
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ELİPTİK DİŞLİ ÇİFTİ İLE İMAL EDİLEN DEBİMETRE TASARIMI, PROTOTİP İMALATI VE DENEYSEL PERFORMANS TAYİNİ

İbrahim PAZARKAYA

DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

Bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İbrahim PAZARKAYA

26/01/2024

ELİPTİK DİŞLİ ÇİFTİ İLE İMAL EDİLEN DEBİMETRE TASARIMI, PROTOTİP İMALATI ve DENEYSEL PERFORMANS TAYİNİ

(Doktora Tezi)

İbrahim PAZARKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Debimetrelerin tasarım ve imalat parametrelerinin doğru belirlenmesi, ticari ortamlardan temin edilen debimetrelerin beyan edilen özelliklerinin güvenilir olmasını da beraberinde getirmektedir. Bu tez çalışmasında, üç farklı a/b oranı, üç farklı modül ve üç farklı diş sayısına sahip dokuz farklı eliptik dişli çiftine sahip eliptik dişli debimetre üretilmiştir. Akış ölçerlerin kalibrasyon katsayıları, dişli pompa ile tahrik edilen bir deney düzeneği aracılığıyla belirlenmiştir. Akış testlerine göre, akışkan basınçları arttığında tüm akış ölçerler tarafından ölçülen akış hızları azalmıştır. Taguchi L_9 deney setine göre, eliptik düz dişlinin en uygun imalat parametreleri, sinyal-gürültü oranı en büyük en iyi olarak seçildiğinde a/b oranı 1,40, m = 2,50 mm ve z = 40 diş olarak elde edilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre üretilen debimetrelerin R^2 = %98,98 oranında güvenilir olduğu, modülün ölçülen debiye katkı değerinin %65,17 ile en büyük olduğu ve en etkisiz değişkenin %0,95 ile a/b oranı olduğu görülmüştür. Ayrıca üretilen debimetrelerin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modelleri oluşturulmuştur. İmal edilen debimetrelere göre en uygun eliptik dişli parametrelerinin ve ölçülen debi miktarını etkileyen en önemli parametrenin istatiksel olarak belirlenmesinin amaçlandığı çalışmanın yöntemi CFD analizlerine dayandırılmıştır. Akışkan basıncı arttıkça CFD analiziyle hesaplanan debi miktarları azalmıştır. Ölçülen ve CFD analiz sonuçlara göre; ortalama debi değişiminin -%0,0102 olduğu, en büyük değişimin 3,00 MPa basınçta %0,0855 ile Db-03 kodlu, en küçük değişiminse 4,50 MPa basınçta %0,0002 değeriyle Db-02 kodlu debimetrede olduğu görülmüştür. Bütün debimetrelerin ölçülen ve hesaplanan yüzde debi değişimlerine göre imal edilen debimetreler için hazırlanan CFD modellerin tutarlı olduğu göstermiştir. CFD analizleriyle hesaplanan debi miktarlarının R^2=99,00 düzeyinde güvenilir olduğu ve varyans analizi sonuçlarına göre elde edilen debi miktarına en büyük katkıyı %65,25 ile modül değerinin, en az katkıyı ise %0,96 ile a/b oranının sağladığı tespit edilmiştir.

Bilim Kodu	:	91439
Anahtar Kelimeler	:	Eliptik dişli, Fluent, Taguchi, Debimetre, CFD
Sayfa Adedi	:	125
Danışman	:	Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR
İkinci Danışman	:	Dr. Öğr. Üyesi Mehmet YAZAR

FLOWMETER DESIGN MANUFACTURED WITH ELLIPTICAL GEAR PAIR, PROTOTYPE MANUFACTURING and EXPERIMENTAL PERFORMANCE DETERMINATION

(Ph. D. Thesis)

İbrahim PAZARKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

Accurate determination of the design and manufacturing parameters of flowmeters leads to the reliability of the declared characteristics of the flowmeters supplied from commercial environments. In this thesis, elliptical gear flowmeters with nine different elliptical gear pairs with three different a/b ratios, three different modules and three different numbers of teeth have been fabricated. The calibration coefficients of the flowmeters were determined through an experimental setup driven by a gear pump. According to the flow tests, the flow rates measured by all flowmeters decreased when the fluid pressures increased. According to the Taguchi L_9 experimental set, the optimal manufacturing parameters of the elliptical spur gear were obtained as a/b ratio 1.40, m = 2.50 mm, and z = 40 teeth when the signal-to-noise ratio was selected as the largest best. According to the results of the analysis of variance, it was seen that the produced flow meters were reliable with R^2 = 98.98%, the contribution value of the module to the measured flow was the largest with 65.17%, and the most ineffective variable was the a/b ratio with 0.95%. In addition, computational fluid dynamics (CFD) models of the manufactured flowmeters were created. The method of the study, which aims to statistically determine the most suitable elliptical gear parameters according to the manufactured flowmeters and the most critical parameter affecting the measured flow rate, is based on CFD analysis. As the fluid pressure increased, the flow rates calculated by CFD analysis decreased. According to the measured and CFD analysis results, the average flow rate change was -0.0102%, an enormous change was in the flow meter coded Db-03 with 0.0855% at 3.00 MPa pressure, and a minor change was in the flow meter coded Db-02 with 0.0002% at 4.50 MPa pressure. According to the measured and calculated percentage flow rate changes of all flow meters, it was shown that the CFD models prepared for the manufactured flow meters were consistent. It was determined that the flow rates calculated by CFD analysis were reliable at the level of R^2=99.00, and according to the results of the analysis of variance, the most immense contribution to the flow rate obtained was the modulus value with 65.25% and the most negligible contribution was the a/b ratio with 0.96%.

Science Code : 91439
Key Words : Elliptical gear, Fluent, Taguchi, Flowmeter, CFD
Page Number : 125
Supervisor : Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR
Co-Supervisor : Assist. Prof. Dr. Mehmet YAZAR

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bilgi ve deneyimlerini şahsıma aktaran danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR başta olmak üzere, ikinci danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet YAZAR'a, Tez İzleme Komitemde bulunan, değerli bilgi ve deneyimlerini paylaşan Sayın Doç. Dr. Şener KARABULUT ve Sayın Doç. Dr. Gültekin UZUN'a, tez çalışmamı FDK-2021-7425 proje numarasıyla finanse eden Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne, tez çalışmamdan türettiğim akademik yayınların yabancı dil kontrollerini gerçekleştiren Gazi Üniversitesi Akademik Yazma Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne, akış testlerini gerçekleştirdiğim "Uyar Hidrolik San. Tic. Ltd." şirketi sahibi Sayın Necati UYAR'a, debimetre gövdelerinin imalatında destek veren Sayın Murat AY'a, eliptik dişlilerin imalatında destek veren "DES Mühendislik" şirketi sahibi Sayın İbrahim KOŞAROĞLU'na, yüzey pürüzlülük ölçümlerini gerçekleştirdiğim Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mikro İşleme Laboratuvarı sorumlusu Sayın Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ ve Öğr. Grv. Ahmet HASÇELİK'e, manevi desteğini esirgemeyen değerli eşim Mukaddes GEÇİCİ PAZARKAYA'ya ve hayatıma değer katan kızım Nisan PAZARKAYA'ya teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

2.1. Eliptik Dişli Tasarımı ve İmalatı 5

2.2. Eliptik Dişli Debimetrelerin Endüstriyel Uygulamaları 12

2.3. Eliptik Dişlilerin Diğer Uygulamaları 15

3. DEBİMETRE TASARIMI VE İMALATI 19

3.1. Debimetreler 19

3.1.1. Debimetre ölçüm sınıfları 20

3.1.2. Eliptik dişli debimetreler 21

3.2. Akış Kriterleri 24

3.2.1. Laminer akış 26

3.2.2. Türbülanslı akış 26

3.2.3. Reynolds sayısı 27

3.2.4. Kütlenin korunumu 29

3.2.5. Bernoulli ilkesi 29

3.2.6. Eliptik debimetreler için akışkanlar dinamiğinin temelleri 30

3.2.7. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ağ yapısının hesaplama modeli 32

3.3. Tasarım 32
3.3.1. Eliptik dişli tasarımı 33
3.4. İmalat 38
3.4.1. Eliptik dişli imalatı 38
3.4.2. Gövde ve kapak imalatı 39
4. MATERYAL VE METOT 41
4.1. Eliptik Dişlilerin Tasarımı 42
4.2. Eliptik Düz Dişli ve Debimetre Gövdelerinin İmalatı 43
4.3. Eksen Kaçıklık Miktarlarının Belirlenmesi ve Lepleme Operasyonu 45
4.4. Eliptik Dişli Debimetrelerin Ölçtüğü Debi Değerlerinin Belirlenmesi 48
4.4.1. Debi miktarının deneysel olarak belirlenmesi 49
4.4.2. Debi miktarlarının CFD analiziyle belirlenmesi 50
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 55
5.1. Eliptik Düz Dişlilerin Eksen Kaçıklık Miktarlarının Belirlenmesi, Lepleme Operasyonu ve Modül Değerlerinin Ölçülmesi 55
5.1.1. Eksen kaçıklık değerlerinin belirlenmesi 55
5.1.2. Eliptik düz dişlilerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ve kütle kayıplarının belirlenmesi 58
5.1.3. Modül değerlerinin ölçülmesi 61
5.2. Debimetrelerin Ölçtüğü Debi Miktarlarının Belirlenmesi 64
5.2.1. Deneysel olarak ölçülen debi miktarı bulguları 65
5.2.2. CFD analiziyle hesaplanan debi miktarı bulguları 77
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 85
KAYNAKLAR 89
EKLER 95
ÖZGEÇMIŞ 125

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Yaklaşık türbülanslı hız için n değerleri 28

Çizelge 4.1. Eliptik dişli parametrelerinin Taguchi L_9 düzey ve faktörleri 41

Çizelge 4.2. Taguchi L_9'a göre eliptik dişli ve debimetre tasarımları 41

Çizelge 4.3. ST37 ve Alüminyum 6061 malzemelerin kimyasal özellikleri 44

Çizelge 4.4. ST37 ve Alüminyum 6061 malzemelerin mekanik özellikleri 44

Çizelge 4.5. Lepleme parametrelerinin Taguchi L_9 (3^4) göre faktör ve düzeyleri 46

Çizelge 4.6. Taguchi L_9'a göre lepleme operasyonu parametreleri 47

Çizelge 4.7. Hidrolik yağ teknik özellikleri 50

Çizelge 4.8. CFD modellerin ağ yapısının düğüm ve eleman sayıları 53

Çizelge 5.1. Dikey ve yatay konumda eksen kaçıklıklarının yüzde değişimleri (%) 58

Çizelge 5.2. Lepleme öncesi ve sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değerleri. 59

Çizelge 5.3. Modül değerlerine göre en iyi lepleme parametreleri. 59

Çizelge 5.4. Ortalama yüzey pürüzlülüğüne göre varyans analizi 60

Çizelge 5.5. Eliptik dişlilerin lepleme sonrası kütle değişimleri 61

Çizelge 5.6. Lepleme operasyonu öncesi modül değerlerinin ölçümü (mm) 63

Çizelge 5.7. Lepleme operasyonu sonrası modül değerlerinin ölçümü (mm) 64

Çizelge 5.8. Lepleme öncesi ve sonrası modül değerlerinin yüzde değişimleri (%) 64

Çizelge 5.9. Kalibrasyon katsayıları (L) 67

Çizelge 5.10. İmal edilen debimetrelerin varyans analizi 77

Çizelge 5.11. İmal edilen debimetrelerin regresyon analizi. 77

Çizelge 5.12. Ölçülen debi miktarları (m^3/s) 78

Çizelge 5.13. Ölçülen rotor dişli devir sayıları (dev/dk) 78

Çizelge 5.14. Ölçülen ve CFD ile belirlenen debi miktarlarının yüzde değişimleri (%) 82

Çizelge 5.15. Debimetrelerin CFD analizi sonuçlarına göre varyans analizi 84

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. a) Eliptik dişlinin evolvent eğrisinin oluşturulması. b) İmal edilen eliptik dişli çifti 9

Şekil 2.2. a) Yapılandırılan dört eksenli takım tezgâhı şeması. b) Üretilen dairesel olmayan dişli. 10

Şekil 2.3. Dairesel olmayan dişliye sahip IVT şanzıman tipi 16

Şekil 2.4. Eliptik dişliye sahip planet mekanizması 17

Şekil 3.3. Eliptik dişli debimetre gövdesi ve eliptik dişliler 22

Şekil 3.5. Laminer akışın hız profili 26

Şekil 3.9. $c1N1 = r1\theta1$ pozisyon vektörü ve $c1A1$ polar eksen. 33

Şekil 3.10. Analitik çözümün geometrik gösterimi. 34

Şekil 3.11. Evolvent eğrisi oluşumunun geometrik gösterimi. 36

Şekil 3.12. Kremayer kesicinin oluşturduğu evolvent eğrisi. 37

Şekil 3.13. Kremayer kesicinin geometrik gösterimi. 37

Şekil 4.1. Makro programın algoritması. 42

Şekil 4.2. Eliptik dişli çiftleri aktarım şeması 51

Şekil 5.3. Db-01 kodlu eliptik dişli çiftinin dikey konumda eksen kaçıklık miktarı. 56

Şekil 5.4. Db-01 kodlu eliptik dişli çiftinin yatay konumda eksen kaçıklık miktarı. 57

Şekil 5.5. Lepleme öncesi Db-01 kodlu dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum. 57

Şekil 5.6. Lepleme sonrası Db-01 kodlu dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum. 57

Şekil 5.7. Taguchi L9 deney setine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin en küçük en iyi S/N oranı analizi. 60

Şekil 5.8. Süpürülen hacmin geometrik gösterimi. 65

Şekil 5.15. Ölçülen debi miktarının Taguchi L_9 deney setine göre en büyük en iyi analizi S/N oranı 76

Şekil 5.19. CFD analizi sonuçlarına göre Taguchi L_9 deney seti en büyük en iyi analizi S/N oranı 82

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Giovanni Dondi'nin eliptik dişli saat mekanizması..... 6

Resim 2.2. Yeni tip dairesel olmayan dişli 10

Resim 2.3. a) Diş profillerine yerleştirilen kurşun tel. b) Çalışma sırasında yassılaşan kurşun tel..... 11

Resim 2.4. Yakıt sistemi üzerine monte edilmiş eliptik dişli debimetre 13

Resim 3.1. Eliptik dişli debimetre tasarımı..... 33

Resim 3.2. Eklemeli imalatla üretilmiş eliptik dişli çifti. 39

Resim 4.2. Eliptik düz dişlilerin CNC tel erozyon tezgahında kesilmesi. 43

Resim 4.4. Debimetre montajı. 1 – Gövde, 2 – Kapak, 3 – Rotor dişli, 4 – Eliptik düz dişli, 5 – Elektronik devre kutusu, 6 – Manyetik alan sensörü, 7 – Neodyum mıknatıs, 8 –HK102 iğne rulman [71]. 45

Resim 4.5. Lepleme ve eksen kaçıklık cihazı. 46

Resim 4.6. Lepleme macunu..... 47

Resim 4.8. Yüzey pürüzlülük cihazı. 48

Resim 4.10. Debi ölçüm test düzeneği. 1 – Dişli pompa, 2 – Eliptik dişli debimetre, 3 – Kalibrasyon debimetresi, 4 – Manometre, 5 -Tank, 6 – Elektrik motoru..... 50

Resim 4.11. Eliptik dişli çiftlerinin çevrim oranının zamana bağlı UDF kodu 52

Resim 4.12. CFD modellerin ağ yapısı..... 53

Resim 5.3. Bilgisayar destekli tasarım ortamından elde edilen kalibrasyon katsayısı..... 67

Resim 5.4. CFD analiz sonucu..... 78

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Kesit alanı, mm^2
a	Adım elipsinin büyük yarı çapı, mm
α	Eliptik dişli basınç açısı, derece
B	Eliptik dişli yüksekliği, mm
b	Adım elipsinin küçük yarı çapı, mm
c	Ölçüm alınan radyal nokra
D	Boru çapı, mm
dk	Dakika
E	Eksenler arası mesafe, mm
e	Adım elipsinin eksantrikliği
f	Elips üzerindeki noktanın odağa uzaklığı, mm
g	Yer çekim ivmesi, m/s^2
h	Dişlinin diş yüksekliği, mm
h_1	Dişlinin diş başı yüksekliği, mm
h_2	Dişlinin diş dibi yüksekliği, mm
K	Birim başına sinyal sayısı
k	Performans kapsama faktörü
k_s	Kremayer kesicini s. Köşesi
L	Litre
m	Modül, mm
ml	Mililitre
m^3	Metreküp
P	Basınç, Pa
ρ	Akışkan yoğunluğu, kg/cm^3
R	Boru yarıçapı, mm
R_a	Ortalama yüzey pürüzlülüğü, μm
R_e	Reynolds sayısı
rad	Radyan

Simgeler	Açıklamalar
r	Elipsin anlık yarı çapı, mm
r	Elipsin anlık yarı çapı, mm
$R_ü$	Diş üstü elipsinin büyük yarıçapı, mm
R_d	Diş üstü elipsinin küçük yarıçapı, mm
$r_ü$	Diş dibi elipsinin büyük yarıçapı, mm
r_d	Diş dibi elipsinin küçük yarıçapı, mm
r_M	Kremayer kesicini karmaşık koordinatı
S	Adım elipsinin çevre uzunluğu, mm
s	Saniye
t	Zaman, s
V	Akışkan hızı, m/s
V_0	Boru eksenindeki hız, m/s
w	Diş genişliği, mm
Y	Anlık yarı çapın y koordinatı, mm
γ	Teğet doğrunun eğim açısı, radyan
z	Diş sayısı
z	Akışkanın geçtiği kesit yüksekliği, m
X	Anlık yarı çapın x koordinatı, mm
μ	Kinematik viskozite, m^2/s
r_1	Adım elipsinin anlık yarı çapı, mm
β	Süpürülen hacmin kesişim açısı, derece
θ_1	Anlık yarıçapın gerçek eksenle yaptığı açı, derece
ω	Açısal hız, rad/s
n	Devir sayısı, dev/dk
φ	Teğet doğrunun eğim açısı, derece
λ	Bir devirde süpürülen hacim, mm^3

Kısaltmalar	Açıklamalar
CNC	Bilgisayarlı nümerik kontrol
CAD	Bilgisayar destekli tasarım

Kısaltmalar	Açıklamalar
CAM	Bilgisayar destekli imalat
CFD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
CVT	Sürekli değişken şanzıman
Db	Debimetre
DHFLC	Deforme helis ferroelektrik sıvı kristal
FS	Tam ölçek yüzdesi
FSD	Tam ölçekli sapma
FSI	Akışkan Yapı Etkileşimi
FWD	Önden çekişli
IVT	Sonsuz değişken şanzıman
PD	Pozitif deplasmanlı
RWD	Arkadan çekişli
TMC	Taşıma membran kondansatörü
UDF	Kullanıcı tanımlı fonksiyon
WEDM	CNC tel erozyon tezgâhı
4WD	Dört çekişli
2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu

1. GİRİŞ

Günümüzde akışkanların verimli kullanılması adına doğru bir şekilde ölçülmeleri gerekmektedir. Birim zamanda belirli bir alandan geçen akışkanın kütlesel veya hacimsel miktarı debi, bu miktarı ölçen eleman debimetre olarak adlandırılmaktadır. Debimetreler, kütlesel debiyi ölçen ve hacimsel debiyi ölçen debimetreler olmak üzere temelde iki sınıftır. Debimetreler, otomotiv, petrol ve doğalgaz, gıda, termik santraller gibi birçok sektörde kullanılırlar. Örneğin bir aracın motorunda hava – yakıt karışımını ölçen parça bir debimetredir (hava akış metresi), konutlarda kullanılan suyun miktarını belirleyen su saati bir mekanik debimetredir.

Debimetreler özel ve hassas üretilmesi gereken ölçme cihazlarından olup ölçüm düzeneklerine göre elektronik ve mekanik tabanlı olmak üzere de ikiye ayrılır. Elektronik tabanlı olanlar elektromanyetik, ultrasonik gibi akışkanın geçiş hızını belirlemeye yönelik ölçümler yaparlar. Mekanik tabanlı debimetrelerde ise akışkan, debimetre içerisindeki türbin, disk ve dişli gibi makine elemanlarını döndürerek ölçüm gerçekleştirirler. Mekanik tip debimetrelerde dönen elemanın tur sayısı mekanik veya elektronik olarak belirlenmektedir. Mekanik debimetrelerin ulusal düzeyde tasarım ve imalatı yapılabilmekte ve ticari olarak temin edilebilmektedir. Yüksek akış miktarlarını doğru ölçebilen, eliptik dişli çiftine sahip debimetreler; tasarım ve imalatındaki gerekliliklerin fazla olmasından dolayı yerli üreticiler tarafından üretilememekte ve yurtdışından ithal yoluyla temin edilmektedir.

Bu tez çalışmasında mekanik debimetrelerin en yaygın üyesinden olan “Eliptik Dişli Debimetre” setlerinin tasarımları, imalatları yapılmış, deneysel ve bilgisayar destekli akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında yürütülen faaliyetlerle; eliptik çiftlerine sahip mekanik debimetrelerin ulusal düzeyde ilk üretimleri ve analizleri elde edilmiş, bu tip debimetrelerin teorik ve deneysel alt yapısı tümüyle hazırlanmıştır. Eliptik dişli debimetreler içerisinde bir çift eliptik dişli barındırmakta ve bu tip debimetrelerin imalatında en büyük zorluk eliptik dişli çiftlerinin tasarımıyla başlamakta, debimetre gövdelerinin dişlileri dar toleranslara uygun şekilde imalatı ve montajıyla devam etmekte, uzun süreli çalışma sonrasında dahi doğru akış miktarlarını ölçebilir niteliğinin korunması olarak sonlanmaktadır. Bundan dolayı; gereken teknolojik bilgiye ve işleme alt yapısına sahip olmayan birçok ülkeler eliptik dişli debimetreleri ithal etmektedir. Güney Kore gibi bazı

ülkeler, ithalatın önüne geçebilmek adına eliptik dişli debimetre üretimi üzerine AR-GE çalışmaları başlatmıştır. Bu tez çalışmasıyla ulusal düzeyde eliptik dişli imalatının teorik ve pratik altyapısının oluşturulması amaçlanmış ve başarılmıştır.

Çalışma kapsamında Taguchi L_9 deney setine göre doğru debiyi ölçmeye odaklı olarak üretilmiş olan dokuz farklı debimetrenin her biri 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5 MPa akışkan basınçlarında ölçtükleri debi miktarları elde edilmiştir. Debimetreler, en büyük 27 MPa basınca kadar ulaşabilen ve 50 L/dk debiye sahip dişli pompanın bulunduğu test düzeneğinde denenmiş ve numune debimetreler test düzeneğin üzerinde bulunan türbin tip anolog bir referans debimetre aracılığıyla kalibre edilmiştir. Doğru ölçülen debi miktarları esas alınarak en uygun eliptik dişli parametreleri belirlenmiş ve bilgisayar destekli akış analiziyle (CFD) de doğrulama işlemi yapılmıştır. Bununla birlikte, numune debimetrelerde yer alan eliptik dişlilere lepleme işlemi uygulanmış, lepleme öncesi ve sonrası akış ölçümlerine olan değişiklikler tespit edilmiştir. Ayrıca, eliptik dişlilerin tel erozyonla imalatı sonrasında her bir çiftin eksenel kaçıklık değerlerinin belirlenmesine yönelik aparat tasarımı ve imalatı yapılmış, modüler yapıda tasarlanan ve üretilen aparat hem eksenel kaçıklık tespitinde hem de lepleme işlemlerinin yapılmasında çok amaçlı olarak değerlendirilmiştir. Eksen kaçıklık miktarları cihaza bağlı 1 μm hassasiyete sahip dijital komparatör saatinden alınan değerlerin bilgisayar ortamına, geliştirilen bir yazılım aracılığıyla aktarılarak elde edilmiştir. Lepleme işlemiyse cihaz üzerinde bulunan kontrol paneliyle yapılmıştır. Bu kontrol panelinde lepleme işlemi için gerekli olan devir sayısı ve süre bilgileri ayarlanabilmektedir.

Çalışmada, eliptik dişlilerin tasarım parametreleri olarak üç farklı a/b oranı, üç farklı modül ve üç farklı diş sayısı Taguchi L_9 deney setine göre Catia V5 ortamında bir makro program aracılığıyla iki boyutlu çizim yöntemiyle oluşturulmuştur. Eliptik dişliler, 20° kavrama açılı kremayer formlu bir kesicinin adım elipsi üzerinde yuvarlanma yöntemi esas alınarak tasarlanmıştır. Dişilerin CNC tel erozyon tezgahında imalatında, mekanik dişlilerin üretilmesinde yaygın olarak dikkate alındığı tespit edilen DIN 17100 St37 – 2 (EN 10025, ASTM A283, BS 4360 40 A) malzeme tercih edilmiştir. Dişlilerin yüksekliği 20 mm olacak şekilde ham plakanın karşılıklı yüzeyleri taşlanmış ve CNC tel erozyon tezgahında kesilmiştir. Debimetre gövde ve kapakları alüminyum 6000 serisinden üretilmiştir. Debimetreye ait rotor dişlinin devir sayısı ölçebilmek için manyetik alan sensörü üzerinden okuma yapabilen bir elektronik devre kutusu geliştirilmiştir.

Eliptik dişlilerin debi testleri öncesinde eksen kaçıklık miktarları ve yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Debimetrelerin akış testleri Uyar Hidrolik San. Tic. Ltd. Şti 'de bulunan debi test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Her bir debimetrenin belirlenen beş farklı basınç değerine karşılık gelen ölçtüğü debi miktarları manyetik alan sensörlü elektronik devre kutusunun göstergesinden okunup not edilmiştir. Debi ölçüm test düzeneğindeki sınır şartları CFD analizine uygulanarak ölçülen debi miktarları bilgisayar ortamında doğrulanmıştır. Hem ölçülen hem de CFD analiziyle elde edilen debi miktarlarının Taguchi ve ANOVA analizleri soncunda debi miktarına katkı sağlayan eliptik dişli parametreleri ve en uygun eliptik dişli parametreleri tespit edilmiştir. Akış testlerinin ardından eliptik dişli çiftleri belirlenen devir sayısı, süre ve kütle parametrelerine göre lepleme işlemine tabi tutulmuştur. Lepleme işleminden sonra dişlilerin eksen kaçıklık miktarları ve yüzey pürüzlülük değerleri tekrar elde edilmiştir. Lepleme öncesi ve sonrasında oluşan eksen kaçıklık miktarları ve yüzey pürüzlülük değerleri birbirleriyle kıyaslanmıştır. Diğer taraftan dişlilerin eksen arası mesafeleri teorik olarak kusursuz olsa da imalattan kaynaklı hatalara karşı eliptik dişli çiftlerinin eksenel kaçıklık miktarları ölçülmüş, en büyük eksenel kaçıklık miktarları referans alınarak debimetreler içerisinde serbest çalışma göstermesi gereken eliptik dişlilerin yataklar arası mesafesi elde edilmiştir.

Akış testleri sonucunda en iyi eliptik dişli parametreleri; a/b = 1,40, m = 2,50 mm ve z = 40 diş olarak belirlenmiştir. %95 güven aralığında varyans analizi sonuçlarına göre imal edilen debimetrelerin R^2=%95,90 oranında güvenilir olduğu, ölçülen debi miktarına katkı oranının %65,17 ile en etkili değişkenin modül, en etkisiz değişkenin ise %0,95 ile a/b oranı olduğu tespit edilmiştir. Eliptik dişli çiftlerine uygulanan lepleme işleminin, lepleme öncesindeki ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerini yaklaşık %27,64 oranında iyileştirdiği görülmüştür. Lepleme sonrasında elde edilen yüzey pürüzlüğü değerlerine göre ANOVA analizi sonuçları, modül, devir sayısı ve sürenin yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerindeki anlamlı etkisini gösterirken, kütle parametresinin anlamsız kaldığını göstermiştir.

Ulusal düzeyde eliptik dişli debimetrelerin tasarım ve imalatının deneysel ve teorik alt yapısı hazırlanmış, bu tip debimetrelerin üniversite sanayi işbirliği kapsamında milli ve seri üretime geçirilebilecek aşama elde edilmiştir.

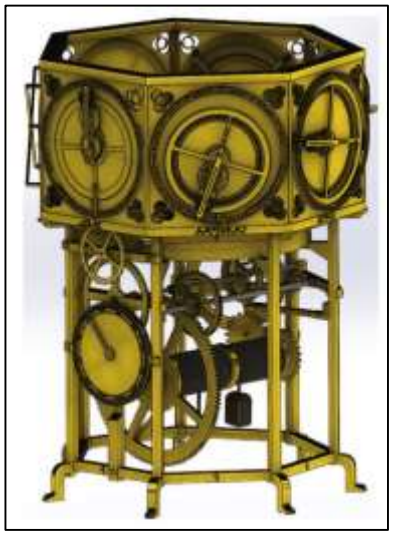
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde eliptik dişlilerle ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların büyük bölümü, eliptik dişlilerin tasarım ve imalatlarıyla ilgilidir. Yapılan çalışmalarda, özellikle eliptik dişlilerin diş profilleri üzerine yapılan çalışmalar öne çıkmaktadır. Bunun nedeni, eliptik dişlilerin diş profillerinin silindirik dişliler gibi özdeş olmamasıdır. Çoğunlukla geliştirilen diş profilini kremayer veya silindirik düz dişli formlu kesici tipiyle bölüm elipsi üzerinde yuvarlamak suretiyle eliptik dişlilerin tasarımları yapılmaktadır. Tasarımı yapılan bu dişlilerin imalatı için ise CNC tel erozyon tezgahlarında kesilmesi yaygınlaşmaktadır. Bununla birlikte azdırma tezgâhları için elektronik dişli kutuları geliştirilerek eliptik dişlilerin standart modülde imalatı mümkün hale gelmiştir. Ayrıca, Eliptik dişli çiftleri birçok makine ve teçhizatta kullanılmaktadır. Özellikle eliptik dişli çiftine sahip debimetre ve pompalar öne çıkmaktadır. Çünkü debimetreler ile akışkan haldeki sıvı ve gazların hassas bir biçimde ölçülmesi mümkündür. Çağımızın en önemli problemlerinden olan enerjinin verimli kullanılması için debimetrelerden alınan veriler kullanılmaktadır. Petrol ve doğalgaz sahalarında, fosil yakıtlar ile elektrik üretim tesislerinde, araçların ve gemilerin yakıt sistemlerinde kullanılan yakıtın ölçülmesinde eliptik dişli çiftine sahip debimetreler kullanılmaktadır. Bununla birlikte bazı ülkeler eliptik dişliye sahip debimetreleri dışarıdan temin ettikleri için yerli üretim debimetreler için çalışmalar yapmaktadırlar.

2.1. Eliptik Dişli Tasarımı ve İmalatı

Bilinen ilk eliptik dişli tasarımına İtalyan saatçi Giovanni Dondi'nin (1330 – 1388) Tractus Astarii isimli el yazmasında Merkür ve Ay'ın yörünge hareketlerini izleyen bir saat mekanizmasında (Resim 2.1) rastlanılmıştır [1]. Eliptik dişliler, Leonardo da Vinci'nin tasarladığı pompa, geneva mekanizmaları, otomatik oyun aletleri, anahtar açma tezgahları ve müzik kutuları gibi mekanik sistemlerde kullanılmıştır [2]. Bununla birlikte eliptik dişliler; debimetre, paketleme, tekstil ve etiketleme makinelerinde de tercih edilmektedir [3]. Eliptik dişlilerin, düzlemsel çubuk mekanizmalarının tahrik unsuru olarak kullanılması özellikle dinamik yük altında daha dengeli, yüksek verimlilikli ve doğruluğa sahip olduğu görülmüştür [4]. Eliptik dişliler hakkında literatürde teorik ve deneysel birçok araştırma yer almaktadır. Bu araştırmalar, kremayer şekilli bir kesici takımla eliptik dişlilerin diş profilleri

bilgisayar programlarıyla oluşturulmuş, diş profilinin alttan kesimi incelenmiş ve evolvent eğrisine sahip dişlilerle kıyaslanmıştır.



Resim 2.1. Giovanni Dondi'nin eliptik dişli saat mekanizması [1].

Eliptik dişlilerin diş profillerinin dizildiği adım elipsinin geometrik eşitliklerinin literatürde ayrıntılı bir biçimde açıklandığı, evolvent yöntemine göre adım elipsi üzerinde yuvarlanma hareketi kesici takımla dişlinin diş profilleri oluşturulduğu ve evolvent yönteminin matematiksel eşitliklerinin önerildiği görülmüştür [5,6].

Eliptik dişliler, odak noktaları etrafında döndürüldüğünde dişler birbirlerini düzgün bir şekilde kavrarlar ve değişken çevrim oranlarında tasarlanırlar. Eliptik dişlilerin adım eğrisi elips şeklinde olduğundan tasarım ve üretimleri zordur [7]. Dairesel olmayan dişlilerin adım eğrilerinin denklemleri sırasıyla şu üç veriyle belirlenmektedir; tahrik dişlisi adım eğirişi, dişlilerin merkezleri arasındaki mesafe ve çıkış fonksiyonu [8]. Dairesel olmayan dişlilerin, kam mekanizmaları ve dairesel dişlilerin avantajlarını sentezlediği ve sürekli değişken çevrim oranıyla mükemmel doğruluk ve yüksek çıkış gücü elde edildiği görülmektedir [9]. Eliptik dişlilerin adım elipslerinin bilgisayar destekli tasarımı ve kinematik analizlerine odaklanan bazı çalışmalar da mevcuttur .[10]. Eliptik dişlilerin tasarım ve üretimlerinde, standart modüllerin tercih edilebilmesi için adım elipsinin çevre uzunluğunun doğru bir şekilde hesaplanması gerekmekte ve bu hesaplamaya yönelik farklı eşitliklerin literatürde yer aldığı tespit edilmiştir [11]. Adım elipsinin çevre uzunluğunun hesaplanması yaklaşık çözümlerle yapılmakta ve en bilinen hesap yöntemi Ramanujan denklemi olarak

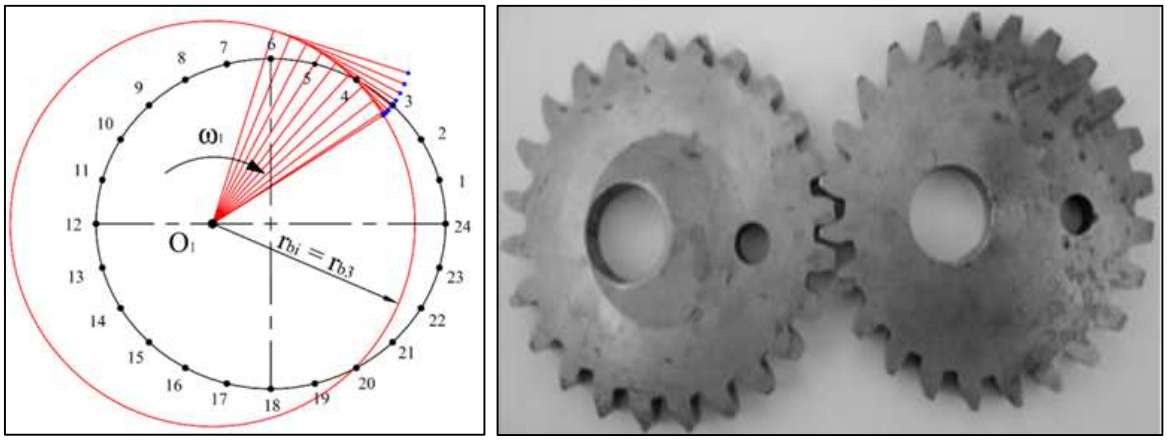
bilinmektedir [12]. Diğer bir yöntem ise analitik yöntemdir. Bu yöntem, adım elipsinin odak noktasından anlık yarıçapların bulunması ve adım eğrisi üzerinde oluşan noktalar arasında kalan sonsuz küçüklükteki doğruların toplanmasıyla elde edilmektedir. Eliptik dişlilerin adım elipsinin çevre uzunluğunun analitik olarak hesaplandığı bir çalışmada [13], analitik yöntemle hesaplanan çevre uzunluğunun, MATLAB ve CATIA V5 paket programları aracılığıyla elde edilen çevre uzunluklarının uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Eliptik dişli tasarımındaki diğer bir problemse, aynı dişlinin tüm dişlerinin yanı sıra aynı dişin diş yan profillerinin arasında da fark meydana gelmesidir. Bu durum, karmaşık matematiksel eşitliklerin dikkate alınmasını ve çözüm için bilgisayar destekli tasarım programlarının kullanılmasını gerektirmektedir [14]. Diş profillerinin oluşturulmasında çoğunlukla silindirik ve kremayer dişli biçimli kesiciler tercih edilmektedir. Bu kesicilerle adım elipsi üzerinde yuvarlanma ve doğrusal kesme hareketiyle diş formları elde edilmektedir. MATLAB paket programıyla diş profillerinin oluşturulması amacıyla bir program geliştirilmiş ve diş profilleri oluşturulmuştur [15]. Bir diğer çalışmada, merkezleri birbirlerine bağlı yay parçalarıyla oluşturulan bir adım elipsi modeli geliştirilmiş ve düz dişli formunda bir kesiciyle eliptik dişli tasarlanmıştır [16].

