünün kalite ve dayanıklılığını yükselten bir yöntemdir. Bu avantajlar, özellikle büyük ölçekli üretimlerde ve yüksek kaliteli ürünlerin talep edildiği sektörlerde tercih edilme oranını artırmaktadır. Bağlantı elemanları üretimi tamamlandıktan sonra ve üretim aşamasında, her istasyon belirli standartlar ve şartnameler doğrultusunda kalite kontrol işlemine tabi tutulur. Bu kontroller, boyutsal, mekanik ve kimyasal olmak üzere farklı aşamalarda gerçekleştirilir. Boyutsal kontroller, üretilen cıvatanın standartlara uygun olarak belirlenen boyutsal şartlar doğrultusunda yapılır. Bu aşamada, cıvatanın uzunluğu, çapı ve diğer geometrik özellikleri kontrol edilerek, her bir ürünün belirtilen toleranslara uygunluğu sağlanır. Kimyasal ve mekanik kontroller, özellikle EN ISO 898-1 standardına göre yapılır. Bu standart, cıvata ve bağlantı elemanlarının mekanik özelliklerinin yanı sıra kimyasal bileşenlerini de belirler. Kimyasal kontrol, malzemenin alaşım elementlerinin ve elementlerin oranlarının doğruluğunu kontrol ederken, mekanik kontrol, malzemenin sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı gibi temel mekanik özelliklerini test eder. Ayrıca, diğer detay kontrolleri, üretim sürecinde belirlenen diğer standartlara uygunluk açısından gerçekleştirilir. Bu kontroller, ürünlerin her aşamada kaliteyi ve güvenliği sağlamak adına titizlikle yapılır. Üretilen ürünlerin kalite kontrol süreçlerine uygunluğu, ürünlerin her birinin belirlenen standarda ve doğruluğa bağlılık açısından test edilmesini sağlar. Bu sayede, her bağlantı elemanının yüksek kalitede ve güvenilir olmasını temin etmek için gerekli tüm kontroller tamamlanmış olur.

3. BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel araştırmalar, belirli elik malzemeler üzerinde uygulanan çeşitli imalat ve test süreçlerinin, nihai ürünün yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla planlanmış ve sistematik bir şekilde yürütülmüştür. Kullanılan tüm ekipmanlar, cihazlar ve hammaddeler, deneysel sürecin teknik gereksinimlerine uygun olarak seçilmiş ve uluslararası standartlara bağlı kalınarak çalışılmıştır. Deneysel sürecin genel yapısı ve işlem adımları, çalışmanın daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla Şekil 3.1'de Şematik olarak sunulmuştur. Bu bölümde, kullanılan malzeme türleri, üretim makineleri, test cihazları ve bunların işlevleri ayrıntılı şekilde açıklanarak deneysel yöntemlerin bilimsel temeli ortaya konulmaktadır.



Şekil 3.1. Genel akış Şeması

3.1. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, M20 bağlantı elemanlarının üretiminde kullanılmak üzere üç farklı çelik malzeme tercih edilmiştir: 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4. Bu çelikler sırasıyla küreselleştirme tavlama, soğuk dövme ve ardından farklı sıcaklıklarda uygulanan menevişleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Uygulanan bu işlemler sonucunda, malzemelerin mikroyapısal özellikleri, işlem sıcaklığı ve süresi gibi parametrelere bağlı olarak detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Bu tablo, ilgili malzemelerin karbon, mangan, bor, krom, molibden ve silisyum gibi alaşım elementlerini içeriş oranlarını göstermekte; böylece her bir çeliğin ısıl işlem ve şekillendirme süreçlerine verdiği tepkilerin nedenleri daha iyi anlaşılabilir.

Tablo 3.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi

Element	27MnB4	41Cr4	42CrMo4
Karbon (C) %	0.24–0.32	0.38–0.45	0.38–0.45
Mangan (Mn) %	1.30–1.70	0.60–0.90	0.60–0.90
Bor (B) %	0.0005–0.003	-	-
Krom (Cr) %	-	0.90–1.20	0.90–1.20
Molibden (Mo) %	-	-	0.15–0.30
Silisyum (Si) %	0.001–0.003	0.10–0.40	0.10–0.40
Fosfor (P) Max %	0.035	0.035	0.035
Kükürt (S) Max %	0.035	0.035	0.035

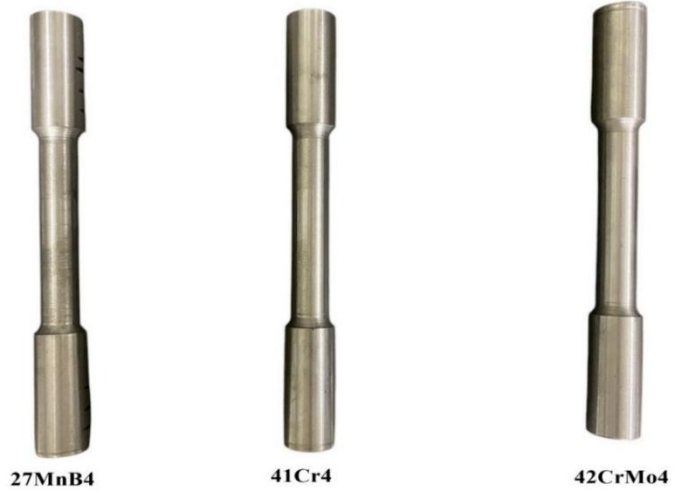
3.2. Çekme Test Cihazı

Malzemelerin mekanik dayanım özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen çekme testleri, bu çalışmanın temel karakterizasyon yöntemlerinden birini oluşturmaktadır. Bu testler sayesinde numunelerin çekme mukavemeti, akma dayanımı ve kopma uzaması gibi kritik mekanik parametreleri elde edilmiştir. Deneyler, ISO 6892-1 standardına uygun olarak hazırlanmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olup, kullanılan çekme testi cihazı MC WAW-600C 223 seri numaralı, servo-hidrolik kontrollü bir sistemdir. Cihaz, test verilerini dijital ortamda kaydedebilen gelişmiş bir

yazılım altyapısına sahiptir. Şekil 3.2'de kullanılan çekme testi cihazının genel görünümü, Şekil 3.3'te ise teste tabi tutulan numunelerin hazırlanmış hâli verilmiştir. Bu testler hem soğuk şekillendirme hem de uygulanan ısı işlem süreçlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.



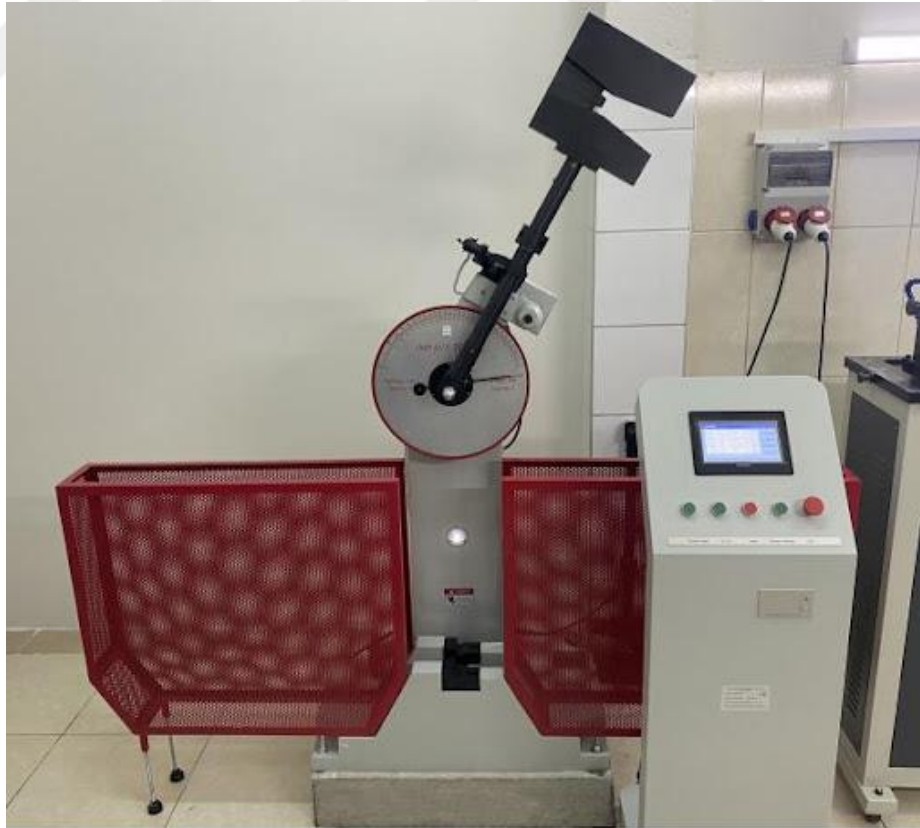
Şekil 3.2. Kullanılan çekme testi cihazı



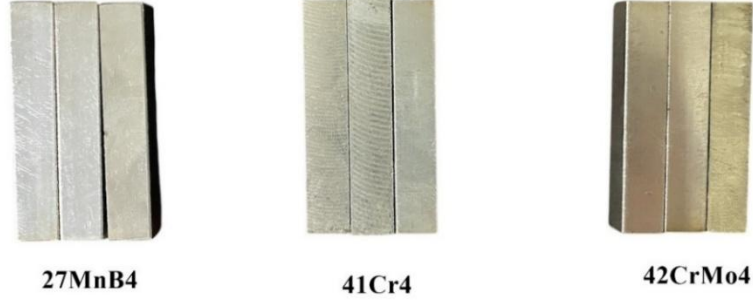
Şekil 3.3. Çekme testi numuneleri

3.3. Çentik Darbe Testi Cihazı (Charpy V-Çentik Testi)

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel araştırmalar, belirli elik malzemeler üzerinde uygulanan çeşitli imalat ve test süreçlerinin, nihai ürünün yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla planlanmış ve sistematik bir şekilde yürütülmüştür. Kullanılan tüm ekipmanlar, cihazlar ve hammaddeler, deneysel sürecin teknik gereksinimlerine uygun olarak seçilmiş ve uluslararası standartlara bağlı kalınarak çalışılmıştır. Deneysel sürecin genel yapısı ve işlem adımları, çalışmanın daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla Şekil 3.1'de Şematik olarak sunulmuştur. Ayrıca, deneysel aşamada kullanılan test cihazlarından biri olan JBW 150J - 300J entik darbe dayanımı test cihazının görünümüne Şekil 3.4'te yer verilmiş, bu testte kullanılan numunelerin görseli ise Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bu bölümde, kullanılan malzeme türleri, üretim makineleri, test cihazları ve bunların işlevleri ayrıntılı şekilde açıklanarak deneysel yöntemlerin bilimsel temeli ortaya konulmaktadır.



Şekil 3.4. entik darbe dayanımı testi cihazı



Şekil 3.5. Çentik darbe test numuneleri

3.4. Isıl İşlem Fırını

Bu ekipman, çelik malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan tavlama, sertleştirme (su verme) ve menevişleme gibi ısı işlemlerin gerçekleştirildiği, yüksek sıcaklık kontrollü bir sistemdir. Kullanılan fırın, atmosfer kontrollü olup 950 °C'ye kadar çıkabilen sıcaklık kapasitesine sahiptir. Bu çalışma kapsamında kullanılan 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 çelik numuneleri, bu fırında 900 °C'de 90 dakika süreyle tavllanmış ve ardından yağ ortamında su verilerek sertleştirilmiştir.

