

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR (GGG50) MALZEMEYE BAKIR
İHTİVASININ YORULMA DAYANIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mertcan KIZGIN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Ocak 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR (GGG50) MALZEMEYE BAKIR
İHTİVASININ YORULMA DAYANIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mertcan KIZGIN
(506161417)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mahmut Ercan AÇMA

Ocak 2021

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506161417 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mertcan KIZGIN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR (GGG50) MALZEMEYE BAKIR İHTİVASININ YORULMA DAYANIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mahmut Ercan AÇMA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Necip ÜNLÜ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Serdar AKTAŞ
Marmara Üniversitesi

Teslim Tarihi : 22 Aralık 2020
Savunma Tarihi : 19 Ocak 2021





Tüm sevdiklerime,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimimdeki tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek, ilgi, samimiyet ve yardımlarından dolayı danışman hocam Prof. Dr. Ercan Açma'ya büyük bir teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmam boyunca tüm döküm malzeme ihtiyaçlarımda yardımcı olan Karaman Döküm ailesine ve bugünlere gelmemde emeği çok büyük olan annem Neslihan Hayırlı'ya ve çok sevgili eşim Duygu Kızgın'a sonsuz teşekkür ederim.

Ocak 2021

Mertcan Kızgın



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	3
1.3 Hipotez	5
2. DÖKME DEMİRLER	7
2.1 Dökme Demirlerin Tanımı ve Sınıflandırılması	7
3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	9
3.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Özellikleri	9
3.1.1 Küresel grafitli dökme demirin üretim yöntemleri	9
3.1.2 Ergitme prosesi	10
3.1.3 Ana metal analizi	11
3.1.4 Kükürtün betaraf edilmesi	11
3.1.5 Küreselleştirme	11
3.1.6 Küreselleştirme prosesinde kalite kontrolün sağlanması	12
3.1.7 Aşılama	13
3.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Matris Yapıları	13
3.2.1 Ferritik yapı	13
3.2.2 Ferritik + perlitik yapı	14
3.2.3 Perlitik yapı	14
3.2.4 Martenzitik yapı	14
3.2.5 Beynitik yapı	14
3.2.6 Östenitik yapı	14
3.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	15
3.4 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Uygulama Alanları	16
4. YORULMA	17
4.1 Yorulmanın Oluşumu	18
4.2 Yorulma Dayanımının Saptanması	20
4.3 Yorulma Deney Numunesi	23
4.4 Yorulma Dayanımını Etkileyen Faktörler	25
4.4.1 Malzeme özellikleri	25
4.4.2 İnklüzyonlar ve mikro yapı hataları	26

4.4.3	Geometrik faktörler	27
4.4.4	Çentik etkisi.....	28
4.4.5	Yüzey işlemlerinin etkisi.....	29
4.4.6	Isıl işlem ve mikro yapı etkisi	29
4.4.7	Gerilmelerin etkisi.....	30
4.4.8	Çalışma koşulları.....	31
5.	YORULMA TEST PROSEDÜRÜ	33
6.	DENEY ÇALIŞMASI	37
6.1	Deney Çalışması Numune 1	38
6.2	Deney Çalışması Numune 2	39
6.3	Deney Çalışması Numune 3	40
6.4	Deney Çalışması Numune 4	41
6.5	Deney Çalışması Numune 5	42
6.6	Çekme Deneyi Sonuçları.....	43
6.7	Yorulma Deneyi Sonuçları.....	45
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER	47
8.	KAYNAKLAR.....	49
9.	ÖZGEÇMİŞ	53

KISALTMALAR

KGDD	: Küresel Grafitli Dökme Demir
INCO	: Uluslararası Nikel Birliği
DDK	: Dökme Demir Küresel Grafitli
SAE	: Otomotiv Mühendisleri Birliği
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
ISO	: Uluslararası Standart Organizasyonu
DIN	: Alman Standartları Enstitüsü
NEN	: Hollanda Kraliyet Standartları Enstitüsü
BS	: İngiliz Standartları
AFNOR	: Fransız Standartları Birliği
Hz	: Hertz
HB	: Brinell Sertliği



SEMBOLLER

N_f	: Kırılma için gerekli toplam yorulma çevrimi
N_i	: Çatlak başlangıcı için gerekli olan çevrim sayısı
N_p	: Çatlağın kırılmaya kadar ilerlemesi için gerekli olan çevrim sayısı
σ_c	: Çekme Mukavemeti
ΔT	: Sıcaklık Farkı
α	: Termal Genleşme Katsayısı
E	: Young modülü
F	: Parçaya uygulanan yük (N)
L	: Moment hesabında kullanılan kol uzunluğu (mm)
σ	: Eğme gerilmesi (MPa)
D	: Test numunesi çapı (mm)
M	: Eğilme Momenti
I	: Eylemsizlik Momenti
A	: Kesit Alanı
π	: Pi Sayısı
R_p	: Akma mukavemeti büyüklüğü
R_m	: Çekme mukavemeti büyüklüğü
L₀	: Parça ilk boyu
L₁	: Parça son boyu



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Dökme demirlerin mikroyapı özelliği ve kırılma görüntüsüne göre Kategorize edilmesi.....	8
Çizelge 2.2 : Çeşitli dökme demirlerin kimyasal kompozisyonu.....	8
Çizelge 3.1 : Küresel grafitli dökme demirlerin uygulama alanları	16
Çizelge 4.1 : Çelik şaft için parça kesitinin yorulma dayanımına etkisi.....	28
Çizelge 4.2 : 655MPa sabit bir gerilme altında, yüzey kalitesi farklı olan SAE3130 sınıfı numunelerin yorulma dayanımları.....	29
Çizelge 6.1 : 1 numaralı numune kimyasal analiz.....	38
Çizelge 6.2 : 2 numaralı numune kimyasal analiz.....	39
Çizelge 6.3 : 3 numaralı numune kimyasal analiz.....	40
Çizelge 6.4 : 4 numaralı numune kimyasal analiz.....	41
Çizelge 6.5 : 5 numaralı numune kimyasal analiz.....	42
Çizelge 6.6 : Çekme deneyi sonuçları.....	43
Çizelge 6.7 : Bakır oranına göre faz değişimleri.....	43
Çizelge 6.8 : Bakır oranı değişiminin yorulma testi sonuçlarına etkisi.....	46



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Yıllara göre yayın sayısı.....	4
Şekil 1.2 : Ülkelere göre yayın sayısı.....	4
Şekil 1.3 : Kaynaklara göre yayın sayısı.....	5
Şekil 3.1 : KGDD 'lerde döküm aralığının grafik gösterimi.....	10
Şekil 3.2 : Grafit hatası içermeyen KGDD mikro yapısı.....	12
Şekil 3.3 : KGDD'de grafit hataları a) Gelişmemiş grafit, b) Yarı lamelli grafit, c) Küçük lamelli grafit, d) Patlamış grafit.....	12
Şekil 3.4 : KGDD mikro yapısındaki fazlar.....	13
Şekil 3.5 : Küresel grafitli dökme demirlerin farklı matris yapıları a) Ferritik b) Ferritik+Perlitik c) Perlitik d) Martenzitik e)Temperlenmiş Martenzitik f) Beynitik g) Beynitik h)Östenitik.....	15
Şekil 3.6 : Ülkelere göre küresel grafitli dökme demir standartları ve gösterimleri.....	15
Şekil 4.1 : Yorulmaya istinaden kırılan parça yüzey görüntüleri; a) çatlağın ağır ilerlemesi, b) alternatif büyüklükte uygulanan gerilme neticesinde oluşan yüzey.....	19
Şekil 4.2 : Kayma bantları ile yüzey kesişimi a) çekme gerilmesi b) değişken gerilme.....	20
Şekil 4.3 : Wöhler eğrisi	21
Şekil 4.4 : Dönen destekli kiriş yorulma test düzeneği.....	21
Şekil 4.5 : Yorulma gerilme periyotları	22
Şekil 4.6 : Çelik ve demir dışı malzemelerin genel Wöhler gösterimi.....	23
Şekil 4.7 : Dönen eğmeli yorulma testi yapılan parça S-N eğrisi	25
Şekil 4.8 : Farklı malzemelerin yorulma dayanım değerleri	26
Şekil 4.9 : İnküzyonların düşük alaşımlı çeliklerde yorulma dayanımına etkisi.....	27
Şekil 4.10 : Yorulma dayanım sınırına çentik etkisi.....	28
Şekil 4.11 : Çeliğin mikro yapısının yorulma dayanımına etkisi.....	30
Şekil 4.12 : Malzemenin maruz kaldığı gerilme durumları.....	30
Şekil 4.13 : Çalışma ortamının yorulma dayanımı üzerindeki etkisi.....	32
Şekil 5.1 : Yorulma Test Numunesi Ölçüleri.....	33
Şekil 5.2 : Eylemsizlik Momenti	34
Şekil 5.3 : Kiriş Eğilme Momenti.....	34
Şekil 5.4 : Kiriş Boyunca Eğilme.....	35
Şekil 5.5 : Dönel eğmeli yorulma test cihazı.....	36
Şekil 6.1 : 1 numune uzama gerilme grafiği.....	38
Şekil 6.2 : 1 nolu numune mikro yapı incelemesi (100 µm).....	38
Şekil 6.3.: 2 nolu numune uzama gerilme grafiği.....	39
Şekil 6.4 : 2 nolu numune mikro yapı incelemesi (100 µm).....	39
Şekil 6.5 : 3 nolu numune uzama gerilme grafiği.....	40
Şekil 6.6 : 3 nolu numune mikro yapı incelemesi (100 µm).....	40

Şekil 6.7 : 4 nolu numune uzama gerilme grafiği.....	41
Şekil 6.8 : 4 nolu numune mikro yapı incelemesi (100 µm).....	41
Şekil 6.9 : 5 nolu numune uzama gerilme grafiği.....	42
Şekil 6.10 : 5 nolu numune mikro yapı incelemesi (100 µm).....	42
Şekil 6.11 : Çekme mukavemeti sonuçları.....	44
Şekil 6.12 : Akma mukavemeti sonuçları.....	44
Şekil 6.13 : Sertlik değerleri sonuçları.....	44
Şekil 6.14 : Uzama miktarı sonuçları.....	45
Şekil 6.15 : Yorulma testi numunesi ansys gösterimi.....	45
Şekil 6.16 : Bakır oranına göre yorulma dayanım testi sonuçlarının grafik gösterimi.....	46



KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR (GGG50) MALZEMEYE BAKIR İHTİVASININ YORULMA DAYANIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada küresel grafitli dökme demirlerin alaşımlı ve alaşımsız olarak mekanik özellikleri incelenmiştir. Ardından ise; alaşımsız ve farklı oranlarda bakır ihtiva edilen küresel grafitli dökme demirin dönmeli-eğilmeli yorulma testleri ile kırılmaya kadar geçen çevrim sayısına göre performansları incelenmiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda çıkan gerilme-uzama grafiklerine göre tokluk değerleri incelenmiş olup, ayrıca bakırın perlit yapıcı etkisinin anlaşılması için ferrit ve perlit oranları kayıt altına alınmıştır.

5 farklı bakır kompozisyona sahip numuneye çekme testi, sertlik testi, mikro yapı incelemesi, spektral analiz ve yorulma testi yapılarak değişimler gözlemlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarda küresel grafitli dökme demire ihtiva edilen bakırın, malzemenin mekanik özelliklerine olumlu yönde etki ettiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, düşük frekanslı yorulma testinde bakır ihtivasının %1,49 oranına kadar yorulma dayanımına da artırıcı yönde etki ettiği görülmüştür. Bunun sebebi ise mikro yapıda bulunan perlit miktarının artması olarak gösterilmektedir. Yapılan mikro yapıdaki faz değişiklikleri incelendiğinde bakırın perlit ve grafit oluşumunu desteklediği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca sertlik ve çekme dayanımlarının artışına bağlı olarak uzama değerlerindeki düşüş gözlemlenmiştir. Buna paralel olarak yapılan tokluk hesabında, beklendiği üzere azalma meydana gelmiştir.

Tüm bu sonuçlar ışığında alaşımsız küresel grafitli dökme demirin özellikle yorulma kuvvetlerine maruz kaldığı uygulama alanlarında ve doğal yorulma dayanımının yeterli olmayacağı öngörüsünde bulunulduğunda, bakır ilavesi ile malzemenin yorulma dayanımının arttırılabileceği bilgisine ulaşılmıştır. Yorulma dayanımını etkileyen başlıca faktörlerin literatür araştırmalarına göre, sıcaklık, korozyon, yüzey pürüzlülüğü, çentik etkisi, malzeme çapı, test frekansı gibi parametreler olduğu görülmüştür. Bunların etkisini en düşük seviyeye çekmek adına deney numunelerinin aktif çapı 6mm, sıcaklık oda sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü 0,8 mikron, çalışma frekansı 25 Hz ve nemli olmayan, korozyon etkisi oluşmayacak şekilde testler gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarının yorumlanabilir istatistik vermesi için ise her bir kompozisyondan üçer adet numuneye bahsedilen testler yapıp, sonuçların ortalama değerleri kullanılmıştır.

Deney verilerinin sonucunda, yapılan çalışmada %1,49'a kadar bakır ilavelerinin küresel grafitli dökme demirin hem mekanik özelliklerini iyileştirdiği hem sertlik değerlerini arttırdığı hem de yorulma dayanımını iyileştirdiği ortaya konmuştur.



THE INFLUENCE OF COPPER ADDITION ON FATIGUE PROPERTIES OF GGG50 GRADE SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRON

SUMMARY

Spheroidal graphite cast irons have better mechanical properties when they are compared to alternative cast irons and are obtained as a result of the reaction in the nodulation melting pot with the help of a spheroidizer (Mg or Ce) added to the molten cast iron in small amounts.

Spheroidal graphite cast irons show similar mechanical properties to steel. With the castability and low production cost of ductile graphite cast iron, which provides steel's high strength, ductility, high fracture toughness and wear resistance properties, it has enabled designers to produce superior machine parts at low cost.

Spheroidal graphite cast irons have ferritic, pearlitic, austenitic, bainitic or martensitic internal structure. The addition of copper to Spheroidal graphite cast irons promotes the formation of pearlitic structure.

Spheroidal graphite cast irons are iron alloys that contain 3.4 - 3.9% carbon and 1.8 - 3.1% silicon and have a spheroidal graphite structure. Numerous studies have been conducted on the production of materials with optimum properties in the process from the years when metal materials were used to the present day. Spheroidal graphite cast irons, one of the cast iron types, have more uses than other types of cast iron in terms of both production and mechanical properties.

Spheroidal graphite cast irons; It is also known as nodular, sphero, ductile. These types of cast irons have the same composition as gray cast irons, the only difference being the shape of graphite. While graphite is lamellar in gray cast iron, it is spheroidal in spheroidal graphite cast irons. Ce or Mg added to molten cast iron enables graphite to form spherically. Spheroidal graphite cast irons have high strength compared to other types of cast iron, as well as low melting temperature, good fluidity and pourability. In this respect, it has engineering advantages of both gray cast iron and steel. In addition to all these advantages, desired mechanical properties can also be obtained by processes similar to heat treatments applied to steel.

Spheroidal graphite cast irons, whose production has increased since 1970, create a very useful structure by combining many advantages of steel and the economical machining of cast irons. Thanks to these superior properties, it has gained a more common usage rate by preventing gray cast iron, tempered cast iron and steel casting. It has a wide range of use, especially where high strength and good wear resistance are required.

Some properties of spheroidal graphite cast irons are as follows.

- * Spheroidal graphite cast irons are 10% lighter than steels. Gears made of spheroidal graphite cast iron work quieter than steels.
- * Graphite in the structure increases the damping capacity by 40%.
- * Spheroidal graphite cast irons have less notch sensitivity than steel. For this reason, surface treatments do not need to be made as sensitive as with steels.

- * Spheroidal graphite cast iron as raw material is cheaper than steels
- * Gears made of spheroidal graphite cast iron can be cast to give their final shape. For example, threads can be created during the casting process.
- * Machinability of spheroidal graphite cast irons is much better than annealed steel. Therefore, the consumption of expensive processing tools is also less.
- * The energy used in the production of spheroidal graphite cast iron gears is less than the energy used in the production of steel gears. In this way, energy savings can be increased up to 50%.
- * Spheroidal graphite cast irons exhibit a lower friction coefficient and lower wear rate compared to steels, thanks to the free graphite contained within.

Due to these superior properties mentioned above, ductile graphite cast irons have many uses. Automotive and architectural applications have the largest share in these areas of use. Crankshafts, front wheel support arms, complex shapes of steering linkages, brake discs, engine connecting rods, free arms, wheel hubs, power transmission connections, turbo housings and manifolds for high temperature applications and high safety valves are manufactured from spheroidal graphite cast iron. Besides that, the spheroidal graphite cast iron pipe industry constitutes the other biggest usage area. In addition, it is also used in mining and metallurgy industry, crushing bodies, hot rolling mills, molds, melting and slag pots.

Spheroidal graphites can be of different sizes which are up to the section thickness of the casting and the number of cores required for graphite precipitation. Generally thinner sections contain more cores. Consequently, the numbers of graphite spheres in thin sections are higher, but smaller in size. In spheroidal graphite cast irons, the number and distribution of graphites is a very good and precise indicator of metallurgical quality. The number of spheres of 150 - 250 pieces / mm² is preferred as an average value. The structure of spheroidal graphite cast irons consists of a main phase and spherical graphites within this main phase. It is preferred that graphites constitute 8 - 10% of the structure by volume. The carbides that can be found in the structure are not preferred except the austenitic ductile graphite cast irons.

The basic elements in the composition of spheroidal graphite cast irons are carbon and silicon. The most suitable carbon composition is 3.5 - 3.8%, for silicon it is 2.0 - 2.8%. The amount of Mg required for the formation of spheroidal graphites is usually between 0.04% and 0.06%. If the sulfur content is below 0.015%, 0.035 - 0.04% Mg amount is sufficient. If the amount of Mg is below the specified values, it causes insufficient spheronization and consequently the formation of vermicular graphite in the form of popcorn. The amount of sulfur is preferred to be below 0.02%. The sulfur amount in the composition after casting is approximately 0.015%. If the spheronization process is carried out in the mold, the sulfur amount should be below 0.01%.

In order to prevent carbide formation in spheroidal graphite cast iron, the manganese ratio must be controlled. Since the manganese carbide forming effect is limited to a maximum value that depends on the % Si and the cross section range. In thin castings with a section thickness of 25 mm or more, the carbide forming effect of manganese is compensated by the increase in the amount of silicon. For a casting piece with a section thickness of 12 mm, an increase in the silicon ratio from 2.5% to 3.0% allows the manganese ratio to increase from 0.25% to 0.35%. This kind of manganese increase occurs due to segregation in casting parts with thick sections. Manganese preferentially segregates in the liquid. As the solidification rate decreases, this segregation occurs clearly. It has been proved that in the alloy containing 0.4% Mn on average, the Mg content in the final solidifying liquid can be 2.5% or more. This segregation cannot be

prevented by the silicon with the increase of the section thickness, because the silicon segregation is quite high in the first solidification.

In this study, the mechanical properties of spheroidal graphite cast iron with and without alloy were investigated. Then; the strength of spheroidal graphite cast iron, which is unalloyed and containing copper in different proportions, was investigated by rotational-bending fatigue tests.

In experimental studies, it was observed that copper addition to spheroidal graphite cast iron had a positive effect on the mechanical properties of the material such as tensile strength and hardness. In addition, it was found that copper content in GGG50 has an increasing effect on high cycle fatigue strength up to 1.49% as a result of the experiments.

In this respect, it is obtained that the fatigue strength of the material can be increased by adding copper in the application areas where unalloyed spheroidal graphite cast iron is subjected to fatigue forces and it is predicted that the natural fatigue strength will not be sufficient.

As a result of the experimental data, it has been shown that copper additions up to 1.49% improve both the mechanical properties of spheroidal graphite cast iron and increase fatigue strength.



