

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ÜÇ BOYUTLU METAL YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE ÜRETİLEN METAL
DİŞLİLERİN GELENEKSEL İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLENLER
YERİNE KULLANILABİLİRLİĞİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Tuğçe TEZEL

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MAYIS 2019

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ÜÇ BOYUTLU METAL YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE ÜRETİLEN METAL
DİŞLİLERİN GELENEKSEL İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLENLER
YERİNE KULLANILABİLİRLİĞİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Tuğçe TEZEL

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MAYIS 2019

ANTALYA

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

**ÜÇ BOYUTLU METAL YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE ÜRETİLEN METAL
DİŞLİLERİN GELENEKSEL İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLENLER
YERİNE KULLANILABİLİRLİĞİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Tuğçe TEZEL
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

**(Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon
Birimi tarafından FDK-2017-2808 nolu proje ile desteklenmiştir.)**

MAYIS 2019

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU METAL YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE ÜRETİLEN METAL
DİŞLİLERİN GELENEKSEL İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLENLER
YERİNE KULLANILABİLİRLİĞİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

TUĞÇE TEZEL
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 20/05/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

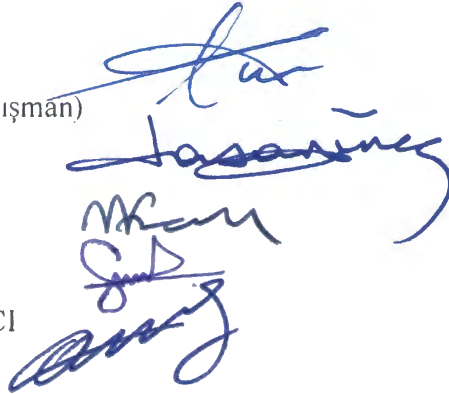
Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL (Danışman)

Prof. Dr. Hasan GÜNEŞ

Prof. Dr. Volkan KOVAN

Doç. Dr. Gökmen ATLIHAN

Dr. Öğr. Üyesi Gültekin BASMACI



ÖZET

ÜÇ BOYUTLU METAL YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE ÜRETİLEN METAL DİŞLİLERİN GELENEKSEL İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLENLER YERİNE KULLANILABİLİRLİĞİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Tuğçe TEZEL

Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL

Mayıs 2019; 84 sayfa

Eklemeli imalat teknolojilerinin temel prensibi, üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım sistemi kullanılarak üretilen modelin, ürün planlamasına ihtiyaç duyulmaksızın doğrudan imal edilebilmesidir. Geleneksel yöntemlerden oldukça farklı olan bu teknoloji, üretimin katman katman yapılarak malzeme israfının da önüne geçilmesini sağlar.

Bu çalışmada benzer özelliklere sahip 420 paslanmaz çelik, 316L paslanmaz çelik, Ti6Al4V ve AlSi10Mg malzemelerden üretilen mikro modüllü dişliler, hem eklemeli hem de geleneksel üretim yöntemiyle üretilmiştir. Özdeş test süreçlerinden geçirilerek, karşılaştırmalı olarak mekanik davranışları incelenmiştir. Devir sayısı, tork, üretim tekniği, üretim sonrası yüzey parlatma işleminin etkisi incelenmiştir. Ağırlıkça aşınma, verim analizi, yağ analizi, hasar analizi ile optik ve taramalı mikroskop ile yüzey incelemeleri yapılmıştır.

Eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin yoğunluk ve sertliklerinin geleneksel yöntemlerle üretilenlere oldukça yakın olduğu ancak yüzey özelliklerinin farklı olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple aynı çalışma koşullarında meydana gelen hasar tipleri farklılık göstermektedir. Ayrıca üretim tekniğine bağlı olarak, mikro modüllü dişlilerde hasar oluşumu ve gelişimi makro boyuttaki dişlilerden farklıdır. Test edilen eklemeli imalat ürünü tüm dişlilerin verimi, geleneksel yöntemle üretilenlerle hemen aynı ya da yüksek olduğundan, eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin geleneksel yöntemlerle üretilen aynı malzemedeki dişlilerin yerini alabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Düz dişli, DMLS, Eklemeli imalat, MEMS, Mikro modüllü dişli.

JÜRİ: Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL

Prof. Dr. Hasan GÜNEŞ

Prof. Dr. Volkan KOVAN

Doç. Dr. Gökmen ATLIHAN

Dr. Öğr. Üyesi Gültekin BASMACI

ABSTRACT

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE USE OF THREE-DIMENSIONAL METAL PRINTED GEARS IN PLACE OF CONVENTIONAL METHODS

Tuğçe TEZEL

PhD Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL

May 2019; 84 pages

The basic principle of additive manufacturing technology is that the model can be fabricated directly via computer-aided design system without needing product planning. This technology is quite different from the traditional methods and allows the production to be prevented wasting material.

This study features 420 steel, 316L steel, Ti6Al4V, AlSi10Mg micro module gears produced using both additive and traditional manufacturing. They were subjected to identical test processes and compared to one another. The effect of rotational speed, torque, production technique, heat treatment and post-production surface treatment was investigated. The researchers performed wear loss, efficiency analysis, oil analysis, damage analysis, normalization optical, and scanning microscope surface analysis. It was revealed that the density and hardness of the gears produced by additive manufacturing were quite close to those produced by conventional methods, however the surface properties were different. Therefore, the types of damage that occur under the same operating conditions differ. Since the efficiency of all the gears tested is wither almost identical or higher than those produced by the conventional method, we concluded that the gears produced using additive manufacturing could replace gears produced by conventional means.

KEYWORDS: Additive manufacturing, DMLS, MEMS, Micro module gear, Spur gear.

COMMITTEE: Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL

Prof. Dr. Hasan GÜNEŞ

Prof. Dr. Volkan KOVAN

Assoc. Prof. Dr. Gökmen ATLIHAN

Asst. Prof. Dr. Gültekin BASMACI

ÖNSÖZ

Eklemeli imalat teknolojileri son yıllarda oldukça popüler bir üretim tekniği olmasına rağmen, geleneksel imalat yöntemlerinin yerini doldurup dolduramayacağı tartışılmaya devam etmektedir. Özellikle, yaygın kullanılan makine elemanlarından dişlilerin en yeni teknolojilerden biriyle üretilerek servis koşullarında çalıştırılması konusu üzerine hazırlanan bu tezin bilime ve Ar-Ge çalışmalarına katkı sağlamasını ümit ediyorum.

Büyük mücadeleler sonucunda verdiğim emeklerin karşılığını alabildiğim için öncelikle şükrediyorum.

Her konuda destekleri ve katkıları ile hep yanımda olan, birlikte çalışmaktan büyük onur duyduğum değerli danışmanım Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL'a, karşılaştığım her zorlukta yanımda olmasının yanı sıra beni destekleyen, bu çalışmada da büyük katkısı olan Prof. Dr. Volkan KOVAN'a teşekkür ederim. Ayrıca, tez izleme komitemin bir diğer üyesi olan Prof. Dr. Hasan GÜNEŞ'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Akademik hayatım süresince doğrudan veya dolaylı olarak tarafıma kastetmeye çalışarak motivasyonumu artırıp, her yönden gelişmeye ve bugüne gelmeye vesile olanlara teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışmanın her aşamasında maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan aileme teşekkür eder, sevgi ve minnetlerimi sunarım.

Son olarak bu çalışmayı, meslek seçimimde ve akademik kariyer hedeflerimde yol gösteren, her zaman yanımda olan, ancak bu tezin hazırlanması sürecinde Hakk'a yürüyen, merhum dayım M. Metin Akbulut'a atfediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	6
2.1. Eklemeli İmalat ile Üretim	6
2.2. Dişli Aşınması ve Dişli Test Cihazları.....	9
2.3. Dişli Teorisi.....	13
2.3.1. Giriş	13
2.3.2. Genel dişli kanunu	14
2.3.3. Dişlilerde temel büyüklükler	16
2.3.4. Düz dişlilerde kuvvetler.....	18
2.3.5. Modül hesapları	18
2.3.5.1. Diş dibi mukavemetine göre modül hesabı.....	19
2.3.5.2. Yüzey basıncına göre modül hesabı	21
3. MATERYAL VE METOT	23
3.1. Malzemeler	23
3.2. Test Dişlileri	25
3.3. Dişlilerin Üretim Yöntemleri	25
3.3.1. Geleneksel yöntemlerle dişli üretimi	25
3.3.2. Eklemeli imalat ile dişli üretimi	26
3.4. Dişlilerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	29
3.4.1. Ağırlık ve yoğunluk ölçümü	29
3.4.2. Yüzey inceleme	29
3.4.3. Sertlik ölçümü.....	30
3.4.4. Madeni yağ elementel analizi	31
3.4.5. Dişli aşınma test cihazı	31


3.4.5.1. Dişli kutusu	32
3.4.5.2. AC servo motor	32
3.4.5.3. Torkmetreler	33
3.4.5.4. Fren mekanizması	33
3.4.5.5. Kontrol ve veri toplama sistemi	34
3.4.6. Test dişlilerinin verim analizi	35
3.4.7. Nümerik analiz.....	35
3.4.8. Normalizasyon	35
3.4.9. Test parametreleri	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
4.1. Nümerik Analiz	37
4.2. 420 Çelik Dişlilerden Elde Edilen Sonuçlar.....	41
4.2.1. Dişlilerin mekanik özellikleri	41
4.2.2. Ağırlık değişimi ve yağ analizi sonuçları	45
4.2.3. Meydana gelen hasarlar	48
4.2.4. Verim analizi	52
4.3. 316L Çelik Dişlilerden Elde Edilen Sonuçlar	52
4.3.1. Dişlilerin mekanik özellikleri	52
4.3.2. Ağırlık değişimi ve yağ analizi sonuçları	55
4.3.3. Meydana gelen hasarlar	57
4.3.4. Verim analizi	58
4.4. Ti6Al4V Dişlilerden Elde Edilen Sonuçlar	59
4.4.1. Dişlilerin mekanik özellikleri	59
4.4.2. Ağırlık değişimi ve yağ analizi sonuçları	60
4.4.3. Meydana gelen hasarlar	63
4.4.4. Verim analizi sonuçları.....	64
4.5. AlSi10Mg Dişlilerden Elde Edilen Sonuçlar	65
4.5.1. Dişlilerin mekanik özellikleri	65
4.5.2. Aşınma miktarı ve yağ analizi sonuçları	67
4.5.3. Meydana gelen hasarlar	68
4.5.4. Verim analizi sonuçları.....	70
4.6. Genel Sonuçlar	71

5. SONUÇLAR	77
6. KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Üç Boyutlu Metal Yazıcı Teknolojisi ile Üretilen Metal Dişlilerin Geleneksel İmalat Yöntemiyle Üretilenler Yerine Kullanılabilirliğinin Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

20/05/2019


Tuğçe TEZEL

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a_d	: Eksenler arası mesafe
Al	: Alüminyum
b	: Diş genişliği
cm^3	: Santimetreküp
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Ç	: Bölüm dairesi çevresi
d	: Bölüm dairesi çapı
MPa	: Megapaskal
GPa	: Gigapaskal
d	: Bölüm dairesi çapı
d_a	: Diş üstü dairesi çapı
d_b	: Temel dairesi çapı
d_f	: Diş dibi dairesi çapı
Fe	: Demir
F_t	: Teğetsel kuvvet
F_n	: Normal kuvvet
F_r	: Radyal kuvvet
g	: Gram
h	: Diş yüksekliği
h_a	: Diş üstü yüksekliği
h_f	: Diş dibi yüksekliği
HV	: Vickers sertliği
HRB	: Rockwell B sertliği

HB	: Brinell sertliği
Hz	: Hertz
i	: evrim sayısı
K _f	: Form faktörü
K _i	: İşletme faktörü
K _v	: Hız faktörü
K _ε	: Kavrama oranı faktörü
K _m	: Yük dağılım faktörü
K _α	: Kavrama açısı faktörü
Nm	: Newton metre
Nmm	: Newton milimetre
m	: Dişli modülü
M _d	: Döndürme momenti
μm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
mm ³	: Milimetreküp
mg	: Miligram
Mg	: Magnezyum
Mo	: Molibden
Ni	: Nikel
p	: Diş adımı
p _e	: Kavrama adımı
r	: Yuvarlanma dairesi yarıçapı
R	: Bölüm dairesi yarıçapı
s ⁻¹	: Devir sayısı
s	: Diş kalınlığı

Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
Ti	: Titanyum
ω	: Açısal hız
V	: Vanadyum
v	: Çizgisel hız
v_n	: Çizgisel hızın normal bileşeni
v_t	: Çizgisel hızın teğetsel bileşeni
z	: Diş sayısı
α	: Kavrama açısı
β	: Helis açısı
ψ_m	: Modül genişlik oranı
X	: Kavrama noktası

Kısaltmalar

AGMA	: Amerika Dişli Üreticileri Birliği
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
DMLS	: Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
FDM	: Ergiyik biriktirme tekniği
FZG	: Dişli Araştırma Merkezi
HIP	: Sıcak İzostatik Pres
ISO	: Uluslararası Standartlar Örgütü
MEMS	: Mikro elektromekanik sistemler
PBF	: Toz Yatağı Füzyonu

P	: İlave işlemle yüzeyi parlatılmış dişli
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SLM	: Seçici Lazer Ergitme
TS	: Türk Standardı
WAAM	: Ark Enerji Kaynaklı Tel Ergitme
3D	: Üç Boyutlu
3DGP	: Üç Boyutlu Jel Baskı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Dişli çark mekanizmaları (Decker ve Kabus 2011).....	14
Şekil 2.2. Genel dişli kanunu (Haberhauer ve Bodenstein 2014)	15
Şekil 2.3. Dişli çarklarda temel büyüklükler (Decker ve Kabus 2011)	17
Şekil 2.4. Düz dişlilerde kuvvetler ve kuvvetlerin gerilme etkisi (Wittel vd. 2013)	18
Şekil 2.5. Form faktörü, K_f (DIN 3990)	20
Şekil 2.6. Düz dişliler için tahmini modül seçimi (Şekercioğlu 2015).....	21
Şekil 2.7. Kavrama açısı faktörü, K_A (DIN 3990)	22
Şekil 3.1. Paslanmaz çeliklerde Cr ve C miktarının içyapı oluşumuna etkisi (Bargel ve Schulze 2012)	24
Şekil 3.2. 1000°C sıcaklıktan suda soğutulmuş paslanmaz çeliklerde (C %0,2) Cr ve C miktarının içyapı oluşumuna etkisi (Bargel ve Schulze 2012)	24
Şekil 3.3. Dişli test numunelerinin teknik resmi.....	26
Şekil 3.4. Doğrudan metal lazer sintirleme (DMLS) yöntemi	27
Şekil 3.5. Dolaylı DMLS yöntemi	28
Şekil 3.6. Hassas terazi ve ölçüm kiti	29
Şekil 3.7. Stereo mikroskop	30
Şekil 3.8. Taramalı elektron mikroskobu.....	30
Şekil 3.9. Sertlik ölçme cihazı	31
Şekil 3.10. Dişli aşınma test cihazı	31
Şekil 3.11. Dişli kutusunun üstten görünümü	32
Şekil 3.12. AC servo motor	33
Şekil 3.13. Torkmetre	33
Şekil 3.14. Fren mekanizması.....	34
Şekil 3.15. AC servo motor sürücüsü	34
Şekil 3.16. Kontrol ve veri toplama cihazı	34
Şekil 3.17. Fren kontrolörü	35
Şekil 4.1. Analizde kullanılan düz dişli çifti ve ağ yapısı.....	37
Şekil 4.2. 316L dişlide 0,25 Nm torkta meydana gelen temas basıncı	38
Şekil 4.3. 316L dişlide 0,25 Nm torkta meydana gelen Von-Mises gerilmesi	38
Şekil 4.4. 316L mikro modüllü dişlilerde torka bağlı olarak temas basıncı ve eşdeğer eğilme gerilmesi değişimi (Tezel vd. 2018b).....	39
Şekil 4.5. 420 çelik mikro modüllü dişlilerde torka bağlı olarak temas basıncı ve eşdeğer eğilme gerilmesi değişimi	40

Şekil 4.6. Ti6Al4V alaşımı mikro modüllü dişlilerde torka bağlı olarak temas basıncı ve eşdeğer eğilme gerilmesi değişimi.....	40
Şekil 4.7. AlSi10Mg alaşımı malzemeden mikro modüllü dişlilerde torka bağlı olarak temas basıncı ve eşdeğer eğilme gerilmesi değişimi.....	41
Şekil 4.8. Geleneksel yöntem ile üretilen 420 çelik dişliye ait diş yüzeyi.....	42
Şekil 4.9. Eklemeli imalat ile üretilen 420 çelik dişliye ait diş yüzeyi.....	43
Şekil 4.10. Eklemeli imalat ile üretildikten sonra yüzeyi parlatılmış 420 çelik dişliye ait diş yüzeyi.....	44
Şekil 4.11. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 420 çelik dişlilerin aşınma miktarı.....	45
Şekil 4.12. 500 s ⁻¹ devir sayısında torka bağlı olarak 420 çelik dişlilerin aşınma miktarı.....	46
Şekil 4.13. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 420 çelik dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen Fe miktarı.....	47
Şekil 4.14. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 420 çelik dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen Fe+Cr ve Cu +Sn miktarı.....	48
Şekil 4.15. 420 çelik dişlilerin 0,25 Nm torkta çalışması sonrası yüzeyleri.....	49
Şekil 4.16. 0,50 Nm torkta eklemeli imalat ile üretilen 420 çelik dişlilere uygulanan ilave parlatma işleminin dişli hasarlarına etkisi.....	50
Şekil 4.17. Eklemeli imalat ile üretilen 420 çelik dişlilere uygulanan üretim sonrası yüzey işleminin dişli hasarlarına 0,25 Nm torkta etkisi.....	51
Şekil 4.18. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 420 çelik dişlilerin verimi.....	52
Şekil 4.19. Geleneksel yöntem ile üretilen 316L çelik dişliye ait diş yüzeyi.....	53
Şekil 4.20. Eklemeli imalat ile üretilen 316L çelik dişliye ait diş yüzeyi.....	54
Şekil 4.21. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 316L çelik dişlilerin aşınma miktarı.....	55
Şekil 4.22. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 316L çelik dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen Fe miktarı.....	56
Şekil 4.23. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 316L çelik dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen Fe+Cr ve Cu +Sn miktarı.....	57
Şekil 4.24. 316L çelik dişlilerin 0,25 Nm torkta çalışması sonrası yüzeyleri.....	58
Şekil 4.25. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 316L çelik dişlilerin verimi.....	59
Şekil 4.26. Geleneksel yöntem ile üretilen Ti6Al4V dişliye ait diş yüzeyi.....	60
Şekil 4.27. Eklemeli imalat ile üretilen Ti6Al4V dişliye ait diş yüzeyi.....	61
Şekil 4.28. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak Ti6Al4V dişlilerin aşınma miktarı.....	62
Şekil 4.29. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak Ti6Al4V dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen titanyum miktarı.....	62

Şekil 4.30. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak Ti6Al4V dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen titanyum, alüminyum ve vanadyum miktarının toplamı	63
Şekil 4.31. Ti6Al4V dişlilerin 0,25 Nm torkta çalışması sonrası yüzeyleri	64
Şekil 4.32. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak Ti6Al4V dişlilerin verimi.....	65
Şekil 4.33. Geleneksel yöntemle üretilen AlSi10Mg dişliye ait diş yüzeyi	66
Şekil 4.34. Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg dişliye ait diş yüzeyi.....	67
Şekil 4.35. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak AlSi10Mg dişlilerin aşınma miktarı.....	68
Şekil 4.36. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak AlSi10Mg dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen alüminyum miktarı.....	69
Şekil 4.37. 0,25 nm torkta devir sayısına bağlı olarak AlSi10Mg dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen alüminyum, silisyum ve magnezyum miktarı	69
Şekil 4.38. AlSi10Mg dişlilerin 0,25 Nm torkta çalışması sonrası yüzeyleri.....	70
Şekil 4.39. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak AlSi10Mg dişlilerin verimi	71
Şekil 4.40. Farklı üretim teknikleriyle üretilen dişlilerin sertlik sonuçları	72
Şekil 4.41. Farklı üretim teknikleriyle üretilen dişlilerin yoğunluk sonuçları.....	72
Şekil 4.42. 420 çelik dişlilerin 500 s ⁻¹ devirde torka bağlı olarak özgül aşınma oranı...	73
Şekil 4.43. Dişlilerin 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak özgül aşınma oranı ...	74
Şekil 4.44. Dişlilerin 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak verimi	75
Şekil 4.45. 420 çelik dişlilerin 500 s ⁻¹ devirde torka bağlı olarak verimi.....	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Standart modüller (TS 24340, DIN 780)	16
Çizelge 2.2. Hız faktörü, K_v (Şekercioğlu 2015)	19
Çizelge 2.3. Yük dağılım faktörü, K_m (Şekercioğlu 2015).....	19
Çizelge 2.4. Kavrama faktörü, K_ϵ (Şekercioğlu 2015).....	19
Çizelge 2.5. İşletme faktörü, K_i (DIN 3990)	20
Çizelge 3.1. Dişlilerde kullanılan alaşımların kısa gösterimleri	23
Çizelge 3.2. DMLS ile imal edilen dişlilerden beklenen malzeme özellikleri	27
Çizelge 3.3. Dolaylı DMLS ile imal edilen dişlilerden beklenen malzeme özellikleri ..	28
Çizelge 4.1. 420 çelik dişlilerin özellikleri	44
Çizelge 4.2. 316L çelik dişlilerin özellikleri.....	54
Çizelge 4.3. Ti6Al4V dişlilerin özellikleri	59
Çizelge 4.4. AlSi10Mg dişlilerin özellikleri	65

1. GİRİŞ

Dişliler, miller arasında hareket ve mekanik güç iletimini sağlayan neredeyse tüm makine tasarımcıları tarafından ihtiyaç duyulan makine elemanlarından biridir. Tarihi gelişimi üç bin yıldan uzun olan dişlilerin tasarımı oldukça karmaşıktır. Makine tasarımı ve imalatı alanındaki gelişmeler neticesinde ucuz, hafif, sessiz çalışan ve güç iletimi yüksek dişli ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Dişli tasarımındaki bu sürekli değişimlerin karşılanması gerekmektedir (Radzevich 2016).

Dişlilerin, parçası oldukları makinelerin kullanım ömrü boyunca sorunsuz çalışması önemli tasarım parametrelerindedir. Ancak, elverişsiz koşullar altında çalışan dişliler için erken hasar kaçınılmazdır (Glew 1980). Makinelerde meydana gelecek hasarlar sonucunda ortaya çıkan zaman, maliyet gibi olumsuzlukların önüne geçilebilmesi için dişlilerde meydana gelen hasarların erken tespiti önem arz etmektedir. Çeşitli dişli arızaları ve bu arızaları tanımlayan isimlendirme AGMA (American Gear Manufacturers Association, Amerika Dişli Üreticileri Birliği) tarafından standardize edilmiştir. AGMA Standardı 1010'a göre bir dişli diş yüzeyinin zarar görebileceğinin bilindiği 18 çeşit yol ve 3 tip diş kırılması vardır. Aynı anda birkaç çeşit diş hasarı olabileceği gibi tek tip bir hasarla karşılaşmak da mümkündür (Radzevich 2016). Bir dişli hasarıyla karşılaşıldığında, temel olarak hasarın ilişkilendirilebileceği üç temel neden bulunmaktadır:

1. Yüzey yorulma hasarları: Pitting (çukurlaşma)
2. Diş kırılma hasarları: Cleavage (kırılma)
3. Yağlama kaynaklı hasarlar: Scoring (pullanma), aşınma, scuffing (çizilme)

Yüzey yorulma hasarları, yüksek yüzey basıncına maruz dişlilerde malzeme dayanım sınırları aşıldığında ortaya çıkan bir hasar türüdür. Başlangıç ve ilerleyen olmak üzere iki tip pitting (çukurlaşma) vardır. Başlangıç pitting hasarı, diş yüzeylerindeki pürüzler sebebiyle yeni çalışan dişlilerde sıklıkla görülür. Yüksek gerilmeye maruz kalan diş yüzeylerinde pitting, çalışmaya başladıktan sonra birkaç gün içinde veya başladıktan birkaç saat sonra gözlenebilir. Diş yüzeyinin pürüzlülüğü azaltılarak veya diş profilleri düzeltilmek suretiyle gerilmenin temas yüzeylerine eşit dağılması sağlanarak bu hasarın önüne geçmek mümkündür. İlerleyen pitting hasarında, oluşan çukurlar birbirleriyle temas ettikçe parçalanarak şekillenmeye ve genişlemeye devam eder. Bu hasar sonucunda diş şekli bozularak dişli çiftinin gürültülü çalışmasına neden olur. Ayrıca diş yüzeyinde meydana gelen çukurlar, yorulma çatlaklarının oluşmasına, ilerlemesine hatta diş kırılmasına dahi sebebiyet verebilir.

Diş kırılma hasarları, yorulma kırılması ve aşırı yüklemeye kırılması olarak ikiye ayrılır. Bir dişli dişinin sadece bir kısmı kopsa bile, dinamik dengesizlik beraberinde tahrik sistemindeki diğer elemanlara da hasar verebilir. Yorulma kırılması, malzemenin yorulma dayanımının üstündeki olan gerilmeler sonucunda, genellikle diş dibindeki yorulma çatlağı ile başlar ve zayıflayan diş kopana kadar yavaş yavaş büyür. Yorulma kırılmasından kaçınmanın en iyi yöntemlerinden biri, yüksek yorulma mukavemetli malzeme seçimidir. Malzemenin uygun iç yapı elde edilecek şekilde ısıl işleme tabi tutulması ve kalıntı gerilmelerin en aza indirilmesi de önemlidir. Aşırı yük kırılması ise,

ani aşırı yüklemelerin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Diş kırılmaları incelendiğinde, genellikle ilk kırılmanın yorulmadan kaynaklandığı ve ardından meydana gelen ani yüklemeler sonucunda diğer dişlerin kırıldığı görülmektedir. Ayrıca, tahrik edilen ekipmanın arızası, yağda bulunan yabancı madde veya bir dişli yatağı arızası nedeniyle ani yanlış hizalanmadan da kaynaklanabilir.

Yağlama kaynaklı hasarlar (aşınma, çizilme, pullanma), dişlilerde hasara sebebiyet veren temel nedenlerden bir diğeridir. Yağ, dişli çiftleri birbiri üzerinden kayarken metalin metalle temas etmesini önleyen bir film oluşturur. Yataklardan gelen kirler, diş yüzeylerindeki metal parçası kopmaları gibi çeşitli nedenlerden dolayı, yağ filmi, metal ile metal temasını önleyecek kadar yeterli olmayabilir. Bunun sonucunda, diş yüzeylerinde kayma yönünde çizilmeler (scuffing), aşınma yüzeyleri ve yırtılmalar görülebilir. Böylelikle, diş profili bozularak dişlilerin şiddetli titreşim ve gürültü ile çalışmasına neden olur. Yağlama, bu hasarların yaygın önlemlerinden biridir. Yağlamanın amacı; sürtünme, aşınma, sıcaklık ve korozyon kontrolü sağlanması ve kirli maddelerin uzaklaştırılması suretiyle tasarım elemanlarının korunmasıdır (Glew 1980).

Endüstriyel alanda küçük modüle sahip dişlilerin pratik olarak kullanımı için bu tip dişlilerin hasar mekanizmaları ve dayanımlarının önceden bilinmesi gerekir. Normal boyuttaki dişliler için bu verilerin varlığı test düzenekleri vasıtasıyla elde edilebilir. Ancak, küçük geometriye sahip dişli ile normal dişli karşılaştırıldığında modülü küçük dişli çiftinin kavrama durumu, hasarı, dayanım karakteristikleri normal boyuttaki dişlilere göre oldukça farklıdır. Modülü 1'den büyük dişlilerin aşınmalarının araştırılması için literatürde ve sanayi de birçok test ekipmanı mevcutken, modülü 1 ve 1'den küçük dişliler için test cihazlarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Mikro elektromekanik sistemler (MEMS) günümüzde var olan mekanik ve elektrik sistemlerin bütünleşik ve minyatür versiyonları olup mikron boyutlarında sistemlerdir. Mikro elektronik devreler veya mekanik yapılar entegre edilerek tek parça haline getirilir. Böylelikle mikro sistemin hem boyutu hem de maliyeti azalır. MEMS teknolojisi başta otomotiv, endüstri, biyomedikal, robotik ve askeri olmak üzere hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Otomotivde hava yastık sistemlerinde, araç güvenlik sistemlerinde, yol bilgisayarlarında; askeri alanda askeri araçlarda ve ekipmanlarda; biyomedikalde tüm tıbbi cihaz, sensör vb. ekipmanlarda, vücut içi-dışı implantlarda, biyoçiplerde; endüstride birçok makine parçasında, ayrıca ev aletlerinde kullanılmaktadır. Gelişen imalat teknolojileri ve oluşan ihtiyaçlarla birlikte minyatür/mikro ürünler/sistemler ve bileşenler için talep giderek artmaktadır. Bu taleplerin karşılanabilmesi için makro ve mikro imalat süreçleri arasında bir köprü kurmak gereklidir. Böylelikle minyatür makine parçalarının tasarımı ve gelişmesi sağlanarak, birçok alanda verimli bir şekilde kullanılacaktır.

Mikro sistemler, belirli mühendislik işlevlerini yerine getiren MEMS bileşenlerini içerir. Bir MEMS, 1 ile 1000µm (1mm) arasında değişen boyuttaki bileşenleri içerebilir (Hsu 2008). Dişlileri de içeren minyatür bileşenler için boyutsal olarak tutarlı bir uluslararası sınıflandırma bulunmamaktadır. Genel olarak dış çapı 1mm'den az olan dişliler mikro dişli, dış çapı 1 ile 10mm arasında olan dişliler ise mezo dişli olarak sınıflandırılır. Mikro modüllü dişliler ise modülü 1 ve 1'den küçük dişlilerdir (Gupta ve Jain 2014).

Mikro modüllü dişliler, minyatür makine elemanlarının en önemli elemanlarından biri olup mikro elektro-mekanik sistemlerde (MEMS) yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikro modüllü dişlilerin kullanıldığı cihazların işlevsel özellikleri, kullanılan dişlilerin üretim kalitesine büyük ölçüde bağlıdır. Bu nedenle kaliteli dişli imalatı önem kazanmaktadır. İmal edilen mikro modüllü dişlilerin tolerans ve boyutları, tasarıma en yakın şekilde üretilebilmelidir. Mikro modüllü dişliden istenilen performansın elde edilebilmesindeki bir diğer önemli husus ise malzeme seçimidir. Paslanmaz çelikler, demir olmayan metaller ve plastikler mikro modüllü dişli imalatında yaygın olarak kullanılır. Paslanmaz çelikler büyük güçlerin aktarılmasında tercih edilir ve yüksek mukavemet sağlar. Demir olmayan metaller iyi işlenebilirlik, hafiflik ve korozyon direnci sunarken plastikler zayıf işlenebilme özellikleri ve çalışma sıcaklığı sınırlamalarıyla bilinmektedir. Ayrıca az gürültülü çalışmak, gücü en verimli şekilde aktarabilmek ve uzun ömürlülük normal boyutlu dişlilerde olduğu gibi mikro modüllü dişlilerin de en temel işlevsel gereklilikleridir. Bu özelliklerin elde edilebilmesi için, mikro modüllü dişlinin yüzey kalitesi iyi olmalı, geometrik olarak doğru ve üst düzey mekanik özelliklere sahip olmalıdır. Bu gereklilikler imalat yöntemiyle birlikte uygun malzemenin seçimi, ısıtma işlem koşulları ve üretim sonrası işlemler ile sağlanabilir.

Mikro modüllü dişlilerin imalatında yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemi azdırma tezgâhıyla imalattır. Üretilen dişlilerin boyut ve yüzey kalitesi sınırlı olduğundan son işlem gereklidir. Daha yüksek yüzey kalitesine sahip mikro modüllü dişlilerin plastik şekil verme yöntemlerinden kalıpta kesme ve ekstrüzyon ile de üretimi mümkündür. Kalıpta kesme işleminde, bir kalıbın üst ve alt kısmı arasına bir metal levha yerleştirilir, üst kalıba uygulanan kuvvet, levhadan dişliyi keserek çıkarır. Kalıp ve zımba arasındaki kesme hareketi dişlerin ve dış çevredeki dişlerin bir kenarda biraz kaba ve yuvarlak olmasına neden olur. Bu durum dişlilerin performansını olumsuz yönde etkiler. İşlem sonrası istenilen yüzey özelliklerine bağlı olarak yüzey kalitesini artırmaya yönelik işlemlere gereksinim duyulabilir. Bunun yanı sıra kalıp zımbalarının aşınması veya yıpranması, dişli yüzeyi için önemli bir sorundur. Bu yöntem, hafif ve orta yük taşıma kapasiteli dişliler üretmek için düşük maliyetli ve verimli bir yöntemdir. Düşük ve orta karbonlu çelikler, pirinçler ve bazı alüminyum alaşımları da dahil olmak üzere çok çeşitli malzemelerden derin çekme işlemiyle dişli üretimi sağlanabilir. Ekstrüzyon ile mikro modüllü dişli imalatında bir çubuk, son kalıpta istenen diş formunun elde edilebilmesi için birkaç kalıptan oluşan bir dizi boyunca ekstrüde edilir. Basıncın etkisiyle yer değiştiren malzeme son şeklini alır, dış yüzey sertleşmiş ve oldukça pürüzsüzdür. Bu yöntem ile yalnızca düz ve dişleri kalın dişlilerin üretimi mümkündür. Dişliler için gereken tolerans ve doğruluğun elde edilebilmesi için ek işlem gereklidir. Bunun yanı sıra kalıbın aşınması istenilen özelliklerde dişli imalatına engel olabilir. Geleneksel mikro modüllü dişli imalat yöntemlerinden bir diğeri ise dökümdür. Çinko, pirinç, magnezyum, alüminyum, çelik, bronz gibi çeşitli malzemelerden düz, helisel, konik dişliler döküm ile üretilebilir. Bu yöntemin maliyetinin düşük olması ve yüksek üretim hacmine uygunluğu üstün yanlarıdır. Hassas tolerans ve doğrulukta dişli imalatı için döküm kalıbının tasarımı önem arz etmektedir. Yüksek yüzey kalitesi için taşlama, broşlama vb. talaşlı imalat işlemlerine ihtiyaç duyulabilir. Toz metalurjisi, mikro modüllü dişli imalatında kullanılan yöntemlerden bir diğeridir. Bu işlemle dişlilerin üretimi için, toz formunda homojen bir malzeme karışımı kalıp içinde sıkıştırılır ve daha sonra bir fırında kontrollü bir atmosfer altında malzemelerin ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta sinterlenir. Pirinç, bronz, demir, düşük alaşımlı çelikler ve paslanmaz çelik gibi çok çeşitli temel malzemeler toz

halinde mevcut olup bu tozlardan dişli imalatı gerçekleştirilebilir. Ancak düz dişli dışındaki dişli türlerinin bu yöntemle üretilmesi zordur. Ayrıca, üretim sonrası ek işlemler uygulanmaksızın iyi yüzey kalitesi eldesi zordur (Townsend, 2011; Davis 2005). Sonuç olarak, geleneksel yöntemler yerine yeni yöntemlerle yüksek kaliteli mikro modüllü dişlilerin üretimi, geleneksel işlemlerin sınırlamalarının üstesinden gelecek alternatifler sunacaktır.

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte eklemeli imalat, etkin bir üretim yöntemi haline gelerek imalat sektöründe kendine yer edinmeye başlamıştır. Eklemeli imalat teknolojileri ile üretim sırasında, metallerin enerjisi çevresindeki metal tozlarına da etki ederek ergimeyi kısmi de olsa kontrol dışına iter. Bu sebeple yüzey kalitesi ve mekanik özellikleri, talaşlı imalata nazaran kötüdür. Ancak eklemeli imalat ile üretim sırasında, üretim parametreleri ve üretim sonrası ek işlemler ile istenen mekanik özellikler, yüzey kalitesi, toleranslar vb. ayarlanabilir. Geleneksel talaşlı imalat ile üretim yerine eklemeli imalat yöntemini seçmek tasarım adımlarının tamamına çok büyük katkı sağlar. Eklemeli imalat, hemen hemen her geometrideki parçanın üretimine olanak sağlar. Geometrik tasarım esnekliği, mühendislere veya tasarımcılara üretim sınırlaması olmadan tasarım yapma imkanı verir. Böylelikle tasarımlar hafifler, birçok malzeme seçeneği ile döküm ve dövme yöntemlerine ihtiyaç duyulmadan üretim imkanı sağlar. Bu sebeple eklemeli imalatın en popüler olduğu alanların başında uzay ve havacılık sanayisi gelir. Bunun yanı sıra kullanıcıya özel ürün ve sınırlı sayıda ürün geliştirmek amacıyla bu yöntemden yararlanılabilir. Ayrıca eklemeli imalat yöntemi enerji verimliliği sayesinde çevreye duyarlı bir üretim yöntemidir.

ASTM (American Society of Testing Materials) standartlarında eklemeli imalat “geleneksel makineyle işleme gibi çıkarmalı üretim yöntemlerinin aksine, malzemelerin üç boyutlu model verilerinden nesnelere yapmak için genellikle üst üste katmanlar şeklinde birleştirilmesi” şeklinde tanımlanmaktadır (ISO/ASTM52900, 2015). Bir başka ifadeyle eklemeli imalat, malzemeleri katman katman birleştirerek nihai ürün elde etmektir. Üç boyutlu baskı, üç boyutlu yazıcı imalatı, katmanlı imalat gibi isimlerle de bilinen bu yöntem son yıllarda makine parçası üretiminde oldukça popüler olup model, prototip veya son ürün imalatında kullanılır. Makine parçası tasarımı, imalatı, malzeme davranışı, eklemeli imalat üretim parametreleri, çalışma koşulları gibi etkenler dikkate alındığında bu imalat yönteminin çeşitli üstünlükleri ve sakıncaları bulunmaktadır. Bu üstünlükler ve sakıncalar, son yıllarda çeşitli üretim süreçleri geliştirilerek ve bu süreçlerin üretim kalitesine etki eden parametreleri ile incelenmiştir. Makine parçası imalatında kullanımı son yıllarda yaygınlaşan eklemeli imalat teknolojileri, MEMS imalatında da kullanılabilir. Eklemeli imalat teknolojisi ürünlerin, makul bir üretim maliyeti ile birlikte üstleneceği fonksiyona uygun istihdam edilebilecek düzeyde kalite ve dayanıklılığa sahip olduklarını ispatlamaları gerekmektedir. Ülkemizde henüz yeterince kullanılmayan bu üretim yöntemi, son yıllarda dünyada yaygınlaşmaya başlamıştır. Ülkemiz sanayisine özellikle seri ve kısa vadeli üretimlerde eklemeli imalat teknolojilerinin önemli ölçüde faydası olacaktır. Kullanıcıya özel ya da sınırlı sayıda ürün geliştirme amacıyla da tercih edilen bu yöntem ile kısa sürede tasarım hataları en aza indirilerek Ar-Ge çalışmaları geliştirilebilir (Tezel vd. 2018a).

Bu çalışmada, benzer özelliklere sahip alüminyum alaşımı, titanyum alaşımı ve paslanmaz çelik malzemelerden üretilen çeşitli mikro modüllü dişliler, hem eklemeli hem de geleneksel üretim yöntemiyle üretilerek özdeş test süreçlerinden geçirilmiş,

karşılaştırmalı olarak mekanik davranışları incelenmiştir. Uygulanan test süreçleri, dişlilerin servis koşullarına uygun olarak belirlenen çalışma parametrelerinden oluşmaktadır. Böylelikle, eklemeli üretim yöntemlerinin, geleneksel imalatın yerini alabileceği çalışma koşulları, birçok alanda kullanılan makine elemanlarından biri olan dişliler için belirlenmiştir. Hasara uğrayan bir dişlinin yerini aynı metal malzemeden üretilmiş eklemeli imalat ürününün alabilmesi, yedek parça imalatında da önemli yer tutacaktır. Bu teknoloji sayesinde birçok cihazın aşınmış parçalarının bulunduğu yerde tamir edilebilmesi, arızaların anında giderilebilmesi ve onarımının kolayca yapılabilmesi mümkün olacaktır. Ayrıca üretimi planlanan yeni dişli tasarımlarının geleneksel yöntemlere göre daha hızlı prototipleri üretilip incelenebilecektir. Eklemeli imalat ile üretilen dişlinin mekanik davranışının incelenmesi, diğer makine parçalarının da bu yöntem ile imalatı ve kullanımıyla ilişkili olarak fayda sağlayacaktır.

Bu tez aşağıda belirtildiği gibi 5 bölümden oluşmaktadır:

1. bölümde, dişlilerde meydana gelen hasarlar, mikro modüllü dişliler ile ilgili genel bilgiler, tezin konusu ve amacı belirtilmektedir.
2. bölümde, tez konusuyla ilişkili olarak dişli çarklar üzerine daha önce yapılmış olan çalışmalara ve düz dişliler için teorik bilgilere yer verilmiştir.
3. bölümde, kullanılan malzemelerin özellikleri, üretim yöntemleri, dişli aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı ile test parametreleri hakkında detaylı bilgiler bulunmaktadır.
4. bölümde, teste tabii tutulan malzemelere göre optik ve taramalı elektron mikroskobu analiz sonuçları, sertlik ve yoğunluk sonuçları, ağırlıkça aşınma miktarları, kullanılan yağın elementel analiz sonuçları, dişlilerin verim analizleri ve dişli hasarlarına ilişkin tespitler yer almaktadır.
5. bölümde ise sonuçlar, değerlendirmeler ve gelecek dönemlerde yapılabilecek çalışmalara yönelik önerilere yer verilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

Dişliler, kullanımı oldukça yaygın olan makine elemanlarından biri olup dişlilerde meydana gelen hasar mekanizmaları, makinelerdeki güç iletimini doğrudan etkileyen unsurlardandır. Bu sebeple çeşitli yöntemlerle üretilen dişlilerin verim ve hasar analizlerinin incelenmesi oldukça önemlidir.

Literatürde, geleneksel imalat yöntemiyle üretilmiş herhangi bir dişli ile eklemeli imalat ile üretilen dişlinin, gerçek servis koşulları altında mekanik davranışlarının karşılaştırıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürdeki çalışmalar eklemeli imalat ile üretilen deney numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, iyileştirilmesi, çeşitli malzemelerden parçalar üretilmesi şeklinde olup bu başlıklar altında dahi oldukça kısıtlıdır. Bu sebeple, literatür araştırması eklemeli imalat ve dişli aşınması ve dişli test cihazı başlıkları altında ayrı ayrı incelenmiştir. Çünkü, bu tez kapsamında hem farklı bir imalat yöntemi ile makine parçası imal edilmiş hem de imal edilen ürün, tasarımı gerçekleştirilen test cihazında test edilerek geleneksel muadilleri ile kıyaslanmıştır.

