

SAE 4032 Dövme Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Sertleştirme ve Kriyojenik İşlemlerin Etkisinin İncelenmesi

Erdoğan Gür

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül 2018

Effect of Quenching and Cryogenic Treatment on Forged SAE 4032 Steel's Mechanical Properties

Erdoğan Gür

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Metallurgical Engineering

September 2018

SAE 4032 Dövmeye Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Sertleştirme Ve Kriyojenik İşlemlerin  
Etkisinin İncelenmesi

Erđinç Gür

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Hakan Gaşan

Eylül 2018

## ONAY

Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Erdinç Gür'ün YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “SAE 4032 Dövme Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Sertleştirme Ve Kriyojenik İşlemlerin Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğın ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliğı ile kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Hakan Gaşan

**İkinci Danışman** : -

**Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Doç.Dr.Hakan Gaşan

**Üye** : Doç.Dr.Erhan Ayas

**Üye** : Doç.Dr.Bilge Yaman Islak

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN  
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç.Dr. Hakan Gaşan danışmanlığında hazırlamış olduğum "SAE 4032 Dövme Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Sertleştirme ve Kriyojenik İşlemlerin Etkisinin İncelenmesi" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 03/09/2018

Erdoğan GÜR

İmza

## ÖZET

Bu çalışmada disk tipi frenlerde levye parçası malzemesi olarak kullanılan SAE 4032 çeliğine önceden yapılan su verme ve temperleme sonrası 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış ardından parçadan çıkarılan numunenin sertlik, mikroyapı, çekme mukavemeti ölçülmüştür. Levyeden çıkarılan sertlik ve mikroyapı numunesi, ANSYS sonlu elemanlar analizi programı ile tespit edilen, plastik deformasyonun başlangıç noktasından hazırlanmıştır. Kriyojenik işlem dakikada 2°C düşülerek -196°C'ye kadar soğutulup, belirtilen sürelerde bu sıcaklıkta tutulup, tekrar dakikada 2°C ısıtılarak oda sıcaklığına getirilerek yapılmıştır. Mikroyapı değişimleri optik mikroskopta incelenmiş, sertlik değişimi için Vickers sertlik birimi kullanılmıştır. Yorulma testleri Ege Fren 222H modeli gerçek fren sistemi üzerinde yapılmış, körükten gelen 17,5-18,5 kN arasındaki kuvvet, levye parçası vasıtası ile balatalara aktarmıştır. Yapılan test sonuçlarına göre kriyojenik işlem sonrasında parçaların yüzeyinde sertlik kriyojenik işlemler sonucunda önemli bir artış göstermemiş, mikroyapılar incelendiğinde tane boyutu incelmış, homojen dağılmış bir martenzit yapısı elde edilmiş ancak akma mukavemeti düşmüştür. Fren üzerinde yapılan testlerde ise kırılma çevrim sayısı sadece su verilmiş ve temperlenmiş numunelere göre düşmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Kriyojenik işlem, SAE 4032, Yorulma, Mekanik Özellikler

## SUMMARY

In this study, cryogenic treatment was applied at 12, 24, 36 hours to air disk brake opshaft which made by SAE 4032 steel. After cryogenic treatment; metallographic investigations, hardness tests, tensile tests were carried out. Metallographic samples are taken from yielding's start point which identified by ANSYS finite element analysis. Cryogenic treatment is applied which the cooling rate of 2 °C per minute to -196 °C and had stood at this temperature at specified times. It was reached at room temperature again with heating rate of 2 °C per minute. Optical microscope, Vickers hardness methods, tensile test were used to examine the changes in the microstructure and mechanical properties. Fatigue tests were carried out on Ege Fren 222H disc type brake in real conditions. Comparission of results are; hardness on the surface was improved but yield strength was decreased. Tensile strength was maksimum on 24 hours cryogenic treated part. Residual austenite decreased on 12, 24 hours cryogenic treatment but increased on 36 hours. Martensite phase was more uniform than after cryogenic treatment than just forged part.

**Keywords:** Cryogenic Treatment, SAE 4032, Fatigue, Mechanical Properties

## TEŞEKKÜR

Tez sürecinde değerli yönlendirmeleri ve bana duyduğu güven ile yönlendiren Doç.Dr.Hakan GAŞAN'a; Ege Fren ailesi olarak desteğini esirgemeyen, Teknik Genel Müdür Yardımcısı Sn.Taner KOÇ'a, Tasarım Şefi Sn.Barış YILMAZ'a, fren testleri konusunda yardımcı olan Test ve Validasyon Şefi Bora GÜNTAY'a ve ekip arkadaşım Özgün Cem YILMAZ'a teşekkür ederim.

Hayatımın her alanında bana sonsuz destek veren babam Mehmet Erdem GÜR'e teşekkürü borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	vI
<b>SUMMARY</b> .....	vII
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	vIII
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	IX
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	XI
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	XIII
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	XV
<b>1.GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....	1
<b>2.ÇELİK</b> .....	3
2.1 Karbon Miktarına Göre Çelik Türleri.....	4
2.2 Alaşım Elementlerine Göre Çelik Türleri .....	8
<b>3.ISIL İŞLEM</b> .....	10
3.1 Difüzyon Esaslı Isıl İşlemler .....	13
3.2 İçyapı Transformasyonu İle Yapılan Isıl İşlemler .....	13
3.3 Su Verme Ve Menevişleme Isıl İşlemi .....	14
3.4 Kriyojenik İşlem .....	17
3.4.1 Kriyojenik İşlemin Uygulama Metodları .....	20
3.4.1.1 <u>Endirekt Metod</u> .....	21
3.2.1.2 <u>Direkt Metod</u> .....	22
<b>4.SONLU ELEMENLAR ANALİZİ</b> .....	23
4.1 Tresca Akma Kriteri .....	23
4.2 Von Misses Akma Kriteri .....	25
4.3 Meshing .....	27
<b>5.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	29
<b>6.MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	35
6.1 SAE 4032 Çeliği .....	35
6.2 Hammadde .....	36
6.3 Ansys Bilgisayarlı Sonlu Elemanlar Analizi .....	37

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
6.3.1 Mühendislik Değerleri .....	37
6.4 Dövme .....	43
6.5 Isıl İşlemler .....	44
6.6 Kriyojenik İşlemler .....	45
6.7 Metalografik Kontrol .....	48
6.7.1 Kesme .....	48
6.7.2 Bakalite Alma .....	49
6.7.3 Zımparalama ve Parlatma .....	50
6.7.4 Dağlama .....	50
6.7.5 Mikroskop .....	50
6.8 Mekanik Testler .....	51
6.8.1 Çekme Testi .....	51
6.8.2 Sertlik Testi .....	55
6.8.3 Mikroyapı Görüntüleri .....	56
6.9 Disk Fren Çalışma Mekanizması ve Yorulma Ortamı .....	58
<b>9.BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>64</b>
<b>10. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>66</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>	<b>69</b>

**SİMGELEK VE KISALTMALAR DİZİNİ****Simgeler****Açıklama**

°C	Santigrat derece
K	Kelvin
W	Weber

**Kısaltmalar****Açıklama**

MPa	Megapaskal (basınç birimi)
HV	Vickers sertlik birimi
HRB	Rockwell B sertlik birimi
HRC	Rockwell C sertlik birimi
HB	Brinell sertlik birimi
maks.	Maksimum
SAE	Society of Automotive Engineers
FEA	Finite Element Analysis
ksi	Kilopound per square inch (basınç birimi)
m	Metre
cm	Santimetre
s	Saniye
dk	Dakika
gr	Gram

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)****Kısaltmalar****Açıklama**

HMK

Hacim Merkezli Kübik

YMK

Yüzey Merkezli Kübik

kN

Kilo Newton

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Demir Karbon Denge Diyagramı .....	5
2.2. Alaşım elementlerinin Ötektoid sıcaklığına ve ötektoid karbon sıcaklığına etkisi... ..	7
2.3. Çeliklerin sınıflandırılması .....	8
3.1. %2.14'e kadar Karbon içeren Fe-C denge Diyagramı .....	12
3.2. HMK Kafes Yapısı .....	15
3.3. YMK Kafes Yapısı .....	15
3.4. Tetragonal Kafes Yapısı .....	16
3.5. Masif (A) ve İğnesel (B) martenzit yapısı .....	16
3.6. T-8 ve 1045 çeliklerinin -196 °C „de bekletme süreleri ile % değişen aşınma direnci ve % sertlik farklılıkları .....	18
3.7. Endirekt Soğutma Metodu ile Kriyojenik İşlem Tankı .....	21
3.8. Direkt soğutma metodu ile Kriyojenik İşlem Tankı .....	22
4.1. Mohr Çemberi .....	24
4.2. Tresca ve Von Misses kriterlerine göre yörüngesel akma yüzeyleri .....	27
4.3. FEM analizi mesh atamasında kullanılan modeller .....	28
4.4. Matematiksel analizde mesh çalışması .....	28
5.1 Kriyojenik işlemler ve kriyojenik işlemsiz sürünme-gerilim eğrisi .....	29
5.2. 5N Yük Altında Aşınma Testleri .....	31
5.3. 10N Yük Altında Aşınma Testleri .....	32
5.4. Yüksek kromlu dökme demirde ısıtma ve havada soğutma- ısıtma ve kriyojenik işlem sonrasında sertlik değişimi .....	33
5.5. Yüksek kromlu dökme demirde ısıtma ve havada soğutma- ısıtma ve kriyojenik işlem sonrasında aşınma direnci değişim (2) .....	34
6.1. Parçanın yatakladığı kısım ve silindirik destek yüzeyi .....	39
6.2. Kuvvetin uygulandığı bölge .....	40
6.3. Parçanın sonlu elemanlara bölünmüş hali görüntüleri .....	41
6.4. Isıl İşlemsiz parçanın maksimum gerilme bölgeleri .....	42
6.5. Isıl işlemlerli parçanın maksimum gerilme bölgeleri .....	42
6.6. Isıl işlemlerli numune maksimum gerilme bölgeleri .....	43
6.7. Dövme işlemi sonrası mikroyapılar .....	44
6.8. Isıl işlem sonrası mikroyapıları .....	45
6.9. Cryo marka Kriyojenik işlem fırını .....	46
6.10. 12 saat kriyojenik işlem sıcaklık-zaman grafiği .....	47
6.11. 24 saat kriyojenik işlem sıcaklık-zaman grafiği .....	47
6.12. 36 saat kriyojenik işlem sıcaklık-zaman grafiği .....	48
6.13. Metalografik kesme cihazı .....	49
6.14. ATM Opal 410 Bakalite Alma Cihazı .....	49
6.15. ATM SAPHIR 530 Zımparalama ve Parlatma Cihazı .....	50

**ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
6.16. Nikon-Clemex marka optik metal mikroskopi .....	51
6.17. Shimadzu AG-IC marka çekme cihazı .....	52
6.18. Isıl İşlemsiz levyeden çıkarılan çekme çubuğu .....	53
6.19. Dövme sonrası su verme ve temperleme yapılmış numune .....	53
6.20. Su verme sonrası 12 saat kriyojenik işlem yapılmış numune.....	54
6.21. Su verme sonrası 24 saat kriyojenik işlem yapılmış numune.....	54
6.22. Su verme sonrası 36 saat kriyojenik işlem yapılmış numune.....	55
6.33. Dövme sonrası 200x ve 500x mikroyapı görüntüleri .....	56
6.34 Su verme ve temperleme sonrası mikroyapılar .....	56
6.35 Su verme ve temperleme sonrası 12 saat kriyojenik işlemler mikroyapılar .....	57
6.36 Su verme ve temperleme sonrası 24 saat kriyojenik işlemler mikroyapılar.....	57
6.37 Su verme ve temperleme sonrası 36 saat kriyojenik işlemler mikroyapılar .....	57
6.39. Disk Tipi Fren Görünümü .....	59

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b><u>Cizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1. Önemli metalurjik fazlar ve mikrobileşenleri (Heat Treating, ASM Metal Handbook Volume 4, 15) [6] .....	11
3.2. Kriyojenik işlemden kullanılan bileşiklerin buharlaşma sıcaklıkları .....	19
3.3. Derin ve Sığ kriyojenik işlemin farklı çelikler için etkisi .....	20
6.1. SAE 4032 çeliği kimyasal analizi.....	36
6.2. SAE 4032 çeliği mekanik, termal özellikleri.....	36
6.3. Kullanılan çeliğin kimyasal analizi .....	36
6.4. Hammadde sertlik, tane büyüklüğü ve karbonsuzlaşma derinliği .....	37
6.5. Hammadde mikrotemizlik raporu.....	37
6.6. Ansys'e girilen uzama ve gerilme değerleri .....	38
6.7. Parçaların akma ve çekme mukavemetleri .....	55
6.8. Parça üzerinde yapılan sertlik taraması sonuçları.....	56
6.9 Test levyelerinin kırılana kadar yaptığı çevrim sayısı .....	62

## 1.GİRİŞ VE AMAÇ

Bu çalışmada SAE 4032 çeliğinden dövme yoluyla imal edilmiş; fren disklerinde levye olarak kullanılan parçanın su verme sonrasında uygulanan kriyojenik işlem ile yorulma ömründeki değişim incelenmiştir.

Otomobil sektörü her geçen gün büyüyor; standartları da kendisi ile birlikte yükselen, dünya ekonomisinin çekici gücünü oluşturan sektörlerden biridir. 2016 yılında 4 trilyon dolar ile dünya ekonomisinin %5'ini oluşturan bu sektör; Türkiye ekonomisinin 29 milyarlık ihracat rakamıyla ana sanayisini oluşturmaktadır. (O.D.D., 2018)

Dünyada her ne kadar karbon emisyonlarını düşürmek, araçları hafifletmek, maliyetleri azaltmak için alternatif malzemeler üzerine çalışılsa da; demir ve alaşımları dünya sanayisindeki ana element olma konumunu açık ara ile korumaktadır. Bugün Ar-Ge faaliyetleri son sürat devam eden bu sektörde; araçlarda tasarımsal olarak parça kesit kalınlıklarının düşürülmesi için, demir-çelik ürünlerinin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla alternatif ısıtma işlemler, kaplamalar, alaşım elemanları ilavesi gibi yöntemler ile çalışılmaktadır.

Isıl işlem; çelik, alüminyum gibi metal malzemelerde istenilen spesifik özellikleri kazandırmak için ısı değişimi etkisi ile yapılan işlemlerdir. Sementasyon, nitrürasyon gibi malzemeye difüzyon esaslı yapılabildiği gibi, su verme, yaşlandırma gibi dönüşüm sıcaklıklarından yararlanılarak kendi analizi dahilinde faz dönüşümü ile yapılabilmektedir.

Bu işlemlerde hedef, malzemenin çalışma koşullarında maruz kalacağı etkilere göre yapılacak işlemi belirleyebilmekten geçer. Örneğin; Aşınmaya maruz kalan yüzeylerde nitrürasyon işlemi ile 650 Vickers sertlik yakalanabildiği gibi, yüzeyinde sertlik, ortasında tokluk istenilen dişli çarklarda, dişlere su verilerek martenzitik yapı elde edilebilmektedir.

Kriyojenik işlem ise; parçaların aşınma ömrünü arttırmak için kontrollü olarak parçaların oda sıcaklığının çok altında sıcaklıklara soğutulması, parçada homojen bir yapı



elde edilmesi, kalıntı gerilimlerin giderilmesi, tane boyutunun küçülmesi amacıyla yapılan bir soğuk işlemdir. Bu işlemde parça sıcaklıkları  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düşürülmekte olup; müzik aletlerinde, silah sanayinde ve otomobil sektöründe fren diskleri, krankşaftlar, motor blokları parçalarında kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında; disk tipi frenlerde körükten gelen kuvveti balatalara ileterek fren rotorunu sıkıştıran levyelerde uygulanan kriyojenik işlemin, parçanın yorulma ömrüne olan etkisi incelenmiştir. Levyeler; alt kısmından frene yataklanarak sabitlenip, üst kısmında bulunan cepten dinamik yüke maruz kaldığı için yorulmaya da maruz kalmaktadır. Fiziki yapısı gereği dövme yoluyla imal edilen bu parçalar, dövme sonrası su verme ve temperleme ısı işlemlerinin ardından işlenerek kullanıma hazır hale getirilirler. Bu çalışmada dövme ile üretilen parçalara su verme işlemin ardından 12, 24 ve 36 saatlik sürelerde kriyojenik işlemler uygulanarak iç yapısında ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

Çalışmada mikroyapı ve performans değerlendirmelerinde ANSYS sonlu elemanlar analizi ile parça kullanım koşullarında simüle edilmiş, simülasyon sonuçlarına göre parçanın kırılacağı bölgelerden mikroyapı incelenmiş, sertlik değerleri ölçülmüştür.

## 2. ÇELİK

Dünya genelinde rezervlerinin miktarı, üretiminde 1300 yılından günümüze kazanılan tecrübesi, yapısındaki element miktarı değiştirilerek ve termo-mekanik işlemlerle çok farklı özellikler kazandırılabilmesi ile çelik günümüzde endüstrinin temel hammaddesi olmaya devam etmektedir. Bugün otomobil sektörünün temel hammaddesi olan demir elementinin; hurda döngüsü, cevher üretimi ile her gün artarak üretimine devam edilmektedir.

Otomotiv sanayi 28.5 milyar dolar ile Türkiye'nin ana ekonomik güçlerinden biridir. Türkiye, ülkenin bu sektördeki pazar payını arttırmak için çeliği çok iyi tanımalıdır. Çünkü; çelik türlerine göre doğru alanda, doğru çelik seçimi ile karlılığı beraberinde getirebilir.

Türkiye ihracatının 11.5 milyar dolarlık hacmi, %7.3'lük toplam ihracatı ile çelik sanayisi Türkiye'nin çekici lokomotif sektörlerinden biridir. (Ç.İ.B., 2017)

Nispeten üretimi için düşük enerji ihtiyacı, bilinen tüm yöntemler ile şekillendirilebilmesi ile çelik günümüzde ve ilerleyen yıllarda sanayinin temel hammaddesi olmaya devam edecektir.

Yer kabuğunda %5.4 oranında bulunan Demir cevherinin atom numarası 26, ergime derecesi 1535°C ve yoğunluğu 7,874 gr/cm<sup>3</sup>'dür.

Çelik; Demir elementine %2'ye kadar Karbon elementi ilavesi ile elde edilen Demir-Karbon alaşımıdır. Demir-Karbon Denge Diyagramına göre incelendiğinde; %0.8 Karbon içeren ötektoid noktasına göre referans alınır; ötektoid, ötektoid altı ve ötektoid üstü çelikler olarak ikiye ayrılır.

Genellikle; 0,02-0,30 Karbon içerenlere düşük karbonlu çelik, 0,30-0,60 Karbon içerenlere orta karbonlu çelik, 0,60-2,14 Karbon içerenlere ise yüksek karbonlu çelik denir.

## 2.1 Karbon Miktarına Göre Çelik Türleri

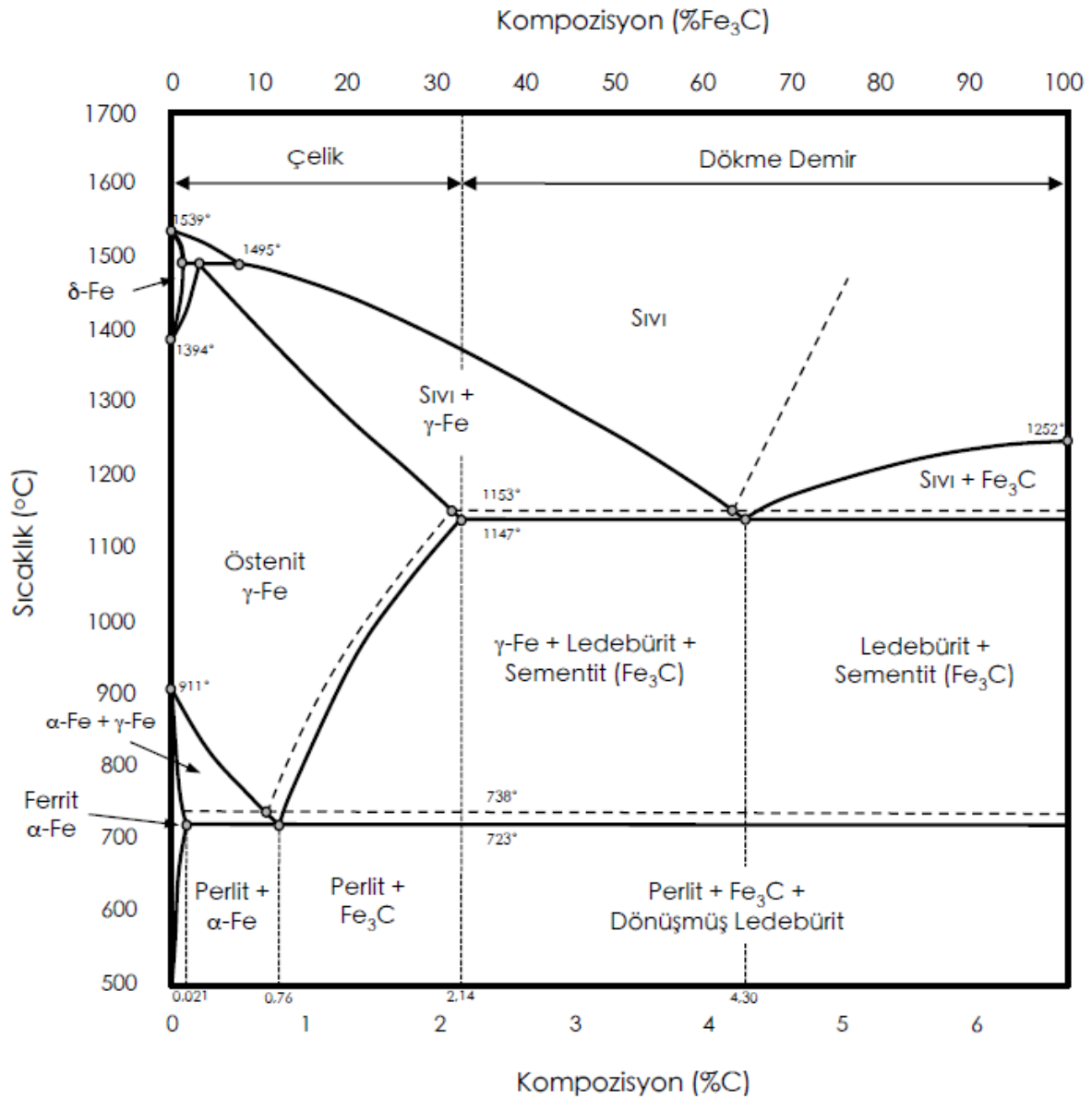
**\*Düşük karbonlu çelikler;** %0,30'a kadar karbon içeren; genellikle soğuk haddelenmiş ve tavllanmış olarak üretilen levha formunda imal edilen çeliklerdir. Şekillendirilebilme kabiliyetleri yüksektir. Otomobillerde gövde paneli, teneke levha, tel olarak kullanılırlar.

**\*Orta Karbonlu çelikler;** Karbon miktarı %0,30-0,60 arasında değişen; genellikle mangan içeriği ile su verme kabiliyeti artırılmış çeliklerdir. Dövme parçalarda sıkça tercih edilen bu çelikler; shaft, aks, krank mili gibi parçalarda kullanılır.

**\*Yüksek Karbonlu çelikler;** %0,60-%1,00 aralığında karbon içeren bu çelikler genellikle yay malzemesi, yüksek mukavemetli tel için kullanılırlar.

**\*Çok yüksek karbonlu çelikler;** %1,25-%2,14 arasında karbon içeren, alaşım elementi ilavesi ile üretilmiş çeliklerdir. Özel uygulamalar için tercih edilir ve genellikle ısıtılarak, karbür ve grafit yapısı özel olarak termomekanik işlemlerle biçimlendirilip, istenilen özelliklerde çelik üretilir.