1. GİRİŞ

Dökme demirler çok uzun zamandır değişik amaçlarla kullanılmak üzere parçalar üretmek için kullanılmaktadır. Ancak; özellikle sanayinin gelişmesi, ihtiyaçlarının değişmesi ve farklı ihtiyaçlara istinaden yeni kullanım alanlarının oluşması ile birlikte daha yüksek performanslı malzeme ihtiyaçları hasıl olmuştur. Bu doğrultuda küresel grafitli dökme demirler üzerinde geliştirmeler yapılmış olup, kullanımı günümüzde oldukça yaygınlaşmış durumdadır. 1943 senesinde, (INCO) laboratuvarlarında, ergiyik yapıya magnezyum ihtiva edilerek küresel grafitli dökme demir icat edilmiş olup, bundan 5 yıl sonra ise yine az miktarda Ce ilave edilerek benzer neticeye ulaşılmıştır. [1]

KGDD'ler işlenebilirliğinin kolaylığı ve mekanik özelliklerinin iyi olması kaynaklı birçok sektörde sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe kullanılan krank milleri küresel grafitli dökme demirlerden tercih edilmektedir. Bu tercihin sebepleri ise; bahsi geçen malzemenin sahip olduğu yüksek mukavemet, yüksek yorulma dayanımı ve işlenebilirliğinin kolay olması olarak gösterilir. Krank mili gibi yaygın kullanım alanlarından bir diğeri ise dişlilerdir, nedeni ise özellikle dişlilerin yüksek mukavemete ve yüksek yorulma dayanımına ihtiyaç duymasıdır. [2]

Küresel grafitli dökme demirler, ferritik, perlitik, östenitik, beynitik veya martenzitik mikro yapıya sahip olabilmektedirler. Küresel grafitli dökme demire bakır ihtivası ile perlitik yapının oluşumu malzeme içinde desteklenmektedir. Oluşan perlitik yapı ise malzemenin mukavemetini, sertlik değerlerini ve buna bağlı yorulma dayanımını arttırmaktadır.

Bu çalışmada GGG50 sınıfı küresel grafitli dökme demirin ve değişik oranlarda bakır ihtivalı numunelerin hem mekanik özellikleri incelenmiş, hem de farklı bileşimlerdeki malzemelerin yorulma davranışları incelenerek, mekanik özelliklerle yorulma dayanımı arasında bir korelasyon olup olmadığı incelenmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD) yüksek çekme dayanımı, şekil verilebilirlik , dökülebilirlik ve yüksek yorulma dayanımı özellikleriyle karakterize edilmektedirler. Bu özellikleri sayesinde KGDD'ler geniş bir çeşitlilikte kullanım alanına sahiptirler. Bunlardan bazıları otomotiv sektöründeki motor blokları, manifoldlar, vites kutuları, turbo şarj ünitesi gövdeleri gibi parçalardır. Artan daha verimli yakıt tüketimi, daha çevreci araçlar gibi talepler doğrultusunda sıkıştırma oranlarını arttırmak için, daha yüksek operasyon sıcaklıklarında çalışmaya uygun parçalar elde etmek adına SiMo-SiCu gibi alaşımlı KGDD'lerin kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. [3-4]

KGDD içerisine eklenen silisyum sayesinde grafit şeklinin küreselleşme eğilimi ve ferritik matrisin oluşması desteklenmektedir. Aynı zamanda östenit dönüşüm sıcaklığını da yükselttiğinden yüksek sıcaklıklarda mikro yapının stabilizasyonunu da arttırmaktadır. Silisyum oranını arttırmanın, akma dayanımını arttırmasının yanı sıra tokluğu ve malzemenin elastikiyetini azalttığı gözlemlenmektedir. Dolayısı ile üretilen malzeme oda sıcaklığında kırılğan bir yapıda olabilmektedir.

KGDD'ye molibden eklenmesi silisyumla benzer şekilde malzemenin yüksek sıcaklıklardaki performansını arttırmaktadır. Bu sayede malzemenin sürünme dayanımı ve oksidasyona karşı direnci artmaktadır. Molibdenin karbür oluşumunu tetiklemesi ile birlikte tane sınırlarına çöken karbür, malzemenin çekme dayanımını arttırmaktadır. Ancak daha sert ve dayanıklı malzeme oluşmakla beraber şekil verilebilirliği ve işlenebilirliği azaltmaktadır. [5-6]

KGDD'ye bakır ihtivası, malzeme içindeki perlit fazının oluşumunu desteklerken, aynı zamanda ötektoid sementinin daha stabil olmasını sağlamaktadır. KGDD'ye bakırın ilavesi ile beraber daha yüksek çekme dayanımı ve sertlik değeri ile daha düşük uzaman elde edilmektedir. Bunların yanı sıra aşınma dayanımı artar, sürtünme katsayısının azalması sağlanır. Günümüzde bakır ilaveli KGDD'ler yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. [7-8]

Bahsedilen bilgiler ışığında endüstride en yaygın şekilde kullanılan KGDD'lerden GGG50 malzeme seçilmiştir. Bu malzemeye bakır ilavesinin mekanik özellikler üzerinde yarattığı değişimleri, bununla ilintili olarak yorulma dayanımına olan etkileri gözlemlenmek istenmiştir.

Bakır ihtiva edilmiş GGG50 malzemenin özelliklerinin anlaşılabilmesi için 5 farklı kombinasyonda 3'er adet numune dökürölüp işletilmiştir. Bu malzemelerin mekanik özelliklerinin anlaşılabilmesi için çekme testleri, sertlik testleri, mikro yapı incelemeleri, spektral analiz testleri yapılmıştır. Belirlenen özelliklere sahip malzemelerin R=-1 özellikli (fully reversed) yorulma testindeki performansları incelenmiştir. Malzemelerde iç yapı, yüzey pürüzlülüğü gibi etkilere bağılı olarak değışme ihtimali olan yorulma test sonuçlarının daha güvenilir olabilmesi adına her bir kompozisyondaki numuneden 3 adet test edilmiştir.

Özetle, 5 farklı kompozisyona sahip GGG50 malzeme için toplamda 15 adet yorulma testi yapılarak, bakır elementinin performansa etkisi incelenmiş ve deney sonuçları ortaya konmuştur.

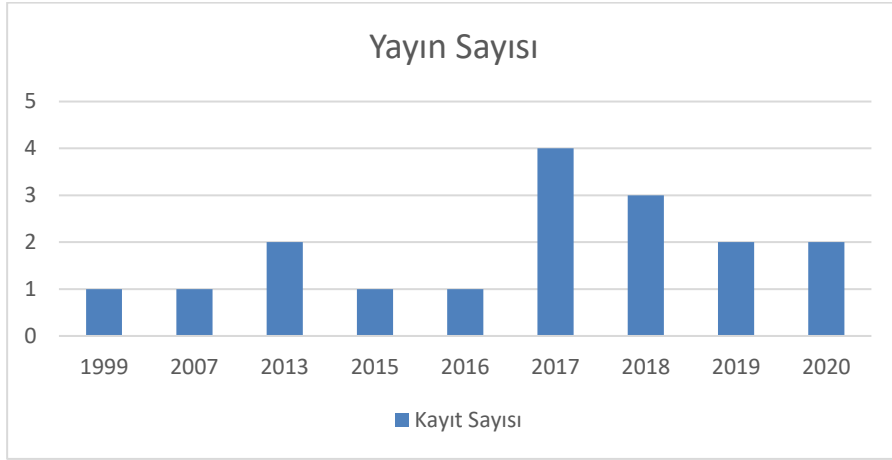
1.2 Literatür Araştırması

Kürsel grafitli dökme demirler oldukça geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptirler. Özellikle titreşimli ortamlarda çalışan parçalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak motor blokları, manifoldlar, otomotiv sektöründe değışik komponentler verilebilir. Parçaların kullanım alanlarına bağılı olarak özellikle titreşimli ortamlarda yorulma dayanımı önemli bir malzeme performansı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu doğrultuda KGDD'lerin yorulma dayanımlarının arttırılması, geliştirilmesi, analiz edilmesi ile ilgili araştırmalar incelenmiş ve klasifiye edilmiştir.

Literatürde KGDD'lerin mekanik özelliklerinin ve yorulma dayanımlarının incelenmesine dair önemli sayıda çalışma mevcuttur. Dünyanın en önemli araştırma veritabanlarından biri olan Web of Science üzerinden 01.09.2020 tarihinde yapılan (konu: Kürsel Grafitli Dökme Demirler, Mekanik Özellikler, Yorulma) aramasında tüm yıllar için ve SCI-Expanded, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-SSH, ESCI indeksleri için yapılan aramada toplam 49 sonuç bulunmuştur. Çalışmalar KGDD'nin yorulma testlerinin ve mekanik özellikler üzerindeki değışikliklere göre sınırlandırıldığında 17 adet sonuç elde edilmiştir.

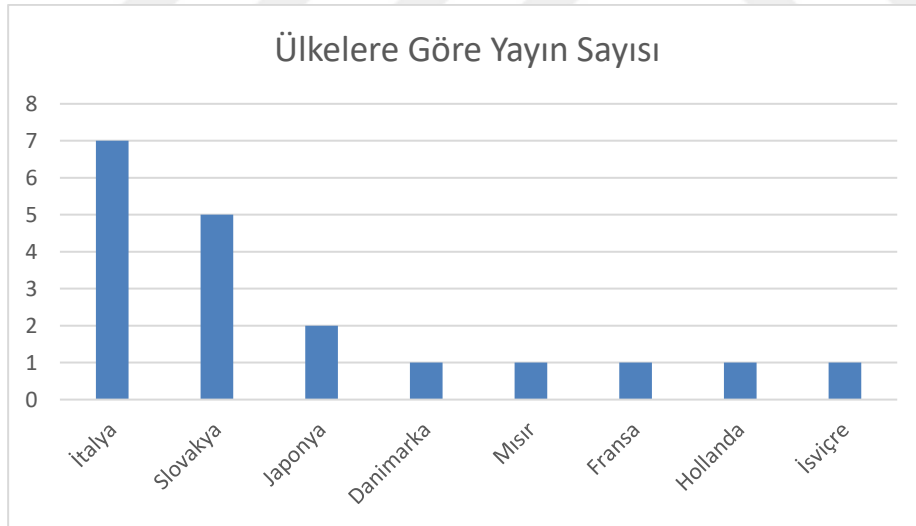
Belirlenen 17 çalışma arasında ilk yapılan çalışma 1999 yılında gerçekleştirilmiştir. 2020 yılına kadar yapılan toplam 17 çalışmanın %60'tan fazlası olan 11 adedi son 3

yıl içerisinde ortaya konmuştur. Çalışma sayılarının yıllara göre dağılımı Şekil 1.1’ de incelenmiştir.



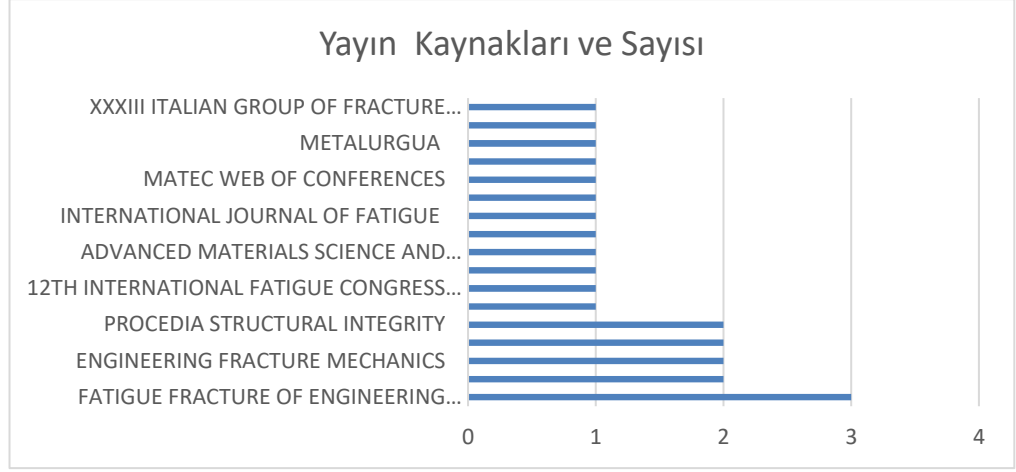
Şekil 1.1 Yıllara göre yayın sayısı.

Belirlen 17 çalışmanın yapıldığı ülkeler incelendiğinde ise en fazla çalışmanın %40 ile İtalya’da olduğu, ardından %30 ile Slovakya’da olduğu görülmektedir. 1999 yılında başlayan bu çalışmalarla ilgili günümüze kadar incelemeyi ilgili veritabanında yaptığımızda Türkiye’den herhangi bir çalışma olmadığı görülmüştür.



Şekil 1.2 Ülkelere göre yayın sayısı.

Ek olarak belirlenen 17 yayının yayınlandığı dergi isimleri ve yayın sayıları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.



Şekil 1.3 Kaynaklara göre yayın sayısı.

Sonuçlardan anlaşılaçağı üzere tezin belirlenen konusu güncelliğini korumakla birlikte, geliştirmeye ve araştırmaya oldukça açıktır. Endüstrinin beklentileri doğrultusunda üretilecek yeni malzemeler için yol gösterici olabilecek nitelikte çalışmalar mevcuttur.

1.3 Hipotez

Kürsel grafitli dökme demirler yüksek çekme dayanımına sahiptirler. Bir malzemenin yorulma dayanımı ise o malzemenin çekme dayanımı ile doğrudan ilişkilidir. Standart bir kimyasal kompozisyona sahip KGDD ile çekme dayanımını arttırmak için farklı bir element eklenmiş malzeme arasında yorulma dayanımları açısından fark olması beklenir. Bu doğrultuda GGG50 sınıfı standart malzeme ile farklı oranlarda bakır ihtiva edilmiş GGG50 malzeme arasında yorulma dayanımları açısından fark olması olasıdır. Zira; bakır ilavesinin çekme dayanımına olumlu yönde katkı yaptığı anlaşılmaktadır. Yapılan bakır ilaveleri neticesinde GGG50 malzemenin yorulma dayanımının, belirlenen 300 MPa gerilme altında , $R=-1$, 25Hz frekansta ve oda sıcaklığında artması beklenmektedir.



2. DÖKME DEMİRLER

Döküm sektöründe kullanım miktarı açısından ilk sıradaki malzeme gri dökme demirdir. Dökme demirler benzer nitelik ve bileşenlere sahip olsa bile üretim metodları ve kullanım alanları oldukça geniş bir spektrumdadır. Dökme demirlere talebin bu denli yüksek olma sebeplerinden en önemli iki sebebi ise; maliyet avantajı ve mühendislik gereksinimlerini iyi bir şekilde karşılayabiliyor olmasıdır. [9-10]

2.1 Dökme Demirlerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Genel anlamda dökme demirler karbon içeriği %2'den başlayarak %6.67'ye kadar olan demir-karbon-silisyum alaşımlarıdır; fakat yüksek karbon oranlarının malzemenin sünekliğini ciddi ölçüde azaltması nedeniyle endüstrideki uygulamalarda karbon oranı %2 ile %4 arasında olan dökme demirler tercih edilmektedir. Dökme demirlerin birden fazla alaşımı vardır ve ötektik reaksiyon neticesinde oluşurlar. İçerisindeki alaşım elementleri genellikle çoktan aza doğru %2-4 C, %0.4-3.5 Si, %0.4-0.8 Mg, %0.1-0.8 P, %0.05-0.1 S şeklindedir. Bahsedilen elementler dışında dökme demirlerin içerisinde bakır, alüminyum, krom, nikel, molibden gibi alaşım elementleri de bulunabilir. [11]

Çeliklerle kıyaslandığında, dökme demirlerin ergime sıcaklığı daha düşük olmakla beraber akışkanlığı daha iyidir ve kalıplandıkları malzemeler ile olumsuz reaksiyonlara girme potansiyelleri daha düşüktür. Bileşiminde bulunan yüksek karbon miktarı dökülebilme özelliklerini iyileştirirken, aynı zamanda çeliğe göre daha düşük bir yoğunluk sağlar. Ancak bu iyi özelliklerine rağmen, döküldüklerinde gevrek bir yapıda olduklarından soğuk ve sıcak olarak şekillendirme yapılamamaktadır. [9-10]

Dökme demirler endüstrideki kullanım yoğunluklarına göre 5 ana grupta incelenmektedir. Bunlar gri dökme demir, temper dökme demir, beyaz dökme demir, küresel grafitli dökme demir ve alaşımlı dökme demirlerdir. Bahsedilen dökme

demirlerin şematik gösterimi Çizelge 2.1’de, kimyasal içerikleri ise aşağıdaki Çizelge 2.2’de gösterilmiştir. [12-13]

Çizelge 2.1 Dökme demirlerin mikroyapı özelliği ve kırılma görüntüsüne göre kategorize edilmesi [14].

Sınıfı	Zengin Faz	Matris	Kırılma Görünümü	Nihai İşlem
Gri	Lamelli Grafit	Perlit	Gri	Katılaşma
Sünek	Küresel Grafit	Ferrit, Perlit, Östenit	Gümüş	Katılaşma
Yumru Grafitli	Yumru	Ferrit, Perlit	Gri	veya Isıl İşlem
Beyaz	Sementit	Perlit, Martenzit	Beyaz	Katılaşma
Benekli	Lamel Grafit+Sementit	Perlit	Benekli	veya Isıl İşlem
Temper	Temperleniş Grafit	Ferrit, Perlit	Gümüş-Gri	Katılaşma
Östempelenmiş	Küresel Grafit	Beynit	Gümüş-Gri	Isıl İşlem

Çizelge 2.2 Çeşitli dökme demirlerin kimyasal kompozisyonu [10-14].

Dökme Demir	Kimyasal Bileşim % Ağırlık				
	C	Si	Mn	P	S
Gri	2,5-4,0	1,0-3,0	0,2-1,0	0,002-1,0	0,02-0,25
Yumru Grafitli	2,5-4,0	1,0-3,0	0,2-1,0	0,01-0,1	0,01-0,03
Sünek	3,0-4,0	1,8-2,8	0,1-1,0	0,01-0,1	0,01-0,03
Beyaz	1,8-3,6	0,5-1,9	0,25-0,8	0,06-0,2	0,06-0,2
Temper	2,2-2,9	0,9-1,9	0,15-1,2	0,02-0,2	0,023-0,2

3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

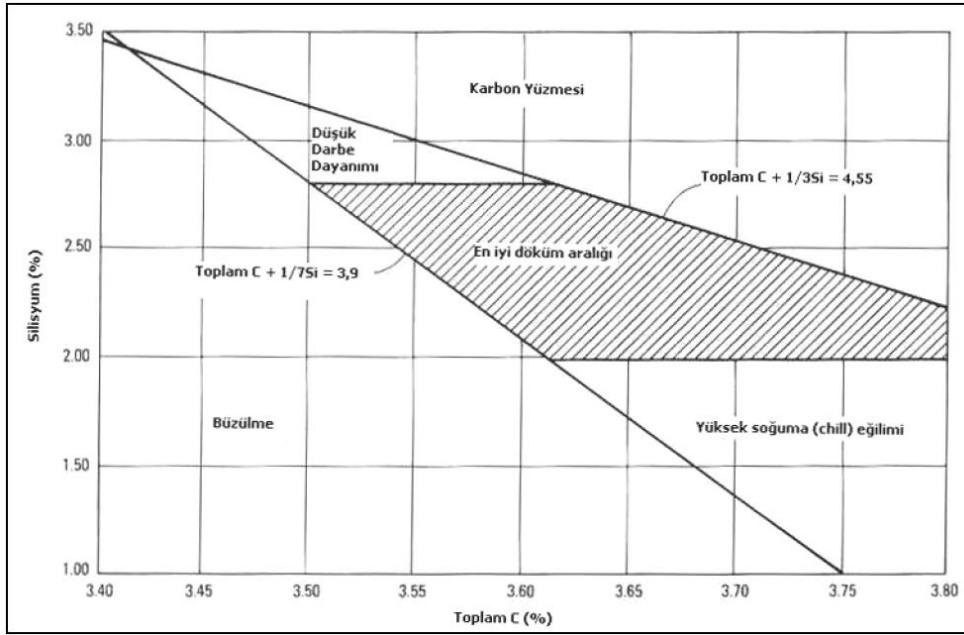
Küresel grafitli dökme demirin farklı isimlendirmeleri mevcuttur ve bunlar; sfero, nodüler, duktıl şeklindedir. Bileşimleri gri dökme demirlerle aynı olmasına rağmen içerisindeki grafit küre şeklinde olduğundan küresel grafitli dökme demir olarak adlandırılırlar.