2.1. Eklemeli İmalat ile Üretim

Literatürde tezin konusu ile doğrudan ilgili olan herhangi bir çalışmaya rastlanmadığından bu bölümde eklemeli imalat teknolojileri ile üretilen çeşitli deney numunelerinin mekanik özelliklerinin araştırılması ve geliştirilmesi üzerine yapılmış çalışmalara yer verilmiştir.

Khaing vd. (2001), doğrudan metal lazer sinterleme yöntemi ile metal parça imalatı yapmışlardır. Parçaların boyutsal doğruluğu, yüzey pürüzlülüğü, tokluğu, sertliği ölçüldükten sonra parçalar taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. İmal edilen parçanın yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluğu, imalatı gerçekleştiren cihazın üretim ayarlarına göre farklılık göstermiştir. En uygun çalışma parametreleri belirlenerek, parçanın boyutsal doğruluğu ve sinterleme kalitesi iyileştirilmiştir.

Tay vd. (2002), doğrudan metal lazer sinterleme ile üretilmiş parçaların ortak dezavantajlarından, düşük yüzey kalitesi, düşük aşınma direnci, yumuşak ve gözenekli yapıyı iyileştirmek için çeşitli teknikler uygulamışlardır. İstenen özelliklere en yakın sonuç tek başına ya da birbirleri ile kombine halde, elektroliz nikel kaplama ve yarı parlak nikel elektro kaplama ile elde edilmiştir.

Simchi vd. (2003) tarafından doğrudan metal lazer sinterleme işlemi için, demir bazlı, C, Cu, Mo ve Ni de dahil olmak üzere farklı elementlerin karışımından oluşan toz geliştirilmiştir. Çok bileşenli demir esaslı tozun sinterleme davranışı, mekanik özellikleri ve mikroyapısal özellikleri incelenerek lazer tarama mesafesi ve tarama deseni gibi işlem parametrelerinin optimizasyonu sayesinde yoğunluğu yüksek parçalar imal edilebilmiştir.

Pal vd. (2016), doğrudan metal lazer sinterleme ürünü paslanmaz çeliğe, üretim sonrası işlemlerin etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, belirli seviyede mekanik ve yüzey özelliklerini karşılayabilmek için, üretim sonrası işlemlerin gerekebileceği tespit edilmiştir. Belirli bir ürünün mekanik özelliklerinin, enerji yoğunluğu ve işleme parametrelerinin kombinasyonu değiştirilerek düzenlenebileceği vurgulanmıştır. Ancak, yüzey pürüzlülüğü, lazer dozuna ve tarama hızına bağlı olup enerji yoğunluğu değerinden

bağımsızdır. Böylelikle, tasarımı gerçekleştirecek ürünün malzemesine göre işleme parametrelerinin doğru kombinasyonlarının bulunması gerektiği belirtilmiştir. Çalışmalarında tespit ettikleri işleme parametreleriyle üretilen numunelerde neredeyse hiç mikro çatlak görülmemiştir.

Calignano vd. (2014), AlSi10Mg ve Ti6Al4V alaşımından üretilen dişli ve bağlantı elemanlarını incelemiştir. Üretim yöntemi olarak doğrudan metal lazer sinterleme tercih edilmiştir. Bu yöntem genellikle statik parçaların üretiminde kullanılmasına rağmen, makine ve robot parçalarında sıklıkla karşılaşılan dinamik parçaların da bu yöntemle üretilebilirliği incelenmiştir. Eklemeli imalatın kısıtlayıcısı, üretim sonunda elde edilen yüzey olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için, üretim sonrası ilave yüzey işlemleri önerilmiştir.

Simonelli vd. (2014), titanyum alaşımlarının eklemeli imalat ile üretimi sırasında, eklemeli imalat işleminden kaynaklanan özelliklerin, mikro yapıya etkisini incelemiştir. Mikro yapının mekanik özellikler üzerindeki etkisini anlamak için, seçici lazer ergitme tekniğiyle üretilen Ti6Al4V numunelere çekme testi uygulanmıştır. Üretim özelliklerine bağlı olarak oluşan mikro yapının, çekme özelliklerini ve özellikle numunelerin sünekliğini etkilediği tespit edilmiştir.

Turhan vd. (2016), eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan doğrudan metal lazer sinterleme metodu ile Ti6Al4V toz malzemesi kullanarak test numuneleri üretmişlerdir. Bu yöntemde cihaz parametrelerinden lazer tarama hızı, tarama mesafesi, lazer gücü gibi farklı imalat işlem parametrelerinin etkisini incelemiştir. Çeşitli lazer enerji yoğunluğu değerleri uygulayarak numunelerin, mikro sertlik, yoğunluk ve mikro yapıları incelenmiştir.

Konecna vd. (2017), doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) ile hazırlanan Ti6Al4V alaşımında oluşan yorulma çatlaklarının gelişimini deneysel olarak araştırmışlardır. Hazırlanan 3 tip deney numunesi farklı yazdırma yönlerinde üretilerek, oluşan kırılmaya yazdırma yönünün etkisi incelenmiştir. DMLS tekniği ile üretilen Ti6Al4V için deneysel olarak elde edilen yorulma eğrisi, mevcut literatür verileri ve geleneksel olarak dövülmüş malzemeler için olan veriler ile karşılaştırılmıştır. Çatlak büyüme oranları ve çatlak ilerleme özelliklerinin, geleneksel olarak üretilen alaşımlar için belirlenen değerlerle karşılaştırılabilir seviyede olduğu belirtilmiştir.

Bilgin vd. (2016) tarafından geleneksel döküm, talaşlı imalat ve doğrudan metal lazer sinterleme olmak üzere üç farklı yöntemle imal edilen CoCr malzemenin çekme dayanımı incelenmiştir. Geleneksel döküm ve doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemiyle imal edilen CoCr numuneler benzer çekme dayanımı gösterirken, talaşlı imalat ile üretilen malzeme daha yüksek çekme dayanımı göstermiştir.

Doyle vd. (2015), diğer imalat prosesleri gibi eklemeli imalatta da süreç parametreleri arasındaki etkileşimi anlamının önemini vurgulamıştır. Bu çalışmada, üretim süreci boyunca çeşitli parametrelerin, çekme dayanımı, akma sınırı, yoğunluk gibi malzeme özelliklerine etkisi incelenmiştir. Parça geometrisine ve mukavemet gereksinimlerine bağlı olarak en iyi sonuçlar için parçanın katman kalınlığının makinenin yapım hacmine göre belirlenerek güç, ağırlık, maliyet ve işlevlerin optimizasyonunun parçaların tasarımında ve imalatında yardımcı olduğu belirtilmiştir.

Ren vd. (2016), eklemeli imalat yöntemlerinden jel baskı tekniğiyle (3DGP, 3D Gel Printing) paslanmaz çelik malzemeden dişli üretimi gerçekleştirmişlerdir. 316L partikül içeriğine sahip bir metal bulamaç ile üretilen sinterlenmiş numune homojen bir mikro yapıya sahiptir. Üretilen dişlinin yüzey pürüzlülüğü ve mukavemeti farklı hammaddeler için incelenmiştir.

Liverani (2017) tarafından seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen 316L çeliğinin mikro yapı, kusur oluşumu ve mekanik özellikleri, imalatında kullanılan üretim parametrelerine göre incelenmiştir. Tam yoğunluklu olarak üretilen bu numunelerin çekme dayanımı, geleneksel olarak işlenmiş 316L çeliğinden daha yüksek bir seviyede elde edilmiştir. Ayrıca, lazer gücünün yoğunluk üzerinde en güçlü etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin katılaşması sırasında bağlanma kusurları, gözenekli yapı ve artık gerilmeler olmak üzere üç tip kusur gözlemlenmiştir.

Shi vd. (2017), eklemeli üretim yöntemlerinden Seçici Lazer Ergitme (SLM) ile Ark Enerji Kaynaklı Tel Ergitme (WAAM) yönteminin birlikte kullanımıyla üretilmiş Ti6Al4V malzemenin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, mikro yapı ve gerilme özelliklerini analiz etmek için WAAM işlemi için altlık olarak yatay ve dikey SLM örnekleri kullanılmış ve bu örnekler WAAM örnekleri ile karşılaştırılmıştır. SLM ve WAAM yönteminin birlikte kullanımı ile elde edilen örneklerin çekme özelliklerinin, yalnızca WAAM ile üretilen örneklerden daha iyi olduğu görülmüştür.

Zhu vd. (2016), seçici lazer ergitme (SLM) ile imal edilmiş 316 L paslanmaz çelik parçaların sürtünme ve aşınma davranışlarını, çeşitli yağlama koşulları altında araştırmışlardır. Aynı yüzey işlemleriyle geleneksel bir yöntemle üretilen eş numunelerle karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. SLM işlemi sırasında malzeme yoğunluğunun artırılmasıyla, tribolojik performansın geleneksel yöntemle üretilenden daha iyi olabileceği vurgulanmıştır.

Röttger vd. (2016) tarafından çeşitli yöntemlerle üretilen 316L sınıfı ostenitik çeliğin üretim sürecinin, mikroyapı ve malzeme özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Böylece, sıcak-izostatik presleme (HIP), seçici lazer ergitme (SLM) ve bu iki yöntemin birlikte uygulandığı durum ile döküm yöntemiyle üretilenin mikroyapı ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. SLM ile üretilen numunelerin yüksek yoğunluğa sahip olanlarının mekanik değerleri oldukça iyi olup, döküm veya sıcak izostatik preslemeye nazaran yüksek olduğu belirtilmiştir.

Riener vd. (2014), seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen 316L paslanmaz çeliğin yorulma mukavemetini incelemişlerdir. Bu yöntemle üretilen ostenitik çeliğin sünekliği yüksek olup geleneksel olarak işlenmiş aynı malzemeye benzer yorulma davranışı göstermiştir. Üretimden kaynaklı artık gerilmeler için uygulanan ısıtma işleminin etkisi olmamıştır. Bu çeliğin, yorulma çatlaklarının büyüme davranışı, katılaşma şartlarından ve ortaya çıkan mikro yapıdan oldukça etkilenmiştir. Bu malzemelerin, üretim sonrası ilave işlem yapılmaksızın kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

Buchanan vd. (2017), eklemeli imalat yöntemlerinden toz yatağı füzyonu (PBF) ile üretilen martenzitik ve ostenitik çeliklere çeşitli testler uygulamışlardır. Akma sınırı ve çekme dayanımı, geleneksel yöntemle üretilmiş numunelere nazaran yüksek bulunmuş olup sebebi ince tabakalardaki hızlı soğutma olarak açıklanmıştır. Ancak elastisite

modülü, geleneksel yöntemlerle üretilenlere nazaran düşük çıkmıştır. Kırılma mekanizmaları, geleneksel yöntemlerdeki kırılmalarda elde edilen tiplerden farklılık göstermiştir.

Mower ve Long (2016), seçici lazer ergitme (SLM) ve doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) ile hazırlanan dört alaşımı geleneksel yöntemle (talaşlı imalat veya dövme) üretilenlerle kıyaslamışlardır. Doğrudan metal lazer ergitme ile üretilen paslanmaz çeliğin yüksek süneklik ve kayda değer ölçüde daha yüksek akma sınırına sahip olduğu hatta tavllanmış paslanmaz çelikten daha iyi mekanik özellikler sergilediği belirtilmiştir. Seçici lazer ergitme ile AlSi10Mg malzemedan üretilen numunelerin yorulma dayanımı, geleneksel dövülmüş ve talaşlı işlenmiş 6061 alüminyum alaşımının yorulma dayanımının yaklaşık %60'ı kadardır. Üretim sonrası mekanik olarak uygulanan yüzey parlatma işlemlerinin yorulma dayanımına etkisi olmamıştır. Ancak, elektrokimyasal yüzey parlatma işlemiyle yorulma mukavemeti çok az miktarda da olsa iyileştirilmiştir. Doğrudan metal lazer sinterleme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının yorulma mukavemeti, dövülmüş ve tavllanmış olanlara kıyasla daha düşüktür. Doğrudan metal lazer sinterleme yöntemiyle üretilen paslanmaz çelikler, üretim sırasında yatay olarak yönlendirilerek üretilmiş olup, yorulma mukavemetleri dövülmüş olanlarının %85 ila %90'ı arasındadır. Dikey yönlendirilerek üretilenlerin yorulma dayanımları ise önemli ölçüde azalmıştır.

Bandyopadhyay ve Heer (2018) çalışmalarında çeşitli malzemelerden eklemeli imalat yöntemiyle çok işlevli parçaların oluşturulmasının sağlandığını yeni eklemeli imalat teknolojilerinin önemini vurgulamıştır. Eklemeli imalat teknolojileri ile polimer esaslı metal-metal ve metal-seramik uygulamalarının avantajları ve zorlukları tartışılmıştır.

Ngo vd. (2018) tarafından eklemeli imalat yöntemlerinin, malzemelerinin ve güncel uygulamalardaki gelişmelerinin kapsamlı bir incelemesi gerçekleştirilmiştir. Anizotropik davranış, bilgisayar tasarımının sınırlandırılması ve katmanlı görünümü ile temel işlem zorlukları tartışılmıştır. Bu teknolojide yaygın kullanıma sahip titanyum alaşımının Ti6Al4V olduğu, alüminyum alaşımının da AlSi10Mg ve AlSi12 olduğu belirtilmiştir.

Yukarıda sunulan literatür bilgileri eklemeli imalat ile ilgili çalışmaların son yıllarda yoğunluk kazandığı ve bu yöntemin seri üretimde kullanılmaya aday yaygın bir imalat yöntemi olma yolunda hızla gelişmekte olduğunu göstermektedir. Konuyla ilgili bilimsel literatürün mevcut birikimine katkı sağlamak üzere yapılan bu çalışma kapsamında eklemeli imalat yöntemiyle benzer özelliklere sahip alüminyum alaşımı, titanyum alaşımı ve paslanmaz çelik malzemedan üretilen mikro modüllü dişlilerin servis koşullarındaki testlerden elde edilen mekanik özellikleri, aynı malzemelerden geleneksel imalat yöntemiyle üretilen dişlilerin servis koşullarındaki testlerden elde edilen özellikleri ile kıyaslanmıştır.

2.2. Dişli Aşınması ve Dişli Test Cihazları

Yaygın kullanım alanına sahip olan dişlilerin çalışma esnasında değişken torkları ve hızları sebebiyle gösterdikleri davranışlar, çeşitli testlerle analiz edilir. Dişli test cihazları, dişlilerin performanslarının izlenmesinin yanı sıra oluşabilecek dişli hasarlarına

karşı önlem alınabilmesini sağlar. Dişli test cihazlarını dişlilerin büyüklüğüne, diş sayısına, türlerine, dişlilerin birbirine göre konumlarına göre sınıflandırmak mümkündür. Bu sınıflandırmanın ölçütleri FZG (Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau-Dişli Araştırma Merkezi) tarafından belirlenmiştir. FZG dişli test cihazları ASTM standartlarına uygun olarak sonuçlar vermektedir. FZG tarafından üretilen ve geliştirilen bu test cihazları ile gürültü ve titreşim analizleri, kullanılan yağın viskozitesi ve katkı maddelerinin dişli aşınmasına etkisi, dişlilerin dayanımı, dişli hasarı, dişli verimi ve dişli performansı gibi çeşitli analizler yapılabilmektedir. Bu tez kapsamında kullanılan dişliler mikro modüllü dişliler olup, mikro modüllü dişliler için standartlaştırılmış dişli aşınma test cihazı bulunmamaktadır. Bu sebeple mikro dişliler için uygun bir dişli aşınma test cihazı tasarımı ihtiyacı doğmuş ve tez kapsamında tasarım ve imalatı tamamlanmıştır.

Tez kapsamında doğrudan metal lazer sinterleme ile üretilen dişlilerin, aynı malzemelerden geleneksel yöntemler ile üretilen dişlilerin yerine kullanılabilirliğinin ortaya konması için tasarlanan dişli aşınma test cihazında kullanılacak dişlilerin modülü 1'dir. Üretim yöntemlerinden eklemeli ve geleneksel imalat yöntemleriyle imal edilen dişliler, tasarlanan test cihazında çalıştırılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Literatürde, bu üretim yöntemlerinin dişli aşınmasına etkisinin karşılaştırıldığı bir çalışma yer almamaktadır. Ancak bu bölümde, FZG dişli test cihazına ait literatürdeki çalışmalara ve çeşitli dişli test cihazı tasarımlarına kısaca yer verilmiştir.

Özkasap (2001), düz dişlilerde aşınmanın yağlama yağı ile ilişkisini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada, dişli çiftleri üzerinde farklı hız ve yük kademelerinde farklı özelliklere sahip yağlama yağı kullanarak dişli aşınması ve yağ sıcaklığının zaman içerisindeki değişimi FZG dişli test cihazı ile incelenmiştir.

Aslantaş vd. (2004) küresel dökme demirden yapılmış düz dişlilerin ostemperlenmesi işleminin pitting oluşumuna etkisini araştırmışlardır. Deneyleri FZG dişli test cihazı kullanarak yapmışlardır. Pitting oluşumunu elektron tarama mikroskobu ile inceleyerek, uygulanan ostemperleme işleminin pitting oluşumunu geciktirdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Martins vd. (2006a) çalışmalarında dişliler arasındaki ortalama sürtünme katsayısını, dişlilerin kaplama yapıldığı ve kaplamasız olduğu durumlar için deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler, FZG dişli test cihazı ile dişli verimliliğinde yüzey kaplamanın etkisini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kaplamanın çizilme (scuffing) performansını değerlendirilerek kaplamanın önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Sjöberg vd. (2016) çalışmalarında FZG dişli test düzeneği kullanarak iki farklı sıcaklık için dişlilere alıştırmaya sürecinde uygulanan yükün etkisini ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Yüksek alıştırmaya yüklerinin uygulanması ve düşük sıcaklığa sahip yağlama yağı kullanımı ile daha yüksek verim elde edilmiştir.

Bartz ve Krüger (2003), FZG dişli test düzeneği kullanarak ısı işlem uygulanmış dişlilerde meydana gelen aşınmaya etkilerine yağlayıcı ve katkı maddelerinin etkisini araştırmışlardır. Test edilen katkı maddeleri arasından MoS₂'nin aşınmayı önlediği belirtilmiştir.

Flodin ve Andersson (2001), FZG dişli test cihazını kullanarak helisel dişli çarklardaki aşınmayı incelemişlerdir. Dişlilerde meydana gelen aşınma sonucu oluşan diş profilindeki değişimi araştırarak bu değişimin aşınma artışına etkisini belirlemişlerdir.

Martins vd. (2006b) mikro aşınmaya karşı özel katkı maddeleriyle güçlendirilmiş parafinik mineral yağ ve bakterilerce ayrıştırılabilen toksik olmayan esterden oluşan iki çeşit yağ kullanarak, FZG dişli test cihazı ile dişlilerdeki sürtünme katsayısını araştırmışlardır. Çeşitli hız, yük ve çalışma süreleri sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak ester yağının, sürtünme katsayısını azaltma yönünde katkı sağladığını tespit etmişlerdir.

Senthilvelan ve Gnanamoorthy (2006), Nylon 6/6 malzemedan karbon fiber katkılı ve katkısız olarak üretilen düz dişlileri FZG dişli test cihazında test etmişlerdir. Test dişlilerinin yüzey sıcaklığı ve dişlinin birleştiği bölgedeki gürültü kesintisiz olarak ölçülmüştür. Test sonuçları, katkılı dişlilerin katkısız dişlilerden daha fazla temas gürültüsü oluşturduğunu göstermiştir.

Arrisek vd. (2001), FZG dişli test düzeneği kullanarak düz dişlilerde pitting olayını incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü ve yağ viskozitesinin pitting oluşumuna etkisini araştırmışlardır.

Senthilvelan ve Gnanamoorthy (2007), enjeksiyon kalıplama yöntemi ile Nylon 6 ve cam fiberle güçlendirilmiş Nylon 6 malzeme ile üretilmiş dişlileri FZG test cihazında, farklı hız ve torkta test etmişlerdir. Cam fiber ile güçlendirilmiş Nylon 6 dişliler, diğerlerine nazaran daha üstün mekanik özellikler göstermiştir.

Lv vd. (2016) tarafından 20CrMnTi çelik dişliler seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilerek, dişlilere geleneksel ve geleneksel olmayan bilyeli dövme işlemleri uygulanmıştır. Dişlilerin yüzey özellikleri, bir taramalı elektron mikroskopu ve bir X-ışını difraktometresi (XRD) ile analiz edilmiştir. Yorulma deneyleri için FZG düz dişli test cihazı kullanılmıştır. Yüksek hızlı atışla yapılan geleneksel olmayan bilyeli dövme işleminin, dişlilerinin yorulma özelliklerini geliştirmek için çok önemli bir faktör olduğu ortaya konmuştur.

Fujisawa ve Komori (2015) yaptıkları çalışmada, yüzeyleri sertleştirilmiş minyatür dişli için diş yüzeyine uygulanmak üzere son bir işlem önermektedir. Yöntem, alümina-elyaf takviyeli plastikten oluşan dişli biçimli bir aletin salınımı ile test dişlisinin dişlerini sertleştirmektedir ve bu yöntemin etkinliği doğrulanmıştır.

Kattelus vd. (2016) tarafından dişli hasarlarından biri olan pittingin ilerlemesi, yüzeyleri sertleştirilmiş dişlilerde incelenmiştir. Bu hasarın belirlenmesinde, dişli yağı ve titreşimin izlenmesi ile gözle muayene kullanılmıştır. Sonuçlar, yağ içerisindeki metalik parçacık konsantrasyonunun, dişli pitting hasarıyla ilişkili olduğunu göstermiştir.

Mallipedi vd. (2017) tarafından düz dişlilerinin yüzey karakteristikleri ve verimlilikleri, FZG dişli test cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Oluşan mikropitting hasarı, yüzeydeki pullanma ve plastik deformasyonla ilişkilendirilmiştir. Dişlilerin çalışmasının hemen ardından oluşan mikropittingler plastik deformasyonla düzeltilmiştir. Çalışma yükü artırıldıkça mikropitting oluşumunda artış gözlemlenmiştir.

Lv vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, W6Mo5Cr4V2 çelik dişli, yüksek karbonlu dökme çelikler ve seramik olmak üzere iki farklı malzemedan mikro bilye ile sertleştirilmiştir. Sertleştirme işlemi sırasında değişken parametreler kullanılarak üretilen dişlilerin yorulma davranışı FZG düz dişli test cihazı ile incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, dişlilerin mikrosertlik değerinin arttığını ve dişli yüzey pürüzlülüğünün azaldığını göstermiştir. Yüzey pürüzlülüğünün azaltılması, kalıcı ostenitin yararlı etkisi, mikro sertlik artışı gibi özellikler yorulma mukavemetinin iyileştirilmesinde önemli rol oynamıştır.

Höhn vd. (2011), modülü küçük dişlilerin çalışma koşullarını dikkate alarak bir test cihazı geliştirmişlerdir. Özellikle 7.5-65 mm aralığında merkez mesafesi olan dişlileri test etmek için geliştirilen dişli test cihazının parametreleri 50-10000 s⁻¹ ve 0,5-200 Nm aralığındadır. Bu geliştirilen test cihazının parametreleri, modül aralığı 0,3-2 mm arasında değişen dişlilerin test edilmesini sağlamak üzere tasarlanmıştır.

Pogacnik ve Tavcar (2015) tarafından plastik dişliler için birkaç farklı test türünden oluşan hızlandırılmış test prosedürü sunulmuştur. Test cihazının tasarımı, test dişlilerinin x ve y yönlerinde hassas olarak konumlandırılmasını sağlamıştır. Güç, 4000 s⁻¹ kapasiteli maksimum 1 Nm'lik bir servomotor ile sağlanmıştır. Motor, sürücü dişlisinin monte edildiği milin üzerine kaplin ile sabitlenmiştir. Önerilen yöntem, polioksimetilen ve polyamid 6'dan yapılmış bir dişli çifti üzerinde uygulanmıştır. Test için farklı dönme hızları ile moment yükleri ve dolayısıyla farklı aktarılan güçler kullanılmıştır. Sunulan test prosedürü, dişlileri kabul edilebilir maliyet ve zaman tüketim sınırlarına sahip ya da değil şeklinde nitelendirmiştir. Ayrıca test yönteminin, farklı malzemelerden plastik dişlilere genişletilebilir ve uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Itagaki vd. (2014) geliştirdikleri test cihazı ile takviyeli plastik malzemedan üretilmiş düz ve helisel dişli çiftlerinin yorulma mukavemetini incelemişlerdir. 300-1500 rpm aralığında ayarlanabilir motora bağlı bu sistemde, çalışma şartlarını belirleyen torkmetre ve fren mekanizması ile birlikte, deney süresince test dişli kutusu sıcaklığı ölçülmüştür.

Li vd. (2011) polimer malzemedan üretilmiş dişliler için test düzeneği tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Test cihazı, sabit yük koşullarında dişli yüzeyinin aşınmasını sürekli olarak ölçmek üzere tasarlanmıştır. Bu test düzeneğinin tasarımının diğer dişli test cihazlarından temel farklılığı, cihazın, bir moment kolu tarafından yüklenerek ayarlanabilir ağırlık ile birlikte dönmesidir. Polimer kompozit dişliler, metal dişli test düzeneklerine benzer şekilde, önceden belirlenmiş torklarda çalıştırılmıştır. Deneysel çalışmada, asetale malzemedan dişli çiftlerinin özellikle düşük hızlı çalışmaları halinde aşınma davranışlarının farklılık gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Tubi vd. (2015) dişlilerdeki mikropitting (mikro çukurcuk) hasarlarını araştırmak için dişli test cihazı geliştirmişlerdir. Tork düzenleyici, motor ve iki adet dişli kutusundan oluşan dişli test sistemi, test edilen dişlilerden istenen miktarda sabit tork seviyesi sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. İki adet dişli kutusunun esnek kaplin kullanılarak birleştirilmesiyle, titreşim ve gürültünün en aza indirilerek özdeş dişli çiftlerinin test edilmesi sağlanmıştır.

Valentin (2015), deneysel ve sayısal olarak ağır iş makinalarında kullanılan dişlilerde meydana gelen aşınmaları incelemiştir. Sayısal çalışmayı teyit etmek için kullandıkları deney düzeneklerinin tasarımı, aşınma testleri sırasında dişli verimliliğinin incelenmesi üzerine yapılmıştır. Deney düzeneği dört adet dişli kutusu ve motordan meydana gelmektedir. Redüktörlerin, şaftlara monte edilmiş zincir kaplin ile bağlandığı deney seti kullanılmıştır.

Niza vd. (2010) tarafından, dişli çalışma koşullarının ölçüm ve ayarlamalar ile, dişlinin çalıştığı koşullarda incelenmesi önerilmektedir. Bu sebeple mikro dişlilerin çalışma koşullarının oluşturulduğu bir test cihazı tasarımı yapmışlardır. Tasarlanan test cihazı; dişliler, dişli destek tabanı, tahrik ünitesi olarak işlev gören AC servo motor, fren ünitesi ve ayar cihazları ile imal edilmiştir. Bu test cihazı ile metalik cam mikro dişlilerin arıza durumları araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, mikro dişlilerin yağlanmadığı koşullarda, dişlilerde şiddetli aşınmaların meydana geldiğini ortaya koymuştur.

Dempsey ve Afjeh (2002) düz dişlilerin yorulma dayanımının incelenmesi amacıyla bir test cihazı (Glenn Spur Fatigue Test Rig) geliştirmişlerdir. Bu cihaz ile yapılan yorulma testlerinden elde edilen titreşim ve yağ analizi bilgisi ile dişlilerdeki aşınma hasarlarının tespiti sağlanmıştır.

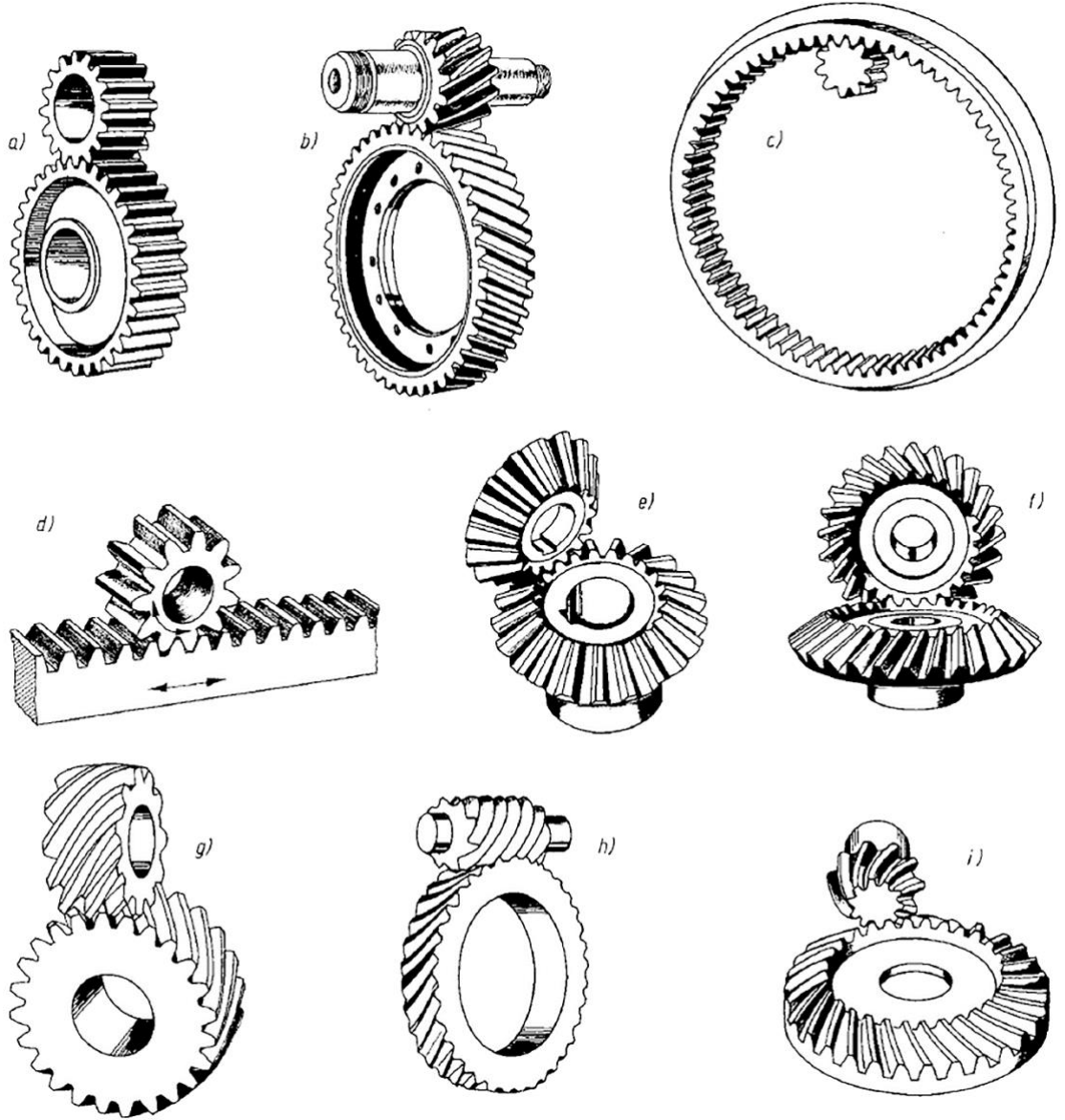
Hegadekate vd. (2010) mikro dişlilerin etkili kullanım sürelerini belirlemek amacıyla aşınma modelleri kullanarak deneysel ve sonlu elemanlar analizleri yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, diş geometrisinin, kayma hızlarının ve hareket çizgisinin, aşınmanın bir sonucu olarak orijinal değerlerinden oldukça hızlı saptığını göstermektedir.

2.3. Dişli Teorisi

2.3.1. Giriş

Dişli çarklar, dişlilerin dönme momentini bir milden diğer mile aktarmasını sağlayan makine elemanlarıdır. Farklı ebatlardaki dişlilerin kullanımında tork dönüştürücü olarak da çalışırlar. Güç aktarımını şekil bağı ile gerçekleştirirler (Decker ve Kabus 2011). Güç iletimi bakımından, dişli çark mekanizması döndüren ve döndürülen olmak üzere en az iki elemandan oluşur. Bu mekanizmadaki küçük dişli pinyon diğeriyse çark olarak isimlendirilir. Dişli çarklar millerin konumuna göre sınıflandırılabilir: Silindirik dişli çarklar, eksenleri aynı düzlemde paralel olan iki mil arasında güç iletir. Bu dişliler, dişlerin yönü çark eksenine paralel olduğunda düz silindirik (Şekil 2.1a), eğik olduğu durumda helisel silindirik dişli çark (Şekil 2.1b) adını alır. Çarkların birbirinin dışında veya içinde yuvarlanmalarına göre dış (Şekil 2.1 a,b) veya iç silindirik dişli çark (Şekil 2.1c) denir. Dişli çarkın yarıçapı sonsuz yapıldığında kremayer adlı çubuk şeklinde dişli eleman elde edilir. Bu elemanın düz silindirik dişli çarkla çalışmasıyla düz kremayer mekanizması (Şekil 2.1d) oluşur. Eksenleri aynı düzlemde bulunan fakat kesişen iki mil arasında güç ve devir ileten çarklara konik dişli çarklar denir. Dişlerin uzunluk yönündeki durumlarına göre düz konik dişli çark (Şekil 2.1e) helisel konik dişli çark (Şekil 2.1f) ismini alır. Eksenleri aynı düzlemde olmayan miller arasında güç ve devir ileten dişli çarklara spiral dişli çarklar denir. Dişlilerinin helisel olması halinde spiral helisel (Şekil 2.1g) olarak adlandırılır. Eksenlerinin iz düşümleri kesişen ve izdüşümleri birbirine dik olan sonsuz vida mekanizmasıdır (Şekil 2.1h). Hipoid konik dişliler (Şekil 2.1i), eksenleri

aynı düzlemde olmayan ve kesişmeyen dişli mekanizmalarıdır (Akkurt 2005).



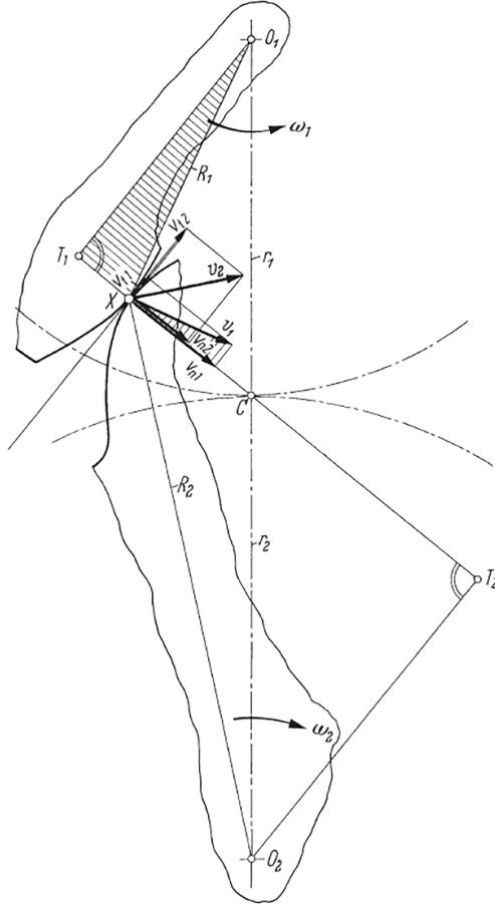
Şekil 2.1. Dişli çark mekanizmaları (Decker ve Kabus 2011)

2.3.2. Genel dişli kanunu

Dişlilerde güç aktarımının sürekli olarak sağlanabilmesi için diş yan yüzeyleri, sürekli düzenli dönme hareketi iletiminin sağlanacağı şekilde oluşturulmalıdır. Gerekli denklem koşulları, Şekil 2.2 yardımıyla üretilir.

O_1 noktası etrafında ω_1 açısal hızı ile döndüren dişlinin diş yüzeyi, X noktasından çizilen konumda, O_2 etrafında ω_2 hızı ile döndürülen dişlinin diş yüzeyinin karşı tarafına temas etmektedir. Anlık temas noktası X'e kavrama noktası da denir. Bu noktada iki diş yüzeyinin ortak bir teğet ve ortak bir normali bulunmaktadır. Döndüren dişlinin diş

yüzeyi olarak X noktasının hızı $v_1=R_1\omega_1$ ve döndürülen dişlinin dış yüzeyi olarak X noktasının hızı $v_2=R_2\omega_2$ 'dir. Bu hız vektörlerinin her biri R_1 ve R_2 'ye diktir. Hız v_1 , normal bileşen v_{n1} ve teğetsel bileşen v_{t1} , benzer şekilde, v_2 de v_{n2} ve v_{t2} olarak ayrıştırılabilir. İki diş yüzeyinin temas halinde kalması şartı ancak normal bileşenler eşit büyüklükteyse ($v_{n1}=v_{n2}$) sağlanabilir. Eğer v_{n2} , v_{n1} 'den daha büyük olursa, döndürülen dişlinin dış yüzeyi, döndüren dişlinin dış yüzeyinden ayrılır. Ayrıca döndürülen dişlinin dış yüzeyi, döndüren dişlinin dış yüzeyini geçemeyeceğinden v_{n1} , v_{n2} 'den büyük olamaz.