Silindirik düz dişli diş profili haricindeki değişik tipte diş profiline sahip kremayer kesicilerle adım elipsi üzerinde yuvarlama yöntemine dayalı olarak farklı diş profilli eliptik dişli elde etmek mümkündür. Diş profili çift yay parçası olan helisel dişlilerin matematiksel eşitlikleri geliştirilmiş, anlık temas elipsleri analiz edilmiş ve kinematik hatalar dikkate alınmıştır [6]. Diğer bir çalışmada dış bükey – içbükey yaylı diş profilli bir kremayer kesiciyle yuvarlanma yöntemine göre eliptik dişliler tasarlanmış ve matematiksel denklemleri gösterilmiştir. Bu diş profiline sahip eliptik dişlilerin, evolvent diş profilli dişlilere göre tahrik kapasitesinin daha büyük olduğu beyan edilmiştir [17]. Eliptik dişlilerin diş profillerinin oluşturulabilmesi için bilgisayar destekli tasarım ortamında, makro programlar sayesinde istenilen diş sayısı ve modülde eliptik dişliler oluşturmak kolay hale gelmiştir. Çift basınç açısına sahip kremayer kesici formlu bir kesiciyle simetrik olmayan diş profilli dairesel olmayan dişlinin elde edildiği çalışmada, kremayer kesicinin adım elipsi üzerinde yuvarlanma durumunun matematiksel eşitliği ortaya koyulmuştur [18]. AutoCAD paket programı yardımıyla literatürdeki eşitliklerden faydalanılarak istenilen diş sayısı ve modülde eliptik dişli oluşturabilen bir LISP programı [19–21] geliştirilmiştir. Bu programla beş farklı eliptik dişli tasarlanmış, CNC tel erozyon tezgâhında kesilmiş ve bu dişliler bir

pompada çalıştırılmıştır. Pompanın rotor dişlisinin devir sayısı artışının pompalama basıncını artırdığı ve rotor dişlinin 40 dev/dk'da oluşturduğu basıncın 4 bar, 175 dev/dk'da ise 10 bar olduğu tespit edilmiştir [22]. Eliptik dişliler üzerine çalışmaların yoğunlaştığı diğer bir alan adım eğrisinin düzenlemesine yönelik matematiksel eşitliklerin oluşturulmasıdır. Eliptik dişli çiftlerinin kasıntısız çalışmasına yönelik adım elipsini deforme edilerek adım eğrisinin şeklini ve dişli çevrim oranının ayarlanmasını kolaylaştıran matematiksel model sunulmuştur. Parçalı deforme eliptik dişliler ile eliptik dişliler ailesi arasındaki iç ilişki analiz edilmiştir. Son olarak, geliştirilen CAD sistemi yöntemi de sunulmuştur [23]. Diğer bir çalışmada sikloid diş profiline sahip eliptik dişli çiftinin tasarımında alttan kesmeyi önlemek için hesaplama yöntemi geliştirilmiş ve CNC freze tezgahında üretilmiştir. Eksantrik eliptik dişli çiftinin merkez ucunun matematiksel bir modeli oluşturulmuştur. Eksantrik eliptik dişlinin diş profilini tanımlayan matematiksel denklem geliştirilmiş ve bir sikloid profile sahip kremayer kesici tarafından yuvarlanma yöntemine göre oluşturulmuştur. Bu dişlilere ait MATLAB yazılımı ve tasarım için sayısal bir program yazılmıştır. Araştırmanın uygulanabilirliğini göstermek amacıyla üç eksenli bir CNC freze tezgâhında bir çift eksantrik eliptik dişli üretilmiştir. Deneysel olarak üretilen dişlilerin, çıkış milinin giriş miline göre 0,33 - 3 kat arasında değişken bir hız ve tork aralığına sahip olduğu ve geleneksel dairesel dişlilerden ve geleneksel dairesel olmayan dişli çiftlerinden farklı kıldığı beyan edilmiştir [24].

Eliptik dişlilerin çevrim oranlarının rijitliğinden dolayı farklı tip eliptik dişliler tasarlanmış, değişken çevrim oranına sahip şanzımanlarda kullanılmış ve kinematik analizleri yapılmıştır [25, 26]. Çevrim oranları 0,5; 1 ve 2 olan sürekli değişken çevrim oranına sahip bir şanzıman için bir çift özdeş eliptik dişli ve adım elipsinin tasarım prosedürünün önerildiği diğer bir çalışmada, dişlilerin dönme merkezlerinin, adım elipsi odaklarıyla çakıştırmak amacıyla eliptik dişliler eksantrik olarak konumlandırılmış ve dişlinin diş profilleri asimetrik olacak şekilde üretilmiştir (Şekil 2.1). Ayrıca değişken çevrim oranlı şanzımanın, sabit çevrim oranlı şanzımanla arasındaki farklılıklar ve kinematik yapıları tartışılmıştır [27]. Bir diğer çalışmada, ProE ortamında adım adım elipsinin çizim yöntemi ortaya koyulmuş ve farklı eksantrikliklere sahip eliptik dişli modellenmiştir [28]. Bu eliptik dişlilerin ADAMS paket programında simülasyonları yapılmış ve dişlilerin hareket özellikleri tartışılmıştır. Bununla birlikte bu eliptik dişlilerin bir debimetrede kullanılabileceğini, eksantriklikleri farklı olan eliptik dişlilerin süpürdükleri hacimlerin belirlenebileceği ve eksantriklik aralığına göre uygun eliptik dişli çiftinin önceden imal edilebileceği ortaya koyulmuştur [28].



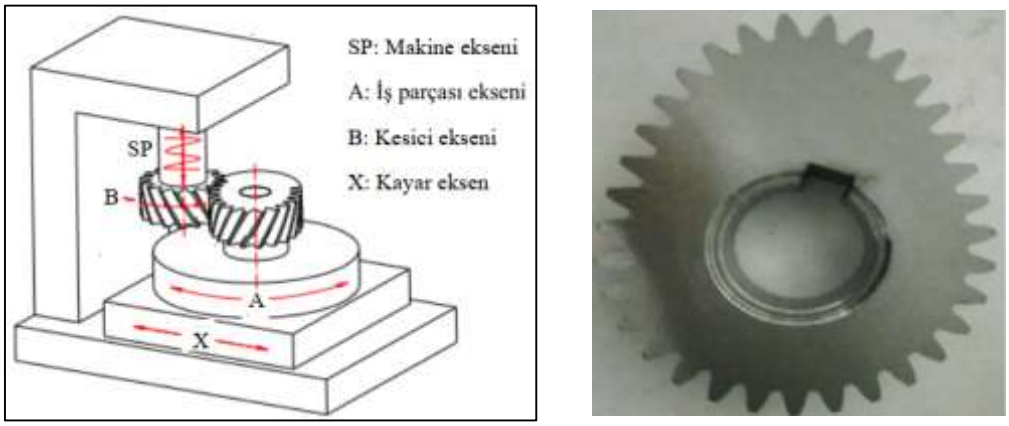
(a) (b)

Şekil 2.1. a) Eliptik dişlinin evolvent eğrisinin oluşturulması. b) İmal edilen eliptik dişli çifti [27].

Literatürde eliptik dişlilerin imalat yöntemleri tartışılmış ve dairesel olmayan dişliler iyi bir şekilde üretilebilmiştir [29]. Farklı imalat yöntemleriyle hem iç hem de dış dişliler için kullanılabilen, kesicinin yarıçapına göre adım ayarlanabilmekte ve alttan kesme kusurunu giderebilen dişli üretmenin, eliptik dişli imalatında uygun olduğu benimsenmektedir [30], [31]. Dairesel olmayan dişli işlemeyle ilgili, bilgisayarlı diş profili hesaplanması ve alttan kesme kusurunun analiziyle dairesel olmayan dişli üretiminin matematiksel eşitlikleri açıklanmıştır [32]. Düz dairesel olmayan dişlinin teorik ve pratik süreci tartışılmış, dairesel olmayan iç ve helis dişlilerin imalat süreci genelleştirilmiş ve her tür dairesel olmayan dişlinin üç eksenli bir takım tezgahında üretimi gerçekleştirilmiştir [33, 34]. Yakın zamanlarda farklı özelliklere sahip bir yuvarlanma yöntemi önerilmiş ve dairesel olmayan dişlilerin seri olarak üretilebilmesi için bir makine geliştirilmiştir [35].

Eliptik dişli imalatı hem geleneksel hem de geleneksel olmayan yöntemlerle üretilebilmektedir. Geleneksel yöntemlerde dişli üretim tezgahlarına ek aparat ve elektronik donanımlar eklenmesi gerekmektedir. Diğer taraftan eliptik dişliler geleneksel olmayan imalat yöntemi olan CNC tel erozyon tezgahlarında kesilerek imal edilebilmektedir. Dişli üretiminde, geleneksel takım tezgahları azdırma, Fellow ve Magg yöntemlerinden birisiyle dişli şekillendirme yapmaktadır [36]. Dairesel olmayan dişlilerin adım eğrilerinin normalleri imalat sırasında sürekli değişken olduğundan, kesici takımla iş parçasının adım eğrisi arasında açı meydana gelmektedir. Bu durum kesici takamın işleme sırasında geri kaçmasına sebep olmaktadır. Kesici takımın geri kaçmasını engellemeye yönelik yapılan bir çalışmada, bir Fellow tezgahı dört eksenli ve programlanabilir hale dönüştürülmüş, tezgahın

matematiksel modelli ortaya koyulmuş ve dairesel olmayan dişli imalatı gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.2) [37].



(a) (b)

Şekil 2.2. a) Yapılandırılan dört eksenli takım tezgâhı şeması. b) Üretilen dairesel olmayan dişli [37].

Yüzey frezeleme yöntemiyle imal edilen spiral konik dişli üretim süreci dairesel olmayan dişlilere uyarlanmış ve yeni bir dairesel olmayan dişli türü imal edilmiştir. Bu yeni tip dairesel olmayan dişlinin dişleri doğrusal değil yay şeklinde oluşturulmuştur (Resim 2.2). Yay biçimli diş şekli sayesinde helisel dairesel olmayan dişlilere kıyasla daha yüksek temas oranı ve küçük eksenel kuvvet meydana geldiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte yeni tip dairesel olmayan dişlinin çalışma sırasında, diş profillerinin iç bükey kısmında yağ tutmasından dolayı daha fazla yağlama yaptığı beyan edilmiştir [38].



Resim 2.2. Yeni tip dairesel olmayan dişli [38].

Literatürde azdırma tezgahında eliptik dişlilerin imalatlarıyla ilgili araştırmalar bulunmaktadır. Bu araştırmalar azdırma tezgahında eliptik dişli imalatı sırasında oluşan bağlantı modelleri, interpolasyonlar ve kesicinin talaş derinliğine doğru ek hareketi üzerine olduğu saptanmıştır. Azdırma tezgahında dairesel olmayan dişlilerin üretilebilmesi için birden fazla eksenin zamanla değişen hız oranlarının korunabilmesine bağlıdır. Elektronik dişli kutuları bu hız oranlarının korunmasını sağlayabildiği görülmüştür [39 – 42]. C eksenli CNC torna tezgahında, küresel uçlu kesici takımla konik dairesel olmayan dişli çiftinin üretildiği bir çalışmada; imalatı yapılan dişlilerden birisinin üzerine Resim 2.3'te gösterildiği gibi kurşun tel parçaları yerleştirilmiş ve dişlilerin çalışmasıyla düzleşen kurşun tellerin toplam et kalınlığı dişlilerin çalışma boşluğu olarak kabul edildiği belirlenmiştir [43].



(a) (b)

Resim 2.3. a) Diş profillerine yerleştirilen kurşun tel. b) Çalışma sırasında yassılaşan kurşun tel [43].

Modern sanayide, mekanik güç aktarımı yüksek doğrulukta istenmektedir. Bu nedenle eliptik dişlilerin diş profillerinin taşlanması gerekmektedir. Özellikle ısıl işlem sonrası dişlilerin diş profillerinin yüzey pürüzlülüklerinin en aza indirilmesi gerekliliğinden dolayı dişli taşlama operasyonu yapılmaktadır. Taşlama taşının özelliklerini dişli taşlama tezgâhı, taşın formu ve özellikleriyle tespit edilmektedir. Dişli taşlama işlemi, azdırma tezgâhında azdırma frezesi yerine taşlama taşı bağlanarak yapılmaktadır [36]. Ancak eliptik dişlilerin taşlanmasıyla ilgili bilgi sınırlıdır. Eliptik dişlilerde her bir dişin diş yan profilleri birbirinden farklı olduğundan dolayı bu tür dişlilerin taşlanabilmesine yönelik matematiksel model oluşturulmuştur. Bu matematiksel model, diş profiline göre konumlama analizi, hareket oluşturma ve her bir diş için uzunluk eşitliği geliştirilmiş ve CNC konik dişli taşlama tezgâhında eliptik dişlilerin taşlanabileceği gösterilmiştir [44].

Dairesel olmayan dişlilerin imalat yöntemlerinden birisi de CNC tel erozyon (WEDM) tezgâhında kesilmesidir. CNC tel erozyonda kesmenin avantajı standart modüllerin yanı sıra standart olmayan modüllerdeki dişlilerin de üretilebilmesidir. Tel erozyonda dairesel olmayan dişli kesimi için yenilikçi bir metot geliştirilmiştir [45]. WEDM yöntemiyle üretim yapabilmek için bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli imalat (CAM) ortamlarından faydalanılmaktadır. Eliptik dişli üretimine yönelik, AutoCAD bünyesinde bulunan AutoLISP programlama diliyle bir makro program yazılmış, makro programla 5 farklı diş sayısı ve modülde eliptik dişli çiftleri oluşturulmuş ve WEDM ile üretilmiştir. Üretilen dişlilerin ANSYS paket programında doğal frekansları elde edilmiş, eksen kaçıklıkları bir deney setiyle belirlenmiş ve eksen kaçıklık miktarının 5,6 μm olduğu ortaya koyulmuştur [19]. WEDM yönteminin, dairesel olmayan dişli imalatında diğer imalat yöntemlerine göre daha kötü olmadığı beyan edilmiş, yüzey kalitesinde bozulma ve dişli malzemesinin mikro yapısında değişim olmadan dişli imal edilebileceği tespit edilmiştir [46]. Ayrıca eliptik dişlilerin eklemeli imalat (3D yazıcı) yöntemiyle de üretildiği literatürde görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü R_a = 1,6 μm ve 0,01 köşe radyusuna sahip eliptik dişli eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş ve SolidWorks paket programında döndüren dişlinin açısal hızı 100 rad/s ile hareket analizi gerçekleştirilmiştir. Döndürülen eliptik dişlinin 12. dişte ve 50 rad/s ile en küçük açısal hızı olduğu tespit edilmiştir [27].

Azdırma tezgahında eliptik dişli imalatına yönelik yapılan bir çalışmada, eliptik dişlilerin adım eğrisinin her bir açısal konumunda azdırma frezesi üzerinde oluşan kesme kuvveti dalgalanmaları ve adım eğrisinin doğruluğu incelenmiş ve birim kesme kuvveti katsayısı yöntemine dayanarak, azdırma kuvvetinin dalgalanma eğilimini karakterize etmek için kesintili kesme ile üretilen deforme olmamış talaş hacmi kullanılmıştır Sabit yay uzunluğu artışlı azdırma modelinin kesme kuvveti dalgalanması üzerinde, özellikle de büyük eğrilik yarıçapına yakın kesme kuvveti dalgalanması üzerinde önemli bir bastırma etkisi olduğu sonucuna varılmıştır [47].

2.2. Eliptik Dişli Debimetrelerin Endüstriyel Uygulamaları

Eliptik dişlilerin tercih edildiği alanlardan birisi de pompa ve debimetre rotorlarıdır. Literatürde eliptik dişli rotorlu debimetreler hakkında ayrıntılı çalışma ihtiyacına rağmen, çok az sayıda araştırma bulunmaktadır. Akış analiz çıktılarının değerlendirmek ve doğrulamak amacıyla akış görselleştirilmesi üzerine yapılan bir araştırmada, eliptik dişli

debimetrenin, debi miktarı üzerinde etkili olan parametrenin rotor devri olduğu, debimetre gövdesi ve rotor dişli arasındaki boşluğun hassas olarak ayarlanması gerektiği belirlenmiştir. Eliptik dişli debimetrenin iç akış alanı hakkında FSI (Akışkan Yapı Etkileşimi) analiziyle, rotorun her hangi bir noktasındaki basınç ve açısal hızında periyodik değişimler olduğu ve gerçek debimetreyle akış görselleştirmeyle elde edilen akış alanının uyumlu olduğu görülmüştür [48]. Diğer bir çalışmada, pompa ve debimetrelerin çalışma esnasında oluşan akış dalgalanmalarını azaltmak amacıyla yapıldığı tespit edilmiştir [49]. Pompanın rotor dişli miline ve tahrik motoruna ayrı bir çift eliptik dişli takılmış ve pompa bu şekilde çalıştırılmıştır. Harici olarak takılan eliptik dişli çifti sayesinde, eliptik dişli pompanın büyük genlikli ve düşük frekanslı akış şiddetinin teoride ortadan kaldırılabilir olduğu belirlenmiştir [49].

Eliptik dişli debimetreler, doğalgaz, petrol gibi enerji kaynaklarının ve enerji tüketiminin belirlenmesinde sıklıkla tercih edilmektedir. Mekanize tarımda az enerji harcanması ve makine performansının artırılması amacıyla yapılan çalışmada, bir traktörün yakıt sistemine eliptik dişli debimetre eklenerek (Resim 2.4), dört çekişli (4WD), arkadan çekişli (RWD) ve önden çekişli (FWD) traktörün, toprak işleme sırasında performans ve yakıt tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiştir [50].



Resim 2.4. Yakıt sistemi üzerine monte edilmiş eliptik dişli debimetre [50].

Benzer şekilde deniz taşıtlarının bilimsel olarak enerji tüketimlerinin belirlenmesi, enerji harcama yönetim sistemlerinin kurgulanmasında önemli bir rol oynamakta ve rutin motor

bakımlarının yapılabilmesi için geminin seyahat halinde olduğu sürece yakıt tüketiminin doğru olarak ölçen, iyileştirilebilir ve kapsamlı bir sisteme ihtiyaç duymaktadır [51]. Deforme Helis Ferroelektrik Sıvı Kristalin (DHFLC) özelliğinden istifade edilerek eliptik dişli debimetre ağına küçük voltaj sinyalleri, pasif ve doğrusal olarak iletmek için kullanıldığı tespit edilmiştir [52]. Birden fazla sensörden elde edilen sinyaller tek bir fiber optikte çoğaltılmış ve pozitif deplasmanlı (PD) oval dişli debimetreyi, kısa aralıklarla darbe üretmek için manyetik anahtarlama olabilme yönüyle tercih edilmiştir. Çok küçük akışlar da dahil olmak üzere, tüm debi miktarlarında hatasız akış iletimi sağlandığı belirlenmiştir [52]. Konsantre güneş enerjisi (CSP) santralleri üzerine yapıldığı, su kaynaklarının az olduğu bölgelerde veya sistemin verimliliğini etkileyen kuru soğutmalı sistemlere gereksinim duyulmaktadır. Güneş enerjisi tesislerinin devamlılığını sağlamak amacıyla hibrit soğutma sistemleriyle düşük su tüketimi ve yüksek verimlilikte bir çözüm geliştirildiği literatürde tespit edilmiştir [53].

Fosil yakıtlarla elektrik üretimi dünyada oldukça yaygındır. Kömürün yanmasıyla oluşan baca gazında su buharı ve ısı çok fazla bulunmaktadır [54]. Bu gazdaki su ve ısının geri kazanımı, su kıtlığı ve yüksek enerji gereksinimine karşı bir çözüm olabilir. Son yıllarda bir çok araştırmada, taşıma membran kondansatörünün (TMC) meydana getirdiği baca gazından su ve ısı geri kazanımı üzerine deneysel çalışmalar ve sayısal simülasyonlar yapılmıştır [55]. Isı ve kütle transferine dayalı, taşıma TMC uzay-durum modeli geliştirilmiş ve deneysel olarak doğruluğu kanıtlanmıştır. Baca gazı bir fan yardımıyla tahrik edilmiş, eliptik dişli debimetreyle (90 – 900 ml/dak, hassasiyet: ± %0,5) ve gaz kütle debimetre (0 – 40 L/dk, hassasiyet: ± %1) sırasıyla su ve gaz debileri ölçülmüştür [56].

Çok fazlı debimetreler (MPFM), gaz ve petrol üretim verimini üst düzeye çıkarmak amacıyla önemli veriler sağlar. Çok fazlı akış ölçümündeki son bulgular ve karşılaşılan zorlukları, petrol debisinin ölçüm uygulamalarında türbin debimetreler yerine PD eliptik dişli debimetrelerin kullanılabileceği görülmüştür [57]. Çok fazlı debimetreler üzerine yapılan bir diğer çalışmada, su – yağ iki fazlı debiyi ölçmeye yönelik bir eliptik dişli debimetre ve ventüri akış ölçeri birleştiren hibrit debimetre tercih edilmiştir [58]. Hibrit debimetrenin, toplam hacimsel debi, kütlesel debi ve yoğunluk bakımından su – petrol iki fazlı debi ölçümü için uygun olduğu ve hibrit debimetrenin Coriolis debimetrelerine göre az maliyetli bir seçenek sunduğu görülmüştür [58].

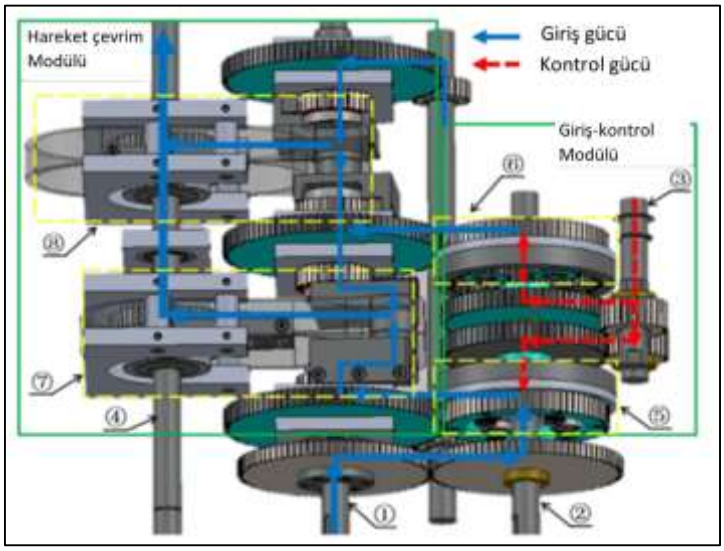
Dünya nüfusunun artmasıyla birlikte üretim sektörlerindeki çeşitlenme, enerji ihtiyacında büyük bir artmaya neden olmuştur. Bu enerji ihtiyacının artmasına örnek olarak, bir frigorifik kamyona soğutma ünitesi geliştirilmiş, dondurma ve iklimlendirme özelliklerini belirlemek amacıyla CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri gerçekleştirilmiş ve soğutma ünitesinin, hava debisini tespit etmek amacıyla yüksek hassasiyetli eliptik dişli debimetreler, hava debisini ölçebilecek konumlara yerleştirilmiştir [59].

Birçok ülke eliptik dişli debimetreleri yerli imkanlarla üretmek istemektedir ve araştırmalar ulusal düzeyde artış göstermektedir. Bu amaçla, Güney Kore dışa bağımlı olduğu eliptik dişli debimetre imalatını, yerli teknolojisini geliştirmek ve teknik becerilerinin dışa bağımlılığını azaltmak amacıyla yapmışlardır. Çalışmada 30˚ basınç açısına sahip eliptik dişlilerin dişlerinin çakıştığını, daha büyük basınç açılarındaysa diş dibinin geniş, diş üstününse sivri olduğunu tespit etmişler ve eliptik dişli tasarımlarını 2D ve 3D tasarım programlarında doğrulamışlardır [60].

2.3. Eliptik Dişlilerin Diğer Uygulamaları

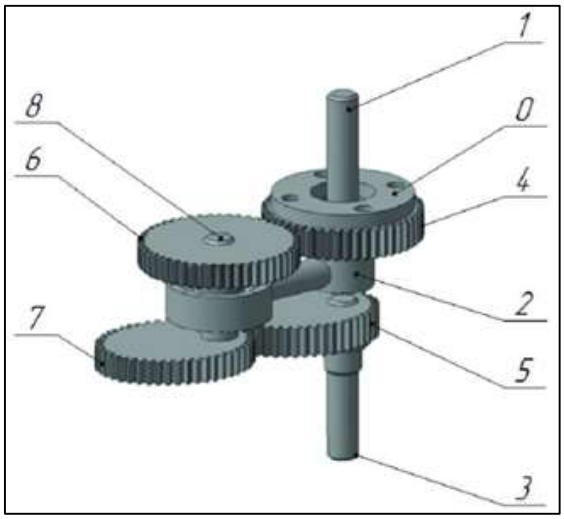
Silindirik dişliler, otomotiv, makine imalat ve madencilik sektörü gibi değişik alanlarda, şanzıman ve redüktörlerde güç ve hareket iletimine yönelik işlevi yerine getiren makine elemanlarıdır [61]. Bu tip şanzıman ve redüktörler, belirli bir çevrim oranına göre belirli sayıda dişli çiftleriyle sabit çevrim oranlarında güç ve hareket iletmek amacıyla tasarlanmıştır. Sabit çevrim oranına sahip dişli çiftleri şanzıman ve redüktörlerde çevrim oranı aralıklarını sınırlamakta ve düşük verimliliğe neden olmaktadır [62]. Bu nedenden dolayı değişken çevrim oranlarına sahip diğer bir şanzıman türü olan sürekli değişken şanzımanlar (CVT); hız kutularının sürekli değişebilen giriş ve çıkış çevrim oranları sıfır ile tanımlanan çevrim oranını sağlayabilen sonsuz değişken şanzımanlar (IVT) geliştirilmiştir [63]. Eliptik dişliler, istenilen hareket dönüşümü nedeniyle, değişken çevrim oranlarıyla tasarlanabilen dairesel olmayan dişlilerin en yaygın üyesidir [64]. CVT ve IVT tipindeki şanzımanlarda ve redüktörlerde tercih edilmektedir. IVT tipi bir şanzıman için eliptik adım eğrisine dayanan dairesel olmayan dişli tasarlanmış ve bu dişli çiftinin güç kaybı incelenmiştir. Tasarlanan dairesel olmayan dişliye sahip IVT şanzıman Şekil 2.3'de gösterilmiştir [7]. Şekil 2.3'de prototipi üretilen IVT şanzımanın kısımları; giriş mili 1, ikinci giriş mili 2, kontrol mili 3, çıkış mili 4, birinci planet dişli sistemi 5, ikinci planet dişli sistemi

6, birinci Scotch Yoke mekanizması 7, ikinci Scotch Yoke mekanizması 8 numara ile gösterilmiştir [7].



Şekil 2.3. Dairesel olmayan dişliye sahip IVT şanzıman tipi [7].

Eliptik dişliye sahip mekanik bir sistemde, dönme hareketini karşılıklı dönme hareketine çeviren bir planet mekanizması tasarlanmış ve kinematik analizi gerçekleştirilmiştir. Mekanizmanın eliptik ve düz dişlilerden oluşmasından dolayı klasik planet dişli mekanizmalarına göre güvenilir ve kompakt olduğu tespit edilmiştir. Mekanizmanın sondaj kulelerinde, karıştırmalı tanklarda, içten yanmalı motorlarda, takım tezgahlarında ve karşılıklı dönme hareketinin içeren cihaz ve makinelerde uygulanabileceği belirlenmiştir [65]. Şekil 2.4'de flanş 0, giriş mili 1, taşıyıcı 2, çıkış mili 3, güneş dişli 4, eliptik dişli 5, çıkış miline güneş dişliden hareketi veren düz dişli 6, planet eliptik dişli, mil 8 olarak gösterilmiştir [65].



Şekil 2.4. Eliptik dişliye sahip planet mekanizması [65].

Eliptik dişli tercih edilen bir tohum ekme mekanizmasının titreşiminin incelendiği bir çalışmada, fide itme cihazının neden olduğu titreşim, ekim performansını ciddi ölçüde düşürdüğünden dolayı ekim mekanizmasının yapısı ve çalışma süreci analiz edilmiştir. Uygun çalışma hızını, karşı ağırlık kütlesini ve yay sertliğini belirlemek amacıyla ekim mekanizmasının titreşim performansını optimize etmek için ortogonal bir test tasarımı uygulanmıştır. Optimizasyon sonuçları, son olarak ekim kalitesi simülasyonu ve tezgâh testi ile doğrulanmıştır. Çalışmanın sonucu, çalışma hızı 250 dev/dak, karşı ağırlık kütlesi 0,9 kg ve yay sertliği 140 N/m olduğunda, mekanizmanın çalışma performansının ve ekim etkisinin en iyi olduğunu gösterdiği tespit edilmiştir [66].

Eliptik dişlerin bireysel tasarımı, bilgisayar destekli dayanım ve/veya titreşim analizlerine yönelik çok sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Muhtelif mekanizma ve ürünlerin bünyesinde yaptığı görev itibarıyla da çeşitli çalışmalara eliptik dişlilerin maruz kaldığı anlaşılmaktadır. Bu çalışma kapsamında mekanik bir debimetre ürünü esas alınmıştır. Bu ürün bazlı yapılan taramalarda ticari ortamlarda verilen kapasite teknik verilenin dışında başka bir bilginin ve teknolojinin literatürde yer almadığı görülmüştür. Doğru akış miktarını ölçebilen bir debimetrenin tasarımı ve imalatı üzerine uluslararası literatürde alt yapı çalışmasının yer almadığından hareketle; hem ölçme testlerinden güvenilir ve geçerli sonuçlar verebilecek hem de deneysel ve bilgisayar destekli akış analizlerinden doğrulanmış bulguların elde edilebildiği eliptik dişli çiftine sahip mekanik bir debimetrenin çalışılması uygun görülmüştür.

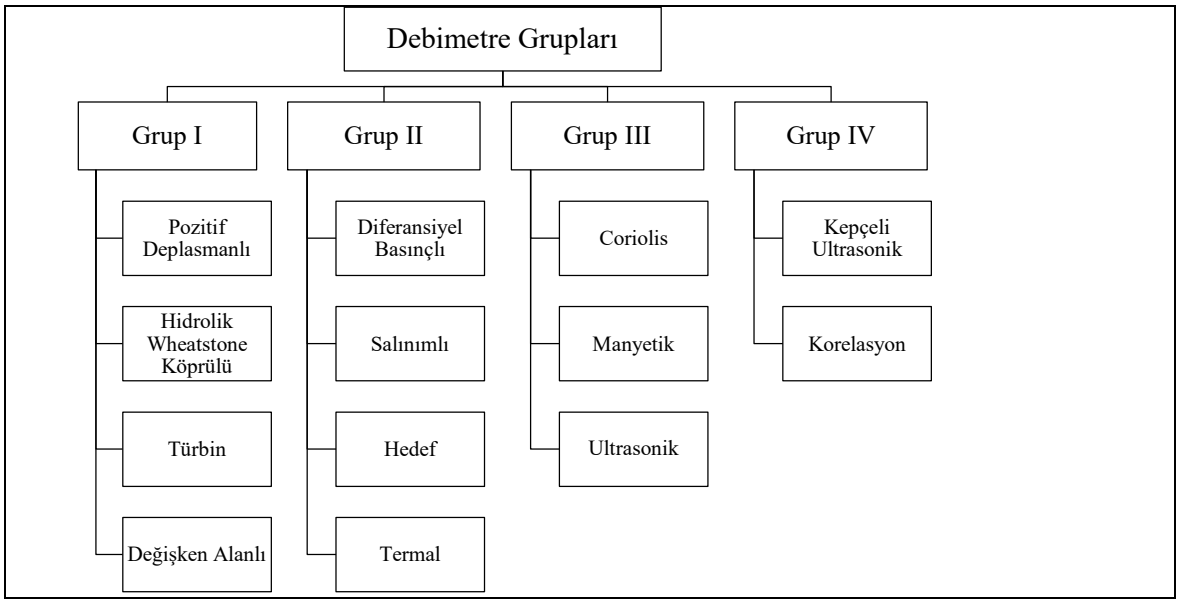
3. DEBİMETRE TASARIMI VE İMALATI

Debimetre ya da akış ölçer; tesisat içerisinde bulunan akışkanın kütlesel veya hacimsel olarak birim zamanda geçen akışkan miktarını ölçen cihazlardır. Diğer bir tanımla, debimetreler genellikle bir elektrik sinyali biçiminde, belirsiz akış hızlarını ölçmeye yarayan eleman olarak adlandırılmaktadır. Akışkanın geçtiği boru tesisatı ve çalışma ortamı bu sinyalden ihmal edilebilir düzeyde etkilenmektedir.

3.1. Debimetreler

Debimetrelerde akış ölçümü için çeşitli prensipler kullanılsa da bazılarının ölçüm prensipleri temelde aynıdır ancak debimetre seçiminde bazı faktörlerin tanımlanması gerekir. Bu nedenden dolayı debimetreler sınıflar halinde gruplandırılabilir (Şekil 3.1). Bu gruplandırma şu şekildedir [67];

- Akışkanla temas halinde hareketli parçalara sahip olan debimetreler
- Akışkanla temas halinde hareketli parçası olmayan debimetreler
- Engelsiz debimetreler
- Boru dışına monte edilmiş debimetreler



Şekil 3.1. Debimetre grupları [67].

Grup I debimetreler debi miktarlarını ölçebilmek için hareketli parçalara sahiptirler. Bu parçalar yüksek toleransa sahip olarak üretilirler. Diğer taraftan bu parçalar aşınmaya ve hasara maruz kalırlar. Bu tipteki debimetreler teorik olarak cazip olmasa da tesisata uygun bir şekilde montajı yapıldığında ve iyi bir şekilde kalibre edildiğinde mükemmel olduğu kanıtlanmıştır. Ancak bu debimetreler temiz akışkanlar dışında kullanılmazlar [67].

Grup II debimetreler sabit parçalara sahiptirler. Bu parçalar delikli bir plaka olabileceği gibi farklı giriş ve çıkış çaplarında üretilmiş boru da içerebilirler. İşlenmiş yüzeylerin aşınmadan kaynaklı tolerans kaybı olması durumunda ölçülen debi miktarlarında belirsizliğe neden olurlar. Ancak hareketli parçalar kullanmamaları bir avantajdır. Temiz akışkanlar dışında kalan sıvıların debi miktarları bu tip debimetrelerle ölçülebilir. Bununla birlikte çok kirli akışkanlar ve çok aşındırıcı sıvılar uzun vadede aşınma sorunlarına neden olurlar [67].

Grup III debimetreler genellikle hareketli parçası olmayan akış ölçerlerin bir alt kümesidir. Bu tip debimetrelerin avantajı, kirli akışkan ve aşındırıcı olsa bile tesisata uygun şekilde montajı yapıldığında uzun ömürlü olmasıdır [67].

Grup IV debimetreler genellikle engelsiz debimetrelerin alt kümesidir. Bu tip debimetrelerin avantajı, engelsiz olmaları, akışkanla temas etmemeleri ve tesisata harici olarak bağlandığından dolayı debi ölçümü tesisat üzerinde herhangi bir yerden yapılabilmesidir [67].

3.1.1. Debimetre ölçüm sınıfları

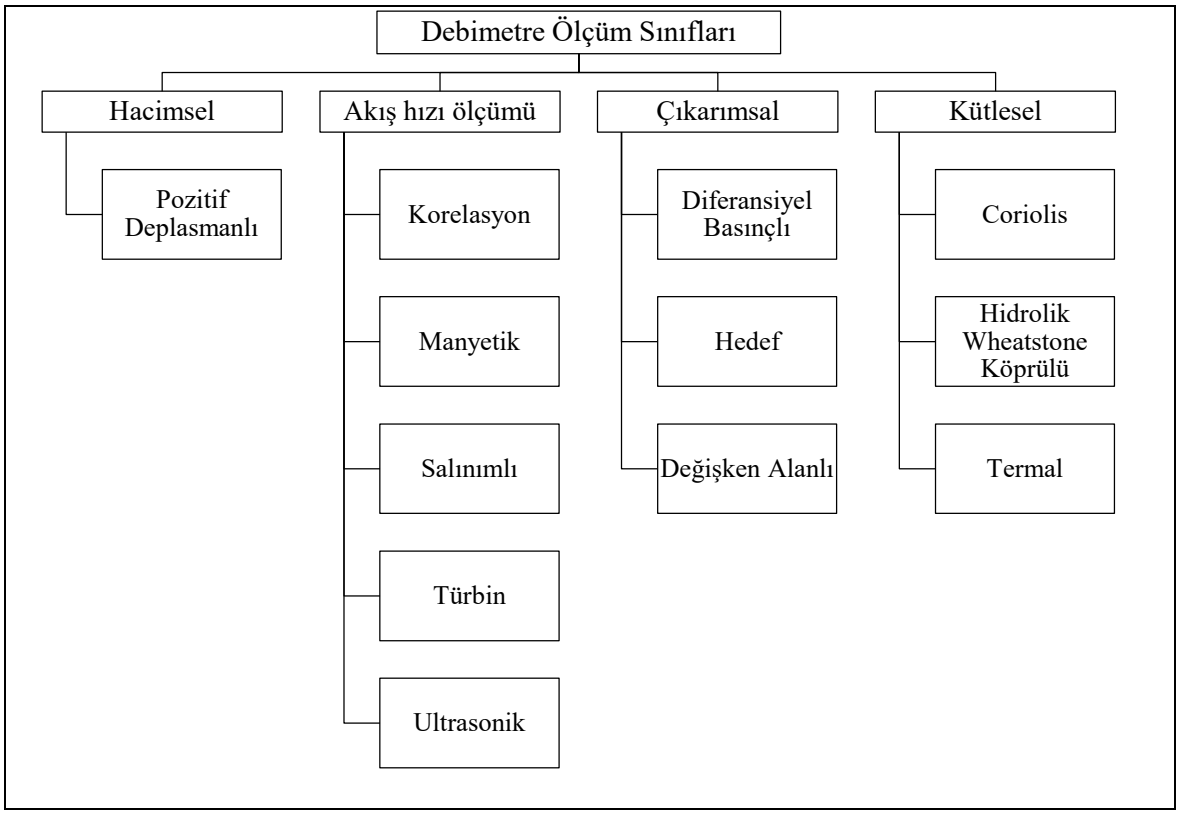
Debimetreler ölçüm şekillerine göre; hacimsel, hız akış ölçümü, çıkarımsal ve kütlesel ölçüm olarak dört ana sınıfa ayrılır (Şekil 3.2).

Hacimsel debimetreler doğrudan hacim ölçümü yaparak debi miktarını ölçerler. Hacimsel debimetreler, kesin olarak bilinen bir hacmi dönen bir parça aracılığıyla toplam hacim hesaplanarak akış miktarını tespit ederler [67].

Hız akış ölçümü debimetreler, akış hızının belirlendiği ve akışkanın aktığı alanla çarparak toplam debiyi ölçerler. Bu tip debimetreler farklı tiplerde prensipler kullanabilirler [67].

Çıkarımsal debimetreler, bir borudan geçen akışkanın fiziksel eşitliklerinden yararlanılarak debi ölçümü yaparlar. Örneğin, debi miktarından akış hızını belirlemektir. Bu debimetreler hacim yada hız ölçmezler, bunun yerine basınç farklarından ve deneysel korelasyonlardan debi miktarlarını belirlerler [67].

Kütlesel debimetreler, doğrudan boru içinden geçen akışkanın zamana bağlı kütlesini ölçerler. Örneğin, akışkan kavisli bir borudan geçerken hızlanırken meydana getirdiği kuvvetin bir fonksiyonu olarak kütle miktarını tespit ederler [67].