3.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Özellikleri

Ergimiş metal ihtiva edilen Mg ve Ce grafitin küre şeklini almasını sağlar. KGDD'ler, farklı dökme demirlerle kıyas edildiğinde daha yüksek mukavemet sağlamasının yanı sıra düşük ergime sıcaklığı ve iyi akışkanlığın getirdiği kolay dökülebilirlik özelliğini de sağlamaktadır. Bu bağlamda çeliğin ve dökme demirlerin mühendislik faydalarına sahiptir. Bu avantajlarının yanında ısıtma işlemi tabii tutularak istenen performans özelliklerinin elde edilebilir olması da kullanımını yaygınlaştırmaktadır. [15]

3.1.1 Küresel grafitli dökme demirin üretim yöntemleri

Küresel grafitli dökme demirlere farklı ısıtma işlemleri uygulanarak farklı mikro yapılar elde edilebilir. Bu iç yapı farklılıklarına göre malzemenin sınıflandırması gerçekleştirilir. Yüksek sıcaklıklarda östenitik yapıda olan küresel grafitli dökme demirin 735 C°'nin altında yapısı değişmektedir. Östenit fazında çözünebilir karbon oranı %1 mertebesinde dir. Bileşimdeki karbonun ferrit fazındaki çözünürlüğü ise çok düşüktür. Bu nedenle östenitin ferrite dönüşümü esnasında %1 karbon östenitten ayrışır. Serbest kalan karbon karbür olarak gelişir ve küresel grafit üzerinde katılır. Östenit içinde bulunan karbonun yeterli zaman bulması durumunda tam çözünmesi gerçekleşir ve yapı ferrite dönüşmüş olur. Yapının içerisinde ise düzensiz dağılmış küresel grafitler bulunur. Genellikle serbest kalan karbon grafitlerin bulunduğu alanlara kadar ilerleyemez. [16]



Şekil 3.1 KGDD 'lerde döküm aralığının grafik gösterimi [17].

3.1.2 Ergitme prosesi

Küresel grafitli dökme demirlerin üretimi indüksiyon veya döner ocaklarda üretilebileceği gibi kupol ocaklarında da üretim yapılabilir. Üretim sırasında tüm kademelerde gerekli kontrollerin yapılması, istenen malzeme kalitesinin elde edilmesi için önemlidir. Bu doğrultuda kalite problemlerinin önüne geçecek önlemlerin alınması durumunda maliyet anlamında en avantajlı yöntem kupol ocağı kullanılmasıdır. Kupol ocağının maliyet avantajının yanında koktan oluşacak kükürtün dökümün içine girmesine bağlı istenen kaliteye ulaşılamaması gibi bir riski vardır. Buna bağlı olarak nihai üründen kükürtün uzaklaştırılması için ek proses uygulaması yapılır. İndüksiyon ocakları ise maliyet olarak yüksek kalmasına rağmen daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tercihin sebebi ise kontrolün daha kolay olması, kükürtün malzemenin içine nüfuz etme riskinin olmaması ve kupol ocaklarının aksine istenen yüksek sıcaklıklara ulaşılabilmesidir. İndüksiyon ocaklarının bir diğer avantajı ise malzeme kullanımında sınır olmamasıdır; yani istenmesi durumunda %100 çelik hurdasından bile istenen kalitede küresel grafitli dökme demir elde edilebilmektedir. [18-19]

3.1.3 Ana metal analizi

Üretilen küresel grafitli dökme demirin kalitesinin saptanabilmesi için ana metalin analiz edilmesi gerekir, buna paralel olarak karbon, silisyum, manganez, fosfor ve kükürt yüzdeleri incelenir. Yapılan ana metalin analizinde incelenen en önemli parametreler ise karbon eşdeğerliği ve malzemenin barındırdığı kükürt oranıdır. Magnezyum miktarının sabit kalabilmesi için kükürt oranının maksimum %0.03 olması gerekmektedir. Kükürt elementi lamel grafit oluşumunu desteklediğinden küresel grafitli dökme demirin oluşumuna engel olur, dolayısı ile kükürt miktarının kontrol altında tutulması önemli bir parametredir.

3.1.4 Kükürtün betaraf edilmesi

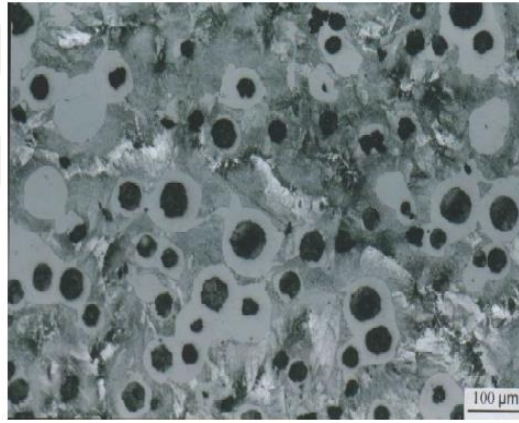
Kükürt giderme prosesi şarjın içerisindeki malzeme oranlarına ve seçilen ergitme yöntemine göre uygulanmaktadır. Küresel grafitli dökme demirler için bitmiş üründe düşük kükürt oranı gerektiğinden, kullanılacak karbonlaştıracının da aynı şekilde yüksek karbonlu ve düşük kükürt oranına sahip olması gerekmektedir. İndüksiyon ocaklarının yapısı gereği cüruf reaksiyonları kullanılarak kükürtün giderilmesi mümkün olmamaktadır. [18-19]

3.1.5 Küreselleştirme

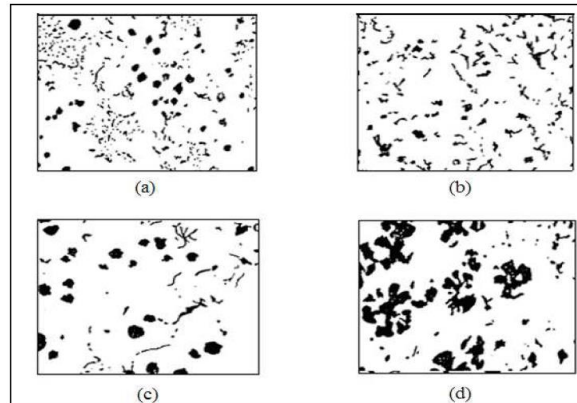
Küresel grafitli dökme demirlerin içerisindeki küresel grafitin şeklini alabilmesi için kullanılabilir element seçeneği geniş olsa da güncel uygulamalarda magnezyum, seryum veya kalsiyum yaygın olarak kullanılmaktadır. Grafitin küreselleştirilmesi için kullanılması gereken magnezyum miktarı genelde %0.01 kadar iken, parametrelere bağlı olarak %0.02 kadar kullanılabilir. Ancak küreselleştirici olacak kullanılacak element yalnızca magnezyum ise, toplam magnezyum oranı %0.02'den az olmamalıdır. Seryum ve kalsiyumun beraber kullanıldığı durumlarda ise magnezyumun alt limiti %0.01'dir. Buna ek olarak, artan kükürt miktarının küreselleşmeyi engellemesinin önüne geçebilmek için kullanılan magnezyumun miktarının artırılması gerekmektedir, bu doğrultuda döküm yapılan uygulama alanlarında %0.05 magnezyuma kadar müsaade edilmektedir. [18-19]

3.1.6 Küreselleştirme prosesinde kalite kontrolün sağlanması

İstenen malzeme kalitesinin yakalanabilmesi için dökümhanelerde yaş analiz yöntemlerinin yanı sıra spektrometreler ve atomik absorpsiyon cihazları kullanılır. Bu analizler sayesinde istenen element oranları standartlar içerisinde tutulabilir ve beklenen kaliteye ulaşılabilir. Küresel grafitli dökme demirin kalitesini belirleyen en önemli parametre grafitin şeklidir. Dolayısı ile grafitin küreselleşme aşamalarının takip edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple her şarjda özellikle son dökümden numune alınıp incelenmelidir, böylelikle aşılamanın etkisinin azalıp azalmadığı ve sıcaklık düşmesinin etkisi gözlemlenebilir. Buna ek olarak malzeme içerisindeki küresel grafitin sayısı, prosesin kalitesiyle ilgili önemli bilgiler verir. Özellikle grafit sayısının minimum 100 adet/mm² olması beklenir, bu sayı dağlanmış numuneler üzerinden 100 kez büyütme yapılarak metal mikroskobunda belirlenir. [18-19]



Şekil 3.2 Grafit hatası içermeyen KGDD mikro yapısı [15].



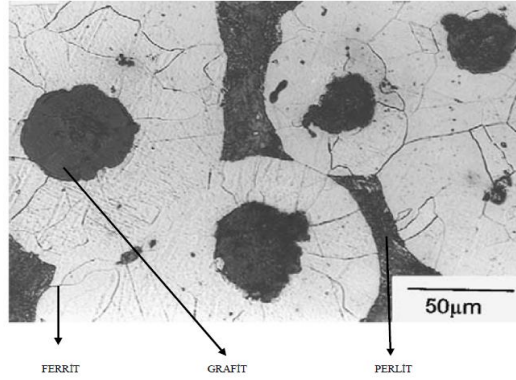
Şekil 3.3 KGDD’de grafit hataları [16] a) Gelişmemiş grafit, b) Yarı lamelli grafit, c) Küçük lamelli grafit, d) Patlamış grafit.

3.1.7 Aşılama

Metalurjik olarak aşılama terimi, eriyik metal içinde istenen çekirdek sayısına ulaşılabilmesi için yapılan prosestir. Grafitin büyüyebilmesi için bu çekirdekler gereklidir, küresel grafitlerin oluşması aşılama işlemi ile gerçekleştirilir. Öncesinde demir-silisyum-magnezyum ile yarı aşılanmış olan eriyik, aşılamadan sonra çok sayıda çekirdeğe sahip olur. Buna paralel olarak karbür oluşumu engellenmiş olur. Aşılama genel olarak magnezyum uygulamasının ardından ve dökümden hemen önce gerçekleştirilerek etkisinin maksimum seviyede olması sağlanır. [18-19]

3.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Matris Yapıları

Dökme demirlerin matris yapıları yalnızca ferrit, ferrit ve perlit kombinasyonu veya yalnızca perlit şeklinde olabilir. Dökme demirlerin alaşımlı tiplerinde ise yapı östenitik veya beyritik olabilir. KGDD'lerin özellikleri incelendiğinde genelde sınıflandırmasını içeriğindeki fazların belirlediği görülmektedir. Matris yapısını etkileyen faktörler ise ısıtma işlemi, alaşım için kullanılan elementlerin ne olduğu ve soğuma hızıdır.



Şekil 3.4 KGDD mikro yapısındaki fazlar [20].

3.2.1 Ferritik yapı

Metalik yapının büyük bir kısmını ferrit ve kalan %10'luk kısmını perlit oluşturmaktadır. Matrisin büyük oranda ferrite sahip olması sayesinde yüksek süneklik ve tokluk değerleri elde edilir. Buna bağlı olarak darbe direnci yüksektir, üretimi nedeniyle sağladığı maliyet avantajı nedeniyle birlikte mühendislik uygulamalarında

yaygın olarak kullanılmaktadır. Ferrit oluşumunu destekleyen ana elementlerden bazıları silisyum, titanyum ve alüminyumdur. [18-21]

3.2.2 Ferritik + perlitik yapı

Matris ferrit ve perlitten oluşmaktadır. Buna bağlı olarak son ürün, ferrit ve perlitin ortak mekanik performansına sahiptir. Bu küresel grafitli dökme demir ferritten gelen süneklik, darbe dayanımı ve kolay işlenebilirlik gibi özelliklerin yanı sıra perlitten gelen mukavemet özelliklerini beraber taşımaktadır. [18-22]

3.2.3 Perlitik yapı

Matris yapısı perlitten oluşmaktadır. Perlitin özelliklerinden dolayı malzeme kolay işlenebilir olup aşınmaya karşı dirençlidir. Fakat malzeme sert olduğundan darbe dayanımı diğer tiplere göre daha düşüktür. Perlit oluşumunu destekleyen elementlerden bazıları ise bakır, mangan, silisyum, kalaydır. [18-22]

3.2.4 Martenzitik yapı

Martenzit doğası gereği çok sert; fakat buna bağlı olarak çok kırılgandır. Aşınma direnci çok yüksek olup, östenit sıcaklığından (870-925 Co) hızlı soğutularak üretilir. Malzemenin çok sert yapısının genel mühendislik uygulamalarına çok uygun olmaması nedeniyle genelde temperleme yapılarak kullanılır. [18-22]

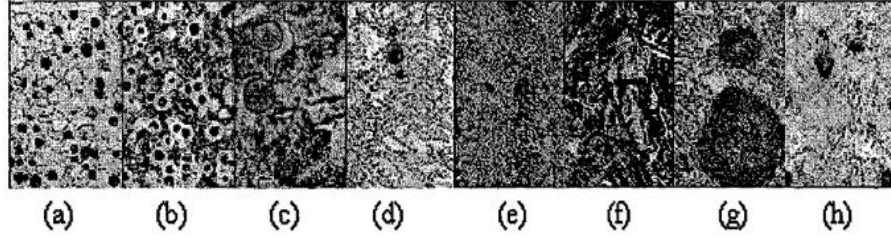
3.2.5 Beynitik yapı

Beynit yapısı alt ve üst beynit olarak ikiye ayrılır. Perlitle kıyaslandığında sünekliği ve buna bağlı darbe dayanımı daha düşüktür; fakat mukavemeti daha yüksektir. Aşınma direnci yüksektir, bununla beraber işlenebilirliği de oldukça iyidir. İzotermal yöntemle veya aşılama tekniği kullanılarak üretildiğinden diğer yapılara göre maliyeti daha yüksektir. Ostemperleme ısı işlemine tabii tutulan küresel grafitli dökme demirler beynitik yapıda olmaktadır. [18-22]

3.2.6 Östenitik yapı

Saf demir özelliklerine sahip olduğundan mukavemeti düşüktür, sünekliği ve tokluğu yüksektir, işlenebilirlik özelliği ise iyidir. -60 Co'de dahi yapısı bozulmadan

kalmaktadır. Östenitik yapı oluşturmak için %18 Ni ilavesi yeterlidir. Aşağıdaki şekilde, yukarıda açıklanan tüm yapıların görselleri bulunmaktadır. [18-22]



Şekil 3.5 Küresel grafitli dökme demirlerin farklı matris yapıları [23]

a) Ferritik b) Ferritik+Perlitik c) Perlitik d) Martenzitik e) Temperlenmiş Martenzitik f) Beynitik g) Beynitik h) Östenitik.

3.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Ulusların küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırmasında kullandıkları normlar ve gösterim şekilleri vardır. Buradaki sınıflandırmalar malzemenin çekme mukavemetine, akma mukavemetine, uzama, sertlik değerine ve matris yapılarına göre yapılmaktadır. Şekil 3.6'da küresel grafitli dökme demirler için ulusların standartları ve kıyaslamaları bulunmaktadır. [24]

ÜLKELER							ÖZELLİKLER					
TR	ISO	F	GB	NL	D	USA		Cekme Dayanımı	% 0.2 Uzama Dayanımı	Uzama	Sertlik	F:Ferritik veya P:Perlitik
TSE 526	ISO 1083 1976	AFNOR NF 32201	BS 2783 1973	NEN 6002D 1966	DIN 1693 1973	ASTM A536 1972	SAE J434B 1970	Mpa	Mpa	%	HB	F veya P
DDK 35.3					GGG35-3			350	220	22		
	370-17	FGS370-17	370-17					370	230	17	<=179	F
				GN38				373	245	17	<=180	F
DDK 40.3					GGG40-3			400	250	18		
								400	250	15	120	F
	400-12	FGS400-12						400	250	12	180	F
				GN42				412	275	12	<=201	F
						60-40-18		414	276	18	<200	
						D4018		414	276	18	149	F
DDK 40			420-12					420	250	12	187	F
						65-45-12		448	310	12	<=170	
						D4512		448	310	12	<=201	F+F
				GN50				490	343	7	170	F+F
DDK50			500-7					500	310	7	207	F+F
	500-7	FGS500-7			GGG50			500	320	7	156	F+F
						80-55-06		552	379	6	217	
						D5506		552	379	6	170	P+F
				GN60				588	412	2	240	P
DDK60			600-3					600	350	3	170	P+F
	600-3	FGS600-3						600	370	3	241	P+F
					GGG60			600	380	3	170	P+F
				GN70				686	490	2	241	P
						00-70-03		689	483	3	187	
						D7003		689	483	3	241	P
DDK70			700-2					700	400	2	302	P
	700-2	FGS700-2						700	400	2	229	P
					GGG70			700	440	2	302	P
DDK80			800-2					800	460	2	229	P
	800-2	FGS800-2						800	480	2	302	F
					GGG80			800	500	2	210	P
						20-90-02		827	621	2	320	

Şekil 3.6 Ülkelere göre küresel grafitli dökme demir standartları ve gösterimleri [24].

3.4 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Uygulama Alanları

Küresel grafitli dökme demirlerin yüksek tokluk, aşınma ve yorulma performansları nedeniyle birçok farklı mühendislik uygulamasında kullanımı yaygındır. Endüstrideki kullanım alanlarına göre dağılımlar Çizelge 3.1’de belirtilmiştir. [24]

Çizelge 3.1 Küresel grafitli dökme demirlerin uygulama alanları [24].

DDK-40	DDK-50	DDK-60	DDK-70	DDK80
İnşaat iskele parçaları	Kompresör pistonları	Büyük dişliler	Kam milleri	Piston kolları
Fren merkezleri	Tekerlekler	Kağıt sanayinde haddeler	Kazıcı uçlar	Hadde silindirleri
Büyük tekerlekler	Pompa gövdeleri	Hidrolik control yatakları	Kavramalar	Krank milleri
Potalar	Dişli kutuları	Uçak motor parçaları	Pistonlar	Kam milleri
Fırın ve ocak kapakları	Traktör parçaları		Kalıplar	Soğuk kalıplar
Pnömatik makas ve pistonları	Valfler		Makine parçaları	Palet makaraları

Çizelge 3.1’de belirtildiği üzere küresel grafitli dökme demirlerin endüstrilerdeki kullanım alanları oldukça yaygındır. Özellikle tek parça halinde kullanılmak istenen otomotiv ve makine parçalarında oldukça geniş bir yelpazede kullanılmaktadırlar. En önemli sebeplerinden biri ise kullanılmak istenen parçanın döküm ile yekpare olarak dökülebileceği ve metal kalıp maliyetlerine girilmeden de ürünler üretilabiliyor olmasıdır.

Örneğin bir alüminyum döküm parçasını üretmek için metal kalıbının üretilmesi ve deneme ürünleri üretilerek kalıpta revizyonların yapılması gerekmektedir. İlgili küresel grafitli döküm parçaları için ise öncesinde bir tahta kalıp yardımıyla çıkacak ürünlerle ilgili fikir sahibi olunabilir. Maliyeti, dayanımı, üretim kolaylığı göz önüne alındığında yukarıdaki çizelgede belirtildiği gibi kullanım alanları günden güne genişlemektedir.

