

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN MARAGING ÇELİĞİNİN AŞINMA
DAVRANIŞINA ISIL İŞLEMİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Metehan EMİRZEOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MART 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN MARAGING ÇELİĞİNİN AŞINMA
DAVRANIŞINA ISIL İŞLEM ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Metehan EMİRZEOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MART 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN MARAGING ÇELİĞİNİN AŞINMA
DAVRANIŞINA ISIL İŞLEMİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Metehan EMİRZEOĞLU
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bu tez Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2023-
6208 nolu proje ile desteklenmiştir.**

MART 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN MARAGING ÇELİĞİNİN AŞINMA
DAVRANIŞINA ISIL İŞLEMİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Metehan EMİRZEOĞLU
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 04/03/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Volkan KOVAN (Danışman)

Doç. Dr. Tuğçe TEZEL

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÖZENÇ

ÖZET

EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN MARAGING ÇELİĞİNİN AŞINMA DAVRANIŞINA ISIL İŞLEMİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Metehan EMİRZEOĞLU

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Volkan KOVAN

Mart 2024; 38 sayfa

“Maraging” sözcüğü İngilizce “Martensitic” ve “Aging (Age Hardening)” kelimelerinin birleşimiyle türetilmiştir. İsminden de anlaşılacağı üzere martenzitik haline getirilerek çökelme sertleşmesi uygulanmış çeliklerdir. Maraging çeliğinin hem mekanik hem de tribolojik özelliklerini iyileştirmek için, farklı ısı işlemleri ve imalat yöntemleri üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Isıl işlemlerde homojenizasyon ve yaşlandırma tavlari ön plana çıkmaktadır. İmal yöntemlerinde ise eklemeli imalat yöntemleri günümüzde giderek popüler hale gelmektedir. Literatürde eklemeli imalat ile üretilmiş ve ısı işleme maruz kalmış maraging çeliklerinin aşınma davranışları yeteri kadar incelenmemiştir.

Numuneler DMLS (Doğrudan Metal Lazer Ergitme) yöntemiyle imal edildikten sonra yaşlandırma tavlari (490°C- 6h), homojenizasyon tavlari (840°C -1h), homojenizasyon + yaşlandırma tavlari (840°C -1h + 490°C -6h) uygulanmıştır. Aşındırıcı olarak SiC içeren # 600 tipi zımpara kâğıdı kullanılmıştır. Tribolojik deneyler farklı yük ve kayma mesafelerinde yürütülmüştür. Akabinde numunelerin aşınma miktarı belirlenerek, özgül aşınma oranı hesaplanmıştır.

Sonuçlar irdelendiğinde, ısı işleme görmemiş numunenin yüksek süneklik ve tokluk değerleri sayesinde diğer numunelerden daha yüksek aşınma direnci görülmüştür. Isıl işleme maruz kalan numuneler kendi içinde sınıflandırıldığında, homojenizasyon + yaşlandırma tavlari uygulanmış numune en yüksek aşınma direncini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar literatürle kıyaslandığında özgül aşınma oranları oldukça yüksektir. Bu durumun oluşmasında zımparada kullanılan aşındırıcı SiC parçacıklarının standart malzemelere göre çok sert ve parçacıklı yapıda olması ana etmendir.

ANAHTAR KELİMELELER: Aşınma, DMLS, Eklemeli imalat, Isıl işleme, Maraging çeliği

JÜRİ: Prof. Dr. Volkan KOVAN

Doç. Dr. Tuğçe TEZEL

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÖZENÇ

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE WEAR BEHAVIOR OF MARAGING STEEL PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Metehan EMİRZEOĞLU

MSc Thesis in Mechanical Engineering Department

Supervisor: Prof. Dr. Volkan KOVAN

March 2024; 38 pages

The word “*Maraging*” is derived from the combination of the English words “*Martensitic*” and “*Aging (Age Hardening)*”. As the name suggests, they are steels that have been rendered martensitic and precipitation hardening has been applied. To improve both the mechanical and tribological properties of maraging steel, studies have been carried out on different heat treatments and manufacturing methods. Solution and aging treatments come to the fore in heat treatments. In terms of manufacturing methods, additive manufacturing methods are becoming increasingly popular today. The wear behaviour of maraging steels produced by additive manufacturing and subjected to heat treatment has not been adequately examined in the literature.

After the samples were manufactured by DMLS (Direct Metal Laser Melting) method, aging treatment (490°C- 6h), solution treatment (840°C -1h), solution + aging treatment (840°C -1h + 490°C -6h) were applied. #600 type sandpaper containing SiC was used as abrasive. Tribological experiments were carried out at different loads and sliding distances. Subsequently, the wear amount of the samples was determined and the specific wear rate was calculated.

When the results were examined, it was observed that the as fabricated sample had higher wear resistance than the other samples, thanks to its high ductility and toughness values. When the samples subjected to heat treatment were classified within themselves, the sample with solution + aged treated showed the highest wear resistance. The main reason for this situation is that the abrasive SiC particles used in sandpaper are very hard and have a particle structure compared to standard materials

KEYWORDS: Wear, DMLS, Additive Manufacturing, Heat treatment, Maraging Steel

COMMITTEE: Prof. Dr. Volkan KOVAN

Assoc. Prof. Dr. Tuğçe TEZEL

Asst. Prof. Dr. Murat ÖZENÇ

ÖNSÖZ

Akademik hayatımın ilk basamakları olarak nitelendirebildiğim yüksek lisans süreci bana Rus edebiyatçı Anton Çehov'un "*Fevkalade zaferlerim olmayabilir, fakat içinden sağ çıkmayı başardığım yenilgilerimle sizi şaşırtabilirim*" sözünü anımsatır. Birçok yenilginin yanı sıra maddi ve manevi kayıpların eşliğinde bu süreci mütevazı bir zaferle sonuçlandırabildiğim için kendimi şanslı hissediyorum.

Bu sürecin her aşamasındaengin bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan kıymetli danışmanım Prof. Dr. Volkan KOVAN'a; karşılaştığım her zorlukta yanımda olmasının yanı sıra bu çalışmada büyük katkısı olan fahri danışmanım Doç. Dr. Tuğçe TEZEL'e teşekkür ederim.

Akademik çalışmalarım boyunca beni her daim motive eden, bilgi ve fikirlerini içtenlikle paylaşan Mak. Müh. Gülsüm TEKAVİT'e, Mak. Müh. Kaan KÜÇÜKBİÇAKÇI'ya ve Mak. Yük. Müh. Aybike ÇELİK'e teşekkürü borç bilirim.

Bu süreç içerisinde her türlü toplum baskına rağmen aldığım kararların arkasında duran, inancımı kaybettiğim zaman bile bana sarsılmaz güven duyan başta annem Dilek KÜÇÜKOSMAN ve babam Maksut EMİRZEOĞLU olmak üzere aileme teşekkür eder, sevgi ve minnetlerimi sunarım.

Son olarak bu çalışmayı; lisans eğitimim süresince bana Konstrüksiyon ve İmalat ana bilim dalını sevdiren, beni akademik çalışmalara teşvik eden, ancak 04. 04. 2020 tarihinde vefat eden Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sabri DUMAN'a atfediyorum.

Sevgi ve Saygılarımla;

Mak. Müh. Metehan EMİRZEOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1. Maraging Çeliği.....	4
2.1.1 Maraging Çeliklerinin Sınıflandırılması.....	5
2.1.2. Maraging Çeliklerine Uygulanan Isıl İşlemler	5
2.2. Eklemeli İmalat	7
2.2.1. Toz Yataklı Ergitme	7
2.2.2. Toz Besleme Yöntemi	8
2.3. Aşınma Teorisi	10
2.3.1 Tribolojik Sistemin Bileşenleri.....	10
2.3.2. Aşınma Mekanizmaları.....	12
2.3.2.1. Adeziv Aşınma.....	12
2.3.2.2. Abrasif Aşınma	13
2.4. Eklemeli İmalat ile Üretilmiş ve Isıl İşlem Uygulanmış Maraging Çelikleriyle İlgili Tribolojik Çalışmalar.....	15
3. MATERYAL VE METOT	20
3.1. Materyal.....	20
3.2. Metot	21
3.2.1. Aşınma Test Cihazı	21
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	25
4.1. Özgül Aşınma Oranı.....	25
4.2. Tartışma.....	28
5. SONUÇLAR	33
6. KAYNAKLAR	35

ÖZGEÇMİŞ



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN MARAGING ÇELİĞİNİN AŞINMA DAVRANIŞINA ISIL İŞLEMİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

04 / 03 / 2024

Metehan EMİRZEOĞLU

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
°C	: Santigrat Derece
µm	: Mikrometre
Al	: Alüminyum
C	: Karbon
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Fe	: Demir
g	: Gram
h	: Saat
m	: Metre
mm	: Milimetre
mm ³	: Milimetreküp
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal
N	: Newton
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
RH	: Bağlı Nem
s	: Saniye
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum

Kısaltmalar

3B : Üç Boyutlu

ASTM : Amerikan Test ve Malzeme Derneği

DED : Doğrudan Enerji Biriktirme

DIN : Alman Standardizasyon Enstitüsü

DMLS : Doğrudan Metal Lazer Ergitme

EBM : Elektron Işını ile Ergitme

EN : Avrupa Standartları

HB : Brinell Sertlik Değeri

HV : Vickers Sertlik Değeri

ISO : Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu

PBF : Toz Yataklı Ergitme

SLM : Seçici Lazer Ergitme

SLS : Seçici Lazer Sinterleme

TSE : Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Homojenizasyon ve Yaşlandırma İşlemleri ve Mikroyapıdaki Değişimin Şematiği (Savaşkan 2017).....	7
Şekil 2.2. Toz Yataklı Ergitme Parça Üretim Şematiği (Santecchia vd. 2020)	8
Şekil 2.3. Toz Besleme Yönteminin Şematiği (Pontes, A.J. 2021)	9
Şekil 2.4. Tribolojik Sistem Bileşenleri	11
Şekil 2.5. Tribolojik sistemde a) mikro kaynak oluşumu, b) yüzeyden parçacığın koparılması ve c) mikro kaynaklanmış parçaların yüzeyden kopması	13
Şekil 2.6. İki elemanlı abrasif aşınmanın modellenmesi a) Tribolojik sistemde yüzey pürüzlerinin teması, b) yüzeyden parçacığın koparılması	14
Şekil 2.7. Üç elemanlı abrasif aşınmanın modellenmesi a) Tribolojik sistemde ara eleman (parçacık), b) yüzeyden parçacığın koparılması.....	14
Şekil 3.1. Deneyler için a) yazdırılmış pin ve b) ölçüleri.....	20
Şekil 3.2. Deney cihazının şematiği.....	21
Şekil 3.3. Zımpara kağıdının (#600 tipi) lazerle kesilmesi.....	22
Şekil 3.4. Numunelerin hassas terazide kütlelerinin ölçülmesi	22
Şekil 3.5. Deney esnasında numune ve aşındırıcı etkileşimi	24
Şekil 4.1. Kayma Mesafesine Bağlı Olarak Özgül Aşınma Oranı (5,23 N Yükte)	25
Şekil 4.2. Kayma Mesafesine Bağlı Olarak Özgül Aşınma Oranı (10,40 N Yükte)	26
Şekil 4.3. Kayma Mesafesine Bağlı Olarak Özgül Aşınma Oranı (20,66 N Yükte)	26
Şekil 4.4 Kuvvete Bağlı Özgül Aşınma Oranı (500 m mesafede).....	27
Şekil 4.5. Kuvvete Bağlı Özgül Aşınma Oranı (1000 m mesafede).....	28

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Kalitesine Göre Maraging Çeliklerinin Elementel Bileşimi (Sha ve Guo 2009)	5
Çizelge 2.2. ASTM G99-17 Standardı deney parametreleri (ASTM G99-17).....	15
Çizelge 3.1. EOS Maraging Çeliğinin (MS1) yüzde elementel bileşimi (Tezel ve Kovan, 2021)	20
Çizelge 3.2. Numunelere uygulanan ısıt işlemler	20
Çizelge 3.3. Tribolojik deney parametreleri	21
Çizelge 3.4. Numunelerin kumlama sonrası Brinell (HB30) sertlik değerleri	22
Çizelge 3.5. Deney kategorileri ve parametreleri	23
Çizelge 4.1. Numunelere uygulanan ısıt işlemler ve mekanik özellikleri (Song vd. 2021)	29
Çizelge 4.2. Yaşlandırma işleminin mekanik özelliklere etkisi (Kempen vd. 2011)	30
Çizelge 4.3. Çeşitli alaşımların deney koşulları ve özgül aşınma oranı	31

1. GİRİŞ

İkinci dünya savaşının sonrasında askeri ve sivil havacılık sektöründe ses üstü uçuş, kıtalar arası yolculuk, yük taşıma kapasitesinin artması gibi prestijli hedefler ortaya konulmuştur. Özellikle ses üstü uçuş çalışmaları askeri havacılıkta önemli bir yer tutmaktaydı (Grant R.G. 2017). Bu doğrultuda gerçekleştirilen ses üstü uçuş denemelerinde, türbinlerin krom (Cr) içerikli çeliklerden imal edilmiş kritik alt sistemlerinde yorulma çatlakları ve sürünme hasarları gözlenmiştir. Ayrıca uçakların taşıma kapasitesi arttıkça iniş takımlarının güvenilirliği tartışma konusu olmuştur. Bu sebeple uçakların bakım maliyetini azaltmak ve taşıma kapasitelerini arttırmak için düşük yoğunluklu, yüksek sürünme ve yorulma dayanımına sahip malzeme ihtiyacı doğmuştur. Bu doğrultuda yürütülen çalışmalarda, güç sistemleri nikel alaşımları ön plana çıkmıştır (Rolls Royce, 2015). Diğer bileşenlerin ihtiyacı için demir-nikel alaşımlarına titanyum ve alüminyum ilave edilerek maraging çelikleri geliştirilmiştir (Mouritz A.P. 2012). İlerleyen yıllarda maraging çeliğinin bileşimine Molibden (Mo) ve Kobalt (Co) eklenerek mekanik özellikleri geliştirilmiştir (Decker 1979).

“Maraging” isminin kökeni, İngilizce “Martensitic” ve “Aging (Age Hardening)” kelimelerinin birleşimiyle türetilmiştir. İsminden de anlaşılacağı üzere martenzitik haline getirilerek çökelme sertleşmesi uygulanmış çeliklerdir (Sha ve Guo 2009). Maraging çeliklerini diğer çeliklerden ayıran en önemli özellik ise çok düşük karbon (C) miktarına sahip olmasıdır. Karbon miktarının malzemeyi gevrekleştirecek karbon martenzitleri, Titanyum ve Demir karbür bileşikleri oluşumu engellenir. Ayrıca demir-nikel martenziti karbon esaslı martenzitlere göre daha sünek olması maraging çeliklerinin işlenebilirliğini arttırmıştır. Maraging çelikleri çökelme sertleşmesi sonucunda iç yapıda meydana gelen intermetalik bileşiklerin dislokasyon hareketlerini engellemesiyle mukavemet artırıcı mekanizmaları oluştururlar (Rohrbach ve Schmidt, 1990).

Maraging çelikleri ilk bakışta havacılık sektörünün ihtiyaçları için geliştirilse de 1970’li yılların sonuna kadar iyi kaynaklanabilirlik, yüksek mukavemet ve akma dayanımı, yüksek kırılma tokluğu, yüksek çalışma sıcaklıklarında kullanıma elverişli olması, iyi işlenebilirlik ve şekillendirilebilirlik gibi özelliklerinden ötürü birçok sektörde kullanılmaya başlanmıştır (Sha ve Guo 2009). Kullanım alanı genişledikçe maraging çeliklerinin mekanik özelliklerini iyileştirme ve daha ekonomik olması için birçok yöntem geliştirilmiştir. Malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için soğuk şekillendirme, kaplama, ileri yüzey işlemleri gibi birçok metalurjik yöntem uygulanabilir. Ancak malzemenin tüm kesitlerindeki özellikleri yalnızca ısı işlem ile değiştirilebilir. Isıl işlem “ISO 4885:2018 Ferrous materials/ Heat treatments/ Vocabulary” teknik terminoloji standardı tarafından “Katı halde bulunan metallerin özelliklerinde ve /veya iç yapısında bir değişiklik meydana getirmek üzere tamamen ya da kısmen termal döngülere maruz bırakıldığı bir dizi işlem” olarak tanımlanmıştır (ISO 4885:2018). Metalurji literatüründe ve uygulamalarında birçok ısı işlem mevcut olmasına rağmen maraging çelikleri için homojenizasyon ve yaşlandırma tavlari uygulanmaktadır. Her iki ısı işlemde birlikte veya bağımsız uygulandığında maraging çeliklerinin mekanik özelliklerinde iyileşme görülmüştür (Decker 1979).

Maraging çeliklerinin daha ekonomik olması içinde alaşım elementlerinin maliyetleri azaltılmaya çalışılmıştır. Kobaltın yüksek maliyetinden ötürü 250 kalite maraging çeliğine alternatif olarak kobalt içermeyen T250 çeliğin üretilmiştir. Kobalt

içeren maraging çeliklerinin aksine T250 çeliği krom, vanadyum ve mangan içerir (Pan vd. 2019). T250 çeliklerinin ısıtılma işlem uygulamalarında iç yapıda demir oksitler görülmüştür. Bu sebepten ötürü kobalt içermeyen maraging çeliklerinde ısıtılma işlemleri sınırlıdır (Sha ve Guo 2009).