Çeliklerde istenilen özelliği elde etmek amacıyla alaşım elementleri ilave edilir. Bu alaşım elementleri katılma oranına göre çeliğin; mukavemetini, ısıtma özelliklerini, ısıtma kabiliyetini, mekanik özelliklerini belirler. Bu alaşım elementleri ve etkileri aşağıda listelenmiştir. (Çetin A., Çeliklerde Alaşım Elementlerinin Etkileri, Dökümhane.org, 2017)



Şekil 2.1. Demir Karbon Denge Diyagramı

1. Karbon; Demir-Karbon denge diyagramında görülen fazların oluşumu için gerekli olan temel alaşım elementidir. Özellikle çeliklerin su verilebilmesinde en belirleyici elementtir. Perlit, sementit, beynit, martenzit oluşumunu sağlar, dolayısı ile mekanik özelliklere direkt etki eder.

2. Silisyum; Çeliklerin akışkanlığını belirli bir aralığa kadar olumlu yönde etkiler. Ayrıca; ferrit fazı içerisinde çözünebildiği için tokluğu, grafit oluşumunu desteklediği için de sertlik ve mukavemeti artırır.

3. Mangan; Çeliklerde su verme kabiliyetini pozitif olarak etkileyen bu element, karbon miktarı ile paralel olarak su verilme işlemini daha düşük solisyon sıcaklıklarında yapılabilmesini sağlar, bu işlem sırasında çatlak eğilimini azaltır. Ancak ferrit fazının sertleşmesine sebep olduğu için malzemedeki sünekliği azaltır.

4. Krom; Bu element kuvvetli bir karbür yapıcı olması özelliği ile çeliklerin sertliğini ve aşınma direncini artırır. Ayrıca Mangan ile beraber kullanıldığında çeliğe havada su vermeye olanak tanır. Ayrıca çeliğin yüksek sıcaklık direncinde artırma özelliğide bulunmaktadır. Dezavantaj olarak fazla ilavesi beraberinde kırılma getirebildiği için Nikel ve Molibden ile beraber kullanılır.

5. Nikel; Ferrit fazının sertliğini artırarak çeliklerde tokluk sağlayan bu element, düşük alaşımlı çeliklerde su verme derinliğini artırarak parçada sertlik derinliğini artırır. Paslanmaz çeliklerde Kromun kırılma etkisini azaltmak için ilave edilir.

6. Molibden; Çeliklerde kaynaklanabilme kabiliyeti ve yüksek sıcaklıkta servis koşullarını arttıran, meneviş gevrekliğini azaltan element olup, çekme mukavemeti ve sertliği artırıcı özelliğe sahiptir.

7. Fosfor; Çeliklerde sertliği arttırmasına rağmen karbon miktarı arttıkça, fosfor etkisi dahada baskınlaşmaya başlayıp sünekliği ve tokluğu azaltmaktadır.

8. Kükürt; Çeliklerde sertleşebilirliği ve kaynaklanabilirliği düşürür, tokluğa olumsuz yönde etki eder. Demir atomlarını bağlayarak FeS bileşiği oluşturur ve yüksek sıcaklıklarda kırılma sebebi olur.

9. Bakır; Sertliği arttırarak korozyon dayanımı sağlayan bakır, %0,5 üzeri ilavelerde sıcak şekillendirmede parçaların kırılmasına sebebiyet verir.

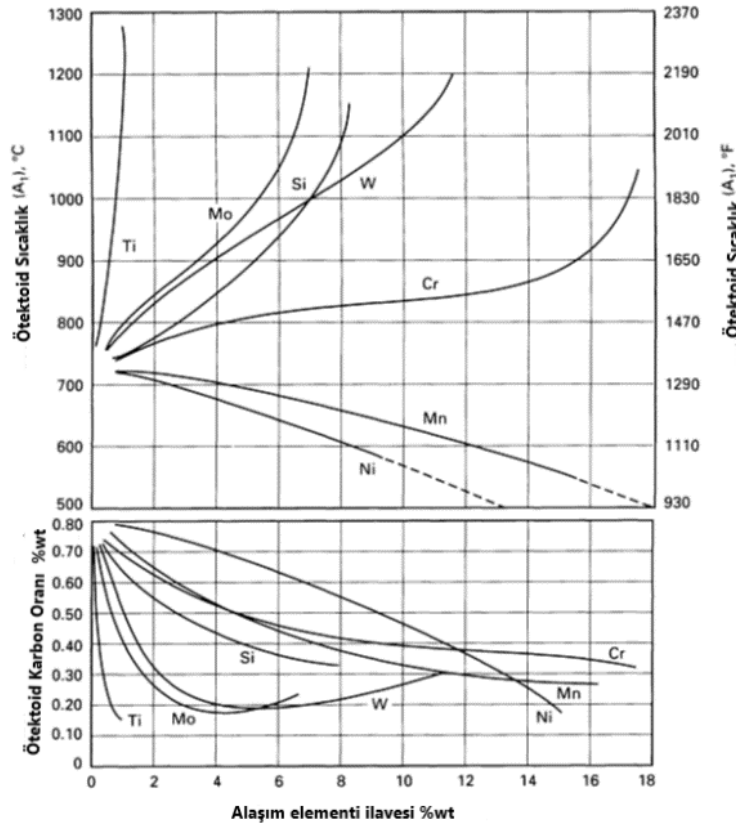
10. Titanyum; Tane inceltici ve kuvvetli karbür yapıcı etkisi ile çeliklerde mukavemeti artırır.

11. Niobiyum; Titanyum gibi tane inceltici ve karbür yapıcı element olup sertliği ve mukavemeti artırıcı özelliğe sahiptir. Karbür yaparken karbon atomlarını bağladığından su verme derinliğine negatif etkide bulunur.

12. Vanadyum; Isıl işlem sırasında tane büyümesini engeller, daha ince bir yapı elde edilmesini sağlar. Bu özelliği ile yüksek sıcaklık uygulamalarında parçaların daha stabil çalışmasını sağlar.

13. Tungsten; Genellikle kesici takım uçlarında kullanılan çeliklerde bulunan bu element; yapıdaki serbest karbürleri bağlayarak, ısıl işlem sırasında hem su verme ile hem de bu karbürlerden sertlik artışını sağlar. Ayrıca yüke maruz kaldığında mukavemetli kalan bu parçalar, yüksek sıcaklıkta stabil çalışmayı mümkün kılar.

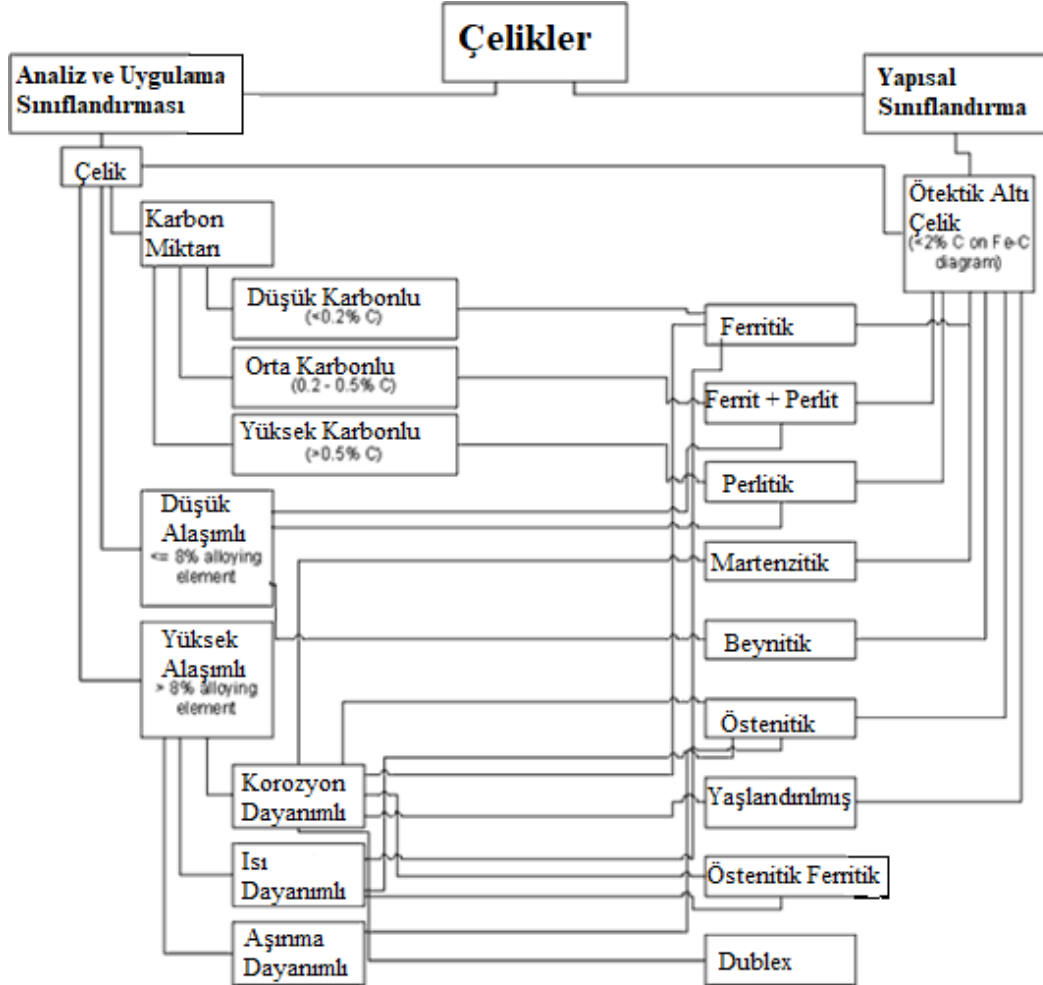
Bu elementlerin ötektoid sıcaklığa ( $A_1$ ) ve karbon içeriğine etkisi Şekil 2.2'de bulunan grafikte gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Alaşım elementlerinin Ötektoid sıcaklığına ve ötektoid karbon oranına etkisi (E.C. Bain and H.W. Paxton, Alloying Elements in Steel, American Society for Metals, 1961)

## 2.2 Alaşım Elementlerine Göre Çelik Türleri

Çelikler kullanım koşullarında kendisinden beklenen özelliklere göre alaşım elementi ilavesi ile servis koşullarında kullanım performansı yakalarlar. Eklenen bu alaşım elementlerine göre çelikler Şekil 2.3'deki gibi sıralanmıştır. (Classification of Carbon and Low carbon steels, Total Materia., 2011)



Şekil 2.3: Çeliklerin sınıflandırılması (ASM Handbook Volume 1, Classification of steels, 330)

\***Yüksek mukavemetli düşük alaşımli çelikler (HSLA)**; Bu çelikler mikroalaşımli çelikler olarakta geçer. Konvansiyonel karbon çeliklerine kıyasla daha yüksek mukavemet ve termal korozyon direnci kazanmak amacıyla tasarlanırlar. Bu çelikler rahat şekil verilebilirlik

amacıyla düşük karbonlu olup, su verme kabiliyetlerinin artması için Mangan içerirler. Isıl işlem performanslarını arttırmak için Titanyum, Vanadyum, Niobiyum gibi element ilavesi yapılır.

**\*Düşük alaşımli çelikler;** Bu çelikler düz karbon çeliğine alaşım elementi ilavesi ile daha yüksek mekanik özellik hedeflenen çeliklerdir. Bu çeliklerde asıl amaç ısıtım işlem yolu ile istenilen mekanik özellikleri kazanmaktır. Alaşım elementi ilavesi %2 ile %10'a kadar (Paslanmaz çelik için krom ilavesi) değişebilir.

**\*Yüksek alaşımli çelikler;** Bu çelikler takım çelikleri ve paslanmaz çelikler olarak ikiye ayrılır. Yapılarında yüksek oranda Nikel, Molibden, Mangan, Titanyum, Vanadyum ve/veya Krom içerirler. Bu çeliklerde kullanım amaçlarına göre alaşım elementi ilavesi ve ısıtım işlem söz konusudur. Kalıp çelikleri, soğuk ve sıcak iş takım çelikleri, şok dirençli çelikler, paslanmaz çelikler olarak kendi içinde ayrılırlar. (ASM Handbooks Volume 1; Speciality Steels and High Resistance Alloys, 1764-2249)



### 3.ISIL İŞLEM

Isıl İşlem, malzemelerde istenilen özellikleri elde etmek için uygulanan, malzemenin ısı etkisiyle içerisinde oluşan faz dönüşümlerinden yararlanılarak yapılan işlemlerdir.

Bu işlemler, kullanılacak malzemenin faz diyagramlarından yararlanılarak, uygun dönüşüm sıcaklıklarında ve sürelerinde işleme maruz bırakılarak elde edilen içyapıların sonucu olarak istenilen özelliğin elde edilmesi amacıdır.

Isıl işlemler kimi zaman malzemede komple bir faz dönüşümü olduğu gibi, kimi zaman içyapıdaki kalıntı gerilimleri gidermek ve parçanın servis ömrünü uzatmak amacıyla yapılabilir. Bu işlemler istenilen şartnameye bağlı olarak; difüzyon esaslı olabileceği gibi, direkt dönüşüm esaslıda yapılabilir.

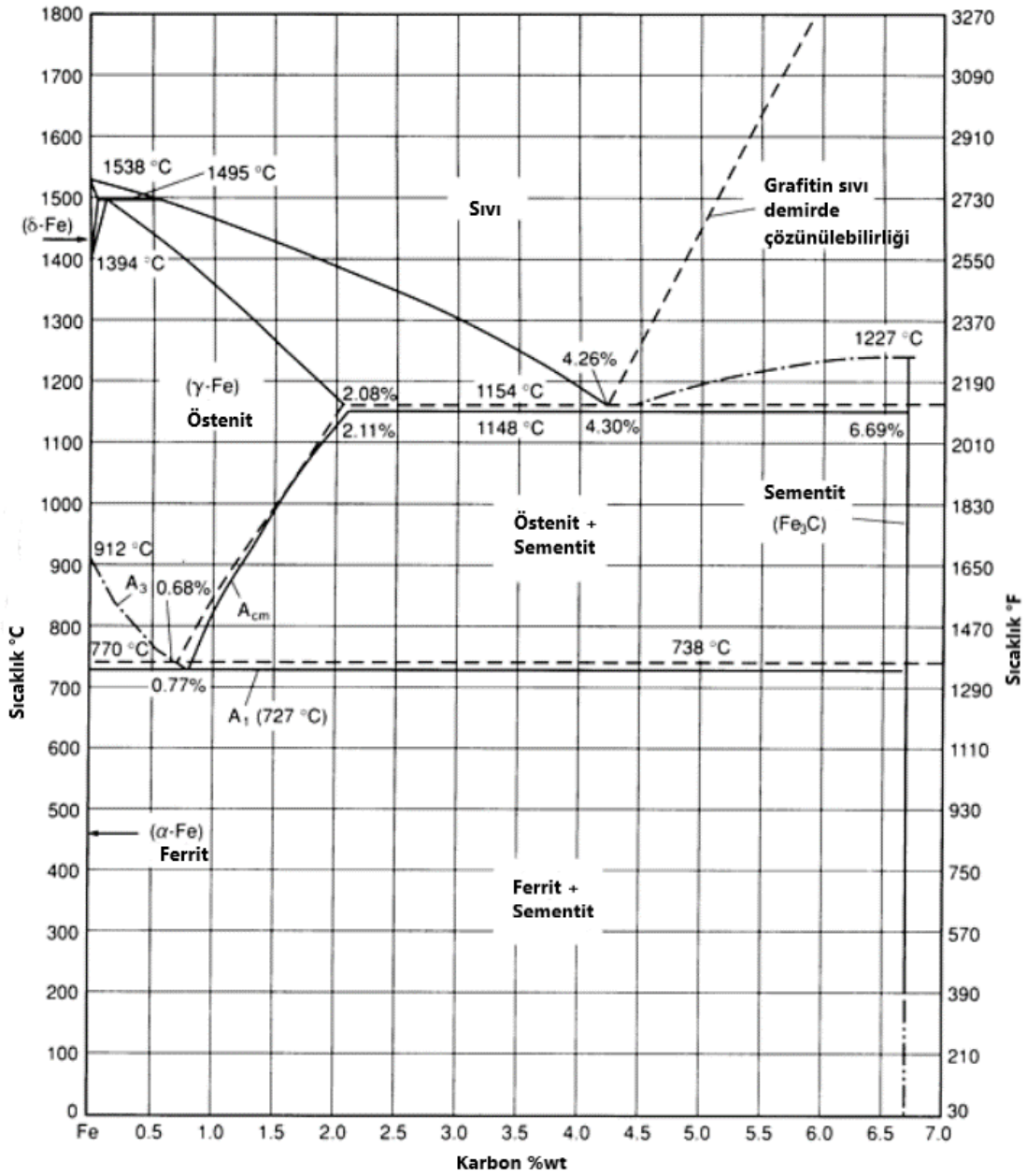
Örneğin; Nitrürasyon ile çelik yüzeyine Azot (N) difüze edilerek aşınmaya dayanıklı bir yüzey elde edilebileceği gibi, uygun karbon içeren çeliklere su verme ısıl işlemi yapılarak; östenit sahadan hızlı bir soğutma ile martenzitik sert ve aşınmaya dirençli bir yapı elde edilebilir. Bu uygulamalar parça şartnamesine, kullanım alanına, parçanın servis koşullarına ve uygulamanın ekonomikliğine bağlıdır.

Isıl işlemde dikkat edilmesi gereken noktalar; kullanılacak malzemenin kimyasal analizinin doğru yorumlanabilmesi, uygun faz diyagramı ve TTT diyagramına göre hareket edilerek doğru yapıların elde edilmesi, ısıtmanın tüm yapıda homojen sıcaklığa çıkacak şekilde; ani çarpılmaların olmaması için kademeli olarak yapılması ve soğutma ortamının doğru seçilerek parçada çatlak ve distorsiyon olmadan işlemin doğru sonlanması olmalıdır.

Demir karbon denge diyagramına baktığımızda gördüğümüz fazlar; alaşımın özelliğini belirler. Kafes yapısı, kimyasal kompozisyon, ortam sıcaklığı gibi etkenler sonucunda oluşan bu fazların özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Önemli metalurjik fazlar ve mikrobileşenleri (Heat Treating, ASM Metal Handbook Volume 4, 15)

Faz	Kristal Kafes Yapısı	Karakteristik
$\alpha$ ferrit	Hacim merkezli Kübik	Nispeten yumuşak, kararlı, düşük sıcaklık denge fazı
$\delta$ ferrit	Hacim merkezli Kübik	$\alpha$ -demir ile izomorf; yüksek sıcaklık fazı; kararlı denge fazı
$\gamma$ östenit	Yüzey merkezli Kübik	Nispeten yumuşak orta sıcaklık fazı; kararlı denge fazı
Sementit (Fe <sub>3</sub> C)	Kompleks ortorombik	Sert yarı kararlı faz
Grafit	Hegzagonal	Stabil denge fazı
Perlit		Ferrit ve sementit fazının lamel, mikroölçekli bileşimi
Martenzit	Hacim merkezli tetragonal (Karbonun ferrit fazı içinde aşırı doymuş çözeltilisidir.)	Sert faz; %0.6'ya kadar C içerenler iğnesel, %1'e kadar C içerenler ise tabaka martenzit yapısıdır.
Beynit	-	Yarı stabil ferrit ve sementit fazıdır. Yüksek sıcaklıklarda oluşan üstbeynit kuştüyümsü yapıda, düşük sıcaklıklarda oluşan alt beynit ise asiküler yapıda olur. Beynit oluum sıcaklığı düştükçe bu fazın sertliği artar.



Şekil 3.1. %2.14'e kadar Karbon içeren Fe-C denge Diyagramı (Metallography, Structures, and Phase Diagrams, Vol 8, Metals Handbook, 8th ed., American Society for Metals, 1973)

Çelik alaşımlarındaki ısıl işlemler genellikle Şekil 3.1'de bulunan diyagramda %2ye kadar Karbon içeren Fe-C denge diyagramına göre yapılır. Oda sıcaklığında HMK yapıda olan demir, östenit bölgeye çıkıldığında YMK yapıya dönüşür. Yapılan işlemler genellikle bu yapı değişimi esasına göre yapılır.

Bu işlemlerde parametreler;

- Basınç
- Sıcaklık
- İşlem süresi
- Soğutma hızı ve ortamı

Demir-Çelik ürünlerine uygulanan Isıl İşlemler kendi arasında 2'e ayrılır;

### 3.1 Difüzyon Esaslı Isıl İşlemler

Bu işlemler ana elemente kendisinden daha küçük boyutlu bir elementi difüze ederek yüzeyde daha mukavim bir yapı elde etme esasına dayanır. Parçanın içerisine difüze olan bu atomlar yardımıyla daha sert ve aşınmaya dayanıklı yüzey elde edileceği gibi, kaplamalarda olduğu gibi bir ölçü değişikliği olmadan parçaya uygulanabilir.

Çelik ürünlerine uygulanan bu işlemler;

- **Sementasyon(Karbürizasyon);** İş parçasına karbon emdirilerek yüzeyde daha yüksek kompozisyonda karbon oranı birikmesi sağlanır, ardından hızlı soğutularak bu yüzeyde sert ve aşınmaya dirençli bir yapı elde edilir.

- **Nitrürasyon:** Genellikle bu iş için özel üretilmiş çeliklere uygulanan bu işlem, yüzeye azot atomları difüzyonu yapılarak Nitrür tabakası oluşturulur. Aşınmaya dirençli bu tabakada 650 Hv'e kadar sertlik yakalanabilir.

- **Karbonitrürasyon ve Nitrokarbürizasyon:** Yüzeye Sementasyon+Nitrürasyon işleminin aynı anda yapılarak iki işlemin özelliklerini beraber yakalamak üzere yapılan işlemdir.

- **Borlama:** Yüzeye Bor elementi difüzyonu ile özel bir FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakası oluşturmak üzere yapılan ısıl işlemdir. Yüzeyde 1600-2400 Hv sertlikte bir tabaka oluşur.

### 3.2 İç yapı transformasyonu ile yapılan ısı işlemler

Bu işlemler malzemede kimyasal kompozisyonda bir değişiklik yapılmadan iç yapı transformasyonu ile malzemede sertlik ve özelliklerde iyileştirme elde edilen ısı işlemlerdir. (Heat Treatment of Ferrous Alloys, DIN 17022-1, 1994)

- **Su verme;** Parçada östenit bölgeden hızlı soğuma ile martenzit elde etmesi esasına dayanan işlemdir.

- **Normalizasyon;** Sertleştirme sıcaklığına ısıtılan parçanın havada soğumaya bırakılarak dövme gibi tane yapısını büyüten işlemlerden sonra tane boyutunu küçültmek, tane sınırlarındaki karbür ağını dağıtmak, mekanik özellikleri iyileştirmek için yapılan işlemdir.

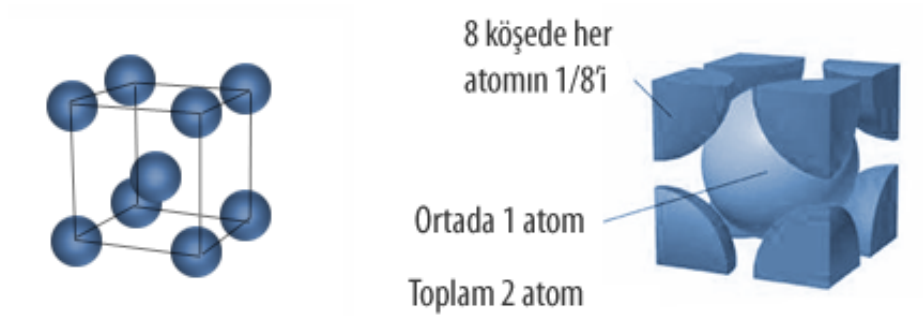
- **Menevişleme (Temperleme);** Parçada ısı işlem sonrasında kalan iç gerilmeleri ve kalıntıları elimine etmek için su vermeye göre nispeten düşük sıcaklıklarda yapılan ısı işlemdir.