4. YORULMA

Mühendislik uygulamalarında kullanılan makine parçaları genellikle sabit yükler altında değil, değişken yükler altında çalışmak durumundadırlar. Parçanın maruz kaldığı yükler sabit olsa dahi, parçanın kesitinde oluşan yükler değişken olabilmektedir. Buna bağlı olarak birçok makine parçası değişken yükler veya titreşim altında çalışmaktadır. Özellikle sanayi devrimi ile yaygınlaşan buharlı makinelerin, çalışma mekanizmasındaki değişken streslere maruz kalan ve momenti aktaran parçaların kullanımının artmasıyla birlikte daha önce farkındalığı olmayan yorulma hasarı ortaya çıkmıştır. Sabit gerilme altında çalışmayan metal parçalarda, malzemelerin statik mukavemet değerlerinin altındaki tekrarlı gerilmelerde yüzey çatlaklarının oluştuğu, buna bağlı çatlağın malzemenin içine doğru ilerlediği, sonucunda ise malzemenin kırıldığı gözlenmektedir. Malzemede gerçekleşen bu hata mekanizması ise yorulma olarak tanımlanmaktadır. [25]

Malzemelerin statik yükler altında normal dayanım değerlerini gösterdiği; ancak gerilmelerin değişmesi ve tekrarlı olması durumunda malzemenin dayanımının düştüğü ve buna bağlı olarak yorulması fikri, ilk olarak 1850 yıllarında düşünülerek ortaya atılmıştır. Yorulma mekanizması ile ilgili ilk sistemli çalışmalar yine aynı yıllarda Agust Wöhler tarafından, demir yollarında kullanılan vagonların aksları üzerinde yapılmış olup, bu deneylerde Wöhler kendi yorulma deney sistemini kullanmıştır. İlk olarak metal malzemelere uygulanan gerilmelerin büyüklüğüne odaklanmasına rağmen, deney sonuçları yorumlandığında ortaya çıkan verilere göre uygulanan gerilme aralığının daha önemli olduğu anlaşılmıştır. Woehler yaptığı çalışmaların sonuçlarını S-N eğrisi adı verilen, gerilme-çevrim sayısı grafiklerinde göstermiştir. Woehler'in yapmış olduğu çalışmaların ardından, ortalama gerilmenin önemini ortaya koymak için Bach çalışmalarını sürdürmüştür. 1900'lü yıllarda ise yorulmanın nedenlerinin anlaşılabilmesi için optik mikroskoplar kullanılarak çeşitli deneyler sürdürülmüş olup, sonucunda ise mikro çatlakların oluşmasında kayma

bantlarının ve lokalize kayma doğrultularının yorulma mekanizmasının oluşabilmesi için önemi ortaya konmuştur. [26]

Değişken yükler altında çalışan makine parçalarında oluşan hasarlarının %80'inin yorulmaya bağlı olarak gerçekleştiğinin anlaşılmasından sonra bu malzemelerin dayanımlarının araştırılması istenmiştir. Ancak kullanılacak malzemelerin dayanımlarının uygulama alanında belirlenmesinin hem pahalı, hem de mühendislik açısından uygun olmaması nedeniyle laboratuvar ortamlarında malzemelerinin yorulma dayanımlarının anlaşılabilmesi çeşitli deneyler yapılmaktadır. Bu deneylerin sonuçlarına göre malzemenin statik olmayan yükler altındaki dayanımlarına dair temel bilgiler edinilebilmektedir. [27]

4.1 Yorulmanın Oluşumu

Malzemelerde yorulma hasarının oluşabilmesi için 3 ana unsurun aynı anda mevcut olması zaruridir. İlgili unsurlar ise aşağıdaki şekildedir;

- Yeterli çekme gerilmesi
- Değişken gerilmeler
- Plastik şekil değiştirme

Yukarıda belirtilen unsurlardan herhangi birinin oluşmaması durumunda malzeme üzerinde bir çatlak başlangıcı ve buna bağlı bir ilerleme gerçekleşmeyecektir. Gerilme değerindeki değişimler malzeme yüzeyindeki çatlağı oluşturur, çekme gerilmeleri ise oluşan çatlağın ilerlemesine neden olmaktadır. Yorulma mekanizmasının oluşumu ve gelişimi malzemenin mikro yapısıyla doğrudan ilgilidir, bunlardan bazıları ise matriks yapısı, tane boyutu ve yüzeydeki malzeme kayıplarıdır. [25]

1900'lü yılların ortalarında yapılan araştırmalar sonucunda, yorulma hasarının malzeme hatalarından veya tasarımdan gelen süreksizliklerden başladığı düşüncesi genel kanı haline gelmiştir. Bu düşünce doğrultusunda yapılan mikroskobik incelemeler neticesinde yorulma mekanizmasının üç adımda oluştuğu, bunların ise; çatlağın oluşması, çatlağın ilerlemesi ve buna bağlı olarak kırılmanın oluşması şeklinde olduğu ortaya konmuştur. [28]

Yorulma, oluşan çatlağın ilerlemesi ve malzemenin belirli bir çevrim sayısı sonrasında kırılması olarak tanımlanabilir. Buradaki tanımlama aşağıdaki denklem (4.1) ile açıklanabilir:

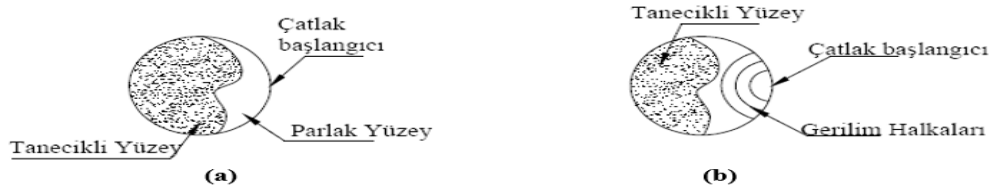
$$N_f = N_i + N_p \quad (4.1)$$

N_f : Kırılma için gerekli toplam yorulma çevrimi.

N_i : Çatlak başlangıcı için gerekli olan çevrim sayısı.

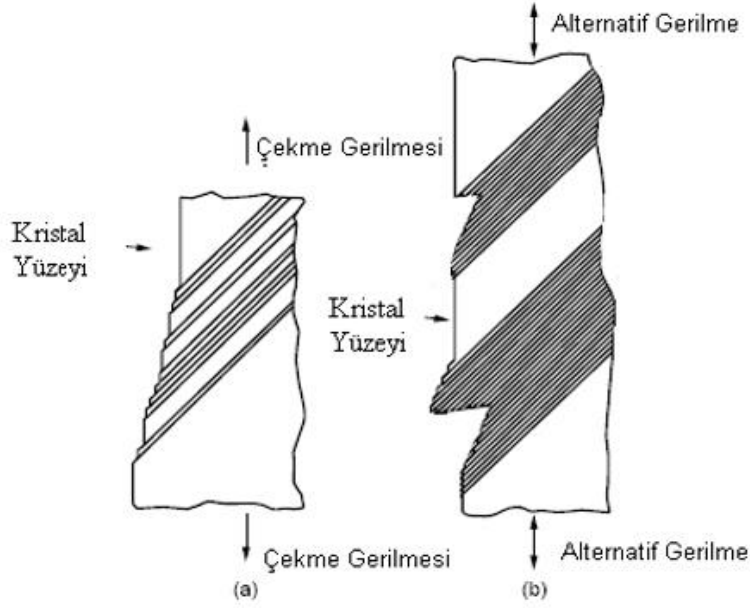
N_p : Çatlağın kırılana kadar ilerlemesi için gerekli olan çevrim sayısı [29]

Yorulma hasar mekanizması genellikle tekrarlı ve değişken yükler altında çalışan makine parçalarının yükü taşıyan aktif bölgede oluşan çatlağın ilerlemesi, bu bölgede kesitin daralması ve ilgili bölgenin kırılması şeklinde kendini gösterir. Çatlağın ilerlemesinin ve büyümesinin etkileri nedeniyle, kırılan malzeme incelendiğinde birbirinden ayırt edilebilir iki farklı yüzeyin oluştuğu gözlenir. Aşağıda genel bir yorulmaya bağlı kırılmanın görseli verilmiştir. Buradaki parlak yüzey çatlak ilerlemesinin yavaş olduğu, diğer yüzey ise kırılmanın gerçekleştiği bölgeye aittir.



Şekil 4.1 Yorulmaya istinaden kırılan parça yüzey görüntüleri; (a) çatlağın ağır ilerlemesi, (b) alternatif büyüklükte uygulanan gerilme neticesinde oluşan yüzey [29].

Yorulma mekanizması ile ilgili yapılan çalışmalar neticesinde, yorulmanın dislokasyonların hareketi ile ilgili olduğu ortaya konmuştur. Uygulanan gerilmeler, eksenel yüklerde terstir ve buna bağlı olarak oluşan kayma bantları yüzeydedir. Parça üzerindeki şekil değiştirme tekil bir ekseninde olduğunda, kayan bantların görünümü görece kolay bir şekilde anlaşılmaktadır. Ancak gerilmeler birden fazla ekseninde etki ettiğinde ve değişken şekilde olduğunda, ilgili kayma bantları yüzeyde toplanma eğilimindedir ve toplanan girintili çıkıntılı kayma bantlarının görüntüsü mikroskopik incelemeler açısından çok daha karmaşıktır. Buna ek olarak, yüzeyde oluşan girinti çıkıntılar malzemede gerilmelere neden olduğundan, çatlağın bu bölgelerde başlaması çok olasıdır. [29]



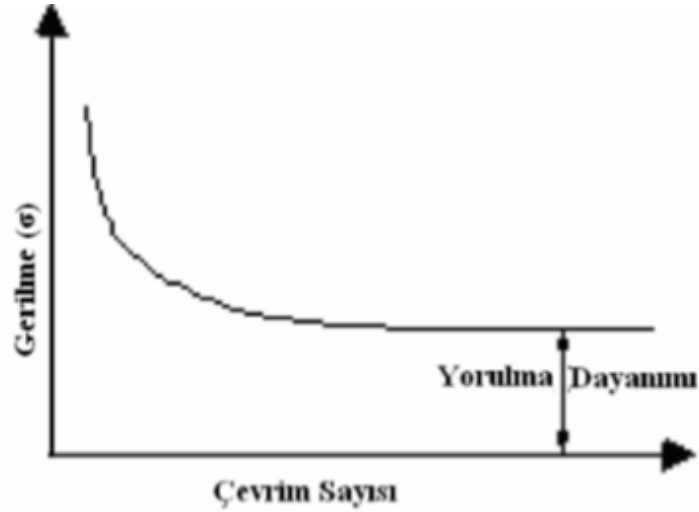
Şekil 4.2 Kayma bantları ile yüzey kesişimi a) çekme gerilmesi b) değişken gerilme [29].

4.2 Yorulma Dayanımının Saptanması

Malzemelerin yorulma dayanımı tespitinde genelde Wöhler yöntemi kullanılır. Wöhler yönteminde, şekil ve yüzey kalitesi olarak eşdeğerde olan numuneler, sürekli olarak belirlenen farklı seviyelerdeki zorlamalara tabii tutularak malzemenin kırılana kadarki çevrim sayısı belirlenir. Yapılacak bir yorulma dayanım testi için genellikle 6-10 adet arası numune kullanılır. Deney sırasında malzemenin maruz bırakıldığı gerilme değeri sabittir, bu değer değiştirilmeyerek sabit ve sürekli gerilme altındaki malzeme davranışı incelenir. Ancak çok kademeli yorulma deneylerinde, malzemeye uygulanan gerilme belirli aralıklarda değiştirilebilir, her bir gerilim için belirli çevrim sayılarında sabit tutularak deney gerçekleştirilebilir. Bu sayede malzemenin sürekli; fakat değişen gerilmeler altındaki davranışıyla ilgili sonuçlar elde edilebilir. [30]

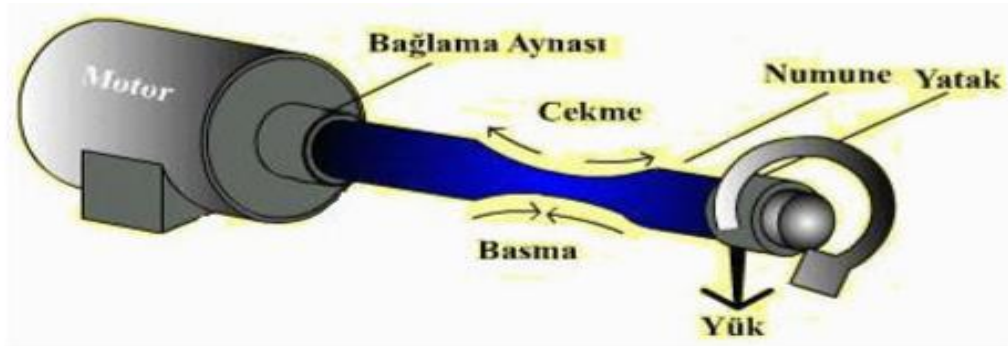
Yorulma dayanımı testlerinde amaç, malzemenin uygulanan gerilme altında kırıldığı çevrim sayısına ulaşmaktır. Wöhler'in deney metodunda, test için sabit tutulacak bir ortalama veya alt gerilim belirlenir, ardından gerilme genliği ayarlanır. Genellikle ilk numune, malzemenin akma sınırı civarında yüksek bir gerilim değeri ile zorlanır. Diğer numuneler ise, giderek azalan bir gerilme genliğine maruz bırakılarak, malzemenin kırılmadan sonsuz çevrime sahip olduğu yorulma dayanım sınırı bulunana kadar testler devam ettirilir. Test edilen numune parçalarının sonuçlarında dağınık bir

veri yoksa aşağıdaki örnek olarak gösterilen Wöhler grafiği elde edilir. Bu grafikte x eksenini çevrim sayısını, y eksenini ise malzemenin maruz bırakıldığı gerilme genliği değeridir.



Şekil 4.3 Wöhler eğrisi [29].

Yorulma dayanımı testleri için farklı test düzenekleri vardır, bunlardan temel olanı Şekil 4.4’te gösterilen dönen destekli kiriş yorulma testidir.



Şekil 4.4 Dönen destekli kiriş yorulma test düzeneği.

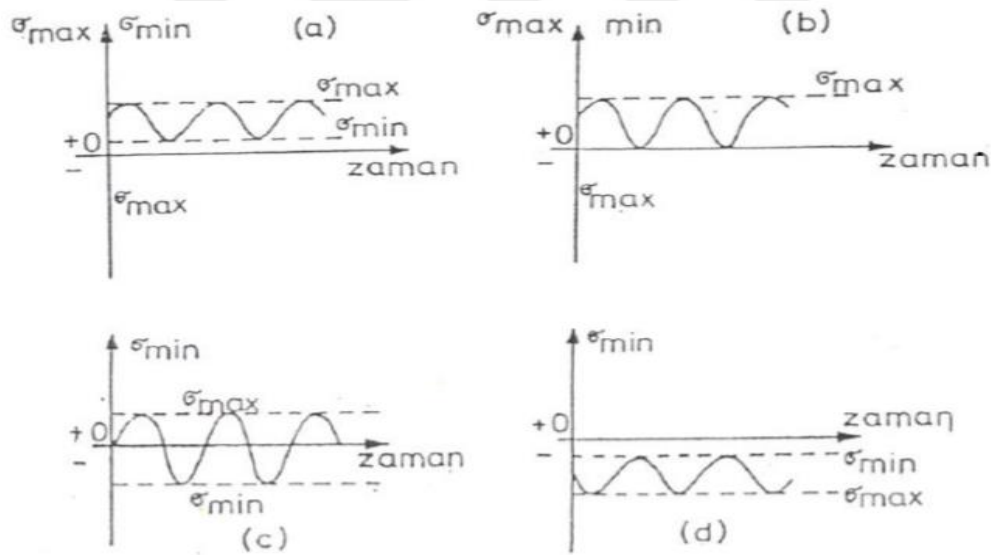
Yorulma testlerinde, malzemelere farklı genliklerde ve tekrarlı gerilmeler uygulanarak kırılmanın meydana geldiği çevrim sayısı gözlemlenir. Bu amaçla Şekilde 4.4’te gösterilen motorun bağlantı kısmına silindirik olan işlenmiş parçanın bağlantısı yapılır, diğer ucuna ise yük bağlanarak döndürülür. Test sırasında uygulanan yükten dolayı çekme kuvvetine maruz kalan parça 180 derece döndüğünde aynı parça basma kuvvetine maruz kalır. Dolayısı ile bir çevrim tamamlandığında malzeme hem çekme

hem basma kuvvetine maruz bırakılarak yorulma davranışı incelenir. Malzeme üzerine uygulanan maksimum maksimum gerilmenin gösterim şekli aşağıdaki denklem (4.2) ile açıklanır. [30]

$$\sigma = \frac{10,18 \cdot L}{d^3} \quad (4.2)$$

L: Çubuğun boyu, F: Yük, d: Çubuk çapı

Wöhler eğrilerinden elden edilen iki önemli sonuç vardır. Bunlardan birincisi yorulma ömrü, ikincisi ise yorulma dayanımıdır. Yorulma ömrü, malzemenin maruz bırakıldığı sürekli ve değişken gerilmenin altında kırılmanın gerçekleştiği çevrim sayısıdır. Yorulma dayanımında ise, belirlenmiş çevrim sayısında malzemenin dayanabildiği maksimum gerilme değeri belirlenir. [31]

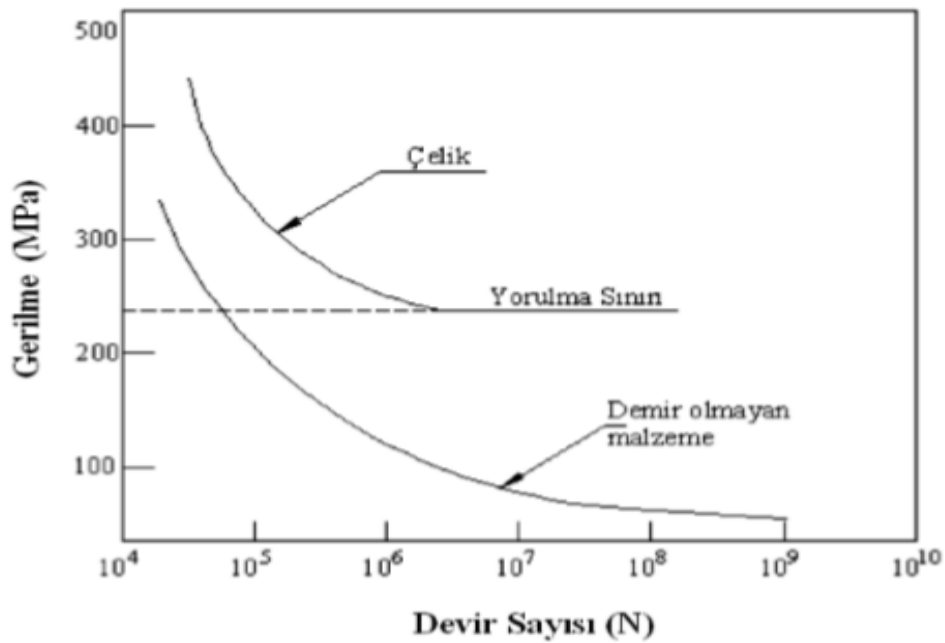


Şekil 4.5 Yorulma gerilme periyotları [27].

Yorulma testi cihazlarında gerilmeler, belirlenen gerilme değerleri arasında zamanın bir fonksiyonu olarak sinüzoidal şekildedir. Şekilde 4.5'te gösterilen durumlarda; (a) malzeme yalnızca belirlenmiş çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır. (b) durumunda malzeme aynı şekilde yalnızca çekme kuvvetinin etkisindedir; fakat minimum gerilme sıfırdır. (c) durumunda ise malzeme hem çekme hem basma kuvvetlerinin etkisi altındadır, bu durum alternatif gerilme olarak da adlandırılmaktadır. (d) durumunda ise değişen basma kuvvetlerinin etkisi altındadır. Yorulma testleri çevrim sürelerinin

fazla olması nedeniyle olabildiğince frekansı yüksek şekilde yapılmalıdır; ancak belirli koşulları bozarak malzemenin gerçek performansının ölçülmesini engellememelidir. [29]

Yorulma testleri sonucunda elde edilen grafiklerde eğrinin yatay olmaya başladığı bölge malzemenin yorulma dayanımını göstermektedir. Bu eğrinin altında, malzemenin sonsuz çevrime karşı dayanıklı olduğu kabul edilmektedir. Demir dışı malzemelerde ise 100 milyon çevrimden sonra dahi kabul edilebilir bir yorulma dayanım sınırı göstermemektedir. [27]



Şekil 4.6 Çelik ve demir dışı malzemelerin genel Wöhler gösterimi [28].