Şekil 2.2. Genel dişli kanunu (Haberhauer ve Bodenstern 2014)

O_1 ve O_2 noktalarından ortak normallere kadar olan bağlantılar kesiştirilirse, o zaman döndüren dişli için çizilen hız üçgenlerine benzer dik açılı üçgenler O_1T_1X ve O_2T_2X oluşur. Üçgenlerin benzerliğinden Denklem 2.1, Denklem 2.2, Denklem 2.3 ve Denklem 2.4 elde edilir. $v_{n1}=v_{n2}$ olduğundan Denklem 2.4 ve Denklem 2.5 yardımıyla Denklem 2.6 ortaya çıkar.

$$\frac{v_{n1}}{v_1} = \frac{|O_1T_1|}{R_1} \quad (2.1)$$

$$v_{n1} = \frac{v_1}{R_1} |O_1T_1| = \omega_1 |O_1T_1| \quad (2.2)$$

$$\frac{v_{n2}}{v_2} = \frac{|O_2T_2|}{R_2} \quad (2.3)$$

$$v_{n2} = \frac{v_2}{R_2} |O_2T_2| = \omega_2 |O_2T_2| \quad (2.4)$$

$$\omega_1 |O_1T_1| = -\omega_2 |O_2T_2| \quad (2.5)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{|O_2T_2|}{|O_1T_1|} = i \quad (2.6)$$

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, ortak temas normalinin O_1 - O_2 merkez hattını C'de kestiği ve iki benzer dik açılı üçgen (O_1T_1X ve O_2T_2X) oluşturduğu görülmektedir. Bunun sonucunda, Denklem 2.7 elde edilir.

$$-\frac{|O_2T_2|}{|O_1T_1|} = -\frac{O_2X}{O_1X} = -\frac{r_2}{r_1} = i = \text{sabit} \quad (2.7)$$

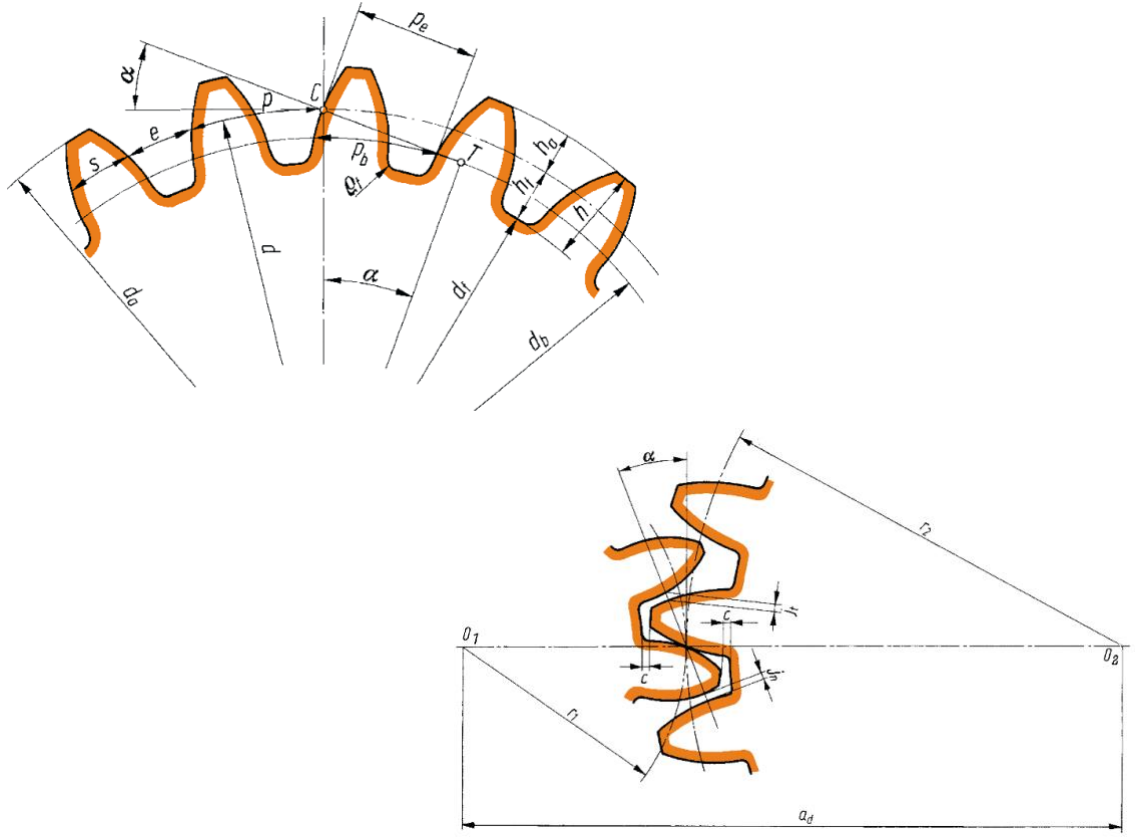
Elde edilen denklemlere göre kesişim noktası X yuvarlanma noktası, r_1 ve r_2 ise yuvarlanma dairesi yarıçapı olmalıdır. Bu nedenle, iki dış yüzeyinin temas noktasındaki normalin sabit iletim oranında $r_1 + r_2$ merkez mesafesini paylaşması gerekir. Bu ifadeye genel dişli kanunu denir. Bir başka deyişle iki dış yüzeyinin herhangi bir temas noktasındaki normali her zaman yuvarlanma noktasından, yani X'ten geçmelidir. (Haberhauer ve Bodenstern 2014)

2.3.3. Dişlilerde temel büyüklükler

DIN 867, DIN 868, DIN 3960 ve DIN 3998'e göre dişlilerdeki temel büyüklükler Şekil 2.3'te görülmektedir (Wittel vd. 2013). Diş sayısı (z), dişlinin çevresindeki diş adedidir. Diş genişliği (b), dişlinin referans yüzeyindeki iki uç yüzey arasındaki mesafedir. Bölüm dairesi (d), diş sayısının belirli bir adımla taksim edildiği dairedir. Adım (p), bölüm dairesi üzerindeki bir diş dolusu ve bir diş boşluğunu içine alan mesafedir. Modül (m), adımın π sayısına bölümdür. Birlikte çalışan dişli çiftinin modülü aynı olmalıdır. Kavrama açısı (α), temel dairesine çizilen teğet ile bölüm dairesine çizilen teğet arasındaki açıdır. Kavrama açısı DIN 867 ile standartlaştırılmıştır ve genellikle $\alpha=20^\circ$ alınır. Dişli modülleri DIN 780'e göre standartlaştırılmış olup, Çizelge 2.1'de yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Standart Modüller (TS 24340, DIN 780)

Seri	Modül, m (mm)
I	0,1-0,12-0,16-0,2-0,25-0,3-0,4-0,5-0,6-0,7-0,8-0,9-1-1,25-1,5-2-2,5-3-4-5-6-8-10-12-16-20-25-32-40-50-60
II	0,11-0,14-0,18-0,22-0,28-0,35-0,45-0,55-0,65-0,75-0,85-0,95-1,125-1,375-1,75-2,25-2,75-3,5-4,5-5,5-7-9-11-14-18-22-28-36-45-55-70
III	3,25-3,75-6,5-65-75



Şekil 2.3. Dişli çarklarda temel büyüklükler (Decker ve Kabus 2011)

Bölüm dairesi çevresi denklem 2.8 ve denklem 2.9 ile hesaplanır. Bölüm dairesi çevresi;

$$\zeta_1 = \pi \cdot d \quad (2.8)$$

$$\zeta_2 = p \cdot z \quad (2.9)$$

Denklem 2.8 ve 2.9 birbirine eşitlendiğinde Denklem 2.10 elde edilir.

$$d = \frac{p}{\pi} \cdot z ; \frac{p}{\pi} = m ; d = m \cdot z \quad (2.10)$$

DIN 867'ye göre (Wittel vd. 2013; Decker ve Kabus 2011)

Bölüm dairesi çapı : $d = m \cdot z$ (2.11)

Adım : $p = m \cdot \pi$ (2.12)

Temel dairesi çapı : $d_b = d \cdot \cos \alpha$ (2.13)

Kavrama adımı : $p_e = p \cdot \cos \alpha = m \cdot \pi \cdot \cos \alpha$ (2.14)

Diş üstü yüksekliği : $h_a = m$ (2.15)

Diş yüksekliği : $h = h_a + h_f = 2,25 \cdot m$ (2.16)

$$\text{Diş dibi yüksekliği} : h_f = 1,25 \cdot m \quad (2.17)$$

$$\text{Diş üstü dairesi çapı} : d_a = d + 2 \cdot h_a \quad (2.18)$$

$$\text{Diş dibi dairesi çapı} : d_f = d - 2 \cdot h_f \quad (2.19)$$

$$\text{Diş kalınlığı = Diş boşluğu} : s = t = \frac{p}{2} \quad (2.20)$$

$$\text{Diş genişliği} : b = \psi_m \cdot m ; \psi_m = 5 - 40 \text{ arasında değişir.} \quad (2.21)$$

$$\text{Eksenler arası mesafe} : a_d = r_1 + r_2 = \frac{m}{2}(z_1 + z_2) \quad (2.22)$$

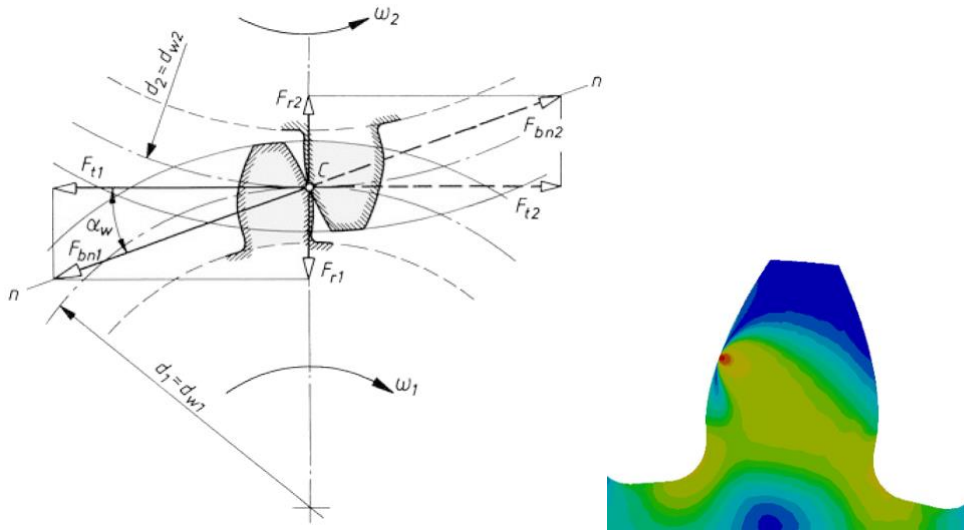
2.3.4. Düz dişlilerde kuvvetler

Moment iletimi esnasında kavrama doğrusu üzerinde döndüren dişlinin dönme yönüne ters yönde F_{n1} diş kuvveti oluşur (Şekil 2.4). Yataklara gelen reaksiyon kuvvetlerini bulmak için bu kuvvetin teğetsel (F_{t1}) ve radyal (F_{r1}) bileşenleri alınarak işlem kolaylaştırılır. Şekil 2.4'te yer alan kuvvetlerin hesabında Denklem 2.23, Denklem 2.24 ve Denklem 2.25 kullanılır (Şekercioğlu 2015).

$$F_{t1} = F_{t2} = \frac{2 \cdot M_{d1}}{d_1} \quad (2.23)$$

$$F_{n1} = \frac{F_{t1}}{\cos \alpha} \quad (2.24)$$

$$F_{r1} = F_{r2} = F_{t1} \cdot \tan \alpha \quad (2.25)$$



Şekil 2.4. Düz dişlilerde kuvvetler ve kuvvetlerin gerilme etkisi (Wittel vd. 2013)

2.3.5. Modül hesapları

Dişlilerde modül hesaplamaları yapılırken diş dibi mukavemetine göre ve yüzey basıncına göre modül kontrolleri yapılarak dişlilerin emniyetli sınırlar içerisinde çalışması sağlanır.

2.3.5.1. Diş dibi mukavemetine göre modül hesabı

Diş dibi mukavemetine göre modül hesabı aşağıdaki denklemlere göre yapılır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen değer, dişli modülüne eşit ya da küçük olmalıdır (Denklem 2.26). Diş dibinde meydana gelen eğilme gerilmesi Denklem 2.27, dişliye gelen teğetsel kuvvet Denklem 2.23, bölüm dairesi çapı Denklem 2.11, diş genişliği ise denklem 2.21 ile hesaplanır.

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2 \cdot M_d \cdot K_f \cdot K_i \cdot K_v \cdot K_\epsilon \cdot K_m}{\Psi_m \cdot z \cdot \sigma_{em}}} \quad (2.26)$$

$$\sigma_e = \frac{F_t}{b \cdot m} \cdot K_f \cdot K_i \cdot K_v \cdot K_\epsilon \cdot K_m \quad (2.27)$$

Modül genişlik oranı (Ψ_m), düz ve helis dişlilerde 10-20 arasında seçilebilir. Ayrıca hız faktörü (K_v) Çizelge 2.2, yük dağılım faktörü (K_m) Çizelge 2.3, kavrama faktörü (K_ϵ) Çizelge 2.4, işletme faktörü (K_i) Çizelge 2.5, form faktörü (K_f) Şekil 2.5 yardımıyla bulunur. Denklem 2.26'nın içerisinde yer alan faktörlerin belirlenmesinde modüle ihtiyaç duyulabilir. Bu durumda, şayet modül bilinmiyorsa Şekil 2.6'dan yararlanarak iletilen güce ve pinyonun devir sayısına bağlı olarak tahmini modül belirlenerek kontrolleri yapılabilir (Şekercioğlu 2015).

Çizelge 2.2. Hız Faktörü, K_v

Diş Kalitesi	Çevresel Hız, v (m/s)					
	0	10	20	30	40	50
Yüksek kalite, önemli yük gelmeyen dişli	1	1	1	1	1	1
Yüksek kalite, az yük gelen dişli	1	1,20	1,25	1,30	1,40	1,50
Yüksek kalite orta yük gelen dişli	1	1,50	1,60	1,65	1,75	1,50
Azdırma yöntemi ile imal edilen dişli	1	1,65	1,80	2	2,30	1,85

Çizelge 2.3. Yük dağılım faktörü, K_m

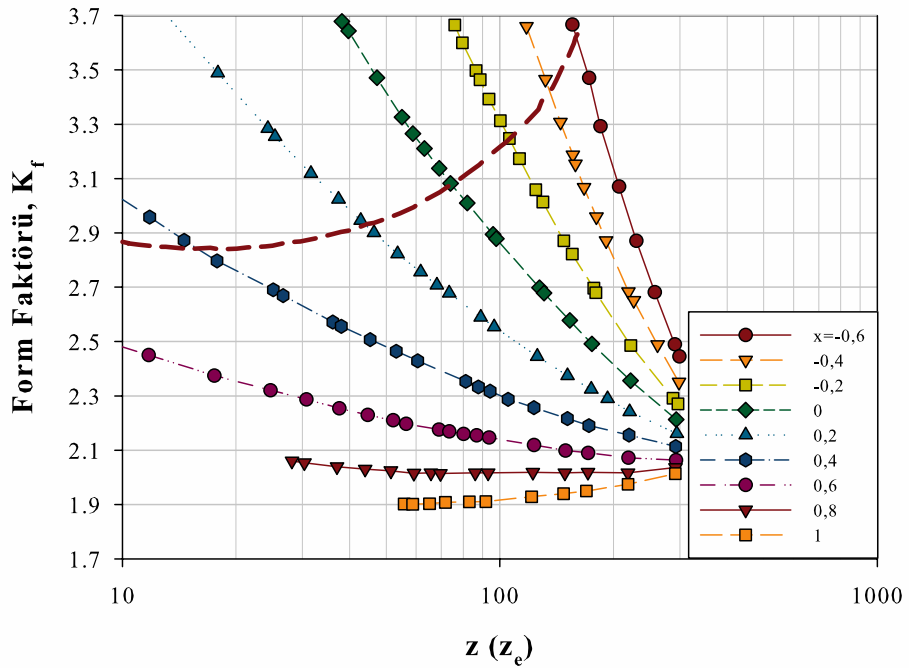
Mil ve dişli durumu	Diş Genişliği (mm)			
	50	50-150	150-450	>450
İyi yataklanmış düzgün dişli ve milde az sehim	1,3	1,4	1,5	1,8
Az sehim oluşan mil ve orta kalitede düzgünlük	1,6	1,7	1,8	2
Sehimi fazla mil ve düzgün olmayan dişli	>2			

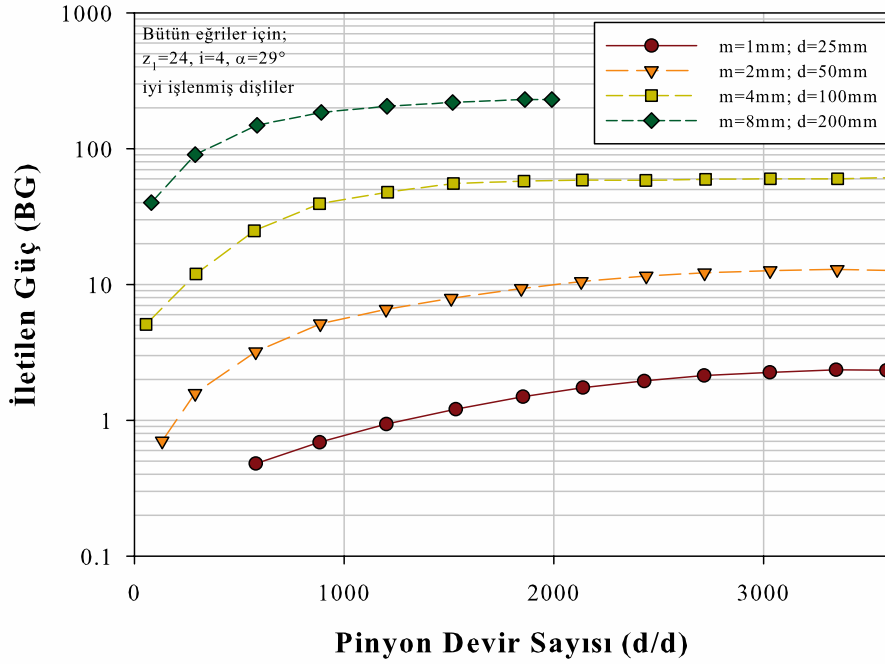
Çizelge 2.4. Kavrama faktörü, K_ϵ

Diş Dibinden Kırılmaya Göre Kontrol	Yüzey Basıncına Göre Kontrol
$K_\epsilon = 0,25 + \frac{0,75}{\epsilon_\alpha}$	$K_\epsilon = \frac{4 - \epsilon_\alpha}{3}$
Not: Bazı kaynaklara göre, kavrama olayını birçok faktör etkilediği için $K_\epsilon = 0,9 - 1$ alınabilir.	

Çizelge 2.5. İşletme Faktörü, K_i (DIN3990)

İş Makinesi	Tahrik Motoru			
	Elektrik motoru düzgün çalışan	Türbin, hafif darbeli çalışan	Çok silindirli motor, orta darbeli	Tek silindirli motor, şiddetli darbeli
Düzenli çalışan jeneratör, bantlı konveyör, hafif asansör, turbo kompresör	1	1,10	1,25	1,50
Orta darbeli tezgah motorları, karıştırıcılar, pompalar, krenler	1,25	1,35	1,60	1,75
Orta darbeli kauçuk ekstrüzyon makineleri, kırıcılar, ağaç işleme makineleri	1,50	1,60	1,75	2
Şiddetli darbeler, haddehaneler, zımba, kepçe, ağır makineler, taş kırıcılar	1,75	1,85	2	2,25

Şekil 2.5. Form Faktörü, K_f (DIN3990)



Şekil 2.6. Düz dişliler için tahmini modül seçimi (Şekercioğlu 2015)

2.3.5.2. Yüzey basıncına göre modül hesabı

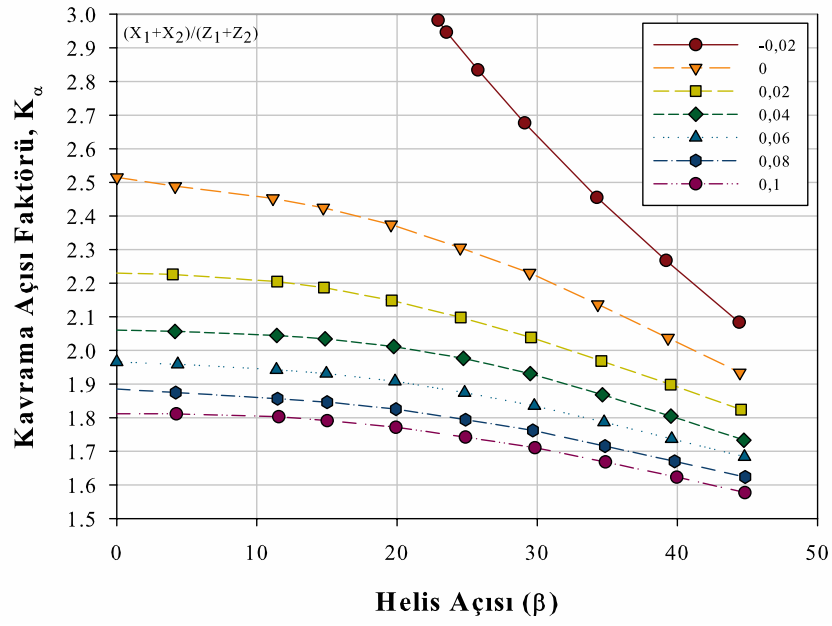
Yüzey basıncına göre modül hesabı aşağıdaki denklemlere göre yapılır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen değer, dişli modülüne eşit ya da küçük olmalıdır (Denklem 2.28).

$$m \geq 0,7 \sqrt[3]{\frac{M_d \cdot K_a^2 \cdot K_i \cdot K_v \cdot K_m \cdot K_\epsilon \cdot E (i_{12} + 1)}{\Psi_m \cdot z^2 \cdot p_{em}^2 \cdot i_{12}}} \quad (2.28)$$

Profil ötelemesi yapılmamış düz dişliler için Şekil 2.7'deki $K_a = 2,5$ alındığında Denklem 2.28'deki eşitlik sadeleştirilerek ($\alpha = 20^\circ$ için), Denklem 2.29 elde edilir.

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2 \cdot M_d \cdot K_i \cdot K_v \cdot K_m \cdot K_\epsilon \cdot E (i_{12} + 1)}{\Psi_m \cdot z^2 \cdot p_{em}^2 \cdot i_{12}}} \quad (2.29)$$

Alın dişli mekanizmalarında, modül eşitlikleri hem pinyon hem de çark için geçerlidir. Birlikte çalışan dişlilerde kontrol, pinyon dişliye göre yapılır. Çünkü, pinyon dişli, fazla devir sayısı ve yük tekrarına maruz kalarak için daha çabuk hasar görür (Şekercioğlu 2015).



Şekil 2.7. Kavrama açısı faktörü, K_{α} (DIN 3990)

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Malzemeler

Çalışmada, geleneksel yöntemlerden döküm ve talaşlı imalat, eklemeli imalat yöntemlerinden doğrudan metal lazer sinterleme ile imal edilen; 420, 316L paslanmaz çelikleri, Ti6Al4V titanyum alaşımı ve AlSi10Mg alüminyum alaşımı dişliler kullanılmıştır. Kullanılan alaşımların kısa gösterimlerine Çizelge 3.1’de yer verilmiştir.

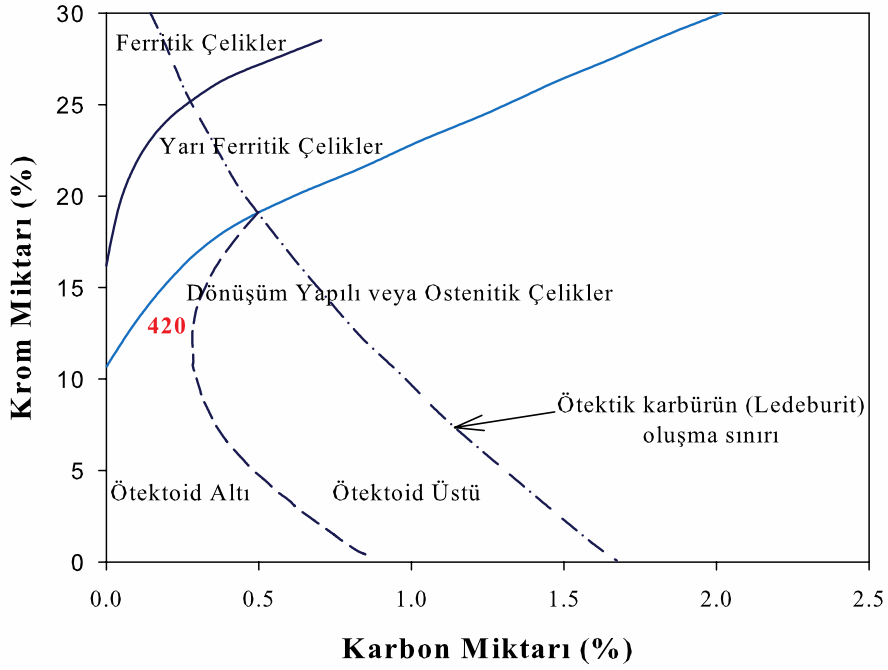
Çizelge 3.1. Dişlilerde kullanılan alaşımların kısa gösterimleri

Amerika Standartları		Avrupa Standartları	
Kısa Gösterim	Birleşik Numaralandırma Sistemi	Kısa Gösterim	Malzeme Numarası
420 (AISI)	S42000	X20Cr13	1.4021
316L (AISI)	S31603	X2CrNiMo17-12-2	1.4404
ASTM Grade 5	R56400	Ti6Al4V	3.7165
359.0 (AA)	A03590	ENAC-AlSi10Mg	3.2382

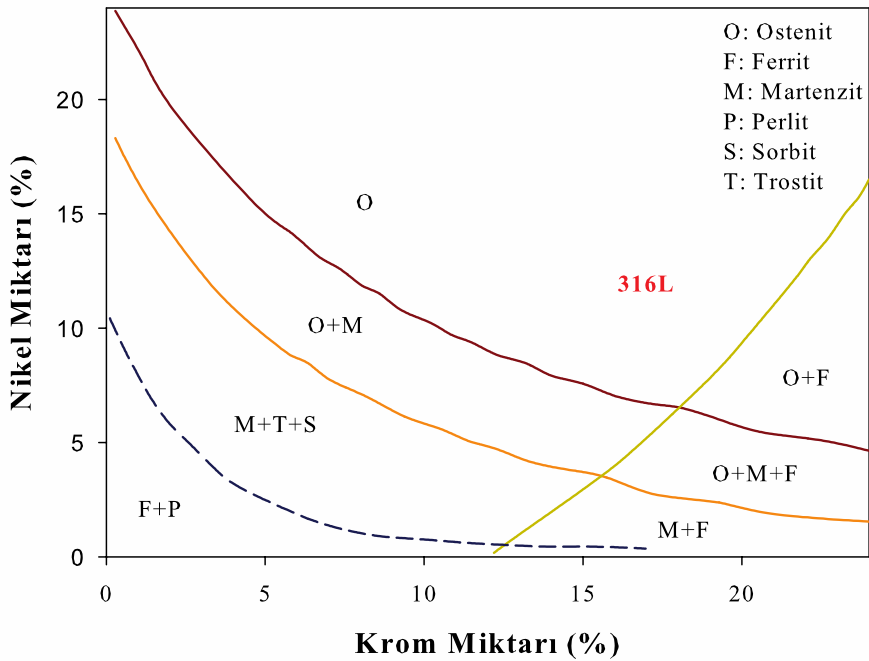
Alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerin dayanıklı olmadığı korozif ortamlarda kullanılan çelikler 420 ve 316L paslanmaz çelikleri olup, 420 (perlitik) martenzitik, 316L ise ostenitik paslanmaz çeliklerdir. Bileşimlerinde bulunan en az %12 krom; yüzeye sıkı bağlı, yoğun, tok ve ince bir Cr₂O₃ tabakası oluşturur ve korozyona direnç sağlar. 420 çeliği, yarı $\alpha \leftrightarrow \gamma$ dönüşümü gösteren bir perlitik-martenzitik paslanmaz çeliklerdir. Kuvvetli ostenit yapıcı olan karbon, belirli bir miktara ulaşıncaya kromun ferrit yapıcı etkisi ortadan kalkar. Ancak bu çelikte karbon oranı artırıldığı halde perlitik yapıya da istendiği için, krom yüzdesi de yükseltilmiş ve sadece kısmi dönüşüm elde edilmiştir (Şekil 3.1). 316L ise paslanmaz çeliklerin korozyona dayanıklı en önemli bölümünü oluşturan ostenitik paslanmaz çeliklerdendir. Bu çelik grubu büyük ölçüde manyetik değildir ve katı halde dönüşüm göstermediklerinden normalleştirilemezler veya sertleştirilemezler. Korozyon direnci nedeniyle gerekli olan en az %12 krom içeriğinin ferritik bir mikro yapıya yol açması muhtemeldir. Bu nedenle, istenen ostenitik yapının oluşumu için uygun türde ve miktarda ostenit dengeleyici nikel eklenmektedir. Nikel ayrıca oksitleyici ortamlara ve redükleyici asitlere karşı da çok dayanıklıdır. Şekil 3.2 mikroyapıyı krom ve nikel içeriğinin bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Buna göre, %13 Cr ile saf bir ostenitik çelik üretmek için yaklaşık %9 Ni gerekmektedir. Şekilde görüldüğü gibi 316L tümüyle γ katı çözeltisinden oluşan (tam) ostenitiktir. Tam ostenitik çelikler asitlere dayanıklı ve yüksek sıcaklıkta mekanik özellikleri iyi olan malzemelerdir.

Titanyum, yüksek dayanım ve üstün korozyon direnci yanında, düşük yoğunluğu ile seçkin bir metaldir. Bu özelliklerin bir araya gelmesi sonucunda pahalı olmasına rağmen titanyum alaşımları uçak yapımında, jet ve yüksek güç motorlarında uygulama alanları bulmaktadır. Titanyum, başta alüminyum olmak üzere kalay, zirkonyum alaşım elementleri veya oksijen hegzagonal (α) yapısının; vanadyum, krom, demir ve molibden de hacim merkezli kübik (β)’nin kararlılığını destekler. Kullanım yerine göre α , β ve $\alpha+\beta$ alaşımları geliştirilmiş olup, bunlar genellikle iki veya daha fazla katkı elementi içerir.

Ti6Al4V iki fazlı ($\alpha+\beta$) bir titanyum alaşımıdır. Bu alaşımlar, β alaşımları kadar yüksek dayanımlı olmamakla birlikte, yoğunluklarının düşük olması nedeniyle dayanım/yoğunluk oranı uygun malzemelerdir.



Şekil 3.1. Paslanmaz çeliklerde Cr ve C miktarının içyapı oluşumuna etkisi (Bargel ve Schulze 2012)



Şekil 3.2. 1000°C sıcaklıktan suda soğutulmuş paslanmaz çeliklerde (C %0,2) Cr ve C miktarının içyapı oluşumuna etkisi (Bargel ve Schulze 2012)

α ve β alaşımları arasında en uygun özellikleri temsil ettiklerinden en yaygın olarak kullanılan malzeme grubudur. Bu alaşıma, çökelme sertleştirme uygulanabilir. Bunun için öncelikle β -alanı sınırının hemen altındaki bir sıcaklıkta homojenizasyon tavl yapıp,

çok miktarda β -katı çözeltilisinin az miktarda α -katı çözeltisi ile dengede bulunması sağlanır. Daha sonra malzeme oda sıcaklığına kadar su verilerek soğutulur. Bu aşırı doymuş durumda gerçekleştirilen yaşlandırma tavyıyla önemli ölçüde sertlik artışı elde edilir. Ancak bu çalışmada alaşımlara yaşlandırma işlemi uygulanmamıştır.

Düşük yoğunluğu ile alüminyum, diğer metallere göre başlıca üç noktada üstünlüğe sahiptir. Dayanım/yoğunluk oranının yüksekliği alaşımlarında daha da belirgin olmakla birlikte, hafifletilmek istenen tasarımlar için uygun bir malzemedir. Elektrik iletkenliğinin yoğunluğa oranı bakımından tüm metal malzemelerin önünde gelen alüminyum, yüksek gerilim hatlarında bakırın yerini almaktadır. Havada ve diğer birçok ortamda korozyona dayanıklı oluşu, alüminyuma dekoratif görünüm kazandırarak mimari uygulamalarda ve ev araçlarının üretiminde de geniş bir alan açmıştır. Çalışmada kullanılan AlSi10Mg, döküm alüminyum alaşımlarının en önemlilerinden olup Al-Si faz diyagramındaki ötektik noktanın bileşimi esas alınarak geliştirilmiştir. Ötektik Alüminyum-Silisyum alaşımları dayanım özelliklerinin iyi olması yanında, üstün döküm özelliklerine sahiptirler. Alüminyum-Magnezyum-Silisyum üçlü sisteminin magnezyum-silisyum kenarında Mg_2Si ara fazı ortaya çıkar ve uygun bileşimli alaşımlara çökeltme sertleşmesi uygulanabilir (Bargel ve Schulze 2012). Bu çalışmada kullanılan AlSi10Mg alaşımı döküm ile üretildikten sonra ısıl işlem uygulanmıştır.

Alüminyum-magnezyum-silisyum sistemi için ısıl işlemin ilk adımı, $530^{\circ}C$ 'da yapılan homojenizasyon tavidir. Homejenizasyon tavinin süresi, döküm iç yapısından gelebilecek iri Mg_2Si çökeltilerinin katı çözelti içinde tümüyle çözünmesine yeterli olması amacıyla 24 saattir. İkinci adımda malzemeye su verilerek oda sıcaklığında aşırı doymuş katı çözelti elde edilmiştir. Aşırı doymadan ileri gelen sertlik artışının önemsiz olduğu (40-45HB10) tespit edilmiştir. Son adım olan yaşlandırma $160^{\circ}C$ 'de 24 saat süreyle yapay olarak yapılmıştır.

3.2. Test Dişlileri

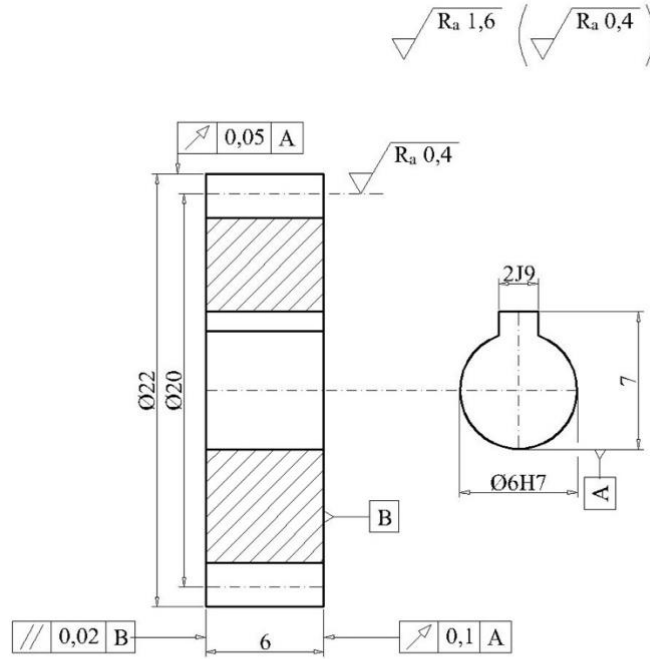
420, 316L, Ti6Al4V ve AlSi10Mg malzemelerden üretilen dişli test numunelerinin teknik resmi Şekil 3.3'te görülmektedir. Üretilen dişli $m=1$ mm modüle ve $z=20$ diş sayısına sahiptir.

3.3. Dişlilerin Üretim Yöntemleri

Dişlilerin üretiminde, geleneksel ve eklemeli imalat yöntemler kullanılmıştır. Üretim yöntemlerine ait detaylı bilgiler alt başlıklar halinde detaylı olarak açıklanmıştır.

3.3.1. Geleneksel yöntemlerle dişli üretimi

Üretilen deney numunelerinin ilk grubu geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile üretilmiştir. 420, 316L ve Ti6Al4V malzemeler soğuk çekme üretimi olup, 25mm çapında silindirik çubuk olarak temin edilmiştir. Ancak, AlSi10Mg döküm alaşımı olduğundan, işletme koşullarına uygun olması için 25mm çapta ingota dökülerek elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra tüm malzemeler uygun çapa tornalanmış ve istenilen tolerans ve kalite sağlanabilmesi için yuvarlanma yöntemi kullanarak dişli çark açan özel tezgahta (azdırma tezgahı) tüm boya diş açılmıştır. Ardından uygun genişlikte dişliler işlenmiş, kama kanalları açılmış ve taşlanarak işlem sonlandırılmıştır.



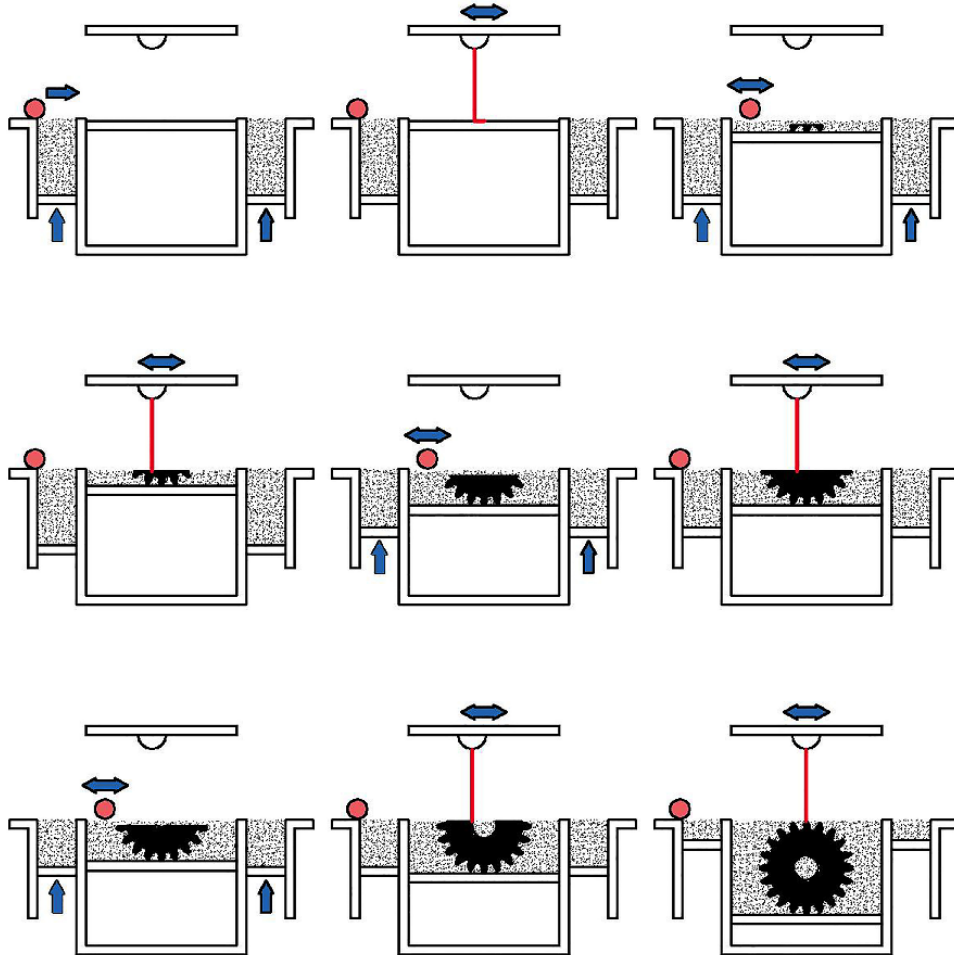
Şekil 3.3. Dişli test numunelerinin teknik resmi

3.3.2. Eklemeli imalat ile dişli üretimi

Eklemeli imalat ile üretimde, Şekil 3.3'teki teknik resme uygun üç boyutlu katı modeller Solidworks programında çizilerek tasarıma başlanmıştır. Dişlilerin tasarımı tamamlandıktan sonra üç boyutlu CAD modeli *.STL dosyasına dönüştürülerek kaydedilmiştir. STL dosyası, üç boyutlu modeli üçgenlere bölerek modelin daha basit gösterimini sağlar. Bu dosya, yardımcı bir yazılım aracılığıyla üç boyutlu modelin dilimlenerek G-koduna dönüştürülmesini sağlar. İmalata hazır olan modelin verileri, eklemeli imalatın yapılacağı cihaza aktarılarak üretim gerçekleştirilir.

Bu çalışmada kullanılan dişlilerin üretiminin gerçekleştirildiği eklemeli imalat teknolojisi doğrudan metal lazer sinterlemedir. Bu yöntem, doğrudan ve dolaylı olarak iki gruptan oluşmaktadır. Aralarındaki temel fark, tasarımın eklemeli imalat ile yapılması ve ardından direk kullanılması (doğrudan üretim) veya yalnızca modelin oluşturulması sürecinde (dolaylı) eklemeli imalattan faydalanılması ardından fırın vb ilave işlemler uygulanarak parçanın kullanılabilmesi durumudur. Alüminyum ve titanyum alaşımı dişliler doğrudan metal lazer sinterleme yöntemi ile üretilmiştir. Doğrudan üretimde (Şekil 3.4), üç boyutlu modelin oluşturulmasının ardından, özel yazılımlar aracılığıyla ürün bilgisi yazıcıya iletilir. Modelin oluşması için, yatak üzerinde lazerin hareketi sonucu eriyen toz metaller birbirine yapışarak modeli oluşturur. Bir katman basıldıktan

sonra yeni bir toz tabakası rulo ile yüzeye yayılır. Yazıcının, tozun erime noktasının hemen altına ısıtılmış bir baskı odası vardır. Lazer ışını tozu eritmek için ekstra enerji katar, böylelikle sağlam bir model oluşturur. Bir baskı işi tamamlandıktan sonra, içinde bulunan baskılı model ile birlikte büyük bir ısıtılmış toz bloğu elde edilir. Toz bloğun içerisinde model çıkarılır. Doğrudan metal lazer sinterleme yöntemiyle imal edilen dişlilerden beklenen malzeme özellikleri Çizelge 3.2’de yer almaktadır.

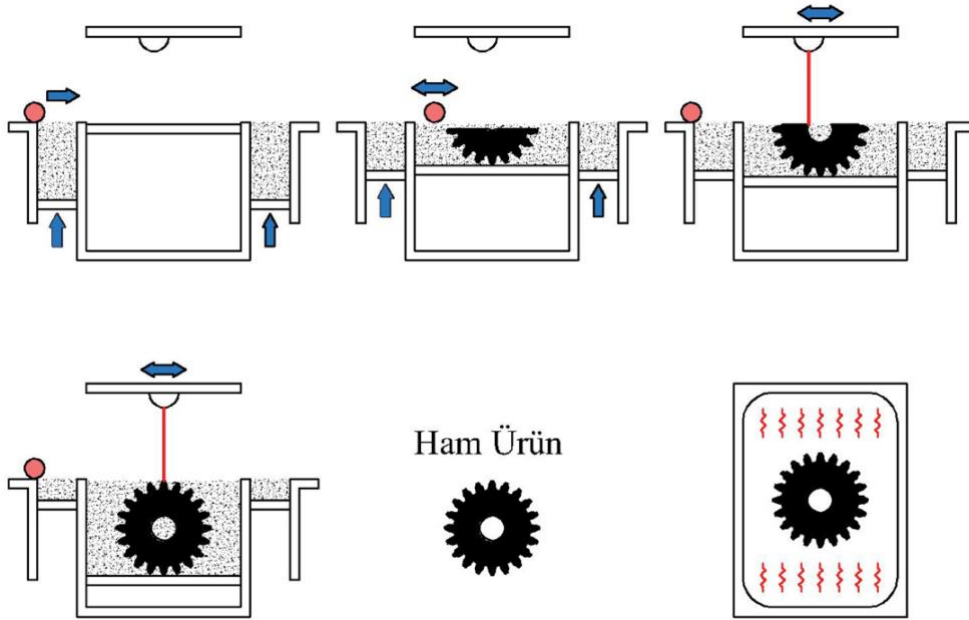


Şekil 3.4. Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemi

Çizelge 3.2. DMLS ile imal edilen dişlilerden beklenen malzeme özellikleri

Özellikler	AlSi10Mg	Ti6Al4V
Yoğunluk (g/cm ³)	2,68	4,41
Çekme dayanımı (MPa)	335-355	930-1140
Kopma uzaması (%)	9-13	13-15
Elastisite modülü (GPa)	50-70	104-124
Akma sınırı (MPa)	215-245	860
Sertlik (HV)	114-124	308-332

Dolaylı DMLS ise paslanmaz çeliklerin üretiminde kullanılmıştır (Şekil 3.5). Çeliğin dolaylı üretimi, paslanmaz toz tabakalarının birbirine bağlanması ile oluşur. Eklemeli imalat teknolojisi cihaza ait özel bir baskı kafası, bilgisayar ve tasarım dosyasının yönlendirdiği tabaka üzerinde ileri ve geri hareket ederek bağlayıcı maddeyi, çelik tozu tabakası üzerine bırakır. Tabaka tamamlandıktan ve güçlü ısıtıcılar ile kurutulduktan sonra, yeni bir toz tabakası yayılır ve işlem tekrar başlar. Bu şekilde, aşağıdan yukarıya doğru tasarım ürünü elde edilir. Bu haliyle parça oldukça kırılıgandır. Son olarak parçaya bronz difüz edilerek, içerisindeki bağlayıcının yerini alması sağlanır. Böylelikle elde edilen ürünler, oldukça dayanıklı parçalardır. Soğutma işlemi bittikten sonra model mekanik parlatma makinasına konur. Pürüzsüz bir yüzey elde edilmek istenirse, ilave işlemler uygulanabilir. Difüz edilen bronzdaki bileşim oranı %90 Cu ve %10 Sn şeklindedir. Bu teknikle, üretim sonrası paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimi %60 paslanmaz çelik ve %40 bronzdan oluşmaktadır.



Şekil 3.5. Dolaylı DMLS yöntemi

Dolaylı üretim yöntemiyle imal edilen dişlilerden beklenen malzeme özellikleri Çizelge 3.3'te yer almaktadır.

Çizelge 3.3. Dolaylı DMLS ile imal edilen dişlilerden beklenen malzeme özellikleri

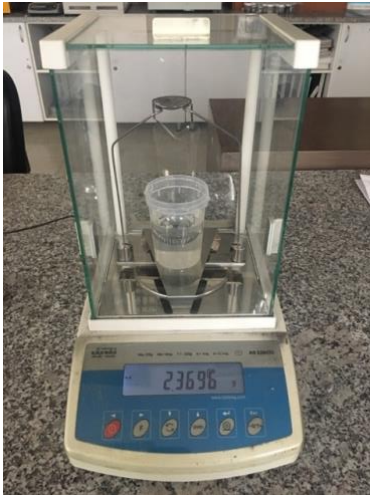
Özellikler	420+Bronz	316L (Cr 17% Ni 12% Mo 2.2%) + Bronz
Yoğunluk (g/cm ³)	7,86	-
Çekme dayanımı (MPa)	682	520
Kopma uzaması (%)	2,3	50
Elastisite modülü (GPa)	147	-
Akma sınırı (MPa)	455	180
Sertlik (HB)	97	55

3.4. Dişlilerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

3.4.1. Ağırlık ve yoğunluk ölçümü

Eklemeli ve geleneksel imalat yöntemleriyle üretilen dişlilerin ağırlık kayıpları ve yoğunluk ölçümleri Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan Radwag AS/220/C/2 marka 0,0001 g hassasiyetli terazi ve yoğunluk ölçüm kiti (Şekil 3.6) kullanılarak tespit edilmiştir. Dişlilerin ağırlık ve yoğunluk ölçümleri, hem test öncesi önce hem de test sonrası yapılmıştır.

Eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin her birinin yoğunluğu, üretim tekniği olan tozun sinterlenmesi sebebiyle farklıdır. Bu sebeple aşınma testleri öncesi dişlilerin her birinin yoğunluğu üç kez ölçülmüştür. Yoğunluk değerleri birbirine yakın olsa da az miktardaki farklılıklara “Sonuçlar” kısmında yer verilmiştir. Benzer işlemler aşınma testi sonrasında da tekrarlanmıştır. Geleneksel yöntemle üretilen dişlilerin de tamamının yoğunluk ölçümü hem aşınma testi öncesi hem sonrası yapılmıştır. Ancak, beklendiği gibi tüm yoğunluk değerleri aynı çıkmıştır. Ağırlık kayıpları pinyon ve döndürülen dişli için ayrı ayrı yapılarak kayıt altına alınmıştır. Hesaplamalar esnasında dişli çiftlerinin toplam ağırlık kaybı kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Hassas terazi ve ölçüm kiti

3.4.2. Yüzeysel inceleme

Eklemeli ve geleneksel imalat yöntemi ile üretilen dişlilerin, aşınma testleri öncesi ve sonrası yüzeysel incelemeleri Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Prototipleme Laboratuvarında bulunan SOIF SZ780-B2/L Trinoöler Stereo Zoom Mikroskop (Şekil 3.7) kullanılarak yapılmıştır. Bu mikroskop ile entegre olarak çalışan M-SHOT 5.0 MP CMOS mikroskop görüntüsü transfer kamerası ve yazılımı ile incelenen diş yüzeylerinden görüntüler alınmıştır. Ayrıca, aşınma testleri öncesi ve sonrası yüzeysel incelemelerinde ZEISS GeminiSEM 500 taramalı elektron mikroskobu (Şekil 3.8) kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Stereo mikroskop



Şekil 3.8. Taramalı elektron mikroskobu

3.4.3. Sertlik ölçümü

Eklemeli ve geleneksel imalat yöntemleriyle üretilen dişlilerin sertlik ölçümleri Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan Hardness Tester RBOV-200 isimli sertlik ölçme cihazı (Şekil 3.9) ile yapılmıştır. Sertlik ölçümü için 420 çeliği, 316L çeliği, Ti6AL4V ve AlSi10Mg malzemelerinden imal edilen dişlilerde Brinell 10 ve Brinell 30 sertlik ölçüm yöntemi kullanılmıştır.



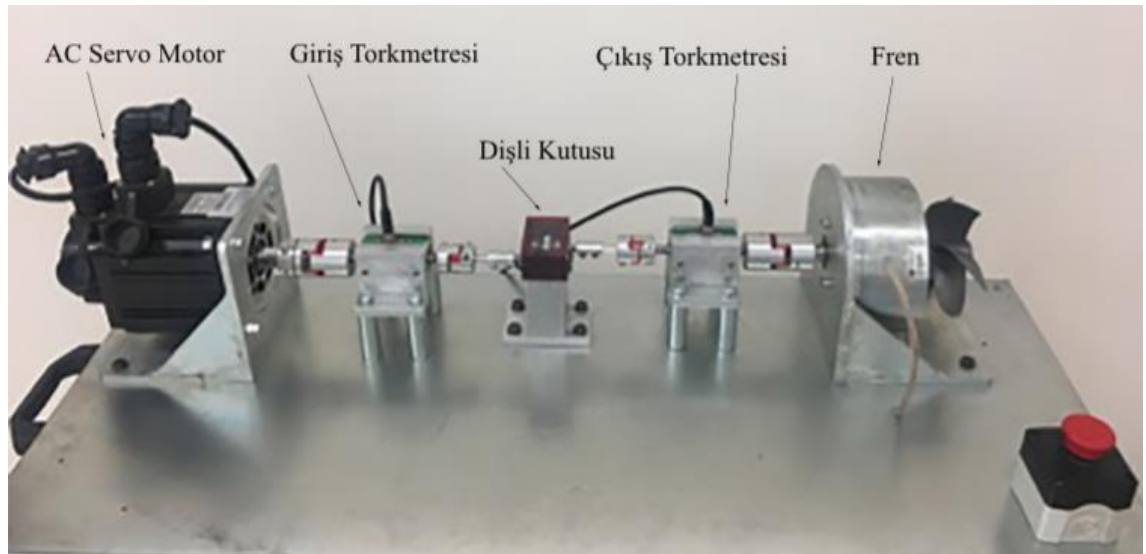
Şekil 3.9. Sertlik Ölçme Cihazı

3.4.4. Madeni yağ elementel analizi

Dişli aşınma testine tabii tutulan dişli çiftlerinin bulunduğu dişli kutusuna, her test öncesi eklenen Castrol GL 4 90 yağ, test sonrası toplanmıştır. Bu yağ mineral bazlı, aşırı basınç katkısı içeren, çok amaçlı dişli yağıdır. Aşınma testi sonucu yağa karışan elementlerin ve miktarlarının analizi ASTM (American Society for Testing and Materials - Amerikan Test ve Malzeme Derneği) yöntemlerinden ASTM D 5185 standardında belirlendiği şekilde hizmet alımı ile yapılmıştır.

3.4.5. Dişli aşınma test cihazı

Tez kapsamında mikro modüllü dişliler için geliştirilen test cihazı, AC servo motor, tork sensörü, dişli kutusu, kaplin, fren mekanizması ve çeşitli makine parçalarından oluşmaktadır. Mikro modüllü dişlilerin aşınma testlerinin yapılacağı konstrüksiyonun üstten görünümü ve bileşenleri Şekil 3.10'da yer almaktadır.



Şekil 3.10. Dişli aşınma test cihazı

Tasarımı ve imalatı yapılan bu test cihazında $m=1\text{mm}$ modül ve $z=20$ diş sayısına sahip dişlilerin takılabileceği bir dişli kutusu bulunmaktadır. Ancak ileride gerçekleştirilebilecek çalışmalar düşünülerek, farklı boyutlarda dişliler ve dişli kutuları için uyarlanabilir şekilde bir cihaz tasarlanmıştır. Dişli kutusuna tahrik, bir servo motor aracılığıyla verilmektedir. Motordan alınan hareket esnek kaplin vasıtasıyla giriş torkmetresine, buradan da ikinci bir esnek kaplin ile dişli kutusuna iletilmektedir. Dişli kutusunun çıkışında ise hareket üçüncü bir esnek kaplin ile çıkış torkmetresine ve dördüncü esnek kaplin ile de yükü temsil eden fren mekanizmasına iletilmektedir. Servo motor sürücüsü ile motora istenen devirde hareket verilmekte ve fren mekanizması ile istenen yük seviyesi ayarlanabilmektedir. Test cihazında kullanılan parçaların detaylı bilgileri aşağıda yer almaktadır.

3.4.5.1. Dişli kutusu

Test dişlilerin bulunduğu dişli kutusunun detaylı görünümü Şekil 3.11’de yer almaktadır. Dişliler, $\text{Ø}6\text{h}6$ toleranslı mil üzerine radyal yönde A tipi uygu kaması, aksel yönde ise mil segmanı ile sabitlenmektedir. Pirinç yatak içerisindeki iğneli rulmanlar ile sabit-serbest yataklanmış giriş ve çıkış milleri esnek kaplinler ile torkmetrelere giriş ve çıkış torklarını iletmektedir. Her test öncesi dişli kutusuna 10ml Castrol GL 4-90 yağ konulmuş ve test sonrası yağ toplanarak analiz için kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Dişli kutusunun üstten görünümü

3.4.5.2. AC servo motor

Dişli aşınma test cihazının bileşenlerinden biri olan AC motor, sistemdeki farklı parametre ihtiyaçlarını karşılayabilecek şekilde seçilmiştir. 1500 W kapasiteli AC motor ile 2000 s^{-1} ’e kadar devir elde edilebilmektedir. 0 Nm ila 18 Nm aralığında tork üretebilen bu motorun çalışma sıcaklığı 0°C ile 40°C arasındadır. AC Servo motor, bir sürücü ve bağlantı takımı ile kontrol edilmektedir. Dişli aşınma test cihazında kullanılan motor, Şekil 3.12’de yer almaktadır.



Şekil 3.12. AC servo motor

3.4.5.3. Torkmetreler

Dişli aşınma test cihazında kullanılan torkmetreler, fırçasız döner tip olup temassızdır ve elektromanyetik diyafram teknolojisine sahiptir. Elektromanyetik diyafram teknolojisi, nikel içerikli sensörün çelik mile sabit bir manyetik alan uygulaması sonucu, sensör statorun elektromanyetik diyafram elektronik devresi tarafından işlenmesiyle ölçüm sinyalinin oluşmasıdır. Torkmetrelerden elde edilen bu sinyaller, veri toplama cihazı ile tork değerleri olarak elde edilir ve kaydedilir. 0-5 Nm aralığındaki tork değerlerinde çalışabilen Burster 8645 marka tork sensörlerinin dişli aşınma test cihazı ile bağlantısı esnek kaplinlerle sağlanmıştır. Dişli aşınma test cihazında kullanılan torkmetreler Şekil 3.13'te yer almaktadır.



Şekil 3.13. Torkmetre

3.4.5.4. Fren mekanizması

Fren mekanizması, güvenilir ve hassas tork kontrolünde gerekli ihtiyaçları karşılamak için histerezis ilkelerini kullanmaktadır. Histerezis frenleri, manyetik partiküller veya sürtünme bileşenleri kullanmadan yalnızca manyetik bir hava boşluğu vasıtasıyla tork üretir. Bu frenleme yöntemi, neredeyse her türlü malzemenin işlenmesinde hassas kontrol için üstün özelliklerden biridir. Dişli aşınma test cihazında, değişken tork değerlerinde çalışabilmeyi sağlayan Magtrol HB750 marka fren sistemi kullanılmıştır. 26 Nm tork, 24000 rpm hızı durdurabilme kapasitesine sahip olup fren mekanizmasının kontrolü bir fren kontrolörü aracılığıyla sağlanmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Fren mekanizması

3.4.5.5. Kontrol ve veri toplama sistemi

AC Servo motor, SG15A marka sürücü ile istenildiği şekilde kontrol edilebilmektedir. Bu motor sürücüsü, Şekil 3.15'te yer almaktadır.



Şekil 3.15. AC servo motor sürücüsü

Torkmetrelerden elde edilen veriler, analog ve dijital sistemlerde ölçüm ve kontrolde kullanılan U12 LabJack ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Ayrıca fren mekanizmasının kontrolü de yine bu cihaz aracılığıyla DAQ Factory yazılımı aracılığıyla bilgisayardan veri girilmek suretiyle sağlanmıştır. LabJack U12, analog giriş sinyalleri, tek uçlu kanallar ve diferansiyel kanallardan oluşmaktadır (Şekil 3.16). Her girişin ± 10 voltluk bir giriş aralığı, 12-bit çözünürlük ve ± 90 mikroamper giriş öngerilim akımı vardır. LabJack U12 analog çıkış sinyalleri ise her bir analog çıkış için, 0 ile besleme voltajı (nominal değer +5 volt) arasındaki bir voltaja 10 bit çözünürlükte ayarlanabilir. Analog çıkışlar, komut/yanıt modunda kanal başına 50 Hz'e kadar kontrol edilebilmektedir. Ayrıca giriş veya çıkış olarak ayrı ayrı konfigüre edilebilen 20 dijital kanala sahip olan bu cihaz yüksek gerilim ve kısa devre korumasına sahiptir.



Şekil 3.16. Kontrol ve veri toplama cihazı

Fren sistemine güç sağlamak ve kontrol etmek için Şekil 3.17'de yer alan V8 amplifikatör kullanılmıştır.



Şekil 3.17. Fren kontrolörü

3.4.6. Test dişlilerinin verim analizi

Dişli kutusunda çalışan dişli çiftinin tork verileri, çalışma süresince anlık olarak kaydedilmiştir. Elde edilen anlık giriş ve çıkış tork verilerinin ortalaması alınarak, ortalama giriş ve çıkış torku tespit edilmiştir. Çıkış torkunun giriş torkuna oranı, test edilen dişli çiftinin verimini verir.

3.4.7. Nümerik analiz

Çalışma kapsamında kullanılan dişlilerin, servis çalışma koşullarının ve bu koşullar altında hasar mekanizmalarının belirlenmesinde nümerik analiz ihtiyacı doğmuştur. Bu sebeple Ansys Mechanical yazılımında sonlu elemanlar yöntemiyle çözümlenmeler yapılmıştır. Mesh yapısı oluşturulurken özellikle dişlilerin birbirlerine temas noktaları ve yüzey basıncının olduğu yüzeylerde ağ yapıları sıklaştırılarak daha fazla düğüm noktasında çözümlenme yapılması sağlanmıştır.

3.4.8. Normalizasyon

Genel olarak aşınma, kaybedilen hacim/kütle miktarı ve aşınma yüzeyinin durumu ile değerlendirilir. Aşınmanın miktarı; aşınma oranı, özgül aşınma oranı veya aşınma katsayısı ile tanımlanarak diğer durumlarda da kullanılmak üzere normalleştirilebilmektedir. Aşınma oranı, birim mesafe başına aşınma hacmi olarak tanımlanır. Özgül aşınma oranı ise, birim mesafe ve birim yük başına karşılık gelen aşınma hacmidir. Aşınma katsayısı ise özgül aşınma oranı ve deney malzemesinin sertliğe oranı olarak tanımlanır.

Herhangi bir sistemdeki aşınma miktarı genel olarak, uygulanan yük, kayma hızı, kayma mesafesi ve malzeme özellikleri gibi faktörlere bağlı olacaktır; bu çalışmanın sonuçlarını servis sırasında karşılaşılabilecek tüm koşullarda kullanabilmek amacıyla, ASTM G99'a göre özgül aşınma oranı hesaplanmıştır. Bu standarda göre aşınan hacim, kat edilen yol ve uygulanan yüke bölünerek özgül aşınma oranı olarak kullanılmıştır.

3.4.9. Test parametreleri

Test parametrelerinin belirlenmesinde öncelikle, bu çalışma kapsamındaki 420 çeliği, 316L paslanmaz çeliği, Ti6Al4V ve AlSi10Mg malzemeleri için ortak bir çalışma aralığı belirlenmiştir. Bu çalışma aralığının belirlenmesinde Bölüm 2'de yer alan teorik düz dişli hesaplamaları kullanılmıştır. Ardından, tüm malzemeler için ortak çalışma aralığı belirlenmiştir. Teorik hesaplamalara bağlı olarak gerçekleştirilen nümerik çalışma

sonuçları, teorik hesaplamaları desteklemiş olup nümerik çalışmanın detaylarına 4. bölümde yer verilmiştir.

Tüm dişli aşınma testlerinde, dişliler toplam 10^5 devir dönüş yapmıştır. Böylelikle farklı devir sayılarında çalışan dişlilerin eşit yol alması sağlanmıştır. Tüm dişli aşınma testlerinde özdeş dişli çiftleri çalıştırılmıştır. Yapılan aşınma testlerinde dişlilerden elde edilen sonuçlara, malzeme özellikleri ve üretim tekniklerinin yanı sıra tork ve devir sayısının etkisi de incelenmiştir. Ayrıca üretim sonrası yüzey işlemlerinin etkisinin irdelenebilmesi için eklemeli imalatla üretilen 420 çeliği dişlilerde, üretim sonrası yüzeylere ilave parlatma işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem etkisinin de incelenebilmesi için AISi10Mg dişlilerin bir kısmına ısıl işlem uygulandıktan sonra özdeş testler uygulanmıştır. Bu kapsamda, tüm dişli çiftleri Çizelge 3.4 doğrultusunda, dişli aşınma test cihazında çalıştırılmıştır.

Birçok parametrenin incelendiği bu çalışmadan elde edilen veriler, dişlilerin yüzey karakteristikleri, dişli verimleri, hasar mekanizmaları, aşınma miktarları, yağdan element analizleri, nümerik analizler şeklinde oldukça geniş kapsamlı olup “Bulgular ve Tartışma” bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır.

Çizelge 3.4. Test planı ve parametreleri

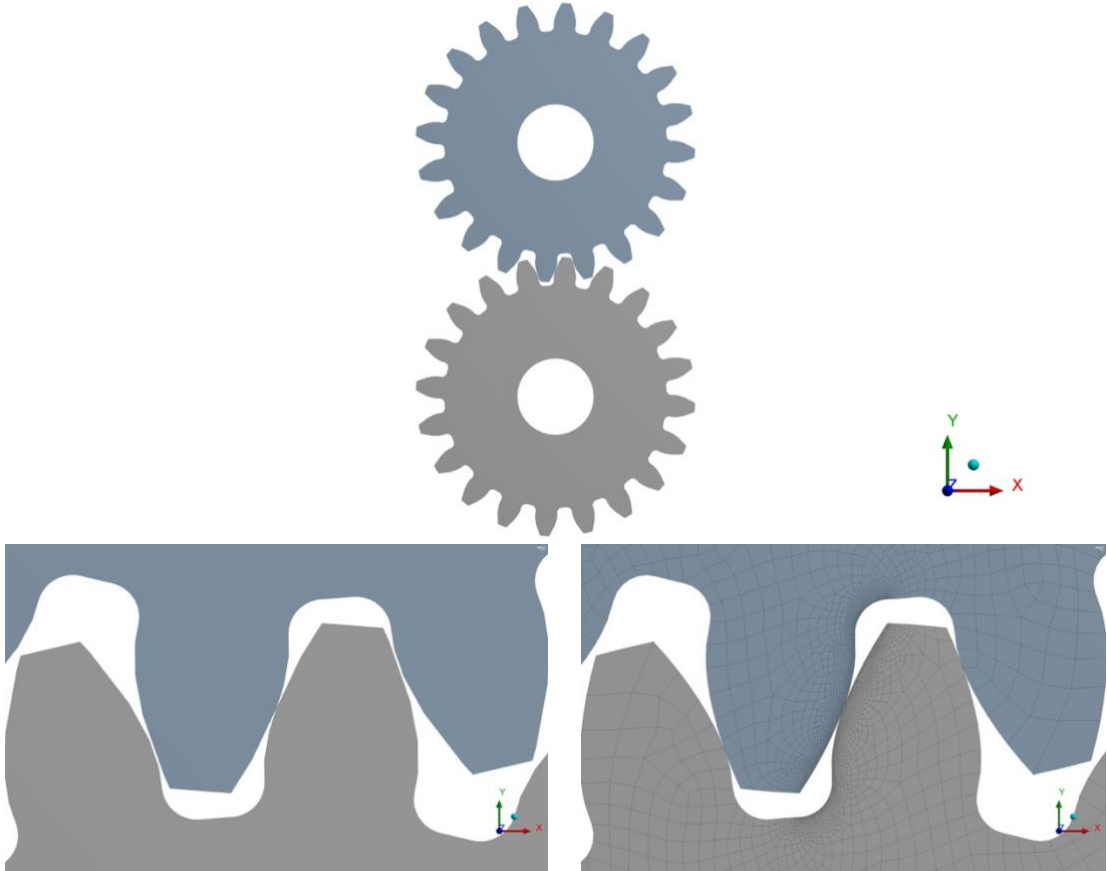
Üretim Yöntemi		Malzeme	Tork	Devir Sayısı
Geleneksel İmalat	Talaşlı İmalat	420	0,25Nm 0,50Nm	250 s ⁻¹ 500 s ⁻¹ 1000 s ⁻¹
Eklemeli İmalat	DMLS			
	DMLS + yüzey parlatma			
Geleneksel İmalat	Talaşlı İmalat	316L		
Eklemeli İmalat	DMLS			
Geleneksel İmalat	Talaşlı İmalat	Ti6Al4V		
Eklemeli İmalat	DMLS			
Geleneksel İmalat	Döküm+Talaşlı İmalat	AISi10Mg		
Geleneksel İmalat	Döküm+Isıl İşlem +Talaşlı İmalat			
Eklemeli İmalat	DMLS			

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında mekanik davranışı incelenen malzemeler; 420 ve 316L paslanmaz çeliği, Ti6Al4V titanyum alaşımı ve AlSi10Mg alüminyum alaşımıdır. Önceki bölümde dişli teorileri doğrultusunda yapılan hesaplamalarla, hem doğrudan metal lazer sinterleme ile üretilen malzemeden dişliler için hem de talaşlı imalat ile üretilen dişliler için bir çalışma aralığı belirlenmiştir. Geleneksel yöntemle üretilen dişlilere ait dişli teorisi 2. bölümde detaylı olarak açıklanmış olup nümerik analiz sonuçlarına bu bölümde yer verilmiştir.

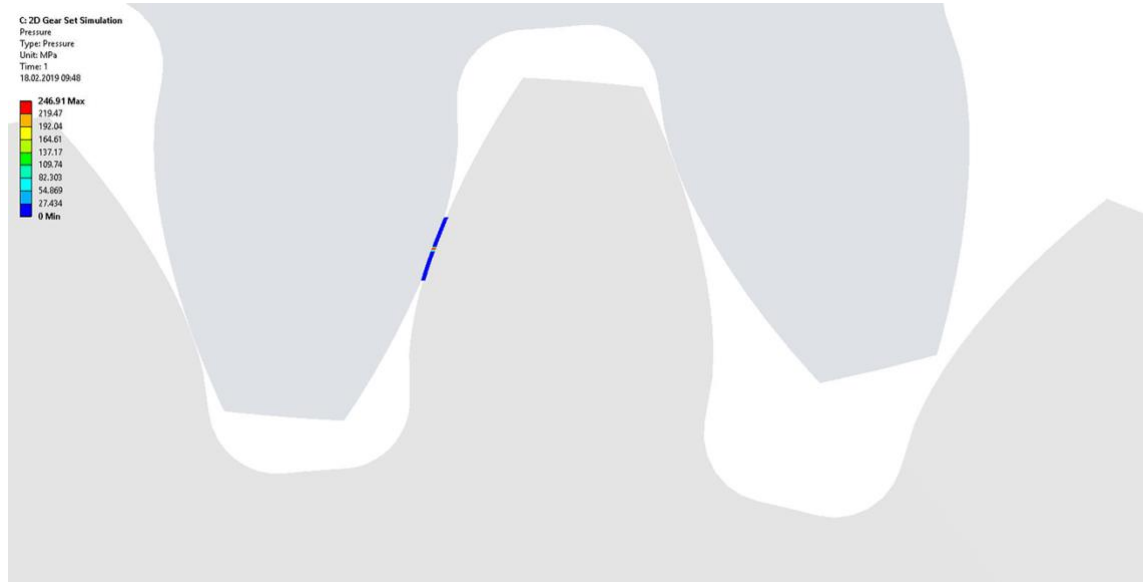
4.1. Nümerik Analiz

Çalışmanın nümerik analiz kısmında, teorik hesaplamalarla belirlenen aralıklarda analiz yapılarak elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Literatür ve dişli teorileri hesaplamaları yardımıyla geleneksel yöntemlerle üretilen dişlilerin davranışları tahmin edilebilir. Ancak eklemeli imalat ile üretilen dişlilere dair literatürde hiçbir çalışmaya rastlanmadığından nümerik çalışma bu yöntemle üretilen dişliler üzerine yoğunlaştırılmıştır. Nümerik analizde, mikro modüllü test dişlilerinin gerilme dağılımlarını incelemek için lineer statik analiz yapılmıştır. Analizde kullanılan dişliler, genişliği 6 mm, diş sayısı 20 ve modülü 1 olan mikro modüllü dişliler olup dişli aşınma test cihazında kullanılan dişli çifti ile özdeştir. Şekil 4.1’de analizi yapılan mikro modüllü dişli çifti görülmektedir.

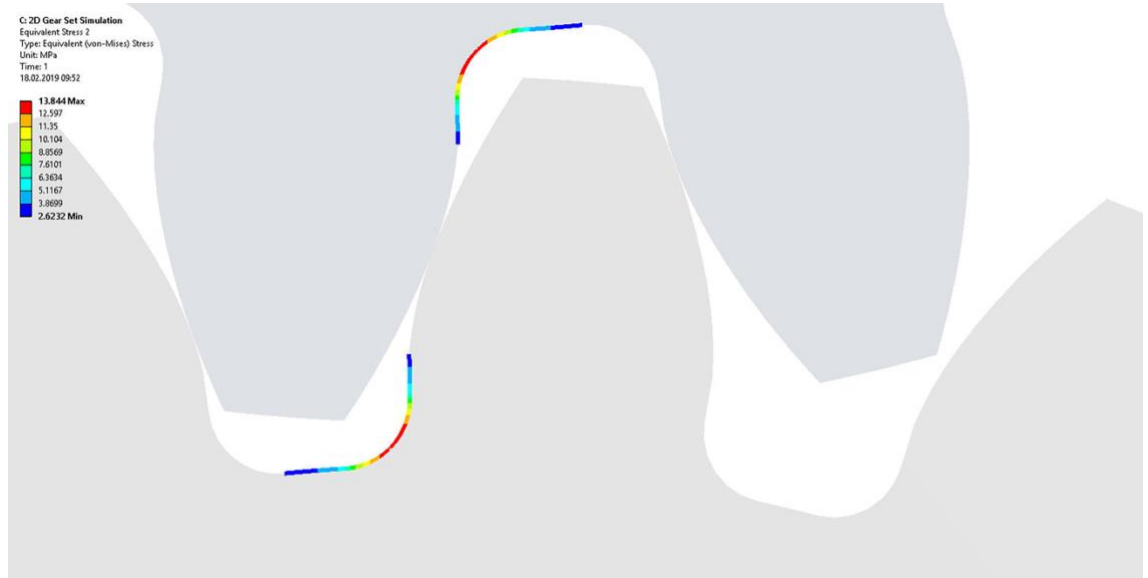


Şekil 4.1. Analizde kullanılan düz dişli çifti ve ağ yapısı

Şekil 4.1’de analizi yapılan dişli çiftinin malzeme atamasında, eklemeli imalat kullanılarak imal edilmiş 316L paslanmaz çeliğin malzeme özellikleri kullanılmıştır. Eklemeli imalat ürünü dişli çiftinin temas ve eğilme gerilmesi analizleri ANSYS Mechanical programı kullanılarak iki boyutlu olarak yapılmıştır. Bu analizler; 0,25, 0,5, 0,75 ve 1 Nm torklar için yapılarak gerilme dağılımları incelenmiştir. Analiz sonucunda meydana gelen temas basıncı Şekil 4.2’de, Von-Mises gerilme dağılımı ise Şekil 4.3’te verilmiştir.

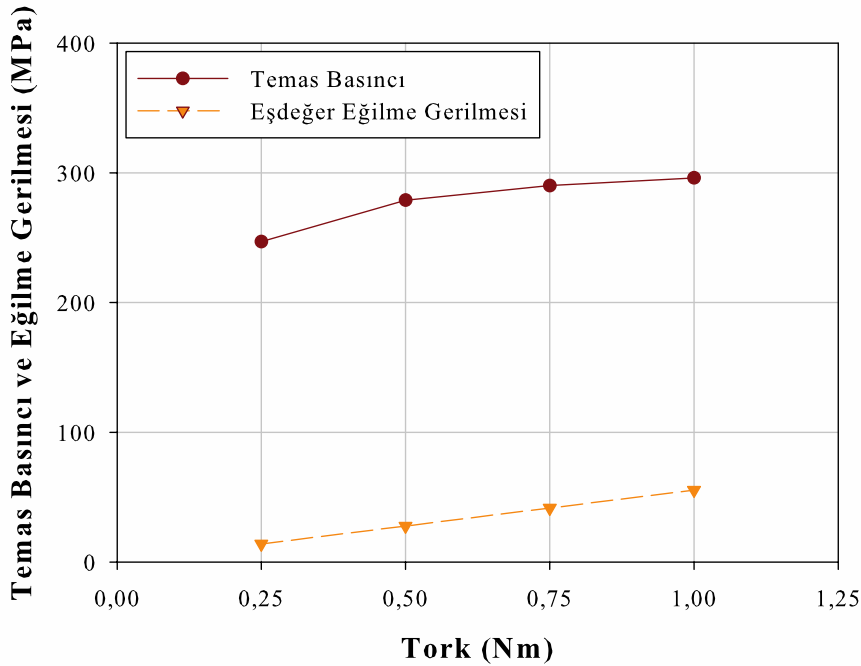


Şekil 4.2. 316L dişlide 0,25 Nm torkta meydana gelen temas basıncı



Şekil 4.3. 316L dişlide 0,25 Nm torkta meydana gelen Von-Mises gerilmesi

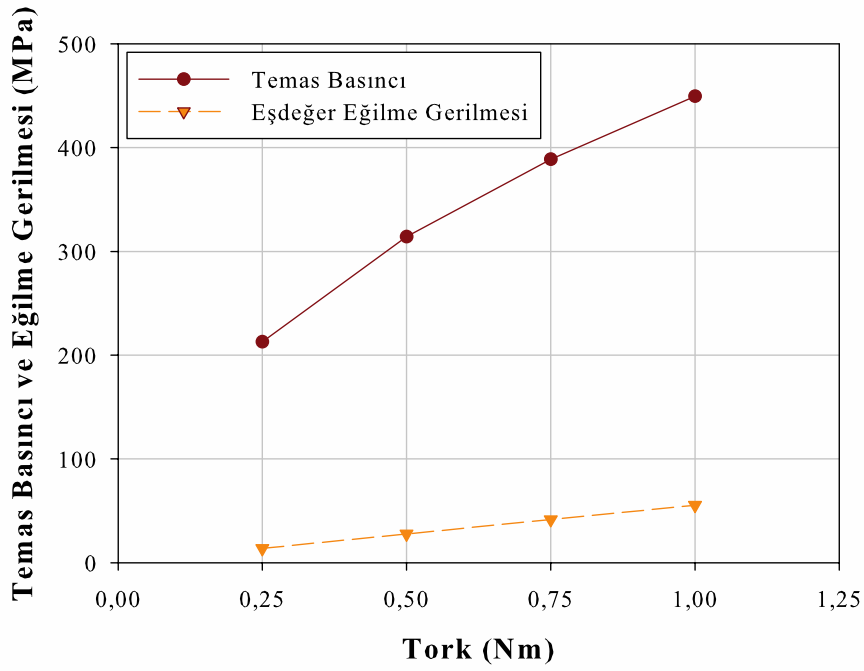
Elde edilen veriler kullanılarak, çeşitli torklarda temas basıncı ve diş dibindeki eşdeğer eğilme gerilme değişimi Şekil 4.4'te yer almaktadır. Şekil 4.4 incelendiğinde, 316L malzemeden dişlilerde torkun artmasıyla birlikte temas basıncı ve eşdeğer gerilme de artmaktadır. Buna rağmen dişli çiftindeki temas basıncının her zaman eşdeğer gerilmeden yüksek olduğu görülmektedir. Bu sebeple Şekil 4.4'teki veriler, eklemeli imalat ile üretilmiş dişli çiftinde düşük yüklemelerde hasar sürecinin öncelikli olarak pitting hasarı ile başlamasının beklenmesinin gerektiği sonucunu ortaya koymaktadır. Ancak artan yüklemeler ile pitting yanında diş dibi kırılmalarının da görülmesi muhtemeldir.



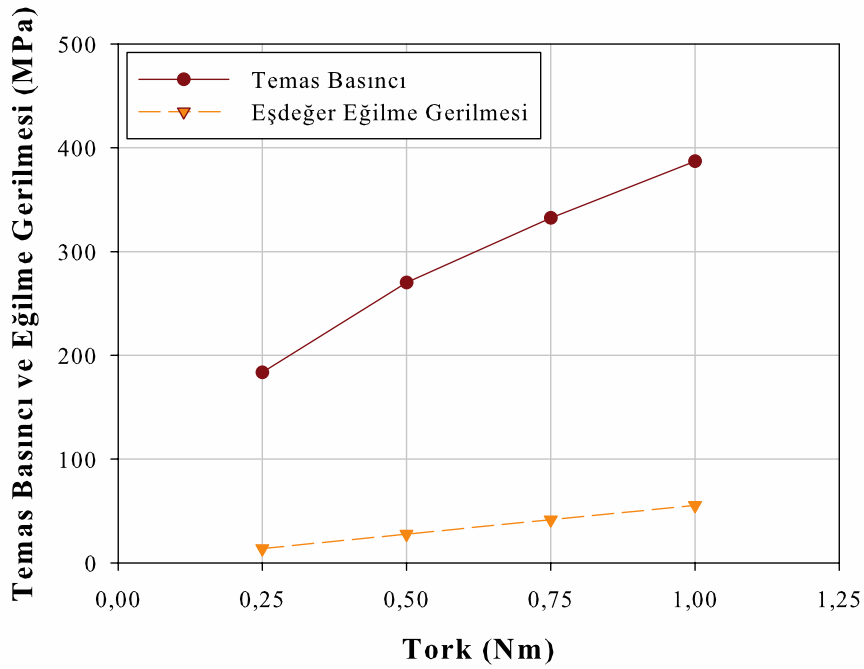
Şekil 4.4. 316L mikro modüllü dişlilerde torka bağlı olarak temas basıncı ve eşdeğer eğilme gerilmesi değişimi (Tezel vd. 2018b)

420 çelik malzemeden mikro modüllü dişlilerde torka bağlı olarak temas basıncı ve eşdeğer eğilme gerilmesi değişimi Şekil 4.5'te yer almaktadır. Uygulanan torkun artmasıyla hem temas basıncı hem de eşdeğer gerilme artmaktadır. Ancak temas basıncının artış oranı, eşdeğer gerilmenin artış oranına kıyasla oldukça yüksektir. Ayrıca, tüm torklarda temas basıncı, eşdeğer gerilmenin oldukça üstündedir. Bu sebeple 420 çelikten üretilen eklemeli imalat ürünü dişlilerde özellikle temas basıncından kaynaklanan hasarlar görülebilir. Bunun için diş yuvarlanma noktaları özellikle incelenmelidir.

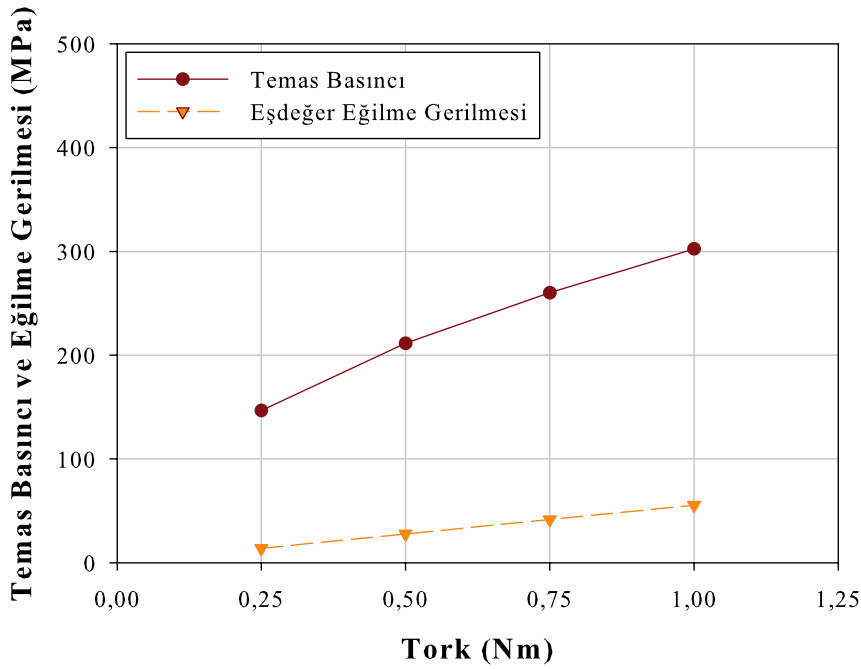
Ti6Al4V alaşımı malzemeden mikro modüllü dişlilerde torka bağlı olarak temas basıncı ve eşdeğer eğilme gerilmesi değişimi Şekil 4.6'da, AlSi10Mg alaşımı mikro modüllü dişliler için temas basıncı ve eşdeğer eğilme gerilmesi değişimi Şekil 4.7'de yer almaktadır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'ten elde edilen sonuçlara benzer şekilde, Ti6Al4V ve AlSi10Mg alaşımlardan dişliler için de temas basıncı eş değer gerilmenin oldukça üzerindedir. 420 çelik malzemeden mamul dişliler ile Ti6Al4V alaşımı dişlilerin sonuçlarının birbirine oldukça yakın olması dikkat çekmektedir.



Şekil 4.5. 420 çelik mikro modüllü dişlilerde torka bağlı olarak temas basıncı ve eşdeğer eğilme gerilmesi değişimi



Şekil 4.6. Ti6Al4V alaşımı mikro modüllü dişlilerde torka bağlı olarak temas basıncı ve eşdeğer eğilme gerilmesi değişimi



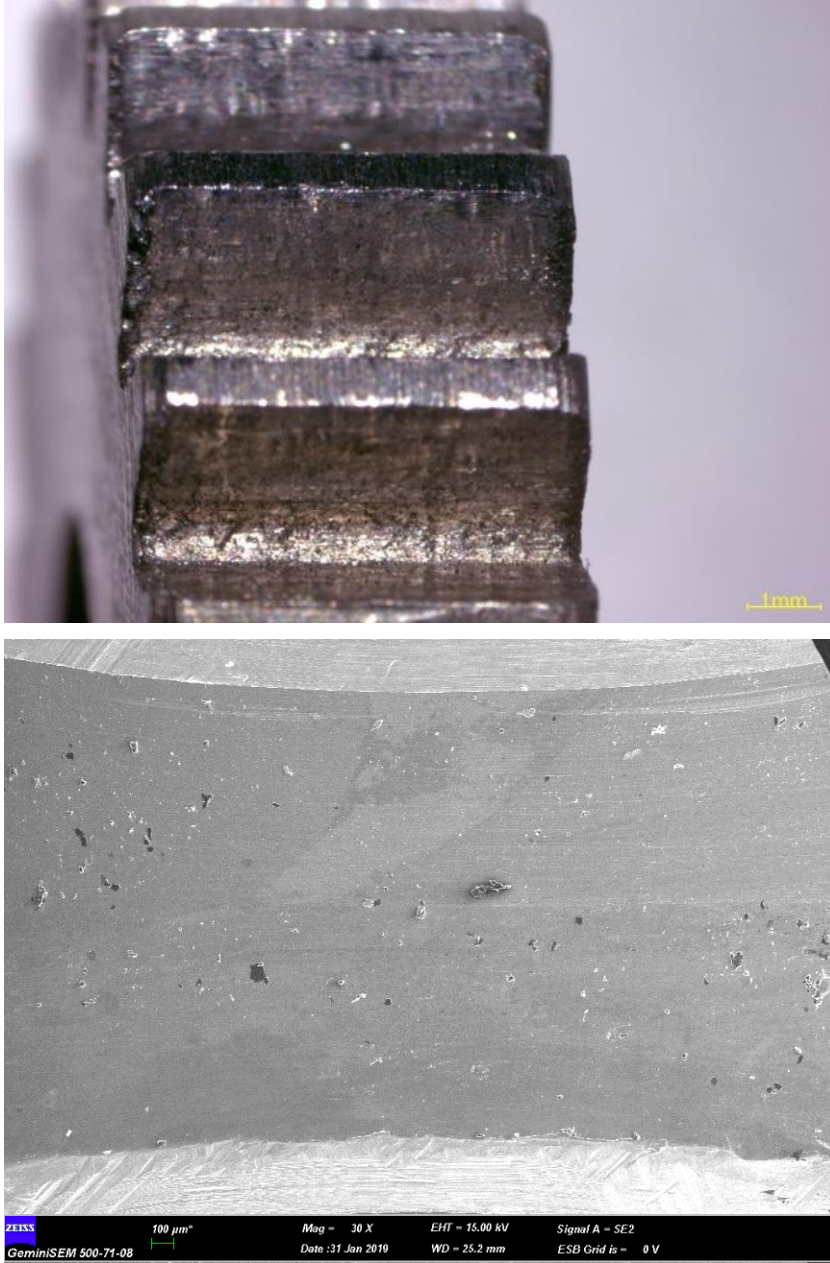
Şekil 4.7. AlSi10Mg alaşımı malzemeden mikro modüllü dişlilerde torka bağlı olarak temas basıncı ve eşdeğer eğilme gerilmesi değişimi

Mühendislik yazılımları kullanılarak tasarım öncesi yapılan çeşitli analizler oldukça büyük önem taşır. Bu bölümde, eklemeli imalat ile üretilen mikro modüllü dişli tasarımı yapılarak çeşitli yükler altında eşdeğer eğilme gerilmesi ve temas basıncı incelenmiştir. Elde edilen veriler, çalışmada kullanılan tüm malzemeler için tork arttıkça eşdeğer eğilme gerilmesi ve temas basıncının arttığını göstermektedir. Yine tüm malzemeler için, eşdeğer eğilme gerilmesi ve temas basıncı değerleri kıyaslandığında, çalışma parametresi olan tüm tork değerlerinde temas basıncı eğilme gerilmesinden yüksektir. Nümerik analiz sonuçları, mikro modüllü dişlilerde meydana gelen hasarların erken tespiti için oldukça önemli olup çalışmanın deneysel aşamasında da oldukça faydalı olmuştur (Tezel vd. 2018b). Çalışma kapsamındaki tüm dişliler için özellikle temas basıncı kaynaklı hasarlarla karşılaşılması olasıdır. Ayrıca, teorik hesaplamalarla elde edilen bu çalışma parametrelerinin, tüm malzemeler için ortak bir çalışma aralığı olduğu nümerik analizler sonucunda da doğrulanmıştır.