Endüstride maliyet azaltma metalurjik yaklaşımlarla sağlanabildiği gibi, imal usulünde yapılacak değişikliklerle de sağlanabilir. Geleneksel imal yöntemlerinin yanı sıra eklemeli imalat yöntemleri günümüzde popülerliğini arttırmaktadır. Diğer bir deyişle katmanlı imalat olarak adlandırılan eklemeli imalat kendi içerisinde farklı tekniklerle değişmekle birlikte toz, granül, reçine veya filament formundaki malzemenin ergitilmesi, sinterlenmesi, yapıştırılması ile bir parçanın katmanlar halinde üretilmesini sağlar. ASTM standardı F2792-10'a göre eklemeli imalat *"geleneksel makineyle işleme gibi üretim metodlarının aksine, malzemelerin üç boyutlu (3B) model verilerinden nesneler yapmak için genellikle üst üste katmanlar şeklinde üretilmesi süreci"* olarak tanımlanmıştır (ASTM F2792-10). Eklemeli imalatın döküm ve talaşlı imalata kıyasla daha yüksek tasarım serbestliği sağlaması, eklemeli imalatın en önemli avantajı kabul edilmektedir. Eklemeli imalat uygulamalarında döküm ve talaşlı imalata kıyasla daha az ham madde tüketilir. Bu durum eklemeli imalatı maraging çeliği gibi pahalı ya da işlenmesi zor alaşımlar için vazgeçilmez kılmaktadır.

Mühendislik uygulamalarında kullanılan makine elemanlarında sıklıkla hasar oluşumu görülmektedir. Colangelo ve Heiser (1987) göre hasar "üretilmiş bir parçanın kullanım ortamında kırılarak, çatlayarak, deforme olması veya aşınması nedeni ile yüklenen işlevi görememesi" şeklinde tanımlanmaktadır. Makine elemanlarında hasarlar aşırı yüklenme, yorulma, sürünme, korozyon veya hidrojen gevrekleşmesinden ötürü oluşabilir (Colangelo ve Heiser 1987). İmal edilen malzemenin bu hasarlara dayanımı teorik, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel metodlarla ölçülür. Maraging çeliği üstün seviyede mikro kaynaklanabilme özelliği sayesinde eklemeli imalat yöntemleri için vazgeçilmez olmuştur. Ancak eklemeli imalatın görece yeni bir yöntem olması, imal edilen ürünün niteliğinin proses parametreleriyle değişmesinden ötürü numune özelliklerinin belirlenmesi gereklidir. Tezel ve Kovan (2021) çalışmasında DMLS (Doğrudan Metal Lazer Ergitme) yöntemiyle üretilmiş maraging çeliklerine ısıtılma işlem uygulamanın yorulma davranışlarına etkisini incelemiştir. Isıtılma işlemin malzemenin yorulma davranışını iyileştirdiği görülmüştür. Kempen vd. (2011) çalışmasında LPBF (lazerli toz yatak ergitme) parametrelerinin ve son ısıtılma işlemin maraging çeliklerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. LPBF tarafından üretilen maraging çeliğinin homojenizasyon tavına gerek duyulmadan yalnızca yaşlandırma tavı sertleştirilebileceğini ortaya koymuştur. Simson vd. (2019) LPBF prosesi ile üretilen maraging 18Ni-300 çeliğinin mekanik özelliklerini araştırdılar. LPBF tarafından üretilen ısıtılma işlem görmüş maraging çeliğinin sertliğinin, çekme mukavemetinin ve sünekliğinin geleneksel yöntemle üretilmiş maraging çeliğiyle aynı veya daha yüksek olabileceğini belirlemiştir. Literatürde eklemeli imalat ile üretilmiş ve ısıtılma işleme maruz kalmış maraging çeliklerinin aşınma davranışları yeteri kadar incelenmemiştir. Bu husus literatür eksikliği olarak tanımlanmıştır.

Proje kapsamında eklemeli imalatla üretilen maraging çeliğinin aşınma davranışına ısıtılma işlemin etkisi incelenmiştir. Çalışma süresince maraging çeliğinden DMLS yöntemiyle üretilmiş numunelere yaşlandırma tavı (490°C- 6h), homojenizasyon tavı (840°C -1h), homojenizasyon + yaşlandırma tavı (840°C -1h + 490°C -6h) olmak

üzere üç farklı ısıt işlemler uygulanmıştır. Üretilen numuneler “*ASTM G99-17 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*” standartlarında aşınma testine tabi tutularak tribolojik özellikleri ölçülmüştür. Çalışmadan elde edilen veriler literatür verileri ile kıyaslanmıştır.

Aşağıda belirtildiği gibi bu tez beş bölümden oluşmaktadır.

Giriş bölümünde maraging çelikleri hakkında genel bilgiler verilmiş, maraging çeliğinin metalurjisi ve üretim yönteminden bahsedilmiş, eklemeli imalat yöntemlerinin maraging çeliğine sağladığı avantajlarına değinilerek tezin amacı anlatılmıştır.

Kaynak taraması bölümünde maraging çeliği kapsamlı biçimde açıklanmış, eklemeli imalat yöntemleri ve ısıt işlemler hakkında bilgiler verilmiş akabinde maruz kalınan aşınma davranışının teorisi ve literatür çalışmalarından bahsedilmiştir.

Materyal ve metot bölümünde çalışmada kullanılan materyal, imal edilen test cihazı ve metodoloji hakkında kapsamlı bilgiler verilmiştir.

Bulgular ve tartışma bölümünde deneylerden elde edilen aşınma miktarları ve hesaplanmış özgül aşınma oranları irdelenerek literatürle kıyaslanmıştır.

Sonuçlar bölümünde tez çalışmasının sonuçları özetlenmiş ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Maraging Çeliği

Maraging çeliklerinin temel özelliği %0,03 den az karbon içermesi ve yüksek mekanik özelliklere (tokluk, sertlik, mukavemet) sahip olmasıdır. Bu çelikler mukavemetini karbondan değil yaşlandırma işlemi sonucunda iç yapıda oluşan intermetalik fazlardan sağlar (Rohrbach ve Schmidt 1990). Kendisinden görece yüksek karbonlu çeliklerin kafes yapısı tetragonal iken maraging çeliklerinin kafes yapısı ise hacim merkezli kübiktir. Bu özelliği onu diğer çeliklerden ayırmaktadır. Metalurjik olarak içeriğinde balans element Demir (Fe) olmak üzere Nikel (Ni), Kobalt, Molibden, Titanyum (Ti), Alüminyum (Al) ve Karbon (C) bulundurulur. Bu alaşımların her biri oranlarına göre maraging çeliğine ayrı özellikler kazandırır.

Nikel maraging çeliğinin korozyona karşı dirençli olmasını sağlar. Ötektoik altı çeliklerde kritik soğuma hızının altında ferrit ve perlit oluşur. Ancak yüksek soğuma hızlarında martenzit oluşmaktadır. Maraging çeliklerinde bulunan yüksek nikel oranı düşük soğuma hızlarında bile ferrit ve perlit oluşumunu baskılayarak doğrudan martenzit oluşumunu sağlar. Maraging çeliğindeki martenzitik faz; sade karbon çeliklerinde oluşan martenzit fazından yumuşaktır. Bu yumuşaklık ilave ısıtılma işlemi gerek duyulmadan süneklik ve tokluk sağlar. Yaşlandırma aşamasında ise Ni_3Ti , Ni_3Al , Ni_3Fe bileşiklerini oluşturur (Guo vd. 2022).

Kobalt maraging çeliklerinde sınıf ayrımını en net ortaya koyan elementtir. Elementel oranı arttıkça maraging çeliğinin de nitelikleri artmaktadır. Molibdenin çözünürlüğünü arttırarak Ni_3Mo , Fe_2Mo oluşumunu sağlar. Kobalt oluşan çökeltilerin martenzit fazı içerisinde düzgün yayılmasına yardımcı olur (Sha ve Guo 2009) Çökeltme sertleşmesinin süresini azaltır. Ancak günümüzde kobalt içermeyen maraging çelikleri de (T250) mevcuttur. Kobaltın yüksek maliyetinden ötürü 250 kalite maraging çeliğine alternatif olarak üretilmiştir. Kobalt içeren maraging çeliklerinin aksine T250 çeliği krom (Cr), vanadyum (V) ve mangan (Mn) içerir (Pan vd. 2019). Kobalt içermeyen maraging çeliklerinin yaşlandırma prosesleri sınırlıdır. Bu duruma örnek verilecek olursa; 480°C'de üç saat yaşlandırma sertleştirmesinde kobalt eksikliğinde molibdenin çözünürlüğü sınırlanır. Bu sebepten ötürü yapı içerisinde Ni_3Ti , Ni_3Al , Ni_3Mo , Fe_2Mo_3 gibi çökeltilerin miktarı azalır. Ayrıca yüzeyde Fe_3O_4 ve Fe_2O_3 gibi metal oksitler açığa çıkar (Sha ve Guo 2009).

Molibden çeliğin sertleştirilme kabiliyetini arttırır. Kobaltın ve kendisinin yüzde bileşimine göre diğer elementlerle oluşturduğu bileşikler (Fe_2Mo_3 , Fe_3Mo , $Fe_{63}Mo_{37}$, $Fe_{0,54}Mo_{0,73}$, Fe_7Mo_6 , Ni_3Mo) yapı içerisinde intermetalik çökelti fazlarını oluşturur. Çökelti fazları dislokasyon hareketini engelleyerek çeliğin mukavemet özelliklerini iyileştirir. Bunun yanı sıra molibden çeliğin sünekliğini, tokluğunu ve aşınma direncini arttırır (Sha ve Guo 2009).

Titanyum nikel ile Ni_3Ti , demirle $FeTi$, kobalt ile $CoTi$ çökelti bileşimini oluşturur. Özellikle %0,7 ve üstündeki oranlarda titanyum içeren maraging çelikleri eklemeli imalat uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Titanyumun yüzde oranı arttıkça maraging çeliğinin mekanik özelliklerinde iyileşme görülmüştür (Dehgahi vd. 2020). Bu iyileşmenin üst limitlerini belirlemek için Kürsteiner vd. (2023) çalışmasında $Fe_{19}Ni-xTi$ maraging çeliklerinde Ti oranının %0 dan %21'e kadar arttırmıştır. Titanyum oranı

arttıkça sertlik değerinde artış görülmüştür (%0'da 300 HV₅, %20'de 875 HV₅). Ancak titanyum oranındaki artış maraging çeliği içindeki faz dağılımını etkilemiştir. % 2 Ti oranından sonra Fe₂Ti fazları görülmeye başlanmıştır. %10 Ti oranında martenzitik faz balans özelliğini kaybetmiştir.

Alüminyum nikel ile Ni₃Al bileşiğini oluşturur. Titanyum bileşiklerinde de olduğu gibi alüminyum bileşikleri martenzit fazı içinde çökelti oluşturur. Gao vd. (2023) çalışmasında 18Ni300 tozuna belirli oranlarında Al tozları karıştırılmıştır. Karışımda Al oranı arttıkça (%6 ya kadar) tüm mekanik özelliklerinde iyileşme görülmüştür.

Karbon maraging çeliklerinde karbon oranının yüksek olması durumunda, malzemeye gevreklik kazandıracak TiC ve karbür çökeltilerini oluşturur. Bu sebeple maraging çeliklerinde karbon oranı oldukça düşük tutulur (Sha ve Guo 2009).

2.1.1 Maraging Çeliklerinin Sınıflandırılması

Çizelge 2.1'de ise maraging çeliklerinin sınıflarına göre elementel bileşimleri görülmektedir. Sınıflandırma da ise inç kare başına düşen pound olarak nitelendirilen ksi cinsinden çekme dayanımı ile isimlendirilmiştir (Sha ve Guo 2009).

Çizelge 2.1. Kalitesine Göre Maraging Çeliklerinin Elementel Bileşimi (Sha ve Guo 2009)

	200 Kalite	250 Kalite	300 Kalite	350 Kalite
Fe	Balans	Balans	Balans	Balans
Ni	18	18	18	18
Co	8,5	8,5	9,0	12,5
Mo	3,3	5,0	5,0	4,2
Ti	0,2	0,4	0,7	1,6
Al	0,1	0,1	0,1	0,1
C	0,03'ten az	0,03'ten az	0,03'ten az	0,03'ten az

Maraging çeliği, DMLS yönteminde yüksek soğutma hızlarına sahip mikron boyutlu eriyik havuzu nedeniyle ve mikro düzeyde iyi kaynaklanabilme özelliğiyle en uygun çelik türüdür. DMLS yöntemiyle üretilmiş Maraging çeliğinin mekanik özellikleri hem yazdırma parametrelerine hem de proses sonrasında yapılan yaşlandırmalara göre değişkenlik arz etmektedir. Bu sebeple DMLS işlemi bittikten sonra isteğe bağlı ısıtılımlar yürütülür.

2.1.2. Maraging Çeliklerine Uygulanan Isıl İşlemler

Maraging çelikleri üretiminden sonra çok yüksek mekanik özelliklere sahip olsa bile, işletme şartlarında daha optimum ve fonksiyonel çözümler üretebilmesi için mekanik özelliklerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Metal ve alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirebilmek için soğuk şekillendirme, kaplama, ileri yüzey

işlemleri gibi birçok metalurjik yöntem uygulanabilir. Ancak malzemenin tüm kesitlerindeki özellikleri yalnızca ısı işlem ile değiştirilebilir.

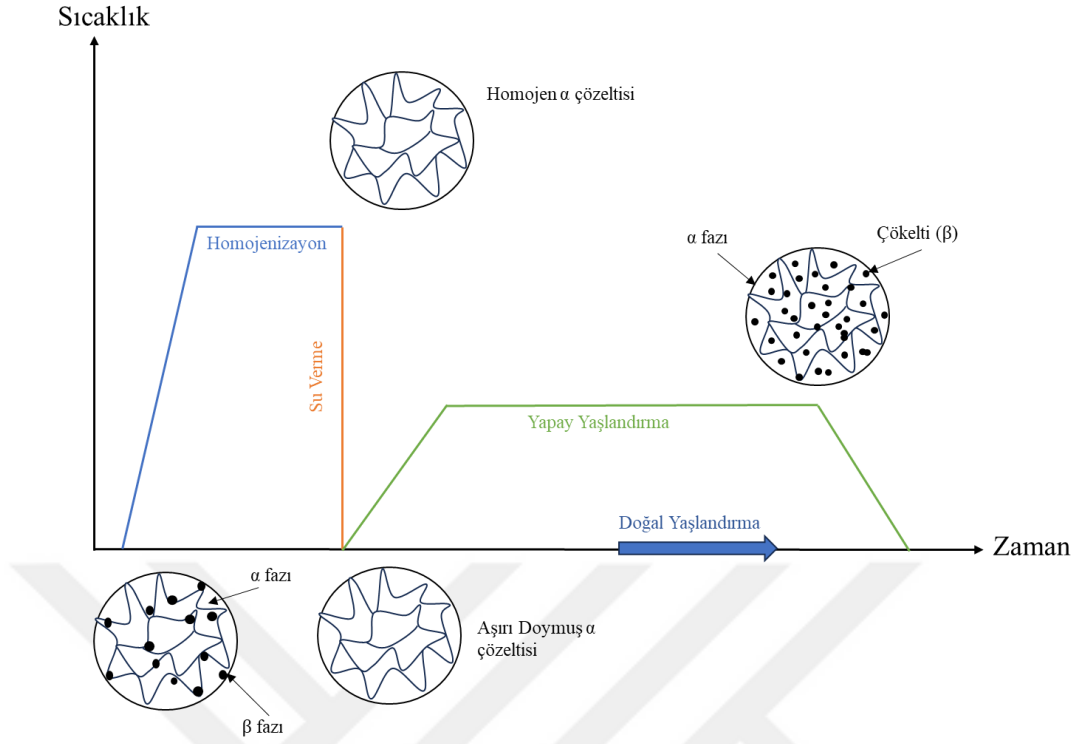
Isıl işlem “ISO 4885:2018 Ferrous materials/ Heat treatments/ Vocabulary” teknik terminoloji standardı tarafından “Katı halde bulunan metallerin özelliklerinde ve /veya iç yapısında bir değişiklik meydana getirmek üzere tamamen ya da kısmen termal döngülere maruz bırakıldığı bir dizi işlem” olarak tanımlamıştır (ISO 4885:2018). Türk Standartları Enstitüsü (TSE) ise ısı işlem için bu standardı “TSE EN ISO 4885: 2018 Demir esaslı malzemeler-Isıl işlemler – Sözlük” ismiyle teknik kuruldun geçirerek standartlaştırmıştır. Teknik literatürde ısı işlem için “tav” sözcüğü yaygınlıkla kullanılmaktadır.

Metalurji literatüründe ve uygulamalarında birçok ısı işlem mevcut olmasına rağmen maraging çelikleri için homojenizasyon ve yaşlandırma tavları uygulanmaktadır. Literatürde eklemeli imalat ile üretilmiş maraging çeliklerine yalnızca homojenizasyon veya yaşlandırma tavı uygulanarak çeşitli özelliklerinin incelendiği çalışmalar mevcuttur. Mekanik özelliklerde daha iyi sonuçlar elde edilebilmesi için numuneye sırasıyla homojenizasyon ve yaşlandırma tavı uygulanmaktadır.

Homojenizasyon tavında, uygun bileşimdeki bir alaşım tek fazlı bir yapı elde etmek için belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Alaşımdaki bütün fazların tek bir faz içerisinde çözünmesi beklenir. Akabinde alaşım hızlı soğutulur (su verilerek) soğutulur. Homojenizasyon tavından sonra aşırı doymuş α katı çözeltisi elde edilir (Savaşkan 2017).

Metalurjik olarak aşırı doymuşluk kararsız bir durumdur. Bu kararsızlığı giderebilmek için malzemeye yaşlandırma tavı uygulanır. Yaşlandırma tavı oda sıcaklığında uygulanırsa “Doğal Yaşlandırma”, oda sıcaklığının üzerinde yapılırsa “Yapay Yaşlandırma” denir. Yaşlandırma işleminin hazırlık evresinde çözelti içerisindeki fazlalık çözünen atomlar bir araya gelip ilk çökeltiyi oluştururlar. Yaşlandırma evresinde ise çekirdekleşme mekanizması daha etkin hale gelir. Bu durumda fazlalık atomlar β fazının çekirdeklerini oluştururlar. Bu β fazı intermetalik bileşiktir. Yaşlandırma evresinde oluşan ara kristal yapısı veya geçiş kafesi matrisin kafes yapısıyla uyumludur. Bu evrede çökelen β fazının kafes parametresi, matrisin kafes parametrelerinden daha farklıdır. β fazının kafes yapısı ile matrisin kafes yapısının uyumlu olmasından ötürü, matrisin kafes yapısında çarpılma veya distorsiyon meydana gelir. Matrisin kafes yapısında meydana gelen çarpılmanın distorsiyon hareketini zorlaştırması veya engellemesinden ötürü bu evrede alaşımın sertlik ve mukavemeti önemli ölçüde artar (Savaşkan 2017).