Sertleştirme sonrasında, sırasıyla 550 °C, 630 °C ve 660 °C sıcaklıklarda 3 saat süreyle menevişleme işlemleri uygulanmış ve böylece temperlenmiş martenzit yapı elde edilmiştir. Bu işlemlerin gerçekleştirildiği ısı işlem fırınının genel görünümü Şekil 3.10'da verilmiştir. Bu ısı işlem fırını Termosan ısı işlem AŞ. 'ine aittir.



Şekil 3.6. Isıl işlem fırını

3.5. Sertlik Test Cihazı

Bu çalışmada, çelik numunelerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi kapsamında analog tipte Rockwell C (HRC) sertlik test cihazı kullanılmıştır. Kullanılan cihaz, Bulut Makina üretimi olup geleneksel mekanik sistemle çalışmakta ve ölçüm sonuçlarını analog gösterge üzerinden vermektedir. Analog sistemler, dijital sistemlere kıyasla daha basit yapıda olmaları sayesinde kullanım kolaylığı sunar; ayrıca dayanıklı yapıları sayesinde zorlu endüstriyel koşullarda uzun süreli ve güvenilir ölçüm imkânı sağlar. Gerçekleştirilen tüm testler, TS EN ISO 6508-1 standardına uygun şekilde yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan Bulut makina BMS201-R seri numaralı sertlik test cihazının genel görünümüne Şekil 3.7'de, testlerde kullanılan numunelerin hazırlanmış hâline ise Şekil 3.8'de yer verilmiştir.

Malzemelerin yüzey özelliklerini değerlendirmek ve uygulanan işlemlerin etkilerini ortaya koymak amacıyla Brinell (HB), Vickers (HV) ve Rockwell (HRC) sertlik test yöntemleri kullanılmıştır. Numuneler, her test metoduna uygun şekilde taşlanmış ve parlatılmış yüzeylerden ölçüm alınacak biçimde hazırlanmıştır. Özellikle Rockwell C (HRC) ölçeğinde yapılan testlerle, soğuk şekillendirme sonrası oluşan martenzitik yapı ile menevişleme işlemi sonucunda elde edilen temperlenmiş martenzit yapılar karşılaştırılmış ve malzemenin mekanik davranışı detaylı olarak analiz edilmiştir.



Şekil 3.7. Sertlik ölçüm test cihazı



Şekil 3.8. Sertlik test numuneleri

3.5.1. Ölçüm Prosedürü

Sertlik test sürecinde, ilk olarak ön yükleme işlemi gerçekleştirilmiş ve numune yüzeyinde küçük bir temas sağlanarak referans noktası oluşturulmuştur. Bu işlemin ardından, esas testin belirleyici adımı olan ana yük, yani 150 kgf'lik kuvvet, manuel sistem aracılığıyla dikkatli bir şekilde numuneye uygulanmıştır. Ana yük uygulaması, malzeme yüzeyine sabit hızda ve kontrollü biçimde iletilmiş; bu aşamada, yük altındaki numune yüzeyinde belirgin bir çentik oluşumu gerçekleşmiştir. Oluşan bu çentik, malzemenin plastik deformasyona uğrama eğilimini ve dış yük altında gösterdiği direnç seviyesini doğrudan yansıtmaktadır. Malzemenin yüzeyinde oluşan bu deformasyon, uygulanan kuvvet ve numune yüzeyindeki çentik derinliği arasında kurulan ilişkiyle hesaplanmış ve Rockwell C sertlik değeri bu sayede elde edilmiştir. Bu süreç, yalnızca malzemenin sertliğini belirlemekle kalmamış, aynı zamanda uygulanan ısıl işlem ve mekanik işlemlerin malzeme mikroyapısı üzerindeki etkilerinin de dolaylı bir göstergesi olmuştur. Özellikle menevişleme sonrası oluşan temperlenmiş martenzitik yapıların, ana yük altında çentik oluşumuna karşı gösterdiği direnç, malzemenin sertlik karakterini açık biçimde ortaya koymuştur. Bu nedenle ana yük uygulaması ve çentik oluşumu, sadece testin teknik bir aşaması değil, aynı zamanda malzemenin davranışsal özelliklerinin anlaşılmasında kritik bir rol oynamaktadır.

4. BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, soğuk şekillendirme yöntemi ile 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 alaşımlı çeliklerinden üretilen 8.8 sınıfı cıvataların üretimi gerçekleştirilmiş ve bu cıvataların karakteristik davranışları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma, her bir çelik türünün mekanik özelliklerinin ve soğuk şekillendirme sürecinin cıvata üretimi üzerindeki etkilerini analiz etmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, bu çeliklerin farklı şekillendirme parametreleri, altında gösterdiği davranışlar, performans ve dayanıklılık açısından karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kullanılan malzemelerin ve üretim yöntemlerinin cıvata kalitesi üzerindeki etkisini daha iyi anlamamıza yardımcı olmaktadır. Çalışmada ayrıca, 8.8 sınıfı cıvataların endüstriyel uygulamalarda karşılaştığı yük taşıma kapasiteleri, mekanik mukavemetleri gibi mühendislik açısından önemli parametreler incelenmiştir.

4.1. 27MnB4 Mikroyapısı

27MnB4 çeliği, özellikle soğuk şekillendirme ve ısıtma işlem süreçlerinde bor katkısının etkisiyle martensitik mikroyapı gösterebilir. Bu mikroyapı, yüksek sertlik ve mukavemet sunarken aynı zamanda sünekliğin de belirli bir düzeyde korunmasına imkân tanır. Martensitik yapı, karbonun ani soğuma ile difüzyonsuz dönüşüm geçirmesi sonucunda iğnemsiz morfoloji ile ortaya çıkar ve bu yapı, sertlik ile aşınma direnci açısından önemli avantajlar sağlar. Ancak bu dönüşümün başarısı, yapı içindeki segregasyonların, tane boyutunun ve çözültideki karbon miktarının homojenliğine bağlıdır. Dolayısıyla, mikroyapının homojenliği çeliğin genel performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. 27MnB4 çeliği, yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bor elementi, sertlik ve sertleştirilebilirlik üzerinde pozitif etkiye sahipken, manganez ise ferrit-perlit dönüşümünü kontrol ederek çeliğin darbe dayanımı ve sünekliğine katkı sağlar. Bu bileşenlerin etkisiyle şekillendirilen mikroyapılar, otomotiv ve makine parçaları gibi yüksek dinamik yükler altında çalışan sistemler için uygundur.

Bu çalışmada kullanılan 27MnB4 çeliği, 830 °C sıcaklığa kadar ısıtılarak bu sıcaklıkta 60 dakika süreyle tavlanaştırılmıştır. Tavlama işlemiyle amaçlanan, karbon atomlarının daha homojen dağılmasını sağlamak ve önceki işlemlerden kaynaklanan iç gerilmeleri minimize ederek daha kararlı bir yapıya zemin hazırlamaktır. Totten (2007), özellikle düşük alaşımlı borlu çeliklerde tavlamanın, martensitik dönüşüm öncesinde segregasyonları ortadan kaldırmak ve çözeltide faz homojenliğini sağlamak adına kritik bir aşama olduğunu vurgulamaktadır.

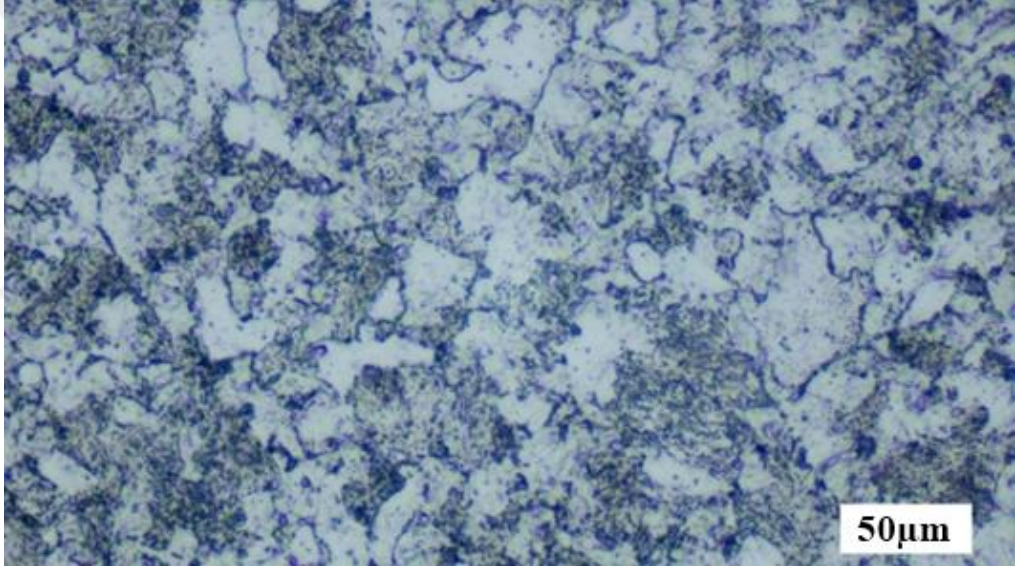
Isıl işlem uygulanmamış, yalnızca tavlama görmüş 27MnB4 çeliğine ait mikroyapı Şekil 4.1'de sunulmuştur. Mikroyapıda ferrit matris içerisinde belirgin perlit kolonileri gözlemlenmektedir. Bu yapı, karbonun difüzyon yoluyla perlit fazında yeniden düzenlenmesini ve ferrit fazında daha düşük karbon içeriği ile çökeltisiz bir yapı oluşmasını sağlamaktadır. Perlit lamellerinin düzenli ve net bir şekilde seçilebilmesi, karbon difüzyonunun başarılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca ferrit-perlit dağılımının homojen oluşu, tavlamanın mikro düzeyde etkili olduğunu ve ilerleyen sertleştirme aşamaları için uygun bir temel oluşturduğunu kanıtlamaktadır. Tavlama sonrası tane sınırlarının net ve keskin olması, tane büyümesinin kontrol altında tutulduğunu ve mikroyapının mekanik olarak tutarlı bir hale geldiğini işaret eder.

Tavlamanın ardından, hedeflenen yaklaşık 30 HRC sertlik seviyesine ulaşmak amacıyla çelik, 550 °C'de 90 dakika süreyle temperlenmiştir. Totten'in rehberinde de belirtildiği gibi, temperleme işlemi martensitik yapının gevrekliğini azaltarak malzemenin tokluk ve sünekliğini artırmayı amaçlar.

