



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR MOTOR BLOKLARINDA GERİLİM
GİDERME TAV SÜRESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE VE İŞLETME
MALİYETLERİNE ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FURKAN ÜSTÜN

DANIŞMAN: DOÇ. DR. Ali KALYON

**YALOVA
ARALIK 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR MOTOR BLOKLARINDA GERİLİM
GİDERME TAV SÜRESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE VE İŞLETME
MALİYETLERİNE ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan ÜSTÜN
248113002

TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. Ali KALYON

YALOVA
ARALIK 2025

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün **248113002** numaralı Yüksek Lisans öğrencisi **FURKAN ÜSTÜN** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR MOTOR BLOKLARINDA GERİLİM GİDERME TAV SÜRESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE VE İŞLETME MALİYETLERİNE ETKİLERİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde sunmuş ve oy birliği/oy çokluğu ile başarılı bulunmuştur.

İmza / **Kanaati**
(Kabul/Red)

Doç. Dr. Ali KALYON
Danışman, Yalova Üniversitesi

..... /

Prof. Dr. Muammer GAVAS
Jüri Üyesi, Yalova Üniversitesi

..... /

Prof. Dr. Yakup KAYA
Jüri Üyesi, Karabük Üniversitesi

..... /

Tez Savunma Tarihi: 04.12.2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “Lamel Grafitli Dökme Demir Motor Bloklarında Gerilim Giderme Tav Süresinin Mekanik Özelliklere ve İşletme Maliyetlerine Etkileri” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Furkan ÜSTÜN



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Doç. Dr. Ali KALYON'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Ayrıca her zaman yanımda oldukları ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemedikleri için aileme teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince, Döktaş Dökümcülük AŞ, laboratuvar olanakları, ölçüm ve analiz cihazları, üretim süreçlerine dair gözlem ve veri toplama imkânları ile çalışmama büyük katkı sağlamıştır. Başta Ar-Ge ve kalite kontrol birimleri olmak üzere, çeşitli birimlerde görevli tüm çalışanların desteği ve sağladıkları teknik bilgi sayesinde, araştırma sürecim daha verimli ve sistematik bir şekilde ilerlemiştir. Bu süreçte sağlanan altyapı, donanım ve tecrübe paylaşımı, çalışmanın bilimsel niteliğini artırmada önemli rol oynamıştır. Sunduğu tüm imkânlar ve göstermiş olduğu iş birliği için Döktaş Dökümcülük AŞ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Aralık – 2025

Furkan ÜSTÜN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN.....	i
ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1.GİRİŞ.....	1
2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3.DÖKME DEMİRLER.....	7
3.1. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması.....	8
3.1.1. Lamel grafitli dökme demir.....	10
3.1.2. Küresel grafitli dökme demir	11
3.1.3. Beyaz dökme demir.....	13
3.1.4. Temper dökme demirler	13
3.1.5. Vermiküler dökme demir	14
3.1.6. Kimyasal kompozisyonuna göre dökme demirler.....	15
3.2 Lamel Grafitli Gri Dökme Demirin Genel Özellikleri.....	16
3.2.1. Katılma sırasında grafikleşme.....	17
3.2.2. Gri dökme demirde bulunan alaşım elementleri	18
3.2.3. Gri dökme demirin mikroyapısı	19
3.2.4. Gri dökme demirin mekanik özellikleri ve kullanım alanları	20
3.2.5. Motor blok malzeme seçimi	23
3.3. Gri Dökme Demirlerin Isıl İşlemleri	24
3.3.1. Tavlama (Yumuşatma) ısıl işlemi	26
3.3.2. Normalizasyon	31
3.3.3. Su verme ve ıslah işlemi (Temperleme).....	32
3.3.4. Östemperleme.....	34
3.3.5. Martemperleme	35
3.3.6. Alev ile sertleştirme	35
3.3.7. İndüksiyonla yüzey sertleştirme	37
3.3.8. Gerilme giderme tavlı.....	37

4.DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	45
4.1. Deneysel Çalışmaların Planlanması	45
4.2. Deneysel Numunelerin Hazırlanması.....	45
4.3. Motor Blokların Üretilmesi (Deneysel Numunelerin Üretimi).....	46
4.3.1. Sıvı metalin ergitilmesi	48
4.3.2. Döküm prosesi.....	50
4.3.3. Temizleme taşıma proseleri	51
4.4. Isıl İşlem ve Tav Fırını Özellikleri	52
4.5. Laboratuvar Testlerinde Kullanılan Cihazlar	55
4.5.1. Boyutsal ölçüm kontrolü	55
4.5.2. Çekme testi	55
4.5.3. Sertlik testi.....	56
4.5.4. Kimyasal analiz ölçümü	56
4.5.5. Mikroyapı analizi	57
4.5.6. Artık (Kalıntı) gerilme ölçümü	57
5.MEKANİK TESTLERİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ.....	60
5.1. Çekme Testi.....	60
5.2. Sertlik Testi	61
5.3. Boyutsal Ölçüm.....	62
5.4. Mikroyapı Analizi	62
5.5. Kalıntı Gerilim Ölçümü	62
6.BULGULAR VE TARTIŞMA.....	68
6.1. Test Sonuçları.....	70
6.1.1. Boyutsal ölçüm sonuçları	70
6.1.2. Kimyasal analiz sonuçları	71
6.1.3. Mikroyapı analiz sonuçları	72
6.1.4. Çekme test sonuçları	73
6.1.5. Sertlik ölçüm sonuçları.....	75
6.1.6.Kalıntı gerilim ölçüm sonuçları.....	75
6.1.7. Isıl işlem maliyetleri.....	81
7.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	87

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

°C	: Santigrat derece
°F	: Fahrenheit derecesi
h	: Saat
kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
Mm	: Megametre
sn	: Saniye
µm	: Mikrometre
mm ²	: Milimetrekaare
E	: Elastik modülü
σ	: Kalıntı gerilme
ε	: Kalıntı gerinim
HB	: Brinel sertlik
N	: Newton
MPa	: Megapascal
GPa	: Gigapascal
İn.	: İnç
Ra	: Ortalama pürüzlülük
ksi	: Bin pound/inç ²
lb	: Pound
MW	: Megawatt

KISALTMALAR

ASTM	: Amerika Test ve Materyalleri Topluluğu
AFS	: Amerikan Dökümcülük Derneği
BDD	: Beyaz Dökme Demir
CE	: Karbon Eşdeğeri
ÇDD	: Çelik Dökme Demir
DKP	: Derin Çekme Pres
DIN	: Alman Standardizasyon Enstitüsü
EN	: Avrupa Standartı
GDD	: Gri Dökme Demir
KGDD	: Küresel Grafitli Dökme Demir
TDD	: Temper Dökme Demir
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TNC	: Sayısal Kontrol Üniteli
ZSD	: Zaman Sıcaklık Dönüşüm

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Dökme demirlerin ticari isimlerine, mikroyapılarına ve kırılmayüzeylerin göre sınıflandırılması.....	9
Tablo 3.2. Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan dökme demir türlerinin genel kimyasal bileşim aralıkları.....	12
Tablo 3.3. DIN-EN 1561 standartına göre gri dökme demirlerin kimyasal kompozisyonları	16
Tablo 3.4. Küresel grafitli dökme demir (KGDD); Gri dökme demir (GDD); Temper dökme demir (TDD); Beyaz dökme demir (BDD) ve Çelik döküm (ÇD) arasındaki çeşitli özelliklerin karşılaştırılması	22
Tablo 3.5. TS EN 1561 numaralı standarda göre özellikler ve dünya standartlarına göre gösterimi.....	23
Tablo 3.6. Gri dökme demirin özelliklerinin motor blok üzerinde mekaniksel özellikleri.....	23
Tablo 3.7. Gerilim giderme uygulanan A,B,C,D malzemelerinin kimyasal bileşimi	41
Tablo 3.8. Gri dökme demirlerdeki % Cr miktarına bağlı olarak tavsiye edilen tavlama sıcaklıkları	41
Tablo 3.9. Gerilim giderme uygulanan A,B,C,D,E malzemelerinin kimyasal bileşimi	42
Tablo 3.10. 225 kg (500 lb) dizel motor silindir bloklarındaki kalıntı gerilim üzerinde kalıp bozma ve gerilim gidermenin uygulamasının etkisi.....	44
Tablo 4.1. Motor bloğun kimyasal bileşimi.....	45
Tablo 4.2. Hurda saç kimyasal analiz	48
Tablo 4.3. Geri döngü yolu kimyasal analizi.....	49
Tablo 4.4. Gri piki kimyasal analizi	49
Tablo 4.5. Superseed 75 aşılama kimyasal analizi.....	49
Tablo 4.6. Tav fırını özellikleri	54
Tablo 5.1. DIN 50125 standardına göre çekme çubukları ölçüleri	61
Tablo 6.1. Coord 3 CMM cihazında 10 saat ve 15 saat tav sonrası boyutsal ölçüm sonuçları	71
Tablo 6.2. Motor blokların kimyasal analizi	72
Tablo 6.3. Kep bölgelerinde alınan numunelerin çekme test sonuçları	74
Tablo 6.4. 10 saat ve 15 saat ısıtma işlem uygulanan bloklarda sertlik ölçüm değerleri.....	75
Tablo 6.5. Çekme testinden ölçülen mekanik özellikler.....	76
Tablo 6.6. 10 saat gerilim giderme işlemi sonrası ölçüm sonuçları	78
Tablo 6.7. 15 saat gerilim giderme işlemi sonrası ölçüm sonuçları	80
Tablo 6.8. 10 saat ve 15 saat gerilim giderme tavlama sonrası kalıntı gerilmelerin karşılaştırması	80

Tablo 6.9. 15 saat gerilim giderme ısıtıl işleminin 10 saat gerilim giderme işlemine göre fark maliyet hesabı ve birim parça maliyet hesabına etkisi.....	82
--	----



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Demir-Karbon Denge Diyagramı	7
Şekil 3.2.	Ticari dökme demirlere ait kimyasal bileşim aralığı ve farklı ısı işlemler ile elde edilen mikroyapıların şematik olarak gösterimi	9
Şekil 3.3.	Lamel grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı.....	10
Şekil 3.4.	(a) Çelik (b) gri dökme demirin titreşim sönümlene kapasitelerinin karşılaştırılması	11
Şekil 3.5.	Grade 80-55-06 perlitik küresel grafitli dökme demir. Grafit nodüllerinin etrafı ferrit fazı tarafından sarılmış. (%3 nital dağılayıcı, 100x büyütme).....	12
Şekil 3.6.	Beyaz dökme demire ait mikroyapı fotoğrafı. Açık renkli bölgeler sementit, koyu renkli bölgeler ise perlit.....	13
Şekil 3.7.	İki aşamalı tavlama (4 saat 954 °C’de tutma ve 6 saatte 704 °C’ye soğutma) ile üretilen ferritik matrisli temper grafitli dökme demire ait mikroyapı Beyaz bölgeler ferrit fazı, koyu bölgeler ise temper grafitler.	14
Şekil 3.8.	Vermiküler grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı.	15
Şekil 3.9.	Karbon eşdeğeri- Sıcak diyagramı	15
Şekil 3.10.	Gri dökme demir mikroyapısı	16
Şekil 3.11.	ASTM ve AFS gri dökme demirde grafit lamel tipleri.	17
Şekil 3.12.	Demir-karbon faz diyagramı.	18
Şekil 3.13.	Gri dökme demirin yapı bileşenleri.....	19
Şekil 3.14.	Dökme demirlere uygulanan ısı işlemlerden bazıları.....	24
Şekil 3.15.	Silisyum miktarıyla ötektoid sıcaklığının ve dönüşüm aralığının değişimi	25
Şekil 3.16.	Sınıf 30 gri demirin çekme dayanımına tavlamanın etkisi.....	26
Şekil 3.17.	Lamel grafitli bir dökme demirde yumuşatma tavı sıcaklığının sertliğe etkisi	27
Şekil 3.18.	Alaşımsız ve alaşımlı lamel grafitli dökme demirlerde bir saatlik bir yumuşatma tavının Brinell sertliğine etkisi.....	28
Şekil 3.19.	Alaşımsız gri demirin döküm halindeki perlitik yapısının tavlama yoluyla ferrit ve grafit dönüştürülmesi.(a) Döküldüğü gibi;180 HB.(b) 760 °C'de 1 saat tavllanmış;120 HB. (Büyütme, 500×).	29
Şekil 3.20.	Dökme demirlerin normalizasyon ısı işleminin şematik gösterimi.....	31
Şekil 3.21.	Zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramları ve bazı ısı işlemlere ait soğuma eğrileri ; 1 : su verme, 2 : perlitleme, 3: ostemperleme.	33
Şekil 3.22.	Su vermenin ve temperlemenin alaşım bileşiğine sertlikle ilgili etkileri sonuçlar aynı sertlik aralığında ostenize edilmeden önce sertlik ve 850°C’den yağda su verilmek için normalleştirilmiştir.	35
Şekil 3.23.	Gri dökme demirin alevle sertleştirilmesiyle üretilen tipik sertleşme profili.....	36
Şekil 3.24.	25,35 ve 50 sınıflarındaki gri demirlerin çekme dayanımları ve sertlik üzerindeki etkileri.Toplam fırın süresi 43*3/4 saat 650°C’de 6 saat gerilim giderme tavı uygulandı.	38

Şekil 3.25. Lamel grafitli dökme demirlerde tav sıcaklığıyla gerilme giderme yüzdesinin değişimi.	39
Şekil 3.26. Gri demirde gerilim giderme sıcaklığı ve süresinin kalıntı gerilime etkisi. Demir bileşimi: 2,72% C, 1,97% Si, 0,141% P, 0,080% S, 0,51% Mn.	39
Şekil 3.27. Tavlama sıcaklığının alaşımlı ve alaşımsız gri dökme demirlere sertlik açısından etkileri 30 mm çapındaki çubuk numuneler belirtilen sıcaklıklarda 1 saat tutuldu ve ardından havada soğutulmuştur.	40
Şekil 3.28. Farklı kimyasal bileşime sahip dökme demir malzemelerin farklı sıcaklıklarda gerilim giderme tavlama değerlendirmesi.	42
Şekil 3.29. Alaşımsız lamel grafitli bir dökme demirde tutma süresinin gerilme gidermeye etkisi.	43
Şekil 4.1. Motor Blok	46
Şekil 4.2. Motor bloğun derece ve yolluk görseli.....	46
Şekil 4.3. Motor blokların kalıplanma öncesi model görüntüsü.....	47
Şekil 4.4. Maça ve Filtreler yerleştirildikten sonraki görüntüsü	47
Şekil 4.5. 14 ton kapasiteli indüksiyon ocağı	48
Şekil 4.6. Şarj malzemesi olarak kullanılan DKP sac (solda) ve gri piki (sağda).	48
Şekil 4.7. Künkel Wagner döküm potası.....	49
Şekil 4.8. Curüf temizleme istasyonu.	50
Şekil 4.9. Spektro numune alma – karbon-kükürt numune alma – çil ölçümü numune alma.	50
Şekil 4.10. Pota döküm arabasına yerleştirilmiş döküm anı görseli.....	51
Şekil 4.11. Kalıp bozma bölgesinden konveyöre andromat yardımıyla parça yükleme	51
Şekil 4.12. Soldaki resim temizleme öncesi – sağdaki resim temizlenme sonrası görseller.	52
Şekil 4.13. Taşlanan motor blok görseli	52
Şekil 4.14. Palet üzerine alınmış motorların tav fırınına yüklenmiş görseli.	53
Şekil 4.15. 15 saat gerilim giderme ısıtma işlem grafiği.....	53
Şekil 4.16. 10 saat gerilim giderme ısıtma işlem grafiği.....	54
Şekil 4.17. Coord 3 CMM cihazı.....	55
Şekil 4.18. Shimadzu Çekme cihazı	55
Şekil 4.19. Reichert Marka Sertlik Ölçüm cihazı.....	56
Şekil 4.20. ARL 4460 Optik emisyon spektrometresi.....	56
Şekil 4.21. Nikon Optik Mikroskop	57
Şekil 4.22. Yüzey pürüzlülük boşluklarını doldurmak için sürülen M-Bond AE yapıştırıcı.	58
Şekil 4.23. Gerilim Ölçer Bölgeleri Görüntüsü	58
Şekil 4.24. Kalıntı gerilim ölçüm işlem görseli.....	59

Şekil 4.25. Kalıntı gerilim ölçüm veri toplama sistemi.....	59
Şekil 5.1. Parçadan çekme testi numune alma bölgeleri	60
Şekil 5.2. DIN standartlarına göre çekme testine göre numune görseli.	60
Şekil 5.3. Çekme çubukları teknik resmi.....	61
Şekil 5.4. Sertlik ölçümü yapılan bölgeler	61
Şekil 5.5. Nikon marka optik mikroskopla numunelerin mikroyapı incelemeleri	62
Şekil 5.6. Soldaki görsel bloğun ön görünüşü, sağdaki görsel bloğun üstten görünüşü	63
Şekil 5.7. Bloğun yandan görünüşleri	63
Şekil 5.8. Gerinim ölçerlerin 1.ve 2. Noktalarında yerleştirilme görüntüsü	64
Şekil 5.9. Gerinim ölçerlerin 3.ve 4. Noktalarında yerleştirilme görüntüsü	64
Şekil 5.10. Gerinim ölçerlerin 5.1,5.2,5.3,5.4,5.5,5.6 Noktalarında yerleştirilme görüntüsü	64
Şekil 5.11. Gerinim ölçerlerin 6.7.8.9 Noktalarında yerleştirilme görüntüsü	65
Şekil 5.12. TNC freze tezgahında test aşaması ve IMC programından veri alma görseli.....	65
Şekil 5.13. Yeterli kesme derinliği ve frezeleme işlemi esnasında kalıntı gerinim değerleri.....	66
Şekil 5.14. Test numunesi ve çekme testi esnasında yatay ve dikey yönler.....	67
Şekil 5.15. Doğrusal regresyon eğrisi ile elastik modül ve poisson oranının bulunması	67
Şekil 6.1. Coord 3 CMM cihazında boyutsal ölçüm değerlendirme bölgeleri	70
Şekil 6.2. 10.Saat tavllanmış dağlanmamış 100 X Büyütme, 10.Saat Tavllanmış dağlanmış görüntüsü	72
Şekil 6.3. 15 saat tavllanmış dağlanmamış 100 X Büyütme, 15 saat tavllanmış dağlanmış görüntüsü.....	73
Şekil 6.4. Shimadzu test cihazı örnek çekme test raporu	74
Şekil 6.5. 10 saat gerilim giderme sonrası SG1,SG2,SG3,SG4 noktalarının gerinim ölçer testi program çıktıları.	77
Şekil 6.6. 15 saat gerilim giderme sonrası SG 10 ve SG 5.3 noktalarında 2.test görseli.	78
Şekil 6.7. 15 saat gerilim giderme sonrası SG 5.2 ve SG 5.5 noktalarında 2.test görseli.	79
Şekil 6.8. 15 saat gerilim giderme ısıtıl işlemi sonrası SG 5.2, SG 5.3, SG 5.5, SG 10 noktalarının freze de işleme aşamasında IMC programından alınan veriler gösterilmiştir.....	79
Şekil 6.9. Belirlenen noktaların gerinim ölçer testinde freze işlemleri sonrası görselleri.....	81

LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR MOTOR BLOKLARINDA GERİLİM GİDERME TAV SÜRESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE VE İŞLETME MALİYETLERİNE ETKİLERİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, motor bloklarında uygulanan 10 ve 15 saatlik gerilim giderme ısıtma işlemlerinin boyutsal ölçümler, kimyasal analiz, mikroyapı, mekanik özellikler ve kalıntı gerilimler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Boyutsal ölçüm için TR20 CMM cihazı, kimyasal analiz için ARL 4460 optik emisyon spektrometresi, mikroyapı için Nikon marka optik mikroskop, sertlik ölçümü için Reichert marka 3 ton yük kapasiteli cihaz, çekme sonuçları için 250 kN kapasiteli ekstansometreli Shimadzu marka çekme cihazı ve kalıntı gerilimler için kesme/işleme uygulaması ile gerilim ölçer metodu kullanılmıştır.

Boyutsal ölçümler sonucu farklı ısıtma işlem reçetesi uygulanan parçaların birçok bölgesinde boyutsal farkların olmadığı bir kaç bölgede minimal farklar olduğu belirlenmiştir. Kimyasal analiz sonuçları EN GJL-250 standartlarına uygunluk göstermiştir. Mikroyapı incelemelerinde, her iki ısıtma işlemde de A tipi grafitlerin bulunduğu ve matrisin %99 perlitik yapıya sahip olduğu görülmüştür. 15 saatlik tavlama süresinin grafit parçacıklarının daha uzun, ince ve homojen dağıldığını ortaya koyduğu; böylece matris-grafit uyumunun artarak malzemenin sünekliğini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Çekme test sonuçları, 15 saatlik gerilim giderme işleminin malzemenin akma dayanımını ve kopma uzamasını hafifçe artırırken, çekme dayanımını ise büyük ölçüde değiştirmediğini göstermiştir. Sertlik ölçümleri ise 15 saatlik işlem sonrası hafif düşüş göstermiştir ki bu durum işlenebilirliği artırıcı bir etki olarak değerlendirilmiştir. Yapılan kalıntı gerilim ölçümleri, 15 saatlik gerilim giderme ısıtma işleminin özellikle yüksek gerilim içeren bölgelerde %40 ila %80 oranında kalıntı gerilim azalması sağladığını ortaya koymuştur. Bu azalma, motor bloğunun çatlama riski ve deformasyon eğilimini azaltarak termomekanik dayanıklılığını ve servis ömrünü artırmaktadır. Elde edilen sonuçlar, tav süresinin uzatılmasının iç gerilim giderimi açısından etkili bir yöntem olduğunu doğrulamaktadır.

Isıtma işlem süresinin 10 saatten 15 saate çıkarılmasıyla oluşan yıllık yaklaşık 26.273 Euro tutarındaki ek maliyetin detaylı analizine göre; bu farkın %64'ü doğalgaz tüketiminden (yaklaşık 16.949 Euro), %32'si işçilik maliyetlerinden (yaklaşık 8.400 Euro) ve yalnızca %4'ü elektrik enerjisi giderlerinden (yaklaşık 924 Euro) kaynaklanmaktadır. Isıtma işlem fırın kapasitesi dikkate alındığında, her tavlama döngüsünde yaklaşık 10–11 tonluk motor bloğu işlem görmektedir. Yıllık 28.000 adet üretim baz alındığında, bu ek maliyet parça başına yalnızca %0,4'lük bir artışa denk gelmektedir. Bu maliyet dağılımı, enerji ve iş gücü optimizasyonunun önemini vurgularken; elde edilen yapısal iyileştirmelerle birlikte değerlendirildiğinde, maliyet artışının kabul edilebilir düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Lamel grafitli dökme demir, Gerilim-giderme ısıtma işlemi, Mekanik özellikler, Kalıntı gerilmesi, Motor blok

EFFECT OF STRESS RELIEF ANNEALING TIME ON MECHANICAL PROPERTIES AND OPERATING COSTS IN LAMELLAR GRAPHITE CAST IRON ENGINE BLOCKS

ABSTRACT

In this thesis study, the effects of 10-hours and 15-hours stress-relief heat treatments applied to engine blocks were investigated in terms of dimensional measurements, chemical analysis, microstructure, mechanical properties, and residual stresses. For dimensional measurement, a TR20 CMM device was used; for chemical analysis, an ARL 4460 optical emission spectrometer; for microstructure analysis, a Nikon optical microscope; for hardness testing, a Reichert device with a 3-ton load capacity; for tensile testing, a Shimadzu tensile tester with a 250 kN capacity and extensometer; and for residual stress measurements, the strain gauge method via cutting/machining was applied.

As a result of the dimensional measurements, it was determined that there were no significant dimensional differences in most regions of the parts subjected to different heat treatment recipes, with only minimal differences observed in a few areas. The chemical analysis results were in compliance with EN GJL-250 standards. Microstructural examinations revealed the presence of Type A graphite in both heat treatment conditions and a matrix structure consisting of approximately 99% pearlite. It was observed that the 15-hour annealing process resulted in longer, thinner, and more homogeneously distributed graphite particles, thereby improving the matrix-graphite compatibility and enhancing the ductility of the material. Tensile test results indicated that the 15-hour stress relief process slightly increased the yield strength and elongation at break, while having minimal effect on the ultimate tensile strength. Hardness measurements showed a slight decrease after the 15-hour process, which can be considered a beneficial effect in terms of improved machinability. Residual stress measurements demonstrated that the 15-hour stress relief heat treatment reduced residual stresses by approximately 40% to 80% in regions with initially high stress levels. This reduction contributes to lowering the risk of cracking and deformation in the engine block, thereby enhancing its thermomechanical durability and service life. The findings confirm that extending the annealing duration is an effective method for relieving internal stresses.

According to a detailed analysis, increasing the heat treatment duration from 10 to 15 hours results in an additional annual cost of approximately €26,273, of which 64% (€16,949) is due to natural gas consumption, 32% (€8,400) to labor costs, and only 4% (€924) to electricity expenses. Considering the furnace capacity, approximately 10–11 tons of engine blocks are processed per annealing cycle. Based on an annual production volume of 28,000 units, this additional cost corresponds to only a 0.4% increase per part. This cost distribution highlights the importance of energy and labor optimization; however, when evaluated together with the structural improvements achieved, the cost increase is deemed acceptable.

Keywords: Lamellar graphite cast iron, Stress relief heat treatment, Mechanical properties, Residual stress, Engine block

1.GİRİŞ

Gri dökme demirler, özellikle otomotiv, makine ve enerji sektörlerinde yaygın olarak kullanılan metal alaşımlarıdır. Bu malzemeler; yüksek ısı iletkenliği, titreşim sönümleme kabiliyeti, işlenebilirlik kolaylığı ve düşük üretim maliyeti gibi avantajlar sunmaları nedeniyle motor bloğu, fren diskleri, silindir kafaları ve volan gibi kritik komponentlerin üretiminde tercih edilmektedir. Gri dökme demirin karakteristik yapısal özelliği olan lamel (pul şeklinde) grafit yapıları, termal genleşme ve çekme gerilmelerine karşı belirli ölçüde tolerans sağlayarak parçanın genel dayanıklılığına katkıda bulunur. Ancak bu lamel yapı, mekanik yükler altında çatlak başlatıcı görev görebileceğinden, mikroyapısal kontrol ve ısıl işlem optimizasyonu büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, doğru ısıl işlem reçetesi uygulanmadığı takdirde, gri dökme demirin avantajları istenilen performansa dönüşmeyebilir [1-3].

EN GJL-250 sınıfı lamel grafitli gri dökme demir, iyi mekanik dayanımı ve yüksek perlitik matris oranı nedeniyle özellikle motor bloğu üretiminde sıkça kullanılmaktadır. Ancak döküm işlemi sırasında yaşanan sıcaklık farklılıkları ve farklı kesit kalınlıklarının oluşturduğu soğuma farklılıkları, parça içerisinde dengesiz kalıntı (artık) gerilimler oluşmasına sebep olur. Bu kalıntı gerilimler, motor bloğu gibi sürekli termomekanik yüke maruz kalan parçalarda çatlak oluşumu, boyutsal sapmalar ve yorulma dayanımı düşüklüğü gibi ciddi problemlere yol açabilir. Örneğin, iç gerilimlerin yüksek olduğu bölgeler, özellikle montajdan sonra çalışma sırasında gerilme yığılmalarına zemin hazırlayarak zamanla yapısal hasarlara neden olabilir. Bu durum, hem üretim sırasında hem de kullanım ömrü boyunca kalite problemleri ve yüksek bakım maliyetleri anlamına gelmektedir. Bu nedenle, üretim sonrası uygulanan gerilim giderme işlemleri, hem parçanın güvenilirliği hem de servis ömrü açısından kritik bir adımdır [4-6].

Gerilim giderme ısıl işlemleri, özellikle döküm parçalarda iç yapıda oluşan gerilimleri azaltmak amacıyla yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu işlem genellikle, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda belirli bir süre bekletilmesi ve kontrollü bir şekilde soğutulması esasına dayanır. Isıl işlem sırasında oluşan atomik difüzyon ve matris gevşemesi, iç yapının daha dengeli hale gelmesini sağlar. Ancak bu sürecin etkinliği, tav sıcaklığı ve süresi gibi parametrelere doğrudan bağlıdır. Tav süresinin yetersiz olması durumunda, malzeme içerisindeki gerilimler tam anlamıyla giderilemezken, gereğinden fazla uzatılması hem enerji ve işçilik maliyetlerini artırır hem de üretim sürecini yavaşlatır. Bu nedenle, optimum süre ve sıcaklık parametrelerinin belirlenmesi hem teknik verimlilik hem de

maliyet etkinliği açısından önem taşır. Literatürde, uzun süreli ısıl işlemlerin özellikle kalın kesitli dökme demirlerde daha etkin gerilim giderimi sağladığı belirtilmiştir [7-10].

Bu bağlamda, bu çalışmada EN GJL-250 gri dökme demirden üretilmiş motor blokları üzerinde uygulanan 10 saatlik ve 15 saatlik gerilim giderme tavı işlemlerinin mekanik, mikroyapısal ve kalıntı gerilim özellikleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, tav süresinin artırılmasının kalıntı gerilimleri ne ölçüde etkilediğini tespit etmek, bunun yanında mikro yapıdaki değişimleri ve mekanik özelliklerdeki olası sapmaları değerlendirmektir. Uygulanan testler arasında çekme testleri, Brinell sertlik ölçümleri, mikroyapı analizleri (dağlanmış ve dağlanmamış numuneler üzerinden) ve hassas kalıntı gerilim ölçümleri yer almaktadır. Bununla birlikte, yapılan ısıl işlemlerin üretim sürecine getirdiği ek maliyetler de hesaplanarak ekonomik fizibilite analizi yapılmıştır.

Elde edilen test verilerine göre, 15 saatlik gerilim giderme tavı işleminin kalıntı gerilimleri %50 ile %80 oranında azalttığı, mikroyapıda daha homojen ve ince grafit yapılar elde edilmesini sağladığı ve bu iyileşmenin çatlak oluşumu potansiyelini azalttığı gözlemlenmiştir. Mekanik zellikler açısından ise, çekme dayanımı ve sertlik değerlerinde anlamlı bir fark oluşmadığı, bu da uzun süreli tavin malzeme mukavemetinde olumsuz bir etki yaratmadığını ortaya koymaktadır [28]. Diğer yandan, üretim maliyetlerine etkisinin parça başına yalnızca %0,4 gibi düşük bir oranda olduğu hesaplanmıştır. Bu fark, motor bloklarının ömür boyu performansı ve müşteri memnuniyeti üzerindeki olumlu etkiler dikkate alındığında göz ardı edilebilir düzeydedir. Özellikle yüksek güvenilirlik gerektiren motor parçaları için, bu tür yapısal iyileştirmeler uzun vadede daha az arıza, daha az bakım maliyeti ve daha fazla müşteri memnuniyeti anlamına gelmektedir. [11-16].

Sonuç olarak, bu çalışma hem akademik literatüre katkı sağlayacak nitelikte bilimsel veriler sunmakta, hem de otomotiv ve döküm sektörüne yönelik pratik öneriler geliştirmektedir. Özellikle motor blokları gibi yorulma dayanımı ve mikroyapısal kararlılık gerektiren parçalarda, ısıl işlem süresinin optimize edilmesiyle elde edilebilecek performans artışı, uzun vadeli işletme verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır [12]. Bu kapsamda, 15 saatlik gerilim giderme işleminin hem teknik hem de ekonomik açıdan uygulanabilir bir yöntem olduğu değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarla, benzer uygulamalarda ısıl işlem reçetelerinin yeniden gözden geçirilmesi gerektiğinin önemi vurgulanmış ve sanayiye yönelik stratejik kararlar için bilimsel bir temel sunması amaçlanmaktadır.

2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Lamel grafitli gri dökme demirler (EN GJL-250 gibi) otomotiv ve ağır sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olup, bu malzemelerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısal stabilitelerinin iyileştirilmesine yönelik ısıtılma işlem uygulamaları uzun yıllardır araştırma konusu olmuştur. Özellikle motor blokları gibi yüksek termomekanik gerilmelere maruz kalan bileşenlerde, üretim sonrası oluşan kalıntı gerilmelerin azaltılması, malzemenin hizmet ömrü ve yapısal güvenliği açısından kritik öneme sahiptir [4],[6],[12]. Literatürde, kalıntı gerilmelerin oluşumu, ölçülmesi ve giderilmesine yönelik kapsamlı çalışmalar bulunmaktadır.

Dökme demirlerde uygulanan gerilim giderme ısıtılma işlemleri üzerine yapılan çalışmalar, bu işlemin özellikle kalıntı gerilmeleri azaltma, mikroyapıyı stabilize etme ve çatlak oluşumunu engelleme açısından etkili olduğunu göstermektedir Smith [1]. Gerilim giderme işlemleri genellikle 500–700 °C aralığında gerçekleştirilmekte olup, işlem süresi ve soğuma hızı bu işlemlerin etkinliğinde belirleyici parametrelerdir [10].

Alipooramirabad ve Kianfar [2] tarafından yapılan çalışmada, motor blokları üzerinde kalıntı gerilme oluşum mekanizmaları detaylı bir şekilde ele alınmış ve çeşitli ölçüm teknikleri incelenmiştir. Bu çalışmada; döküm sırasında oluşan termal gradyanların, mikroyapısal dönüşümlerin ve mekanik yüklemelerin kalıntı gerilmeler üzerinde büyük etkisi olduğu vurgulanmıştır. Özellikle büyük ve karmaşık geometrilere sahip motor bloklarında, kalıntı gerilmelerin bölgesel olarak yüksek değerlere ulaşabildiği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca, X-ışını difraksiyonu, delik delme ve nöron difraksiyonu gibi yöntemlerle yapılan ölçümlerde, gerilim giderme işlemlerinin bu iç gerilmeleri etkin şekilde düşürdüğü ortaya konulmuştur [14]. Mevcut tez çalışmasında da benzer şekilde, 15 saatlik ısıtılma işlem süresinin, motor bloğu üzerindeki kalıntı gerilmeleri %50–80 oranında azalttığı ve bunun, daha homojen bir yapısal dağılım sağladığı görülmüştür.

