**T.C.**
**BATMAN ÜNİVERSİTESİ**
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# TANTALYUM KARBÜR (TaC) TAKVİYESİNİN LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MALZEME ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**Ömer ÇİFTÇİ**

**Şubat-2025**
**BATMAN**

**T.C.**
**BATMAN ÜNİVERSİTESİ**
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# TANTALYUM KARBÜR (TaC) TAKVİYESİNİN LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MALZEME ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**Ömer ÇİFTÇİ**

**Danışman**
**Dr. Öğr. Üyesi Rifat YAKUT**

**Diğer Jüri Yeleri**

**Doç. Dr. Fatih ÖZEN** **Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN**

**Şubat-2025**
**BATMAN**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Ömer ÇİFTÇİ tarafından hazırlanan "Tantalyum Karbür (TaC) Takviyesinin Lamel Grafitli Dökme Demirin Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi" adlı tez çalışması 25/02/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

| **Jüri Üyeleri** | **İmza** |
|---|---|
| **Başkan**<br>Doç. Dr. Fatih ÖZEN | …….. |
| **Danışman**<br>Dr. Öğr. Üyesi Rifat YAKUT | …….. |
| **Üye**<br>Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN | …….. |

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

## ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Ömer ÇİFTÇİ
25.02.2025

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

## TANTALYUM KARBÜR (TaC) TAKVİYESİNİN LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MALZEME ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**Ömer ÇİFTÇİ**

**Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Rifat YAKUT**

**2025, 60 Sayfa**

Bu çalışmada farklı oranlarda (ağrılıkça %0, %0.025, %0.155 ve %0.285) Tantalyum Karbür (TaC) takviyesi yapılarak lamel grafitli dökme demir malzemelerin üretimleri yapılmıştır. Üretilmiş olan bu döküm malzemelerden sertlik deney numuneleri, basma deney numuneleri ve aşınma deney numuneleri hazırlanmıştır. Mekanik özellikleri belirlemek amacıyla hazırlanmış olan bu numunelere sertlik ölçüm deneyi, basma deneyi ve aşınma deneyleri uygulanmıştır. Yapılan sertlik ölçüm sonuçlarına göre %0.025 TaC takviye oranına sahip deney numunesinde ortalama 231 HB olarak en yüksek değer tespit edilmiştir. Basma deneylerinde %0.285 TaC takviyeli numunede ortalama 949 MPa olarak en yüksek gerilme değeri gözlemlenmiştir. Yapılan aşınma testleri ile aşınma hacmi, aşınma oranı ve sürtünme katsayılarındaki değişimler tespit edilmiştir. Ayrıca, numunelerin aşınmış yüzeyleri SEM cihazı ile incelenerek aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Lamel Grafitli Dökme Demir (LGDD), Tantalyum Karbür (TaC), Kayma aşınması.

# ABSTRACT

## MASTER THESIS

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TANTALUM CARBIDE (TaC) REINFORCEMENT ON THE MATERIAL PROPERTIES OF LAMELLAR GRAPHITE CAST IRON

**Ömer ÇİFTÇİ**

**Batman University Graduate Education Institute**

**Department of Mechanical Engineering**

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Rifat YAKUT**

**2025, 60 Pages**

In this study, lamellar graphitic cast iron materials were produced with Tantalum Carbide (TaC) reinforcement at different ratios (0%, 0.025%, 0.155% and 0.285% by weight). Hardness test specimens, compression test specimens and wear test specimens were prepared from these produced cast materials. Hardness measurement tests, compression tests and wear tests were applied to these samples prepared to determine the mechanical properties. According to the hardness measurement results, the highest value of 231 HB was determined in the test specimen with 0.025% TaC reinforcement ratio. In compression tests, the highest stress value of 949 MPa was observed in the 0.285% TaC reinforced sample. With the wear tests, changes in wear volume, wear rate and friction coefficients were determined. In addition, the worn surfaces of the samples were examined by SEM device and the wear mechanisms were determined.

**Keywords:** Lamellar Graphite Cast Iron (LGCI), Tantalum Carbide (TaC), Sliding wear.

# ÖN SÖZ

Farklı Tantalyum karbür takviye oranlarına sahip lamel grafitli dökme demirlerin sertlik, basma, aşınma ve mikroyapı üzerindeki etkilerini içeren bu yüksek lisans tez çalışması Giriş, Kaynak Araştırması, Materyal ve Yöntem, Deneysel Bulgular ve Tartışma, Sonuçlar ve Öneriler olmak üzere beş bölümden oluşmaktadır. Yapılan bu çalışma konusunda literatür taramaları yapılarak daha önce yapılmış bilimsel çalışmaların özetlerine yer verilmiştir.

Bu tez çalışması süresince bilgisini ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Rifat YAKUT'a teşekkür ederim.

Deneylerde kullanılan lamel graftli dökme demirlerin üretimi esnasında desteğini esirgemeyen HEMA Otomotiv Döküm Fabrikasının değerli yöneticilerinden Genel müdür Yardımcısı Fatih BARAN'a teşekkür ederim.

Aşınma deneylerinin yapılışında desteğini esirgemeyen İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü değerli hocalarından Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN ve Arş. Gör. Doğukan ÇETİNER'e teşekkür ederim.

Ayrıca, bilgisini ve desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI'ya teşekkür ederim.

Ayrıca, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Ömer ÇİFTÇİ
BATMAN-2025

# İÇİNDEKİLER

**ÖZET** ..... **iv**

**ABSTRACT** ..... **v**

**ÖN SÖZ** ..... **vi**

**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**

**ÇİZELGELER/TABLOLAR LİSTESİ** ..... **ix**

**ŞEKİLLER LİSTESİ** ..... **x**

**SİMGELER VE KISALTMALAR** ..... **iv**

**1. GİRİŞ** ..... **1**

**2. KAYNAK ARAŞTIRMASI** ..... **4**

2.1. Dökme Demirler ve Tanımı ..... 10
2.2. Tarihçe ..... 11
2.3. Döküm Teknolojisi ..... 12
2.4. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması ..... 12
2.4.1. Beyaz dökme demirler ..... 13
2.4.2. Küresel dökme demirler ..... 13
2.4.3. Temper dökme demirler ..... 14
2.4.4. Lamel grafitli dökme demirler ..... 14
2.4.4.1. A tipi gri dökme demirler ..... 14
2.4.4.2. B tipi gri dökme demirler ..... 15
2.4.4.3. C tipi gri dökme demirler ..... 16
2.4.4.4. D tipi gri dökme demirler ..... 16
2.4.4.5. E tipi gri dökme demirler ..... 17
2.5. Dökme Demirlerin Yapısında Bulunan Fazlar ..... 18
2.5.1. Grafit ..... 18
2.5.2. Ferrit ..... 18
2.5.3. Östenit ..... 18
2.5.4. Perlit ..... 19
2.5.5. Sementit ..... 19
2.5.6. Steadit ..... 19
2.6. Alaşım Elementlerinin Dökme Demirlerin Özelliklerine Etkisi ..... 20
2.6.1. Karbon (C) ..... 20
2.6.2. Silisyum (Si) ..... 20
2.6.3. Kükürt (S) ..... 21
2.6.4. Mangan (Mn) ..... 21
2.6.5. Fosfor (P) ..... 21
2.6.6. Krom (Cr) ..... 21
2.6.7. Nikel (Ni) ..... 21
2.6.8. Bakır (Cu) ..... 22
2.7. Gri Dökme Demirlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ..... 22
2.7.1. Basma deneyi ..... 22
2.7.2. Sertlik deneyi ..... 23

2.8. Sürtünme Teorisi ..... 24
2.9. Aşınma Mekanizmaları ..... 25
2.9.1. Adhesiv aşınma ..... 25
2.9.2. Abrasiv aşınma ..... 26
2.9.3. Korozif aşınma ..... 26

**3. MATERYAL VE YÖNTEM ..... 28**

3.1. Dökme Demir Malzemelerin Üretimi ..... 28
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması ..... 29
3.3. Metalografi İşlemleri İçin Numunelerin Hazırlanması ..... 31
3.4. Deneylerin Yapılışı ..... 33

**4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA ..... 36**

4.1. Sertlik Deneyleri ..... 36
4.2. Basma Deneyleri ..... 37
4.3. Aşınma Deneyleri ..... 43
4.4. Mikroyapı Analizleri ..... 46

**5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 54**

**KAYNAKLAR ..... 55**

## ÇİZELGELER/TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Dökme demir yapıda bulunan miktar ve elementler (%) ..... 13
Tablo 3.1. Numunelerin kimyasal bileşimleri (%) ..... 28
Tablo 3.2. Aşılayıcının kimyasal bileşimi ..... 28
Tablo 3.3. TaC'ün Teknik özellikleri ..... 29
Tablo 4.1. Kayma aşınması deney sonuçları ..... 43

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Demir karbon denge diyagramı ..... 10
Şekil 2.2. Lamel grafitli dökme demir (A tipi) ..... 15
Şekil 2.3. Lamel grafitli dökme demir (B tipi) ..... 15
Şekil 2.4. Lamel grafitli dökme demir (C tipi) ..... 16
Şekil 2.5. Lamel grafitli dökme demir (D tipi) ..... 17
Şekil 2.6. Lamel grafitli dökme demir (E tipi) ..... 17
Şekil 2.7. Basma testi numunesi ..... 23
Şekil 2.8. Brinell sertlik deneyinin prensip şeması ..... 24
Şekil 2. 9. Statik ve dinamik yükleme durumlarında sürtünme mesafesi ..... 24
Şekil 2.10. Adhesiv aşınma ..... 25
Şekil 2.11. Abrasiv aşınma modelleri a) İki cisimli aşınma tipi b) Üç cisimli aşınma tipi ..... 26
Şekil 3. 1. Sertlik testi A numunesi ..... 29
Şekil 3.2. Basma testi C numunesi ..... 30
Şekil 3.3. Aşınma deney numunesi ..... 31
Şekil 3.4. Hassas kesme cihazı ..... 31
Şekil 3.5. Bakalite alma cihazı ..... 32
Şekil 3.6. Zımparalama ve parlatma cihazı ..... 32
Şekil 3.7. SEM cihazı ..... 33
Şekil 3.8. Sertlik ölçüm cihazı ..... 34
Şekil 3.9. Basma test cihazı ..... 35
Şekil 3.10. Aşınma deney cihazı ..... 35
Şekil 4. 1. Brinell sertlik deneyi ölçüm değerleri ..... 37
Şekil 4.2. Basma testi değerleri ..... 38
**Şekil 4.3.** Basma deneyi kırılma hasarları ..... 39
Şekil 4.4. Basma deneyleri gerilme-gerinim grafikleri ..... 41
Şekil 4. 5. Aşınma iz derinliği ve genişliğinin şematik gösterimi ..... 44
Şekil 4.6. Sürtünme katsayısı değişimleri, 1N, 3N ve 5N ..... 45
Şekil 4.7. TaC tozunun SEM görüntüsü ..... 46
Şekil 4.8. TaC tozunun XRD Analizi ..... 47
Şekil 4.9. A tipi gri dökme demirin (ASTM A30) mikro yapısı grafit dağılımı ..... 47
Şekil 4.10. SEM mikroyapı grafit dağılımları ..... 48
Şekil 4.11. A nolu deney numunenin EDS Analizi ..... 49

Şekil 4.12. B nolu deney numunenin EDS Analizi..... 50
Şekil 4. 13. Aşınma sonrası SEM görüntüleri ..... 51

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

| | |
|---|---|
| Al | : Alüminyum |
| B | : Bor |
| C | : Karbon |
| Ca | : Kalsiyum |
| Cr | : Krom |
| Cu | : Bakır |
| Fe | : Demir |
| Mn | : Manganez |
| Ni | : Nikel |
| P | : Fosfor |
| S | : Kükürt |
| Si | : Silisyum |
| Sn | : Kalay |
| Sr | : Stronsiyum |
| Ta | : Tantal |
| TaC | : Tantalyum Karbür |
| Ti | : Titanyum |
| W | : Tungsten |

**Kısaltmalar**

| | |
|---|---|
| % | : Yüzde |
| ASTM | : Amerika malzemeler ve testler derneği |
| $Fe_3C$ | : Sementit |
| Fe-Si | : Ferro Silisyum |
| GDD | : Gri Dökme Demir |
| GG | : Lamel grafitli dökme demir |
| GGG | : Küresel grafitli dökme demir |
| HB | : Brinell Sertliği |
| HMK | : Hacim merkezli kübik |
| HRC | : Rockwell Sertliği |
| HV | : Vickers Sertliği |
| KGDD | : Küresel Grafitli Dökme Demir |
| Kgf | : Kilogram kuvvet |
| Met-SiC | : Metalürjik Silisyum Karbür |
| mm | : Milimetre |
| MPa | : Megapaskal |
| $^oC$ | : Sıcaklık birimi Santigrat derece |
| SEM | : Taramalı Elektron Mikroskobu |
| Sn, (s) | : Saniye |
| XRD | : X-ışını kırınımı |
| YMK | : Yüzey merkezli kübik |

# 1. GİRİŞ

Kimyasal içeriğinde %2'den daha fazla karbon bulunan demir malzemeler dökme demir (demir - karbon - silisyum ) malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Dökme demirler yaklaşık olarak %2-4 C ve %1-3 Si içeriğine sahiptir. Bileşiminde karbon ve silisyumdan başka manganez, fosfor ve kükürt gibi elementler bulunur. Dökme demir malzemeler döküm yöntemi ile son aşamadaki şekil ve boyutlara getirilebildiği için dökme demir malzemeler olarak isimlendirilmişlerdir. Dökme demir malzemeler; değişen mukavemet, kolay işlenebilme, aşınmaya karşı dayanıklılık, sertlik, korozyon direnci ve titreşimleri sönümleme gibi özelliklere sahip olup geniş bir aralıkta kullanılmaktadırlar (Çolak vd., 2018; Münker, 2010; Çiftçi ve Yakut, 2021). Bunun dışında, ısıl iletkenlik, iyi akışkanlık özelliği, düşük ergime sıcaklığı noktası, ergime işleminin kolay ve ucuz olması gibi faktörler dökme demirleri avantajlı hale getirmektedir. Sahip oldukları üstün özellikleri nedeniyle dökme demirler yaygın bir şekilde otomotiv uygulamalarında ve birçok alanda kullanılmaktadır (Malcıoğlu, 2015; Diószegi vd., 2016). Kullanım esnekliği sebebiyle dökme demirler üretim maliyetlerinin düşük olması, dökülebilirliklerinin iyi olması, elde edilebilir mekanik özelliklere sahip olmaları bu malzemelerin geleneksel olarak endüstrinin birçok uygulama alanında kullanılmasını sağlamaktadır (Collini vd., 2008). Ekonomik üretim süreçleri fiziksel özellikler ve mekanik özelliklerin iyi olması gibi kombinasyonlar dökme demirlerin özelliklerini oluşturmaktadır (Bilici, 2004; Ghasemi ve Elmquist, 2014).

1600°C civarındaki erime sıcaklığına sahip dökme demirler, endüstriyel uygulamalar için daha kullanışlı olmalarını sağlamaktadır (Beniwal ve Saxena, 2020; Yakut ve Çiftçi, 2023). Dökme demir içerisinde karbon oranının yüksek olması, kırılganlığa sebep olmaktadır. Dökme demirler pratik uygulamalarda % 3.5'a kadar silisyum, % 4.4'e kadar karbon içeren demir, karbon ve silisyum alaşımı (Fe-C-Si) olarak bilinmektedirler (Aytaçoğlu, 2012; Lima vd., 2020; Aguado vd., 2019). Silisyum ve karbon elementlerine ilave olarak, döküm malzemelerde çoğunlukla gördüğümüz başka elementler arasında mangan, az oranda fosfor ve kükürt elementleri görülebilmektedir (Şen, 2018). Karbon elementinin katılaşma esnasında ayrışması, dökme demir malzemelerin mikro yapılarında ayrı bir eleman şeklinde görülmektedir. Katılaşma esnasında karbon elementinin ortaya çıkmasıyla oluşan biçim ve şekil, dökme demir

malzemelerin tiplerini belirlemekte ve dolaylı olarak da bu durum dökme demirlerin özelliklerini etkilemektedir (Aytaçoğlu, 2012).

Dökme demirlerin üretiminde ki ilk gelişmeler; lamel grafitli dökme demirlerin (pik, gri dökme demirler) aşılama yöntemi ile üretilmesi yoluyla olmuştur (Tan, 2005; Sağlam D, 2009). Lamel grafitli dökme demirlerin yapısı, döküm işleminden önceki safhalarda soğutma koşullarına, aşılayıcılara ve kimyasal bileşimlere bağlı olarak değişim göstermektedir (Collini vd., 2008). Lamel grafitli dökme demir malzemeler otomotiv endüstrisinde bloklar, fren kampanaları ve diskleri, motorlar, piston segmanları, silindir kapağı ve silindir gömlekleri imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır (Bilici, 2004; Ghasemi ve Elmquist, 2014; Malcıoğlu, 2015; Diószegi, vd., 2016).

Kayma aşınması, sanayide kullanılan dökme demirlerde görülen önemli problemlerden biridir. Mekanik etkenler sebebiyle mikro tanecikler koparak malzeme yüzeyinden ayrılması ile yüzeyinde istenmeyen değişimlerin görülmesi aşınma işlemini teknik olarak açıklamaktadır (Münker, 2010). Aşınma işleminde, aşınan (aşındırılan) malzeme ana malzeme olarak tanımlanmakta, aşındıran malzeme ise karşı malzeme olarak tanımlanmaktadır. Ara malzemeler, karşı malzemeler, ana malzemeler, hareket durumları ve yükler kayma aşınmasının unsurlarını oluşturur. Tribolojik Sistemler olarak adlandırılan bu sistemler yukarıdaki unsurlardan meydana gelmektedir. Çevre koşullarının aşınma sistemlerindeki belirleyici rolü oldukça önemlidir. Nem veya korozif ortam etkisi aşınma sistemlerinde aşınmayı hızlandırmaktadır (Sağlam D., 2009; Okay, 2006; Yakut ve Çiftçi, 2022). Ana malzemenin özellikleri (mikroyapı, yüzey sertliği, ısıl işlem vb.) karşıt malzemenin özellikleri ve sıcaklık, nem gibi ortam atmosferi tribolojik sistemde aşınmayı etkileyen unsurlardır. Bunlara ek olarak malzemelerin servis şartlarına bağlı bazı özelliklerinin (maruz kalınan yükleme şekli vb.) aşınma mekanizmasına büyük bir ektisi bulunmaktadır (Filiz, 2021).

Bu çalışmanın amacı, sanayide yaygın olarak kullanılan lamel grafitli dökme demirlere %0; %0.025, %0.155 ve %0.285 gibi çeşitli oranlarda Tantalyum Karbür (TaC) takviye edilerek sertlik değerlerini, basma değerlerini ve aşınma değerlerini incelemektir. Yapılan aşınma deneylerinde numuneler standartlara uyun olarak hazırlanarak karşıt hareketli Tribotech aşınma test cihazında kayma hızı 10 mm/s, kayma uzunluğu 5 mm ve toplam kayma mesafesi değerleri sabit tutularak 50 m olacak şekilde, 1N, 3N ve 5N'luk yüklerde aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Test esnasında sürtünme katsayısı değerleri ve testlerden sonra da aşınma izleri yüzey profilometresi ile ölçülerek veriler toplanmıştır.

Böylece, aşınma davranışı üzerinde yük değişimlerinin çeşitli oranlarda TaC takviyeli lamel grafitli dökme demirlerdeki etkileri araştırılmıştır.

# 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Lamel grafitli dökme demirler üzerine son yıllarda yapılan yayınlar araştırılarak aşağıda verilmiştir. Bu tez çalışması lamel grafitli dökme demir içerisine çeşitli oranlarda TaC takviye edilerek aşınma davranışları, sertlik, basma mukavemeti gibi bazı mekanik özellikler hakkında bilginin geliştirildiği bir çalışma olacaktır.

Arslanbulut ve Selçuk (2024) tarafından yapılan çalışmada herhangi bir ısıl işlem uygulanmamış lamel ve küresel grafitli dökme demir kam mili (içten yanmalı motorlarda kullanılan) numunelerinin aşınma kayıpları incelenmiştir. Hem lamel hem de küresel grafitli dökme demir deney numuneleri 3 farklı dönme hızında (85, 100 ve 115 d/dk) ve 3 farklı yük altında (4N, 8N ve 12N) aşındırılmıştır. Aşınma işlemi bir kam profili ölçüm makinesinde gerçekleştirilmiştir. Aşınmaların hangi bölgelerden olduğunu tahmin etmek için hem ağırlık kaybı ölçümleri hem de aşınma sonrası kam profili ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Aynı hız ve yükte gerçekleştirilen aşınma testlerinde, lamel grafitli dökümlerin küresel grafitli dökümlere göre daha fazla aşındığı görülmüştür. Bunun sebebinin, lamel grafitli dökümlerdeki grafit yapısının etkisiyle açıklanabileceği düşünülmüştür. Lamel grafitli dökümlerdeki lamel grafitler yağlama özelliğine sahip olsa da ince yapıların kırıldığı ve aşınmayı artırdığı belirtilmiştir.

Li vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada mekanik özellikleri ve güçlendirme mekanizmasını iyileştirmek için, gri dökme demirler (Nb içeriği ağırlıkça %0, %0.15, %0.2, %0.25, %0.3 ve %0.35 sırasıyla Nb0, Nb1.5, Nb2, Nb2.5, Nb3, Nb3.5 olarak basitleştirmişlerdir) orta frekanslı bir indüksiyon fırını kullanılarak hazırlanmıştır. Gri dökme demir matrisinin mikro yapısındaki lameller arası aralık Nb ilavesiyle ayrıştırılmış ve aralık 530 nm'den 210 nm'ye düşmüştür. A tipi grafitin boyutu azaltılmış ve daha homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Nb ilavesi ile gri dökme demirin Vickers sertliği ve çekme mukavemeti artmıştır. Nb2.5 oldukça iyi yapısal homojenliğe sahip olup perlit aralığını 210 nm'ye kadar iyileştirerek kararlı mekanik özellikler göstermiştir. Nb3.5 gri dökme demir en iyi mekanik özellikleri sergilemiş, vickers sertliği ve çekme mukavemeti sırasıyla 389 HV ve 537 MPa olarak bulunmuştur.