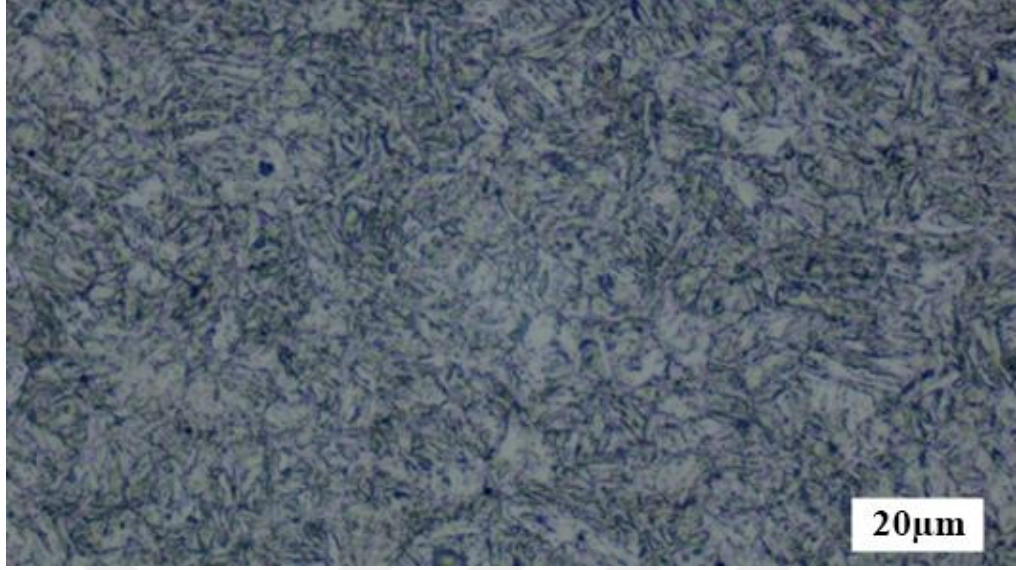
Bu işlem sırasında, martensit içinde dağılmış halde bulunan karbonun karbürlere çökmesiyle birlikte yapı mekanik olarak stabilize olur. Temperleme sonrasında elde edilen nihai mikroyapı Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Burada, yoğun iğnemsiz martensitik yapı açıkça seçilebilmektedir. Bu morfoloji, ani soğuma sırasında karbonun çözeltide hapsolmesi ve difüzyonsuz dönüşümle martensit oluşumunu doğrulamaktadır. Martensit lamellerinin yoğunluğu ve yönelmesi, yüksek sertliğin elde edildiğini ve yapının aşınma direnci açısından avantajlı olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yapıda yer yer gözlemlenen ferrit fazı, dönüşümün tam anlamıyla tamamlanmadığını göstermekte; bu durum bazı bölgelerde lokal olarak süneklik sağlarken, aynı zamanda mekanik özelliklerde bölgesel farklılıkların oluşmasına neden olabilir. Bu tür kalıntılar, yüksek stres altında çalışan parçalar için önemlidir çünkü mikroyapıdaki süreksizlikler çatlak başlangıç noktası olabilir.

Martensit lamellerinin ince ve paralel yapısı, sertlik ile kırılmalık arasındaki denge aısından belirleyici olup, temperleme sonrası bu dengenin büyük ölçüde sağlandığı görölmektedir.

Sonuç olarak, şekil analizleriyle birlikte değerlendirildiğinde; tavlama işlemleri ile elde edilen ferrit-perlit yapısının homojenliği (Şekil 4.1), sertleştirme ve temperleme sonrası oluşan yoğun martensitik yapı (Şekil 4.2), 27MnB4 çeliğinin ısı işleme uygunluğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır. Martensitik yapının sertlik sağlarken, yer yer kalan ferrit fazları süneklik katkısı sunmakta; bu da çeliği bağlantı elemanları gibi hem mukavemet hem şekillendirme kabiliyeti gerektiren uygulamalarda son derece uygun hale getirmektedir.



Şekil 4.1. Isıl işlem öncesi 27MnB4 mikroyapı görüntüsü



Şekil 4.2. Isıl işlem sonrası 27MnB4 mikroyapı görüntüsü

4.2. 41Cr4 Mikroyapısı

41Cr4 çeliği, karbon ve krom içeriği sayesinde martensitik mikroyapı geliştirmeye son derece uygun bir alaşımdır. Özellikle sertleştirme işlemiyle martensit fazının baskın hale gelmesi, çeliğin hem sertliğini hem de aşınma direncini belirgin biçimde artırmaktadır. Ancak uygulanan soğuma hızına, karbon miktarına ve alaşım elementlerinin difüzyon davranışına bağlı olarak mikroyapıda beynit veya perlitik kalıntılar da oluşabilir. Nihai mikroyapının karakteri; elde edilen mekanik özellikleri (sertlik, süneklik, işlenebilirlik) doğrudan etkilediğinden, ısıl işlem parametreleri bu çelik için performansı belirleyen kritik değişkenlerdendir.

Bu doğrultuda 41Cr4 çeliği, ön hazırlık amacıyla 830 °C sıcaklığa kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 60 dakika süreyle tavlannmıştır. Bu işlem sırasında, çözültide düzensiz dağılmış karbon atomlarının homojen hale getirilmesi ve önceki üretim süreçlerinden kaynaklı mikrosegregasyonların giderilmesi amaçlanmıştır. Totten (2007), bu aşamanın özellikle martensitik dönüşüm öncesinde yapılmasının, kararlı fazların oluşumunu kolaylaştırdığını belirtmektedir [36]. Korkmaz ve Demirtaş (2018) de, 41Cr4 çeliğinde tavlamanın tane içi gerilmeleri azaltarak daha düzgün ve yönsüz bir mikroyapı oluşturduğunu ortaya koymuştur [37].

Tavlama sonrası elde edilen mikroyapı Şekil 4.3'te verilmiştir. Mikroyapıda ferrit matris içerisinde düzgün bir şekilde dağılmış perlit kolonileri gözlemlenmektedir. Bu yapı, karbonun difüzyonla daha kararlı bölgelerde birikmesini ve perlit lamelleri şeklinde çökmesini sağlamıştır. Tane sınırlarının netliği ve ferrit-perlit fazlarının homojen dağılımı, tavlamanın başarılı olduğunu göstermektedir. Özellikle perlit lamellerinin yönsüz ve ince yapıda olması, sonraki sertleştirme adımında martensit dönüşümünün daha homojen başlamasına zemin hazırlamaktadır. Ayrıca segregasyon bölgelerinin azlığı, mikroyapısal sürekliliği artırmakta ve mukavemetin belirli bir düzeyde her bölgede tutarlı olmasına katkı sağlamaktadır. Tavlamanın ardından, hedeflenen ~30 HRC sertlik değerine ulaşmak amacıyla çelik 630 °C sıcaklıkta 90 dakika boyunca temperleme işlemine tabi tutulmuştur.

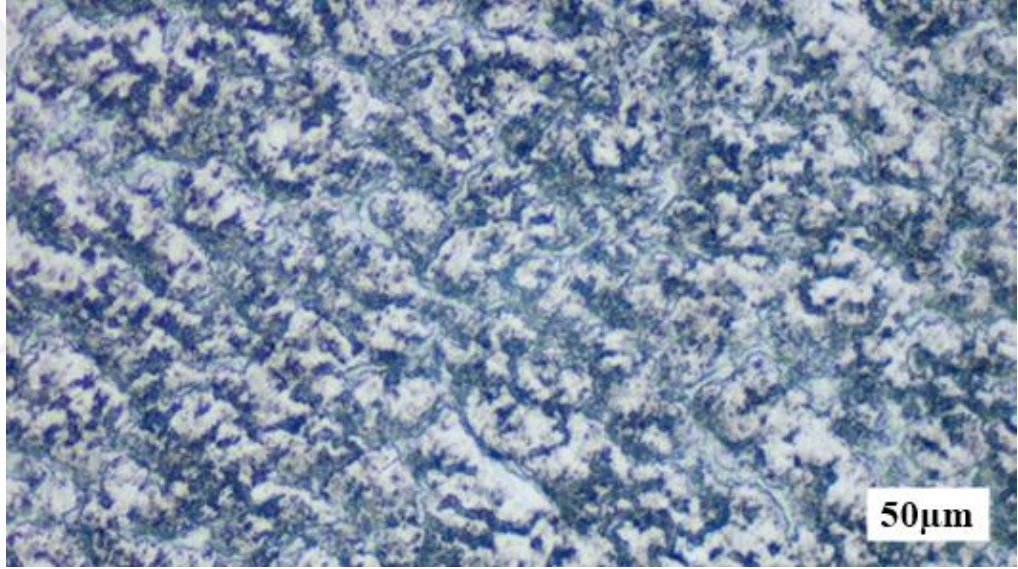
Totten (2007), bu sıcaklık seviyesindeki temperlemenin karbür çökmesine neden olarak martensit içindeki karbonun faz dışına çıkmasını sağladığını ve böylece gevrekliğin azaldığını ifade etmektedir [36]. Yılmaz (2017) ise bu sıcaklık aralığında ferrit-perlit dönüşümünün başlayabileceğini, bunun da sertlik ile tokluk arasında optimum bir denge sağladığını belirtmektedir [38].

Bu işlem sonrasında elde edilen nihai mikroyapı, Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Burada, mikroyapının büyük ölçüde iğnemsiz morfolojiye sahip martensit fazlarından oluştuğu görülmektedir. Bu yapı, hızlı soğuma sırasında karbon atomlarının çözümlenmiş difüzyonsuz dönüşüme uğrayarak kristal kafes yapısında sıkışmasıyla meydana gelmiştir. Mikroyapıda ayrıca yer yer ince karbür çökeltileri ve ferritik bölgeler de dikkat çekmektedir. Bu karbürler, temperleme işlemiyle martensit fazından ayrılan karbon atomlarının daha kararlı bir formda çökmesinden kaynaklanmakta; bu da yapıdaki gevrekliğin azalmasına ve sünekliğin artmasına katkı sağlamaktadır. Ferrit kalıntıları ise mikroyapıda lokal deformasyonlara karşı direnç noktaları oluşturarak darbe dayanımını olumlu yönde etkileyebilir. Ancak bu bölgelerin düzensiz dağılımı, sertlik profili açısından homojen olmayan davranışlara neden olabilir.

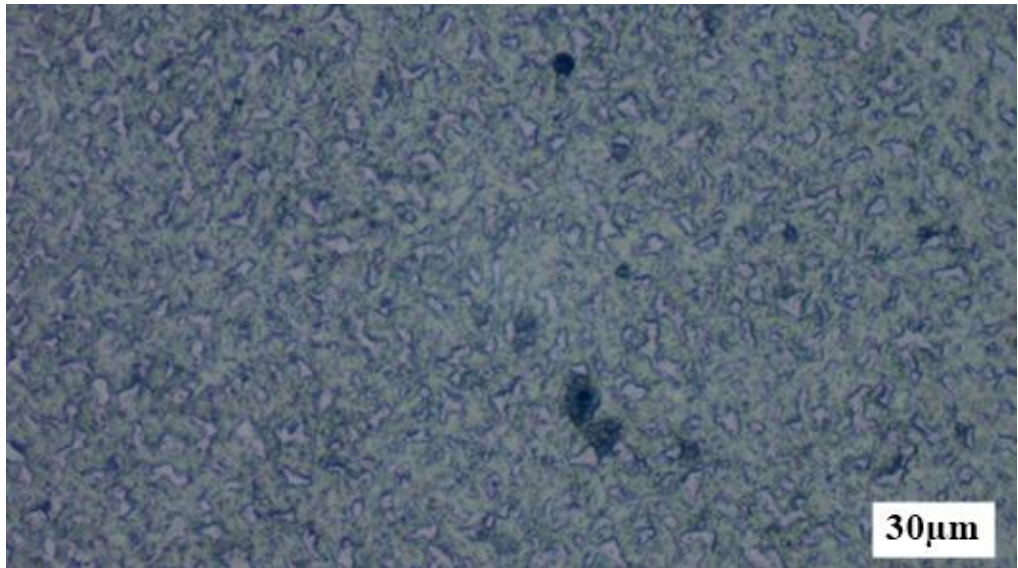
27MnB4 çeliğiyle yapılan karşılaştırmalarda, 41Cr4 çeliğinin sertleştirme sonrası daha iri taneli bir yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu farkın temelinde, 41Cr4'ün daha yüksek krom içeriğine sahip olması ve bor gibi sertleştiricilerin bulunmaması yer almaktadır. Krom elementi, difüzyon kinetiğini yavaşlatarak faz dönüşümlerini geciktirebilir ve tane büyümesine neden olabilir.