Futas ve diğ. [3] tarafından yapılan çalışmada ise, kalıntı gerilmelerin azaltılması amacıyla mikroyapı mühendisliğinin önemi vurgulanmıştır. Özellikle Ti mikro alaşımlandırmasının sentetik dökme demirde iç gerilmeleri kontrol altına alma üzerindeki etkisi araştırılmış ve Ti ilavesinin grafit morfolojisini değiştirerek daha homojen bir yapıya yol açtığı ve dolayısıyla kalıntı gerilme dağılımını iyileştirdiği ortaya konulmuştur. Bu bağlamda, ısıtılma işlem ile birlikte mikroalaşım tekniklerinin sinerjik etkisi olduğu belirtilmiştir. Bu literatür sonucu, tez çalışmasında gözlemlenen grafit parçacıklarının daha düzenli, uzun ve ince morfolojiye dönüşmesinin kalıntı gerilmeleri azaltma üzerindeki etkisini destekler niteliktedir [16].

Marberg ve Pal [2] tarafından gerçekleştirilen deneylerde ise, üç farklı malzeme tipinden test numunesi için döküm parça üretilmiştir. Malzeme çeşitleri sırasıyla VIG-275/190, GJL-250 ve GJS-500-7'dir. Bu üç farklı malzemeye çeşitli gerilim giderme ısıtma işlem uygulamaları yapılmış ve sonuçları incelenmiştir. Kalıntı gerilmeleri azaltmada asıl etkili parametre olarak "bekleme süresi ve sıcaklık seviyesi öne çıkarılmıştır. Soğuma hızları üzerine yapılan analizlerde ise 400 °C'den sonra kontrollü soğumanın (örneğin 40 - 75 °C/saat gibi) ekstra anlamlı bir etki yaratmadığı, doğal soğuma ile benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Kritik sıcaklık eşiği olan 400 °C'nin altına indikten sonra, kalıntı gerilme oluşumuna katkı azalıyor. Optimum bir gerilim giderme uygulaması için 400°C'den sonra doğal soğutma uygulanmasının negatif etki yaratmayacağını belirtmiştir. Çalışmada, soğuma hızının gerilme azaltmaya olan etkisinin %5 -%10 seviyeleriyle sınırlı olduğu açıklanmıştır. Bunlara karşın bekleme süresi ve sıcaklığın gerilim azaltmada %80 - %90'a varan sonuçlar aldığını göstermiştir. Sonuç olarak soğuma hızının mutlak değil, tamamlayıcı bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır [11]. Bu noktada çalışmamızın sebebi çalışmalarda test parçası uygulamaları için farklı kalınlıkta numunelerin seçilmesidir. (Heat Treatment of Cast Irons) adlı teknik kaynakta, etkili bir gerilim giderme ısıtma işlemi için parça et kalınlığı arttıkça bekleme süresi artmalı ve soğutma hızı düşmesi gerektiği belirtilmiştir. Örneğin et kalınlığı > 50 mm ise; soğutma 50°C/h fırın içinde kontrollü, bekleme süresi 2,5 saat üzerinde olması gerektiğini vurgulamaktadır [8].

Bu çalışmada elde edilen bulgular, aynı tip malzeme ve ürün üzerinde yapılan deneylerde, kontrollü soğuma sürecinin 200°C altına kadar devam ettirilmesinin gerilim giderme etkinliğini artırdığı ve mekanik performans üzerinde olumlu katkılar sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, kalıntı gerilme optimizasyonunda soğuma hızlarının malzeme ve parça özelinde titizlikle belirlenmesi gerektiği, tek bir standart soğuma parametresinin tüm uygulamalara genellenmesinin mümkün olmadığı sonucu çıkarılmaktadır. Bu bağlamda, çalışmamız literatüre, soğuma parametrelerinin malzeme ve uygulama şartlarına göre optimize edilmesinin gerekliliğini vurgulayarak katkı sağlamaktadır ve ileride farklı alaşımlar ile çeşitli geometriye sahip parçalar üzerinde kapsamlı soğuma hızı parametrelerinin deneysel ve simülasyon temelli incelenmesi önerilmektedir.

Aran [1] tarafından sunulan Döküm Teknolojisi Seminer Notları kapsamında, gerilim giderme ısıtma işlem reçetelerinde soğuma hızı, malzemenin kalıntı gerilmelerinin minimize edilmesi ve mekanik özelliklerin korunması açısından kritik bir parametre olarak değerlendirilir. Aran'ın çalışmasında, döküm parçaların iç ve yüzey gerilmelerinin dengelenmesi için soğuma sürecinin kontrollü ve aşırı hızlı olmaması gerektiği vurgulanmıştır. Özellikle, hızlı soğuma gerilmelerin

düzensiz bir şekilde dağılımına ve termal şok kaynaklı çatlaklara yol açabileceği belirtilmiştir. Bu nedenle, gerilim giderme ısıtma işleminde soğuma hızının, malzemenin türüne ve parça geometrisine göre optimize edilmesi gerekmektedir. Soğuma hızının, malzemenin kristal yapısını ve mikro yapı dönüşümlerini olumsuz etkilememesi adına, kritik sıcaklık aralıklarında kontrollü ve yavaş bir soğuma tercih edilmelidir. Aran [1] ayrıca, özellikle döküm demir gibi kırılgan malzemelerde, doğal soğumaya bırakmanın avantajlarını öne çıkararak, ısıtma işlem sonrası ani sıcaklık değişimlerinin engellenmesini önermektedir. Sonuç olarak, Aran'ın değerlendirmesine göre, gerilim giderme ısıtma işlem reçetesinde soğuma hızı; parçanın termal ve mekanik dayanıklılığını sağlamak, iç gerilmeleri minimize etmek ve istenmeyen mikro yapısal deformasyonları önlemek için kontrollü ve yavaş olmalıdır. Bu analiz, mevcut literatürle karşılaştırıldığında, soğuma hızının malzeme özelinde dikkatle belirlenmesinin gerekliliği hususunu desteklemektedir [9].

Özetle, yapılan literatür araştırmaları; kalıntı gerilmelerin motor bloğu gibi kritik komponentlerde mekanik bütünlük ve yorulma dayanımı açısından doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, ısıtma işlem süresinin uzatılması, mikroyapının iyileştirilmesi ve soğuma hızının kontrol altına alınması gibi faktörlerin, kalıntı gerilmelerin azaltılmasında ve yapısal kararlılığın artırılmasında önemli rol oynadığı anlaşılmaktadır. Literatürde sunulan bulgular, bu tez çalışmasında elde edilen deneysel sonuçlarla büyük ölçüde örtüşmekte ve 15 saatlik gerilim giderme işleminin daha uygun bir yöntem olduğunu teyit etmektedir.

Isıtma işlemlerin teknik etkilerinin yanı sıra, ekonomik boyutları da göz önünde bulundurulması gereken önemli bir parametredir. Uzun süreli ısıtma işlemler, özellikle endüstriyel ölçekte uygulandığında enerji tüketimi, iş gücü maliyeti ve zaman kaybı açısından üretim sürecine doğrudan etki etmektedir. Literatürde yer alan birçok çalışmada ısıtma işlem süresinin minimumda tutulması yönünde optimizasyonlara gidildiği görülmektedir. Ancak, bu süreçlerde süreyi kısaltmak adına yapılan hızlı ısıtma veya soğutma işlemleri, mikroyapıda istenmeyen faz oluşumlarına veya yeni kalıntı gerilmelerin ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Bu durum, son ürünün performansını olumsuz etkileyerek uzun vadede daha yüksek bakım ve servis maliyetlerine yol açabilmektedir. Dolayısıyla, işlem süresi her ne kadar maliyet kalemini doğrudan etkileyen bir unsur olsa da, ürün kalitesinden taviz verilmeden, optimum süre-sıcaklık-soğuma dengesi kurulması önem arz etmektedir.

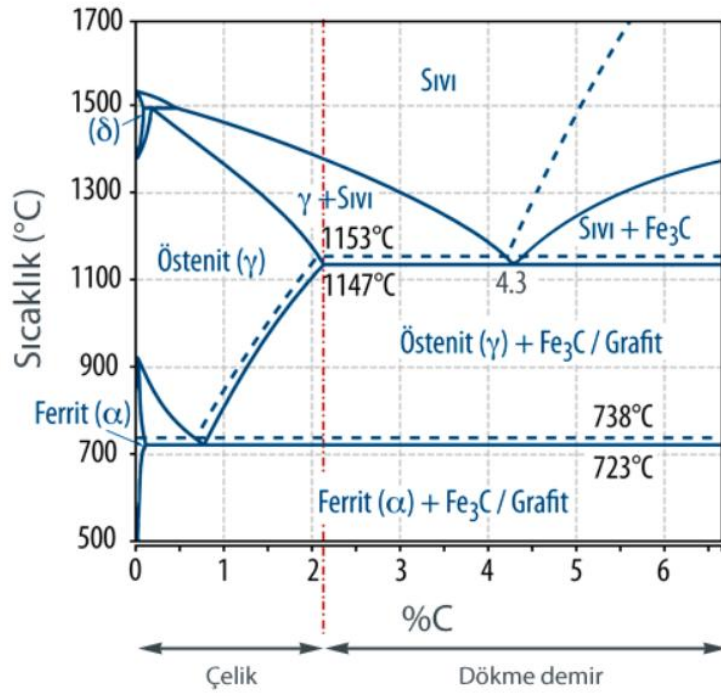
Tez kapsamında yapılan çalışmada tercih edilen 10 ve 15 saatlik tavlama süreleri, ilk bakışta enerji tüketimini artırıcı bir faktör gibi görünse de, motor bloğu gibi yüksek hacimli ve karmaşık yapıları döküm parçalarında iç gerilmelerin etkili bir şekilde giderilmesi ve mikroyapının

homojenleştirilmesi açısından avantaj sağlamaktadır. Bu da, parça servis ömrünün uzaması, işlenebilirliğinin artması ve üretim sonrası deformasyon ihtimalinin azalması gibi kazanımlar sağlayarak dolaylı maliyetleri düşürebilmektedir. Ayrıca, literatürde sık karşılaşılan ısıtma işlem reçetelerinden farklı olarak, uzun süreli tav işlemlerinin büyük hacimli parçalar için uygulanabilirliğini ve etkinliğini ortaya koyması açısından bu çalışma özgün bir katkı sunmaktadır.

Yukarıda özetlenen çalışmalar ışığında, bu tez çalışmasının literatüre katkısı; EN GJL-250 malzeme üzerinde farklı gerilim giderme süresi uygulamalarının kalıntı gerilimler üzerindeki etkisini detaylı olarak nicel verilerle analiz etmesi ve motor bloğu özelinde mikroyapısal iyileşmeyi net bir şekilde ortaya koymasındır. Ayrıca çalışmanın, üretim maliyetleriyle ilişkili olarak önerilen işlem süresinin endüstriyel uygulanabilirliğini de göz önünde bulundurması, literatürdeki boşlukları tamamlayıcı niteliktedir.

3.DÖKME DEMİRLER

Dökme demir, %2.11 ile %6.67 arası karbon içeren demir-karbon alaşımlarına verdiğimiz genel bir isimdir. Çelikler de demirin karbonla alaşımlanması sonucunda elde ediliyor, fakat dökme demirden farklı olarak çelikler çok daha düşük miktarda karbon içerirler (%2.11'den daha az)[17].



Şekil 3.1. Demir-Karbon Denge Diyagramı [17]

Dökme demirler her ne kadar demirin karbonla alaşımlanmasıyla elde ediliyor olsalar da, sanayide üretilen dökme demirlere baktığımızda, alaşım içinde karbona ek olarak mutlaka yaklaşık %1 ila %3 arasında silisyum olduğunu görürüz. Bu açıdan bakıldığında, sanayide üretilen dökme demirleri Fe-C-Si (demir, karbon ve silisyum) alaşımları olarak değerlendirmek daha doğru olmaktadır. Karbon ve silisyuma ek olarak, dökme demirlerde sıklıkla gördüğümüz diğer elementler arasında mangany ve az miktarda da olsa fosfor ve kükürtü de gösterebiliriz[17].

Dökme demirlerde karbonun katılma sırasında ayrışması mikro yapısında ayrı bir eleman olarak görülür. Bu ortaya çıkan karbonun oluşturduğu şekil ve biçim dökme demirin tipini belirlemekte ve dolayısıyla özelliklerine de etki etmektedir [18].

3.1. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Tarihsel olarak, dökme demirlere ait ilk sınıflandırma, dökme demirin kırılmasına dayandırılmıştır: Beyaz dökme demir; beyaz, kristalin bir kırılma yüzeyi gösterir çünkü kırılma demir karbür plakarı boyunca meydana gelir. Bu yarı kararlı katılaşmanın bir sonucudur. Gri dökme demir, grafit lamelleri boyunca kırılma meydana geldiği için gri bir kırılma yüzeyi sergiler. Bu durum kararlı katılaşmanın bir sonucudur. Metalografinin ortaya çıkmasıyla ve dökme demirler hakkındaki bilgi birikiminin artmasıyla beraber, mikroyapısal özelliklere bağlı olan diğer sınıflandırmalar mümkün hale gelmiştir. Grafit şekli: Lamel grafit, küresel grafit, vermiküler grafit ve temper grafit. Matris yapısı: Ferritik, perlitik, östenitik, martensitik ve beynitik (östemperlenmiş) [2],[19],[22].

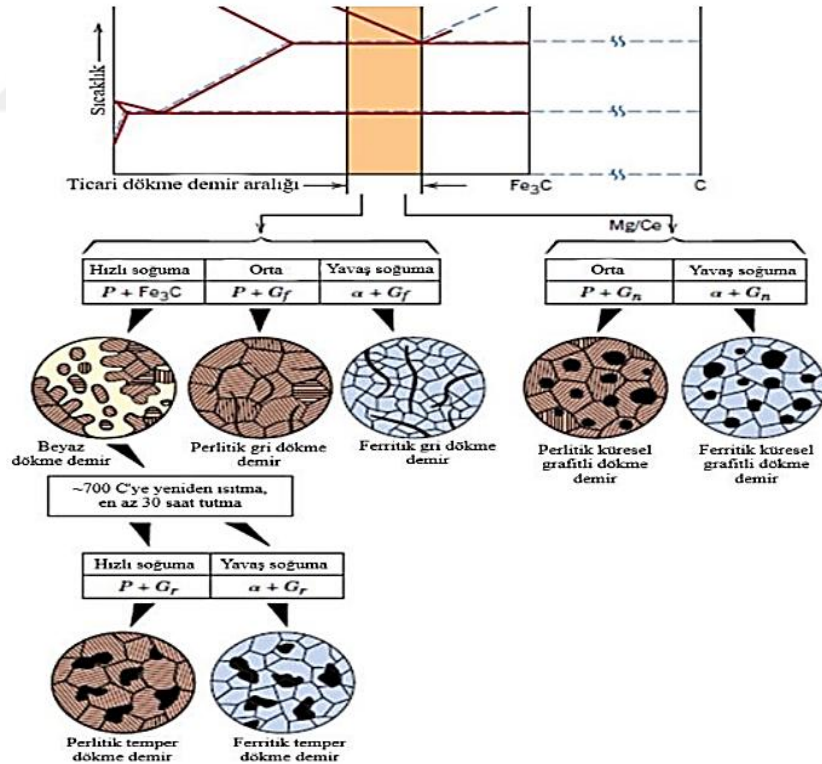
Başka bir yaygın sınıflandırma şeması, dökme demirleri beş temel türe ayırır. Bunlar; beyaz dökme demir, gri dökme demir, sünek dökme demir (küresel grafitli dökme demir, sfero), temper dökme demir ve kompakt grafitli (vermiküler) dökme demirdir. Daha önce de belirtildiği gibi beyaz dökme demir ve gri dökme demir, isimlerini kırılma yüzeylerinden alırlar. Sünek dökme demir ise ölçülebilir derecede süneklik sergilemesinden dolayı bu adı almıştır. Beyaz dökme demir ve gri dökme demir ise bir çekme testinde önemli derecede süneklik sergileyememektedir. Temper dökme demir ise beyaz dökme demir olarak dökülür ve ısıtılardan geçirilir. Vermiküler (kompakt) grafitli dökme demirdeki grafit yapısı ise gri dökme demir ve küresel grafitli dökme demirin yapıları arasındadır [22-23].

Bu beş temel dökme demir sınıflandırmasının yanı sıra, özel isimlerin kullandığı başka dökme demir formları da vardır. Çil uygulanmış dökme demir, katılaşma sıcaklık aralığında çok hızlı soğutulmuş üretilen beyaz dökme demirdir. Benekli (alacalı-mottled) dökme demir, soğuma hızına bağlı olarak beyaz dökme demir ve gri dökme demirin yapılarının beraber görüldüğü dökme demirlerdir. Yüksek alaşımlı grafit dökme demirler, mukavemet ve yüksek oksidasyon direnci gerektiren uygulamalarda kullanılır[19].

Tablo 3.1. Dökme demirlerin ticari isimlerine, mikroyapılarına ve kırılma yüzeylerine göre sınıflandırılması [19]

Ticari İsim	Karbon Bakımından Zengin Faz	Maktriks	Kırık Yüzeyi	Nihai Yapı
Gri Dökme Demir	Lamel grafit	Perlitik	Gri	Katılaşma sonrası
Sfero Dökme Demir	Küresel grafit	Ferritik, perlitik, ostenitik	Gümüş Gri	Katılaşma veya ısıtıl işlem sonrası
Vermiküler Dökme Demir	Yumru (kompakt) grafit	Ferritik, Perlitik	Gri	Katılaşma sonrası
Beyaz Dökme Demir	Fe_3C	Perlitik, Martenzitik	Beyaz	Katılaşma veya ısıtıl işlem sonrası
Benekli Dökme Demir	Lamel grafit + Fe_3C	Perlitik	Benekli	Katılaşma sonrası
Temper Dökme Demir	Temper grafit	Ferritik, Perlitik	Gümüş Gri	Isıl işlem sonrası
Osterlenmiş Sfero Dökme Demir	Küresel grafit	Östemperlenmiş (beynit)	Gümüş Gri	Isıl işlem sonrası

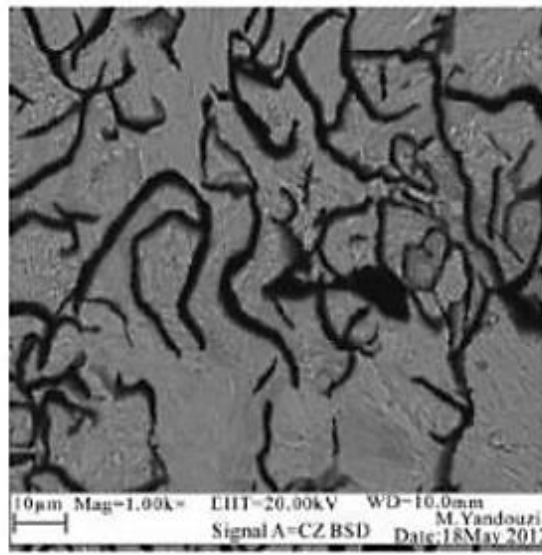
*Gerilim giderme ve ostenitik dönüşüm haricinde beyaz dökme demirlere ısıtıl işlem genelde uygulanmamaktadır.



Şekil 3.2. Ticari dökme demirlere ait kimyasal bileşim aralığı ve farklı ısıtıl işlemler ile elde edilen mikroyapıların şematik olarak gösterimi. (Gf, lamel grafit); (Gr, temper grafit); (Gn, küresel grafit); (P, perlit); (α, ferrit) [19]

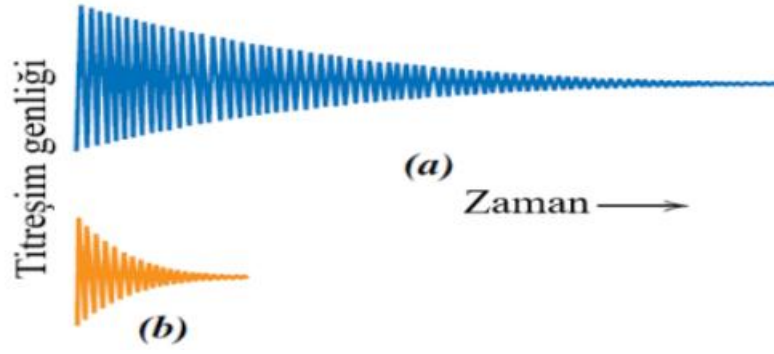
3.1.1. Lamel grafitli dökme demir

Alaşım içerisinde bulunan karbonların, katmanlı bir grafit yapısı oluşturacak şekilde katılaştığı dökme demir türüne lamel grafitli dökme demir denir. Lamel grafitli dökme demirlerde grafit yaprakları şeklinde ortaya çıkan grafitlerin hem yük taşıyan kesitlerin küçülmesi hem de çentik etkisi yaratmasından dolayı dayanımları düşüktür. Lamel grafitli dökme demirin mikroyapısı mikroskop altında incelendiğinde grafit yaprakları çok net şekilde görülmektedir. Lamel grafitli dökme demirlerin termal iletkenlik kat sayıları yüksektir. Bu sebepten dolayı motor blokların ve fren disklerin dökümünde tercih edilmektedirler [20]. Şekil 3.3’ de lamel grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Lamel grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı [20]

Gri dökme demirlerdeki karbon oranı ağırlıkça %2,5-4 ve silisyum oranı da %1-3 arasındadır. Alaşımındaki karbon, östenitte çözünebilen miktarı aştığında grafitler lamel olarak çöker. Bundan dolayı lamel grafitli dökme demirler olarak da adlandırılır. Grafit lamelleri, ferrit ve perlit matris içinde gömülü haldedir[3-4]. Gri dökme demirler, mekanik özellikler bakımından çekme gerilmeleri altında zayıf ve gevrek davranış gösterir. Bunun sebebi, çekme gerilmeleri uygulandığı zaman grafit lamellerinin keskin uçlarında gerilme yığılmaları oluşmasıdır. Bu malzemeler basma zorlamaları altında daha dayanıklıdır ve sünek davranış gösterirler. Gri dökme demirler, sahip oldukları bazı üstün özellikleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Gri dökme demirlerin aşınma dayanımları oldukça iyidir. Yüksek akışkanlıkları nedeniyle, ince kesitli parçaların döküm yoluyla üretilmesine avantaj sağlar. Döküm sonrasında katılaşma sırasında çekinti oluşması da nispeten azdır[22].

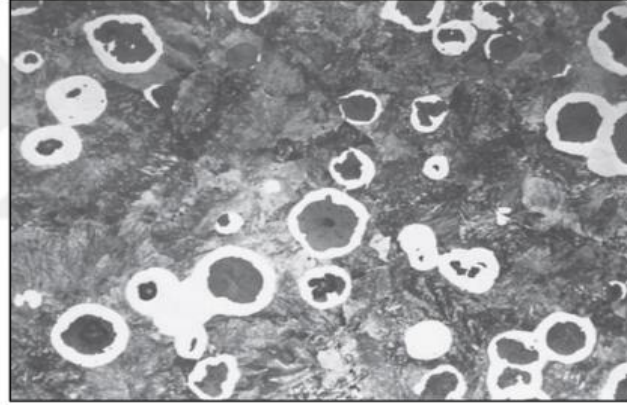


Şekil 3.4. (a) Çelik (b) gri dökme demirin titreşim sönümleme kapasitelerinin karşılaştırılması [19]

Şekil 3.4'den de görüleceği üzere gri dökme demirler titreşim enerjisini çok iyi sönümlenmektedirler. Titreşime maruz kalan ağır makine ve takım tezgahlarının gövdeleri ve şasileri gri dökme demirden yapılır. Bunlara ek olarak gri dökme demirler en ekonomik dökme demir türüdür [19].

3.1.2. Küresel grafitli dökme demir

Katılaşma esnasında karbonun küresel şekle sahip grafitler halinde meydana geldiği dökme demir türüdür. Grafitlerin küresel şekli alabilmeleri için sıvı metal magnezyum ile tretman işleminden geçirilmektedir. Bu işlem, grafitin yapraksı biçimde büyümesine neden olan oksijen ve kükürt miktarlarını düşürmek için uygulanmaktadır. Magnezyum, sadece oksijen ve kükürtle tepkimeye girebilen bir element olduğundan dolayı değil, aynı zamanda demirle herhangi bir bileşik oluşturmaması ve yüksek denge buhar basıncı sayesinde karıştırmaya gerek kalmadan sıvı içine kolaylıkla yayılabilmesi nedeniyle dökümhaneler tarafından tercih edilmektedir [20]. Şekil 3.5' de küresel grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Grade 80-55-06 perlitik küresel grafitli dökme demir. Grafit nodüllerinin etrafı ferrit fazı tarafından sarılmış. (%3 nital dağlayıcı, 100x büyütme) [19]

Küresel grafitli dökme demirlerin çekme dayanımları ve akma dayanımları lamel grafitli dökme demirlere göre daha yüksektir. Gri dökme demirlerde bulunan lamel grafitler çentik etkisine neden olduğu için, küresel grafitli dökme demirlerin darbe dirençleri lamel grafitli dökme demirlere göre daha yüksektir. Dökme demirlerde ısı iletimini sağlayan grafit fazıdır. Küresel grafitler lamel grafitlere göre daha az yüzey alanına sahip olduğu için, küresel grafitli dökme demirlerin ısı iletim katsayıları lamel grafitli dökme demirlere göre daha düşüktür.[20]

Alaşımsız küresel grafitli dökme demirin bileşimi, karbon ve silisyum bakımından gri dökme demire benzer.Tablo 3.2’de listelendiği gibi, küresel grafitli dökme demirin karbon içeriği %3-%4 arasında, silisyum içeriği ise %1,8-%2,8 arasında değişir. Yüksek kaliteli bir küresel grafitli dökme demir için kükürt ve fosfor seviyeleri, gri dökme demir için olan maksimum seviyelerden yaklaşık 10 kat daha düşük olan maksimum %0,03 S ve %0,1 P değerinde tutulmalıdır.Diğer impürite elementleri de grafitlerin küreselliğine etki ettiği için düşük miktarda bulunmalıdır [7],[9],[19],[24].

Tablo 3.2. Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan dökme demir türlerinin genel kimyasal bileşim aralıkları [19]

Element	Gri Dökme Demir (%)	Beyaz Dökme Demir (%)	Temper Dökme Demir (%)	Küresel Grafitli Dökme Demir (%)
Karbon	2,5 - 4,0	1,8 - 3,6	2,0 - 2,60	3,0 - 4,0
Silisyum	1,0 - 3,0	0,5 - 1,9	1,10 - 1,60	1,8 - 2,8
Mangan	0,25 - 1,0	0,25 - 0,80	0,20 - 1,0	0,10 - 1,0
Kükürt	0,02 - 0,25	0,06 - 0,20	0,20 - 1,0	0,03 max.
Fosfor	0,05 - 1,0	0,06 - 0,18	0,18 max.	0,10 max.

3.1.3. Beyaz dökme demir

Bileşimlerinde ağırlıkça %1'den daha az silisyum içeren dökme demirler ve yüksek soğuma hızlarında Şekil 3.3'de gösterildiği gibi, karbon grafit formunda ayrışamaz ve Fe_3C 'in içinde kalır. Şekil 3.6'da beyaz dökme demire ait bir mikroyapı fotoğrafı gösterilmiştir. Kalın kesitli parçalarda hızlı soğuma yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde gerçekleştiği için parçanın yüzeyi ve yüzeye yakın bölgeleri beyaz dökme demir; içerideki bölgeler ise soğuma hızı daha yavaş olduğundan gri dökme demir yapısına sahiptir. Bu şekildeki dış yüzeyi sert beyaz dökme demir, iç bölgeleri ise yumuşak gri dökme demirlere sahip döküm parçalara çil döküm adı verilir [19].



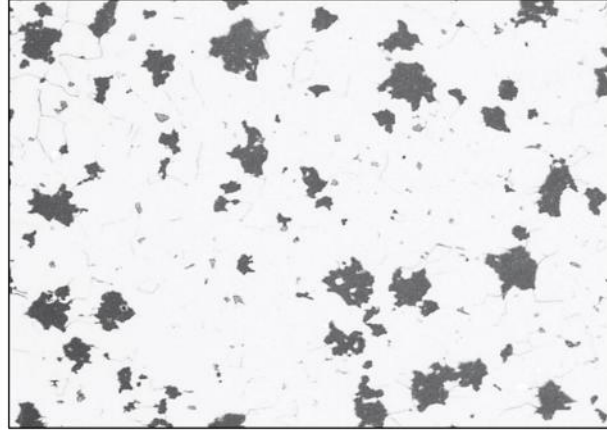
Şekil 3.6. Beyaz dökme demire ait mikroyapı fotoğrafı. Açık renkli bölgeler sementit, koyu renkli bölgeler ise perlit [3]

Beyaz dökme demirler, içlerinde yüksek miktarda Fe_3C içerdiğinden dolayı çok serttir ve gevrek özellik gösterir. Bundan dolayı işlenebilirlik açısından çok zayıftırlar. Sünekliğin gerekmediği, yüksek sertlik ve aşınma dayanımı istenen parçalarda kullanılırlar. Beyaz dökme demirler, temper dökme demir için hammadde görevi de görür[19].

3.1.4. Temper dökme demirler

Temper dökme demirler önce içeriğinde çok miktarda demir karbür (Fe_3C) içeren ve grafit içermeyen beyaz dökme demir olarak dökülür. Bundan dolayı temper dökme demirlerin kimyasal bileşimi, beyaz dökme demiri oluşturan bileşimle sınırlıdır. Tablo 3.2'de görüldüğü gibi, temper dökme demirler %2-%2,6 arasında karbon, %1,1 - %1,6 arasında silisyum içerir [19],[24]. Temper dökme demir üretmek için, beyaz dökme demirler, içerdiği demir karbürü grafitte ve demire ayırmak için ısıtılma işleminden geçirilir. Temper dökme demirdeki grafitler, temper grafit adı verilen patlamış mısır görünümündedir [19]. Şekil 3.7'de ferritik matrisli temper

grafitli dökme demire ait mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Ferritik matrisli temper dökme demirler, mekanik özellikler açısından gri dökme demirlere göre daha dayanıklı ve sünektir [4].

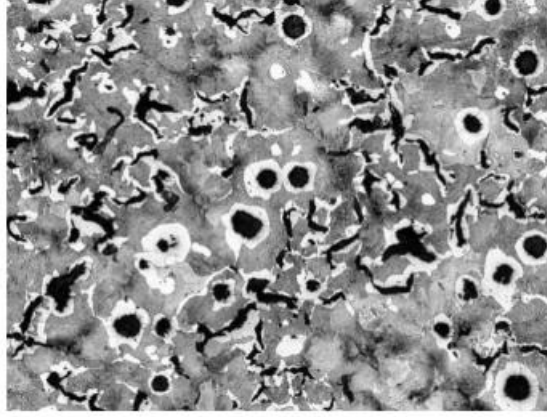


Şekil 3.7. İki aşamalı tavlama (4 saat 954 °C’de tutma ve 6 saatte 704 °C’ye soğutma) ile üretilen ferritik matrisli temper grafitli dökme demire ait mikroyapı. Beyaz bölgeler ferrit fazı, koyu bölgeler ise temper grafitler. (Dağlayıcı %2 nital, 100x büyütme) [19]

3.1.5. Vermiküler dökme demir

Küresel grafitli dökme demir üretimi esnasında yetersiz magnezyum aşılması ile ortaya çıkan dökme demir türüdür. Mikroyapıya baktığımızda grafit yapısı lamel grafit ve küresel grafit arasındadır. Mikroyapıda ortalama %20 küresel grafit %80 vermiküler grafit bulunur.

Vermiküler dökme demirlerin lamel grafitli dökme demirlere göre mekanik özellikleri, küresel grafitli dökme demirlere göre de termal iletkenlikleri daha iyidir[11],[20].Vermiküler dökme demirler otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle motor bloklarının ve motor kafalarının dökümünde tercih edilmektedir. Mukavemetlerinin lamel grafitli dökme demirlere göre daha yüksek olmasından dolayı, yüksek basınçlı yanma odalarının imalatına daha elverişlidirler ve daha düşük emisyon değerlerinin elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca mukavemet değerleri yüksek olduğundan dolayı daha ince kesitli parçalar tasarlanıp, daha hafif motor bloklarının üretilmesine imkan sağlamaktadırlar[11],[20]. Şekil 3.8’ de vermiküler grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı gösterilmiştir.

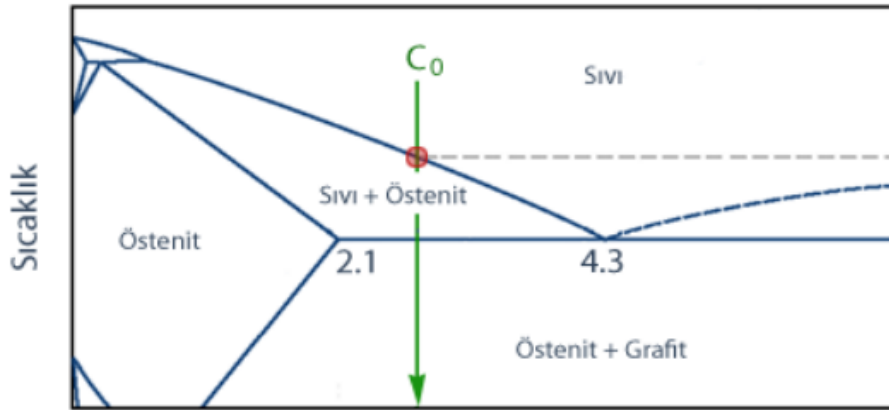


Şekil 3.8. Vermiküler grafitli dökme demirin temsili mikroyapısı [20]

3.1.6. Kimyasal kompozisyonuna göre dökme demirler

Dökme demirler kimyasal kompozisyonlarına göre karbon eşdeğerine bakılarak sınıflandırılmaktadır. Dökme demir kompozisyonunun ötektik noktaya göre nerede bulunduğunu değerlendirmek için aşağıdaki formül kullanılmaktadır; [17]

$$CE \text{ (Karbon eşdeğeri)} = (\% C + (\% Si + \% P) / 3) \quad (3.1)$$



Şekil 3.9. Karbon eşdeğeri- Sıcak diyagramı [18]

Ötektik altı dökme demir: Dökme demirin karbon eşdeğeri ötektik kompozisyonun (%4.3) altındaysa, bu dökme demirler ötektik altı ya da hipoötektik dökme demir olarak adlandırılmaktadır.

Ötektik üstü dökme demir: Yukarıdaki tariftten de anlaşılabileceği gibi, dökme demirin karbon eşdeğeri ötektik kompozisyonun (%4.3) üzerindeyse, bu dökme demirler ötektik üstü ya da hiperötektik olarak adlandırılmaktadır.