4.2. 420 Çelik Dişlilerden Elde Edilen Sonuçlar

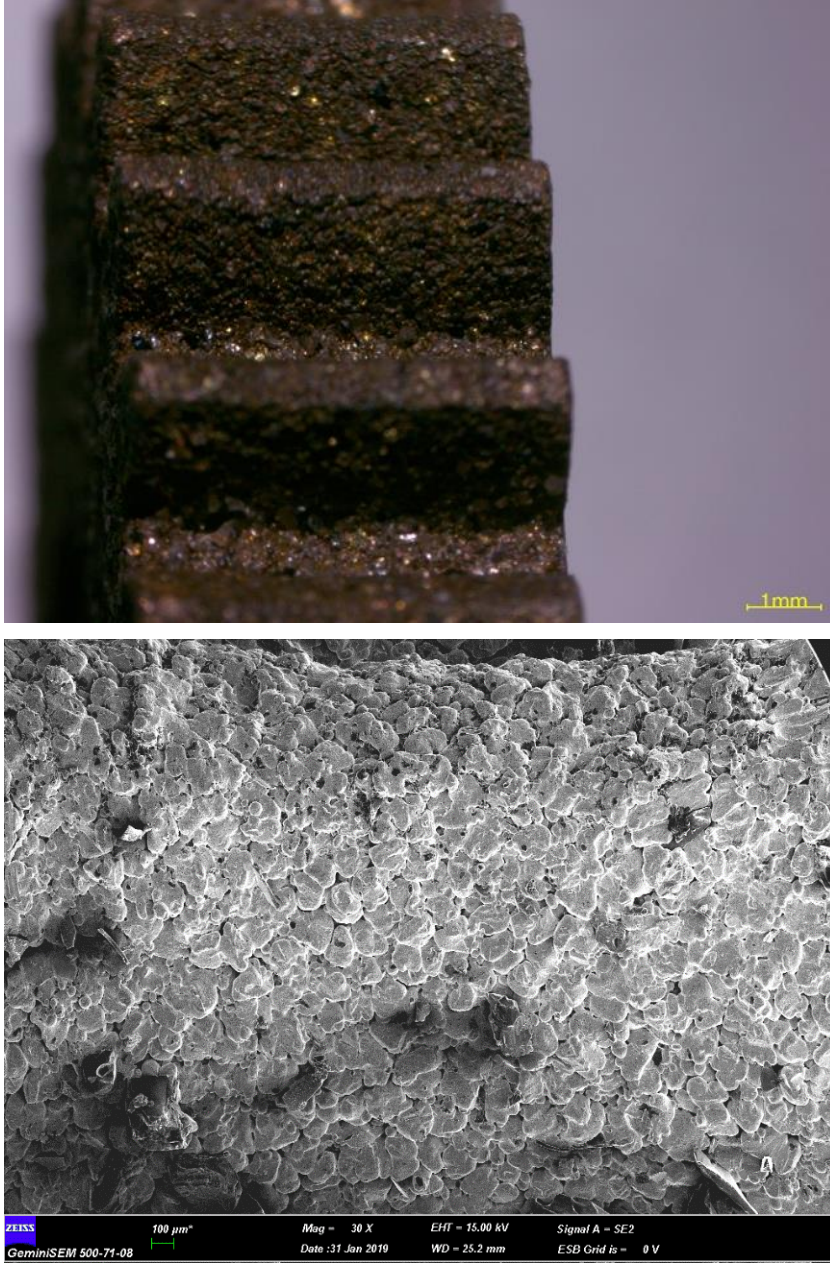
4.2.1. Dişlilerin mekanik özellikleri

Geleneksel üretim yöntemlerinden talaşlı imalat ile üretilen dişlinin üretim sonrası diş yüzeylerine ait mikroskop görüntüleri Şekil 4.8, eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin üretim sonrası diş yüzeylerine ait mikroskop görüntüleri ise Şekil 4.9 ve 4.10'da yer almaktadır. Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, dişlilerin diş yüzeylerinde üretim tekniğine bağlı olarak net farklılıklar olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 4.8'de talaşlı imalat ile üretilen dişli yüzeyinde, şekil verme esnasında uygulanan kesme kuvvetlerinin oluşturduğu yüzey deformasyonları görülmektedir. Ayrıca üretim sonrası diş yüzeyinin tamamı üniform özelliklere sahiptir.



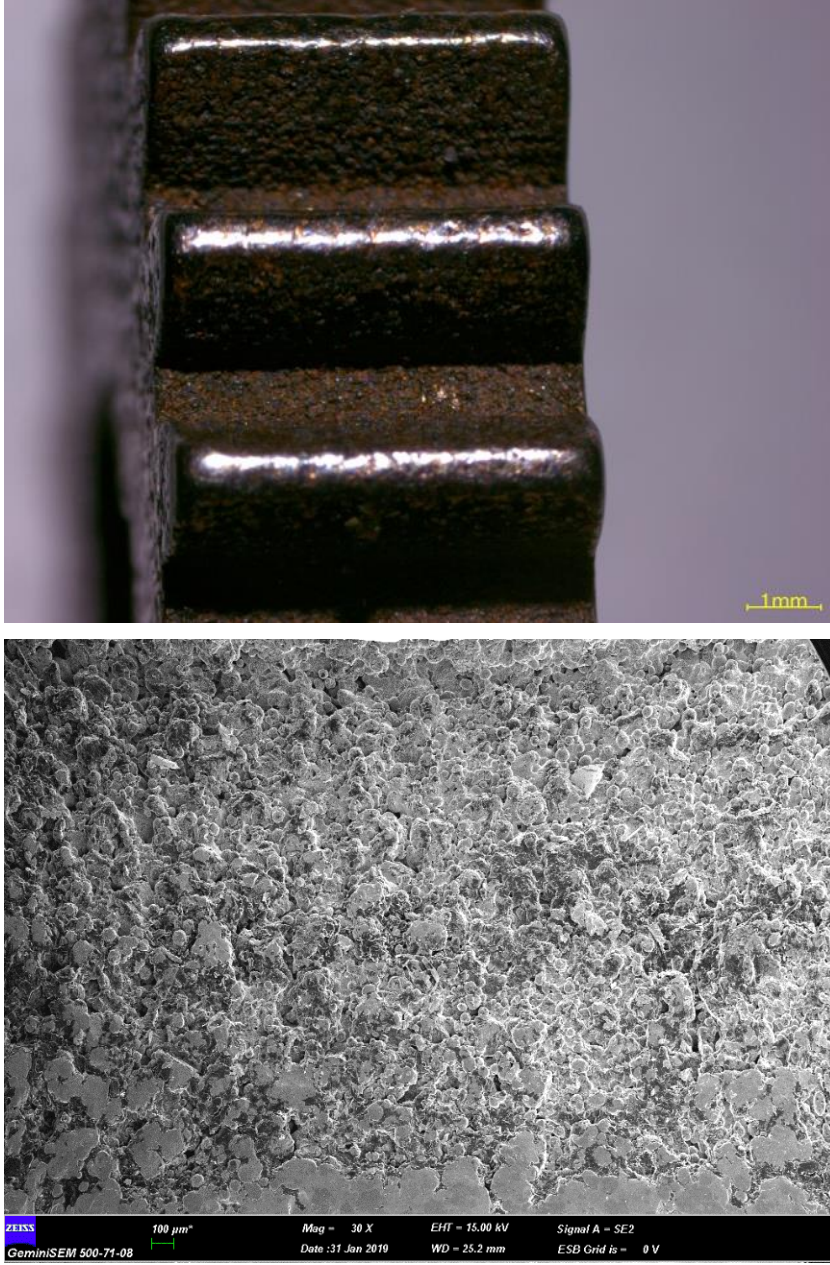
Şekil 4.8. Geleneksel yöntem ile üretilen 420 çelik dişliye ait diş yüzeyi

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 incelendiğinde dişlilerin malzemesinin aynı olmasına rağmen imalat tekniğinden ötürü dişli yüzeyi Şekil 4.8'den oldukça farklıdır. Şekil 4.9'da yer alan sinterlenmiş tozlardan oluşan dişli yüzeyi tüm yüzey boyunca üniform değildir. Taramalı elektron mikroskobundan elde edilen görüntülere göre yer yer yetersiz sinterlenme işleminden kaynaklı boşlukların olduğu görülmektedir. Şekil 4.9'da yer alan dişliler gibi eklemeli imalat ile imal edilen 420 çeliklere ilave yüzey parlatma işlemi uygulanması sonrasında diş yüzeyleri Şekil 4.10'daki gibi görülmektedir. Şekil 4.10'da optik ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri yer alan üretim sonrası yüzeyi parlatılmış dişlilerde, parlatma işlemi sonrası malzemeyi bir araya getiren toz taneciklerinin özellikle diş yüzeyi boyunca etkisi görülmektedir. Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10 her ne kadar aynı malzemelere ait dişlilerin mikroskop görüntüleri olsa da üretim metodlarına bağlı olarak yüzeylerinin birbirinden oldukça farklı olduğu göze çarpmaktadır.



Şekil 4.9. Eklemeli imalat ile üretilen 420 çelik dişliye ait diş yüzeyi

Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10’da mikroskop görüntüleri yer alan dişlilerin yoğunluk ve sertlik değerleri Çizelge 4.1’de yer almaktadır. Eklemeli imalat ile üretilen dişlilere, üretim sonrası bronz difüz edildiği için, içerisindeki kalay ve bakırın yoğunluğunun yüksek olması sebebiyle bu dişlilerin yoğunluğu daha yüksektir. İlave yüzey parlatma işlemi uygulanan eklemeli imalatla üretilen dişlilerde, sinterlenmeyen toz taneleri parlatma işlemi esnasında yüzeyden uzaklaştığından o dişlilerin yoğunluğunda bir miktar azalma göze çarpmaktadır. Sertlik ve yoğunluk değerleri incelendiğinde, farklı yöntemlerle üretilen çeliklerden elde edilen değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



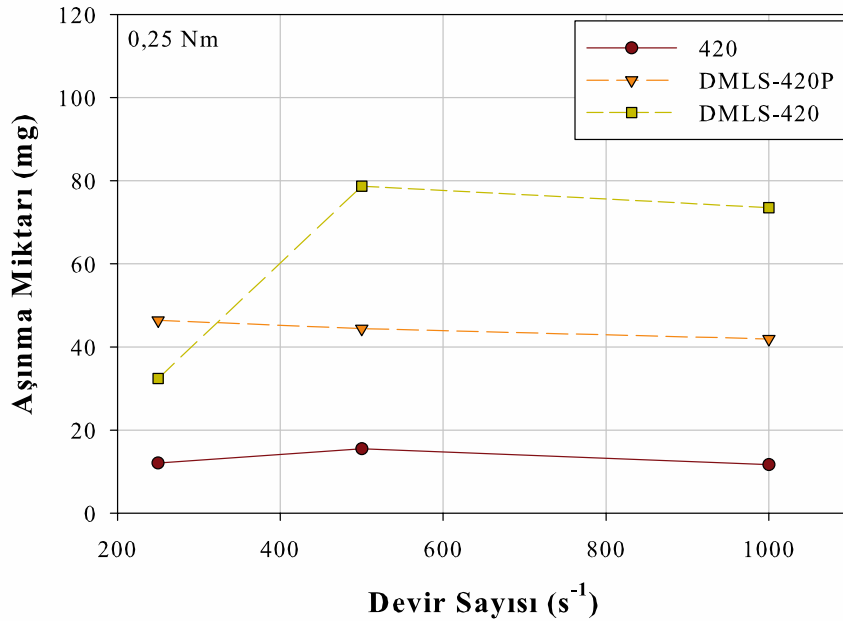
Şekil 4.10. Eklemeli imalat ile üretildikten sonra yüzeyi parlatılmış 420 çelik dişliye ait diş yüzeyi

Çizelge 4.1. 420 çelik dişlilerin özellikleri

Üretim Tekniği	Sertlik (HB10)	Yoğunluk (g/cm ³)
Geleneksel imalat (420)	128	7,52
Eklemeli imalat (DMLS-420)	115	8
Eklemeli imalat + yüzey parlatma (DMLS-420P)	132	7,85

4.2.2. Ağırlık değişimi ve yağ analizi sonuçları

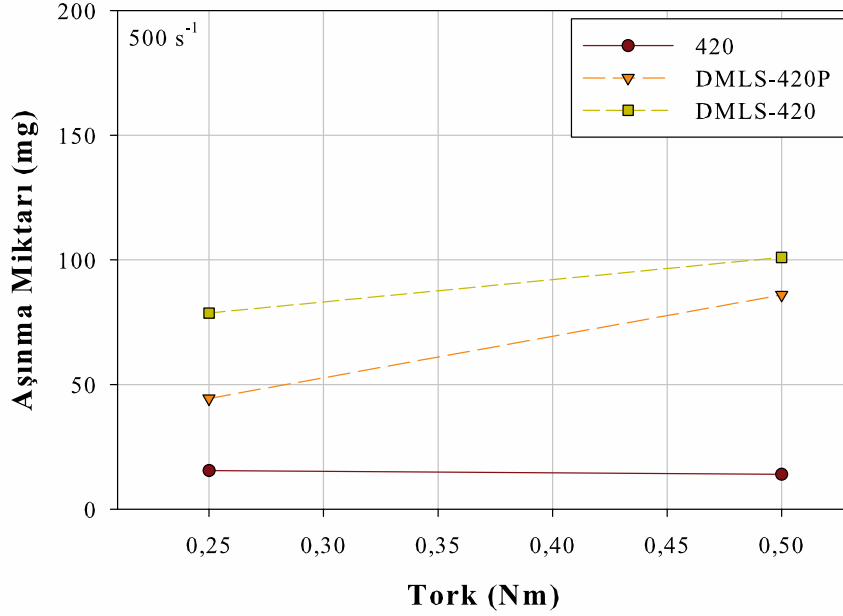
0,25 Nm tork değerinde 250, 500 ve 1000 s^{-1} devirde çalıştırılan çelik dişli çiftlerinin toplam ağırlık kaybına bağlı olarak elde edilen aşınma miktarı değerleri Şekil 4.11'de yer almaktadır. 500 ve 1000 s^{-1} devirde aşınma miktarı sırasıyla eklemeli imalat ile üretilen dişli, eklemeli imalat ile üretildikten sonra yüzeyi parlatılmış dişli ve geleneksel yöntemle ile üretilen dişli şeklinde sıralanmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinden doğrudan lazer sinterleme ile üretilen dişlilerde aşınma miktarının fazla olmasının nedeninin, düşük devirlerde yeterince sinterlenmemiş tozların yüzeyden ayrılması olduğu düşünülmektedir. 250 s^{-1} devirde, diğer devirlerde elde edilen sonuçlara benzer şekilde en düşük miktarda aşınan dişli çifti, talaşlı imalat ile üretilen dişlilerdir. Ancak bu devir sayısında, eklemeli imalat ile üretilen dişlilerden yüzeyi parlatılmış olan dişli çiftinin daha fazla aşındığı görülmektedir. Devir sayısının artışı, eklemeli imalat ile üretilen dişlilerden ilave işleme yüzeyi parlatılmış olan dişli çiftinin ve geleneksel yöntemle üretilen dişlilerin aşınma miktarını neredeyse hiç etkilememiştir. Ancak eklemeli imalat ile üretilen yüzeyi mat dişlilerin aşınma miktarı, 250 s^{-1} devirden 500 s^{-1} devir sayısına çıkarıldığında yaklaşık 2,5 kat artış göstermiştir. Bu üretim tekniğiyle üretilen dişlinin aşınma miktarı 500 s^{-1} devirden 1000 s^{-1} devir sayısına çıkarıldığında, aşınma miktarı tıpkı diğer üretim teknikleriyle üretilen dişlilerdeki gibi devir sayısının artışıyla etkilenmemiştir.



Şekil 4.11. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 420 çelik dişlilerin aşınma miktarı

500 s^{-1} devirde, 0,25 ve 0,50 Nm torkta çalıştırılan 420 çelik dişli çiftlerinin toplam ağırlık kaybına bağlı olarak elde edilen aşınma miktarlarının değişimi Şekil 4.12'de görülmektedir. Tüm tork değerlerinde, ağırlıkça aşınmanın en fazla görüldüğü dişli üretim tekniği, eklemeli imalattır. Bunu, eklemeli imalat ile üretildikten sonra yüzey parlatma işlemi uygulanan dişli ve talaşlı imalat ile üretilen dişli takip etmektedir. Tork değerindeki artış, talaşlı imalat ile üretilen çelik dişlinin aşınma miktarını neredeyse hiç

etkilememişken eklemeli imalat ile üretilen çelik dişlilerin aşınma miktarını artırmıştır. Tork değerindeki artıştan en fazla etkilenen çelik dişli grubu, eklemeli imalat ile üretilen yüzeyi parlatılmış dişlilerdir.

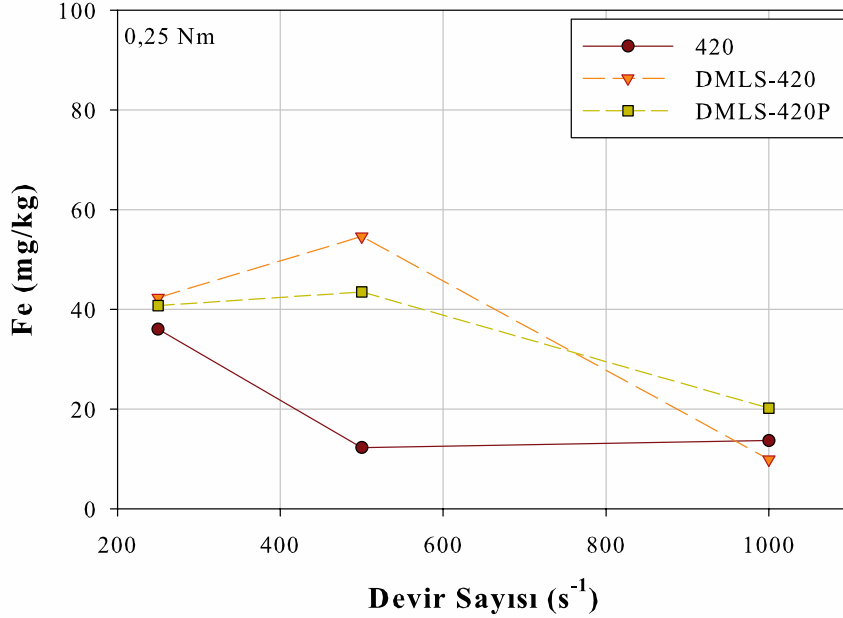


Şekil 4.12. 500 s⁻¹ devir sayısında torka bağlı olarak 420 çelik dişlilerin aşınma miktarı

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de aşınma miktarı yer alan dişlilerde, elementel olarak en fazla kayba uğrayan elementlerin tespiti yağ ile yapılmıştır. Üç farklı üretim tekniğiyle üretilen 420 çeliği dişlilerin 0,25 Nm torkta, 250, 500 ve 1000 s⁻¹ devirde içerisinde çalıştığı süre boyunca yağa transfer olan Fe miktarına ait değişim Şekil 4.13’te verilmiştir. 250 ve 1000 s⁻¹ devirde, yağda bulunan demir miktarı tüm üretim teknikleri için yakın sonuçlar vermiştir. Ancak 500 s⁻¹ devirde, yağda tespit edilen demir miktarına, üretim tekniğinin ciddi oranda etkisi olmuştur.

Tüm imalat teknikleri için, artan devir sayısının yağda tespit edilen demir miktarına etkisi yine Şekil 4.13’te görülmektedir. 250 s⁻¹ devirde tüm dişlilerin değerleri birbirine yakınken, 500 s⁻¹ devirde eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin değerleri artarken, talaşlı imalatla üretilen dişliye ait değer azalmıştır. Devir sayısının daha da artmasıyla tüm dişlilerden, dişlilerin içerisinde çalıştığı yağa transfer olan Fe miktarı birbirine yakındır. Artan devir sayısının etkisiyle eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin içerisinde çalıştığı yağdaki demir miktarı önce artış göstermiş, sonrasında azalmıştır. Ancak talaşlı imalat ile üretilen çelik dişlilerin içerisinde çalıştığı yağdaki yağ miktarı, devir sayısının artışıyla önce azalmış ardından neredeyse sabit kalmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, ağırlıkça değişim ile yağdan elde edilen element miktarlarının karşılaştırılması için yeterli değildir. Çünkü üretim teknikleri sebebiyle, karşılaştırılan dişliler içerisinde yer alan demir miktarı arasında farklılık vardır. Bir başka deyişle, farklı tekniklerle aynı malzemeden üretilen dişlilerin malzeme bileşimindeki elementler ve miktarları farklılık göstermektedir.

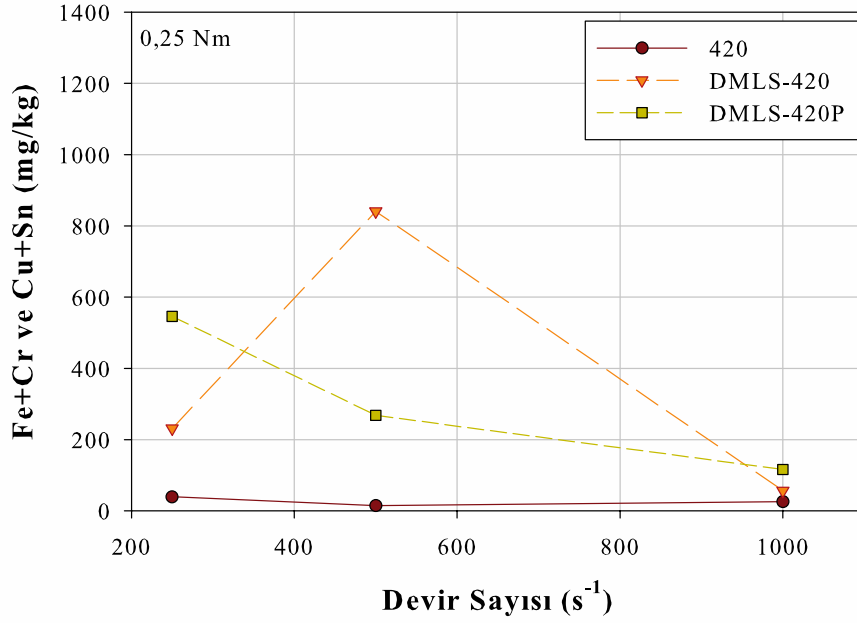
Eklemeli imalat ile üretim sonrasında kırılabilirliği önlemek için uygulanan bronz emdirme işlemi sebebiyle, DMLS ile üretilen dişliler yaklaşık olarak %60 paslanmaz çelik ve %40 bronzdan oluşmaktadır. Bu sebeple, üç üretim tekniği için de ortak olan ve ağırlıkça etkisi fazla olan yağdaki elementlerin toplamı sonucunda Şekil 4.14'teki sonuçlara ulaşılmıştır.



Şekil 4.13. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 420 çelik dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen Fe miktarı

Şekil 4.14'te 0,25 Nm torkta, devir sayısına bağlı olarak çelik dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen Fe+Cr & Cu +Sn miktarı yer almaktadır. Talaşlı imalat ile üretilen dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen demir ve krom miktarının toplamı Şekil 4.11'de yer alan ağırlıkça elde edilen aşınma miktarı değişimine benzer şekilde değişim göstermiştir. Eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda demir ve krom elementlerinin yanı sıra bakır ve kalay da incelenmiştir. Şekil 4.14'e göre 250 ve 1000 s⁻¹ devirde, araştırılan elementler daha yoğun olarak eklemeli imalatla üretildikten sonra yüzeyi parlatılmış dişlilerde elde edilirken, 500 s⁻¹ devirde ise eklemeli imalat ürünü dişlide daha yoğun gözlemlenmiştir.

Şekil 4.11 ve Şekil 4.14 karşılaştırılmak suretiyle, ağırlıkça değişim ve yağ analizinden elde edilen elementel sonuçlar da kıyaslanabilir. Her iki analiz sonucunda da en fazla aşınma miktarı, eklemeli imalat yöntemlerinden doğrudan metal lazer sinterleme ürünü dişlilerde elde edilmiştir. Şekil 4.14'teki verilere çelik bileşimindeki diğer elementlerin de eklenmesi halinde sonuçların, Şekil 4.11'de elde edilen sonuçlara yaklaşacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.14. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 420 çelik dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen Fe+Cr ve Cu +Sn miktarı

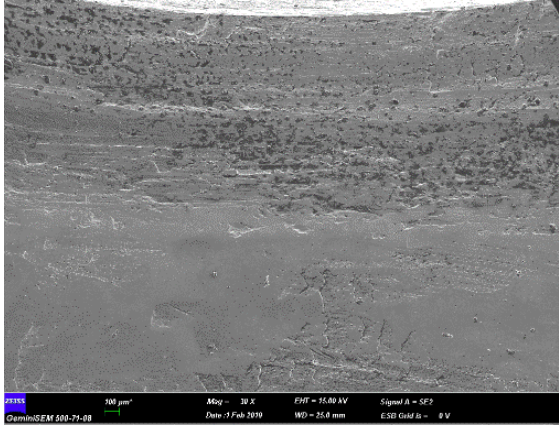
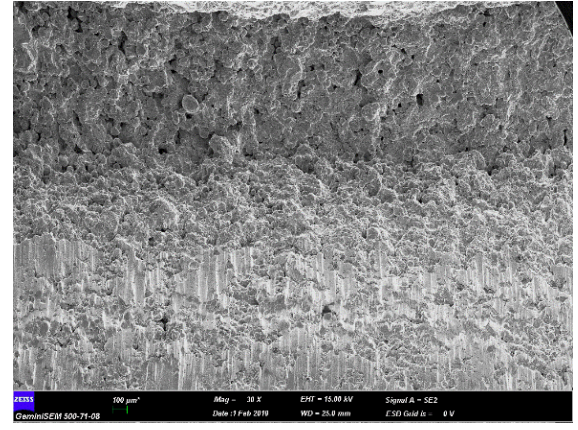
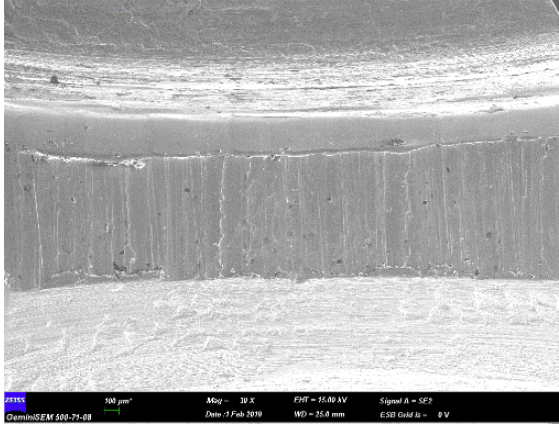
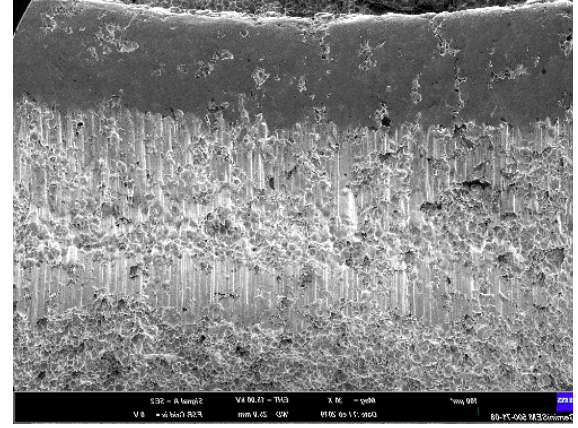
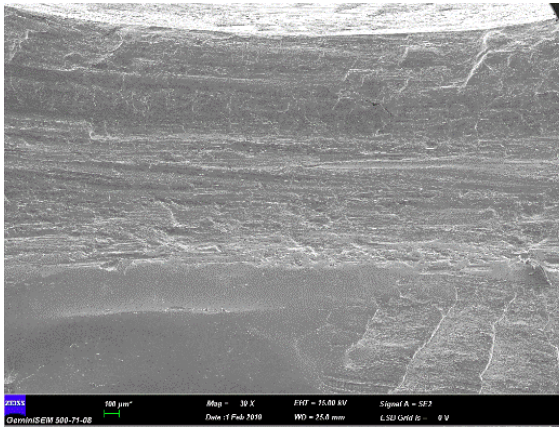
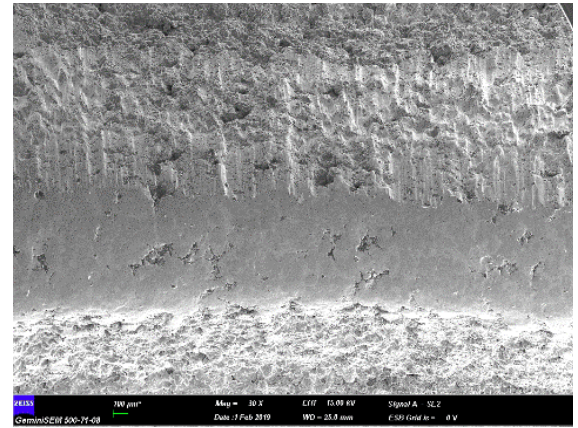
4.2.3. Meydana gelen hasarlar

420 çelik dişlilerin 0,25 Nm torkta çalışması sonrası yüzey görüntüleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş olup Şekil 4.15'te yer almaktadır. Şekil 4.15, üç farklı devir sayısında talaşlı imalat ile üretilen dişlilerin yüzeyleri ile eklemeli imalatla üretildikten sonra yüzeyi parlatılmış dişlilerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden oluşmaktadır.

Talaşlı imalat ile üretilen dişli 250 s⁻¹ devirde çalıştıktan sonra yüzeyde net bir şekilde pitting hasarlarının meydana geldiği görülmektedir. Özellikle diş üstü yüksekliğinin sol üst kısmında oluşan bu hasarın yoğunlaştığı görülmektedir. 500 s⁻¹ devirde çalıştıktan sonra hasar mekanizması değişiklik göstermiştir. Düşük devirde diş üstü yüksekliğinde oluşan pittingin azaldığı ancak diş dibinde temas eden dişin kuvveti yönünde çizilme (scuffing) ve pitting çukurları göze çarpmaktadır. Ayrıca, bu durum 250 s⁻¹ devir sayısında görülen pittingin başlangıç pittingi olduğunu göstermektedir. 1000 s⁻¹'de değişen diş yüzeyi profili, bu hasarın yüzeyde plastik şekil değişimi olduğunu ortaya koymaktadır.

Eklemeli imalat ile üretildikten sonra yüzeyi parlatılmış dişlilerin 250 s⁻¹ devirde çalışması sonrası yüzeyde çok az miktarda pitting ve temas eden dişlinin uyguladığı kuvvet yönünde çizilme (scuffing) hasarı göze çarpmaktadır. Devir sayısının artışıyla (500 s⁻¹) yüzeyde meydana gelen hasarlar dikkat çekicidir. Hem diş dibinde hem de diş üstü yüksekliğinde pittingler yer almaktadır. Ayrıca diş üstü yüksekliğinde yüzey basıncına maruz kalınan yük doğrultusunda yoğun plastik şekil değişimi mevcuttur. Diş dibinde ise oldukça genişlemiş pitting ile scuffing hasarı görülmektedir. Bu kısımdaki genişlemiş pittingler ve genişlemiş pittinglerde biriken yağ basıncının etkisiyle, diş

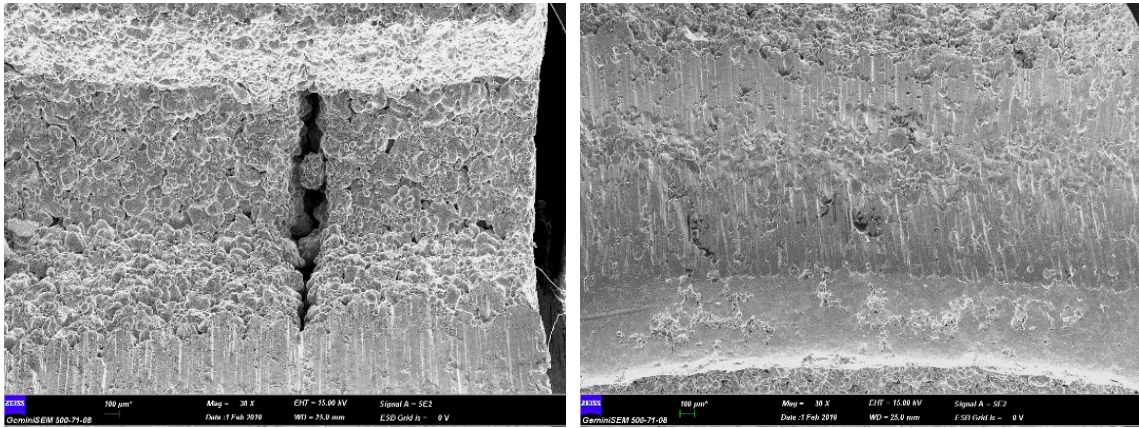
yüzeyinden yeterince sinterlenmemiş tozların büyük oranda uzaklaştığı söylenebilir. 1000 s^{-1} 'de elde edilen yüzeyde, hasarların meydana geldiği bölgeler, diğer devir sayılarından farklılık göstermiştir. Özellikle diş dibinde meydana gelen yoğun plastik şekil değişimi neredeyse sinterlenmiş yüzey görüntülerini yok etmiştir. Üretim tekniklerine bağlı olarak oluşan hasar mekanizmaları karşılaştırıldığında, düşük devirde her iki üretim tekniğinde de pitting hasarı yoğunluktadır. Benzer şekilde 500 s^{-1} 'de her iki üretim tekniğinde de yoğun olan hasar tipi scuffing olmakla birlikte eklemeli imalatla

Talaşlı imalat ile üretilen dişli (250 s^{-1})DMLS-P ile üretilen dişli (250 s^{-1})Talaşlı imalat ile üretilen dişli (500 s^{-1})DMLS-P ile üretilen dişli (500 s^{-1})Talaşlı imalat ile üretilen dişli (1000 s^{-1})DMLS-P ile üretilen dişli (1000 s^{-1})

Şekil 4.15. 420 çelik dişlilerin $0,25\text{ Nm}$ torkta çalışması sonrası yüzeyleri

üretileen yüzeyi parlatılmış dişli yüzeyinde scuffing daha yoğundur. Ayrıca eklemeli imalatla üretildikten sonra parlatılmış dişli yüzeyinde yoğun plastik şekil değişimi ve ilerleyen pitting göze çarpmaktadır. 1000 s^{-1} devirde ise her iki üretim tekniğiyle de üretileen dişlilerde yoğun plastik şekil değişimi söz konusudur. Bunun yanı sıra eklemeli imalatla üretildikten sonra yüzeyi parlatılan dişli yüzeyinde ilerleyen pitting hasarı da mevcuttur.

Artan torkun eklemeli imalat ile üretileen dişlilere etkisi Şekil 4.16 aracılığıyla görölmektedir. Torkun artmasıyla, yüzey işlemleri uygulanmamış dişlide bölgesel çatlak oluşumu göze çarpmaktadır. Hatta aşınan toz tanesinin bu çatlak içerisine sıkıştığı görölmektedir. Eklemeli imalat ile üretim sonrası parlatma işlemi uygulanan dişlilerde ise diş dibinde az miktarda plastik şekil değişimi, bölüm dairesi üzerinde az miktarda pitting ve scuffing ile birlikte diş üstü yüksekliğinde daha yoğun pitting görölmektedir.



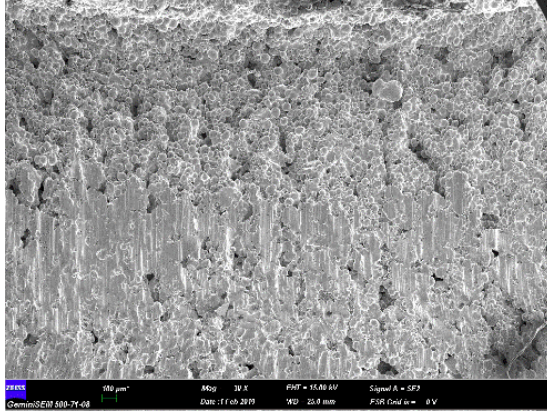
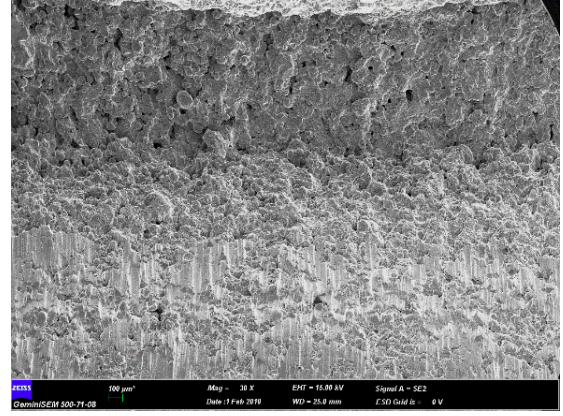
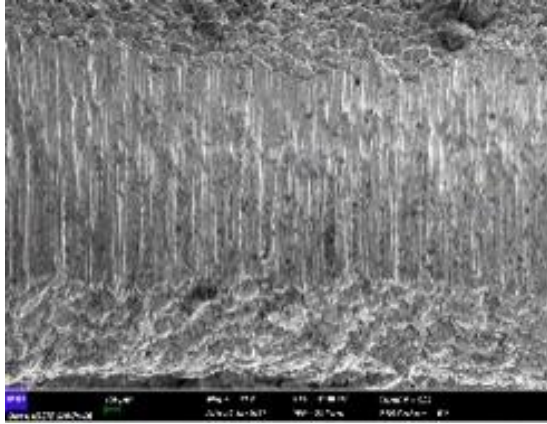
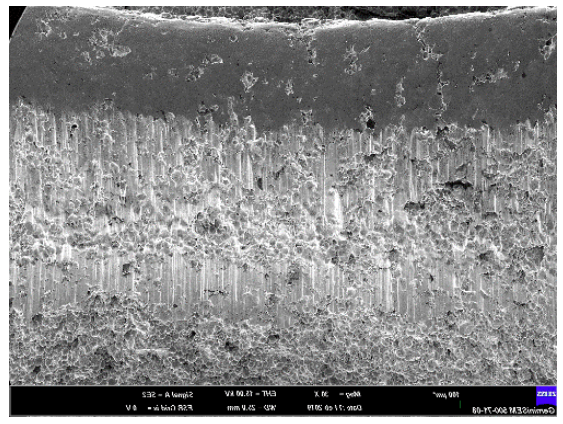
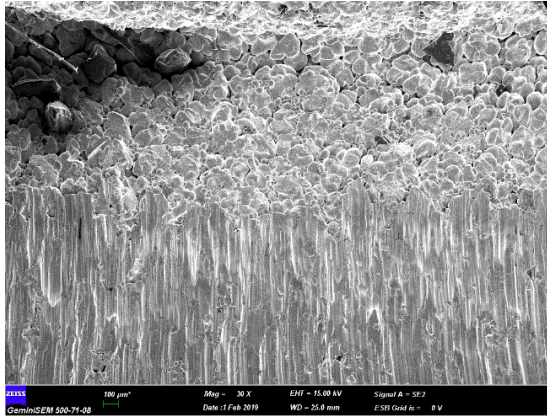
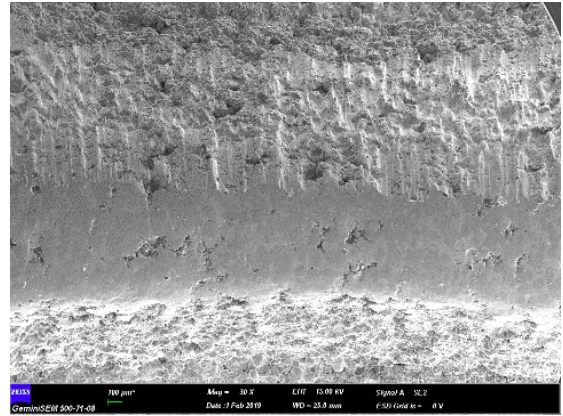
DMLS ile üretileen dişli (500 s^{-1})

DMLS-P ile üretileen dişli (500 s^{-1})

Şekil 4.16. 0,50 Nm torkta eklemeli imalat ile üretileen 420 çelik dişlilere uygulanan ilave parlatma işleminin dişli hasarlarına etkisi

0,25 Nm tork ile 250 , 500 ve 1000 s^{-1} devirde eklemeli imalat ile üretileen ve eklemeli imalatla üretildikten sonra yüzeyi parlatılan diş yüzeylerinde meydana gelen hasarlar Şekil 4.17’de yer almaktadır. Şekil 4.17, eklemeli imalat ile üretileen dişlilere üretim sonrası uygulanan yüzey işleminin, dişli hasar mekanizmalarına etkisini ortaya koymaktadır. 250 s^{-1} devirde eklemeli imalat ile üretildikten sonra ilave yüzey işlemi gören dişlilerde de görmeyen dişlilerde de pitting hasarları görölmektedir. İlave yüzey işlemi uygulanmamış eklemeli imalat ürünü dişlide, scuffing diş dibi boyunca yayılmakla birlikte diş üstü yüksekliğine doğru yönelmiştir. Ancak ilave işlemle yüzeyi parlatılmış eklemeli imalat ürünü dişlide scuffing yalnızca diş dibinde az miktarda görölmektedir. 500 s^{-1} devirde ilave yüzey işlemi uygulanmamış dişlide bölüm dairesi üzerinde yoğun scuffing hasarının yanı sıra az miktarda plastik şekil değişimi vardır. Ancak ilave işlemle yüzeyi parlatılmış dişlide, diş dibinde pitting, bölüm dairesinde oluşan pitting beraberinde genişlemiş bölgesel boşluklar, diş üstü yüksekliğinde ise yoğun plastik şekil değişimi göze çarpmaktadır. 1000 s^{-1} devirde ek yüzey işlemi uygulanmamış eklemeli imalat ürünü dişlide, diş üstü yüksekliğinde az miktarda pittingle beraber diş dibinde temas kuvveti doğrultusunda oluşmuş çizilme (scuffing) görölmektedir. Üretim sonrası ek işlemle yüzeyi parlatılmış dişlide ise, diş dibinde yoğun plastik şekil değişimi ve pitting görölmektedir. Sonuç olarak uygulanan yüzey işleminin hasar tiplerinde ve hasarın

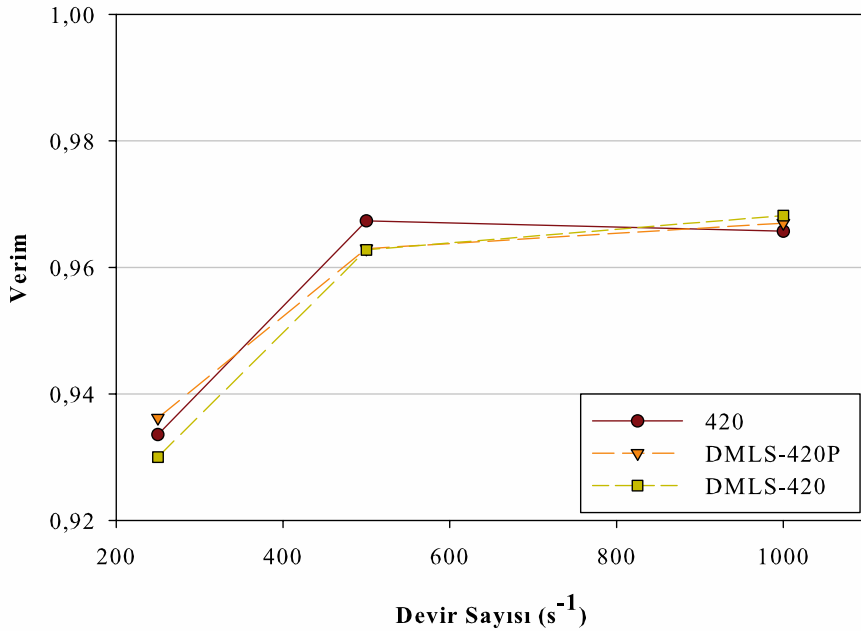
oluştığı bölgelere etkisi bulunmaktadır. Şekil 4.16 ve 4.17 kıyaslandığında artan tork ile uygulanan yüzey işleme arasındaki bağlantı görülmektedir. Özellikle yüksek torklarda üretim sonrası yüzey parlatma işlemi çeşitli hasarların önlenmesine katkı sağlamıştır. Nümerik analiz sonucunda elde edilen değerler yardımıyla hasarın gerçekleşmesinin muhtemel olduğu bölgelerde, uygulama sonucu hasarların yoğunlaştığı görülmektedir. Böylelikle nümerik analiz ve deneysel sonuçların birbirini desteklediği sonucu ortaya konmuştur.