Bahsedilen bu işlemler uygulamada farklı yöntemlerle yapılabilir. Sementasyon ve Nitrürasyon işlemleri gaz veya tuz banyolarında yapılabilir ancak uygulamada farklılıklar işletmelerin ekonomik ve fizibilite durumuna göre farklılık göstermektedir. Özellikle iç yapıda transformasyon ile yapılan ısı işlemlerde; induksiyon ile parça ısıtılıp ani soğutma ile martenzitik dönüşüm sağlanabilirken; yüksek Molibden içeren çeliklerde radyasyonla metal bağlar hareket ettirilerek havada soğuma ile daha sert bir yapı elde edilebilir. Bunlar tamamen işlemin uygulanacağı parçanın geometrisine, miktarına, enerji sarfiyatına ve işletme maliyetine göre belirlenecek parametreler olup; işleme göre değişiklik gösterebilir. (K-E. Thelning, Steel and its heat treatment, 217-305, 1967)

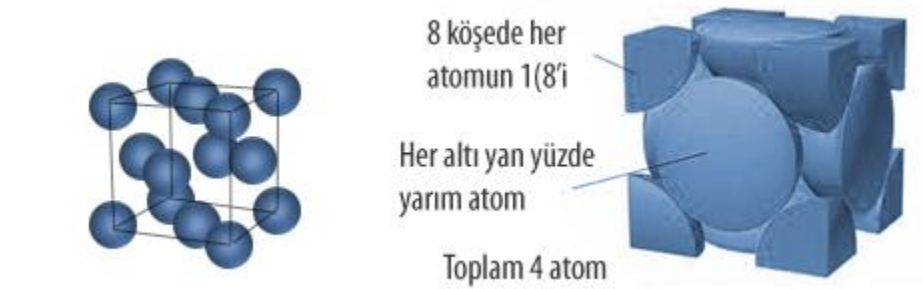
### 3.3 Su Verme Ve Menevişleme Isıl İşlemi

Su verme işlemi; çelik parçaların içerisindeki karbon miktarına göre  $A_3$  veya  $A_{cm}$  eğrisi üzerine ısıtılarak tüm yapının östenite dönüştürülerek difüzyonun sağlanması, ardından hızlı soğutma ile martenzitik yapı elde edilmesi esasına dayanır.

Oda sıcaklığında Hacim Merkezli Kübik (HMK) yapıda bulunan demir,  $A_3$  ve  $A_{cm}$  üzerinde östenitik bölgeye geldiğinde östenite dönüşür. Östenit yapı olarak Yüzey Merkezli Kübik (YMK) yapıya sahiptir. Hacim merkezli kübik yapı birim hücrenin %0,68'ini doldururken; Yüzey merkezli kübik yapıda bu %0,74'dür. Aşağıdaki resimlerde görüleceği üzere birim hücreden bu duruma bakıldığında difüzyon için atomlar YMK yapılarda daha geniş boşluk bulup difüze olabilmektedir.



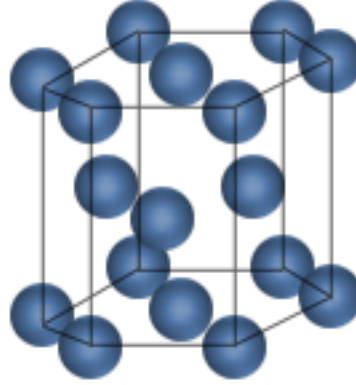
Şekil 3.2. HMK Kafes Yapısı



Şekil 3.3. YMK Kafes Yapısı

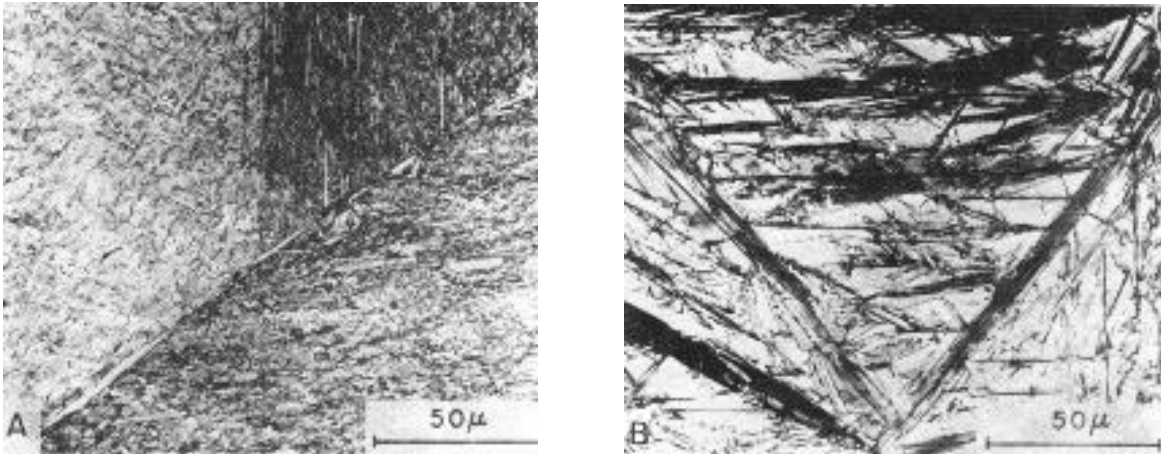
Östenit bölgeden hızlı soğutma ile oda sıcaklığına soğutulduğunda Karbon atomları aslında olması gereken HMK yapıya tekrardan difüze olacak fırsatı bulamazlar. Bu durumda yeni bir faz olan Hacim merkezli tetragonal kafes yapısında olan 'Martenzit' fazı olarak yapıda kalırlar. Bu faz diğer fazlara göre çok daha sert, aşınmaya dayanıklı bir faz olup, parça yüzeyinde istenilen sert tabakadır. Kimyasal kompozisyona bağlı olarak bu fazın

derinliği değiştiği gibi, yine yapıdaki alaşım elemntlerine bağlı olarak ve soğuma ortamının hızına bağlı olarak kalıntı östenit gibi ara fazların oluşmasına sebebiyet verebilir.



şekil 3.4. Tetragonal Kafes Yapısı

Bu işlem sonrasında elde edilecek martenzitin mikroyapısı aşağıdaki şekilde gürüleceği üzere beyaz ferrit fazı üzerinde sivri şekilde oluşmuş dentrit kolları halinde gürülecektir. Bu yapıda gürülen martenzit fazı; masif ve iğnesel martenzit olarak 2'ye ayrılır. Bu yapıların mikroyapısı şekil 3.5'de gsterilmiştir. (G.Krauss, A.R.Marder, The morphology of Martensite in Iron Alloys, Metallurgical and Materials Transactions, 1970)



şekil 3.5. Masif (A) ve İğnesel (B) martenzit yapısı

Bu işlem sonrasında ani ısı değişimi neticesinde parçada termal y¼klenmeler ve distorsiyonlar kalabilir. Bunları elimine etmek i¼in parçada östenit sıcaklığın altındaki

sıcaklıklarda menevişleme (temperleme) işlemi yapılır. Bu işlemde belirli bir sıcaklığın üzerinde bekletilen parçalarda dislokasyonların hareketi için uygun enerji verilmiş olup, atomlar arasındaki mesafenin artması parçada iç gerilmeler yok edilmiş olur.

### 3.4 Kriyojenik İşlem

Kriyojenik işlem antik Yunan Dilinde ‘donmak’ anlamına gelen ‘cryo’ ve işlem anlamına gelen ‘jenik’ kelimelerinin birleşiminden gelir. Proses olarak bu kelimelerden anlaşılacağı üzere parçaları oda sıcaklığının çok altındaki sıcaklıklara soğutmak işlemidir.

Termodinamiğin üçüncü kanununa göre sıcaklığın  $0^{\circ}\text{C}$  olduğu durumda entropide  $0$ 'dır. Derin Kriyojenik işlemde inilen sıcaklıklarda malzeme içerisindeki stress serbest bırakılarak daha stabil bir yapı elde edilir. Tane sınırları ve boyutu daha uniform bir yapıya büründürülür ve tanelere arası mesafe küçülür. (P.I.Patil., R.G.Tated, Comparison of Effects of Cryogenic Treatment on Different Types of Steels: A Review, 2012)

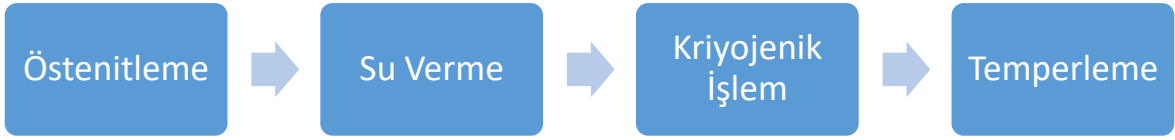
Kriyojenik işlem; malzemelerin sıfırın altında sıcaklıklara kademeli olarak kontrollü soğutularak, parçada daha homojen bir yapı elde edilerek; iç gerilmelerin elimine edilmesi, kalıntı fazların yok edilmesi ile daha sert ve aşınmaya dayanıklı yapı elde edilmesi esasına dayanmaktadır.

Kriyojenik işlem 3'e ayrılır;

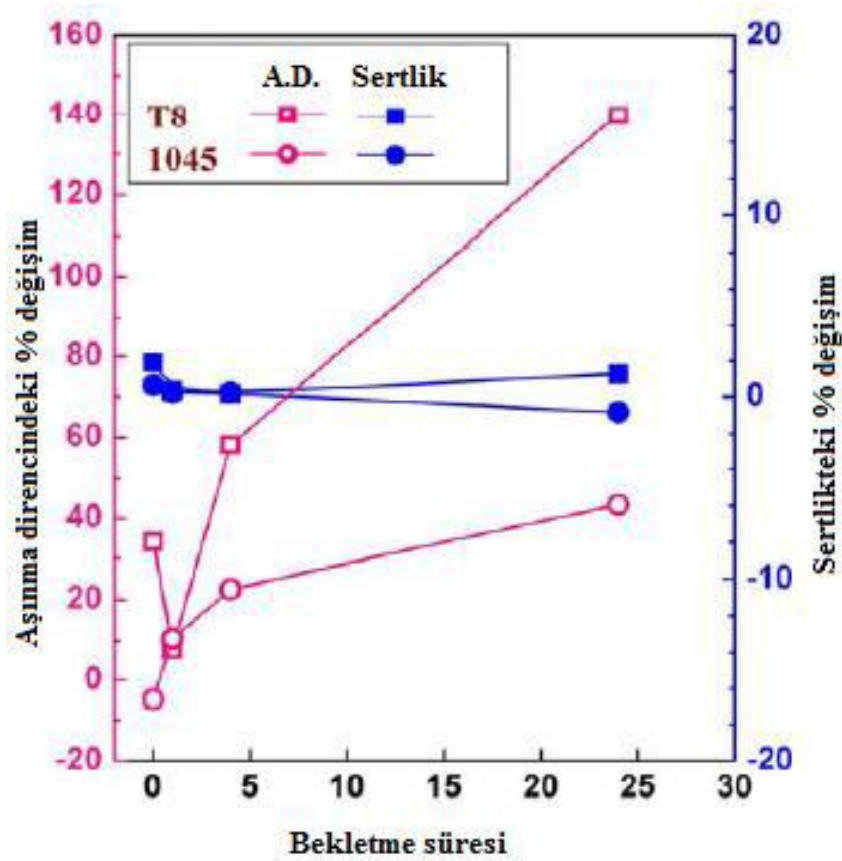
1. Soğuk İşlem:  $-80^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklara kadar yapılan bu işlemde içerideki soğuk atmosfer kuru buz ile yakalanır.
2. Sığ Kriyojenik İşlem:  $-80^{\circ}\text{C}$  ile  $-160^{\circ}\text{C}$  arasında yapılan işlemidir.
3. Derin Kriyojenik İşlem:  $-160^{\circ}\text{C}$  ile  $-176^{\circ}\text{C}$  arasında yapılan kriyojenik işlemidir.

Çeliklerde uygulanan kriyojenik işlem adımları aşağıdaki sırada yapılmaktadır. Bu işlemlerde amaç, su verme sonrasında yapıdaki kalıntı östeniti yok etmek, iç gerilmeleri yok ederek daha stabil bir yapı eldesidir.





Kriyojenik işlemde işlem sıcaklığı kadar; parçaların işlem süresinde önemli bir parametredir. İşlem süresi arttıkça parçalarda atomsal hareketlerin tamamlanabilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 3.6. T-8 ve 1045 çeliklerinin  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  „de bekletme süreleri ile % değişen aşınma direnci ve % sertlik farklılıkları (Barron, R., F., Mulhern, C., 1980, Cryogenic treatment of AISI-T8 and C1045 steels, Advances in Cryogenic Engineering Materials, 26, 171-179)

Kriyojenik işlemin avantajları;

- Tane yapısında incelmeyi sağlayarak, daha mukavim, aşınmaya dayanıklı bir yapı elde edilmesini sağlar.
- Karbür yapılarını parça içerisinde homojen dağılmasını sağlayarak; sertliğin parça içerisinde rijit dağılması sağlar.
- Kalıntı östenit fazının dönüşümünü sağlar, böylece daha fazla martenzitik yapı elde edilerek; ısıl işlem performansını artırır.

Kriyojenik işlemde kullanılacak gazların buharlaşma sıcaklıkları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Kriyojenik işlemde kullanılan bileşiklerin buharlaşma sıcaklıkları

	Metan	Oksijen	Nitrojen	Hidrojen	Helyum
Buharlaşma Sıcaklığı (°C)	-161,5	-183,0	-195,8	-252,9	-169,0

P.I Patil ve R.G Tated yaptıkları kriyojenik işlem çalışmasında farklı çelikler için uyguladıkları sığ ve derin kriyojenik işlemlerde parçalardaki aşınma oranının değişimini aşağıdaki bulunan Çizelge 3.3’de özetlemiştir. (P.I.Patil., R.G.Tated, Comparison of Effects of Cryogenic Treatment on Different Types of Steels: A Review, 20)

Çizelge 3.3. Derin ve Sığ kriyojenik işlemin farklı çelikler için etkisi (P.I.Patil., R.G.Tated, Comparison of Effects of Cryogenic Treatment on Different Types of Steels: A Review, 20)

US steel designation and corresponding German standards		Description	At -79 °C (-110 °F)	At -190 °C (-310 °F)
AISI(USA)	DIN(BRD)	Materials that showed improvement	In percent	In percent
D2	1.2379	High carbon/chromium steel	316	817
S7		Silicon tool steel	241	503
52100	1.3505	Bearing steel	195	420
O1	1.2510	Oil hardening cold work die steel	221	418
A10		Graphite tool steel	230	264
M1	1.3346	Molybdenum high speed steel	145	225
H13	1.2344	Hot work tool steel	164	209
M2	1.3341	Tungsten/molybdenum high speed steel	117	203
T1	1.3355	Tungsten high speed steel	141	176
CPM 10V		Alloy steel	94	131
P20	1.2330	Mold steel	123	130
440		Martensitic stainless steel	128	121
		<b>Materials without significant improvement</b>		
430		Ferritic stainless steel	116	119
303	1.4305	Austenitic stainless steel	105	110
8620	1.6523	Case hardening steel	112	104
C1020	1.0402	0.20 % carbon steel	97	98
AQS		Grey cast iron	96	97
T2		Tungsten high speed steel	72	92

### 3.4.1 Kriyojenik İşlemin Uygulama Metodları

Kriyojenik işlem; kontrollü yapılmadığında, düşük sıcaklıklarda çalışıldığından parçada çatlama, distorsiyon gibi hatalara sebep olabilmektedir.

Bundan dolayı işlemde inilecek sıcaklık; parçanın morfolojisine, alaşım elementlerine ve mikroyapına göre işlemin uygulanma biçimi değişmektedir.

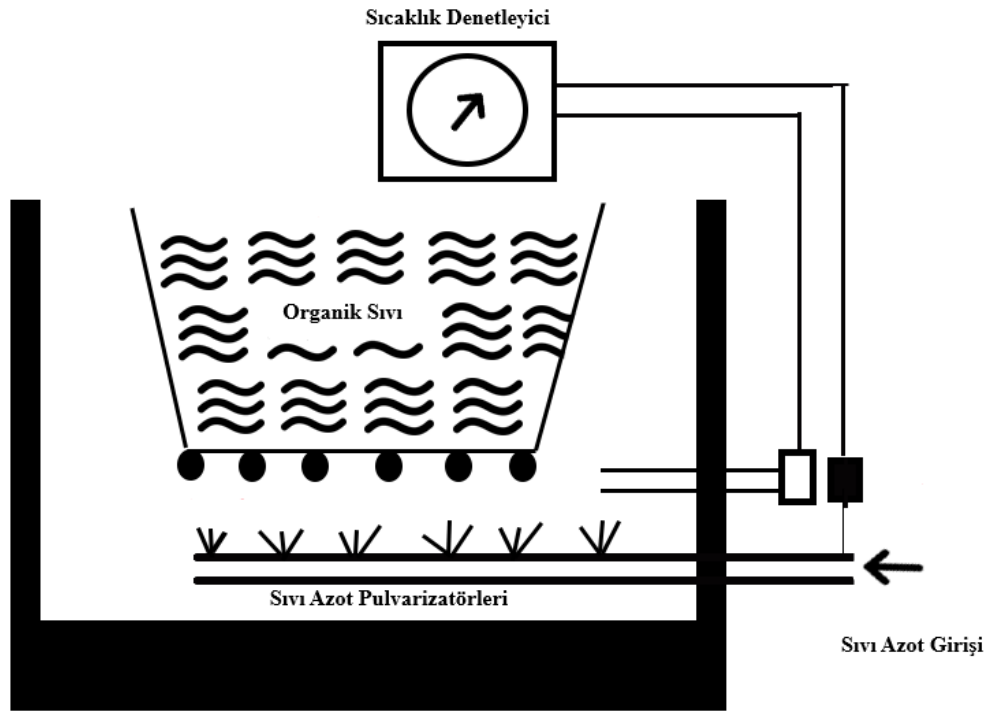
Bu etkilerden en önemlisi; azotun parçaya uygulanış biçimidir. Azotun parçaya uygulanışına göre;

1. Endirekt Azotun uygulanması
2. Direkt Azotun uygulanması olarak işlem 2'ye ayrılır.

### 3.4.1.1 Endirekt Metod

Bu yöntem daha çok sığ kriyojenik işlem için uygundur. Ortam sıcaklığı olarak düşünöldüğünde inilebilecek en düşük sıcaklık 110-120°C arasısıdır.

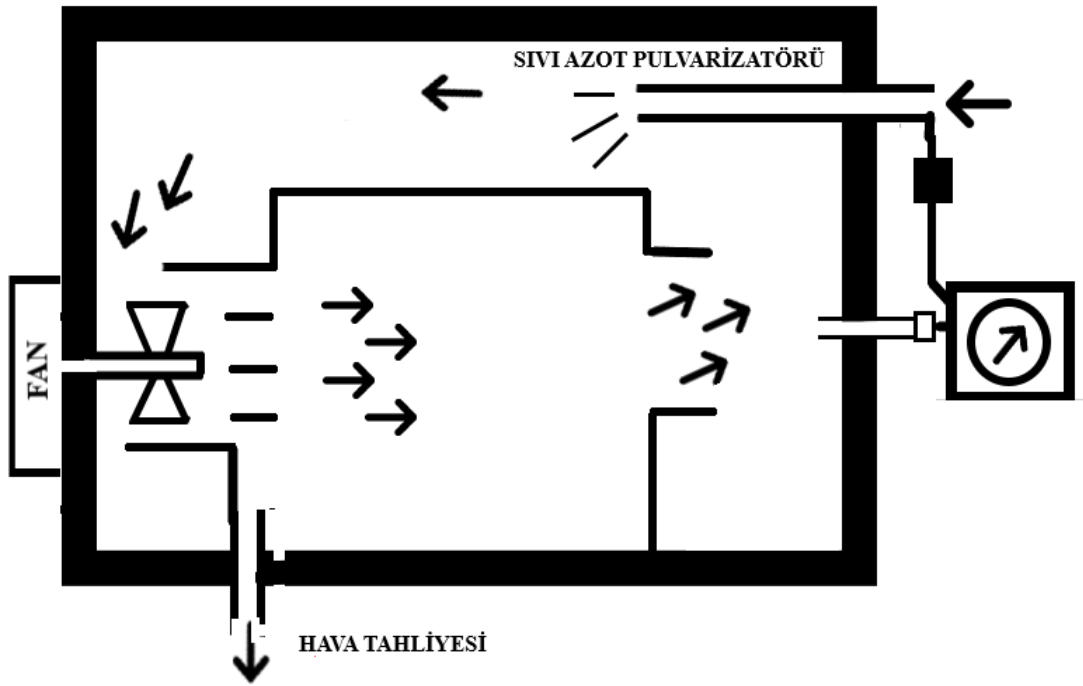
Parçalar Alkol banyosunun içine yatırılıp, Azot pulvarizatörlerinin dışarıdan alkol tankını soğutması prensibine dayanır. Ortam tamamen ısı kaybına karşı izole edilmiş olup işlem kontrollü olarak yapılabilir.



Şekil 3.7. Endirekt Soğutma Metodu ile Kriyojenik İşlem Tankı

### 3.4.1.2 Direkt Metod

Bu yöntemde sıvı Azot atomize edilerek; gaz halinde parça yüzeyine püskürtülür ve soğutulma sağlanır. Derin kriyojenik için uygun bir yöntem olup; azot debisi ayarlanılarak parça sıcaklığı, akış hızı değiştirilerek kontrollü sıcaklık değişimi sağlanabilir.



Şekil 3.8. Direkt soğutma metodu ile Kriyojenik İşlem Tankı

## 4.SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar analizi; parçaların bilgisayarda simüle edilerek, bilgisayar ortamında gerçekte kullanılacak kuvvetleri, termal koşulları, bağlantı noktalarını tanımlayarak gerçeğe yakın sonuçların alınmasını sağlar.

Bu analizler sayesinde parçanın maruz kalacağı yükler kullanım öncesi tespit edilmiş olup, hasar başlangıç noktaları, rijitliği bozan bölgeler, yüklerin homojen dağılmadığı alanlar, düşük mukavemetli bölgeler tespit edilebilir.

İlk olarak uçak gövdelerinin maruz kaldığı yükü tespit etmek için kullanılan bu yöntemler daha sonra farklı disiplinlerdeki mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Dökümde katılaşma analizi, katı parçalarda kırılma mekaniği, gerilme yoğunluğu, çatlak ilerlemesi analizi, makinelerde titreşim analizi, motorlarda termal analiz gibi birçok mühendislik uygulamasının simülasyonun da kullanılmaktadır.

Bu simülasyonlarda en küçük hacimli bölgelerden itibaren çözülecek, plastik şekil değişimi tespiti için matematiksel denklem akma kriteri denklemleridir.

### 4.1 Tresca Akma Kriteri

Tek eksenli bir yük uygulandığında gerilim ve gerinim arasında bir doğrusallık bulunmaktadır. Akma noktası; gerilim ve gerinimin doğrusallıktan çıkıp malzemede kalıcı şekil değişiminin oluşmaya başladığı gerilim değeridir.

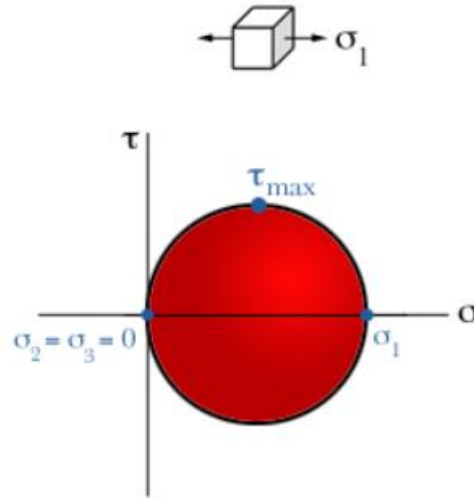
Eğer malzemede tek eksenli yüklenme değilse, çok eksenli bir yükleme var ise malzemede akma kriterlerini belirlemek için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Tresca'da, kalıcı şekil değişimini dislokasyon hareketine bağlamak için matematiksel bir yaklaşım getirmiştir.