Homojenizasyon ve yaşlandırma işlemlerinin zamana bağlı termal döngüsü ve işlem esnasında mikro yapıdaki değişimin şematığı Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Homojenizasyon ve Yaşlandırma İşlemleri ve Mikroyapıdaki Değişimin Şematiği (Savaşkan 2017)

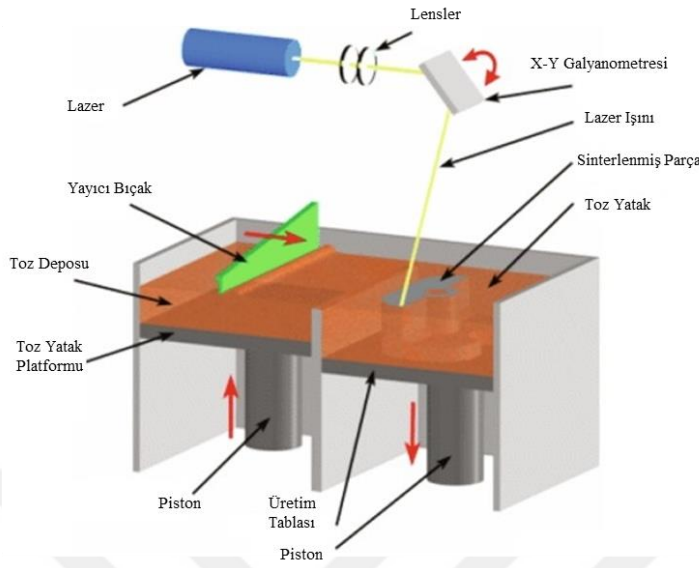
2.2. Eklemeli İmalat

İmalat yöntemlerinin geliştirilmesi malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinde gelişimi sağlayabilecek önemli bir kilometre taşıdır. Günümüzde giderek popüler hale gelen eklemeli imalat yöntemlerinin, geleneksel üretim yöntemlerine göre bu açıdan avantajları mevcuttur. ASTM standardı F2792-10'a göre eklemeli imalat "geleneksel makineyle işleme gibi üretim metotlarının aksine, malzemelerin üç boyutlu (3B) model verilerinden nesneler yapmak için genellikle üst üste katmanlar şeklinde üretilmesi süreci" olarak tanımlanmıştır (ASTM F2792-10). Endüstriyel uygulamalarda birçok eklemeli imalat yöntemi bulunmakla birlikte malzeme türüne veya yöntemin ana mekanizmasına göre sınıflandırılabilir. Deneylerde kullanılan maraging çeliğinin metalurjik özelliklerinden ötürü yalnızca metallerle uyumlu yöntemlerden bahsedilecektir.

2.2.1. Toz Yataklı Ergitme

Toz yataklı ergitme metal ve metal esaslı alaşımlar için kullanılan en yaygın imal yöntemlerinden birisidir. Üretim şeması Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Toz yatak füzyonu (PBF) birçok alt kategorilere ayrılmakla birlikte tüm kategoriler benzer prensipte çalışmaktadır. Buradaki ayrımın başlıca sebebi belirli patent yükümlülüklerinden kaçınılması ve farklı malzemelerin işlenmesidir (Gibson vd. 2015). Endüstriyel ve akademik uygulamalarda farklı platform ölçülerinde ve verimliliklere sahip birçok toz yataklı tipi 3B yazıcı mevcuttur. Seçici Lazer Ergitme (SLM), Seçici Lazer Sinterleme

(SLS) ve Elektron Işını ile Ergitme (EBM) ve Doğrudan Metal Lazer Ergitme (DMLS) metaller için kullanılan başlıca toz yatak yöntemleridir (Pou vd. 2021).

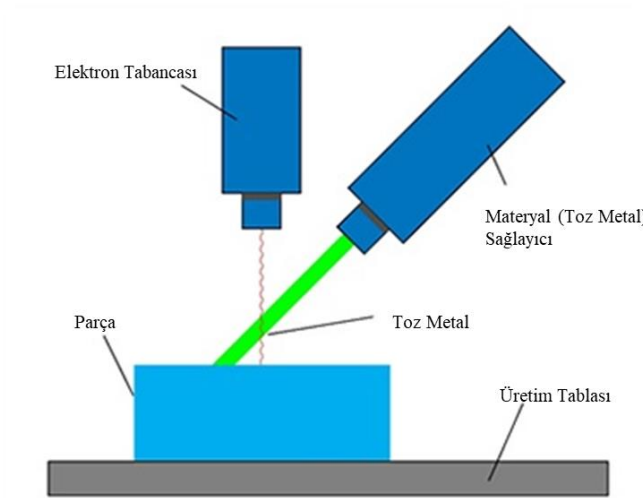


Şekil 2.2. Toz Yataklı Ergitme Parça Üretim Şematığı (Santecchia vd. 2020)

Toz yataklı ergitme sistemlerinde sarf malzemesi olarak toz metal partiküller kullanılmaktadır. Bu partiküllerin boyutları mikron (μ) mertebesinde olmakla birlikte 15 ila 100 μm arasında değişmektedir. Metal tozlar ise yüksek enerjili lazer ışınları ile ergitilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda alaşım elementlerinin çevre atmosfer bileşenleriyle tepkimeye girmemesi önemli bir husustur. İnert atmosfer ise toz malzemenin oksidasyonunu oldukça kısıtlamaktadır (Godec vd. 2022). Bu sebeple yazdırma prosesi kapalı ortamda ve inert atmosfer koşullarında gerçekleşir. Parça üretiminde ilk olarak metal partiküller yayıcı bıçakla üretim tablasına ince katman halinde (15-100 μm) yayılır. Lazer ışınları ise x-y galvanometresi yardımıyla yönlendirilir ve tabla üzerindeki metal partikülleri. STL formatında kodları esas alarak birleştirir. Ergimemiş toz partikülleri ise üretim sürecinde parçada destek elemanı olarak kalır. Bir katmanın üretimi tamamlandığında üretim tablası katman kalınlığı kadar aşağı inmektedir. Yayıcı bıçak yeni katman için toz deposundan partikülleri üretim tablasına taşır (Gibson vd. 2015).

2.2.2. Toz Besleme Yöntemi

Toz yatak yönteminin aksine toz beslemeli (Powder Feed Fusion) sistemlerde tozlar doğrudan parçanın üzerine püskürtülür. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi metal partiküller işlem alanına püskürtülürken; elektron tabancasından gelen ışınlar tarafından aynı zamanda birleştirilir. Doğrudan Enerji Biriktirme (DED) ve Doğrudan Metal Biriktirme (DMD) metallerin yaygın olarak kullanıldığı toz besleme yöntemlerine örnek verilebilir (Bahnini vd. 2018).



Şekil 2.3. Toz Besleme Yönteminin Şematığı (Pontes, A.J. 2021)

Eklemeli imalatın geleneksel imalat yöntemlerine göre aşağıda belirtilen bir dizi avantaj ve dezavantajı bulunmaktadır (Pou vd. 2021; Godec vd. 2022).

Avantajları;

- Döküm ve talaşlı imalata kıyasla daha yüksek tasarım serbestliği sağlar.
- Parçadan uzaklaştırılabilir destek yapılar sayesinde ana malzeme karmaşık iç kanallar imal edilebilir ya da birkaç parça tek bir parça halinde üretilebilir.
- Üretim süresince döküm ve talaşlı imalata kıyasla daha az ham madde tüketilir. Bundan ötürü pahalı ya da işlenmesi zor alaşımlar için ekonomik bir çözümdür.
- Kalıplar ya da metal şekillendirme ve çıkarma aletleri gerektiren diğer konvansiyonel metalürjik proseslerinin aksine alet gerekli değildir.
- Karmaşık parçalar, eklemeli imalat yöntemleri ile birkaç saatte katmanlar halinde üretilebilir. Son işlemler (post-processing) dahil üretim süreci genellikle birkaç gün ya da hafta kadardır.

Dezavantajları;

- Üretilecek parça büyüklüğü tezgâhın hacmi ile sınırlıdır.
- Seri üretim bantları ile çalışmak için uygun olmamakla birlikte bir tezgâhtan bir günde çıkabilecek ürün sayısı parça büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir.
- Eklemeli imalat yöntemleri için birçok alaşım mevcut olmakla birlikte, kaynaklanabilir olmayan metaller eklemeli imalat ile işlenemez. Ayrıca kaynak edilmesi zor alaşımlar ise özel yaklaşımlar gerektirir.
- Malzemenin mekanik özellikleri malzeme katmanlarının yönelimi (anizotropi) ile oldukça değişmektedir. Malzemelerde oluşan anizotropi kontrollü olduktan sonra kullanımda fayda sağlar.
- Malzemeler %99 dan daha yoğun üretilebilmekle malzeme içerisinde bazı artık iç gözenekler olabilir.

2.3. Aşınma Teorisi

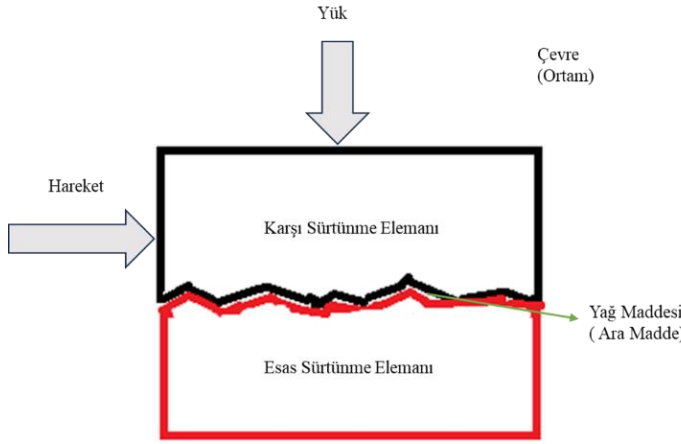
Aşınma, DIN (Deutsches Institut für Normung) 50320 “Wear; Terms, Systematic Analysis of Wear Processes, Classification of Wear Phenomena” standartına göre “Kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen istenmeyen yüzey bozulması” şeklinde tanımlanmaktadır (DIN 50320). Mühendislik malzemelerinde yıpranmaların aşınma sayılabilmesi için aşağıdaki tüm şartların sağlanması gereklidir (Adelbary ve Chang 2023).

1. Mekanik bir etken olmalıdır. Malzeme de kütle kaybı yalnızca aşınma mekanizmaları ile olmaz. Kimyasal ve elektro kimyasal tepkimelerde malzemenin kütleinde azalmaya yol açar.
2. Bir yük altında izafi hareket ve dolayısıyla sürtünme olmalıdır.
3. Aşınma hızı yavaş ve sürekli olmalıdır.
4. Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana gelmelidir
5. Malzemede aşınma isteğimiz dışında gerçekleşmelidir. (Bu şart göz önünde bulundurulduğunda talaşlı imalat uygulamaları kontrollü gerçekleştiği için aşınma olarak nitelendirilemezler).

2.3.1 Tribolojik Sistemin Bileşenleri

Aşınma olayını daha kapsamlı inceleyebilmek için triboloji ve tribolojik sistem bileşenlerinin tanımlanması gerekir. Malzemelerin sürtünme ve bağlı olarak aşınma davranışları 1970’li yıllardan bu yana mekanik ve metalurjik bağlamlarda “Triboloji” ana bilim dalı kapsamında yürütülmektedir (Pürçek 2021). Araştırmacılar çalışmalarında sürtünme çiftlerinin tribolojik davranışlarını malzemenin yüzey özellikleri, ısı işleme, imal yöntemi, kayma hızı, normal kuvvetin büyüklüğü, yağlama koşulları gibi birçok değişken altında belirlenmiştir. Bu deneyler sonucunda malzemenin belirli şartlar altındaki kütleli veya hacimsel aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı gibi tribolojik verilerini ortaya konulmaktadır. Tribolojik sistemin bütün bileşenleri aşınmaya doğrudan etki etmektedir. Bundan ötürü her bir bileşene bağlı faktörleri tanımlanması ve aşınmaya etkisi gözlenmelidir. Bu gözlemin daha rahat yapılabilmesi için aşınma deneylerinde tribolojik bileşenler sabit ve değişken parametreler olarak ayrılır. Tribolojik sistemi oluşturan bileşenler Şekil 2.4’te şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 2.4’te görülen esas sürtünme elemanı; belirli yük, hız ve yağlama koşulunda tribolojik özellikleri incelenmek istenen elemandır. Esas sürtünme elemanı tribolojik sistemin aşınma davranışını etkileyen çok fazla faktöre sahiptir. Esas sürtünme elemanının malzemesi işletme koşulları göz önünde bulundurularak aşınmaya dayanıklı malzeme seçimi yapılmalıdır. Malzemenin mikro yapısındaki fazlar ve tane boyutu mekanik özellikleri önemli ölçüde etkileyen faktördür (Hutchings ve Shipway 2017). Bu nedenden ötürü malzeme içerisinde gevrek fazların olmamasına ve büyük tanelerin olmamasına dikkat edilmelidir.



Şekil 2.4. Tribolojik Sistem Bileşenleri

Bir malzemenin sertlik değeri ile aşınma direnci arasında bir dizi korelasyon mevcuttur. Bu doğrultuda malzemenin yüzey sertliğinin artışı ile aşınma direncinde de artışlar gözlenmiştir. Ancak sertlik değerindeki belirli bir artıştan sonra malzemenin aşınmaya karşı direncinde bir artış görülmemiştir (Pürçek 2021). Aşınma, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi malzemelerin yüzeylerinde gerçekleşir. Bundan ötürü metallerde yüzey sertliğinin artırılması için nitrürleme karbürleme veya kaplama gibi birçok yöntem geliştirilmiştir. Ancak malzemenin diğer özelliklerinin de iyileştirilmesi bakımından ısıtma işlemi yüzey sertleştirmek için en ideal yöntemdir. Ancak bu işlemlerde sadece yüzey sertliği arttığı için malzemenin iç kısmı yüzeye göre daha sünektir.

Esas sürtünme elemanının yalnızca metalurjisi değil yüzey geometrisi de aşınma miktarını etkileyecek önemli bir faktördür. Sürtünme sırasında yüzey pürüzlerine etki eden teğetsel gerilmelerin malzemenin akma sınırını aşması durumunda pürüzler yüzeyden koparak parçacık haline gelir. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça malzemenin aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı artar (Sarkar 1976).

Tribolojik sistemin diğer kritik bileşeni karşı sürtünme elemanı ise, esas sürtünme elemanı ile aşınma çifti oluşturan bileşendir. Katı (parçacık ya da rijit), sıvı (saf veya çözelti) ya da gaz olabilir. Karşı sürtünme elemanının da aşınma direncinin artması için tane boyutunun küçülmesi gerekir. Bunun yanı sıra aşındırıcı tane köşelerinin keskin formdan parabolik forma dönüşmesi aşınmayı azaltan önemli bir unsurdur.

Karşı sürtünme elemanının tribolojik sistemi etkileyen en önemli faktör ise geometrik biçimidir. Aşındırıcı parçacıklar yüksek sertlik değerlerine ve keskin köşelere sahip olmasından ötürü esas sürtünme elemanının aşınma miktarını artırırlar. Triboloji deneylerinde aşındırıcı olarak birçok malzeme kullanılsa da alümina (Al_2O_3) ve silisyum karbür (SiC) en çok tercih edilen aşındırıcıdır (Pürçek 2021). SiC taneleri Al_2O_3 tanelerine nazaran daha yüksek sertlik ve keskin köşeli olmalarına rağmen Al_2O_3 tanelerine nazaran daha gevrek davranış sergiler.

Tribolojik sistemde sürtünme ve aşınma davranışının oluşması için mekanik unsurların olması gerekir. İki eleman arasında oluşan sürtünme kuvvetinin büyüklüğü, türü (statik, dinamik), doğrultusu ve zamana göre değişimi kritik bir faktördür. Tribolojik sistemde sürtünme kuvveti, sisteme uygulanan basınçla doğrudan ilişkilidir.

Tribolojik sisteme etki eden basıncın artması durumunda pürüzlere uygulanan teğetsel gerilmeler artacağı için aşınma miktarı da artacaktır. Bu artış belirli bir yükleme miktarına kadar doğru orantılı gerçekleşir. Ancak tribolojik sistemdeki mekanik kuvvet ve bileşenleri yalnızca sisteme uygulanan basınçtan meydana gelmez. Sisteme etki eden hareket bileşenleri aşınma olayının meydana gelmesindeki en temel unsurdur. Hareket sürtünme elemanlarının birbirine göre izafi hareketinin cinsi, kayma hızı ve doğrultusu ile tanımlanır. Literatürdeki tribolojik araştırmalar kayma hızı ve mesafesi artışı ile aşınma miktarı artışı orantılı olduğunu göstermiştir (Pürçek 2021).

Tribolojik sistemde çevre ortamın bağıl nemi, sıcaklığı, basıncı ve elementel bileşimi gibi birçok faktörle tanımlanmıştır. Bu çevresel faktörler malzemenin aşınma direncini ve ara elemanın niteliğini etkiler. Çevresel faktörlerin en yaygın olanı ise sıcaklık ve nemdir (Pürçek 2021). Tribolojik sistemde sıcaklığın etkisi incelendiğinde; sürtünme etkisindeki yüzeylerde lokal sıcaklık artışları görülür. Yüzeyde oluşan sıcaklık artışı malzemenin başta metalurjisi olmak üzere birçok niteliğini değiştirerek aşınmaya karşı direncini etkiler. Bu artış incelendiğinde belirli bir eşiğe kadar tribolojik sistemi etkilemediği; daha yüksek sıcaklıklarda ise aşınma da etkin mekanizma olduğu tespit edilmiştir. Daha yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin aşınma dirençlerinin daha yüksektir. Ayrıca tribolojik sistemdeki yüksek nem oranı, aşınma miktarını %15 oranında arttırmaktadır.