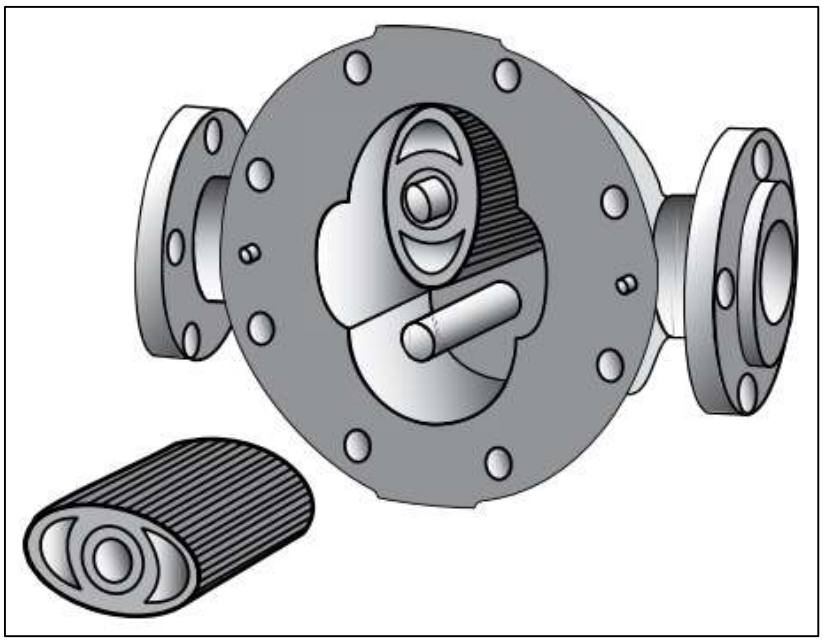
Şekil 3.2. Debimetre ölçüm sınıflandırması [67].

3.1.2. Eliptik dişli debimetreler

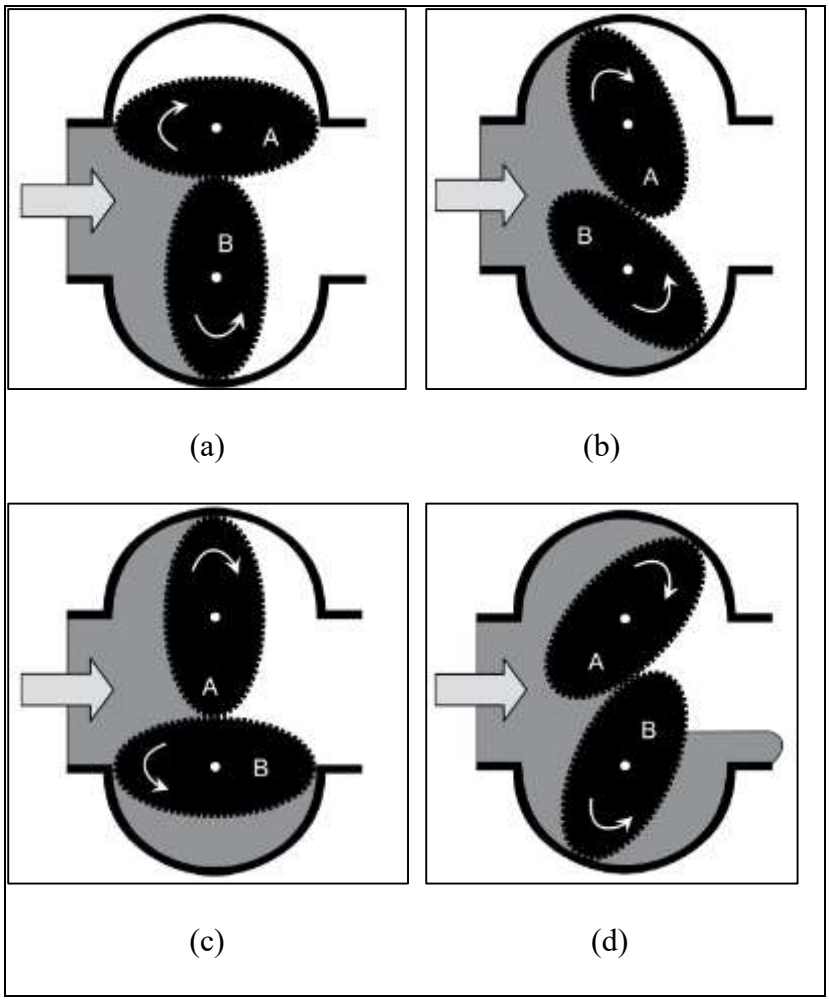
Eliptik dişli debimetreler iki özdeş eliptik rotor dişliye sahiptir. Bu eliptik dişliler debimetre gövdesine sabitlenmiş miller üzerinde dönerler (Şekil 3.3). Eliptik dişliler akışkan girişini çıkışından ayırırlar ve önemsenmeyecek bir basınç farkı oluştururlar. Bu durum eliptik rotor dişlilerinin dönme hareketiyle sonuçlanır (Şekil 3.4) ve ölü noktalar olmadan neredeyse sabit torkta düzgün bir dönüş sağlar. Şekil 3.4 daha detaylı açıklanırsa; Şekil 3.4a'da A dişlisi

basınç farkından tork alır. B Dişlisi üzerindeki net tork sıfırdır, Şekil 3.4b'de A dişlisi, B dişlisini tahrik eder, Şekil 3.4c'de B dişlisi tanımlanmış miktarda sıvıyı hapseder. A dişlisi üzerindeki net tork sıfırdır, B dişlisi basınç farkından tork alır, Şekil 3.4d'de B dişlisi A dişlisini tahrik eder ve tanımlanan miktarda akışkan çıkışa geçer [68].

Debimetreden geçen akışla birlikte eliptik dişliler döner ve akışkanı hilal şeklinde gövde içerisine hapseder. Eliptik dişli çiftinin bir tam turu için toplam debi miktarı hilal şeklindeki akışkanın dört katıdır ve akış hızı eliptik dişlilerin dönüş hızıyla doğru orantılıdır [68].



Şekil 3.3. Eliptik dişli debimetre gövdesi ve eliptik dişliler [68].



Şekil 3.4.Eliptik dişli debimetrenin çalışma prensibi [68].

Eliptik dişlilerle hilal şeklindeki ölçüm odası arasındaki kayma miktarı debimetre gövdesinin duvarlarında minimumdur ve debimetre akışkanların viskozitesinden etkilenmez. Bu debimetre türünün en büyük dezavantajı, eliptik dişlilerin sabit devirde dönmesi ve sonuç olarak debimetrenin akışkana titreşim ilave etmesidir. Eliptik dişli debimetrelerin daha yeni tiplerinde dişlileri tahrik etmek için servo motorlar kullanılmaktadır. Servo motor kullanılması, debimetre üzerindeki basınç kaybını ve dişliyi çalıştırmak için gereken kuvveti azaltır. Servo motorlar küçük boyuttaki eliptik dişli debimetreler için geçerlidir ve düşük akışlarda ölçüm doğruluğunu önemli ölçüde artırır [68].

Eliptik dişli debimetrelerin avantajları ve dezavantajları şu şekilde sıralanabilir [68];

Avantajlar:

- ± %0,25'lik yüksek hassasiyet
- ± %0,05'lik yüksek tekrarlanabilirlik
- Düşük basınç düşüşü 20 kPa'dan az
- Yüksek çalışma basınçları, 10 MPa'a kadar
- 300°C'ye kadar yüksek sıcaklıklar
- Geniş akışkan ölçüm yelpazesi

Dezavantajlar:

- Alternatif tahrik eyleminin neden olduğu titreşimler
- Dişliler ve debimetre duvarları arasında sıvı kayması riskinin artması nedeniyle genellikle su veya düşük viskoziteli sıvılar için önerilmezler.

3.2. Akış Kriterleri

Uluslararası ve ulusal kalibrasyon sertifikasını ve performans kapsama faktörü k = 2'yi ve yaklaşık %95 güven düzeyini yakalayan debimetrelerle sağlıklı ölçümler yapılabilir. Ayrıca kalibrasyon dışında kalan akış aralığı, maksimum çalışma basıncı, ölçülebilen akışkanın sıcaklık aralığı ve ortam sıcaklık aralığı debimetrelerde belirtilmelidir [69].
Yaygın olarak sinyal duyarlı doğrusal debimetreler kullanılsalar da debimetrelerin ölçtüğü debi miktarlarını tanımlayan iki faktörün belirlenmesi önemlidir. K faktörü, birim başına sinyal sayısıdır ve Eş. 3.1'le hesaplanır [69].

$$K = \frac{Sinyal\ sayısı}{Gerçek\ hacim} \tag{3.1}$$

Pratikte debimetreler, yalnızca debimetre teknolojisinin kendisini değil, aynı zamanda debimetrenin uygulandığı proses dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir. Bu değerlendirmede göz önüne alınması gereken hususlardan bazıları şunlardır; kurulum karmaşıklığı ve maliyeti, bakım, kesinlik, doğrusallık, tekrarlanabilirlik, akışkan özelliklerine bağımlılık, işletme maliyetleri, akış ölçerin ve sıvının hidrolik özellikleri,

güvenilirlik, emniyet. Ancak mükemmel bir debimetrenin geliştirilmesi fiilen imkansızdır. [67].

Debimetrelerin performans ölçümleri, ideal bir debimetrenin nasıl bir performans sergileyeceğiyle gerçek debimetrenin gerçekte nasıl bir performans gösterdiğiyle ilgilidir ve bu ikisi arasındaki farkı temsil eder. En çok bilinen performans ölçütleri, oran yüzdesi, tam ölçek yüzdesi, debimetre kapasitesi ve kalibre edilmiş aralığın yüzdesidir [67].

Debimetrelerde oran yüzdesi olarak belirtmekle tam ölçek yüzdesi arasında önemli bir fark vardır. Oran yüzdesi olarak belirtilen ölçek, hatanın gerçek debinin yüzde çarpımına eşit ve göreli bir hata olacağı anlamı taşımaktadır.

Ölçüm hatası = % oran × gerçek ölçüm

Şeklinde tanımlanır.

Tam ölçek yüzdesi (FS) olarak belirtilen özellik, ölçümle ilgili hatanın, tam ölçekli debinin o yüzdeyle çarpımıdır ve mutlak bir hata olduğu anlamına gelir.

Ölçüm hatası = % FS × tam ölçekli akış

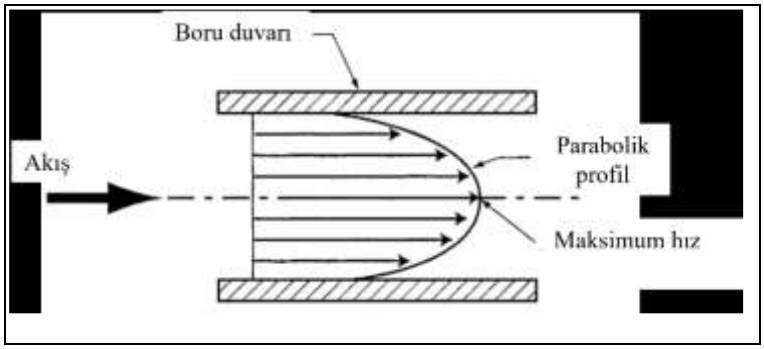
Şeklinde belirtilir [67].

Bu nedenle bir debimetrenin ölçüm hataları tanımlanmalıdır. Örneğin, ölçüm sapması ± %5 olabilir ve bunun tam ölçekli sapmayla (FSD) ilgili olup olmadığı belirtilmelidir veya başka bir değerle çalışma aralığı gösterilmelidir (1 m^3/s – 20 m^3/s) [69].

Akış ölçümünü etkileyen en önemli akışkan özelliklerinden biri, akış yönündeki hız profilinin şeklidir. Boru duvarlarında sürtünmenin olmadığı akış türü “ideal” akış olarak bilinmektedir. Ancak gerçekte durum böyle değildir ve akışkan ile boru duvarları arasında sürtünme oluşur. Bununla birlikte tesisattaki dirsek gibi elemanlar ve sürtünme akışın tipini belirler.

3.2.1. Laminer akış

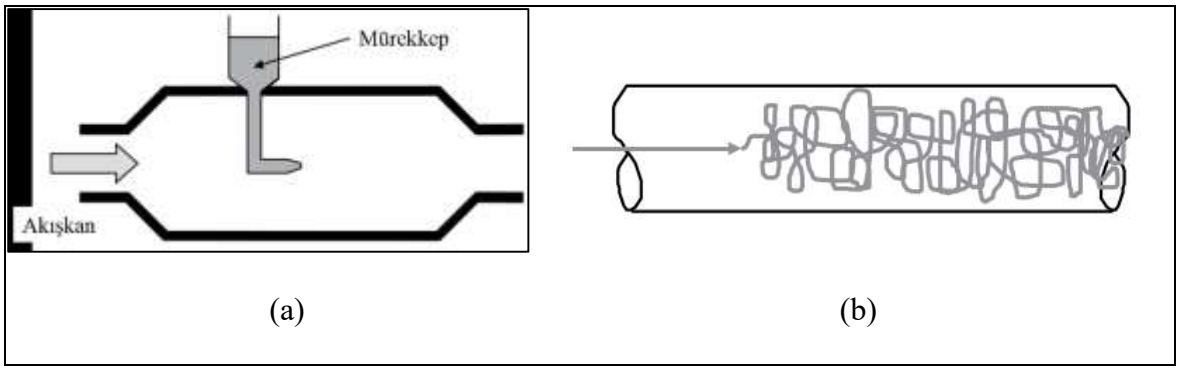
Akışkanın boru duvarlarında kaymadığı, akışkan molekülleriyle borunun molekülleri arasında yapışkan bir kuvvet tarafından yüzeyde tutulmasından dolayı akışkan ve boru duvarı arasında hiçbir bağıl hareket oluşmaz. Düşük akış hızlarında akışkan laminer bir şekilde düz düz çizgiler şeklinde hareket eder. Her bir akışkan katmanı, diğer katmanlardaki akışkan katmanlarıyla hiçbir karışım olmaksızın bitişik katmanlar halinde düzgün bir şekilde akar. Sonuç olarak akış hızı boru duvarlarında sıfırdan borunun merkezinde maksimum değere yükselir ve boru boyunca bir hız gradyanı mevcuttur. Laminer akışın hız profili Şekil 3.5'te görüldüğü gibi paraboliktir ve merkezdeki hız ortalama hızın iki katıdır [68].



Şekil 3.5. Laminer akışın hız profili [70].

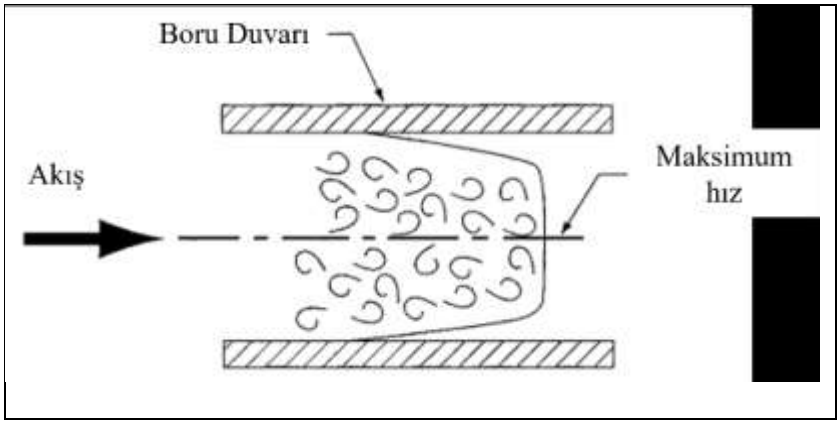
3.2.2. Türbülanslı akış

Akışkanlarla ilgili ilk araştırmacılardan biri olan Osborne Reynolds (1842-1912), günümüzde Reynolds deney seti olarak bilinen ve akış hızına mürekkep enjekte eden bir cihaz kullanarak bir dizi deney gerçekleştirmiştir (Şekil 3.6a). Bir boru ve akışkan için, akış hızı arttıkça, sıvının laminer yolu ve her bir parçacığı bozulur ve artık düz değildir. Buna geçiş aşaması denir (Şekil 3.6b). Hız daha da arttıkça, akışkan parçacıklarının yolları iç içe geçmeye ve kesişmeye başlar, ardından düzensiz bir şekilde birbirlerine karışır, böylece akışkanın tamamen karışması gerçekleşir. Bu "türbülanslı akış" olarak adlandırılır [68].



Şekil 3.6. a) Reynolds deney seti. b) Türbülanslı akış [68].

Akış hızı boru kesitinin tamamında neredeyse sabit olduğundan, türbülanslı akış için hız profili laminer akışa göre daha düzdür ve bu nedenle 'ideal' veya 'tek boyutlu' akışa daha yakındır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Türbülanslı akış hız profili [70].

3.2.3. Reynolds sayısı

Dairesel kesitlerdeki akış parametrelerinin belirli bir değerindeki akış modelini tanımlayan boyutsuz değer Reynolds sayısıdır ve Eş. 3.2'de gösterilmiştir.

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} \tag{3.2}$$

Burada ρ akışkanın yoğunluğu, μ dinamik viskozite, V boru içi akış hızı ve D boru çapıdır.

$R_e < 2$ ise, sıvı sabit duruma ulaşmak için yeterli boru uzunluğuna sahipse, sıvının tamamı boru eksenine paralel hareket eder ve kaymazlık olarak bilinen bir duruma geçer ve boru duvarına yapışır. Bu nedenle boru duvarında hız sıfır, boru merkezinde maksimum değere ulaşır ve bu akış türü laminer akış olarak adlandırılır. $R_e = 2$ olduğunda, akışın pürüzsüz ve paralel yapısı yerini türbülansa bırakır. Bu türbülanslar, boru eksenindeki yüksek hızı boru duvarındaki daha küçük hızlarla karıştırır. Ancak boru duvarlarında hız sıfırdır. Bu durum türbülanslı akış olarak bilinir. Su ve hava Reynolds sayısı hesaplamalarından, endüstriyel uygulamaların çoğunluğunun türbülanslı akış olacağı ve türbülanslı akışın içinden geçtiği debimetrelerin davranışları birincil öneme sahip olacağı açıktır [69].

Laminer akış için akışkan hızı Eş. 3.3 ile hesaplanmaktadır.

$$V = V_0 \left[1 - \left(\frac{c}{R}\right)^2\right] \tag{3.3}$$

Burada V_0 boru eksenindeki hız, c hızı ölçtüğümüz radyal nokta ve R boru yarıçapıdır. V laminer akışta kaymama koşulu nedeniyle borunun duvarında sıfırdır. Borudaki ortalama hız Eş. 3.4'te, türbülanslı akış ise Eş. 3.5'te verilmiştir.

$$V_{ort} = \frac{V_0}{2} \tag{3.4}$$

$$V = V_0 \left(1 - \frac{c}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{3.5}$$

Burada n deneysel verilerden elde edilmiştir ve Reynolds sayısına bağlıdır. n değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir [69].

Çizelge 3.1. Yaklaşık türbülanslı hız için n değerleri [69].

R_e	4×10^3	$2{,}3 \times 10^4$	$1{,}1 \times 10^5$	$1{,}1 \times 10^6$	$2 \times 10^6 – 3{,}2 \times 10^6$
n	6,0	6,6	7,0	8,8	10,0
V/V_{ort} (r = 0,75 R)	1,003	1,004	1,004	1,005	1,005
V/V_{ort} (r = 0,758 R)	0,998	0,999	1,000	1,002	1,002

3.2.4. Kütlenin korunumu

Akışkanlar mekaniğinde kütlenin korunumu önemi bir kavramdır. Bu kavram boru içindeki her noktadan aynı kütle miktarının geçmesi gerektiği şeklinde tanımlanabilir. Boru içerindeki bu kütle geçişi, kütlesel debi olarak bilinmektedir. Eş. 3.6 kütlesel debiyi, Eş. 3.7 ise kütlenin korunumunu ve farklı kesitlerdeki hızı göstermektedir.

$$q_m = \rho V A \tag{3.6}$$

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \tag{3.7}$$

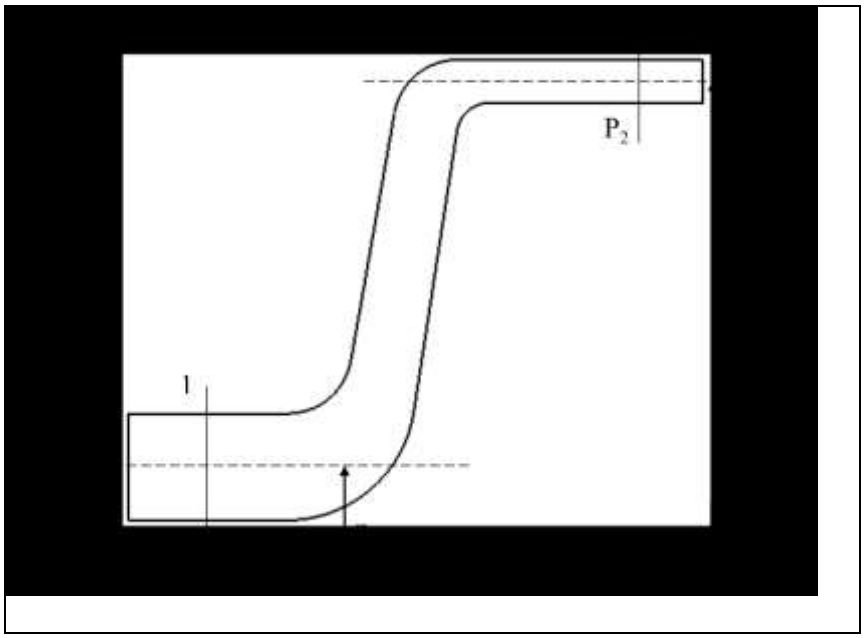
Bu eşitliklerde A akışkanın geçtiği kesit alanıdır.

3.2.5. Bernoulli ilkesi

Akışkanlar mekaniğinde Bernoulli denklemi ise basınç değişimini hız değişimiyle ilişkilendirir. Sıkıştırılabilir sıvıda basınç, hız ve referans düzlemin üzerindeki yükseklikteki akış kayıpları bu şekilde tanımlanır [69]. Bernoulli denklemi Eş. 3.8'de verilmiştir. Şekil 3.8'de Bernoulli ilkesinin şematik gösterimi verilmiştir.

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \tag{3.8}$$

Bu eşitlikte, P_2 akışkanın geçtiği ikinci kesitteki basınç, P_1 akışkanın geçtiği birinci kesitteki basınç, g yer çekim ivmesi, z_2 akışkanın geçtiği ikinci kesitin yüksekliği, z_1 akışkanın geçtiği birinci kesitin yüksekliğidir.



Şekil 3.8. Bernoulli prensibinin şematik görüntüsü

3.2.6. Eliptik debimetreler için akışkanlar dinamiğinin temelleri

Eliptik dişli çiftine sahip debimetrenin iç akış alanı ve sınır şartları oldukça karmaşık olmasına rağmen, Navier – Stokes ve süreklilik denklemi gibi akışkanın temel kontrol eşitliklerini sağlamalıdır [71]. Ancak bu denklemleri analitik olarak çözmek zordur. Bu yüzden günümüzde, bilgisayar destekli analiz yöntemiyle sonlu elemanlar, sonlu farklar, sonlu hacim ve spektral yöntemler gibi çeşitli teknikler kullanarak denklemleri çözmek mümkündür. Debimetre ve pompaların iç akış karakteristiklerini belirlemede CFD analiz yöntemi sıklıkla tercih edilmektedir. Bu analiz yönetimi Eş. 3.9 ve Eş. 3.10'da verilen Tensör denklemlerini kullanmaktadır [71].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{3.9}$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} = -\frac{\partial \prod_{ik}}{\partial x_k} \tag{3.10}$$

Sıkıştırılamaz akışkanlar için Π_{ik},

$$\prod_{ik} = -p\delta_{ik} + \eta\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i}\right) \tag{3.11}$$

Olarak elde edilmektedir. Burada; p, basınç ve η, dinamik viskozitedir.

Eliptik dişlili debimetre çalıştığında, özellikle dişli bölgesinde ve iç akış alanında türbülans meydana gelir. Debimetre gövdesinin duvarları akışkanı kapalı hale getirir ve bu akışkan eliptik dişlilerle birlikte döner. Bu durum standart türbülans modeli akış şartlarını doğru bir biçimde yansıtmaz. Türbülanslı akışkanı simüle etmek için yaygın olarak kullanılan en basit yaklaşımlardan biri, Navier-Stokes denklemlerinin (RANS) Reynolds ortalaması ile elde edilir. Dişli pompalarda türbülanslı akışkanların modellenmesinde iyi performansı kanıtlandığından, seçilen model standart k − ε (Launder ve Spalding) olmuştur. Gerçekleştirilebilir türbülans modeli (Realizable κ–ε model) türbülanslı akışların fiziğiyle tutarlı olarak Reynolds gerilimleri üzerindeki belirli matematiksel kısıtlamaları karşılamaktadır. k − ε modelinin türetilmesinde, akışın tamamen türbülanslı olduğu ve moleküler viskozitenin etkilerinin ihmal edilebilir olduğu kabul edilmiştir. Gerçekleştirilebilir κ–ε modelinin faydası hem düzlemsel hem de yuvarlak jetlerin yayılma hızını daha doğru bir şekilde tahmin etmesidir. Ayrıca dönme, güçlü ters basınç gradyanları altındaki sınır tabakalar, ayrılma ve devridaim içeren akışlar için üstün performans sağlaması muhtemeldir [72]. Burada κ türbülanslı kinetik enerji ve ε türbülanslı dağılma oranıdır. Gerçekleştirilebilir κ–ε modeline ait denklemler [72] Eş. 3.12 ve Eş. 3.13'te gösterilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\kappa u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa}\right)\frac{\partial \kappa}{\partial x_j}\right] + G_\kappa + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_\kappa \tag{3.12}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{\kappa}C_{3\varepsilon}G_b + S_\varepsilon \tag{3.13}$$

Burada;

$$C_1 = max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}\right],\ \eta = S\frac{\kappa}{\varepsilon},\ \ S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

Bu eşitliklerde, G_κ ortalama hız gradyanlarından kaynaklanan türbülans kinetik enerji, G_b kaldırma kuvvetinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji, Y_M sıkıştırılabilir türbülanstaki

dalgalı genleşmenin genel dağılım oranına katkısı (sıvılarda ihmal edilebilir düzeydedir), $C_{1\varepsilon}$, C_2 ve $C_{3\varepsilon}$ sabitler, σ_κ, σ_ε, κ ve ε için sırasıyla türbülanslı Prandtl sayılarıdır. S_κ ve S_ε kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir.

3.2.7. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ağ yapısının hesaplama modeli

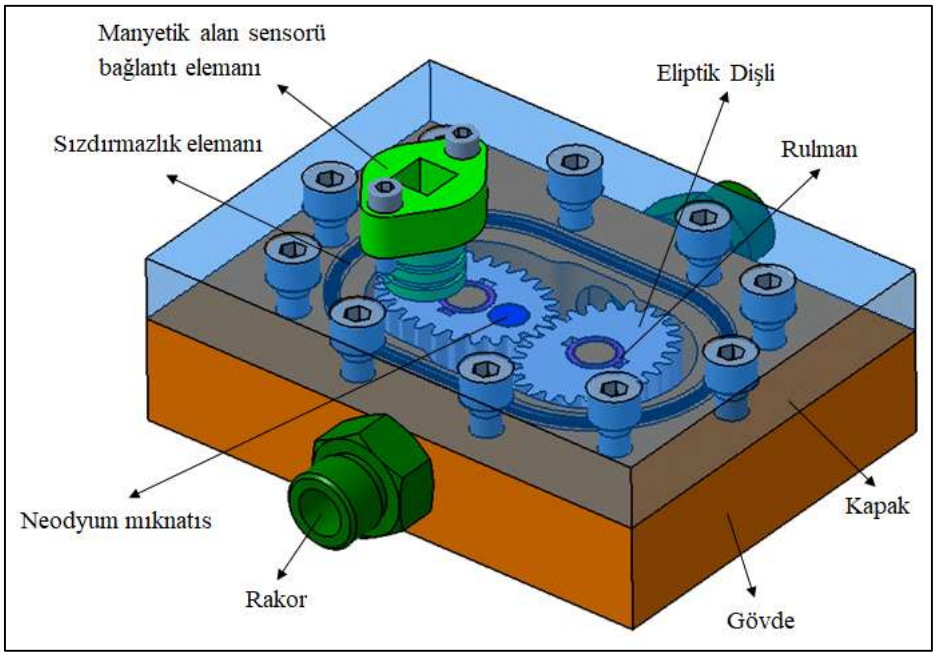
Dinamik ağ oluşturma tekniği, zamana bağlı akış alanının sebep olduğu yer değiştirmelerin veya sınır şartları bozulmasının hangi aralıkta kaldığını simüle etmek için kullanılabilir. Bu teknoloji sırasıyla katmanlama, yay yumuşatma ve yerel yeniden ağ oluşturma olmak üzere üç model sunmaktadır. Bu çalışmada, üçgen ağ yapıları tercih edildiğinden dolayı eliptik dişliler döndüğünde ağ yapılarını yenilemek için iki yay yumuşatma ve yeni ağ modeli oluşturulmaktadır. Dinamik ağ yapısını hesaplama modelinin genel formülü Eş. 3.14'te gösterilmiştir [73].

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho\phi dV + \int_{\partial V} \rho\phi(\vec{u}-\vec{u}_s)d\vec{A} = \int_{\partial V} \Gamma\nabla\phi d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \tag{3.14}$$

Bu eşitlikte; $\vec{u}$ akışkanın hız vektörü, $\vec{u}_s$ dinamik ağın deforme olma hızı, Γ difüzyon katsayısı, S_ϕ ϕ'nin kaynak akışkanı ve ∂V hacim sınırıdır.

3.3. Tasarım

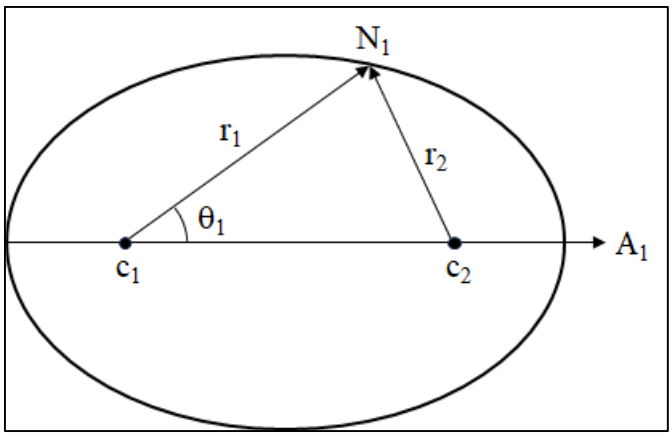
Eliptik dişli debimetreler; gövde, kapak, döndüren dişli, dönen dişli, sızdırmazlık elemanları, rakor, rulman (yüksek basınç değerlerinde kullanılmayabilir), mil, cıvata ve manyetik alan sensörlü elektronik devre (bazı eliptik dişli debimetreler mekanik sayıcıya sahiptir) olmak üzere temelde 10 parçadan oluşmaktadır. Eliptik dişli debimetre tasarımında ilk önce eliptik dişli çiftinin tasarımı gerçekleştirilir. Daha sonra eliptik dişli çiftlerinin çalışabilmesi için debimetre gövdesine çalışma boşlukları verilir ve diğer debimetre elemanları tasarıma eklenir. Resim 3.1'da bir eliptik dişli debimetre tasarımı görülmektedir.



Resim 3.1. Eliptik dişli debimetre tasarımı.

3.3.1. Eliptik dişli tasarımı

Elips, silindir veya koni şeklindeki geometrik nesnelerin tabana paralel olmayacak şekilde kesilmesiyle elde edilen alanı çevreleyen eğriye verilen isimdir. Şekil 3.9'da bir elipse ait elemanlar gösterilmiştir. Eliptik dişlilerin tasarımlarında bölüm elipsinin çevre uzunluğunun doğru hesaplanması gerekmektedir. Literatürde eliptik dişlilerin bölüm elipsinin çevre uzunluğunun hesaplanmasının çeşitli denklemlerle yapılabildiği gösterilmiştir [13]. Bir elipsin çevre uzunluğunu veren diferansiyel denklemin (Eş. 3.15) çözümü olmadığından dolayı literatürdeki çözümler yaklaşık çözümlerdir.



Şekil 3.9. $\overline{c_1N_1} = r_1(\theta_1)$ pozisyon vektörü ve $\overline{c_1A_1}$ polar eksen.

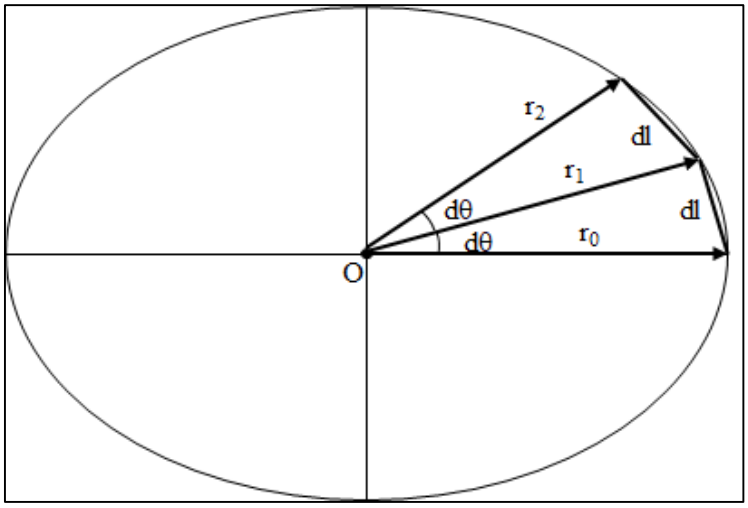
$$S = 4.a.\int_0^{\pi} \sqrt{1 - e^2.sin^2\theta}.d\theta \tag{3.15}$$

Burada; e bölüm elipsinin eksantrikliğidir ve Eş. 3.16 ile hesaplanır.

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \tag{3.16}$$

Burada; a elipsin büyük yarıçapı ve b elipsin küçük yarıçapıdır.

Eliptik dişli tasarımında tıpkı silindirik dişlilerde olduğu gibi modül ve diş sayısına göre çevre uzunluğu ve a/b oranına göre bölüm elipsinin büyük ve küçük yarıçapları belirlenir. Bu tez çalışmasında bölüm elipsinin çevre uzunluğu yaklaşık çözümlerden birisi olan analitik yöntemle hesaplanmıştır. Analitik yöntemin geometrik anlatımı Şekil 3.10'da ve denklem Eş. 3.17'de gösterilmiştir. Analitik yöntemde bölüm elipsi sonsuz küçüklükteki açıların oluşturduğu anlık yarıçaplar hesaplanır ve iki yarıçapın bölüm elipsi üzerinde meydana getirdiği noktalar arasında kalan doğruların toplanmasıyla bölüm elipsinin çevre uzunluğu elde edilir.



Şekil 3.10. Analitik çözümün geometrik gösterimi.

$$S = m.z.\pi = \sum_{n=1}^{\frac{360}{d\theta}} \sqrt{r_n^2 + r_{(n-1)}^2 - 2.r_n.r_{(n-1)}.\cos(d\theta)} \tag{3.17}$$

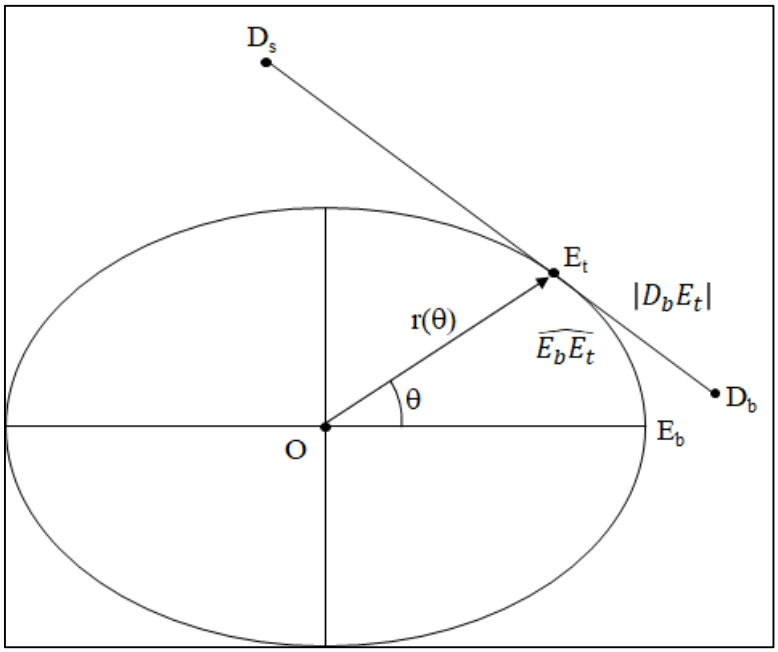
Burada; r, θ açısına bağlı anlık yarıçap ve dθ iki anlık yarıçap arasındaki sonsuz küçüklükteki açıdır. Anlık yarıçaplar ise Eş. 3.18 ile belirlenmektedir [74].

$$r(d\theta) = \frac{2.a.b}{(a+b) - (a-b).\cos(2.d\theta)} \tag{3.18}$$

Eş. 3.17'de dθ değeri ne kadar küçük alınırsa bölüm elipsinin çevre uzunluğu o kadar doğru belirlenir. İmalat ve tasarımda virgülden sonra üç basamak yeterli olduğundan dolayı dθ'nın belli bir değerden küçük alınması sonucu değiştirmez.

Eliptik dişli tasarımlarında diş profilleri iki şekilde oluşturulmaktadır. En yaygın olanı kremayer bir kesici formunu bölüm elipsi üzerinde kaymadan yuvarlanmasıdır. Diğer yöntem ise silindirik dişli formundaki bir kesicinin yine bölüm elipsi üzerinde yuvarlanarak eliptik dişlinin diş profilleri oluşturulmaktadır. Bu tez çalışmasında kremayer formlu bir kesicinin bölüm elipsi üzerinde kaymadan yuvarlanması yöntemi esas alınmıştır.

Kaymadan yuvarlanan kremayer biçimli kesici, bölüm elipsine göre evolvent eğrisi oluşturarak yuvarlanır. Evolvent eğrisi, başlangıç noktaları çakışık olmak üzere; bir eğri üzerinde kaymadan yuvarlanan teğet doğrunun meydana getirdiği noktaları birleştiren eğriye verilen isimdir. Ancak şu şarta bağlıdır; bir eğrinin başlangıç noktası ve eğri üzerinde bulunan bir nokta arasındaki eğri uzunluğunun, aynı eğri üzerindeki aynı noktada teğet doğrunun başlangıç noktasının eğri üzerindeki noktadaki uzunlukları eşit olmalıdır. Tanımın geometrik gösterimi Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Evolvent eğrisi oluşumunun geometrik gösterimi.