Totten (2007), kromun özellikle yüksek sıcaklıklarda tanelerin daha serbest büyümesine yol açabildiğini belirtmiştir [36]. Korkmaz ve Demirtaş (2018) de bu durumu destekleyerek 41Cr4 çeliğinin daha yüksek sıcaklıklarda daha iri taneler oluşturduğunu ifade etmiştir [37].

Sonuç olarak, Şekil 4.5 ve 4.6’da sunulan mikroyapılar incelendiğinde; 41Cr4 çeliğinin tavlama sonrası homojen ferrit-perlit yapısından başlayarak, başarılı bir sertleştirme ve temperleme süreci sonucunda iğnemsiz martensit fazlarının hakim olduğu bir yapıya dönüştüğü görülmektedir. Bu dönüşüm, çeliğin bağlantı elemanları gibi yüksek statik ve dinamik yük taşıyan uygulamalarda kullanım potansiyelini desteklemekte, aynı zamanda sertlik-tokluk dengesi açısından avantaj sağlamaktadır.



Şekil 4.3. Isıl işlem öncesi 41Cr4 mikroyapı görüntüsü



Şekil 4.4. Isıl işlem sonrası 41Cr4 mikroyapı görüntüsü

4.3. 42CrMo4 Mikroyapısı

42CrMo4 çeliği, karbon, krom ve molibden içeriği sayesinde yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen ısıtıl işlemler sonucunda martensitik veya beynitik mikroyapılar geliştirme potansiyeline sahiptir. Martensit fazı, kristal yapı içerisindeki karbon atomlarının difüzyonsuz dönüşümüyle oluşur ve bu faz, çeliğe yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direnci kazandırır. Öte yandan, beynit yapılar daha ince iğnemi morfolojiye sahip olup, orta düzeyde sertlik ve iyi tokluk dengesi sunar. Bu iki fazın miktarı ve dağılımı, uygulanan ısıtıl işlemin sıcaklık-zaman profiline ve çeliğin kimyasal bileşimine bağlı olarak değişir. Mikroyapıda yer yer gözlenen perlitik kalıntılar ise dönüşümün tam anlamıyla gerçekleşmediği bölgeleri temsil eder.

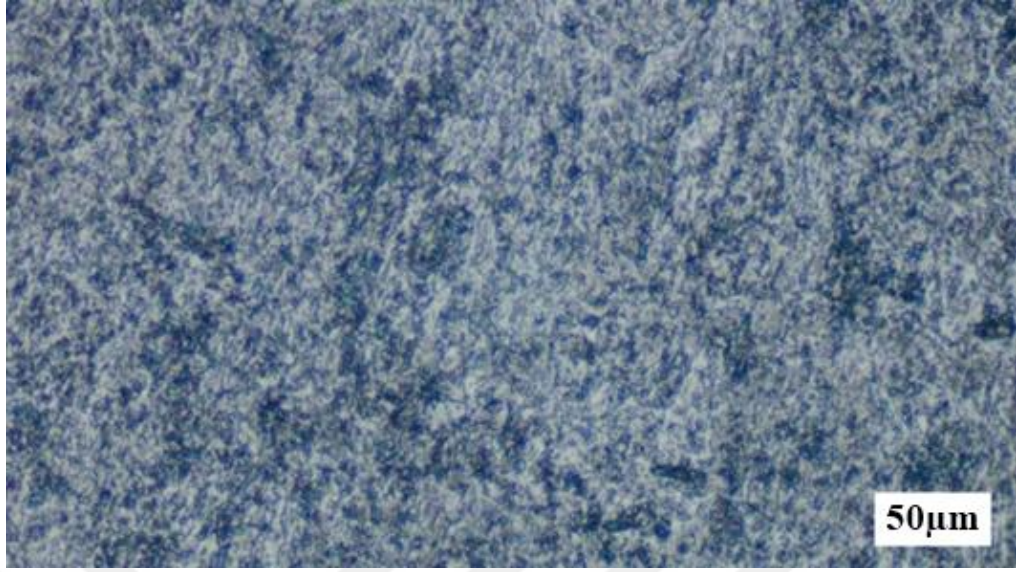
Isıtıl işlemlerle elde edilen bu mikroyapılar, çeliğin mekanik davranışları üzerinde doğrudan etkilidir. Özellikle bağlantı elemanları gibi yüksek mekanik dayanım ve darbe direnci gerektiren uygulamalarda, mikroyapı-mekanik özellik korelasyonu kritik önem taşır. Bu doğrultuda, çalışmada kullanılan 42CrMo4 çeliği 830 °C sıcaklıkta 60 dakika süreyle tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem, öncelikle çözültüdeki karbonun homojenleşmesini ve iç gerilmelerin giderilmesini hedeflemiştir. Homojen bir mikroyapı, martensitik dönüşümün daha kontrollü gerçekleşmesini sağlar. Totten (2007), bu tür çeliklerde tavlamanın segregasyonları azaltarak faz dönüşümünü optimize ettiğini vurgulamıştır [36]. Korkmaz ve Demirtaş (2018) de, tavlamanın sonraki ısıtıl işlemlere zemin hazırlayan kritik bir adım olduğunu ifade etmiştir [37].

Tavlama sonrası mikroyapı, Şekil 4.5'te sunulmaktadır. Bu yapı, ferrit matris içinde düzgün dağılmış perlit kolonileri ile karakterizedir. Perlit lamellerinin homojenliği ve yönsüzlüğü, karbon difüzyonunun dengeli gerçekleştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, yapıda hâlâ bazı segregasyon bölgelerinin bulunması, iç gerilmelerin tamamen giderilemediğini ve önceki üretim adımlarından kalan kalıntıların etkisini sürdürebildiğini göstermektedir. Bu durum, tavlamanın süre veya sıcaklık bakımından yeniden optimize edilmesi gerektiğine işaret edebilir. Yapının bu hali, martensit dönüşümünün başlayacağı noktalar açısından farklı kinetik koşullara neden olabileceğinden, ısıtıl işlem sonrası oluşacak fazların dağılımını etkileyebilir.

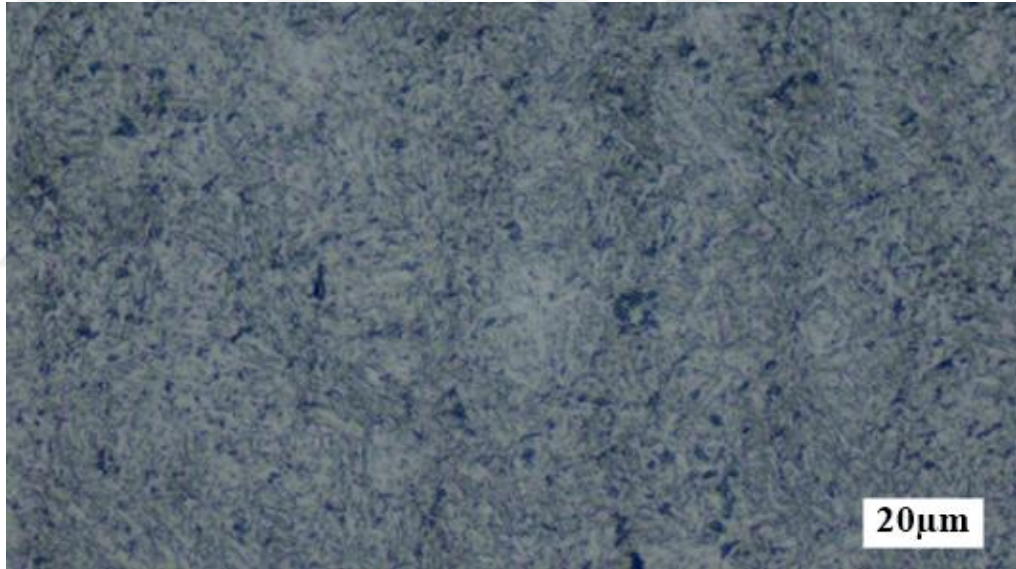
Tavlama sonrası hedeflenen yaklaşık 30 HRC sertlik değerine ulaşmak amacıyla numuneye 660 °C sıcaklıkta 90 dakika süreyle temperleme işlemi uygulanmıştır. Bu sıcaklık, özellikle martensitik yapı içerisinde karbür çökmesi için uygundur. Yılmaz (2017), bu sıcaklık aralığının tokluk kazanımı açısından kritik olduğunu belirtmiş; sertliğin bir miktar azalmasına karşın, yapının gevrekliğini kaybederek daha dayanıklı hale geldiğini ifade etmiştir [38]. Totten (2007) ise, temperleme sonrası ortaya çıkan karbür fazlarının dislokasyon hareketlerini sınırlandırarak mukavemeti desteklediğini vurgulamıştır [36].

Isıl işlem sonrası elde edilen mikroyapı, Şekil 4.6'da verilmiştir. Görüntüde, iğnemsî morfolojiye sahip martensit fazlarının baskın olduğu ve bu fazlar arasında dağılmış karbür çökeltilerinin yer aldığı görülmektedir. Martensit yapının yoğunluğu, ani soğumanın başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini gösterirken, temperleme sonrası çöken karbürler malzemenin gevrekliğini azaltarak darbe dayanımını artırmaktadır. Yapıda yer yer beynitik yapılar gözlemlenmekte olup, bu bölgeler martensit kadar sert olmamakla birlikte daha fazla süneklik sunmaktadır. Bu durum, özellikle parça üzerinde yükün heterojen dağıldığı uygulamalarda enerji absorpsiyon kapasitesini artırıcı yönde bir etki yaratır. Bununla birlikte, Flutecnica'nın yayımladığı teknik rapora göre 42CrMo4 çeliğinin kimyasal bileşimi özellikle krom ve molibdenin etkisiyle karbür çökmesini geciktirmekte ve böylece ince taneli martensitik dönüşüm yapılarının oluşmasını sınırlamaktadır [23]. Bu durum, difüzyon hızlarının düşüklüğü ile açıklanabilir. Dolayısıyla, 42CrMo4 çeliği, 27MnB4 ve 41Cr4 çeliklerine kıyasla daha iri taneli ve yavaş dönüşüme sahip bir yapı göstermektedir. Totten (2007) ile Korkmaz ve Demirtaş (2018), alaşım elementlerinin bu tür difüzyon temelli etkilerinin, mikroyapının homojenliğini ve tane boyutunu doğrudan etkilediğini rapor etmiştir [15, 36].

Sonuç olarak, Şekil 4.5 ve 4.6'da gösterilen mikroyapılar, 42CrMo4 çeliğinin tavlama sonrası homojenleştirilen ferrit-perlit yapısından, sertleştirme ve temperleme işlemleri ile yoğun martensit ve karbür çökeltilerinden oluşan sert bir yapıya başarıyla dönüştüğünü göstermektedir. Bu yapı, yüksek mukavemetli uygulamalar için elverişli olmakla birlikte, iri tane yapısının kontrol altına alınması gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Özellikle bağlantı elemanları gibi hem yüksek mukavemet hem de tokluk gerektiren uygulamalarda, bu mikroyapısal dengenin sağlanması performans açısından kritik bir parametredir.