Tribolojik sistemde ara madde (yağ maddesi) iki sürtünme elemanı arasında maddenin tüm formlarında veya bunların karışımı şeklinde olabilir. Aşınmanın ileriki evresinde açığa çıkan ve sürtünme elemanlarından kopan parçacıklarda ara madde olarak nitelendirilir (Pürçek 2021).

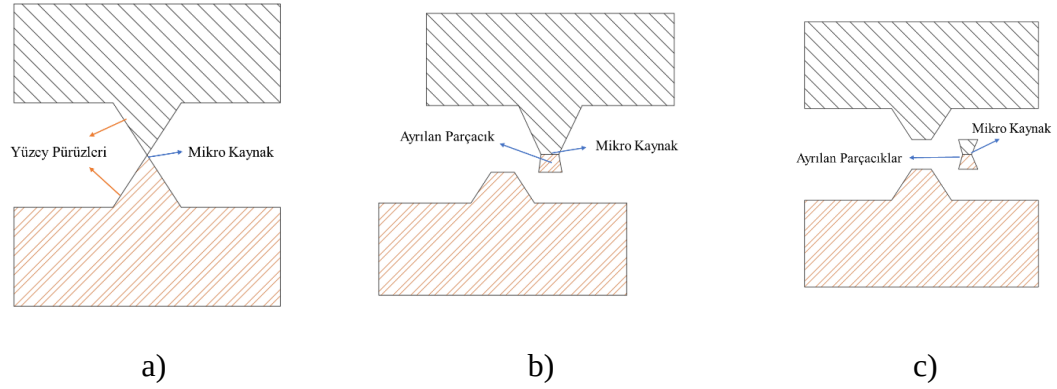
2.3.2. Aşınma Mekanizmaları

Literatürde aşınma mekanizmaları çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Oluş mekanizmaları bakımından adeziv, abrasif, tabaka ve yorulma aşınması; hasarın fiziksel görünüşüne göre ise kayma, erozyon, korozyon ve yuvarlanma aşınması olarak sınıflandırılır. Bu sınıflandırmanın içinde adeziv ve abrasif aşınmalar diğer aşınma türlerine göre makine hasarlarında daha etkin rol oynamaktadır (Yıldız ve Gür 2006; Pürçek 2021).

2.3.2.1. Adeziv Aşınma

Adhezyon birbiriyle temas halinde bulunan yüzeylerdeki bağ veya kuvvetler etkisinde meydana gelir. Adhezyon etkisini oluşturan bağlar kovalent, iyonik veya metalik bağ olabilirken kuvvet bakımından Van der Waals kuvvetleri etkin mekanizmadır (Sarkar 1976; Pürçek 2021).

Adeziv aşınma özellikle tribolojik sistem elemanlarının her ikisinin de metal olması durumunda gerçekleşir. Metal bileşenlerin yüzey pürüzlerinde ise yük tesiri ve metalik bağ etkisinde mikro kaynak gerçekleşir (Şekil 2.5.a). Mikro kaynaklar tribolojik sistemin aktif veya pasif olduğu her zaman diliminde gerçekleşebilir. Tribolojik sistem aktif edildiğinde yüzeyler birbiri üzerinde kayma hareketi yapar ve pürüzlerdeki gerilmeler akma sınırına erişir veya geçer (Sarkar 1976). Bu durumda birbirine kaynamış pürüzler plastik deformasyona uğrayarak yüzeyden ayrılır (Şekil 2.5.b ve Şekil 2.5.c).



Şekil 2.5. Tribolojik sistemde **a)** mikro kaynak oluşumu, **b)** yüzeyden parçacığın koparılması ve **c)** mikro kaynaklanmış parçaların yüzeyden kopması

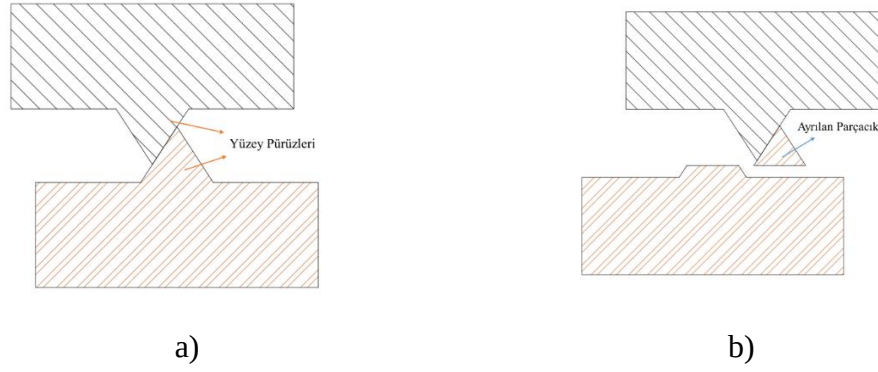
Tribolojik sistem bileşenlerinde adeziv aşınmayı azaltmak için yağlama ucuz ve etkin bir yöntemdir. Sistemle şartlarına dayanıklı yağlayıcı sürtünmeyi ve ısıyı azaltmakla birlikte bileşenler arasında mikro kaynak oluşumunu engeller. Aşağıda belirtilen diğer tedbirlerin uygulanması maliyetli olduğu için çok özel durumlar için kullanılabilir (Bayer, R. G. 2019).

1. Metal-metal çiftlerinde çözelti oluşumunu engellemek: Metallerin temas bölgesinde birbiri içerisinde çözünmeyen bileşimlere sahip olması mikro kaynaklamayı sınırlar. Teması engellemenin başka bir yolu ise metal yüzeylerini kaplama işlemine tabi tutmaktır.
2. Pürüzsüz yüzeyler kullanmak: Teorikte temas eden yüzeylerde pürüzler mevcut değilse aşınma meydana gelmez. Günümüz teknolojisinde tolerans ve hassas yüzey işlemleri mikron mertebesinde. Taşlama işlemi sonrasında bile yüzeyde pürüzler mevcuttur. Ancak bu talaşlı imalat uygulamaları ekonomik olmamakla birlikte belirli limitler çerçevesinde gerçekleşir.

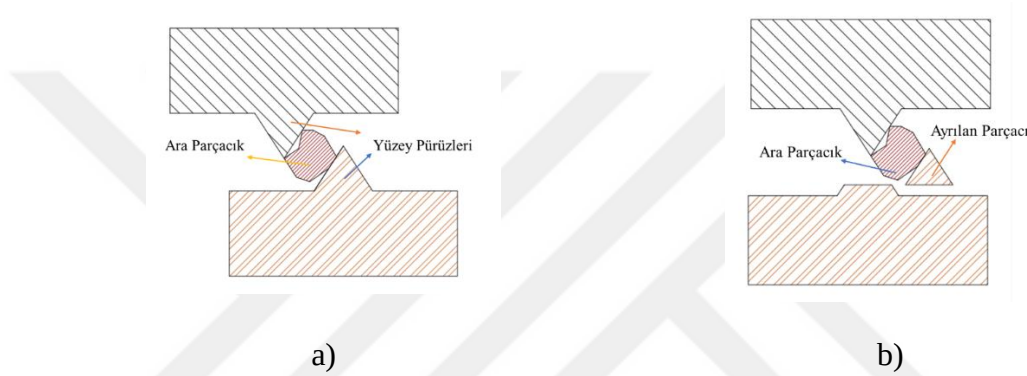
2.3.2.2. Abrasif Aşınma

Sert ve keskin köşeli bir parça veya parçacığın görece daha yumuşak bir parçadan talaş kaldırmasına abrasif aşınma denir. Literatürde çizilme veya yırtılma aşınması olarak da isimlendirilir. Sert parçacıkların yumuşak metale penetrasyonu da abrasif aşınmaya sebep olabilmektedir. Bu duruma örnek olarak, tribolojik sistem içerisine dışarıdan giren toz ve partiküllerin sebep olduğu aşınmalar verilebilir (Hutchings ve Shipway 2017).

Abrasif aşınma iki ve üç elemanlı olmak üzere ikiye ayrılır (Pürçek 2021). İki elemanlı abrasif aşınma; aşındırıcı veya abrasif yüzeye sahip karşı sürtünme elemanının esas sürtünme elemanı üzerinde izafi hareket yapması sonucunda oluşur. Üç elemanlı abrasif aşınma ise; birbiriyle izafi hareket yapan esas ve karşı sürtünme elemanları arasındaki parçacıkların tesiri ile oluşur (Hutchings ve Shipway 2017).



Şekil 2.6. İki elemanlı abrasif aşınmanın modellenmesi **a)** Tribolojik sistemde yüzey pürüzlerinin teması, **b)** yüzeyden parçacığın koparılması



Şekil 2.7. Üç elemanlı abrasif aşınmanın modellenmesi **a)** Tribolojik sistemde ara eleman (parçacık), **b)** yüzeyden parçacığın koparılması

Metal-metal tribolojik sistemlerde aşınma davranışı öncelikle iki elemanlı abrasif (Şekil 2.6) veya adeziv; sonrasında üç elemanlı abrasif aşınma (Şekil 2.7) şeklindedir. Metal-metal tribolojik sisteminde içine giren toz, mineral tanecikleri, yüzeyden ayrılarak serbest hale mikro talaşlar ve metal oksit parçacıkları üçüncü elemanı (ara maddeyi) oluşturur. Serbest haldeki mikro talaş ve metal oksit parçacıkları ayrıldıkları yüzeylerden daha sert olduğu için abrasif aşınmayı hızlandırıcı etkiye sahiptir (Hutchings ve Shipway 2017; Pürçek 2021).

Abrasif aşınma endüstriyel uygulamalardaki makine ve makine parçalarında en sık görülen aşınma türüdür. Bu nedenle tribolojik sistemde bir dizi konstrüksiyonel ve metalurjik tedbirler alınarak abrasif aşınma hasarı minimize edilebilmektedir. Tribolojik sistemde alınabilecek konstrüksiyonel tedbirler aşağıdaki gibidir (Bayer, R. G. 2019).

- Kayma hızının ve yükün azaltılması
- Yağlama ile serbest haldeki mikro talaşların sistemden uzaklaştırılması
- Kullanım yerine göre sistem bileşenleri arasında sertlik farkına dikkat edilmesi

Tribolojik sistem bileşenlerinin metalurjik özellikleri abrasif aşınmada kritik bir rol oynamaktadır. Yüzey ve hacim merkez kübik malzemeler sıkı düzenli hekzagonal malzemelerden daha çok aşınır (Ziębowicz vd. 2020; Pürçek 2021). Bu durumunun

oluşmasında sıkı düzenli hekzagonal malzemelerin deformasyon sertleşme hızının daha düşük olması etkilidir. Endüstriyel uygulamalarda metal malzemeler saf halleriyle çok nadiren kullanılır. Bu malzemelerin daha fazla mukavemet ve sertlik değerine; korozyon direncine sahip olması için belirli oranlarda diğer elementler eklenir. Literatürde bu işleme “Alaşımlama” oluşan yeni malzemeye ise “Alaşım” denir. Alaşım yine metal karakteristiğinde olmakla birlikte kendisini oluşturan metallerin özelliklerinden farklı özellikler gösterirler (Savaşkan 2017). Alaşımlama işlemi ise abrasif aşınmayı azaltıcı bir tedbirdir. Alaşımlama sırasında oluşan ikincil fazlar sertlik ve mukavemeti artışı ile aşınma direncinde artış görülür. Ancak burada ikincil fazların ana faz ile uyumu ve geometrik özelliklerine dikkat edilmesi gerekir (Pürçek 2021).

2.4. Eklemeli İmalat ile Üretilmiş ve Isıl İşlem Uygulanmış Maraging Çelikleriyle İlgili Tribolojik Çalışmalar

Tribolojik çalışmalar metodolojik yönüyle incelendiğinde testlerin büyük çoğunluğu pin-on-disk veya ball-on disk tipi tribometrelerde gerçekleştiği görülmüştür. Çalışmalarda parametreleri Çizelge 2.2’de verilen “ASTM G99-17 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus” standardı referans alınmıştır. Bu standart doğrultusunda yürütülen deneylerde sürtünme katsayısı; açısal kayma hareketine ters doğrultuda meydana gelen sürtünme momenti üzerinden hesaplanır.

Çizelge 2.2. ASTM G99-17 Standardı deney parametreleri (ASTM G99-17)

Parametre	
Normal Kuvvet (N)	10 N
Kayma Hızı (m/s)	0,1 m/s
Kayma Mesafesi (m)	1000 m
Aşındırıcı Pin / Küre Çapı (mm)	10 mm
Aşındırıcı Malzemesi	100Cr6 / Alümina
Çevre/Ortam	Hava
Ortam Sıcaklığı (°C)	23 °C
Bağıl Nemi (%RH)	% 12-78
Aşınma İz Dairesinin Çapı (mm)	25-35 mm

Ahmed vd. (2020) çalışmasında kısa süreli yaşlandırmaya maruz kalmış 18Ni1900 maraging çeliklerinin aşınma davranışını incelemiştir. Tribolojik testler çeşitli kayma hızları, kayma mesafesi ve yükler altında gerçekleşmiştir. Bu testlerde maraging numuneler pin olmakla birlikte aşındırıcı olarak rulman çeliğinden diskler kullanılmıştır. Deney verileri incelendiğinde aşınma oranları parametrelerin maksimum değerlerinde en düşük değere sahip olduğu belirlenmiştir.

Podgornik vd. (2021) çalışmasında katman yönelimlerinin (anizotropi), maraging çeliğinin aşınma davranışına etkisini gözlemlemiştir. Numuneler yatay, dikey ve 45° eğimli yönlerde yazdırılmıştır. Akabinde farklı doğrultularda yazdırılmış numunelere iki ayrı ısıl işlem yapılmıştır. Birinci ısıl işlem 490°C’de altı saat yaşlandırma tavı uygulanmış akabinde (1 °C/min soğuma hızında) 60°C’ye kadar soğutulmuştur. İkincil ısıl işlem ise numuneler oda sıcaklığından (3 °C/min ısıtma hızında) 840°C’ye ısıtılmış ve bir saat homojenizasyon tavı uygulanmıştır. Akabinde numuneler 490 °C’ye

soğutularak (1 °C/min soğuma hızında) altı saat boyunca yaşlandırma tavına tabi tutulmuştur. Çalışmada tribolojik testler ise ball-on-disk tribometresinde, ASTM G99 standartlarında gerçekleştirilmiştir. Abrasif aşınma oranları incelendiğinde X yönünde yazdırılan numunenin aşınma oranı en düşük iken, Z-X yönünde yazdırılan numunenin aşınma oranı en yüksektir. Adeziv aşınma oranları değerlendirildiğinde Z-X yönünde yazdırılan numunenin aşınma oranı en düşük iken, 45°-Y yönünde yazdırılan numunenin aşınma oranı en yüksektir. Sonuçlar değerlendirildiğinde anizotropinin kayma yönü doğrultusunda olması aşınma direncini arttırmıştır. Ayrıca 45° yazdırma yönlerinde adeziv ve abrasif aşınma arasındaki farkın azaldığı görülmüştür.

Özer vd. (2022) çalışmasında, maraging çeliklerinde farklı ısıtma işlem uygulamalarının yanı sıra uygulanan yük ve kayma hızının aşınma özelliklerine etkisini incelemiştir. Birinci kategori ısıtma işlemde numuneye 480°C'de altı saat yaşlandırma tavı uygulandıktan sonra hava ortamında soğumaya bırakılmıştır. İkinci tip ısıtma işlemde numune 980°C de bir saat homojenizasyon tavı uygulandıktan sonra havada oda sıcaklığına kadar soğumuştur. Akabinde numune 720 °C'de beş dakika bekletildikten sonra su verilmiştir. Bu işlem iki kez uygulandıktan sonra numune 480°C'de altı saat yaşlandırılmış, sonrasında hava ortamında soğumuştur. Üçüncü ısıtma işlem ise numune 980°C de bir saat homojenizasyon tavına tabi tutulduktan sonra havada oda sıcaklığına kadar soğumuştur. Daha sonrasında numune 480°C'de altı saat yaşlandırıldıktan sonra hava ortamında soğumuştur. Çalışmada tribolojik testler ise ball-on-disk tribometresinde gerçekleştirilmiştir. Deney parametrelerinde kayma mesafesi sabit tutulmuştur. Kayma hızı ve uygulanan yük değişken parametredir. Aşınma oranları incelendiğinde tüm yük ve hızlarda en yüksek aşınma direncine, 480°C'de altı saat yaşlandırma tavı uygulanmış numune sahiptir.

Bae vd. (2021) çalışmasında anizotropinin, ısıtma işlemin ve uygulanan yükün maraging çeliğinin aşınma davranışına etkisini incelemiştir. Çalışmada iki ayrı ısıtma işlemin etkisi gözlenmiştir. Birincil ısıtma işlem 850°C'ye ısıtılmış ve iki saat homojenizasyon tavı uygulanmıştır. Akabinde numuneler 500 °C'ye soğutularak altı saat boyunca yaşlandırma tavına tabi tutulmuştur. Diğer ısıtma işlemde 490 °C'de altı saat boyunca yaşlandırılmıştır. Numuneler ise X, 45°X-Y ve Z yönünde yazdırılmıştır. Çalışmada tribolojik testler ise ball-on-disk tribometresinde gerçekleştirilmiştir. Deney parametrelerinde kayma mesafesi ve kayma hızı sabit tutulmuştur. Testlerde kuvvet değişken parametre olarak kullanılmıştır. Aşınma oranları incelendiğinde, 50 N'a kadar ısıtma işlem görmüş numunelerin aşınma oranı ısıtma işlem görmemiş numunelere göre düşüktür. 50 N yük altında ise ısıtma işlem görmüş numunelerin aşınma oranı iki kat daha fazladır. Yazdırma yönüne göre aşınma oranları incelendiğinde X yönünde yazdırılan numunenin ısıtma işleminden bağımsız olarak daha iyi aşınma direnci ortaya koymuştur.