Avcı (2022) tarafından yapılan çalışmada disk frenlerde kullanılan rotor parçasını (sadece grafit boyut ve tipleri farklı olacak şekilde) aynı özelliklerdeki lamel grafitli dökme demirlerden üretilerek, sertlik, işlenebilirlik, aşınma ve fren performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Brinell sertlik testi yönteminde uç kısımda 10 mm

çapında tungsten karbür bilye kullanılmış ve (10 mm aralıklarla 5 farklı noktadan) 3000 kgf yük uygulanmıştır. A numunesinin sertlik değerleri ortalaması 192 HB, B numunesinin sertlik değerleri ortalaması 163 HB olarak tespit edilmiştir. Aşınma testleri Pin on disk yöntemiyle, Ø6 mm' lik çelik bilyeyi, döküm fren diski üzerinde hareket ettirilerek toplamda 200 m mesafede gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi sonucunda numune A'da disk aşınması 6.2 mg, numune B'de ise 16.92 mg olarak ölçülmüştür. A numunesinde disk aşınması daha az olurken balatadaki aşınma daha fazla olmuştur. Balata aşınma değerleri incelediğinde tüm hız ve sıcaklık sınır koşullarında A numunesinin B numunesinden daha iyi aşınma performansı gösterdiği belirlenmiştir.

Çalık vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada GG-25 (lamel grafitli) dökme demir numune malzemeleri farklı iki üretim tekniği kullanılarak üretilmiştir. Üretilmiş olan bu döküm malzemelerinin mikroyapısı incelenmiş daha sonra da kullanılan dökümün üretim yöntemlerinin mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Döküm sıcaklıkları ve kimyasal kompozisyonları aynı olan GG-25 döküm malzemeyi hem kum kalıba döküm yöntemi kullanılarak hem de savurma döküm yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilmiş olan döküm malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, her iki döküm yöntemiyle üretilen numunelere brinell sertlik testleri ve çekme testleri uygulanmıştır. Savurma döküm yöntemi kullanılarak üretilen test numunelerinin sertlik değerleri iç yüzeyde ortalama 248 HB, dış yüzeyde ortalama 255 HB olarak bulunmuş, çekme mukavemeti değerleri ise ortalama 282 MPa olarak tespit edilmiştir. Kum kalıba döküm yöntemiyle üretilen numunelerin sertlik değerleri iç yüzeyde ortalama 202,6 HB, dış yüzeyde ortalama 212 HB olarak tespit edilmiş ve çekme mukavemeti değerleri ise ortalama 263 MPa olarak bulunmuştur.

Pekşen (2021) tarafından yapılan çalışmada ferro silis (Fe-Si) ve metalürjik silisyum karbür (Met-SiC) lamel grafitli dökme demirlerin mekanik ve metalürjik özelliklerdeki değişimleri incelenmiştir. Fe-Si'ye ait olan numunelerin, Met-SiC ait numunelere göre daha kararlı olduğu görülmüştür. Sertlik ölçümlerinde Fe-Si'ye ait numunelerde ortalama sertlik değerleri 287.5 HB iken Met-SiC'e ait numunelerde ortalama sertlik değerleri 252.5 HB olarak belirlenmiştir. Çekme deney sonuçları incelendiğinde, Fe-Si'nin aritmetik ortalaması 286.6 MPa, Met-SiC'nin aritmetik ortalaması 250 MPa olarak ifade edilmiştir. Çekme dayanımları karşılaştırıldığında, Fe-Si numunelerin çekme dayanım değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan metalürjik kontroller sonucunda Fe-Si'ye ait numunelerin mikro yapılarında

lamel grafitlerin dağılımının homojen ve istenilen boyutlarda olduğu, bu durumun mekanik özellikleri önemli derecede etkilediği tespit edilmiştir.

Pan vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada motor silindir kapağı üretiminde kullanılan gri dökme demir içerisine ağırlıkça %0, %0.05, %0.11, %0.16, %0.20 niyobyum ilave edilerek mikro yapısı ve özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Gri dökme demirin çekme mukavemetinin, tokluğunun, yorulma özelliklerinin ve termal yorulma özelliklerinin niyobyum elementleri eklenerek iyileştirildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, niyobyum elementlerinin eklenmesi sadece grafiti, ötektik hücreyi, karbürü ve fosfor ötektiğini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda perlit lamel mesafesini de azaltarak matrisi güçlendirmektedir. Niyobyum içeriğini %0'dan %0.20'ye doğru arttırdıklarında çekme dayanımının 246 MPa' dan 300 MPa' çıktığı ve maksimum değerin niyobyum içeriği %0.20 olduğunda ortaya çıktığı tespit edilmiştir. %0.20 niyobyum içeren deney numunesi, diğer ilave niyobyum oranlarına sahip deney numunelerine göre daha iyi mekanik özellikler gösterdiği gözlemlenmiştir.

Akgül (2018) tarafından yapılan çalışmada gri dökme demirlere (GDD) 5 farklı oranda (0.03, 0.06, 0.09, 0.12 ve 0.15) kalay (Sn) takviyesi yapılmıştır. Bu takviyelerin mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, iki referans numune kullanılarak karşılaştırmalı işlem yapılmıştır. İlk referans numunesine %0.4 Cu ilave edilmiştir. Diğer referans numuneye ise alaşım elementi ilavesi yapılmamıştır. Çalışmanın sonunda, Brinell sertlik ölçüm değerini, en yüksek % 0.12 oranında Sn (kalay) takviyeli numunede 177 HB olarak tespit edilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre, en yüksek çekme dayanımı 195 MPa ile %0.12 Sn ile güçlendirilmiş numunede gözlenmiştir. En düşük çekme dayanımı alaşımsız numunede 157 MPa olarak bulunurken, %0.4 bakır takviyeli numunenin çekme dayanımı 177 MPa olmuştur. Perlitik oran en yüksek %0.12 Sn olan numunede görülmüştür. İçerisinde %0.12'ye kadar Sn bulunan A tipi lamelli grafit yapıda olduğu, içerisinde %0.15 Sn bulunduğunda bazı bölgelerde lamellerin rozetleşme eğiliminde oldukları gözlenmiştir.

Şen (2018) tarafından yapılan çalışmada iki farklı değişken Ferro-silisyum (Fe-Si) ve metalurjik silisyum karbür (Met-SiC) kullanılarak yapısı lamel grafitli olan dökme demir üretilmiştir. Fe-Si ve Met-SiC numunelerinin üretimi sırasında, potalardaki (1290-1330 ºC) erimiş metale %0.3 Ca bazlı aşılayıcılar eklenmiştir. Mekanik testler sonucunda Fe-Si numuneler Met-SiC numunelere göre daha kararlı davranış göstermiştir. Sertlik ölçümü sonucunda Fe-Si numunelerin ortalama sertliği 214 HB olarak bulunmuştur. Met-SiC numunelerinin ortalama sertliği ise 172 HB olarak tespit edilmiştir. Sertlik

ölçüm sonuçları dikkate alındığında %25'lik bir artış olduğu gözlenmiştir. Çekme deney sonuçlarına göre Fe-Si için aritmetik ortalama değerini 243.34 MPa, Met-SiC için aritmetik ortalama değeri 167.68 MPa olarak bulunmuştur. Çekme test sonuçları dikkate alındığında Fe-Si numunelerinin çekme dayanımlarının daha yüksek olduğu ifade edilmiştir.

Sübütay vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada çil oluşumunun gri ve küresel dökme demirin sertliği, aşınması, darbe tokluğu ve mikroyapısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çilli ve çilsiz gri ve küresel grafitli dökme demirden dört farklı kam mili (gri dökme demir, gri çilli dökme demir, küresel grafitli dökme demir, küresel çilli dökme demir) üretilmiş ve mekanik testler ile aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda yüzeyde oluşan çillerin dökme demirin sertliğini ve aşınma direncini artırdığını, gri ve küresel çilli dökme demirin aşınma miktarının ise hemen hemen aynı olduğu tespit edilmiştir. Maksimum sertlik değeri gri çilli dökme demirde tespit edilmiştir. Darbe tokluğu testi sonucunda çil oluşumu ile birlikte darbe tokluğunun azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın aşınma deneyleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada sadece gri dökme demirlerin oda sıcaklığında, 300 dev/dk sabit devirde ve 500 m sabit kayma mesafesinde, temas yükleri 52 N, 77 N ve 102 N değerlerinde olacak şekilde aşınma davranışları incelenmiştir. Ayrıca buna ek olarak 52 N temas yükü sabit tutularak 500 m, 750 m ve 1000 m kayma mesafelerinde aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise aynı hızda ve sabit 500 m kayma mesafesinde 77 N ve 102 N yük altında malzemelerin aşınma miktarı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Her iki durumda da aşındırıcı silindir yüzeyi yaklaşık 2300 HV yüzey sertliğine sahip borlanmış AISI 5115 çeliğidir. İlk durumda, 500 m kayma mesafesinde numuneye uygulanan temas yükü arttıkça aşınma kaybının da arttığı gözlenmiştir. 52 N sabit temas yükü altında gerçekleştirilen deneyde, gri dökme demir için kayma mesafesi arttıkça aşınma miktarının da arttığı tespit edilmiştir. İkinci durumda ise malzemenin yüzey sertliğine bağlı olarak aşınma direncinin artan sertlikle birlikte arttığı tespit edilmiştir. Gri dökme demirin yüzeyindeki çil yapısı sertlik değerinde aşırı bir artışa neden olduğu için aşınma testi sonunda malzeme kaybında büyük bir azalma (aşınma miktarında azalma) olduğu görülmüştür. Temas yükünün artması ile birlikte aşınma kaybının da arttığı gözlenmiştir.

Abbasi vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada alaşım elementi olarak fosforun (P) gri dökme demirin mikroyapısı, ötektik sıcaklığı, sertliği ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Beş farklı fosfor miktarı (ağırlıkça %0.5, %1, %1.5, %2

ve %2.5) gri dökme demire ilave edilmiştir. Gri dökme demirde fosforun %0.45'ten %2.58'e çıkarılması mekanik özellikleri zayıflattığı (çekme mukavemeti 297.5'ten 184.1 MPa'ya düşmüş) tespit edilmiştir. Ayrıca, sertlik değerinin 215.43'ten 249.38 HB'ye çıkardığı ve ötektik sıcaklığı 1139.7'den 1102.5°C'ye düşürdüğü gözlenmiştir.

Şimşir (2007) tarafından yapılan çalışmada kum döküm yöntemi kullanılarak lamel grafitli dökme demir içerisine tok ve mukavemeti yüksek çelik tel takviye edilerek tokluğu ve mukavemeti yüksek kompozit malzeme üretilmiş ve üretilmiş olan bu malzemenin de kırılma davranışı incelenmiştir. Kompozit malzeme (lamel grafitli dökme demir) üretirken çelik teller (4 mm çapında) iki farklı yerleşim düzeninde (2x3 ve 3x3) kalıbın içerisine yerleştirilmiştir. Kırılma tokluğu ve bükme mukavemetleri üç nokta eğme deneyleriyle (ASTM E-399 standardına uygun olarak) tespit edilmiştir. Dökme demir kırılgan bir malzeme olduğu için üç noktadan eğme test numunelerine ön yorulma çatlağı açılmamıştır. Üç nokta eğme deneyi strok kontrollü olarak 0.01 mm/sn hızda gerçekleştirilmiştir. İki farklı takviye hacim oranına sahip (Vr=0.05 ve Vr=0.08) ve takviyesiz kompozit malzemenin kırılma toklukları tek numune tekniği ile kompliyans ve j-integral metodları kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sonunda fiber takviyeli kompozit malzemenin hem kırılma toklukları hem de bükme mukavemetleri takviyesiz lamel grafitli dökme demire nazaran daha yüksek değerlerde olduğu ortaya koyulmuştur. Ayrıca, takviye fazın hacim oranının artmasıyla birlikte bükme mukavemetleri ve kırılma tokluğunun arttığı görülmüştür. Takviye fazın miktarı attıkça, kompozitlerin bükme dayanımının arttığı ifade edilmiştir. Takviyesiz gri dökme demirin bükme dayanımı 421 MPa, kompozit malzemelerin bükme dayanımları ise Vr=0.05 hacim oranı için 592 MPa, Vr=0.08 hacim oranı için 653 MPa olarak tespit edilmiştir. Mikro yapı ve kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelediğinde lamel grafitli dökme demirden çelik tele karbon yayınması sonucu, lamel grafitli dökme demirde yüksek sertliğe sahip geçiş bölgesi oluştuğu belirlenmiştir.

Taşgın (2007) tarafından yapılan çalışmada dubleks döküm tekniği kullanılarak iç kısmını sünek ve titreşimleri absorbe edebilen gri dökme demirden, dış kısmını ise farklı oranlarda Manganez (Mn) ve Bor (B) elementleri takviye edilerek sert ve aşınmaya karşı dayanıklı yüksek alaşımlı beyaz dökme demir malzemeler üretilmiştir. Gri dökme demirin sertliğini, mukavemetini ve döküm özelliklerini iyileştirmek için test numuneleri normalizasyon ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Bunun için numuneler 1 saat boyunca dönüşüm sıcaklığı olan 885-925 $^{o}$C'nin üzerinde bir sıcaklıkta tutulmuş ve havada soğutulmuştur. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler sert ve kırılgan bir yapıya sahip

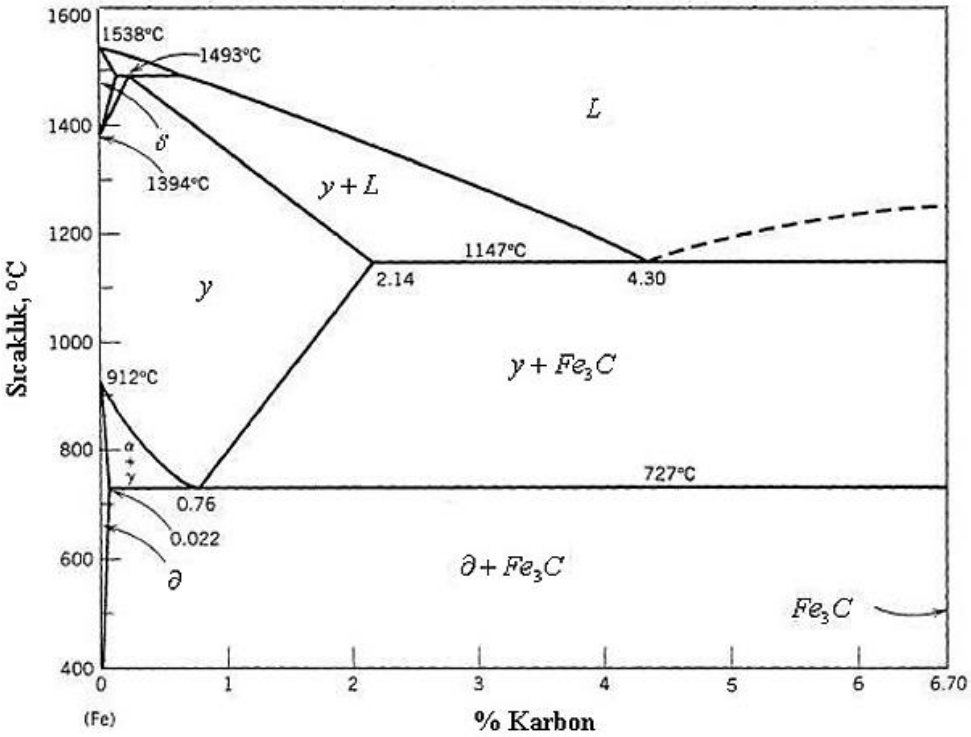
olduğundan, uygulanan ısıl işlem daha sünek bir yapıyla sonuçlanmıştır. 10N, 20N ve 30N'luk farklı yük değerlerinde, toplam 100 m aşınma mesafesi boyunca, sabit hızda, pim on disk test düzeneği kullanılarak aşındırıcı aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonucunda yapıdaki karbürlerin aşınmaya etki ettiği görülmüştür. Aşındırıcı ile karbürlerin teması sonucu aşındırıcı aşınma yüzeyinden kayarak ince bir çizgi bırakmış veya aşındırıcı bağlı bulunduğu yüzeyden kopmuştur. Numunelere uygulanan ısıl işlem sonrası karbürler çökelmiş ve sertlik değerlerinde azalmaya neden olmuş, parçaların kırılganlığı azalmış ve daha sünek bir malzeme haline gelmiştir. Yapılan mikroyapı incelemeleri ve aşınma testleri sonucunda, yüksek kromlu beyaz demir kısmında $M_7C_3$, $M_{23}C_6$, $M_2C$, $M_3B$ ve $M_{23}B_6$ tipi karbürler tespit edilmiş ve bu karbürlerin aşınma direncini artırdığı ifade edilmiştir.

Tan (2005) tarafından yapılan çalışmada hadde merdanesi yapımında kullanılan lamel grafitli dökme demirlere farklı oranlarda (%0.69, %0.79, %0.98, %1.12, %1.21, %1.50) bakır (Cu) elementi takviyesi yapılarak malzemeler üretilmiştir. Üretilen bu malzemelerin numuneleri pin on disk testi için hazırlanmıştır. Metal-metal aşınma testleri, ASTM G 99'a göre oda sıcaklığında, 1.256 m/s ve 2.513 m/s kayma hızlarında, 167 N, 192 N, 242 N ve 292 N yüklerde, 6782.4 m ve 13564.8 m kayma mesafelerinde 60 mm çapında ve 16 mm genişliğinde bir aşınma diski üzerinde gerçekleştirilmiştir. 29-32 HRC sertlik değerleri aşınma uygulanacak malzemelerin sertlikleri olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan aşındırıcılar 900 °C'de 30 dakika süreyle ısıl işlem fırınında östenitlenmiş ve yağ ortamında su verilerek sertleştirilmiş olup aşındırıcıların 63±2 HRC sertliğe sahip oldukları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda lamel grafitli yapıdaki dökme demir deney numunelerinde %0.69 - %1.5 değerleri arasında değişim gösteren bakır oranları ile farklı yük ve kayma mesafelerinde bakır içeriği arttıkça malzemelerdeki aşınma miktarının azaldığı tespit edilmiştir. %1.5'e kadar bakır ilavesinin aşınma üzerinde olumlu bir etki yarattığını ve malzemenin aşınma direncini artırdığı gözlenmiştir. Ağırlık kaybındaki değişimlerden yola çıkılarak bakır oranının %0.9'un altında olduğu durumlarda aşınma direncine etkisinin bulunmadığı kısmen gözlemlenmiş, fakat bakır oranının %0.9'un üstünde olduğu durumlarda mutlak bir aşınma direnci sağladığı ifade edilmiştir. Aşınma testlerinde yük arttığında deney numunelerde daha fazla partikül kopması olmuş ve buna bağlı olarak da aşınma miktarı artmıştır. Kayma mesafesi arttıkça, düşük bakır takviyeli numunelerin daha fazla aşınma gösterdiği, ancak yüksek bakır takviyeli numunelerin ise daha iyi aşınma direnci gösterdiği bulunmuştur.

## 2.1. Dökme Demirler ve Tanımı

Döküm ergitme fırınlarında yüksek sıcaklıklarda elde edilen sıvı haldeki ham demirler döküm kalıplarına aktarılarak elde edilen yarı mamüllere pik denilmektedir. Döküm ergitme fırınlarında pikler ergitilerek kalıplara dökülmekte ve ergiyik kalıptaki boşlukların şeklini alarak katılaşan malzemeye dökme demir adı verilmektedir (Bilici, 2004; Ortakaya, 2023).

Çelikler içerdikleri karbon oranına göre demir karbon denge diyagramında yedi fazdan oluşmaktadır. Şekil 2.1'de Demir-karbon denge diyagramının gösterimi verilmiştir (Kesti, 2009).




**Şekil 2.1.** Demir karbon denge diyagramı

| | | |
|---|---|---|
| a) | $L$ | : Eriyik Çelik |
| b) | $y + L$ | :Östenit + Eriyik Çelik |
| c) | $y$ | :Östenit |
| d) | $y + Fe_3C$ | :Östenit + Sementit |
| e) | $\partial$ | :Ferrit |
| f) | $\partial + y$ | :Östenit + Ferrit |
| g) | $\partial + Fe_3C$ | :Ferrit + Sementit |

Dökme demirler soğuma hızına, bileşime ve erime sürecine bağlı olarak ya yarı kararlı demir-sementit sisteminde ya da kararlı demir-grafit sistemine göre katılaşabilir. Eğer yarı kararlı katılaşma sistemine göre olursa, ötektikteki karbonca zengin faz demir karbürdür (sementit-$Fe_3C$). Eğer kararlı katılaşma sistemi görülürse, karbon açısından zengin faz grafittir (Bulut, 2021).

Dökme demirin içyapısındaki silisyum, karbon ve fosfor gibi alaşımların bileşimindeki değişiklikler, katılaşma sıcaklığı, ötektik bileşim ve sıvılaşma gibi parametreler malzemelerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu etki derecesi, malzemenin içyapısındaki karbon eşdeğeri (Ceş) ile (denklem 2.1) hesaplanmaktadır.

$$C_{eş} = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \tag{2.1}$$

Dökme demir içyapısındaki karbon eşdeğeri, ötektik bileşime ne kadar yakın olduğunu gösterir. %4.3 karbon eşdeğeri olan dökme demirlerde ötektik yapı görülür. Malzemenin mikro yapısındaki karbon eşdeğerinin %4.3'ten az veya fazla olmasına bağlı olarak dökme demirler, ötektik altı yapıya yada ötektik üstü bir yapıya sahiptir. Malzemenin iç mikro yapısındaki karbon eşdeğeri, dökme demirin yapısını ve malzeme özelliklerini tanımlamak için önemli parametrelerdir. Karbon eşdeğerine bağlı olarak malzemenin içyapısındaki karbon içeriği ve silisyum, alaşımın katılaşma aralık değerinin belirlenmesi, dökümün karakteristiği ve özelliğiyle ilgilidir (Ortakaya, 2023; Münker, 2010).

## 2.2. Tarihçe

Döküm yöntemi tarihsel bulgulara göre, M.Ö. 4000 yıllarına kadar uzanmaktadır. Bakır ve altın insanların ilgisini çeken ilk metallerdir. Bakır cevherinin, ateş söndürme işleminde kullanılması esnasında bakır taneciklerinin ergimesi sonucu tesadüfen keşfedilmiştir. İlk zamanlarda dövülerek şekil verilen bakır, daha sonraları bakırın yüksek sıcaklıklarda ergidiğini görünce dövülerek değil de ergitip dökerek kullanılmaya başlanmıştır. Tesadüfen bulunmuş olan bronz, bir bakır alaşımıdır ve dayanımı bakırdan daha yüksektir. İlk dönemlerde, ilkel olan ergitme ocaklarında ergitilmiş olan metal, pişirilmiş kil veya taştan yapılmış kalıplara dökülerek üretilmiştir.

Bakır dökümler, M. Ö. 2500'lü yıllarda Çin'de mum kalıpların kullanılmaya başlanmasıyla birlik üretimleri yapılmaya başlanmıştır. Dökme demir dökümlerin üretimi M. Ö. 600'lü yıllarda yine Çin'de ilk olarak gerçekleştirilmiştir. Üretimi yapılan döküm malzemelerde oldukça yüksek oranlarda fosfor ve kükürt görülmüştür (Kavaklı, 2006).