Şekil 4.5. Isıl işlem öncesi 42CrMo4 mikroyapı görüntüsü



Şekil 4.6. Isıl işlem sonrası 42CrMo4 mikroyapı görüntüsü

4.4. 27MnB4, 41Cr4, 42CrMo4 çeliklerinden M20X L=95 8.8 kalitede cıvata üretimi ve ısıl işlem uygulaması,

Bu çalışma kapsamında, Ø20 çapında 27MnB4 çeliği, filmaşın olarak temin edilmiştir. İlk aşamada, çeliğe küreselleştirme tavlaması uygulanmış, bu işlemle çeliğin mikroyapısı uygun hale getirilerek mekanik özelliklerinin istenen seviyeye ulaşması sağlanmıştır. Ardından, tel çekme yöntemi ile çeliğin çapı Ø19,65 mm'ye düşürülmüştür.

Bu işlemlerin ardından, malzeme fosfat banyosuna daldırılarak yüzeyi fosfatla kaplanmış, böylece hem yüzey koruma sağlanmış hem de sonraki işlemler için uygun hale getirilmiştir. Son final kontrolleri yapılmış ve malzemenin uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu aşamada, onaylanan malzeme cıvata üretim hattına aktarılmıştır.

Hammadde, soğuk dövme istasyonunda işleme alınmış ve burada M20x L=95 8.8 cıvata üretimi için gerekli kalıp ayarları yapılmıştır. Soğuk dövme işlemi ile malzeme istenilen geometrik şekle getirilmiş ve cıvata üretim süreci başlatılmıştır. Şekillendirme işlemi tamamlandıktan sonra, cıvata diş açma istasyonuna aktarılmıştır. Diş açma işlemi, ovalama yöntemi ile otomasyon sistemi aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle cıvatanın dişleri yüksek hassasiyetle işlenmiştir. Son olarak, cıvatalara ısıl işlem uygulanarak malzemenin mekanik özellikleri optimize edilmiştir. Uygulanan ısıl işlem, malzemenin dayanımını arttırmaya yönelik olarak belirli sıcaklık ve süre koşullarında gerçekleştirilmiş ve sonuçları aşağıda belirtilen kriterlere göre değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, 27MnB4 çeliği üzerinde tavlama ve temperleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, çelik örneği, östenit sıcaklık aralığının üzerinde bir sıcaklıkta 830 °C'ye ısınmış ve bu sıcaklıkta 60 dakika süreyle tavlansmıştır. Bu tavlama işlemi, çeliğin mikroyapısındaki karbon çökelmelerini homojen hale getirerek, sonraki sertleşme işlemi için uygun ortamı hazırlamayı amaçlamaktadır.

Tavlama işleminin ardından, 27MnB4 çeliği martenzitik dönüşümün sağlanabilmesi için hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Bu soğutma işlemi, çeliğin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yağda gerçekleştirilmiştir. Yağda yapılan hızlı soğutma, çeliğin yüzeyinde martenzit fazının oluşmasına yol açarak, sertliğin önemli ölçüde artmasını sağlamaktadır. Bu işlemin ardından, çeliğin yağ çıkışı sertliği 45 HRC olarak ölçülmüştür. Bu değer, martenzit dönüşümünün başarıyla gerçekleştiğini ve çeliğin sertleşme aşamasının tamamlandığını göstermektedir.

Tavlama işleminin doğruluğunu ve temperleme sıcaklığının belirlenmesini sağlamak amacıyla, çeliğin yağ çıkışı sertliği üzerinde yapılan ölçümler, tavlama işleminin etkinliğini doğrulamak için kullanılmıştır. Yağ çıkışı sertliğinin belirlenmesinin ardından, temperleme işlemi için uygun sıcaklık belirlenmiştir. Hedeflenen 30 HRC sertlik değerine ulaşabilmek amacıyla 550 °C'de 90 dakika süreyle temperlenmiştir. Temperleme işlemi, çeliğin iç yapısındaki gerilmeleri azaltarak, dayanıklılığını ve tokluk özelliklerini geliştirmek için kritik bir adım olup, bu işlem sonrasında çeliğin sertliği yaklaşık olarak 30 HRC'ye düşürülmüştür.

Sonuç olarak, tavlama ve temperleme işlemleri, 27MnB4 çeliğinin istenen mekanik özelliklere ulaşması için etkin bir şekilde uygulanmış ve gerekli sertlik değerleri elde edilmiştir. 27MnB4 çeliği, uygulanan sertleştirme işlemi sonrasında elde edilen karakteristik mekanik özellikler aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Sertleştirme işlemi, çeliğin mikro yapısında martenzit fazının oluşmasına ve bu sayede çeliğin sertliğinin artmasına yol açmıştır. Yapılan sertleştirme işlemi, çeliğin mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler meydana getirmiştir. Bu değişiklikler, çeliğin dayanıklılığını, çekme-akma, %uzama, %kesit daralması darbe dayanımı, sertlik gibi özelliklerini doğrudan etkilemiş olup, bu özelliklerin her biri, belirli uygulamalar için uygunluğu hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Ø20 çapında 41Cr4 çeliği, filmaşın olarak temin edilmiştir. İlk aşamada, çeliğe küreselleştirme tavlaması uygulanmış, bu işlemle çeliğin mikroyapısı uygun hale getirilerek mekanik özelliklerinin istenen seviyeye ulaşması sağlanmıştır. Ardından, tel çekme yöntemi ile çeliğin çapı Ø19,65 mm'ye düşürülmüştür. Bu işlemlerin ardından, malzeme fosfat banyosuna daldırılarak yüzeyi fosfatla kaplanmış, böylece hem yüzey koruma sağlanmış hem de sonraki işlemler için uygun hale getirilmiştir. Son final kontrolleri yapılmış ve malzemenin uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu aşamada, onaylanan malzeme cıvata üretim hattına aktarılmıştır.

Hammadde, soğuk dövme istasyonunda işleme alınmış ve burada M20x L=95 8.8 cıvata üretimi için gerekli kalıp ayarları yapılmıştır. Soğuk dövme işlemi ile malzeme istenilen geometrik şekle getirilmiş ve cıvata üretim süreci başlatılmıştır. Şekillendirme işlemi tamamlandıktan sonra, cıvata diş açma istasyonuna aktarılmıştır. Diş açma işlemi, ovalama yöntemi ile otomasyon sistemi aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle cıvatanın dişleri yüksek hassasiyetle işlenmiştir. Son olarak, cıvatalara ısı işlem uygulanarak malzemenin mekanik özellikleri optimize edilmiştir. Uygulanan ısı işlem, malzemenin dayanımını arttırmaya yönelik olarak belirli sıcaklık ve süre koşullarında gerçekleştirilmiş ve sonuçları aşağıda belirtilen kriterlere göre değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, 41Cr4 çeliği üzerinde tavlama ve temperleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, çelik örneği, östenit sıcaklık aralığının üzerinde bir sıcaklıkta 830 °C'ye ısınmış ve bu sıcaklıkta 60 dakika süreyle tavlansmıştır. Bu tavlama işlemi, çeliğin mikroyapısındaki karbon çökelmelerini homojen hale getirerek, sonraki sertleşme işlemi için uygun ortamı hazırlamayı amaçlamaktadır.

Tavlama işleminin ardından, 41Cr4 çeliği martenzitik dönüşümün sağlanabilmesi için hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Bu soğutma işlemi, çeliğin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yağda gerçekleştirilmiştir. Yağda yapılan hızlı soğutma, çeliğin yüzeyinde martenzit fazının oluşmasına yol açarak, sertliğin önemli ölçüde artmasını sağlamaktadır. Bu işlemin ardından, çeliğin yağ çıkışı sertliği 52 HRC olarak ölçülmüştür. Bu değer, martenzit dönüşümünün başarıyla gerçekleştiğini ve çeliğin sertleşme aşamasının tamamlandığını göstermektedir.

Tavlama işleminin doğruluğunu ve temperleme sıcaklığının belirlenmesini sağlamak amacıyla, çeliğin yağ çıkışı sertliği üzerinde yapılan ölçümler, tavlama işleminin etkinliğini doğrulamak için kullanılmıştır. Yağ çıkışı sertliğinin belirlenmesinin ardından, temperleme işlemi için uygun sıcaklık belirlenmiştir. Hedeflenen 30 HRC sertlik değerine ulaşabilmek amacıyla 630 °C'de 90 dakika süreyle temperlenmiştir. Temperleme işlemi, çeliğin iç yapısındaki gerilmeleri azaltarak, dayanıklılığını ve tokluk özelliklerini geliştirmek için kritik bir adım olup, bu işlem sonrasında çeliğin sertliği yaklaşık olarak 30 HRC'ye düşürülmüştür.

Sonuç olarak, tavlama ve temperleme işlemleri, 41Cr4 çeliğinin istenen mekanik özelliklere ulaşması için etkin bir şekilde uygulanmış ve gerekli sertlik değerleri elde edilmiştir. 41Cr4 çeliği, uygulanan sertleştirme işlemi sonrasında elde edilen karakteristik mekanik özellikler aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Sertleştirme işlemi, çeliğin mikro yapısında martenzit fazının oluşmasına ve bu sayede çeliğin sertliğinin artmasına yol açmıştır. Yapılan sertleştirme işlemi, çeliğin mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler meydana getirmiştir. Bu değişiklikler, çeliğin dayanıklılığını, çekme-akma, %uzama, %kesit daralması darbe dayanımı, sertlik gibi özelliklerini doğrudan etkilemiş olup, bu özelliklerin her biri, belirli uygulamalar için uygunluğu hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Ø20 çapında 42CrMo4 çeliği, filmaşın olarak temin edilmiştir. İlk aşamada, çeliğe küreselleştirme tavlaması uygulanmış, bu işlemle çeliğin mikroyapısı uygun hale getirilerek mekanik özelliklerinin istenen seviyeye ulaşması sağlanmıştır. Ardından, tel çekme yöntemi ile çeliğin çapı Ø19,65 mm'ye düşürülmüştür. Bu işlemlerin ardından, malzeme fosfat banyosuna daldırılarak yüzeyi fosfatla kaplanmış, böylece hem yüzey koruma sağlanmış hem de sonraki işlemler için uygun hale getirilmiştir. Son final kontrolleri yapılmış ve malzemenin uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu aşamada, onaylanan malzeme cıvata üretim hattına aktarılmıştır.

Hammadde, soğuk dövme istasyonunda işleme alınmış ve burada M20x L=95 8.8 cıvata üretimi için gerekli kalıp ayarları yapılmıştır. Soğuk dövme işlemi ile malzeme istenilen geometrik şekle getirilmiş ve cıvata üretim süreci başlatılmıştır. Şekillendirme işlemi tamamlandıktan sonra, cıvata diş açma istasyonuna aktarılmıştır. Diş açma işlemi, ovalama yöntemi ile otomasyon sistemi aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle cıvatanın dişleri yüksek hassasiyetle işlenmiştir. Son olarak, cıvatalara ısıtma işlemi uygulanarak malzemenin mekanik özellikleri optimize edilmiştir. Uygulanan ısıtma işlemi, malzemenin dayanımını arttırmaya yönelik olarak belirli sıcaklık ve süre koşullarında gerçekleştirilmiş ve sonuçları aşağıda belirtilen kriterlere göre değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, 42CrMo4 çeliği üzerinde tavlama ve temperleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, çelik örneği, östenit sıcaklık aralığının üzerinde bir sıcaklıkta 830 °C'ye ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 60 dakika süreyle tavlansmıştır. Bu tavlama işlemi, çeliğin mikroyapısındaki karbon çökelmelerini homojen hale getirerek, sonraki sertleşme işlemi için uygun ortamı hazırlamayı amaçlamaktadır.