Malzemede kalıcı şekil değişimi olması için, malzemenin düzenli kristal yapısındaki blokların düzlemsel boyutta birbiri üzerinde kayması prensibine dayanmaktadır. Yük

uygulandığında malzemede bu düzlemler üzerinde kayan atomlar, yük kalktığında eski noktalarına dönmediğinde malzemede kalıcı şekil değişimi söz konusu olmaktadır.

Normal gerilim uygulandığında atomları plastik boyutta hareket ettirilemez ancak bir kesme kuvveti uygulandığında bu durum söz konusu olmamaktadır.

Tresca; kesme gerilimi malzeme üzerine etki edildiğinde, oluşan şekil değişimini hesaplayabilmek için tek eksenli çekme diyagramını hesapları baz almıştır.



Şekil 4.1: Mohr Çemberi

Mohr Çemberine göre (Şekil 4.1); en yüksek kesme gerilimi formülü Denklem 4.1'de gösterilmiştir.

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \quad (4.1)$$

Yukarıdaki Mohr çemberine bakıldığı zaman; Tresca'ya göre akmanın başlayabilmesi için, uygulanan gerilimin maksimum kesme gerilmesini aşması gerekmektedir.

## 4.2 Von Misses Akma Kriteri

Von Misses akma kriterini açıklarken, Tresca'ya göre daha rafine, çok yönlü yüklerin farklı eksenlerdeki etkisi ve kayma gerilimlerini hesaplayarak malzemedeki plastik şekil değişimini açıklamaya çalışmıştır.

Von Misses; gerilim tensörünü hidrostatik ve Sapma gerilmeleri olarak iki kısımda incelemiştir. Hidrostatik gerilmeler malzemede sadece elastik şekil değişimi meydana getirirken, Sapma gerilmesi; kesme gerilimi değerlerini de içeren plastik şekil değişimi için gerekli gerilim tensörünü temsil eder.

Birçok kaynakta  $J_2$  tipi gerilme olarak da geçen bu sapma gerilmeleri Von Misses'in sabit katsayı ile gösterdiği toplam gerilimdir. (A.F.Liu, Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction; Equivalent Stress and Equivalent Strain.,30-58 2005)

Von Misses'e göre malzeme eğer plastik şekil değişimi yapacaksa belirli bir  $k^2$  değerini aşmalıdır.

$$F(J_2) = J_2 - k^2 \quad (4.2)$$

“ $J_1$ ” gerilim tensörünü parçaya 3 farklı eksen olarak uygulanan gerilim ve hidrostatik ortalama gerilim olarak alırsak;

$$J_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} - 3\sigma_m \quad (4.3)$$

“ $J_2$ ” gerilim tensörünü de uygulanan kuvvetlerin matrisi ve kayma gerilimlerinin toplam etkisi olarak alırsak;

$$J_2 = \frac{1}{6} [ (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 ] + \tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2 \quad (4.4)$$



$$J_2 = \frac{1}{6} [ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 ] + \tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2$$

Örneğin; tek eksenli bir gerilme testinde sadece tek yönde bir gerilme olacağı için y ve z eksenlerindeki gerilme sıfır olacaktır. Bu durumu yukarıdaki denklemde yerine koyarsak (Denklem 4.4);

$$\sigma_2 \text{ ve } \sigma_3 = 0$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [ (\sigma_1 - 0)^2 + (0 - 0)^2 + (\sigma_1 - 0)^2 ] + 0^2 + 0^2 + 0^2 = k^2$$

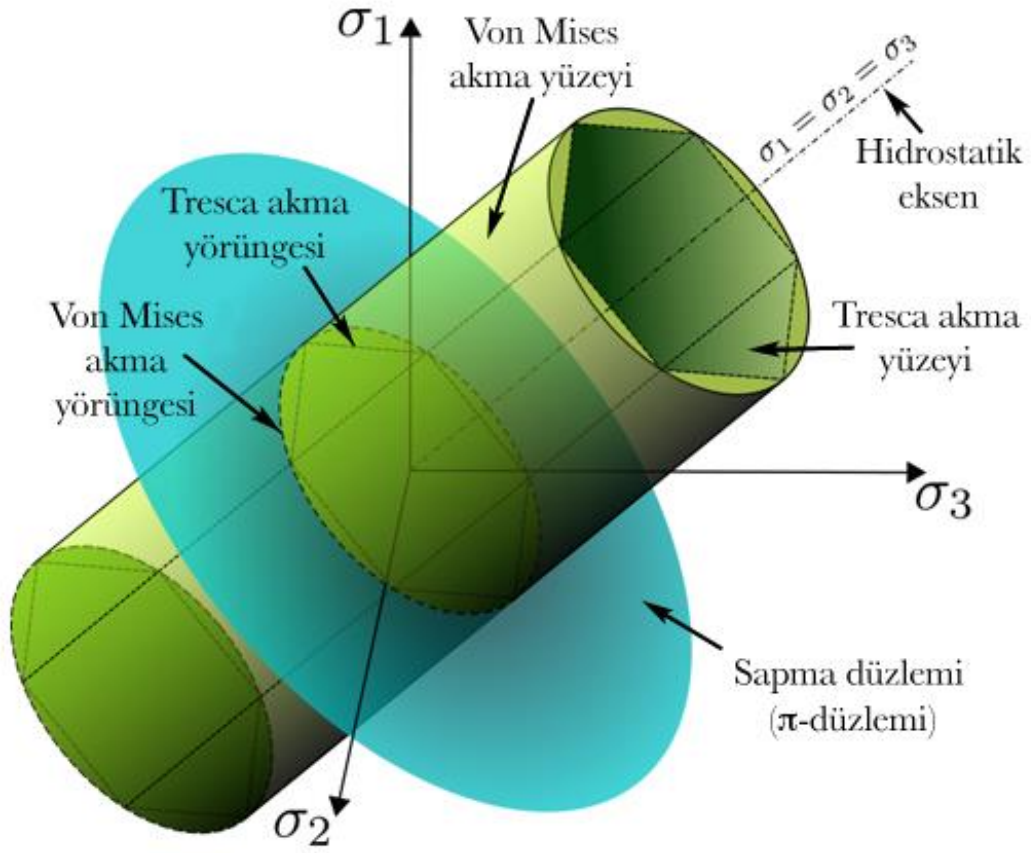
$$J_2 = \frac{1}{6} [ \sigma_1^2 + \sigma_1^2 ] = k^2$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [ 2\sigma_1^2 ] = k^2$$

$$\sigma_1^2 = 3k^2$$

$$k = \frac{\sigma_1}{\sqrt{3}}$$

Yukarıda bulunan eşitliğe göre bir malzeme üzerine uygulanan yüklere göre parçaya etki eden kuvvetlerin yorumlanması Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



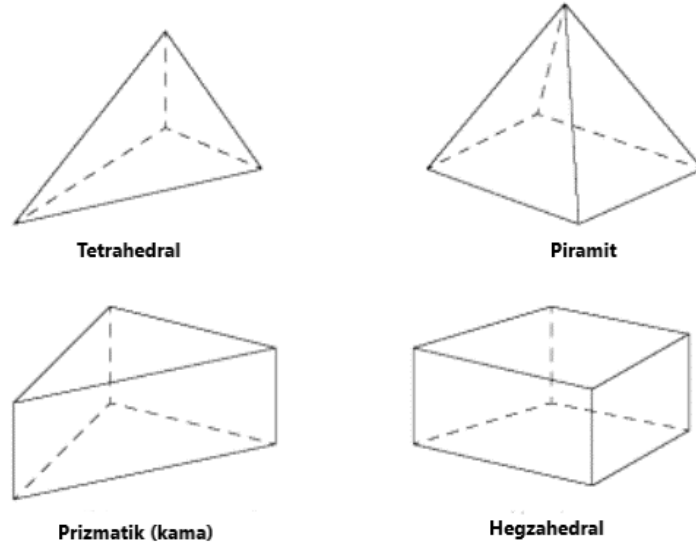
Şekil 4.2. Tresca ve Von Mises kriterlerine göre yörüngesel akma yüzeyleri

### 4.3 Meshing

Adından anlaşılacağı gibi sonlu elemanlar analizi; zor bir matematiksel modeli çok sayıda küçük, birbirine bağlı bölgeye bölerek işlemleri yapmaktır. Mesh adı verilen bu küçük bölgelerde matematiksel denklemler çözülerek, gerçek sonuca en yakın sonuçlar elde edilmektedir.

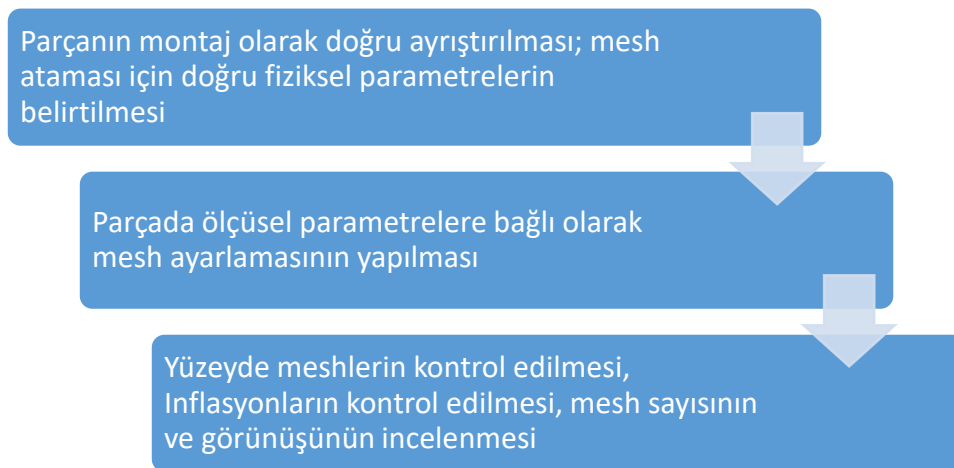
Denklemlerin çözümü için oluşturulan bu küçük noktaların boyutu küçülüp sayısı arttıkça simülasyonun doğruluğu artmaktadır. Bu yüzden parçaya mesh atılırken radyal geçişlerde, parçadaki kesit kalınlıkları değişiminde, parça üzerindeki delikler gibi parça rijitliğini bozacak noktalarda prizmatik, tetrahedral, hegzahedral, piramitsel 3 boyutlu

şekiller kullanılarak modelleme yapılır. Bu mesh çeşitlerinin şekilleri Şekil 4.3'de resimlenerek gösterilmiştir.



Şekil 4.3: FEM analizi mesh atamasında kullanılan modeller (Introduction to Ansys meshing, Ansys User Guide volume 15, 2014, syf 14)

Parçalar matematiksel olarak parçalara ayrılacağı zaman Şekil 4.4 gibi bir metodoloji izlenebilir;

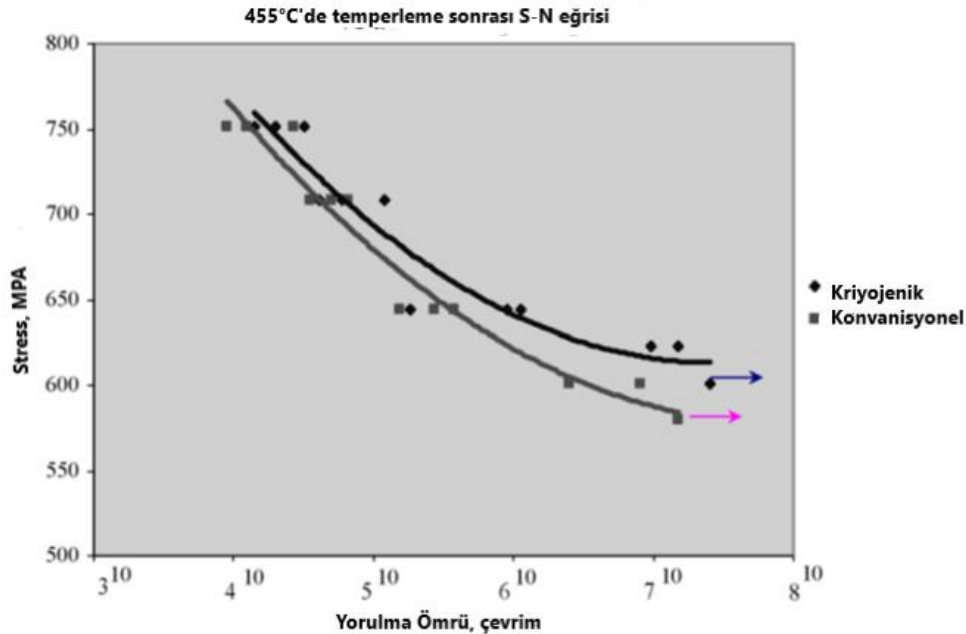


Şekil 4.4: Matematiksel analizde mesh çalışması (Introduction to Ansys meshing, Ansys User Guide volume 15, 2014, syf 6)

## 5.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

M.Koneshlou, K.M.Ashl ve F. Homamizadeh; AISI H13 Sıcak iş takım çeliklerine yaptıkları soğuk işlem ve derin kriyojenik işlemde aşınma ömrünün arttığını tespit etmiştir. Ø20mm ölçüsündeki çubuk profilleri 1040°C’de östenitlemiş; havada soğumaya bırakmışlardır. Ardından numuneleri 0,5°C/min<sup>-1</sup> hızla -72°C ve -196°C’ye soğutarak kriyojenik işlem yapmışlardır. Bu çalışmalarını sonrasında -196°C’de kriyojenik işlem yapıp, üzerine 2 saat temperledikleri numunelerin en yüksek aşınma direnci verdiğini; ayrıca kalıntı östenit fazının derin kriyojenik işlemin azalttığını tespit etmişlerdir. (M.Koneshlou, K.M.Ashl ve F. Homamizadeh, Effect Of Cryogenic Treatment On Microstructure, Mechanical And Wear Behaviors Of AISI H13 Hot Work Tool Steel, 2010)

S. Zhirafar, A. Rezaeian, M. Pugha; SAE 4340 yüksek alaşımlı çeliğe yaptıkları derin kriyojenik işlem ile aşınma ve yorulma ömrünün arttığını tespit etmişlerdir. -196°C’de yaptıkları kriyojenik işlemde martenzit oranının arttığını, kalıntı östenit oranının düştüğünü gözlemlemişlerdir. 455°C’de yaptıkları yorulma deneyi sonuçları Şekli 5.1’de grafikte gösterilmiştir. (S. Zhirafar, A. Rezaeian, M. Pugha, Effect Of Cryogenic Treatment On The Mechanical Properties Of 4340 Steel, 2006)



Şekil 5.1. Kriyojenik işlemlili ve Kriyojenik İşlemsiz Sürünme - gerilim eğrisi

A.Molinari, M.Pelizzari, S.Gianella, G.Straffellini, K.H.Stiasni; AISI M2 yüksek hız çeliği ve AISI H13 sıcak iş çeliğine sıcak iş çeliğine temperleme , kriyojenik işlem ve menevişleme ısıl işlemi yapmış; Yüksek hız çeliğinde temperleme ve kriyojenik işlem sonrasında  $2,1 \text{ g/m} \times 10^{-5}$  aşınma hızı, Sıcak iş çeliğinde ise  $1,5 \text{ g/m} \times 10^{-5}$  aşınma hızı bulunmuştur. Çalışmalarında AISI M2 çeliğinde sertlik ve aşınma dayanımının arttığı, AISI H13 sıcak iş çeliğinde ise sertlik artmamasına rağmen aşınma direncinin arttığını tespit etmişlerdir. Sıcak iş çeliğinde oluşan bu durumu Alüminyum partiküllerinin sıcak şekillendirme esnasında çökmesine bağlamışlardır. (A.Molinari, M.Pelizzari, S.Gianella, G.Straffellini, K.H.Stiasni, Effect Of Deep Cryogenic Treatment On The Mechanical Properties Of Tool Steel, 2001)

M. Pérez, C. Rodríguez, F. J. Belzunce; Dövme kalıplarında kullanılan AISI H13 kalıp çeliklerine uyguladıkları kriyojenik işlem ile; karbür yapılarındaki değişim, kalıntı östenit fazları, mekanik özelliklerdeki değişimi irdelemişlerdir. Gazda su verme sonrası temperleme ve yada su verme sonrası kriyojenik işlem ve temperleme yaptıkları numunelerde; sertlikde değişim gözlenmemiş, Kırılma tokluğunda  $22,6 \text{ MPam}^{1/2}$  artış gözlenmiştir. %41 kırılma tokluğundaki artış ile kriyojenik işlemin faydası irdelenmiştir. (M. Pérez, C. Rodríguez, F. J. Belzunce, The Use Of Cryogenic Thermal Treatments To Increase The Fracture Toughness Of A Hot Work Tool Steel Used To Make Forging Dies, 2014)

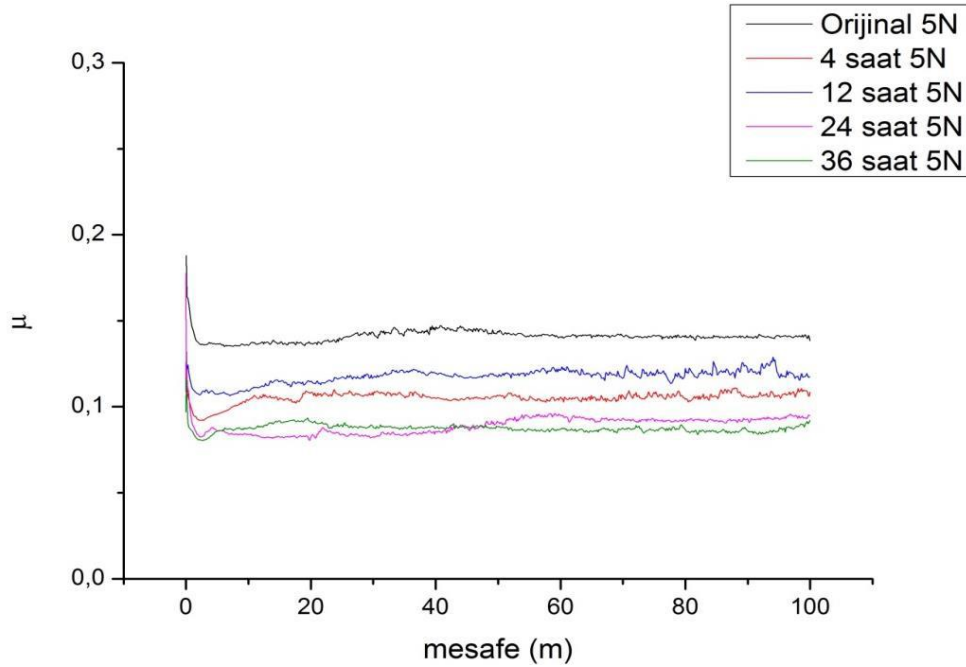
M.Uzun; soğuk iş takım çeliğine 24 saat kriyojenik işlem uyguladığında sertliğin 58 HRC'den 62,5 HRC'ye yükseldiğini tespit etmiştir. 12 saat kriyojenik işlem uyguladığında tanelerin incelendiği ve tane boyutunun küçüldüğünü; 24 saat uygulandığında ise tanelerin büyüdüğünü gözlemlemiştir. Su verme ardından yapılan kriyojenik işlemin kalıntı östenit miktarını azalttığını tespit etmiştir. (M.Uzun, Kriyojenik İşlem Görmüş Soğuk İş Takım Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi, 2014)

G.Höke; 4140 çeliğine yaptığı kriyojenik işlemde; geleneksel su verme ve menevişleme işleminden çok daha yüksek kopma ve tokluk elde etmiştir. Su verme-kriyojenik-menevişleme işlemi sonucunda 143 Joule bulduğu Tokluk değeri, sadece su verme işleminde 108 Joule olarak kalmıştır. Martenzit oranlarını karşılaştırdığında 59,78 HRC sertliği kriyojenik işlemde elde etmiş, sadece su verilmiş numunede ise sertlik 46,68

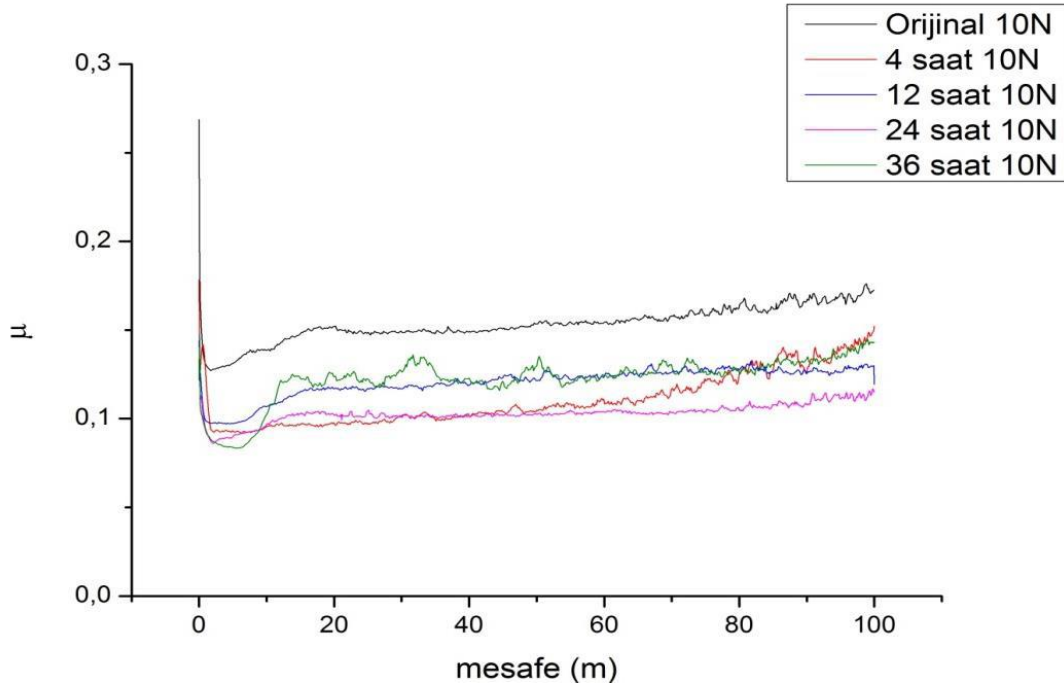
HRC'de kalmıştır. (G. Höke, İ.Şahin, Ç.Henifi, T. Fındık, Kriyojenik işlemin SAE 4140 çeliğinin mekanik özellikler üzerine etkisi, Selçuk Teknik Dergisi, 2014, 25-37)

C.M.Akın; Vermiküler Grafitli Dökme Demire 4, 12, 24, 36 saat süreler ile kriyojenik işlem uygulanmış; metalografik olarak parçaları incelediğinde herhangi bir faz farkına rastlamamış, elektron mikroskobunda parçaları incelediğinde ise perlit fazı içerisindeki lamellerin mesafesinin kısaldığını tespit etmiştir. En kısa lameller arası mesafeyi 24 saatlik kriyojenik işlemden gözlemlemiştir. Ayrıca vermiküler grafitli dökme demirlerde kriyojenik işlemin kayda değer bir sertlik artışını getirmediğini deneysel olarak görmüştür. (C.M.Akın, Kriyojenik İşlemin Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Aşınma Davranışına Etkisi, 2015)

C.M.Akın'ın çalışmasında en önemli bulgular aşınma dayanımı sonuçlarında ortaya çıkmıştır. Özellikle 24 saatlik kriyojenik işlemin aşınma direncinde önemli bir artış ortaya çıkardığı görülmektedir. (Şekil 5.2 , Şekil 5.3)