Yin vd. (2018) çalışmasında yaşlandırma işlem parametrelerinin 18Ni300 maraging çeliğinin mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisinin incelemiştir. Çalışmada üç ayrı sıcaklık ile dört ayrı işlem süresi parametre olarak kullanılmıştır. Mekanik testler ve karakterizasyon sonucunda maraging numuneler için ideal yaşlandırma sıcaklığı 490°C olarak belirlenmiştir. Yaşlandırma işleminin ise üç ile beş saat arasında olması numune özelliklerini olumlu etkilemiştir. Diğer parametreler ise numunede yetersiz veya aşırı yaşlanmaya sebep olduğu için mukavemetinde azalma görülmüştür. Çalışmada tribolojik deneyler pin-on-disk tribometresinde, ASTM G99 standartlarında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik numuneler zaman sabit (3 saat) ve sıcaklık sabit (490°C)

olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Aşınma oranları incelendiğinde yaşlandırma uygulanmamış numunenin en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Yaşlandırılmış numunelerin aşınma oranı sıcaklığa bağımlı incelendiğinde, 490°C'deki numunenin en düşük, 390°C'deki numunenin en yüksektir. Aşınma oranları zaman bağımlı incelendiğinde, bir saat işlem görmüş numunenin aşınma oranı en yüksek, dört saat işlem görmüş numunenin en düşüktür.

Tonolini vd. (2022) çalışmasında geleneksel ve eklemeli imalat yöntemleriyle üretilmiş 18Ni300 maraging çeliğinin aşınma davranışlarını kıyaslamıştır. Geleneksel yöntemle üretilmiş numuneler 820°C'de bir saat homojenizasyon tavının ardından 490°C'de kısa süreli yaşlandırma tavına tabi tutulmuştur. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş numune ise, 490°C'de dört saat yaşlandırma tavına tabi tutulmuştur. Çalışmada tribolojik testler pin-on-disk tribometresinde, ASTM G99 standartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kayma hızı değişken parametre kabul edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, kayma hızı arttıkça numunelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı artmaktadır. Eklemeli imalat numuneleri geleneksel yöntemle üretilmiş numunelerden daha yüksek sürtünme katsayısına ve aşınma oranına sahiptir.

Godec vd. (2021) çalışmasında plazma nitrürleme ve ısıtma işleminin 18Ni300 maraging çeliğinin aşınma direncine etkisini gözlemlemiştir. Numuneler DMLS yöntemiyle üretildikten sonra iki ayrı ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Bunlardan birincisi 520°C'de altı saat yaşlandırma tavidir. İkincisi ise 840°C'de otuz dakika homojenizasyon tavinin ardından 520°C'de altı saat yaşlandırma tavidir. Isıtma işlemi uygulandıktan sonra numuneler plazma nitrürlenmiştir. Nitrürleme prosesinde numuneler altı saat boyunca 450 °C sıcaklıkta, %25N₂ / %75H₂ karışım atmosferinde bekletilmiştir. Çalışmada tribolojik testler ise ball-on-disk tribometresinde, ASTM G99 standartlarında gerçekleştirilmiştir. Veriler incelendiğinde yalnızca DMLS yöntemiyle üretilmiş numunenin aşınma oranı en yüksektir. Isıtma işlemi ile numunelerin aşınma oranlarında azalma görülmüştür. Nitrürlenmiş numunelerin aşınma direnci yalnızca DMLS numunesine nazaran yedi kat daha dirençlidir.

Godec vd. (2022) çalışmasında 18Ni300 maraging çeliğine farklı sıcaklıklarda plazma nitrürleme uygulamanın aşınma direncine etkisi gözlemlemiştir. Maraging numuneler DMLS yöntemiyle üretildikten sonra altı saat %25N₂ / %75H₂ karışım atmosferinde bekletilmiştir. Nitrürleme işleminde ise 440°, 480°, 520°C olmak üzere üç ayrı sıcaklık kullanılmıştır. Çalışmada tribolojik testler ise ball-on-disk tribometresinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, 520°C'de nitrürlenmiş numunenin aşınma direnci en yüksek, 440°C'deki aşınma direnci en düşüktür. Statik sürtünme katsayısında ise 520°C'de nitrürlenmiş numune en düşük değere sahiptir. Numunelerin dinamik sürtünme katsayısı ise birbirine çok yakındır.

Ostrovski vd. (2023) çalışmasında plazma nitrürasyon işlem süresinin 18Ni300 maraging çeliklerinin mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. SLM ile üretilmiş numuneler %70 N₂ ve %30 Ar atmosferinde plazma nitrürlenmiştir. Numunelerin plazma nitrürlenme süreleri ise bir, iki ve beş saattir. Çalışmada tribolojik deneyler ASTM G99-17 standartlarında yürütülmüştür. Özgül aşınma oranları incelendiğinde, beş saat nitrürlenmiş numunenin en düşük; SLM numunesinin en yüksektir. Diğer mekanik özelliklere etkisi değerlendirildiğinde iki saat nitrürlenmiş numunenin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Bae vd. (2021) çalışmasında 18Ni-300 Maraging çeliğinden SLM yöntemiyle üretilen numunelerin anizotropisi, ısıtıl işlem etkisi ve aşınma hızının tribolojik özelliklerine etkisi gözlenmiştir. Çalışmada altı adet numune üretilmekle birlikte, üç numune yazdırma aşamasından sonra 2 saat 850 °C de çökeltme sertleşmesinden sonra 500 °C de 6 saat yaşlandırma sertleştirmesine tabi tutulmuştur. Çalışmada tribolojik deneyler ASTM G99-17 standartlarında yürütülmüştür. Deney verileri incelendiğinde SLM ile üretilmiş normal ve ısıtıl işlem görüş numunelerin sürtünme katsayıları arasında gözle görülür bir fark gözlenmemiştir. Bunun yanı sıra yüksek hızlı aşınma testlerinde gözlenen sürtünme katsayısı değerleri diğer koşullara nazaran daha düşük değerdedir. Deney yürütücüleri bu düşüşü kayma hızındaki artış ile ilişkilendirmiştir.

Çakan vd. (2023) çalışmasında farklı yaşlandırma sürelerinin ve atmosfer koşullarının 18Ni300 maraging çeliğinin mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışmada yaşlandırma işlemi 490 °C sabit sıcaklıkta altı ve dokuz saat olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Atmosfer koşulları ise hava, azot (N₂) ve %90N₂ / %10H₂ karışımıdır. Tribolojik deneyler ASTM G99 standartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney verileri kıyaslandığında, en yüksek aşınma oranı hava atmosferinde altı saat yaşlandırılan numunede gözlenmiştir. En düşük değer ise %90N₂ / %10H₂ karışım atmosferinde altı saat yaşlandırılan numunede görülmüştür. Tüm mekanik özellikler ele alındığında %90N₂ / %10H₂ karışım atmosferinde yapılan uygulamalar daha iyi sonuçlar vermiştir. Atmosfer koşullarından bağımsız olarak yaşlandırma süresini uzatmanın aşınma direnci ve sertliğe olumsuz etkisi görülmüştür.

Hong vd. (2021) çalışmasında maraging çeliklerine uygulanan ısıtıl işlem ve nitrürleme işleminin, aşınma davranışına etkisini incelemiştir. Çalışmada parametrik olarak üç ayrı ısıtıl işlemin uygulanmasına karar verilmiştir. Bunlardan birincisi yalnızca 900°C'de iki saat homojenizasyon tavlı; ikincisi yalnızca 480 °C'de altı saat boyunca yaşlandırma tavlıdır. Üçüncül ısıtıl işlem türü ise ilk iki ısıtıl işlemin kombinasyonudur. Nitrürleme prosesinde numuneler dört saat boyunca 480 °C sıcaklıkta, 0,5 MPa basınçta, %30N₂ / %70H₂ karışım atmosferinde bekletilmiştir. Çalışmada tribolojik testler ise ball-on-disk tribometresinde, ASTM G99 standartlarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma miktarları incelendiğinde, hiç ısıtıl işlem ve nitrürleme görmemiş numunenin aşınma miktarı en yüksektir. Homojenizasyon tavlı ve nitrürleme işlemi uygulanmış numunenin aşınma miktarı en düşüktür.

Chen vd. (2019) çalışmasında soğuk spreyl kaplama ve ısıtıl işlemin 300 serisi maraging çeliğinin mekanik özelliklerine etkisini gözlemlemiştir. Soğuk spreyl yönteminde kaplama malzemesi olarak 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Proses parametreleri 5 MPa basınç sabit olmak üzere 900 °C (AF1) ve 1000 °C (AF2) sıcaklık değerleridir. ısıtıl işlem etkisini gözlemlemek için AF2 numunesine 840°C-1h homojenizasyon tavlı, 490 °C yaşlandırma tavlı uygulanmıştır. Deneyler pin-on-disk tribometresinde, ASTM G99 standartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney verileri değerlendirildiğinde ısıtıl işlem uygulanmış numunenin ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı en düşük değere sahiptir. AF1 numunenin ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı en yüksek değere sahiptir.

Černašejus vd. (2020) çalışmasında oksijen ortamında 18Ni300 maraging çeliğine farklı parametrelerde lazerle yüzey işlemi uygulamanın etkilerini incelemiştir. Numunelerin üst yüzeylerine farklı lazer güçleri ve lazer tarama hızları uygulanmıştır.

ASTM G99 standartlarında gerçekleşen tribolojik testlerin verileri numerik olarak ele alınmıştır. Lazerle yüzey işlenmiş numuneler, SLM numunelerine nazaran çok daha iyi aşınma direnci göstermiştir.

Černašejus vd. (2019) çalışmasında farklı parametrelerde lazerli yüzey işlemenin, 18Ni300 maraging çeliğinin tribolojik özelliklerine etkisini gözlemlemiştir. SLS yöntemiyle numuneler üretildikten sonra yüzeyleri, çeşitli lazer gücü, tarama hızı ve tarama sayılarında işlem görmüştür. Çalışmada tribolojik testler pin-on-disk tribometresinde gerçekleşmiştir. Sonuçlar incelendiğinde lazer tarama hızı arttıkça aşınma miktarında artış görülmüş; lazer gücü arttıkça azalma görülmüştür. Bu durumun oluşmasında lazerli yüzey işleminde yüzey pürüzlerinin yeterince giderilmesi için gerekli enerjinin ve sürenin oluşması etkin olmuştur.

Škamat vd. (2023) çalışmasında lazerle borlama prosesinin parametrelerinin, 18Ni300 maraging çeliğinin aşınma davranışına etkisini incelemiştir. Lazer borlamada farklı pasta macun kalınlığı (0,03 mm – 0,6mm) ve lazer tarama hızları (500 mm/min – 1500 mm/min) uygulanmıştır. Çalışmada maraging numuneler toz yatak yöntemiyle imal edildikten sonra, 820 °C de homojenizasyon tavı ve 490°C’de yaşlandırma tavı uygulanmıştır. Çalışmada tribolojik deneyler ball-on- disk tribometresinde çeşitli kayma hızları, kayma mesafeleri ve yükler altında gerçekleşmiştir. Sonuçlar incelendiğinde yalnızca 0,6 mm macun kaplama ve 500 mm/min lazer hızında kaplanmış numune en az aşınan numune (300 µg) olmuştur. Ancak katman kalınlığı ve çok yüksek sertlik değerinden (1450 Knoop_{0,2}) ötürü yüzeyde gevrekleşme görülmüştür. Yalnızca ısıtma işlemi uygulanmış numunenin ise aşınma miktarı ise borlanmış numunelerden çok daha yüksektir (2260 µg). Pin aşınma miktarları dahil edildiğinde, lazerle borlamanın tribolojik sistemin toplam aşınma direncini 7,5 kata kadar arttırdığı görülmüştür.

Tan vd (2023) çalışmasında SiC parçacıklarının yüzde oranı ve yazdırma parametrelerinin maraging çeliğinin mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Silisyum karbür parçacıkların maraging çeliğinde oranı altı farklı parametre altında incelenmiştir. Proses parametrelerinin etkisini görmek için bileşimde %9 SiC içeren maraging çeliğinde tarama hızlarını ve lazer güçlerini değiştirmiştir. Tribolojik deneyler ASTM G99 standartlarında gerçekleşmiştir. Veriler incelendiğinde maraging çeliğine SiC katkısının ortalama sürtünme katsayısı azalmıştır. SiC oranındaki artış (%3’ten %12’ye) ile sürtünme katsayısında azalış görülmüştür. %18 SiC içeren numune yüzeyi aşırı gevrekleştiği için tribolojik test sırasında yüzeyi çatlamıştır. Numunelerin özgül aşınma oranları ise SiC yüzde miktarı arttıkça azalmıştır.

Lakshmanan vd. (2023) çalışmasında geleneksel ve eklemeli imalat yöntemleriyle üretilmiş 18Ni350 maraging çeliğinin mekanik özelliklerini kıyaslamıştır. Eklemeli imalat yöntemlerinde 300 kalite maraging çelikleri çok sık kullanılır. Bunun başlıca sebebi toz üreticilerinin 300 kalite maraging çeliği tozlarını üretmesi ve 300 kalite maraging çeliğinin ihtiyaçlara çözüm üretebilmesidir. Çalışmada tribolojik testler ise ball-on-disk tribometresinde, ASTM G99 standartlarında gerçekleşmiştir. Sonuçlar incelendiğinde eklemeli imalat numunelerinin sürtünme katsayısı daha düşük çıkmıştır. Geleneksel imalat ile üretilmiş numunenin aşınma oranı en yüksektir. Mekanik testlerin sonuçlarında eklemeli imalat kullanılarak üretilen maraging çeliğinin, geleneksel maraging çeliklerine göre daha yüksek mukavemete sahip olduğu belirlendi.

3. MATERYAL VE METOT

Numuneler DMLS yöntemiyle üretildikten sonra yaşlandırma tavı, homojenizasyon tavı, homojenizasyon + yaşlandırma tavı olmak üzere üç farklı ısıtılma işlemine maruz bırakılmıştır. Numunelerin farklı yük ve mesafelerdeki aşınma davranışlarını incelemek için bir tribometre kullanılmıştır. Deney verileri doğrultusunda aşınma miktarı ve özgül aşınma oranları hesaplanmıştır. Böylelikle ısıtılma işleminin numunelerin tribolojik özelliklerine etkileri belirlenmiştir.

3.1. Materyal

Çalışmada EOS firması tarafından üretilen ve elementel bileşimi Çizelge 3.1’de verilen MS1 tozlar kullanılmıştır. Numuneler Şekil 3.1’deki gibi tasarlanmış akabinde toz yatak beslemeli EOS M290 sisteminde 285W güçte, 110 µm tarama alanında ve 960 mm/s yazdırma hızında yazdırılmıştır. Yazdırma sonrasında kumlama işlemi yapılarak numunelerin yüzey kaliteleri iyileştirilmiştir. Sonrasında numuneler Çizelge 3.2’te belirtilen ısıtılma işlemlere tabi tutulmuştur.

Çizelge 3.1. EOS Maraging Çeliğinin (MS1) yüzde elementel bileşimi (Tezel ve Kovan, 2021)

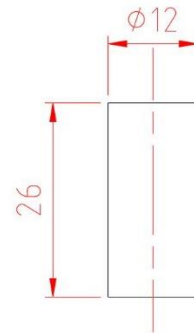
	Fe	Ni	Mo	Ti	Co	Al	C	S	P	Si	Mn
MS1	Balans	17-19	4,5-5,2	0,6-0,8	8,5-9,5	0,05-0,15	≤0,03	≤0,01	≤0,01	≤0,1	≤0,1

Çizelge 3.2. Numunelere uygulanan ısıtılma işlemler

Numune	Isıl İşlem	Kısaltma
İşlem Görmemiş	-	H00
Yaşlandırma Tavı	490 °C’de 6 saat	H01
Homojenizasyon Tavı	840 °C’de 1 saat	H02
Homojenizasyon + Yaşlandırma Tavı	840 °C’de 1 saat + 490 °C’de 6 saat	H03



a)



b)

Şekil 3.1. Deneyler için **a)** üretilmiş pin ve **b)** ölçüleri

3.2. Metot

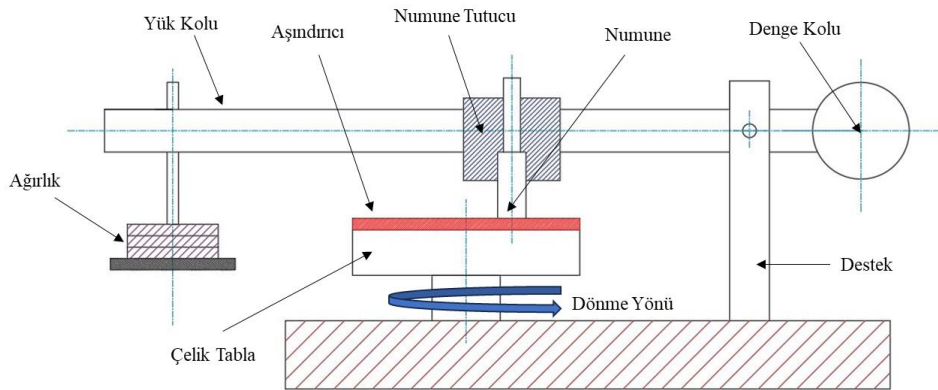
Çalışmada aşınma deneyleri şematiği Şekil 3.2’de görülen tribometrede gerçekleştirilmiştir. Numune tutucuya sabitlenmiş numuneler sürekli dönen aşındırıcı tablaya temas ettirilerek aşındırılmıştır. Temasın sürekliliği için ağırlıklar kullanılmıştır. Deney parametreleri Çizelge 2.2’de verilen ASTM G99-17 standardına göre bir dizi farklılık içermekle birlikte Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Tribolojik deney parametreleri

Parametre	ASTM G99-17 Standardı	Deney Parametreleri
Normal Kuvvet (N)	10 N	5,23-10,40-20,66 N
Kayma Hızı (m/s)	0,1 m/s	0,65 m/s
Kayma Mesafesi (m)	1000 m	500 -1000 m
Aşındırılan Pinin Çapı (mm)	10 mm	12 mm
Aşındırıcı Malzemesi	100Cr6 / Alümina	# 600 SiC Zımpara Kâğıdı
Çevre/Ortam	Hava	Hava
Ortam Sıcaklığı (°C)	23 °C	25 °C
Ortam Nemi (%RH)	12-78 %RH	12-78 %RH
Aşınma İz Dairesinin Çapı (mm)	25-35 mm	61 mm

3.2.1. Aşınma Test Cihazı

Deneylerin Çizelge 3.3’te verilen parametrelerde sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi için Şekil 3.2’de şematiği görülen Akdeniz Üniversitesi Talaşlı İmalat ve Prototip Laboratuvarında mevcut olan tribometre kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Deney cihazının şematiği

Deneylerde aşındırıcı olarak SiC içeren # 600 tipi zımpara kağıtları kullanılmıştır. Bu kâğıdın kullanılmasında literatürde (Zambrano vd. 2019, 2020) demir-karbon alaşımlarının #400 ve # 600 tipi kağıtlar kullanılarak aşındırılması etkin olmuştur. Zımpara kağıtları Şekil 3.3’de görüldüğü gibi lazerle kesildikten sonra çift taraflı bant kullanılarak aşındırıcı tablaya bağlanmıştır. Aşındırıcının iç çapı 25; dış çapı ise 75 mm’

dir. Çift taraflı bantla kurulan bağlantı sayesinde her deneyde ayrı zımpara kağıdının kullanılabilmesi mümkün hale gelmiştir.