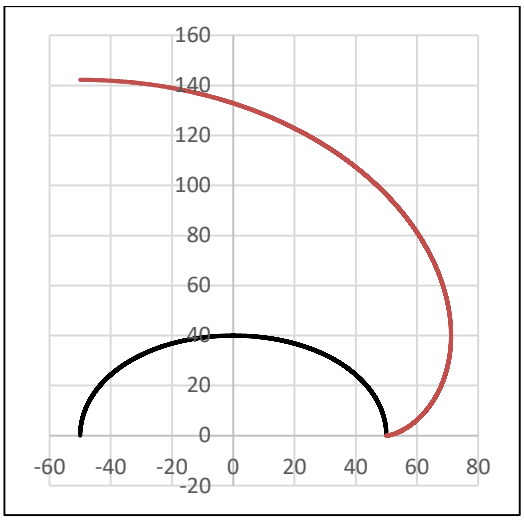
Burada, $\widehat{E_bE_t} = |D_bE_t|$ ve $|D_bD_s| = S$ dir. E_b eğrinin başlangıç noktası, E_t bölüm elipsi üzerinde bulunan teğet nokta, D_b teğet doğrunun başlangıç noktası, D_s teğet doğrunun bitiş noktası, r(θ) θ açısına bağlı anlık yarıçaptır ve başlangıçta E_b ve D_b aynı nokta üzerindedir. Evolvent eğrisini oluşturabilmek için bölüm elipsi üzerinde alınan noktalara göre elips denkleminin türevleri, her bir nokta için teğet doğrunun eğimini verir ve elipsin genel denklemi Eş. 3.19'da verilmiştir. Bu denklemin, bölüm elipsi üzerindeki anlık yarıçapların bölüm elipsi üzerinde oluşturduğu noktalara göre türevleri alınarak kremayer kesicinin adım doğrusunun kaymadan yuvarlanması sağlanmaktadır. D_b noktasının oluşturduğu noktalar evolvent eğrisini meydana getirmektedir. D_b noktasının konumuysa E_t noktasının konumuna bağlıdır. E_t noktasının konum denklemi Eş. 3.20 ve D_b noktasının konum denklemiyse Eş. 3.21'de verilmiştir. Mevcut denklemlerle çizdirilen evolvent eğrisi Şekil 3.12'de gösterilmiştir.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \tag{3.19}$$

$$\left.\begin{aligned} E_{tx} &= r.\cos(\theta) \\ E_{ty} &= r.\sin(\theta) \end{aligned}\right\} \tag{3.20}$$

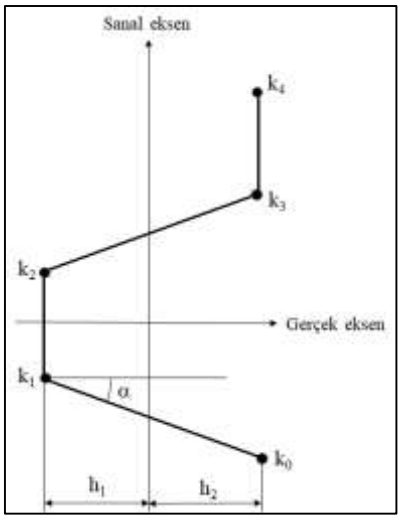
$$\left.\begin{aligned} D_{bx} &= E_{tx} + |D_b E_t|.\cos(\varphi) \\ D_{by} &= E_{ty} - |D_b E_t|.sin(\varphi) \end{aligned}\right\} \quad (3.21)$$

Burada, φ teğet doğrunun eğimidir.



Şekil 3.12. Kremayer kesicinin oluşturduğu evolvent eğrisi.

Kremayer kesicinin diş profilleri kompleks sayılar yöntemi kullanılarak tasarlanabilir. Tasarım, kremayer kesicinin adım doğrusu sanal eksen olarak tanımlanır ve kompleks sayılar koordinat sisteminin 0 + i0 noktası D_b noktasıyla çakıştırılır ve kremayer kesicinin her bir köşe noktasının, kompleks eksen takımına göre Eş. 3.22'de verilmiştir. Kremayer kesicinin geometrik gösterimi Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Kremayer kesicinin geometrik gösterimi.

$$\left.\begin{aligned} k_0 &= h_2 - i.\left(\frac{m.\pi}{4} - h_2.\tan(\alpha)\right) \\ k_1 &= -h_1 - i.\left(\frac{m.\pi}{4} - h_1.\tan(\alpha)\right) \\ k_2 &= -h_1 + i.\left(\frac{m.\pi}{4} - h_1.\tan(\alpha)\right) \\ k_3 &= h_2 + i.\left(\frac{m.\pi}{4} + h_2.\tan(\alpha)\right) \end{aligned}\right\} \quad (3.22)$$

Burada $i^2 = -1$ ve α basınç açısıdır. Kremayer kesicinin s. noktalarıysa Eş. 3.23 ile belirlenir.

$$k_s = k_{s-4} + i.m.\pi \quad (3.23)$$

Burada s = 4,5,6……4.z-1 olarak tanımlanmıştır. z = z + 1 ise kremayer kesicinin toplam diş sayısıdır.

3.4. İmalat

Günümüzde debimetreler birçok malzemeden imal edilmektedirler. Ancak malzeme seçimini etkileyen parametreler debimetrenin kullanılacağı sektör, ölçüm aralığı, hassasiyet ve hangi basınçlar altında çalışacağı belirler. Eliptik dişli debimetrelerin imalatında, dişli çiftlerinin tasarımı ön plana çıkmaktadır. Bununla beraber eliptik dişli çiftlerinin rahat çalışabilmesi açısından debimetre gövdesinin imalatı da hassas bir şekilde yapılması önemlidir.

3.4.1. Eliptik dişli imalatı

Eliptik dişli çiftlerinin imalatında birçok yöntem tercih edilmektedir. Literatüre bakıldığında en çok tercih edilen yöntemin tel erozyon tezgahında kesilmesi olduğu görülmektedir. Eliptik dişlilerin tel erozyon tezgahında kesmenin en büyük avantajı standart modüllere bağımlı kalınmamasıdır. Bununla birlikte diş profillerinin yüzey kalitesi diğer yöntemlere göre daha iyidir. Eliptik dişlilerin tel erozyon tezgahında imal etmenin dezavantajıysa kesme işleminin yavaş olmasıdır [36].

Diğer taraftan CNC teknolojisinin ilerlemesiyle birlikte, eliptik dişliler CNC azdırma tezgahlarında da üretilebilmektedirler. Ayrıca klasik azdırma tezgahlarına ek donanımlar eklenerek eliptik dişlilerin imalatı mümkündür [36].

Hassasiyeti ve basınç kapasitesi düşük debimetrelerde, eliptik dişliler eklemeli imalatla da üretilmektedirler. Bu yöntemde diş profili hassasiyeti, nozzle çapı ve katman kalınlığına bağlıdır. Bununla birlikte dilimleyici programın anlayacağı dosya uzantısı olan STL verinin düğüm sayıları da eliptik dişlilerin kalitesini etkilemektedir. Bu yöntemin dezavantajıysa sıcak malzemenin soğuyunca çekmesi ve istenilen modül değerinin tam olarak yakalanamamasıdır. Resim 3.2'de eklemeli imalatla üretilmiş eliptik dişli çifti görülmektedir.

Eliptik dişlilerin tıpkı silindirik dişliler gibi toz metalurjisiyle üretilmesi mümkündür. Ancak literatürde toz metalurjisiyle üretilmiş eliptik dişliye rastlanılmamıştır.



Resim 3.2. Eklemeli imalatla üretilmiş eliptik dişli çifti.

3.4.2. Gövde ve kapak imalatı

Debimetrelerin gövde ve kapakları, debimetrelerin kullanılacağı sektör ve çalışacağı basınç değerine göre aynı malzemeden üretilmektedir. Debimetre gövdesine ve kapağına eliptik

dişlilerin millerinin yerleştirileceği rulman ya da pim yuvası açılır. Bu millerin merkez uzaklıkları teoride a + b kadar olmalıdır. Ancak eliptik dişlilerin imalat hatalarından kaynaklı olabilecek tolerans mil eksenlerinin mesafesine eklenmelidir. Bu hatalar eliptik dişli çiftlerinin bölüm elipsinin ne kadar sapma yaptığını tespit ederek mil eksen aralığına eklenmelidir. Bu tez kapsamında bu hataların belirlenmesine yönelik eksen kaçıklık cihazı geliştirilerek, eksen sapmaları belirlenmiştir. Teoride eliptik dişlilerin gövde içerisine yerleştirilebilmesi için gövde boşluğu genişliğinin 2.(a + m) kadar olması gerekir. Eğer gövde boşluğu bu değerde imal edilirse eliptik dişliler duvara sürter. Eliptik dişlilerin, gövde duvarlarına sürtünmeden çalışabilmesi için gövde duvarlarına da çalışma boşluğu verilmiştir. Gövde, bu çalışma boşluğu tek taraftan 0,05 mm olacak şekilde gövde imal edilmiştir. Bu çalışma boşluğunun fazla olması debimetrede iç kaçaklara sebep olur ve ölçüm hassasiyetini etkiler. Debimetre gövdelerine akışkanın girip ve çıkacağı delikler delinip, boru diş kılavuz çekilmiştir. Kılavuz ölçüleri standart rakorlara göre 1/2″ seçilmiştir. Ayrıca kapak bağlantısı için bağlama deliklerine M8 vida tercih edilmiştir. Bu bağlama deliklerinin sayısı çalışma basıncına göre basınç altında kapağa zarar vermeyecek şekilde delinmiştir. Kapak üzerine standartlara uygun 4 mm contaya uygun conta kanalı açılmıştır.
Debimetre kapağı, gövdeyle aynı malzemeden imal edilmiştir. Kapak gövdeye M8 alyan başlı cıvatayla monte edilmiştir. Ayrıca kapağa manyetik alan sensörünün bağlanabileceği delikler delinmiş ve M5 cıvatayla montajlanmıştır.

4. MATERYAL VE METOT

Bir önceki bölümde debimetrelerle ilgili matematiksel, teorik ve pratik bilgilerin yanı sıra akışkanlar mekaniğinin temelleri açıklanmıştı. Bu bilgiler ışığında Taguchi L_9 deney seti esas alınarak zamandan, imalat giderlerinden ve fazladan yapılacak olan deney sayısından tasarruf edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, eliptik düz dişli çiftine sahip debimetrelerin tasarım ve imalat parametreleriyle, doğru debi ölçebilme performanslarının tespiti ve seri üretim alt yapısının hazırlanması amaçlanmıştır. Eliptik düz dişlilerin tasarım ve imalatları üç farklı a/b oranı, üç farklı modül ve üç farklı diş sayısı esas alınarak yapılmıştır. Bu değerler standart sayılar tablosunun R10 ve R20 sütunlarından seçilmiştir [75]. Farklı parametrelere sahip ve Taguchi L_9 deney setine uygun dokuz farklı debimetre üretilmiştir. Taguchi L_9 düzey ve faktörleri Çizelge 4.1'de, tasarım ve imalatı yapılan debimetreler Çizelge 4.2'de gösterilmiş ve her debimetreye ayrı kod verilmiştir.

Çizelge 4.1. Eliptik dişli parametrelerinin Taguchi L_9 düzey ve faktörleri [71].

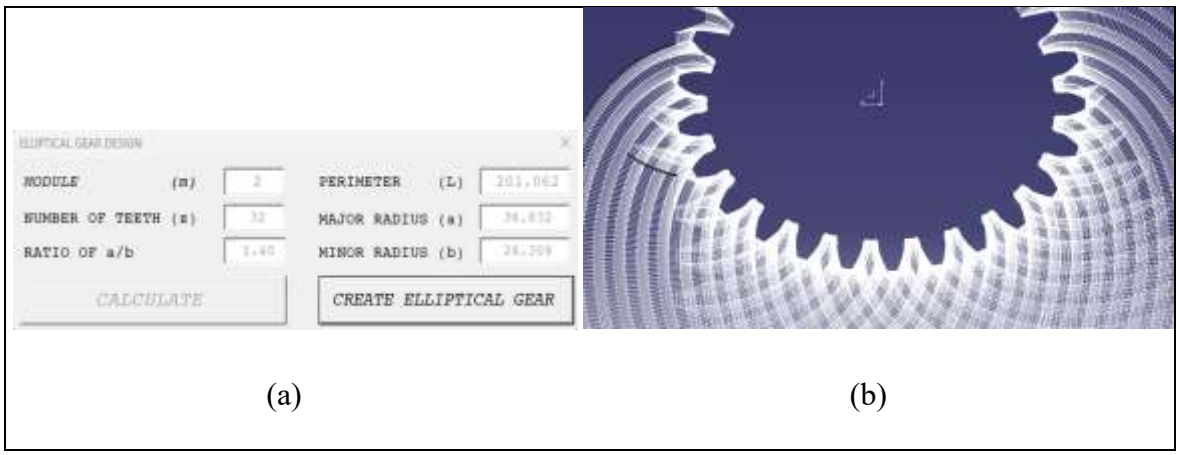
FAKTÖR	1.DÜZEY (1)	2.DÜZEY (2)	3.DÜZEY (3)
a/b oranı (A)	1,25	1,40	1,60
m (modül) (B)	1,60	2,00	2,50
z (diş sayısı) (C)	25	32	40

Çizelge 4.2. Taguchi L_9'a göre eliptik dişli ve debimetre tasarımları [71].

Debimetre Kodu	Faktör A	Faktör B	Faktör C
Db-01	1	1	1
Db-02	1	2	2
Db-03	1	3	3
Db-04	2	1	2
Db-05	2	2	3
Db-06	2	3	1
Db-07	3	1	3
Db-08	3	2	1
Db-09	3	3	2

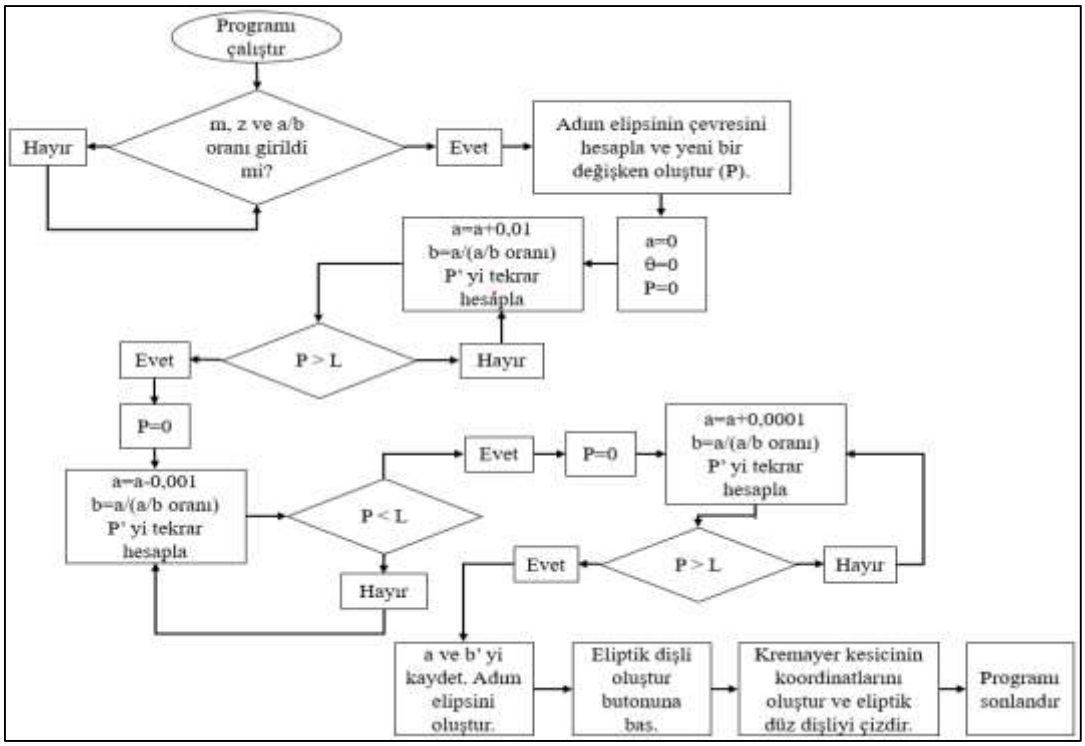
4.1. Eliptik Dişlilerin Tasarımı

Eliptik düz dişlilerin tasarımı Catia V5 ortamında, 3.3.1 Eliptik dişli tasarımı bölümünde anlatılan eşitlikler kullanılarak makro program geliştirilmiştir (Resim 4.1a). Aynı zamanda eliptik düz dişliler, kavrama açısı 20˚ olan kremayer formlu bir kesicinin bölüm elipsi üzerinde ve sanal ortamda yuvarlanmasıyla diş profilleri oluşturulmuştur (Resim 4.1b). Makro programın algoritmasıysa Şekil 4.1'de verilmiştir.



(a) (b)

Resim 4.1. (a) Makro program. (b) Diş profillerinin oluşturulması



Şekil 4.1. Makro programın algoritması.

4.2. Eliptik Düz Dişli ve Debimetre Gövdelerinin İmalatı

Eliptik düz dişli çiftleri iki loblu olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Bilgisayar destekli ortamdan elde edilen iki boyutlu verilerle, eliptik düz dişliler ST37 malzemeden CNC tel erozyon tezgahında üretilmiş (Resim 4.2) ve düzlem taşlama tezgahında 20 mm yüksekliğe kadar taşlanmıştır. Debimetre gövde ve kapakları CNC freze tezgahında alüminyum 6061 serisi malzemeden işlenmiştir Debimetre gövdelerine akışkan giriş ve çıkış çapları 14,5 mm olacak şekilde delik delinmiştir (Resim 4.3). Kullanılan malzemelerin kimyasal ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir. Debimetre kapağına conta kanalı açılmış ve 4 mm çapında O-ring ile sızdırmazlık sağlanmıştır. Eliptik düz dişli çiftlerinden birine mıknatıs deliği delinmiş ve neodyum mıknatıs yerleştirilmiştir. Akış ölçerlerin rotor dişlilerinin devir sayılarını tespit etmek için manyetik alan sensörü (hall effect sensor) ve 9V pille çalışan bir mikrodenetleyici içeren bir elektronik devre geliştirilmiştir. Eliptik düz dişlilerin dönüş merkezlerine HK1012 tipi iğneli rulmanlar monte edilmiş ve merkez deliklerine kama yuvaları açılmıştır (Resim 4.4). Rotor dişlisinin her dönüşünde manyetik alan sensörü tetiklenmiş ve iki tetikleme arasındaki süre belirlenerek rotor dişlilerinin devir sayıları ölçülmüştür. Elde edilen devir sayıları ve debi miktarları 0,96" OLED ekranda okunmuş ve kaydedilmiştir.



Resim 4.2. Eliptik düz dişlilerin CNC tel erozyon tezgahında kesilmesi.



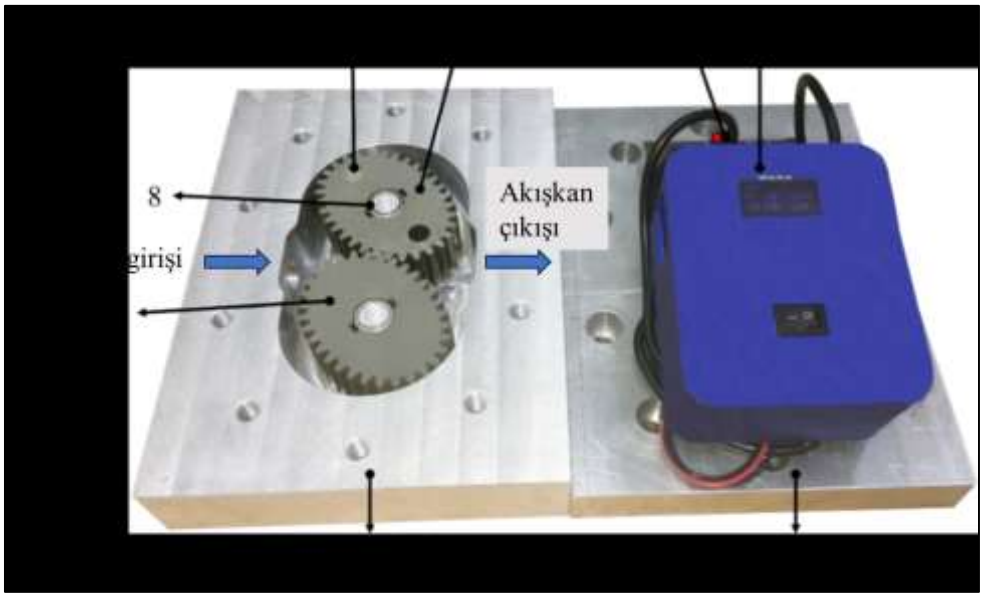
Resim 4.3. Debimetre gövdelerinin CNC freze tezgahında işlenmesi.

Çizelge 4.3. ST37 ve Alüminyum 6061 malzemelerin kimyasal özellikleri [76, 77].

	Kimyasal Özellikler (%)											
Malzeme	C	Fe	P	S	Mn	Si	Cu	N	Mg	Zn	Ti	Cr
St37	0,17	98,031	0,045	0,045	1,4	0,3		0,009				
Al 6061		0,7			0,15	0,4-0,8	0,6-1,1		0,8-1,2	0,25	0,15	0,04-0,35

Çizelge 4.4. ST37 ve Alüminyum 6061 malzemelerin mekanik özellikleri [76, 77].

	Mekanik Özellikler		
Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
St37	235	350-480	25
Al 6061	240-275	260-310	8-12

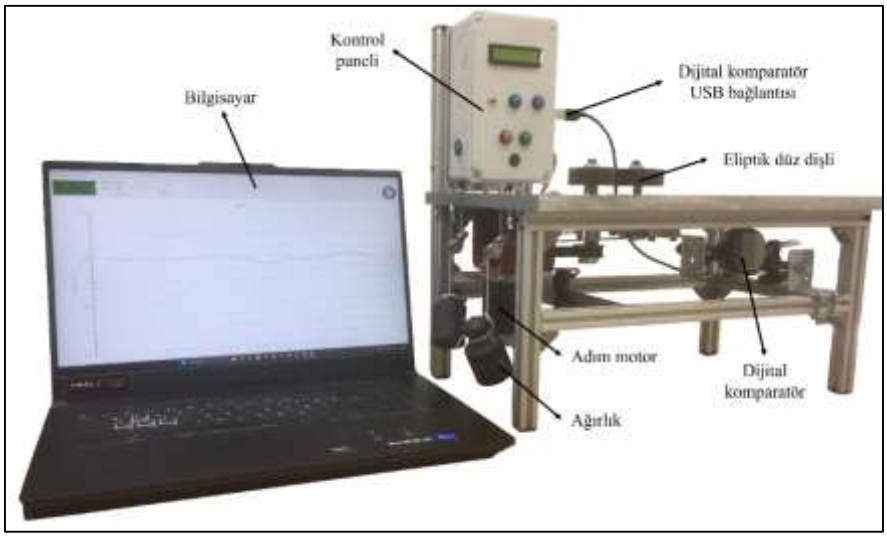


Resim 4.4. Debimetre montajı. 1 – Gövde, 2 – Kapak, 3 – Rotor dişli, 4 – Eliptik düz dişli, 5 – Elektronik devre kutusu, 6 – Manyetik alan sensörü, 7 – Neodyum mıknatıs, 8 –HK102 iğne rulman [71].

4.3. Eksen Kaçıklık Miktarlarının Belirlenmesi ve Lepleme Operasyonu

Lepleme cihazı hem eksen kaçıklığını hem de lepleme operasyonunu yapacak şekilde portatif olarak tasarlanmış ve imal edilmiştir. Cihazın taşıyıcı gövdesi 20×20 alüminyum sigma profilden, üst plakası ise alüminyum 5000 serisinden üretilmiştir. Cihaza birisi sabit diğeri hareketli olacak şekilde dişlilerin bağlanabileceği mil işlenmiş ve monte edilmiştir. Sabit milin tahrik, triger kayışı aracılığıyla 2,2 Nm torka sahip bir step motorla sağlanmıştır. Eksen kaçıklık verileri 1 μm hassasiyete sahip dijital komparatör saatiyle elde edilmiştir. Komparatör verilerini almak amacıyla, bilgisayar ve komparatör arasında bilgi alışverişini sağlayacak bir elektronik devre ve bilgisayar yazılımıyla geliştirilmiştir (Resim 4.5).

Eliptik dişlisinin yuvarlanma elipsinin, tasarım ve imalat arasındaki fark, dişli çiftinin bir tam dönüşü esnasında oluşan fark ile belirlenmiştir. Eksenel kaçıklık verileri her bir derecede bir alınarak saptanmıştır. Eksenel kaçıklık miktarı, eliptik düz dişliler birbirlerine hareketli mile bağlı kütle vasıtasıyla temas ettirilmiş ve dişli çiftlerinin tel erozyon tezgahında kesilmesi sonrası, hiçbir yüzey pürüzlülük giderme işlemi yapılmadan elde edilmiştir.



Resim 4.5. Lepleme ve eksen kaçıklık cihazı.

Lepleme operasyonunun gerçekleştirilebilmesi için eksen kaçıklık ve lepleme cihazından, eksen kaçıklıklarının belirlendiği komparatör saati ve bilgisayar bağlantısı cihazdan sökülmüştür. Lepleme operasyonu Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilen parametrelere göre Taguchi L_9 (3^4) deney seti oluşturularak yapılmıştır. Lepleme macunu, endüstriyel olarak piyasada kullanılan 28 μm ortalama tane büyüklüğüne sahip Spezial – Einsschleifpaste Nr. 240 marka olarak seçilmiştir (Resim 4.6). Lepleme operasyonu öncesinde tüm eliptik dişlilerin kütleleri tartılmış (Resim 4.7a) ve modül değerlerinin, imalata uygun olup olmadığının belirlenebilmesi için mikroskop altında diş profillerinin fotoğraflanmıştır (Resim 4.7b). Bununla birlikte Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mikro İşleme Laboratuvarında bulunan yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla (Resim 4.8) eliptik dişlilerin diş evolventlerinin yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Ayını şekilde lepleme sonrası eliptik dişlilerin kütleleri belirlenmiş, diş profillerinin mikroskop altında fotoğraflanmış ve yüzey pürüzlülük değerleri tekrar ölçülmüştür.

Çizelge 4.5. Lepleme parametrelerinin Taguchi L_9 (3^4) göre faktör ve düzeyleri.

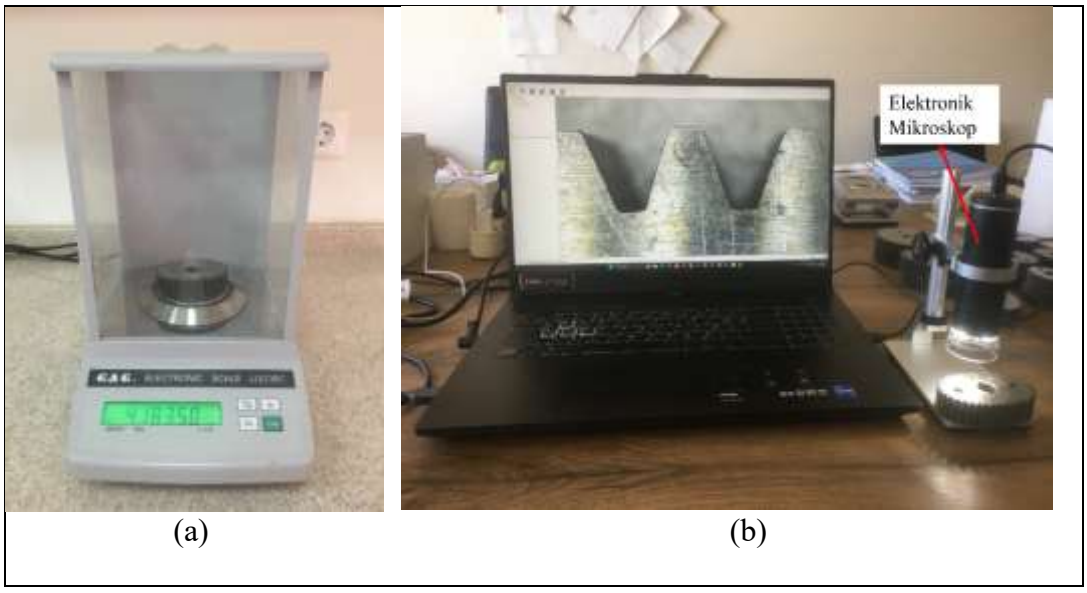
Faktör	Kodlama	Birim	Seviye 1 (1)	Seviye 2 (2)	Seviye 3 (3)
Modül	D	mm	1.60	2.00	2.50
Devir sayısı	E	dev/dk	120	170	220
Süre	F	dk	10	20	30
Kütle	G	kg	0.5	1.0	1.5

Çizelge 4.6. Taguchi L_9'a göre lepleme operasyonu parametreleri.

Faktör D	Faktör E	Faktör F	Faktör G
1	1	1	1
1	2	2	2
1	3	3	3
2	1	2	3
2	2	3	1
2	3	1	2
3	1	3	2
3	2	1	3
3	3	2	1

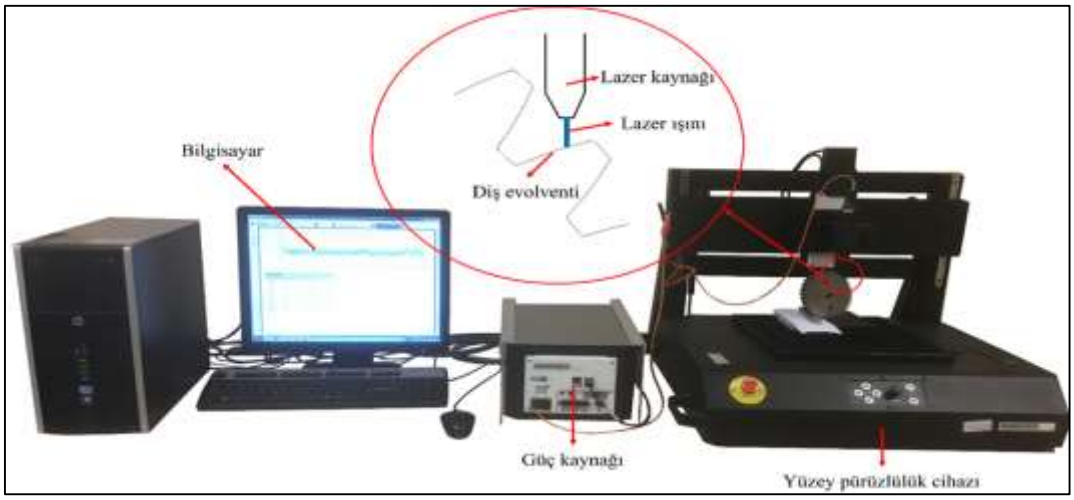


Resim 4.6. Lepleme macunu.



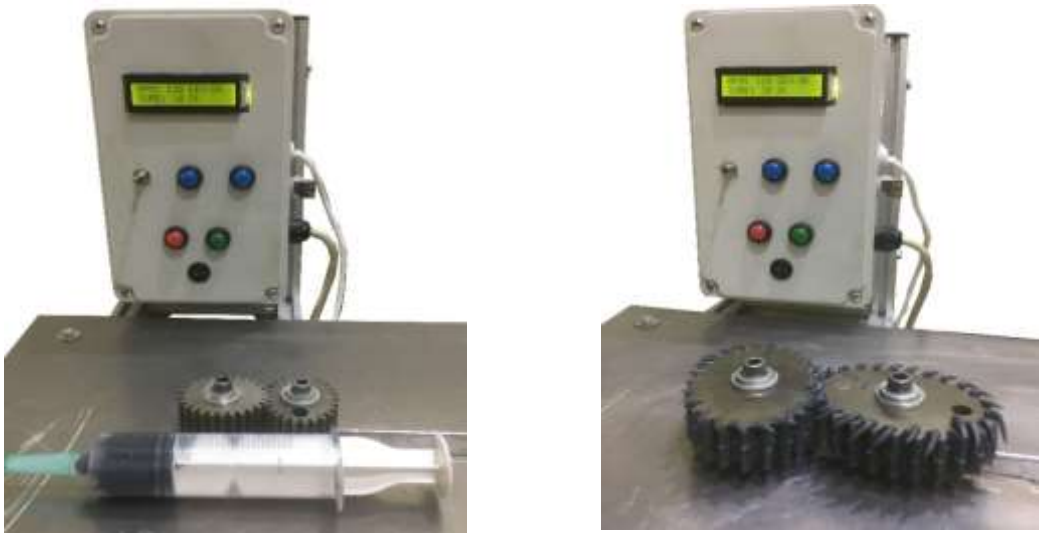
(a) (b)

Resim 4.7. a) Eliptik dişlilerin tartılması. b) Diş profillerinin fotoğraflanması.



Resim 4.8. Yüzey pürüzlülük cihazı.

Lepleme macunu, şırınga üzerinde bulunan ölçü çubuğu yardımıyla her seferinde eşit miktarda olacak şekilde eliptik dişlilerin her bir diş boşluğuna uygulanmıştır (Resim 4.9a). Daha sonra lepleme baskısını uygulamak amacıyla döndürülen dişliye kütle asılmış, cihaz çalıştırılmadan önce el ile bir tur döndürülerek lepleme macununun tüm diş yüzeylerine dağılması sağlanmış ve fazla lepleme macunu temizlenmiştir (Resim 4.9b). Son olarak belirlenen parametrelerle tüm eliptik dişliler leplenmiş ve lepleme sonrası dişliler üzerindeki lepleme macunları temizlenmiştir.



(a) (b)

Resim 4.9. a) Lepleme macunun şırıngaya alınması. b) Lepleme macunun diş boşluklarına doldurulması.

4.4. Eliptik Dişli Debimetrelerin Ölçtüğü Debi Değerlerinin Belirlenmesi

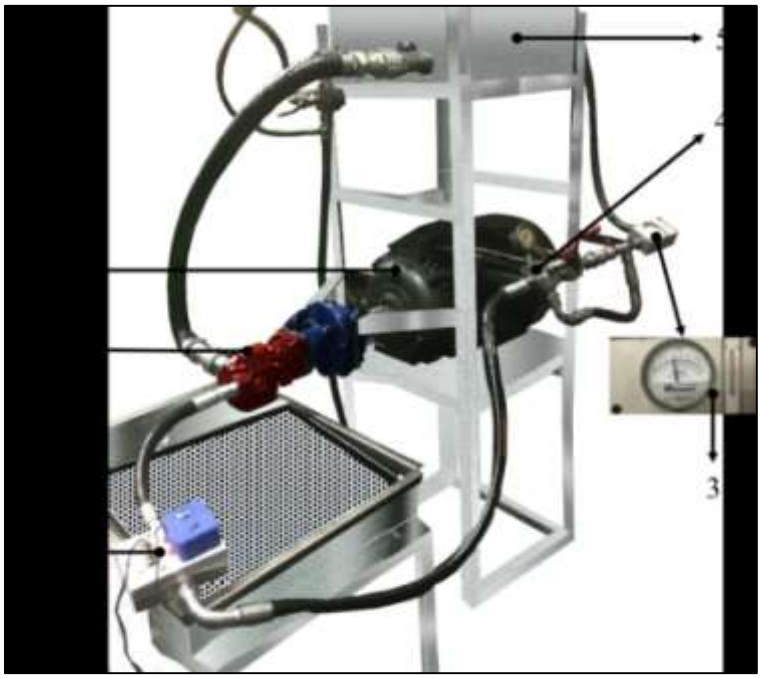
Bu tez çalışmasında debi değerleri iki türlü belirlenmiştir. Tasarımı ve imalatı yapılan debimetrelerin önce deneysel olarak ölçtükleri debi miktarları belirlenmiş daha sonra CFD modelleri oluşturulmuştur. CFD modellere sınır şartları olarak deneysel parametreler girilerek sanal ortamda da debi değerleri tespit edilmiştir.

4.4.1. Debi miktarının deneysel olarak belirlenmesi

Debimetrelerin debi ölçüm testleri Resim 4.10'da gösterilen test düzeneğinde yapılmıştır. Debi ölçümleri öncesinde imal edilen debimetreler, deney düzeneği üzerinde referans debimetreyle kalibre edilmiş ve çalışma kapsamında imal edilen debimetrelerin kalibrasyon katsayıları, referans debimetrenin göstergesi üzerinden okunan değerlere göre belirlenmiştir. Debimetreler, manometre üzerinden elle ayar yapılarak ve 2,5 MPa, 3 MPa, 3,5 MPa, 4 MPa ve 4,5 MPa olmak üzere beş farklı basınç kademesinde teste tabi tutulmuştur. Bununla birlikte sisteme güç 50 l/dk kapasiteli, en yüksek basıncı 27 MPa olan dişli pompayla sağlanmıştır. İmalatı yapılan dokuz farklı debimetrelerin ölçtüğü debi değerleri Eş. 4.12 ile hesaplanmıştır.

$$Q = n \cdot \lambda, \left(\frac{L}{dk}\right) \tag{4.12}$$

Burada; Q ölçülen debi miktarı, n rotor dişlinin devir sayısı ve λ kalibrasyon katsayısı olarak tanımlanmıştır. Kalibrasyon katsayısı, rotor dişlinin bir devirde süpürdüğü hacim olarak tanımlanmış ve debimetrelerin yazılımına eklenerek debi değerleri OLED ekrandan okunmuş ve kaydedilmiştir. Test düzeneğinde sisteme basınç, Çizelge 4.7'de teknik özellikleri verilen 46 numara yağla sağlanmıştır.



Resim 4.10. Debi ölçüm test düzeneği. 1 – Dişli pompa, 2 – Eliptik dişli debimetre, 3 – Kalibrasyon debimetresi, 4 – Manometre, 5 -Tank, 6 – Elektrik motoru [71].

Çizelge 4.7. Hidrolik yağ teknik özellikleri [Shell Tellus S2 V46].

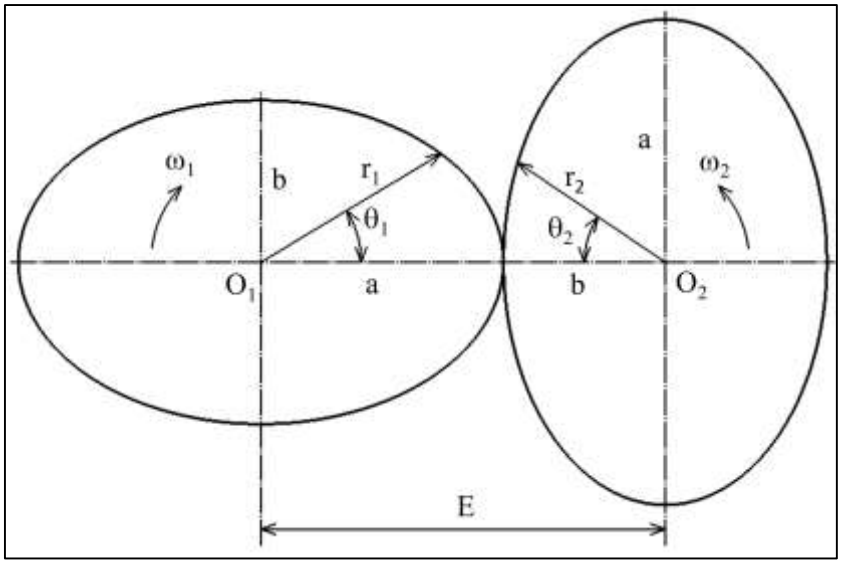
	Standart	Teknik Özellik
ISO Viskozite Sınıfı	ISO 3448	46
ISO Tipi		HV
Kinematik Viskozite -20 ºC cSt[a]	ASTM D445	2350
Kinematik Viskozite 40 ºC cSt	ASTM D445	46
Kinematik Viskozite 100 ºC cSt	ASTM D445	7,9
Viskozite İndeksi	ISO 2909	143
Yoğunluk 15 ºC kg/l	ISO 12185	0,872
Parlama Noktası (COC) ºC	ISO 2592	225
Akma Noktası ºC	ISO 3016	-36

4.4.2. Debi miktarlarının CFD analiziyle belirlenmesi

Debimetrelerin CFD modelleri ANSYS Workbench, akış analizleriyse ANSYS Fluent ortamında gerçekleştirilmiştir. Debimetrelerin CFD analizlerinden elde edilen debi miktarları dinamik ağ yapısı kullanılarak belirlenmiştir. Eliptik dişlilerin adım elipslerinin dönme açısına karşılık gelen yarıçapların parametrik denklemi [74] Eş. 4.13'te verilmiştir.

$$r_1(\theta_1) = \frac{2 \cdot a \cdot b}{(a+b) - (a-b) \cdot \cos(2\theta_1)} \tag{4.13}$$

Eliptik dişli çiftleri arasındaki aktarım Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Şekil 4.2'de sol taraftaki dişli rotor, sağ taraftaki dişliyse döndürülen dişlidir. a adım elipsinin büyük yarıçapı, b adım elipsinin küçük yarıçapı, θ_1 rotor dişlinin dönme açısı, θ_2 döndürülen dişlinin dönme açısı, r_1 döndüren dişlinin θ_1 açısına bağlı yarıçapı, r_2 döndürülen dişlinin θ_2 açısına bağlı yarıçapı, E dişlilerin eksenler arası mesafesi, ω_1 rotor dişlinin açısal hızı ve ω_2 döndürülen dişlinin açısal hızıdır.