Ötektik dökme demir: Dökme demir eğer tam olarak ötektik kompozisyona sahipse, yani karbon eşdeğeri %4.3'e eşitse, bu tür dökme demirler ötektik olarak adlandırılmaktadır.

Alaşımli dökme demirler: Yukarıda bahsi geçen dökme demir türlerine ek olarak, farklı alaşım elementleri kullanılarak da dökme demirlerin farklı özelliklere sahip olması sağlanabiliyor. Bu tür dökme demirler genel olarak alaşımli dökme demirler olarak sınıflandırılmaktadır[17].

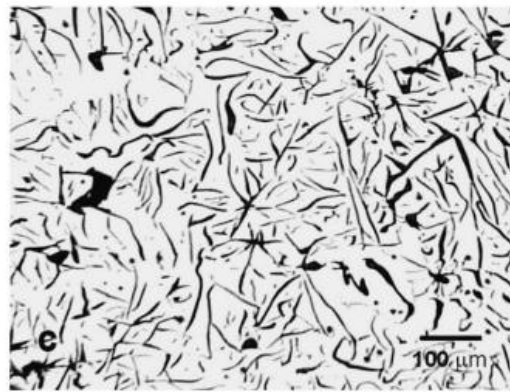
3.2. Lamel Grafitli Gri Dökme Demirin Genel Özellikleri

Karbon atomlarının katmanlı olarak, lamel şeklindeki grafitler halinde bulunduğu dökme demir çeşidi olduğu daha önce açıklanmıştı. Bu dökme demirlere kırılma yüzeyleri gri renkte görüldüğü için gri dökme demir denir[2],[4],[7],[20]. Tablo 3.3'de DIN- 10 EN 1561 standartına göre gri dökme demirlerin kimyasal kompozisyonları gösterilmiştir.

Tablo 3.3. DIN-EN 1561 standartına göre gri dökme demirlerin kimyasal kompozisyonları(%) [20]

Alaşım	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mg	% S	% P
EN GJL 200	3,35	1,90	0,50	0,10	-	0,09	0,12
	3,40	2,00	0,60	0,12		0,10	0,15
EN GJL 250	3,25	1,90	0,90	0,25	-	0,07	0,08
	3,45	2,20	1,00	0,30		0,10	0,10
EN GJL 300	3,05	1,90	0,90	0,25	-	0,07	0,08
	3,15	2,30	1,00	0,30		0,10	0,10

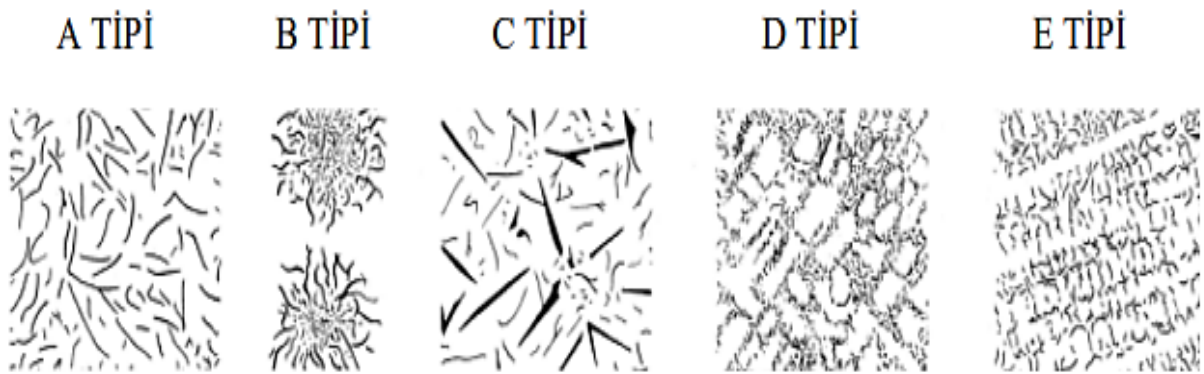
Gri dökme demirlerin dökülebilirlikleri iyidir. Kabul edilebilir mukavemet ve iyi işlenebilirlik özelliklerine sahiptirler [24]. Gri dökme demirlerin mikroyapısına baktığımız zaman yapıda çözünmüş olan grafitlerin katmanlar halinde lamelli bir yapıda çözünmüş olduğunu görürüz [22].Şekil 3.10' da gri dökme demirlerin mikroyapısına örnek gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Gri dökme demir mikroyapısı [20]

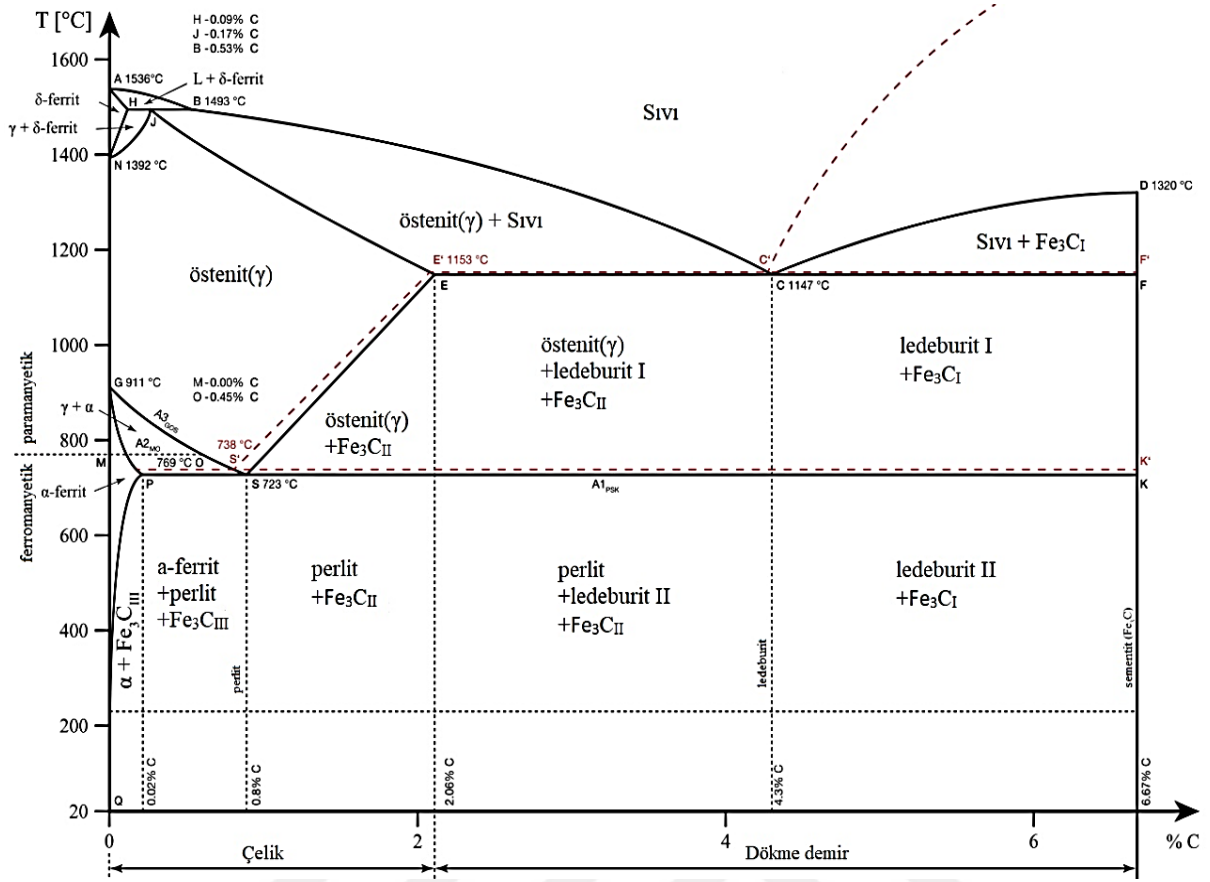
3.2.1. Katılaşma sırasında grafikleşme

Gri dökme demirlerde grafitlerin şekli boyutu ve dağılımı katılaşma sırasında oluşmaktadır. Bu nedenle grafit tip ve boyutları arasında farklılıklar meydana gelmektedir. Sözü edilen farklılıklar ASTM ile AFS tarafından kabul görmüş standartlarla belirlenmektedir. Şekil 3.11’de gri dökme demirlerin ASTM ve AFS standartlarında kabul edilmiş lamel tipleri gösterilmektedir. Gri dökme demir yapısında genellikle gelişmiş güzel yönlendirilmiş A tip lameller tercih edilmektedir. B tip lameller yüksek mukavemet için yetersiz olup ferrit matrisi içerisinde gelişigüzel yönlendirilmiştir. C tip grafitler termal şoka dayanımlıdır ve hiperötektik bileşimde meydana gelmektedirler. D tipi grafitler düşük aşınma direnci ve düşük mukavemet özelliği gösterip yüksek silisyum içerenlerde ve hızlı soğuma şartlarında oluşmaktadır. D tipi grafitler katılaşma sırasında aşırı soğuma sebebiyle oluşmaktadır. E tipi grafitler ise C%’si düşük hipoötektik bileşimlerde bulunmaktadır[1].



Şekil 3.11. ASTM ve AFS gri dökme demirde grafit lamel tipleri[1]

Şeki 3.12’de gösterilen demir-karbon faz diyagramında östenit, katı hal dönüşümü ile beraber metalin sıcaklık ve bileşimine bağlı olarak ferrit+perlit+grafit yada ferrit+perlite dönüşebilmektedir. Bununla birlikte sementit, ferrit ve sementite de ayrışabilir[1].



Şekil 3.12. Demir-karbon faz diyagramı [1]

3.2.2. Gri dökme demirde bulunan alaşım elementleri

Gri dökme demirleri üretebilmek için demir ve karbon elementinin alaşımlandırılması ile elde edilebilmektedir. Ancak sanayi de kullanılan demirler için farklı özellikler istendiği için farklı alaşım elementleri kullanılarak üretilen dökme demirin istenilen mekaniksel özelliklere sahip olması sağlanmıştır[4]. Silisyum(Si): Silisyum elementi, eritilmiş metalin akışkanlığını arttırdığı gibi karbon eşdeğerinde önemli rol aldığı için katılaşma süresini de etkilemektedir. Kükürt (S): kükürt elementi, silisyumdan daha fazla karbür yapıcı etkiye sahiptir. Dökme demirlerde %0,06- %0,18 arasında olması gerekmektedir. Fazla olması durumunda demir ile bileşik (FeS) oluşturarak dökme demiri sert ve kırılgan olmayı tetiklemektedir[3],[7].

Mangan (Mn): Mangan elementi, oldukça kuvvetli östenit yapıcı özelliğe sahiptir. Mangan elementi kükürtün olumsuz etkilerini dengelemesi amacı ile kullanılmaktadır. Ayrıca fazla olması durumunda karbür miktarında artış görülmektedir.

Fosfor (P): Fosfor elementti sıvı metalin akışkanlığını arttırdığı gibi katılaşma aralığında genişletmektedir. Fosfor elementinin fazla konulması durumunda ise demir ile bileşik (Fe3P)

oluşturmaktadır. Bu yapı ise östenit ve sementit ile üçlü faz oluşturarak kırılgan yapıya sahip olan steadit denilen faz ortaya çıkarmaktadır.

Nikel (Ni): Nikel elementi, östenit yapıcı olduğu gibi grafit inceltici etkiye sahiptir. Nikel elementi dökme demirin tokluk özelliğini artırır ve farklı kesit kalınlıklarına sahip bölgelerin sertlik farklılıklarını da ortadan kaldırmaktadır.

Krom (Cr): Krom elementi, dökme demirde az miktarda eklendiğinde bile karbür yapıcı özelliğinden dolayı çil oluşumunu tetikleyecek etkiye sahiptir.

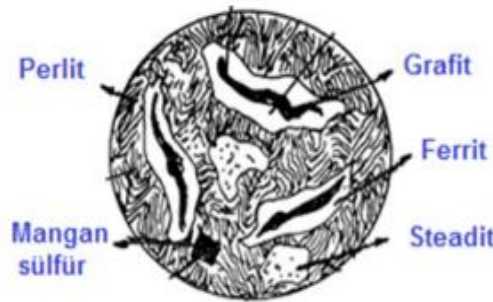
Bakır (Cu): Eritilen metale %0,5--%2,5 oranında eklenen bakır elementi, çil oluşumunu azalttığı gibi grafit yapısını inceltir ve metalin akışkanlığını arttırmaktadır.

Molibden (Mo): Molibden elementinin karbür yapıcı özelliğinin yanı sıra grafit yapısını ve perlitik yapıyı inceltici etkiye sahiptir. Genellikle sertliğin artırılması için kullanılmaktadır.

Vanadyum(V): Karbür yapıcı özelliği yüksek olan bu elementi, sertliği ve aşınma direncini arttırmak amacı ile dökme demirlere %0,15- %0,5 oranında eklenebilmektedir [4],[7].

3.2.3. Gri dökme demirin mikroyapısı

Gri dökme demirin yapısında grafit, ferrit, perlit ve sementit bulunur. Bunlardan başka fosfor ötektiği (steadit) ve mangan sülfür de bulunabilir[2-3].Şekil 3.13’de gri dökme demirin yapı bileşenleri görülmektedir.



Şekil 3.13. Gri dökme demirin yapı bileşenleri

Grafit : Dökme demirde serbest halde bulunan karbona grafit denir. Gri dökme demir içinde lameller halinde bulunur. Grafitin miktarı, şekli, büyüklüğü ve dağılımı malzemenin özelliklerini belirler. Dökümü yapılan malzemenin geç soğuması, kalın kesitlerin fazla olması veya bileşiminde grafitleştirici elemanların çok miktarda bulunması grafitin artmasını sağlar. Grafit, gri dökme demirin çekme dayanımını azaltır ve ötektik yapının ergime sıcaklığını düşürür. Grafit tipleri ASTM [American Society for Testing and Materials/Amerika Test ve

Materyalleri Topluluğu]] tarafından beş tipe ayrılmıştır: A-B-C-D ve E tipi. Gri dökme demirde olması istenen grafit tipi “A tipi” dir. A tipinde grafit, homojen olarak dağılmıştır. Grafitin homojen dağılımı, gri dökme demirin mekaniksel özelliklerinin çok daha iyi olmasını sağlar[1],[3].

Ferrit : Ferrit; yumuşak, esnek ve orta derecede dayanıklı bir yapı elemanıdır. Ferrit ya serbest halde ya da sementit ile birlikte perlit içerisinde bulunur. Yapı içerisinde serbest olarak bulunması, grafitleşme şartlarına bağlıdır. Karbon serbest halde kalırsa ferrit de serbest halde kalacaktır. Silisyum, ferriti sertleştirir ve dayanımı artırır [2].

Sementit : Demirle karbonun birleşmesi sonucu oluşan demir karbür bileşiğidir. Çok sert ve kırılgan bir yapı bileşenidir. Sementit, gri dökme demirlerde genellikle perlit içinde bulunur. Çok hızlı soğutulmuş gri dökme demirin ince kesitlerinde görülür [21].

Perlit : Perlit; ferrit ve sementitten meydana gelmiştir. Dolayısıyla ferritten daha sert, sementitten daha yumuşak bir yapıya sahiptir. Mikro yapısı parmak izi görünümündedir.

Steadit : Gri dökme demirde, demir fosfür (Fe_3P) bileşiğidir. Mikro yapıda fazla oranda bulunması, gri dökme demiri sert ve kırılgan yapar[3].

Mangan Sülfür : Dökme demirdeki kükürt, manganle birleşerek mangan sülfürü (MnS) oluşturur. Mikro yapıda açık mavi veya grimsi renkte görülür. Mangan sülfür oluşumu, kükürdün gri dökme demire verdiği zararları gidermiş olur [1-2],[21].

3.2.4. Gri dökme demirin mekanik özellikleri ve kullanım alanları

Gri dökme demirlerin yapısal olarak incelendiğinde, iç yapılarını belirleyen grafit yapraklılar, görüntü olarak sivri uçlara sahiptirler. Bu sivri uçlar parçada herhangi bir darbe ile “çentik etkisi” yaratmaktadır. Bu sebepten dolayı çarpma tokluğu düşük olduğu için çarpmalı ve darbeli uygulamalar için uygunsuzdur [4].

Isıl İletkenlik : Yapraksı grafitlerinden dolayı ısı iletkenliği yüksektir. Bu sebepten dolayı otomotiv sanayiinde, cam sanayiinde, motor blok üretimde ve inşaat sanayiinde yoğun olarak kullanılmaktadır [4-5].

Titreşim Sönümleme : Sönümleme kapasitesi titreşimin neden olduğu enerji absorbe (emme) ve bu nedenle sönümleme yeteneği olarak tanımlanır. Özellikle lamel grafitli yüzdesi fazla olan gri dökme demirler titreşimi hızla sönümler. Gri dökme demirin sönümleme kapasitesi bazı uygulamalar için büyük avantaj sağlar. Dişli kapakları, silindir blokları ve kafaları gri dökme demirin sönümleme kapasitesinden faydalanan bazı uygulama alanlarıdır [7].

Aşınma Direnci : Gri dökme demirler kayma sürtünmesi tipi aşınmaya karşı önemli bir dirence sahiptir. Bu nedenle, içten yanmalı motorlardaki silindir boşlukları ve piston segmanlarının kayma yüzeyleri ve makine takımlarına kızak kanalları gibi kayma gerektiren uygulamalarda kullanılır. Gri dökme demirler grafit lamellerinin yağlayıcı etkisi ve yağın grafit tarafından tutulması ile açıklanan mükemmel aşınma ve yapışma direnci göstermektedir [1],[7].

İşlenebilirlik : Gri dökme demirler en iyi işlenebilir dökme demir alaşımlarıdır. Sağlam ve sert ince perlitik matrisler düşük hızlarda işlenir. Buna karşılık perlitik matrisli gri dökme demirler en iyi işlenebilirlik ve aşınma direnci kombinasyonuna sahiptir [24].

Akışkanlık : Gri dökme demirler soğuma eğrisinde ötektik bileşime yakın alaşımlar olduğu için akışkanlıkları oldukça iyidir. Akışkanlık özelliğinden dolayı ince kesitli parçalar üretmek mümkündür [1],[4].

Sertlik Değeri : Gri dökme demirin sertliği, kimyasal bileşime ve soğuma hızına bağlıdır. Kimyasal bileşimdeki manganez, fosfor ve en önemlisi kükürt oranı malzemenin sert olmasını sağlar. Soğuma hızı nedeniyle dökülen parçanın kesit kalınlığının farklılığı da sertliği etkiler. İnce kesitler daha hızlı soğuduğu için burada karbür yapı oluşur. Böylece ince kesitlerde malzemenin sertliği artar. Normal gri dökme demirin sertliği 120-200 brinell (HB) olur [8],[21].

Çekme Dayanımı : Çekme dayanımı, gri dökme demirin bir milimetrekaresinin (mm²) dayandığı yükü kilogram (kg) cinsinden tanımlar. Ortalama bir gri dökme demirin çekme dayanımı 20-24 kg/ mm²'dir. Çekme dayanımı ile gri dökme demirin kimyasal yapısı arasında doğrudan bir ilişki vardır [21]. Gri dökme demirlerin mekanik özelliklerinden basma kuvveti çekme mukavemetinin 3-5 katı kadardır. Gri dökme demirlerin yüksek basma özelliği en önemli özellikler arasındadır. Gri dökme demirlerde, çekme dayanımı özelliği sertlik ile paralel olarak bağlantılıdır. Bu bağlantıyı şu ifade ile göstermek mümkündür [4].

$$\text{Çekme Dayanımı (N/mm}^2\text{)} = \text{Brinell Sertlik Değeri (HB)} \times K \quad (3.2)$$

Burada K = 1,1 ile 1,5 arasında değişmektedir.

Kalıcı Gerilmeler (İç Gerilmeler) : Tanım olarak kalıcı gerilmeler, değişime uğrayan bir gövdede, dış etkilere ve sıcaklık değişiminden kaynaklanan gerilimlerdir. Bu iç gerilmelerin prensip olarak kaynağı, metal üzerindeki bölgelerin homojen olmayan deformasyona uğraması sonucu ortaya çıkan bölgeler arası uyumsuzluktur [5],[8]. Dökme demirin katılaşması, ısıtma işlemleri veya kaynağı sırasında iş parçasında bazı iç gerilmeler meydana gelir. Bu gerilmeler parçanın, servis esnasında maruz kaldığı dinamik veya statik zorlamalar karşısında kırılma,

kopma veya çatlamasına sebep olabilir. Bu sebepten muayene sırasında sıcak yırtılması tespit edilmiş bir malzeme, kalıcı gerilmeleri tayin edilmemiş bir malzemedan çok daha az tehlikelidir. Bu ve benzeri sorunları çözmek için dökülen parçalar, tav fırınlarında amaca uygun olarak ısıtılma işlemine tabi tutulur [11],[21].

Tablo 3.4. Küresel grafitli dökme demir (KGDD); Gri dökme demir (GDD); Temper dökme demir (TDD); Beyaz dökme demir (BDD) ve Çelik döküm (ÇD) arasındaki çeşitli özelliklerin karşılaştırılması[22]

Özellik	KGDD	GDD	BDD	TDD	ÇD
Dökülebilirlik	1	1	3	2	4
İşlenebilirlik	2	1	-	2	3
Güvenilirlik	1	5	4	3	2
Titreşim Söndürme	2	1	4	2	4
Yüzey Sertleştirme	1	1	-	1	3
Elastisite Modülü	1	3	-	2	1
Aşınma Direnci	3	5	-	3	1
Darbe Direnci	2	3	1	4	5
Korozyon Direnci	1	1	2	2	4
Sertlik / Ağırlık Oranı	1	5	-	4	3
Üretim Maliyeti	2	1	1	3	4

(1= En iyi , 5= En kötü)

Tablo 3.5. TS EN 1561 numaralı standarda göre özellikler ve dünya standartlarına göre gösterimi [23]

TS EN 1561 Numaralı Standart Özellikleri	DDL 15	DDL 20	DDL 25	DDL 30	DDL 35
Çekme Mukavemeti (Min.) (N/mm ²)	150	200	250	300	350
Sertlik (HB)	160 - 190	170 - 210	180 - 250	200 - 240	210 - 250
Mikro Yapı	Ferrit + Perlit	Perlit + Ferrit	Perlit (Min %90)	Perlit (Min %100)	Perlit (İnce)
Kimyasal Kompozisyon	C: 3,4-3,6 Si:2,3- 2,5 Mn:0,5-0,8 S: 0,12 max P:0,5 max	C: 3,2-3,4 Si:2,1- 2,3 Mn:0,5-0,8 S: 0,12 max P:0,4 max	C: 3,0-3,25 Si:1,85- 2,1 Mn:0,4-0,7 S: 0,12 max P:0,25 max	C: 2,95-3,1 Si:1,7- 2,0 Mn:0,4-0,7 S: 0,1 max P:0,2 max	C: 2,7-3,0 Si:1,7- 2,0 Mn:0,6-0,8 S: 0,10max P:0,2 max
Eşdeğer standart EU EN 1561	GJL 150	GJL 200	GJL 250	GJL 300	GJL 350
Germany DIN 1691	GG15	GG20	GG25	GG30	GG35
USA ASTM A 4876	Class 20 B	Class 25 B	Class 35 B	Class 50 B	Class 55 B
G.BRITAIN BS 1452	Grade 150	Grade 200	Grade 250	Grade 300	Grade 350
FRANCE NF A32101	Ft 15 D	Ft 20 D	Ft 25 D	Ft 30 D	Ft 35 D
JAPAN JIS G 5501	FC 150	FC 200	FC 250	FC 300	FC 350

3.2.5. Motor blok malzeme seçimi

Motor blok üretimi için gerekli olan bazı zorunlu gereksinimler vardır. Aşınmaya karşı direnci ve kullanım ömrünün uzun olması gerekmektedir[1]. Motor bloğunda yanma gerçekleştiğinde oluşacak olan basınca yüksek dayanıklı olması gerekmektedir. Bu gereksinimlerin yanı sıra blok yüksek sıcaklıklara ve titreşime dayanıklı olması gerekmektedir[4],[12]. Gri dökme demir, motor blok üretiminde kullanılmakta olan ilk ve en yaygın olan malzemedir. Gri dökme demirler, iyi bir titreşim sönümleme özelliğine sahip, aşınma dirençleri ve termal dirence olan mukavemet özellikleri yüksektir. Bu özelliklerinin yanı sıra maliyet olarak düşüktür ve iyi bir işlenebilir özelliğine sahiptirler[4],[14].

Tablo 3.6. Gri dökme demirin özelliklerinin motor blok üzerinde mekaniksel özellikleri[4]

Özellik	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Young Modülü (GPa)	Yorulma Direnci (MPa)	Isı İletkenliği (W/(mK))	Sertlik (HB)	Termal Ergime Noktası (oC)
Gri Dökme Demir	7,15	250	105	110	48	179-202	1150-1250

3.3. Gri Dökme Demirlerin Isıl İşlemleri

Lamel grafitli dökme demirlerden üretilen parçaların performansı, ısıtım uygulamaları ile önemli derecede iyileştirilebilir. Isıl işlemler sayesinde, iç yapıda bulunan bağı karbon miktarı ve yapının oluşum şekli geniş bir yelpazede değiştirilerek, döküm parçalarının kullanım amacına en uygun özelliklere sahip olması sağlanabilir. Dökme demirler üzerinde yapılan başlıca ısıtım işlemler ise şu şekildedir;[7],[9-10].

Gerilme giderme tavı: Dökme parça içindeki iç gerilmelerin azaltılması amaçlanır;

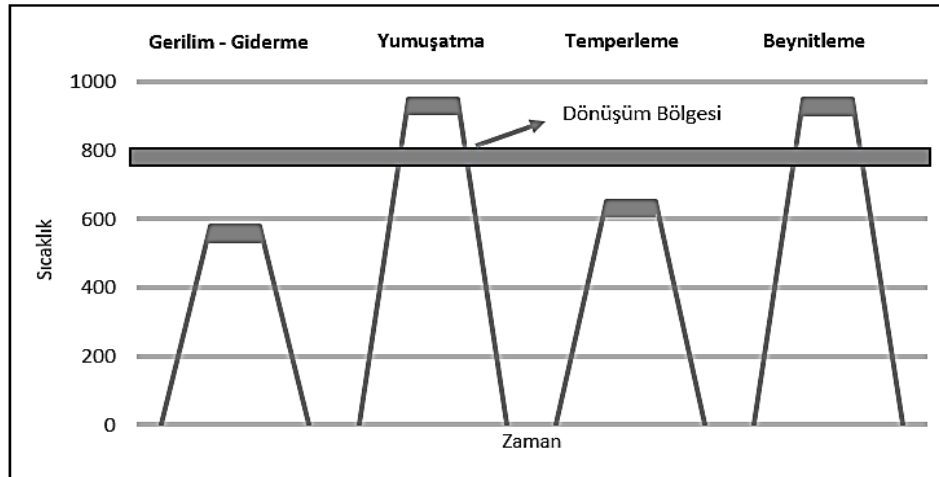
Tavlama (Yumuşatma) tavı: Sertliğin azaltılması ve dolayısıyla tokluğun artırılması amaçlanır;

Normalizasyon (perlitleme): İç yapı kısmen veya tamamen perlite dönüştürülür.

Su verme ve ıslah İşlemi: Kritik sıcaklığın üzerine ısıtılarak (yaklaşık 900°C) ostenitleme yapılır ve su verilerek sertlik, dayanım ve aşınmaya dayanıklılık artırılır. Malzemenin tokluğunu artırmak için bu işlemden sonra bir temperleme (menevişleme) uygulanabilir.

Beynitlenme (ostemperleme): Ostenitlemeden sonra, beynit kademesindeki bir sıcaklığa su verilen malzeme, bu sıcaklıkta tutularak ostenitin beynite izotermik dönüşümü sağlanır.

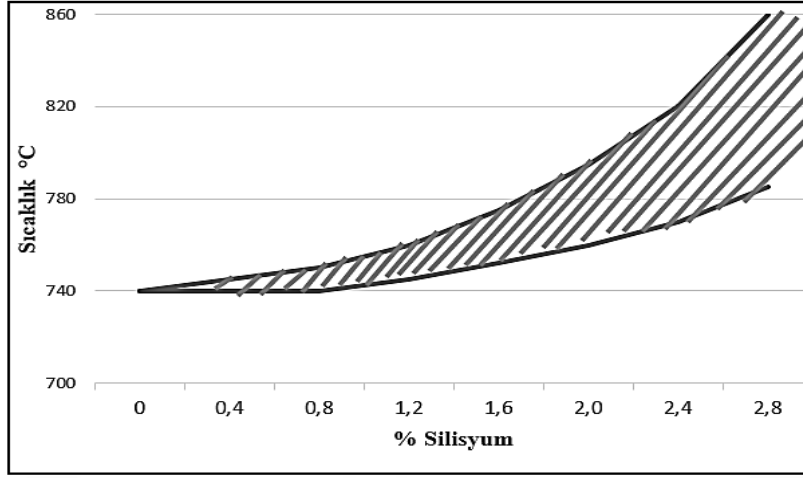
Dökme demirde alaşım elementlerinin bulunması genellikle ısıtım işlemlerin etkisini artırır. Alaşımlama işlem sıcaklıklarını biraz yükseltse de ısıtım işlem uygulamalarının daha kolaylaştığı söylenebilir. Bunun yanında alaşımlama ile malzemenin sertleşme kabiliyeti de artar [9-10].



Şekil 3.14. Dökme demirlere uygulanan ısıtım işlemlerden bazıları [9]

En önemli alaşım elementlerinden biri olan silisyum derişikliğinin artması ile ötektoid sıcaklığı değişir, Şekil 3.15. Ostenitin perlit veya grafit/ferrite dönüştüğü bu sıcaklık kritik sıcaklık (A_1) olarak da adlandırılır. Görüldüğü gibi artan silisyum miktarı ile kritik sıcaklık artmakta ve dönüşüm genişliği giderek artan bir sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Bunun yanında % 0,8

C derişikliğindeki ötektoid noktasıda artan silisyum miktarı ile daha düşük derişikliklere ötelenmektedir. Bazı ısıl işlemlerde kritik sıcaklığın kesin olarak bilinmesi çok önemlidir[8].



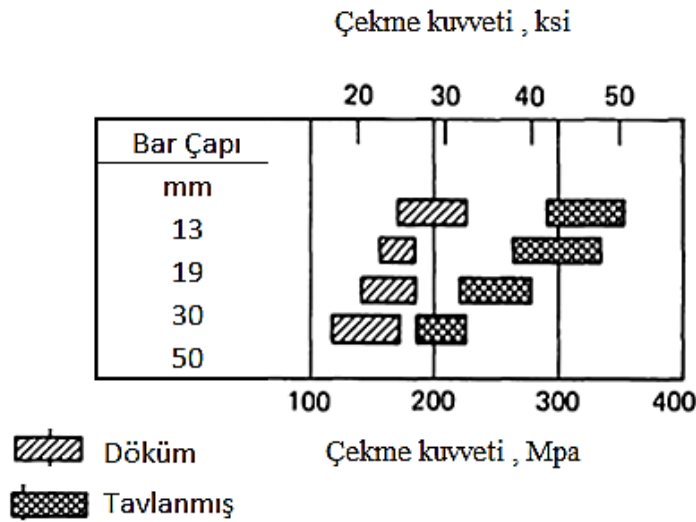
Şekil 3.15. Silisyum miktarıyla ötektoid sıcaklığının ve dönüşüm aralığının değişimi [9]

Gri dökme demirler üzerine uygulanan ısıl işlemler, matris mikro yapısını istenilen şekilde değiştirebilme yeteneğine sahiptir. Ancak, döküm sürecinde meydana gelen grafitlerin şekli ve boyutları, ısıl işlem sırasında herhangi bir değişikliğe uğramaz; bunlar aynen kalır. Isıl işlemle matris yapısı ferritten martensite kadar farklı fazlara dönüştürülebilir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan su verme işlemiyle martensit matris elde etmek mümkündür, ancak bu yöntem ticari alaşımlarda yaygın olarak kullanılmaz. Çünkü, su verme ile elde edilebilecek mukavemet artışını daha ekonomik yollarla sağlamak mümkündür. Örneğin, döküm metalinin silisyum ve toplam karbon içeriği düşürülerek veya alaşım elementleri eklenerek döküm parçasının mukavemeti artırılabilir. Su verme ve temperleme işlemlerinin amacı, metalin aşınma ve abrazyon direncini arttırmaktır. Gri dökme demirlerde en yaygın olarak uygulanan ısıl işlemler tavlama ve gerilme giderme işlemleridir [8],[10].

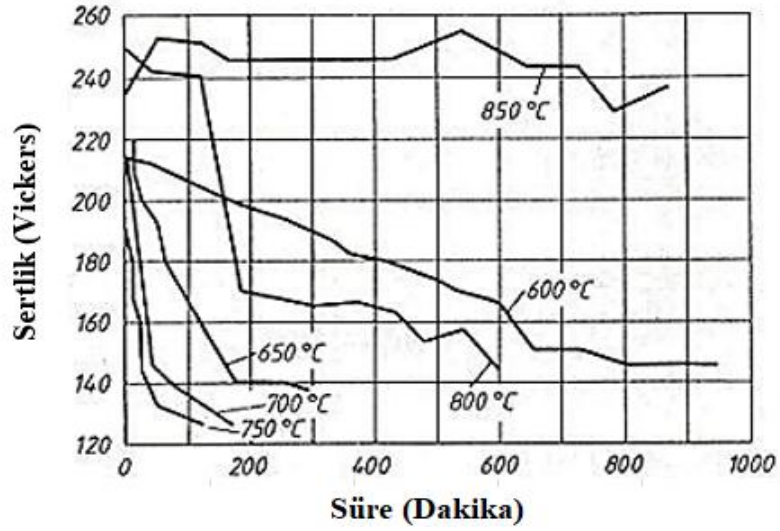
Grafit levhalarının boyutu ısıl işlem sırasında değişmese de, bu levhalar matrisin karbon hareketi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İnce grafit levhalara sahip mikroyapılarda, karbon atomlarının yayılma mesafesi kısa olurken, iri grafit levhalı dökümlerde bu mesafe daha uzun olur. Bu nedenle, ince grafitli dökümlerde ferritleştirme tavlama ve normalizasyon ısıl işlem süreleri, iri grafitli dökümlere kıyasla daha kısa olmaktadır. Ayrıca, dökümün kimyasal bileşimi de ısıl işlem üzerinde önemli bir etki yapar. Örneğin, silisyum, karbonun çözünürlüğünü azaltarak ostenit içinde karbon yayılım hızını artırır ve ostenitleme sıcaklığını yükseltir, bu da sementit hacim oranının azalmasına yol açar. Buna karşılık, mangan silisyumun tersine, ostenitleme sıcaklığını düşürür, sertleşme kabiliyetini artırır ve ostenitte karbon yayılma hızını yavaşlatır [11].