Şekil 3.3. Zımpara kağıdının (#600 tipi) lazerle kesilmesi

Numunelerin ısıtma işlemlerinin öncesinde ve sonrasında sertlikleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri RBOV-200 cihazında Brinell sertlik ölçüm (HB30) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde 2,5 mm çaplı çelik küre kullanılarak 187,5 kg yük uygulanmıştır. Standartın beş nokta ölçüm tavsiyesine rağmen numuneler üzerinde 9-10 noktalı ölçümler yapılarak Çizelge 3.4’te verilen sonuçların güvenilirliği arttırılmıştır.

Çizelge 3.4. Numunelerin kumlama sonrası Brinell (HB30) sertlik değerleri (Tezel ve Kovan, 2021)

Isıl İşlem Türü	Sertlik Değeri (HB30)	Standart Sapması
İşlem Görmemiş	239,6	17,08
Yaşlandırma Tavı	368,2	19,51
Homojenizasyon Tavı	244,9	12,25
Homojenizasyon + Yaşlandırma Tavı	391,1	9,645

Test öncesinde ve sonrasında numunelerin aşınma öncesi ağırlıkları Şekil 3.4’de görüldüğü gibi OHAUS marka hassas terazide kütleleri ölçülmüştür. Terazinin hassasiyeti 0,0001g’dır.



Şekil 3.4. Numunelerin hassas terazide kütlelerinin ölçülmesi

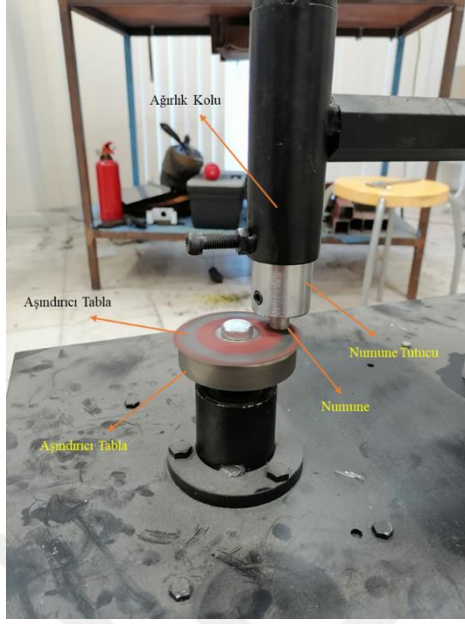
Çizelge 3.5. Deney kategorileri ve parametreleri

Deney Koşulları (Kayma Hızı = 200 rpm)		
Deney No	Yük (N)	Mesafe (m)
1	5,23	500
2	5,23	1000
3	10,40	500
4	10,40	1000
5	20,66	500
6	20,66	1000

Tribolojik deneyler Şekil 3.2’de görülen tribometrede ve Çizelge 3.5’de görülen parametrelerde aşağıdaki sıra ile yürütülmüştür. Prosedürlerde öncelikle iş güvenliği esas alınmış ve ekipmanlarla sağlanmıştır.

1. Numune numarası kontrol edilerek deney parametreleri belirlenir
2. Numunenin ucu 12 mm dışarda kalacak şekilde “Numune Tutucusuna” mesnetlendikten sonra “Numune Tutucusu” “Ağırlık Koluna” sabitlenir
3. #600 tipi zımpara kâğıdı “Aşındırıcı Tablaya” çift taraflı bantla yapıştırılır
4. Belirli yükler için markalanmış ağırlıklar “Ağırlık Koluna” takılır
5. Sisteme güç verilmeden numunenin zımpara ile teması kesilir
6. Sisteme güç verilir ve elektrikselsel kontroller yürütülür
7. “Aşındırıcı Tablanın” hızı 200 rpm’e ayarlanır
8. Numune zımpara ile oldukça düşük hızla temas ettirilir. İlk temasla eş zamanlı olarak kronometre başlatılır.
9. Deney süresince cihaz gözetim altında tutulur.
10. Deney süresi bitince işlemler 6. Adımdan geriye yürütülür.

Şekil 3.5’te ise deney esnasında fotoğraflanmış numune ve aşındırıcı arasındaki etkileşim görülmektedir. Şekil dikkatli incelendiğinde numune daire çapında aşınan parçacıklar görülmektedir. Bu ara parçacıklar ise tribolojik sistemde ara eleman işlevi görür. Bu yönüyle irdelendiğinde deneyde abrasif aşınma önce iki elemanlı başlamış ve üç elemanlı sonlanmış.



Şekil 3.5. Deney esnasında numune ve aşındırıcı etkileşimi

Tüm deneyler tamamlandıktan sonra numuneler Şekil 3.4’te görüldüğü gibi tekrardan hassas terazide ölçülerek kütle kaybı ölçülmüştür. Akabinde numunelerin özgül aşınma oranları Denklem 3.1’de verilen denklemle belirlenmiştir. Özgül aşınma oranı birim mesafe ve yükte malzemenin hacim kaybı olarak tanımlanır (ASTM G137 -97).

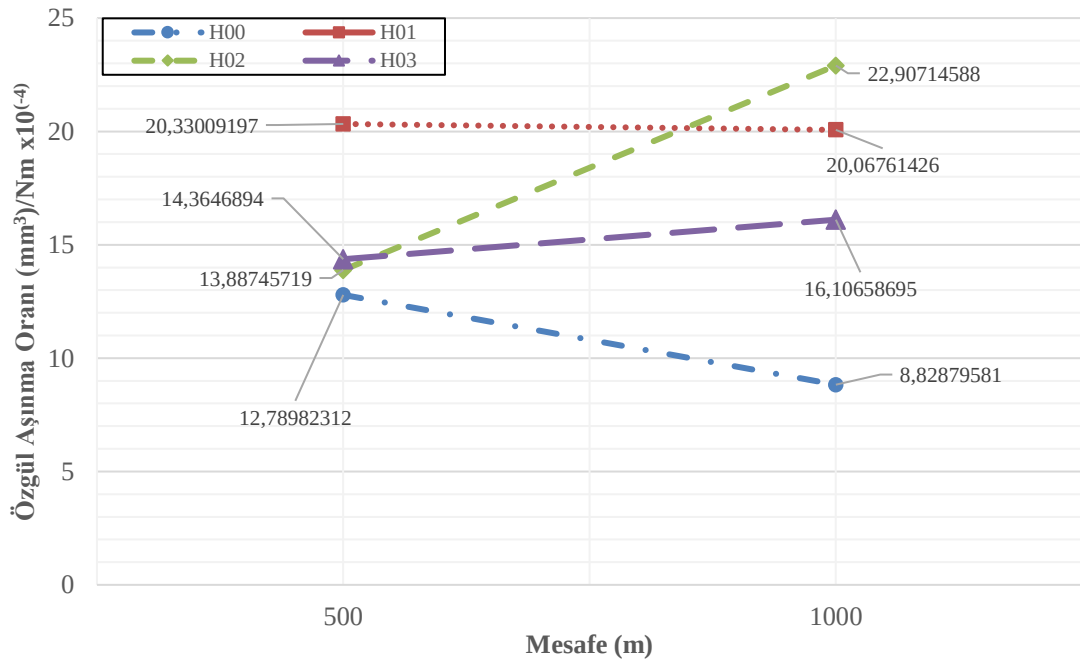
$$\text{Özgöl Aşınma Oranı} = \frac{\text{Kütle kaybı (g)}}{\text{Mesafe (m)} * \text{Kuvvet (N)} * \text{Yoğunluk } (\frac{\text{g}}{\text{mm}^3})} \quad (3.1)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel sonucunda öncelikle aşınma miktarları hesaplanmış özgül aşınma oranları hesaplanmıştır. Numunelerin mesafeye bağlı aşınma miktarı ve özgül aşınma oranı grafikleri çizilmiştir.

4.1. Özgül Aşınma Oranı

Şekil 4.1’de 5,23 N yükte, kayma mesafesine bağlı olarak özgül aşınma oranı değişimi görülmektedir. 5,23 N yükte 500 metre mesafede özgül aşınma miktarı en yüksekte en düşüğe doğru yaşlandırma tavı, homojenizasyon + yaşlandırma tavı, homojenizasyon tavı ve ısıtma işlem görmemiş şeklinde sıralanmaktadır. 1000 metre mesafede ise homojenizasyon tavı, yaşlandırma tavı, homojenizasyon + yaşlandırma tavı ve ısıtma işlem görmemiş şeklinde değişim göstermiştir.

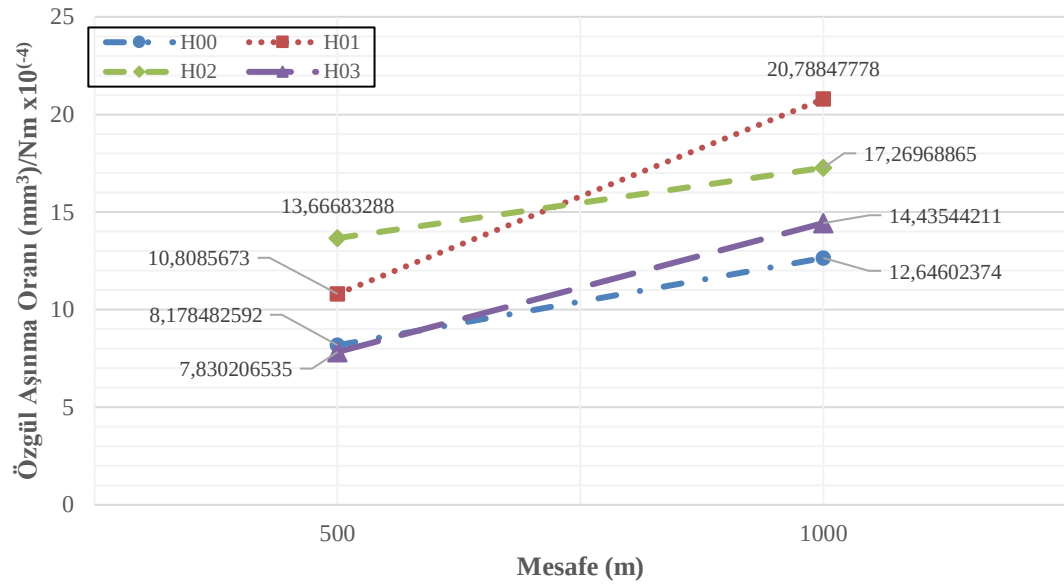


Şekil 4.1. Kayma Mesafesine Bağlı Olarak Özgül Aşınma Oranı (5,23 N Yükte)

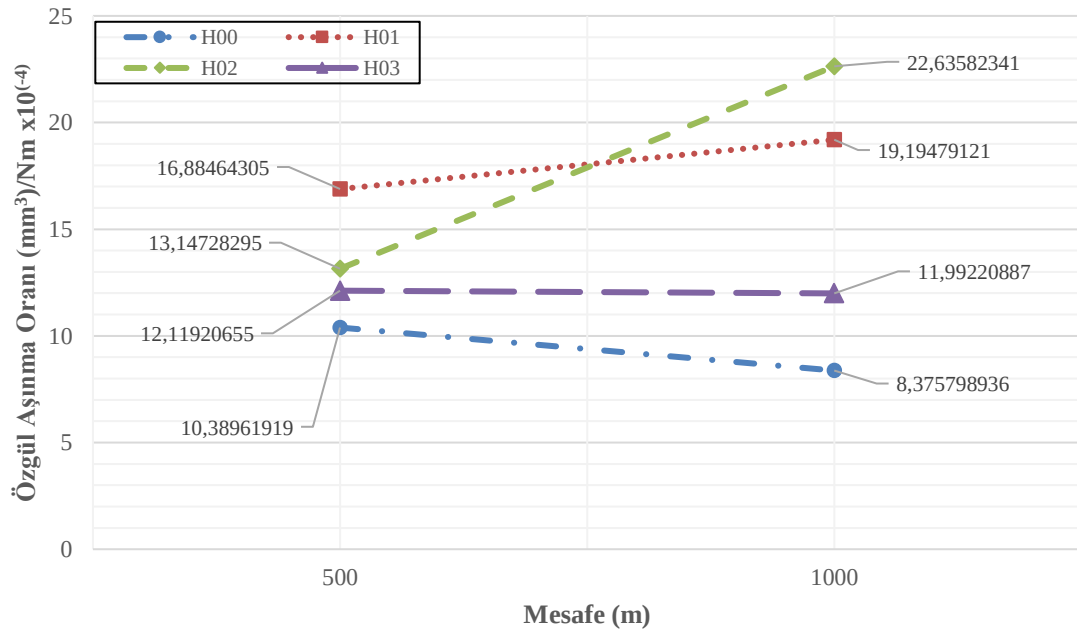
Şekil 4.2’de 10,40 N yükte, kayma mesafesine bağlı olarak özgül aşınma oranı değişimi görülmektedir. 10,40 N yükte 500 metre mesafede özgül aşınma oranı en yüksekte en düşüğe doğru homojenizasyon tavı, yaşlandırma tavı, ısıtma işlem görmemiş, yaşlandırma tavı ve homojenizasyon + yaşlandırma tavı şeklinde sıralanmaktadır. 1000 metre mesafede ise yaşlandırma tavı, homojenizasyon tavı, homojenizasyon + yaşlandırma tavı ve ısıtma işlem görmemiş şeklinde değişim göstermiştir.

Şekil 4.3’te 20,66 N yükte kayma mesafesine bağlı olarak özgül aşınma oranı değişimi görülmektedir. 20,66 N yükte 500 metre mesafede özgül aşınma miktarı en yüksekte en düşüğe doğru yaşlandırma tavı, homojenizasyon tavı, homojenizasyon + yaşlandırma tavı ve ısıtma işlem görmemiş şeklinde sıralanmaktadır. 1000 metre mesafede

ise homojenizasyon tavı, homojenizasyon + yaşlandırma tavı, ısıtım işlem görmemiş ve yaşlandırma tavı şeklinde değişim göstermiştir.

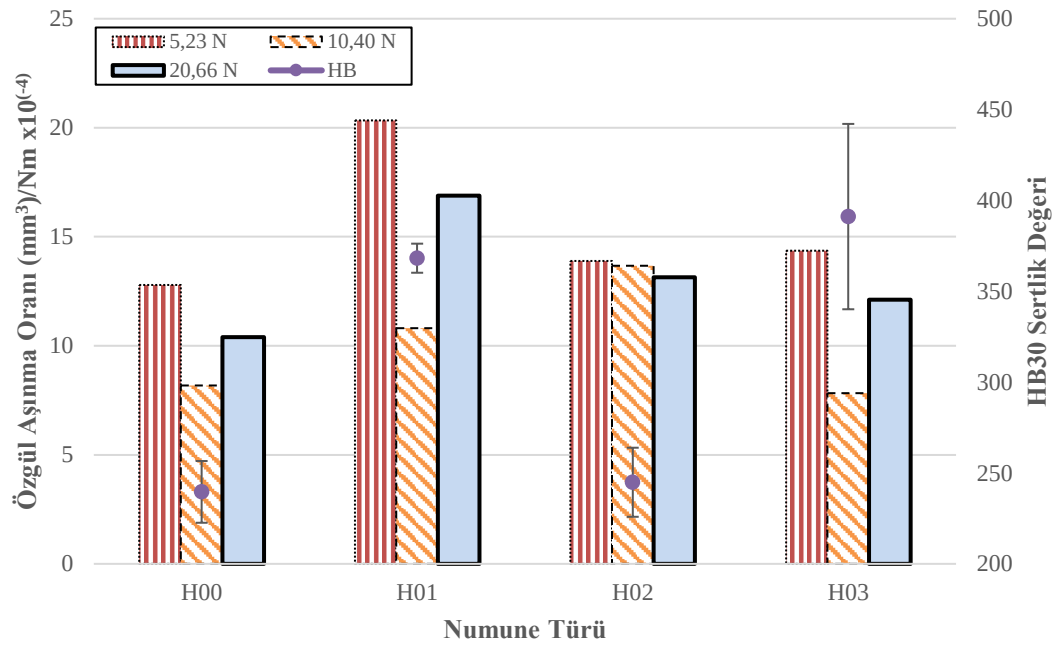


Şekil 4.2. Kayma Mesafesine Bağlı Olarak Özgül Aşınma Oranı (10,40 N Yükte)



Şekil 4.3. Kayma Mesafesine Bağlı Olarak Özgül Aşınma Oranı (20,66 N Yükte)

Aşınma özgül aşınma oranının kuvvete bağlı değişimini göstermek verilerin irdelenmesini kolaylaştıracı bir unsur olacaktır. Bu doğrultuda Şekil 4.4’de numunelerin 500 metre mesafede kuvvete bağlı özgül aşınma oranı görülmektedir.