### 2.3. Döküm Teknolojisi

Dökümcülük, mekanik işlemlerin gelişmesi ve sanayinin günümüzdeki seviyelerine gelmesinin başlangıcıdır. Ülkelerin ekonomik gelişme seviyelerinin göstergesi, o ülkelerin döküm endüstrileri olarak kabul edilmektedir. Teknolojik gelişmeler son zamanlarda dökümcülüğü dinamik bir sektör haline getirmektedir (Kavaklı, 2006). Mamul parça ve döküm özellikleri bakımından dökme demir malzemeleri üstün özellikler gösterir. Bu özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Ay, 2025):

a) Düşük ergime sıcaklığı,
b) İyi akışkanlık özelliği ile homojen yapı oluşumu,
c) Kalıp şeklini alma kabiliyeti,
d) Düşük ergime sıcaklığı nedeniyle düşük maliyet,
e) Karmaşık yapıya sahip parçaların tek seferde üretilebilmesi,
f) İşleme kolaylıkları,
g) Titreşim sönümlemesinin iyi olması,
h) Basma mukavemetinin yüksek olması,
i) Aşınma dayanımının yüksek olması,
j) Sertlik değerlerinin 120-600 HB arasında değişebilmesi,
k) Mukavemet değerlerinin iyi olması,
l) Gri dökme demirlerin mükemmel titreşim sönümleme kapasitesinin olması,
m) Gerilimlerin daha az çarpılmaya neden olması.

### 2.4. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

İçerisinde kükürt, fosfor, %1-3 arasında silisyum ve %2 den fazla karbon elementi bulunduran demir alaşımlar dökme demir olarak adlandırılır. Nikel, molibden, bakır, krom gibi elementler eklenerek mekanik özellikleri arttırılan dökme demirlerin sertlik, mukavemet gibi özellikleri arttırılabilir. Sünekliği ve tokluğu düşük olduğundan çelikler

ile karşılaştırıldığında dökme demirlerin kullanımları sınırlıdır. Mekanik özellikleri ve yapılarına göre dökme demirler 4 gruba ayrılır. Bu gruplar; beyaz dökme demir, küresel dökme demir, temper dökme demir ve gri dökme demir olarak adlandırılır. Dökme demir yapıda bulunan miktar ve elementler Tablo 2.1'de verilmiştir (Baş, 2022).

**Tablo 2.1.** Dökme demir yapıda bulunan miktar ve elementler (%)

| | **Toplam (C)** | **Silisyum (Si)** | **Kükürt (S)** | **Fosfor (P)** | **Mangan (Mn)** | **Demir (Fe)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Beyaz Dökme Demir | 2.5-4.0 | 0.4-1.6 | 0.15 | 0.4 | 0.3-0.8 | Kalan |
| Küresel Dökme Demir | 3.2-4.1 | 1.8-2.8 | En çok 0.03 | En çok 0.1 | En çok 0.8 | Kalan |
| Temper Dökme Demir | 2.0-3.0 | 0.9-1.8 | En çok 0.2 | En çok 0.2 | 0.25-1.25 | Kalan |
| Gri Dökme Demir | 2.0-4.0 | En az 1.0 | 0.2 | 0.6 | En çok 0.1 | kalan |

### 2.4.1. Beyaz dökme demirler

Yüksek sertlik ve aşınma direnci uygun ısıl işlem uygulanarak ve kimyasal bileşim kontrol edilerek yüksek kromlu beyaz dökme demirin özelliklerine bağlı olarak elde edilebilir (Sağlam C., 2009).

Yüksek kromlu dökme demir alaşımları, düşük kromlu alaşımlara göre daha yüksek tokluğa sahiptir. Tokluk özellikle öğütme ve kırma işlemlerinde kazaların önlenmesinde önemlidir. Yapıdaki karbon içeriği arttıkça sertlik ve aşınma direnci de artar. Ancak düşük gerilimli aşınma ortamlarında, sertlik değeri belirli bir seviyeye ulaştığında mikro sertlik artışları aşınma direncini etkilemez (Çetinkaya, 2003, Ortakaya, 2023).

### 2.4.2. Küresel dökme demirler

Diğer dökme demirler ve çelik dökümlerle karşılaştırıldığında, küresel grafitli dökme demirler iyi dökülebilirlik, düşük erime noktaları, ısıl işleme uygunluk, yüksek aşınma direnci ve iyi yüzey kalitesi ile karakterize edilir. Isıl işlemlerle ve alaşımlara eklenen elementlerle küresel grafitli dökme demirler üstün mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Küresel grafitli dökme demirler; mekanik özellikler, alaşım elementleri, östemperleme sıcaklıkları, östenitleme ve bekleme süreleriyle ilişkilidir (Kaçal vd., 2008).

### 2.4.3. Temper dökme demirler

Beyaz dökme demirin temper işlemi ile karbürlerinin parçalanmasının sonucunda oluşan yapıya temper dökme demir denilmektedir. Beyaz dökme demirler, kapsadığı demir karbürü, grafite ve demire ayırmak için ısıl işlemden geçirilmektedir. Bu işlemler sonucunda temper dökme demir beyaz dökme demire göre daha sünek bir yapıya dönüşmektedir. Temper dökme demirin katılaşma sıcaklığı 1250°C ve döküm sıcaklığı 1325-1400 °C 'dir. Temper dökme demirdeki grafitler patlamış mısıra (temper karbon) benzeyen görünümde bulunmaktadır. Temper dökme demirin kırık yüzeyi gümüş gri renktedir. Yapıda karbon küresel formda olduğu için gri dökme demire göre daha iyi mukavemete sahip olmaktadır. Temper dökme demirler, iyi işlenebilirlik, yüksek mukavemet ve tokluğa sahip ayrıca sünek yapılardır (Öztürk, 2023).

### 2.4.4. Lamel grafitli dökme demirler

Lamel grafitli (gri) dökme demirler, dökme demirlerin yavaş soğumaları, karbonun sıvı demir içerisinde ayrışması ile grafit lamelleri oluşacak şekilde katılaşmalarıyla oluşan dökme demirlere denilmektedir (Çolak vd., 2018). Katılaşmadan sonra içinde yer alan karbonun büyük bir kısmı serbest veya lameller şeklinde bulunan dökme demir tipine lamel grafitli ya da gri dökme demir olarak adlandırılır. Gri dökme demirde kırık olan yüzey, mat gri renkli olmasından dolayı bu malzemeye gri dökme demir denmektedir. Lamel grafitli ya da gri dökme demirler A, B, C, D ve E tipi grafitlere sahip olmakla beraber beş bölüme ayrılır. Lamel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılmasını yukarıda görüldüğü gibi birkaç kategoriye ayırmak mümkündür (Ay, 2025).

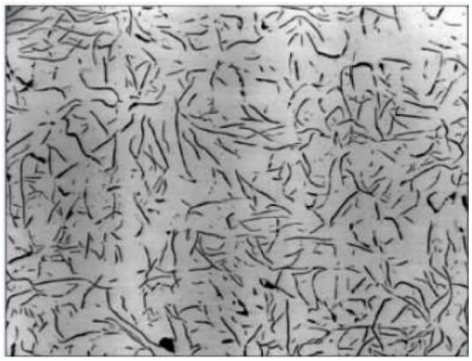
Gri dökme demirde, grafit şeklindeki lamellerin boyut ve şekillerindeki dağılım dökümün katılaşması esnasında oluşmakta ve daha sonra da herhangi bir işlemle değiştirilememektedir (Çelik, 2001; Ortakaya, 2023).

#### 2.4.4.1. A tipi gri dökme demirler

A tipi yapraksı grafit türünde gelişi güzel yönlenmeye ve üniform dağılıma sahip olan serbest dağılım mevcuttur. İşlenebilirlik özelliği talaşlı imalat için en yüksek olan grafit türü bu yapıdır (Baş, 2022). A tipi lamel grafitli dökme demirler perlit veya ferrit ile birlikte bulunmaktadır. Yüksek çekirdeklenme oranlarının elde edilebildiği

durumlarda az miktarda alt soğuma meydana gelmektedir. Bu durumda grafit hücrelerinin büyüme hızları düşüktür ve sonuç olarak A tipi grafitler oluşmaktadır. A tipi grafitleşme işlemi sadece ötektik katılaşma aralığı değerlerinde gerçekleşebilmektedir. ASTM' ye göre lamel grafitli dökme demir A-Tipi grafit Şekil 2.2'de verilmiştir (Aytaçoğlu, 2012; Kumruoğlu, 2003).

**A TİPİ**
Lamel grafitlerin homojen dağılımı

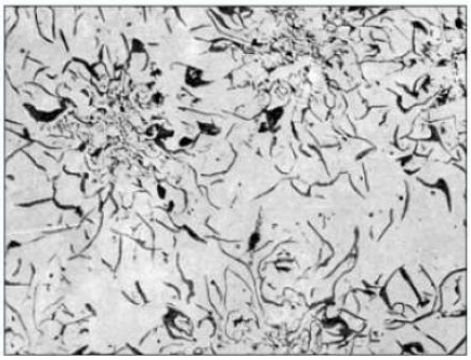


**Şekil 2.2.** Lamel grafitli dökme demir (A tipi)

### 2.4.4.2. B tipi gri dökme demirler

B Tipi gri dökme demirlerin temel özelliği, mikro yapıda grafit yumakları (rozet) olarak görünmeleri ve rastgele dağılmalarıdır. Isı ve elektriksel iletkenlik özellikleri vermiküler ve küresel grafitli dökme demirlerinkinden daha iyidir. Basma ve çekme özellikleri, element ilavesi ve ısıl işlem gibi müdahale süreçleri ile geliştirilebilir. Lamel boyutların büyümesiyle birlikte malzeme yumuşaklık özelliği kazanmaktadır. Bu malzemelerin işlenebilme özellikleri oldukça iyidir. Genel olarak 10 mm kalınlığındaki kesitlerin yüzeylerinde, soğuma hızlarının yavaş olduğu kısımlarda A tipi grafit gözlemlenmektedir (Şen, 2018). ASTM' ye göre B tipi lamel grafitli dökme demirlerde, grafit dağılımının gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir (Çalık vd., 2022; Aytaçoğlu, 2012).

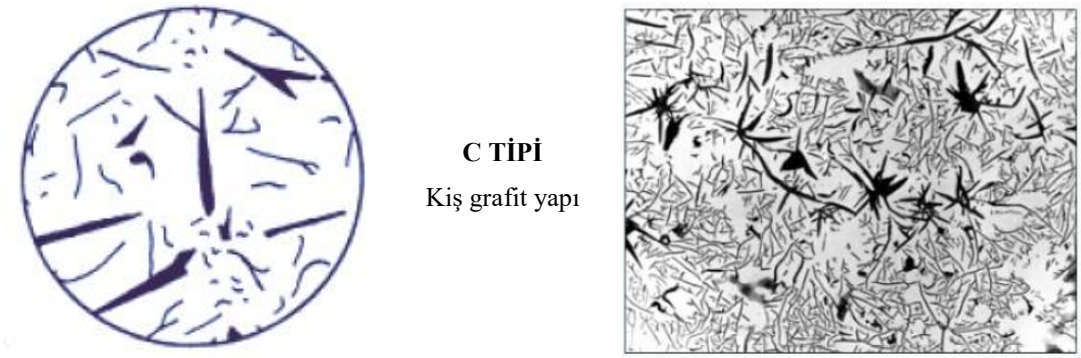
**B TİPİ**
Rozet grafit yapı



**Şekil 2.3.** Lamel grafitli dökme demir (B tipi)

### 2.4.4.3. C tipi gri dökme demirler

Grafit yapı ötektik üstü katılaşma sonucu oluşmaktadır. Malzemenin soğuma hızlarının yüksek seviyede tutulması, kristalleşme hızının düşük seviyede tutulması ve çekirdek sayısının yüksek seviyede tutulması C tipi dökme demir üretebilmek için sağlanması gereken şartlardandır. Katılaşma işleminin başlamasından çok kısa bir zaman içinde katılaşma gerçekleşmektedir (Aytaçoğlu, 2012). Termal şoka karşı C tipi grafit yapıya sahip dökme demirler dayanıklıdır. Ancak işleme sonrasında pürüzlü yüzeyler ortaya çıkmakta olup mukavemetleri de düşük olmaktadır (Tan, 2005). Yapısındaki oldukça büyük olan grafitler çekme mukavemetlerinin düşmesine ve işlenmiş olan yüzeylerdeki görüntü bozukluklarına sebep olmaktadır (Çolak, 2019). ASTM' ye göre C Tipi lamel grafitli dökme demirlerdeki grafit dağılımının gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir (Çalık vd., 2022; Aytaçoğlu, 2012).

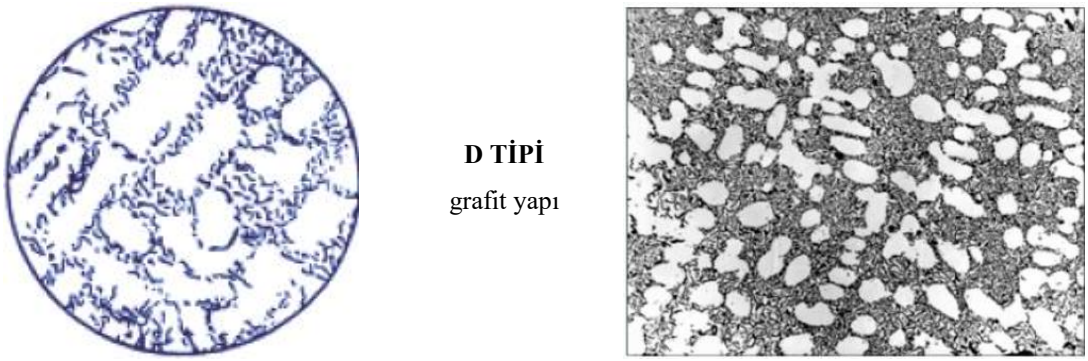



**Şekil 2.4.** Lamel grafitli dökme demir (C tipi)

### 2.4.4.4. D tipi gri dökme demirler

İçerisindeki silisyum oranı yüksek olan dökme demirin hızlı soğutma koşulları altında belirli bir düzen olmadan yönlendirilen küçük boyutlu grafitlerdir ve hiperötektik alaşımlarda görülürler. Aşırı soğumanın katılaşma sırasında bu tip hücresel grafitin oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir ve matris perlitik olduğunda bile bu ince grafit tipi genellikle ferrit ile birlikte bulunur. Dikey kesitte A veya B tipi grafit ile birlikte bulunan bu dökme demir türü, genellikle soğuma hızının hızlı olduğu ince kesitlerde bulunur. Malzemenin mukavemetini arttırmayan ve iyi işlenebilirlik sağlayan bu tipde grafit yapı, çoğunlukla soğuma hızının hızlı olduğu ince kesitli malzemelerde bulunur ve düşey kesitlerde A veya B tipi grafitlerle birlikte bulunur. Ti ve Al gibi alaşım elementleri perlit ve karbür oluşumunu etkiler (Çolak, 2019). ASTM' ye göre D tipi lamel grafitli

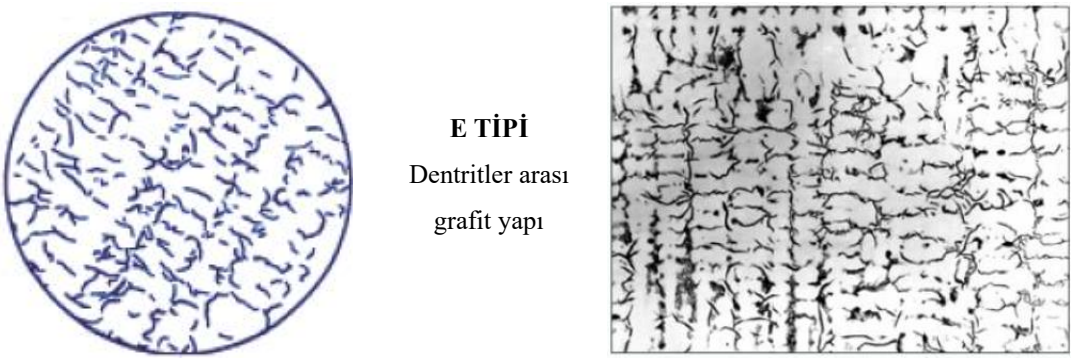
dökme demirlerde grafit dağılımının gösterimi Şekil 2.5'te verilmiştir (Çalık vd., 2022; Aytaçoğlu, 2012).




**Şekil 2.5.** Lamel grafitli dökme demir (D tipi)

### 2.4.4.5. E tipi gri dökme demirler

Grafit yapısı hipoötektik katılaşmada görülür. Hipoötektik bileşimlerin katılaşması sırasında oluşan grafit malzemelerin mukavemetinin A tipi grafite göre daha iyi olduğu görülmektedir. Bunlar, karbon oranı düşük dökme demirlerde tercihli bir yönelim gösteren ve dentritler arası bir yapı sergileyen grafittirler. Yüksek miktarda birincil östenit, E tipi grafit oluşumunda önemli bir rol oynar. Yüksek döküm sıcaklıklarında gözlenirler. Bu tip dökme demirlerde, çekme mukavemeti, sertlik ve basma mukavemeti nispeten yüksektir (Şen, 2018). Şekil 2.6'da E tipi lamel grafitli dökme demirin grafit dağılımı gösterilmiştir (Çalık vd., 2022; Aytaçoğlu, 2012).




**Şekil 2.6.** Lamel grafitli dökme demir (E tipi)

## 2.5. Dökme Demirlerin Yapısında Bulunan Fazlar

### 2.5.1. Grafit

Dökme demirde karbon serbest veya bileşik halde, soğuma hızına ve kimyasal bileşime bağlı olarak bulunur. Grafit lameller gri dökme demirde katılaşma sırasında meydana gelir ve düşük yoğunlukları sebebiyle toplam döküm hacminin %6-17'sini oluşturabilir. Grafit, dökme demirde lamel dışında da oluşabilir. Örneğin, beyaz dökme demirin ısıl işlemi temper karbonu veya rozet grafit üretebilir. Grafit hem kristal şekli hem de bağ mukavemeti açısından zayıftır. Bu nedenle, mikroyapıdaki grafitin boyutu, şekli ve dağılımı döküm özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gri dökme demirdeki süneklik eksikliği lamel grafitten kaynaklanmaktadır. Temperli dökme demirlerin yapısındaki rozet grafitler veya küresel dökme demirlerdeki küre şekilli grafitler sünekliği lameller kadar etkilemez. Dökme demirdeki saf karbonun en kararlı formudur. Kayganlık, düşük yoğunluk, yüksek ısı iletkenliği, düşük sertlik gibi unsurlar önemli fiziksel özellikleridir (Yüksel, 2011).

### 2.5.2. Ferrit

Normal oda sıcaklığından 910°C'ye kadar kübik hacim merkezi yapısına sahip demir ve az miktarda karbondan oluşan sünek, yumuşak ve orta derecede mukavemetli katı bir eriyik olarak tanımlanır. Dökme demirde ferrit, bileşiminde silisyum içeren fazdır. Silisyum ferriti sertleştirir ve mukavemetini artırır. Yapısal olarak, dökme demirde ferrit ya serbesttir ya da perlit içinde oluşur. Dökme demirde serbest yapısal eleman olarak ferritin varlığı, dökümün kimyasal bileşimine ve soğuma hızlarına bağlıdır. Silisyum miktarlarına bağlı olarak ferritin sertlik değeri 100-140 HB aralığında, mukavemet değeri 35-50 kg/mm$^2$ aralığında ve uzama değeri ise %20-30 aralığında olabilir. Tamamen ferritik yapılar sadece tavlama işlemi ile elde edilebilmektedir (Şen, 2018; Yüksel, 2011).

### 2.5.3. Östenit

910°C ile 1410°C arasındaki sıcaklıklarda, katılaşma sırasında oluşan ve yavaş soğumada ferrit, perlit veya her ikisinin karışımına dönüşen allotropik formdaki yüzey merkezli kübik (YMK) demir ve karbondan oluşan katı bir eriyik olarak tanımlanabilir. Östenitik demirlerde, östenit %18-36 aralığında nikel tarafından kararlaştırılır. Östemperlenmiş demirde östenit, perlit oluşumunu engelleyen hızlı soğutma ile oluşur.

Östemperleme sırasında karbonun aşırı doygunluğu, normal oda sıcaklık değerinin altında bile östenitten martensite dönüşümün başlamasını bastırır. Östenitik dökme demirler tüm sıcaklıklarda tokluk ve süneklik gösterir. Ayrıca, iyi korozyon direnci ve ısıl çevrim koşullarında yüksek sıcaklık özellikleri sağlar (Yüksel, 2011).

### 2.5.4. Perlit

Sementit ve ferrit fazlarının karışımlarından oluşan tabakasal veya katmanlı mikro yapıdır. Bu yapı %12 sementit ve %88 ferrit içermektedir. Perlit, ötektoid dönüşüm sonucunda oluşmakta olup, bundan dolayı da perlit oluşurken sıcaklık değeri daima aynı kalmaktadır. Ötektoid dönüşüm, %0.8 oranında karbon bulunduran ve 723 °C sıcaklıktaki yapının yavaş bir şekilde soğumasıyla oluşmaktadır. Perlit fazı oluşurken, östenit kafesinde bulunmakta olan karbon atomları tane sınırlarına kadar yol almaktadır. Tane sınırlarında, demir atomları ve karbon birleşerek sementit fazını oluşturmaktadır. Karbon miktarı azalan yüzey merkezli kübik (YMK) yapıdaki östenit fazı, hacim merkezli kübik (HMK) yapısındaki ferrit olmaktadır. Bu dönüşüm sonucunda, ferrit üzerine sementit lamelleri dizilerek perlit yapısını oluşturmaktadırlar (Tekgöz, 2021).

### 2.5.5. Sementit

Bu fazda 3 Fe atomu ile 1 C atomunun birleşmesiyle sementit yapı oluşur. Kırılgan ve sert özellikler göstermektedir. Sementitin karbon çözünürlüğü %6.67'dir (Erdoğan, 2021). Bunlar, demir karbid olarak da isimlendirilir. Yapı içinde iğneli ve ağ görünümünde bulunan sementit fazı kırılgan ve oldukça da serttir. Düşük çekme mukavemetine sahip olmasına rağmen basma mukavemeti ise yüksektir. Bu durum çeliğin sert olmasını sağlamaktadır (Mutlu, 2021).

### 2.5.6. Steadit

Özellikle lamel grafitli dökme demirde fosfor (954°C-982°C) düşük ergime sıcaklıklarında demir-demir fosfor ötektiği olan steadit görünümünde bulunur. Steadit %10.20 fosfor içermektedir. Fosfor katılaşma işleminde katılaşmanın en son olduğu bölgede toplandığı için steadit bölgeleri mikroyapı içerisinde çoğunlukla hücresel bir görünüme sahiptirler (Münker, 2010; Şen, 2018).