Demir dışı malzemelerde açık bir yorulma dayanım sınırı olmadığından genel kabul olarak aşağıda (4.3) denkleminde gösterildiği şekilde hesaplama yapılmaktadır. [32]

$$\text{Yorulma dayanım sınırı} = 1/3 \sigma_{\text{ç}} \quad (4.3)$$

4.3 Yorulma Deney Numunesi

Numune parçalarının planlamaları, incelenecek değişkenlere, deney koşullarına uygun olarak tüm gereklilikleri karşılayacak şekilde yapılmalıdır. Malzeme deneyleri tek bir parça için ise basit şekilde hazırlanabilir. Fakat bütünü oluşturan birden fazla parça

mevcut ise, gerçek duruma en yakın biçimde, tüm yük dağılımları ve parçaların ayrı ayrı maruz kalacakları gerilmeler hesaplanarak çalışma gerçekleştirilmelidir. [33]

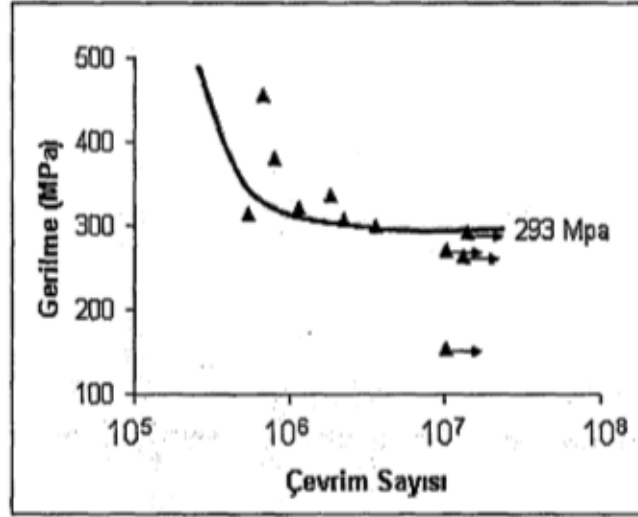
Yorulma hasarları, malzemenin yüzeyinde başlayan çatlaklar nedeniyle gerçekleştiğinden kopmalar yüzeyden başlar. Dolayısı ile bir makine parçasının veya yapı elamanın yüzey kalitesi, yorulma performansı açısından son derece önemlidir. Yorulma dayanımı belirlenecek parçalar için birden fazla numune temin edilmesi gereklidir; zira yorulma dayanımının belirlenmesinde yapılacak testlerde farklı yükler uygulanarak değişik çevrim sayıları incelenecektir. [33]

Deney numuneleri hazırlanırken yüzey hazırlık çalışmalarının neden olabileceği yüzey hasarları, fazla ısınma ve yüzeysel gerilmelerin önceden hesaba katılarak parlatma işlemlerinin yapılması gerekmektedir. [33]

Temin edilecek numunelerde bilinçli olarak çentik, boyut değişikliği, delik gibi süreksizlikler isteniyorsa, yukarıda bahsedilen parlatma işleminden doğabilecek etkileri de göz önünde bulundurularak hazırlık yapılmalıdır. [33]

Deney numunesini düzeneğe bağlarken ekstra bir gerilmeye maruz kalmayacağı şekilde işlemler yapılmalıdır. Teste tabii tutulacak tüm numune parçalar aynı koşullarda proses edilmelidir. Deney süresi ise, testi gerçekleştirilen malzemenin karakteristik özelliği olup değişkendir. Fakat çelikler için genel olarak 10^7 çevrim olarak alınmaktadır.

Yorulma testlerinin çıktıları genel olarak grafik olarak verilmektedir. Yatay ekseninde çevrim sayısı, düşey ekseninde ise malzemeye uygulanan gerilme değeri bulunur. Bu sayede malzemenin hangi gerilme altında hangi çevrime kadar kırılmadan çalışabildiği bilgisine ulaşılır. Örnek olarak aşağıda östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir S-N eğrisi verilmiştir. [33]



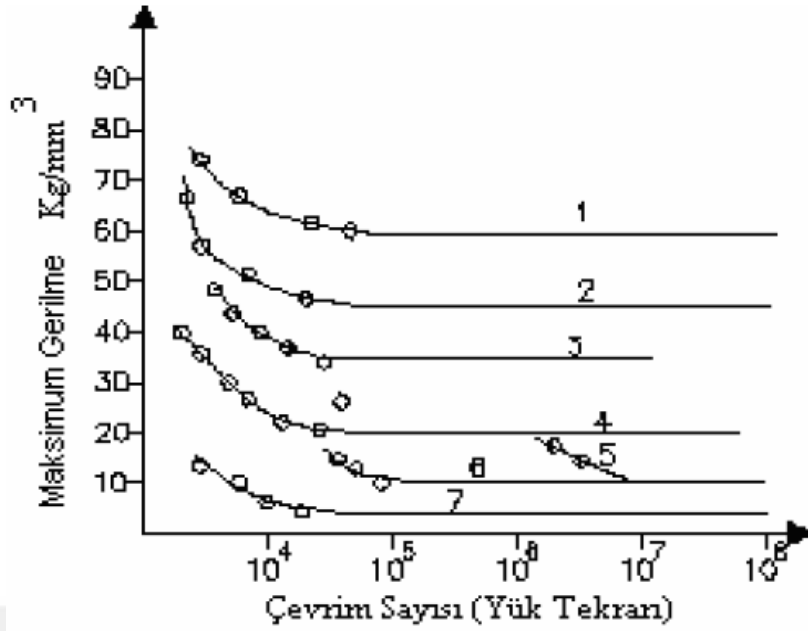
Şekil 4.7 Dönen eğmeli yorulma testi yapılan parça S-N eğrisi [33].

4.4 Yorulma Dayanımını Etkileyen Faktörler

Malzemelerin yorulma dayanımını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlardan bazıları malzemenin kendi özellikleriyle, bazıları çalıştığı ortamın şartlarıyla, bazıları maruz kaldığı gerilmelere, bazıları ise malzemenin tasarımına bağlıdır.

4.4.1 Malzeme özellikleri

Yorulma dayanımı incelenirken, genel olarak malzemenin çekme dayanımı arttığında yorulma dayanımının da arttığı gözlemlenir. Malzemelere eklenen alaşım elementleri veya uygulanan su verme gibi işlemlerle çekme dayanımları ve sertlik değerleri artırıldığı gibi, aynı zamanda yorulma dayanımı sınırının da artması sağlanır. [34] Malzemelerin yorulma dayanımı özelliklerini etkileyen önemli durumlardan biri ise parçanın içerisindeki inklüzyonlardır. Örneğin malzemenin içindeki kükürt miktarına bağlı olarak metal olmayan inklüzyonların oluşması teşvik edilir, dolayısı ile malzemenin yorulma dayanımında azalma meydana gelir. Çelik malzemelerde yorulma sınırına genel olarak 10^6 - 10^7 çevrim sonrası ulaşılmaktadır. Demir dışındaki malzemelerde ise çeliklerde görüldüğü gibi keskin bir yorulma dayanım sınırı bulunmamaktadır. [35-36] Aşağıdaki Şekil 4.8’de farklı proseslere tabii tutulmuş malzemelerin yorulma performanslarına dair grafik verilmiştir.

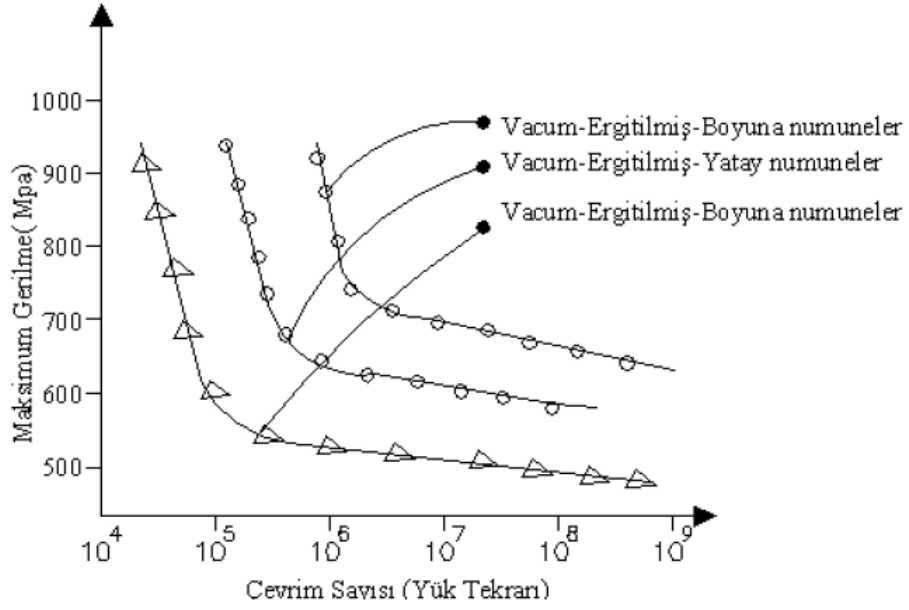


Şekil 4.8 Farklı malzemelerin yorulma dayanım değerleri.

- | | |
|------------------------------|--|
| 1. Su verilen % 1,2 C çelik | 2. Su verilen Cr, Ni içeren çelik |
| 3. Su verilen % 0,53 C çelik | 4. Sıcak haddeleme yapılan yapı çeliği |
| 5. Al-Cu kompozisyonları | 6. Soğuk haddeleme yapılan tavlanmış bakır |

4.4.2 İnküzyonlar ve mikro yapı hataları

Genellikle yorulma hasarını meydana getiren çatlaklar, yüzeye yakın gevrekleşen tanelerin sınırlarında, kayma bantları üzerinde, yüzey pürüzlülüğünün fazla olduğu bölgelerde, kaynaklı yapılarda kaynağın olduğu yerlerde ve geometrik olarak keskin değişimlerin olduğu bölgelerde meydana gelir. [31] Daha önce de bahsedildiği gibi metal dışı inklüzyonlar malzemelerin yorulma dayanımlarına olumsuz etki etmektedir. Örnek olarak aşağıdaki Şekil 4.9’da orta karbon bileşimine sahip çeliklere ait yorulma dayanımları verilmiştir. Özellikle malzemelerin üretim aşamalarında inklüzyonlar oluşabildiğinden, malzemelerin üretim yöntemleri önem kazanmaktadır. Örneğin Şekil 4.9’da verilen grafikte üst ve orta eğriler, vakum ortamında ergitilen çeliklere ait olmakla beraber, alttaki eğriye sahip malzemenin üretim yöntemi hava ortamında ergitmedir. Hava ortamında ergiyen malzemelerin, gazları yapısına alma eğilimi daha yüksek olduğundan, yapısında daha fazla inklüzyon barındırmaktadır. Bunun da yorulma dayanımına etkisi açıkça görülebilmektedir. [37]



Şekil 4.9 İnküzyonların düşük alaşımlı çeliklerde yorulma dayanımına etkisi.

4.4.3 Geometrik faktörler

Farklı gerilimler altında zorlamaya maruz kalan parçaların merkezine göre yüzeylerinde daha fazla gerilim oluşmaktadır. Bu sebeple, yorulma hasar mekanizmalarında çatlaklar yüzeyden başlamaktadır. Ancak oluşan bu çatlakların ilerleme hızları ve boyutları malzemenin kesit özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. [34] Bu doğrultuda genellikle çeliklerde malzemenin boyutunda artış olduğunda, yorulma dayanımında düşüş gözlemlenmektedir. Bu duruma örnek olarak yorulma dayanım testlerinde kullanılan numune parçaların çaplarındaki değişiklikler verilebilir. Numune parçanın çapı 6mm değerini aştığında, daha küçük çaplara göre yorulma performansında %20 bir düşüş görülmektedir. Bu durumun nedeni ise, ilk olarak malzemenin yüzeyinde bulunan hataların yüzey alanının artışıyla doğru orantılı olmasıdır. İkinci olarak ise, parçanın yüzey alanı arttığında malzemenin maruz kaldığı burulma ve bükme kuvvetlerinin eğiminin artmasına bağlı olarak gerilmeye maruz kalan bölgelerin artmasıdır. [38]

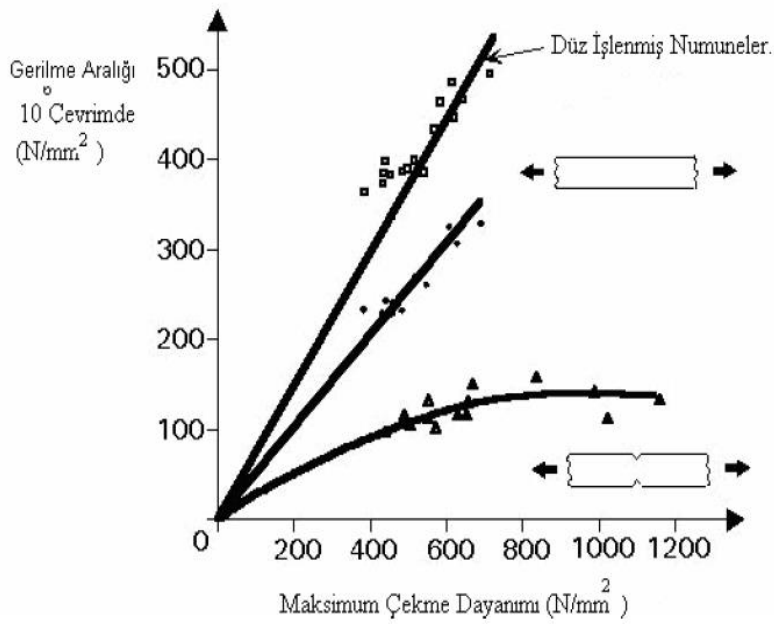
Parçanın artan boyutuyla azalan yorulma dayanımının ilişkisi aşağıdaki Çizelge 4.1’de verilmektedir. [38]

Çizelge 4.1 Çelik şaft için parça kesitinin yorulma dayanımına etkisi.

Numune Çapı		Yorulma Dayanım Sınırı	
mm	inç	MPa	Ksi
7,6	0,30	248	36
152	6,00	144	21

4.4.4 Çentik etkisi

Parçaların kesitlerinde bulunan çentik, delik, ani kesit değişimleri gibi süreksizlikler yorulma dayanımına olumsuz yönde ciddi bir etkiye sahiptir. Örnek olarak vida dişlileri veya kama yuvaları gibi bölgelerde gerilmeler yığılır ve bu durum çentik etkisi yaratır. Çentik etkisine bağlı olarak oluşacak yorulma çatlağı teşvik edilmiş olur. [31] Parçanın üretim yöntemlerine bağlı olarak oluşacak yüzeydeki üretim hataları veya tasarımdan kaynaklı süreksizliklerin neden olacağı çatlakların etkisi çentikli numune kullanılarak yapılacak yorulma dayanım testlerinde belirlenebilir. Bu etkinin deneysel sonuçları aşağıdaki Şekil 4.10’da verilmiştir. [35-36]



Şekil 4.10 Yorulma dayanım sınırına çentik etkisi.

4.4.5 Yüzey işlemlerinin etkisi

Yorulma hasarlarıyla ilgili yapılan çalışmalarda, hasarın oluşumuna katkı yapan çatlakların genel olarak yüzeyden başladığı görülmektedir. Bu sebeple, yüzeyin tabii tutulduğu mekanik işlemler ve buna bağlı yüzey kaliteleri ciddi bir önem arz etmektedir. [39] Malzemelerin maruz kaldığı eğme, bükme, kesme gib kuvvetler ilk olarak parçanın yüzeyine etki ettiğinden, çatlakların bu bölgelerde oluşması beklenen bir davranıştır. Yorulma deneylerinde kullanılan numunelerin yüzeylerini etkileyen faktörler 3 grupta toplanabilir.

- 1) Yüzey pürüzlülüğü
- 2) Yüzeyin yorulma mukavemetindeki değişiklikler
- 3) Yüzeyin kalıntı gerilme altındaki değişiklikler

Bahsedilen 3 ana unsura ek olarak, parçaların yüzeyleri oksidasyonun ve korozyonun etkisi altında kalmaktadır. [35]

Tüm bu bilgilerin ışığında, malzemelerin yüzeylerinin kalitesinin artırılması yorulma dayanımının artırılması için kritik düzeyde öneme sahiptir. Örneğin yüzeyi parlatılmış parçaların yorulma dayanımı, yüzey parlatma yapılan parçaya göre daha yüksektir. Yüzey kalitesinin etkileri aşağıdaki Çizelge 4.2’de verilmiştir.

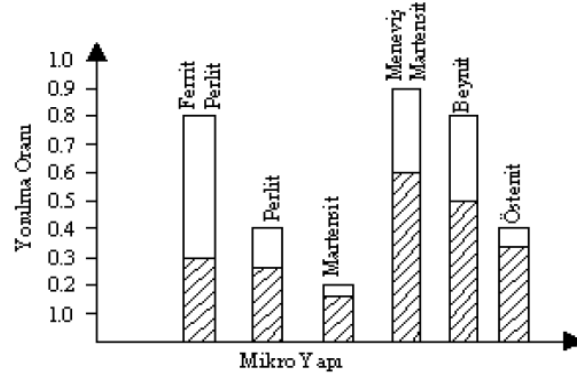
Çizelge 4.2 655MPa sabit bir gerilme altında, yüzey kalitesi farklı olan SAE3130 sınıfı numunelerin yorulma dayanımları [34].

Yüzey İşleme Tipi	Yüzey Pürüzlülüğü (micron)	Ortalama Yorulma Ömrü (Çevrim Sayısı)
Tornada İşlenmiş	2,67	24.10 ³
Kısmi Elde Parlatılmış	0,15	91.10 ³
Elde Parlatılmış	0,13	137.10 ³
Tornalanmış	0,18	217.10 ³
Taşlanmış ve Tornalanmış	0,05	234.10 ³

4.4.6 Isıl işlem ve mikro yapı etkisi

Çekme dayanımını arttıran tüm yöntemler genel olarak yorulma dayanımını da arttırmaktadır. Dolayısı ile malzemenin dayanımını arttıracak ısıl işlem prosesleri de yine yorulma dayanımını artırıcı yönde etki etmektedir. Ancak ısıl işlem sonrasında veya üretim süreçlerinden kaynaklanan inklüzyonlar, kaba perlit mikro yapısı veya hızlı soğutmada oluşabilen artık östenitin malzemenin dayanımını azaltıcı yönde etkisi bulunmaktadır. Örneğin hızlı soğutma esnasında martenzite dönüşümeyerek oluşan

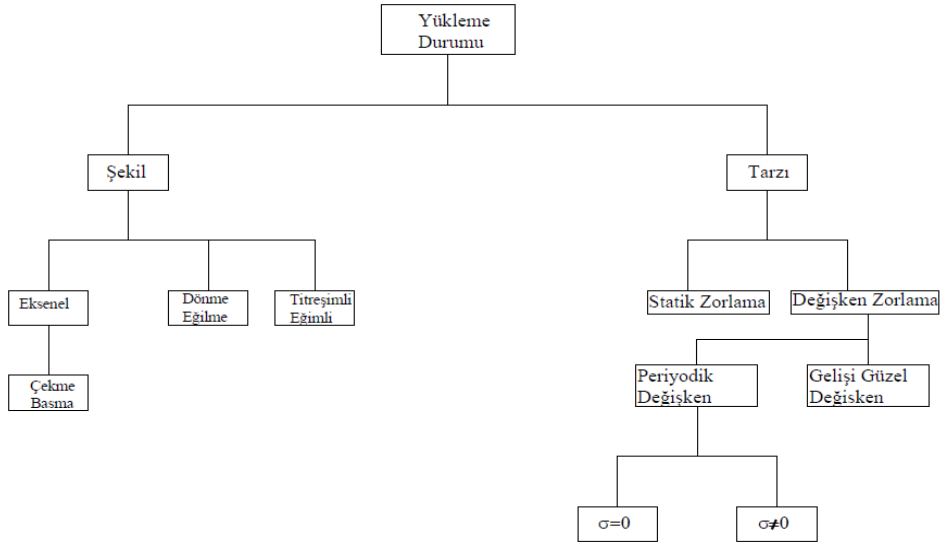
kalıntı östenitin malzemenin sertliğini azalttığı, buna bağlı olarak yorulma dayanımının düştüğü bilinmektedir. Tane boyutları özelinde ise, tane boyutlarının küçülmesi yorulma dayanımını arttırıcı yönde etki etmektedir. [31]



Şekil 4.11 Çeliğin mikro yapısının yorulma dayanımına etkisi.