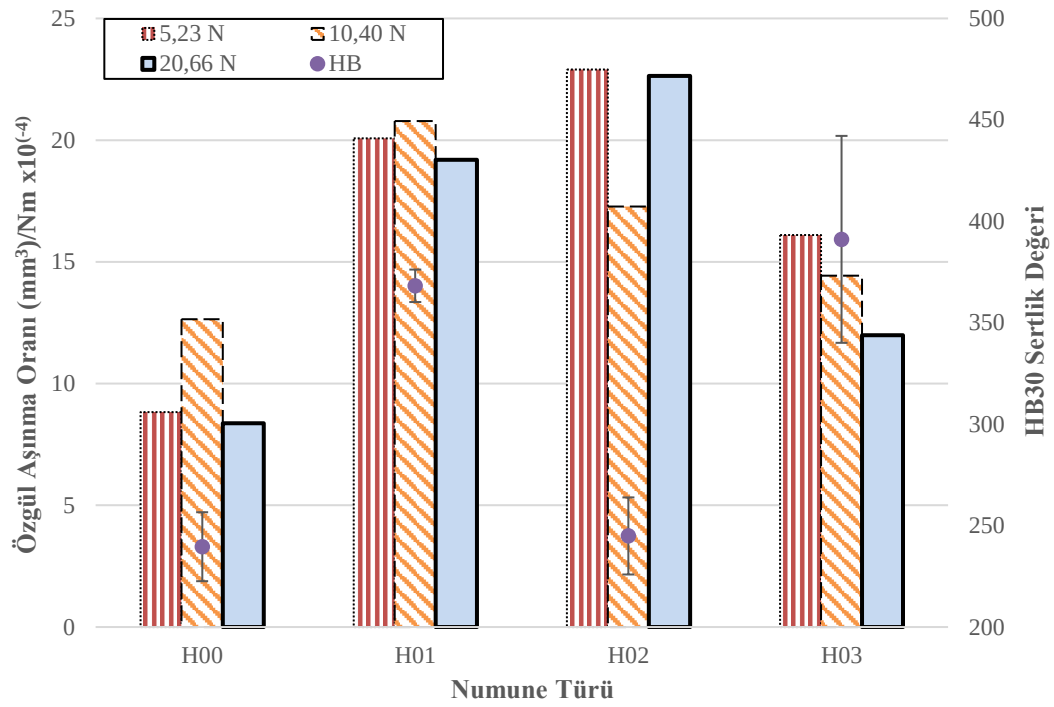
Şekil 4.4 Kuvvete Bağlı Özgül Aşınma Oranı (500 m mesafede)

Şekil 4.4'te minimum özgül aşınma oranı ısıtılmış işlem görmemiş numunelerde görülmüştür. Isıtılmış işlem uygulanmış numunelerde ise homojenizasyon + yaşlandırma tavı uygulanmış numune en az özgül aşınma oranına sahiptir. Yaşlandırma tavı ve homojenizasyon tavı numunelerinin özgül aşınma oranlarının sıralaması ise değişmektedir.

Şekil 4.5 incelendiğinde 1000 m mesafede kuvvete bağlı özgül aşınma oranları görülmektedir. Şekil 4.5 incelendiğinde minimum özgül aşınma oranı ısıtılmış işlem görmemiş numunelerde görülmüştür. Isıtılmış işlem uygulanmış numunelerde ise homojenizasyon + yaşlandırma tavı uygulanmış numune en az özgül aşınma oranına sahiptir. Yaşlandırma tavı ve homojenizasyon tavı numunelerinin özgül aşınma oranlarının sıralaması ise değişmektedir.

Şekil 4.1-4.5 incelendiğinde mesafe ve kuvvete bağlı en düşük özgül aşınma oranı ısıtılmış işlem görmemiş numunelerde görülmüştür. Isıtılmış işlem görmüş numuneler ele alındığında homojenizasyon + yaşlandırma tavı uygulanmış numune en az özgül aşınma oranına sahiptir. Şekil 4.1-4.3'e göre homojenizasyon tavı ve yaşlandırma tavı uygulanmış numunelerin özgül aşınma oranına göre sıralamaları değişiklik göstermektedir. Ancak özgül aşınma oranlarının eğilimi incelendiğinde; yalnızca homojenizasyon tavı uygulanan numunenin ise özgül aşınma oranı her zaman artış göstermiştir.

Bu durumda projede kullanılan malzemelerin aşınma dirençleri en yüksekte en düşüğe doğru ısıtılmış işlem görmemiş, homojenizasyon + yaşlandırma tavı uygulanan, yaşlandırma tavı ve homojenizasyon tavı şeklinde sıralanmaktadır.



Şekil 4.5. Kuvvete Bağlı Özgül Aşınma Oranı (1000 m mesafede)

4.2. Tartışma

Sonuçlar kapsamlı tartışılmadan önce deney süresince meydana gelen aşınma mekanizmalarının ve numune metalurjilerinin tekrardan incelenmesi gerekir. Deneyde öncelikle # 600 SiC içerikli zımpara kâğıdı ile maraging numune arasında abrasif aşınma gerçekleşir. Abrasif aşınmanın ileriki safhalarında ise numunelerden kopan mikro talaşlar ise ara malzeme katmanını oluştururlar.

Bu bölümde numunelere uygulanmış ısıtma işlemlerinin metalurjik etkilerine tekrardan değinmek gerekir. Homojenizasyon tavında, uygun bileşimdeki bir alaşım tek fazlı bir yapı elde etmek için belirli bir sıcaklığa kadar soğutulur. Alaşımdaki bütün fazların tek bir faz içerisinde çözünmesi beklenir. Akabinde alaşım hızlı soğutulur (su verilerek) soğutulur. Homojenizasyon tavından sonra aşırı doymuş α katı çözeltisi elde edilir (Savaşkan 2017). Karbon içeren çeliklerde bu durum “martenzit” fazını oluşturur. Martenzit fazı çeliğin sertlik ve mukavemetini önemli ölçüde artırır. Demir-nikel martenziti bir numuneye bu tür işlemin yapılması sertlik değerini önemli derecede etkilememiştir. Tezel ve Kovan’ın (2021) çalışması incelendiğinde, numuneye yalnızca homojenizasyon tavı uygulamanın, numunenin yorulma dayanımını yeterli düzeyde iyileştirmedeği görülmüştür.

Metalurjik olarak aşırı doymuşluk kararsız bir durumdur. Bu kararsızlığı giderebilmek için malzemeye yaşlandırma tavı uygulanır. Yaşlandırma tavı oda sıcaklığında uygulanırsa “Doğal Yaşlandırma”, oda sıcaklığının üzerinde yapılırsa “Yapay Yaşlandırma” denir. Yaşlandırma işleminin hazırlık evresinde çözelti içerisindeki fazlalık çözünen atomlar bir araya gelip ilk çökeltiyi oluştururlar. Yaşlandırma evresinde ise çekirdeklenme mekanizması daha etkin hale gelir. Bu durumda

fazlalık atomlar β fazının çekirdeklerini oluşturlar. Bu β fazı intermetalik bileşiktir. Yaşlandırma evresinde oluşan ara kristal yapısı veya geçiş kafesi matrisin kafes yapısıyla uyumludur. Bu evrede çökelen β fazının kafes parametresi, matrisin kafes parametrelerinden daha farklıdır. β fazının kafes yapısı ile matrisin kafes yapısının uyumlu olmasından ötürü, matrisin kafes yapısında çarpılma veya distorsiyon meydana gelir. Matrisin kafes yapısında meydana gelen çarpılmanın distorsiyon hareketini zorlaştırması veya engellemesinden ötürü bu evrede alaşımın sertlik ve mukavemeti önemli ölçüde artar (Savaşkan 2017).

Isıl işlemin maraging çeliklerinin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi projenin konusu olmamıştır. Ancak tribolojik sistemin davranışını çözümleyebilmek ve açıklamak için literatürüne de değinmek gerekir. Song vd. (2019) çalışmasında SLM ile yazdırılmış maraging çeliklerinin proses parametreleri, yazdırma yönü ve ısıl işlemlerin mekanik özelliklere etkisini gözlemlemiştir. Numunelere uygulanan ısıl işlemler ve mekanik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Numunelere uygulanan ısıl işlemler ve mekanik özellikleri (Song vd. 2021)

Isıl İşlem	Vickers Sertlik Değeri (HV _{0,5})	Akma Mukavemeti (MPa)
İşlem Görmemiş	345	928
840 °C +2h	294	609
490 °C +2h	520	1775
840 °C +2h / 490 °C +6h	475	1625
840 °C +2h / 490 °C +4h	510	1580
840 °C +2h / 490 °C +2h	543	1650
840 °C +2h / 200 °C +6h	350	825
840 °C +2h / 650 °C +6h	280	775

Çizelge 4.1 incelendiğinde maraging çeliklerine yalnızca homojenizasyon tavı uygulamanın sertlik ve mukavemet değerini azalttığı görülmektedir¹. Bir önceki paragrafta belirtildiği gibi homojenizasyon tavı sonucunda malzemenin aşırı doymuş olması, intermetalik çökeltileri çözündürmesi ve tane boyutunun artışı bu etkiye sebep olmuştur. Malzemeye yalnızca yaşlandırma tavı uygulamak ise malzemenin sertliğini ve akma dayanımını arttırmıştır. Ancak yalnızca yaşlandırma tavı uygulamak malzemenin tokluğunu azaltacaktır (Savaşkan 2017). Kempen vd. (2011) çalışmasında SLM ile yazdırılmış maraging çeliklerine uygulanan 480 °C +5h yaşlandırma işleminin mekanik

¹ Çizelge 3.4 standart sapma değerleri ile incelendiğinde yalnızca homojenizasyon tavı uygulanmış numuneyle ısıl işlem görmemiş numunenin sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Homojenizasyon tavlının yalnızca bir saat ile sınırlı tutulması etkili olmuştur. Bir saatten daha uzun yapılan Homojenizasyon tavlari sonucunda malzeme mukavemetinde azalmalar görülmüştür (Song vd. 2021).

özelliklerine etkisini incelemiştir. Yaşlandırma işleminin mekanik özelliklere etkisi Çizelge 4.2’de verilmiştir. Charpy testi uygulandığında ısıtılmış numunenin kırılma enerjisi 41 Joule (J) iken, yaşlandırılmış numunenin kırılma enerjisi 6 J’dur.

Çizelge 4.2. Yaşlandırma işleminin mekanik özelliklere etkisi (Kempen vd. 2011)

	Elastisite Modülü (GPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Rockwell C Sertliği
Isıl İşlem Görmemiş	163 ±4,5	1214 ± 99	1290 ± 114	13,3 ± 1,9	39,9 ± 0,1
480 °C +5h	189 ± 2,9	1998 ± 32	2217 ± 73	1,6 ± 0,26	58 ± 0,1

Isıl işlemlerin, numunelerin mekanik özelliklerine etkisi ve özgül aşınma oranları birlikte incelenmesi gerekir. Maraging çeliklerine yalnızca homojenizasyon tavı uygulamanın sertlik ve mukavemetinde azalmalara yol açtığı, iç yapı içerisinde artık gerilmelerin olduğu görülmektedir (Savaşkan 2017; Song vd. 2021). Bu durumda numunelerin aşınma direncinde de azalma görülür. Numuneye yalnızca yaşlandırma tavı uygulamak ise numunenin sertliğini ve mukavemetini artıracaktır. Ancak numune gevrekleşecek ve tokluk değeri azalacaktır (Kempen vd. 2011). Numuneye homojenizasyon + yaşlandırma tavı uygulamak ise numunenin mekanik özelliklerini arttıracaktır. Song vd. (2021) çalışması incelendiğinde numuneye homojenizasyon + yaşlandırma tavı (840 °C +2h / 490 °C +2h) uyguladığında numunenin sertlik ve mukavemeti artmıştır. Bununla birlikte yalnızca homojenizasyon tavı (840 °C +2h) uygulanmış ve yalnızca yaşlandırma tavı (490 °C +2h) uygulanmış numunelere nazaran daha yüksek kopma uzamasına sahip olmuştur. Ancak ısıtılmış numunenin kopma uzaması ısıtılmış görmüş üç numuneden de daha yüksektir.

Tribolojik deneylerde esas aşınma mekanizması abrasif aşınma (Şekil 2.6. ve Şekil 2.7.) olmuştur. Bu mekanizma incelendiğinde pürüzlerin akma sınırını geçmesi ve kopması prensibine dayanır. Tribolojik deneylerde ısıtılmış numunenin yüksek süneklik ve tokluk değerleri sayesinde diğer numunelere nazaran daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu görülmektedir. Isıtılmış maruz kalan numuneler kendi içinde değerlendirildiğinde homojenizasyon + yaşlandırma tavı uygulanmış numunenin diğer iki numuneye nazaran daha düşük özgül aşınma oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun oluşmasında yüksek mekanik özelliklerin yanı sıra tokluğun diğer numunelere nazaran daha yüksek olması, aşınma direncini arttırmıştır. Yalnızca homojenizasyon tavı ve yaşlandırma tavı uygulanmış numunelerin aşınma dirençlerini net bir şekilde kıyaslanamamaktadır. Özgül aşınma oranlarına göre sıralandıklarında 500 m’deki sıralamaları 1000 m’de değişmektedir. Ancak Şekil 4.1 – 4.3 incelendiğinde yalnızca homojenizasyon tavı uygulanmış numunenin özgül aşınma oranı mesafe ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu durumda yalnızca yaşlandırma tavı uygulanmış numunenin aşınma direncinin daha yüksek olduğu belirlenebilir.

Literatürde birçok malzemenin tribolojik deneyleri yürütüldükten sonra özgül aşınma oranları da hesaplanmıştır. Özgül aşınma oranının yanı sıra hacimsel oranlama ([mm³/m] ya da [mm³/mm]) olarak ifade edilmiştir. Çizelge 4.3’de ise eklemeli imalatla

üretmiş maraging çelikleriyle yapılan deneylerin; ısıt işlemleri ve deney koşulları ile özgül aşınma oranı verilmiştir.

Çizelge 4.3. Çeşitli alaşımların deney koşulları ve özgül aşınma oranı

Aşınan Malzeme	Sertlik Değeri ¹	Basınç (MPa)	Yol (m)	Özgül Aşınma Oranı (x10 ⁻⁴)	Kaynak
EOS MS1	425 Vickers Sertlik Değeri (HV _{0,02})	200	200	8,1	Özer vd. 2022
EOS MS1 (480 °C +6h)+ hava soğutma	625 Vickers Sertlik Değeri (HV _{0,02})	200	200	3,5	Özer vd. 2022
EOS MS1 (980 °C +1h / 480 °C +6h)	550 Vickers Sertlik Değeri (HV _{0,02})	200	200	5,5	Özer vd. 2022
18-Ni-300 (520 °C +6h)	515 Vickers Sertlik Değeri (HV _{0,01})	900	120	3	Godec vd. 2022
MS300 (5,0 MPa 900 °C 304L soğuk kaplama)	375 Vickers Sertlik Değeri (HV _{0,01})	67	200	3,3	Chen vd. 2019
MS300 (5,0 MPa 1000 °C 304L soğuk kaplama)	410 Vickers Sertlik Değeri (HV _{0,01})	67	200	2,25	Chen vd. 2019
MS300 (5,0 MPa 1000 °C 304L soğuk kaplama +980 °C +1h / 480 °C +6h)	600 Vickers Sertlik Değeri (HV _{0,01})	67	200	0,75	Chen vd. 2019
EOS MS1	40 Rockwell C	1000	100	0,45	Podgornik vd. 2021

Çizelge 4.3'ün yanı sıra ikinci bölümde (Kaynak Taraması) tribolojik çalışmaların deney parametreleri ve özgül aşınma miktarı verilmiştir. Bu çalışmalar bütünüyle irdelendiğinde tribolojik testleri Çizelge 2.2'de verilen ASTM G99-17 standardı referans alınarak yürütülmüştür. Deneylerde tribolojik özelliklerin mesafe, kuvvet ve kayma hızına bağlı özelliklerini incelemek için parametreler değiştirilmiştir. Aşındırıcı uçlar ise standardın belirttiği malzemelerden imal edilmiştir. Standartta ise pin aşındırıcı olarak tanımlanmakla birlikte literatürde diskin aşındırıcı olduğu çalışmalar mevcuttur². Projede mevcut standart Çizelge 3.3'deki gibi revize edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

¹ Projede Çizelge 3.4.'te görüldüğü gibi HB 30 tipi Brinell sertlik değeri kullanılmıştır. Ancak literatürde malzeme sertlikleri farklı yöntem ve metotlarla da ölçülmektedir. Elde edilen sertlik değerlerinin birbirine dönüşümleri için "Dönüşüm Cetveli" mevcuttur. Ancak dönüşüm cetvelleri her metot için belirli değer aralıklarında işlevsel olmakla birlikte Sertlik değerleri arasında bir katsayı yoktur.

² Bir karşılaştırmalı çalışma ele alındığında birden fazla numunenin kullanılması gerekir. Malzemenin birim imalat maliyetleri alaşım içeriğinden ve imalat yönteminden ötürü çok yüksek bedellere ulaşabilir. Bu durumlar için aşınan malzemenin standart da belirtildiği gibi silindirik pin şeklinde üretilerek maliyet azaltıcı tedbir olarak uygulanabilir. Bu durumda disk aşındırıcı materyal olur.

Tribolojik deneylerden elde edilen özgün aşınma oranları Çizelge 4.3'te verilen değerlerden oldukça yüksek çıkmıştır. Sonuçlardaki bu farklılığın oluşmasında aşağıda belirtilen unsurların etkili olduğu düşünülmektedir.