3.3.1. Tavlama (Yumuşatma) ısıt işlemleri

Gri demire uygulanan en yaygın ısıt işlemleri, gerilim giderme dışında tavlama işlemleri. Tavlama, demiri yumuşatmak ve büyük ötektik karbürleri azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak amacıyla, demiri belirli bir yüksek sıcaklığa ısıtarak işlenebilirliğini artırmayı sağlar. Bu işlemler, demirin daha kolay işlenmesini sağlasa da, mekanik özelliklerinde önemli bir azalmaya yol açar. Genellikle tavlama işlemleri, demirin sınıf seviyesini bir alt sınıfa düşürür; örneğin, sınıf 40 gri demir tavlendiğinde, özellikleri sınıf 30 gri demire yaklaşır. Şekil 3.16 'da tam tavlama işleminin, sınıf 30 gri demirden yapılmış tahkim çubuklarının çekme mukavemeti üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Özelliklerdeki bu azalma, tavlama sıcaklığına, işlemler süresine ve demirin alaşımlar bileşimine bağlı olarak değişir [8].



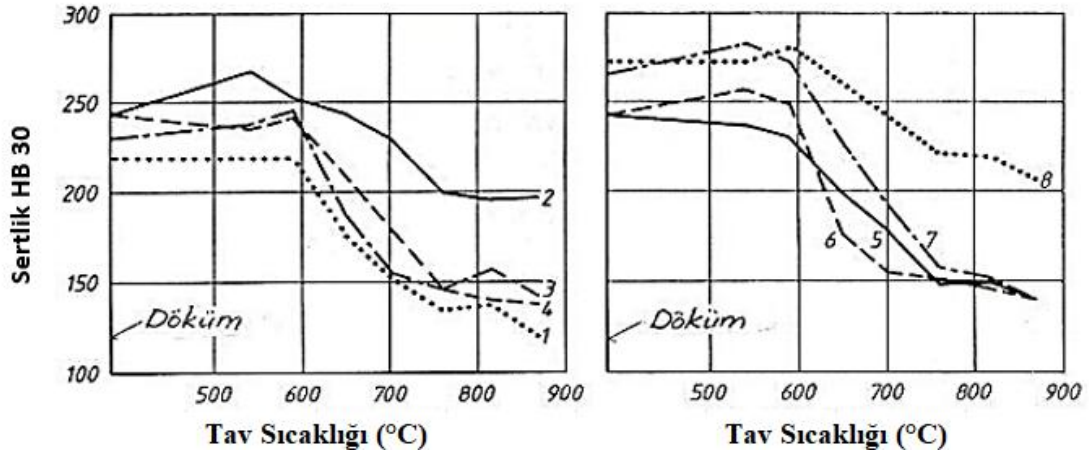
Şekil 3.16. Sınıf 30 gri demirin çekme dayanımına tavlamanın etkisi. Numuneler 31 ısıdan elde edilen tahkim çubuklarıydı. Çubuklar 25 mm'lik her 25 mm (1 inç) kesit için 2 saat artı 1 saat boyunca 925 °C'de tavlandı ve 925'ten 565 °C'ye maksimum 160 °C/saat hızında soğutuldu. Soğutma o seviyeden 200 °C'ye maksimum 130 °C/saat hızında devam etti; çubuklar daha sonra oda sıcaklığına hava ile soğutuldu [8]



Şekil 3.17. Lamel grafitli bir dökme demirde yumuşatma tavlı sıcaklığının sertliğe etkisi [9]

Yumuşatma tavlı Şekil 3.17'den de görüldüğü gibi çok değişik sıcaklıklarda yapılabilir. Çok uzun tav sürelerinde alaşımsız dökme demirlerde 400 °C' tan itibaren perlit az da olsa parçalanmaya başlamaktadır. Ancak perlit parçalanmasının hızı 620°C 'dan sonra hızla artmakta ve kritik sıcaklığın hemen altında en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu sıcaklık alaşımsız ve az alaşımlı dökme demir türleri için 740 ile 829 °C arasında değişmektedir[10].

Bu şekillerden ayrıca ekonomik bir tav için sıcaklık ve sürenin uygun olarak seçiminde yararlanılabilir. Görüldüğü gibi ayrışma hızı kritik sıcaklığın hemen altında yüksek olmakta ve çok uzun tav sürelerine gitme zorunluluğu ortaya çıkmadan grafit oluşumu sağlanmaktadır. Kritik sıcaklık bölgesinin seviyesi kimyasal bileşime ve alaşım elementi miktarına bağlıdır, özellikle silisyumun etkisi büyüktür. Silisyum değerindeki her %1'lik artış ötektoid sıcaklığını 25°C artırır, bunun yanında karbon yayınmasında teşvik eder. Ostenit bölgesini genişleten alaşım elemanları dönüşüm sıcaklığını düşürürler. Nitekim %1 kalay bu sıcaklığı 10°C, %1 nikel ise 30°C düşürür. Krom katkıları kritik sıcaklığı yükseltir, buna karşın vanadyum katılmasıyla vanadyum karbür oluştuğundan önemli bir etki görülmez. Molibden ise ostenit dönüşümünü geciktirir ve kritik sıcaklığın düşmesine neden olur[2-3].



Şekil 3.18. Alaşımsız ve alaşımlı lamel grafitli dökme demirlerde bir saatlik bir yumuşatma tavının Brinell sertliğine etkisi (1=alaşımsız, 2=0,56 %Cr, 3=1,72 %Ni, 4=0,47 %Mo, 5=0,12 % V, 6=1,8 % Cu, 7=0,54 % Mo, 0,66 % Ni, 8=0,56 %Mo, 0,61 % Cr) [9]

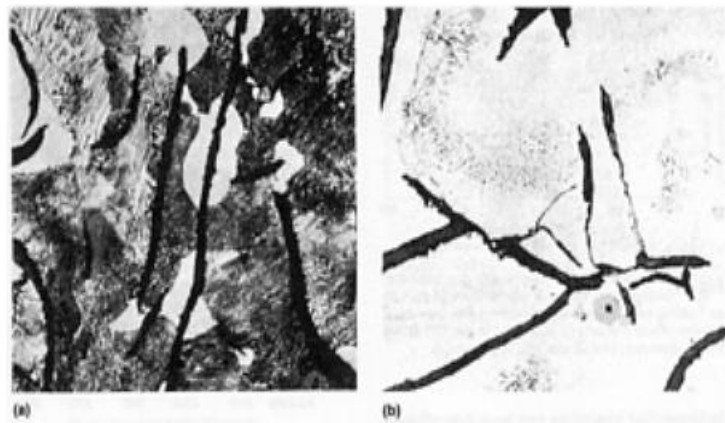
Yumuşatma tavlama sıcaklıklarında yeni grafit çekirdeklerinin oluşumu mümkün olmadığından perlit parçalanması ile açığa çıkan karbon yayınarak en yakın grafit çökeltisi üzerinde kristalleşir. Bu olayı kolaylaştıran veya engelleyen her etki parçalanmayıda etkiler. Bakır ve kalay gibi alaşım elemanları grafit çökeltilerinin üzerine veya çevresinde biriktiklerinden, karbon yayınmasını yavaşlatırlar ve yumuşatma tavlama sırasında perlit parçalanmasını yavaşlatırlar[2]. Nikelin ise bu olaylara önemli bir etkisi yoktur. Alaşım elemanlarının miktarı ayrıca sementitin kararlılığını belirler[19]. Silisyum ve alüminyum gibi sementitte çözünemeyen ve ferritte biriken elementler sementitin kararlılığını düşürürler. Yani silisyum ve alüminyum ferritlenmeyi teşvik ederler. Buna karşın karbür oluşturan elementler sementit içinde tercihen çözünürler ve bu fazın kararlılığını artırır. Bunlar arasında krom, mangan, vanadyum ve yüksek derişikliklerde kükürt sayılabilir. Bu elementler sementitin parçalanmasını yavaşlatırlar ve hatta tümüyle önlerler. Bunlar arasında krom en etkin olanıdır[22]. Şekil 3.18 'de aynı kimyasal bileşime sahip dökme demirlerde bazı alaşım elementlerinin değişik sıcaklıklarda sertlik değeri üzerindeki etkileri görülmektedir, iç yapıda krom ve/veya vanadyum karbürlerin bulunması halinde kısmi veya tam bir karbür çözünmesi için çok yüksek sıcaklıklar ve/veya tavlama süreleri gerekmektedir [9].

Perlitik bir yapının ferritik bir iç yapıya dönüşmesinde lamel grafitli dökme demirde çekme dayanımının % 10..30 düşeceği dikkate alınmalıdır. En büyük düşüşler alaşımsız dökme demirlerde ortaya çıkar. Karbür kararlılığını sağlayan elementlerin miktarına bağlı olarak yumuşatma tavlama sonrasında Brinell sertliği 30..150 birim düşer [9].

Bunun sonucu talaşlı işlenebilme kabiliyeti artar, aşınmaya karşı dayanıklılık ise önemli ölçüde azalır. Malzemenin tokluğu, titreşimleri sönmüleme kabiliyeti, ısı ve elektriksel iletkenliği

önemli ölçüde artar.Yorulma dayanımı ve kırılma tokluğu bakımından önemli bir fark saptanamamıştır[1]. Ancak yumuşatma tavlı yapılmış malzemede çatlak başlangıçlarının çok daha önce oluştuğu bilinmektedir.Bu olgu grafit/matris ara yüzeyindeki bağın zayıf olması ile açıklanmaktadır.Öte yandan ferritin matriste çatlak ilerleme hızı daha yavaş olmaktadır.Yumuşatma tavlı sırasında dökme parça yüzeyinde oksidasyon oluşması daha sonra uzaklaştırılabilecek uygun yüzey kaplamaları veya koruyucu atmosfer kullanılarak önlenabilir[9].Gri dökme demirler, genellikle üç farklı tavlama işleminden birine tabi tutulur ve her biri farklı sıcaklık aralıklarında ısıtmayı içerir.Bu işlemler ferritleştirme tavlaması, tam yumuşatma tavlaması ve grafitleştirme tavlamasıdır[8-10].

Yumuşatma Tavlaması : Normal kompozisyonda, alaşımsız veya düşük alaşımlı bir dökme demir için, istenen tek sonuç perlitik karbürün ferrite ve grafitte dönüşmesi olduğunda, dökümün dönüşüm aralığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılmasına genellikle gerek yoktur. Yaklaşık 595 °C (1100 °F) sıcaklığa kadar, kısa süreli ısıtma, gri demirin yapısı üzerinde önemli bir etki yapmaz. Sıcaklık 595 °C'nin (1100 °F) üzerine çıktıkça, demir karbürünün ferrit ve grafitte dönüşme hızı belirgin bir şekilde artar ve bu oran, dönüşüm sıcaklığının alt sınırına (alaşımsız veya düşük alaşımlı demir için yaklaşık 760 °C veya 1400 °F) ulaştığında maksimuma çıkar. Bu durum, şekil 3.19'da gösterilmektedir; şekil a'da döküm durumundaki alaşımsız gri demirin yapısı, şekil b'de ise 1 saat boyunca 760 'de (1400 °F) tutulduğunda elde edilen yapısı görülmektedir. Aynı süre boyunca daha yüksek sıcaklıklara ısıtmak, eğer dökümün tamamen veya kısmen ostenite dönüşmesine yol açarsa, tavlama sürecine zarar verebilir[10].



Şekil 3.19. Alaşımsız gri demirin döküm halindeki perlitik yapısının tavlama yoluyla ferrit ve grafitte dönüştürülmesi.(a) Döküldüğü gibi;180 HB.(b) 760 °C'de 1 saat tavllanmış;120 HB. (Büyütme, 500×)[7]

Alaşımsız gri dökme demirlerde A_1 dönüşüm sıcaklığı aşağıdaki formülden bulunur:

$$A_1(^{\circ}\text{C})=730+\%28 \text{ Si} - \%25 \text{ Mn} \quad (3.3)$$

$\%3,35 \text{ C}$, $\%2,15 \text{ Si}$, $\%55 \text{ Mn}$ içeren bir alaşımın A_1 sıcaklığı $730+(28 \times 2,15) - (25 \times 0,55) = 776^{\circ}\text{C}$ olmaktadır. Bu sıcaklığın altındaki ferrit ve üzerindeki ostenit olmaktadır.

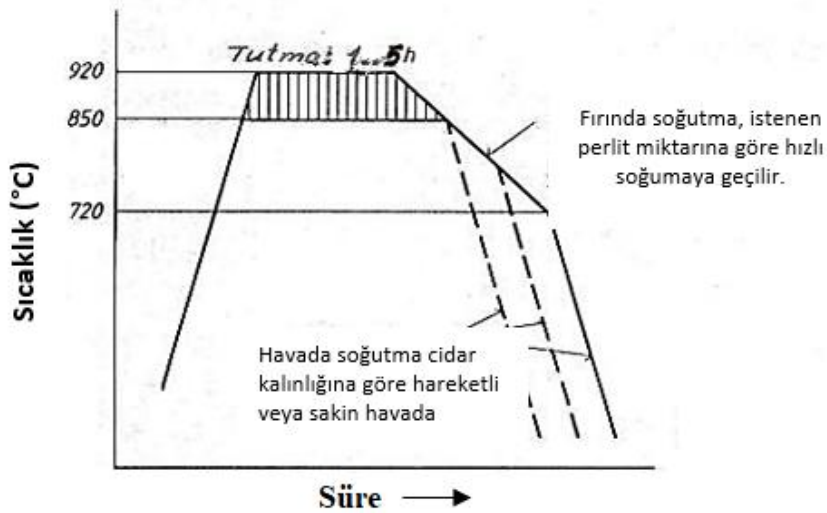
Çoğu gri dökme demir için, ferritleştirme tavlama sıcaklığının 700 ile 760°C (1300 ile 1400°F) arasında olması tavsiye edilir. Fırın sıcaklık profili, dökümlerin belirlenen sıcaklıklara ulaşmasını sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu sıcaklık aralığındaki kesin sıcaklıklar, demirin tam bileşimine göre belirlenir. İşlenebilirlik özellikleri ön planda olduğunda, en düşük nihai sertliği elde etmek için 700 ile 760°C (1300 ile 1400°F) arasındaki farklı sıcaklıklarda birkaç örnek tavlanaarak en uygun sıcaklık belirlenmelidir. Döküm, grafitleşme sürecinin tamamlanması için yeterli süre boyunca sıcaklıkta tutulmalıdır[8]. 700°C 'nin (1300°F) altındaki sıcaklıklarda, genellikle aşırı uzun bir tutma süresi gerekir. 700 ile 760°C (1300 ile 1400°F) arasındaki sıcaklıklarda ise tutma süresi kimyasal bileşime bağlı olarak değişir ve alaşımsız dökümler için bu süre 10 dakika kadar kısa olabilir. Eğer olağan dışı derecede düşük bir soğuma hızı kullanılıyorsa, sıcaklıkta kalma süresi daha da kısaltılabilir. Soğuma hızı doğrudan tavlama sürecinin başarısı için çok önemli olmasa da, tavlama sırasında otomatik olarak gerçekleşen gerilme giderme etkisinin, döküm oda sıcaklığına düşerken korunabilmesi için yavaş soğuma önerilir. En karmaşık dökümler hariç, 110°C/saat (200°F/saat) ile 290°C (550°F) arasında değişen bir soğuma hızı, genellikle yeterlidir [7].

Tam Yumuşatma Tavlama : Gri dökme demir parçasının alaşım miktarı yüksek ise ferritleştirme tavlama ile talaş kaldırma kabiliyeti geliştirilemez. Bu parçalara tam yumuşatma tavlama yapılır. Parça A_1 sıcaklığının üzerinde $790-900^{\circ}\text{C}$ arasında ısıtılır. Tavlama süresi yine her 25mm kalınlık için 1 saattir. Soğuma sırasında A_1 sıcaklığından yavaş geçilir. Yani parça 790°C 'den 675°C 'ye çok yavaş soğutulur [8].

Grafitleştirme Tavlama : Bu ısıtma işlemin amacı çok iri karbürleri perlit + grafit haline getirmektir. Bunun için sıcaklık $900-955^{\circ}\text{C}$ arasında olur. Isıtma tamamlanınca amaca göre soğutma yapılır. Amaç maksimum mukavemet ve aşınma direnci elde etmek ise tavlama sıcaklığından itibaren sakın havada soğutma yapılır. Talaş kaldırma kabiliyetini arttırmak amacı için ise tavlama sıcaklığından itibaren fırında soğutma yapılır [24].

3.3.2. Normalizasyon

Gri dökme demirlere normalizasyon ısıtma işlemi, A_1 sıcaklığının üzerine ısıtılması, her 25 mm kalınlık için 1 saat süre ile tutulması ve daha sonra sakin havada soğutma yapılması ile gerçekleştirilir. Normalizasyon tavının amacı; sertlik ve çekme mukavemeti gibi mekanik özellikleri arttırmak veya döküm onarım kaynağından özellikleri geliştirmektir. Normalizasyon sıcaklığı genellikle $885-925^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Ostenitleme sıcaklığı mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde belirgin etki yapar[8]. Normalizasyon tavisinde başlangıç iç yapısının türü önemli değildir. Ancak başlangıç iç yapısında büyük oranda ferrit bulunması halinde ostenit bölgesinde tutma süresi artırılarak karbonun ostenit içinde yeterince çözünmesine fırsat verilmelidir. Normalizasyonun ilk kademesi bir ostenitleme tavisine olup bu işlem yüksek sıcaklıkta yumuşatma tavisine benzer. Soğutma hızı ferrit değil perlit oluşumunu sağlayacak şekilde seçilmelidir, ancak bu hız martenzit oluşumuna neden olacak kadar yüksek olmamalıdır. Normalizasyon işlemindeki sıcaklık-zaman eğrisi Şekil 3.20'de görülmektedir [9].



Şekil 3.20. Dökme demirlerin normalizasyon ısıtma işleminin şematik gösterimi [9]

Ostenit bölgesindeki tutma sıcaklığının aşırı yüksek seçerek tane irileşmesine neden olmaktan kaçınılmalıdır. Soğutma ortamı ise parçanın iriliğine göre belirlenmelidir. Perlitik bir iç yapı için iri parçaların hareketli hava içinde soğutulmaları gerekirken, bazı durumlarda su püskürtmek dahi zorunlu olur. İlerde de ele alınacağı gibi arzulanan dönüşümlerin gerçekleşmesi için çoğu zaman bakır, nikel ve/veya molibden gibi alaşım elementlerinin katılması yolu seçilebilir. İnce parçalar için genellikle havada soğutma yeterli olmaktadır. Yapının sadece kısmen perlitik olması istenirse bu durum tav sıcaklığı, süresi ve soğutma hızı ile ayarlanabilir. Ferrit oranı arttıkça malzemenin tokluğu artar ve çatlak ilerleme hızı azalır [10].

Hızlı soğutma nedeniyle oluşabilecek gerilmelerin azaltılması için teorik olarak sadece 550 °C'a kadar hızlı soğutmak , gerektiğinde bu sıcaklıkta bir süre tutmak ve daha sonra fırında soğutmak uygundur. Ancak bu sıcaklığa tam olarak inmenin güç olduğu durumlarda, önce soğutma yapılarak daha sonra gerilme giderme tavı uygulanır [11].

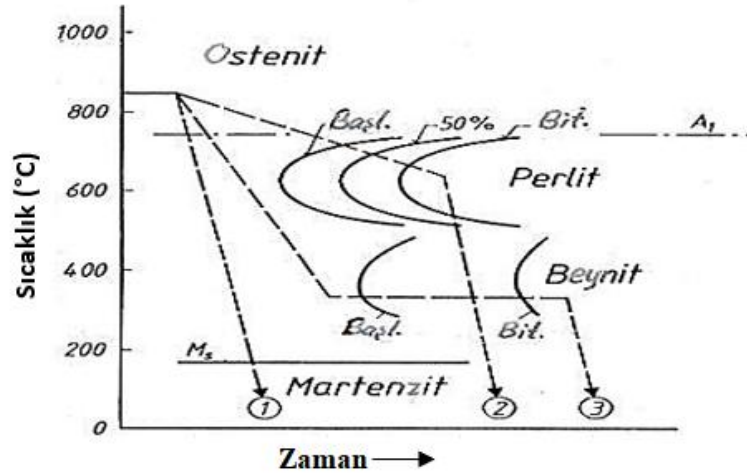
3.3.3. Su verme ve ıslah işlemi (Temperleme)

Dökme demirlerin mekanik özellikleri ve aşınmaya karşı dayanıklılıklarını su verme ve ıslah etme ile önemli ölçüde iyileştirilebilir [9]. Su verme sırasında ostenit bölgesinden yağ veya suda ortamında hızla soğutulan malzemede normal ostenit ferrit dönüşümü gerçekleşemez. İçinde daha yüksek oranda karbon çözüdüren ostenit, içinde hemen hemen hiç karbon çözüdüremeyen ferrite değil, ostenitle aynı kimyasal bileşime sahip iğneli yapıya sahip sert martenzite dönüşür. Çok gevrek olan martenzite kritik sıcaklığın altında temperlenerek (menevişlenerek) bir miktar süneklik kazandırılır [9].

Bilindiği gibi demir esaslı malzemelerin dönüşüm davranışları, Şekil 2.17' de olduğu gibi ZSD-diagramlarında gösterilebilir. Martenzitik bir iç yapı elde etmek için perlit burnunu kesmeden geçecek bir hızda soğutmak gereklidir, Şekil 3.18 - 1 çizgisi. Martenzit oluşumu için gerekli minimum soğuma hızı kritik soğuma hızı olarak adlandırılır [10].

Karbon miktarı çok yüksek olan dökme demirlerin hemen hepsi sertleşebilir özelliklere sahiptir. Ancak tüm karbonu grafit olarak ayrılmış ve bağlı sementit miktarı çok düşük olan dökme demirlerin sertleştirilmesi pratik olarak uygun değildir, çünkü karbonu ostenit içinde çözeltiye alabilmek için çok uzun tav süreleri gerekir. Kimyasal bileşim ve alaşım elementi miktarları gerekli tav sıcaklığını, tutma süresini, kritik soğuma hızını, oluşan sertliği ve sertleşme kabiliyetini etkiler [7].

Lamel grafitli dökme demirde karbon mümkünse % 3,3'ün altında kalmalı, silisyum ise % 1..2 olmalıdır, %2'den fazla silisyum bulunması karbonun ostenit içinde çözünmesini engeller ve elde edilen sertlik değerleri düşük olur. Daha yüksek karbon ve silisyum derişikliklerinde de yeterli bir sertliğe ulaşılabilmesine rağmen maksimum değerlerin % 3,3 C ve % 2,0 Si ile sınırlandırılması uygun olur. Lamel grafitli dökme demirde grafit mümkün olduğunca ince lamelli olmalıdır. Lamelli dökme demirlerde sertleştirme sırasında oluşan iç gerilmelerin lamel uçlarındaki çentik etkisiyle mikro çatlaklar oluşturma ihtimali unutulmamalıdır [9-11].



Şekil 3.21. Zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramları ve bazı ısı işlemlere ait soğuma eğrileri ;
1 : su verme, 2 : perlitlenme, 3: ostemperleme[9]

Alaşım elementleri de sertleşme kabiliyetini etkilerler. Döküm tekniği bakımından gerekli olabilecek yüksek karbon ve silisyum oranlarında dahi alaşımlama yardımıyla başarılı bir sertleştirme yapılabilir. Kobalt dışında tüm alaşım elemanları ZSD diyagramlarını sağa kaydırır ve kritik soğuma hızını düşürür. Böylece hızlı soğutma sırasında oluşabilecek çatlak ve çarpılmalar ortadan kalkar[9].

Ostenitleme Sıcaklığı ve Süresi : Ostenitleme tavı sıcaklığı ferrit/ostenit dönüşüm sıcaklığına bağlı olarak seçilmelidir. Bu sıcaklık ne kadar yüksek olursa gerekli tutma süresi o kadar azalır. Karbonun grafitten çözünme hızı, grafitin içyapıda ne kadar ince dağıldığına bağlıdır. Yani yayınma mesafesi ne kadar kısa ise çözünme o kadar hızlı olur[10].

Dönüşüm sıcaklığının 30, 60 °C üzerindeki bir sıcaklık yeterli olmasına rağmen, genellikle 850..950 °C arasındaki sıcaklıklar tercih edilir. Tam bir ostenitleme sağlamak için gerekli tutma süresi 1 saat olup buna her 25 mm kalınlık için 1 saat eklenir, ince dağılmış lamel grafitler içeren malzemelerde bu süre 15 dakikaya kadar inebilmektedir[9].

Su verme : Su verme sonucunda ostenit tümüyle veya kısmen sert martenzit fazına dönüşür. Gerekli soğuma hızı ZSD diyagramlarından alınabilir. Bu hıza uyulamadığı zamanlar martenzit yanında perlit ve beynit de oluşabilir[13].

Dökme demirlerde su verme ortamı olarak yağ banyoları yaygın olarak kullanılır. Bazı alaşımlı türler için havada soğutma da yeterli olur. Bilindiği gibi parçalar su verme banyosunda hareket ettirilmeli ve kalın kesitler banyoya önce daldırılmalıdır. İç gerilmeleri azaltmak için yaklaşık 150°C'a soğuyan parçalar banyodan çıkarılarak hemen temperlenir[11].

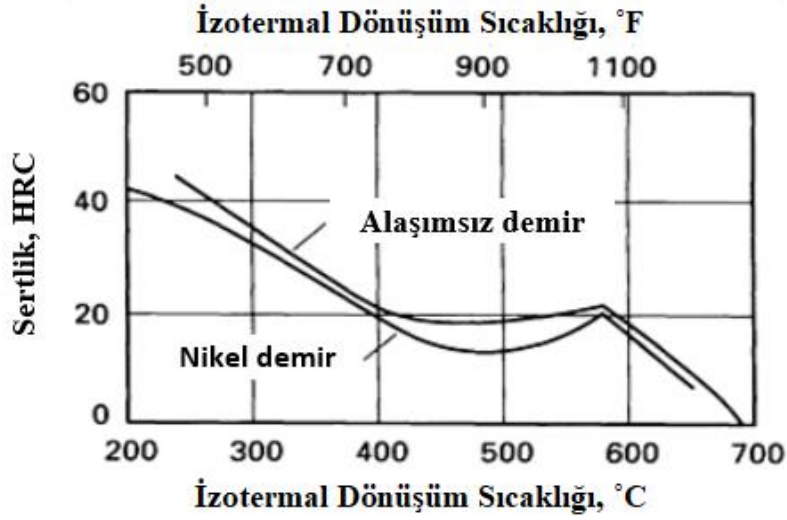
Temperleme: Dökme parçalar su vermeden sonra genellikle menevişlenirler. Bu işlem sırasında parçalar dönüşüm sıcaklığının altında 150 ile 650 °C arasında tutulurlar. Menevişleme sıcaklığı parçanın kullanım sıcaklığından yüksek seçilmelidir[9]. 250°C sıcaklığa kadar tetragonal martenzit kübik bir yapıya dönüşür ve bu sırada dislokasyonların bulunduğu bölgelere karbürler çökeler, sertlik çok fazla değişmemesine rağmen kırılmalık bir miktar giderilmiş olur. 250..400°C sıcaklıkları arasında karbürlerin veya tane sınırındaki çökeltilerin sementite dönüşümü gerçekleşir. Bu durumda sertlik ve gevreklik giderek kaybolur [10]. 400°C sıcaklığın üzerindeki temperleme sıcaklıklarında sementit taneciklerinin büyüklüğü artar, sertlik daha da azalarak süneklik yükselir[9].

Tutma süresi olarak her 25 mm kalınlığa 1 saat yeterlidir. Menevişleme işlemiyle gerilmeler giderilir, kırılmalık azalır ve birçok mekanik özellik iyileşmiş olur[9]. Su verme sonrasında sertlik 45 ila 60 RC (430 ila 600HB) değerine yükselir, bu arada süneklik ve çekme dayanımı düşüktür. Dökme demirlerin sertleşme kabiliyeti çelikler için kullanılan Jominy Deneyi ile saptanabilir. Bu deneyde saptanan sertlik derinliği malzemenin sertleşme kabiliyetinin ölçütüdür[9].

Temperleme ile dökme demir sertlikten kaybeder, ancak çekme dayanımı ve tokluk değeri iyileşir. 200°C' a kadar yapılan temperlemede sertlikte önemli bir azalma olmadığından bu işlem aşınma dayanımının önemli olduğu uygulamalar için idealdir. En yüksek dayanımı elde etmek için alaşımsız dökme demirler 300 ila 370°C'ta temperlenir. İç yapı karallığının daha yüksek olduğu alaşımlı dökme demirlerde ise temperleme sıcaklığı 400 ila 500°C sıcaklıklarında bir gevrekleşme söz konusu olduğundan bu aralıkta menevişleme yapılması tavsiye edilmez. Bu temper gevrekliği bileşime molibden katılması ile azaltılabilir[10].

3.3.4. Östemperleme

Ostemperlemenin amacı martensit dönüşümü olmadan beynitik mikroyapı elde ederek gri dökme demiri sertleştirmektir. Matris mikro yapısı beynit kalıntı ostenitten oluşur. Bu ısı işlemde döküm klasik su verme sıcaklığına 840-900°C' ye ısıtılarak matrisin ostenite dönüşmesi sağlanır. Daha sonra döküm 230 - 425°C sıcaklıklarında tuz, yağ veya kurşun banyosuna sokulur. Bu fırında parça tutularak ostenit beynite dönüştürülür. Banyonun sıcaklığına göre oluşan mikroyapı ve elde edilen sertlik değişir (Şekil 3.22). Yüksek sertlik ve aşınma direnci ısı banyo sıcaklığı 230-290°C arasında tutulur. Döküm parçasının kimyasal bileşimi banyoda tutma süresini tayin eder. Alaşım elementleri genellikle sürenin uzamasına yol açar[8].



Şekil 3.22. Su vermenin ve temperlemenin alaşım bileşiğine sertlikle ilgili etkileri. Sonuçlar aynı sertlik aralığında ostenize edilmeden önce sertlik ve 850°C'den yağda su verilmek için normalleştirilmiştir[8]

3.3.5. Martemperleme

Martemperleme kesikli su vererek martensit mikroyapısı elde edilen bir ısıtma işlem türüdür. Martemperlemede su verme ile kalıntı gerilmeleri çok az olur. Döküm su verme sıcaklığına ısıtılır ve daha sonra martensit dönüşüm sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta (200-260°C) banyonun içerisine sokulur. Dökümün her tarafı banyo sıcaklığına ulaşınca parça fırından çıkarılır sakın havada soğutulur[8]. Geleneksel sertleştirmeye benzerdir, ancak bozulma en aza indirilir. Bununla birlikte, martensitin karakteristik kırılganlığı, martemperlemeden sonra gri dökümde kalır ve martemperlenmiş dökümler neredeyse her zaman temperlenir[8]. Tamamen martensitik bir yapı isteniyorsa, döküm, sıcak söndürme banyosunda yalnızca banyonun sıcaklığına ulaşmasına izin verecek kadar uzun süre tutulmalıdır. Bu nedenle, dökümün boyutu ve şekli, martemperlemenin süresini belirler[7].

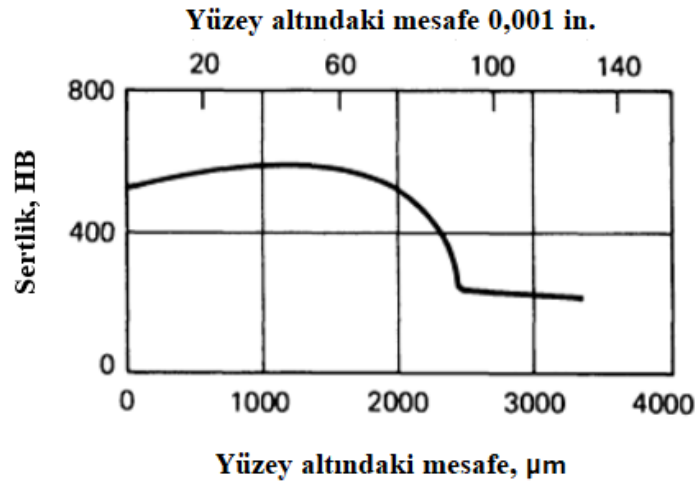
3.3.6. Alev ile sertleştirme

Bu yüzey sertleştirme yöntemi genellikle gri dökme demirlere uygulanmaktadır. Alevle sertleştirme sonunda yüzeyde aşınmaya dayanıklı, sert martensit tabakası oluşurken malzemenin içi yumuşak kalmaktadır. Hem alaşımsız hemde alaşımlı gri dökme demirlere alevle sertleştirme başarı ile uygulanmaktadır. Ancak bazı kimyasal bileşimler daha iyi sonuç vermektedir. Alevle sertleştirilecek gri dökme demirde birleştirilmiş karbon oranı (yani ısıtma sırasında oluşan ostenitin karbon oranı) % 0,50 ile % 0,70 arasında olmalıdır. Bu oran % 0,40'ın altına düşerse elde edilen sertlik düşmektedir. Karbon % 0,80'in üzerine çıkarsa (benekli veya beyaz dökme demir gibi) yüzeyde su verme sırasında çatlama olmaktadır[10].

Su verme sonrası maksimum sertlik elde etmek için döküm parçasının toplam karbon oranı mümkün olduğu kadar az olmalıdır. Yüksek karbonlu dökümlerde sık sık iri grafit levhaları oluşur. Döküm yüzeyindeki levhalar alevle sertleşme sırasında yanar ve yüzeyin gözenekli hale gelmesine sebep olur. Silisyum, gri dökme demirlerde grafit oluşturup birleştirilmiş karbon oranını azaltan etki gösterir. Bu nedenle döküm silisyum içeriğinin az olması istenir. Alevle sertleştirilecek dökümlerde silisyum oranının % 2'den az olması istenir[7].

Alevle yüzeyi sertleştirilecek dökümler porozite, kum ve curuf içermemelidir. İnklüzyonlar yüzey pürüzlülüğüne ve çatlamalara sebep olur. Yüzeydeki döküm kabukları ısı yalıtımı etkisi yapar alevle sertleştirmenin etkisini azaltır. Bu nedenle yüzeydeki inklüzyonlar ısıtılma işlem öncesi temizlenmelidir. Alevle ısıtılan yüzeye su, sulu polivinil alkol soğutma sıvısı olarak püskürtülür. Suyun 30°C sıcaklıkta olması istenir. Klasik su vermede kullanılan klasik yağlar, yangın riskinden dolayı alevle sertleştirmede kullanılmaz. Alaşım dökümlerde hava üfleyerek de su verme sağlanır [7].