DMLS ile üretilen dişli (250 s^{-1})DMLS-P ile üretilen dişli (250 s^{-1})DMLS ile üretilen dişli (500 s^{-1})DMLS-P ile üretilen dişli (500 s^{-1})DMLS ile üretilen dişli (1000 s^{-1})DMLS-P ile üretilen dişli (1000 s^{-1})

Şekil 4.17. Eklemeli imalat ile üretilen 420 çelik dişlilere uygulanan üretim sonrası yüzey işleminin dişli hasarlarına 0,25 Nm torkta etkisi

4.2.4. Verim analizi

0,25 Nm torkta 250, 500 ve 1000 s^{-1} devirde çalıştırılan 420 çelik dişli çiftlerinin verimlerinin değişimi Şekil 4.18’te yer almaktadır. Şekil 4.18’te açıkça görüldüğü üzere, tüm devirlerde elde edilen verim değerleri birbirine oldukça yakındır. Özellikle devir sayısının artışıyla, üç üretim tekniğiyle üretilen dişli çiftlerinden elde edilen verim değerlerinin birbirine daha fazla yaklaşmıştır. Ağırlık değişimi ve yağ analizi sonuçlarına göre eklemeli imalat teknolojilerinden doğrudan metal lazer sinterleme ile üretilen dişli genel olarak en fazla aşınan dişli çifti olsa da, bu durumun verim anlamında bir düşüşe sebebiyet vermediği Şekil 4.18 ile ortaya konmuştur. DMLS ile üretildikten sonra ilave yüzey işlemi uygulanmış dişliler her ne kadar ağırlıkça daha az aşınmış olsa da verimde, bu durum değişime neden olmamıştır. Ayrıca, hasar mekanizmalarındaki farklılıklar da çalışma parametrelerine bağlı olarak, verimde herhangi bir değişime sebebiyet vermemiştir.

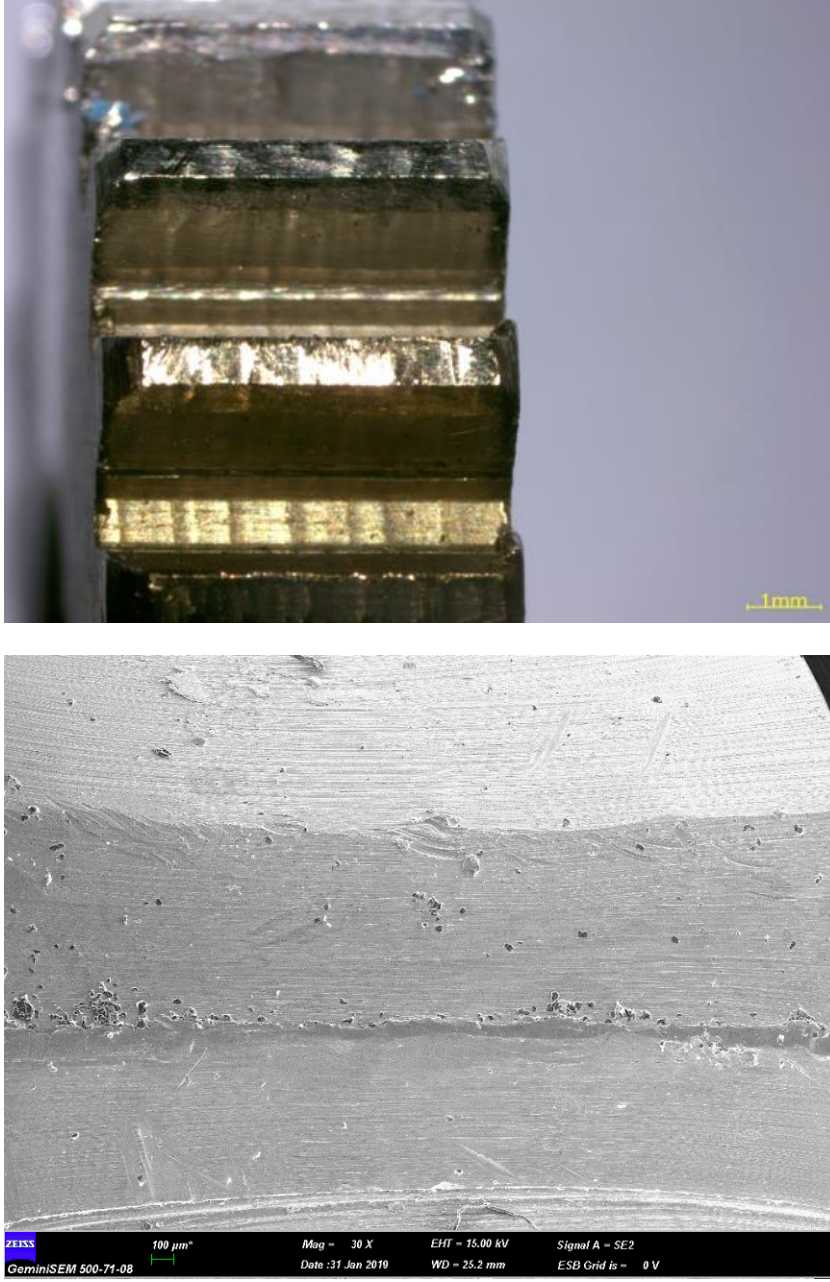


Şekil 4.18. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 420 çelik dişlilerin verimi

4.3. 316L Çelik Dişlilerden Elde Edilen Sonuçlar

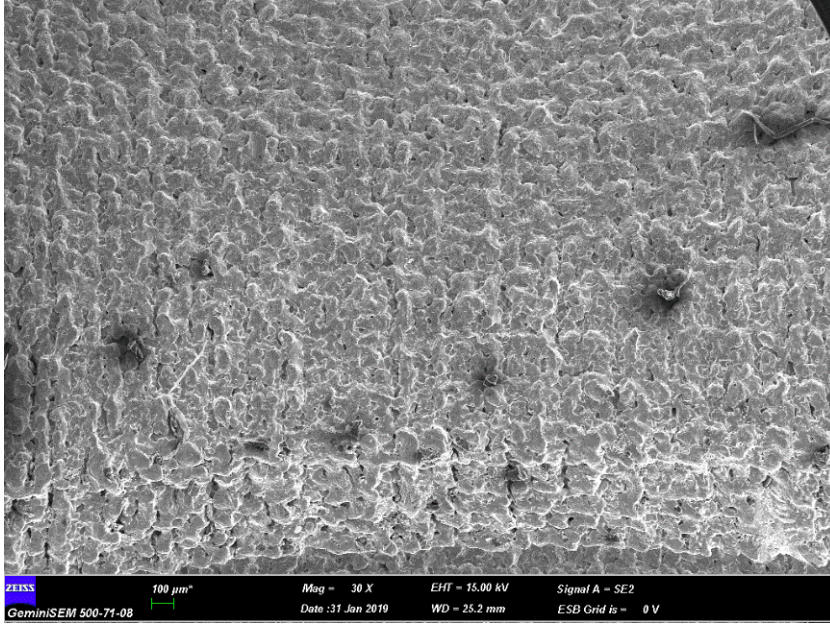
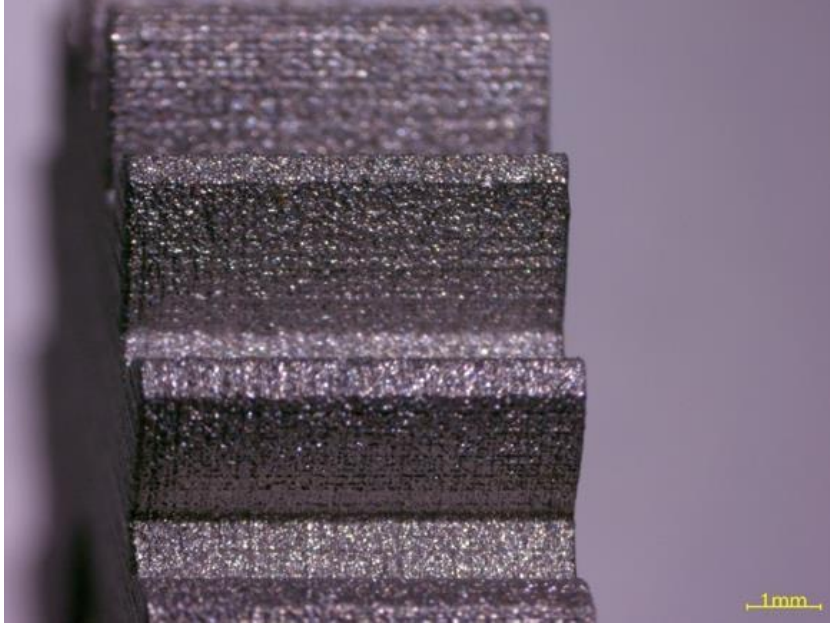
4.3.1. Dişlilerin mekanik özellikleri

Geleneksel üretim yöntemlerinden talaşlı imalat ile üretilen 316L çelik dişlinin üretim sonrası diş yüzeyine ait mikroskop görüntüleri Şekil 4.19, eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin üretim sonrası diş yüzeylerine ait mikroskop görüntüleri ise Şekil 4.20’de yer almaktadır. Şekil 4.19 ve 4.20 kıyaslandığında, talaşlı imalat ile üretilen dişli yüzeyi, eklemeli imalat ile üretilen dişli yüzeyinden oldukça farklıdır. Eklemeli imalat teknolojilerinden DMLS ile üretilen dişlinin yüzeyi incelendiğinde sinterlenmiş tozların oluşturduğu yüzey ve yeterince sinterlenmemiş tozlardan ötürü oluşan boşluklar göze çarpmaktadır.



Şekil 4.19. Geleneksel yöntem ile üretilen 316L çelik dişliye ait diş yüzeyi

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de taramalı elektron ve optik mikroskop görüntüleri yer alan dişlilerin yoğunluk ve sertlik verileri Çizelge 4.2’de yer almaktadır. Farklı yöntemlerle üretilen 316L çelik dişlilerde de 420 çeliğinden üretilen dişlilerden elde edilen sonuçlara benzer şekilde, birbirine yakın yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Sertlik ölçümü esnasında, talaşlı imalat ile üretilen 316L çelik dişlilerden HB10 skalasında ölçüm alınamamıştır. Diğerlerine nazaran daha sert olması sebebiyle ölçüm alınamadığından, HB30 skalasında ölçülen değerlerle Çizelge 4.2 oluşturulmuştur. Farklı sertlik skalalarında ölçüm yapılmasına rağmen bilinmektedir ki talaşlı imalat ile üretilen 316L çelik dişlinin sertliği, eklemeli imalatla üretilen dişliye nazaran oldukça yüksektir.



Şekil 4.20. Eklemeli imalat ile üretilen 316L çelik dişliye ait diş yüzeyi

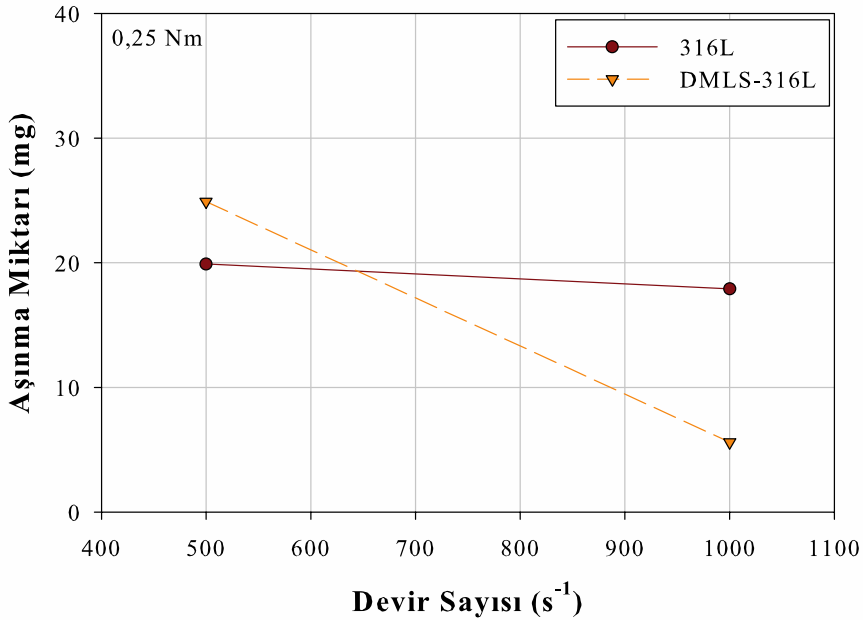
Çizelge 4.2. 316L çelik dişlilerin özellikleri

Üretim Tekniği	Sertlik	Yoğunluk (g/cm ³)
Geleneksel imalat (316L)	280,7 (HB30)*	7,85
Eklemeli imalat (DMLS-316L)	75 (HB10)	7,55

*HB10 sertliği yaklaşık 240 civarındadır.

4.3.2. Ağırlık değişimi ve yağ analizi sonuçları

0,25 Nm torkta, 500 ve 1000 s⁻¹ devirde çalıştırılan 316L çelik dişli çiftlerinin toplam ağırlık kaybına bağlı olarak elde edilen aşınma miktarı sonuçları Şekil 4.21’de yer almaktadır. Talaşlı imalat ile üretilen 316L çelik dişlilerden elde edilen aşınma miktarı, devir sayısının artmasıyla az miktarda azalma göstermiştir. Ancak eklemeli imalat ile üretilen 316L çelik dişli çiftlerinin aşınma miktarı, artan devir sayısı ile % 80 oranında azalmıştır. Bunun nedeni, artan devir sayısı ile yeterince sinterlenmeyen toz tanelerinin sıkışarak ana dişli gövdesi ile adheziv bağ oluşturması sonucu dişli yüzeyinden kopamaması olabilir. Ayrıca artan devir sayısı ile çevresel hızın artması sonucu, temas eden diş yüzeyleri arasında daha etkili yağ filmi tabakası oluştuğu bilinmektedir. Bununla birlikte artan yüzey pürüzlülüğü değeri de yağ filmi kalınlığını artırmaktadır (Cameron, 1949). Bu durum, düşük devirlerde dolayısıyla düşük çevresel hızlarda toz tanelerinin dişli yüzeyinden uzaklaşarak yağ ve aşınma miktarı analizlerinde daha yüksek oranda çıkmasını açıklamaktadır.

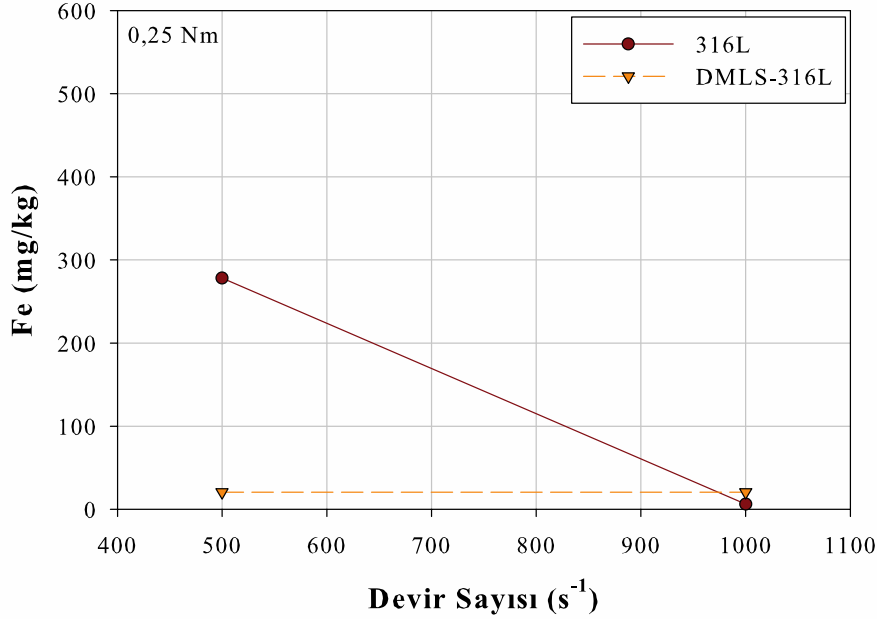


Şekil 4.21. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 316L çelik dişlilerin aşınma miktarı

Şekil 4.22’de, 0,25 Nm torkta, devir sayısına bağlı olarak 316L çelik dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen demir miktarının sonuçları görülmektedir. Aşınan dişli çiftinin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen demir miktarı, eklemeli imalat ile üretilen 316L çelik dişlide oldukça düşük seviyelerde olup artan devir sayısından etkilenmemiştir. Ancak talaşlı imalat ile üretilen dişlilerin çalıştığı dişli kutusundaki yağdan elde edilen sonuçlara göre, devir sayısının artmasıyla aşınan demir miktarı ciddi oranda azalma göstermiştir. Bu durum, Şekil 4.23 yardımıyla daha detaylı olarak analiz edilecektir.

Eklemeli imalat ile üretilen dişlilere uygulanan bronz emdirme işlemi sebebiyle, bu yöntemle üretilen dişliler içerisinde yaklaşık olarak %60 paslanmaz çelik ve %40 bronz malzeme bulunmaktadır. Şekil 4.21’de her iki üretim tekniğiyle de üretilen

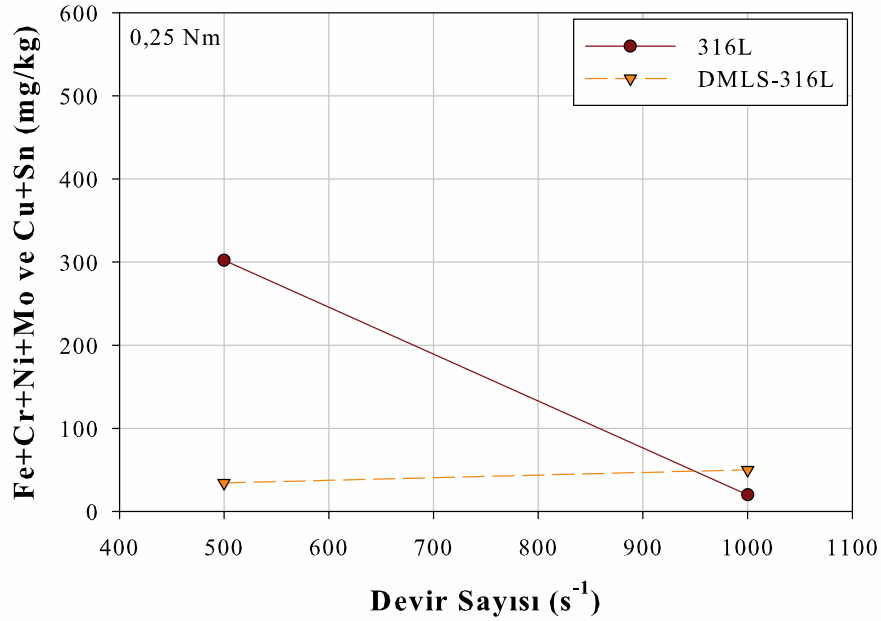
dişlilerin aşınmış olduğu tespit edilmesine rağmen Şekil 4.22’de 1000 s^{-1} devirde kullanılan yağda demir elementine neredeyse hiç rastlanmaması, bu şartlar altında talaşlı imalat ile üretilen dişli çiftlerinin aşınması sonucu en fazla kayba uğrayan elementin demir olmadığını ortaya koymuştur. Bu durum, artan devir sayısına bağlı olarak artan çevresel hızın, aşınmayı belirgin şekilde azaltan yağ filmi oluşturması ile açıklanabilir. Yağ filmi düşük devirlerde yeterli basınca ulaşamadığı için dişliler daha fazla aşınmıştır. Tüm bu nedenlerden ötürü her iki üretim tekniğiyle de üretilen dişlilerde bulunan elementlerin toplamı Şekil 4.23 aracılığıyla daha detaylı incelenmiştir.



Şekil 4.22. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 316L çelik dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen Fe miktarı

Şekil 4.23’te 0,25 Nm torkta, devir sayısına bağlı olarak 316L çelik dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen Fe+Cr +Ni +Mo & Cu +Sn miktarı yer almaktadır. Eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen demir, krom, nikel, molibden, bakır ve kalay miktarlarının toplamı devir sayısına bağlı olarak az miktarda artış göstermiştir. Şekil 4.22 ile karşılaştırıldığında, yağda tespit edilen demir miktarı artışı, incelenen tüm elementlerin artışından daha azdır. Böylelikle, devir sayısının artmasıyla demir dışındaki elementlerin daha yüksek miktarda aşındığı anlaşılmaktadır. Talaşlı imalat ile üretilen 316L dişlilere bronz emdirme işlemi uygulanmadığı için, bu dişlilerin çalıştığı yağda yalnızca malzemenin bileşiminde yer alan demir, krom, nikel ve molibden elementleri incelenmiştir. Artan devir sayısıyla yağda tespit edilen bu elementlerin toplamı ciddi oranda azalmıştır. Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 karşılaştırıldığında sonuçların birbirine yakınlığı, her iki üretim tekniğinde de aşınma sonucu en fazla kayba uğrayan elementin demir olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 4.21 ve 4.22 karşılaştırıldığında ağırlıkça değişime göre aşınma sonucu en fazla kayba uğrayan element Fe iken, Şekil 4.22 ve 4.23 incelendiğinde sonuçlar tutarsızlık göstermektedir. Ağırlıkça değişim sonuçları (Şekil 4.21) ile yağ analizinden elde edilen sonuçlar (Şekil 4.23) kıyaslandığında elde edilen sonuçlar arasındaki bu farklılık göze çarpmaktadır. Dişlilerin aşınma testleri öncesi ve sonrası ağırlık tartım işlemi üç kez

tekrarlanmış olup bu farklılığın yatakların aşınarak yağa sızmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

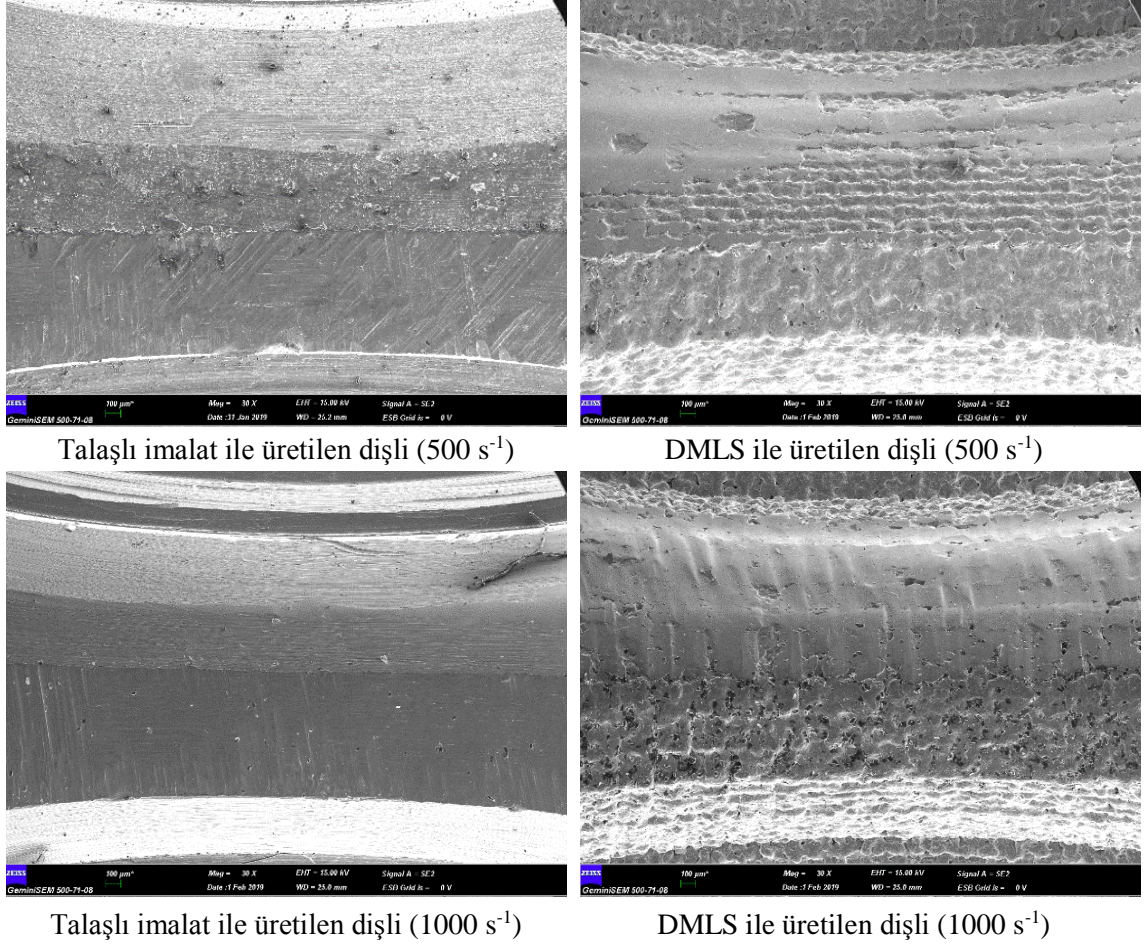


Şekil 4.23. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 316L çelik dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen Fe+Cr ve Cu +Sn miktarı

4.3.3. Meydana gelen hasarlar

316L çelik dişlilerin 0,25 Nm torkta 500 ve 1000 s⁻¹ devirde çalışması sonrası yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.24'te yer almaktadır. Talaşlı imalat ile üretilen 316L çelik dişlilerde 500 s⁻¹ devirde özellikle diş üstü yüksekliğinde pitting hasarı görülmüştür. 1000 s⁻¹ devirde çalışan dişlilerde yer almayan pitting, 500 s⁻¹ devirde pitting hasarının türünün başlangıç pittingi olduğunu ortaya koymaktadır. Devir sayısının artışıyla dişli diş dibinde, çalıştığı eş dişlinin uyguladığı yüzey basıncı yönünde scuffing (çizilme) hasarı oluşmuştur.

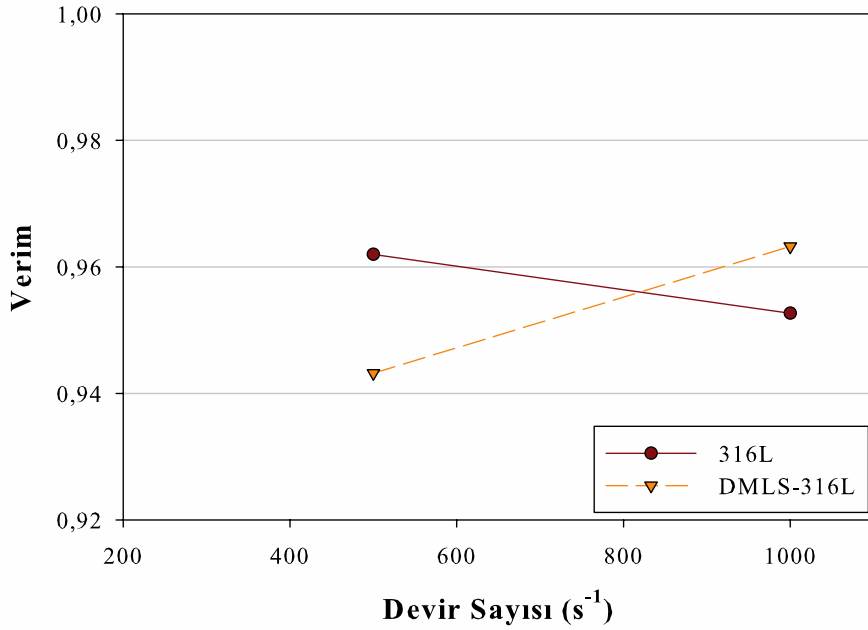
Eklemeli imalat ile üretilen 316L çelik dişlilerin aynı şartlar altında çalışması sonucu incelenen yüzeylerinde meydana gelen hasar tipleri, Şekil 4.24'te de açıkça görüldüğü üzere, talaşlı imalat ile üretilen dişlilerdeki hasarlardan oldukça farklıdır. Bir başka deyişle üretim tekniklerine bağlı olarak diş yüzeylerinde farklı hasar tipleri tespit edilmiştir. Eklemeli imalatla üretilen dişli 500 s⁻¹ devirde çalıştığında, diş üstü yüksekliği boyunca yoğun plastik şekil değişimi ve yüzeyden bölgesel kopmuş parçaların bıraktığı çukurlar görülmektedir. Artan devir sayısı ile, diş üstü yüksekliğindeki plastik şekil değişimi daha geniş bir alana yayılmakla birlikte diş dibinden bölüm dairesine doğru yoğun bir şekilde pitting hasarı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, ilerleyen pitting hasarları sonucunda pitting içerisine biriken yağ basıncının etkisiyle hasarın ilerlemesi olabilir. Ayrıca karşılaşılan hasar tipleri, nümerik analiz sonucunda beklendiği gibi yorulma hasarları şeklinde yoğunlaşmış olup beklenen diş yüzey bölgelerinde oluşmuştur. Nümerik ve deneysel sonuçlar birbirini destekler niteliktedir.



Şekil 4.24. 316L çelik dişlilerin 0,25 Nm torkta çalışması sonrası yüzeyleri

4.3.4. Verim analizi

0,25 Nm torkta 500 ve 1000 s^{-1} devirde çalıştırılan 316L çelik dişli çiftlerinin verimlerinin değişimi Şekil 4.25'te yer almaktadır. Devir sayısının artmasıyla eklemeli imalatla üretilen dişlilerin verimi artarken, talaşlı imalat ile üretilen dişlilerin verimi azalmıştır. 500 s^{-1} devirde, eklemeli imalatla üretilen dişli çiftinin verimi diğer dişli çiftine nazaran yaklaşık %2 daha düşük olmasına rağmen, 1000 s^{-1} devirde yaklaşık %1 daha yüksektir. Aşınma miktarı ve verim arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılabilmesi, Şekil 4.21 4.24 ve Şekil 4.25'in karşılaştırılması ile mümkündür. Talaşlı imalat ile üretilen 316L çelik dişlilerde, artan devir sayısı ile aşınma miktarı az miktarda azalırken beklenenin aksine verim yaklaşık %1 azalmaktadır. Bunun sebebi, ağırlıkça aşınma azalmasına rağmen Şekil 4.24'te diş yüzeyinde tespit edilen hasarlar olabilir. Eklemeli imalat ile üretilen 316L çelik dişlilerde ise artan devir sayısı ile aşınma miktarı ciddi oranda azalırken, verim %2'den fazla artış göstermiştir. Eklemeli imalat teknolojilerinden doğrudan metal lazer sinterleme ile üretimde, özellikle diş profilindeki düzgünlük sebebiyle güç aktarımı, gelişen hasar, aşınma vb. olumsuzluklara rağmen artış göstermiştir.



Şekil 4.25. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak 316L çelik dişlilerin verimi

4.4. Ti6Al4V Dişlilerden Elde Edilen Sonuçlar

4.4.1. Dişlilerin mekanik özellikleri

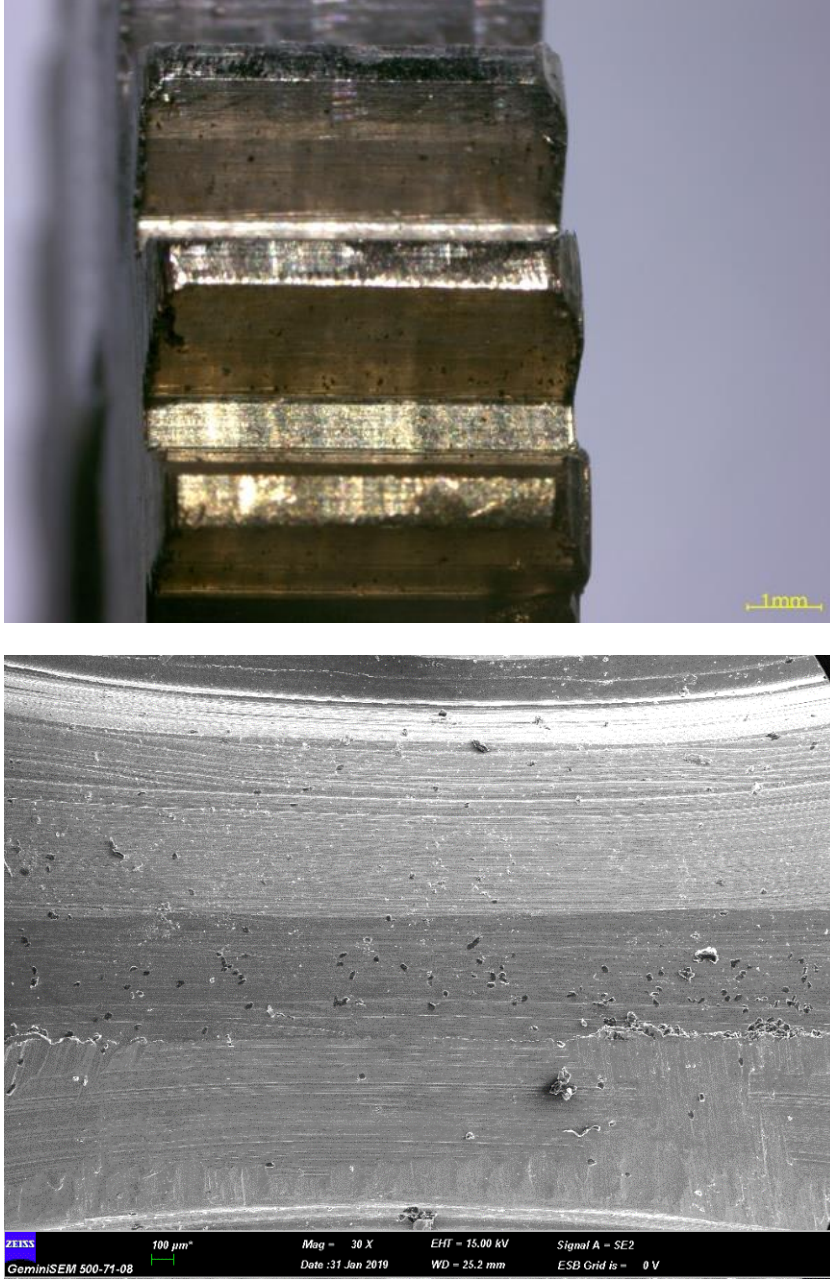
Geleneksel yöntem ile üretilen Ti6Al4V dişliye ait optik ve taramalı elektron mikroskop görüntüsü Şekil 4.26'da, eklemeli imalat teknolojilerinden doğrudan metal lazer sinterleme ile üretilen Ti6Al4V dişliye ait optik ve taramalı elektron mikroskop görüntüleri ise Şekil 4.27'de yer almaktadır.

Şekil 4.26 ve 4.27 karşılaştırıldığında farklı yöntemlerle üretilen dişlilerin yüzeylerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Eklemeli imalat teknolojilerinden DMLS ile üretilen dişlinin yüzeyi incelendiğinde sinterlenmiş tozların oluşturduğu yüzey ve yeterince sinterlenmemiş tozlardan ötürü oluşan boşluklar göze çarpmaktadır.

Çizelge 4.3'te Şekil 4.26 ve 4.27'de mikroskop görüntüleri yer alan dişlilere ait yoğunluk ve sertlik ölçüm sonuçları yer almaktadır. Sertlik ve yoğunluk değerleri incelendiğinde, farklı tekniklerle üretilen Ti6Al4V dişlilerin sertlik ve yoğunluk değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.3. Ti6Al4V dişlilerin özellikleri

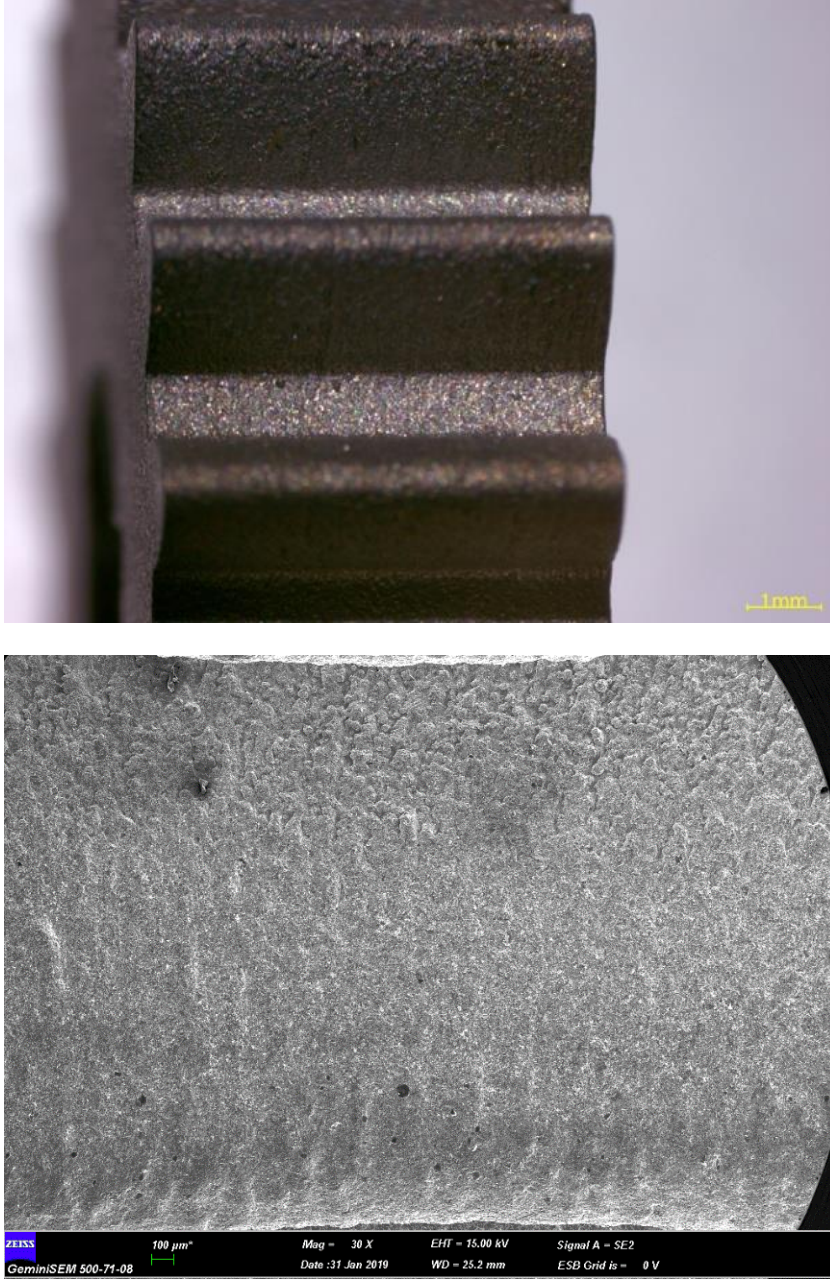
Üretim Tekniği	Sertlik (HB10)	Yoğunluk (g/cm ³)
Geleneksel imalat (Ti6Al4V)	90,6	4,37
Eklemeli imalat (DMLS- Ti6Al4V)	92,2	4,29



Şekil 4.26. Geleneksel yöntem ile üretilen Ti6Al4V dişliye ait dış yüzeyi

4.4.2. Ağırlık değişimi ve yağ analizi sonuçları

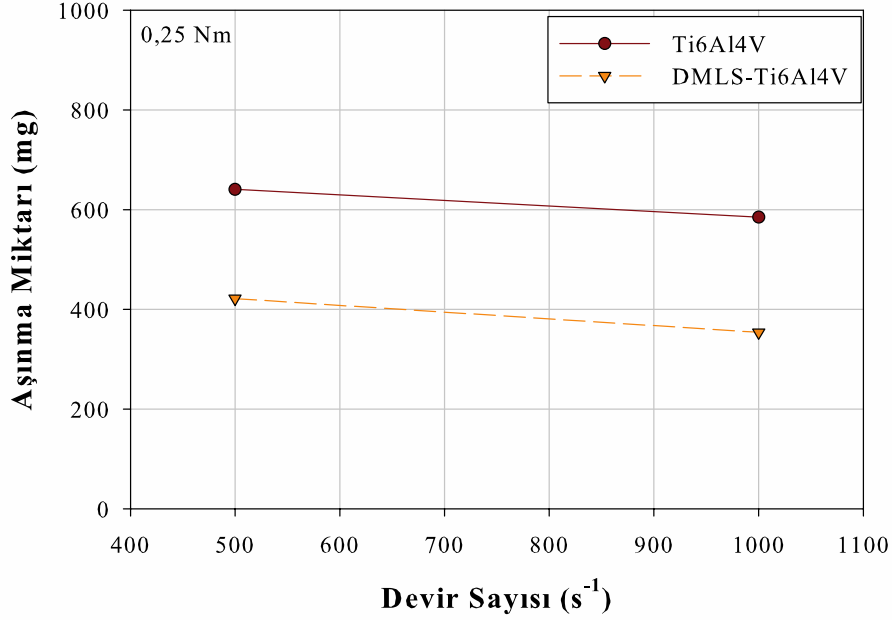
0,25 Nm torkta, 500 ve 1000 s⁻¹ devirde ağırlıkça aşınma miktarının değişimi Şekil 4.28’de yer almaktadır. Eklemeli ve geleneksel imalatla üretim yöntemlerinin aşınma miktarına etkisi kıyaslandığında, geleneksel talaşlı imalatla üretilen dişlilerin daha fazla aşındığı göze çarpmaktadır. Her iki üretim tekniğiyle üretilen dişlilerde de aşınma miktarı, devir sayısının artışına bağlı olarak az miktarda azalma göstermiştir. 0,25 Nm torkta 500 ve 1000 s⁻¹ devirde Ti6Al4V dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen titanyum miktarı Şekil 4.29’da yer almaktadır. Şekil 4.28 ile karşılaştırmalı olarak incelendiğinde



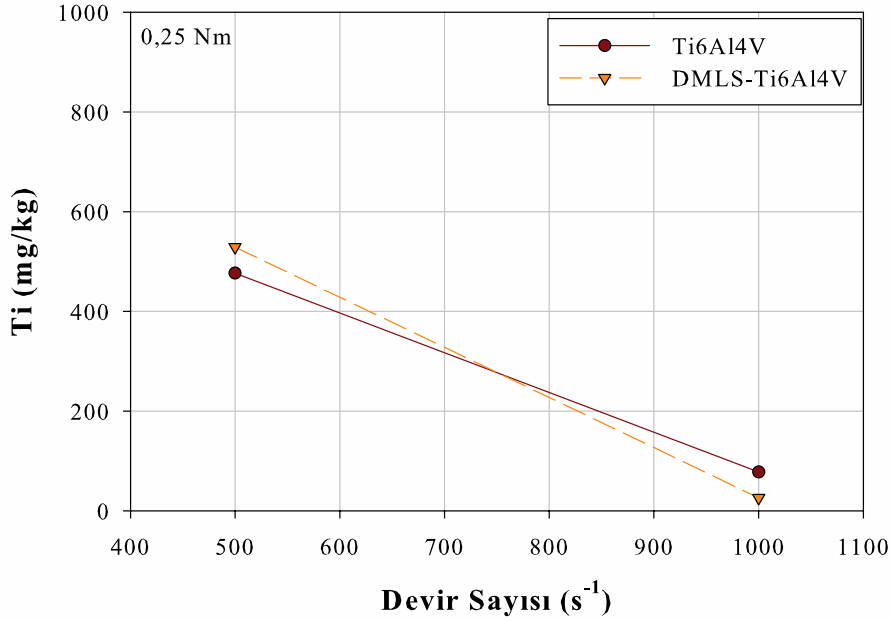
Şekil 4.27. Eklemeli imalat ile üretilen Ti6Al4V dişliye ait dış yüzeyi

500 s⁻¹ devirde aşınma sonucu kayba uğrayan elementin büyük bir kısmını titanyumun oluşturduğu açıkça görülmektedir. Ancak devir arttığında (1000 s⁻¹), toplam ağırlıkça aşınma miktarındaki azalmaya nazaran yağda tespit edilen titanyum elementi ciddi olarak azalma göstermiştir. Böylelikle, artan devir sayısı ile titanyum aşınmasının azaldığı tespit edilmiş olup detaylı elementel yağ analiz sonuçları Şekil 4.30'da yer almaktadır. Şekil 4.30'da görüldüğü üzere titanyum alaşımından üretilen dişlinin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen titanyum dışındaki alaşım elementlerinin de yağdaki miktarı oldukça düşüktür. Ağırlıkça aşınma miktarı her iki üretim tekniğiyle üretilen dişlilerde de oldukça düşük olmasına rağmen, dişli çiftlerinin içerisinde çalıştığı yağda devir sayısına bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilmiştir. Ağırlıkça değişim miktarı hassas terazi ile en az üç kez ölçüldüğünden titanyum, vanadyum ve alüminyum

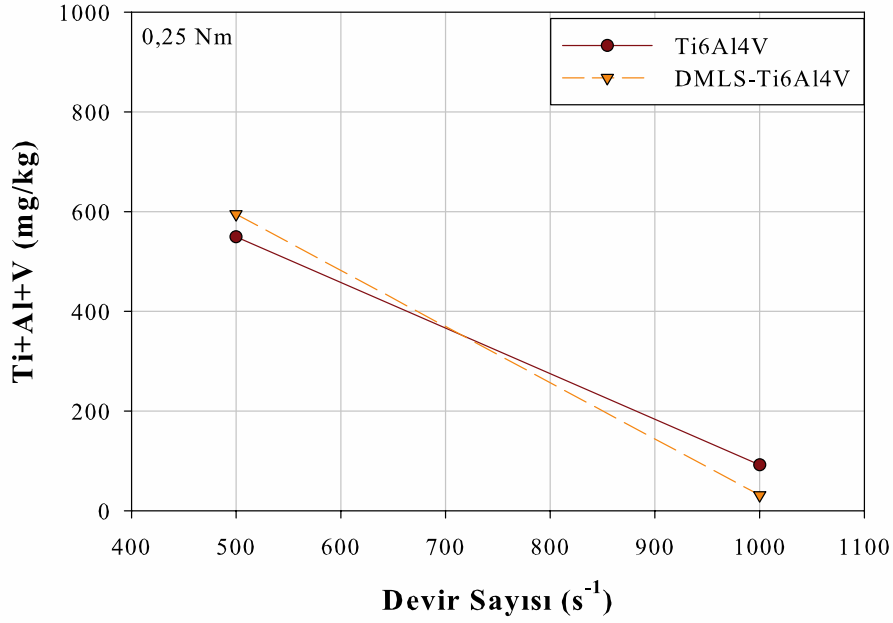
elementlerinin yağ spektrometresi analizlerinde (özellikle 1000 s^{-1}) hata olduğu düşünülmektedir. Bu hata, yağın dişli kutusundan uygun şekilde toplanmamasından kaynaklanmış olabilir. Ancak yağ analizi spektrometresinde özellikle vanadyum ve alüminyum tespitinde hata yapılmış olması daha olasıdır. Çünkü, bu sonuç dışında elde edilen diğer tüm veriler birbirini desteklemektedir.