Şekil 4.2. Eliptik dişli çiftleri aktarım şeması [71].

Rotor dişlilerin açısal hızı, imal edilen debimetreler üzerinden okunan değerlere göre Eş. 4.14, eliptik dişliler arasındaki çevrim oranı Eş. 4.15 ile hesaplanmıştır.

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{60}.n \tag{4.14}$$

$$\omega_1.r_1 = \omega_2.r_2 \tag{4.15}$$

Burada;

$$r_2 = E - r_1 \; ve \;\; E = a + b$$

Olarak tanımlanmıştır. Rotor dişlinin zamana bağlı anlık yarıçap değişimiyse Eş. 4.16'da verilmiştir. Bu eşitlikte t zamanı ifade etmektedir.

$$r_1 = \frac{2 \cdot a \cdot b}{(a+b) - (a-b) \cdot \cos(2\omega_1 t)} \tag{4.16}$$

Rotor dişlileri, basınçlı akışkanın dişlilere ulaşmasıyla birlikte dönmeye başlar. Bu dönme hareketi döndürülen dişliyi çevrim oranı kadar döndürür. Eliptik dişliler arasındaki bu çevrim oranı ANSYS Fluent ortamında kullanıcı tanımlı fonksiyonla (UDF) CFD modellere uygulanmıştır (Resim 4.11).

```
#include "udf.h"

#define RPM 1920
// Devir sayısı, dev/dk
#define W (2*3.141592*RPM)/60
// Rotor dişlinin açısal hız, rad/s

DEFINE_CG_MOTION(gear1_motion,dt,vel,omega,time,dtime)
{
    omega[2] = W;
}
DEFINE_CG_MOTION(gear2_motion, dt, vel, omega, time, dtime)
{
    double a = 22.08707;
    // Adım elipsinin büyük yarı çapı, mm
    double b = 17.669656;
    // Adım elipsinin büyük yarı çapı, mm

    double r1, r2, ratio;

    r1 = (2 * a * b) / ((a + b) - (a - b) * cos(2 * W * time));
    // Zamana bağlı anlık yarı çap değeri, mm
    r2 = a + b - r1;
    // Döndürülen dişlinin anlık yarı çap değeri, mm
    ratio = r1 / r2;
    // Dişliler arası çevrim oranı
    omega[2] = -W * ratio;
    //Döndürülen dişlinin açısal hızı, rad/s
}
```

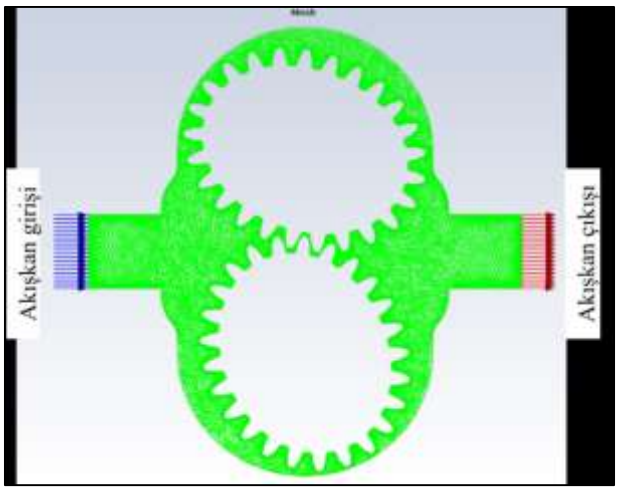
Resim 4.11. Eliptik dişli çiftlerinin çevrim oranının zamana bağlı UDF kodu [71].

Dokuz farklı debimetrenin CFD modellerine (Resim 4.12) akışkan giriş sınır şartları, her bir debimetre için belirlenen beş faklı basınç değerine karşılık gelen akışkan giriş hızları ve basınç değeri, akışkan çıkış sınır şartı olarak ise belirlenen beş farklı basınç değeri kullanılarak akış analiz sonuçları elde edilmiştir. CFD ağ modellerine ait düğüm ve eleman sayıları Çizelge 4.8'de verilmiştir. CFD akış analizleri, İntel Core (TM) İ7-12700 2,30 Ghz, 16 GB bellek ve NVIDIA GeForce RTX 3050 ekran kartına sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiş ve her bir CFD analizi ortalama 12 saat sürmüştür. Üretilen debimetrelerin ölçtüğü debi miktarları Şekil 4.3a' da devre şeması verilen bir deney düzeneğiyle belirlenmiştir. Şekil 4.3b' de görüldüğü üzere çıkış sınır şartı olarak basınç değerlerinin

atanması, üretilen debimetrelerin performans testlerinin basınç altında yapılmış olmasıdır. Akışkan giriş hızlarıysa Eş. 4.17 ile hesaplanmıştır. Türbülanslı akış modeli gerçekleştirilebilir türbülans (Realizable κ–ε) ve çözücü olaraksa birleşik algoritma (Coupled Algorithm) seçilmiştir. Bu çözücünün seçilme nedeni momentum ve basınca dayalı süreklilik denklemlerini birlikte çözebilmesidir.

$$Q = V.A \tag{4.17}$$

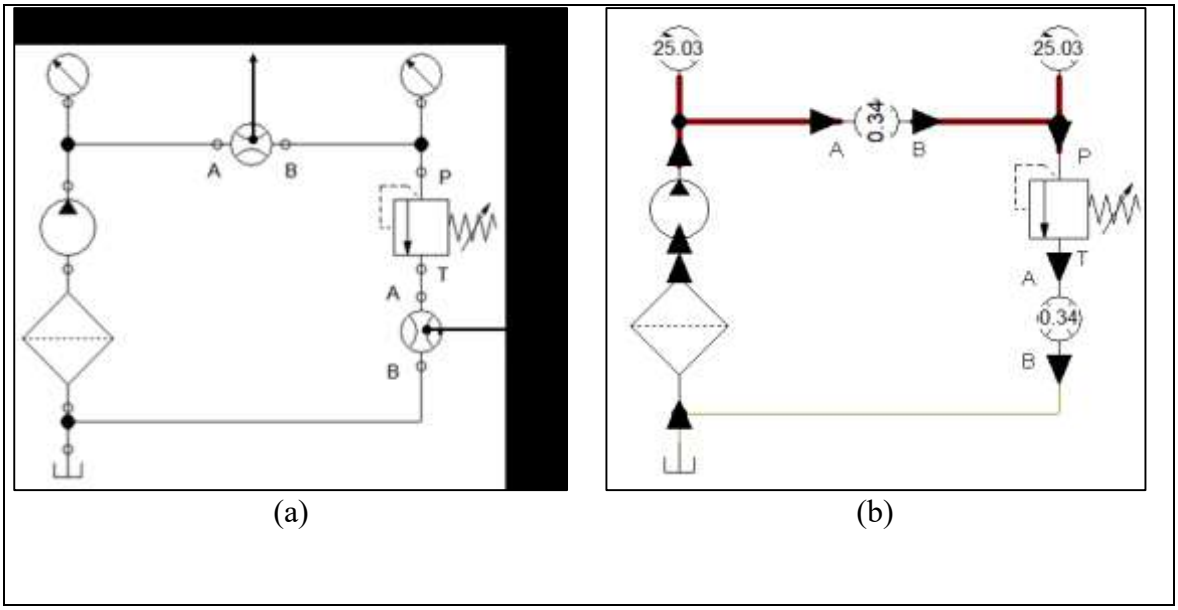
Burada; V akışkanın giriş hızı, A akışkanın giriş alanıdır.



Resim 4.12. CFD modellerin ağ yapısı [71].

Çizelge 4.8. CFD modellerin ağ yapısının düğüm ve eleman sayıları [71].

	Debimetre Kodu								
	Db-01	Db-02	Db-03	Db-04	Db-05	Db-06	Db-07	Db-08	Db-09
Düğüm	31280	49841	80825	40369	65537	50682	52404	40486	68483
Eleman	56883	90829	148079	73530	120216	92737	95974	73957	126137



(a) (b)

Şekil 4.3. a) Deney setinin devre şeması. b) İmal edilen debimetrenin giriş ve çıkış basınçları [71].

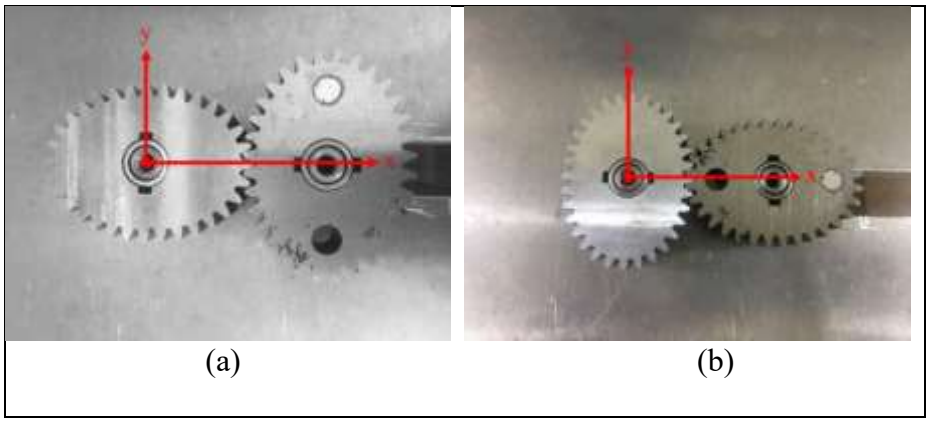
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Eliptik Düz Dişlilerin Eksen Kaçıklık Miktarlarının Belirlenmesi, Lepleme Operasyonu ve Modül Değerlerinin Ölçülmesi

Eliptik dişli çiftlerinin tel erozyon tezgahında kesiminden sonra eksen kaçıklık değerlerine bakılmış, lepleme operasyonu yapılmış ve lepleme sonrası tekrar eksen kaçıklık miktarları belirlenmiştir.

5.1.1. Eksen kaçıklık değerlerinin belirlenmesi

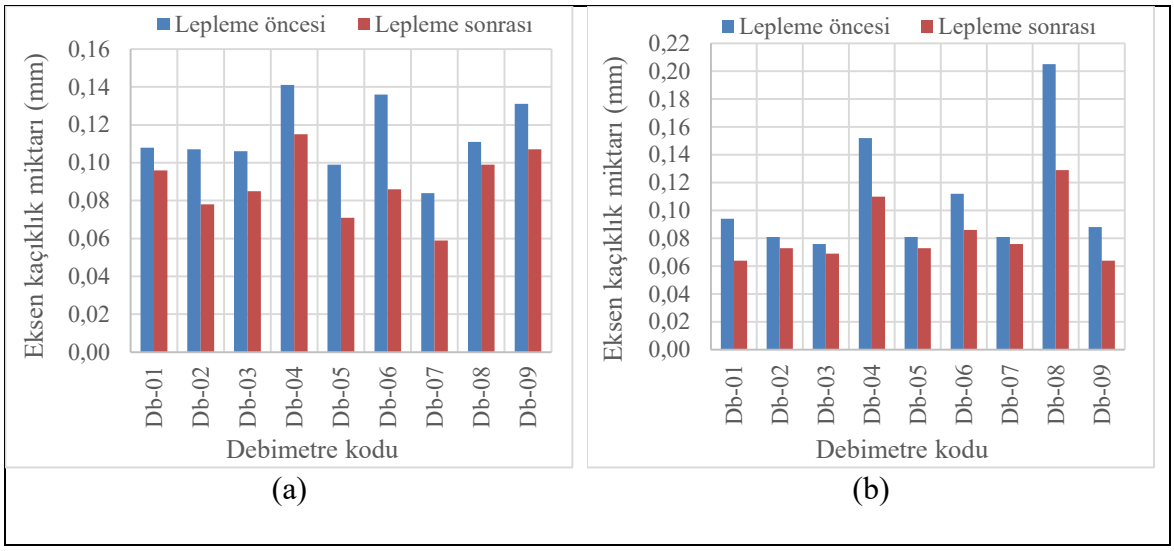
Eksen kaçıklık miktarları, imalatı yapılan lepleme ve eksen kaçıklık cihazının sabit ve hareketli millerine monte edilen eliptik düz dişli çiftleri birbirlerine, hareketli mile 1 kg'lık kütle asılarak temas ettirilmiş ve 1 derecede bir veri alınarak belirlenmiştir. Bu deney üretilen 9 farklı eliptik düz dişli çiftlerine ayrı ayrı uygulanmıştır. Eksen kaçıklık deneyleri, eliptik düz dişli çiftlerinin başlangıç konumları, adım elipsinin büyük yarı çapı x ve y eksenine paralel olacak şekilde yatay ve dikey (Şekil 5.1) olarak iki defa tekrarlanmıştır.



(a) (b)

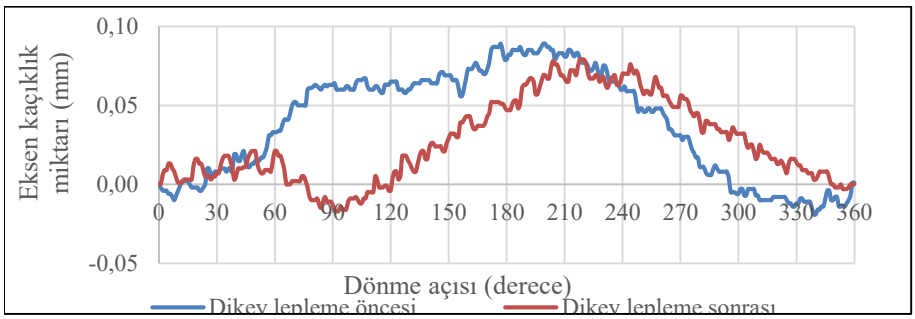
Şekil 5.1. a) Yatay konum. b) Dikey konum.

Eliptik düz dişli çiftlerinin eksen kaçıklık miktarları lepleme operasyonu öncesinde ve sonrasında yatay ve dikey konumda belirlenmiş, lepleme öncesinde ve sonrasında en büyük ve en küçük eksen kaçıklık miktarları elde edilmiş, eksen kaçıklık miktarlarının farkları hesaplanmıştır (Şekil 5.2). Lepleme öncesi ve sonrası oluşan eksen kaçıklık değerlerinin yüzde değişimleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

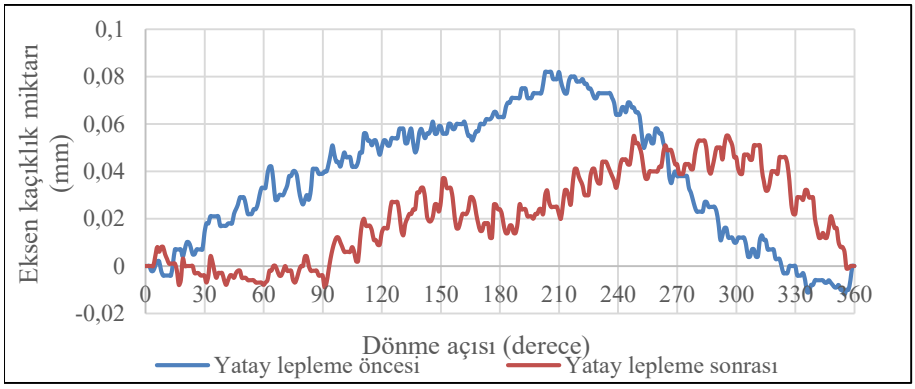


Şekil 5.2. Eliptik düz dişlilerin eksen kaçıklık fark miktarları. a) Dikey konum. b) Yatay konum.

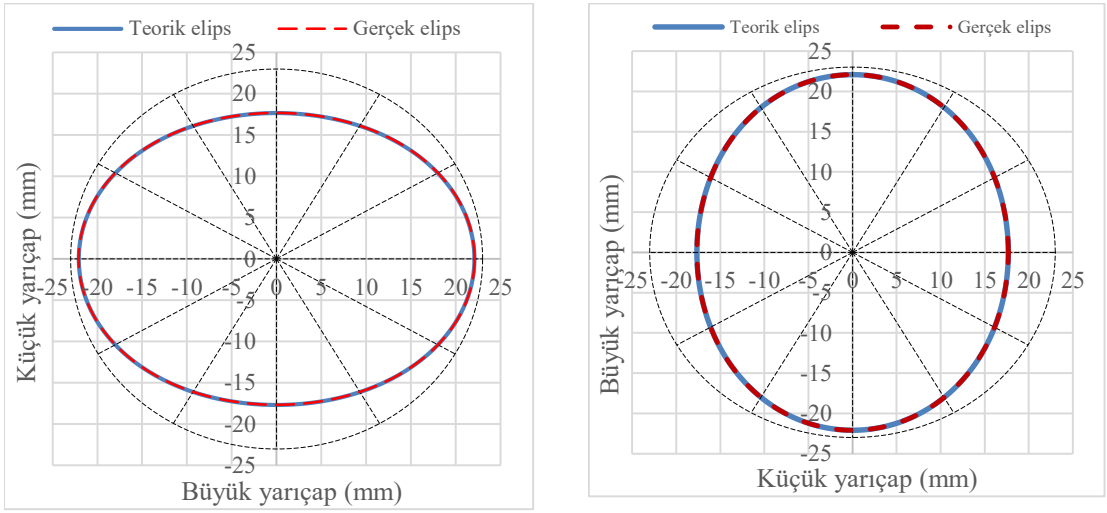
Bütün eliptik düz dişlilerin yatay ve dikey konumlarda alınan eksen kaçıklık miktarları lepleme sonrasında azalmıştır (Şekil 5.2). Yatay konum ele alındığında en büyük yüzde değişimin -%37,07 değeriyle Db-08 kodlu, en küçük yüzde değişimi ise -%6,17 değeriyle Db-07 kodlu eliptik düz dişli çiftinde olduğu görülmüştür. Benzer şekilde dikey konumda en büyük yüzde değişim -%36,76 değeriyle Db-06 kodlu, en küçük yüzde değişimse -%10,81 değeriyle Db-08 kodlu eliptik düz dişli çiftinde olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te lepleme cihazının eksen kaçıklık ölçüm modundan alınmış Db-01 kodlu debimetre dişlilerinin sırasıyla dikey ve yatay konumlardaki grafikleri verilmiştir. Benzer şekilde teorik bölüm elipsi ve hem lepleme öncesinde hem de lepleme sonrası eksen kaçıklık miktarlarının elde edilmesinden sonra oluşan gerçek bölüm elipsleri arasında göz ardı edilebilecek kadar fark oluşmuştur. Teorik ve gerçek bölüm elipsleri sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Db-01 kodlu eliptik dişli çiftinin dikey konumda eksen kaçıklık miktarı.

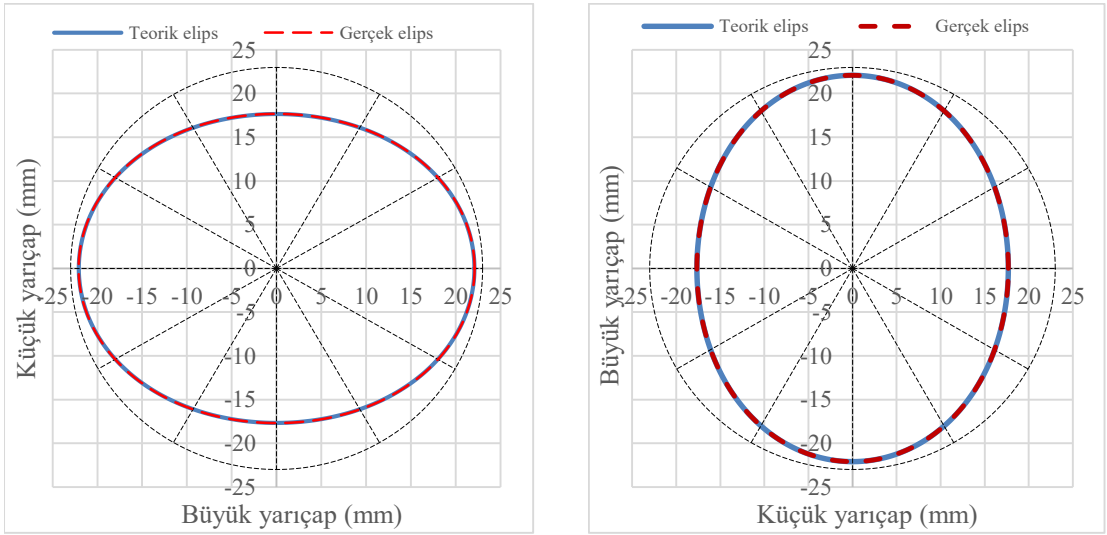


Şekil 5.4. Db-01 kodlu eliptik dişli çiftinin yatay konumda eksen kaçıklık miktarı.



(a) (b)

Şekil 5.5. Lepleme öncesi Db-01 kodlu dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.



(a) (b)

Şekil 5.6. Lepleme sonrası Db-01 kodlu dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.

Çizelge 5.1. Dikey ve yatay konumda eksen kaçıklıklarının yüzde değişimleri (%).

	Db-01	Db-02	Db-03	Db-04	Db-05	Db-06	Db-07	Db-08	Db-09
Dikey konum	-11,11	-27,10	-19,81	-18,44	-28,28	-36,76	-29,76	-10,81	-18,32
Yatay konum	-31,91	-9,88	-9,21	-27,63	-9,88	-23,21	-6,17	-37,07	-27,27

Eksen kaçıklık değişim miktarlarının yatay ve dikey konumda birbirlerinden farklı olmasının nedeniyse, eliptik dişlilerin diş profillerinin her bir dişte hatta aynı dişin iki yan evolvent profillerinin birbirlerinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. İmal edilen eliptik dişli çiftlerinin hem yatay hem de dikey konumda belirlenen eksen kaçıklık fark miktarları, debimetre gövdesine yerleştirilecek mil eksen arası mesafesine eklenmesi gerekmektedir. Bu sayede eliptik dişli çiftlerinin daha sessiz ve kasıntısız çalışması sağlanmakta ve dişliler zorlanmayacağı için debi ölçümleri daha doğru olacaktır.

5.1.2. Eliptik düz dişlilerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ve kütle kayıplarının belirlenmesi

Yüzey pürüzlülük değerleri, eliptik dişli düz dişlinin evolvent eğrisi üzerinden alınmıştır. Lepleme operasyonu öncesi ve sonrası ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Bütün eliptik düz dişlilerde lepleme sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine göre en büyük yüzde değişim -%47,70 ile Db-06 kodlu, en küçük yüzde değişimse -%11,83 değeriyle Db-09 kodlu ait eliptik düz dişlide görülmüştür. Bununla birlikte en büyük yüzde değişimin elde edildiği lepleme parametreleri 220 dev/dk, 10 dk ve 1 kg kütlede olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan, modül değerleri ayrı ayrı değerlendirildiğinde m = 1,60, m = 2,00 ve m = 2,50 için en iyi lepleme parametreleri Çizelge 5.3'te gösterilmiştir. Çizelge 5.3 incelendiğinde, modül değerlerinin değişimiyle birlikte devir sayıları ve süreler değişmesine rağmen kütlelerin eşit ve 1 kg olduğu tespit edilmiştir. Lepleme işlemiyle eliptik düz dişlilerin ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde %27,64'lük bir iyileşme olmuş ve bu beklenilen olağan sonuç olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca birbirleriyle temas halinde çalışan eliptik düz dişlilerin lepleme işleminin tasarım ve imalatı zor olmayan bir cihazla yapılmasının mümkün olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.2. Lepleme öncesi ve sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değerleri.

Debimetre kodu	Lepleme öncesi			Lepleme sonrası			Yüzde değişim (%)		
	R_a (µm)	R_t (µm)	R_z (µm)	R_a (µm)	R_t (µm)	R_z (µm)	R_a (µm)	R_t (µm)	R_z (µm)
Db-01	1,290	37,500	6,100	0,810	9,820	3,890	-37,21%	-73,81%	-36,23%
Db-02	2,610	52,700	15,000	1,470	22,200	9,340	-43,68%	-57,87%	-37,73%
Db-03	1,520	26,800	4,860	1,330	21,300	7,760	-12,50%	-20,52%	59,67%
Db-04	1,150	28,900	5,450	0,926	12,800	5,590	-19,48%	-55,71%	2,57%
Db-05	1,560	16,600	4,510	1,360	29,200	7,530	-12,82%	75,90%	66,96%
Db-06	2,390	42,600	12,900	1,250	19,400	5,790	-47,70%	-54,46%	-55,12%
Db-07	1,700	35,700	6,800	1,080	13,200	6,410	-36,47%	-63,03%	-5,74%
Db-08	2,030	57,500	9,440	1,480	23,700	8,310	-27,09%	-58,78%	-11,97%
Db-09	1,690	38,100	7,070	1,490	21,600	8,290	-11,83%	-43,31%	17,26%

Çizelge 5.3. Modül değerlerine göre en iyi lepleme parametreleri.

m, modül (mm)	n, devir sayısı (dev/dk)	t, süre (dk)	M, kütle (kg)
1,60	170	20	1
2,00	220	10	1
2,50	120	30	1

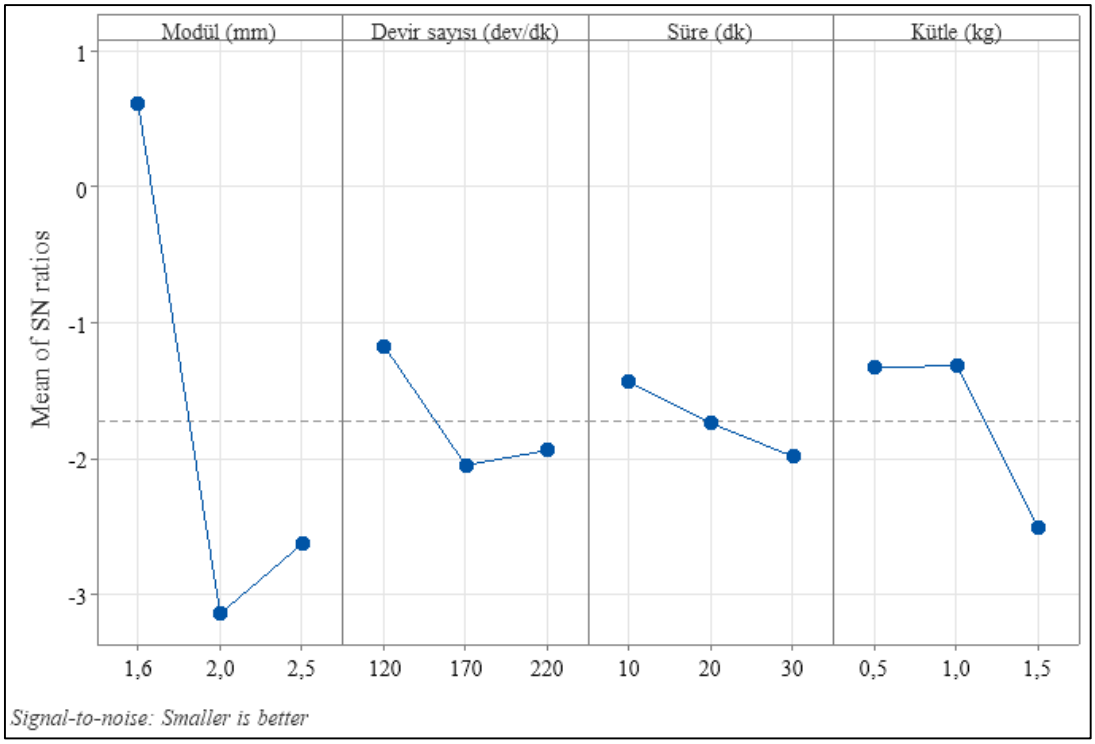
Ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri için %95 güven aralığında yapılan varyans analizi sonuçları, P değerlerine göre modül, hız ve zaman parametrelerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu, kütle parametresinin ise anlamsız olduğunu ortaya koymuştur. Alıştırma parametrelerinin katkı oranları incelendiğinde, hız parametresinin %79,76 ile en yüksek katkıya sahip olduğu, kütle parametresinin ise %0,61 ile en az anlamlı katkıya sahip olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 5.4). Yüzey pürüzlülüğü değerlerini etkileyen lepleme parametrelerini belirlemek için en küçük en iyidir kriterine göre yapılan Taguchi analizi, D faktörü seviye 1, E faktörü seviye 1, F faktörü seviye 1 ve G faktörü seviye 2'nin (m = 1,6, S = 120 dev/dk, t = 10 dk, M = 1 kg) optimal olduğunu göstermiştir. Ayrıca, Şekil 10'da gösterildiği gibi M = 0,5 kg alıştırma için uygun görülmüştür (Şekil 5.7).

Çizelge 5.4. Ortalama yüzey pürüzlülüğüne göre varyans analizi.

Değişkenler	SD	SKT	KO	DKT	DOK	F-Değeri	P-Değeri
Modül	2	0,15442	9,57%	0,15442	0,077212	13,83	0,000230
Devir sayısı	2	1,28738	79,76%	1,28738	0,643692	115,30	0,000000
Süre	2	0,06202	3,84%	0,06202	0,031012	5,55	0,013217
Kütle	2	0,00982	0,61%	0,00982	0,004912	0,88	0,431960
Hata	18	0,10049	6,23%	0,10049	0,005583		
Toplam	26	1,61415	100,00%				

SD: Serbestlik derecesi, SKT: Sıralı kareler toplamı, KO: Katkı oranı, DKT: Düzeltilmiş kareler toplamı, DOK: Düzeltilmiş ortalama kareler.

$R^2 = 93,77\%$ R^2 (düzeltilmiş) = 91,01%



Şekil 5.7. Taguchi L9 deney setine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin en küçük en iyi S/N oranı analizi.

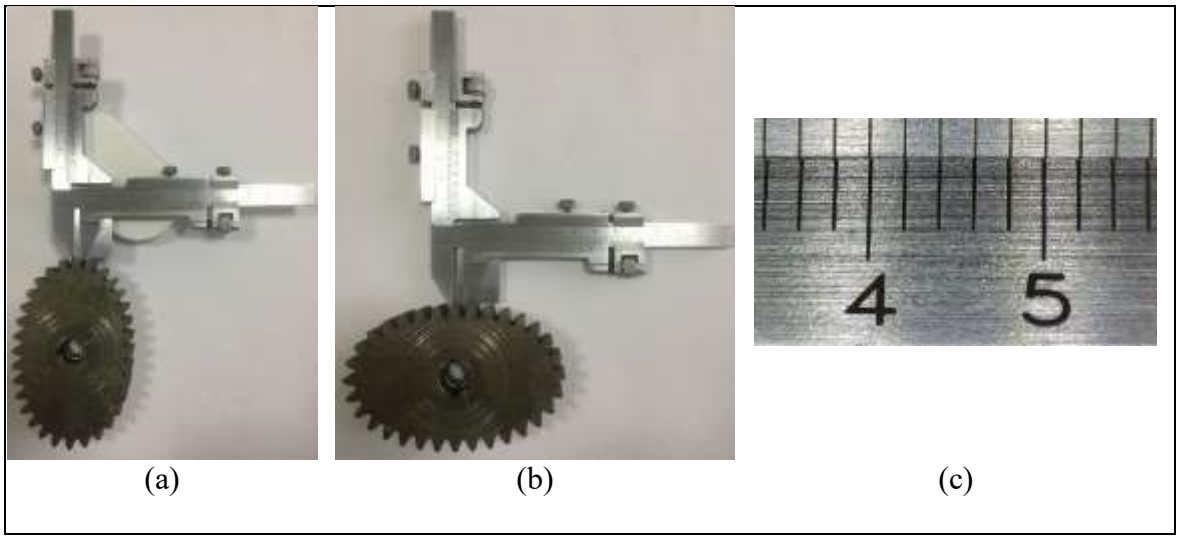
Eliptik düz dişli çiftlerinin lepleme sonrası kütle kayıpları, üzeri delikli ve deliksiz eliptik düz dişli şeklinde ikiye ayrılarak belirlenmiştir. Üzerinde delik bulunan eliptik düz dişli, deliğe bir mıknatıs yerleştirilerek debimetre rotoru olarak kullanılmıştır [71]. Ölçülen kütle kayıpları ve yüzde değişimleri Çizelge 5.5'te gösterilmiştir. Yüzde olarak en büyük kütle kaybı delik bulunan Db-08 kodlu eliptik düz dişlide -%0,0543, en küçük kütle kaybının ise -%0,0101 ile Db-01 kodlu deliksiz dişlide olduğu tespit edilmiştir. Yüzde değişimlere göre kütle kayıplarının ihmal edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.5. Eliptik dişlilerin lepleme sonrası kütle değişimleri.

	Lepleme öncesi kütle (gr)		Lepleme sonrası kütle (gr)		Kütle farkı (gr)		Değişim (%)	
Debimetre Kodu	Deliksiz	Delikli	Deliksiz	Delikli	Deliksiz	Delikli	Deliksiz	Delikli
Db-01	167,858	155,054	167,841	155,035	0,017	0,019	-0,0101	-0,0123
Db-02	466,639	454,113	466,624	453,996	0,015	0,117	-0,0032	-0,0258
Db-03	1176,28	1163,42	1176,06	1163,25	0,220	0,170	-0,0187	-0,0146
Db-04	283,444	270,898	283,371	270,824	0,073	0,074	-0,0258	-0,0273
Db-05	726,38	713,86	726,23	713,72	0,150	0,140	-0,0207	-0,0196
Db-06	431,98	419,034	431,876	418,98	0,104	0,054	-0,0241	-0,0129
Db-07	439,391	426,412	439,219	426,213	0,172	0,199	-0,0391	-0,0467
Db-08	256,991	244,984	256,909	244,851	0,082	0,133	-0,0319	-0,0543
Db-09	698,08	685,24	697,87	684,95	0,210	0,290	-0,0301	-0,0423

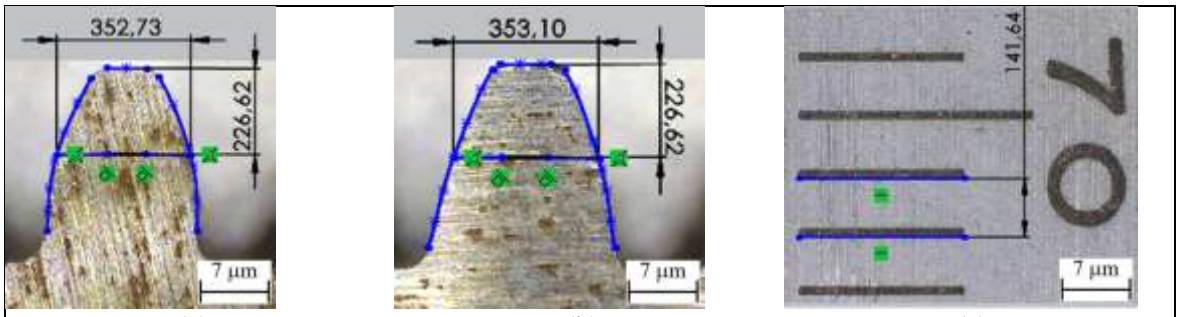
5.1.3. Modül değerlerinin ölçülmesi

Eliptik dişli çiftlerinin modül değerleri hem lepleme operasyonu öncesinde hem de lepleme operasyonu sonrasında 1/50'lik modül kumpası ve bilgisayar destekli tasarım ortamında ölçülerek, lepleme öncesi ve lepleme sonrasındaki modül değerleri karşılaştırılmıştır. Modül kumpasıyla eliptik dişlilerin bölüm elipsinin hem büyük hem de küçük yarıçapları üzerindeki dişlilerin modül değerleri ölçülmüştür. Modül değerinin tam okunabilmesi için modül kumpasının verniyer bölümü dijital mikroskopla büyütülmüş ve okunarak kaydedilmiştir (Resim 5.1). Benzer şekilde eliptik dişliler bir dijital mikroskopla lepleme öncesi ve sonrasında bölüm elipsinin büyük ve küçük yarıçapları üzerinde bulunan dişleri dijital mikroskobun yüksekliği bozulmadan 200 kat büyütülerek fotoğraflanmış ve Resim 5.2'de görüldüğü gibi bilgisayar destekli tasarım ortamına alınarak diş profilleri çizilerek modül değerleri ölçülmüştür. Ölçek olarak 1/20'lik mekanik kumpas dijital mikroskobun yüksekliği bozulmadan fotoğraflanmış ve bilgisayar destekli tasarım ortamda kullanılmıştır.



(a) (b) (c)

Resim 5.1. a) Bölüm elipsinin büyük yarıçapından modül değeri ölçme. b) Bölüm elipsinin küçük yarıçapından modül değeri ölçme. c) Modül kumpasının verniyerinin dijital mikroskopla büyütülmüş hali.



(a) (b) (c)

Resim 5.2. a) Bölüm elipsinin büyük yarıçapından modül değeri belirleme. b) Bölüm elipsinin küçük yarıçapından modül değeri belirleme. c) Ölçek.