Şekil 5.2. 5N Yük Altında Aşınma Testleri

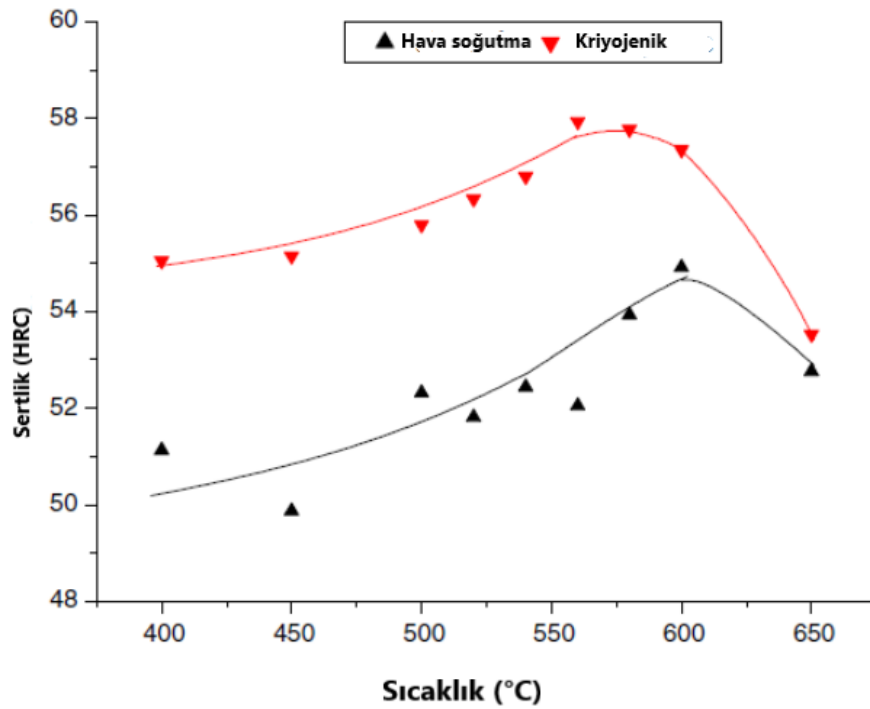


Şekil 5.3. 10N Yük Altında Aşınma Testleri

F.Kara; AISI 52100 Rulman çeliğine yaptığı derin kriyojenik işlemde mekanik özelliklerin arttığını, en iyi sonuçları 36 saat yaptığı derin kriyojenik işlemde aldığını belirtmiştir. Çekme deneyi sonrasında kırık yüzeyleri karşılaştırdığında kriyojenik işlemsiz numunelerin düşük akma ve daha fazla plastik deformasyona maruz kaldığı için daha bozuk yüzeye sahip olduğunu yorumlamıştır. (Kara F., AISI 52100 çeliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması, 2014)

B.Köylüoğlu; Sürtünme kaynağı ile birleştirdiği SAE 8620 çubuklarına yaptığı sementasyon + su verme + menevişleme; sementasyon + su verme + kriyojenik işlem + menevişleme; kriyojenik işlem + menevişleme proseslerini kıyaslamıştır. İşlemler sonucunda optik mikroskop ile baktığı mikroyapılarda bir değişiklik gözlememiş, ancak sertliklerde sementasyon + su verme + menevişleme yaptığı numunelerde 377 Hv görünürken, sementasyon + su verme + kriyojenik işlem + menevişleme yapılan numunelerde 637 Hv gözlemlemiştir. Bu sertlik farkını kalıntı östenitin martenzite dönüşümüne ve daha fazla Fe<sub>3</sub>C oluşumuna bağlamıştır. (B.Köylüoğlu, Sürtünme Kaynağı Yapılmış SAE 8620 Çeliğinde Kriyojeni ve Sementasyon İşleminin Malzeme Üzerindeki Etkileri, 2014)

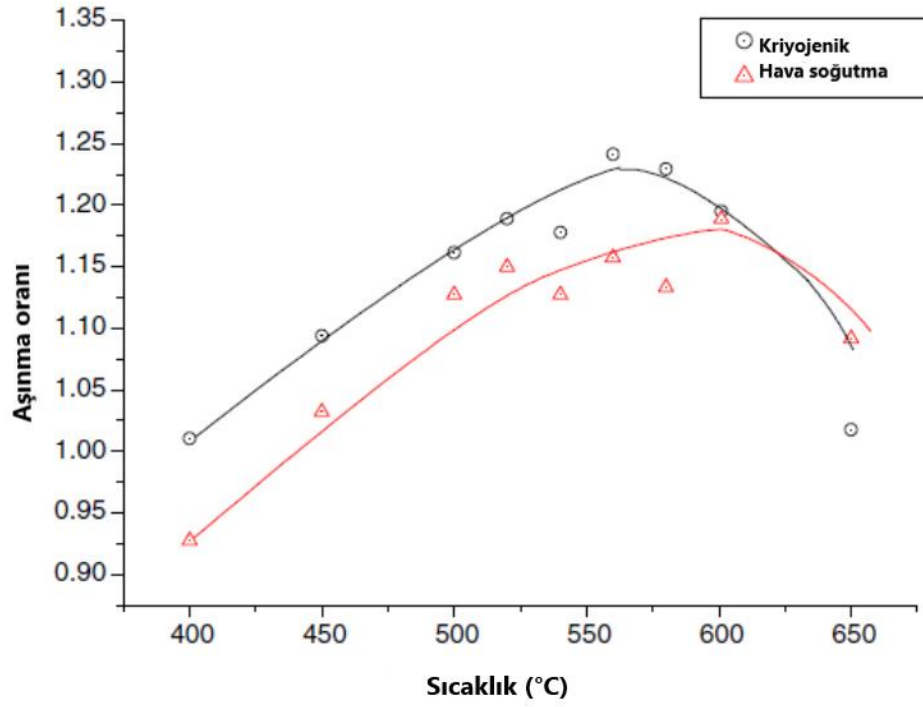
3Cr13Mo1V1.5 yüksek kromlu dökme demirlerde yapılan kriyojenik işlem sonrasında; %20 kalıntı östenit kaldığında aşınma dayanımının maksimum seviyede olduğunu tespit etmiştir. 600°C'ye kadar 1 saat numuneleri tutarak yaptığı, ikincil karbürleri çözmeden, ısıl işlemde sonra havada soğutma ve havada soğutup kriyojenik işlem yaptığındaki sertlik artarken, bu sıcaklıktan sonra yapılan ısıtma işleminde ikincil karbürler çözüldüğü için Şekil 5.4'de bulunan grafikte görüleceği üzere sertlikte düşüş gözlenmiştir. (H.Liu, J.Wang, B.Shen, H.Yang, S.Gao, S.Huang Effects of deep cryogenic treatment on property of high chromium cast iron, 2005)



Şekil 5.4. Yüksek kromlu dökme demirde ısıtma ve havada soğutma- ısıtma ve kriyojenik işlem sonrasında sertlik değişimi



Aynı şekilde tüm yapı bu sıcaklıkta çözünün tane boyu arttığı için, sertlikte düşüşünde etkisi ile aşınma dayanımında belirli bir sıcaklıktan sonra düşmektedir. 400°C-600°C aralığında; hızlı soğuma ile oluşan ikincil karbürler; alaşım elementlerinin  $M_s$  sıcaklığını yukarı çekmesi ile yapıda çökelerek distorsiyon sertleşmesine sebep olurlar. (Şekil 5.5)



Şekil 5.5. Yüksek kromlu dökme demirde ısıtma ve havada soğutma- ısıtma ve kriyojenik işlem sonrasında aşınma direnci değişim

## 6.MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan çalışmalarda ana hedef kriyojenik işlemin; levye parçasının fren sistemi üzerinde kullanım performansına etkisini incelemek etmek olup, SAE 4032 çeliğinde bu işlemin nasıl sonuçlar vereceğini görmek; mikroyapıda faz değişiklikleri ve kriyojenik işlem süresinin parça kullanım ömrüne nasıl etki edeceğini gözlemlemektir.

Bu kapsamda Disk tipi frenlerde sürekli yüke maruz kalan Levye parçaları ham dövme işleminden çıkmış hali, su verme ve menevişlenmiş hali, su verme kriyojenik işlem ve menevişlenmiş hali ile; direk fren sistemi üzerinde test edilmiştir.

Test kapsamında öncelikle levye parçaların servis koşullarında kırılmanın gerçekleşeceği bölgeyi tespit etmek için Ansys programında, maruz kalacağı yük ve parçanın sabitleneceği bölgeler programa girilerek simülasyon yapılmıştır. Simülasyonda kırılmanın başladığı bölge tespit edilip, bu bölge referans alınarak metalografik numuneler hazırlanmış, mikroskopta incelenmiş ve sertlik kontrolleri yapılmıştır.

### 6.1 SAE 4032 Çeliği

Amerikan otomobil standartları enstitüsü tarafından belirlenmiş standart ile isimlendirilmiş bu çelik; orta karbonlu sınıf olup yapısında %0,38-0,43 aralığında Karbon, %0,60-0,80 Mangan içerir.

Bu çelikler ısıtıl işlem ile sertleştirilmeye uygun olup, dövme ile şekillendirilebilmek için ideal malzemelerdir. Endüstride cıvata, somun, dingil, dişli çark, frezeli veya transmisyon mili, manivela kolu, ray gibi endüstriyel uygulamalar için kullanılabilir.

Standartlarda bu çelik için istenilen analiz Çizelge 6.1'deki gibidir;

Çizelge 6.1. SAE 4032 çeliği kimyasal analizi

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mo
0,30-0,35	0,15-0,35	0,70-0,90	Max 0,035	Max 0,04	0,20-0,30

Yine bu çeliğin standartlarda belirtilen mekanik ve ısıl özellikleri Çizelge 6.2’de listelenmiştir.

([http://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=c86629fe18c048fda6000dcfe4751d92](http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=c86629fe18c048fda6000dcfe4751d92))

Çizelge 6.2 SAE 4032 çeliği mekanik ve termal özellikleri

Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Isıl İletkenlik ( Jm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Akma Modülü (Gpa)	Termal İletkenlik (W/m-K)
7,85	52	200	0,29	78	52

## 6.2 Hammadde

Dövme yoluyla imal edilen bu parçalar; Çemtaş tarafından elektrik ark ocağında üretilmiş SAE 4032 çelik kütüğünden üretilmiştir. Çelik kütüğe ARL3460 Optik emisyon spektrometresinde yapılan kimyasal analize göre çelik içeriği Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3. Kullanılan çeliğin kimyasal analizi

Karbon	Silisyum	Mangan	Fosfor	Kükürt	Krom	Molibden	Nikel
0,37	0,23	1,49	0,009	0,028	0,1	0,24	0,05

Vanadyum	Alüminyum	Bakır	Kalay	Kurşun	Antimuan	Arsenik
0	0,021	0,05	0,004	0,0003	0,0014	0,004

Yine Çemtaş tarafından yapılan testlerde; EN ISO 6506-1 standardına göre sertlik, ASTM E 112'ye göre östenit tane büyüklüğü, EN ISO 3887'e göre karbonsuzlaşma derinliği kontrol edilmiştir. (Çizelge 6.4)

Çizelge 6.4. Hammadde sertlik, tane büyüklüğü ve karbonsuzlaşma derinliği

	Sertlik (Brinell)	Östenit Tane Büyüklüğü	Karbonsuzlaşma Derinliği (mm)
SAE 4032	234 HB	8	0,14

Parçalarda mikro temizlik kontrolü ASTM E 45 standardına göre yapılmış, sonuçlar Çizelge 6.5'de listelenmiştir.

Çizelge 6.5. Hammadde mikrotemizlik raporu

	A Sülfür	B Alümina	C Silikat	D Yuv.Oksit
İnce	2,25	-	-	1,00
Kalın	1,00	-	-	0,58

Çelik kütük 12:1 oranında haddelenerek üretilmiş olup, kütük %100 yüzey çatlağı ve ultrasonik çatlak incelemelerinden geçirilmiştir.

### 6.3 ANSYS Bilgisayarlı Sonlu Elemanlar Analizi

Ansys 18.1 programı kullanılarak parçalarda kırılma analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile levye parça meshlere ayrılmış. Ardından Von Misses akma kriterine göre fren esnasında maruz kaldığı yük, parçanın fren sistemine sabitlendiği bölgeler belirlenerek işlem yapılmıştır.

#### 6.3.1 Mühendislik Değerleri

Bilgisayarlı simülasyon yapılırken ortam sıcaklığı 22°C olarak belirlenmiştir. Malzeme seçimi olarak 'structural steel' seçilmiş, yoğunluğu 7,85 g/cm<sup>3</sup> olarak

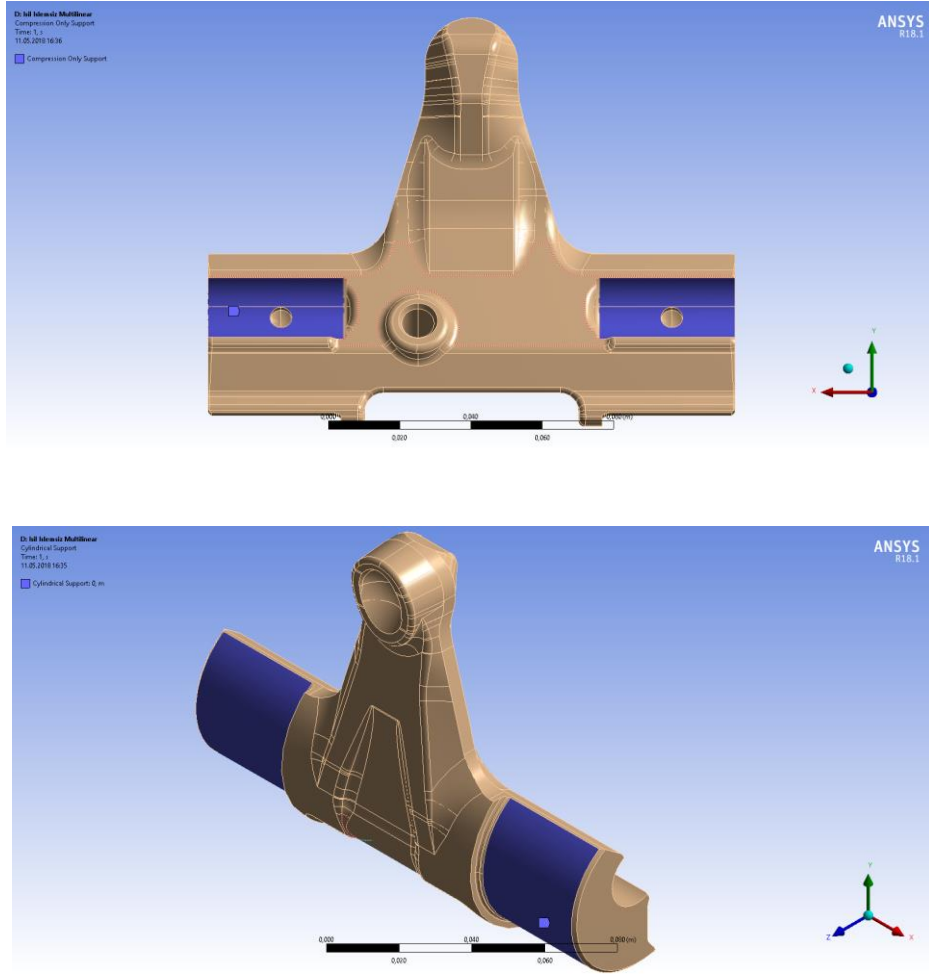
tanımlanmıştır. Parçadan çıkarılan çekme çubukları çekilmiş ve akma değeri, çekme değeri ve kopma değeri programa (Structural Steel malzemesine) tanımlanmıştır. Bu değerler kullanılarak; dövme sonrası herhangi ısıl işleme girmeyen parçanın çekme değerleri ve dövme sonrası su verme ve menevişleme işlemi yapılan parçanın çekme değerleri olarak iki farklı simülasyon hazırlanmıştır. Simülasyona girilen değerler Çizelge 6.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.6. Ansys'e girilen uzama ve gerilme değerleri

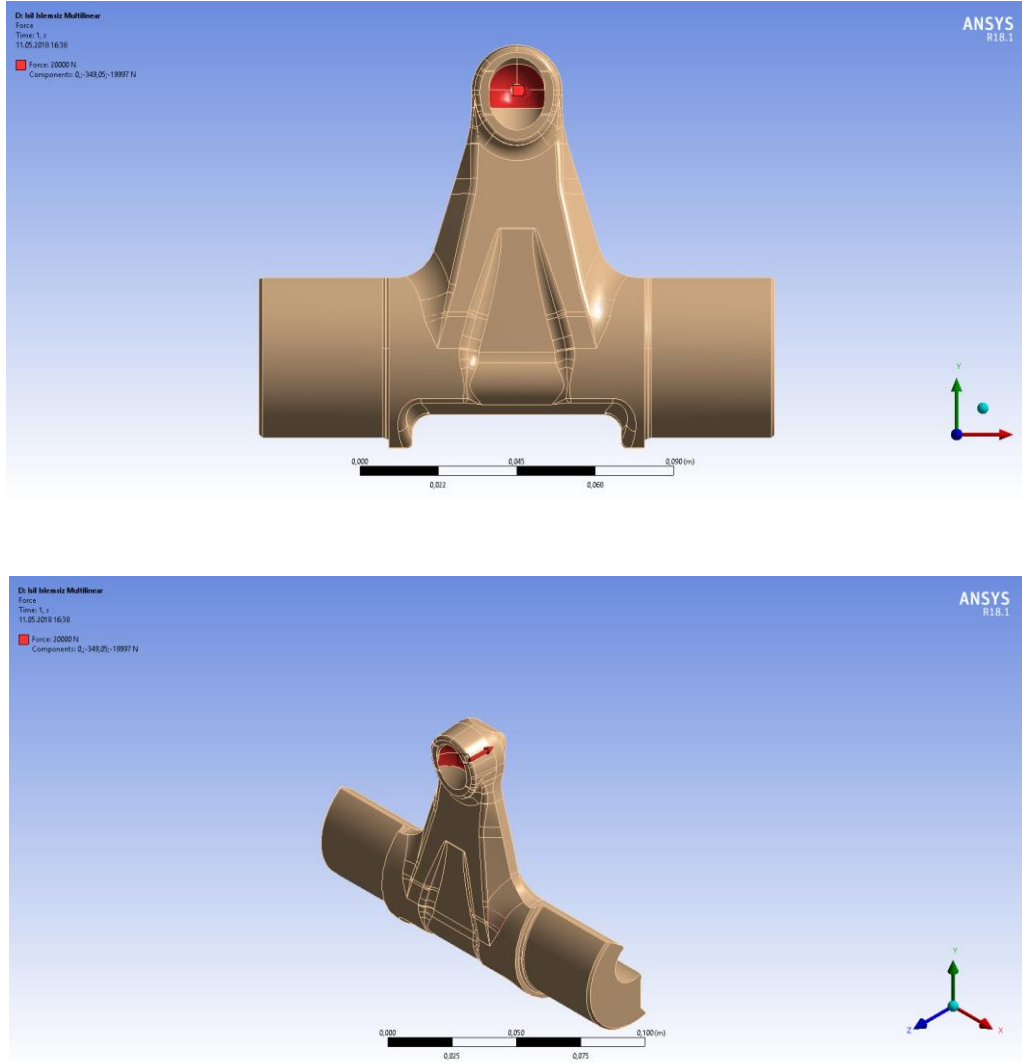
	ISIL İŞLEMSİZ		ISIL İŞLEMLİ	
	UZAMA (%)	GERİLME (N/mm <sup>2</sup> )	UZAMA (%)	GERİLME (N/mm <sup>2</sup> )
1	0	537	0	740
2	0,2	537	0,2	740
3	3,5	742	0,8	745
4	4,9	754	1,25	758
5	6,55	759	2,18	785
6	7,57	760	2,97	807
7			3,94	825
8			4,85	837
9			5,59	843
10			6,44	847
11			7,32	847

Tablodaki veriler parçanın elastik ve plastik şekil değişimini hesaplamada kullanılan değerlerdir. Ansys bu tablodaki verilere göre yük uygulandığında parçadaki şekil değişiminin başladığı noktayı, maksimum gerilim bölgelerini sonlu elemanlar sistemine göre analiz etmiştir.

Parçanın sabitlendiği ve yükün uygulandığı bölgeler Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de, resimde gösterilmiştir. Yükün uygulandığı bölge için, körükten gelen 18,5 kN kuvvet değeri girilmiştir.

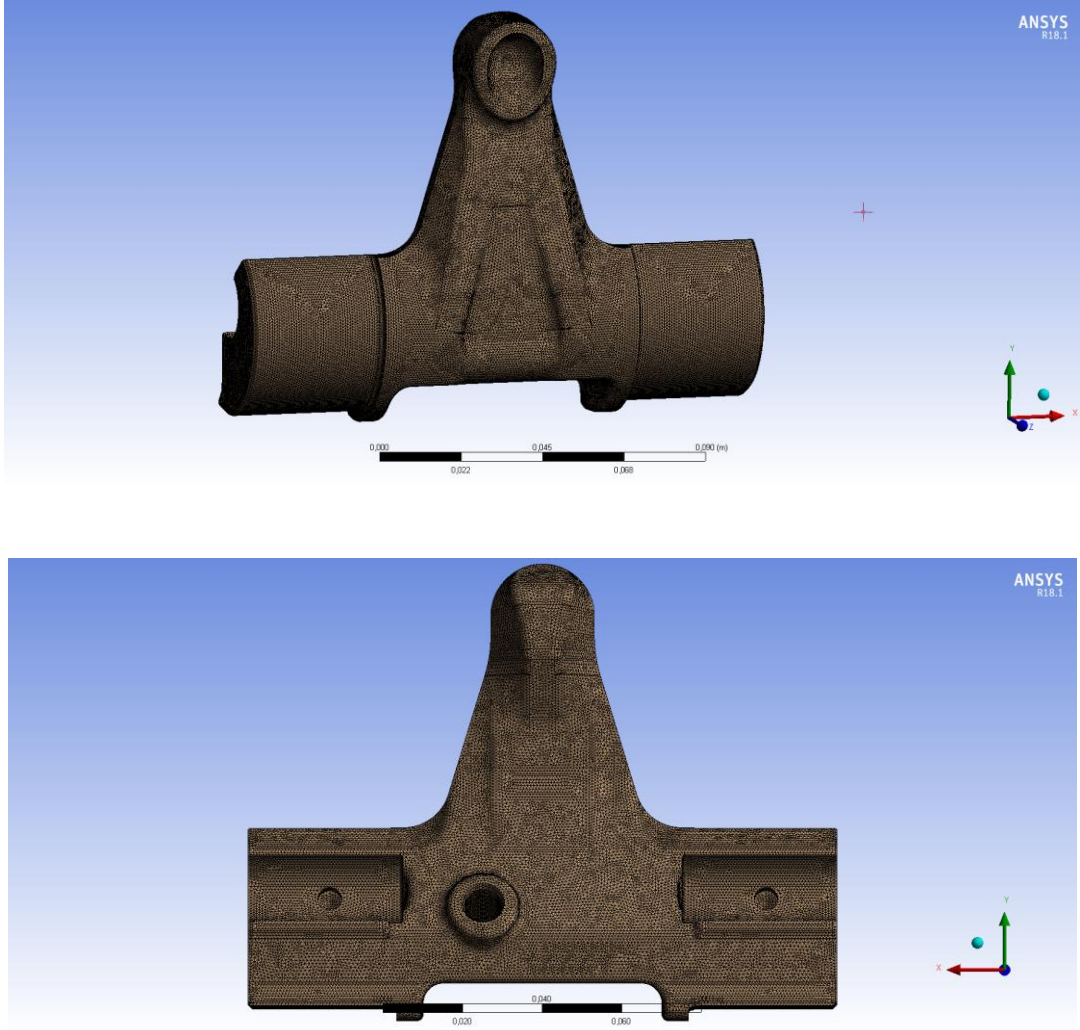


Şekil 6.1. Parçanın yatakladığı kısım ve silindirik destek yüzeyi



Şekil 6.2. Kuvvetin uygulandığı bölge

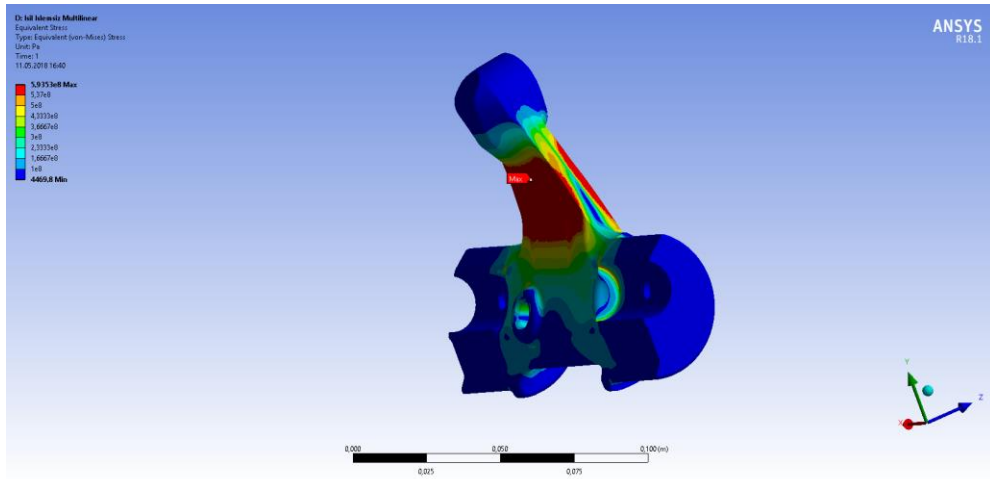
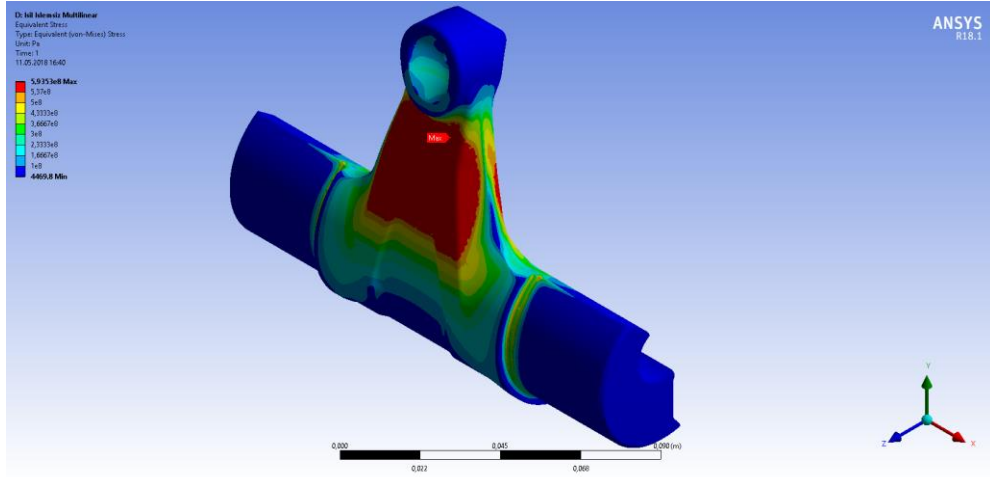
Parçanın 3D çizimi Ansys'e yüklenmiş olup, otomatik mesh ataması modu kullanılarak parça sonlu elemanlara ayrılmıştır. Otomatik mesh atama ve düğüm noktalarının belirlenmesinden sonra mesh görüntüsü Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Element sayısı 277238 adet, düğüm soktası sayısı 472451 adet olarak hesaplanmıştır.