1. Çizelge 2.2' de aşındırıcı uç malzemeleri olarak tanımlanan 100Cr6 ile Alümina malzemenin sertlik değerleri sırasıyla 700 HV ve 1365 HV'dir. Ancak deney düzeneğinde kullanılan SiC malzemenin sertlik değeri 2498 HV 'dir. Ayrıca 100Cr6 veya Alümina aşındırıcılar rijit yapıda iken projede SiC parçacıkları aşındırıcı olarak kullanılmıştır. Aşındırıcı parçacık yoğunluğunun inç kare başına 600 adet olması abrasif aşınma mekanizmalarını çok daha etkin hale getirmiştir.
2. Kayma hızının bir parametre olmadığı çalışmalarda kayma hızı standartta belirtilen değere yakınlık göstermiştir. Ancak triboloji deneylerinde numuneler referans hızın 6,5 katına eşit kayma hızında (0,65 m/s) aşındırılmıştır. Kayma hızındaki artışın aşınma miktarını artırdığı Natarajan vd. (2006) çalışmasında görülebilir.
3. Denklem 3.1 irdelendiğinde aşınma oranının mesafe ve kuvvetle ilişkisi görülebilir. İlk bakışta proje bulguları ile Çizelge 4.3'deki çalışmaların oran orantı yapılarak kıyaslanabilmesi mümkün görünebilir. Ancak malzemelerin farklı yük ve mesafelerdeki aşınma miktarlarındaki orantısızlıktan¹ ötürü çalışmaların kıyaslanması mümkün değildir.

¹ Bu duruma verilebilecek en ideal örnek bu projenin bulgularıdır. Aşınma miktarı ister kuvvete bağlı isterse mesafeye bağlı olsun fazla değişkenlik göstermektedir. Aynı ısıtım işlem grubundan örnek verilecek olursa "5H01" numaralı numunenin aşınma miktarı 0,1396 g iken "6H01" numaralı numunenin aşınma miktarı 0,3174 g'dır. Mesafe iki katına çıkarken aşınma miktarı 2,27 kat artmıştır. Bu durum kuvvet artışı altında irdelendiğinde "3H01" numaralı numunenin aşınma miktarı 0,045 g iken "5H01" numaralı numunenin ise 0,1396 g'dır. Kuvvet iki katına çıkarken aşınma miktarı 3,1 kat artmıştır.

5. SONUÇLAR

Malzemelerin aşınma davranışlarının gelişen teknolojik koşullarla birlikte araştırma alanı gelişmiştir. Bu çalışmada tribolojik özellikleri incelenmemiş maraging çeliklerine tribolojik testlerin yapılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda maraging çeliklere uygulanan ısıl işlemler, imal yöntemleri ve literatür çalışmaları detaylı incelenmiştir. Deneyisel çalışmalarda DMLS yöntemiyle üretilmiş maraging numuneler çeşitli ısıl işlemlere tabi tutulmuştur. Ardından tribolojik deneylerle aşınma miktarı ve özgül aşınma miktarı hesaplanarak ortaya konmuştur. Numunelerin aşınma dirençlerini sıralamak için numuneler özgül aşınma oranları ve eğilimleriyle değerlendirilmiştir.

1. Isıl işlem sonucunda numunelerin daha tokluğundaki azalma sonucu gevrekleşme eğilimi görülür. Gevrek malzemenin aşınma direnci ise sünek malzemeye nazaran daha düşüktür. Bu sebeple ısıl işlem görmemiş numuneler aşınma direnci en yüksek numune olmuştur.
2. Isıl işleme maruz kalmış numuneler kendi içinde sınıflandırmaya tabi tutulduğunda homojenizasyon + yaşlandırma tavı uygulanan numune tüm deney parametrelerinde en az düşük özgül aşınma oranına sahip numunedir. Bu durumun oluşmasında mekanik özelliklerin yanı sıra sünekliğini koruyabilmesi etkili olmuştur.
3. Yalnızca yaşlandırma ve homojenizasyon tavı uygulanmış numunelerin aşınma dirençleri kıyaslandığında bize net bir sonuç vermemektedir. Ancak özgül aşınma oranlarının eğilimi irdelendiğinde; yalnızca homojenizasyon tavı uygulanmış numunenin özgül aşınma oranı mesafe ile doğru orantılı olarak artmaktadır.
4. Tüm bulgular ışığında numuneler aşınma direnci bakımından azalan en yüksekten en düşüğe doğru aşağıdaki gibi sınıflandırılır.
Isıl işlem görmemiş (H00) > Homojenizasyon + Yaşlandırma tavı (H03) > Yaşlandırma tavı (H01) > Homojenizasyon tavı (H02)

Çalışmada elde edilen özgül aşınma oranları literatür ile kıyaslandığında değerler oldukça yüksektir. Bu durumun oluşmasındaki ana faktörse deney düzeneğinde standart dışında tercih edilen 2498 HV sertlik değerine sahip SiC içeren # 600 zımpara kağıdının kullanılmasıdır. ASTM G99-17 standardında ise 700 HV sertlik değerine sahip 100Cr6 ya da 1365 HV sertlik değerine sahip Alümina kullanımı önerilmektedir. Standardın belirttiği malzemeler ayrıca rijit pin veya disk formundadır. Deney düzeneğinde kullanılan parçacıklı aşındırıcı abrasif aşınma miktarının artmasında önemli rol oynamıştır.

Sonuçlar irdelendiğinde DMLS yöntemiyle maraging çeliğinden üretilmiş numuneler yazdırıldıktan sonra homojenizasyon + yaşlandırma tavı ve yaşlandırma tavına tabi tutulabilir. Ancak numuneye yalnızca yaşlandırma tavı uygulamanın, numuneyi daha da gevrekleştireceği unutulmamalıdır. Aşınma direnci olarak ısıl işlem görmemiş numune en yüksek değere sahip olsa bile, makine elemanlarında tekrarlı zorlamalara dayanım önemli bir unsurdur. Makine elemanlarında tekrarlı zorlamalar doğrultusunda yorulmaya dayalı hasar ve görülebilir. Bu sebepten ötürü makine elemanı olarak düşünülen malzemenin yorulma dayanımının da yüksek olması gerekir.

Çalışmadan elde edilen tecrübeler doğrultusunda maraging çeliklerinin tribolojik ve mekanik özellikleri ile ilgili birçok çalışmanın da yürütülebileceği görülmektedir. Öncelikle maraging çeliklerinin temel bileşimi esas alınarak ısıtıl işlemin ve üretim parametrelerinin tribolojik ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmelidir.



6. KAYNAKLAR

- Ahmed Abdelbary, Li Chang, (2023). 4- Friction and wear, Editor(s): Ahmed Abdelbary, Li Chang, Principles of Engineering Tribology, Academic Press, pp 127-206,
- Ahmed, G. M. S., Badruddin, I. A., Tirth, V., Algahtani, A., & Ali, M. A. (2020). Wear resistance of maraging steel developed by direct metal laser sintering. *Materials Express*, 10(7), 1079-1090.
- ASTM F2792-10. 2010. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies
- ASTM G99-17. 2017. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus
- ASTM G137-97. 1997. Standard Test Method for Ranking Resistance of Plastic Materials to Sliding Wear Using a Block-On-Ring Configuration
- Bae, K., Kim, D., Lee, W., & Park, Y. (2021). Wear behavior of conventionally and directly aged maraging 18Ni-300 steel produced by laser powder bed fusion. *Materials*, 14(10), 2588.
- Bae, K. C., Kim, D., Kim, Y. H., Oak, J. J., Lee, H., Lee, W., & Park, Y. H. (2021). Effect of heat treatment, building direction, and sliding velocity on wear behavior of selectively laser-melted maraging 18Ni-300 steel against bearing steel. *Wear*, 482, 203962.
- Bahnini, I., Rivette, M., Rechia, A., Siadat, A., & Elmesbahi, A. (2018). Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 147-161.
- Bayer, R. G. (2019). *Engineering Design for Wear, Revised and Expanded*. Amerika Birleşik Devletleri: Taylor & Francis. 448 sayfa.
- Černašėjus, O., Škamat, J., Markovič, V., Višniakov, N., & Indrišiūnas, S. (2020). Effect of laser processing on surface properties of additively manufactured 18-percent nickel maraging steel parts. *Coatings*, 10(6), 600.
- Černašėjus, O., Škamat, J., Markovič, V., Višniakov, N., & Indrišiūnas, S. (2019). Surface laser processing of additive manufactured 1.2709 steel parts: Preliminary study. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019.
- Chen, C., Yan, X., Xie, Y., Huang, R., Kuang, M., Ma, W., ... & Liao, H. (2019). Microstructure evolution and mechanical properties of maraging steel 300 fabricated by cold spraying. *Materials Science and Engineering: A*, 743, 482-493.
- Çakan, D., Ertuğrul, O., & Yılmaz, M. S. (2023). Aging Heat Treatment of Additively Manufactured Maraging Steels in Nitrogen Containing Atmospheres. *Materials Today Communications*, 106347.
- Colangelo, Vito j., Heiser, Francis A. (1987). *Analysis of Metallurgical Failures*, J. Willey, 360 sayfa.
- Decker, Raymond F., (1979). *Source Book on Maraging Steels: A Comprehensive Collection of Outstanding Articles from the Periodical and Reference Literature*, American Society for Metals, 384 sayfa

- Dehgahi, S., Ghoncheh, M. H., Hadadzadeh, A., Sanjari, M., Amirkhiz, B. S., & Mohammadi, M. (2020). The role of titanium on the microstructure and mechanical properties of additively manufactured C300 maraging steels. *Materials & Design*, 194, 108965.
- DIN 50320: 1979-12. Wear; Terms, Systematic Analysis of Wear Processes, Classification of Wear Phenomena
- Gao, C., Chen, C., Jiang, L., & Zhang, M. (2023). Design of maraging steel with aluminum by laser metal deposition. *Journal of Materials Research*, 38(11), 3022-3033.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Powder bed fusion processes. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*, 107-145.
- Godec, D., Gonzalez-Gutierrez, J., Nordin, A., Pei, E., & Ureña Alcázar, J. (2022). *A Guide to Additive Manufacturing* (p. 324). Springer Nature.
- Godec, M., Podgornik, B., Kocijan, A., Donik, Č., & Balantič, D. A. (2021). Use of plasma nitriding to improve the wear and corrosion resistance of 18Ni-300 maraging steel manufactured by selective laser melting. *Scientific reports*, 11(1), 1-12.
- Godec, M., Ruiz-Zepeda, F., Podgornik, B., Donik, Č., Kocijan, A., & Balantič, D. A. S. (2022). The influence of the plasma-nitriding temperature on the microstructure evolution and surface properties of additive-manufactured 18Ni300 maraging steel. *Surface and Coatings Technology*, 433, 128089.
- Grant, R.G., (2017) *Flight: The Complete History of Aviation*, DK Publishing, 452 sayfa
- Guo, L., Zhang, L., Andersson, J., & Ojo, O. (2022). Additive manufacturing of 18% nickel maraging steels: Defect, structure and mechanical properties: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 120, 227-252.
- Hong, Y., Dong, D. D., Lin, S. S., Wang, W., Tang, C. M., Kuang, T. C., & Dai, M. J. (2021). Improving surface mechanical properties of the selective laser melted 18Ni300 maraging steel via plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 406, 126675
- Hutchings, Ian, Shipway, Philip. (2017) *Tribology (Second Edition)*, Butterworth-Heinemann, 388 sayfa
- ISO 4885:2018. Ferrous materials/ Heat treatments/ Vocabulary
- Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2011). Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel. *Physics Procedia*, 12, 255-263.
- Kürsteiner, P., Barriobero-Vila, P., Bajaj, P., De Geuser, F., Wilms, M. B., Jägle, E. A., & Raabe, D. (2023). Designing an Fe-Ni-Ti maraging steel tailor-made for laser additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 103647.
- Lakshmanan, M., Ramar, M., Saravanakumar, S., & Nandha, M. T. (2023). Mechanical and tribological performance of 18Ni (350) maraging steel. *Materials Today: Proceedings*.

- Mouritz Adrian P., (2012), Introduction to Aerospace Materials, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 621 sayfa.
- Natarajan, N., Vijayarangan, S., & Rajendran, I. (2006). Wear behaviour of A356/25SiCp aluminium matrix composites sliding against automobile friction material. *Wear*, 261(7-8), 812-822.
- Ostrovski, I. F., Rabelo, A., Bodziak, S., Milan, J. C. G., Lafratta, F. H., Parucker, V. S., & Duarte, D. A. (2023). Effect of the plasma nitriding on the mechanical properties of the 18Ni300 steel obtained by selective laser melting. *Surface and Coatings Technology*, 129688.
- Özer, G., Khan, H. M., Tarakçi, G., Yilmaz, M. S., Yaman, P., Karabeyoğlu, S. S., & Kisasöz, A. (2022). Effect of heat treatments on the microstructure and wear behaviour of a selective laser melted maraging steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 236(6), 2526-2535.
- Pan, D., Zhao, Y., Xu, X., Wang, Y., Jiang, W., & Chong, X. (2019). A novel strengthening and toughening strategy for T250 maraging steel: Cluster-orientation governed higher strength-ductility combination induced by electropulsing. *Materials & Design*, 169, 107686.
- Podgornik, B., Šinko, M., & Godec, M. (2021). Dependence of the wear resistance of additive-manufactured maraging steel on the build direction and heat treatment. *Additive Manufacturing*, 46, 102123.
- Pontes, A. J. (2021). Designing for additive manufacturing. *Design and Manufacturing of Plastics Products*, Elsevier, 249-292.
- Pou, J., Riveiro, A., & Davim, J. P. (Eds.). (2021). *Additive manufacturing* (p. 723). Elsevier.
- Pürçek, G. (2021). *Tribology* [PDF Belgesi]. [https://avesis.ktu.edu.tr/purcek/dokumanlar/adresinden alınmıştır](https://avesis.ktu.edu.tr/purcek/dokumanlar/adresinden%20alınmıştır).
- Rohrbach, K., & Schmidt, M. (1990). Maraging steels. In: *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, ASM International, 1063 sayfa
- Rolls Royce, (2015) *The Jet Engine*, John Wiley & Sons, 288 sayfa
- Santecchia, E., Spigarelli, S., & Cabibbo, M. (2020). Material reuse in laser powder bed fusion: Side effects of the laser—metal powder interaction. *Metals*, 10(3), 341.
- Sarkar, A.D., (1976) Chapter 8 – Adhesive Wear, Editor(s): A.D. Sarkar, In *International Series in Materials Science and Technology, Wear of Metals*, Pergamon, pp 49-58,
- Savaşkan, Temel.; (2017) *Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi*. İstanbul. Papatya Yayıncılık Eğitim, 444 s.
- Sha, W., & Guo, Z. (2009). Maraging steels: modelling of microstructure. *Properties and Applications*, 63.
- Simson, T., Koch, J., Rosenthal, J., Kepka, M., Zetek, M., Zetková, I., ... & Kulháněk, J. (2019). Mechanical Properties of 18Ni-300 maraging steel manufactured by

- LPBF. *Procedia Structural Integrity*, 17, 843-849.
- Škamat, J., Bučelis, K., Černašėjus, O., & Indrišiūnas, S. (2023). Fiber laser alloying of additively manufactured 18Ni-300 maraging steel part surface: Effect of processing parameters on the formation of alloyed surface layer and its properties. *Materials*, 16(13), 4732.
- Song, J., Tang, Q., Feng, Q., Ma, S., Setchi, R., Liu, Y., ... & Zhang, M. (2019). Effect of heat treatment on microstructure and mechanical behaviours of 18Ni-300 maraging steel manufactured by selective laser melting. *Optics & Laser Technology*, 120, 105725.
- Tan, C., Ma, W., Deng, C., Zhang, D., & Zhou, K. (2023). Additive manufacturing SiC-reinforced maraging steel: Parameter optimisation, microstructure and properties. *Advanced Powder Materials*, 2(1), 100076.
- Tezel, T., & Kovan, V. (2021). Heat treatment effect on fatigue behavior of 3D-printed maraging steels. *Rapid Prototyping Journal*, 28(1), 175-184.
- Tonolini, P., Marchini, L., Montesano, L., Gelfi, M., & Pola, A. (2022). Wear and corrosion behavior of 18Ni-300 maraging steel produced by laser-based powder bed fusion and conventional route. *Procedia Structural Integrity*, 42, 821-829.
- Yıldız, T., & Gür, A. K. (2006). Aşınma Sistemleri. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 86-91.
- Yin, S., Chen, C., Yan, X., Feng, X., Jenkins, R., O'Reilly, P., ... & Lupoi, R. (2018). The influence of aging temperature and aging time on the mechanical and tribological properties of selective laser melted maraging 18Ni-300 steel. *Additive Manufacturing*, 22, 592-600.
- Zambrano, O. A., Muñoz, E. C., Rodríguez, S. A., & Coronado, J. J. (2020). Running-in period for the abrasive wear of austenitic steels. *Wear*, 452, 203298.
- Zambrano, O. A., Valdés, J., Rodríguez, L. A., Reyes, D., Snoeck, E., Rodríguez, S. A., & Coronado, J. J. (2019). Elucidating the role of κ -carbides in FeMnAlC alloys on abrasion wear. *Tribology International*, 135, 421-431.
- Ziębowicz, A., Matus, K., Pakieła, W., Matula, G., & Pawlyta, M. (2020). Comparison of the crystal structure and wear resistance of co-based alloys with low carbon content manufactured by selective laser sintering and powder injection molding. *Crystals*, 10(3), 197.

ÖZGEÇMİŞ

METEHAN EMİRZEOĞLU

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2021-2024	Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi
2015-2020	Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon

ESERLER

1- Emirzeoğlu M., Tezel T, Kovan V. (2022). Failure Analysis of a Diesel Vehicle Pistons. AL-FARABI 4th INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED SCIENCES, 19-20 August 2022, Iksad Global Publishing House, Erzurum 2022, p.75-84

2- Emirzeoğlu M., Tezel T, Kovan V. (2022). Biomimetic Soft Materials and Soft Robots Produced by Additive Manufacturing. AL-FARABI 4th INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED SCIENCES, 19-20 August 2022, Iksad Global Publishing House, Erzurum 2022, p.85-90