## 2.6. Alaşım Elementlerinin Dökme Demirlerin Özelliklerine Etkisi

### 2.6.1. Karbon (C)

Karbon miktarı gri dökme demirde ağırlıkça %2.50-4.50 arasında değişim gösterir. İçyapıda serbest ve bileşik olarak iki farklı faz karbon tarafından oluşturulur. Toplam karbon yüzdesi dökme demirdeki kimyasal analizlerde verilmektedir. Her iki bulunuş şekli ayrı ayrı tayin edilebildiğinden karbonun grafitleşme derecesi denklem 2.2'de verilmiştir.

$$\%Toplam\ karbon = \%Grafit\ halindeki\ karbon + \%Bileşik\ halindeki\ karbon \quad (2.2)$$

%0.05-0.80 bileşik karbon varsa bu gri dökme demirin mikroyapısı büyük ölçüde perlitiktir. Gri dökme demir %2 civarlarında Si içerdiğinde, perlit %0.60 bileşik karbon içeren ötektoid östenitten oluşmaktadır. Bu nedenle yukarıdaki denklem grafitleşme derecesi için gri dökme demirde kimyasal bir kriterdir. Katılaşmada yeterli grafitleşmenin olabilmesi için gri dökme demirde toplam karbon yüzdesinin belli bir minimum değerde olması gereklidir. Bu değer, alaşımın yüzde silisyum içeriğine bağlı olarak en az %2.20'si karbondur. %2.20 C'ye kadar karbon elementi dökme demir morfolojisinde bileşik halinde bulunabilir, ancak grafit olarak çökelmesinin düşünülme nedeni bu değerden sonra doygunluğa ulaşmasından kaynaklıdır. (Akgül, 2018).

### 2.6.2. Silisyum (Si)

Gri dökme demirde silisyumun etkisi büyüktür. Gri dökme demirler %1-3.50 arasında silisyum içerir ve en büyük etkisi grafitleşme üzerinedir. Artan silisyum %'si demir-karbon denge diyagramındaki ötektik noktasını sola doğru kaydırır. Grafitleşmeyi silisyum teşvik eder. Düşük silisyum seviyeleri katılaşma sırasında grafitleşmeyi sağlamak için yeterli değildir. Ancak yüksek sıcaklıkta ısıl işlemle grafitleşmeyi ve katı halde çekirdek oluşumunu sağlar. Silisyum ve daha az oranda bakır, fosfor ve nikel katılaşma sürecini yavaşlatır ve kararlı bir sistem oluşumuna yardımcı olur. Öte yandan krom, manganez ve diğer karbür oluşturan elementler (ince kesitlerde) katılaşmayı hızlandırır ve yarı kararlı bir sistemin oluşumuna yardımcı olurlar. Yarı kararlı veya kararlı dökme demirin yapısındaki fosfor, silisyum ve karbon gibi alaşım elementlerinin

bileşimindeki değişiklikler ötektik bileşim, katılaşma ve sıvılaşma sıcaklığı gibi parametreleri ve dolayısıyla da mekanik özellikleri etkiler (Şen, 2018).

### 2.6.3. Kükürt (S)

Grafitleşmeyi sınırlamaktadır. Magnezyum ile birleşip magnezyumun küreselleştirici özelliğini engellemesine sebep olduğu için magnezyum işleminden önce yapı içerisinde maksimum %0.02 oranında olması istenilmektedir (Pehlivan, 2017).

### 2.6.4. Mangan (Mn)

Manganez, karbon elementinin grafit hâlinde ayrışmasına engel olmaktadır. Bileşimde yaklaşık olarak %0.4 ile %1 arasında bulunmaktadır. Eğer %2'lik dilimden çok olursa grafitleştirme olayını geciktirmektedir. Dökme demire sertlik özelliğini veren elementtir. Bu element, mangan sülfür halinde birleşmektedir. Ayrıca kükürt elementinin kötü etkilerini de önlemektedir (Köse, 2022).

### 2.6.5. Fosfor (P)

Fosfor elementi erimiş metalin akışkanlığını artırır ve katılaşma aralığını genişletir. Fazla konulan fosfor elementi demir ile bileşik ($Fe_3P$) oluşturmaktadır. Bu yapı sementit ve östenit ile üçlü bir faz oluşturarak steadit adı verilen ve kırılgan bir yapıya sahip olan bir faza neden olmaktadır (Baş, 2022).

### 2.6.6. Krom (Cr)

Lamel grafitli dökme demirlere %0.5-1 krom eklendiğinde, kromun perlit üzerindeki dengeleyici etkisi ve yavaş soğutma sırasında serbest ferritin ortadan kaldırılması nedeniyle mekanik özellikler genellikle artar. Kromun bu özelliği gri dökme demirlerin aşınma direncini ve sertliğini artırır. Krom sertlik değerlerini %0.2'ye kadar çok az miktarda yükseltir, ancak çekme mukavemetini artırır (Tan, 2005).

### 2.6.7. Nikel (Ni)

Nikel, dökme demirlerin yapılarında bulunan bir elementtir. Hem perlit hem de grafit yapılar üzerinde inceltici etkisi olan nikel, dökme demirlerin tokluk değerini artırır ve farklı kesitler arasındaki sertlik değeri farklılıklarını ortadan kaldırır (Kurt, 2019).

### 2.6.8. Bakır (Cu)

Sıvı dökme demire bir fırın veya pota içinde %0.5 ile %2.5 oranında ilave edilen bakır çili azaltmakla kalmaz aynı zamanda grafit yapıyı seyreltir ve sıvının akışkanlığını arttırır (Köse, 2022). Bakır alaşımları lamel grafitli dökme demirlerin sertliğini ve çekme mukavemetlerini olumlu yönde arttıran elementlerdir ve ayrıca grafitleştirici etkiye de sahiptirler. Bakır, esas olarak dökme demir yapısının perlitik olarak katılaşmasını sağlamaktadır. Yapıdaki bakır takviyesinin mekanik etkisi, dökme demirdeki Mn, C ve Si oranlarına bağlı olmaktadır. Malzemelerin işlenebilirliğini arttırmak dökme demirdeki bakır elementlerinin en faydalı katkısıdır (Akgül, 2018; Ortakaya, 2023).

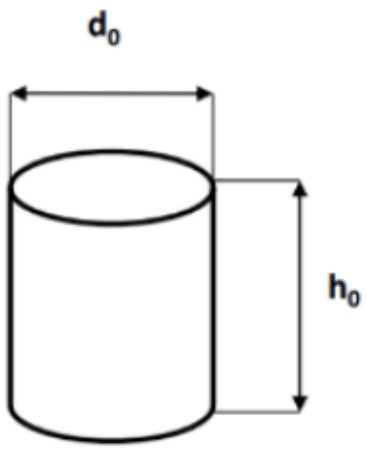
## 2.7. Gri Dökme Demirlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

### 2.7.1. Basma deneyi

Basma test sonuçları, kabul edilebilir bir ürün ile kabul edilemez bir ürün arasında ayrım yapılmasını sağlar. Bir malzemenin basma yükü altındaki davranışını tespit etmek için yapılır. Deneyin yapılışı sırasında akma mukavemeti, basma mukavemeti gibi özelliklerin belirlenmesi için gerilme-birim şekil değişimi diyagramları oluşturulur (Aydemir, 2022).

Malzemeler basma yüküne maruz kaldığında oluşan gerilim durumları, çekme yükü uygulandığında meydana gelen gerilim durumlarıyla benzerlik göstermektedir. Düşük yükseklik değeri kullanılarak burkulmadan kaynaklanan kararsızlık önlenebilir. Kesit alanı ve yükseklik değerlerindeki değişimler basınç dayanımlarını etkilemektedir. Bu nedenle, yüksekliğin kesit alanına oranının daha büyük olması, sıkıştırma mukavemetinin daha düşük olması anlamına gelir (Albayrak, 2019). Yükseklik (ho) ve numune çapı (do) arasındaki oran basma numunelerinde önemli olan bir özelliktir. ho/do oranı çok yüksek olması durumunda deney numunesi deney esnasında bükülebilir. Bu durum gerilmenin deney numunesi üzerinde homojen bir şekilde dağılmamasına neden olur ve böylece yanlış sonuçlar elde edilebilir. Bundan dolayı basma numunelerinde (ho/do)<10 oranı pratikte üst limit sınırı olarak tavsiye edilmektedir. (ho/do)>1.5 oranın da ise basma numunelerinde yüksekliğin çapa göre çok kısa olması istenmediği için alt limit sınırı olarak tavsiye edilmektedir. Metalik malzemelerde basma deneyleri için

çoğunlukla ho/do=2 oranı kullanılır (Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2009). Şekil 2.7'de basma testi numune görünümü gösterilmiştir.

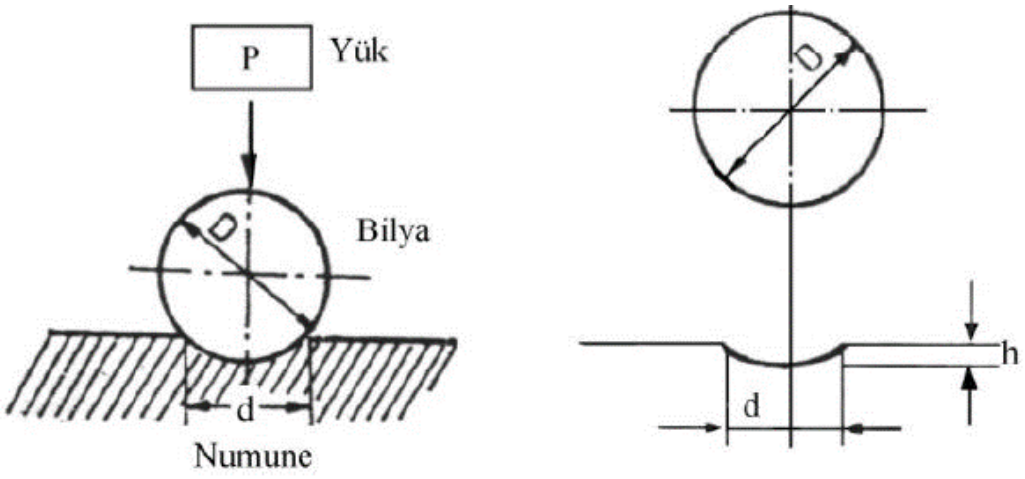



**Şekil 2.7.** Basma testi numunesi

### 2.7.2. Sertlik deneyi

Sertlik, gri dökme demirin kimyasal bileşimine bağlıdır. Gri dökme demirin sertliği, hızlı soğutma sırasında artar. Daha hızlı veya daha yavaş soğutma, dökümün kesit kalınlığına bağlıdır. Kesit kalınlığını kontrol ederek gri dökme demirin sertliğini kontrol edilebilir. Normal gri dökme demirin sertliği 120 ila 200 Brinelldir. Alaşımlı gri dökme demirin sertliği 600 Brinell'dir (Köse, 2022). Kullanılacak standart test yöntemi belirlendikten sonra uygun batıcı uç deney numunesinin yüzeyine batırılır ve deney numunesinin direnci ölçülerek belirlenir. Sertlik testlerinin sonuçları çelik malzemelerde çekme mukavemeti sonuçları ile doğru orantılı sonuçlar vermektedir (Babuçoğlu, 2021).

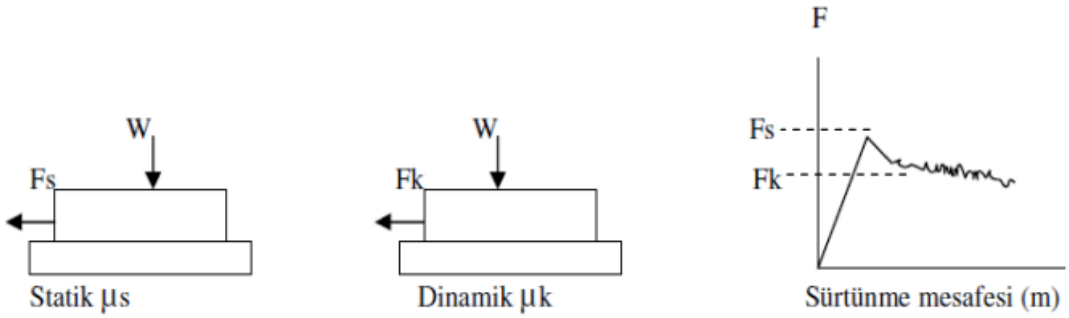
Brinell sertlik ölçümünde deney numunesinin yüzeyine sert malzemeden üretilmiş standart çapta bir bilye belirli bir süre, belirli bir yük altında uygulanır. Daha sonra oluşan bu izin çapı ölçülerek belirlenir. Bu sertlik testleri 10-15 saniye süre aralığında 3000 kg yük değerinde 10 mm çaptaki standart bilye ile gerçekleştirilir. Bilyenin çapı 5 mm olduğunda ise, 30 saniyelik bir süre için 500 kg'lık bir yük uygulanmaktadır. Şekil 2.8'de brinell sertlik deneyinin prensip şeması görülmektedir (Akgül, 2018; Ortakaya, 2023).




**Şekil 2.8.** Brinell sertlik deneyinin prensip şeması

### 2.8. Sürtünme Teorisi

Sürtünme, birbirleri üzerinde hareket eden ve birbiriyle temas eden yüzeylerin veya hareket etme olasılığına karşı gösterdikleri dirençtir. Sürtünme, birbirine göre hareket eden iki malzeme arasında kinetik enerjinin sürekli olarak azalma göstermesidir. Aşınma, katı bir cismin sürtünen yüzeylerini çeşitli şekillerde etkileyen sürekli malzeme kaybının oluşması durumudur. Statik ve dinamik yükleme koşulları altındaki sürtünme mesafeleri Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Sürtünme katsayısı denklem 2.3'te verilmiştir (Ayday, 2013).




**Şekil 2. 9. S**tatik ve dinamik yükleme durumlarında sürtünme mesafesi

$$\mu = \frac{F}{W} \tag{2.3}$$

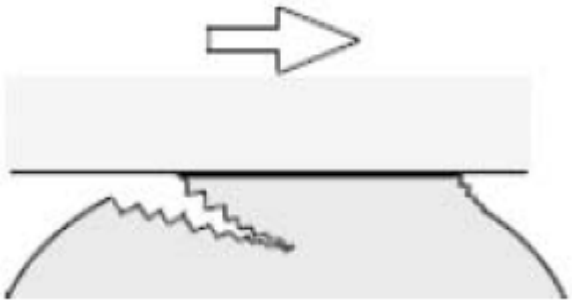
Bu denklem: $\mu$, sürtünme katsayısı; $F$, Sürtünme kuvveti; $W$, normal kuvvet içerir. Sertlik ve aşınma direncinin gerekli olduğu birçok yerde beyaz dökme demir gri dökme demire tercih edilir. Gri dökme demir kullanılan alanlar ise basıncın yüksek ve aşınmanın

az olduğu alanlardır (Köse, 2022). Karbon miktarıyla, aşınma direnci ve sertlik orantılıdır (Tan, 2005). Yapılan çalışmalarda aşınma oranının düşük değerlerde olması parçalanmaya karşı direncin yüksek olduğu anlamına gelmektedir (Öztürk, 2023).

## 2.9. Aşınma Mekanizmaları

### 2.9.1. Adhesiv aşınma

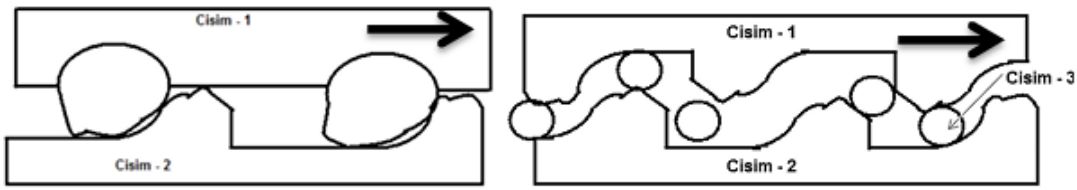
Adhesif aşınma, yapışma ve kayma aşınması olarak bilinir. Yüzeyleri düzgün olan iki katı cisim yağlı veya yağsız bir ortamda kayarak temas etmesinden kaynaklanır. Adhezyon, ara yüzdeki pürüzlülüğün temasından kaynaklanır ve bu temas noktaları kayma ile kesilir. Ancak bir yüzeyden kopan parçalar birlikte çalışan diğer katı yüzeye yapışabilir. Kayma devam ederse, diğer yüzeye yapışan parçalar tekrar orijinal yüzeye yapışabilir veya her iki katı yüzeyden bağımsız aşınma parçacıkları olabilir. Yüzey ne kadar hassas işlenmiş olursa olsun, gerçek temas alanı her zaman görünen temas alanından daha küçüktür. Birbiriyle temas halindeki malzemelere yük uygulandığında, temas noktalarında aşırı gerilmeler oluşur. Akma noktası aşılırsa, küçük kaynak bağları meydana gelir. Sıcaklık ve yük kaynak bağlarının oluşmasını hızlandırır. Temas eden malzemelerde birbirine yapışma veya kaynak olma durumu oluşursa bu bağlantı hareket sırasında kopar ve temas noktalarında bir kırılma meydana gelir. Kırılma durumu yani kopma işlemi daha zayıf metalde meydana gelmektedir. Adhesiv aşınma görseli Şekil 2.10'da verilmiştir (Karabaşoğlu, 2008).



**Şekil 2.10.** Adhesiv aşınma

### 2.9.2. Abrasiv aşınma

Abrasiv aşınma, sert ve pürüzlü bir yüzey, daha yumuşak bir yüzey üzerinde kaydığında, yumuşak yüzeyi oyduğunda ve bir grup oluk açtığında ortaya çıkar (Kökden, 1998). Yüzeylerdeki sert parçacıkların neden olduğu aşınma türüne abrasiv aşınma denilir. Aşınmaya neden olan parçacıklar sürtünme yüzeylerinin arasına dış ortamdan girebilir veya sürtünme yüzeylerinden koparak ayrılan parçacıklar da olabilir. Bunlardan yalnızca sürtünen iki yüzey arasında oluşan abrasiv aşınma türü iki cisimli abrasiv aşınma modeli olarak adlandırılırken, iki cisim arasına giren sert partiküllerin sebep olduğu aşınma türü üç cisimli abrasiv aşınma modeli olarak adlandırılır. Abrasiv aşınma tüm aşınma maliyetinin yaklaşık %63'ünü oluşturur. Abrasiv aşınma, aşındırıcının temel malzemeye eşit veya daha sert olduğu ve sert parçacıkların veya sert çıkıntıların katı bir yüzey üzerindeki hareketi ve direncinden kaynaklandığı durumlarda meydana gelir. Abrasiv aşınma modelleri Şekil 2.11'de gösterilmiştir (Özkader, 2015).




a) b)

**Şekil 2.11.** Abrasiv aşınma modelleri a) İki cisimli aşınma tipi b) Üç cisimli aşınma tipi

### 2.9.3. Korozif aşınma

Korozif aşınmanın meydana gelmesi için korozif ve sürtünme faktörlerinin bir arada bulunması gerekir. Önce temas eden yüzeyler bulundukları çevre ile reaksiyona girerek bir korozyon tabakası oluşturur. Ardından da bu tabaka temas noktalarında çatlar ve aşınma meydana gelir. Korozif aşınma esnasında meydana gelen tabakalar malzeme yüzeylerinde ara bir tabaka oluşturduğundan, bu durum adhezif aşınmasını azaltma etkisine sahiptir, ancak partiküller malzeme yüzeyinden koparak aşınmayı artırır (Özkader, 2015).

Malzeme yüzeylerinin hava ile teması sonucu meydana gelen oksit tabakası (yüzey tabakası) aşınmayı azaltmasına rağmen, tribo-oksidasyon nedeniyle yüzey tabakasının özelliklerinin değişmesi aşınmayı hızlandırmaktadır. Yağ ve benzeri gibi kimyasal maddelerin bulunduğu ortamlarda çalıştırılan makine parçaları için yüzeyde

oluşmuş olan yüzey tabakasının bir kısmı oluşan tribolojik zorlanmalarla kırılması sonucu aşınmayı artıran aşındırıcı partiküller oluşur. Tribo-oksidasyon aşınması metalik malzemelerin yüzeylerinde daha sıklıkla görülür. Malzemelerin yüzeylerinde çatlaklar oluşarak parçacıkların katı yüzeylerden ayrılmasına, oyukların ve çukurların oluşmasına sebep olur (Döngel, 2008; Ortakaya, 2023).

# 3. MATERYAL VE YÖNTEM

## 3.1. Dökme Demir Malzemelerin Üretimi

Bu çalışmadaki test numuneleri, dökümhane üretim koşullarında Hema Otomotiv Döküm Fabrikası'nda üretilmiştir. Çeşitli oranlarda tantalyum karbür (TaC) ile takviye edilmiş dökümlerin üretimlerinde kum kalıp döküm prosesi kullanılmıştır. Dökümler, son döküm pota sıcaklığı 1375 °C'de yapılmıştır. Üretilmiş olan lamel grafitli bu dökme demirlerden standartlara uygun olarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu deney numunelerinin sertliği, basma dayanımı, aşınma analizleri ve mikro yapısı incelenmiştir. Lamel grafitli (gri) dökme demirler ASTM A 48 tanımına göre sınıflandırılır (Yenice, 2002). Takviyesiz referans numunesi ağırlıkça %0 TaC (örnek: K), ağırlıkça %0.025 TaC (örnek: A), ağırlıkça %0.155 TaC (örnek: B), ağırlıkça %0.285 TaC (örnek: C) dört farklı takviye oranı ile üretim yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelerin kimyasal bileşimleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.1.** Numunelerin kimyasal bileşimleri (%)

| No | C | Si | Mn | P | S | Cr | Cu | Al | Ti | TaC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| K | 3.30 | 2.70 | 0.63 | 0.016 | 0.080 | 0.28 | 0.12 | 0.001 | 0.025 | - |
| A | 3.36 | 2.68 | 0.68 | 0.006 | 0.067 | 0.28 | 0.08 | 0.001 | 0.033 | 0.025 |
| B | 3.38 | 2.70 | 0.64 | 0.017 | 0.083 | 0.28 | 0.12 | 0.001 | 0.033 | 0.155 |
| C | 3.23 | 2.71 | 0.63 | 0.016 | 0.086 | 0.28 | 0.12 | 0.001 | 0.025 | 0.285 |

Deney dökümlerinin üretimi sırasında döküm ağırlığının %0.3'ü oranında aşılayıcı ilavesi yapılmıştır. Aşılayıcının kimyasal bileşimi Tablo 3.2'de verilmiştir.

**Tablo 3.2.** Aşılayıcının kimyasal bileşimi

| | % Si | % Al | % Ca | % Sr |
|---|---|---|---|---|
| Min-Max | 73.0-78.0 | 0.50 max | 0.100 max | 0.80-1.40 |
| Numune Dökümler | 75.0 | 0.32 | 0.020 | 1.06 |

TaC takviye malzemesi oldukça sert, gevrek ve metal gibi elektrik iletkenliğine sahiptirler (Altuncu ve Esen, 2015). Bu çalışmada kullanılan TaC'ün mekanik özellikleri Tablo 3.3'te gösterilmiştir (Nanografi, 2024).