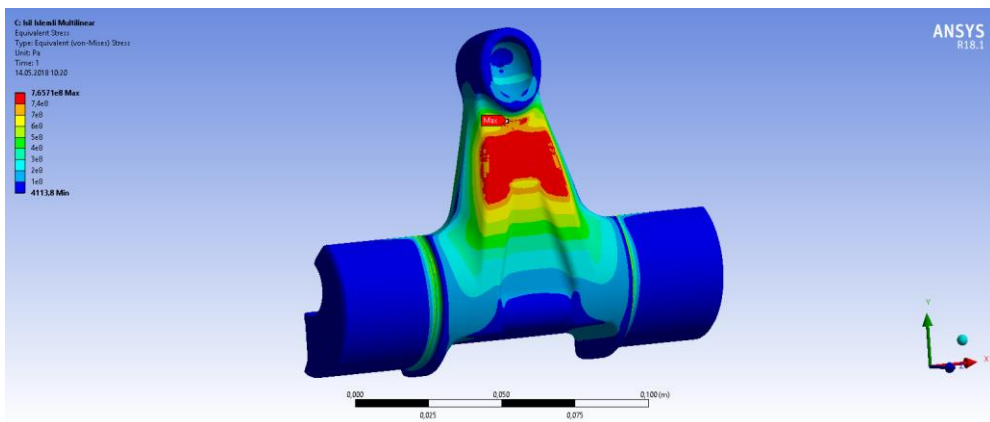
Şekil 6.3. Parçanın sonlu elemanlara bölünmüş hali görüntüleri

Parçada mesh atanıp, çekme diyagramı için veriler girildikten sonra maksimum stres noktaları tespit edilmiştir. Bu noktalar bilgisayarlı simülasyona göre parçanın kırılmaya başlangıç noktalarıdır. Direk dövme sonrası herhangi bir ısıl işleme maruz bırakılmadan hazırlanmış levye ile, su verme ve temperleme ısıl işlemi sonrası levyenin kullanım koşulları simülasyonda hazırlanmıştır. Bu parçaların simülasyon sonucu görüntüleri Şekil 6.4; Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da listelenmiştir.

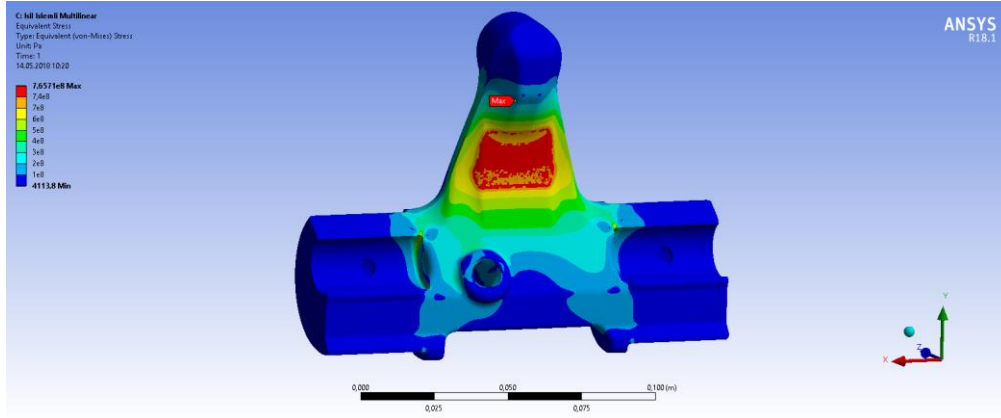




Şekil 6.4. Isıl İşlemsiz parçanın maksimum gerilme bölgeleri



Şekil 6.5. Isıl işlemli parçanın maksimum gerilme bölgeleri



Şekil 6.6. Isıl işlemlili numune maksimum gerilme bölgeleri

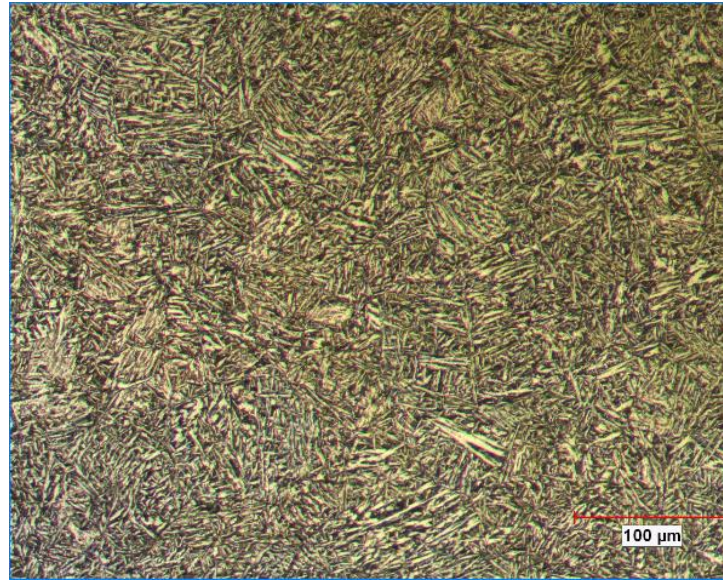
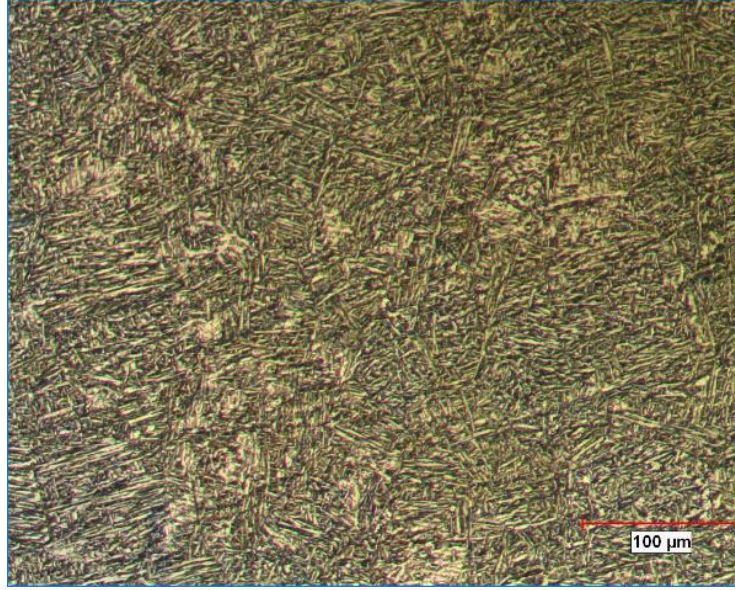
#### 6.4 Dövme

Parçalar SAE 4032 çeliğinden;  $\text{Ø}65\text{mm}$  ve boy 94 mm kesilerek dövme öncesi dilimlenmiştir. Bu kesilen çelik kütükler indüksiyon ile  $1050^{\circ}\text{C}$ 'ye ısıtılıp dövme işlemi yapılmıştır.

Soğutma işlemi direkt havada yapılmış olup, kontrollü soğutma, yağ banyosu gibi herhangi bir yöntem uygulanmamıştır.

Dövme işleminden sonra 0,80-1 mm aralığındaki çelik bilyalar ile 25 dk kumlanmış, avuç içi taşlama makinesi ile çapakları temizlenmiştir.

Dövme işleminden sonra parça mikroyapıları incelendiğinde genel olarak ferrit-perlit fazı tespit edilmiş olup; yapıda yüzeyden içeriye doğru tarandığında martenzit fazına rastlanılmamıştır. Parçanın mikroyapıları Şekil 6.7'de gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Dövme işlemi sonrası mikroyapılar

### 6.5 Isıl İşlemler

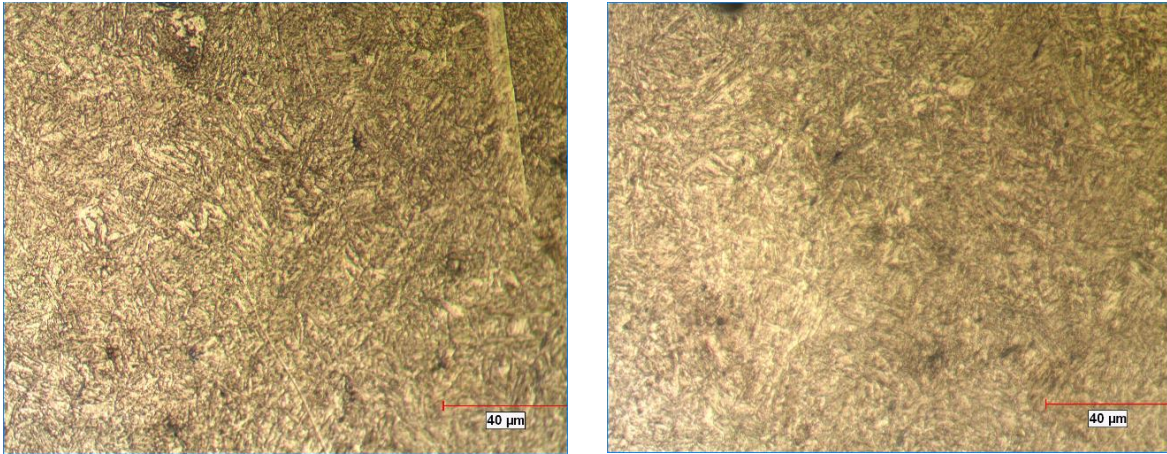
Parçalar; dövme işleminden sonra yapıdaki kalıntı gerilimleri gidermek, tane boyutunu küçültmek, yüzeyde aşınmaya dayanıklı martenzitik bir yüzey oluşturmak amacı ile su verme ve menevişleme işlemi yapılmıştır.

Parçalarda su verme işlemi yapılmadan önce 200°C’de ön ısıtma yapılmıştır. Parçalar 220°C’ye 5°C/dk ile çıkarılmış ve bu sıcaklıkta 2 saat bekletilmiştir. Ardından 750°C lik 0,40 C konsatrasyonlu fırına yüklenmiş, bu koşullarda 30 dakika beklenildikten sonra 860°C’ye 2°C/dk ile çıkılmış ve 40 dakika boyunca östenitleme yapılmıştır.

Östenitlemenin ardından 60°C’lik 1400 dev/dk ile karıştırılan yağ banyosuna daldırılmış ve soğutulmuştur.

Su verme sonrasında 620°C’de (620°C’ye 3°C/dk ile çıkılarak) 2 saat menevişlenerek parça oda sıcaklığına fırın içerisinde gelmesi beklenilmiştir.

Bu işlemler sonrasında parçanın mikroyapısı Şekil 6.3’de görüleceği üzere yüzeylerde daha yoğun olmak üzere martenzitik olmuştur.



Şekil 6.8. Isıl işlem sonrası mikroyapıları

## 6.6 Kriyojenik İşlemler

Kriyojenik işlemler 12, 24, 36 saat sürelerde uygulanmıştır. Kriyojenik işlemler MMD firmasında Cryo marka fırında yapılmıştır. Sıvı azot kullanılarak 2°C/dk hızda düşülerek -196°C’de işleme maruz bırakılmıştır.



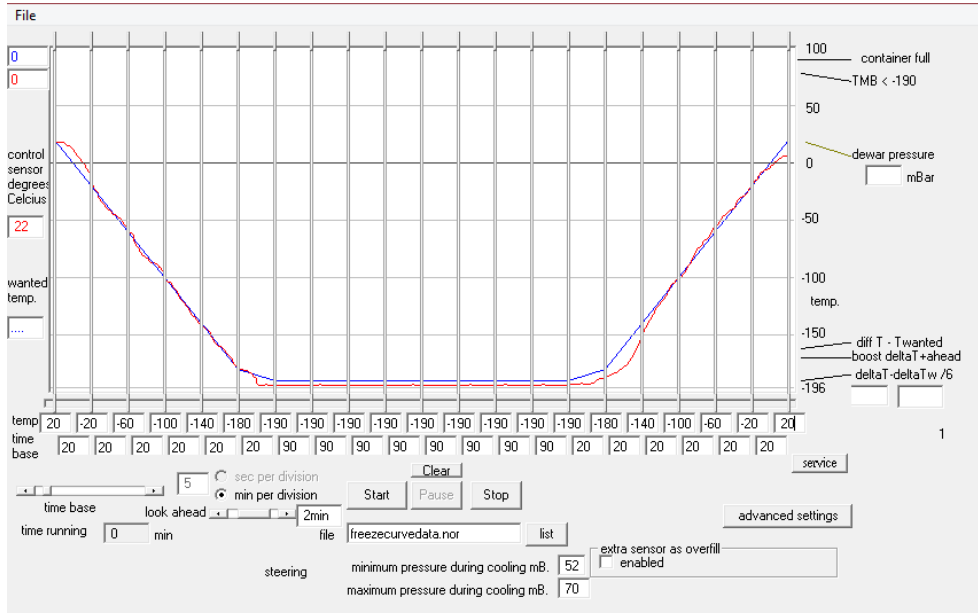


Şekil 6.9. Cryo marka Kriyojenik işlem fırını

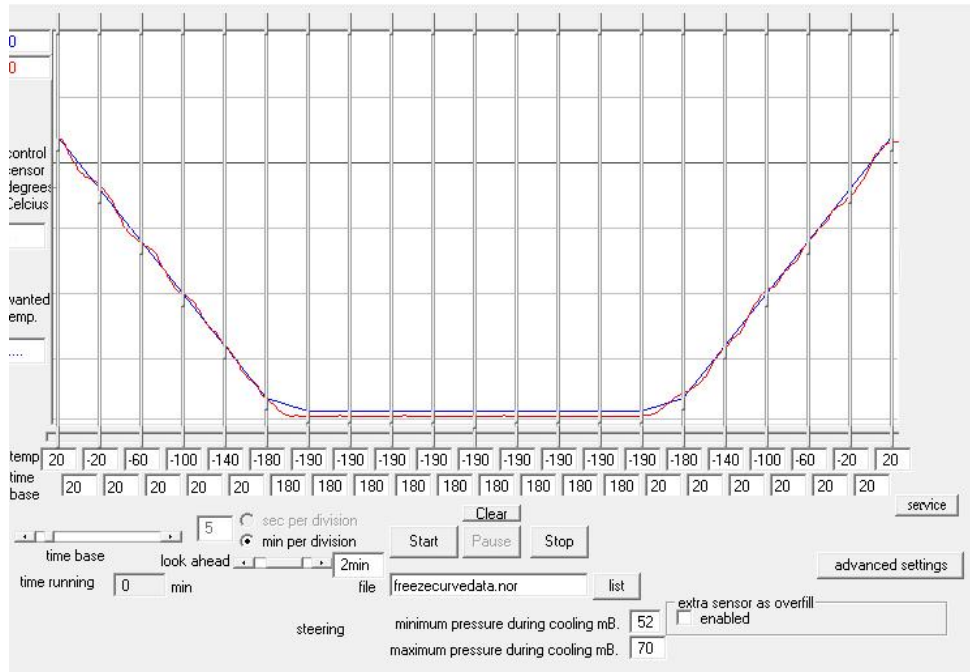
Parçalar soğutulurken basınç minimum 52, maksimum 70 milibar olacak şekilde ayarlanmıştır. Fırın içi sıcaklık oda sıcaklığından  $2^{\circ}\text{C}/\text{dk}$  ile 120 dk'da  $-196^{\circ}\text{C}$  sıcaklığına kadar düşürülmüş, ardından burada 1. Numuneler için 720 dk, 2. Numuneler için 1440 dk ve 3. numuneler için 2160 dk bu sıcaklıkta beklenilmiş ardından yine  $2^{\circ}\text{C}/\text{dk}$  ile 120 dk'da oda sıcaklığına çıkarılmıştır.

Kriyojenik işlem ardından parçalar  $620^{\circ}\text{C}$ 'ye  $3^{\circ}\text{C}/\text{dk}$  ile çıkılarak ve bu sıcaklıkta 2 saat menevişlenerek, ardından yine  $3^{\circ}\text{C}/\text{dk}$  ile oda sıcaklığına soğutularak menevişleme işlemi yapılmıştır.

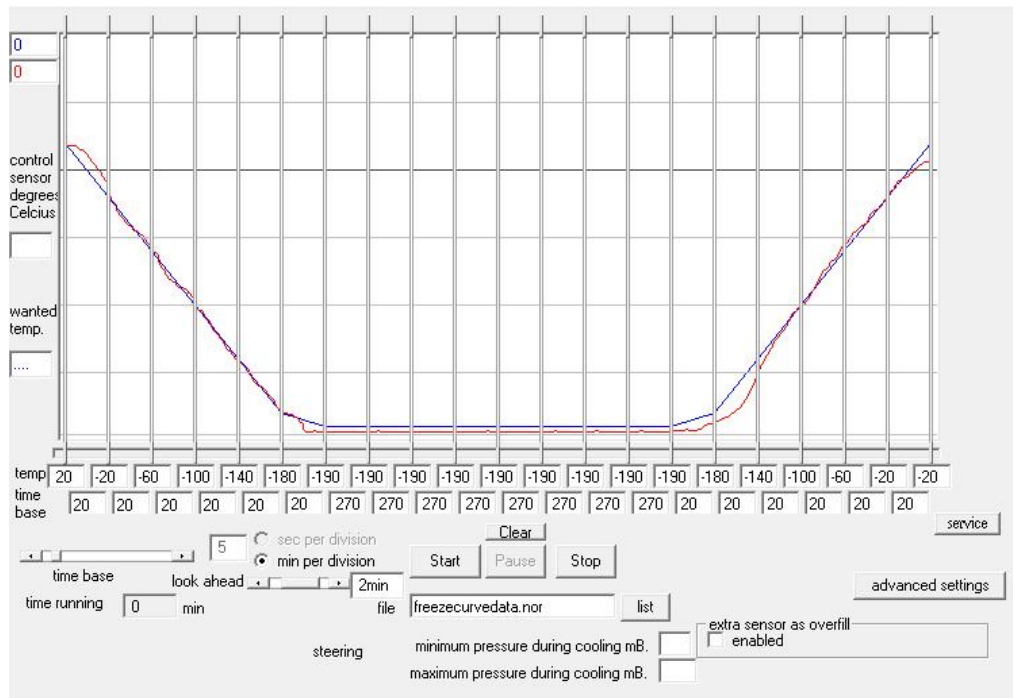
Parçaların bu işlemler yapılırken ki fırından alınan değerlerin grafikleri Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de gösterilmiştir.



Şekil 6.10. 12 saat kriyojenik işlem sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 6.11. 24 saat kriyojenik işlem sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 6.12. 36 saat kriyojenik işlem sıcaklık-zaman grafiği

## 6.7 Metalografik Kontrol

Parçanın Ansys’de yapılan analizlerine göre çatlakın başladığı bölgeden alınan mikroyapılar; Ege Endüstri Metalografi Laboratuvarında incelenmiştir.

Metalografik numuneler sırasıyla kesme, bakalite alma, zımparalama, parlatma aşamalarından geçmiştir.

Numune hazırlama aşamasında kullanılan ekipmanlar aşağıda listelenmiştir.

### 6.7.1 Kesme

Numuneler Metkon Servocut 401-mm marka metalografik numune kesme cihazı kullanılarak kesilmiştir.



Şekil 6.13. Metalografik kesme cihazı

### 6.7.2 Bakalite Alma

Numuneler ATM OPAL 410 marka cihaz ile bakalit ile kaplanmıştır. Kalıplama; Fırının 180°C'de 320 bar basınç ile bakalit tozunun numuneyi kaplaması sağlanmıştır.



Şekil 6.14. ATM Opal 410 Bakalite Alma Cihazı



### 6.7.3 Zımparalama ve Parlatma

Zımparalama ve parlatma işlemi ATM SAPHIR 530 marka cihaz (Şekil 6.15) ile yapılmıştır. Zımparalama işlemi sırasıyla 100X, 250X, 500X ve 1000X zımpara ile yapılmış, ardından numuneler keçe ile parlatılmıştır.



Şekil 6.15. ATM SAPHIR 530 Zımparalama ve Parlatma Cihazı

### 6.7.4 Dağlama

Numuneler %20 Nitrik asit içeren Nital çözeltisi ile 20 sn çözelti içerisinde bekletilerek dağlanmıştır.

### 6.7.5 Mikroskop

Hazırlanan Numuneler Nikon Clemex MA100 (Şekil 6.16) marka cihaz ile incelenmiştir.