Tavlama işleminin ardından, 42CrMo4 çeliği martenzitik dönüşümün sağlanabilmesi için hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Bu soğutma işlemi, çeliğin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yağda gerçekleştirilmiştir. Yağda yapılan hızlı soğutma, çeliğin yüzeyinde martenzit fazının oluşmasına yol açarak, sertliğin önemli ölçüde artmasını sağlamaktadır. Bu işlemin ardından, çeliğin yağ çıkışı sertliği 53 HRC olarak ölçülmüştür. Bu değer, martenzit dönüşümünün başarıyla gerçekleştiğini ve çeliğin sertleşme aşamasının tamamlandığını göstermektedir.

Tavlama işleminin doğruluğunu ve temperleme sıcaklığının belirlenmesini sağlamak amacıyla, çeliğin yağ çıkışı sertliği üzerinde yapılan ölçümler, tavlama işleminin etkinliğini doğrulamak için kullanılmıştır. Yağ çıkışı sertliğinin belirlenmesinin ardından, temperleme işlemi için uygun sıcaklık belirlenmiştir. Hedeflenen 30 HRC sertlik değerine ulaşabilmek amacıyla 660°C'de 90 dakika süreyle temperlenmiştir. Temperleme işlemi, çeliğin iç yapısındaki gerilmeleri azaltarak, dayanıklılığını ve tokluk özelliklerini geliştirmek için kritik bir adım olup, bu işlem sonrasında çeliğin sertliği yaklaşık olarak 30 HRC'ye düşürülmüştür.

Sonuç olarak, tavlama ve temperleme işlemleri, 42CrMo4 çeliğinin istenen mekanik özelliklere ulaşması için etkin bir şekilde uygulanmış ve gerekli sertlik değerleri elde edilmiştir.

42CrMo4 çeliği, uygulanan sertleştirme işlemi sonrasında elde edilen karakteristik mekanik özellikler aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Sertleştirme işlemi, çeliğin mikro yapısında martenzit fazının oluşmasına ve bu sayede çeliğin sertliğinin artmasına yol açmıştır. Yapılan sertleştirme işlemi, çeliğin mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler meydana getirmiştir. Bu değişiklikler, çeliğin dayanıklılığını, çekme-akma, %uzama, %kesit daralması darbe dayanımı, sertlik gibi özelliklerini doğrudan etkilemiş olup, bu özelliklerin her biri, belirli uygulamalar için uygunluğu hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Bu çalışmada, üç farklı çelik türü olan 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 çelikleri üzerinde gerçekleştirilen cıvata üretim süreçleri ve ısıl işlemlerinin etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, her bir çelik türü için belirlenen ısıl işlem parametrelerine göre tavlama ve temperleme işlemleri uygulanarak, çeliklerin mekanik özellikleri optimize edilmiştir. Elde edilen veriler, her bir çeliğin sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı, darbe dayanımı ve diğer ilgili mekanik özellikleri açısından değerlendirilmiştir.

Tablo 4.1’de görüldüğü üzere, 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 çeliklerinin ısıl işlem sonrası mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Tablo, her üç çelik için yağ çıkışı sertliği, çekme dayanımı, akma dayanımı, % kopma uzaması, % kesit daralması, sertlik ve darbe dayanımı gibi önemli parametreleri içermekte olup, 42CrMo4’ün en yüksek mekanik performansa sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 4.1. Çeliklerin ısıl işlem sonucu mekanik sonuçları

Malzeme	Yağ Çıkış Sertliği (HRC)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	% Kopma Uzaması	% Kesit Daralması	Sertlik (HRC)	Darbe Dayanımı (J)
27MnB4	45	947	755	14%	53%	30	52
41Cr4	52	955	798	16%	54%	30	61
42CrMo4	55	962	806	18%	56%	30	83

27MnB4 çeliği üzerinde yapılan ısıl işlemler sonucunda elde edilen yağ çıkış sertliği 45 HRC olarak ölçülmüş, bu da martensit dönüşümünün başarıyla gerçekleştirildiğini ve çeliğin sertleşme aşamasının tamamlandığını göstermektedir. Ardından uygulanan temperleme işlemi ile sertlik değeri 30 HRC'ye düşürülerek, çeliğin tokluğu artırılmıştır.

Çeliğin çekme dayanımı 947 MPa, akma dayanımı ise 755 MPa olarak belirlenmiştir. Çeliğin %14 kopma uzaması ve %53 kesit daralması, çeliğin iyi bir şekil değiştirilebilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çeliğin darbe dayanımı 52 J olarak ölçülmüş olup, bu değer çeliğin darbeye karşı gösterdiği dayanımın yeterli düzeyde olduğunu işaret etmektedir. Bu sonuçlar, 27MnB4 çeliğinin yüksek dayanım ve yeterli tokluk özellikleri ile çeşitli mühendislik uygulamaları için uygun olduğunu ortaya koymaktadır. 41Cr4 çeliği, yapılan ısıl işlemler sonucunda yağ çıkış sertliği olarak 52 HRC değerine ulaşmış ve martensit dönüşümünün tamamlandığı doğrulanmıştır. Temperleme işlemi ile sertlik değeri 30 HRC'ye düşürülmüş ve çeliğin mekanik özellikleri optimize edilmiştir. 41Cr4 çeliği, 955 MPa çekme dayanımı ve 798 MPa akma dayanımı ile yüksek mukavemet özelliklerine sahip olmuştur. Çeliğin %16 kopma uzaması ve %54 kesit daralması, malzemenin iyi bir plastik deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 61 J'lik darbe dayanımı değeri, çeliğin yüksek darbe direncine sahip olduğunu ve zorlu çalışma koşullarında performans sergileyebileceğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, 41Cr4 çeliğini daha yüksek mukavemet ve tokluk gerektiren uygulamalar için uygun kılmaktadır. 42CrMo4 çeliği, 53 HRC yağ çıkış sertliği değeriyle sertleşmiş olup, martensit dönüşümünün başarılı bir şekilde tamamlandığı ve çeliğin yüksek sertliğe ulaştığı belirlenmiştir. Temperleme işlemi sonrasında çeliğin sertliği 30 HRC'ye düşürülerek, malzemenin mekanik özellikleri optimize edilmiştir. Bu çeliğin çekme dayanımı 962 MPa, akma dayanımı ise 806 MPa olarak ölçülmüştür. %18 kopma uzaması ve %56 kesit daralması, çeliğin yüksek deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 42CrMo4 çeliği 83 J darbe dayanımı ile en yüksek darbe direncini sergileyen malzeme olmuştur. Bu sonuçlar, 42CrMo4 çeliğinin yüksek dayanım, tokluk ve darbe dayanımını bir arada sunarak, özellikle dinamik yükler altında çalışan bileşenler için ideal bir seçenek olduğunu göstermektedir. Çalışmada kullanılan üç çelik türü, farklı kimyasal bileşim ve ısıl işlem parametrelerine sahip olmalarına rağmen benzer şekilde yüksek dayanım ve uygun tokluk özellikleri göstermektedir. 27MnB4 çeliği, uygun maliyetli ve dayanıklı bileşenler için tercih edilebilecek bir malzeme iken, 41Cr4 çeliği, yüksek mukavemet ve darbe direnci gerektiren uygulamalar için daha uygun bir seçenek sunmaktadır. 42CrMo4 çeliği ise, özellikle dinamik yükler ve yüksek darbe dayanımı gerektiren uygulamalar için en uygun malzeme olarak öne çıkmaktadır.

Isıl işlemler, çeliklerin mekanik özelliklerini geliştirmek için önemli bir rol oynamış ve her bir çeliğin performansı, yapılan tavlama ve temperleme işlemleriyle optimize edilmiştir. Bu süreçlerin sonunda elde edilen sertlik, dayanım, tokluk ve darbe dayanımı gibi veriler, çeliklerin endüstriyel uygulamalarda kullanımı için gerekli kriterleri karşılamaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 çeliklerinin ısıl işlem ile nasıl özelleştirilebileceğini ve her bir çeliğin farklı mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini göstermektedir. Çalışma, çeliklerin üretim süreçlerine ilişkin değerli veriler sunarak, bu malzemelerin kullanım alanlarını genişletmeye yönelik önemli bir kaynak oluşturmuştur. Temperleme işlemi, martensitik yapının sertliğini kontrol etmek, iç gerilmeleri azaltmak, tokluğu artırmak ve nihai mekanik özellikleri optimize etmek amacıyla yapılan kritik bir ısıl işlemdir. Çalışmada, 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 çelikleri üzerinde farklı temperleme sıcaklıklarında yapılan işlemler sonucunda elde edilen mekanik özellikler, çeliklerin kimyasal bileşimlerine ve kullanılan temperleme sıcaklıklarına göre farklılık göstermektedir. Bu farklar, her bir çeliğin sahip olduğu mekanik kompozisyon üzerinde doğrudan etkili olmuştur. 27MnB4 çeliği üzerinde uygulanan temperleme sıcaklığı 550°C olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklıkta, çeliğin yüzeyindeki martensitik fazın yumuşama ve homojenleşme süreci hızlanmış, fakat sertlikte büyük bir düşüş gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, çeliğin yağ çıkışı sertliği 45 HRC iken, temperleme sonrası sertlik yaklaşık olarak 30 HRC'ye düşürülmüştür. 27MnB4 çeliği, 947 MPa çekme dayanımına sahip olmuş, bu da malzemenin yüksek mukavemetli olduğunu göstermektedir. Akma dayanımı 755 MPa olup, malzemenin plastik deformasyona uğramadan taşıyabileceği yük kapasitesini ifade etmektedir. %14 kopma uzaması ve %53 kesit daralması, çeliğin belirli bir oranda plastik deformasyona dayanabileceğini ve şekil değiştirme kapasitesinin yeterli olduğunu ortaya koymaktadır. 52 J'lik darbe dayanımı, çeliğin darbelere karşı dirençli olduğunu ve soğuk çalışma koşullarında da yeterli tokluğa sahip olduğunu göstermektedir. Bu sıcaklık, 27MnB4 çeliğinin yüksek sertlik ve dayanımını optimize etmek için ideal bir seçim olmuştur. Ancak, çeliğin daha fazla tokluk kazanabilmesi için sertliğin biraz düşürülmesi gerekmiştir. 41Cr4 çeliği üzerinde 630°C'de yapılan temperleme işlemi, çeliğin daha fazla sertlik kaybına uğramadan, tokluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Yağ çıkışı sertliği 52 HRC iken, temperleme işlemi sonrası çeliğin sertliği 30 HRC'ye düşürülmüştür. 41Cr4 çeliği, 955 MPa çekme dayanımına ulaşmış, bu da malzemenin yüksek mukavemete sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Akma

dayanımı 798 MPa ile yüksek olup, çeliğin genellikle yüksek gerilim altında bile deformasyona uğramadan dayanabileceğini göstermektedir. %16 kopma uzaması ve %54 kesit daralması, çeliğin oldukça iyi bir şekil değiştirme kapasitesine ve yüksek süneklik değerlerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. 61 J darbe dayanımı ile 41Cr4 çeliği, en yüksek darbe direncine sahip çeliklerden biri olmuştur. Bu, çeliğin zorlu koşullarda ve dinamik yükler altında bile dayanıklılığını koruyabileceğini göstermektedir. 630°C'deki temperleme sıcaklığı, 41Cr4 çeliği için yüksek mukavemet ve yüksek tokluk dengesi sağlayan bir sıcaklıktır. Bu sıcaklık, çeliğin darbe dayanımını artırarak zorlu çalışma koşullarında performansını iyileştirmiştir. 42CrMo4 çeliği için 660°C temperleme sıcaklığı belirlenmiştir. Bu sıcaklık, çeliğin mekanik özelliklerini daha da iyileştirerek dayanım, tokluk ve darbe dayanımını optimize etmiştir. Yağ çıkışı sertliği 53 HRC iken, temperleme işlemi sonrası sertlik 30 HRC'ye düşürülmüştür. 42CrMo4 çeliği, 962 MPa çekme dayanımı ile en yüksek mukavemete sahip çeliklerden biri olmuştur. Akma dayanımı 806 MPa ile oldukça yüksek olup, çeliğin yüksek gerilim altında bile yeterli güvenlik payı ile çalışabileceğini göstermektedir. %18 kopma uzaması ve %56 kesit daralması, 42CrMo4 çeliğinin yüksek şekil değiştirme kapasitesine ve mükemmel süneklığe sahip olduğunu göstermektedir. 83 J darbe dayanımı ile 42CrMo4 çeliği, diğer iki çeliğe göre daha yüksek bir darbe direncine sahiptir ve dinamik yükler altındaki performansı oldukça yüksektir. 660°C'de yapılan temperleme işlemi, 42CrMo4 çeliğinin darbe dayanımını ve yüksek mukavemetini artırarak, özellikle dinamik yükler altında çalışan bileşenlerde üstün performans göstermesini sağlamıştır.