**Tablo 3.3.** TaC'ün Teknik özellikleri

| | |
|---|---|
| Saflık | % 99.9 |
| Parçacık boyutu | 3 µm |
| Erime Noktası | 3880 °C |
| Kaynama Noktası | 5500 °C |
| Yoğunluk | 13.9 g/cm³ |
| Form | Toz |
| Mohs sertlik @ 20ºC | 1800 kg/mm$^2$ |
| Elektrik direnci | 30 microhm-cm |
| Kristal yapısı | Kübik |

## 3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Döküm işleminin ardından, lamel grafitli dökme demir numuneleri oda sıcaklığında kum kalıptan çıkarılmıştır. Kum kalıptan çıkarılan dökümlerden standartlara uygun olarak sertlik testleri için farklı oranlarda TaC takviyeli (örnek: A, örnek: B, örnek: C ve örnek: K (takviyesiz referans numunesi)) deney numuneleri hazırlanmıştır. Sertlik testleri için 30mm x 30mm x 50mm boyutlarında deney numuneleri hazırlanmıştır. Deney numunelerinin yüzeylerinin farklı kısımlarından en az 5 nokta olacak şekilde ölçümler alınmıştır. Alınan bu ölçüm değerlerinin ortalaması alınarak ortalama sertlik değerleri tespit edilmiştir. Şekil 3.1'de hazırlanan sertlik testi numunelerinden A Numunesi gösterilmiştir.

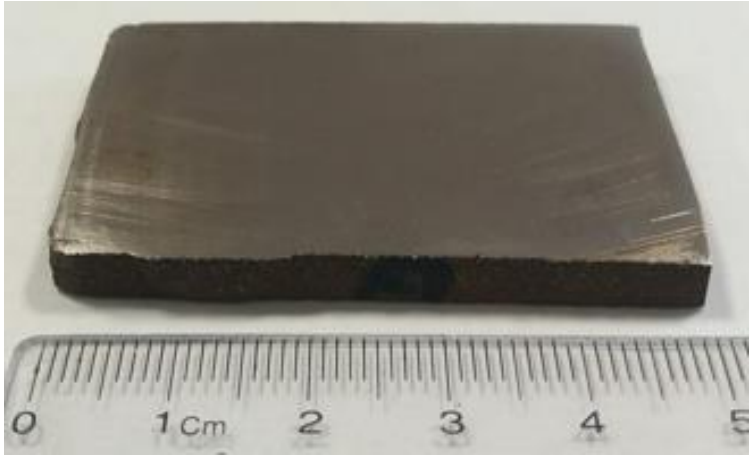
**Şekil 3. 1.** Sertlik testi A numunesi

Lamel grafitli dökme demirler ötektik bileşime yakın olan alaşımlardır. Bundan dolayı da akışkanlık özellikleri oldukça iyidir. Bu sebeple ince kesitli parçaların dökümü

gerçekleşebilmektedir. Lamel grafitli (gri) dökme demirlerin basma dayanım değeri, çekme dayanım değerinin yaklaşık 3-5 katı katıdır. Lamel grafitli dökme demirlerde, yüksek basma dayanımı önemli özelliklerinden biridir. Lamel grafitli dökme demirlerde sertlik ölçüm değerleri, çekme dayanım değerleri ile paralellik göstermektedir (Kurt, 2019). Bu çalışmada, farklı oranlarda TaC takviye edilmiş (örnek: A, örnek: B, örnek: C ve örnek: K) deney numunelerinin her bir takviye oranından 3'er numune olacak şekilde Ø12 mm x 19.2 mm boyutlarında 12 adet basma deney numunesi hazırlanmıştır. Yapılan bu çalışmada basma deney numunelerinde (ho/do) 1.6 oranı kullanılmıştır. Şekil 3.2'de hazırlanan basma testi numunelerinden C Numunesi gösterilmiştir.

**Şekil 3.2.** Basma testi C numunesi

Aşınma testleri için farklı oranlarda TaC takviye edilmiş (örnek: A, örnek: B, örnek: C ve örnek: K) deney numunelerinin her birinden 5mm x 30mm x 50mm ölçülerinde numuneler hazırlanmıştır. Şekil 3.3'te aşınma deneyi uygulanacak bir deney numunesi gösterilmiştir.




**Şekil 3.3.** Aşınma deney numunesi

### 3.3. Metalografi İşlemleri İçin Numunelerin Hazırlanması

Boyutları 15 mm x 15 mm x 15 mm olan Metalografik çalışmalar için kesme işlemi yapılmıştır. Farklı oranlarda TaC takviye edilmiş (örnek: A, örnek: B, örnek: C ve örnek: K) döküm malzemeden mikroyapı analizi için numune hazırlanmıştır. Şekil 3.4'te Metcon Metacut 250 hassas kesicinin görseli verilmiştir.

**Şekil 3.4.** Hassas kesme cihazı

Bakalite alma işlemi kesme işleminin ardından yapılmıştır. Bir sonraki işlemlerde kolaylık sağlaması amacıyla bakalite alınma uygulaması Metkon EcoPress 50 cihazıyla yapılmıştır. Şekil 3.5'te bakalite alma cihazı gösterilmiştir.

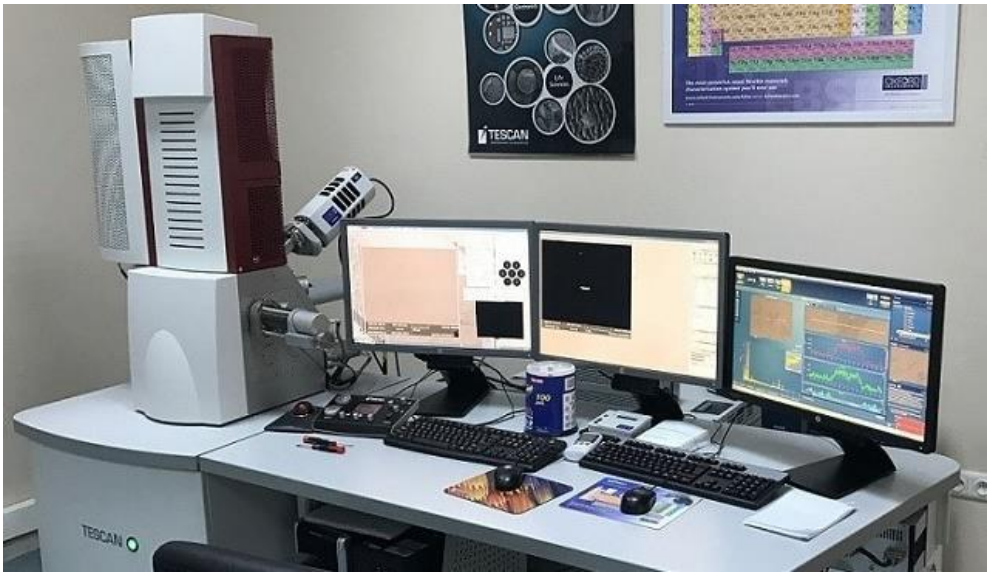
**Şekil 3.5.** Bakalite alma cihazı

Bakalite alma işlemi tamamlandıktan sonra hazırlanan numunelerin yüzeyleri mikroyapı analizi için zımparalanmış ve parlatılmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemi mikroyapı analizi yapılacak olan deney numunesinin üzerindeki çizik ve benzeri görüntü almayı etkileyecek unsurları gidermek için yapılmaktadır. Bu zımparalama ve parlatma işlemi Metkon Forcipol 2V cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6'da zımparalama ve parlatma cihazının görseli verilmiştir.

**Şekil 3.6.** Zımparalama ve parlatma cihazı

### 3.4. Deneylerin Yapılışı

Metalografik incelemeler için hazırlanmış olan deney numuneleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, aşınma deneylerinden sonra meydana gelen aşınma izleri TESCAN MAIA3 XMU marka SEM cihazı kullanılarak görüntülenmiştir. SEM cihazının görseli Şekil 3.7'de verilmiştir.

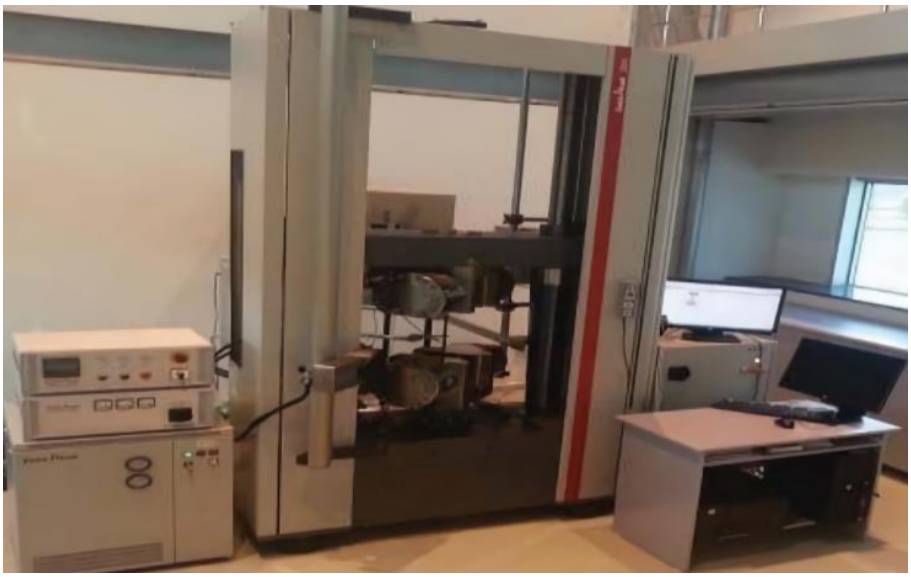



**Şekil 3.7.** SEM cihazı

Brinell sertlik ölçüm yöntemi, diğer sertlik ölçüm yöntemlerine kıyasla ölçülen malzemenin yüzeyinde daha derin ve geniş izler bırakmasından dolayı tercih edilir (Ortakaya, 2023). Bu da sertlik deney numunelerinin yüzeyinde daha geniş bir alanın sertlik değerlerinin ölçüldüğü anlamına gelmektedir. Sertlik deneyleri Şekil 3.8'de gösterilen Ernst AT250 Brinell sertlik deney cihazıyla yapılmıştır. Sertlik ölçüm sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için aynı ölçüm koşulları kullanılmıştır. Sertlik değeri farklı noktalardan ve bu noktalarında birbirlerinden uzak olmalarına dikkat edilerek her deney numunesi için 5 adet ölçüm alınmıştır.

**Şekil 3.8.** Sertlik ölçüm cihazı

Bu çalışmada, basma deneyleri Şekil 3.9'da gösterilen Zwick Roell Z600 üniversal test cihazı kullanılarak ho/do=1.6 oranda gerçekleştirilmiştir. Basma deney sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için numunelerin deney koşulları aynı olacak şekilde hazırlanmıştır. Basma deneyi ile çekme deneyi birbirinin tersidir. Gevrek malzemeler genelde basma yüklerine maruz kalınan yerlerde kullanıldığı için bu malzemelere basma deneyleri uygulanır. Gri dökme demirden üretilmiş yatak alaşımları gibi malzemelerin çekme mukavemetleri basma mukavemetlerinden daha düşük olduğu için, üzerine yük gelen bu tür malzemelere basma deneyleri uygulanır (Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2009). Gri dökme demirlerin basma mukavemetleri iyidir (Öztürk, 2023).



**Şekil 3.9.** Basma test cihazı

Aşınma testleri karşıt hareketli Tribotech aşınma deney cihazı (Şekil 3.10) ile kuru ortam koşullarında ve normal atmosferik şartlarda yapılmıştır. 6 mm çapında aşındırıcı alümina bilye ile deney malzemesinin yüzeyi aşınma deneyine maruz bırakılmıştır. 1N, 3N ve 5N'luk yüklerde, 10 mm/s kayma hızında ve 5 mm kayma uzunluğunda, 50 m toplam kayma mesafesinde aşınma deneyi yapılmıştır. Sürtünme katsayısı değerleri tüm deney numuneleri için deneylerin yapılışı esnasında kaydedilmiştir. Aşınma deneylerinin ardından, deney numunelerinin üzerinde oluşan aşınma izleri yüzey profilometresi (Veeco Dektak 6M) ve SEM cihazı tarafından incelenmiştir (Tazegul, vd., 2014; Bilim, B., 2021).

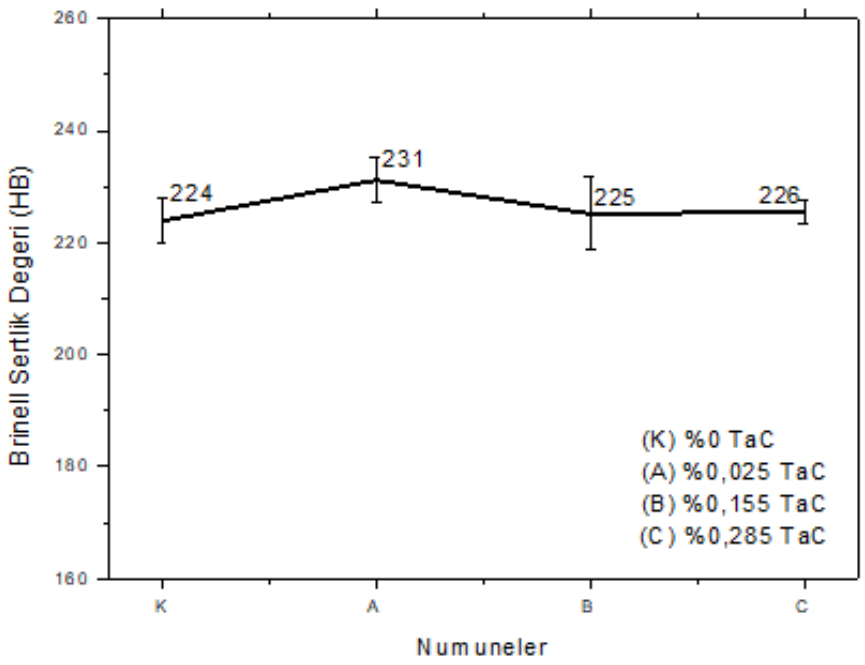
**Şekil 3.10.** Aşınma deney cihazı

# 4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

## 4.1. Sertlik Deneyleri

Dökme demirlerin mekanik özellikleri grafit boyutuna, dağılımına, şekline ve miktarına bağlı olmakla birlikte matris yapının perlit, ferrit oluşuna da bağlı olarak değişmektedir. Grafit morfolojisindeki düzenli dağılım ve matristeki perlit oranının artışı, malzemenin sertliğini arttırdığını göstermektedir (Akgül, 2018). Dökme demir çok çeşitli mekanik/fiziksel özelliklere sahiptir. Dökme demirin sertlik değerleri 120-300 HB aralığında değişmektedir (Şen, 2018; Ortakaya, 2023). Akgül (2018) yaptığı çalışmada takviyesiz gri dökme demirin brinell sertlik değerini 145 HB olarak tespit etmiştir. Çalık vd. (2022) savurma ve kum kalıba döküm yöntemi kullanılarak üretilmiş olan GG-25 dökme demirin brinell sertlik değerini ölçmüşlerdir. Yapılan ölçümler sonucunda kum kalıba döküm yöntemi ile üretilmiş numunelerin dış yüzey sertlik ölçüm değerlerinin ortalamasını 212 HB olarak belirlemişler, savurma döküm yöntemi ile üretilmiş numunelerin dış yüzey sertlik ölçüm değerlerinin ortalamasını 255 HB olarak ölçmüşlerdir.

Çalışmada literatüre uygun olarak sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri alınarak sonuçlar gri dökme demir üzerine daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılmış ve uyumlu bulunmuştur. Sertlik ölçümlerinde en düşük ölçülen 224 HB ortalama değeri ile K (takviyesiz) deney numunesinde tespit edilmiştir. Sertlik değerleri A numunesinde takviye oranı arttığı için beklentiye uygun olarak artış göstererek ortalama 231 HB olmuştur. B numunesinde takviye oranı artmasına rağmen takviyesiz olan K numunesinden yüksek, fakat daha düşük takviyeli olan A numunesinden daha düşük sertlik değeri (ortalama 225 HB) tespit edilmiştir. Perlitik yapı malzemenin sertliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğundan, mikroyapı içerisindeki perlitik yapı ne kadar fazla ise malzemenin sertliği de kadar yüksek olmaktadır (Şen, 2018). C numunesinde tekrar artış görülerek ortalama sertlik değeri 226 HB olarak bulunmuştur. Sertlik test sonuçları incelendiğinde en yüksek sertlik değeri ortalaması, A numunesinde gözlemlenmiştir. Takviye oranlarının bir fonksiyonu olarak numunelerin Brinell sertlik değerleri Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



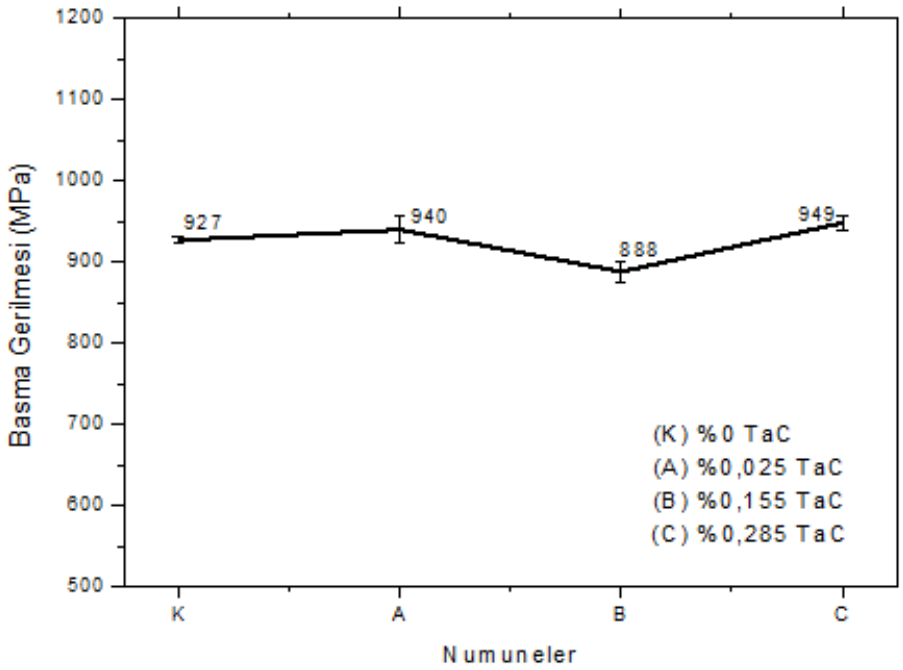

**Şekil 4. 1.** Brinell sertlik deneyi ölçüm değerleri

### 4.2. Basma Deneyleri

Basma deneyleri, genelde basma mukavemetleri, çekme mukavemetlerinden daha yüksek değerde olan gevrek malzemelere (yatak alaşımları gibi metalik malzemeler) uygulanır (Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2009). Lamel grafitli dökme demirlerin basma mukavemetleri belirlenirken, çekme mukavemet değerleri dikkate alınmaktadır. Lamel grafitli (gri) dökme demirlerin çekme mukavemeti 100-350 MPa'dır (Zhycasting, 2024). Lamel grafitli dökme demirlerin basma dayanım değeri, çekme dayanım değerinin yaklaşık 3-5 katıdır (Kurt, 2019). Bundan dolayı literatürde belirtildiği üzere basma mukavemet değer aralığı çekme mukavemet değerlerinin (100-350 MPa) üç katı alındığında 300-1050 MPa dır.

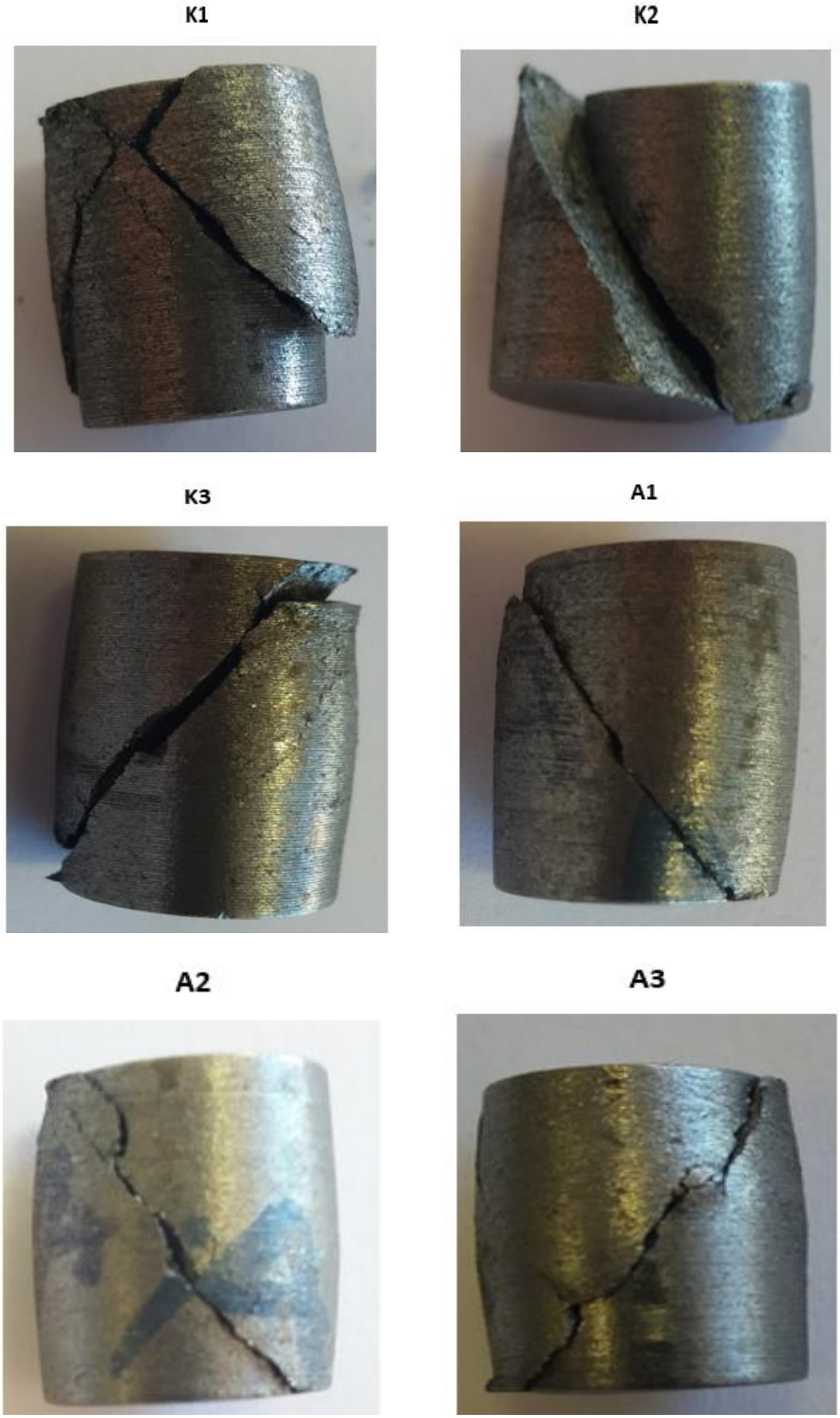
Basma deney numunelerini karşılaştırmak için tüm deneyler aynı koşullarda yapılmıştır. Basma deney sonuçları literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında, bulunan sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Basma deneylerinde, K (takviyesiz referans numunesi) deney numunesinin ortalama basma gerilmesi 927 MPa olarak belirlenmiştir. A numunesi için ortalama basma gerilmesi 940 MPa bulunmuş ve artan takviye oranı ile basma gerilmesinin takviyesiz K referans numunesine göre arttığı gözlemlenmiştir. B numunesinde ise takviye oranın artmasına rağmen düşüş (ortalama 888 MPa) görülmüştür. Mikroyapıdaki perlitik yapı ve döküm içerisindeki lamellerin

gerilme altında öngörülemeyen çentik etkisi oluşturması sebebiyle dayanım değerlerinin azaldığı düşünülmektedir (Şen, 2018; Akgül, 2018). C numunesinde ise beklentilere uygun olarak basma gerilmesi ortalaması artış göstererek 949 MPa olarak belirlenmiştir. En yüksek basma gerilmesi ortalaması, en yüksek takviye oranına sahip olan C numunesinde görülmüştür. Şekil 4.2'de takviye oranlarına bağlı olarak numunelerin basma test değerleri gösterilmiştir.