4.4.7 Gerilmelerin etkisi

Malzemelerin dayanım sınırlarını etkileyen önemli parametrelerden biri de maruz kaldıkları gerilmelerin türü ve büyüklüğüdür. Bu gerilmeler eksenel, düzlemsel, burulma gibi farklı türlerde olabilmektedir. Malzemeye uygulanan gerilmelerin büyüklüğü ve çeşitlerinin fazla olması, yorulma dayanımını önemli ölçüde azaltmaktadır. [31]



Şekil 4.12 Malzemenin maruz kaldığı gerilme durumları.

4.4.8 Çalışma koşulları

Tasarımı yapılan makine parçalarının yorulma dayanımı özelinde incelemesi yapıldığında, parçanın çalıştığı ortamın dayanım üzerinde önemli etkileri olmaktadır. Çalışma ortamında malzeme performansını etkileyen en önemli unsurlar aşağıdaki gibidir.

4.4.8.1 Sıcaklık etkisi

Özel durumlar dışında yüksek sıcaklıklarda malzemelerin yorulma dayanımlarının azaldığı bilinmektedir. Sıcaklığın azalması ise yorulma dayanımına olumlu yönde etki yapmaktadır. [34] Yüksek sıcaklıklarda bir çalışma ortamında kullanılan makine parçalarının yorulma hasarına uğraması için gereken çevrim sayısı, normal çalışma sıcaklıklarında kullanılan aynı parçaya göre düşüktür. Özellikle karbon çeliklerinde 400 C°'nin üzerindeki sıcaklıklarda malzemelerin yorulma dayanımlarının azaldığı görülmektedir. [31]

Oda sıcaklığının altında yapılan deneylerde, malzemelerin çekme mukavemetleriyle birlikte yorulma dayanımlarının da arttığı gözlemlenmektedir. [37]

Yüksek sıcaklıklarda yapılan deneylerde ise, malzemenin sürünme hasar mekanizmasından zarar görmeye başladığı görülmektedir, dolayısı ile yüksek sıcaklık değerlerinin malzemenin hem yorulma dayanımını azalttığı hem de sürünme mekanizmasında etkili olduğu anlaşılmaktadır. [37]

4.4.8.2 Isıl yorulma

Makine parçalarının veya deney numunelerinin yorulma hasarına uğraması için etki edecek gerilmeler yalnızca mekanik olmak durumunda değildir. Yorulma hasarının oluşabilmesi için gerekli en önemli mekanizma daha önce tartışıldığı gibi değişken gerilmelerin bulunmasıdır. Bu gerilmeler mekanik olmasının yanı sıra termal de olabilmektedir. Değişken mekanik gerilmeler gibi, termal olarak da değişken değerler kullanılarak malzeme üzerine ısıl gerilmeler oluşturulabilmektedir. Isıl gerilmeler sıcaklık değişikliğiyle beraber artmaktadır, ilgili denklem (4.4) ise aşağıdaki şekilde verilmektedir. [37]

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (4.4)$$

σ = Gerilme

ΔT = Değişen Sıcaklık

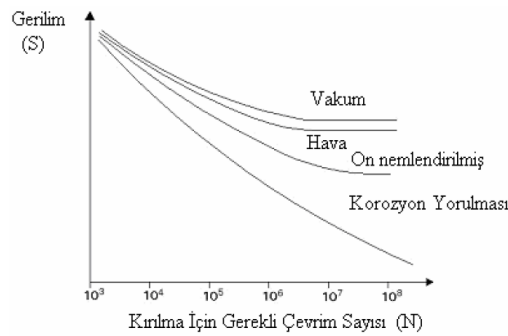
α = Termal Genleşme Katsayısı

E = Young Modülü

Malzemeler üzerinde oluşan kırılmalar, ısı gerilmelerin tekrarlanmasıyla dolayı oluşuyorsa bu mekanizma ısı yorulma olarak adlandırılmaktadır. Örneğin östenitik paslanmaz çelikler bu mekanizmaya oldukça duyarlıdır, bunun sebebi ise malzemenin sahip olduğu düşük termal iletkenlik özelliği ve yüksek termal genleşme katsayısıdır. [37]

4.4.8.3 Korozyon etkisi

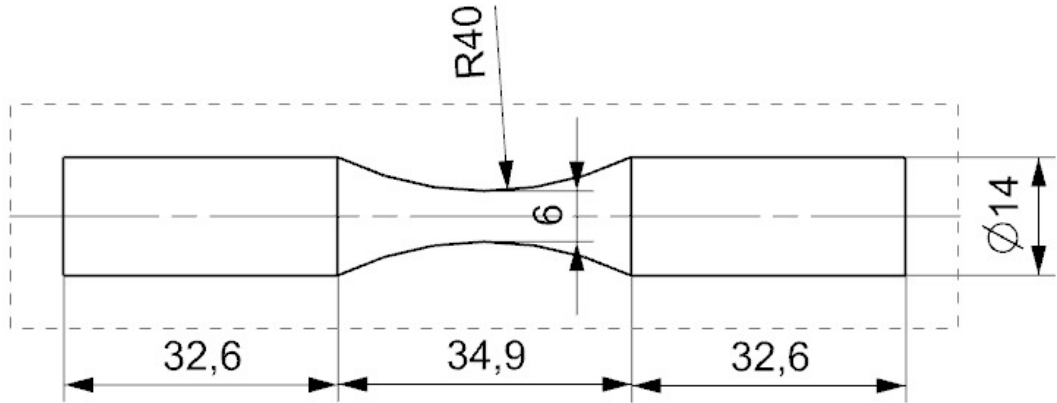
Yorulma hasar mekanizmasında, mekanik zorlanmaların yanı sıra kimyasal korozyonun etkisi de önemlidir. Mekanik zorlanmalardan dolayı yorulma hasarına maruz kalan malzeme, öncesinde bir korozyona uğradıysa yorulma dayanım sınırı azalmaktadır. Bu durumun sebebi ise korozyona uğrayan bölgelerin çentik karakteri ile hareket etmesi ve çatlak başlangıcına neden olmasıdır. Yorulma mekanizması korozyonlu bir ortamda oluşuyorsa, bu durum korozyonlu yorulma olarak tanımlanmaktadır. Özellikle çelikler üzerinde meydana gelen korozyonlar, mekanik zorlanma olması dahi karıncalanmalar oluşturarak çentik yapısını artırıcı yönde etki yapabilmektedir. [35-36]



Şekil 4.13 Çalışma ortamının yorulma dayanımı üzerindeki etkisi.

5. YORULMA TEST PROSEDÜRÜ

Bu bölüm, kırılma mekaniği içindeki uygulamalara girmeden mühendislik uygulamaları ile ilgili olarak yorulma testini açıklayacaktır. Literatürde bildirilen birçok yorulma testi, çeşitli uygulama kodlarında mevcut S-N eğrilerinin (Stres aralığı - Döngü sayısı ilişkisi) şekillendirilmesine yardımcı olmuştur. Bu tezde, GGG50 özellikli 5 farklı bakır kompozisyonunda numune parçaya 300MPa sabit genlikli $R=-1$ olacak şekilde yorulma dayanım testleri yapılarak bakırın etkisi gözlemlenmeye çalışılmıştır. Test sonuçlarının doğruluğunun artırılabilmesi adına 5 farklı kompozisyondan 3'er numune test edilerek toplam 15 parçanın sonuçları toplanmıştır. Dönmeli eğilmeli yorulma test cihazı 25 Hz, 1500 devir/dk şartlarında çalıştırılmıştır. Seçilen gerilme genliği ise malzemelerin ortalama çekme dayanımlarının 0,6 katı olarak 300MPa şeklinde ayarlanmıştır. Test numuneleri aşağıdaki ölçülere göre tornada işletilerek üretilmiştir.



Şekil 5.1 Yorulma Test Numunesi Ölçüleri.

Yüzey kalitesinden kaynaklanan etkileri ve katkıları en aza indirmek için, test numunesi yüzeyinin son hazırlığı mekanik olarak parlatılarak sağlanmıştır.

Testlerden önce, kullanılan yorulma test cihazındaki mekanizmanın ve test numunesinin ne şekilde gerilmelere maruz kaldığının anlaşılması gerekmektedir. Bu nedenle öncelikle gerilme ve moment arasındaki ilişkinin ortaya konması doğru olacaktır.

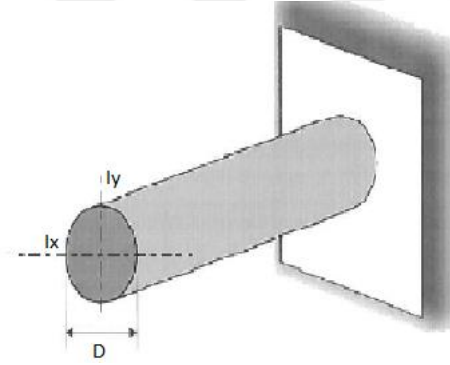
- i) Gerilme: Malzemenin belli bir kesit alanına etkiyen kuvvet ile ilişkidir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

Basma stresi malzeme basıldığında etki eden gerilmedir, o nedenle değeri negatiftir. Çekme stresi ise malzeme çekildiğinde etki etmektedir, bu doğrultuda değeri pozitifdir.

- ii) Eylemsizlik Momenti: Malzemenin kesitiyle ilişkili olarak, cismin durmaya devam etme isteği olarak adlandırılabilir.

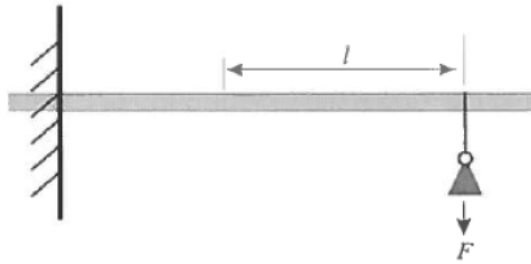
$$I_x = \frac{\pi D^4}{64} = I_y \quad (5.2)$$



Şekil 5.2 Eylemsizlik Momenti [40].

- iii) Kiriş Eğilme Momenti: Tek taraftan sabitlenmiş bir kirişe etki eden moment değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$M = FL \quad (5.3)$$

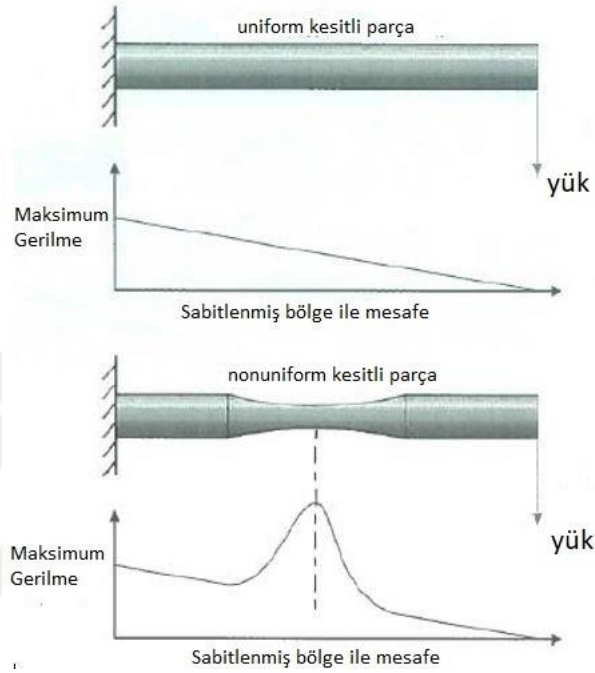


Şekil 5.3 Kiriş Eğilme Momenti [40].

- iv) Kiriş Boyunca Gerilme: Tek taraftan sabitlenmiş, sabit kesitli bir kiriş üzerinde herhangi bir alandaki gerilme değeri aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \frac{My}{Ix} \quad (5.4)$$

y değeri burada parçanın çapının yarısı kadar; yani D/2'dir.



Şekil 5.4 Kiriş Boyunca Eğilme [40].

Yukarıdaki şekil 5.4'te görüldüğü üzere, sabit kesit alanına sahip parçada en yüksek gerilme bağlantı noktasında olduğundan kırılmanın bu bölgede olması beklenir. Ancak homojen olmayan kesit dağılımında, gerilmenin parçanın orta bölgesinde en yüksek olduğu ve bununla beraber boyun bölgesinde kırılmanın gerçekleşeceği öngörülmektedir.

- v) Test Numunesi Üzerinde Gerilme: Standart eğilme denklemleri test numunesi için aşağıdaki şekilde oluşturulabilir.

$$\sigma = \frac{32LF}{\pi D^3} \quad (5.5)$$

F= Parçaya uygulanan yük (N)

L= Moment hesabında kullanılan kol uzunluğu (mm)

σ = Eğme gerilmesi (MPa)

D= Kullanılan deney parçasının çapı (mm)

(5.5) nolu denklemde kullanılan parametreler yukarıda şekilde tanımlanır.



Şekil 5.5 Dönel eğmeli yorulma test cihazı.

(5.5) nolu denklem kullanılarak eğme gerilmesi hesaplanır. Bu tez çalışmasında şekil 5.5'te gösterilen Walter+Bai UBM 0,1-500Nm marka dönel eğmeli yorulma test cihazı kullanılmıştır. Burada 300 MPa belirlenen eğme gerilmesi için, 500mm moment kolu uzunluğunda kullanılması gereken yük 13 N olarak hesaplanmıştır.

Belirlenen 13 N kuvvet 5 farklı bakır kompozisyonuna sahip numunelere uygulanmıştır. Her kompozisyondan 3'er adet numune test edilerek toplamda 15 dönmeli eğilmeli yorulma testi gerçekleştirilmiştir.

Testler daha önce de belirtildiği gibi 25 Hz frekansta ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 1500 devir/dk frekansta yapılan testler, numunelerin dayanımlarına göre her bir numune için yaklaşık 3 saat zaman almıştır. Numune test sonuçlarının eş olması için tüm numunelerin yüzey pürüzlülük değeri ince torna yaptırılarak 0,8 mikron mertebesinde ayarlanmıştır.

6. DENEY ÇALIŞMASI

Küresel grafitli dökme demirlerinden olan GGG50 malzeme için bakır ilavesiz ve farklı kompozisyonlarda bakır ilaveli numuneler üzerinde çekme testleri, spektral analiz ve mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca bu 5 kompozisyon için, 300MPa sabit genlik altında yorulma testi yapılmıştır. Deney verilerinin doğruluğunu arttırabilmek adına her kompozisyondan 3'er adet numune olmak üzere toplam 15 adet numune test edilmiştir.

Küresel grafitli dökme demirlere yapılacak çekme testleri, kimyasal analiz, mikro yapı incelemeleri ve dönmeli eğilmeli yorulma testleri bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

Deney çalışmaları doğrultusunda çekme numuneleri, mikro yapı incelemeleri dağlanmış parçalar hazırlanmıştır. Mikro yapı incelemeleri sırasında malzeme içindeki ferrit ve perlit oranlarının değişimi de ölçülmüştür.

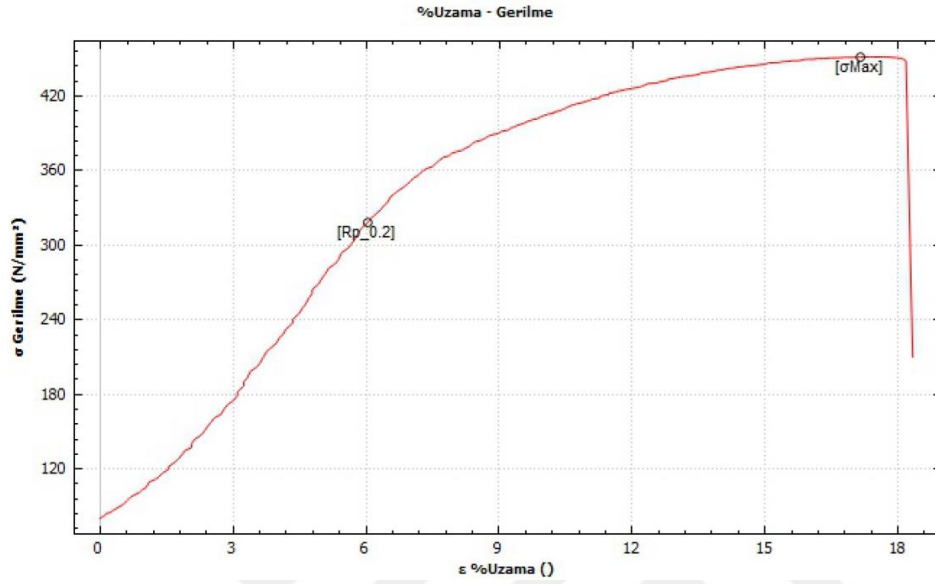
Perlitin malzeme içindeki artışının sertlik, çekme dayanımı artışı sağlaması beklendiğinden bu ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Gerilme uzama grafiğinin altında kalan alanın malzemenin tokluk miktarıyla ilgili sonuçları verdiğinden, ilgili grafiğin altında kalan integral hesabı ile hesaplanmıştır.

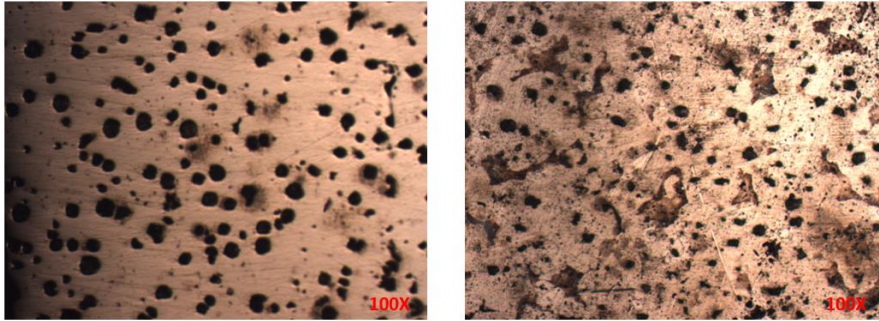
İlgili hesaplamalarda MPa olan birim, dönüşümler yardımıyla J/mm^3 'e çevrilerek malzemenin birim hacminde absorbe edebildiği enerji görülmüştür. Sertlik artışına bağlı uzamalarda azalışların tokluk üzerinde azaltıcı etkisi bilindiğinden bu doğrultuda yapılan gözlemlere eklenmiştir.

6.1 Deney Çalışması Numune 1

Bakır ihtivası yapılmamış, alaşımsız GGG50 malzemeye çekme testi, kimyasal analiz ve mikro yapı incelemesi aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.1 1 nolu numune uzama gerilme grafiği.



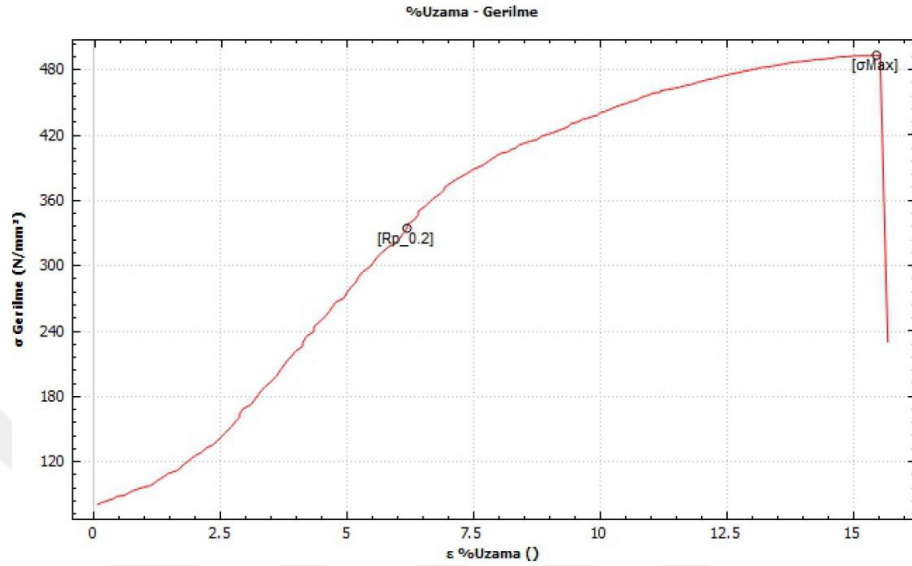
Şekil 6.2 1 nolu numune mikro yapı incelemesi.

Çizelge 6.1 1 numaralı numune kimyasal analiz.