Şekil 3.23'de gri dökme demirlerin alevle sertleştirilmesinde elde edilen tipik sertlik profili görülmektedir. Yüzeydeki sertlik biraz düşük olmalıdır. Yüzeyde fazla miktarda kalıntı ostenit oluşması sertliğin biraz düşük olmasına yol açmaktadır. Döküm 195 - 250°C arasına ısıtılırsa bu kalıntı ostenit dönüşümü sağlanarak yüzey sertliği artırılır. Alaşımsız gri dökme demirlerin alevle sertleştirilmesinde elde edilen maksimum sertlik 400 - 500 BHN arasında olur[8].



Şekil 3.23. Gri dökme demirin alevle sertleştirilmesiyle üretilen tipik sertleşme profili[12]
 % 2,5 Ni + % 0,5 Cr veya %1,5 Ni + % 0,25 Mo alaşım elementleri ilavesi ile sertlik 550 BHN'e çıkabilmektedir. Alaşım elementleri sertleşme kabiliyetinide arttırdığı için sertleşme derinliği de artmaktadır. Alaşım elementlerinin bu etkiyi gösterebilmesi için alevle ısıtma sırasında bu elementlerin oluşan ostenitte çözünebilmesi gerekir[8].

Alevle sertleştirilen dökümlerin temperlenmesi gerekmemektedir, ancak 150 – 200 °C’de gerilme giderme tavlama yapılabilir. 150°C’de 7 saat tavlama alevle sertleştirme kalıntı gerilmelerinin %25-40’ını giderirken yüzey sertliğinde çok cüz-i (2-5 Ra) sertlik azalmasına sebep olur. Gerilme giderme ısı işlemi çarpılma ve çatlama riskini azaltırken sertleştirilmiş tabakanın tokluğunu artırır. Bu ısı işlem arzu edilen bir final işlem olsa da sık sık uygulanmaz[7].

3.3.7. İndüksiyonla yüzey sertleştirme

Çok sayıda gri dökme demir parçasına yüzey sertleştirme yapılacaksa indüksiyonla sertleşme uygulanabilir. Isıtma kullanılan bobin maliyeti yüzünden parça sayısının çok olması ekonomik açıdan gereklidir. Bu yöntemin en büyük özelliği çarpılmaların çok az olmasıdır. Sertleştirilecek dökümlerde minimum birleştirilmiş karbon oranı % 0,40 – 0,50 arasında olmalıdır. Isıl işlem sırasında sertleştirilecek yüzey tabakası 870 - 925°C arasına ısıtılır. Tavlama süresi aşırı uzatılırsa yüzeyde taneler kabalaşır ve su verme sonrası kalıntı ostenit miktarı fazla olur. Elde edilen yüzey sertliği döküm karbon eşdeğerine bağlıdır. Karbon eşdeğeri arttıkça grafit miktarı artar ve elde edilen sertlik düşer[8].

3.3.8. Gerilme giderme tavlama

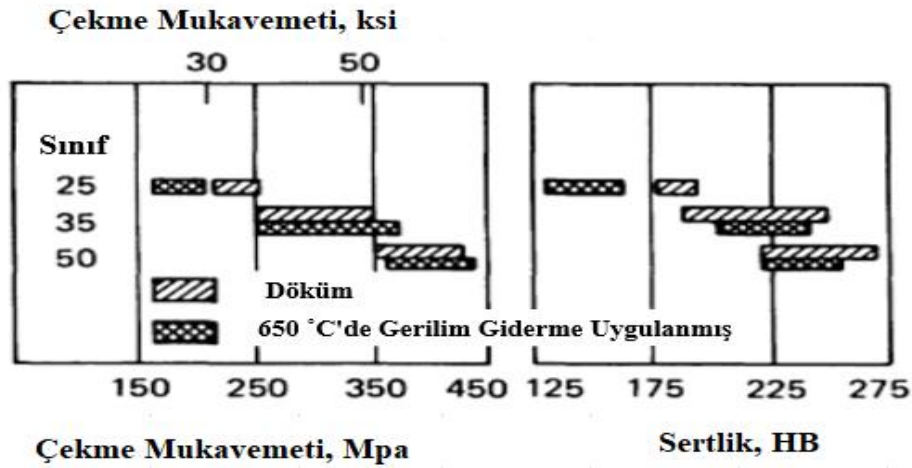
Döküm yöntemiyle üretilmiş bir parçanın iç gerilmesiz olarak elde edilmesi hemen hemen imkansızdır. Dökümün katılaşması ve soğuması sırasında bu gerilmeler oluşur. Döküm halindeki gri demir, (kalıpta soğutulmadığı sürece, bu durumda katılaşma geriliminin çoğu giderilir) artık gerilimler içerir çünkü soğuma (ve dolayısıyla büzülme) dökümün çeşitli bölümlerinde farklı hızlarda ilerler. Ortaya çıkan artık gerilimler mukavemeti azaltabilir, bozulmaya neden olabilir ve aşırı durumlarda çatlama yol açabilir. Bu gerilimlerin büyüklükleri dökümün şekline, kesit boyutuna ve kalınlığına, kullanılan döküm tekniğine, döküm malzemesinin bileşimine ve özelliklerine son olarak dökümün geriliminin giderilip giderilmediğine bağlıdır. İç gerilmelerin oluşum nedenleri üç grup altında toplanabilir:[8],[12-13].

a). Soğuma hızı farklılıkları: Soğuma hızı farklılıkları parçanın yüzeyi ile iç kısımları arasında olabildiği gibi, farklı çidar kalınlıklarına sahip bölgeler arasında da ortaya çıkabilir. Hızlı soğuyarak büzülmesini tamamlamış kısımlar, daha sonra soğuyarak büzülme isteyen bölgelere engel olacağından ve bu uyumsuzluk soğumuş parçada bir plastik şekil değişimi ile giderilemeyeceğinden parçada iç gerilmeler kalacaktır[12].

b). Serbest büzülememe: Parçanın kalıp içinde serbestçe büzülememesi sonucu da gerilmeler oluşabilir. Gerek kalıp, gerekse maça malzemelerinin büzülmeyi engelleyebilecek dayanıma sahip olmaları durumunda büyük iç gerilmeler ortaya çıkabilir[9].

c). Yüzey temizleme işlemleri: Kum veya bilye püskürtme gibi yüzey temizleme işlemleri basma iç gerilmeleri yaratabilir.[24]

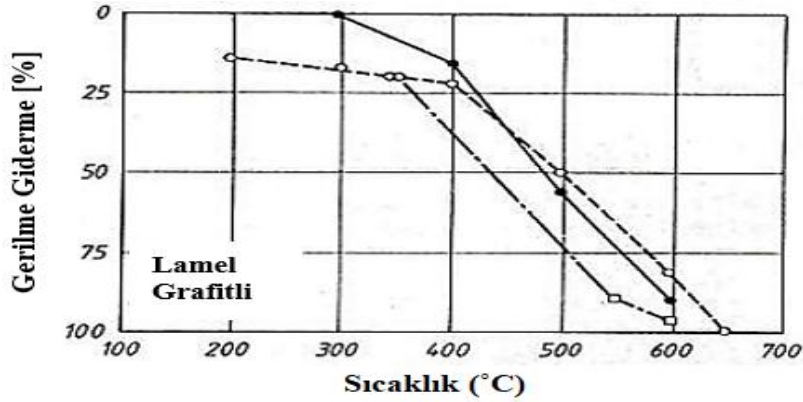
İç gerilmeleri önlemek için değişik tedbirler alınabilir. Bunlar arasında döküm tekniğine uygun biçimlendirme ve boyutlandırma ile döküme özgü tekniklerle farklı kalınlıklardaki cidarların soğuma hızlarını etkilemek sayılabilir. Döküm sonrasında parçayı kalıptan çıkarma sıcaklığını ve dolayısıyla soğuma hızını uygun seçmek de çok önemlidir[25]. Döküm iç gerilmelerinin azaltılması için en emin metot ısıtma işlemi uygulamaktır. Bu işlem sırasında yüksek sıcaklıklarda tutulan malzemenin akma sınırı düşer ve mevcut iç gerilmeler sonucu plastik şekil değişimleri oluşarak iç gerilmeler ortadan kalkar. Parçada kalıcı şekil değişimleri olabileceğinden gerilme giderme tavının parçanın işlenmesinden önce yapılması gereklidir. Ancak akma sınırı hiçbir zaman sıfıra düşürülemeyeceğinden gerilmelerin tamamen giderilmesi söz konusu değildir[25]. Gerilme giderme ısıtma işlemi ostenit dönüşüm sıcaklığının altında gerçekleştirilir ve parça yavaş soğuma ile oda sıcaklığına getirilir[24].



Şekil 3.24. 25,35 ve 50 sınıflarındaki gri demirlerin çekme dayanımları ve sertlik üzerindeki etkileri. Toplam fırın süresi 43*3/4 saat 650°C'de 6 saat gerilim giderme tavi uygulandı[8]

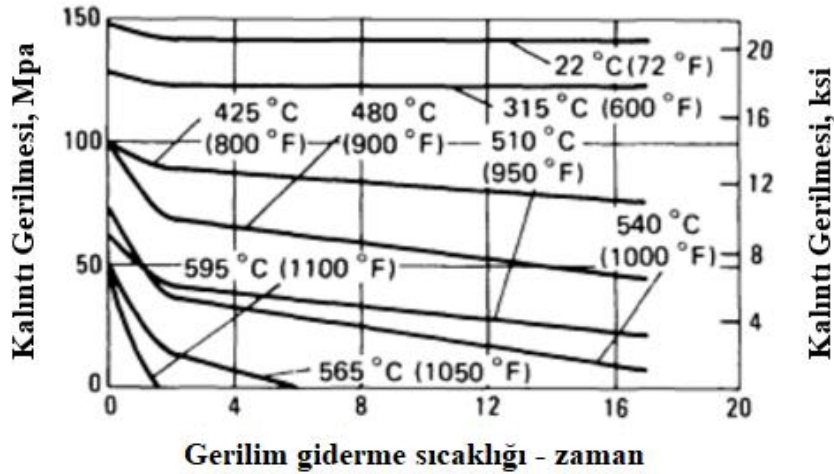
Şekil 3.24'de belirtildiği gibi 25 sınıfı gri dökme demirin özellikleri 35 ve 50 sınıfı demire göre daha fazla etkilenmiştir[8]. Gerilme giderme tavidaki ana parametreler tav sıcaklığı ve süredir. Artan sıcaklık ve süre ile işlemin etkinliği artar. Ancak artan sıcaklık, iç yapı dönüşümlerine (perlitin grafit ve ferrite dönüşmesi) neden olacağı için aşırı yükseltilemez, aksi halde dayanım düşüşleri oluşur [24]. Sıcaklığın gerilme giderme üzerine etkisi Şekil 3.25 'de görülmektedir.

Buna göre 400°C'nin altındaki sıcaklıklarda iç gerilmelerin ancak % 20-30'u giderilebilmektedir. 500°C sıcaklıkta ise gerilmeleri %75'inin kaybolduğu görülmektedir [24].



Şekil 3.25. Lamel grafitli dökme demirlerde tav sıcaklığıyla gerilme giderme yüzdesinin değişimi[24].

Alaşımsız dökme demirlerde 600°C'ın üzerindeki sıcaklıklarda veya uzun sürelerde iç yapı değişimleri sonucu dayanım ile sertlik düşer, buna karşın işlenebilme kabiliyeti artar. Isıl işlem sonrasında yapılacak basit bir sertlik ölçümü ile iç yapı değişimlerinin olup olmadığı anlaşılabilir [1].



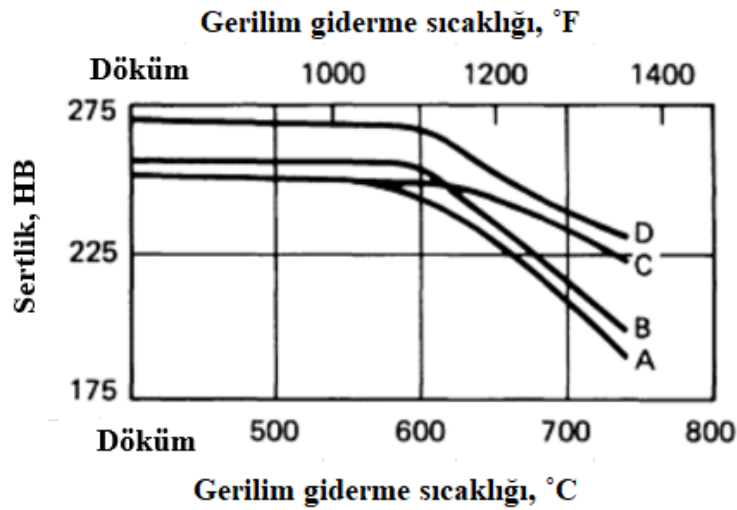
Şekil 3.26. Gri demirde gerilim giderme sıcaklığı ve süresinin kalıntı gerilime etkisi. Demir bileşimi: 2,72% C, 1,97% Si, 0,141% P, 0,080% S, 0,51% Mn [8]

Alaşımsız dökme demirlerde gerilme giderme ısıl işleminin sıcaklığı 500-550°C arasında seçilir. Grafitin serbest olarak bulunduğu dökme demirler daha az iç gerilmeler içereceğinden (daha az çekme) ve lamel grafitli dökme demirlerin akma dayanımları düşük olacağından bu tür malzemelerde ısıl işlem sıcaklığı daha düşük seçilebilir. Buna karşın perlit içeren yüksek

dayanımlı dökme demir türlerinde %70 oranında bir gerilme giderme sağlamak için bu sıcaklık aralığının üst sınırı 570-580°C'a yükseltilmelidir [24].

Düşük alaşımlı dökme demir için 550-600°C arasında bir sıcaklık aralığı önerilmektedir, çünkü krom, molibden, nikel ve vanadyum gibi elementler malzemenin yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirmekte ve gerilme giderme tavlı sıcaklığında malzemenin akma dayanımını yükselterek plastik şekil değiştirmeyi ve dolayısıyla gerilmelerin azalmasını güçleştirmektedir. Buna ek olarak krom, molibden ve vanadyum gibi karbür stabilizasyonu sağlayan elementlerin varlığı iç yapı dönüşümü tehlikesini (örneğin perlitin parçalanması) azaltmaktadır. Bu nedenle bu tür malzemelerde sıcaklığın 620°C'a kadar artırılması düşünülebilir [24].

Yüksek alaşımlı malzemeler tercihen 600-650°C sıcaklıklarında tavlanırlar. Şekil 3.27'de alaşımlı alaşımsız gri dökme demirin belirtilen gerilme giderme tavlında sertlik değerlerine etkileri gösterilmiştir [7].



Şekil 3.27. Tavlama sıcaklığının alaşımlı ve alaşımsız gri dökme demirlere sertlik açısından etkileri 30 mm çapındaki çubuk numuneler belirtilen sıcaklıklarda 1 saat tutuldu ve ardından havada soğutulmuştur[8]

Tablo 3.7. Gerilim giderme uygulanan A,B,C,D malzemelerinin kimyasal bileşimi

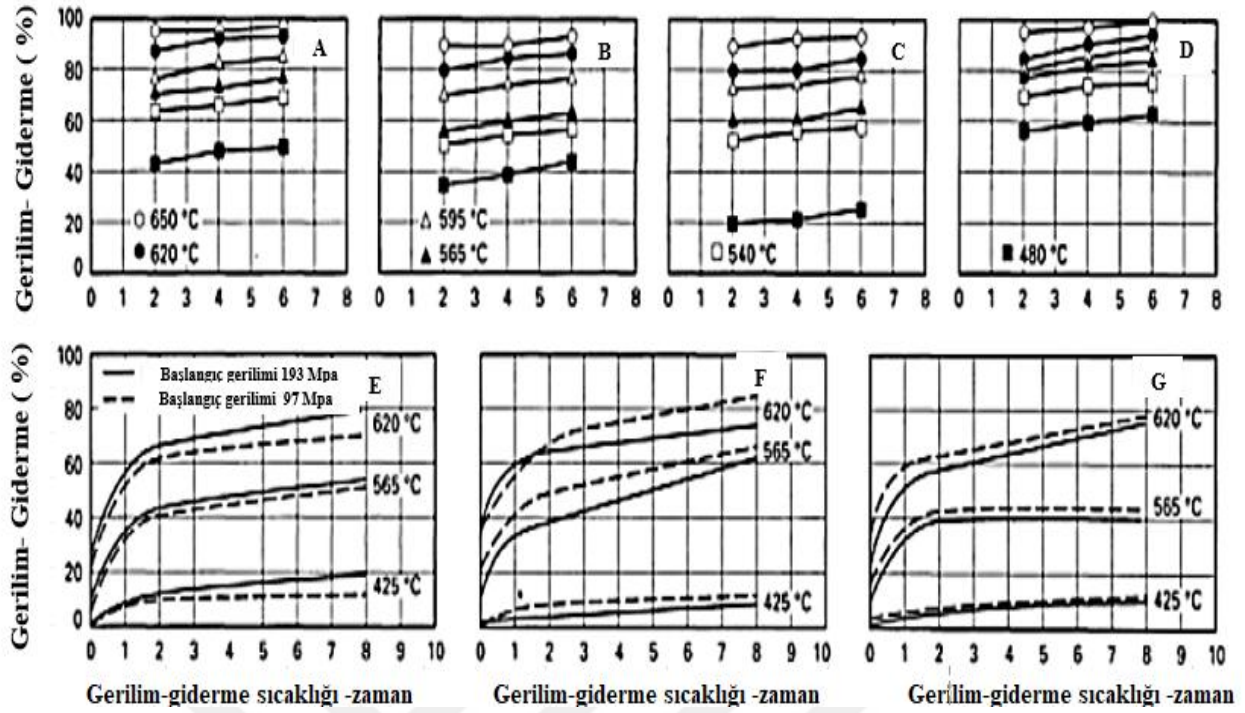
Dökme Demir	Kimyasal Bileşim					
	TC	CC	Si	Cr	Ni	Mo
A	3,20	0,80	2,43	0,13	0,05	0,17
B	3,29	0,79	2,58	0,24	0,10	0,55
C	3,23	0,70	2,55	0,58	0,06	0,12
D	3,02	0,75	2,38	0,40	0,07	0,43

Tablo 3.8. Gri dökme demirlerdeki % Cr miktarına bağlı olarak tavsiye edilen tavlama sıcaklıkları şöyledir [7]

Dökme Demir	Sıcaklık,°C
Alaşımsız veya Cr içermeyen Alaşımlı	510 - 565 °C
0,15 - 0.30 % Cr	595 - 620 °C
> 0.30 % Cr	620 - 650 °C

Eğer dökme demirde çok az kalıntı gerilme isteniyorsa üstte tavsiye edilen sıcaklıklara 30°C ilave edilir.Fakat aynı zamanda sertlik ve mukavemet kritik ise kabul edilemez sertlik veya mukavemet azalması olup olmadığını belirlemek için gerilim giderme uygulanmış dökümün sertliğini kontrol etmek tavsiye edilir [8].

Isıl işlem sırasında ısıtma hızı parça çeşidine ve büyüklüğüne bağlıdır.Fırının sıcaklığının yükleme sırasında 95°C'yi geçmemesi son derece önemlidir.Fırın yüklendikten sonra ısıtma hızı oldukça yüksek olabilir. Örneğin, yaklaşık 3 saatte 620°C'ye ısıtmak ve o sıcaklıkta 1 saat tutmak gibi. Özellikle çok karmaşık tasarımlı parçalarda fırın içinde 95°C'ye kadar soğutmak tavsiye edilir. Genellikle 315°C'ye kadar fırında soğutma ve daha sonra fırın dışında sakın havada soğutma yapılır. Bu koşullar, dökümlerde ek termal gerilim oluşmasını önlemek için çeşitlik sıcaklık bölgelerinin kontrol edilebildiği sürekli fırınlar için de geçerlidir.Sertlikte değişikliklere neden olabilecek alevin dökümlere çarpmasının önlenmesi zorunludur [7-8].



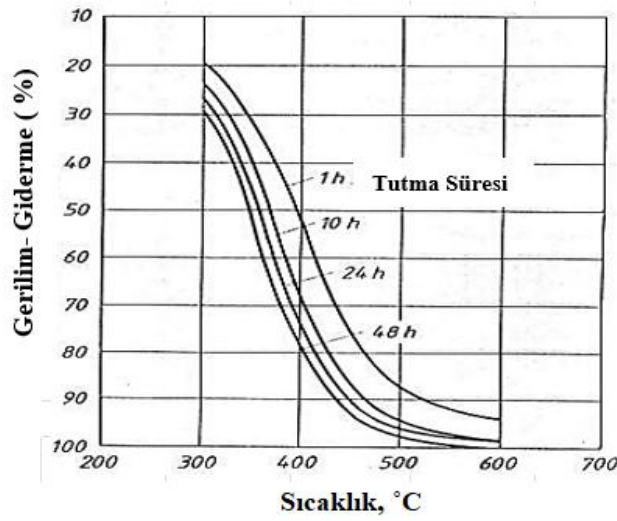
Şekil 3.28. Farklı kimyasal bileşime sahip dökme demir malzemelerin farklı sıcaklıklarda gerilim giderme tavlama değerlendirmesi[8]

Tablo 3.9. Gerilim giderme uygulanan A,B,C,D,E malzemelerinin kimyasal bileşimi

Dökme Demir	Kimyasal Bileşim								Sertlik, HRB	
	C	Si	P	S	Mn	Ni	Cr	Mo	Gerilim Giderme Öncesi	Gerilim Giderme sonrası 8 saat 620°C'de tutuldu.
A	3,20	0,80	2,43	0,13	0,05	0,17	2,43	0,13	98	94
B	3,29	0,79	2,58	0,24	0,10	0,55	2,58	0,24	98	94
C	3,23	0,70	2,55	0,58	0,06	0,12	2,55	0,58	95	95
D	3,02	0,75	2,38	0,40	0,07	0,43	2,38	0,40	82	80
E	3,23	0,70	2,55	0,58	0,06	0,12	2,55	0,58	98	98
F	3,02	0,75	2,38	0,40	0,07	0,43	2,38	0,40	94	95

Şekil 3.27’de düşük alaşımlı gri demirlerde elde edilen gerilim giderme derecesi üzerinde gerilim giderme süresi ve sıcaklığının etkisi. Tablo, maksimum gerilim giderme koşullarının sertlik üzerindeki bileşimlerini ve ihmal edilebilir etkisini göstermektedir [8]. Gerilme giderme genellikle ilk 1 saat içinde gerçekleştiğinden yüksek sıcaklık ve kısa sürelerin kullanılması, düşük sıcaklık ve uzun sürelerin kullanılmasından daha ekonomiktir. Şekil 3.28’de tav süresinin gerilim gidermeye etkisi görülmektedir. Tav sıcaklığında tutma süresi olarak her 25 mm kalınlık için 1 saat alınabilir[9].

Isıl işlem sonrasında lokal iç gerilmelerin oluşmasını önlemek için dökme parçalar en azından üst sıcaklık bölgelerinde yavaş soğutulmalıdır. 650 ile 300 °C sıcaklıkları arasındaki soğuma hızı 40 °C/saati geçmemelidir. Birçok halde 25 - 35 °C/saat uygun olmaktadır. Genellikle ısıtma ve soğutma hızlarının eşit seçilmesi tavsiye edilir.[9]Çoğu kez fırında soğutma önerilmektedir, ancak izolasyonların mükemmel olduğu modern fırınlarda soğuma hızları çok düşüktür, bu durumda fırın içine hava üflenerek soğuma hızı artırılabilir. Önerilen soğuma hızına yaklaşık 300°C sıcaklığa kadar uyulması zorunludur, bundan sonra parça sakın havada soğutulabilir.Karmaşık parçalar ve cidar kalınlığı farklılıklarının büyük olduğu durumlarda 100 °C sıcaklığa kadar fırında soğutma gerekebilir[8],[10],[11].



Şekil 3.29. Alaşımsız lamel grafitli bir dökme demirde tutma süresinin gerilme gidermeye etkisi[9]

Örnek : Tablo 3.10’da , 225 kg (500 lb) dizel motor silindir bloklarındaki kalıntı gerilimler üzerinde farklı soğutma yöntemlerinin ve gerilim giderme işlemlerinin değerlendirilmesinin sonuçlarını göstermektedir. Bu bloklar %3,25 C, %2,20 Si ve %0,30 Cr içeren ve 240 MPa (35 ksi) çekme dayanımına sahip gri demirden yapılmıştır[8].

Tablo 3.10. 225 kg (500 lb) dizel motor silindir bloklarındaki kalıntı gerilim üzerinde kalıp bozma ve gerilim gidermenin uygulamasının etkisi[8]

UYGULAMALAR	Yakınlık mm	Gerilim - Giderme %
1. 6 saat sonra kalıp bozma , maçalı halde 27°C'ye soğutma; toplam süre 16 saat	4,1	Değerlendirmenin temeli
2. Uygulama 1, Maçalar hariç 6 saatte kalıp bozma	1,9	52%
3. Kalıp bozma öncesinde kalıpta 16 saat soğutma	1,6	60%
4. Uygulama 1 , Sonrasında 2 saat 540°C'de Gerilim-giderme ısıt işlemi 340°C'ye kadar fırında soğutma	1,5 - 1,9	%52 - %62
5. Uygulama 1 , Sonrasında 2 saat 620°C'de 2 Gerilim-giderme ısıt işlemi 340°C'ye kadar fırında soğutma	0,3	91%

Kalıp bozma sonrası her iki bloğunda bir ucuna dikey çizgi çizildi.Bu çizgiler arasındaki mesafe, her bloğun ucundan ilk silindir deliğine kadar dikey testere kesimleri(çizilen çizgilere paralel) yapılmadan önce ve sonra ölçüldü.Kesme işleminden sonra iki dikey çizgi arasındaki yakınlık miktarı, kalıntı gerilimin göreceli bir ölçüsüdür[8],[11].

Tablo 3.10’daki sonuçlar kalıpla bozmanın içteki maçalar dahil, iç bölümlerin daha hızlı soğumasına izin vererek, dış bölümlerin soğumasını yavaşlatmak için döküm kalıpta bırakma prosedürü gibi, gerilimleri önemli ölçüde azalttığını göstermektedir[8].

Belirtildiği gibi, 540 °C'de gerilim giderme, 620 °C'de gerilim gidermeye göre çok daha az etkili olmaktadır[8],[11].

4.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1.Deneysel Çalışmaların Planlanması

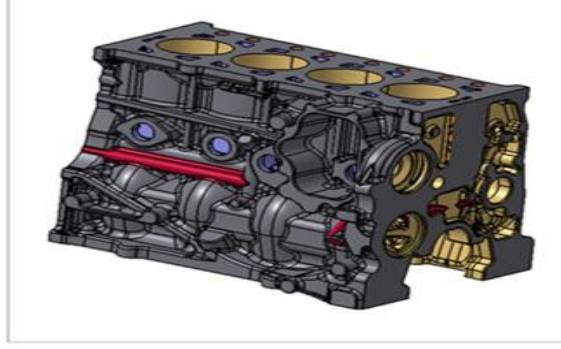
Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalara ilk önce lamel grafitli gri dökme demir malzemeli motor blokların döküm prosesiyle üretilen parçaların ayrılmasıyla başlanılmıştır. Ayrılan motor blokların 2 adeti Sistem Teknik Marka 6 brülörlü fırında 10 saat gerilim giderme ısı işlemine, diğer 2 adeti 15 saat gerilim giderme ısı işlemine tabii tutulmuştur. Bu aşamada ısı işlemde harcanan doğalgaz, elektrik Observer izleme programından alınmış, harcanan işçilikler tarafımdan hesaplanıp kayıt altına alınmıştır. Belirlenen ısıtma-bekleme-soğutma program şartlarını tamamlayan ısı işleminden çıkarılan parçalar ayrı ayrı çekme testi , sertlik testi, mikroyapı analizi ve bias firmasından destek alınarak kalıntı gerilmeleri ölçülmüştür. Gerilim giderme tavlama işlemi tavlama sıcaklığı sabit tutulup, bekletme süreleri ve soğutma süreleri değişken parametre olarak seçilmiştir. Gerilim giderme işlemleri sonrası sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılıp gerilim giderme ısı işlem süresinin arttırılmasının lamel grafitli gri dökme demir malzemeli motor blokların mekanik özelliklerine ve işletme maliyetlerine etkileri incelenip yorumlanmıştır.

4.2. Deneysel Numunelerin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan motor bloğun parça ağırlığı 110,6 Kg ve ölçüleri 358 x 482 x 361 mm'dir. Blok 4 silindirli, lamel grafitli gri dökme demir malzeme ile üretilen bir traktör parçasıdır. Parça resmi Şekil 4.1'de, spektral analiz yöntemiyle yapılan kimyasal bileşimi aşağıda Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1.Motor bloğun kimyasal bileşimi

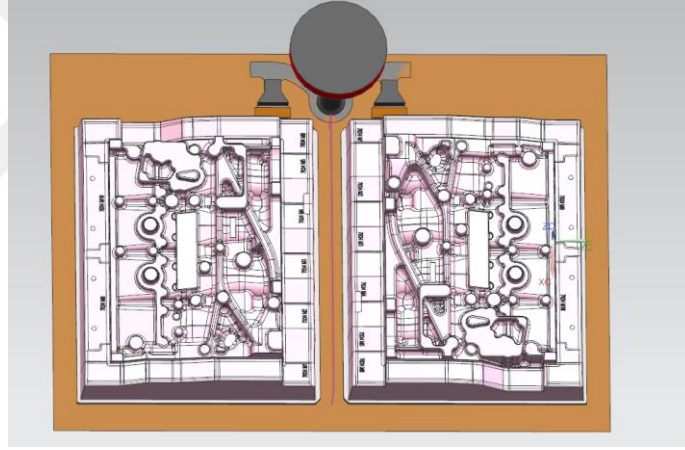
Kimyasal Bileşim											
C	Si	S	Mo	Cr	Cu	Sn	Mn	Ti	Mg	P	Ni
3.100	2.137	0.77	0.022	0.268	0.663	0.073	0.857	0.020	0.001	0.026	0.024



Şekil 4.1. Motor Blok

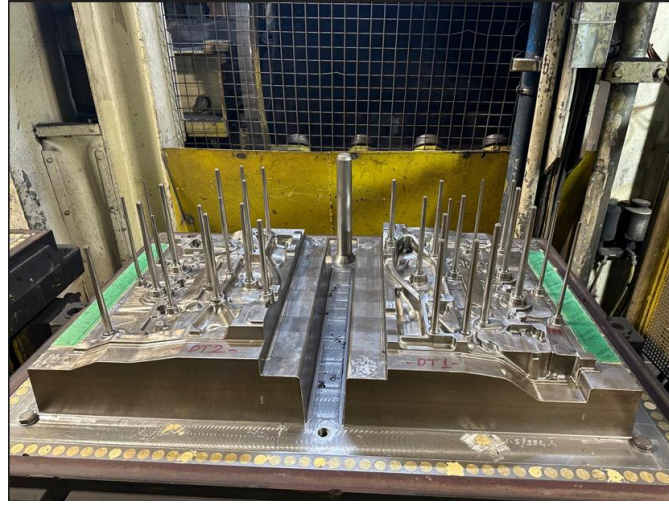
4.3. Motor Blokların Üretilmesi (Deneyisel Numunelerin Üretimi)

EN GJL 250 tipli malzeme 2'nolu hattımızda derece'de 2 adet olarak kalıplanmıştır. Döküm sıcaklığı 1400 derece döküm süresi 22 saniyede gerçekleşmiştir. Bloğun derece ve yolluk planı Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Kalıp kumu olarak silis kumu tercih edilmiştir. Ayrıca, kalıp kumunun karışımında su, bentonit ve kömür tozu gibi katkı maddeleri de bulunmaktadır.



Şekil 4.2. Motor bloğun derece ve yolluk görseli

Kalıplama işlemi için alt ve üst derece olmak üzere iki farklı model kullanılmıştır. Kalıp boşluğunda gerekli olan noktalara soğutucu, filtre ve destek elemanları yerleştirilmiş, sonrasında motor blok maçası konulmuştur. Motor blok maçası üzerine ise ihtiyaç duyulan noktalara destek elemanları yerleştirilmiştir. Şekil 4.3'de motor blokların kalıplanma öncesi model görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Motor blokların kalıplanma öncesi model görüntüsü

Kalıba yerleştirilen motor bloğu maçası, toplamda 13 adet maçadan oluşmaktadır. Bu maçalar, Döktaş Maça Üretim Merkezinde bulunan farklı cold-box maça preslerinde üretilmiştir. Maçaların yapımında silis ve kromit kumu kullanılırken, bağlayıcı olarak reçine ve katalizör olarak dimetiletilamin tercih edilmiştir. Ayrıca, parçada yüksek yüzey kalitesi elde edebilmek amacıyla maçalar, maça boyları ile boyanmıştır. Şekil 4.4’de kalıba yerleştirilen filtre ve maçaların kalıp kapatılmadan önce görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Maça ve Filtreler yerleştirildikten sonraki görüntüsü

Kalıp kapatılmadan önce, içerideki toz, kir ve benzeri kalıntılardan arındırılmak amacıyla basınçlı hava ile temizlenmiştir. Temizleme işlemi tamamlandıktan sonra, kapama ünitesinde üst derece ve alt derece birleştirilerek kalıp kapatılmış ve döküm işlemi için hazır hale getirilmiştir.