Şekil 6.16. Nikon-Clemex marka optik metal mikroskobu

## 6.8 Mekanik Testler

### 6.8.1 Çekme Testi

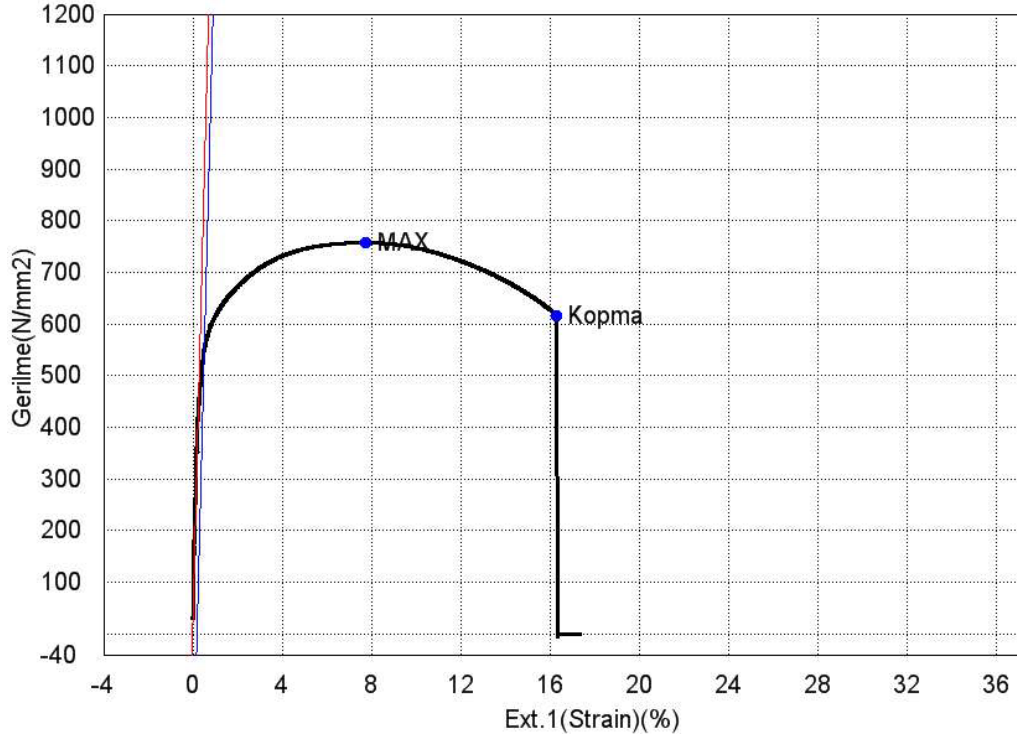
Numuneler çekme testi ve vickers sertlik testi yapılarak mekanik olarak test edilmiştir. Dövme sonrası hiçbir ısıl işlem olmadan, sadece su verme ve temperlenmiş, su verme ardından 12 saat kriyojenik işlem yapılmış ve temperlenmiş, su verme ardından 24 saat kriyojenik işlem yapılmış ve temperlenmiş, su verme ardından 36 saat kriyojenik işlem yapılmış ve temperlenmiş olarak 5 farklı çekme ve sertlik numunesi hazırlanmıştır.

Çekme testleri Shimadzu marka AG-IC model çekme cihazında, Ege Endüstri A.Ş bünyesinde yapılmıştır. Cihaz resmi Şekil 6.17’de verilmiştir.

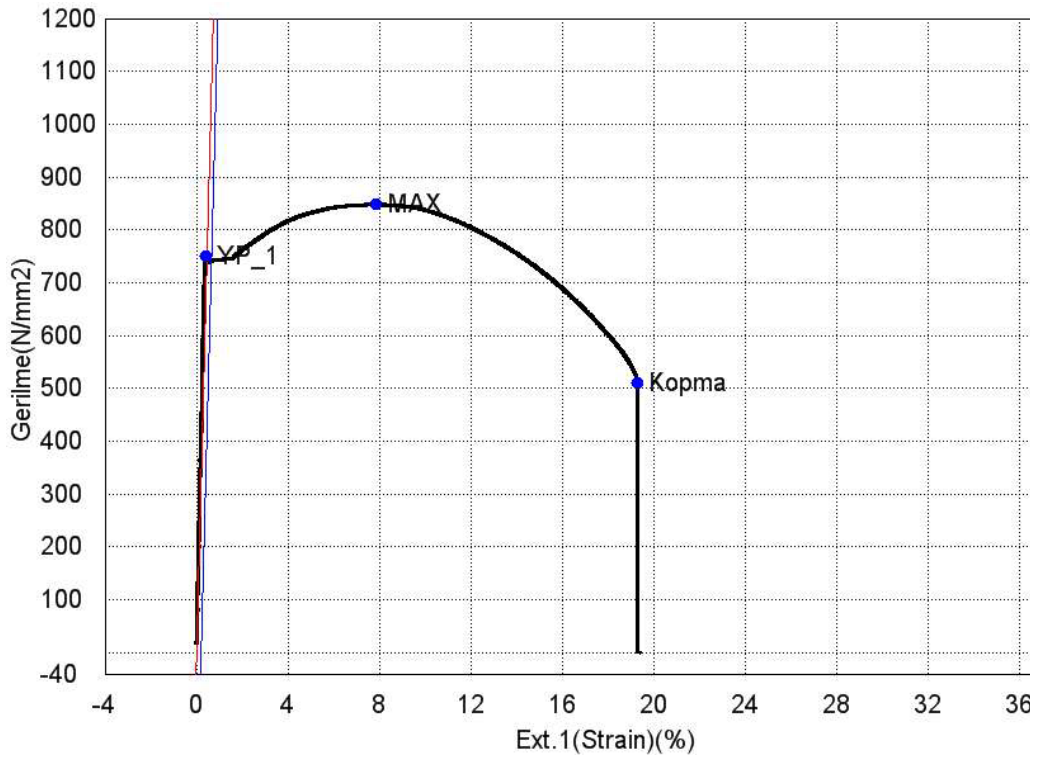


Şekil 6.17. Shimadzu AG-IC marka çekme cihazı

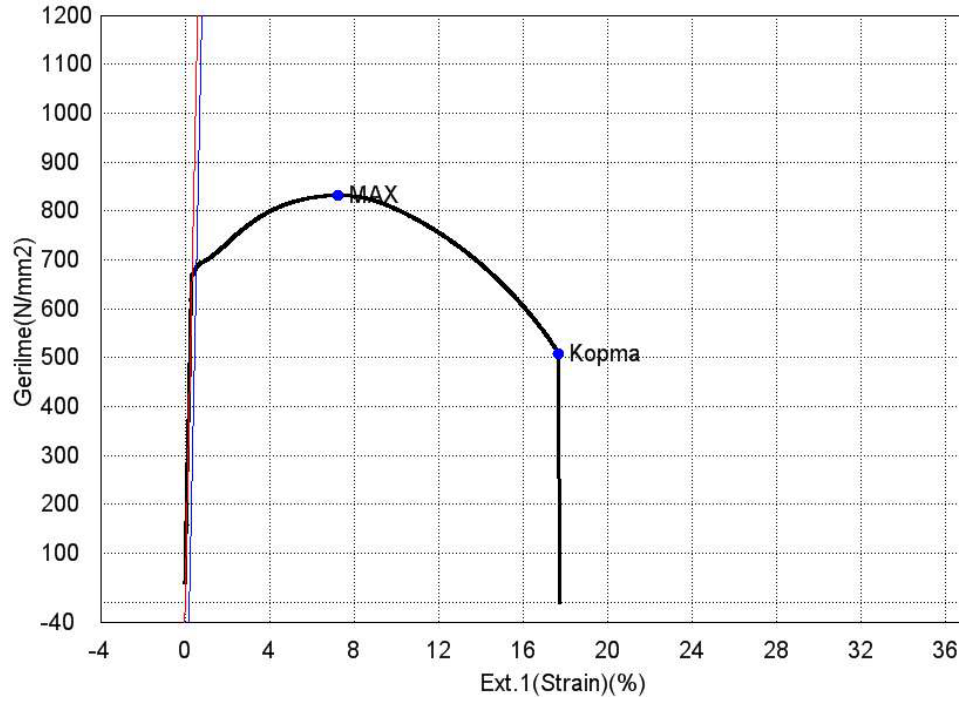
Parçalardan  $\text{Ø}10\text{mm}$  ve  $100\text{mm}$  uzunluğundaki çekme numuneleri hazırlanmıştır. Dövme sonrası, su verilmiş ardından temperleme yapılmış, su verme sonrası 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem ardından temperleme yapılmış olan numunelere çekme testi uygulanmıştır. Çekme diyagramları Şekil 6.18; Şekil 6.19, Şekil 6.20; Şekil 6.21 ve Şekil 6.22'deki gibidir.



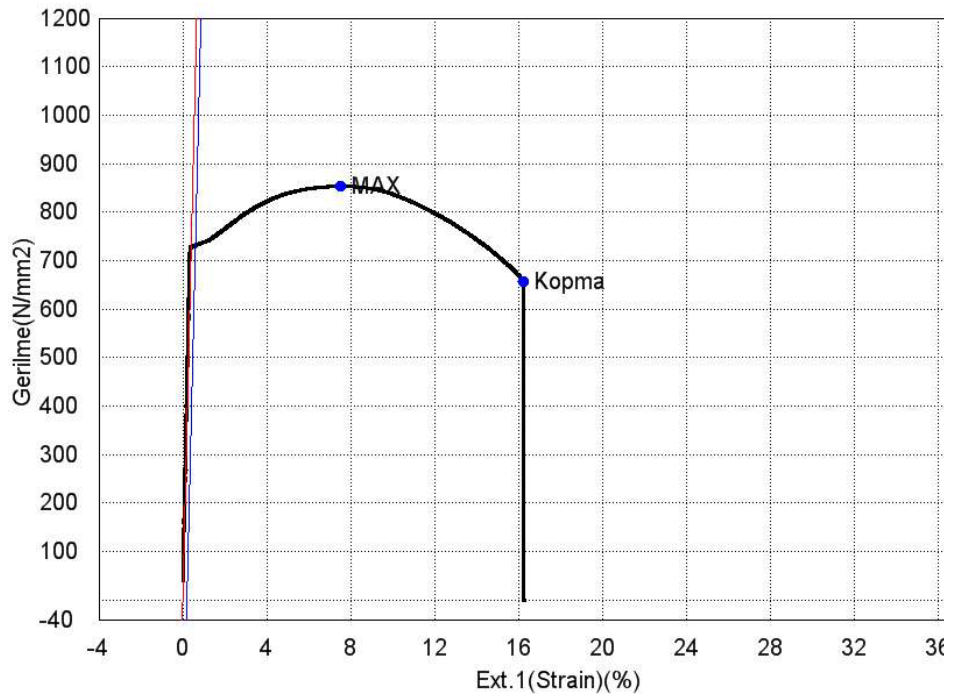
Şekil 6.18. Isıl İşlemsiz numuneye ait çekme diyagramı



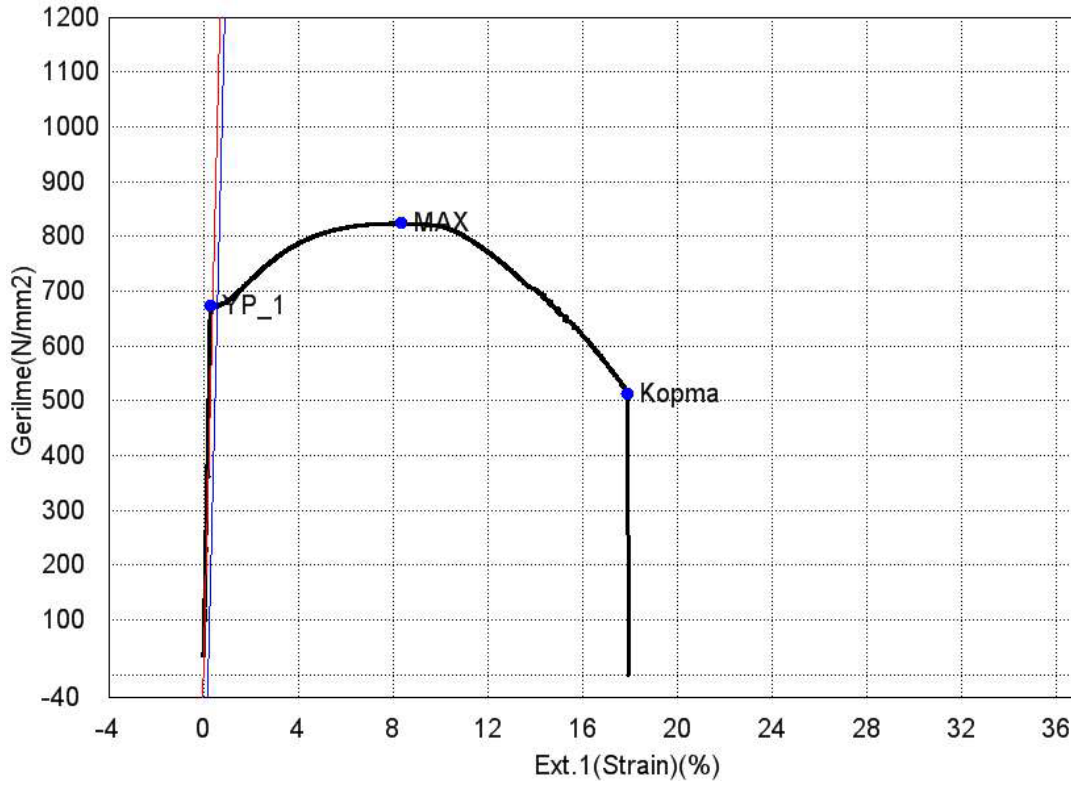
Şekil 6.19. Dövme sonrası su verme ve temperleme yapılmış numuneye ait diyagram



Şekil 6.20. Su verme sonrası 12 saat kriyojenik işlem yapılmış numuneye ait diyagram



Şekil 6.21. Su verme sonrası 24 saat kriyojenik işlem yapılmış numuneye ait diyagram



Şekil 6.22. Su verme sonrası 36 saat kriyojenik işlem yapılmış numune

Parçaların akma ve çekme mukavemeti sonuçları Çizelge 6.7’de listelenmiştir.

Çizelge 6.7. Parçaların akma ve çekme mukavemetleri

	Isıl İşlemsiz	Su verme + Temperleme	12 saat Kriyojenik İşlemli	24 Saat Kriyojenik İşlemli	36 Saat Kriyojenik İşlemli
Akma Muk.	537,703	740,492	680,159	729,291	672,171
Çekme Muk.	757,380	847,863	831,838	853,234	823,537

### 6.8.2 Sertlik Testi

Ansys verilerine göre parçaya yük uygulandığında plastik şekil değişiminin başlayacağı bölgeden sertlik ölçümü için kesit çıkarılmıştır. Vickers sertlik cihazı, 1kg ile yüklenerek yüzeyden merkeze doğru 1 mm aralıklar ile sertlik taraması yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 6.8’de listelenmiştir.

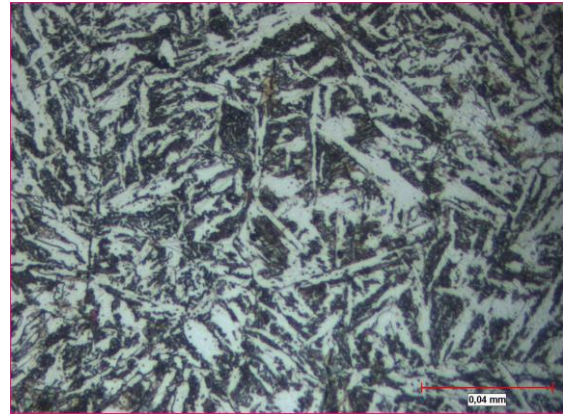
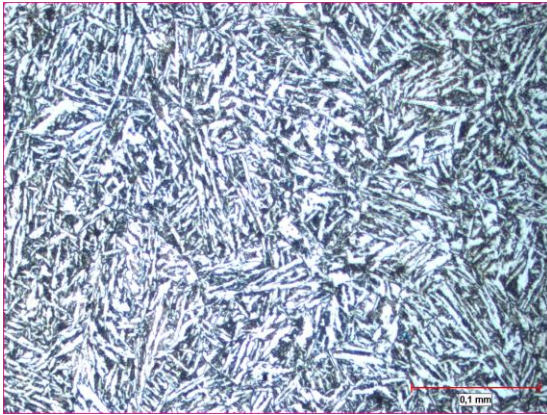


Çizelge 6.8. Numunelerin sertlik değerleri

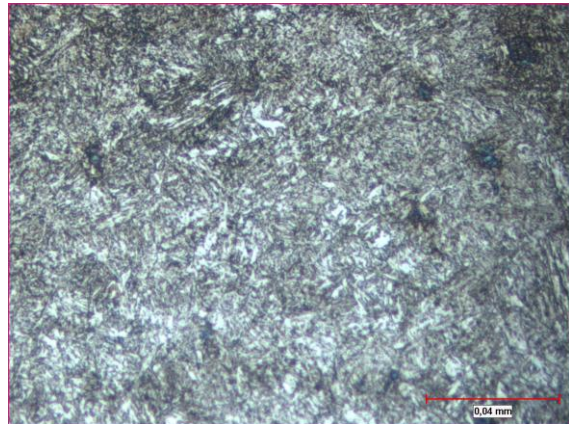
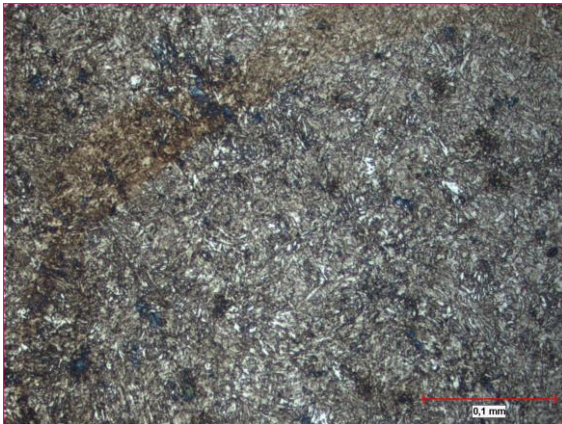
	Isıl İşlemsiz	Su verme + Temperleme	12 saat Kriyojenik İşlemler	24 Saat Kriyojenik İşlemler	36 Saat Kriyojenik İşlemler
Sertlik	238	271	274	277	283

### 6.8.3 Mikroyapı Görüntüleri

Ansys verilerine göre maksimum yüke maruz kalan ve plastik şekil değişimine maruz kalan bölgeden mikroyapı numuneleri çıkarılmıştır. Bu numuneler %20 Nitrik asit içeren Nital çözeltisi ile dağlanmış; 200x ve 500x olarak görüntüleri Şekil 6.33, Şekil 6.34, Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da listelenmiştir.

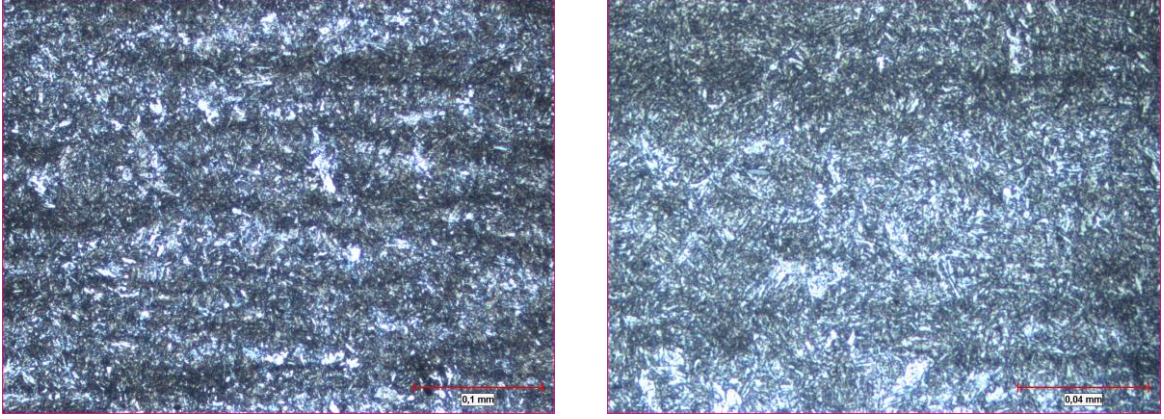


Şekil 6.23. Dövme sonrası 200x ve 500x mikroyapı görüntüleri

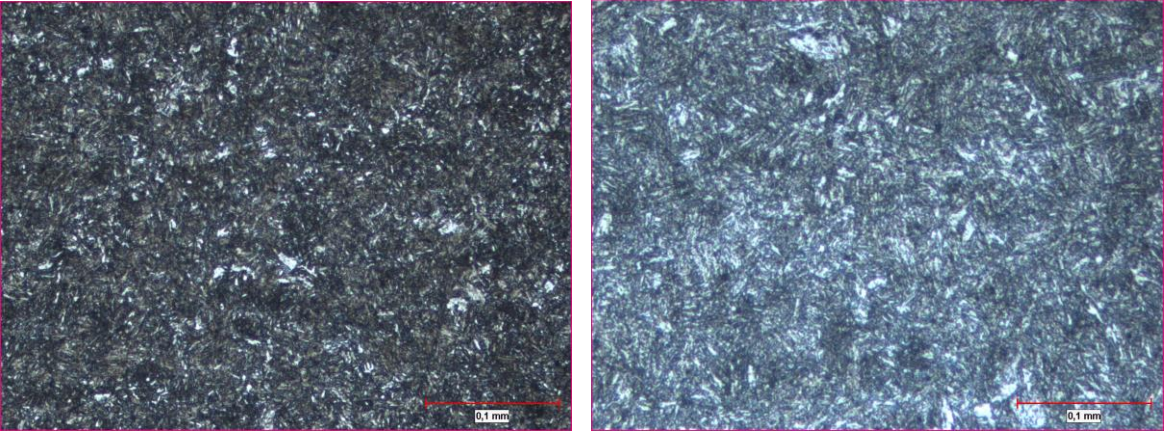


Şekil 6.24. Su verme ve temperleme işlemi sonrası mikroyapı görüntüleri

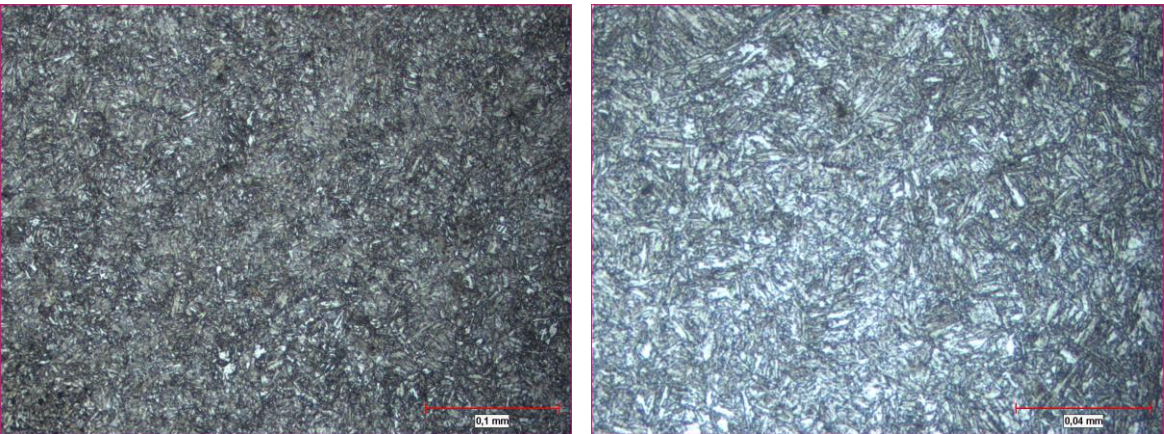




Şekil 6.25. Su verme işlemi sonrası 12 saat kriyojenik işlem ve temperleme yapılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri



Şekil 6.26. Su verme işlemi sonrası 24 saat kriyojenik işlem ve temperleme yapılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri



Şekil 6.27. Su verme işlemi sonrası 36 saat kriyojenik işlem ve temperleme yapılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri



## 6.9 Disk Fren Çalışma Mekanizması ve Yorulma Ortamı

Fren sistemleri; Disk Fren ve Kampanalı Fren Olarak; 2'ye ayrılır. Kampanalı Frenler kendi içerisinde Wedge, S-Kam, Z-Kam olarak ayrılırlar.