4.5. Mekanik Kıyaslama

- **Sertlik ve Tokluk:** Temperleme sıcaklıkları arttıkça, çeliklerin sertlikleri düşmekte ancak toklukları artmaktadır. 27MnB4 çeliği 550°C'de temperlenerek nispeten daha düşük bir sertlik (30 HRC) ve yüksek darbe dayanımı (52 J) elde etmiştir. 41Cr4 çeliği 630°C'de temperlenmiş ve 61 J'lik daha yüksek bir darbe dayanımı sağlanmıştır. 42CrMo4 çeliği ise 660°C'de temperlenerek 83 J'lik darbe dayanımı ile en yüksek darbe direncini elde etmiştir.

- **Çekme ve Akma Dayanımı:** Çekme ve akma dayanımı açısından, 42CrMo4 çeliği (962 MPa ve 806 MPa) en yüksek değerleri elde etmiştir. 41Cr4 ve 27MnB4 çelikleri ise sırasıyla 955 MPa, 798 MPa ve 947 MPa, 755 MPa gibi değerler ile benzer performanslar sergilemişlerdir.
- **Kopma Uzaması ve Kesit Daralması:** 42CrMo4 çeliği, %18 kopma uzaması ve %56 kesit daralması ile en yüksek plastik deformasyon kapasitesine sahip çelik olarak öne çıkmaktadır. 41Cr4 çeliği de %16 kopma uzaması ve %54 kesit daralması ile oldukça iyi bir süneklik sergilerken, 27MnB4 çeliği %14 kopma uzaması ve %53 kesit daralması ile bu iki çeliğin gerisinde kalmıştır.

Temperleme sıcaklıklarındaki farklılıklar, çeliklerin mekanik kompozisyonları üzerinde belirgin etkiler yaratmıştır. Daha yüksek temperleme sıcaklıkları, çeliklerin darbe dayanımını artırarak daha dayanıklı ve tokluk özelliklerini geliştirmiştir. Ancak, sertlikte meydana gelen düşüşler, çeliğin dayanım ve şekil değiştirme kapasitesini dengelemek için doğru temperleme sıcaklığının seçilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu nedenle, her çelik türü için optimum temperleme sıcaklığı belirlenerek, hedeflenen mekanik özellikler elde edilmiştir.

Tablo 4.2’de farklı çeliklerin menevişleme sıcaklığına göre mekanik özelliklerindeki değişim verilmiştir. Şekil 4.7 de de referans alınan değerler şematik olarak gösterilmiştir. 27MnB4 çeliğinde menevişleme sıcaklığı 450 °C iken çekme dayanımı 1070 MPa, uzama %9, sertlik 32 HRC ve çentik darbe dayanımı 43 J olarak ölçülmüştür. Menevişleme sıcaklığı 550 °C’ye yükseldiğinde çekme dayanımı 947 MPa’ya düşerken, uzama %14’e, sertlik 30 HRC’ye ve çentik darbe dayanımı 52 J’ye yükselmiştir. 650 °C’de ise çekme dayanımı 825 MPa’ya inerken, uzama %16, sertlik 24 HRC ve çentik darbe dayanımı 54 J olarak gözlenmiştir.

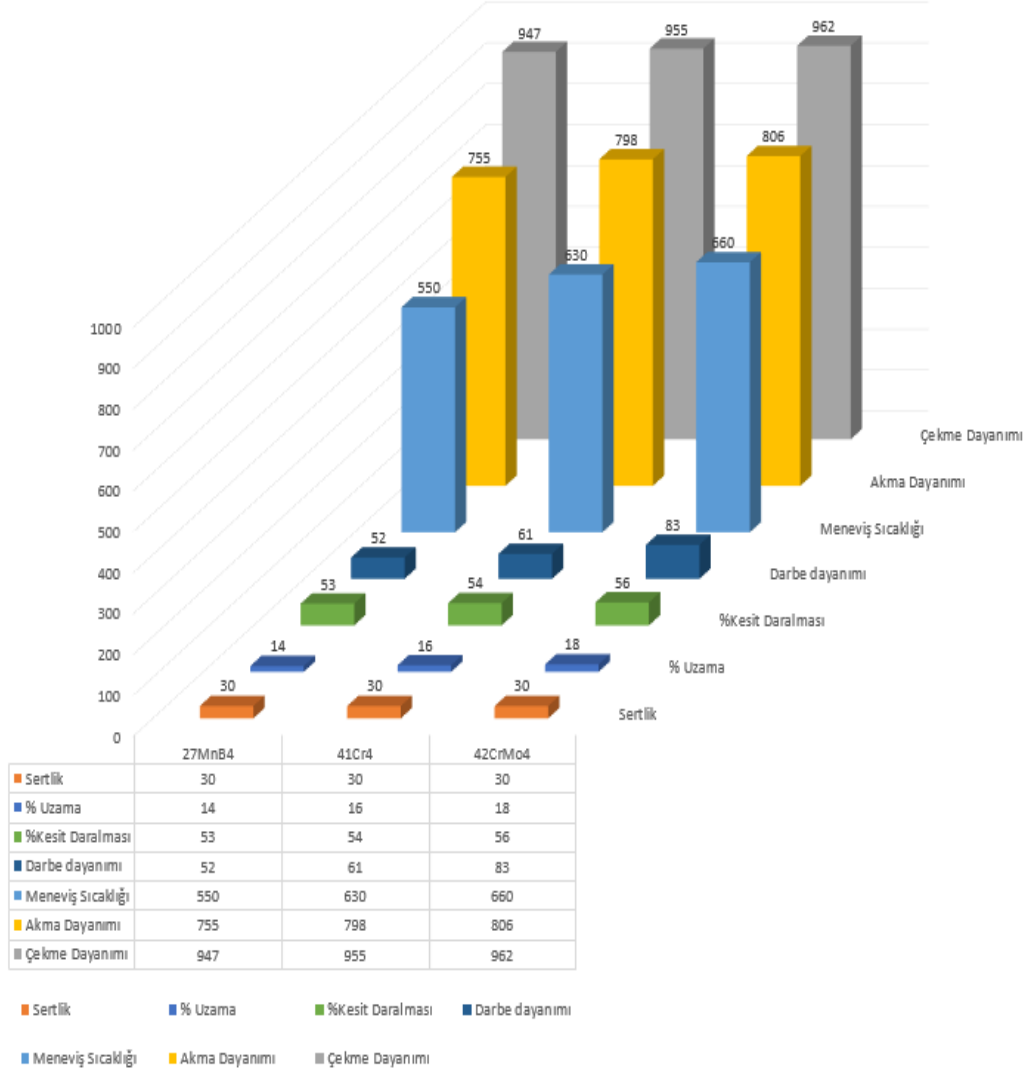
41Cr4 çeliğinde 450 °C’de çekme dayanımı 1123 MPa, uzama %10, sertlik 34 HRC ve çentik darbe dayanımı 30 J iken; 550 °C’de çekme dayanımı 910 MPa’ya, uzama %14’e, sertlik 27 HRC’ye ve çentik darbe dayanımı 55 J’ye çıkmıştır. 630 °C’de çekme dayanımı 955 MPa, uzama %16, sertlik 30 HRC ve çentik darbe dayanımı 61 J olarak kaydedilmiştir. 42CrMo4 çeliğinde 450 °C’de çekme dayanımı 1180 MPa, uzama %9, sertlik 34 HRC ve çentik darbe dayanımı 29 J iken, 550 °C’de çekme dayanımı 1020 MPa’ya, uzama %12’ye, sertlik 32 HRC’ye ve çentik darbe dayanımı 61 J’ye ulaşmıştır. 660 °C’de ise çekme dayanımı 962 MPa, uzama %18, sertlik 30 HRC ve çentik darbe

dayanımı 83 J olarak ölçülmüştür. Bu veriler, menevişleme sıcaklığının artmasıyla çekme dayanımının azaldığını ancak uzama ve darbe dayanımının arttığını göstermektedir. Tablo 4.2’de verilen bu mekanik özelliklerin grafiğe dökülmüş hali Şekil 4.9’da detaylı şekilde gösterilmiştir ve bu şekil, farklı çeliklerin menevişleme sıcaklığına bağlı mekanik davranışlarının görsel karşılaştırmasını sağlamaktadır.

Tablo 4.2. Farklı çeliklere ait mekanik özelliklerin menevişleme sıcaklığına göre değişimi

Malzeme	Menevişleme Sıcaklığı (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HRC)	Çentik Darbe (J)
27MnB4	450	1070	9	32	43
27MnB4	550	947	14	30	52
27MnB4	650	825	16	24	54
41Cr4	450	1123	10	34	30
41Cr4	550	910	14	27	55
41Cr4	630	955	16	30	61
42CrMo4	450	1180	9	34	29
42CrMo4	550	1020	12	32	61
42CrMo4	660	962	18	30	83

Genel Değerlendirme



Şekil 4.7. Genel kıyas değerlendirme

5. BÖLÜM

TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 27MnB4, 41Cr4 ve 42CrMo4 çeliklerinden üretilen M20×95 mm boyutlarındaki 8.8 kalite bağlantı elemanlarının (cıvataların), farklı ısıl işlem parametrelerine (küreselleştirme tavlaması ve çeşitli menevişleme sıcaklıkları) tabi tutulduktan sonra mekanik ve mikroyapısal özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

27MnB4 çeliği, bor elementi katkısıyla sertleşebilirliği artırılmış düşük alaşımlı bir çelik olup, soğuk şekillendirme ve sonrasında yüksek dayanım istenen bağlantı elemanları için uygun bir seçenektir.

41Cr4 ve 42CrMo4 çelikleri, sırasıyla krom ve krom-molibden alaşımı içeren orta karbonlu çeliklerdir; menevişleme sonrası daha yüksek çekme dayanımı ve darbe dayanımı sergilemektedirler.

Küreselleştirme tavlaması sonucu tüm malzemelerde karbür fazları küresel forma dönüşerek soğuk şekillendirmeye uygun mikroyapılar elde edilmiştir.