Şekil 4.28. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak Ti6Al4V dişlilerin aşınma miktarı



Şekil 4.29. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak Ti6Al4V dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen titanyum miktarı



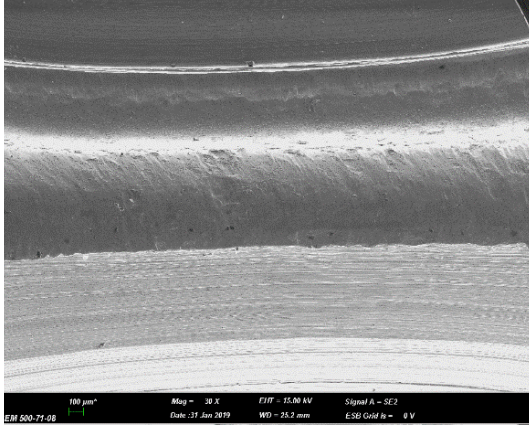
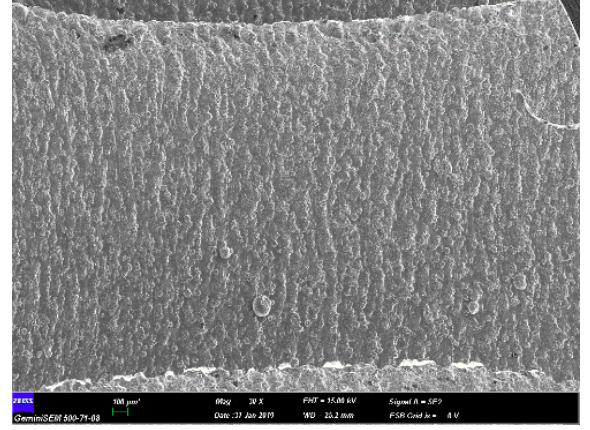
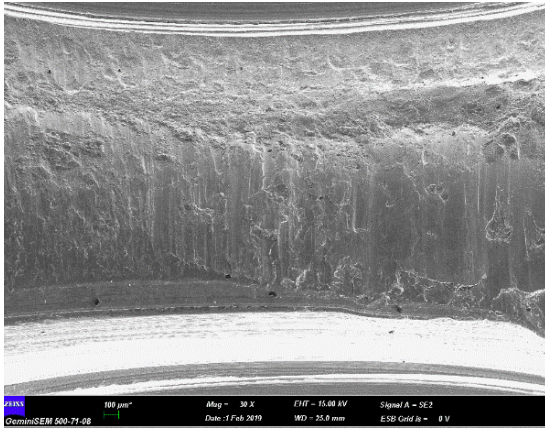
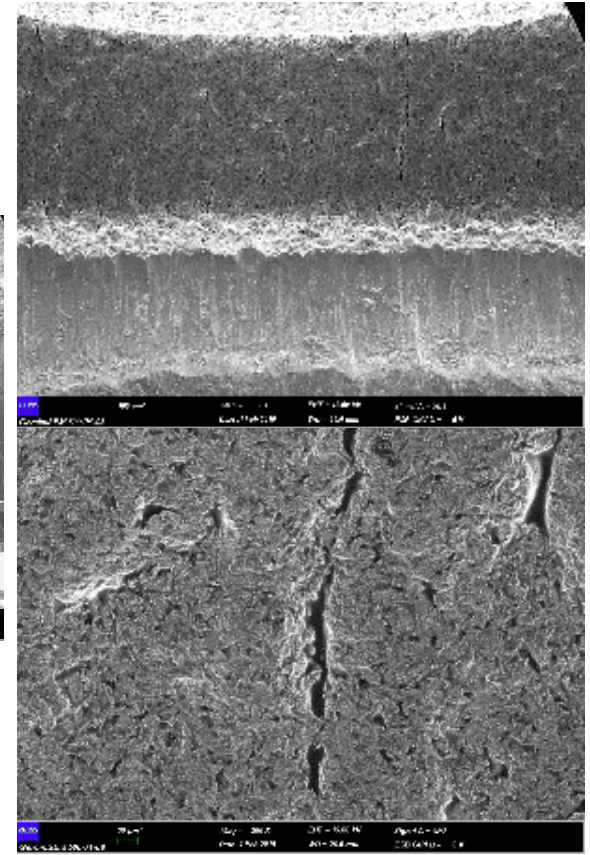
Şekil 4.30. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak Ti6Al4V dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen titanyum, alüminyum ve vanadyum miktarının toplamı

4.4.3. Meydana gelen hasarlar

Ti6Al4V dişlilerin 0,25 Nm torkta 500 ve 1000 s⁻¹ devirde çalışması sonrası yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.31’de yer almaktadır. Talaşlı imalat ile üretilen Ti6Al4V dişlilerde 500 s⁻¹ devirde özellikle diş üstü yüksekliğinde az miktarda plastik şekil değişimi gözlemlenmiştir. Devir sayısının artışıyla artan yüksek yüzey basıncının etkisiyle plastik şekil değişim dişin tüm yüzeyine yayılmıştır. Eklemeli imalat ile üretilen Ti6Al4V dişlilerde, 500 s⁻¹ devirde hasara rastlanmamıştır.

Devir sayısının artışıyla diş dibinde plastik deformasyon oluşumu gözlemlenmiştir. Bölüm dairesinin üst kısmında plastik deformasyon ya da yorulma hasarlarına rastlanmamıştır. Ancak bu çalışma şartlarında eklemeli imalat ile üretilen dişlinin diş üstü yüksekliğinde bölgesel çatlaklar oluşmuş olup Şekil 4.32’de görülmektedir. Birçok noktada meydana gelen ayrılmalar kırılma hasarlarının meydana gelebileceğinin göstergesidir. Bu dişli çiftlerinin çalışmaya devam etmesi sonucu dişli kırılması ile karşılaşılabilir.

Nümerik analiz sonucunda elde edilen değerler yardımıyla hasarın gerçekleşmesinin muhtemel olduğu bölgelerde, uygulama sonucu hasarların yoğunlaştığı görülmektedir. Meydana gelen yüksek yüzey basıncı, sinterlenmiş tozlardan oluşan dişlilerde çatlak gelişimine sebebiyet vermiştir. Nümerik analizden elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar arasında herhangi bir farklılığa rastlanmamıştır.

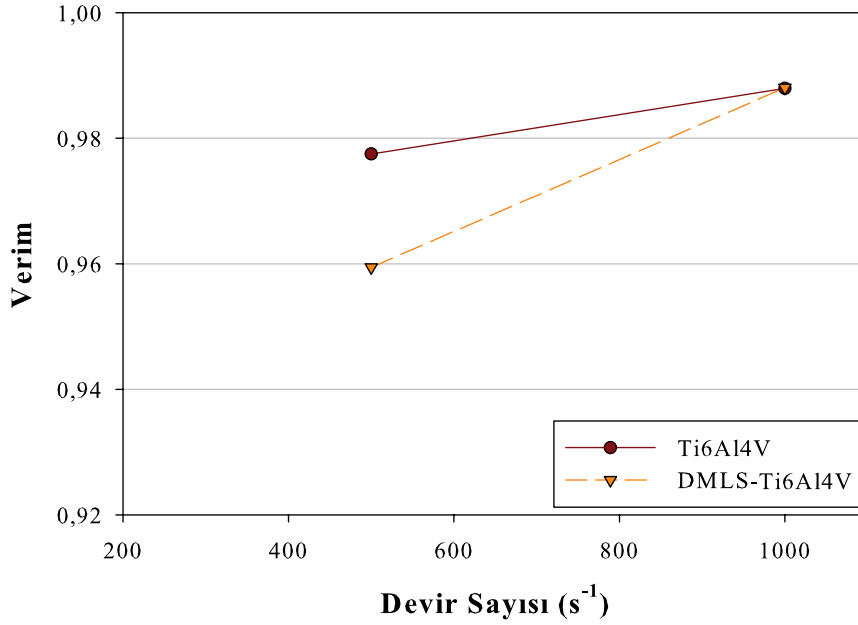
Talaşlı imalat ile üretilen dişli (500 s^{-1})DMLS ile üretilen dişli (500 s^{-1})Talaşlı imalat ile üretilen dişli (1000 s^{-1})DMLS ile üretilen dişli (1000 s^{-1})

Şekil 4.31. Ti6Al4V dişlilerin 0,25 Nm torkta çalışması sonrası yüzeyleri

4.4.4. Verim analizi sonuçları

0,25 Nm torkta, 500 ve 1000 s^{-1} devirde Ti6Al4V dişlilerin verim değişimi Şekil 4.32’de yer almaktadır. 500 s^{-1} devirde geleneksel yöntemle üretilen dişlilerin verimi eklemeli imalat tekniğiyle üretilen dişlilere nazaran yaklaşık %2 daha fazlayken, artan devir sayısı ile hem eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin hem de geleneksel yöntemle üretilen dişlilerin verimi artış göstermiştir. Ayrıca, 1000 s^{-1} devirde her iki teknikte üretilen dişlilerden elde edilen verim aynıdır. Ağırlıkça aşınma miktarları göz önünde

bulundurulduğunda her ne kadar eklemeli imalat ile üretilen dişli daha fazla aşınmış olsa da elde edilen verim değeri aynı çıkmıştır. Bu durum, eklemeli imalat ile imal edilen diş profilinin daha düzgün olması sebebiyle, kaymanın ve kavramanın daha düzgün olması ile açıklanabilir.



Şekil 4.32. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak Ti6Al4V dişlilerin verimi

4.5. AlSi10Mg Dişlilerden Elde Edilen Sonuçlar

4.5.1. Dişlilerin mekanik özellikleri

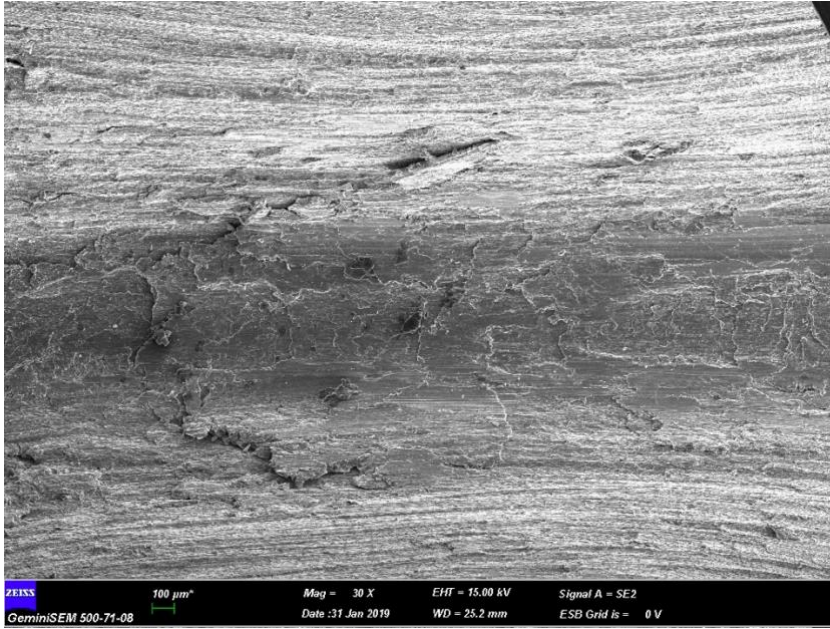
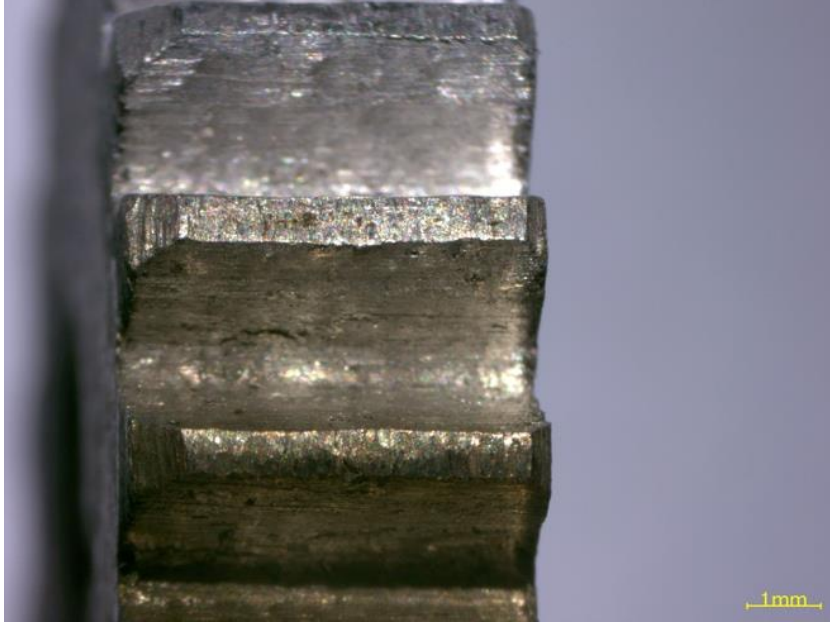
Geleneksel üretim yöntemlerinden talaşlı imalat ile üretilen AlSi10Mg dişli yüzeyine ait mikroskop görüntüleri Şekil 4.33'te, eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg dişli yüzeyine ait mikroskop görüntüleri ise Şekil 4.34'te yer almaktadır. Talaşlı imalat ile üretilen dişli yüzeyinde diş açma kuvveti yönündeki kuvvet izleri göze çarpmaktadır. Şekil 4.34'te ise özellikle diş yüzeyindeki toz boşlukları optik mikroskop görüntülerinden dahi kolaylıkla görülebilmektedir.

Şekil 4.33 ve 4.34'te mikroskop görüntüleri yer alan AlSi10Mg dişliler ile ısıtılma işlemi uygulanan AlSi10Mg-T6 dişlilerin sertlik ve yoğunluk verileri Çizelge 4.4'te görülmektedir.

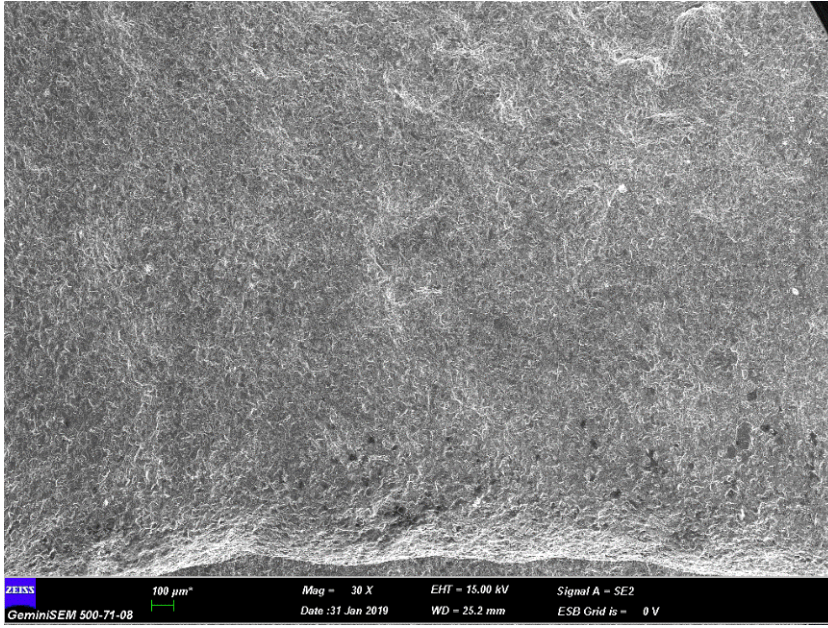
Çizelge 4.4. AlSi10Mg dişlinin özellikleri

Üretim Tekniği	Sertlik (HB10)	Yoğunluk (g/cm ³)
Geleneksel İmalat : Döküm + Talaşlı imalat	64,3	2,51
Geleneksel İmalat : Döküm + Talaşlı imalat + Isıl işlem	85	2,51
Eklemeli İmalat : DMLS	103,2	2,48

Döküm tekniğiyle üretilen dişlinin sertliği ile eklemeli imalatla üretilen dişlinin sertliği arasında oldukça büyük bir fark bulunmaktadır. Bu sebeple ısıl işlem uygulanmak suretiyle döküm ürünü dişlinin sertliği araştırılmıştır. Sonuç olarak, AlSi10Mg alaşımı dişlilerin tamamının yoğunluk değerleri birbirine oldukça yakınken, sertlik değerleri özellikle ısıl işlem uygulanan alüminyum alaşımı ile eklemeli imalat ürünü alüminyum alaşımında birbirine yakınlık göstermektedir.



Şekil 4.33. Geleneksel yöntemle üretilen AlSi10Mg dişliye ait dış yüzeyi



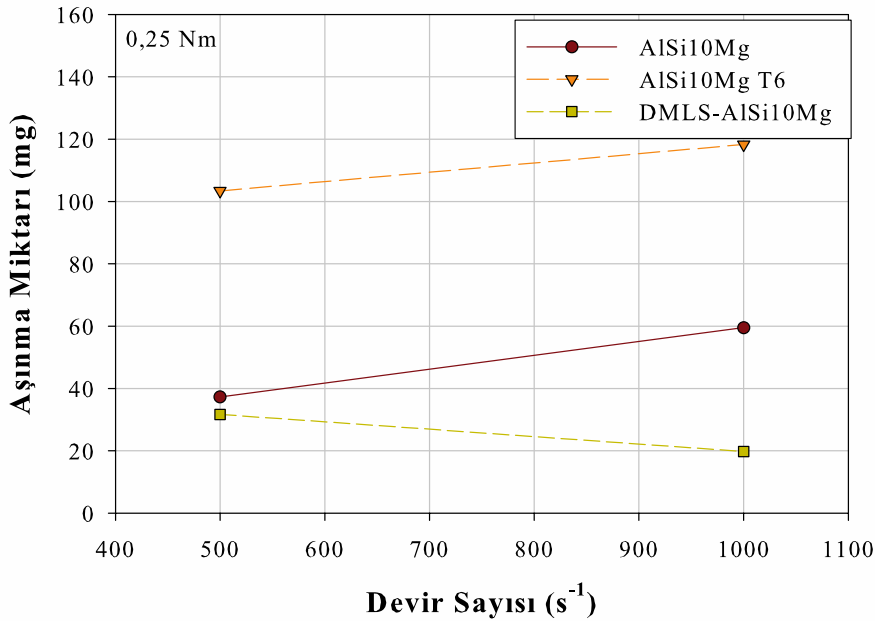
Şekil 4.34. Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg dişliye ait diş yüzeyi

4.5.2. Aşınma miktarı ve yağ analizi sonuçları

0,25 Nm torkta, 500 ve 1000 s⁻¹ devirde ağırlıkça aşınma miktarının değişimi Şekil 4.35'te yer almaktadır. Eklemeli ve geleneksel üretim yöntemlerinin dişli aşınma miktarına etkisi kıyaslandığında, 500 s⁻¹ devirde ağırlıkça aşınma miktarları hemen hemen aynıdır. Ancak ısıtılmış işlem uygulanan alaşımın bu devir sayısında çok daha fazla aşındığı göze çarpmaktadır. Artan devir sayısı ile geleneksel yöntem ile üretilip ısıtılmış işlem uygulanmayan dişli çiftinin toplam aşınma miktarı artış gösterirken, geleneksel yöntemle üretildikten sonra ısıtılmış işlem uygulanan dişli çifti neredeyse sabit kalmıştır. Eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin aşınma miktarı, devir sayısının, bir başka deyişle çevresel hızın artmasıyla azalmıştır. 0,25 Nm torkta 500 ve 1000 s⁻¹ devirde AlSi10Mg dişlilerin

içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen alüminyum miktarı Şekil 4.36'da yer almaktadır. Şekil 4.36 incelendiğinde devir sayısının artışıyla yağda tespit edilen alüminyum eklemeli imalatla üretilen dişlide azalırken geleneksel yöntem ile üretilen dişlide artış göstermiştir. Ayrıca 500 s^{-1} devirde Şekil 4.35'ten elde edilen veriler doğrultusunda, daha az aşındığı bilinen eklemeli imalat ile üretilen dişlinin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen alüminyum elementi daha fazlayken, ağırlıkça daha fazla aşındığı bilinen geleneksel yöntem ürünü dişlinin çalıştığı yağda tespit edilen alüminyum miktarı daha azdır.

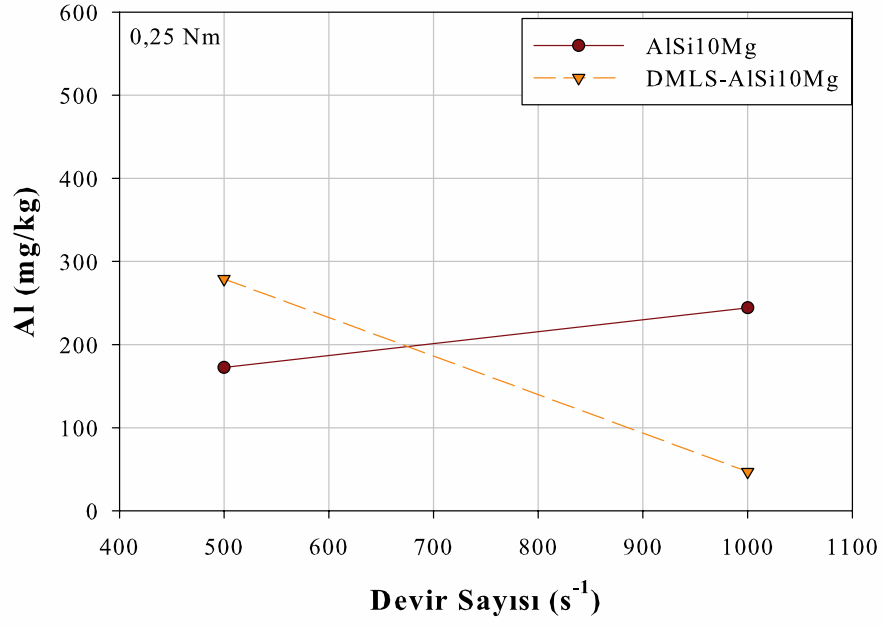
Şekil 4.37'ye göre alüminyum alaşımının diğer elementleri olan silisyum ve magnezyum da göz önünde bulundurulduğunda 500 s^{-1} devirde eklemeli imalat ürünü dişlilerin çalışması esnasında yağda tespit edilen element miktarı daha fazladır. 1000 s^{-1} devirde, hem yağdaki alüminyum hem de yağdaki alüminyum, silisyum ve magnezyum elementlerinin toplamı, 500 s^{-1} devire nazaran, eklemeli imalatla üretilenlerde azalma, geleneksel yöntemle ile üretilenlerde artış göstermiştir. Bu sonuçlar, Şekil 4.35'te elde edilen ağırlıkça değişim sonuçlarıyla benzerdir. Ancak, farklılık gösteren 500 s^{-1} devir sayısındaki ağırlıkça değişim sonuçlarından farklı olarak geleneksel yöntemle üretilen dişliler daha fazla aşınmıştır. 1000 s^{-1} devirde ağırlıkça değişim ve yağ analizi sonuçlarındaki farklılığın sebebinin eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin çalışması esnasında yağdan elde edilen sonuçlardaki, yataklar ve diğer elemanlardan gelen elementlerin yağa karışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



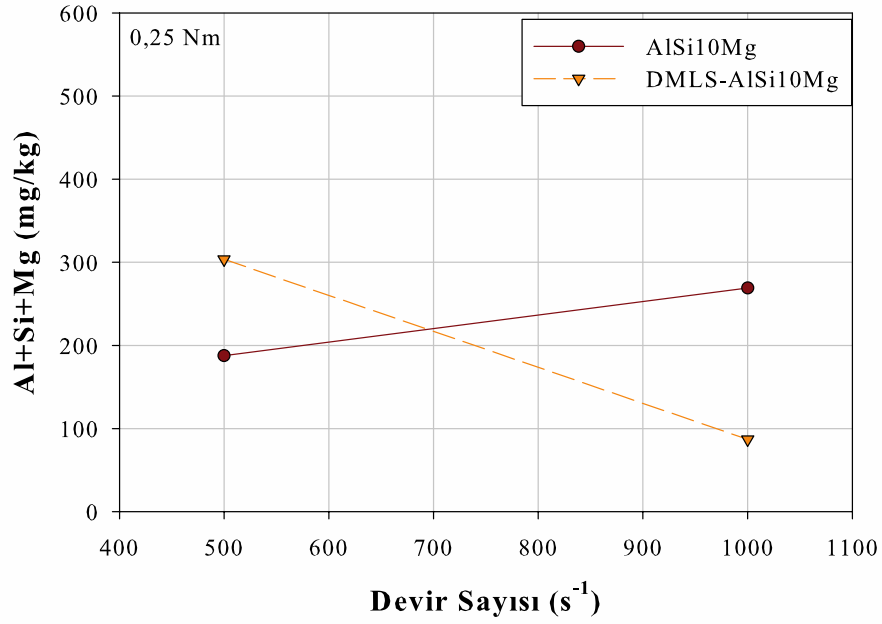
Şekil 4.35. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak AlSi10Mg dişlilerin aşınma miktarı

4.5.3. Meydana gelen hasarlar

AlSi10Mg dişlilerin 0,25 Nm torkta 500 ve 1000 s^{-1} devirde çalışması sonrası yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.38'de yer almaktadır. Döküm sonrası talaşlı imalat ile üretilen AlSi10Mg dişlilerde 500 s^{-1} devirde diş üstü yüksekliğinde oldukça genişlemiş pitting hasarı ile diş dibinde bölgesel plastik şekil değişimleri ile yüzeyden ayrılan parçacıkların izleri görülmektedir. Devir sayısının artışı



Şekil 4.36. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak AISi10Mg dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen alüminyum miktarı

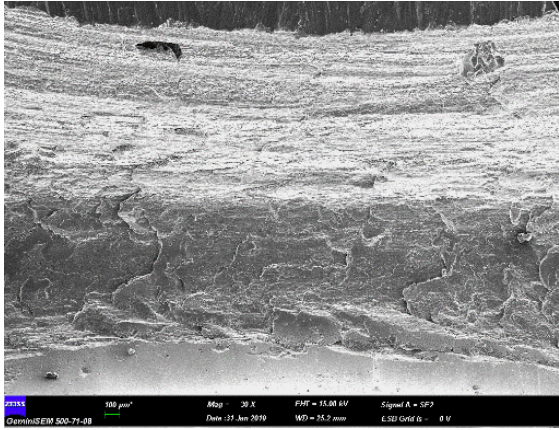


Şekil 4.37. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak AISi10Mg dişlilerin içerisinde çalıştığı yağda tespit edilen alüminyum, silisyum ve magnezyum miktarı

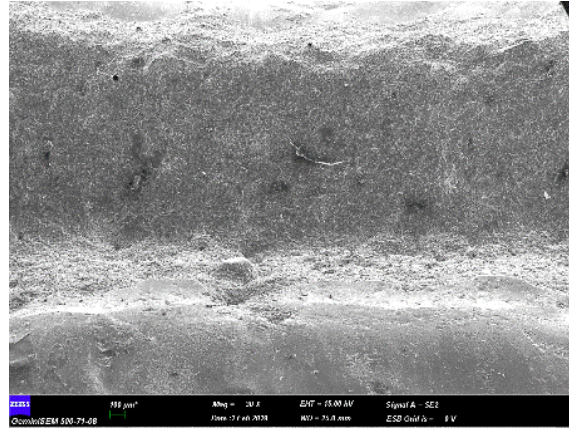
ile diş dibinde daha yoğun olmak üzere diş üstü yüksekliğine doğru yoğun plastik şekil değişimi mevcuttur. Eklemeli imalat ile üretilen AISi10Mg dişlilerde 500 s⁻¹ devirde diş dibine yakın bölgelerde pitting hasarına rastlanmıştır. Ancak artan devir sayısı ile diş yüzeyi boyunca plastik şekil değişimi olduğu görülmektedir.

Üretim tekniklerine bağlı olarak oluşan hasar mekanizmaları incelendiğinde 500 s^{-1} devirde geleneksel yöntem ile üretilen dişlilerde görülen hasar oldukça genişlemiş pitting şeklinde diş üstü yüksekliğindeyken doğrudan metal lazer sinterleme ile üretilen dişlilerde diş dibi bölgesinde ve daha küçüktür. Ayrıca bu çalışma koşullarında eklemeli imalat ile üretilen dişlide plastik şekil değişimine rastlanmazken diğerinde görülmüştür. 1000 s^{-1} devir sayısında ise her iki üretim tekniğinde de hasar tiplerinin benzer olduğu açıkça görülmektedir.

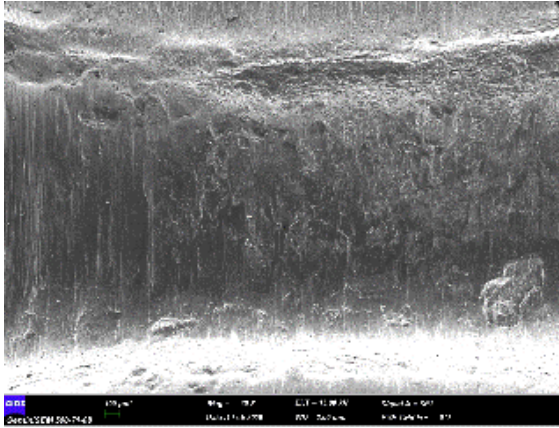
Karşılaşılan hasar tipleri, nümerik analiz sonucunda elde edilen değerler yardımıyla hasarın gerçekleşmesinin tahmin edildiği bölgelerde görülmüştür. Nümerik analiz sonuçları ve dişli aşınma testi sonuçları birbirini desteklemektedir.



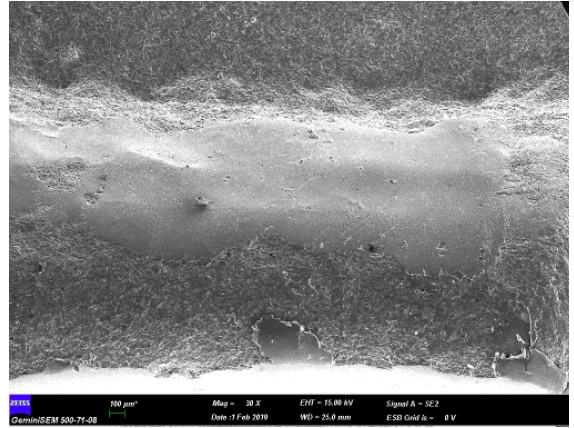
Geleneksel yöntemle üretilen dişli (500 s^{-1})



DMLS ile üretilen dişli (500 s^{-1})



Geleneksel yöntemle üretilen dişli (1000 s^{-1})



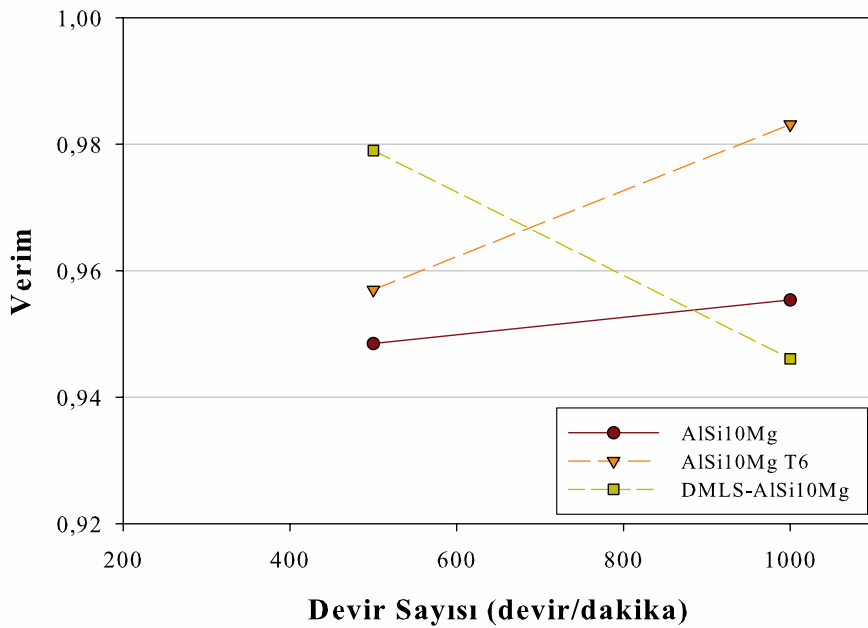
DMLS ile üretilen dişli (1000 s^{-1})

Şekil 4.38. AlSi10Mg dişlilerin $0,25 \text{ Nm}$ torkta çalışması sonrası yüzeyleri

4.5.4. Verim analizi sonuçları

$0,25 \text{ Nm}$ torkta, 500 ve 1000 s^{-1} devirde AlSi10Mg dişlilerin veriminin değişimi Şekil 4.39'da yer almaktadır. 500 s^{-1} devirde geleneksel yöntemle üretildikten sonra ısıtım işlemi uygulanmış AlSi10Mg-T6 dişlilerin verimi, eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin veriminden yaklaşık %2, geleneksel yöntemle ile üretilen ısıtım işlemisiz dişlilerden ise yaklaşık %3 daha yüksektir. Ancak devir sayısının artışıyla ısıtım işlemi uygulanan dişli dışındaki dişli çiftlerinin veriminin arttığı görülmektedir. Isıtım işlemi uygulanan dişli

çiftinin verimi yaklaşık %3,5 azalırken ısı işlem uygulanmayan geleneksel yöntem ürünü dişli çiftinin verimi az miktarda artış göstermiştir. Eklemeli imalat ile üretilen dişli çifti ise yüksek devir sayısında %98'in üzerinde verime ulaşmıştır. Ağırlıkça aşınma miktarı sonuçlarına göre, artan devir sayısı ile daha az aşınan eklemeli imalat ürünü dişlilerin verimlerinin daha yüksek çıkması sonuçların birbirini desteklediğini göstermektedir. Ayrıca hasar oluşumu ve gelişimi incelendiğinde, yüksek devirde hasar tiplerinin farklı üretim tekniklerine rağmen benzer olduğu ve eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin veriminin yüksek olması üretim tekniklerinin farklı özellikleri ile açıklanabilir. Özellikle bilgisayar destekli tasarım, eklemeli imalat ile üretilen diş profillerinin daha düzgün olmasını sağlamaktadır. Düzgün diş profillerinin bir sonucu olarak dişliler daha düzgün çalışmakta ve verim artmaktadır.

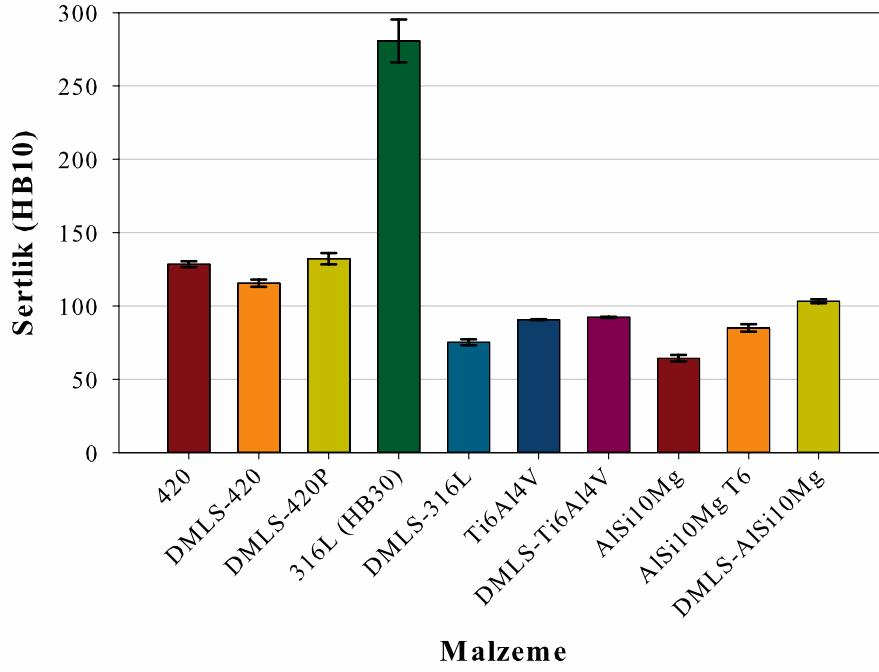


Şekil 4.39. 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak AISi10Mg dişlilerin verimi

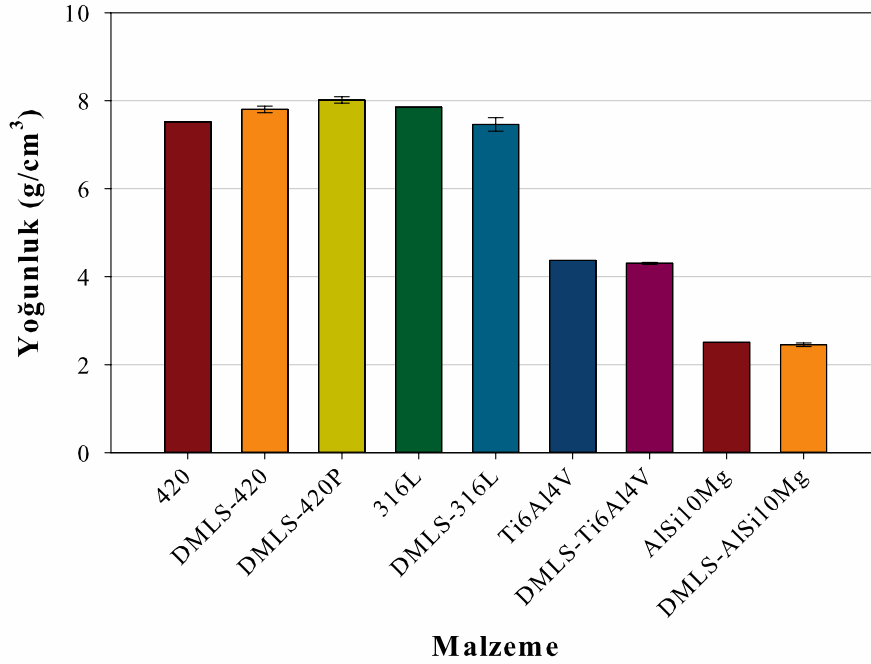
4.6. Genel Sonuçlar

Çalışma kapsamında farklı üretim teknikleriyle üretilen dişlilerin sertlik sonuçları Şekil 4.40'ta yer almaktadır. Sertlik sonuçları kıyaslandığında en sert dişli talaşlı imalat ile üretilen 316L iken, en yumuşak dişli döküm sonrası talaşlı imalat ile işlenen AISi10Mg'dir. Farklı üretim teknikleriyle üretilmelerine rağmen aynı alaşım gruplarının sertlik sonuçları birbirine yakın olup yalnızca 316L alaşımında bu sonuca ulaşamamıştır.