Disk frenler adından da anlaşılacağı gibi; aracın diferansiyelinden gelen dönme torkunun ucuna bağlanmış bir diske; körükten gelen bir hidrolik kuvvet etkisi ile karşılıklı balataların disk yüzeyine sürtünerek aracı durdurması prensibi ile çalışır.

Bu sistem bugün birçok araçta tercih edilen, sürtünme, aşınma, tork kuvveti, termal genleşme, konikleşme gibi birçok mekanik ve fiziksel etki ile çalışan bir sistemdir.

Çalışma sistemi; araç şoförünün fren pedalına bastığında uyguladığı hidrolik kuvveti, bir körük yardımı ile disk frenin bağlı olduğu, köprü adı verilen parça üzerindeki Levye yardımıyla balatalara iletilmesi; bu iletim esnasında yine bridge üzerinde bulunan balataların karşılıklı olarak diski sıkması prensibi ile hareket eder.

Disk Fren 3 ana kısımdan oluşmaktadır. (Bauer, H., Automotive Brake Systems, Robert Bosch GmbH, 1995)

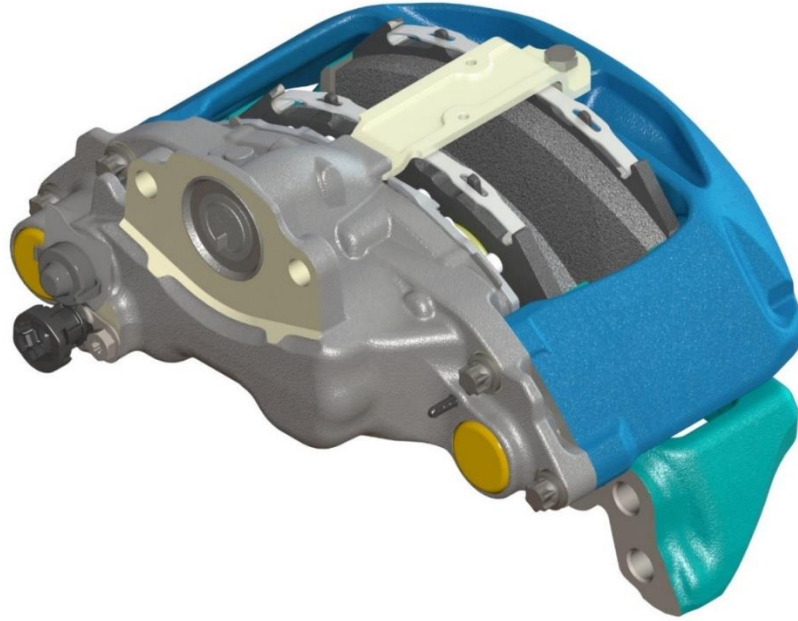
1. Fren Diski: Aracın tekerleğine bağlı olan bu kısım, balataların sürtünme yüzeyini oluşturur. Aracın kinetik enerjisi, sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüştürerek bu ısıyı atmosfere yayar.

2. Balata: Hidrolikten gelen basınç ile fren diskine doğru hareket eden bu parçalar; şoför fren yaptığı anda fren diski yüzeyine karşılıklı baskı uygulayarak sürtünme yüzeyi oluştururlar.

3. Hidrolik Sistem: Şoförün fren pedalına uyguladığı basıncı; araç balatalarına ileten dolayısıyla frenin çalışması için ilk hareketi başlatan kısımdır.

Bu diskler; konvansiyonel hava taşınımını sağlayabilmek için finli bir yapıda tasarlanmış olup, sıkışma esnasında yaklaşık 500°C'ye çıkan diskin hava ile soğutulmasını sağlar.

Balatalar disk freni frenleme esnasında sıkıştırdığında; aşınmaya maruz kalırlar. Bu aşınmanın fren mesafesini engellememesi için balatalar her frende biraz daha fren diskine yaklaşarak mesafenin sabit kalmasını sağlar. Bu sistemin çalışması için Disk Fren içine yerleştirilen Kaset sistemi körükten gelen kuvvet etkisi ile dönerek balataların ileri, fren diskine doğru itilmesini sağlar.



Şekil 6.28. Disk Tipi Fren Görünümü

Bu sistemin çalışması için fren sisteminde bulunan “levye” çok önemli bir yer tutmaktadır. Hem frenlemede kuvvet aktarımı hem de balataların doğru konumlanmasında etkin rol oynayan bu parça; sürekli yüke maruz kalarak yorulmaya, Körükten kuvvet uygulandığında aşınmaya, kaset sistemini çalıştırırken basma kuvvetine maruz kalmaktadır.

Bu mekanik kuvvetleri sağlayabilmek için parçanın ana malzemesi tok bir yapı gösterebilmeli, aşınan bölgelere ısı işlem yoluyla sertleştirmede su verilebilmeli; aşınmaya dayanıklı bir yüzey oluşturabilmelidir.

Dövme yoluyla SAE 4032'den imal edilen bu parçalar disk frenin ana aktarma malzemesidir.

Levyeler Parçalar 3 ana grupta hazırlanarak incelenmiştir.

1.grup numunelerde sadece dövme parça hiçbir ısıl işleme girmeden direkt olarak, 2.grup numunelere sadece su verme ve temperleme işlemi yapılarak, 3. Grup numuneler ise su verme ardından kriyojenik işlem sonrasında da temperleme işlemi yapılarak kullanılmıştır. Numunelerde kriyojenik işlem 12, 24, 36 saat süreyle yapılmıştır.

Levyeler Ege Fren Bünyesinde gerçek bir disk fren sistemi üzerinde test edilmiştir. Aşağıdaki resimde görüleceği üzere fren sistemi bir platform üzerinde sabitlenerek, körukten levye'ye kuvvet uygulanarak içerideki kaset sisteminin balataları hareket ettirerek ortasındaki takozu sıkıştırması şeklinde test yapılmıştır.

Levyeye cep kısmından verilen kuvvet; köruk tarafından verilmektedir. Orsan marka tip 36 disk fren körüğü, test düzeneğinde kullanılmıştır. Köruk kuvveti 17,5 MPA ile 18,5 MPA arasında mesafeye göre değişmektedir. Körüğün uyguladığı kuvvetin büyüklüğünü

tespit etmek için loadcell'e bağlanan veri toplama (şekil 6.39) cihazından mesafe ve yük bileşenleri bulunmuştur.



Şekil 6.39. Veri toplama cihazına bağlanmış körük ve loadcell

Sisteme bağlanan körüğün kuvveti etkidiği yer Şekil 6.40'da belirtilmiş olup, bu bölge abrazif aşınmayı engellemek için gres yağı ile parçadaki cep bölgesine yükü tatbik etmektedir.



Şekil 6.40. ORSAN T36 Tip Körük

Levyeler parçalar gerçek bir fren sistemi üzerinde test edilmiştir. Ege Fren firmasının ELSA225H model disk tipi fren sistemi üzerinde levyeler sürekli tekrarlı yüke maruz bırakılarak test edilmiştir. Fren komponentleri Şekil 6.41’de gösterilmiştir. Test edilen levyeler sol sütunda dördüncü sırada bulunmaktadır.

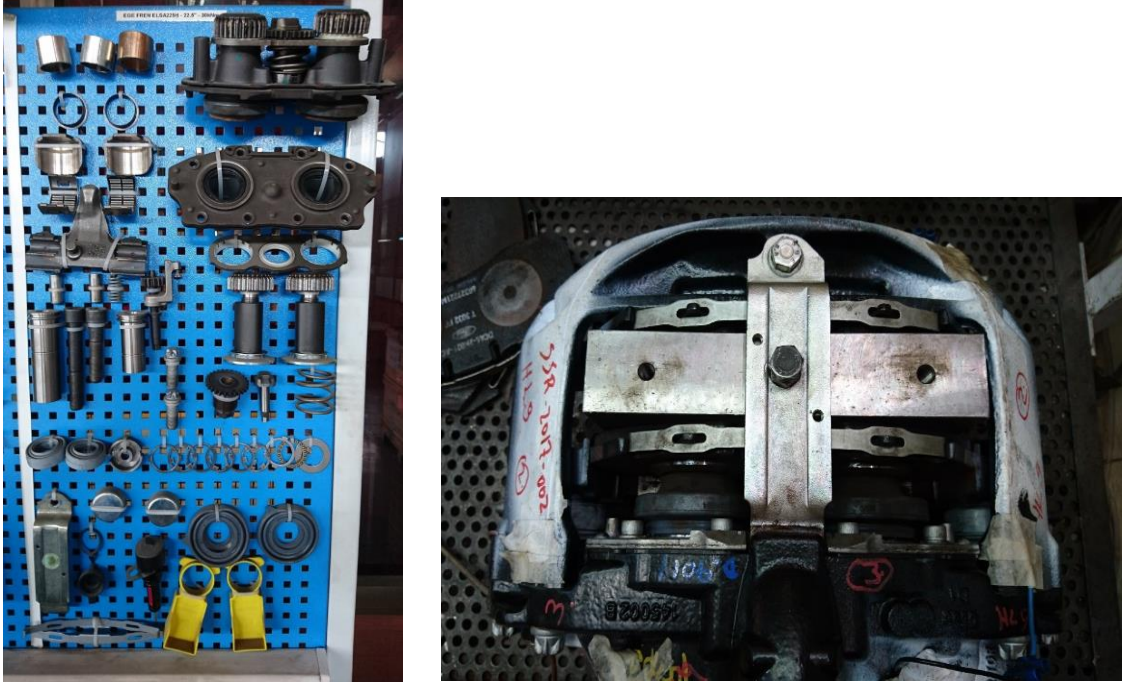
Levyeler bu komponentlerden sağ üst köşede bulunan fren sistemine, ortadan bir çarka yük bindiğinde temas ederek, bu çarkın dişliler vasıtası ile balataları sıkıştırmasını sağlamaktadır. Levyeler parça sol sütunda 3 sırada bulunan rulman ile yataklanarak, frene sabitlenmekte, yük yukarıdan parçaya binmektedir.

Fren pedalına her basıldığında levyeler bu dişliler üzerinden fren hareketi yapmayı sağladığından sürekli yorulmaya maruz kalmaktadır.

Parçaların fren sistemi üzerinde test edildiğinde kırılana kadar olan çevrim sayıları aşağıda bulunan Çizelge 6.9’da listelenmiştir.

Çizelge 6.9. Test levyelerinin kırılana kadar yaptığı çevrim sayısı

Isıl işlem Türü	Kırılma çevrimi
Sadece dövme yapılmış parça	12000 çevrim
Dövme sonrası su verme ve tempreleme yapılmış parça	100000 çevrim
Su verme sonrası 12 saat kriyojenik işlem yapılmış parça	45000 çevrim
Su verme sonrası 24 saat kriyojenik işlem yapılmış parça	60000 çevrim
Su verme sonrası 36 saat kriyojenik işlem yapılmış parça	49000 çevrim



Şekil 6.41. ELSA 225H Fren Komponentleri

## 9.BULGULAR VE TARTIŞMA

Dövme sonrası parçadan alınan metalografik numune incelendiğinde martenzit yapısının kaba martenzit yapısında olduğu, tane boyutunun daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Dövme sonrası parçaya yapılan su verme ve temperleme işlemi sonrasında ise ince taneli martenzit yapısı ve daha küçük tane boyutu mikroyapıda tespit edilmiştir. Sadece dövülmüş parçada yapılan sertlik taramasında sertliğin uniform ilerlemediği, ilk 5 mm'den alınan sertlik değerleri ortalaması 238 HV1 iken, dövme sonrası su verme ve temperlemeden sonra ortalama sertlik 271 HV1 bulunmuştur. Çekme testi sonunda dövme sonrası parçadan çıkarılan çekme çubuğunda akma mukavemeti 537,703 N/mm<sup>2</sup>, çekme mukavemeti 757,380 N/mm<sup>2</sup>; su verilmiş ve temperlenmiş çekme numunesinde ise akma mukavemeti 740,492 N/mm<sup>2</sup>, çekme mukavemeti 847,863 N/mm<sup>2</sup> bulunmuştur.

Kriyojenik işlem yapılan numunelerden yapılan metalografik taramada, 24 saat derin kriyojenik işlem görmüş numuneler en az kalıntı östenit yapısına sahip numuneler olmuştur. 500X büyütmede yapılan metalografik taramada diğerlerine nazaran daha iğnesel martenzit yapısı gözlemlenmiştir. 36 saat yapılan kriyojenik işlemde parça içerisindeki sementit fazının çözüldüğü, daha homojen bir yapı elde edilmiştir. Çekme sonuçları karşılaştırıldığında 24 saat kriyojenik işlem yapılan numuneler en yüksek akma ve çekme mukavemetini vermiştir. En düşük akma ve çekme değeri 36 saat kriyojenik işlem uygulanan numunede gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak yapıdaki karbür fazlarının çözülmesi, tane sınırlarındaki mukavemet arttırıcı etkisinin azalmasına bağlanmıştır. Sertlik testi sonuçlarına bakıldığında ise en yüksek sertlik 36 saat kriyojenik işlemli numunelerde gözlemlenmiştir. Genel olarak yüzeyden içeri doğru 1mm aralıklar ile yapılan sertlik tarama ortalamalarına bakıldığında, kriyojenik işlem süresi arttıkça sertliğin arttığı gözlemlenmiş, ancak bu artış çok fazla miktarda olmamıştır. Yüzeyden yapılan sertlik taramasında ise 36 saat kriyojenik işlem yapılan numuneler, sadece su verilmiş ve temperlenmiş numunelerden 60 HV1 daha fazla sertlik vermiştir.

Yapılan yorulma testlerinde dövme sonrası herhangi bir ısıl işlem yapılmamış numuneler çevrim sayısı olarak 12000 çevrimde kırılmıştır. Su verme ve temperleme yapılan numuneler ise 100000 çevrimde kırılmıştır.



## 10.SONUÇ VE ÖNERİLER

Kriyojenik işlem, parçaların kademeli olarak  $-196^{\circ}\text{C}$ 'ye varan sıcaklıklara soğutularak uygulaması yapılan, genellikle aşınma direncini artırıcı özellikleri için tercih edilen bir işlem türüdür. Literatür araştırması yapıldığında gözlemlenen; genellikle takım çelikleri için aşınma uygulamaları olarak incelemeler yapıldığıdır. Bu çalışma ile amaç; düşük alaşımlı ve ötektoid altı SAE 4032 çeliğinde sertlik, mukavemet, servis koşullarında kullanım ömrüne etkisini incelemek olmuştur.

Çalışmalarımızda 5 farklı tip numune kullanılmıştır. 12,24,36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numuneler ile su verilmiş ve temperlenmiş numuneler ve sadece dövme sonucunda hazırlanmış numuneler kullanılmıştır. Kriyojenik işlemler  $-196^{\circ}\text{C}$ 'de kriyojenik işleme maruz bırakılarak derin kriyojenik işlem yapılmıştır.

Yapılan çalışmalarda sertlik kontrollerinde, parçalara uygulanan kriyojenik işlem sonrasında sertlikte önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu durum yapılan literatür araştırmasında gözlemlenen sonuçlar ile paralellik göstermektedir. S. Zhirafar, A. Rezaeian, M. Pugh; Sae 4032 çeliği için kriyojenik işlem uygulamış ve işlemin mekanik özelliklere etkilerini incelemiş ve yaptıkları kriyojenik işlemde, sertlik değişiminin önemli oranda olmadığını gözlemlemiştir.

Bu az miktardaki sertlik değişimini sertlik değişimini kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi sonucu oluşan sert fazın etkisi olarak yorumlamışlardır. Yaptıkları nötron difraktömetre ölçümlerinde; geleneksel su verme ile %94 martenzit fazı elde ederken, kriyojenik işlemde bu oran %97'dir. Oluşan bu az miktardaki sertlik değişimini bu şekilde açıklamışlardır.

M.Preciado cd. (2005) ekibi ile yüksek alaşımlı ve karbürleşmiş çeliklere yaptığı kriyojenik işlemde, sertlikte kayda değer bir artış gözlemlenmemiştir. Temperleme sıcaklığı

arttıkça sertliğin düştüğünü deneysel olarak göstermişler, bu durumu kriyojenik işlem yaparak nasıl bir değişim olacağı ile ilgili çalışma yapmışlardır. 200°C’de temperleme yaptıktan sonra yapılan derin kriyojenik işlem ile sertliğin arttığını gözlemlemişler, bu sertlik artışının ise kalıntı östenitin martenzite dönüşümü ile değil; tane sınırlarında oluşan nano boyutta karbürler sebebi ile olduğunu belirtmişlerdir.

Yapılan çalışmada SAE 4032 çeliğine uygulanan kriyojenik işlemde de sertlikte kayda değer bir gelişim gözlemlenmemiştir. Mikroyapılara bakıldığında 12 ve 24 saat yapılan kriyojenik işlem sonrasında çeliğin tane boyutu küçülmüş ve martenzit yapısı incelmış ancak 24 saat yapılan kriyojenik işlem sonrasında tekrar taneler büyümeye başlamıştır. Sertlikteki ufak değişim yukarıdaki çalışmalar ile paralel olarak bu şekilde açıklanmıştır.

Numunelere yapılan çekme testi sonuçlarına göre en yüksek çekme mukavemeti 24 saat kriyojenik işlem yapılan numunelerde elde edilmiştir. İşlem süresi 36 saate çıktıkça çekme mukavemetinin düştüğü gözlemlenmiştir. Parçaların mikroyapılarına bakıldığında 36 saat kriyojenik işlem yapılan numunelerde martenzit lamellerinin büyüdüğü ve kabalaşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Bahsedilen çekme mukavemetindeki düşüş yaklaşık 30 N/mm<sup>2</sup> dir ve çalışmalarımızda bulduğumuz bu veriler Sentilhumar cd., (2011) çalışmalarında elde edilenlere yakındır.

Fren disklerinde yük aktarıcı olarak çalışan levye parçalar derin kriyojenik işlem sonucunda kullanım testine sokulmuş ve kullanım ömürlerindeki değişim incelenmiştir. Fren sistemi üzerinde tekrarlı yüke maruz bırakılarak yapılan testlerde kriyojenik işlemin; sadece su verilmiş ve temperlenmiş numunelere göre daha az süreli kullanım ömrü verdiği gözlemlenmiştir. Sadece su verilmiş ve temperlenmiş parçaların kullanım ömrü 100000 çevrim olurken, kriyojenik işlem görmüş numuneler ise; 12 saat kriyojenik işlemlile 45000 çevrim, 24 saat kriyojenik işlemlile numuneler 60000 çevrim, 36 saat kriyojenik işlemlile numuneler ise 49000 çevrim kullanım göstermiştir.

Zhirafar cd. (2006) SAE 4340 çeliği için yaptığı çalışmalarda, kriyojenik işlemin yorulma direncine olan etkisini incelemiştir. Bu çalışmaları yaparken temperleme sıcaklığının etkisinde beraber irdelenmiştir. Çalışmalarında kriyojenik işlemin yorulma direncine ufak bir iyileşme oluşturduğunu gözlemlemiş, kriyojenik işlem sonrasında 200°C'de temperleme yapılan numunelerin, 455°C'de temperlenen numunelere göre daha yüksek yorulma direnci gösterdiğini tespit etmiştir. Bu durumu sertliğin artması ile yorulma direncinin arttığı şeklinde açıklamıştır ancak sertlik artışının çok yüksek olmadığı için yorulmaya etkisinin de fazla olmadığı olarak tanımlamıştır.

SAE 4032 çeliğinde mikroyapılar ve sertlikler incelendiğinde; Kriyojenik işlemde kalıntı östenit fazının martenzite dönüştüğü için parçanın tekrarlı yük ile çalıştığında servis ömrünün düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum Zhirafar cd. (2006) çalışmalarında tespit ettiğinin aksine parçanın daha erken kırıldığı olarak test sonrasında anlaşılmıştır. 36 saat yapılan kriyojenik işlem sonrasında tane boyutunun daha büyük ve sertliklerin daha yüksek olmasına rağmen erken kırıldığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında kriyojenik işlem uygulanan SAE 4032 çeliğinde sertliklerde ve çekme mukavemetinde önemli bir iyileşme gözlemlenmemiştir. Fren sistemi üzerinde SAE 4032 çeliğinden imal edilen levye, test edildiğinde tekrarlı yük ile servis koşullarında kullanım süresi düşmüştür. Bu alanda çalışma yapmayı düşünen araştırmacılar; kriyojenik işlem sonrası yapılan temperleme sıcaklığı parametresini farklı varyasyonlarda deneyerek, parçanın mekanik özelliklerinde yaşanacak değişimi takip edebilirler. Kullandıkları çeliğin karbon miktarını sabit tutarak karbür yapıcı elementlerin ilavesi ile oluşacak karbürlerin sertliğe olan etkilerini irdelenebilirler. Farklı sürelerde yapılan kriyojenik işlemin kalıntı östenit oranını tespit ederek parçanın yorulma ve aşınma direncini inceleyebilirler.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

Otomobil Distribütörleri Derneği, Genel Değerlendirme, Ocak 2018

Çelik ihratçatçıları birliği, 2017

<http://www.cib.org.tr/tr/istatistikler.html>

Çetin A., Çeliklerde Alaşım Elementlerinin Etkileri, 2017

<https://dokumhane.net/2017/01/25/celiklerde-alasim-elementlerinin-etkileri/>

Classification of Carbon and Low carbon steels, Total Materia., 2011

<http://www.totalmateria.com/articles/Art62.htm>

ASM Handbooks Volume 1; Speciality Steels and High Resisdance Alloys, 1764-2249

Heat Treating, ASM Metal Handbook Volume 4, 15

Metallography, Structures, and Phase Diagrams, Vol 8, Metals Handbook, 8th ed.,  
American Society for Metals, 1973

K-E. Thelning, Steel and its heat treatment, 217-305, 1967

Heat Treatment of Ferrous Alloys, DIN 17022-1, 1994

G.Krauss, A.R.Marder, The morphology of Martensite in Iron Alloys, Metallurgical and  
Materials Transactions, 1970

P.I.Patil., R.G.Tated, Comparison of Effects of Cryogenic Treatment on Different Types of  
Steels: A Review, 2012

Barron, R., F., Mulhern, C., 1980, Cryogenic treatment of AISI-T8 and C1045 steels,  
Advances in Cryogenic Engineering Materials, 26, 171-179.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

T.L Anderson, Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications, 2005

Peggy C. Miedlar, Alan P. Berens, Allan Gunderson, and J.P. Gallagher, Damage Tolerent Design Handbook, Fracture Mechanics Fundamentals, 1979

A.F.Liu, Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction; Equivalent Stress and Equivalent Strain.,30-58 2005

Bauer, H., Automotive Brake Systems, Robert Bosch GmbH, 1995

M.Koneshlou, K.M.Ashl ve F. Homamizadeh, Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel, 2010

S. Zhirafar, A. Rezaeian, M. Pugha, Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel, 2006

A.Molinari, M.Pelizzari, S.Gianella, G.Straffellini, K.H.Stiasni, Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steel, 2001

M. Pérez, C. Rodríguez, F. J. Belzunce, The use of cryogenic thermal treatments to increase the fracture toughness of a hot work tool steel used to make forging dies, 2014

M.Uzun, Kriyojenik İşlem Görmüş Soğuk İş Takım Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi, 2014

G. Höke, İ.Şahin, Ç.Henifi, T. Fındık, Kriyojenik işlemin SAE 4140 çeliğinin mekanik özellikler üzerine etkisi, Selçuk Teknik Dergisi, Cilt 13:2 (2014), 25-37

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

C.M.Akın, Kriyojenik İşlemin Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Aşınma Davranışına Etkisi, 2015

Kara F., AISI 52100 çeliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması, 2014

B.Köylüoğlu, Sürtünme Kaynağı Yapılmış SAE 8620 Çeliğinde Kriyojeni ve Sementasyon İşleminin Malzeme Üzerindeki Etkileri, 2014

H.Liu, J.Wang, B.Shen, H.Yang, S.Gao, S.Huang Effects of deep cryogenic treatment on property of high chromium cast iron, 2005