Özellikle 41Cr4 ve 42CrMo4 çeliklerinde küreselleştirme sonrası daha düşük sertlik ve daha yüksek plastik şekillenebilirlik sağlanmıştır.

Menevişleme sıcaklığının artmasıyla tüm malzemelerde çekme dayanımı ve sertlik azalırken, uzama ve darbe dayanımı artmıştır. 450 °C'de yüksek çekme dayanımı ve sertlik değerleri elde edilmiş, bu durum temperlenmiş martensitik yapı ile ilişkilendirilmiştir.

650 °C'de uzama ve darbe dayanımı maksimum seviyeye ulaşmış, bu da mukavemetin azaldığını ancak sünekliğin arttığını göstermiştir. Menevişleme sıcaklığı arttıkça karbür çökeltilerinin birleşerek büyümesi ve dislokasyon gevşemesi nedeniyle mekanik mukavemette azalma gözlemlenmiştir.

550–630 °C aralığında darbe dayanımı artarken, uzama ve çekme dayanımı dengelenmiş; özellikle 630 °C, süneklik ve dayanım açısından optimum özellikler sunmuştur. 42CrMo4 çeliği, 450 °C’de 1180 MPa ile en yüksek çekme dayanımına ulaşmış; ancak bu sıcaklıkta darbe dayanımı düşüktür.

660 °C’de 42CrMo4 çeliği ile %18 uzama ve 83 J darbe dayanımı elde edilmiş; bu durum, yüksek tokluk gerektiren uygulamalar için ideal bir sıcaklık aralığını göstermektedir. Krom ve molibden alaşım elementleri, menevişleme sırasında karbür çökmesi davranışını dengeleyerek tokluk özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir.

Küreselleştirme tavlama sonrası ferrit matris içinde küresel sementit parçacıkları tespit edilmiş; bu yapı soğuk şekillendirme için uygun bir temel sağlamıştır. Menevişleme sıcaklığının artmasıyla martensitik yapı, temperlenmiş martensit ve üst bainit fazlarına dönüşmüş, gevreklik azalmış ve süneklik artmıştır.

42CrMo4 çeliği, yüksek süneklik ve darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda öne çıkarken; yüksek dayanım gereken, ancak sünekliğin ikinci planda olduğu uygulamalarda dikkatli kullanılmalıdır. 27MnB4 çeliği, orta seviyede mekanik özelliklerle ekonomik bir çözüm sunmakta ve belirli menevişleme koşullarında (örneğin 550 °C) uygulanabilirliği artmaktadır.

41Cr4 çeliği, iyi bir mukavemet-tokluk dengesi sağlayarak genel yapısal uygulamalarda avantaj sunmaktadır. Literatürde 42CrMo4 çeliğinin yüksek dayanım ve düşük süneklik sunduğu belirtilmiş olup, bu çalışmada 450 °C’de yapılan menevişleme ile bu bulgu doğrulanmıştır.

41Cr4 çeliği, dengeli mekanik özellikleriyle literatürde tanımlandığı gibi “denge profilli” bir çelik olduğunu göstermiştir. 27MnB4 çeliği, düşük alaşımlı yapısına rağmen menevişleme sonrası yeterli uzama ve darbe dayanımı sağlayarak ekonomik bir alternatif olduğunu ortaya koymuştur. Seri üretim uygulamalarında 27MnB4 çeliği, 550 °C menevişleme ile uygun maliyetli ve yeterli performanslı bir seçenek olabilir. Yüksek darbe yüklerine maruz kalan yapısal uygulamalarda 41Cr4 çeliği, 550–650 °C arası menevişleme ile tercih edilebilir.

42CrMo4 çeliği, ekstra yüksek dayanım gereken özel uygulamalarda kullanılmalı, ancak düşük süneklik nedeniyle oluşabilecek kırılmalara karşı dikkatli olunmalıdır. Soğuk şekillendirme öncesi uygulanacak küreselleştirme tavlama süresi ve sıcaklığı dikkatle belirlenmeli, mikroyapı analizleri ile doğrulama yapılmalıdır.



KAYNAKÇA

1. Dharm_anki, "The Role of Industrial Fasteners in Construction and Manufacturing," Gemsons blog, 13 March 2024. EN ISO 4014. (2011). *Hexagon head bolts - Product grades A and B*. International Organization for Standardization.
2. Haina Fastener, "Fastener Strength & Fatigue: Key Considerations," Haina News, 20 June 2025.
3. Ningbo Datian Fastener Co., Ltd., "Factors Influencing the Selection of Fastener Materials for Different Applications," Datian Fastener Blog, 2023.
4. Shenzhen Xintegu Hardware Co., Ltd., "Advantages and Characteristics of Cold Forged Fasteners," s.z.xintegu.com, 2025.
5. N. Wan et al., "Experimental and numerical investigations on fatigue behavior of 42CrMo4 high-strength steel single lap double-bolted joints," .
6. Menderes Kam & Hamit Saruhan, "Derin Kriyojenik İşlemin Farklı Bekletme Sürelerinin AISI 4140 (42CrMo4) Çeliğin Mekanik Özelliklerine Etkisi," Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt 6, Sayı 3, s. 553-564, 2018.
7. B. Özlü, M. Akgün & H. Demir, "Orta karbonlu DIN 41Cr4 çeliğin mikroyapısı, sertliği ve işlenebilirliği üzerine sıcak dövme ve soğutma koşullarının etkisinin değerlendirilmesi," Gazi Ü. Müh.-Mim. Fakültesi Dergisi, cilt 38(1), 2023.
8. Yılmaz, E. ve Demir, A., "Bağlantı Elemanlarının Tasarımında Malzeme Seçiminin ve Üretim Parametrelerinin Önemi," Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Dergisi, Cilt 26, Sayı 2, 2024.
9. Çelik Konstrüksiyonlarda Bağlantı Elemanlarının Önemi, Gijontij, <https://www.gijontij.com/celik-konstruksiyonlarda-baglanti-elemanlarinin-onemi>, erişim 18 Temmuz 2025.
10. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), "Bağlantı Elemanları Standartları," <https://www.tse.org.tr/>, erişim tarihi 2025.
11. Demir, M. ve Kaya, S., "Endüstriyel Bağlantı Elemanlarının Seçimi ve Uygulamaları," Makine Mühendisliği Dergisi, Cilt 30, Sayı 4, 2024.
12. TÜBİTAK, "İnşaat Sektöründe Bağlantı Elemanları Kullanımı ve Deprem Dayanımı," Rapor, 2023.
13. İstanbul Teknik Üniversitesi, "Otomotivde Bağlantı Elemanları Tasarımı ve Malzeme Seçimi," Yüksek Lisans Tezi, 2022.

14. Aydın, H., “Havacılık ve Uzay Sanayinde Bağlantı Elemanları Tasarımı ve Malzeme Seçimi,” Savunma Teknolojileri Dergisi, Cilt 18, Sayı 2, 2023.
15. Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ), “Bağlantı Elemanları Tasarımı ve Üretim Teknik Raporları,” 2024.
16. Bayraktar, E., “Karbon Çeliklerinin Sınıflandırılması ve Mekanik Özellikleri,” Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Dergisi, Cilt 12, Sayı 1, 2023.
17. Yılmaz, R. ve Aksoy, M., “Bağlantı Elemanlarında Karbon Çeliklerinin Kullanımı ve Yüzey Koruma Yöntemleri,” Endüstriyel Malzeme Dergisi, Cilt 8, Sayı 3, 2024.
18. Kaya, F. ve Çetin, M., “Alaşımli Çeliklerin Özellikleri ve Endüstriyel Uygulamaları,” Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Dergisi, Cilt 14, Sayı 2, 2023.
19. Doğan, A., “Yüksek Mukavemetli Alaşımli Çeliklerin Soğuk Şekillendirme ve Isıl İşlem Performansı,” Metalurji Dergisi, Cilt 20, Sayı 3, 2024.
20. Öztürk, S., “Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması ve Korozyon Dayanımı,” Malzeme ve Teknoloji Dergisi, Cilt 15, Sayı 1, 2023.
21. Yıldırım, E. ve Kara, M., “Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri ve Endüstriyel Kullanım Alanları,” Endüstriyel Malzemeler Dergisi, Cilt 9, Sayı 2, 2024.
22. Acar, T., “Titanium ve Alaşımlarının Havacılık ve Medikal Sektöründeki Uygulamaları,” Malzeme Bilimi Dergisi, Cilt 19, Sayı 3, 2024.
23. Demirtaş, B. ve Yılmaz, H., “Titanium Malzemelerin İşlenmesi ve Performans Özellikleri,” Endüstriyel Malzemeler ve Teknolojiler Dergisi, Cilt 11, Sayı 1, 2023.
24. Özkan, M. ve Yıldız, H., “Alaşımli Çeliklerin Mekanik Özellikleri ve Uygulama Alanları,” Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Dergisi, Cilt 22, Sayı 4, 2024.
25. Yılmaz, K., “Bağlantı Elemanlarında Tasarım Kriterleri ve Malzeme Seçimi,” Makine Mühendisliği Dergisi, Cilt 28, Sayı 3, 2024.
26. Demir, S. ve Arslan, M., “Bağlantı Elemanlarının Korozyif Ortamlarda Kullanımı ve Yüzey Kaplama Teknikleri,” Endüstriyel Malzeme ve Teknoloji Dergisi, Cilt 12, Sayı 2, 2023.
27. Aksoy, F., “Bağlantı Elemanlarında Montaj Teknikleri ve Ekonomik Değerlendirme,” İnşaat ve Makine Teknolojileri Dergisi, Cilt 15, Sayı 4, 2024.

28. Smith, J. & Brown, L., “Quality Standards and Testing Procedures for Fasteners,” *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 45, No. 3, 2022.
29. Kaya, H., “Sıcak Şekillendirme Yöntemleri ve Endüstriyel Uygulamaları,” *Metalurji ve Malzeme Bilimi Dergisi*, Cilt 16, Sayı 2, 2023.
30. Lee, S. & Kim, J., “Induction Heating in Hot Forming Processes: Efficiency and Control,” *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 60, 2023.
31. Kaya, S., “Soğuk Şekillendirme Yöntemleri ve Uygulamaları,” *Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Dergisi*, Cilt 21, Sayı 1, 2024.
32. Johnson, M. & Lee, T., “Cold Forming Processes: Mechanisms and Industrial Applications,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 31, No. 2, 2022.
33. Yalçın, H., “Soğuk Şekillendirme Yöntemleri ve Uygulama Sınırlamaları Üzerine Bir Derleme,” *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi (MATEDER)*, Cilt 17, Sayı 3, ss. 102–110, 2023.
34. Ersoy, N., & Yıldız, T. “Soğuk Şekillendirme Öncesi Küreselleştirme Tavlamaının Etkileri,” *Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Dergisi*, Cilt 14, Sayı 2, ss. 59–66, 2021.
35. Kurt, R., & Gündüz, S. (2019). Soğuk şekillendirme yönteminin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(2), 259–268.
36. Totten, G. E. (Ed.). (2007). *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies* (1. ed.). Boca Raton, FL: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/NOF0849384523>
37. Korkmaz, A., & Demirtaş, B. (2018). *41Cr4 çeliğinde tavlamanın mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
38. Yılmaz, E. (2017). *Çeliklerde ferrit-perlit dönüşümü ve mekanik özelliklere etkisi*. *Malzeme Bilimi Dergisi*, 12(4), 123-130.