Lepleme operasyonu öncesinde modül kumpası ve bilgisayar destekli tasarım ortamında ölçülen modül değerleri Çizelge 5.6'da lepleme operasyonu sonrasında ölçülen modül değerleri Çizelge 5.7'de ve lepleme operasyonu öncesinde ve sonrasında meydana gelen modül değerlerinin yüzde değişimleriyse Çizelge 5.8'de verilmiştir. Eliptik dişlilerin diş genişliğiyse teorik olarak Eş. 5.1 ile hesaplanmıştır. Teorik ve ölçülen diş genişliği değerlerinin lepleme operasyonu öncesi farklı olmasının nedeni tel erozyon tezgahının gap boşluğu neden olmuştur ve bu hata kabul edilebilir düzeydedir. Ayrıca imalat sonrası diş genişliği değerinin, teorik modül değerinden düşük olması dişlilerin daha rahat çalışmasını sağlamaktadır. Lepleme işlemi sonrası, eliptik dişlilerin diş evolventi üzerinden talaş

kaldırıldığı için ölçülen diş genişliği değerlerinin, teorik diş genişliğinden küçük olması doğaldır.

$$w = \frac{m.\pi}{2} \tag{5.1}$$

Çizelge 5.8 incelendiğinde lepleme operasyonu öncesi ve sonrası modül kumpasıyla ölçülen en büyük yüzde değişimin bölüm elipsinin büyük yarıçapı üzerinde ölçülen diş genişliği değeri %-2,04 ile Db-04 kodlu debimetre dişlisine, en küçük yüzde değişimse bölüm elipsinin hem büyük hem de küçük yarıçapı üzerinden ölçülen diş genişliği değeri %-0,51 ile sırasıyla Db-03, Db-06 ve Db-09 kodlu debimetrelerin dişlilerinde görülmüştür. Benzer şekilde bilgisayar destekli tasarım ortamından elde edilen diş genişliği değerleri ele alındığında; en büyük yüzde değişim Db-05 kodlu debimetrenin dişlisinde bölüm elipsinin küçük yarıçapı üzerinde ölçülen diş genişliği %-1,31, en küçük yüzde değişimse Db-09 kodlu debimetrenin dişlisinin bölüm elipsinin küçük yarıçapı üzerinde ölçülen diş genişliğinde %-0,03 olarak tespit edilmiştir. Ortalama yüzde değişimlerse, lepleme operasyonu öncesi ve sonrasında modül kumpasıyla ölçülen diş genişliği değerlerinde %-1,18 ve bilgisayar destekli tasarım ortamında ölçülen diş genişliği değerlerinde %-0,39 olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.6. Lepleme operasyonu öncesi modül değerlerinin ölçümü (mm).

		Modül kumpasıyla ölçüm		B.D.T.O ölçüm	
Debimetre Kodu	Hesaplanan diş genişliği	B.Y.Ö	K.Y.Ö	B.Y.Ö	K.Y.Ö
Db-01	2,513	2,50	2,50	2,490	2,493
Db-02	3,142	3,12	3,10	3,107	3,105
Db-03	3,927	3,92	3,92	3,925	3,921
Db-04	2,513	2,50	2,48	2,490	2,495
Db-05	3,142	3,12	3,10	3,138	3,135
Db-06	3,927	3,92	3,92	3,904	3,905
Db-07	2,513	2,50	2,52	2,491	2,495
Db-08	3,142	3,10	3,14	3,114	3,119
Db-09	3,927	3,92	3,92	3,907	3,908

B.D.T.O: Bilgisayar destekli tasarım ortamı, B.Y.Ö: Büyük yarıçaptan ölçüm, K.Y.Ö: Küçük yarıçaptan ölçüm

Çizelge 5.7. Lepleme operasyonu sonrası modül değerlerinin ölçümü (mm).

		Modül kumpasıyla ölçüm		B.D.T.O ölçüm	
Debimetre Kodu	Hesaplanan diş genişliği	B.Y.Ö	K.Y.Ö	B.Y.Ö	K.Y.Ö
Db-01	2,513	2,46	2,46	2,476	2,471
Db-02	3,142	3,06	3,06	3,094	3,105
Db-03	3,927	3,90	3,90	3,905	3,908
Db-04	2,513	2,44	2,46	2,484	2,477
Db-05	3,142	3,08	3,08	3,099	3,094
Db-06	3,927	3,90	3,90	3,901	3,902
Db-07	2,513	2,44	2,46	2,498	2,497
Db-08	3,142	3,08	3,10	3,101	3,105
Db-09	3,927	3,90	3,90	3,903	3,909

B.D.T.O: Bilgisayar destekli tasarım ortamı, B.Y.Ö: Büyük yarıçaptan ölçüm, K.Y.Ö: Küçük yarıçaptan ölçüm

Çizelge 5.8. Lepleme öncesi ve sonrası modül değerlerinin yüzde değişimleri (%).

	Modül kumpasıyla ölçüm		B.D.T.O ölçüm	
Debimetre Kodu	B.Y.Ö	K.Y.Ö	B.Y.Ö	K.Y.Ö
Db-01	-1,60	-1,60	-0,58	-0,90
Db-02	-1,92	-1,29	-0,41	0,01
Db-03	-0,51	-0,51	-0,50	-0,34
Db-04	-2,40	-0,81	-0,26	-0,73
Db-05	-1,28	-0,65	-1,24	-1,31
Db-06	-0,51	-0,51	-0,08	-0,08
Db-07	-2,40	-2,38	0,27	0,08
Db-08	-0,65	-1,27	-0,43	-0,44
Db-09	-0,51	-0,51	-0,10	0,03

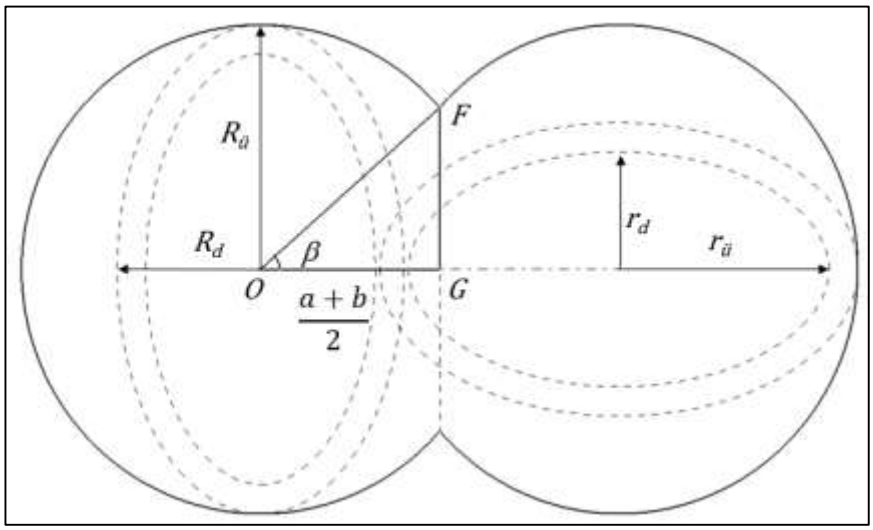
B.Y.Ö: Büyük yarıçaptan ölçüm, K.Y.Ö: Küçük yarıçaptan ölçüm

5.2. Debimetrelerin Ölçtüğü Debi Miktarlarının Belirlenmesi

İmal edilen 9 farklı debimetrenin ölçtüğü debi miktarları deneysel olarak ölçülmüş ve CFD analiziyle doğrulanmıştır. Deneysel olarak debi miktarları Bölüm 4.4.1'de verilen deney setinde 5 farklı basınç altında belirlenmiştir. Belirlenen basınç değerleri ve deneysel olarak elde edilen devir sayılarıyla CFD analizine sınır şartları uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir.

5.2.1. Deneysel olarak ölçülen debi miktarı bulguları

İmal edilen debimetreler deney düzeneğinde bulunan referans debimetreyle kalibre edilmiştir. Debimetreye montajlı elektronik devreyle rotor dişlinin devir sayıları belirlenerek her bir debimetreye ait kalibrasyon katsayıları tespit edilmiştir. Kalibrasyon katsayısı, rotor dişlinin bir devirde süpürdüğü hacim şeklinde tanımlanmış ve Eşitlik 5.3'ün geometrik anlatımı Şekil 5.8'de verilmiştir. Burada eliptik düz dişlilerin diş üstü elipsinin büyük yarıçap ($R_ü$) değerinin oluşturduğu dairelerin alanından, eliptik düz dişlilerin alanı ve dairelerin kesişim alanı çıkarılarak toplam alan bulunmuştur. Burada |OF| = $R_ü$, $\widehat{AOB} = \beta$ ve |OG|=(a+b)/2 şeklinde belirlenmiştir. Bu alan dişli yüksekliğiyle çarpılarak bir devirde süpürülen geometrik hacim bulunmuştur.



Şekil 5.8. Süpürülen hacmin geometrik gösterimi.

$$A = 2\pi \left[R_{ü}^2 \left(1 - \frac{\beta}{180^{\circ}} \right) - a.b + \frac{(R_ü.R_d - r_ü.r_d)}{z} \right] + (a+b).\sqrt{R_{ü}^2 - \left(\frac{a+b}{2} \right)^2} \qquad (5.2)$$

$$\lambda = A.B.10^{-6} \qquad (5.3)$$

Eş. 5.2 ve Eş. 5.3'te, A süpürülen alan, λ bir devirde süpürülen hacim, a bölüm elipsinin büyük yarıçapı, b bölüm elipsinin küçük yarıçapı, $R_ü$ diş üstü elipsinin büyük yarıçapı, R_d diş üstü elipsinin küçük yarıçapı, $r_ü$ diş dibi elipsinin büyük yarıçapı, r_d diş dibi elipsinin

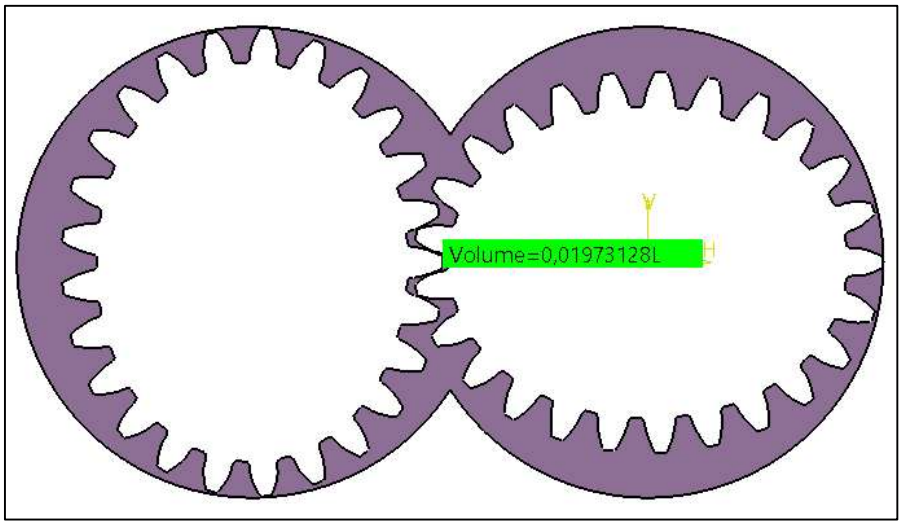
küçük yarıçapı, m modül, z diş sayısı ve B dişli yüksekliği olarak tanımlanmıştır. $R_ü$, R_d, $r_ü$ ve r_d Eş. 5.4 ve Eş. 5.5'te gösterilmiştir. β açısı ise Eş. 5.6'da verilmiştir.

$$R_ü = a + m \quad ve \quad R_d = a - 1{,}166.m \tag{5.4}$$

$$r_ü = b + m \quad ve \quad r_d = b - 1{,}166.m \tag{5.5}$$

$$\beta = cos^{-1}\left(\frac{\frac{a+b}{2}}{R_ü}\right) \tag{5.6}$$

Ayrıca bilgisayar destekli tasarım ortamından da kalibrasyon katsayısı elde edilebilir (Resim 5.3). Çizelge 5.9'da bilgisayar destekli tasarım, Eş. 5.3 ve testlerden elde edilen kalibrasyon katsayıları ve bölüm elipslerinin büyük yarıçapı ve küçük yarıçapı değerleri verilmiştir. Debi ölçümü için geliştirilen elektronik devre yazılımına deney setinden elde edilen kalibrasyon katsayısı tanımlanmış ve rotor dişlinin bir dakikadaki dönüş sayısıyla çarpılarak debi miktarları elde edilmiştir. Bununla birlikte kalibrasyon katsayısının belirlenebilmesi için referans bir debimetre yoksa Eş. 5.3 veya bilgisayar destekli tasarım ortamından hesaplanan kalibrasyon katsayıları devre yazılımına tanımlanabilir. Eş. 5.3 ve bilgisayar destekli tasarım ortamıyla belirlenen kalibrasyon katsayıları arasında %1 hata olduğu görülmüştür. Benzer şekilde gerçek kalibrasyon değeriyle Eşitlik 3 arasında ise %4-%6 arasında hata tespit edilmiştir. Bu hatanın, debimetrelerin çalışma boşluklarından ve sürtünmelerden kaynaklandığı belirlenmiştir. Diğer taraftan bu hatanın diğer bir nedeniyse, eliptik düz dişli çiftlerinin birbirleri üzerinde yuvarlandıkları bölüm elipsleri, yuvarlanma esnasında sürekli temas halinde kalması için düzeltilmiş ve süpürülen hacmi etkilediği sonucuna varılmıştır.



Resim 5.3. Bilgisayar destekli tasarım ortamından elde edilen kalibrasyon katsayısı.

Çizelge 5.9. Kalibrasyon katsayıları (L).

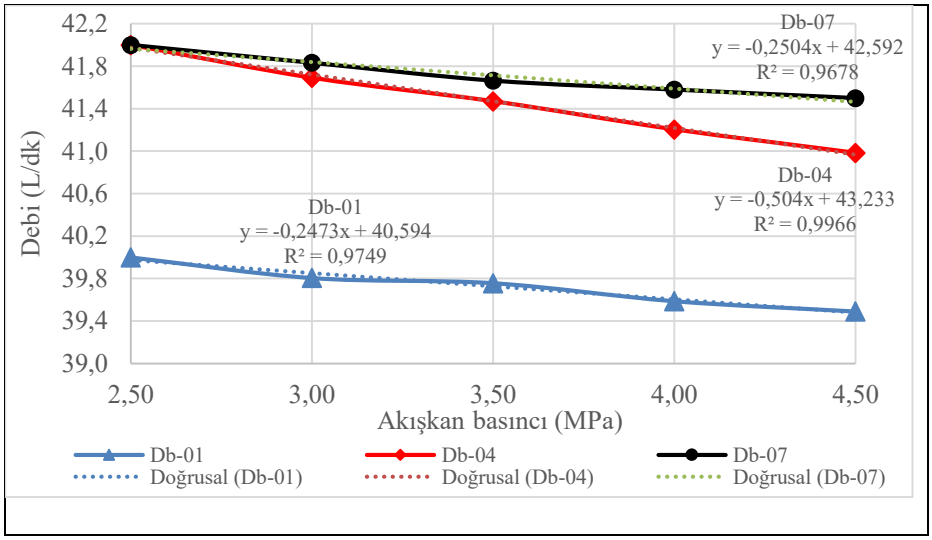
Debimetre Kodu	a	b	Eşitlik 3 aracılığıyla Hesaplanan Değer	Bilgisayar Destekli Tasarım Ortamı Değeri	Deney Setinden Ölçülen Değer
Db-01	22,08707	17,669656	0,019490	0,019731	0,020833
Db-02	35,33932	28,271456	0,044865	0,045126	0,048387
Db-03	55,21768	44,174144	0,101049	0,101072	0,107399
Db-04	29,46561	21,046864	0,038309	0,038060	0,040385
Db-05	46,04001	32,885721	0,088045	0,086877	0,092784
Db-06	35,96876	25,691971	0,061927	0,061119	0,065714
Db-07	38,40052	24,000325	0,073895	0,071908	0,076364
Db-08	30,00041	18,750256	0,050394	0,049171	0,053846
Db-09	48,00065	30,000406	0,120997	0,117423	0,127809

İmal edilen debimetrelerin performans testlerine göre tüm debimetrelerde akışkan basınç değeri arttıkça ölçülen debi değerlerinde düşüş tespit edilmiş ve literatürde yapılan çalışmalara incelendiğinde, benzer bulguların elde edildiği görülmüştür [78].

Deney düzeneğindeki aktif basınç değeri yükseldikçe tasarımı ve imalatı çalışma kapsamında yapılan debimetrelerin ölçtüğü debi değerlerinde düşüşler olduğu belirlenmiştir. Debimetreler arasında her basınç değerinde en büyük debi miktarı m = 2,50 mm ölçüsüne sahip debimetrelerle ölçülmüştür. Benzer şekilde en küçük debi miktarları ise m = 1,60 mm sahip debimetrelerle elde edilmiştir. Ayrıca akışkan basınç değerine karşılık ölçülen debi miktarları arasında doğrusal bir eğilim olduğu görülmüştür. Bütün debimetrelerle ölçülen

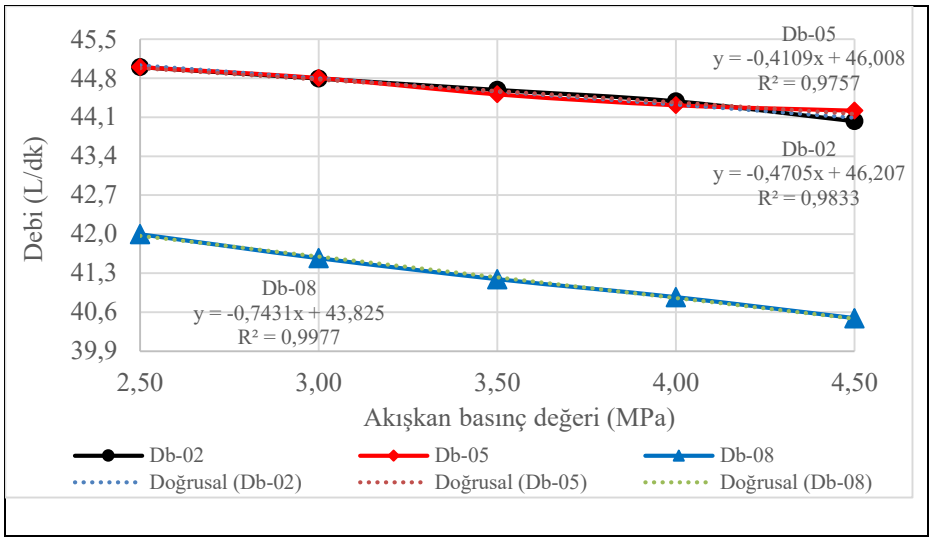
debi değerleri göz önüne alındığında, akışkan basınç değeri ve ölçülen debi miktarı arasında R^2 değerlerinin 0,96'dan büyük olduğu sonucuna varılmıştır. R^2 değerlerinin 0,96'dan büyük ve 1'e yakın olması sebebiyle, debimetrelerin en az hatayla imal edildiği tespit edilmiştir. Bu debimetreler arasında en doğru debi miktarını R^2=0,9977 değeriyle Db-08 kodlu debimetrenin ölçtüğü belirlenmiştir.

Şekil 5.9 incelendiğinde m = 1,60 ölçüsüne sahip debimetreler arasında en büyük debi miktarını Db-07 kodlu debimetreyle, en küçük debi miktarını ise Db-01 kodlu debimetreyle ölçülmüştür. Bununla birlikte m = 1,60 ölçüsüne sahip debimetreler arasında en doğru debi miktarı R^2 = 0,9966 değeriyle Db-04 kodlu debimetreyle belirlenmiştir.



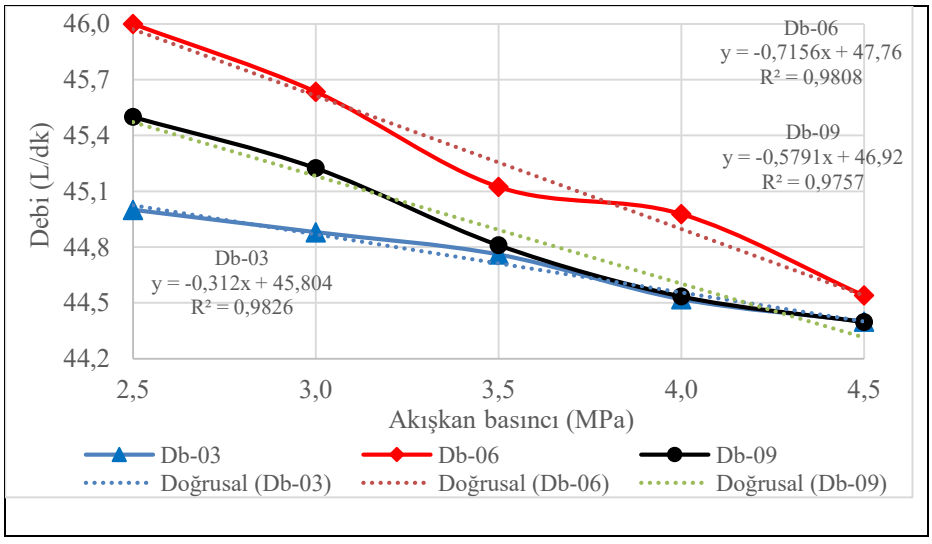
Şekil 5.9. m = 1,60 ölçüsüne sahip debimetrelerin akışkan basıncına karşılık ölçtüğü debi miktarları

m = 2,00 ölçüsüne sahip debimetreler incelendiğinde (Şekil 5.10) Db-02 ve Db-05 kodlu debimetrelerin birbirlerine yakın ve tüm basınç değerlerinde en büyük debi miktarlarını ölçtükleri görülmüştür. Bununla birlikte bütün debimetrelerde akışkan basıncı arttıkça ölçülen debi miktarlarının düştüğü ve Db-08 kodlu debimetre ise tüm basınç değerlerinde en küçük debi miktarlarını ölçtüğü belirlenmiştir. R^2 değerleri ele alındığında en doğru debi miktarını R^2 = 0,9977 değeriyle Db-08 kodlu debimetrenin ölçtüğü tespit edilmiştir.



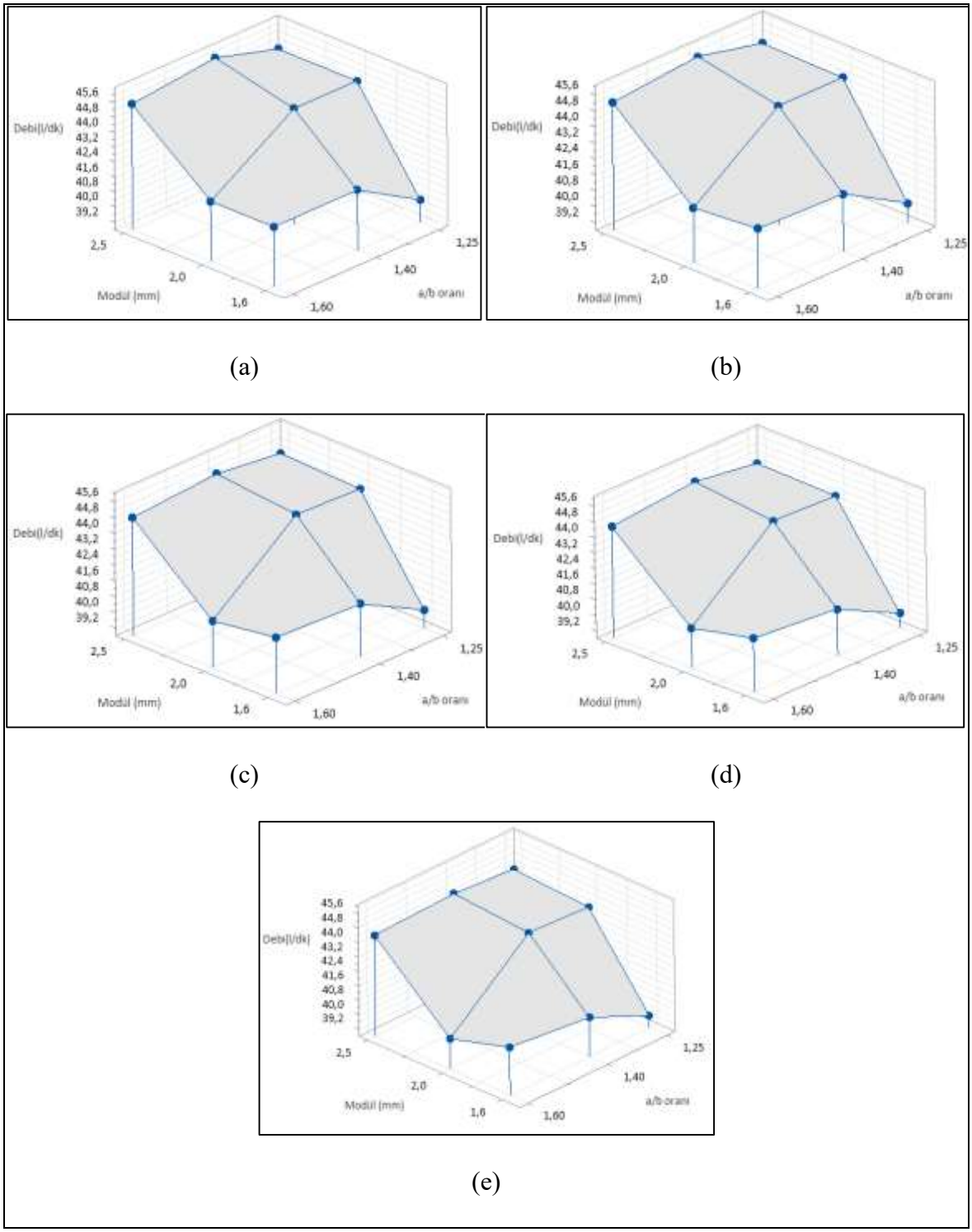
Şekil 5.10. m = 2,00 ölçüsüne sahip debimetrelerin akışkan basıncına karşılık ölçtüğü debi miktarları.

Şekil 5.11 incelendiğinde, tüm debimetrelerle ölçülen debi miktarları akışkan basıncının artmasıyla düştüğü belirlenmiştir. En büyük debi miktarlarını tüm basınç değerlerinde Db-06 kodlu debimetrenin ölçtüğü ve en küçük debi miktarları ise Db-03 kodlu debimetreyle elde edilmiştir. Ancak 4,0 ve 4,5 MPa basınçlarda Db-03 ve Db-09 kodlu debimetreler benzer debi miktarlarını ölçtüğü görülmüştür. m = 2,50 ölçüsüne sahip debimetreler arasında R^2 = 0,9826 değeriyle Db-03 kodlu debimetre en doğru debi miktarını ölçtüğü tespit edilmiştir.



Şekil 5.11. m = 2,50 ölçüsüne sahip debimetrelerin akışkan basıncına karşılık ölçtüğü debi miktarları.

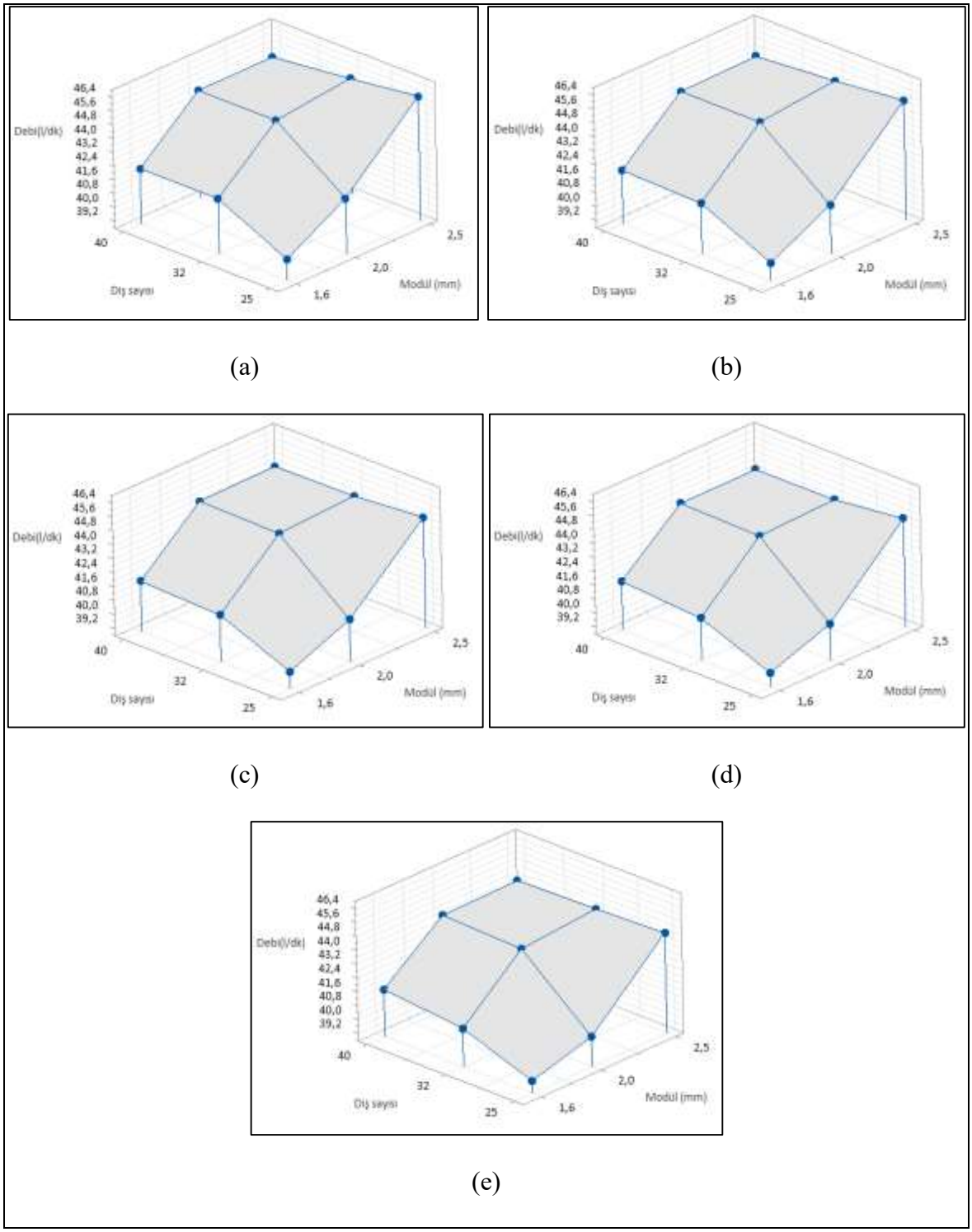
Modül ve a/b oranlarının, ölçülen debi miktarına etkisinin incelendiği Şekil 5.12'de; akışkan basıncına karşılık ölçülen ortalama debi miktarları değişimi, a/b = 1,25 oranı incelendiğinde, m = 1,60 ve m = 2,00 arasında %12 iken, m = 2,00 ile m = 2,50 değerlerinde %0,29 olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, a/b = 1,40 oranındaki debi değişimleriyse m = 1,60 ile m = 2,00 arasında %7,67 olduğu ve m = 2,00 ve m =2,50 arasında ise %1,36 şeklinde tespit edilmiştir. a/b = 1,60 oranı ele alındığında, m = 1,60 ile m = 2,00 değerlerindeki ortalama debi değişimi %-1,18, m = 2,00 ve m = 2,50 arasında ortalama %8,90 olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, modül değerleri sabit tutulup a/b oranlarına göre ölçülen debi miktarlarına bakıldığında m = 1,60 parametresinde, a/b = 1,25 ve a/b = 1,40 oranları arasında ortalama debi değişimi %4,38 ve a/b = 1,40 ile a/b = 1,60 oranları arasında ise %0,59 ortalama debi miktarı değişimi görülmüştür. Diğer bir modül, m = 2,00 değerindeki ölçülen debi miktarlarında ise ortalama debi değişimleri, a/b = 1,25 ve a/b = 1,40 oranı arasında ortalama debi değişimi %0,20 ve a/b = 1,40 ile a/b = 1,60 oranları arasındaysa % -7,67 olarak tespit edilmiştir. m = 2,50 değerinde ölçülen debi miktarlarının ortalama debi değişimiyse a/b = 1,25 ve a/b = 1,40 oranları arasında %1,27, a/b = 1,40 ve a/b = 1,60 oranlarında %-0,80 olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak sabit a/b değerlerinde modül değeri arttıkça ölçülen debi miktarının arttığı, ancak sabit modül değerlerinde a/b oranı arttıkça ölçülen debi miktarlarının doğrusal bir şekilde artmadığı sonucuna varılmıştır. Böylece ölçülen modül ve a/b oranı arasındaki ilişkiye göre debi miktarını etkileyen en önemli parametrenin modül değeri olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.12. Modül – a/b oranının ölçülen debi miktarına etkisi. a) 2,5 MPa basınç. b) 3,0 MPa basınç. c) 3,5 MPa basınç. d) 4,0 MPa basınç. e) 4,5 MPa basınç

Modül ve diş sayısının ölçülen debi miktarına etkisi incelendiğinde (Şekil 5.13), m = 1,60 parametresinde ölçülen debi miktarlarının ortalama değişimi z = 25 ile z = 32 diş arasında %4,38, z 32 ve z = 40 diş değerlerindeki değişimse %0,59 olarak belirlenmiştir. Diğer bir modül değeri olan m = 2,00'de ortalama debi değişimleri ise z = 25 ve z = 32 diş

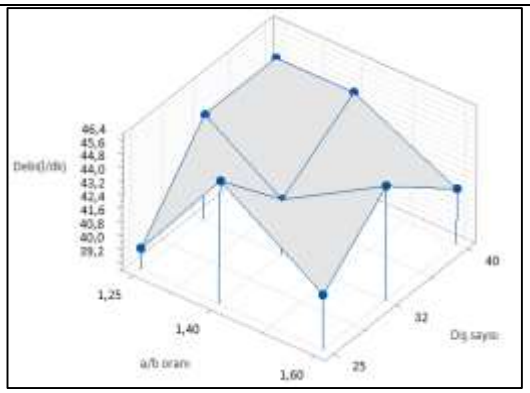
parametrelerinde %8,10 ve z = 32 ile z= 40 diş değerlerinde %0,20 şeklinde tespit edilmiştir. Benzer şekilde m = 2,50 parametresinde, z = 25 ve z = 32 diş değerlerinde ortalama debi değişimi %-0,80, z = 32 ile z = 40 diş arasındaki ortalama debi değişimi ise %-0,45 olduğu görülmüştür. Diğer taraftan diş sayılarının sabit tutulduğu ve modül değerlerinin artması veya azalmasıyla ölçülen debi miktarlarındaki ortalama değişimler ise z = 25 dişte, m = 1,60 ve m = 2,00 parametrelerinde %3,76 iken m = 2,00 ile m = 2,50 değerleri arasında %9,78 olduğu belirlenmiştir. z = 32 dişte ölçülen debi miktarlarındaki ortalama değişim miktarları, m = 1,60 ile m = 2,00 ölçüleri arasında %7,45, m = 2,00 ve m = 2,50 değerlerinde %0,75 olarak elde edilmiştir. Diğer bir değer olan z = 40 diş parametresinde ölçülen debi miktarının ortalama değişimi, m = 1,60 ile m = 2,00 değerleri arasında %7,03 iken m = 2,00 ve m = 2,50 ölçüleri arasında %0,09 olarak belirlenmiştir. Modül ve diş sayısı değerleri arasında ölçülen debi miktarını etkileyen en önemli parametrelerin modül ve diş sayısı olarak tespit edilmiştir. Çünkü modül ve diş sayısı arttıkça ölçülen debi miktarları da genel olarak artmış, ancak m =2,50 değerinde diş sayısı arttıkça ölçülen debi değerinin düştüğü görülmüştür. Bu düşüşün ise %-0,80 ve %-0,45 olduğu göz önünde bulundurulduğunda, diş sayısının ölçülen debi miktarı üzerinde etkili olmadığı sonucuna varılmıştır.



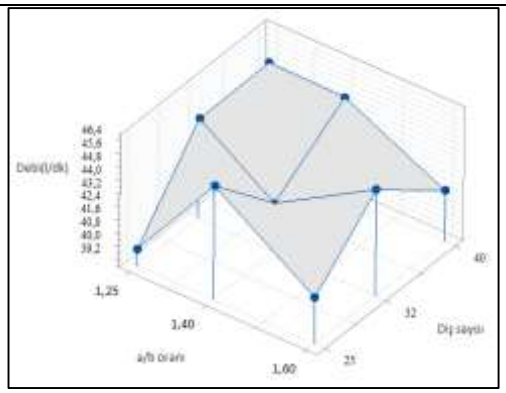
Şekil 5.13. Modül – diş sayısının ölçülen debi miktarına etkisi. a) 2,5 MPa basınç. b) 3,0 MPa basınç. c) 3,5 MPa basınç. d) 4,0 MPa basınç. e) 4,5 MPa basınç.

Diş sayısı ve a/b oranının ölçülen debi miktarına etkisi incelendiğinde (Şekil 5.14), a/b = 1,25 oranında ölçülen debi miktarlarının ortalama değişimleri z = 25 ile z = 32 diş arasında %12,16 iken z = 32 ve z = 40 diş arasında %0,29 olduğu belirlenmiştir. a/b = 1,40 oranı ele alındığında ortalama debi değişimi z = 25 ve z = 32 diş arasında %-8,36 ve z = 32 ile z = 40

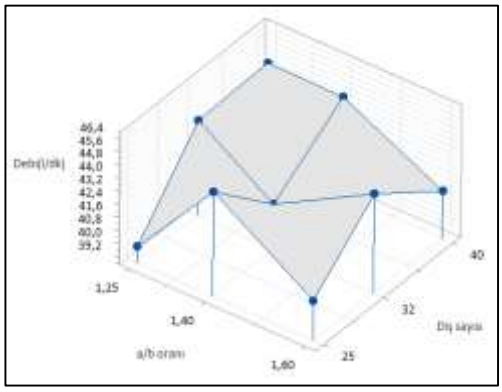
diş arasındaysa %7,67 olarak görülmüştür. Diğer bir parametre olan a/b = 1,60 oranındaki ölçülen debi miktarının ortalama değişimi z = 25 ve z = 32 diş arasında %8,90 iken z = 32 ile z = 40 diş arasında ise %-7,08 olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde sabit diş sayılarına karşılık a/b oranındaki değişimlerin ölçülen debi miktarına etkisi incelendiğinde z = 25 diş parametresinde ortalama debi değişimi a/b = 1,25 ile a/b = 1,40 oranları arasında %13,91, a/b = 1,40 ve a/b = 1,60 oranları arasında ise %-8,91 olarak elde edilmiştir. z = 32 diş parametresinde ölçülen debi miktarının ortalama deşiğimi a/b = 1,25 ile a/b = 1,40 oranları arasında %-6,94 iken a/b = 1,40 ve a/b = 1,60 oranları arasında %8,26 şeklinde belirlenmiştir. z = 40 dişte ölçülen debi miktarlarının ortalama değişimi ise a/b = 1,25 ve a/b = 1,40 oranları arasında %-0,09, a/b = 1,40 ile a/b = 1,60 oranlarında ise %-6,57 olduğu görülmüştür. Diş sayısı ve a/b oranları arasındaki ilişkiye bakıldığında her iki parametrenin de ortalama debi değişimleri ani artma veya azalma karakteristiği gösterdiğinden ölçülen debi miktarlarına katkısı olmadığı sonucuna varılmıştır.