4.3.1. Sıvı metalin ergitilmesi

Ergitme işlemi, 14000 kg kapasiteli ve 8 MW güçte çalışan orta frekanslı bir indüksiyon ocağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5). Şarj malzemesi olarak gri piki, otomotiv hurdası ve geri döngü yolluk kullanılmıştır (Şekil 4.6). Şarj malzeme karışımında 2 ton gri piki, 6 ton DKP sac ve 6 ton (geri döngü) yolluk kullanılmıştır. Şarjda kullanılan hurda sacın kimyasal analizi Tablo 4.2'de, geri döngü yolluğunun kimyasal analizi Tablo 4.3'de gri pikinin kimyasal analizi ise Tablo 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. 14 ton kapasiteli indüksiyon ocağı

Tablo 4.2. Hurda sac kimyasal analizi

C (%)	S (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	Cr (%)	Cu (%)	Sn (%)	Ti (%)
0,004	0,009	0,002	0,09	0,011	0,025	0,021	0,000	0,025



Şekil 4.6. Şarj malzemesi olarak kullanılan DKP sac (solda) ve gri piki (sağda)

Tablo 4.3. Geri döngü yolu kimyasal analizi

C	Si	S	Mo	Cr	Cu	Sn	Mn	Ti	Mg	P	Ni
3.100	2.137	0.77	0.022	0.268	0.663	0.073	0.857	0.020	0.001	0.026	0.024

Tablo 4.4. Gri piki kimyasal analizi

C	Si	Mn	P	S
3.50 - 4.50 %	2.00 - 2.40 %	0.40 - 0.80 %	0,08 % Max	0,04 % Max

Ergitilen metal, döküm sıcaklığına ulaşmasının ardından curufu çekilmiş ve analizi onaylanmış sıvı metal döküme alınır. Döküm potasında ön aşılama işlemleri uygulanmaktadır.(Pota aşılması) Bu işlemler, künkel wagner otomatik döküm arabası potasında yapılmıştır.



Şekil 4.7. Künkel Wagner döküm potası

Aşılama malzemesi superseed 75 aşılama kullanılmıştır. Analizi Tablo 4.5’de gösterilmiştir. 1 ton sıvı metal için ortalama 1,5 kg aşılama kullanılır. Nihai aşılama pota çili ölçülerek yapılır. Bu parça dökümünde 3 - 3,5 aralığında çil derinliği istenilmektedir.

Tablo 4.5. Superseed 75 aşılama kimyasal analizi

%Si	%Ca	%Ba	%Sr	%Zr	%Ce	%Mn	%Al
73 - 78	0.1 max	—	0.8 - 1.4	—	—	—	0.5 max

4.3.2. Döküm prosesi

Döküm işlemine başlamadan önce sıvı metaldeki cürufun temizlenmesi için cüruf temizleme istasyonunda perlit kullanılarak potalardaki sıvı metalin cürufu temizlenmiştir. Ayrıca bu işlem sırasında termokupl ile sıcaklık ölçümü de yapılarak sıvı metal sıcaklığının uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir. Cüruf temizleme istasyonu Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Cüruf temizleme istasyonu

Cürufu temizlenen sıvı metal dolu potadan bir kepçe yardımıyla çil ölçümü numunesi, karbon-kükürt numunesi ve spektro numunesi alınmıştır. 3 ayrı numune için görseller Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Bu numuneler ile kalite masasında çil derinliği ölçülür. Kimyasal analizler ise laboratuvar da yapılmıştır. Numuneler alındıktan sonra pota, Şekil 4.10’da görüldüğü gibi döküm arabasına yerleştirilerek Hat 2’de döküm yapılmıştır.



Şekil 4.9. Spektro numune alma – karbon-kükürt numune alma – çil ölçümü numune alma



Şekil 4.10. Pota döküm arabasına yerleştirilmiş döküm anı görseli

Onay süreçlerinden geçmiş ve döküm potasına alınmış sıvı metal kalıp üzerindeki açılmış havşa boşluğu üzerinden dökülmüştür. 1 derecenin (2 adet motor blok) döküm süresi yaklaşık 22 saniye’de gerçekleşmiştir. Dökümleri yapılan dereceler soğuması için tünellere gönderilmektedir. Ortalama 3 saat tünel içerisinde bekletildikten sonra dereceler kalıp bozma bölgesine otomatik olarak gelir ve kalıp bozmadan çıkarılan parçalar bir andromat yardımıyla konveyörlere yüklenerek tamamlama bölümüne ulaştırılır (Şekil 4.11).

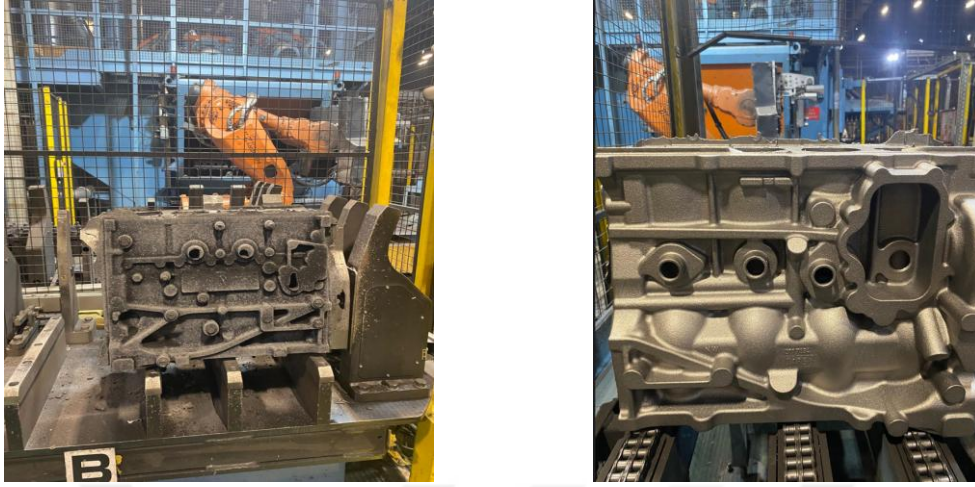


Şekil 4.11. Kalıp bozma bölgesinden konveyöre andromat yardımıyla parça yükleme

4.3.3. Temizleme taşlama prosesleri

Konveyöre yüklenen parçalar yaklaşık 4 saat içinde soğumuş bir şekilde tamamlama hat karşılama bölgesine ulaşır ve devirici sistemi ile parçalar hatta alınmaktadır. Tamamlama hat karşılama bölgesinde besleyici ve yolluk girişleri hidrolik makas ve balyoz yardımlarıyla kırılmıştır. Üzerlerindeki kumlar silkelendikten sonra parçalar rössler markalı robotlu 6 türbinli

motor blok temizleme makinasında temizlenmiştir. Temizleme işleminde S 660 tipli çelik bilya kullanılmıştır. Temizleme öncesi ve sonrası resimler Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Soldaki resim temizleme öncesi – sağdaki resim temizlenme sonrası görseller

Temizlenen parçaların çapakları GTG-40 Turbo spiral el aleti kullanılarak operatör yardımıyla taşlandıktan sonra parça ısıl işleme hazır hale getirilmiştir. Taşlanan parça görseli Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Taşlanan motor blok görseli

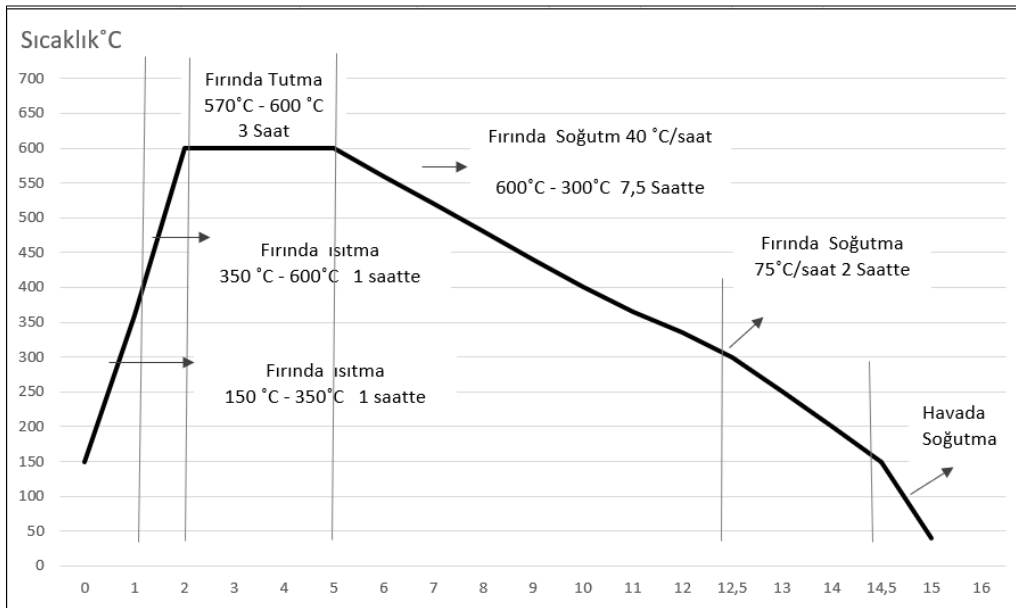
4.4. Isıl İşlem ve Tav Fırını Özellikleri

Isıl işleme hazır hale getirilen parçalar paletler üzerinde arabalı tav fırınına forklift yardımıyla yüklenmiştir. Üretimin yoğunluğuna göre mevcut arabalı tav fırını maksimum 6 palet almaktadır. Parça geometrisine ve palet dizimine göre değişen yükleme ağırlığı fırın kapasitesi maksimum 28’tondur. Şekil 4.14’de parçaların tav fırınında yerleşim görselleri eklenmiştir.

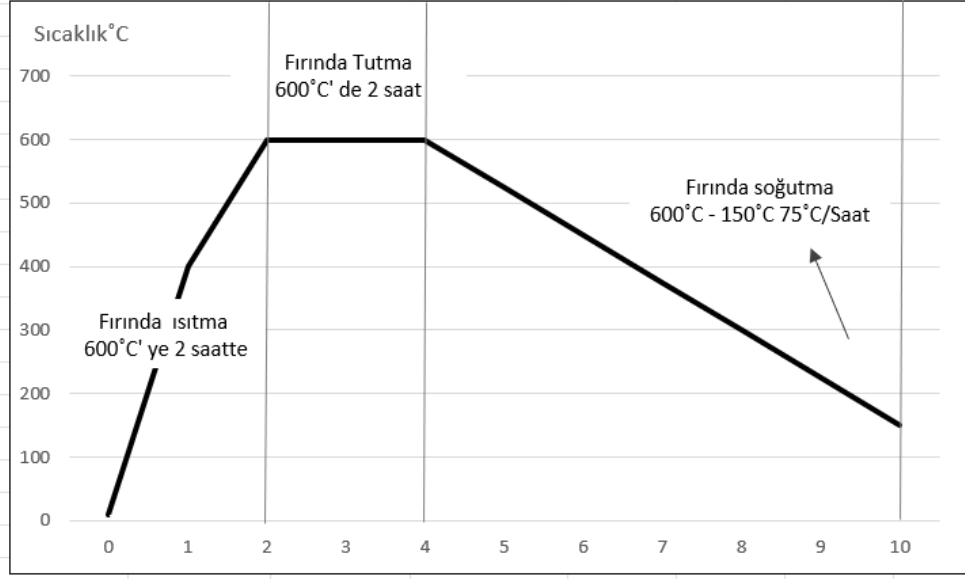


Şekil 4.14. Palet üzerine alınmış motorların tav fırınına yüklenmiş görseli

Parçalar fırına yüklendikten sonra fırın kapağı kapatılır ve istenilen ısı işlem programı ayarlanır. Buradaki ısı işlem programları genellikle müşterilerin isteklerine göre belirlenir. Genellikle 10 saat ısı işlem programları kullanılır. Gerilim giderme işleminde en önemli süreçler belirlenen sıcaklıkta tutma ve soğutma süreleridir. Bu çalışmada 15 saat tav süresinin ve 10 saat tavlama süresinin parçalar üzerinde oluşturduğu mekanik özellikler incelenecektir. Ve aynı zamanda işlem süresinin uzatılmasıyla oluşan işletme maliyetleri belirtilecektir. Şekil 4.15’de 10 saat gerilim giderme ısı işlem grafiği , Şekil 4.16’da 15 saat gerilim giderme ısı işlem grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.15. 15 saat gerilim giderme ısı işlem grafiği



Şekil 4.16. 10 saat gerilim giderme ısıl işlem grafiği

Tablo 4.6'da araba tabanlı tav fırınının detay özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.6. Tav fırını özellikleri

Fırın Tipi	Araba Tabanlı
Proses	Gerilim Giderme
Fırın Faydalı Boyutları	3000 x 4000 x 2500 mm
Fırın Dış Boyutları	4500 x 5250 x 4500 mm
Maksimum Şarj Kapasitesi	28 000 Kg
Fırın Maksimum Sıcaklığı	800 °C
Fırın Çalışma Sıcaklığı	300 - 600 °C
Homojenlik	± 10 °C
Kontrollü Bölge Sayısı	2
Isıtma Hızı	300 °C / Saat
Isıtma Tipi	Doğalgaz
Isıtma Sistemi	Self Reküperatif Doğalgaz Yakıcıları ile (Noxmat)
Soğutma Sistemi	Yakma hava fanı ile yakıcılar üzerinden sağlanır.
Yakıcıların Pozisyonu	Yakıcılar, fırın yan duvarlarına yerleştirilmiştir.
Kontrol Sistemi	SIEMENS PLC
Yükleme / Boşaltma	PLC Kontrollü araba üzerine vinç veya forklift ile

4.5. Laboratuvar Testlerinde Kullanılan Cihazlar

4.5.1. Boyutsal ölçüm kontrolü

10 saat ve 15 saat ısıtıl işlem yapılan motor bloklar Coord3 TR20 manuel CMM cihazında ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm hacmi 500mm, 500mm, 400mm olan tabla üstü tip cihazdır. Hassasiyeti $\pm (2.5+L/100)$ μm 'dir. Şekil 4.17' de Coord 3 tezgahı üzerinde ölçüm yapılan motor bloğu görülmektedir.



Şekil 4.17. Coord 3 CMM cihazı

4.5.2. Çekme testi

Çekme testlerini gerçekleştirmek için, Şekil 4.18' de gösterilen 250 kN kapasiteli, ekstansometreli Shimadzu marka çekme cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, Trapezium-X ve DVE 2 yazılımları ile entegre şekilde çalışmaktadır. Numune, cihazın alt ve üst çeneleri ile kavranarak test işlemine başlanır. Çene bağlantısı sağlandıktan sonra cihazdan çalışma komutu verilir ve çekme testi gerçekleştirilir. Testin sonuçları, cihazdan çıktı olarak alınabilmektedir. Cihazın kalibrasyonu ise her yıl TSE Gebze tarafından yapılmaktadır.



Şekil 4.18. Shimadzu Çekme cihazı

4.5.3. Sertlik testi

Sertlik ölçümleri, 3 tonluk yük kapasitesine sahip ve 10 mm çapındaki bir bilyanın 10 saniye süreyle parçaya batırılması, ardından iz çapının ölçülmesi ve bu çapla ilişkili değerin Brinell sertlik ölçüm yöntemi ile belirlenmesi prensibine dayanmaktadır. Sertlik testlerinin yapıldığı Reicherter marka cihaz Şekil 4.19’da gösterilmektedir. Cihazın kalibrasyonu ise her yıl TSE Gebze tarafından gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.19. Reicherter Marka Sertlik Ölçüm cihazı

4.5.4. Kimyasal analiz ölçümü

Döküm işleminden önce alınan spektro numuneleri, ARL 4460 optik emisyon spektrometresi ile kimyasal analiz için incelenmiştir. Şekil 4.20’de, kimyasal analizlerin gerçekleştirildiği optik emisyon spektrometresi yer almaktadır. Cihazın ölçüm doğruluğu günlük olarak kontrol edilmekte, ayrıca Alisan firması tarafından yıllık bakım ve kalibrasyonu yapılmaktadır.



Şekil 4.20. ARL 4460 Optik emisyon spektrometresi

4.5.5. Mikroyapı analizi

Dökülen parça üzerinde alınan mikroyapı numunelerinin işlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, numuneler sırasıyla Grid 240 ve 1000 numaralı zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve ardından alüminyum oksit solüsyonu ile parlatılmıştır. Sonrasında, numuneler %4'lük nitrik asit çözeltisi ile 30 saniye boyunca asidik bir işlemeden geçirilmiştir. Hazırlanan bu numuneler, mikroskop altında x100 büyütme ile incelenmiş ve yapılan görüntülemelerde grafitlerin yapısı, % küresellik değeri, ana matrisdeki ferrit ve perlit oranları detaylı bir şekilde gözlemlenmiştir. Mikroyapı analizleri, Döktaş Fizik Laboratuvarı'nda yer alan Nikon marka, Clemex Image Analyzer programlarına sahip optik mikroskopa gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.21'de Nikon marka optik mikroskop görüntüsü yer almaktadır.

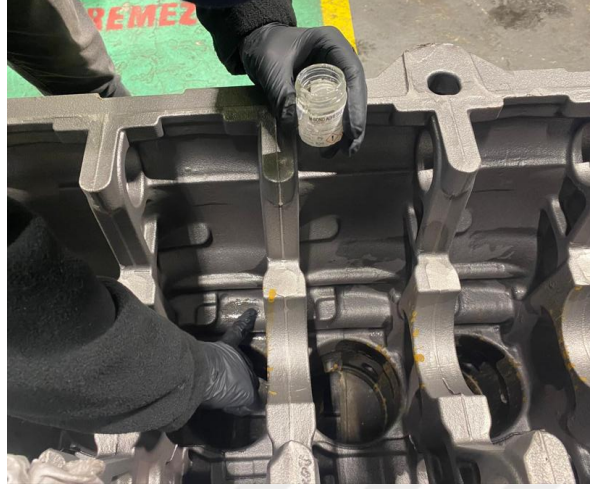


Şekil 4.21. Nikon Optik Mikroskop

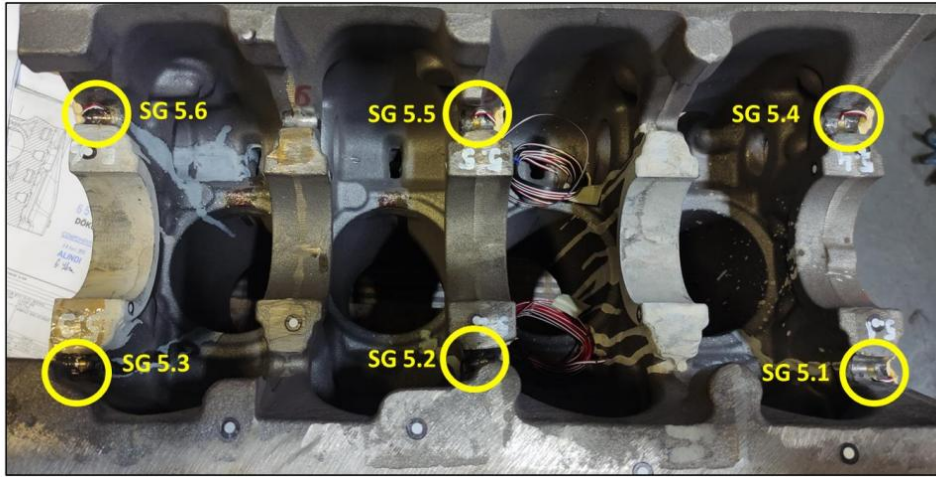
4.5.6. Artık (Kalıntı) gerilme ölçümü

10 saat ve 15 saat gerilim giderme ısı işlemleri uygulanan motor blokların kalıntı gerilim ölçümleri müşteri teknik şartnamesi dökümanlarında bulunan talimatlara göre konumları belirlenip uygulanmıştır. Ölçüm için referans dökümana göre 15 farklı gerilim ölçer lokasyonu belirlenmiştir. Yerleştirilen gerilim ölçerler doğrusal tipinde olduğundan sadece doğrusal yöndeki gerilmeler elde edilmiştir. Gerilim ölçerleri belirlenen bölgelere yerleştirmeden önce, yüzey pürüzlülük boşluklarını doldurmak için 'M-Bond AE-10' tipinde yapıştırıcı sürülmüştür. (Görseli Şekil 4.22'de gösterilmiştir.) Yapıştırıcının 24 saat kurlanma süreci beklenildikten sonra beklenen kalıntı gerilimlerinin yönüne paralel, kesim yönüne dik olacak şekilde gerilim ölçerler takılmıştır. (Görseli Şekil 4.23'de gösterilmiştir.) Ölçüme hazırlanan motor bloklar 3 eksen dikey frezeleme tezgahına bir vinç yardımıyla alınmıştır ve sabitlenmiştir. Daha sonra

gerinim ölçerler veri toplama ünitesine bağlanmıştır ve optimum çalışma koşullarının sağlanması için enerjilendirilmiştir.



Şekil 4.22. Yüzey pürüzlülük boşluklarını doldurmak için sürülen M-Bond AE yapıştırıcısı

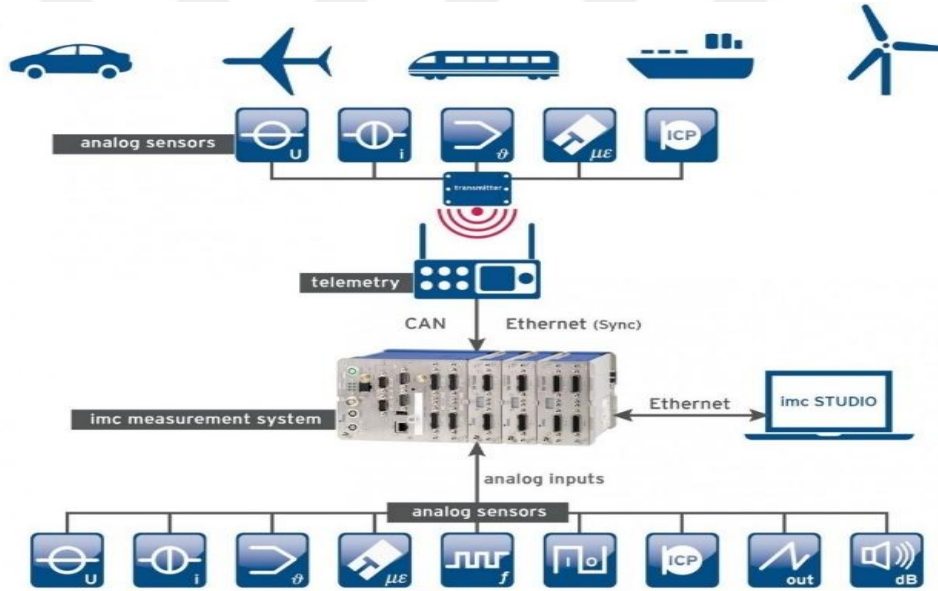


Şekil 4.23. Gerinim Ölçer Bölgeleri Görüntüsü

Kalıntı gerilme ölçümü yapılacak alanlarda parça üzerinde kesme-oyma işlemi uygulanmıştır. Kesme işlemi sırasında, parça üzerindeki kalıntı gerilmeleri nedeniyle deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu deformasyonlar sonucu serbest kalan gerilmeler, uygun sensörler ve ekipmanlar kullanılarak ölçülmüştür. Aşağıda Şekil 4.24 ve 4.25’de kalıntı gerilim ölçüm işlemi ve veri toplama sistemi gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Kalıntı gerilim ölçüm işlem görseli



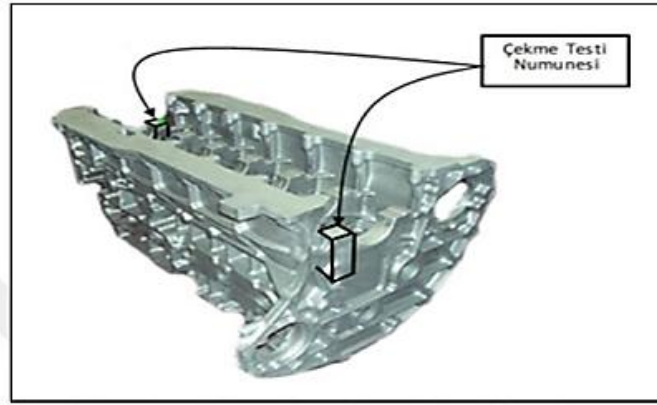
Şekil 4.25. Kalıntı gerilim ölçüm veri toplama sistemi

Deformasyona bağlı olarak sensörün elektriksel direnci değişir. Bu değişim sayesinde birim şekil değiştirme değerleri ölçülebilmektedir. Kalıntı gerilme ölçümünde, kesme işlemi yapıldığında kalıntı gerilmeler serbest kalır ve kesilen bölgeden birim şekil değiştirmeler oluşur. Bu değerler ölçüm alınan yüzeye yapıştırılan strain gage vasıtasıyla ölçülmüştür ve hooke kanunu hesaplamaları kullanılarak kalıntı gerilmeler hesaplanmıştır.

5. MEKANİK TESTLERİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

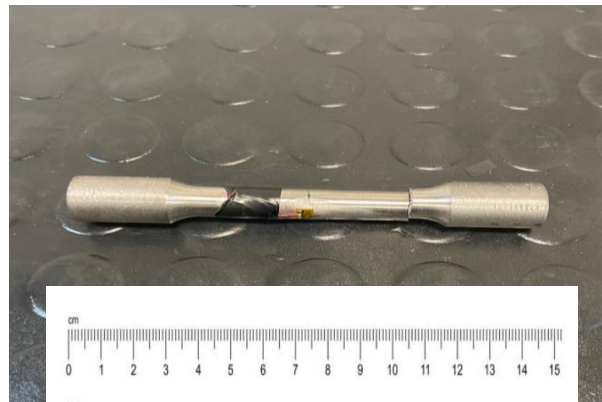
5.1. Çekme Testi

Çekme testi, malzemelerin mühendislik alanındaki uygulamalarda yük altındaki dayanımlarını ölçmek için en yaygın kullanılan test yöntemidir. Bu test sayesinde malzemenin kopma ve akma mukavemeti, elastisite modülü, %uzama oranı ve kesit daralması gibi önemli mekanik özellikler belirlenebilir[25]. Bu çalışmada çekme testi numunesi DIN 50125 standartlarına uygun olacak şekilde tornada işlenmiştir.

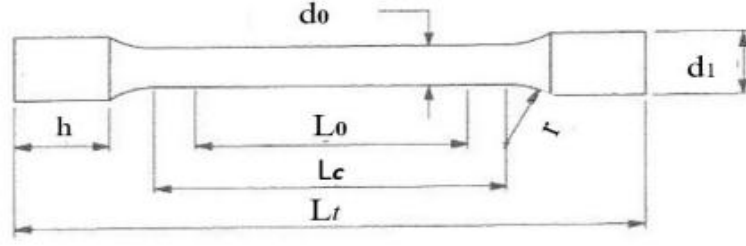


Şekil 5.1. Parçadan çekme testi numune alma bölgeleri

Şekil 5.1’de işlem talimatına göre belirtilen çekme testi numune alma bölgelerinde alınan numuneler tornada işlenerek DIN 50125 Standartlarına uygun hale getirilmiştir. İşlenen çekme çubukları 250 kN kapasiteli Shimadzu marka ekstansometreli çekme testi cihazı ile EN 10002-1:1990 standardına uygun olarak çekilmiştir. Şekil 5.2’de çekme testinden çıkmış numune görseli, 5.3 de çekme çubuğu teknik resmi ve Tablo 5.1’de detaylı ölçümlendirmeleri verilmiştir.



Şekil 5.2. DIN standartlarına göre çekme testine göre numune görseli



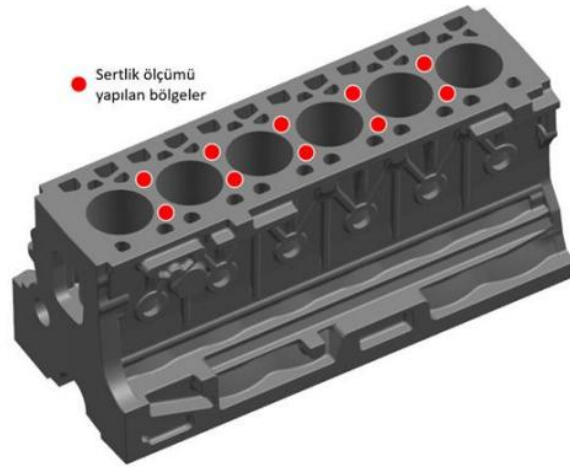
Şekil 5.3. Çekme çubukları teknik resmi

Tablo 5.1. DIN 50125 standardına göre çekme çubukları ölçüleri

d_0	L_0	d_1	r min	h min	L_c min	L_t min
12 mm	60 mm	15 mm	9 mm	40 mm	72 mm	162 mm

5.2. Sertlik Testi

Sertlik değerleri Brinell sertlik metodu ile ölçülmüştür. Yapılan sertlik ölçümleri motor kafa bağlama yüzeyinden ve kep silindir bölgesinin üst yüzeylerinden gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümü yapılan bölgeler Şekil 5.4’de örnek görselde gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Sertlik ölçümü yapılan bölgeler

Sertlik ölçme yöntemi; 10 mm çapındaki bilya ucun, 3000 kg yük ile 10-15 sn arası malzemeye tatbik edilmesi esasına dayanmaktadır. Malzeme üzerinde oluşan iz çapına karşılık gelen değer de malzemenin Brinell cinsinden sertlik değeri olup HB ile gösterilmektedir. Malzemenin sertliği iz çapı ve derinliğiyle ters orantılıdır. Yani iz çapı ve derinliği artar ise malzemenin sertliği düşmektedir. Sertlik ölçümleri ASTM E10-96 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir[8].

5.3. Boyutsal Ölçüm

İki farklı gerilim giderme tav reçetesi uygulanan parçalarda herhangi bir boyutsal değişkenlik olup olmadığını incelemek için iki ayrı numunenin Coord 3 CMM tezgahında sabitlenen koordinatlara göre bölgesel ölçümleri yapılmıştır. Boyutsal ölçümlerin karşılaştırılması excel tablosu oluşturularak yapılmıştır.

5.4. Mikroyapı Analizi

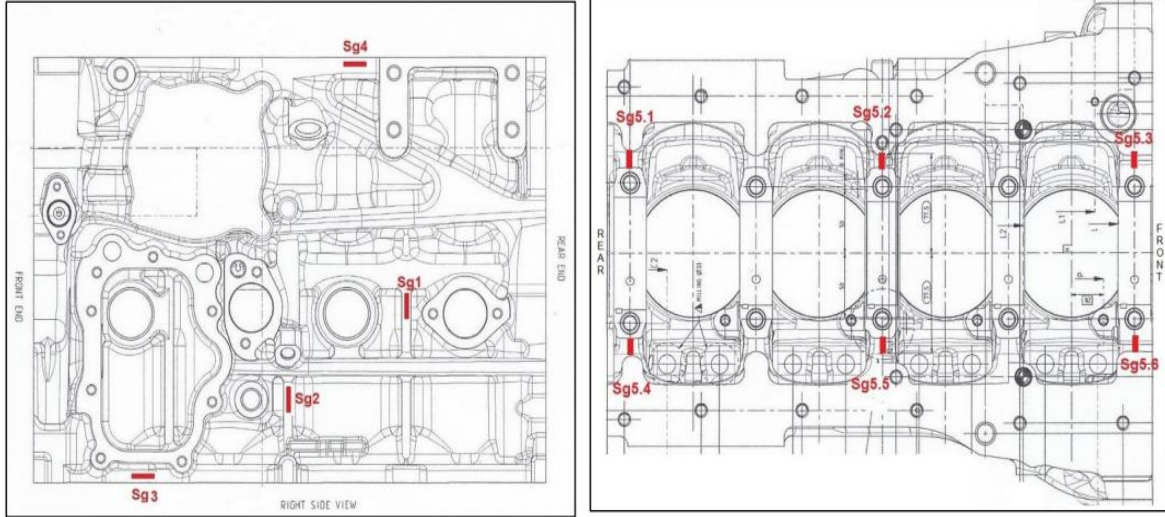
Müşteri teknik şartnamesinde belirtilen örnek mikroyapı numune alma bölgesinden numuneler alındıktan sonra Nikon marka optik mikroskopla iki ayrı gerilim giderme tavı uygulanmış motor bloklardan alınan numuneler incelenip mikroyapıları karşılaştırılmıştır. Numunelerden dağlanmış ve dağlanmamış yapılarda görseller alınmıştır. Şekil 5.5’de mikroyapı incelemeleri anından görsel eklenmiştir.



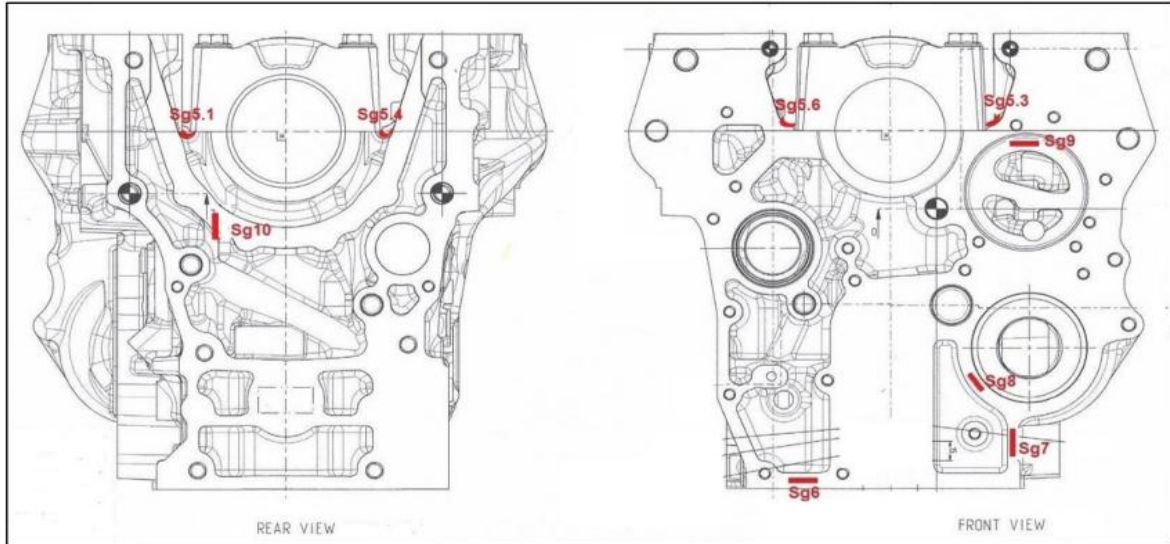
Şekil 5.5 Nikon marka optik mikroskopla numunelerin mikroyapı incelemeleri

5.5. Kalıntı Gerilim Ölçümü

10 saat ve 15 saat gerilim giderme ısıtma işlemi uygulanan motor blokların kalıntı gerilim ölçümleri müşteri teknik şartnamesi dökümanlarında bulunan talimatlara göre konumları belirlenip uygulanmıştır. 15 farklı gerilim ölçer lokasyonu incelenmiştir. Takılan gerilim ölçerler doğrusal tipinde olduğundan sadece doğrusal yöndeki gerilmeler elde edilmiştir. Referans dökümandan alınan ilgili konumlar aşağıda Şekil 5.6 ve 5.8’de bulunan teknik resimlerde belirtilmiştir.