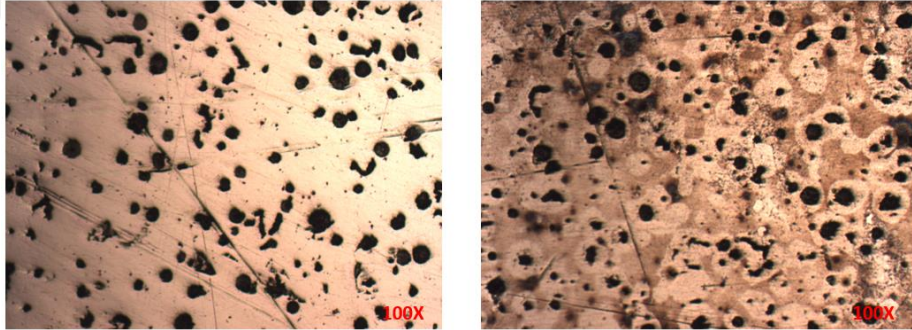
Fe	C	Si	Mn	P	S	Mg
Kalan	3,72	2,41	0,125	0,054	0,21	0,042
Cr	Ni	Cu	Mo	Pb	Ti	V
0,031	0,209	0,028	0,005	0,001	0,018	0,005
Nb	W	Co	B	Sn	Al	
0,002	0,003	0,001	0,0004	0,002	0,007	

6.2 Deney Çalışması Numune 2

%0,299 bakır ihtivası yapılmış, alaşımsız GGG50 malzemeye çekme testi, kimyasal analiz ve mikro yapı incelemesi aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.3.2 nolu numune uzama gerilme grafiği.



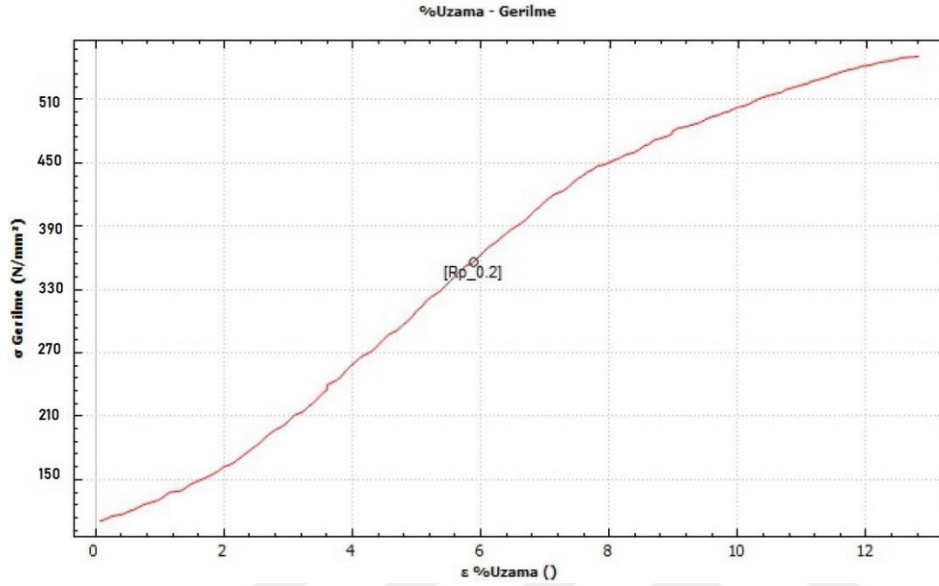
Şekil 6.4 2 nolu numune mikro yapı incelemesi.

Çizelge 6.2 2 numaralı numune kimyasal analiz.

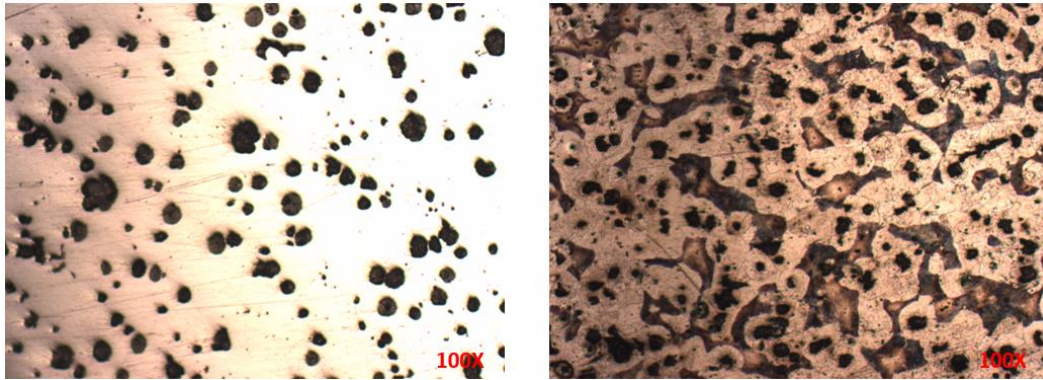
Fe	C	Si	Mn	P	S	Mg
Kalan	3,70	2,34	0,123	0,055	0,19	0,041
Cr	Ni	Cu	Mo	Pb	Ti	V
0,024	0,22	0,299	0,005	0,001	0,018	0,004
Nb	W	Co	B	Sn	Al	
0,002	0,003	0,001	0,0005	0,001	0,008	

6.3 Deney Çalışması Numune 3

%0,505 bakır ihtivası yapılmış, alaşımsız GGG50 malzemeye çekme testi, kimyasal analiz ve mikro yapı incelemesi aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.5 3 nolu numune uzama gerilme grafiği.



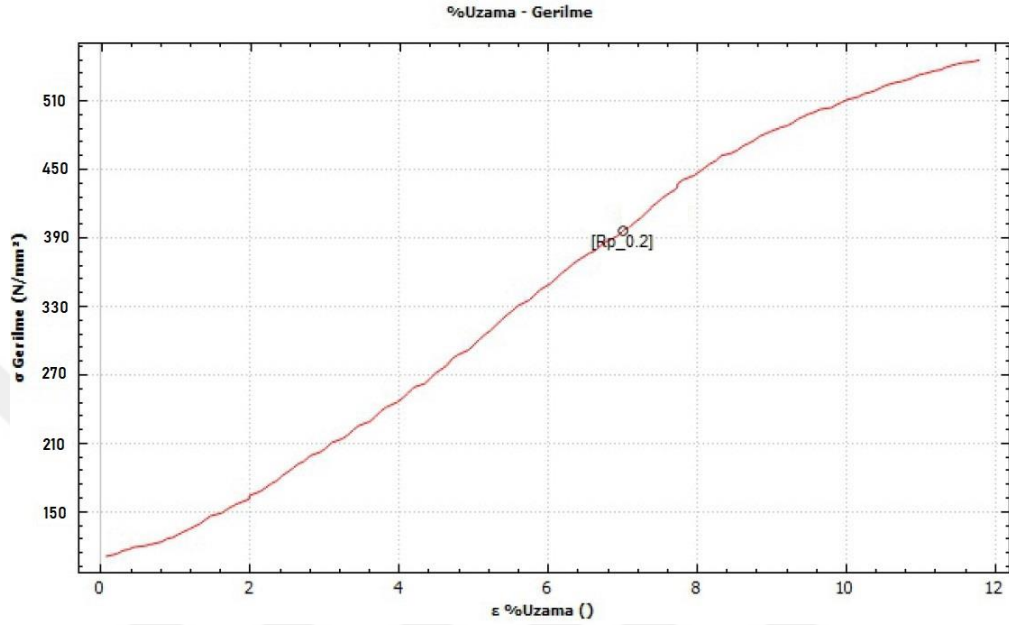
Şekil 6.6 3 nolu numune mikro yapı incelemesi.

Çizelge 6.3 3 numaralı numune kimyasal analiz.

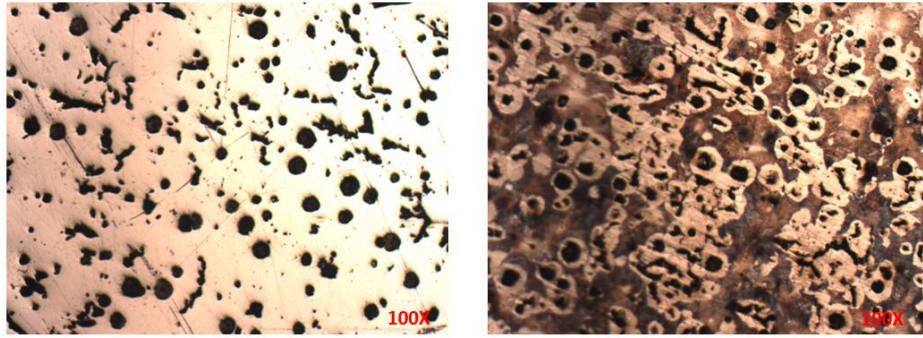
Fe	C	Si	Mn	P	S	Mg
Kalan	3,95	2,67	0,127	0,061	0,29	0,052
Cr	Ni	Cu	Mo	Pb	Ti	V
0,032	0,17	0,505	0,007	0,004	0,019	0,005
Nb	W	Co	B	Sn	Al	
0,008	0,003	0,002	0,0007	0,002	0,008	

6.4 Deney Çalışması Numune 4

%1,05 bakır ihtivası yapılmış, alaşımsız GGG50 malzemeye çekme testi, kimyasal analiz ve mikro yapı incelemesi aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.7 4 nolu numune uzama gerilme grafiği.



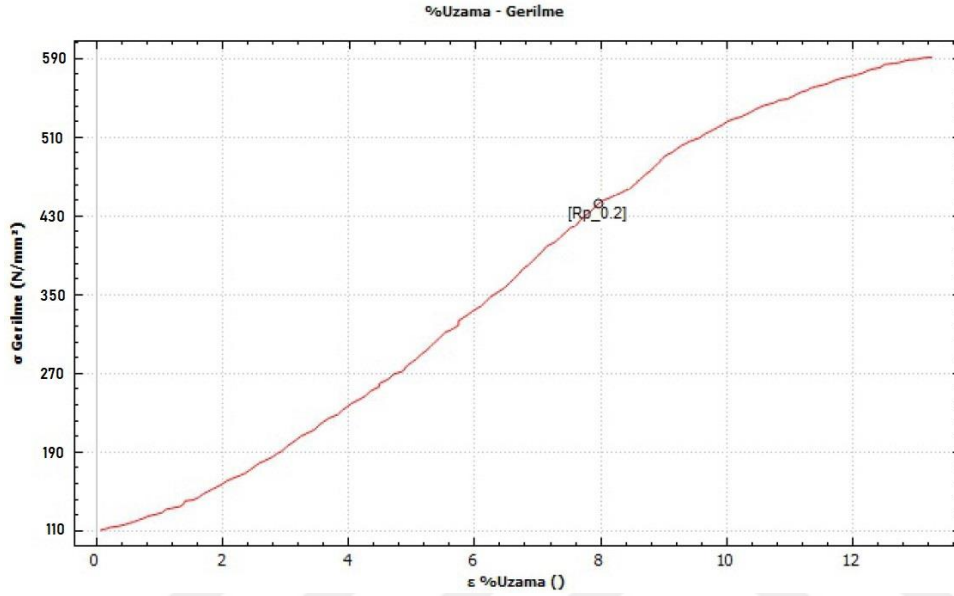
Şekil 6.8 4 nolu numune mikro yapı incelemesi.

Çizelge 6.4 4 numaralı numune kimyasal analiz.

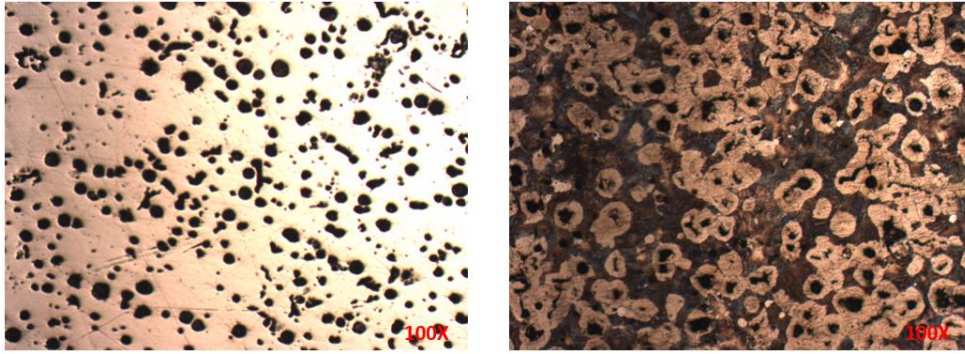
Fe	C	Si	Mn	P	S	Mg
Kalan	3,74	2,41	0,123	0,055	0,18	0,040
Cr	Ni	Cu	Mo	Pb	Ti	V
0,025	0,15	1,05	0,006	0,001	0,018	0,004
Nb	W	Co	B	Sn	Al	
0,003	0,003	0,002	0,0005	0,001	0,007	

6.5 Deney Çalışması Numune 5

%1,49 bakır ihtivası yapılmış, alaşımsız GGG50 malzemeye çekme testi, kimyasal analiz ve mikro yapı incelemesi aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.9 5 nolu numune uzama gerilme grafiği.



Şekil 6.10 5 nolu numune mikro yapı incelemesi.

Çizelge 6.5 5 numaralı numune kimyasal analiz.

Fe	C	Si	Mn	P	S	Mg
Kalan	3,60	2,41	0,121	0,055	0,17	0,052
Cr	Ni	Cu	Mo	Pb	Ti	V
0,024	0,13	1,49	0,006	0,001	0,019	0,004
Nb	W	Co	B	Sn	Al	
0,003	0,003	0,002	0,0006	0,001	0,006	

6.6 Metalografik Deney Sonuçları

Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini incelemek adına yapılan mekanik testlerin sonuçları aşağıdaki çizelgelerde görüldüğü gibidir. Oluşturulan 5 farklı bakır kompozisyonuna ait numunelerin çekme, akma dayanımı, uzama oranları yine çizelgelerde bulunmaktadır. İlgili malzemelerin test sonuçlarının daha doğru yorumlanabilmesi adına ayrıca sertlik testleri de yapılarak sonuçları grafik üzerinde gösterilmiştir.

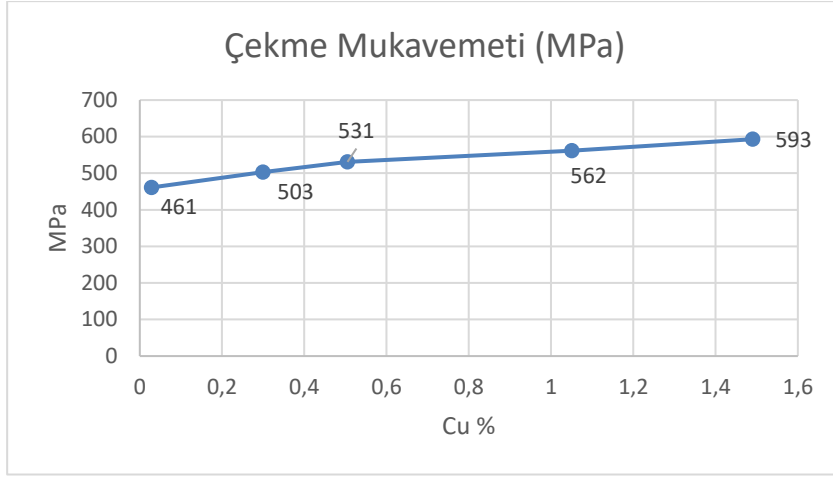
İlgili çekme deneyi sonuçlarına göre oluşan gerilme-uzama grafiklerinden alan hesabı yapılarak tokluk değerleri incelemesi de gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.6 Çekme deneyi sonuçları.

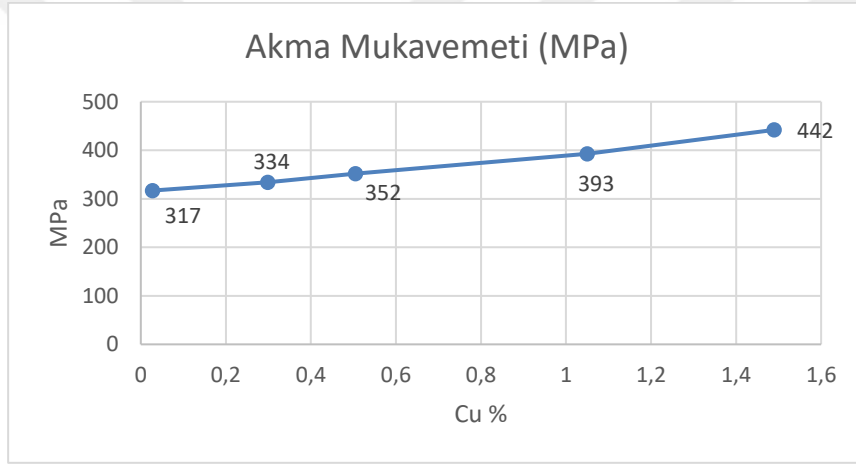
Deney Parametreleri	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5
Fm	23,165 kN	25,275	Satır A	Satır A	Satır A
Rm	461 MPa	503 MPa	Satır B	Satır B	Satır B
L0 Boy	18,00 mm	18,00 mm	18,00 mm	18,00 mm	18,00 mm
L1 Boy	22,24 mm	21,78 mm	21,56 mm	20,93 mm	20,86 mm
Uzama %	23,60	21,50	19,80	16,30	15,90
Rp0,2	317 MPa	334 MPa	352 MPa	393 MPa	442 MPa
Çap	8,00 mm	8,00 mm	8,00 mm	8,00 mm	8,00 mm
Kesit mm ²	50,25	50,25	50,25	50,25	50,25

Çizelge 6.7 Bakır oranına göre faz değişimleri.

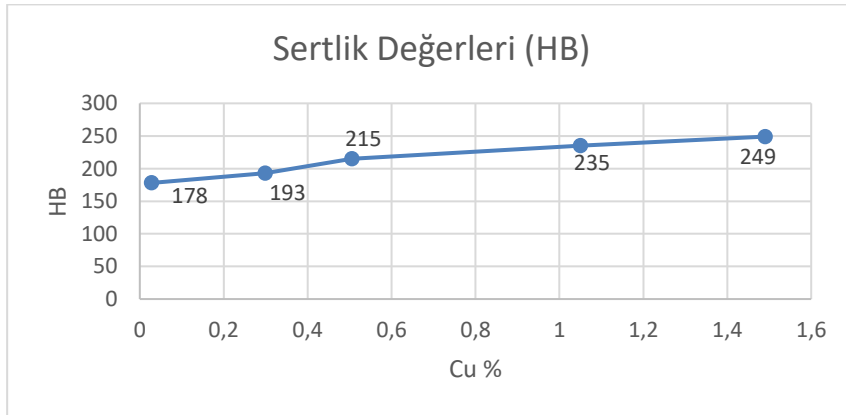
% Cu	Sertlik (HB)	Tokluk(J /mm ³)	Küre Sayısı (mm ² 'de)	% Ferrit	% Perlit	% Grafit
0,028	178	6,1	196	68,4	19,6	11,6
0,299	193	5,5	860	67,2	24,6	8,2
0,505	215	5	1066	52,3	33,1	14,6
1,05	235	3,5	1504	30,7	51,0	18,4
1,49	249	4,6	1713	25,2	60,7	14,1



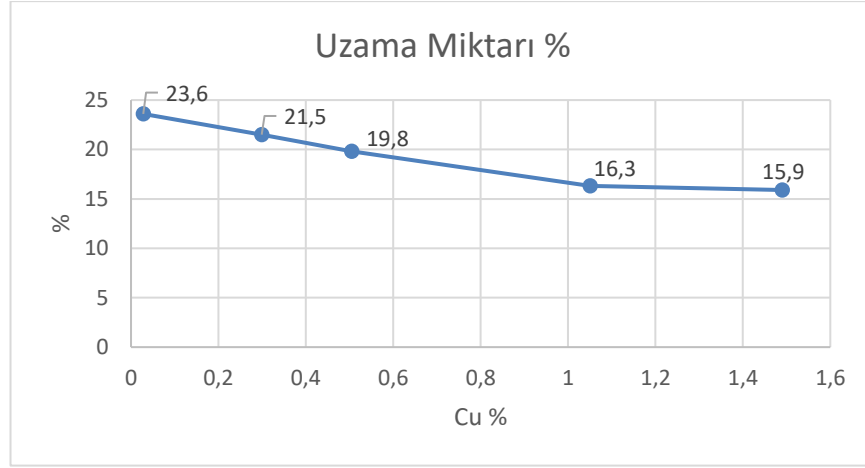
Şekil 6.11 Çekme mukavemeti sonuçları.