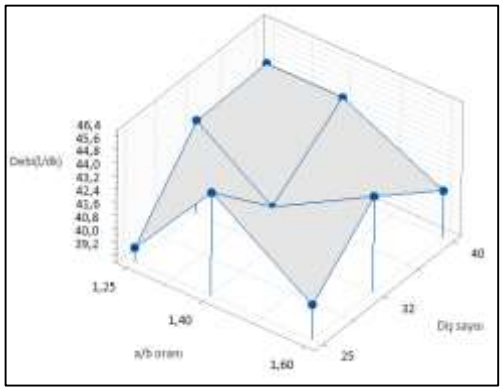
(a)



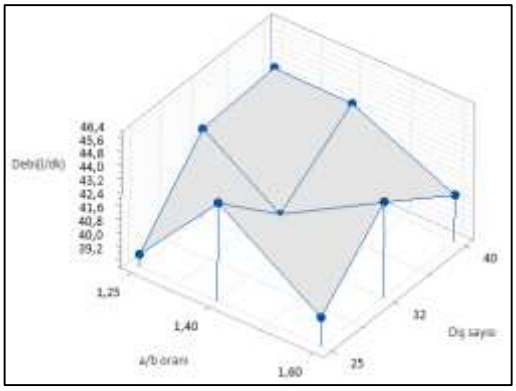
(b)



(c)



(d)

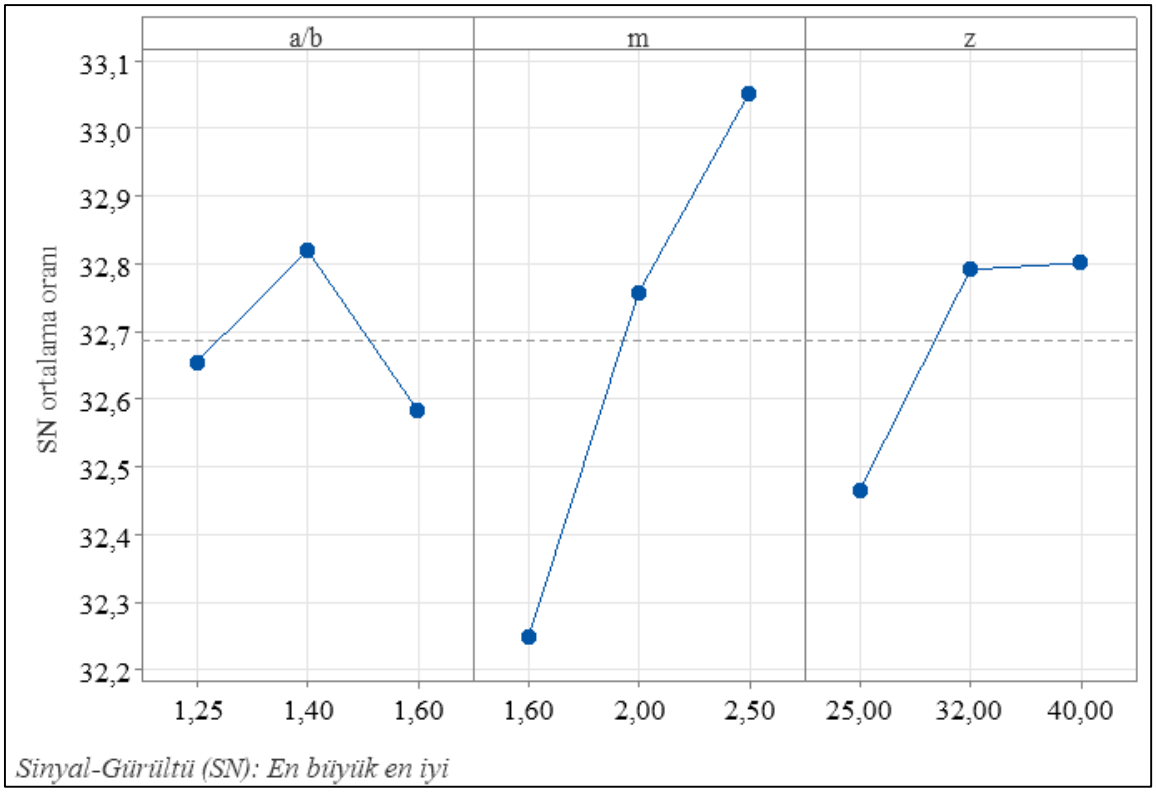


(e)

Şekil 5.14. Diş sayısı – a/b oranının ölçülen debi miktarına etkisi. a) 2,5 MPa basınç. b) 3,0 MPa basınç. c) 3,5 MPa basınç. d) 4,0 MPa basınç. e) 4,5 MPa basınç.

Taguchi metodu kullanılarak gereksiz imal edilecek debimetrelerden ve yapılacak debi ölçüm deneylerinden kaçınılmış, bununla birlikte zaman ve maliyet tasarrufu sağlanmıştır. Taguchi L_9 deney setine göre üretilmiş 9 farklı debimetreyle 5 farklı basınçta, 45 farklı debi

miktarı elde edilmiştir. Bu debi miktarlarına göre yapılan en büyük en iyi durumunda elde edilen sinyal gürültü oranına (S/N) göre Taguchi analiz sonucunda (Şekil 5.15), en uygun eliptik düz dişli parametrelerinin a/b = 1,40, m = 2,50 mm ve z = 40 diş, bununla birlikte a/b = 1,40, m = 2,50 mm ve z = 32 diş parametrelerinin de eliptik düz dişli tasarım ve imalatı için uygun olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.15. Ölçülen debi miktarının Taguchi L_9 deney setine göre en büyük en iyi analizi S/N oranı.

Tasarlanan ve imal edilen akış ölçerler üzerinde %95 güven aralığında varyans analizi yapılmıştır (Çizelge 5.10). Analiz sonuçlarından elde edilen verilere dayanarak aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır. Katkı oranına göre en büyük katkıyı %65,17 ile modül değerinin yaptığı, bunu %10,53 ile diş sayısının ve %0,95 ile a/b oranının takip ettiği belirlenmiştir. Bu parametrelerin P değerleri anlamlı bulunmuştur. Diş sayısı, a/b oranı ve modül parametrelerinin ikili etkileşimleri değerlendirildiğinde, m*z değerinin %17,31 katkı sağladığı, en düşük katkıyı ise %0,05 değeriyle a/b*basınç ikilisinin sağladığı sonucuna varılmıştır. Akış testlerinin sonuçları R^2 = %98,98 ile güvenilir bulunmuştur. Katkı oranları arasında en önemli parametrenin modül olması normal karşılanmıştır çünkü modül, silindirik düz dişli çarklarda olduğu gibi eliptik bir düz dişli çarkın ekleme ve çıkarma

elipsini etkileyen en önemli unsurdur. Benzer şekilde, m*z değeri eliptik düz dişlilerde hatve elipsinin çevresiyle yakından bağlantılıdır ve çevre süpürülen hacmi etkilediğinden, en büyük katkıyı yapması mantıklıdır.

Çizelge 5.10. İmal edilen debimetrelerin varyans analizi.

Değişkenler	SD	SKT	KO	DKT	DOK	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	10	175,777	98,98%	175,777	17,5777	331,07	0,000000
a/b	1	1,686	0,95%	1,935	1,9351	36,45	0,000001
m	1	115,730	65,17%	0,213	0,2125	4,00	0,053460
z	1	18,695	10,53%	15,543	15,5428	292,74	0,000000
Basınç	1	5,001	2,82%	0,002	0,0017	0,03	0,858341
a/b*m	1	1,180	0,66%	12,723	12,7227	239,63	0,000000
a/b*z	1	2,259	1,27%	6,028	6,0277	113,53	0,000000
a/b*Basınç	1	0,092	0,05%	0,092	0,0919	1,73	0,197158
m*z	1	30,746	17,31%	30,746	30,7465	579,10	0,000000
m*Basınç	1	0,166	0,09%	0,166	0,1659	3,13	0,086047
z*Basınç	1	0,223	0,13%	0,223	0,2226	4,19	0,048394
Hata	34	1,805	1,02%	1,805	0,0531		
Toplam	44	177,582	100,00%				

SD: Serbestlik derecesi, SKT: Sıralı kareler toplamı, KO: Katkı oranı, DKT: Düzeltilmiş kareler toplamı, DOK: Düzeltilmiş ortalama kareler.

R^2 = 98,98% R^2 (düzeltilmiş) = 98,68%

İmal edilen debimetrelerin regresyon analiz sonuçlarına bakıldığında R^2=95,90 değeriyle doğrusal ilişkiye çok yakın bir eğilim ortaya koyduğu belirlenmiştir (Çizelge 5.11). Bununla birlikte düzeltilmiş ve tahmini R^2 değerlerinin de %94'ün üzerinde elde edildiğinden ölçülen debi miktarlarının güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.11. İmal edilen debimetrelerin regresyon analizi.

S	R^2	R^2(düzeltilmiş)	ÖGY	R^2(tahmini)	ABK	BCK
0,437905	%95,90	%95,25	10,0866	%94,32	65,78	76,23

S: Ortalama kareler hatası, ÖGY: Öngörü yeteneği, ABK: Akaike bilgi kriteri, BCK: Bayes bilgi kriteri.

5.2.2. CFD analiziyle hesaplanan debi miktarı bulguları

Debimetrelerin rotor dişlilerinin devir sayılarını ölçebilmek için manyetik alan sensörlü mikrodenetleyici devresi geliştirilmiştir. Rotor dişlinin her dönüşünde manyetik alan sensörü tetiklenmiş ve iki tetiklenme arasındaki süre ölçülerek rotor dişlinin devir sayıları

belirlenmiştir. Elde edilen devir sayıları ve debi miktarları 0,96” OLED ekrandan okunarak kaydedilmiştir. Okunan debi miktarları Çizelge 5.12’de, devir sayıları Çizelge 5.13’te verilmiştir.

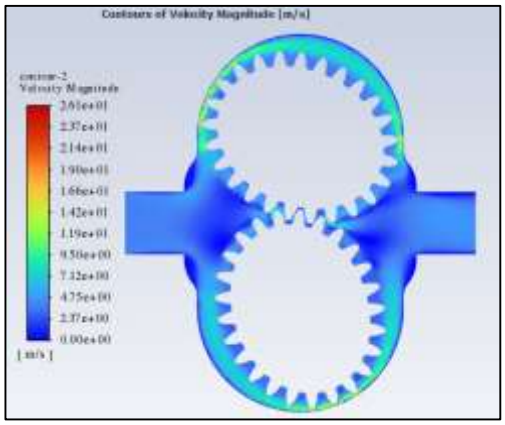
Çizelge 5.12. Ölçülen debi miktarları (m^3/s) [71].

		Debimetre Kodu								
		Db-01	Db-02	Db-03	Db-04	Db-05	Db-06	Db-07	Db-08	Db-09
Basınç (MPa)	2,50	6,7E-04	7,5E-04	7,5E-04	7,0E-04	7,5E-04	7,7E-04	7,0E-04	7,0E-04	7,6E-04
	3,00	6,6E-04	7,5E-04	7,5E-04	6,9E-04	7,5E-04	7,6E-04	7,0E-04	6,9E-04	7,5E-04
	3,50	6,6E-04	7,4E-04	7,5E-04	6,9E-04	7,5E-04	7,5E-04	6,9E-04	6,9E-04	7,5E-04
	4,00	6,6E-04	7,4E-04	7,4E-04	6,9E-04	7,4E-04	7,5E-04	6,9E-04	6,8E-04	7,4E-04
	4,50	6,6E-04	7,3E-04	7,4E-04	6,8E-04	7,4E-04	7,4E-04	6,9E-04	6,7E-04	7,4E-04

Çizelge 5.13. Ölçülen rotor dişli devir sayıları (dev/dk) [71].

		Debimetre Kodu								
		Db-01	Db-02	Db-03	Db-04	Db-05	Db-06	Db-07	Db-08	Db-09
Basınç (MPa)	2,50	1920	930	419	1040	485	700	550	780	356
	3,00	1911	926	418	1032	483	694	548	772	354
	3,50	1908	922	417	1027	482	687	546	765	351
	4,00	1900	917	415	1020	480	684	545	759	348
	4,50	1896	910	412	1015	477	678	543	752	347

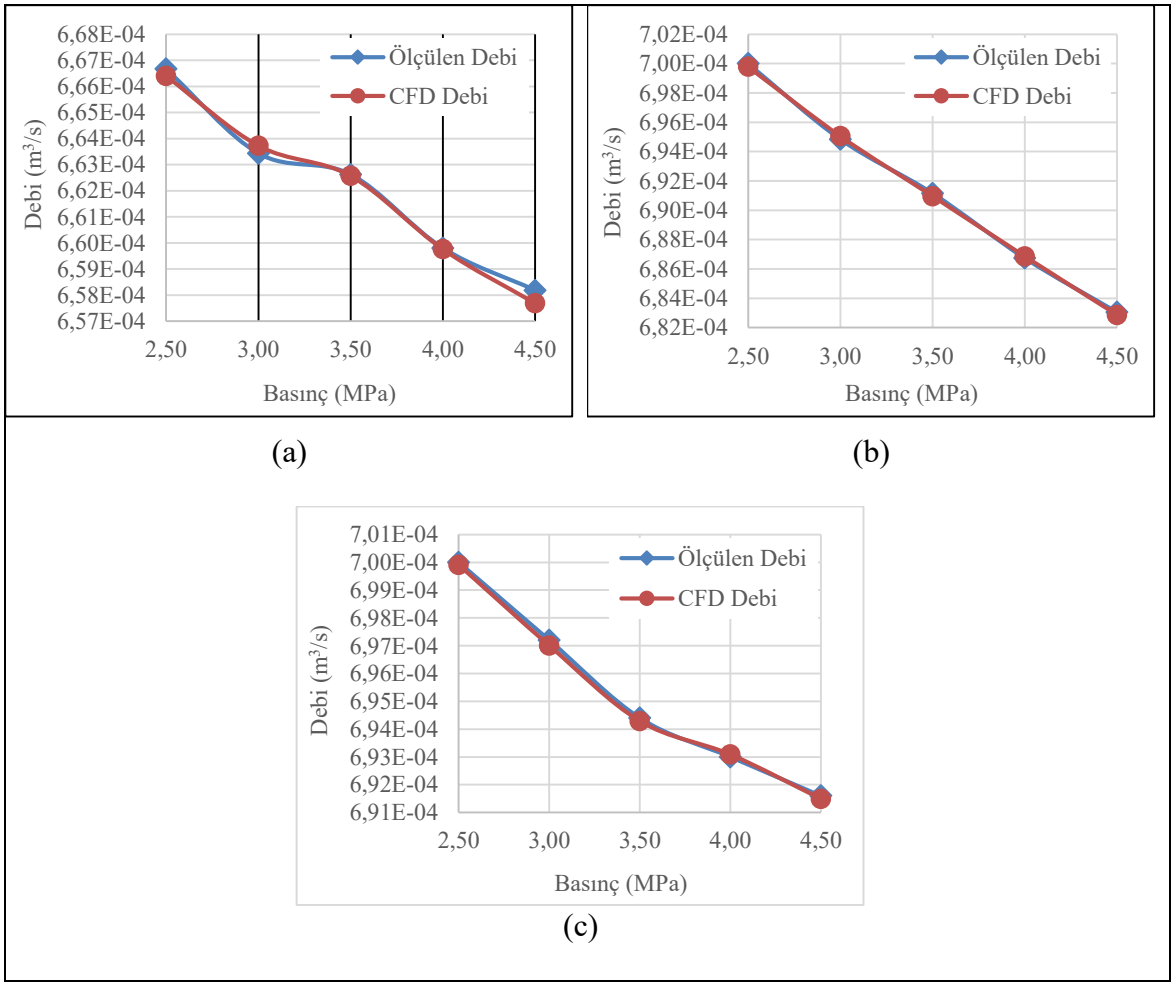
Debimetrelerin CFD analizlerinden elde edilen debi miktarları dinamik ağ yapısı kullanılarak belirlenmiştir. Resim 5.4’te CFD analiz sonucu verilmiştir.



Resim 5.4. CFD analiz sonucu [71].

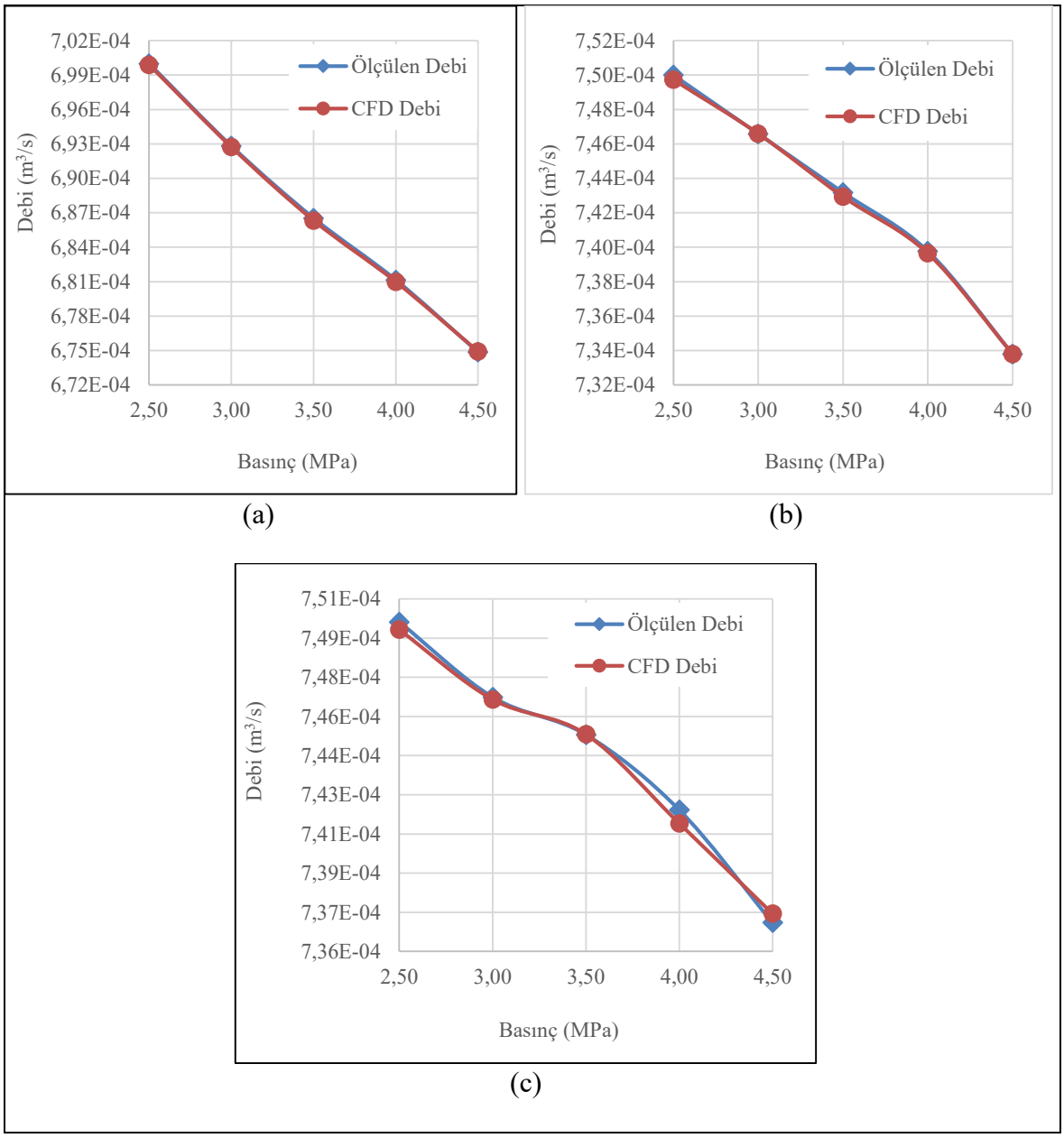
Taguchi L_9 deney setine göre üretilen debimetrelerden deneysel yolla elde edilen debi miktarları ve imal edilen debimetrelerin CFD modellerinin analiz sonuçlarından alınan debi miktarları, basınç arttıkça düşmüştür, bununla birlikte bütün imal edilen ve CFD modellerden elde edilen debi miktarlarının ortalama değişiminin -%0,0102 olduğu belirlenmiştir.

Modülü, m=1,60 ölçüsüne sahip debimetreler incelendiğinde (Şekil 5.16), Db-01 kodlu debimetreyle ölçülen ve CFD analizi sonucuna göre belirlenen debi miktarları arasında ortalama -%0,017'lik değişim olduğu görülmüştür. Benzer şekilde Db-04 kodlu debimetrede ortalama debi değişimi -%0,008, Db-07 kodlu debimetrede ise -%0,012'lik ortalama debi değişimi tespit edilmiştir. Debilerdeki en büyük yüzde değişim 4,50 MPa basınçta -%0,0750 ve en küçük yüzde değişim 4,00 MPa basınçta -%0,0060 ile Db-01 kodlu debimetrede olduğu tespit edilmiştir.



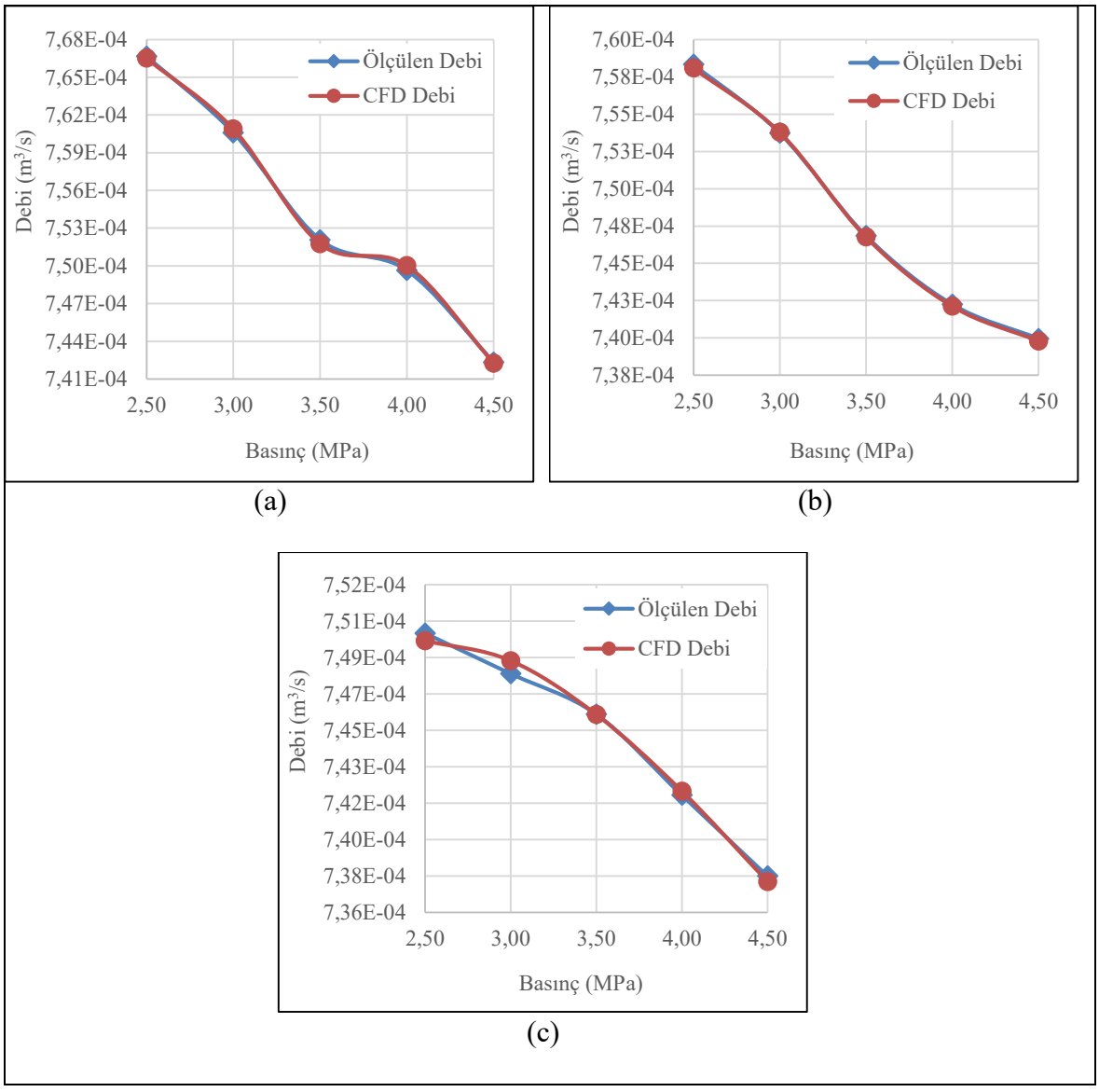
Şekil 5.16. m=1,60 parametresine sahip debimetrelerin basınca karşılık, ölçülen – CFD debi karşılaştırması. a) Db-01 b) Db-04 c) Db-07 [71].

Modülü, m=2,00 parametrelerine sahip debimetreler ele alındığında (Şekil 5.17), ölçülen ve CFD analizinden alınan debi değerleri arasında ortalama değişim Db-08 kodlu debimetrede -%0,015, Db-02 kodlu debimetrede -%0,017 ve Db-05 kodlu debimetrede ise -%0,016 ortalama debi değişimi olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan Db-05 kodlu debimetreyle 4,00 MPa basınç altında -%0,0788 ile en büyük yüzde değişim, Db-02 kodlu debimetreyle ise 4,50 MPa basınçta %0,0002 ile en küçük yüzde değişimin olduğu görülmüştür.



Şekil 5.17. m=2,00 parametresine sahip debimetrelerin basınca karşılık, ölçülen – CFD debi karşılaştırması. a) Db-08 b) Db-02 c) Db-05 [71].

Şekil 5.18'da m=2,50 parametresine sahip debimetrelerde, CFD ve ölçülen debi miktarları arasındaki ortalama değişimleri, Db-06 kodlu debimetrede ortalama debi değişimi %0,004, Db-09 kodlu debimetrede ortalama değişim -%0,015 ve Db-03 kodlu debimetrede ise ortalama debi deşiğimi %0,005 olarak saptanmıştır. Ayrıca, Db-03 kodlu debimetreyle 3,00 MPa basınçta yüzde debi değişimi %0,0855 değeriyle en büyük ve 3,50 MPa basınçta -%0,0024 yüzde debi değişimiyle en küçük değeri aldığı tespit edilmiştir. Bütün debimetrelerde, ölçülen ve CFD analizinden elde edilen debiler arasında ortalama debi değişimlerinin göz önüne alındığında imal edilen debimetrelerle, CFD modelinin uyumlu olduğu görülmüştür.



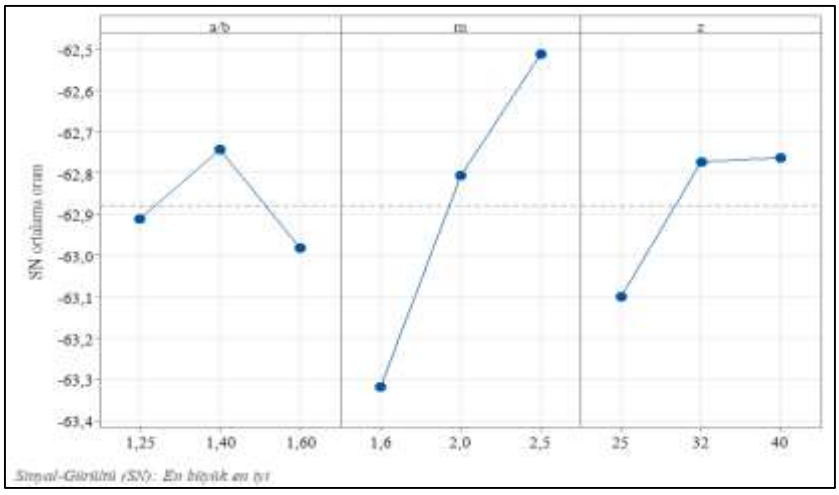
Şekil 5.18. m=2,50 parametresine sahip debimetrelerin basınca karşılık, ölçülen – CFD debi karşılaştırması. a) Db-06 b) Db-09 c) Db-03 [71].

Çizelge 5.14'te imal edilen ve CFD analizi sonucu elde edilen debi miktarları yüzde değişimleri verilmiştir. En büyük yüzde değişim 3,00 MPa basınç altında %0,0855 ile Db-03 kodlu debimetreyle, en küçük yüzde değişimse 4,50 MPa basınçta %0,0002 değeriyle Db-02 kodlu debimetrede olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.14. Ölçülen ve CFD ile belirlenen debi miktarlarının yüzde değişimleri (%) [71].

		Debimetre Kodu								
		Db-01	Db-02	Db-03	Db-04	Db-05	Db-06	Db-07	Db-08	Db-09
Basınç (MPa)	2,50	-0,0401	-0,0358	-0,0498	-0,0298	-0,0446	-0,0203	-0,0134	-0,0147	-0,0320
	3,00	0,0446	0,0015	0,0855	0,0297	-0,0135	0,0396	-0,0281	-0,0131	0,0065
	3,50	-0,0083	-0,0327	-0,0024	-0,0280	0,0026	-0,0418	-0,0160	-0,0300	-0,0107
	4,00	-0,0060	-0,0167	0,0265	0,0167	-0,0788	0,0518	0,0125	-0,0241	-0,0172
	4,50	-0,0750	0,0002	-0,0367	-0,0281	0,0523	-0,0109	-0,0156	0,0065	-0,0213

Taguchi metoduyla, deney sayısından ve imalatı yapılan debimetre maliyetinden tasarruf edilmiştir. Taguchi analizinde, debimetre maliyetine etkisi olmadığından dolayı basınç değişkenleri analizde değerlendirilmemiştir. Taguchi metodu, CFD analizi sonuçlarına uygulanmış ve debi miktarlarına göre yapılan en büyük en iyi durumunda elde edilen sinyal gürültü oranına (S/N) göre (Şekil 5.19), en uygun eliptik dişli parametrelerinin a/b = 1,40, m = 2,50 mm ve z = 40 diş, bununla birlikte a/b = 1,40, m = 2,50 mm ve z = 32 diş parametrelerinin de eliptik düz dişli tasarım ve imalatı için öncelikle tercih edilebilir olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.19. CFD analizi sonuçlarına göre Taguchi L_9 deney seti en büyük en iyi analizi S/N oranı [71].

CFD modellere %95 güven aralığında debimetreler üzerinde etkili olan tüm parametreler (a/b, m, z, basınç) göz önüne alınarak yapılan çok yönlü varyans analizi sonuçları incelendiğinde (Çizelge 5.15), katkı oranına göre en etkili değişkenin %65,25 ile modül değeri, %10,52 ile diş sayısı değişkeninin ikinci önemli parametre olduğu ve en etkisiz değişkenin ise %0,96 ile a/b oranı olduğu görülmüştür. a/b oranı, modül, diş sayısı ve basınç değişkenlerinin birbirleriyle etkileşimleri göz önüne alındığında, m*z ikilisinin %17,25 ile en büyük katkıyı, a/b*Basınç ikilisininse %0,05 ile en az katkıyı sağladığı belirlenmiştir. CFD modellerle hesaplanan debi miktarlarının regresyon değerlerine bakıldığında R^2 = %99,00 ve R^2 (düzeltilmiş) = %98,71 değerleriyle doğrusal ilişkiye çok yakın eğilim ortaya koyduğu ve güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır. Modül değerinin hesaplanan debi miktarlarına en büyük katkıyı sağlaması doğal karşılanmıştır, çünkü modül değeri, dişlilerde adım ve diş yüksekliğini miktarlarının hesaplanmasında kullanılan tek parametredir. Modül değeri büyüdükçe bir dişlinin adımı ve diş yüksekliği de artmaktadır, diğer taraftan modül değerinin azalması dişlinin adımının ve diş yüksekliğinin azalmasına neden olmaktadır. Adım ve diş yüksekliğinin artması, bir diş boşluğunda taşınan akışkan miktarının artmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde ikinci en büyük katkıyı veren diş sayısı parametresinin artması, diş sayısı kadar diş boşluğunun olması anlamına gelir ve bu diş boşluklarında taşınan akışkan miktarının artmasına, dolayısı ile debi miktarının artması demektir. Parametrelerin ikili etkileşimleri ele alındığında m*z değerinin %17,28 ile en büyük, a/b*Basınç ikilisininse %0,05 değeriyle en küçük katkı oranını sağladığı görülmüştür. m*z ikilisinin en büyük katkı oranına sahip olması olağan karşılanmaktadır. Bunun nedeniyse, m*z değerinin dişli çarklarda bölüm dairesini, eliptik dişlilerdeyse bölüm elipsinin çevre ölçüsünü etkileyen parametreler olmasıdır.

Çizelge 5.15. Debimetrelerin CFD analizi sonuçlarına göre varyans analizi [71].

Değişkenler	SD	SKT	KO	DKT	DOK	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	10	$4{,}8\times10^{-8}$	99,00%	$4{,}8\times10^{-8}$	$4{,}8\times10^{-9}$	336,96	0,000000
a/b	1	$4{,}7\times10^{-10}$	0,96%	$5{,}3\times10^{-10}$	$5{,}3\times10^{-10}$	36,86	0,000001
m	1	$3{,}2\times10^{-8}$	65,25%	$6{,}0\times10^{-11}$	$6{,}0\times10^{-11}$	4,30	0,045691
z	1	$5{,}2\times10^{-9}$	10,52%	$4{,}3\times10^{-9}$	$4{,}3\times10^{-9}$	296,67	0,000000
Basınç	1	$1{,}3\times10^{-9}$	2,80%	$2{,}5\times10^{-13}$	$2{,}5\times10^{-13}$	0,02	0,895482
a/b*m	1	$3{,}2\times10^{-10}$	0,65%	$3{,}5\times10^{-9}$	$3{,}5\times10^{-9}$	241,77	0,000000
a/b*z	1	$6{,}3\times10^{-10}$	1,28%	$1{,}6\times10^{-9}$	$1{,}6\times10^{-9}$	115,02	0,000000
a/b*Basınç	1	$2{,}0\times10^{-11}$	0,05%	$2{,}0\times10^{-11}$	$2{,}0\times10^{-11}$	1,67	0,204560
m*z	1	$8{,}5\times10^{-9}$	17,28%	$8{,}5\times10^{-9}$	$8{,}5\times10^{-9}$	588,20	0,000000
m*Basınç	1	$5{,}0\times10^{-11}$	0,09%	$5{,}0\times10^{-11}$	$5{,}0\times10^{-11}$	3,12	0,086124
z*Basınç	1	$6{,}0\times10^{-11}$	0,13%	$6{,}0\times10^{-11}$	$6{,}0\times10^{-11}$	4,45	0,042421
Hata	34	$4{,}9\times10^{-10}$	1,00%	$4{,}9\times10^{-10}$	$1{,}0\times10^{-11}$		
Toplam	44	$4{,}9\times10^{-8}$	100,00%				

SD: Serbestlik derecesi, SKT: Sıralı kareler toplamı, KO: Katkı oranı, DKT: Düzeltilmiş kareler toplamı, DOK: Düzeltilmiş ortalama kareler

R^2 = %99 R^2 (düzeltilmiş) = %98,71

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Taguchi L_9 deney setine göre 9 farklı eliptik dişli debimetre üretilmiştir. Debimetrelere ait eliptik dişlilerin eksen kaçıklık miktarları, modül ölçümleri ve yüzey pürüzlülük değerleri değerlendirilmiş ve debimetreler deneysel olarak test edilmiş ve ölçtükleri debi miktarları belirlenmiştir. Debimetrelerin ölçtüğü debi miktarlarını doğrulamak amacıyla CFD modeller oluşturularak debi miktarları hesaplatılmıştır.

Taguchi L_9'a göre tasarımı ve imalatı yapılan 9 farklı debimetrelerin akış test verilerine göre; üç farklı modül değerine sahip debimetreler için akışkan basıncının artmasına karşılık ölçülen debi miktarları düştüğü belirlenmiştir. Akışkan basıncına karşılık ölçülen debi miktarları arasındaki ilişkinin R^2=0,96'dan büyük olmasından dolayı imal edilen debimetrelerin tasarım ve imalat kaynaklı ciddi bir problem doğurmadığı tespit edilmiş ve bu debimetrelerin ticari ürüne dönüştürülebileceği öngörülmektedir.

Modül – a/b oranına göre ölçülen debi miktarlarında modül değeri arttıkça ölçülen debi miktarının arttığı, ancak a/b oranın artmasının veya azalmasının ölçülen debi miktarının anlamlı bir artışa veya azalmaya neden olmadığı sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde modül – diş sayısı ilişkisine göre ölçülen debi miktarının, modül ve diş sayısının artmasıyla arttığı, ancak m = 2,50 mm ölçüsündeki debimetrelerin tüm diş sayılarında, ölçülen debi miktarlarının azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalmanın %-0,80 ve %-0,45 aralığında kalmasından dolayı göz ardı edilebilir olduğuna karar verilmiştir.

İmal edilen debimetreler arasında basınç değerine karşılık ölçülen en doğru debi miktarı R^2=0,9977 regresyon değeriyle Db-08 kodlu debimetreyle ölçülmüştür. Taguchi L_9 analiz sonuçlarına göre en büyük en iyi analizi ele alınarak belirlenen sinyal gürültü oranına göre en uygun eliptik düz dişli parametrelerinin a/b = 1,40, m = 2,50 mm ve z = 40 diş, bununla birlikte a/b = 1,40, m = 2,50 mm ve z = 32 diş parametrelerinin de debimetre imalatı için uygun olduğu tespit edilmiştir.

İmalatı yapılan debimetrelerin %95 güvenirlik oranına göre varyans analizi sonuçlarından hareketle, en büyük katkıyı modül değerinin, en az katkıyı ise a/b oranının sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, a/b oranı, modül, diş sayısı değişkenlerinin ölçülen debi miktarlarıyla

olan ilişkisini (F değeri) etkileyen en önemli faktörün m*z değişkeni, en etkisiz parametreninse modül değeri olduğu tespit edilmiştir. Regresyon analiz verilerine göre ise imal edilen debimetrelerin R^2=95,90 değeriyle güvenilir olduğu saptanmıştır. Taguchi L_9'a göre ölçülen debi miktarı ile tahmin edilen debi miktarı %95 güvenirlik oranında %88,1'in üzerinde ve güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Taguchi L_9 deney setine göre imal edilen ve CFD analizleri yapılan debimetrelerin akışkan basıncı arttıkça, ölçülen ve CFD analizinden elde edilen debi miktarlarının azaldığı tespit edilmiş ve ortalama yüzde debi değişim miktarının -%0,0102 olduğu göz önüne alındığında, imal edilen debimetrelerle CFD modellerin uyumlu olduğu görülmüştür.

CFD analiziyle belirlenen debi miktarlarına göre yapılan Taguchi L9 analiz sonuçlarına göre en büyük en iyi analizi ele alınarak belirlenen sinyal gürültü oranına göre en uygun eliptik düz dişli parametrelerinin a/b = 1,40, m = 2,50 mm ve z = 40 diş, bununla birlikte a/b = 1,40, m = 2,50 mm ve z = 32 diş parametrelerinin de debimetre imalatı için uygun olduğu tespit edilmiştir.