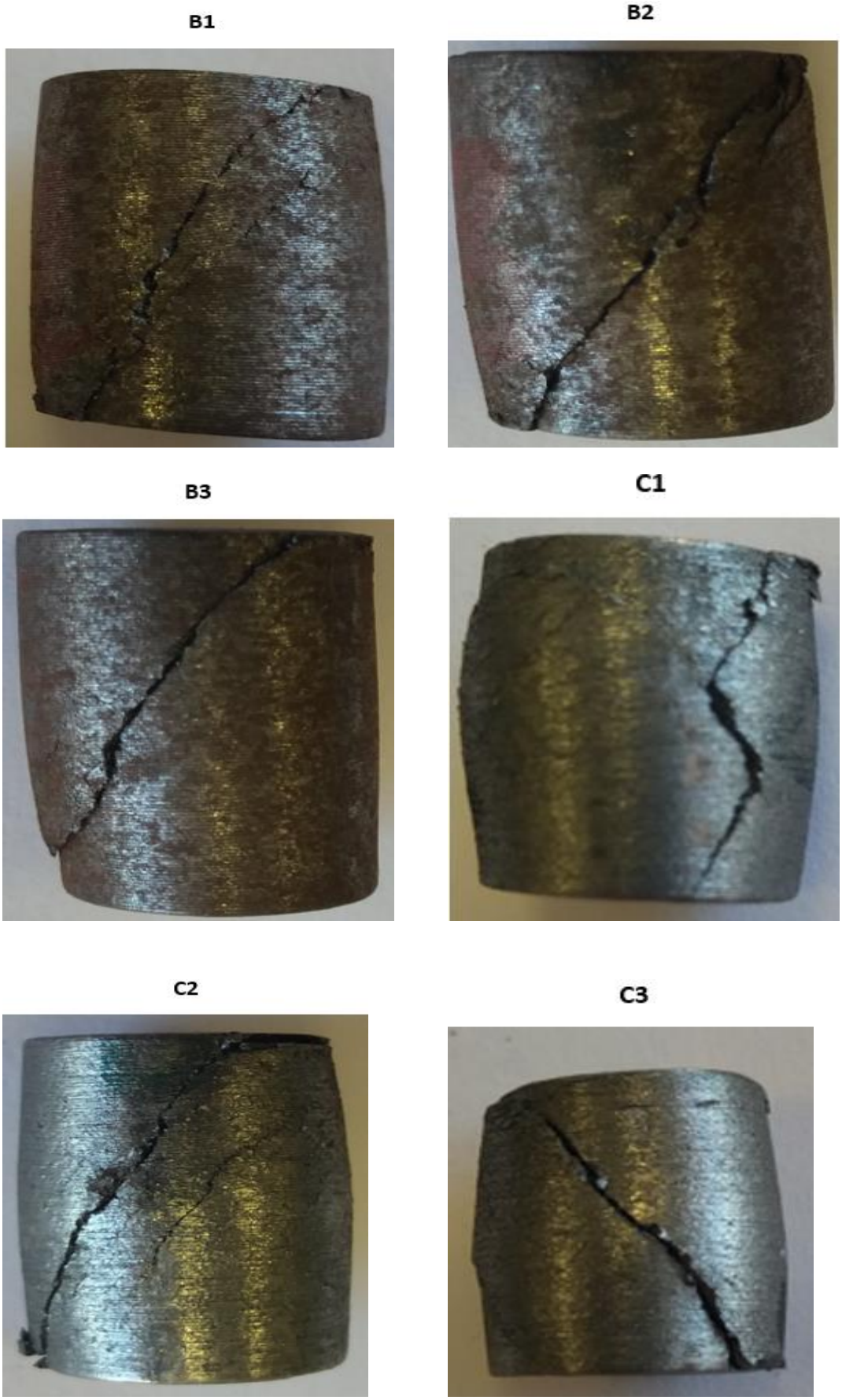



**Şekil 4.2.** Basma testi değerleri

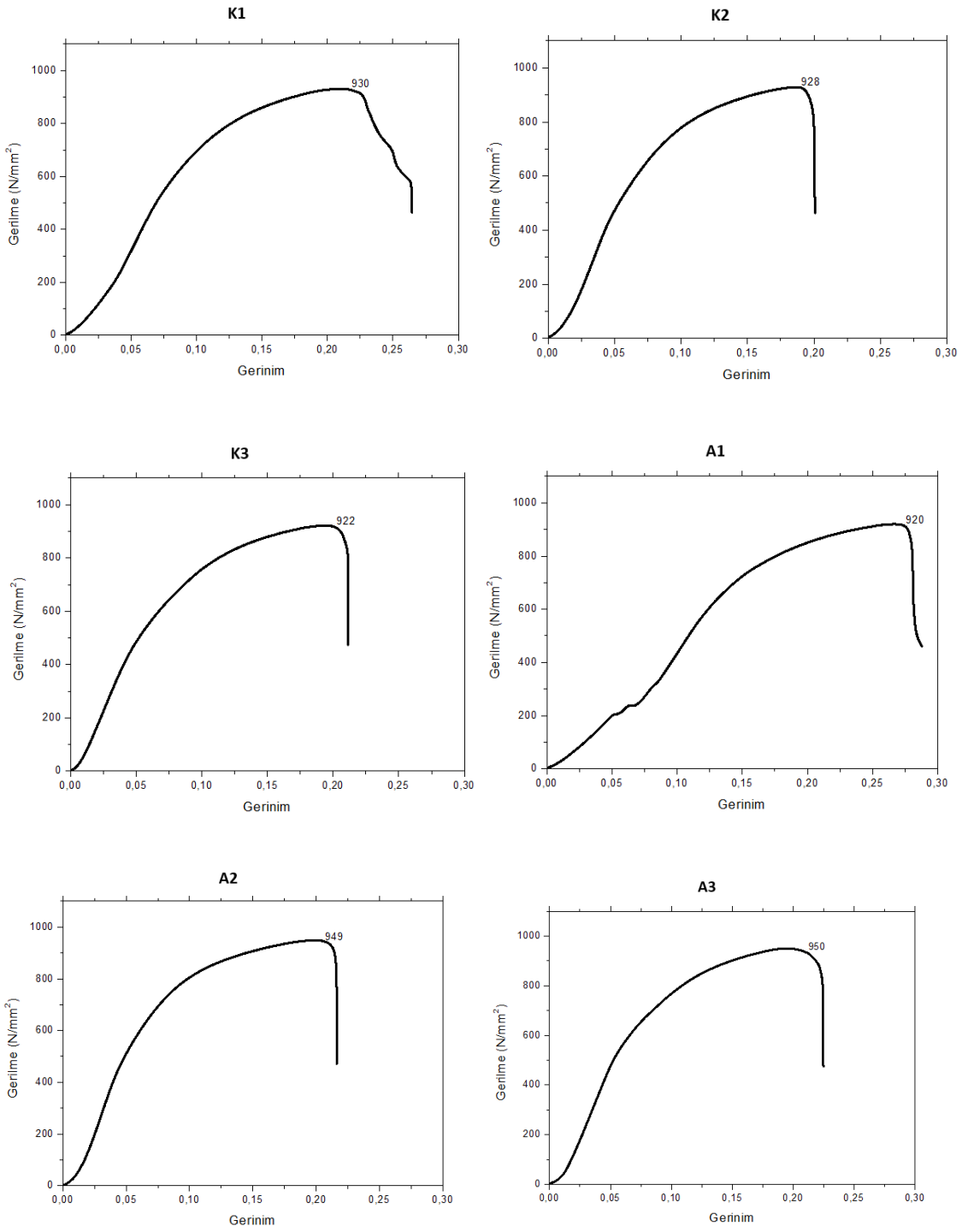
Yapısında bulunan lamel grafitlerden kaynaklı olarak GDD sünek değildir. Yapı içerisinde bu lamel grafitler çentik etkisi oluşturduğu için mukavemet değerleri düşük olmaktadır (Akgül, 2018). Basma testlerinde gerilme-gerinim eğrileri incelendiğinde eğrilerin benzer olduğu ancak kopma noktaları, yüksek gerilme noktaları ve akma noktalarında farklılıklar olduğu anlaşılmıştır. Basma yüklerinde gerilmeler belirli bir değere ulaştığında, iç yapıdaki lamellerin neden olduğu çentik etkisi nedeniyle Şekil 4.3'te görülen basma deneyinde kırılma hasarları meydana gelmiştir. Kırılma hasarları ~45$^{o}$ ile oluşmuştur. Şekil 4.4'te basma deneylerine ait gerilme-gerinim grafikleri verilmiştir.



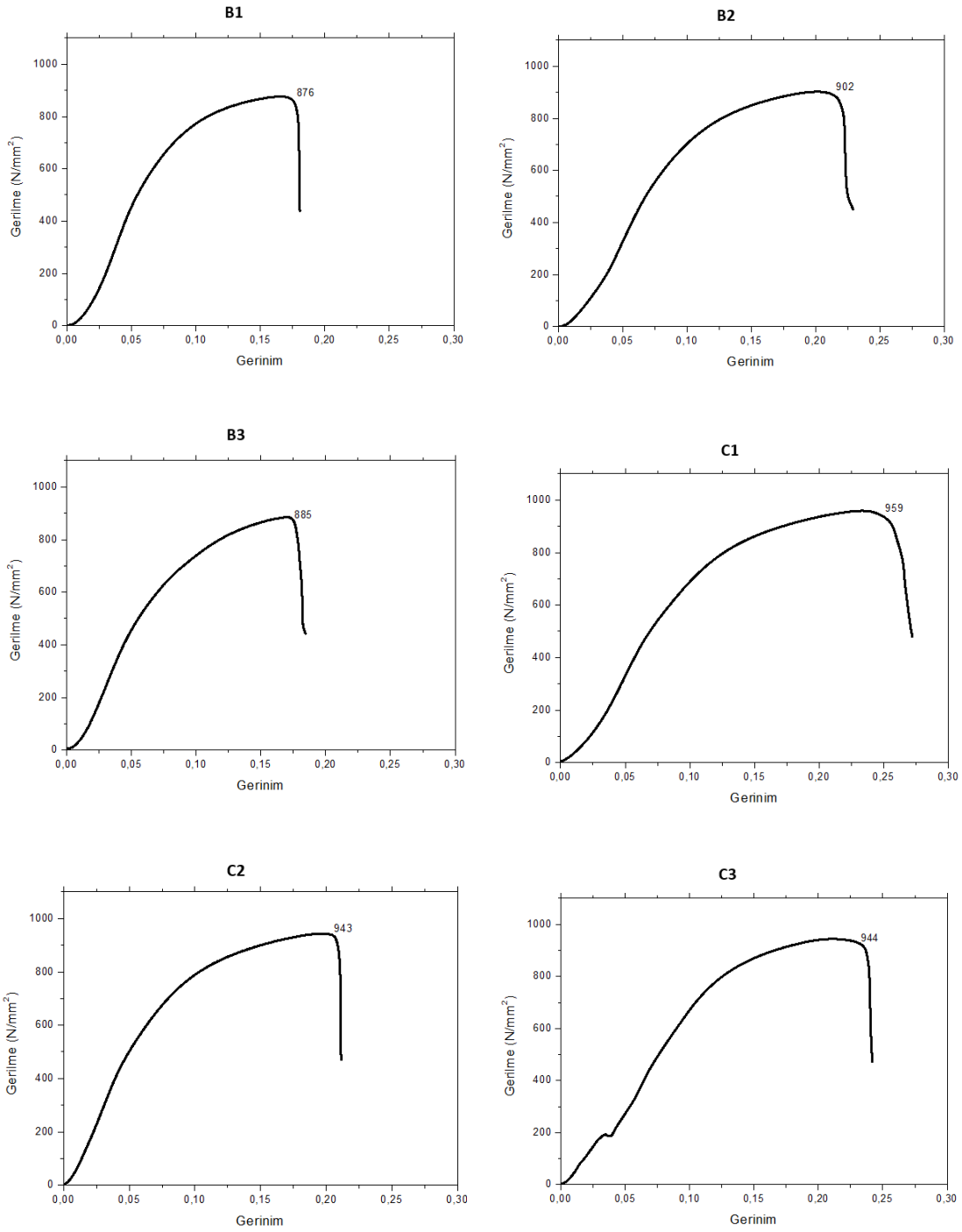

**Şekil 4.3.** Basma deneyi kırılma hasarları




**Şekil 4.3.** Basma deneyi kırılma hasarları (şekillerin devamı)




**Şekil 4.4.** Basma deneyleri gerilme-gerinim grafikleri




**Şekil 4.4.** Basma deneyleri gerilme-gerinim grafikleri (şekillerin devamı)

### 4.3. Aşınma Deneyleri

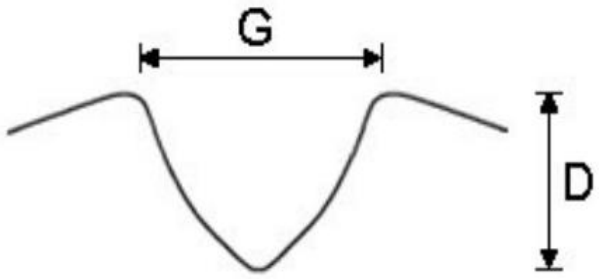
Takviye oranları ve uygulanan yük incelendiğinde, 1N yük değerinde aşınma hacmi $1.2x10^{-3}$ $mm^3$ ile en yüksek A numunesinde görülmüştür. 3N ve 5N için aşınma hacmi incelendiğinde sırasıyla en yüksek $2.9x10^{-3}$ $mm^3$ ve $4.3x10^{-3}$ $mm^3$ olarak C numunesinde görülmüştür. Yük değerlerinin artışı yönünden inceleme yapıldığında, yük değerinin artmasıyla birlikte aşınma hacmi değerlerinde (1N için $0.8\text{-}1.2x10^{-3}$ $mm^3$, 3N için $2.1\text{-}2.9x10^{-3}$ $mm^3$, 5N için artış $3.8\text{-}4.3x10^{-3}$ $mm^3$) artış olduğu görülmüştür. En yüksek aşınma hacmi 5N yük altında $4.3x10^{-3}$ $mm^3$ olarak C numunesinde tespit edilmiştir. En yüksek aşınma oranı ise 1N yük altında $2.3x10^{-5}$ $mm^3/Nm$ olarak A numunesinde tespit edilmiştir. Tablo 4.1'de yapılan çalışmadaki kayma aşınması deney sonuçları gösterilmiştir.

**Tablo 4.1.** Kayma aşınması deney sonuçları

| Numune | Yük (N) | Aşınma Hacmi ($x10^{-3}$ $mm^3$) | Aşınma Oranı ( $x10^{-5}$ $mm^3$ / Nm) | Sürtünme Katsayısı Ortalaması (COF) |
|---|---|---|---|---|
| K (%0 TaC) | 1 | 0.9 | 1.7 | 0.507 |
| A (%0.025 TaC) | 1 | 1.2 | 2.3 | 0.453 |
| B (%0.155 TaC) | 1 | 0.8 | 1.5 | 0.572 |
| C (%0.285 TaC) | 1 | 0.9 | 1.9 | 0.575 |
| K (%0 TaC) | 3 | 2.1 | 1.4 | 0.530 |
| A (%0.025 TaC) | 3 | 2.4 | 1.6 | 0.516 |
| B (%0.155 TaC) | 3 | 2.2 | 1.5 | 0.561 |
| C (%0.285 TaC) | 3 | 2.9 | 1.9 | 0.608 |
| K (%0 TaC) | 5 | 4.2 | 1.7 | 0.508 |
| A (%0.025 TaC) | 5 | 3.8 | 1.5 | 0.475 |
| B (%0.155 TaC) | 5 | 4.0 | 1.6 | 0.548 |
| C (%0.285 TaC) | 5 | 4.3 | 1.7 | 0.555 |

Lamel grafitli dökme demirlerde kayma sürtünmesinin tipi aşınmaya karşı önemli bir direnç oluşturmaktadır. Lamel grafitli (gri) dökme demirler grafit lamellerinin yağlayıcı etkisiyle ve yağın grafit tarafından tutulmasıyla açıklanan iyi derecede aşınma ve yapışma direnci göstermektedirler (Yenice, 2002). Aşınma deneyleri sırasında numunelerin aşınma davranışlarını karşılaştırabilmek için, tüm deney numunelerine aynı deney koşulları uygulanmıştır. Aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma hacmi, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı sonuçları, değişen oranlarda tantalyum karbür takviye edilen deney numuneleri, takviyesiz (referans) kontrol numunesi ile karşılaştırılmıştır.

Numunelerin aşınma oranlarını tespit edebilmek için, deneylerin yapılışı esnasında yüzeyde oluşan aşınma iz derinliği ve genişliği Veeco Dektak 6M modeli yüzey profilometresi yardımıyla belirlenmiştir. Aşınma iz derinliği ve genişliği şematik olarak Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Aşınma izinin genişlik ve derinlik değerleri kullanılarak denklem 4.1 ile önce aşınma hacmi, daha sonra denklem 4.2 ile aşınma oranı hesaplanmıştır.



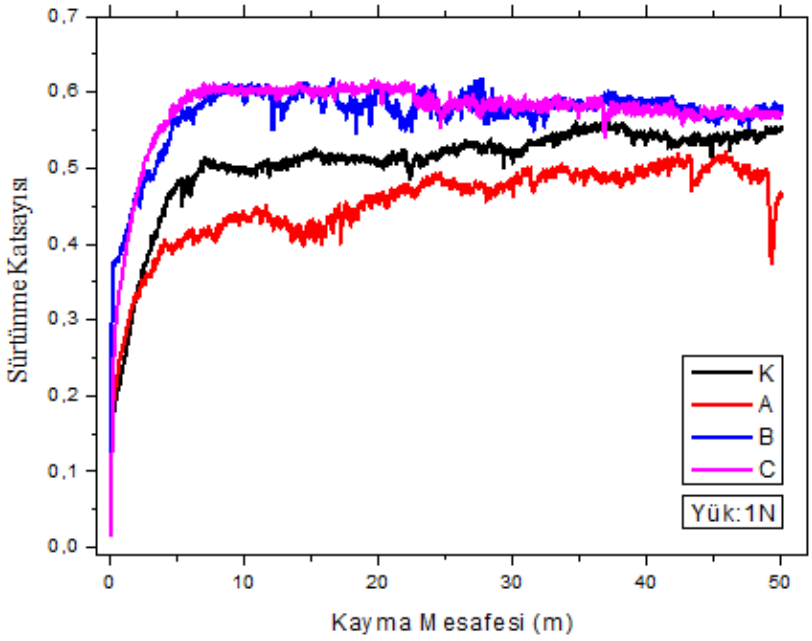

**Şekil 4. 5.** Aşınma iz derinliği ve genişliğinin şematik gösterimi
(Ayday, 2013; Bilim, 2021; Akray, 2007)

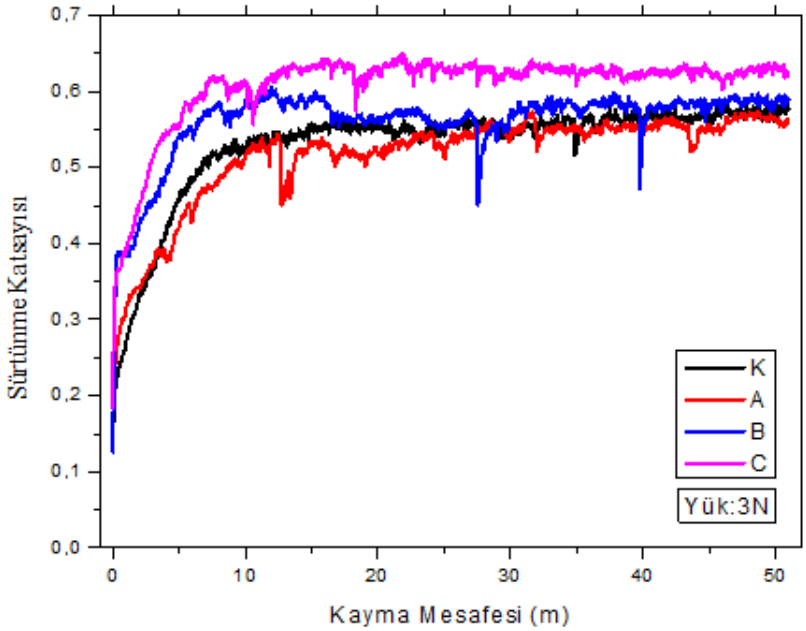
$$V = \frac{\pi}{4} \cdot G \cdot D \cdot \mathrm{L} \tag{4.1}$$

$$W = \frac{V}{F \cdot S} \tag{4.2}$$

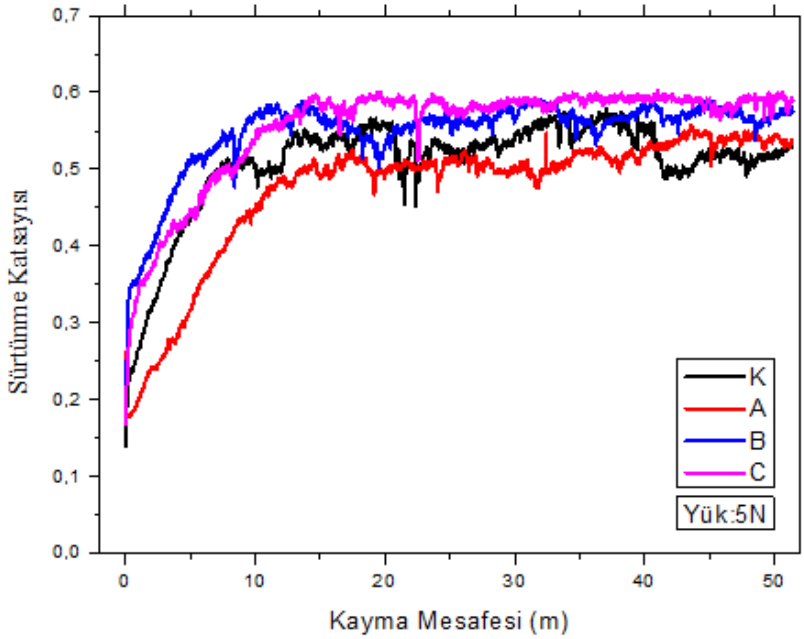
Bu denklemler: *V*, Aşınma Hacmi ($mm^3$); *G*, Aşınma izinin genişliği (mm); *D*, Aşınma izinin derinliği (mm); *L*, Karşıt hareket genliği (mm); *W*, Aşınma oranı ($mm^3/Nm$); *F*, Deney yükü (N); *S*, Toplam kayma mesafesi (m) içerir.