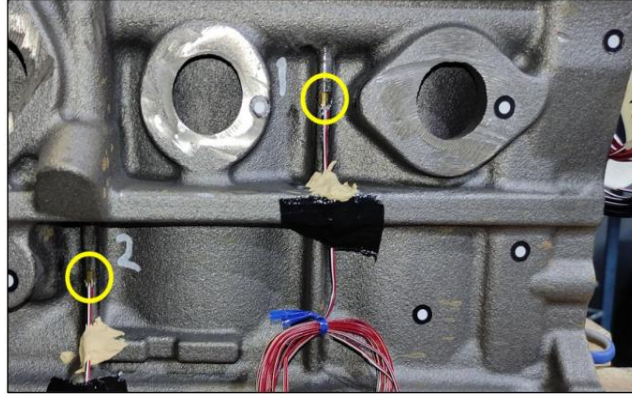


Şekil 5.6. Soldaki görsel bloğun ön görünüşü, sağdaki görsel bloğun üstten görünüşü



Şekil 5.7. Bloğun yandan görünüşleri

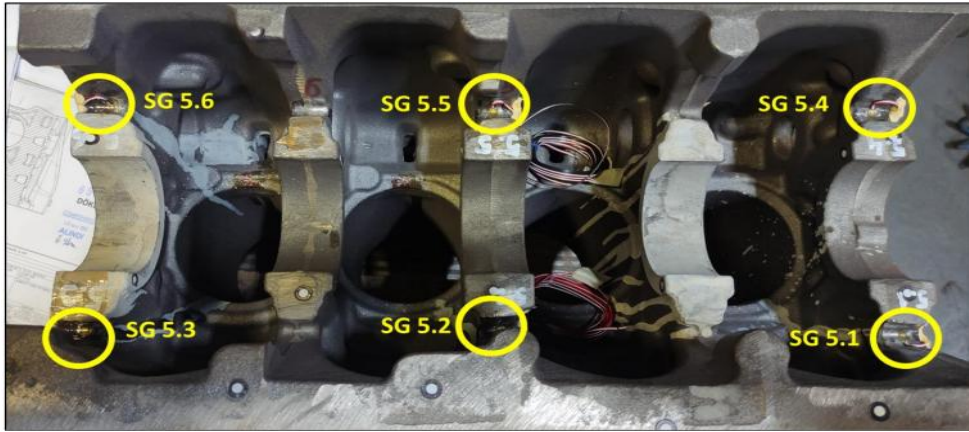
Gerinim ölçerleri, belirlenen bölgelere yerleştirmeden önce, yüzey pürüzlülük boşluklarını doldurmak için ‘M-Bond AE-10’ tipinde yapıştırıcı sürülmüştür. Yapıştırıcının 24 saat kürlenme süreci beklenildikten sonra beklenen kalıntı gerilimlerinin yönüne paralel, kesim yönüne dik olacak şekilde gerinim ölçerler takılmıştır. Belirlenen noktalarda gerinim ölçerler bağlanmış ve frezeleme işlemine hazır hale getirilmiş örnek görüntüler Şekil 5.9, 5.10, 5.11, 5.12’de gösterilmiştir.



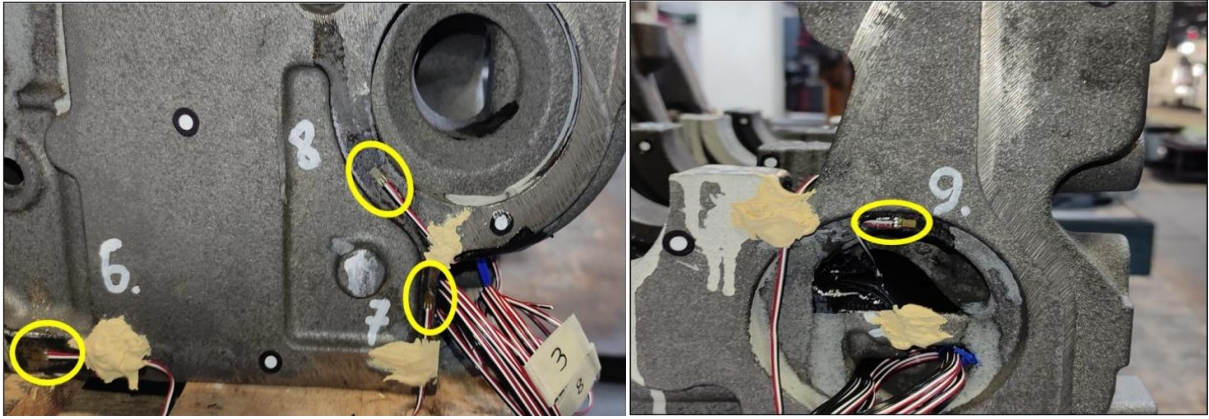
Şekil 5.8. Gerinim ölçerlerin 1.ve 2. Noktalarında yerleştirilme görüntüsü



Şekil 5.9. Gerinim ölçerlerin 3.ve 4. Noktalarında yerleştirilme görüntüsü

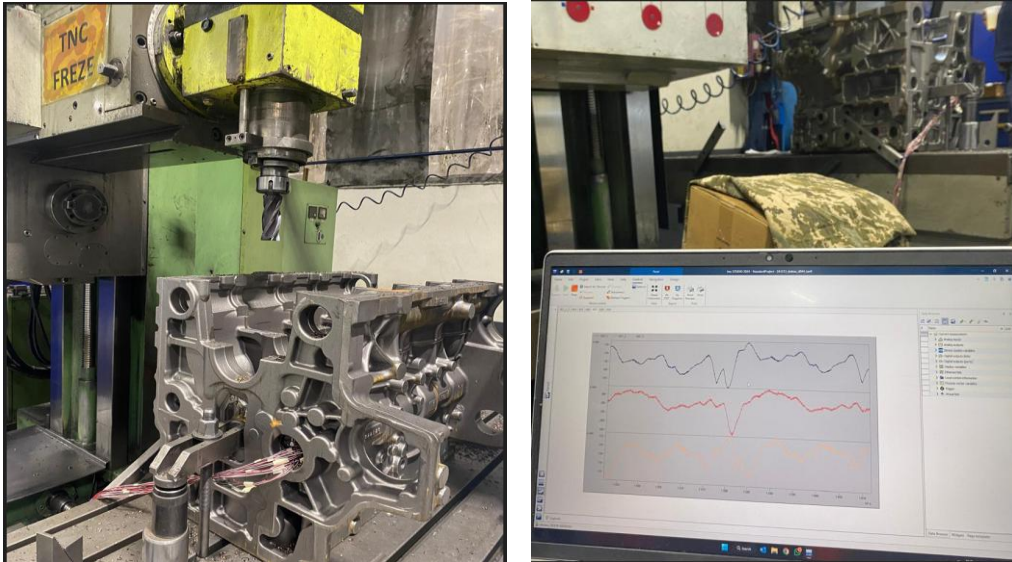


Şekil 5.10. Gerinim ölçerlerin 5.1,5.2,5.3,5.4,5.5,5.6 Noktalarında yerleştirilme görüntüsü



Şekil 5.11. Gerinim ölçerlerin 6.7.8.9 Noktalarında yerleştirilme görüntüsü

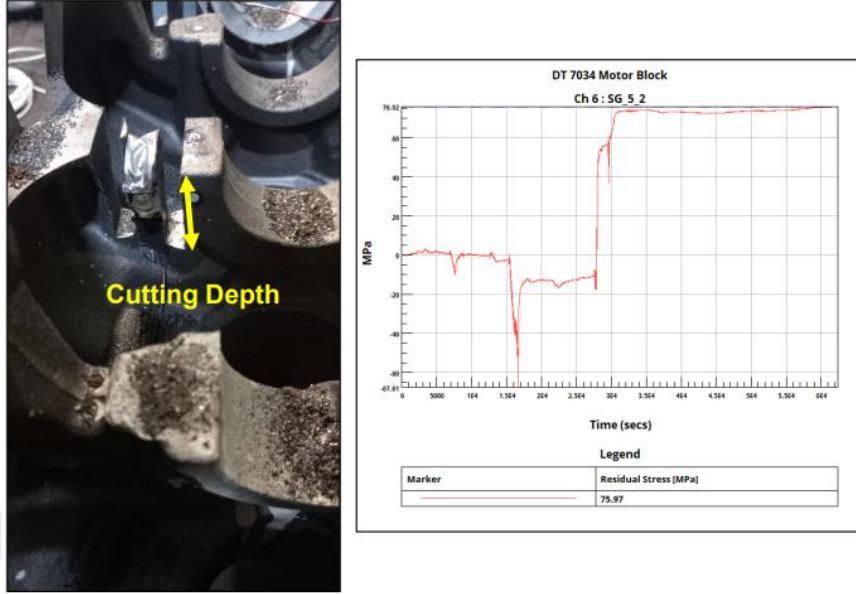
Blok ölçüme hazır hale getirildikten sonra TNC freze tezgahına vinç yardımıyla alınıp sabitlenmiştir. 3 ek analog amplifikatör modülüne sahip IMC Chronosflex veri toplama donanımı verileri anlık elde etmek için kullanılmıştır. Daha sonra gerinim ölçerler veri toplama ünitesine bağlanmıştır ve optimum çalışma koşullarının sağlanması için enerjilendirilmiştir. Tabla kasitesi 2400 mm, 700 mm olan ve max 1535 dev/dk , min 40 dev/dk özelliklerine sahip 3 eksen FIL marka freze tezgahında $\varnothing$ 12–16 – 20’lik karbür uçlu takımlar kullanılmıştır. TNC frezede oyma işlemi yapılırken veriler IMC yazılımlı program tarafından anlık olarak takip edilmiş ve sonuçlar bölge bazlı grafikler şeklinde çıkarılmıştır. Aşağıda IMC programı ve TNC freze tezgahında test aşaması görseli Şekil 5.13’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. TNC freze tezgahında test aşaması ve IMC programından veri alma görseli

İşleme operasyonu yeterli kesme derinliği elde edilene kadar devam etmiştir. Yeterli kesme derinliği takip edilen ekranda görülen kalıntı gerinim değeri sabit kalana kadar frezeleme işlemi devam eder. Belirli bir süre sonra işleme derinliğini arttırmaya çalışsakta kalıntı gerinim değeri

değişmez ve sabit kalır. (Şekil 5.14’de görsel eklenmiştir.) Böylelikle yeterli kesme derinliği bulunmaktadır.

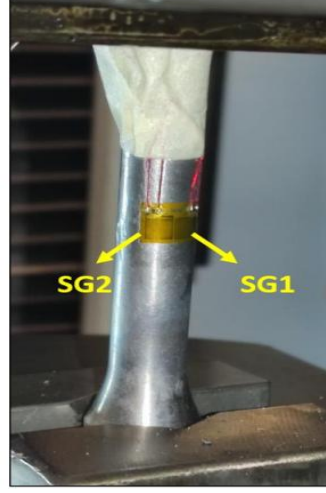


Şekil 5.13. Yeterli kesme derinliği ve frezeleme işlemi esnasında kalıntı gerinim değerleri
Artık gerinimleri elde etmek için gerilme değerleri dönüştürülmüştür. Artık gerilmeler verilen formül aracılığıyla Elastik Modül ile hesaplanmıştır[27],[28]

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (5.1)$$

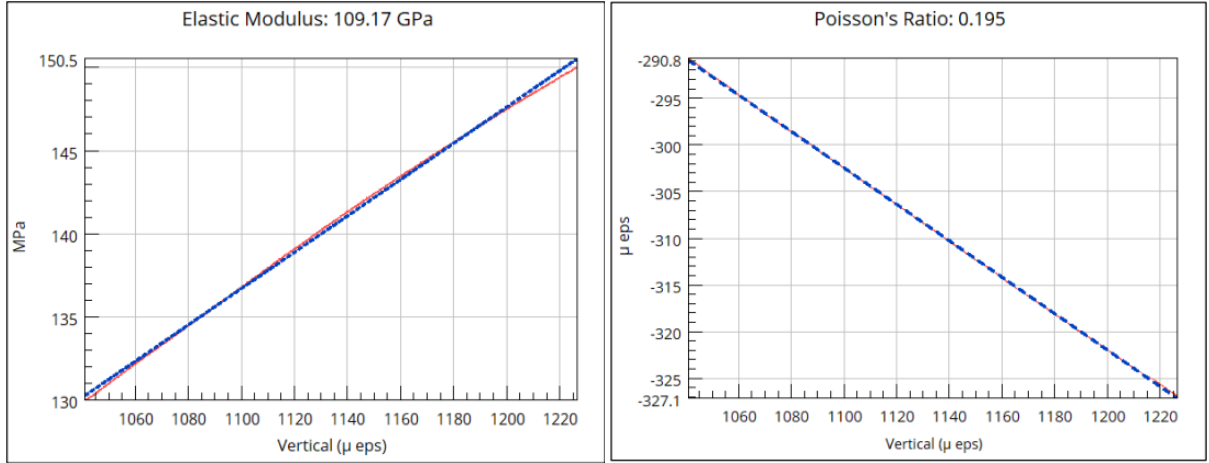
σ : Kalıntı gerilme [Pa] E : Elastik Modül [Pa] ε : Kalıntı gerinim

Elastik modülün bulunması için motor bloğunun kep bölgesinden bir test numunesi alındı ve testi gerçekleştirmek için bir Tee rozet tipi gerinim ölçer kullanılmıştır. Tee rozet ölçer, çekme testi sırasında ortaya çıkan yatay (SG1) ve dikey (SG2) yönlerdeki deformasyon verilerini okumak için numunenin üzerine yerleştirilmiştir. Ölçer test numunesine takıldıktan sonra, numune Shimadzu marka çekme cihazına kelepçelendi ve kırılıncaya kadar kontrollü bir çekme kuvvetine maruz bırakılmıştır. Test 1 mm/dakika yer değiştirme oranında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi görseli Şekil 5.15’de gösterilmiştir[11].



Şekil 5.14. Test numunesi ve çekme testi esnasında yatay ve dikey yönler

Bu test ile gerilme , yatay gerinim ve dikey gerinim değerleri bulunmuştur. Bulunan bu değerler ile doğrusal regresyon eğrisi uyumu kullanılarak elastik modülü ve poisson oranı bulunmuştur.(Şekil 5.16'da).



Şekil 5.15. Doğrusal regresyon eğrisi ile elastik modül ve poisson oranının bulunması

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, EN GJL-250 lamel grafitli gri dökme demir motor blokları üzerinde 10 saatlik ve 15 saatlik gerilim giderme ısıt işlemlerinin mekanik ve mikroyapısal özelliklere etkisi incelenmiştir. Yapılan mekanik testler ve mikroskobik analizler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Kalıntı gerilim ölçümleri, ısıt işlem süresinin artmasıyla birlikte önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. 10 saatlik gerilim giderme işleminde SG 5.2, SG 5.3, SG 5.5 ve SG 10 bölgelerinde sırasıyla -75.97 MPa, -65.10 MPa, -108.14 MPa ve -4.97 MPa olarak ölçülen kalıntı gerilim değerleri, 15 saatlik işlem sonrasında -40.47 MPa, -25.00 MPa, -20.38 MPa ve -2.98 MPa seviyelerine düşmüştür. Bu da kalıntı gerilimlerde %50 ila %80 arasında bir azalma olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, uzun süreli gerilim giderme işlemlerinin iç gerilimleri etkin bir şekilde azaltarak motor bloğunun yorulma ömrünü ve yapısal dayanımını artırabileceğini göstermektedir.

Uygulanan her iki farklı ısıt işlem sonucunda; çekme mukavemeti ve sertlik değerleri açısından ise anlamlı bir fark gözlenmemiştir. 10 saatlik ısıt işlem sonrası çekme mukavemeti 244 N/mm² ve ortalama sertlik 212 Brinell, 15 saatlik işlem sonrası ise sırasıyla 246 N/mm² ve 208 Brinell olarak belirlenmiştir. Bu değerler arasındaki farklar ihmal edilebilir düzeydedir ve malzemenin mekanik dayanımında herhangi bir olumsuz değişiklik olmadığını göstermektedir. Boyutsal ölçümlerde de benzer şekilde, 480 mm ile 480.2 mm arasında küçük bir fark gözlenmiş olup bu değerler kabul edilebilir toleranslar içinde kalmaktadır.

Mikroyapısal analizler sonucunda, her iki işlem süresinde de A tipi lamel grafit yapılar gözlenmiş, matrisin ise %99 oranında perlitik olduğu tespit edilmiştir. Ancak 15 saatlik işlem sonrası grafit parçacıklarının daha ince, uzun ve homojen dağılımlı olduğu; ayrıca grafit fazının daha belirgin bir şekilde ayrıldığı ve faz sınırlarının daha düzenli hale geldiği gözlenmiştir. Buna karşılık, 10 saatlik işlem sonrasında grafit parçacıkları daha kısa, kalın ve düzensiz morfolojide olup bazı bölgelerde yığılma ve boşluklar gözlenmiştir. Bu yapıdaki düzensizliklerin, matris–grafit arayüzünde gerilim birikimine neden olarak çatlak oluşumuna zemin hazırladığı değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, 15 saatlik işlem süresi daha kararlı bir mikroyapı oluşumuna katkı sağlamaktadır.

Ek olarak, 15 saatlik işlemde kullanılan daha düşük soğuma hızı (40 °C/saat), termal gerilimlerin azaltılmasında ve mikroyapının iyileştirilmesinde etkili olmuştur. Daha yavaş soğuma, grafit parçacıklarının daha düzenli büyümesine olanak tanıyarak mikroyapı

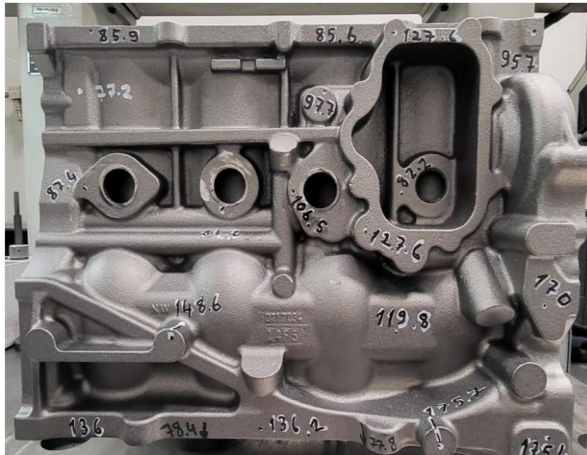
homojenliğini artırmış ve termal çatlak oluşum riskini azaltmıştır. Bu durum, dökme demir motor bloğu bileşenlerinde mekanik kararlılığın artmasına katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, 15 saatlik gerilim giderme işleminin, mekanik özelliklerde olumsuz bir değişiklik yaratmaksızın kalıntı gerilimlerin azaltılmasına ve mikroyapı stabilitesinin artırılmasına olanak sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, bu işlem süresinin uygulanmasıyla oluşan ek maliyet oldukça düşüktür. Yıllık blok üretimini 28 000 adet baz aldığımızda toplamda yaklaşık 26.273 € gibi bir maliyet artışı söz konusu olsa da, bu fark parça başına yalnızca 0,94 €'ya karşılık gelmektedir. Bu da toplam birim maliyetin sadece %0,4'ü kadardır. Dökümhane üretimlerinde enerji ve işçilik gibi kalemlerde %1–2 oranındaki değişimler genellikle normal kabul edildiğinden, bu ek maliyet göz ardı edilebilir düzeydedir. Sonuç olarak, daha uzun süreli ısıtma işlemin sağladığı yapısal ve performans avantajları, oluşan küçük maliyet artışına göre çok daha değerlidir.

6.1. Test Sonuçları

6.1.1. Boyutsal ölçüm sonuçları

10 saat ve 15 saat gerilim giderme tavına giren motor bloklar Şekil 6.1’de gösterildiği gibi referans bölgeleri orta merkez ekseni kabul edilerek Coord3 TR20 CMM cihazında bir çok noktadan ölçümleri alınıp üzerlerine yazılmıştır.



Şekil 6.1. Coord 3 CMM cihazında boyutsal ölçüm değerlendirme bölgeleri

Şekil 6.1’de görüldüğü üzere motorun bir çok bölgesinde silindir, su ve yağ kanalı delik çapları pompa bölgesi ve dış bölgesinde bulunan farklı figürlerinde ölçümler yapılmıştır. Ölçülen bölgelerdeki değerlerin çoğunluğu aynı, bazı noktalarda farklar 0,1 ve 0,2 mm arasında olduğu tespit edilmiştir. Aşağıda Tablo 6.1’de ölçüm noktalarında kayıt edilen değerler gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Coord 3 CMM cihazında 10 saat ve 15 saat tav sonrası boyutsal ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	10 Saat Tav Sonrası Ölçüm Değeri (mm)	15 Saat Tav Sonrası Ölçüm Değeri (mm)
1	85,9	85,8
2	85,6	85,8
3	127,6	127,5
4	95,7	95,7
5	77,2	77,1
6	97,7	97,7
7	87,4	87,3
8	106,5	106,5
9	127,6	127,5
10	148,6	148,5
11	119,8	119,7
12	170	170
13	136	136
14	78,4	78,3
15	136,2	136,2
16	77,8	77,8
17	175,7	175,7
18	175,4	175,4
19	480	480,2

Gerilim giderme ısıtılmasının boyutsal ölçüler üzerindeki etkisinin; kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi, ısıtılma işlem ve soğutma sıcaklıkları gibi birçok faktöre bağlı olduğu, ayrıca dökme demirlerde bu boyutsal değişimin 1000'de 1 ile 1000'de 4 arasında olabileceği Dan Herring'in çalışmalarında belirtilmiştir [26].

6.1.2. Kimyasal analiz sonuçları

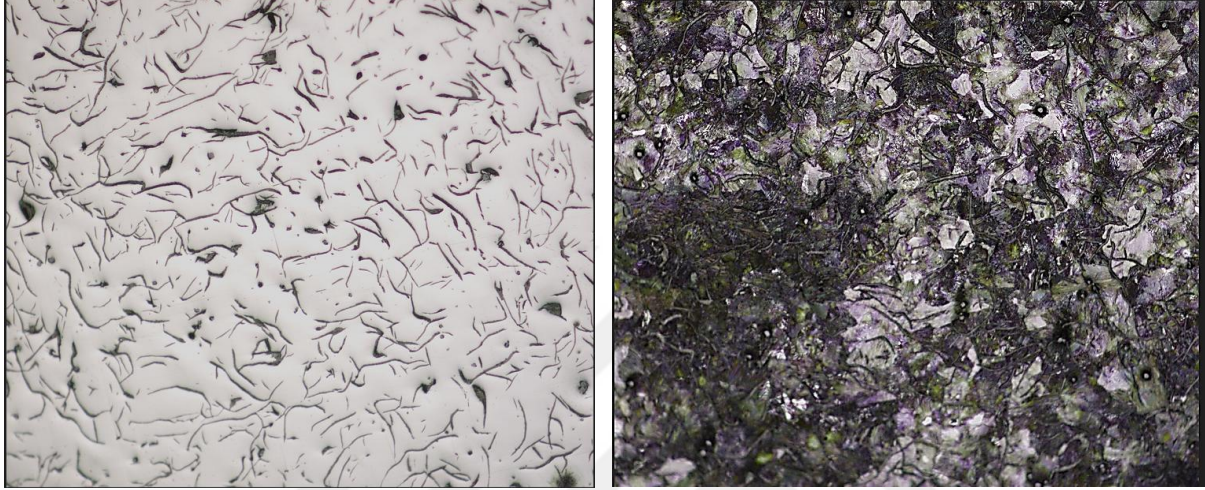
EN-GJL 250 standartına göre üretilmiş motor bloklarının spektrometre ve karbon – kükürt cihazı ile yapılan kimyasal analizleri Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. Motor blokların kimyasal analizi

Kimyasal Bileşim											
C	Si	S	Mo	Cr	Cu	Sn	Mn	Ti	Mg	P	Ni
3.100	2.137	0.77	0.022	0.268	0.663	0.073	0.857	0.020	0.001	0.026	0.024

6.1.3. Mikroyapı analiz sonuçları

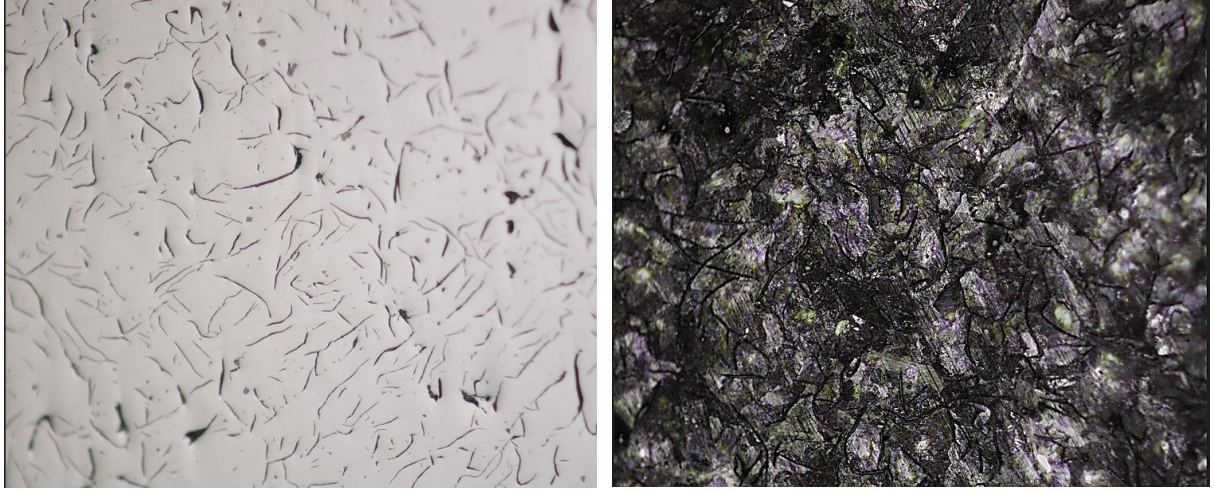
EN-GJL 250 standardına göre üretilmiş motor bloklar 10 saat ve 15 saat gerilim giderme ısı işlemine alındıktan sonra talimatlara göre belirlenen bölgelerinden numune alınıp mikroskop altında mikroyapıları incelenmiştir. Yapıların dağlanmamış ve dağlanmış mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Şekil 6.2 ve 6.3’de görüldüğü üzere 2 mikroyapıda da A tipi grafitler mevcut olup, matriks %99 perlitik yapıdadır[29].



Şekil 6.2. 10.Saat tavllanmış dağlanmamış 100 X Büyütme, 10.Saat Tavllanmış dağlanmış görüntüsü

10 saat tavllanmış mikro yapıda, ortalama grafit parçacık uzunluğunun yaklaşık 10–25 μm olduğu gözlemlenmiştir. Parçacıklar daha kısa, kalın ve daha kıvrımlı ya da düzensiz bir morfoloji sergilemektedir[30]. Bazı bölgelerde, grafit parçacıklarının bir araya toplanması (yani kümelenmesi) tespit edilmiştir. Grafit fazı, daha az homojen bir şekilde dağılmış olup, bazı bölgelerde yoğun grafit birikimleri görülürken, diğer bölgelerde belirgin boşluklar veya seyrek dağılımlar mevcuttur[5],[6].

Grafit parçacıklarının bu şekilde düzensiz şekil, boyut ve dağılımı, matris–grafit arayüzeyinde gerilme yoğunlaşmalarına yol açabilir. Sonuç olarak, yapı daha kırılgan hale gelebilir ve çatlak oluşumu potansiyeli artabilir. Mikro yapıdaki bu tutarsızlıkların, yeterli atomik difüzyon ve matris gevşemesine olanak tanımayan yetersiz tavlama süresinden kaynaklandığı düşünülmektedir[2].



Şekil 6.3. 15 saat tavllanmış dağlanmamış 100 X Büyütme, 15 saat tavllanmış dağlanmış görüntüsü

Buna karşılık, 15 saat tavlanan mikro yapı daha uzun ve ince grafit parçacıkları ortaya koymuştur. Ortalama uzunluk 20–40 μm arasında ölçülmüş, parçacık kalınlığı ise daha tutarlı görünmektedir. Grafit lamelleri daha belirgin şekilde ayrılmış olup, sürekli pul benzeri bir morfolojiye yaklaşmaktadır. Ayrıca, grafit fazı matris boyunca daha düzenli aralıklarla ve daha homojen bir şekilde dağılmıştır. Bu durum, uzatılmış tavlama süresinin atomik difüzyonu kolaylaştırdığını ve daha kararlı bir mikro yapının oluşumuna katkıda bulunduğunu göstermektedir [8],[10],[11],[15].

Ayrıca, matrisin ek bir gevşeme geçirdiği, bu sayede daha fazla karbon difüzyonunun mümkün olduğu düşünülmektedir. Grafit parçacıkları daha net tanımlanmış ve daha eşit dağılmış hale geldikçe, grafit ile matris arasındaki mekanik uyumun da artmış olabileceği değerlendirilmektedir. Bu mikro yapısal iyileşmenin sünekliği artırması ve çatlak oluşum eğilimini azaltması beklenmektedir; bu da daha uzun tavlama sürelerinden sonra genel malzeme performansında iyileşme olduğunu göstermektedir [11].

6.1.4. Çekme test sonuçları

EN – GJL 250 standardına göre üretilmiş motor bloklar 10 saat ve 15 saat gerilim giderme ısı işlemine alındıktan sonra kep bölgelerinden alınan çekme test çubukları Döktaş fabrikası fizik laboratuvarında bulunan ekstansometreli Shimadzu marka çekme test cihazıyla test edilmiştir. Elde edilen sonuçları aşağıda Tablo 6.3’de belirtilmiştir.

Tablo 6.3. Kep bölgelerinde alınan numunelerin çekme test sonuçları.

Ölçüm Bölgesi	10 Saat Tav sonrası	15 Saat Tav Sonrası
1. Kep Bölgesi	245 N/mm ²	248 N/mm ²
2.Kep Bölgesi	239 N/mm ²	241 N/mm ²
3.Kep Bölgesi	248 N/mm ²	250 N/mm ²

Shimadzu test cihazından alınan örnek test raporu aşağıda Şekil 6.4’de gösterilmiştir.



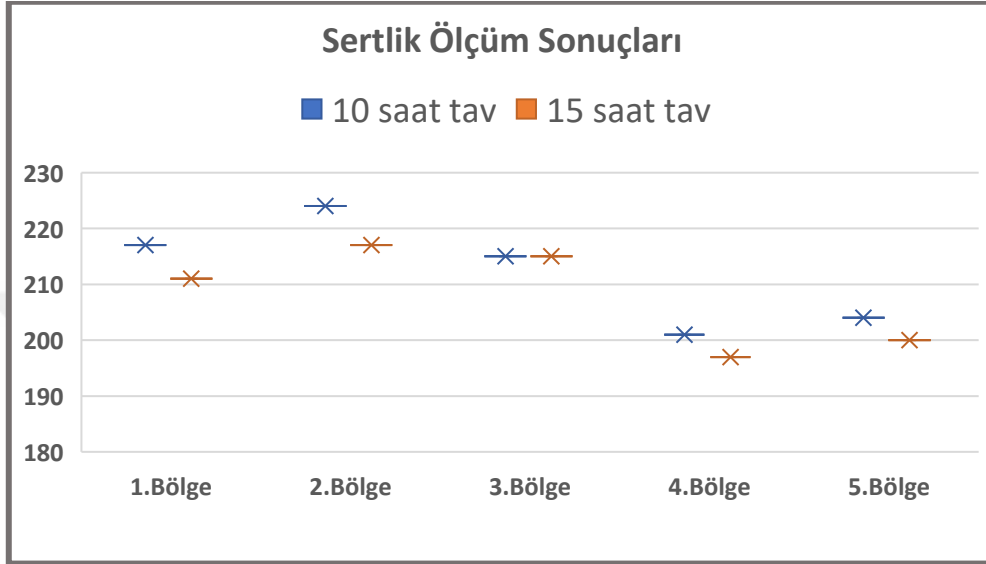
Şekil 6.4. Shimadzu test cihazı örnek çekme test raporu

Çekme testleri sonucunda, gerilim giderme işlemi görmüş dökme demirlerde genellikle daha kararlı bir akma ve kopma davranışı, daha düşük yayılma eğilimli çatlaklar, ve daha tutarlı bir elastik deformasyon bölgesi gözlemlenir. Ayrıca, işlem sonrasında akma dayanımı ve kopma uzaması değerlerinde küçük artışlar olabilirken, çekme dayanımı genellikle çok fazla değişmez. Bununla birlikte, iç gerilmelerin giderilmesi çatlak başlatıcılarının etkisini azalttığı için mekanik testlerde daha güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmesini sağlar [10],[19],[20].

6.1.5. Sertlik ölçüm sonuçları

10 saat ve 15 saat gerilim giderme ısıtma işlemi uygulanan motor blokların sertlik ölçümleri kafa bağlama tarafı yüzeyinden gerçekleştirilmiştir. Motor bloklarından yapılan sertlik ölçüm sonuçları Tablo 6.4’de gösterilmiştir. Değerler Brinell cinsinden verilmiştir.

Tablo 6.4. 10 saat ve 15 saat ısıtma işlem uygulanan bloklarda sertlik ölçüm değerleri



Sertlik ölçümü yapılan iki bloktada sertlik değerleri dökülen malzemeye göre tolerans içindedir. (190 – 230) Fakat 15 saat ısıtma işlem uygulamasında gerçekleşen yavaş soğuma parçanın sertlik değerlerini çok az da olsa düşürmüştür [8]. Dökme demirlerde düşük sertlik genellikle daha yüksek işlenebilirlik ile ilişkilidir. Özellikle tavlama işlemi sonrasında perlitin ferrite dönüşmesi, yapının yumuşamasına ve kesici takımların daha az zorlanarak talaş kaldırmasına olanak tanır. Bu durum, üretim sırasında takım ömrünü uzatırken yüzey kalitesinin de artmasını sağlar. Ayrıca düşük sertliğe sahip ferritik yapı, yüksek sertlikteki martenzitik veya ötektoid yapılara kıyasla daha az kesme kuvveti gerektirir[24]. Bu nedenle, özellikle karmaşık geometrilere sahip döküm parçaların talaşlı imalatında, düşük sertlikteki yapılar tercih edilmekte ve bu sayede üretim süreci daha verimli hale gelmektedir [10].