Eklemeli imalat ile üretilen dişlilerde, toz sinterleme teknolojisi kullanıldığından her dişli eş yoğunluğa sahip değildir. Bu sebeple tüm dişlilerin yoğunlukları ölçülüp ortalama değerleriyle Şekil 4.41 oluşturulmuştur. Eklemeli imalat ürünü dişlilerin yoğunluk dağılımları hata bantları ile gösterilmektedir. Geleneksel yöntemlerle üretilen dişlilerin yoğunlukları aynı olduğundan hata bandı görülmemektedir. Eş malzemeler farklı tekniklerle üretilmelerine rağmen birbirine oldukça yakın yoğunluklara sahiptir.



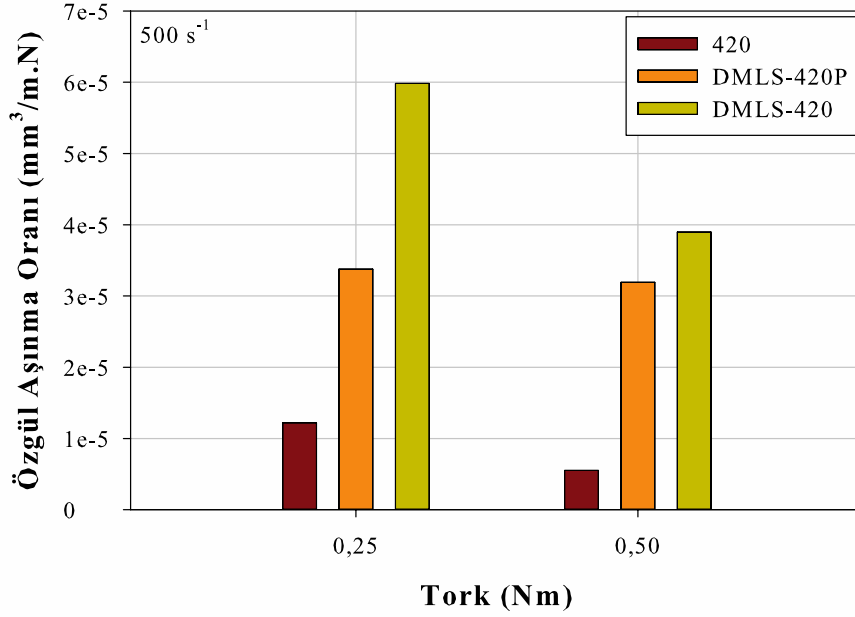
Şekil 4.40. Farklı üretim teknikleriyle üretilen dişlilerin sertlik sonuçları



Şekil 4.41. Farklı üretim teknikleriyle üretilen dişlilerin yoğunluk sonuçları

Çalışma kapsamında farklı üretim teknikleriyle imal edilen dişlilerden elde edilen sonuçlar ASTM-G99'a göre normalize edilmiştir. Böylelikle bu çalışma kapsamında elde edilen deneysel sonuçların, araştırmacıların kullanacağı diğer dişliler için uygulanabilir olması sağlanmıştır. Şekil 4.42'de ASTM-G99'a göre deneysel verilerle yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

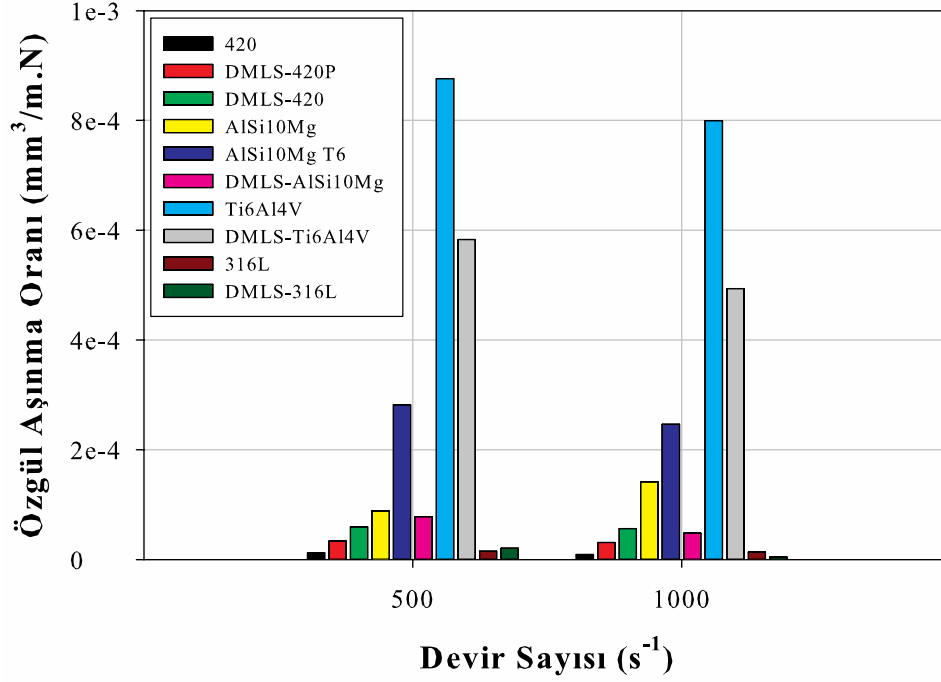
Şekil 4.42’de 420 çelik malzemelerin 500 s^{-1} devirde torka bağlı olarak özgül aşınma oranının değişimi görülmektedir. 420 çelik dişlilerin tamamının özgül aşınma oranı artan torkla azalmıştır. Artan tork eklemeli imalat ile üretildikten sonra ilave işlemle yüzeyi parlatılmış dişlinin özgül aşınma oranını neredeyse hiç etkilememiştir. Geleneksel yöntemle üretilen dişlilerin özgül aşınma oranı artan torkla birlikte en fazla azalmayı gösteren dişlilerdir.



Şekil 4.42. 420 çelik dişlilerin 500 s^{-1} devirde torka bağlı olarak özgül aşınma oranı

Çalışmada kullanılan tüm dişlilerin 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak özgül aşınma oranının değişimi Şekil 4.43’te yer almaktadır. 316L dişlilerde, devir sayısının artışıyla hem eklemeli hem de geleneksel imalat ile üretilen dişlinin özgül aşınma oranı azalmaktadır. Çalışma koşullarından daha fazla etkilenen dişli çiftinin üretim tekniği, eklemeli imalattır. Ti6Al4V dişlilerin devir sayısına bağlı olarak özgül aşınma oranı incelendiğinde farklı tekniklerle üretilen dişlilerin aşınma davranışı değişikliği göstermediği görülmektedir. Çalışılan tüm devirlerde geleneksel yöntemle üretilen dişli çiftinin özgül aşınma oranı daha yüksektir. AlSi10Mg dişlilerin 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak özgül aşınma oranı değişimi incelendiğinde devir sayısı arttıkça geleneksel yöntem ile üretilen dişli çiftinin özgül aşınma oranının artışı dikkat çekicidir. Geleneksel yöntem ile üretildikten sonra ısıtma işlemi uygulanan dişli çifti ve eklemeli imalat ile üretilen dişli çiftinin özgül aşınma oranı, devir sayısının artışıyla azalmaktadır. Burada önemli olan bir diğer nokta, ısıtma işleminin devir sayısına doğrudan etkisidir. Açıkça görülmektedir ki yüksek devir sayılarında ısıtma işlemi uygulaması AlSi10Mg dişlilerin özgül aşınma oranını düşürmektedir. Ancak çalışılan devirlerin tamamı göz önünde bulundurulduğunda, tamamında en yüksek özgül aşınma oranı yine geleneksel yöntem ile üretildikten sonra ısıtma işlemi uygulanmış dişlilerdedir. Şekil 4.43 yardımıyla devir sayısına bağlı olarak ısıtma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış dişlilerin özgül aşınma oranlarının kesişim noktası belirlenmek suretiyle, çalıştırılacak AlSi10Mg dişliler için ısıtma işlemi ihtiyacı olup olmadığı değerlendirilebilir. Eklemeli imalat ile üretilen dişliler ise artan devir sayısına rağmen en düşük özgül aşınma oranıyla

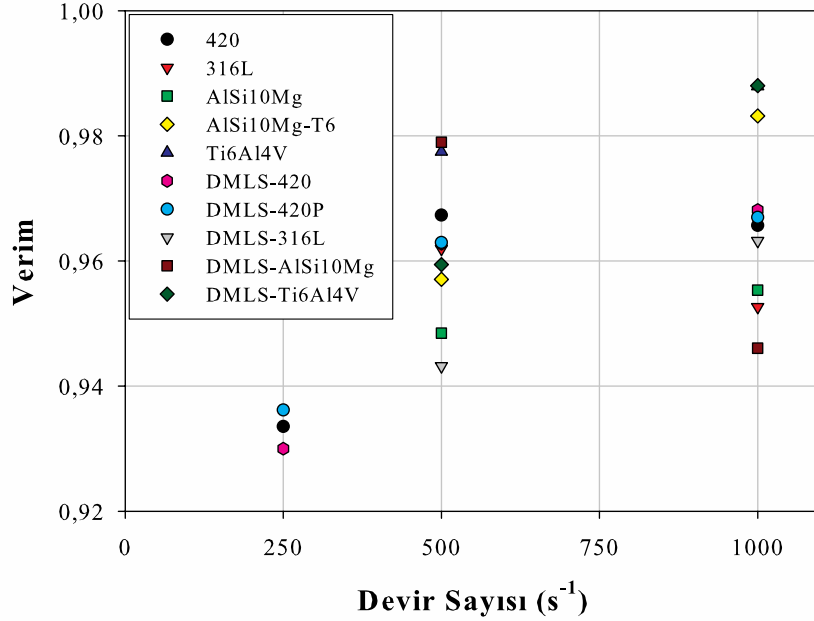
çalışmaktadırlar. Literatür incelendiğinde, çalışma koşullarına ve malzeme seçimine bağlı olarak, özgül aşınma oranı, 10^{-15} ila 10^{-1} mm^3/Nm aralığında büyük ölçüde değişir (Archard, 1953). Bu çalışmada kullanılan tüm malzemeler için elde edilen özgül aşınma oranı değerlerinin tamamı, uygun aralıkta olduğundan sonuçları doğrulamaktadır.



Şekil 4.43. Dişlilerin 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak özgül aşınma oranı

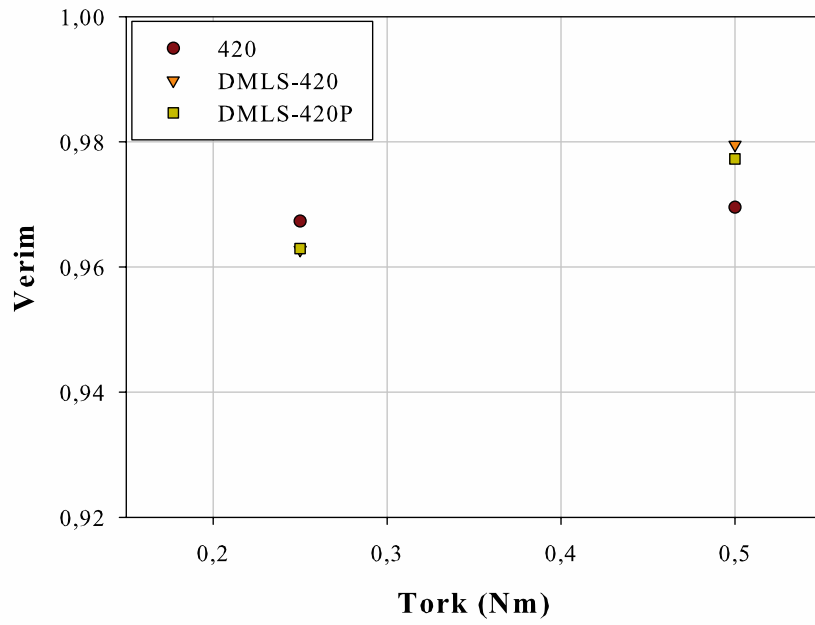
Çalışmada kullanılan tüm dişli çiftlerinin 0,25 Nm torkta çeşitli devir sayılarında verimlerinin karşılaştırması yapılmış olup Şekil 4.44'te yer almaktadır. 250 s^{-1} devirde diğer devirlerde elde edilen sonuçlara nazaran verim düşüktür. Üretim tekniklerine bağlı olarak bu devir sayısında birbirine yakın verim sonuçları elde edilmiştir. 250 s^{-1} devirde, aralarındaki farkı az olmasına rağmen en düşük verim eklemeli imalat ile üretilen 420 çelik dişliye aittir. 500 s^{-1} devir sayısında en yüksek verim eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg dişlide elde edilmiştir. Bu dişliye en yakın verim değerine ulaşan diğer dişli ise geleneksel yöntemle üretilen Ti6Al4V dişlidir. Bu sıralamayı eklemeli imalat ile üretilen Ti6Al4V dişli takip etmektedir. 500 s^{-1} devirde diğer dişliler birbirine yakın ortalama verim değerlerine ulaşmışken, özellikle geleneksel yöntemle üretilen AlSi10Mg ve eklemeli imalatla üretilen 316L çeliğinin verimleri en alt sırada yer almaktadır. Buna rağmen bu devir sayısındaki tüm verimler, 250 s^{-1} devirdeki verimlerden yüksektir. 1000 s^{-1} devirde ise en yüksek verime sahip olan dişliler, eklemeli imalat ile üretilen 316L çeliği ve Ti6Al4V'dir. Bunu, geleneksel yöntemlerle üretildikten sonra ısıl işlem uygulanan AlSi10Mg-T6 dişli takip etmektedir. Diğer dişlilerin de bu devirde verimleri yakın olup en düşük verime sahip dişli, eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg dişlidir. Şekil 4.44 detaylı olarak incelendiğinde, devir sayısına bağlı olarak dişlilerin verimlerinde değişimler olduğu ve eklemeli imalat ile imalatın verime pozitif etkisi ortadadır. Bunun en önemli sebeplerinden biri, özellikle düşük yoğunluklu malzemelerde sinterlemenin etkisidir. Sinterlenmiş tozlarla oluşan dişli ile döküm, azdırma tezgahı vb.

geleneksel yöntemlerle üretilen dişlilerin üretimi esnasındaki farklılıklar, verimi doğrudan etkilemektedir. Eklemeli imalat teknolojisinin buradaki en önemli etkisi, bilgisayar desteğiyle doğrudan üretimi sağlamasıdır. Bir başka deyişle bilgisayar ortamında hazırlanan modeller, doğru diş profilleri ve en az hatayla üretilerek servis koşullarında daha verimli bir şekilde kullanılabilir.



Şekil 4.44. Dişlilerin 0,25 Nm torkta devir sayısına bağlı olarak verimi

Çalışmada kullanılan 420 çelik dişlilerin veriminin 500 s⁻¹ devirde torka bağlı olarak değişimi Şekil 4.45'te yer almaktadır. Hem üretim tekniğinin hem de üretim sonrası yüzey işleminin verime doğrudan etkisini gösteren bu sonuçlara göre düşük torkta geleneksel yöntemle üretilen dişlinin eklemeli imalat ile üretilen dişliye göre verimi yaklaşık olarak %0,5 daha fazladır. Ayrıca bu torkta, eklemeli imalatla üretilen dişliye ilave uygulanan yüzey işleminin verime etkisi olmadığı görülmektedir. Tork artışıyla birlikte eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin verimi geleneksel yöntemle üretilen dişlilerin veriminin yaklaşık olarak %1 üzerindedir. 0,5 Nm torkta da eklemeli imalat ile üretilen dişliye uygulanan üretim sonrası ek yüzey işleminin pek bir etkisi olmamıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, verim farklılıklarının oldukça düşük olması, eklemeli imalat ile üretilenlerin geleneksel yöntemle üretilen dişlilerin yerini alabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.45. 420 çelik dişlilerin 500 s^{-1} devirde torka bağlı olarak verimi

5. SONUÇLAR

Dünya pazarında üretilen ürünler için rekabet, son yıllarda oldukça yoğunlaşmıştır. Yeni ürünlerin piyasaya olabildiğince erken ya da rakiplerden önce ulaşması oldukça önemli hale gelmiştir. Ürünlerin pazara hızlı bir şekilde girmesi için, tasarım, test, imalat aşamaları önem arz etmektedir. Küresel rekabet ve müşteri odaklı ürün taleplerinin yanı sıra şirketlerin iş süreçlerini iyileştirmek ve ürün geliştirme döngüsünü hızlandırma talepleri, üreticileri daha yeni teknolojiler aramaya zorlamaktadır. Eklemeli imalat, hem prototip hem nihai ürün eldesi, hem de ürün tasarımı ve geliştirme süresini kısaltması nedeniyle popülerdir. Ayrıca üç boyutlu model, tüm ürün veya proje bilgi tabanının merkezi bir bileşenidir. Bu da tüm tasarım, analiz ve üretim faaliyetlerinde aynı verilerin kullanıldığı anlamına gelir. Bir başka deyişle tasarıma dair bir yanlış anlama söz konusu değildir. Bu yöntemle araştırılıp geliştirilen ürün bilgisi kolaylıkla çoğaltılabilir, saklanabilir ve yeniden kullanılabilir.

Eklemeli imalat, tasarımcılara, fiziksel bir ürünü ortaya çıkarmanın yanı sıra tasarımı geliştirme kolaylığı sağlar. Çünkü geleneksel üretimde, üretim sırasında tasarımın değiştirilmesi, üretim hattındaki takımlar değiştirildiği için önemli maliyet artışlarına veya zaman israfına neden olabilir. Bu durumda, eklemeli imalat, sabit tasarımlardan uzaklaşarak tasarımcılara, tasarımın birden fazla versiyonunu üretme olanağı sunar. Ayrıca geleneksel imalatta oluşan üretim sonrası atık malzeme oranı, eklemeli imalatta büyük oranda azaldığından malzeme maliyeti düşürülebilir. Geleneksel üretim süreçleriyle karşılaştırıldığında, eklemeli imalat, daha az malzeme kullanarak ve üretim sürecindeki adımları ortadan kaldırarak enerji kullanımını önemli ölçüde azaltabilir.

Bir diğer teknolojik gelişimin arttığı alan, mikro elektromekanik sistem tasarımlarıdır. MEMS teknolojileri, seri üretim teknikleriyle beraber bileşenlerin ve cihazların, fiziksel boyut, hacim, ağırlık ve maliyetinin azaltılarak, artan performans ve güvenilirlikle üretilmesini sağlar. Ancak geleneksel yöntemlerle üretimi zor olan MEMS bileşenleri için yeni üretim teknolojileri göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu çalışmada benzer özelliklere sahip AlSi10Mg alüminyum alaşımı, Ti6Al4V titanyum alaşımı ile 420 ve 316L paslanmaz çelik malzemelerden üretilen çeşitli mikro modüllü metal dişliler, hem eklemeli üretim yöntemiyle hem de geleneksel üretim yöntemiyle üretilerek özdeş test süreçlerinden geçirilmiş, karşılaştırmalı olarak mekanik davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda yer almaktadır:

- Eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin yoğunluk ve sertlikleri geleneksel yöntemlerle üretilenlere oldukça yakındır. Ancak yüzey özellikleri üretim tekniğinden ötürü farklılıklar göstermektedir.
- Eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin her birinin yoğunlukları, üretim tekniğinden ötürü birbirinden farklıdır. Ancak geleneksel yöntemle üretilen dişlilerin her birinin yoğunluğu aynıdır.
- Genel olarak eklemeli imalat ile üretilen çelik dişliler geleneksel yöntemle üretilenlere nazaran daha fazla aşınmasına rağmen verimleri hemen hemen aynı ya da yüksektir. Bu sebeple, eklemeli imalat ile üretilen dişli geleneksel yöntemlerle üretilen

aynı malzemeden dişlilerin yerine kullanılabilir. Yüzey hasarlarının önüne geçebilmek için yüzey parlatma işlemi fayda sağlayacaktır.

- Her iki üretim tekniğiyle üretilen çelik dişliler, aşımına bağlı olarak farklı oranlarda bileşim göstermelerine rağmen, dişlilerde aşınma sonucu en fazla kayba uğrayan element demirdir.

- 420 çelik dişlilerde, eklemeli imalatla üretilen dişlilere ek olarak uygulanan yüzey parlatma işlemi, verim ve kullanım aralığında herhangi bir değişikliğe sebebiyet vermemiştir. Ancak yüksek devirlerde meydana gelen yüzey basıncı kaynaklı hasarlarda önleyici etkisi vardır.

- Eklemeli imalat ile üretilen dişlilerle karşılaştırıldığında, geleneksel yöntemle üretilen AlSi10Mg dişlilere uygulanan ısı işlem, verimi artırırken aşınmayı olumsuz yönde etkilemiştir.

- Eklemeli imalat ile üretilen düşük yoğunluğa sahip alaşımlı dişlilerden Ti6Al4V özellikle yüksek devir sayısı ve torklarda geleneksel yöntemle üretilenlerin yerini alabilir.

- Düşük dönme hızlarında eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg dişliler geleneksel yöntemle üretilenlerin yerini alabilir.

- Ti6Al4V dişlilerde her iki üretim tekniğiyle üretilen dişlilerde aşınma sonucu en fazla kayba uğrayan element titanyumdur. Benzer şekilde AlSi10Mg dişlilerde de alüminyumdur.

- Özellikle yüksek devirlerde, verimin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunu, yüksek devirlerde daha düşük çıkan özgül aşınma oranları değerleri de doğrulamaktadır.

- Üretim tekniklerine bağlı olarak oluşan farklı diş yüzey özellikleri nedeniyle hasar mekanizmaları oldukça farklıdır. Talaşlı imalat ile üretilen dişli yüzeylerinde kesme kuvvetlerinin oluşturduğu yüzey deformasyonları görülürken, eklemeli imalat ile üretilen dişli yüzeylerinde sinterlenme sonucu üniform olmayan diş yüzeyleri görülmüştür. Yeterince sinterlenmeyen toz tanelerinin yüzeyde bıraktığı boşluklar, yağ basıncının etkisiyle genişleyerek eklemeli imalatla üretilen dişlilerde pitting hasarını hızlandırmaktadır. Yüzey karakteristiğinin yanı sıra çalışma koşullarının da etkisiyle geleneksel yöntemle üretilen dişlilerde genelde pitting ve scuffing hasarı gözlemlenirken eklemeli imalat ile üretilen dişlilerde yoğun ve ilerleyen pitting hasarının yanı sıra yoğun plastik şekil değişimi görülmüştür.

- Mikro modüllü dişlilerde görülen hasar tipleri, oluşum zamanı ve gelişimi normal modüllü dişlilerden farklılık göstermektedir. Normal boyutlu dişlilerde yeterince sinterlenmeyen toz tanelerinden kaynaklı boşluklar, diş yüzey alanının oldukça küçük bir hacmine etki ederken, mikro modüllü dişlilerde boyut sebebiyle yeterince sinterlenmeyen toz taneleri daha büyük hacme etki etmektedir. Yağ basıncının da etkisiyle mikro modüllü dişlideki başlangıç pittinginin ilerleyen pittinge dönüşmesi ve pitting sonucu diş kırılma hasarıyla karşılaşılması, normal boyutlu dişlere nazaran daha hızlı gelişebilir.

- Eklemeli imalat ile üretilen dişlilerin en büyük avantajlarından biri üretim sonrası diş profillerinin düzgünlüğüdür. Böylelikle karşılıklı çalıştıkları dişlilerle birlikte yüksek verimli olarak güç iletebilmektedirler.

- Araştırmacılar ve tasarımcılar özellikle normalize edilen veriler yardımıyla farklı boyutlardaki dişliler için bu çalışma verilerinden yararlanabilecektir.

- Özellikle yedek parça ihtiyaçlarında, geleneksel yöntemlerle üretilmiş makine parçalarının yerine eklemeli imalat ürünlerinin belirli şartlar altında kullanılabilceği ortaya konmuştur.

Çalışmadan elde edilen bilgiler ve tecrübeler doğrultusunda araştırmacılara çeşitli öneriler sunulmaktadır:

- Çeşitli modüllere sahip dişliler ve dişli tipleri için bu çalışma geliştirilebilir.
- Dişli kutusunda kullanılan yağın etkisinin incelenmesi faydalı olacaktır.
- Diş profili ötelenen dişliler için yapılacak çalışmalarla, üretim tekniğinden kaynaklı geleneksel yöntemlerde verim düşmesi olup olmadığı açıklığa kavuşturulabilir.

6. KAYNAKLAR

- AGMA 1010. 2014. Appearance of gear teeth - terminology of wear and failure, American Gear Manufacturers Association, Alexandria, VA, ABD.
- Akkurt, M. 2005. Makine Elemanları. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Archard, J.F. 1953. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24, 981-988.
- Arrisek, A., Petrol D.D., Vizintin, J. 2001. Pitting resistance of rapeseed-based oils. *Lubrication Engineering*, 57 (3):17-21.
- Aslantaş, K., Taşgetiren, S., Yalçın, Y. 2004. Austempering retards pitting failure inductile iron spur gears. *Engineering Failure Analysis*, 11: 935–941.
- ASTM D5185. 2018. Standard Test Method for Multielement Determination of Used and Unused Lubricating Oils and Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES), ASTM International, West Conshohocken, PA, ABD.
- ASTM G99. 2017. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, ABD.
- Bartz, W.J., Krüger, V. 2003. Influence of lubricants on the pitting fatigue of gears. *Wear*, 35 (2): 315–329.
- Bargel, H. Schulze, G. 2012. Werkstoffkunde, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Almanya
- Buchanan, C. Matilainen, V.P., Salminen, A., Gardner, L. 2017. Structural performance of additive manufactured metallic material and cross-sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 136 :35–48.
- Bilgin, M. S., Erdem, A., Dilber, E., Ersoy, İ. 2016. Comparison of fracture resistance between cast, Cad/Cam milling, and direct metal laser sintering metal post systems. *Journal of Prosthodontic Research* 60 (1):23–28.
- Bandyopadhyay, A., Heer, B. 2018. Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science & Engineering R*, 129: 1–16.
- Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Biamino, S., Pavese, M., Fino, P. 2014. Direct fabrication of joints based on direct metal laser sintering in aluminum and titanium alloys. *24th CIRP Design Conference Procedia CIRP 21*, 129 – 132.
- Cameron, A. 1949. The surface-roughness of Bearing Surfaces and its relation to oil film thickness at breakdown. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 161(1): 73-79.
- Davis, J.R. 2005. Gear materials, properties and manufacture, ASM International, Ohio, ABD.
- Dempsey, P.J., Afjeh, A.A. 2002. Integrating oil debris and vibration gear damage detection technologies using fuzzy logic. National Technical Information Service, Nasa/TM-211126, Springfield, VA, ABD.
- Decker, K.H., Kabus, K. 2011. Maschinenelemente Funktion, Gestaltung und

- Berechnung, Hanser Verlag, Münih, Almanya.
- DIN780.1977. Series of Modules for Gears; Modules for Spur Gears. Standard by Deutsches Institut Fur Normung, Berlin, Almanya.
- DIN 867. 1986. Basic rack tooth profiles for involute teeth of cylindrical gears for general engineering and heavy engineering, Standard by Deutsches Institut Fur Normung, Berlin, Almanya.
- DIN 868. 1976. General Definitions and Specification Factors for Gears, Gear Pairs and Gear Trains, Standard by Deutsches Institut Fur Normung, Berlin, Almanya.
- DIN 3960. 1987. Definitions, parameters and equations for involute cylindrical gears and gear pairs. Standard by Deutsches Institut Fur Normung, Berlin, Almanya.
- DIN 3990.1987. Calculation of load capacity of cylindrical gears; introduction and general influence factors. Standard by Deutsches Institut Fur Normung, Berlin, Almanya.
- DIN 3998. 1976. Denominations on Gears and Gear Pairs; General Definitions. Standard by Deutsches Institut Fur Normung, Berlin, Almanya.
- Doyle,M., Agarwal, K., Sealy, W., Schull, K. 2015. Effect of layer thickness and orientation on mechanical behavior of binder jet stainless steel 420+bronze parts. *Procedia Manufacturing*, 1 : 251–262.
- Flodin, A., Andersson, S. 2001. A simplified model for wear prediction in helical gears. *Wear*, 249: 285-295.
- Fujisawa, Y., Komori, M. 2015. Surface finishing method for tooth flank of heat-treated surface - hardened small gears using a gear - shaped tool composed of alumina-fiber-reinforced plastic. *Precision Engineering*, 39: 234–242.
- Glew, T.C. 1980. Failure analysis and repair techniques for turbomachinery gears. Texas A&M University. Gas Turbine Laboratories, ABD.
- Gupta, K., Jain, N.K. 2014. On surface integrity of miniature spur gears manufactured by wire electrical discharge machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72 (9–12):1735–1745.
- Haberhauer, H., Bodenstern, F. 2014. *Maschinenelemente Gestaltung, Berechnung, Anwendung*, Springer, Esslingen, Almanya.
- Hegadekattea, V., Hilgertb, J., Krafta, O., Huber, N. 2010. Multi time scale simulations for wear prediction in micro-gears. *Wear*, 268: 316–324:
- Hsu, T.R. 2008. MEMS and microsystems design, manufacture and nano scale engineering. John Wiley & Sons, New Jersey, ABD.
- Höhn, B.R., Oster, P.,Braykoff, C. 2011. Size and material influence on the tooth root, pitting, scuffing and wear load-carrying capacity of fine-module gears. *Gear Technology*, 34-40.
- ISO/ASTM52900. 2015. Standard terminology for additive manufacturing – general principles – terminology, ASTM International, West Conshohocken, PA, ABD.

- Itagaki, T., Takahashi, H., Iizuka, H., Takahashi, M., Nemoto, R. 2014. Evaluating fatigue life of injection molded plastic gear added with carbon particle made from rice hull. 3rd International Conference on Design Engineering and Science, ICDES, 22th-25th February, Barselona, İspanya.
- Kattelus, J., Miettinen, J., Lehtovaara, A. 2016. Detection of gear pitting failure progression with on-line particle monitoring. *Tribology International*, 1–7.
- Konecna, R., L. Kunz, A. Badga, and G. Nicoletto. 2017. Resistance of direct metal laser sintered Ti6Al4v alloy against growth of fatigue cracks. *Engineering Fracture Mechanics*, 185: 82-91.
- Khaing, M.W., Fuh, J.Y.H., Lu, L. 2001. Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of Eos parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 113: 269-272.
- Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., Fortunato, A. 2017. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology* 249: 255–63.
- Li, W., Wood, A., Weidig, B., Mao, K. 2011. An investigation on the wear behaviour of dissimilar polymer gear engagements. *Wear* 271 ,2176– 2183
- Lv, Y., Lei, L., Sun, L. 2016. Influence of different combined severe shot peening and laser surface melting treatments on the fatigue performance of 20CrMnTi steel gear. *Materials Science and Engineering A*, 658:77–85.
- Lv, Y., Lei, L., Sun, L. 2017. Effect of microshot peened treatment on the fatigue behavior of laser-melted W6Mo5Cr4V2 steel gear. *International Journal of Fatigue* 98: 121–30.
- Mower, T. M. ve Long, M.J. 2016. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science and Engineering A*, 651: 198–213.
- Mallipeddi, D., Norell, M., Sosa, M., Nyborg, L. 2017. Influence of running-in on surface characteristics of efficiency tested ground gears. *Tribology International*, 115: 45–58.
- Martins, R.C., Paulo, S. M., Seabra J.O. 2006a. MoS₂/Ti low-friction coating for gears. *Tribology International*, 39: 1686–1697.
- Martins, R., Seabra, J., Brito, A., Seyfert, C., Luther, R., Igartua, A. 2006b. Friction coefficient in Fzg gears luricated with industrial gear oils: biodegradable ester vs. mineral oil, *Tribology International*, 39: 512–521.
- Niza, M. E., Komori, M., Nomura, T., Yamaji, I., Nishiyama, N., Ishida, M., Shimizu, Y. 2010. Test rig for micro gear and experimental analysis on the meshing condition and failure characteristics of steel micro involute gear and metallic glass one. *Mechanism and Machine Theory*, 45: 1797–1812.
- Ngoa,T.D., Kashania, A., Imbalzanao, G., Nguyena, K.T.Q., Huib, D. 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B*, 143: 172–196.

- Özkasap, A. D. (2001) Düz dişli çarklarda aşınma-yağlama yağı ilişkisinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Pal, S., Tiyyagura, H.R., Drstvenšek I, Kumar, C.S. 2016. The effect of post-processing and machining process parameters on properties of stainless steel PH1 product produced by Direct Metal Laser Sintering. *Procedia Engineering*, 149: 359 – 365.
- Pogacnik, A., Tavcar, J. 2015. An accelerated multilevel test and design procedure for polymer gears. *Materials and Design*, 65: 961–973.
- Wittel, H. Muhs, D, Jannasch, D. 2013. Roloff/Matek maschinenelemente. Joachim Voßiek, Springer , Augsburg, Almanya.
- Radzevich, S.P. 2016. Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture, CRC Press, Taylor & Francis Group, ABD.
- Ren, X., Shao, H., Lin, T., Zheng, H. 2016. 3D gel-printing - An additive manufacturing method for producing complex shape parts. *Materials and Design*, 101: 80–87.
- Riemer, A., Leuders, S., Thöne, M., Richard, H.A., Tröster, T., Nienford, T. 2014. On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. *Engineering Fracture Mechanics*, 120: 15– 25.
- Röttger, A., Geenen, K., Windmann, M., Binner, F., Theisen, W. 2016. Comparison of microstructure and mechanical properties of 316L austenitic steel processed by selective laser melting with hot-isostatic pressed and cast material. *Materials Science and Engineering A*, 678: 365–376.
- Senthilvelan, S., Gnanamoorthy, R. 2007. Effect of rotational speed on the performance of unreinforced an glass fiber reinforced Nylon 6 spur gears. *Materials and Design*, 28 : 765–772.
- Senthilvelan, S., Gnanamoorthy, R. 2006. Damping characteristics of unreinforced, glass and carbon fiber reinforced nylon 6/6 spur gears, *Polymer Testing*, 25 :56-62.
- Simonelli, M., Tse, Y.Y., Tuck, C.2014. Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti6AL4V. *Materials Science & Engineering A*, 616 :1–11.
- Sjöberg, S., Andersson, M., Olofsson, U. 2016. Analysis of efficiency of spur ground gears and the influence of running-in. *Tribology International*, 93:172-181.
- Shi, X., Ma, S., Liua, C., Wua, Q., Lua, J., Liub, Y., Shib, W. 2017. Selective laser melting-wire arc additive manufacturing hybrid fabrication of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties. *Materials Science & Engineering A*, 684: 196–204.
- Simichi, A., Petzoldt, F., Pohl, H. 2003. On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling. *Journal Of Materials Processing Technology*, 141: 319- 328.
- Şekercioğlu, T. 2015. Makine Elemanları Hesap Şekillendirme. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Tay, F. E.H., Haider, E.A. 2002. Laser sintered rapid tools with improved surface finish and strength using plating technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 121: 318–322.

- Tezel, T., Kovan, V., Topal E.S. 2018a. Investigation of the usability of 3d printing methods in miniature gear manufacturing. Proceedings on International Conference on Technology and Science, December 13-15, 542-548 , Antalya, Türkiye
- Tezel, T., Kovan, V., Topal E.S. 2018b. Contact and bending stress analysis of 3d printed micro module gears", IMCOFE V. International Multidisciplinary Congress Of Eurasia, 24-26 Temmuz 2018, pp.432-438 Barcelona, İspanya.
- Turhan, S., Özsoy, A. 2016. DMLS Yöntemiyle İmal Edilen Ti6Al4V Alaşım Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisi. *SDÜ International Journal of Technological Science*, 8(2): 15-27.
- Tubi, I.S., Long, H., Zhang, J., Shawb B. 2015. Experimental and analytical study of gear micropitting initiation and propagation under varying loading conditions. *Wear*, 328-329: 8–16.
- Townsend, D.P. 2011. Dudley's gear handbook. Tata McGraw-Hill Publishing Company, New Delhi, Hindistan.
- TS 24340. 2012. Dişli çarklar genel ve ağır sanayii makineleri için silindirik dişli çarklar-Modüller. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Valentin, O. 2015. Investigation of tooth wears from scuffing of heavy duty machine spur gears. *Mechanism and Machine Theory*, 83:38–55.
- Zhu, Y., J. Zou, X. Chen, and H. Yang. 2016. Tribology of selective laser melting processed parts: stainless steel 316 l under lubricated conditions. *Wear*, 350–351:46– 55.
- Wittel, H., Muhs, D., Jannasch, D. 2013. Roloff/Matek maschinenelemente. Joachim Voßiek, Springer, Augsburg, Almanya.
- <http://www.imaterialise.com> [Son erişim tarihi: 20.05.2019].
- <http://www.magtrol.com> [Son erişim tarihi: 20.05.2019].
- <http://www.marmatek.com> [Son erişim tarihi: 20.05.2019].

ÖZGEÇMİŞ

TUĞÇE TEZEL

tugcetezel@akdeniz.edu.tr

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2013-2019	Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2011-2013	Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi
2006-2010	Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Arş. Gör.	Akdeniz Üniversitesi
2011-2019	Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1. Tezel T., Kovan V., Camurlu, H.E, Topal E.S., "Designing and Manufacturing of Polymer-Foam Hybrid Materials Using Fused Deposition Modeling", Advanced Engineering Materials, 2019. <https://doi.org/10.1002/adem.201800840>.
2. Tezel T., Kovan V., Topal E.S., "Effects of the Printing Parameters on Short-Term Creep Behaviors Of Three-Dimensional Printed Polymers", Journal of Applied Polymer Science, 136, 2019.
3. Kovan V., Tezel, T., Topal E.S., "The Effect of Molybdenum on Titanium's Castability in Dental Prosthesis Applications: A Numerical Analysis", Proceedings of the Institution

of Mechanical Engineers, Part L: Journal Of Materials: Design and Application, 2018, <https://doi.org/10.1177/1464420718802464>.

4. Doğan A., Tezel T., "Experimental Investigation of Convection Heat Transfer From Open-Celled Metal Foam Blocks", Journal of Enhanced Heat Transfer, 29: 267-275, 2013.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1. Kovan V., Tezel T., Topal E.S., "Effects of the Tooth Profile Modification on Root Stress in 3D Printed Micro Module Spur Gears : A Numerical Analysis", International Conference on Technology and Science, Antalya, Türkiye, 13-15 Aralık 2018, pp.5-5.

2. Tezel T., Kovan V., Topal E.S., "Investigation of the Usability of 3D Printing Methods in Miniature Gear Manufacturing", International Conference on Technology and Science, Antalya, Türkiye, 13-15 Aralık 2018, pp.542-548.

3. Kovan V., Tezel T., Çamurlu H.E., Topal E.S., "Effect of Printing Parameters on Mechanical Properties of 3D Printed Pla/Carbon Fibre Composites", International Scientific Conference Machines Technologies Materials, Varna, Bulgaristan, 12-15 Eylül 2018, 2, pp.271-273.

4. Kovan V., Tezel T., Topal E.S., Çamurlu H.E., "Printing Parameters Effect on Surface Characteristics of 3D Printed Pla Materials", International Scientific Conference Machines Technologies Materials, Varna, Bulgaristan, 12-15 Eylül 2018, vol.2, pp.168-171.

5. Tezel T., Kovan V., Topal E.S., "Effect of Printing Parameters on Surface Roughness of 3D Printed ABS Micro-Module Gears", V. International Multidisciplinary Congress of Eurasia, Barselona, İspanya, 24-26 Temmuz 2018, pp.439-445.

6. Tezel T., Kovan V., Topal E.S., "Contact and Bending Stress Analysis of 3D Printed Micro Module Gears", IMCOFE V. International Multidisciplinary Congress Of Eurasia, Barselona, İspanya, 24-26 Temmuz 2018, pp.432-438.

7. Tezel T., Kovan V., Topal E.S., "3B Yazdırılmış Kompozitlerin Yazdırma Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Deneysel İncelenmesi", 18th International Conference On Machine Design and Production, ESKİŞEHİR, TÜRKİYE, 3-6 Temmuz 2018, pp.935-944.

8. Tezel T., Topal E.S., Kovan V., "Design and Manufacture of Gear Test Machine for Micro Module Gears", 3rd International Conference on Computational Mathematics And Engineering Science, Girne, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti, 4-6 Mayıs 2018, pp.350-350.

9. Tezel T., Atlıhan G., Kovan V., Topal E.S., "3B Yazıcı ile Pla Malzemeden Üretilmiş İnce Kirişlerin Yazdırma Yönelim Açısının Doğal Frekansa Etkisi", 3rd International

Congress on 3D Printing Technologies and Digital Industry, Antalya, Türkiye, 19-21 Nisan 2018, pp.154-155.

10. Tezel T., Topal E.S., Kovan V., "Hibrit İmalat: Eklemeli İmalat ile Talaşlı İmalat Yöntemlerinin Birlikte Kullanılabilirliğinin İncelenmesi", 3rd International Congress on 3D Printing Technologies and Digital Industry, Antalya, Türkiye, 19-21 Nisan 2018, pp.156-158.

11. Doğan A., Tezel T., "Investigation of convection heat transfer from porous blocks in a channel", 3rd International Science, Tecnology and Engineering Conference, Dubai, Birleşik Arap Emirlikleri, 13-15 Aralık 2012, pp.710-716.

12. Doğan A., Öney B., Tezel T., "Heat Transfer from Aluminum Foam Blocks in a Horizontal Channel", 2nd International Scientific Conference on Engineering MAT 2012, Antalya, Türkiye, 22-24 Kasım 2012, pp.374-380.

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1. Tezel T., Atlıhan G., Kovan V., Topal E.S., "3B Yazıcı ile Pla Malzemeden Üretilmiş İnce Kirişlerin Yazdırma Yönelim Açısının Doğal Frekansa Etkisi", Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31(1), 123-128, 2019.

2. Tezel T., Topal E.S., Kovan V., "Hibrit İmalat: Eklemeli İmalat İle Talaşlı İmalat Yöntemlerinin Birlikte Kullanılabilirliğinin İncelenmesi", International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 2: 60-65, 2018.

3. Kovan V., Tezel T., Topal E.S., Çamurlu H.E., "Printing Parameters Effect On Surface Characteristics Of 3D Printed Pla Materials", Machines Technologies Materials,12, pp.266-269, 2018.

4. Kovan V., Tezel T., Çamurlu H.E., Topal E.S., "Effect Of Printing Parameters On Mechanical Properties Of 3d Printed Pla/Carbon Fibre Composites", Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations, 9, pp.126-128, 2018.

Projeler

1. Üç Boyutlu Metal Yazıcı Teknolojisi ile Üretilen Metal Dişlilerin Geleneksel İmalat Yöntemiyle Üretilenler Yerine Kullanılabilirliğinin Deneysel Olarak İncelenmesi, BAP Doktora, FDK-2017-2808, Araştırmacı.

2. 3B yazdırılmış PLA malzemelerin yorulma davranışlarının incelenmesi, BAP Araştırma Projesi, FBA-2018-3470, Araştırmacı.

3. Dişlilerde Aşınma Testi İçin Cihaz Tasarımı ve İmalatı, BAP Araştırma Projesi, FBA-2018-2826, Araştırmacı.