Numunelerin sürtünme katsayısı değişimleri Tablo 4.1'de ve Şekil 4.6'da incelendiğinde en yüksek sürtünme katsayısı her üç yük değeri içinde C numunesinde oluşmuştur.



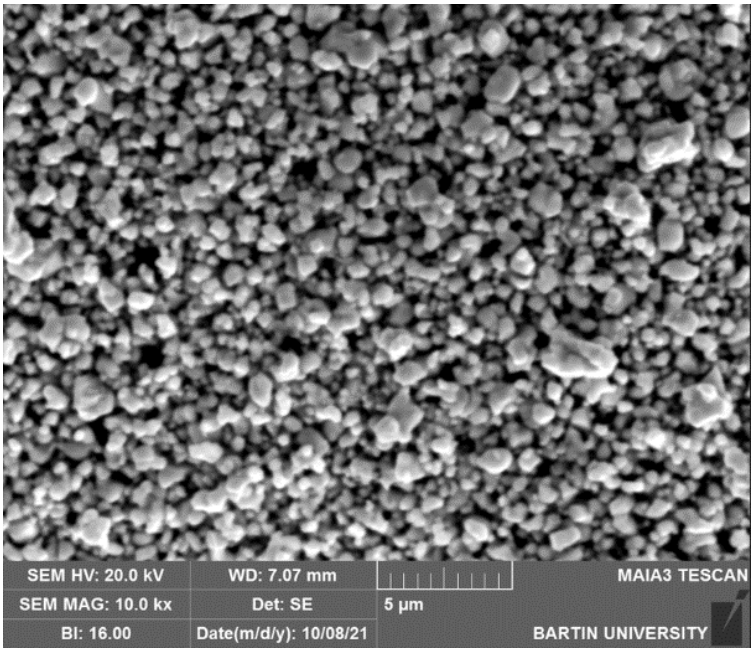

**Şekil 4.6.** Sürtünme katsayısı değişimleri, 1N, 3N ve 5N



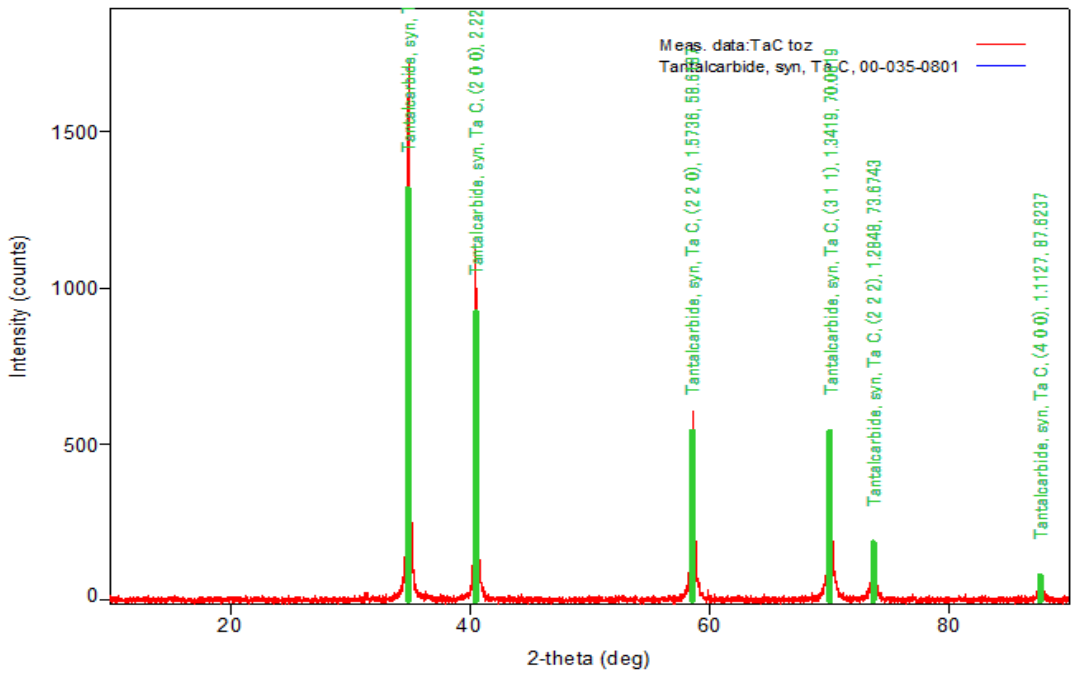

**Şekil 4.6.** Sürtünme katsayısı değişimleri, 1N, 3N ve 5N (şekillerin devamı)

### 4.4. Mikroyapı Analizleri

Takviye elmanı olarak kullanılan TaC tozunun SEM görüntüsü Şekil 4.7'de verilmiştir. Takviye elemanı olarak kullanılan TaC'ün XRD analizi ise Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

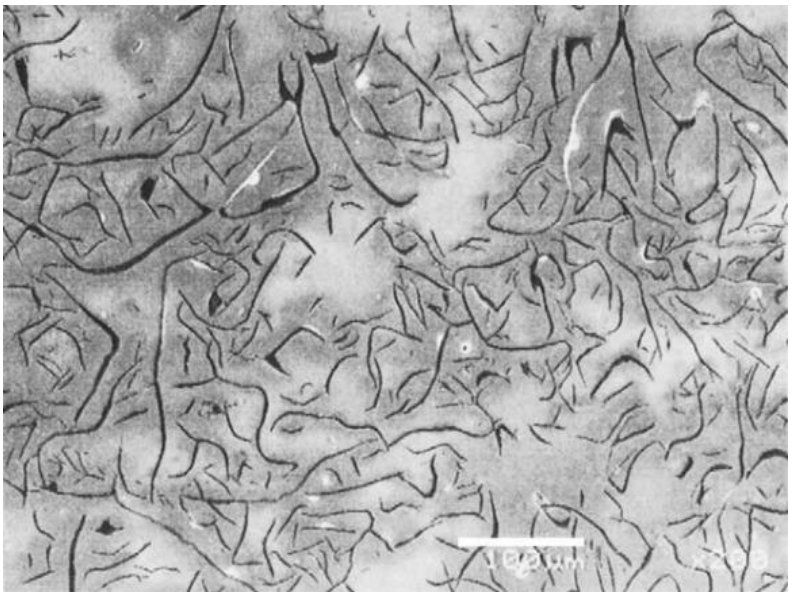



**Şekil 4.7.** TaC tozunun SEM görüntüsü

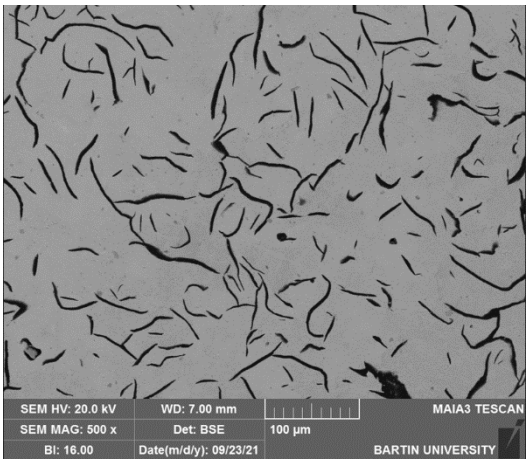



**Şekil 4.8.** TaC tozunun XRD Analizi

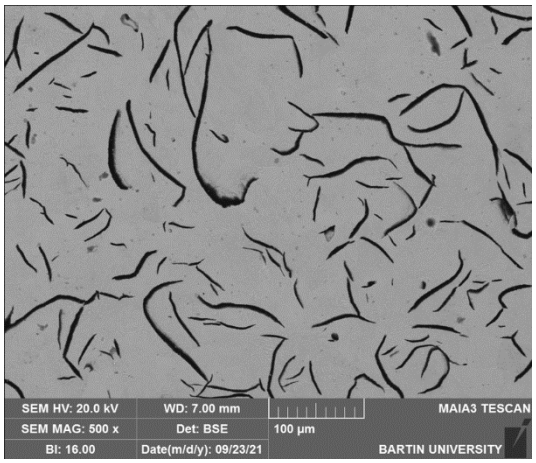
Katılaşma sırasında lamellerin rastgele dağılımı ve küçük boyutlu A tipi lamellerin oluşması istenmektedir (Yenice, 2002). Riahi ve Alpas (2003) tarafından yapılan gri dökme demir çalışmasında Şekil 4.9'da görülen A tipi mikro yapı grafitler elde edilmiştir. Yapılan çalışmanın SEM mikroyapı grafit dağılımları Şekil 4.10'da verilmiştir.



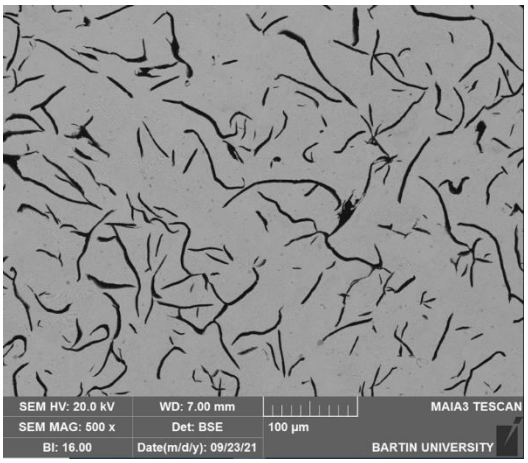
**Şekil 4.9.** A tipi gri dökme demirin (ASTM A30) mikro yapısı grafit dağılımı
Riahi ve Alpas (2003)



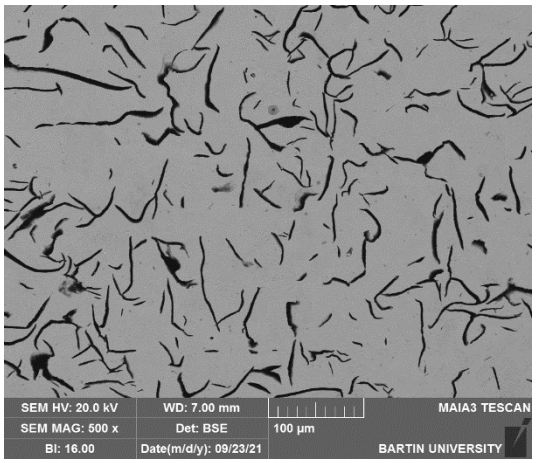

K numunesi




A numunesi



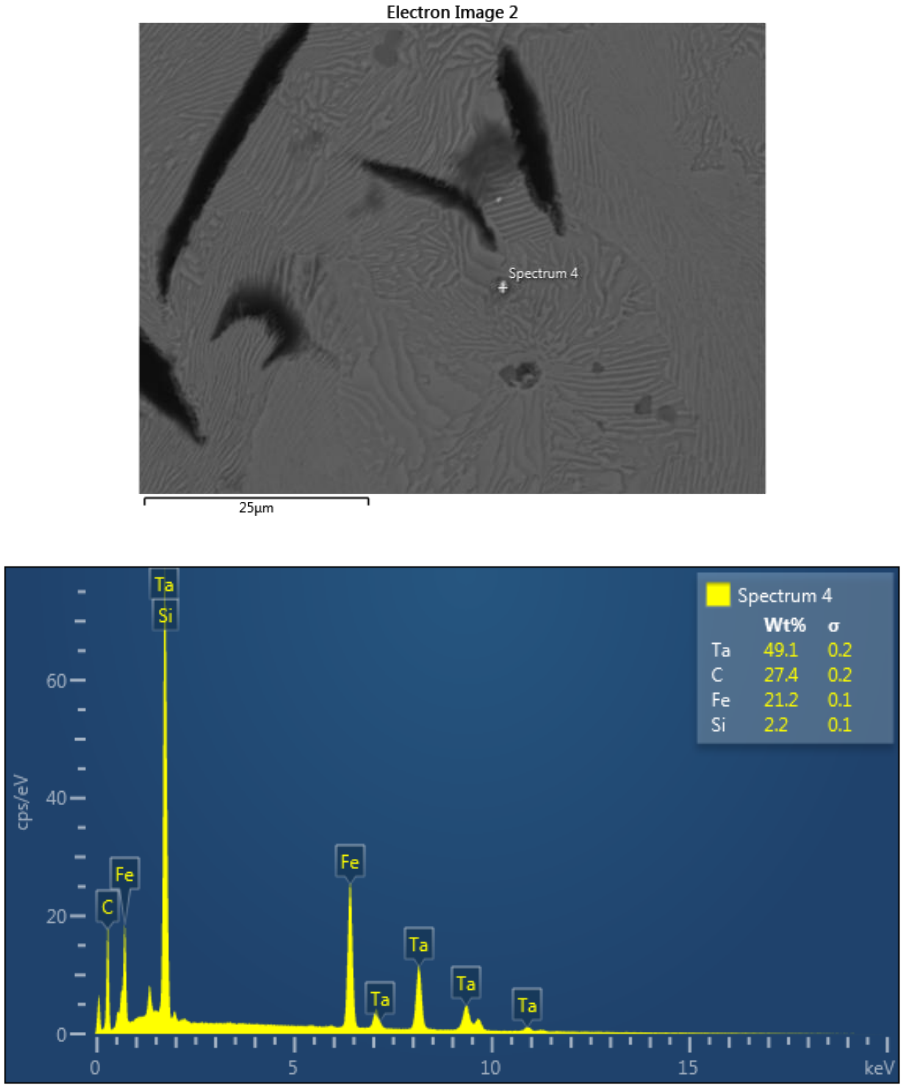

B numunesi




C numunesi

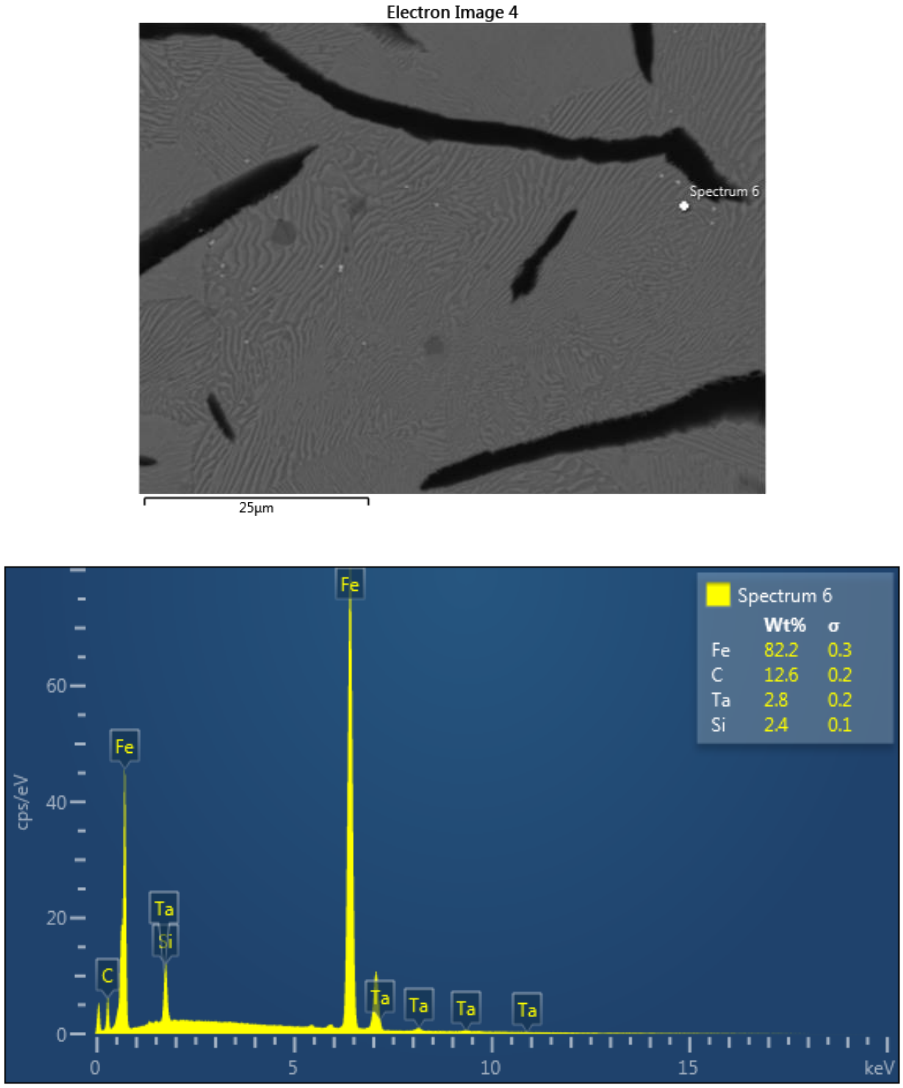
**Şekil 4.10.** SEM mikroyapı grafit dağılımları

A nolu deney numunesinin işaretli bölgesinden (Şekil 4.11) EDS analizi yapılmıştır. Yapılan EDS analizinde işaretli bölgede ağırlıkça %2.2 oranında Si, %21.2 oranında Fe, %27.4 oranında C ve %49.1 oranında Ta olduğu görülmüştür.




**Şekil 4.11.** A nolu deney numunenin EDS Analizi

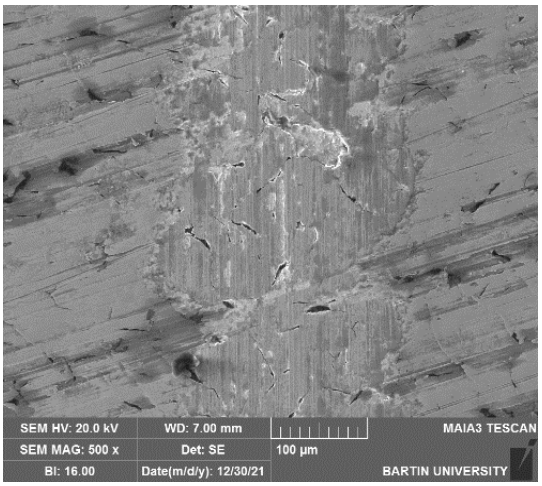
B nolu deney numunesinin işaretli bölgesinden (Şekil 4.12) EDS analizi yapılmıştır. Yapılan EDS analizinde işaretli bölgede ağırlıkça %2.4 oranında Si, %82.2 oranında Fe, %12.6 oranında C ve %2.8 oranında Ta olduğu belirlenmiştir.



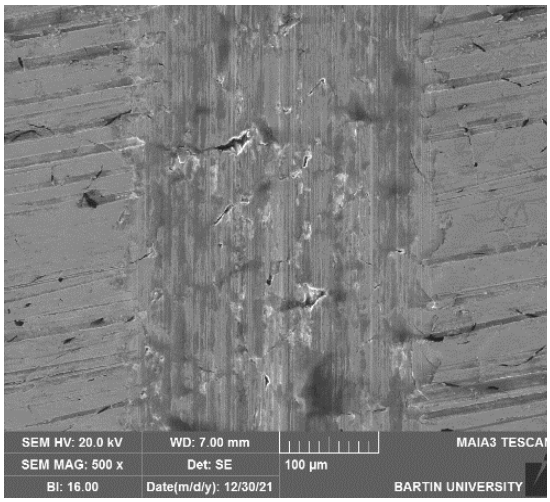

**Şekil 4.12.** B nolu deney numunenin EDS Analizi

Aşınma deneyleri sonucunda deney numunelerinin yüzeyinde oluşan aşınma izleri SEM cihazı ile incelenmiş ve aşınma davranışları belirlenmiştir. Prasad (2011) tarafından gri dökme demirin kayma aşınması üzerine yapılan çalışmada aşınma kayıplarının, uygulanan yük miktarına ya da hızına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Literatür incelendiğinde takviyesiz K numunesinde, artan yük ile birlikte aşınma hacminde artış olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada takviyesiz K numunesi için, en fazla aşınma 5N yükte meydana gelmiştir. K numunesinde 1N, 3N ve 5N yüklerde aşınma yüzeylerinde aşınma oyukları oluşmamıştır. A numunesinin SEM görüntüleri incelendiğinde, 5N yük altında aşınma oyukları oluştuğu görülmüştür. 1N ve 3N yüklerin olduğu deneylerin aşınma yüzeylerinde aşınma oyukları oluşmamıştır. Aşınma izleri, aşınma yüzeyinde belirgin çizikler olarak gözlenmiştir. B numunesinin SEM görüntüleri incelendiğinde, 5N yük altında aşınma oyukları görülmüştür. Çalışma 1N ve 3N yükler

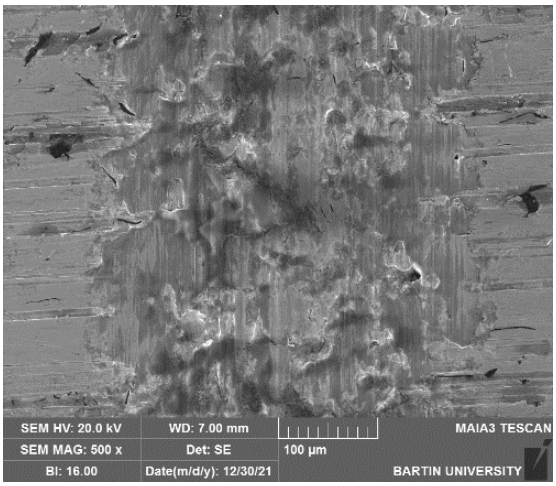
için tekrarlandığında ise, aşınma yüzeylerinde aşınma oyukları oluşmamıştır. C numunesinin SEM görüntüleri incelendiğinde aşınma izleri aşınma yüzeyinde belirgin çizikler olarak görülmüştür. En yüksek takviye oranına sahip olan C numunesinde aşınma oyukları görülmemiştir. Aşınma sonrası SEM mikroyapı görünüşleri Şekil 4.13'te verilmiştir.