Şekil 6.12 Akma mukavemeti sonuçları.



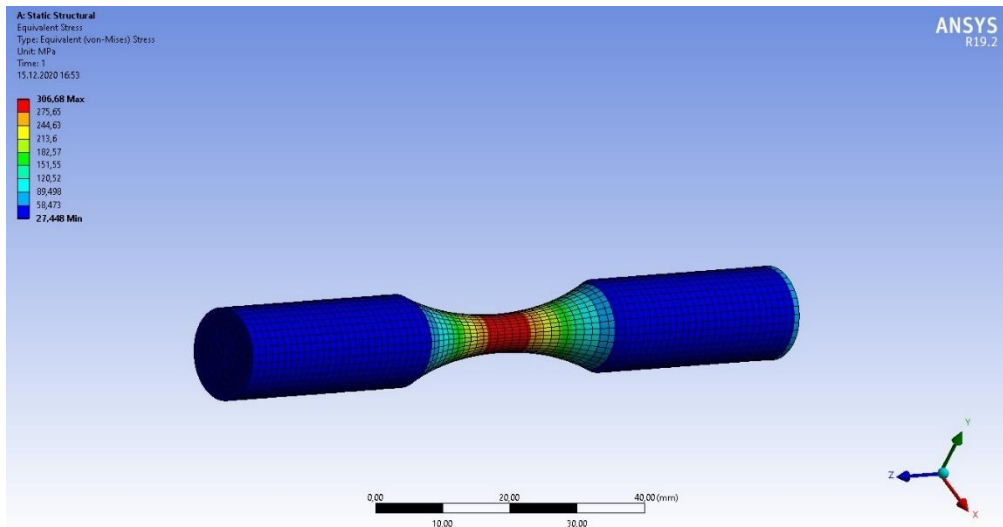
Şekil 6.13 Sertlik değerleri sonuçları.



Şekil 6.14 Uzama miktarı sonuçları.

6.7 Yorulma Deneyi Sonuçları

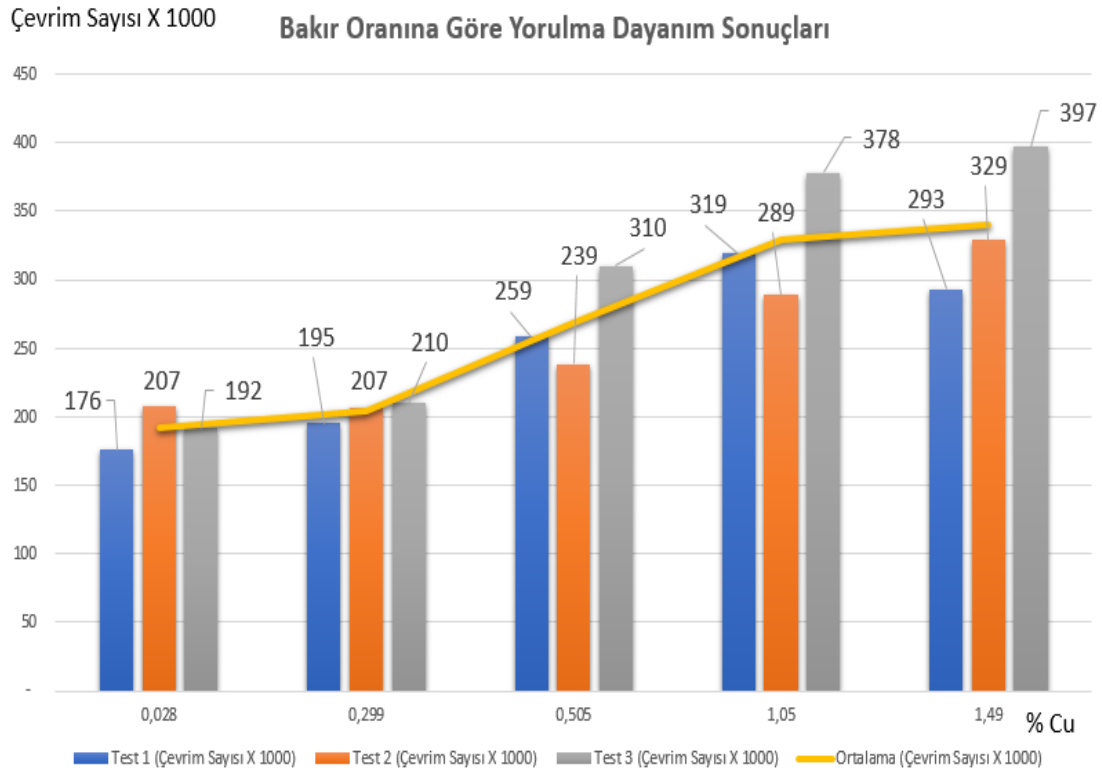
Küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanım özelliklerini incelemek adına yapılan testlerin sonuçları aşağıdaki tabloda görüldüğü gibidir. Oluşturulan 5 farklı bakır kompozisyonuna ait numunelerin 300 MPa altında kırılma gerçekleşene kadar oluşan çevrim sayıları karşılaştırması incelenmiştir. Belirlenen numune geometrisinde ve test koşulları altında oluşan gerilme yoğunlaşması şekil 6.15'teki gibi olmaktadır. Dolayısı ile beklenen kırılma, malzemenin orta bölgesinde gerçekleşmektedir. Yapılan laboratuvar ortamındaki sonuç ile simülasyon sonucu birbirini desteklemektedir.



Şekil 6.15 Yorulma testi numunesi ansys gösterimi.

Çizelge 6.8 Bakır oranı değişiminin yorulma testi sonuçlarına etkisi.

% Cu	Test 1 (Çevrim Sayısı x 1000)	Test 2 (Çevrim Sayısı x 1000)	Test 3 (Çevrim Sayısı x 1000)	Ortalama (Çevrim Sayısı x 1000)
0,028	176	207	192	192
0,299	195	207	210	204
0,505	259	239	310	269
1,05	319	289	378	329
1,49	293	329	397	340



Şekil 6.16 Bakır oranına göre yorulma dayanım testi sonuçlarının grafik gösterimi.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada standart GGG50 küresel grafitli dökme demire yapılan bakır ilavesinin mekanik özelliklere ve düşük frekanslı-dönmeli eğilmeli yorulma performansına olan etkisi incelenmiştir. İlgili özelliklerin incelenebilmesi için 5 farklı bakır kompozisyonuna sahip malzemeye çekme testi, spectral analiz, mikro yapı incelemesi, sertlik testi ve yorulma dayanım testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ise aşağıdaki gibidir.

- * Bakır ilavesiz numunelerde perlit oranı %19,5 seviyelerindeyken %1,49 bakır eklenmiş numunelerde bu oran %61 seviyelerine kadar ulaşmıştır.
- * Perlit oluşumunun artışı ile birlikte malzemenin sünekliği azalmış ve bu doğrultuda bakır ilavesiz malzemenin uzaması %23,6 iken bu değer %1,49'a gelindiğinde %15,9'a düşmüştür.
- * Bakır ilavesinin etkisiyle beraber malzeme içerisindeki küresel grafitlerin mm²'deki sayısı 196 adetten 1713'e yükselmiştir.
- * Küresel grafitlerin sayısındaki artış, bakır ilavesinin yalnızca perlit fazının oluşumunu desteklemediğini, aynı zamanda küresel grafit oluşumunu desteklediğini de ortaya koymaktadır.
- * Bakır ilave edilmeyen GGG50 malzemenin çekme dayanımı 461 MPa iken, %1,49'a kadar yapılan bakır ilavesiyle çekme dayanımı 593 MPa değerine ulaşmıştır.
- * Bakır ilave edilmeyen GGG50 malzemenin sertlik değeri 178 HB iken, %1,49'a kadar yapılan bakır ilavesiyle sertlik değeri 249 HB değerine ulaşmıştır.
- * Bakır ilavesiyle sertlik değeri artan GGG50 malzemenin uzama oranı %23,6'dan %15,9 seviyesine gerilemiştir.
- * Uzama miktarına bağlı olarak gerilme-uzama grafiğindeki fonksiyonun altında kalan alan küçüldüğünden malzemenin tokluk değeri azalmıştır.

- * Dönmeli eğilmeli yorulma dayanımı GGG50 bakır ilavesiz malzeme için ortalama 192.000 çevrim iken, bakır ilave edildikçe ortalama dayanımlar artmıştır. %1,49'a gelindiğinde ilgili dayanım değeri 340.000 çevrime ulaşmıştır.
- * GGG50 malzemeye %1,49 orana kadar ilave edilen bakır sayesinde 300 MPa altındaki yorulma dayanımı testinde performans %77 oranında artmıştır.
- * İlgili çalışmada sabit 300MPa altında, $R=-1$, oda sıcaklığında 5 farklı numune test edilmiştir. Bu doğrultuda bakır ilavesinin yorulma dayanımına etkisi gözlemlenmiştir. Bu çalışma, farklı kompozisyonlar ve her bir kompozisyon için S-N eğrisi çıkarılacak şekilde genişletilebilir.
- * Bu çalışma kapsamındaki aynı kompozisyondaki numuneler 350 MPa, 325 MPa, 275 MPa, 250 MPa, 225 MPa altında tekrarlanarak bir korelasyon oluşturulabilir.
- * İlgili korelasyon yakalandıktan sonra yeni bir formülasyon oluşturulabilir, bu sayede S-N eğrileri oluşturulabilir.
- * Endüstrinin ihtiyaçları doğrultusunda bakıra alternatif bir element veya elementler ilave edilerek gerekliliklerin karşılanıp karşılanamayacağı test edilebilir ve yeni bir malzeme yaratmak için araştırmalar genişletilebilir.
- * Simülasyon programları yardımıyla, endüstri için parça yorulma dayanımları çalışılabilir ve test maliyetleri azaltılabilir.

8. KAYNAKLAR

- [1] **Cavallini, M., Di Bartolomeo, O. ve Iacoviello, F.** (2008). Fatigue crack propagation damaging micromechanisms in ductile cast irons, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 694–704, İtalya
- [2] **Reardon, A. C.** (2011). *Metallurgy for the non-metallurgist*, ASM International, Ohio, USA. 247-248.
- [3] **Věchet, S., Kohout, J., ve Švejcar, J.** (2002). High Cycle Fatigue Properties of Ductile Cast Iron. Wu, X. R and Wang, Z. G. *FATIGUE*, 99, 2077-2082.
- [4] **Roedter, H.** (2006). *Sorelmetal, Suggestions for Ductile Iron Production*, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Sorel.
- [5] **Åberg, L.M. ve Hartung, C.** (2012). *Trans. Indian Inst. Metals*. 65, 633–636.
- [6] **Roucka, J., Abramová, E. ve Kana, V.** (2018) *Arch Metal Mater* 63, 601–607.
- [7] **Silman, G.I., Kamynin, V.V. ve Tarasov A.A.** (2003). *Metal Sci. Heat Treatment* 45, 254–258.
- [8] **Gumienny, G., Kacprzyk, B., ve Gawronski, J.** (2017). *Arch. Foundry Eng.* 17, 51–56.
- [9] **ASM Handbook**, (2008). *Casting*, Vol.15, Formerly Tenth Edition, ASM International.
- [10] **Çavuşoğlu, E. N.** (1992). "Döküm Teknolojisi I", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 289-299
- [11] **Askeland, D.R.**, (1998). *The science and engineering of materials* , ed. Erdoğan M., cilt 1, Nobel yayın dağıtım, Ankara, p. 332-346
- [12] **Çelik, Ö.** (2001). Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışları, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] **Budinski, K. G. ve Budinski, M. K.** (2010). *Engineering Materials : Properties and Selection*, *Prentice Hall*, Upper Saddle River, N.J.490
- [14] **ASM Metals Handbook**, (1990). *Properties and selection: irons, steels and high performance alloys*, Vol.1, Tenth Edition, *ASM International*.
- [15] **Yazıcı, A.**, (2006). Küresel grafitli dökme demirin bortemperlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

- [16] **Kırcalı, K.**, (2006) Farklı matris yapıları sahip küresel grafitli dökme demirlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [17] **Akça, C.**, (2005). Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirde alarım elementlerinin östenit-martenzit dönüşümüne etkisi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [18] **Gencil, M.S.**, (2001). “Küresel grafitli dökme demirlerde ısıtım işlem koşullarının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir.
- [19] **Ferizoğlu, M. T.**, (1991). “Küresel grafitli dökme demirlerde kaliteye etki eden bazı parametreler”, *Ankara Sincan Küçük İşletmeleri Geliştirme Merkez Müdürlüğü*, Ankara.
- [20] **Yazman, S.**, (2006). Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde kesme parametrelerinin işlemeye etkilerinin araştırılması, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- [21] **Türk Standardı Enstitüsü**, (2000). “Dökümler – Küresel grafitli dökme demirler”, TS 526 EN 1563, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-13.
- [22] **Kökden, M. U.**, (1998). GGG50 ve GGG80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin abrasif aşınma davranışına östemperleme işleminin etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] **Ferizoğlu, M. T.**, (1998). Beynitik küresel dökme demir üzerine bir çalışma, *Ankara Sincan Küçük İşletmeleri Geliştirme Merkez Müdürlüğü*, Ankara.
- [24] **Birgi, S.**, (1999). Alaşımsız küresel grafitli dökme demirlerde termal çevrimli östenitlemenin ve kumlamanın östemperleme sonucu yorulma ömrüne etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Osman Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir.
- [25] **Tekeli M.**, (2002). Küresel Grafitli Dökme Demirde Mikroyapının Çatlak İlerleme Davranışına Etkisi, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [26] **Değer, M.**, (1995). Perlitik-ferritik ve perlitik küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımı üzerine mikro yapı ve yüzey işlemlerinin etkisi, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Ana Bilim Dalı, Konya.
- [27] **Savaşkan, T.**, (1999). Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, *Derya kitabevi*, Trabzon syf. 237- 270.
- [28] **Başman, G.**, (1998). GGG 40 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yorulma Davranışına TiN Kaplamanın Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [29] **Ovalı, D.**, (2006). Kritik Tavlama Sıcaklıklarından Östemperlenmiş Çift Matrisli Alaşımsız Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yorulma Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [30] **Sağın, A.**, (1999). Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerden Dışlı Çark Üretimi ve Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bil. Enstitüsü, İstanbul.
- [31] **Orman, S.**, (1999). Bilyeli Dövme parametrelerinin 1020 çeliğinin yorulma dayanımına etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., Eskişehir.
- [32] **Baydoğan, M.**, (1996). GGG-60 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirde Östemperleme Isıl işleminin çekme, Yorulma ve Aşınma özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [33] **Türk Standardı Enstitüsü**, (1974). Metallerin yorulma deneyi genel prensipleri, TS 1487, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-17.
- [34] **Saka, F.**, (1993). Yorulma Deney Cihazı Projesi ve İmalatı, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 40-85.
- [35] **Paris, P. C., F, Erdogan.**, (1963). A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, *Trans, ASME*, 85:4.
- [36] **Haagensen, P.J.**, (1990). Size Effects in Fatigue of Non-Welded Components Proc., *9th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, (OMAE), Houston, Texas, 152-158.
- [37] **Diater, G.E.**, (1988). Mechanical Metallurgy Principles, *McGrow Hill*, SI Metric Edition, U.K, 55-69.
- [38] **ASM Metals Hand book.**, (1989). Mechanical Testing, Vol 1, *9th Edition*, Metals Park oltio, USA, 123-138.
- [39] **M.S.C.**, (1988). Fatigue User's Guide , *McGrow Hill*, SI Metric Edition, U.K, 1181-1292.
- [40] **Askeland, D.R. ve Webster, P.** (1990). *The Science and Engineering of Materials*. Chapman and Hall.
- [41] **Andriolloa, T., Zhanga, Y., Fæsterb, S. ve Kouznetsovac, V.** (2020). *Analysis of the correlation between micro-mechanical fields and fatigue crack propagation path in nodular cast iron*. *Acta Materialia* 188, 302-314.
- [42] **Vaško, A.**, (2020). *Comparison of mechanical and fatigue properties of SiMo- and SiCutypes of nodular cast iron*. *Materials Today. Proceedings* 32, 168–173
- [43] **Bellini, C., Di Cocco, V., Favaro, G., Iacoviello, F. and Sorrentino, L.**, (2019). *Ductile cast irons: Microstructure influence on the fatigue initiation mechanisms*. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 42(9), pp.2172-2182.
- [44] **Benedettia, M., Fontanaria, V., ve Lusuardib, D.**, (2019). *Effect of graphite morphology on the fatigue and fracture resistance of ferritic ductile cast iron*. *Engineering Fracture Mechanics* 206, 427-441.
- [45] **Benedetti, M., Fontanari, V., ve Lusuardi, D.**, (2018). *Fatigue and fracture resistance of ferritic ductile cast iron: the effect of Sband solidification time*. *MATEC Web of Conferences* 165, 13011.

- [46] **Di Cocco, V., ve Iacoviello, F.,** (2018). *Pearlitic ductile cast iron: fatigue crack paths and damaging micromechanisms*. Procedia Structural Integrity 13, 192-197.
- [47] **Vasko, A., Uhríík, M., Kucharíkova, L., ve Tillova, E.,** (2018). *Microstructure, mechanical and fatigue properties of SiMo- and SiCu-nodular cast irons*. Procedia Structural Integrity 13, 1527- 1532.
- [48] **Vaško, A.,** (2017). *Fatigue Properties Of Nodular Cast Iron At Low Frequency Cyclic Loading*. Arch. Metall. Mater. 62, 4, 2205-2210.
- [49] **Vaško, A., Belan, J.,** (2017). *Fatigue tests of nodular cast iron at low and high frequency cyclic loading*. Materials Today: Proceedings 4, 5985–5988.
- [50] **Deguchi, T., Kim, H.J., ve Ikeda, T.,** (2017). *Fatigue limit prediction of ferritic-pearlitic ductile cast iron considering stress ratio and notch size*. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 842, 012067.
- [51] **Vasko, A., Uhríík, M., Kucharíkova, L., ve Tillova, E.,** (2017). *Low And High Frequency Fatigue Tests Of Nodular Cast Irons*. METABK 56(1-2) 25-28.
- [52] **Iacoviello, F., Di Cocco, V.,** (2016). *Influence of the graphite elements morphology on the fatigue crack propagation mechanisms in a ferritic ductile cast iron*. Engineering Fracture Mechanics 167, 248–258.
- [53] **Di Cocco, V., Iacoviello, F.,** (2015). *Pearlitic Ductile Cast Iron: fatigues initiation micromechanisms*. Procedia Engineering. 109, 465 – 472.
- [54] **Di Cocco, V., Iacoviello, F., Rossi, A., Cavallini, M., ve Natali, S.,** (2012). *Graphite nodules and fatigue crack propagation micromechanisms in a ferritic ductile cast iron*. Wiley Publishing Ltd. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 36, 893–902.
- [55] **Shinohara, N., Hattori, N., ve Khan, M. T. I.,** (2013). *Effect of Mean Stress on Fatigue Strength of Spheroidal Graphite Cast Iron*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. ISSN: 1662-9752, Vol. 750, pp 192-195.
- [56] **Damir A.N., Elkhatib A., Nassef G.,** (2007). *Prediction of fatigue life using modal analysis for grey and ductile cast iron*. International Journal of Fatigue 29. 499–507.
- [57] **Nadot, Y., Mendez, J., Ranganathan, N., ve Beranger, A.S.** (1998). *Fatigue life assessment of nodular cast iron containing casting defects*. Blackwell Science Ltd. Fatigue Fract Engng Mater Struct 22, 289–300.

9. ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : MERTCAN KIZGIN
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.01.1991 - İstanbul
E-posta : mertcankizgin@gmail.com



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fizik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2014-2016 Er Elektronik, Üretim Sorumlusu
- 2016-2018 Filpom Makine, Proje Yöneticisi
- 2018-2019 Gamak Makine, Tedarikçi Geliştirme Uzmanı
- 2019 - Arçelik A.Ş., Tedarikçi Geliştirme Uzmanı