6.1.6. Kalıntı gerilim ölçüm sonuçları

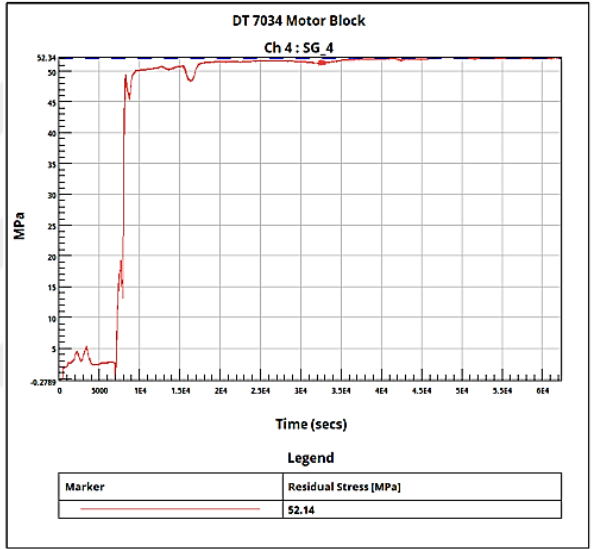
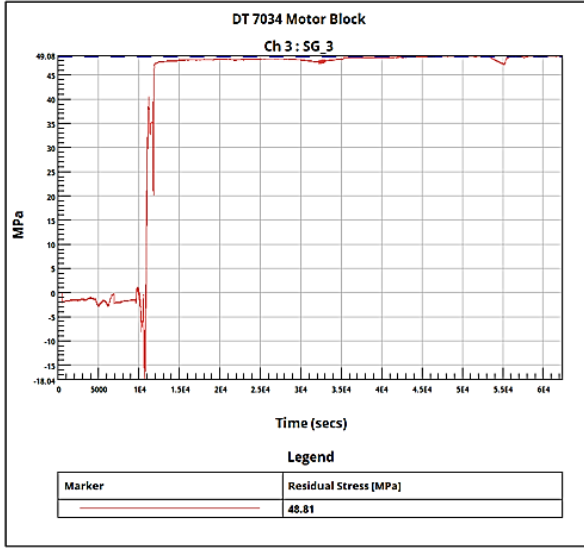
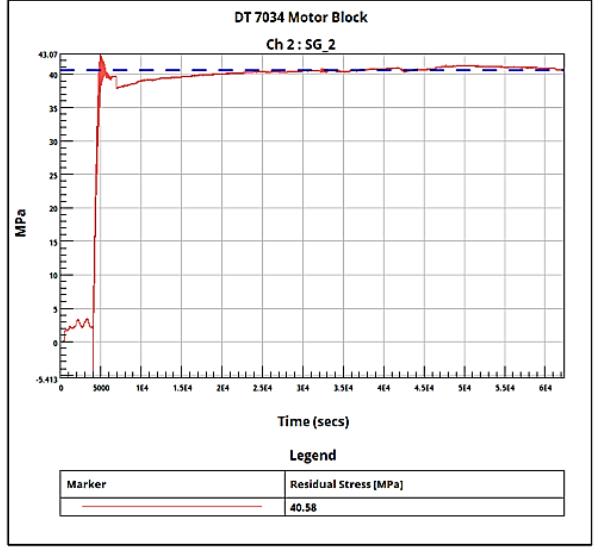
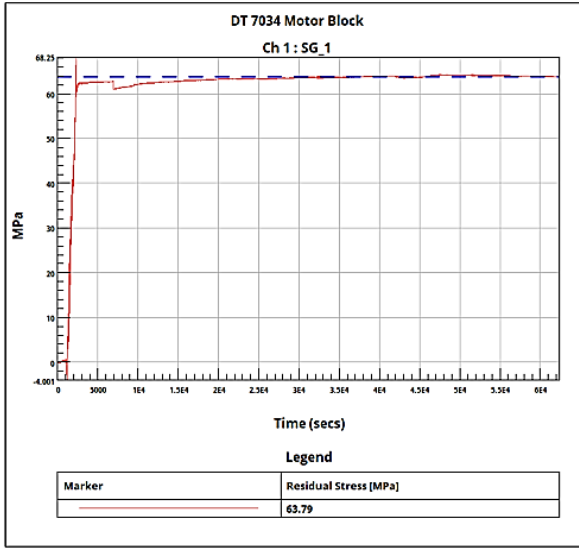
Bu çalışmada, EN GJL-250 malzemeden üretilmiş motor bloğunun artık gerilmeleri ölçülmüş ve karşılık gelen gerilmeler hesaplanmıştır. Artık gerilmelerin hesaplanmasında, çekme testinden elde edilen mekanik özellikler (Elastik modül ve Poisson oranı) kullanılmıştır. Motor bloğu üzerinde 15 adet gerilim ölçer konumu artık gerilmeler açısından incelenmiştir. Her bir ölçüm noktasının çevresi frezelenmiş ve kalıntı gerilmeler ölçülmüştür[5]. Bu kalıntı

gerinimler, hesaplanan Elastik Modül ve Poisson oranı kullanılarak artık gerilmelere dönüştürülmüştür[6].Artık gerilmelerin hesaplanabilmesi için, motor bloğundan alınan deformasyon verilerinin son 20 saniyesinin ortalaması değerlendirilmiştir. Çekme testinden elde edilen mekanik özellikler Tablo 6.5’de gösterilmiştir.

Tablo 6.5. Çekme testinden ölçülen mekanik özellikler

Elastik Modül (GPa)	Poisson Oranı
109.17	0.195

10 saat gerilim giderme ısıt işlemleri uygulanan motor bloğunun 15 farklı lokasyonunda uygulanan gerilim ölçer test program çıktıları Şekil 6.5’de gösterilmiştir.



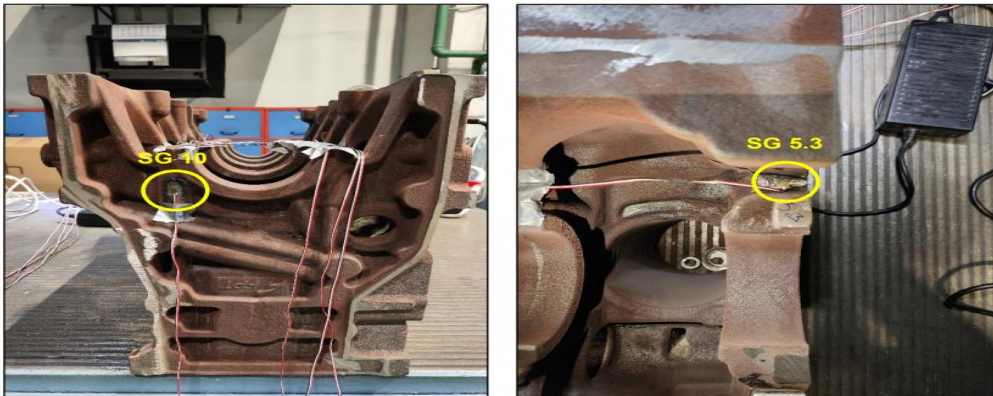
Şekil 6.5. 10 saat gerilim giderme sonrası SG1,SG2,SG3,SG4 noktalarının gerilim ölçer testi program çıktıları

Kalıntı gerilimler; çekme testinden elde edilen elastik modül değeri ile kalıntı gerilim testinden elde edilen gerilim değerleri çarpılarak bulunmuştur. 10 saat gerilim giderme ısı işlemi uygulama sonrası belirlenen 15 farklı noktalarda yapılan gerilim ölçer testi sonucunda bulunan kalıntı gerilmeler aşağıda Tablo 6.6’da verilmiştir.

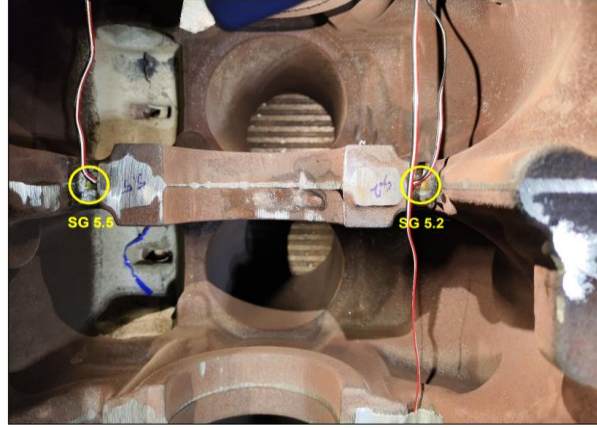
Tablo 6.6. 10 saat gerilim giderme işlemi sonrası ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktaları	Ölçülen Gerinim	Kalıntı Gerinim [μ eps]	Kalıntı Gerilme [MPa]
SG 1	584.27	-584.27	-63.78
SG 2	371.73	-371.73	-40.58
SG 3	447.11	-447.11	-48.81
SG 4	477.63	-477.63	-52.14
SG 5-1	408.88	-408.88	-44.64
SG 5-2	695.88	-695.88	-75.97
SG 5-3	93.38	-596.38	-65.10
SG 5-4	556.52	-556.52	-60.76
SG 5-5	990.57	-990.57	-108.14
SG 5-6	551.19	-551.19	-60.17
SG 6	205.68	-205.68	-22.45
SG 7	190.2	-190.2	-20.76
SG 8	237.18	-237.18	-25.89
SG 9	229.53	-229.53	-25.06
SG 10	45.54	-45.54	-4.97

Bu çalışmanın ana teması gerilim giderme ısıtma işlem süresinin artırılmasının motor bloğa etki eden en temel özellik olan kalıntı gerilim değerlerinin etkisini araştırmaktır. Bu nedenle 15 saat gerilim giderme ısıtma işlemi uygulanan ikinci motor bloğuna tekrar kalıntı gerilim testleri yapılmıştır. Müşterinin belirttiği talimata göre istenen gerilim giderme tolerans aralığı **-70 , +30** Mpa olduğundan ilk testte tolerans dışı ve tolerans sınırına yakın olan noktalarda kalıntı gerilim ölçümü yapılmıştır. Bu noktalar SG 5.2 , SG 5.3 , SG 5.5 ve SG 10 noktalarıdır(Şekil 6.6, 6.7).

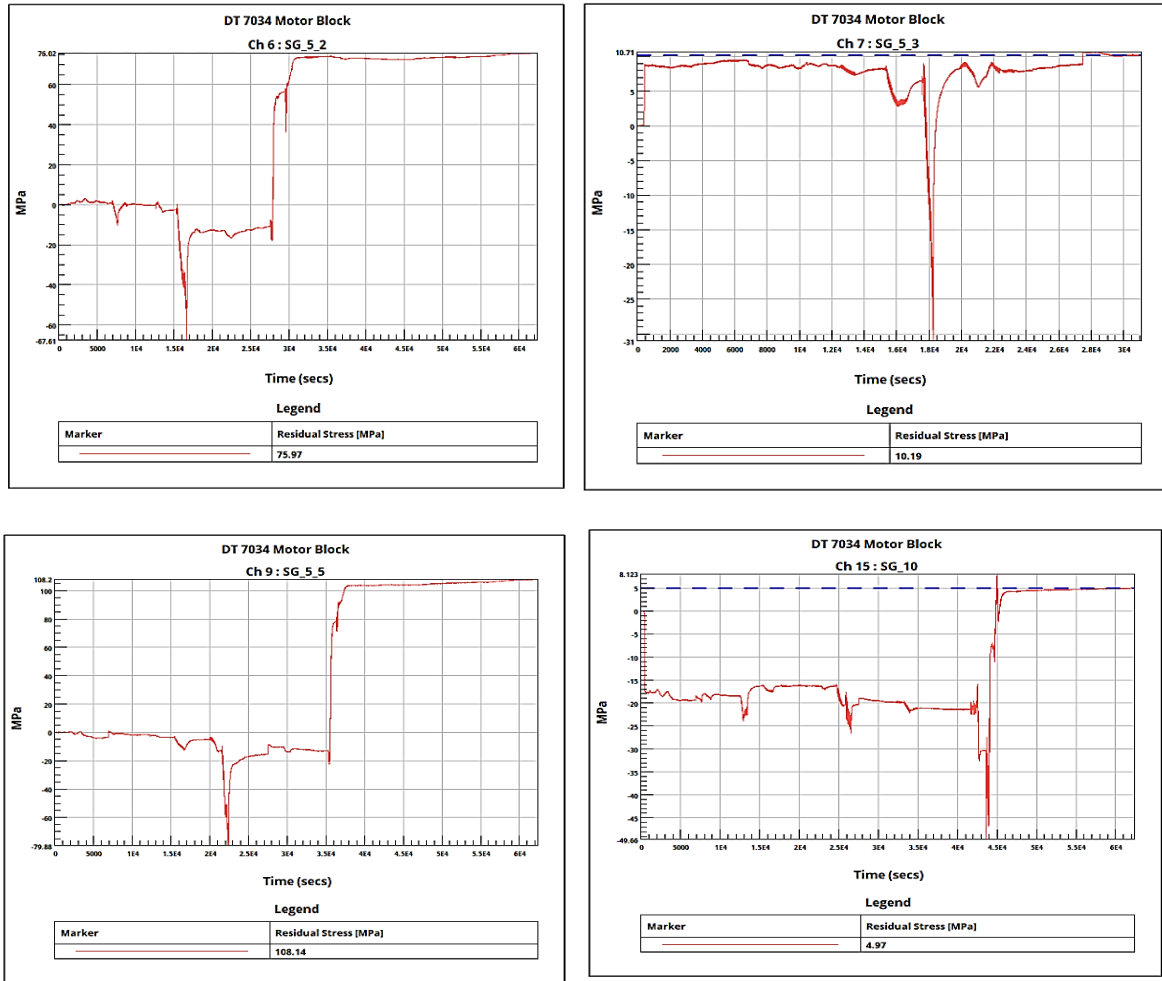


Şekil 6.6. 15 saat gerilim giderme sonrası SG 10 ve SG 5.3 noktalarında 2.test görseli



Şekil 6.7. 15 saat gerilim giderme sonrası SG 5.2 ve SG 5.5 noktalarında 2.test görseli

Aşağıda Şekil 6.8’de SG 5.2, SG 5.3, SG 5.5, SG 10 noktalarının freze de işlenme aşamasında IMC programından alınan veriler gösterilmiştir. Analog sinyalin sabit kaldığı değer yeterli kesme derinliğine ulaşıldığını ve kalıntı gerinimin belirlendiğini göstermektedir.



Şekil 6.8. 15 saat gerilim giderme ısıt işleme sonrası SG 5.2, SG 5.3, SG 5.5, SG 10 noktalarının freze de işlenme aşamasında IMC programından alınan veriler gösterilmiştir

15 saat gerilim giderme ısıt işlemleri sonrası belirlenen SG 5-2, SG 5-3, SG 5-5, SG 10 noktalarında yapılan kalıntı gerilim test sonuçları Tablo 6.7’de verilmiştir.

Tablo 6.7. 15 saat gerilim giderme işlemi sonrası ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktaları	Ölçülen Gerilim	Kalıntı Gerilim [μ eps]	Kalıntı Gerilme [MPa]
SG 5-2	370.74	-370.74	-40.47
SG 5-3	229.02	-229.02	-25.00
SG 5-5	186.70	-186.70	-20.38
SG 10	27.25	-27.25	-2.98

Yapılan test sonucunda belirlenen 4 noktanın kalıntı gerilimleri sırasıyla -40.47 , -25.00 , -20.30 , -2.98 Mpa bulunarak müşteri şartnamesinde istenilen **-70 , +30** tolerans aralığı içinde olduğu belirlenmiştir. 10 saat ve 15 saat gerilim giderme ısıt işlemleri sonrası ölçülen kalıntı gerilimlerinin karşılaştırması aşağıda Tablo 6.8’de yapılmıştır.

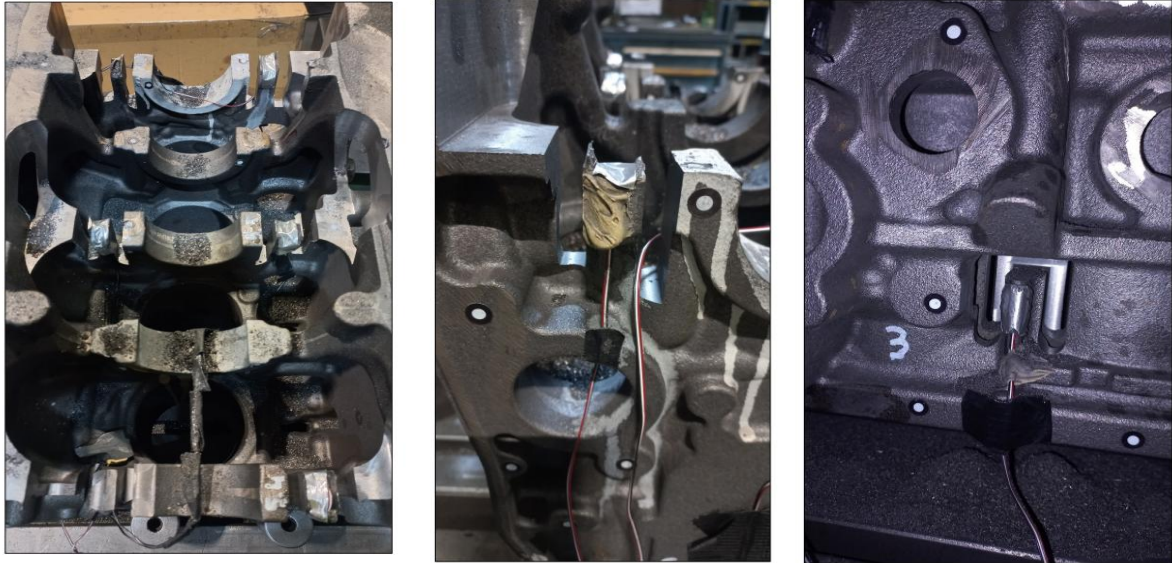
Tablo 6.8. 10 saat ve 15 saat gerilim giderme tavı sonrası kalıntı gerilmelerin karşılaştırması

Ölçüm Noktaları	10 Saat Gerilim Giderme Tavı Sonrası Kalıntı Gerilme [MPa]	15 Saat Gerilim Giderme Tavı Sonrası Kalıntı Gerilme [MPa]
SG 5-2	-75.97	-40.47
SG 5-3	-65.10	-25.00
SG 5-5	-108.14	-20.38
SG 10	-4.97	-2.98

Yapılan ölçümler, 10 saatlik ve 15 saatlik gerilim giderme tavı sonrasında elde edilen kalıntı gerilme değerlerinin karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir. SG 5-2, SG 5-3, SG 5-5 ve SG 10 ölçüm noktalarında yapılan analizler, tav süresinin artmasının kalıntı gerilme değerlerinde belirgin bir azalmaya neden olduğunu ortaya koymuştur[8],[11].

Özellikle SG 5-5 noktasında, 10 saatlik işlem sonrası ölçülen -108,14 MPa düzeyindeki yüksek kalıntı gerilme değeri, 15 saatlik işlem sonrasında -20,38 MPa seviyesine düşerek yaklaşık %80 oranında azalma göstermiştir. Benzer şekilde, SG 5-2 ve SG 5-3 noktalarında da sırasıyla %47 ve %62 oranında azalma gözlenmiştir. SG 10 noktasındaki değişim ise daha sınırlı olup, -4,97

MPa'dan -2,98 MPa seviyesine gerileyerek yaklaşık %40'lık bir düşüş kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, gerilim giderme süresinin uzatılmasının, özellikle yüksek kalıntı gerilme içeren bölgelerde etkin bir azalma sağladığını göstermektedir[8],[11]. Motor blokları gibi otomotiv-tarım sektöründe kullanılan yapısal ve fonksiyonel parçalar, yüksek sıcaklık, tekrarlayan mekanik yükler ve termal genleşmeler gibi zorlu çalışma koşullarına maruz kalmaktadır. Bu tür parçaların üretim süreçleri sonrasında bünyelerinde oluşan kalıntı gerilmeler, özellikle çatlak oluşumu, deformasyon ve yorulma dayanımı açısından kritik önem taşır. Yüksek kalıntı gerilme içeren bölgeler, motor çalışması sırasında oluşan termomekanik yükler altında gerilme yığılmalarına neden olarak malzeme ömrünü kısaltabilir ve servis sırasında beklenmedik arızalara yol açabilir[12]. 15 saat gerilim giderme ısıtma işlemi sayesinde motor bloğunda daha dengeli ve homojen bir gerilme dağılımı sağlanmakta; böylece termal döngüler ve dinamik yükler karşısında çatlak oluşumu riski azaltılmakta ve motor performansı ile güvenilirliği artırılmaktadır [5], [6]. Test aşamasında freze işleme yapılan parçaların görselleri Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9. Belirlenen noktaların gerilim ölçer testinde freze işlemleri sonrası görselleri

6.1.7. Isıl işlem maliyetleri

Isıl işlem süresinin arttırılmasının işletmeye yansıdığı ek maliyetler Tablo 6.9'da hesaplanmış ve açıklanmıştır. Bu bölümde, motor bloklarının üretimi sonrasında uygulanan gerilim giderme ısıtma işlem süresinin uzatılmasının, işletmelere doğalgaz , elektrik tüketimi ve işçilik alanlarında maliyet farkları getireceği belirtilmiştir. Isıl işlem kısmında belirtilen mevcut tav kapasitesine ve özelliklerine göre günlük 1 tav, yıllık 280 tav yapıldığı varsayıldığında 15 saatlik reçetenin kullanılması 10 saatlik reçeteye göre işletmeye yıllık ortalama 26.273 Euro ekstra maliyet

getirdiği hesaplanmıştır. Hesaplamada tav fırını arabasına 6 palet üzerine her seferinde 100 adet parça alınmış ortalama 1 tavda 10 – 11 ton arası parça tavlandığı varsayılmıştır. Hesaplamada doğalgaz ve işçilik, fark maliyetin % 96’sını, elektrik enerjisi ise yaklaşık % 4’ünü oluşturmaktadır. Fark maliyetin birim parça maliyetine etkisi % 0,4’tür. Bu artışın, motor bloklarının servis ömrü boyunca yüksek performans ve dayanıklılık göstermesi gerektiği göz önüne alındığında çok önemli bir fark maliyet olmadığı belirtilmiştir.

Tablo 6.9. 15 saat gerilim giderme ısıtma işleminin 10 saat gerilim giderme işlemine göre fark maliyet hesabı ve birim parça maliyet hesabına etkisi

Yıllık 28 000 Parça İçin Fark Maliyet Hesabı	
Doğalgaz Fark Maliyet Yıllık	€ 16.949
İşçilik Fark Maliyet Yıllık	€ 8.400
Elektrik Fark Maliyet Yıllık	€ 924
Toplam Fark Maliyet Yıllık	€ 26.273
Birim Parça Maliyetine Etkisi	0,4%

Isıl işlem süresinin uzatılmasıyla iç gerilmelerin daha etkin bir şekilde giderilmesi, ürünün mikroyapısal bütünlüğünü artırarak yorulma dayanımı ve termal kararlılığını önemli ölçüde iyileştirmektedir[11]. Bu da motor bloklarının kullanım ömrü boyunca arıza oranlarının azalmasına, bakım maliyetlerinin düşmesine ve müşteri memnuniyetinin artmasına doğrudan katkı sağlamaktadır. Müşteri memnuniyeti, şirket güvenilirliği için ürün kalitesinin ve dayanıklılığının ön planda tutulması gerektiğinden, bu ek maliyetin kabul edilebilir düzeyde olduğu değerlendirilmiştir. Bu nedenle, ısıtma işlem süresindeki artışın getirdiği düşük maliyet farkına rağmen, motor bloklarında uzun ömürlü ve güvenilir performans sağlanması adına 15 saatlik reçetenin tercih edilmesi işletme açısından stratejik bir karar olarak öne çıkmaktadır. Yapılan analizler doğrultusunda, ürün kalitesi ve müşteri memnuniyetine katkı sağlayacak bu tür iyileştirmelerin, uzun vadede işletmeye olumlu geri dönüşler sağlayacağı öngörülmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, EN-GJL 250 lamel grafitli gri dökme demirden üretilmiş motor blokları üzerinde uygulanan 10 saat ve 15 saat süreli gerilim giderme ısıt işlemlerinin mekanik, mikroyapısal ve boyutsal özelliklere etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, özellikle kalıntı gerilimlerin azaltılması ve mikroyapının homojenliğinin artırılması açısından işlem süresinin önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir.

Kalıntı gerilim ölçümleri, işlem süresinin artmasıyla (bekletme süresinin arttırılıp – soğutma sıcaklığının düşürülmesiyle) birlikte belirgin bir şekilde azaldığını göstermiştir. 10 saatlik tavlama sonrası bazı bölgelerde ölçülen -75 MPa ila -108 MPa arasındaki yüksek kalıntı gerilim değerlerinin, 15 saatlik işlem sonrası -20 MPa seviyelerine kadar düştüğü tespit edilmiştir. Özellikle yüksek gerilme birikimi gözlenen SG 5.5 noktasında, yaklaşık %80 oranında bir azalma sağlanmıştır. Elde edilen veriler, tavlama süresinin uzatılmasının (bekletme süresinin 2 saatten 3 saate çıkarılması, soğutma sıcaklığının 75°C/saat'den 40°C/saate düşürülmesinin) özellikle kritik bölgelerde etkin bir gerilim giderimi sağladığını ve motor bloklarının servis ömrü açısından önemli bir katkı sunduğunu ortaya koymuştur.

Mekanik test sonuçları incelendiğinde, çekme mukavemeti ve sertlik değerlerinde işlem süresine bağlı olarak anlamlı bir fark oluşmadığı gözlemlenmiştir. 10 saatlik ısıt işlem sonrası ortalama 244 N/mm² olarak belirlenen çekme dayanımı, 15 saatlik ısıt işlem sonrası ortalama 246 N/mm² ölçülmüştür. Sertlik değerleri ise Brinell cinsinden 10 saatlik ısıt işlemde ortalama 212 HB, 15 saatlik ısıt işlemde 208 HB olarak ölçülmüştür. Bu farklılıklar ihmal edilebilir düzeyde olup, daha uzun süreli işlem sonucu elde edilen düşük sertlik değerleri, artan işlenebilirlik ve daha düşük kesme kuvveti gereksinimi gibi üretim avantajları ile ilişkilendirilmiştir.

Mikroyapı analizleri, her iki işlem süresinde de A tipi lamel grafit yapılar ve %99 oranında perlitik matris yapısı ortaya koymuştur. Ancak 15 saatlik işlem sonrası grafit lamellerinin daha uzun, ince ve homojen dağılımlı olduğu; faz sınırlarının daha belirgin hale geldiği görülmüştür. Bu yapı, atomik difüzyonun daha etkin gerçekleştiğini ve gerilme yığılmalarının azaldığını göstermektedir. 10 saatlik işlemde ise grafit parçacıkları daha kısa, kalın ve düzensiz morfolojide bulunmuş; bazı bölgelerde kümelenmeler ve boşluklar tespit edilmiştir. Bu düzensizliklerin, matris-grafit arayüzeyinde gerilme yoğunlaşmasına neden olarak çatlak oluşum riskini artırabileceği değerlendirilmiştir.

Boyutsal ölçümler, her iki işlem sonrası yapılan analizlerde büyük ölçüde benzer sonuçlar vermiştir. Ölçülen farkların çoğunluğu 0,1–0,2 mm arasında olup, bu değerler dökme demir malzemelerde kabul edilen tolerans sınırları içinde yer almaktadır. Bu durum, tav süresinin artmasının boyutsal kararlılığı olumsuz yönde etkilemediğini göstermektedir.

Isıl işlem süresinin artırılmasıyla işletmeye yansıyan ek maliyet hesaplamaları sonucunda, yıllık bazda yaklaşık 26.273 € fark olduğu belirlenmiştir. Bu fark, birim parça başına 0,94 € gibi düşük bir değere karşılık gelmekte ve toplam üretim maliyetinde yalnızca %0,4'lük bir artışa neden olmaktadır. Enerji ve işçilik maliyetlerinde %1–2'lik sapmaların normal kabul edildiği dökümhane üretim koşullarında, bu farkın ihmal edilebilir düzeyde olduğu değerlendirilmiştir. Dahası, bu küçük maliyet artışıyla elde edilen yapısal iyileşmeler, ürün performansı, üretim güvenilirliği ve müşteri memnuniyeti açısından uzun vadede işletmeye önemli katkılar sağlayacaktır.

Sonuç olarak, 15 saatlik gerilim giderme işlemi, 10 saatlik işleme göre daha düşük kalıntı gerilim değerleri ve daha homojen mikroyapı ile daha kararlı bir malzeme yapısı elde edilmesini sağlamıştır. Mekanik özelliklerde anlamlı bir kayba yol açmadan, mikroyapısal düzeni iyileştirerek çatlak oluşumu riskini azaltmış, işlenebilirliği artırmış ve motor bloğunun servis ömrüne doğrudan katkı sağlamıştır. Üretim maliyetine etkisi düşük olan bu işlem süresinin, özellikle yapısal bütünlük ve uzun ömürlülük gerektiren motor bloğu gibi fonksiyonel parçalarda tercih edilmesi, teknik ve ekonomik açıdan işletmeler için stratejik bir karar olarak değerlendirilmektedir.

Gelecek çalışmalarda, önerilen ısıtım işlem reçetelerinin farklı alaşım türlerinde ve farklı geometriye sahip döküm parçalar üzerindeki etkileri detaylandırılabilir. Ayrıca, ısıtım işlem süreçlerinin maliyet optimizasyonunu hedefleyen yapay zekâ destekli kontrol sistemleriyle entegrasyonu da incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] A.U.Malcıoğlu, Östemperlenmiş Gri Dökme Demirin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek lisans tezi, pp. 2-42, 2015.
- [2] M. G. Doru & S. Gündüz, “Gri dökme demirlerde grafit morfolojisinin mekanik özelliklere etkisi,” Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, vol. 13, no. 1, pp. 27-34, 2016.
- [3] J. Campbell, The New Metallurgy of Cast Metals Castings Second Edition, pp. 242-301, 2003.
- [4] B. Baş, GG25 Esaslı Dökme Demir Motor Bloklarının Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek lisans tezi, pp. 19-34, 2022.
- [5] Li, X., Zhang, H., & Zhou, J. Effect of Residual Stresses on Fatigue Performance of Automotive Components. Materials Science Forum, 10004, 25-31, 2020.
- [6] Kumar, A., Sharma, P., & Singh, R. Effect of residual stress on fatigue life: A review. Materials Today: Proceedings, 4(2), 2415–2423, 2017.
- [7] B. S. Yenici, Gri ve Küresel Dökme Demirlerin Isıl İşlemi, Yüksek lisans tezi, 2002.
- [8] ASM, Heat Treating, vol. 4, ASM Handbook, 1450-1486, 1991.
- [9] A.Arran, Lamel ve Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Isıl İşlemleri, Makina Mühendisleri Odası Seminer Notu, 1991.
- [10] A. J. Smith, Heat Treatment of Castings, Materials Park, OH: ASM International, 481-539, 2010.
- [11] A. Marberg, J. Pal, Residual Stresses in Cast Iron, Measurement and Simulations of Residual Stresses in Heat Treated Cast Iron Materials, pp. 35-69, 2017.
- [12] S. Kumar, M.T. Scholar, Thermal Analysis of IC Engine, Smart Moves Journal, Vol.7, Issue, no:2582-4600, 2021.
- [13] G. E. Totten, Heat Treatment of Gears: A Practical Guide for Engineers, ASM International, 2006.
- [14] A. N. Vasileiou, M. C. Smith, J. A. Francis, D. W. Francis, D. W. Rathod, J. Balakrishnan & N. M. Irvine, “Residual stress measurement in engine block—an overview,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 131:1-27, 2024.
- [15] W.Cheng, L.Wang, Li. Zimming, The influence of residual stresses on mechanical properties and failure mechanisms in cast components. Engineering Failure Analysis, 113, 104556, 2025.
- [16] P. Futas, J. Brezinova, M. Pastor, A. Pribulova, Reducing Residual Stresses in Synthetic Cast Iron by Ti Microalloying, 15,250, 2025.
- [17] Dökümhane Akademi TÜDOKSAD, “Dökme demir türlerine genel bir bakış,” Erişim adresi: <https://dokumhane.net/kutuphane/dokme-demir-turlerine-genel-bir-bakis/>,
- [18] N. B. Şen, Lamel grafitli dökme demirlerin üretiminde metalurjik silisyum karbür ve ferro silisyum katkılarının malzeme üzerindeki mekanik, metalurjik ve ekonomik etkisinin araştırılması, Yüksek lisans tezi, pp. 3-44, 2018.

- [19] E. Bulut, Vermiküler grafitli dökme demir (CGI) ile üretilen motor bloklarının özelliklerini etkileyen faktörlerin alternatif dökme demirler ile karşılaştırmalı analizi, Yüksek lisans tezi, pp. 11-59, 2021.
- [20] C. Aydın, 3 boyutlu yazıcılar ile üretilen maçalara motor bloklarının dökümünde optimum proses ve tasarım parametrelerinin belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, pp. 2-17, 2021.
- [21] B. Coşar & Y. Aygüzer, Metalürji teknolojisi alanı döküm dalı meslek teknolojisi ders kitabı, pp. 95-109,
- [22] R. Elliott, Cast Iron Technology, London: Butterworth & Co. Ltd., 1988.
- [23] A. Umut, Kobiler ve Mikro İşletmelerde Demir Döküm Sanayi Sektör Analizi, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2014.
- [24] K. K. Kırçalı, Farklı Matris Yapılara Sahip Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek lisans tezi, pp. 3-65, 2006.
- [25] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2020.
- [26] D. Herring, Dimensional Changes After Heat Treatment, 2013.
- [27] P.J. Withers, H.K.D.H. Bhadeshia, Residual Stress Part 1 Measurement Techniques Materials Science and Technology, 17(4), 355–365, 2001.
- [28] G.S. Schajer, Practical Residual Stress Measurement Methods, pp. 1-91, 2013.
- [29] R.N. Ghosh, S. Chatterjee, Microstructure-property relationship in cast irons. Materials Science and Engineering: A, 489(1–2), 163–169, 2008.
- [30] H. Megahed, E. Kashif, A.Y. Shash, M.A. Essam, Effect of holding time, thickness and heat treatment on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron, Journal of Materials Research and Technology, pp 1188 -1196, 2019.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Yalova’da tamamladı.2012 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2013-2014 yılını farabi programı ile Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesinde tamamlayarak 2017 yılında Niğde Üniversitesinden mezun oldu. 2022 yılından beri Yalova Üniversitesi Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programında eğitime devam etmektedir. 2018’den beri özel sektörde üretim mühendisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

F. Ustün and A. Kalyon, (2025). Effects of Stress Relief Annealing Time on Mechanical Properties and Operating Costs in Lamellar Graphite Cast Iron Engine Blocks. ITU Journal of Metallurgy and Materials Engineering, 2(2), 12-17.