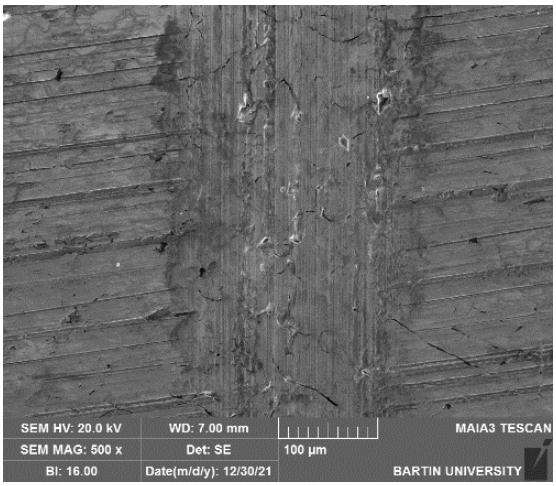

K Numunesi (1N)




K Numunesi (3N)

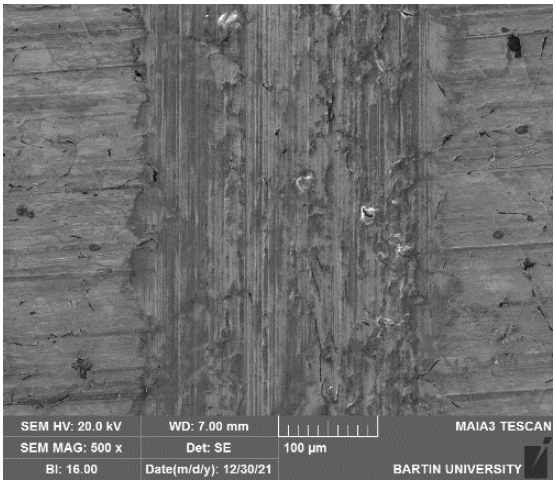



K Numunesi (5N)

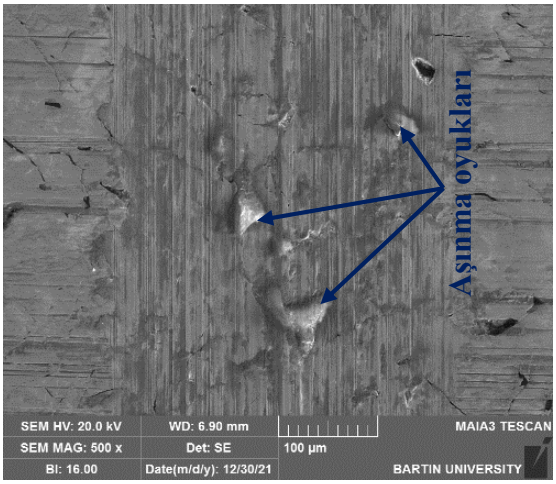



A Numunesi (1N)

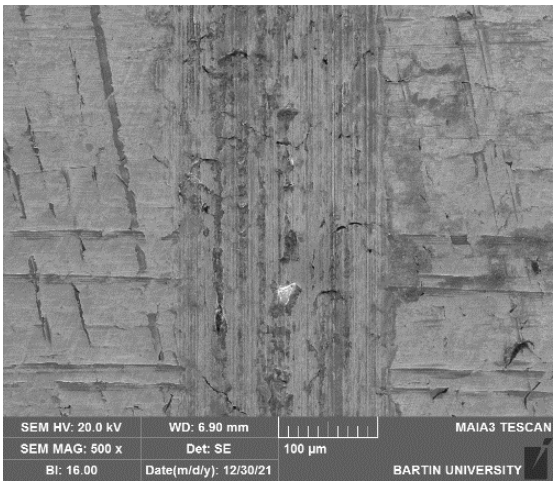
**Şekil 4. 13.** Aşınma sonrası SEM görüntüleri



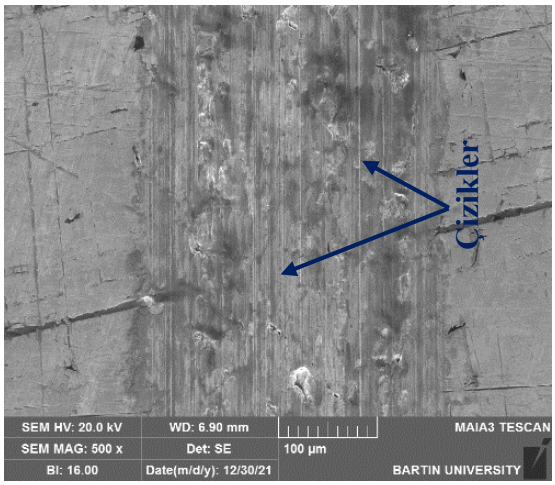

A Numunesi (3N)



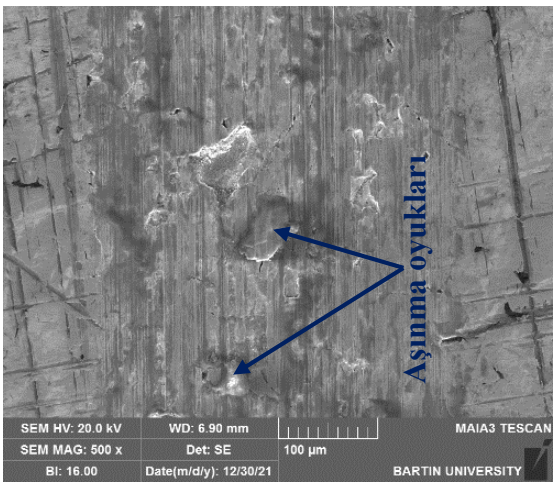

A Numunesi (5N)



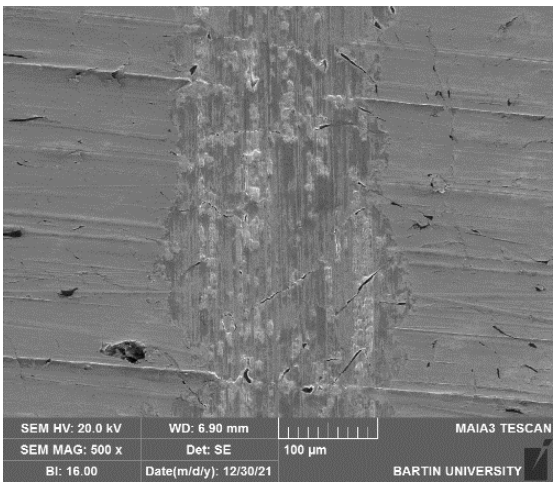

B Numunesi (1N)




B Numunesi (3N)

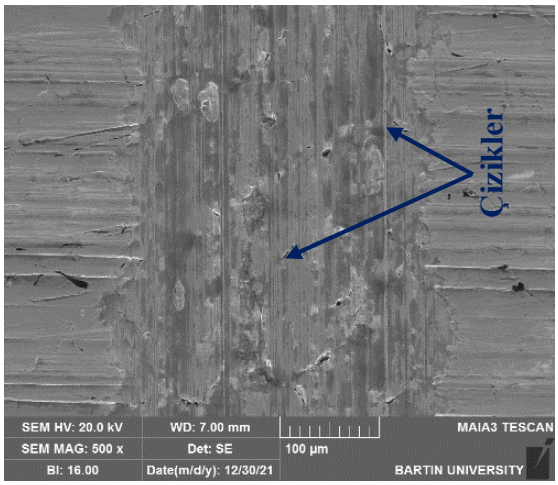



B Numunesi (5N)

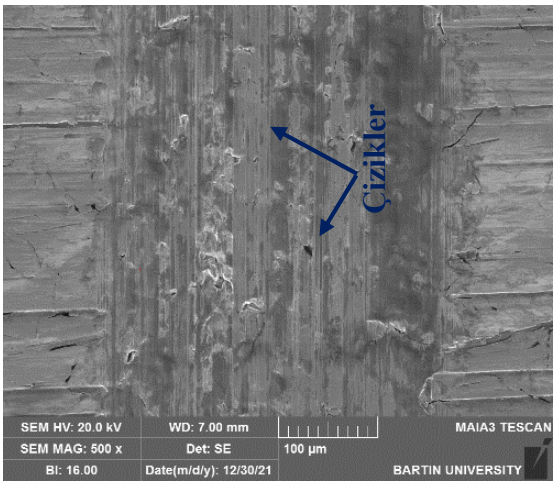



C Numunesi (1N)

**Şekil 4.13.** Aşınma sonrası SEM görüntüleri (şekillerin devamı)




C Numunesi (3N)




C Numunesi (5N)

**Şekil 4.13.** Aşınma sonrası SEM görüntüleri (şekillerin devamı)

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı oranlarda TaC takviye edilmiş lamel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışları, sertlik ve basma deneyleri incelenmiştir. Elde edilen bulgulara ilişkin bilgiler aşağıda verilmiştir:

- Lamel grafitli dökme demir kimyasal kompozisyonuna ilave edilen TaC mikroyapıya dağılmıştır.
- Sertlik ölçüm testlerinde, en yüksek ölçüm değeri A numunesinde ortalama 231 HB olarak bulunmuştur.
- Basma testlerinde, ortalama 949 MPa ile en yüksek mukavemet değeri en fazla takviyeye sahip C numunesinde görülmüştür.
- Aşınma deneylerinde, yük değerlerinin artışıyla birlikte, aşınma hacmi değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

Bu çalışma lamel grafitli dökme demirlere TaC takviyesi farklı oranlarda yapılarak, malzemelerin sertlik testi, basma testi ve aşınma davranışları gibi bazı mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu deneysel çalışmanın sonuçlarına istinaden bundan sonra ki yapılacak olan araştırmalara kaynak teşkil etmesi açısından öneriler aşağıda verilmiştir:

- Değişen oranlarda tantalyum karbür takviye edilmiş lamel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliği araştırılabilir.
- Tantalyum karbür farklı oranlarda küresel grafitli dökme demire takviye edilerek elde edilen döküm malzemenin aşınma davranışları incelenebilir.

# KAYNAKLAR


Abbasi, H. R., Bazdar, M., & Halvaee, A. (2007). Effect of phosphorus as an alloying element on microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. *Materials Science and Engineering: A*, 444(1–2), 314–317. https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.108

Aguado, E., Ferrer, M., Larranaga, P., Stefanescu, D. M., & Suárez, R. (2019). The effect of the substitution of silicon by aluminum on the properties of lamellar graphite iron, *International Journal of Metalcasting*, 13, 536-545. https://doi.org/10.1007/s40962-018-00303-y

Akgül, B. (2018). *Gri dökme demirde kalayın (Sn) mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması*. [Yüksek lisans tezi]. Selçuk Üniversitesi.

Akray, S. İ. (2007) *Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan yüzey işlemlerinin aşınma direncine etkisinin incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Albayrak, F. (2019). *Sanal basma testi tasarımı ve uygulaması*. [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi.

Altuncu, E., & Esen S. G. (2015). Ultra yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik malzemeler: tantalyum karbür (TaC). *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 8(1), 67-74. https://doi.org/10.7603/s40690-015-0008-6

Arslanbulut, E., & Selçuk, B. (2024). Lamel ve küresel grafitli dökme demir kamların blok-bilezik yöntemi ile aşındırılması. *Teknik Meslek Yüksekokulları Akademik Araştırma Dergisi*, 3(2), 12-16.

Avcı, Z. (2022). *Gri dökme demirlerin grafit yapısal özelliklerinin ağır ticari araçlarda kullanılan fren diski karakteristiklerine etkisi*. [Yüksek lisans tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.

Ay, Z. (2025). *Yüksek uzamalı sfero dökme demirin (GGG 400-18) uygun üretim şartlarının araştırılması*. [Yüksek lisans tezi]. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.

Ayday, A. (2013). *Elektrolitik plazma teknolojisi ile küresel grafitli dökme demir malzemesinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi*. [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi.

Aydemir, B. (2022). *Malzeme basma testlerin detayları ve sonuçlarının yorumlanması*. [Makale sunumu]. 7th International Mediterranean Science and Engineering Congress, Alanya, (ss. 118-124).

Aytaçoğlu, L. C. (2012). *Dökme demirlerde termal analiz ve matematiksel yaklaşım*. [Yüksel lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi.

Babuçoğlu, E. (2021). *Kaynaklı parçalarda titreşim ile gerilim gidermenin etkisinin incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi.

Baş, B. (2022). *GG25 esaslı dökme demir motor bloklarının üretimi ve özelliklerinin incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi.

Beniwal, G., & Saxena, K. K. (2020). Effect of niobium addition in grey cast iron: A short review. *Materials Today: Proceedings*, 26(2), 2337-2343. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.503

Bilici, M. K. (2004). *Alaşımsız dökme demirlerin aşınma özelliği*. [Yüksek lisans tezi]. Marmara Üniversitesi.

Bilim, B. (2021). *Sıcak daldırma yöntemiyle aluminyum kaplanmış toz metalurjisi ile üretilen takım çeliklerinin aşınma davranışlarının incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Bulut, E. (2021). *Vermiküler grafitli dökme demir (CGI) ile üretilen motor blokların özelliklerini etkileyen faktörlerin alternatif dökme demirler ile karşılaştırmalı analizi*. [Yüksel lisans tezi]. Bursa Teknik Üniversitesi.

Collini, L., Nicoletto, G., & Konecna, R. (2008). Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. *Materials Science and Engineering A*, 488(1-2), 529-539. https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.070

Çalık, A., Bıçaklı, E. E., & Zerentürk, O. (2022). Savurma ve kum kalıba döküm yöntemi ile üretilen GG-25 dökme demirin mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. *Cihannüma Teknoloji Fen ve Mühendislik Bilimleri Akademi Dergisi*, 1(1), 1-22.

Çelik, Ö. (2001). *Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışları*. [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Çetinkaya, C. (2003). Yüksek kromlu beyaz dökme demir malzemelerin $Al_2O_3$ ile aşınma davranışlarının incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 6(3), 559-567.

Çiftçi, Ö., & Yakut, R. (2021). *Effects of TaC addition to lamellar graphite cast irons on mechanical properties*. [Makale sunumu]. International Cappadocia Scientific Research Congress, Nevşehir, (ss. 107-113).

Çolak, M., Arslan, İ., & Gavgalı, E. (2018). Gri dökme demirlerin katılaşma modellemesi ve gerçek dökümler ile karşılaştırması. *Engineering Sciences (NWSAENS)*, 13(4), 280-290.

Çolak, O. (2019). *Küresel grafitli dökme demirlerin üretiminde modülün mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisi*. [Yüksek lisans tezi]. Bayburt Üniversitesi.

Diószegi, A., Svidró, P., Elmquist L., & Dugic, I. (2016). Defect formation mechanisms in lamellar graphite iron related to the casting geometry. *International Journal of Cast Metals Research*, 29(5), 279-285. https://doi.org/10.1080/13640461.2016.1211579

Döngel, A. (2008). *Bortemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin yüksek sıcaklık aşınma davranışının incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi.

Erdoğan, Ö. (2021). *R260 rayların yerine R350 HT rayların ikame edilmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Karabük Üniversitesi.

Filiz, H. İ. (2021). *AISI D2 soğuk iş takım çeliklerinin darbeli kayma aşınma davranışına mikroyapının etkisi*. [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Ghasemi, R., & Elmquist, L. (2014). A study on graphite extrusion phenomenon under the sliding wear response of cast iron using microindentation and microscratch techniques, *Wear*, 320(2014), 120-126. https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.09.002

Kaçal, A., Gülesin, M., & Melek, F. (2008). GGG-40 Küresel grafitli dökme demirlerin ince tornalama operasyonlarında kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 11(3), 229-234.

Karabaşoğlu, M. (2008). *Aşınma deney cihazı tasarımı ve imalatı*. [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi.

Karadeniz Teknik Üniversitesi. (2009). Mühendislik fakültesi metalurji ve malzeme mühendisliği bölümü metalurji laboratuarı-II basma eğme ve katlama deneyleri föyü. (2024, Aralık 24). https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14_14_00_0e11d.pdf

Kavaklı, Ü. (2006). *Konya bölgesinde döküm sanayinin durumu ve tarım makinelerinde kullanılan döküm parçaların standartlara uygunluğunun belirlenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Selçuk üniversitesi.

Kesti, E. (2009). *Ç-4140 çeliğinin, mikro yapı ve mekanik özelliklerine su verme ortamının etkilerinin araştırılması*. [Yüksek lisans tezi]. Selçuk Üniversitesi.

Kökden, M. U. (1998). *GGG 50 ve GGG 80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin abrasiv aşınma davranışına ostemperleme işleminin etkisi*, [Yüksek lisans tezi], Yıldız Teknik Üniversitesi.

Köse, S. (2022). *Lamel grafitli (gri) dökme demirlerde dolum hızı, döküm sıcaklığı ve metalürji kalitesinin farklı kesit kalınlıklarında akıcılık özelliklerine etkisinin incelenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Gümüşhane Üniversitesi.

Kumruoğlu, L.C. (2003). *Lamel grafitli ve küresel grafitli dökme demirlerde karbon eşdeğerinin mekanik özellikler ve mikroyapıya etkisinin incelenmesi*, [Yüksek lisans tezi], Sakarya Üniversitesi.

Kurt, B. (2019). *Lamel grafitli dökme demirlerde termal analiz yöntemi ile karbon eşdeğerliğinin tayini, mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi.

Li, Z., Chen, R., Wang, Q., Chen, C., Zhang, Y., & Song, Q. (2025). Effect of NB addition on compact microstructure and mechanical properties of gray cast iron for cylinder liner. *International Journal of Metalcasting*, 19(1), 307–317. https://doi.org/10.1007/s40962-024-01292-x

Lima, F. F. O., Bauri, L. F., Pereira H. B., & Azevedo, C. R. F. (2020). Effect of the cooling rate on the tensile strength of pearlitic lamellar graphite cast iron. *International Journal of Cast Metals Research*, 33(4-5), 201-217. https://doi.org/10.1080/13640461.2020.1822573

Malcıoğlu, A. U. (2015). *Östemperlenmiş gri dökme demirin yüksek sıcaklık aşınma davranışının incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Mutlu, O. (2021). *AISI 304 paslanmaz çeliğinde çok adımlı bilyalı dövme uygulamalarının mikroyapı ve malzeme özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Manisa Celal Bayar Üniversitesi.

Münker, F. (2010). *Sertleştirilmiş dökme demrilerin aşınma özellikleri*. [Yüksek lisans tezi]. Marmara Üniversitesi.

Nanografi. (2024, Kasım 22). Tantalyum karbür (TaC). https://shop.nanografi.com.tr/tantalyum-karbur-tac-mikron-tozu-safl-k-99-9-boyut-3-m/

Okay, F. (2006) *PVD yöntemi ile TiN kaplı öztemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin adhesiv aşınma davranışlarının incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Gazi Üniversitesi.

Ortakaya, R. (2023). *Direksiyon dişli kutusu gövdelerinde kullanılan küresel grafitli dökme demirlere zirkonyum diborür (ZrB2) ilavesinin mekanik özelliklere etkisinin deneysel olarak incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi], Batman Üniversitesi.

Özkader, M. Ç. (2015). *Isıl işlemli AISI 4140 çeliğinin abrasiv aşınmasının araştırılması*. [Yüksek lisans tezi]. Hitit Üniversitesi.

Öztürk, B. (2023). *Dökme demir atıklarından elde edilen kompozit malzemelerin farklı sinterleme yöntemleri kullanılarak mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi]. Konya Teknik Üniversitesi.

Pan, S., Zeng, F., Su, N., & Xian, Z. (2020). The effect of niobium addition on the microstructure and properties of cast iron used in cylinder head. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 1509–1518. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.076

Pehlivan, E. (2017). *Küresel grafitli dökme demir yüzeyinin TiBC tabakasıyla kaplanabilirliğinin araştırılması*. [Yüksek lisans tezi]. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi.

Pekşen, M. C. (2021). Gri dökme demir üretiminde metalürjik silisyum karbür ve ferro silis katkılarının malzeme üzerindeki etkileri. *Open Journal of Nano*, 6(1), 21-35.

Prasad, B. K. (2011) Sliding wear response of a grey cast iron: Effects of some experimental parameters. *Tribology International,* 44(5) 660–667. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.01.006

Riahi, A. R. & Alpas, A. T. (2003). Wear map for grey cast iron, *Wear*, 255(1-6) 401–409. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00100-5

Sağlam, C. (2009). *Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin aşınma direncine alaşım elementleri ilavesinin etkisi*. [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Sağlam, D. (2009) *Dökme demirlerin aşınma özellikleri*. [Yüksek lisans tezi]. Marmara Üniversitesi.

Sübütay, H., Şimşir, M., Aydın, M., & karaca, B. (2016). Kam mili üretiminde kullanılan gri dökme demir ve sfero dökme demirlerde çil oluşumunun mekanik özelliklere etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(1), 1-7.

Şen, N. B. (2018). *Lamel grafitli dökme demirlerin üretiminde metalurjik silisyum karbür ve ferro silisyum katkılarının malzeme üzerindeki mekanik, metalurjik ve ekonomik etkisinin araştırılması*. [Yüksel lisans tezi]. Necmettin Erbakan Üniversitesi.

Şimşir, M. (2007). *Çelik tel takviyeli lamel grafitli dökme demirlerin kırılma davranışının incelenmesi*. [Makale sunumu]. *8. Uluslararası Kırılma Konferansı*, İstanbul, (ss. 700-709).

Tan, E. (2005). *Dökme demirden imal edilen hadde merdanelerinin aşınma davranışına bakır katkı oranının etkisi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Pamukkale Üniversitesi.

Taşgın, Y. (2007). *Gri dökme demirin dubleks dökümünde karbür yapıcı elementlerin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkilerinin incelenmesi*. [Doktora Tezi]. Fırat Üniversitesi.

Tazegul, O., Muhaffel, F., Meydanoglu, O., Baydogan, M., Kayali, E. S., & Cimenoglu, H. (2014). Wear and corrosion characteristics of novel alumina coatings produced by micro arc oxidation on AZ91D magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 258, 168-173. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.09.035

Tekgöz, M. (2021). *R260 kalite ray çeliğinin ısıl işlem sonrası mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Karabük Üniversitesi.

Yakut, R., & Çiftçi, Ö. (2022). The effects of reinforcement with TaC on the microstructure and wear properties of lamellar graphite cast irons. *European Journal of Technique (EJT)*, 12(1), 77-81. https://doi.org/10.36222/ejt.1088994

Yakut, R., & Çiftçi, Ö. (2023). Investigation of the microstructure, hardness, and compressive properties of TaC-reinforced lamellar graphite cast irons. *European Mechanical Science*, 7(2), 56-62. https://doi.org/10.26701/ems.1213039

Yenice, B. S. (2002). *Gri ve küresel dökme demirlerin ısıl işlemi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Marmara Üniversitesi.

Yüksel, Ç. (2011). *Rüzgar türbini pervane göbeği üretimi ve yapısal özelliklerinin belirlenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.

Zhycasting. (2024, Kasım 25). Properties and characteristics of grey cast iron. https://www.zhycasting.com/properties-and-characteristics-of-grey-cast-iron/