CFD modellerin %95 güvenirlik oranına göre debimetre deneyleri sırasındaki tüm değişkenler göz önüne alınarak yapılan varyans analizi sonuçlarından hareketle, en büyük katkıyı %65,25 ile modül değerinin, en az katkıyı ise %0,96 ile a/b oranının sağladığı belirlenmiştir. Debimetre üzerindeki parametrelerin ikili etkileşimleri ele alındığında hesaplanan debiyi etkileyen en önemli faktörün %17,28 ile m*z değişkeni, en etkisiz parametreninse %0,05 ile a/b*basınç değeri olduğu belirlenmiştir. Regresyon analiz verilerine göre ise imal edilen debimetrelerin R^2=99,00 değeriyle güvenilir olduğu saptanmıştır.

Ölçülen ve CFD analizleriyle belirlenen yüzde debi değişimlerine göre, en büyük yüzde değişim 3,00 MPa basınç altında %0,0855 ile Db-03 kodlu debimetreyle, en küçük yüzde değişimse 4,50 MPa basınçta %0,0002 değeriyle Db-02 kodlu debimetrede olduğu sonucuna varılmıştır.

Eliptik düz dişlilerin lepleme ve eksen kaçıklık değerleri tasarım ve imalatı çalışma kapsamında gerçekleştirilen bir masaüstü test cihazıyla elde edilmiştir. Aynı donamın hem

lepleme işlemleri hem de dişlilerin çalışması sırasında oluşan eksenel kaçıklıkların belirlenebileceği modüler yapıdan başarıyla faydalanılmıştır.

Eliptik düz dişlilerin diş profillerinin aynı olmaması, yatay ve dikey konumlarda elde edilen eksen kaçıklık miktarlarının birbirlerine göre farklı çıkmasına sebep olmuştur. Eksen kaçıklık miktarlarının eliptik düz dişli çiftlerinin sessiz ve kasıntısız çalışması için mil eksen aralığına eklenmesi gerekmektedir. Yatay konumda en büyük yüzde değişimin -%37,07 ile Db-08 kodlu, en küçük yüzde değişimi ise -%6,17 değeriyle Db-07 kodlu eliptik düz dişli çiftinde ve dikey konumdaysa en büyük yüzde değişim -%36,76 değeriyle Db-06 kodlu, en küçük yüzde değişiminin ise -%10,81 değeriyle Db-08 kodlu eliptik düz dişli çiftinde olduğu tespit edilmiştir.

Bütün eliptik düz dişli çiftlerinde lepleme operasyonu sonrasında ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde yaklaşık %27,64'lük iyileşme ve lepleme sonrasında eliptik düz dişlilerin kütle kayıplarının ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür.

İmal edilen eliptik düz dişliler arasında lepleme sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine göre en iyi lepleme parametresinin 220 dev/dk, 10 dk ve 1 kg kütlede olması uygun bulunmuştur. Yüzde olarak en iyi ortalama yüzey pürüzlülük değerleri bakımından; eliptik düz dişlilerin modüllerine göre ayrı ayrı ele alındığında devir sayısı ve süreler farklılık göstermesine rağmen, tüm modüllerde kütle parametresinin 1 kg olduğu sonucuna varılmıştır. ANOVA sonuçlarıysa, modül, devir sayısı ve sürenin yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerindeki anlamlı etkisini gösterirken, kütle parametresinin önemsiz olduğunu göstermiştir.

Teorik ve ölçülen diş genişliği değerlerinin hem lepleme operasyonu öncesi farklı olmasının nedeni tel erozyon tezgahının gap boşluğu neden olmuştur ve bu tür imalat hataları kabul edilebilir düzeydedir. Ayrıca imalat sonrası diş genişliği değerinin, teorik modül değerinden düşük olması dişlilerin daha rahat çalışmasını sağlamaktadır. Lepleme operasyonu sonrasındaysa, eliptik dişlilerin diş evolventi üzerinden talaş kaldırıldığı için ölçülen diş genişliği değerlerinin, teorik diş genişliğinden küçük olması doğaldır. Ortalama yüzde değişimlerse, lepleme operasyonu öncesi ve sonrasında modül kumpasıyla ölçülen diş genişliği değerlerinde %-1,18 ve bilgisayar destekli tasarım ortamında ölçülen diş genişliği değerlerinde %-0,39 olduğu belirlenmiştir.

Eliptik dişliler, eliptik dişli pompada rotor ve döndürülen dişli olarak kullanılabilir ve silindirik dişli pompalarla basınç, debi, titreşim ve enerji tüketimi açısından kıyaslanabilir. Diğer türlerdeki dairesel olmayan dişlilere sahip debimetreler imal edilebilir. Ülkemizde bulunan termik santrallerdeki su buharı miktarları üzerine çalışmalar gerçekleştirilerek suyun geri kazanımı hakkında bilimsel veriler ortaya koyulabilir. Diğer taraftan diğer tipteki debimetrelerin de imalat alt yapıları oluşturulabilir.

KAYNAKLAR

1. Addomine, M., Figliolini, G., and Pennestrì, E. (2018). A landmark in the history of non-circular gears design: The mechanical masterpiece of Dondi's astrarium. *Mechanism and Machine Theory,*122, 219–232

2. Lai, M. J. (1996). *An Investigation of The Dynamic Behaviour of Systems With, Noncircular Gears*. Yayınlanmış Doktora Tezi, Graduate School of the University of Wisconsin - Madison, Madison.

3. Mundo, D. (2006). Geometric design of planetary gear train with non-circular gears. *Mechanism and Machine Theory*, 41, 456–472.

4. Yao, Y. A. and Yan, H. S. (2003). A new method for torque balancing of planar linkages using non-circular gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.*, 217(5), 495–503.

5. Chang, S. L., Tsay, C. B., and Wu, L. I. (1996). Mathematical model and undercutting analysis of elliptical gears generated by rack cutters. *Mechanism and Machine Theory*, 31(7), 879–890.

6. Litvin, F. L. (1994). *Gear Geometry and Applied Theory.*(1. baskı). New Jersy: PTR Prentice-Hall, 300–400.

7. Li, G. and Zhu, W. (2021). Design and power loss evaluation of a noncircular gear pair for an infinitely variable transmission. *Mechanism and Machine Theory*. 156(2021), 104137.

8. Junfeng, W., Xiaobo, L., Chuan, L., Bo, L., and Fangyan, Z. (2014). Three-dimensional design and motion analysis of non-circular gear. *Journal of hubei university of technology.* 29(04), 69–72.

9. Medvecká-Beňová, S. (2018). Designing pitch curves of non-circular gears. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 99, 105–114.

10. Tong, S. H. and Yang, C. H. (1998). Generation of Identical Noncircular Pitch Curves. *ASME Journal of Mechanical. Design.* 120(2), 337–341.

11. Litvin, F. L. and Fuentes, A. (2004). *Gear Geometry and Applied Theory*. (2. baskı). New York: Cambridge University Press.

12. Chung, D. D. and Wolfgramm, R. (2015). Maxillary arch perimeter prediction using Ramanujan's equation for the ellipse. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.*, 147(2), 235–241.

13. Pazarkaya, İ., Özdemir, A. (2021). *Eliptik Dişli Çarklarda Bölüm Elipsinin Analitik Olarak Hesaplanması*. 1. Uluslararası Mühendislik Bilimleri Ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi, İstanbul, 490–498.

14. Han, J., Li, D. Z., Gao, T., and Xia, L. (2015). *Research on Obtaining of Tooth Profile of Non-circular Gear Based on Virtual Slotting*. The 14th IFToMM World Congress, Taipei Taiwan, 25–30.

15. Wang, X. (2017). *A numerical algorithm of tooth profile of non-circular cylindrical gear*. AIP Conference Proceedings, USA, 1864.

16. Lyashkov, A. A., Panchuk, K. L., and Khasanova, I. A. (2018). *Automated Geometric and Computer-aided Non-Circular Gear Formation Modeling.* Journal of Physics: Conference Series, Russia, 1050.

17. Bair, B. W. (2004). Computer aided design of elliptical gears with circular-arc teeth. *Mechanism and Machine Theory*, 39(2), 153–168.

18. Han, J., Li, D., Xia, L., and Jiang, B. (2015). Research on Design Method of Non-Circular Gear Pair with Double Generating Angles, Computer Aided Drafting. *Design and Manufacturing*, 25, 52.

19. Yazar, M. (2021). Design, Manufacturing and Operational Analysis of Elliptical Gears. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22(8), 1441–1451.

20. Yazar, M. (2021). Eliptik Dişli Çarkların Bilgisayar Destekli Doğal Frekans ve Mod Analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(1), 278–292.

21. Yazar, M., Özdemir, A. (2016). Computer-aided design, manufacture and experimental analysis of a pair of elliptical spur gears. *Anadolu University Journal Of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering*, 17(5), 869–869.

22. Yazar, M., Özdemir, A. (2011). Comparative analysis of the pressure variations and the flow rates of a hydraulic pump made of a pair of elliptical and cylindrical spur gears. *Tehnology*, 14(1), 1–10.

23. Liu, Y., Lu, S., Xu, J., Yang, S., and Tao, W. (2022). Design of piecewise deformed elliptical gear with closed pitch curve and its conjugate pair. *Scientific Reports*, 12(1), 1–12.

24. Thai, N. H., Trung, N. T., and Thom, P. Van (2023). *Research Design and Manufacture Eccentric Elliptical Gear Pair with an Improved Cycloid Profile.* Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2022), Vietnam, 349-357

25. Hou, Y. and Lin, C. (2019). Kinematic analysis and experimental verification of an oval noncircular bevel gears with rotational and axial translational motions. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(60), 42-60.

26. Prikhodko, A. (2020). Experimental kinematic analysis of an intermittent motion planetary mechanism with elliptical gears. *Journal Of Measurements In Engıneerıng,* 8(3), 122-131.

27. Maláková, S., Urbanský, M., Fedorko, G., Molnár, V., and Sivak, S. (2021). Design of geometrical parameters and kinematical characteristics of a non-circular gear transmission for given parameters. *Applied Sciences*, 11(3), 1–24.

28. Zhou, K., Guo, Y., and Li, X. (2020). *Modeling and Dynamics Analysis of Non-Circular Gears. PervasiveHealth:* Pervasive Computing Technologies for Healthcare, South Africa, 442–447.

29. Zheng, F., Hua, L., Chen, D., and Han, X. (2016). Generation of Noncircular Spiral Bevel Gears by Face-Milling Method. *ASME Journal of Manufacturing. Science and Engineering*, 138(8), 081013.

30. Litvin, F. L., Gonzalez-Perez, I., Yukishima, K., Fuentes, A., and Hayasaka, K. (2007). Generation of planar and helical elliptical gears by application of rack-cutter, hob, and shaper. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(2007), 4321–4336.

31. Katz, A., Erkorkmaz, K., and Ismail, F. (2018). Virtual Model of Gear Shaping— Part I: Kinematics, Cutter–Workpiece Engagement, and Cutting Forces. *ASME Journal of Manufacturing. Science and Engineering*, 140(7), 071007.

32. Bair, B. W. (2002). Computerized tooth profile generation of elliptical gears manufactured by shaper cutters. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(2-3), 139–147.

33. Zheng, F., Hua, L., Han, X., Li, B., and Chen, D. (2016). Linkage model and manufacturing process of shaping non-circular gears. *Mechanism and Machine Theory*,96, 192–212.

34. Zheng, F., Hua, L., Han, X., Li, B., and Chen, D. (2017). Synthesis of Shaped Noncircular Gear Using a Three-Linkage Computer Numerical Control Shaping Machine. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 139(7), 071003.

35. Zheng, F., Guo, X., and Zhang, M. (2018). Non-Uniform Flank Rolling Measurement for Shaped Noncircular Gears. *Measurement*, 116, 207–215.

36. Pazarkaya, İ., Yazar, M., and Özdemir, A. (2022). Eliptik Dişli Tasarımı, İmalatı, Analizi ve Eliptik Dişli Esaslı Endüstriyel Uygulamalar. *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Dergisi. Part C Tasarım ve Teknoloji.*, 10(3), 558–576.

37. Zheng, F., Lin, H., Han, X., Zhang, M., Zhang, W., and Guo, X. (2019). Avoidance of Cutter Retracting Interference in Noncircular Gear Shaping Through 4-Linkage Model. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 141(5), 051005.

38. Zheng, F., Xinghui, H., Hua, L., Zhang, M., and zhang, W. (2018). Design and manufacture of new type of non-circular cylindrical gear generated by face-milling method. *Mechanism and Machine Theory*, 122, 326–346.

39. Tian, X., Han, J., Xia, L., and Wu, L. (2016). A fexible electronic helical guide controller," *Procedia CIRP*, 56, 173–177.

40. Han, J., Wu, L., Yuan, B., Tian, X., and Xia, L. (2016). A novel gear machining CNC design and experimental research. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 1711–1722.

41. Wu, L., Han, J., Zhu, Y., Tian, X., and Xia, L. (2017). Non-circular gear continuous generating machining interpolation method and experimental research. *Journal Brazilian Society of Mechanical Sciences Engineering.*, 39(12) 5171–5180,

42. Han, J., Li, D., Tian, X., and Xia, L. (2020). Linkage model and interpolation analysis of helical non-circular gear hobbing. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(11), 5171-5180.

43. Jiang, H., Dazhu, L., Xiaoqing, T., and Lian, X. (2020). Meshing principle and transmission analysis of a beveloid non-circular gear. *Advances in Mechanical Engineering.*, 12(11), 1–11.

44. Liu, Y., Gong, J., and Wu, X. (2013). Investigation on the grinding of elliptical gears with CNC conical wheel gear grinder. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 349–356.

45. Sałaciński, T., Przesmycki, A., and Chmielewski, T. (2020). Technological aspects in manufacturing of non-circular gears. *Applied Sciences,*10(10), 3420.

46. García-Hernández, C., Gella-Marín, R. M., Huertas-Talón, J. L., Efkolidis, N., and Kyratsis, P. (2016). WEDM manufacturing method for noncircular gears, using CAD/CAM software. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 62(2), 137–144.

47. Li, D., Han, J., Tian, X., and Xia, L. (2023). Cutting Force Fluctuation Suppression and Error Homogenization of Noncircular Gear Hobbing Based on the Tool Shifting Method. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 36(1), 36-49.

48. Lee, G. S. and Park, M. Y. (2008). *Flow field characteristics in the housing of noncircular gear flowmeter.* 6th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, South Africa, LG1.

49. Liu, D., Ba, Y., and Ren, T. (2019). Flow fluctuation abatement of high-order elliptical gear pump by external noncircular gear drive. *Mechanism and Machine Theory,* 134, 338–348.

50. Moinfar, A. M., Shahgholi, G., Gilandeh, Y. A., and Gundoshmian, T. M. (2020). The effect of the tractor driving system on its performance and fuel consumption. *Energy*, 202, 117803.

51. Rongping, K. (2020). *Research on Ship Energy Consumption Monitoring System Based on Computer Intelligent Technology.* Journal of Physics: Conference Series, China, 022054.

52. Firth, J., Ladouceur, F., Brodzeli, Z., Wyres, M., and Silvestri, L. (2016). A novel optical telemetry system applied to flowmeter networks. *Flow Measurement and Instrumentation*, 48, 15–19.

53. Zaza, A., Bennouna, E. G., Laadel, N. E., and El Hammami, Y. (2021). Experimental Study of Fouling in Hybrid Cooling Tower Used in CSP Plants: Effects of the Polymer and galvanized steel tubes. *Thermal Science and Engineering Progress*, 25, 101005.

54. Xiao, L., Yang, M., Zhao, S., Yuan, W. Z., and Huang, S. M. (2019). Entropy generation analysis of heat and water recovery from flue gas by transport membrane condenser. *Energy*, 174, 835–847.

55. Soleimanikutanaei, S., Lin, C. X., and Wang, D. (2019). Numerical modeling and analysis of Transport Membrane Condensers for waste heat and water recovery from flue gas. *InternationalJournalofThermalSciences*, 136, 96–106.

56. Yang, Y., Li, N. F., Huang, S. M., Liang, C. H., and Xiao, L. (2021). State-space model for transient behavior of transport membrane condenser. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 165, 120667.

57. Meribout, M., Azzi, A., Ghendour, N., Kharoua, N., Khezzar, L., and AlHosani, E. (2020). Multiphase Flow Meters Targeting Oil & Gas Industries. *Measurement*, 165, 108111.

58. Li, X., Huang, Z., Meng, Z., Wang, B., and Li, H. (2010). Oil-water two-phase flow measurement using a venturi meter and an oval gear flow meter. *Chemical Engineering Communications,* 197(2), 223–231.

59. Yan, J., Li, S., and Li, R. (2021). Numerical study on the auxiliary entrainment performance of an ejector with different area ratio. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116369.

60. Park, J. J. and Lee, E. S. (2013). A study on the elliptical gear design for oval flowmeter. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A*, 37(8), 1029–1033.

61. Waldron, K. J., Kinzel, G. L., and Agrawal, S. K. (2004). *Kinematics, Dynamics, and Design of Machinery.* (3. Baskı). New York: Wiley.

62. Sun, Z. X. and Hebbale, K. (2005). *Challenges and opportunities in automotive transmission control.* Proceedings of the 2005 American Control Conference, Portland, 3284–3289.

63. Wang, X. F. and Zhu, W. D. (2014). Design, modeling, and simulation of a geared infinitely variable transmission. *ASME Journal of. Mechanical. Design*, 136(7), 071011.

64. Litvin, F. and Fuentes-Aznar, A. (2009). *Noncircular Gears: Design and Generation.* (1. Baskı) New York, Cambridge University. Press.

65. Prikhodko, A. A. and Smelyagin, A. I. (2015). Kinematic analysis of mechanism for converting rotational motion into reciprocating rotational motion. *Procedia Engineering*, 129, 87–92.

66. Zhu, D., , Kuang, F. (2023). Vibration analysis and parameter optimization of seedling pushing device of transplanting mechanism with planetary elliptic gears. *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers,Series A*, 46(2), 154–162.

67. Spitzer, D. W. (2011). Industrial Flow Measurement. *The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, 31(7), 711–715.

68. Crabtree, M. A. (2004). *The Concise Industrial Flow Measurement Handbook*, (1. Baskı). New York: CRC Press Taylor&Francis Group.

69. Baker, R. C. (2000). *Flow Measurement Handbook*. (1. Baskı), New York ,Cambridge University Press.

70. Awwa Manual, M. (2006). *Flowmeters in Water Supply*. (2. Baskı). USA, American Water Works Association.

71. Pazarkaya, İ., Yazar, M., and Özdemir, A. (2023). Computational fluid dynamics analysis of flowmeters with elliptical gear pairs and evaluation of calculated flow rate by Taguchi method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 94, 102476.

72. Fluent (2009). *A.N.S.Y.S. ANSYS Fluent 12.0 Theory Guide.* PA, ANSYS Inc.," Canonsburg.

73. Zeng, Q. and Sun, J. (2016). *Analysis of flow of outer meshing elliptic gear pump based on Fluent.* International Conference on Advanced Electronic Science and Technology, China, 374–379.

74. Vanegas-Useche, L. V., Abdel-Wahab, M. M., and Parker, G. A. (2016). Nuevo par de engranajes no circulares para reducir las aceleraciones del eje: Comparación con engranajes sinusoidales y elípticos. *DYNA*, 83(198)220–228,

75. İnternet: Kutay, M. G. (2009). Standart sayilar. URL: *www.guven-kutay.ch*. Son Erişim Tarihi: 26.01.2024

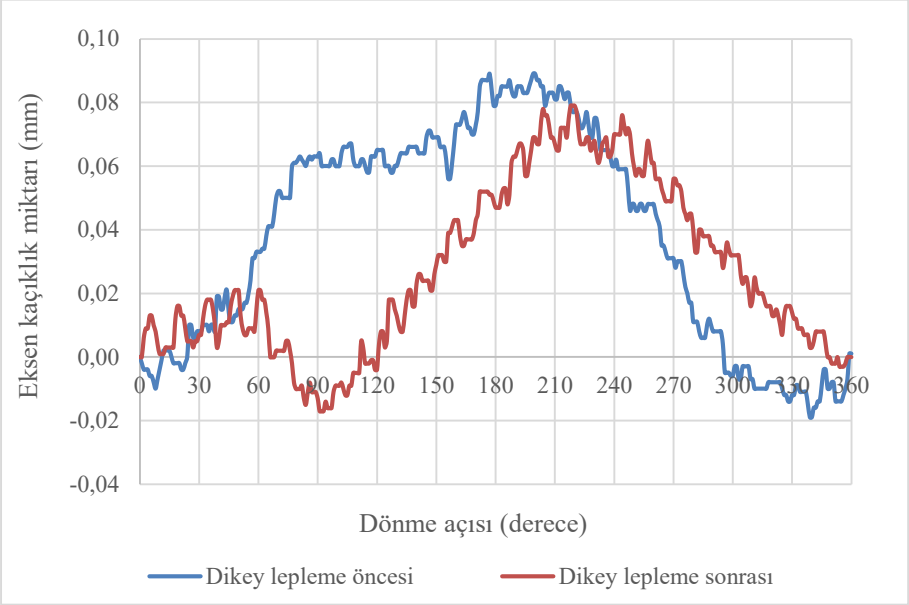
76. Cebeci, R. (2021). *St-37 ve St- 52 Sac Malzemelerin Lazerle Kesilmesinde İşleme Parametrelerinin Kesim Kalitesine Etkisinin İncelenmesi.* Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Estitüsü, Karabük.

77. PUL, M. (2017). Comparison of Surface Roughness and Tool Wear in Turning of 7075, 6061 and 2024 Aluminum Alloys. *International Journal of Engineering Research and Development*, 9(2), 65–75.

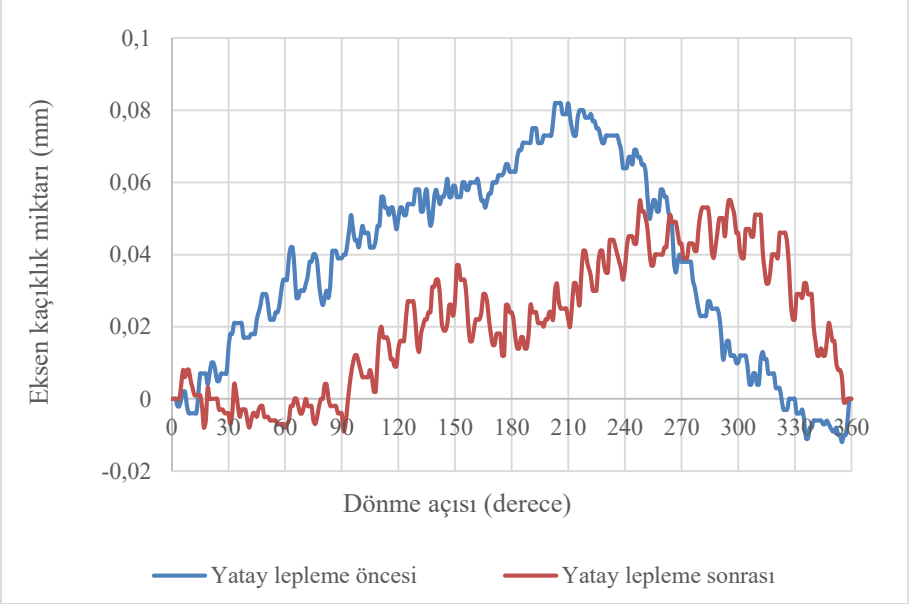
78. Osman, A., Gobran, M., and Mahmoud, F. (2020). Vibration Signature of Gear Pump of Missing One and Two Teeth. *Egyptian Journal for Engineering Sciences and Technology*, 30(1), 39–50.

EKLER

EK-1. Eliptik dişlilerin lepleme operasyonu öncesi ve sonrası eksen kaçıklık miktarları.

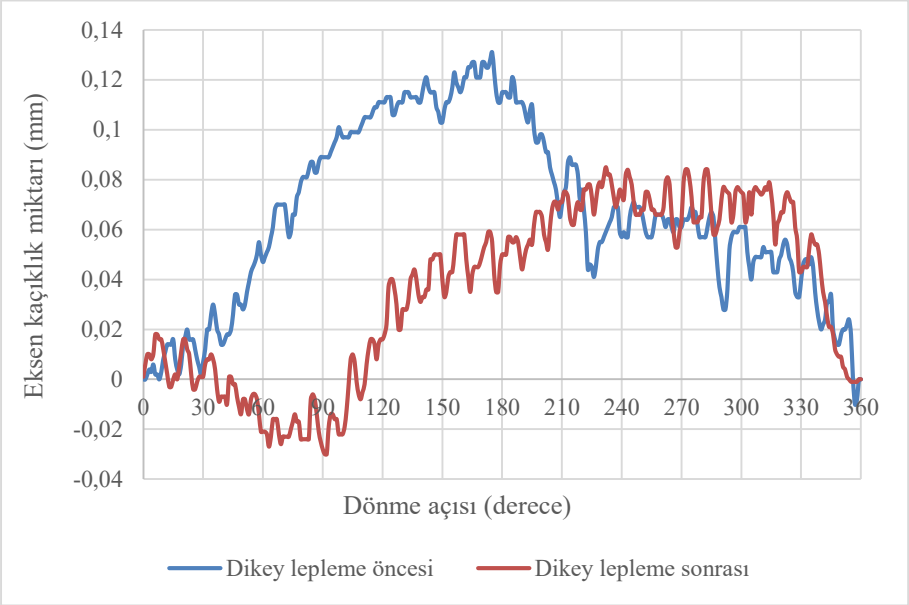


Şekil 1.1. Db-01 kodlu eliptik dişli çiftinin dikey konumda eksen kaçıklık miktarı.

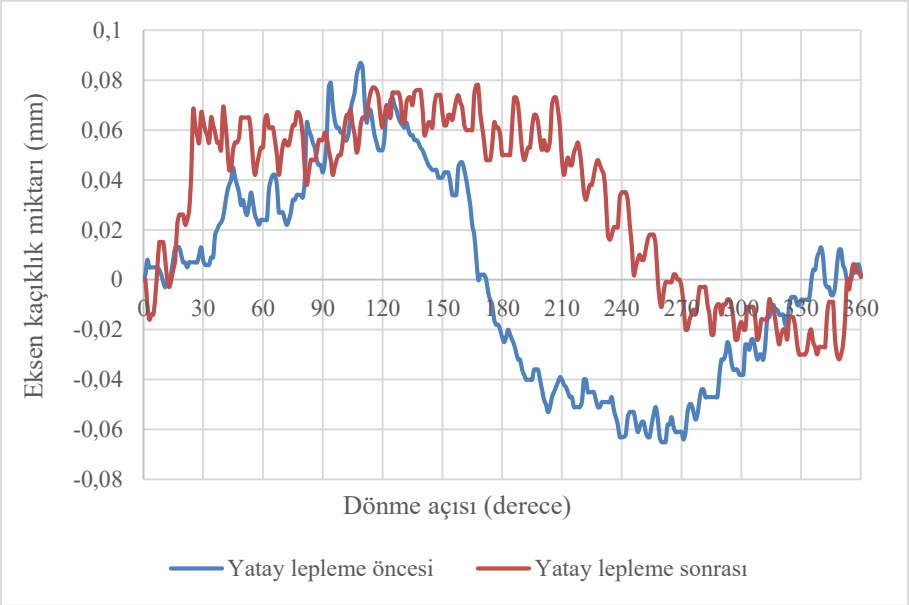


Şekil 1.2. Db-01 kodlu eliptik dişli çiftinin yatay konumda eksen kaçıklık miktarı.

EK-1. (devam) Eliptik dişlilerin lepleme operasyonu öncesi ve sonrası eksen kaçıklık miktarları.

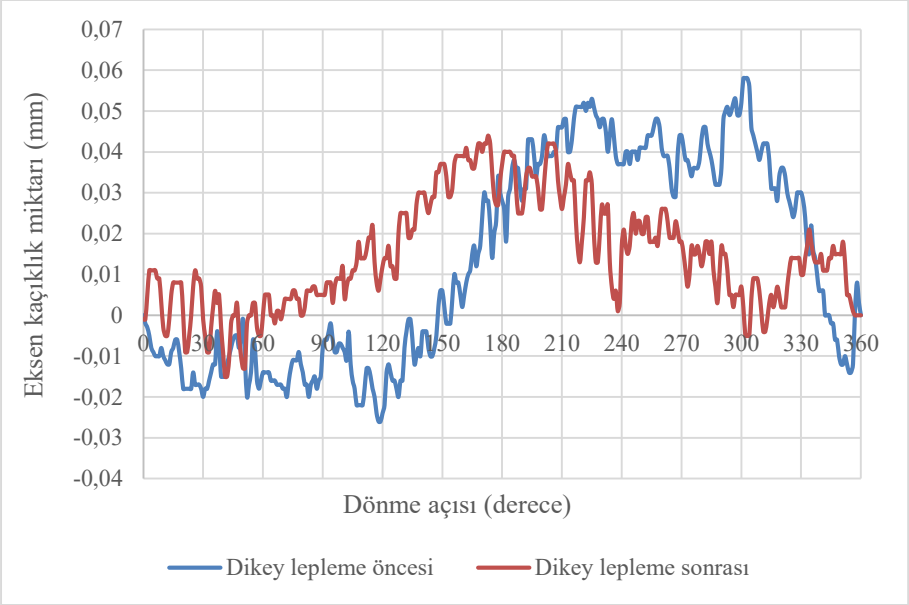


Şekil 1.3. Db-04 kodlu eliptik dişli çiftinin dikey konumda eksen kaçıklık miktarı.

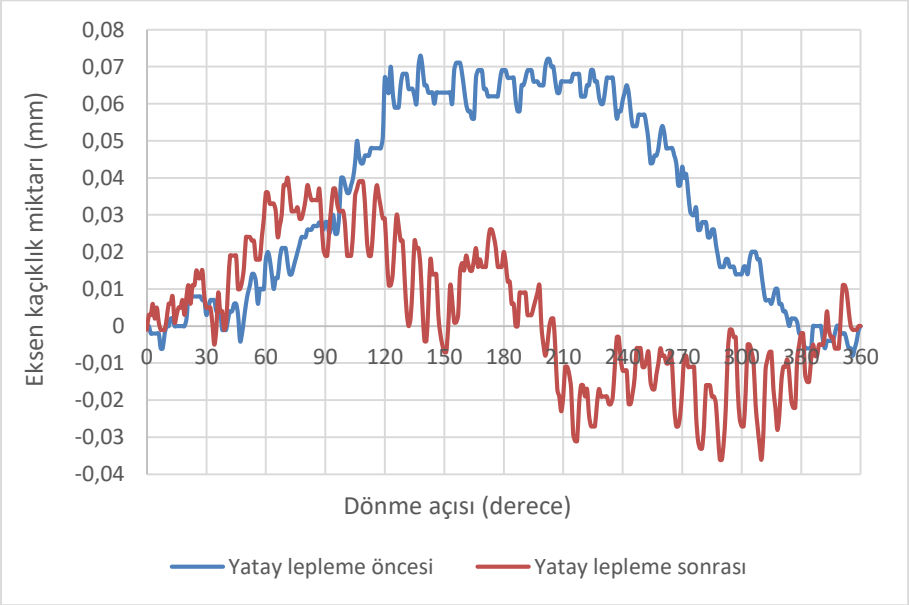


Şekil 1.4. Db-04 kodlu eliptik dişli çiftinin yatay konumda eksen kaçıklık miktarı.

EK-1. (devam) Eliptik dişlilerin lepleme operasyonu öncesi ve sonrası eksen kaçıklık miktarları.

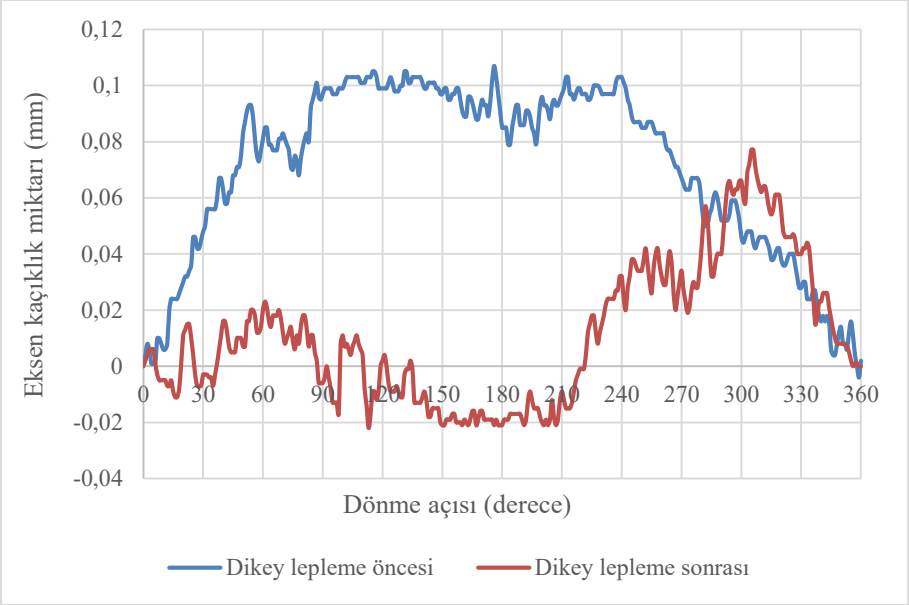


Şekil 1.5. Db-07 kodlu eliptik dişli çiftinin dikey konumda eksen kaçıklık miktarı.

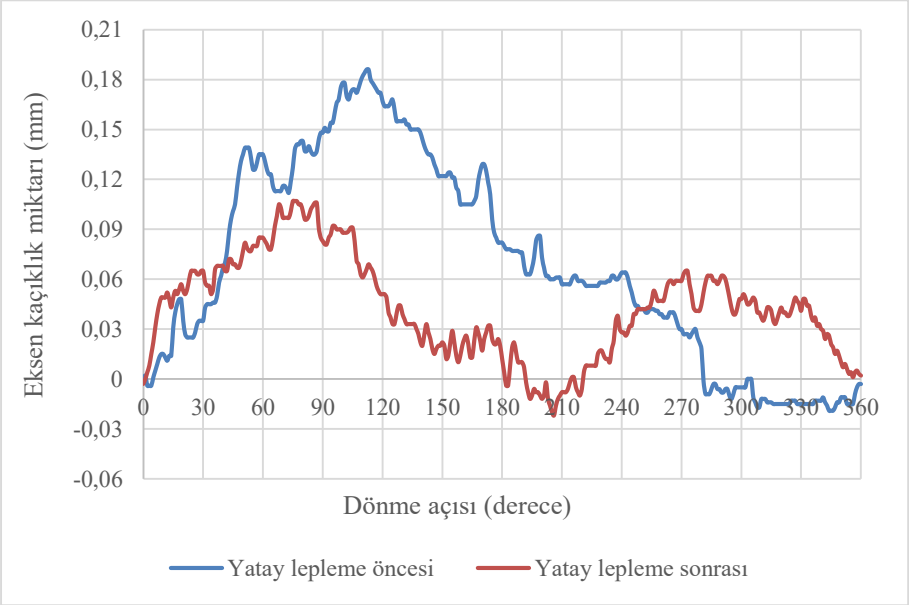


Şekil 1.6. Db-07 kodlu eliptik dişli çiftinin yatay konumda eksen kaçıklık miktarı.

EK-1. (devam) Eliptik dişlilerin lepleme operasyonu öncesi ve sonrası eksen kaçıklık miktarları.

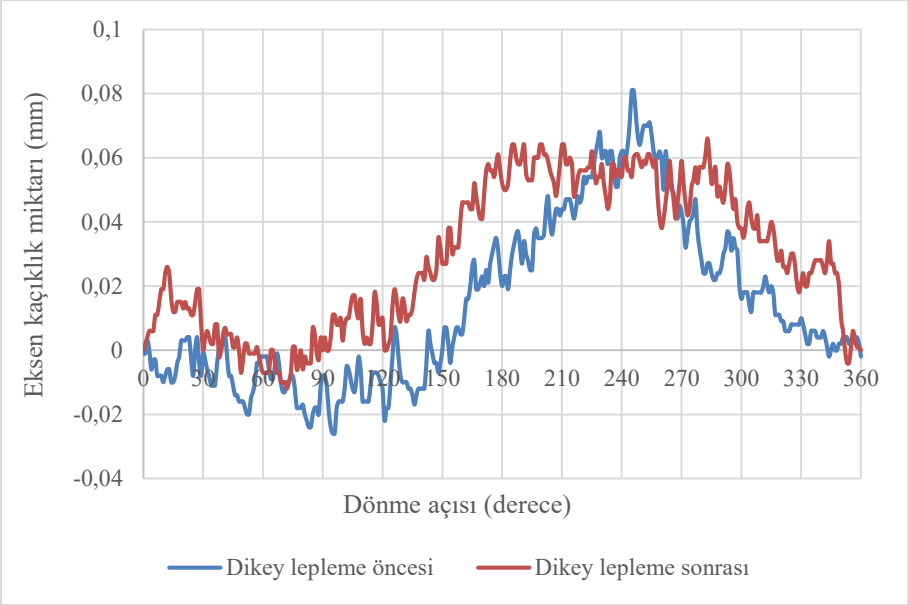


Şekil 1.7. Db-08 kodlu eliptik dişli çiftinin dikey konumda eksen kaçıklık miktarı.

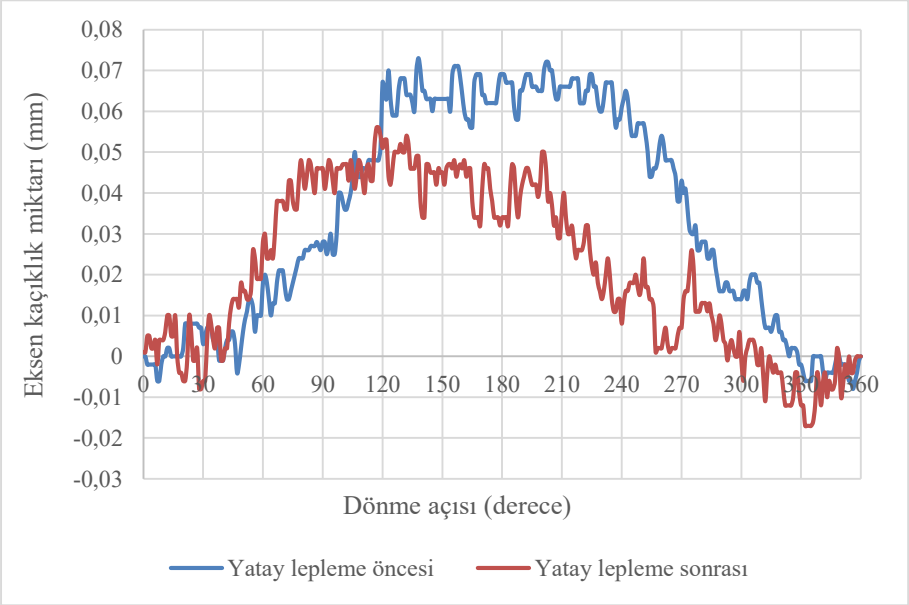


Şekil 1.8. Db-08 kodlu eliptik dişli çiftinin yatay konumda eksen kaçıklık miktarı.

EK-1. (devam) Eliptik dişlilerin lepleme operasyonu öncesi ve sonrası eksen kaçıklık miktarları.

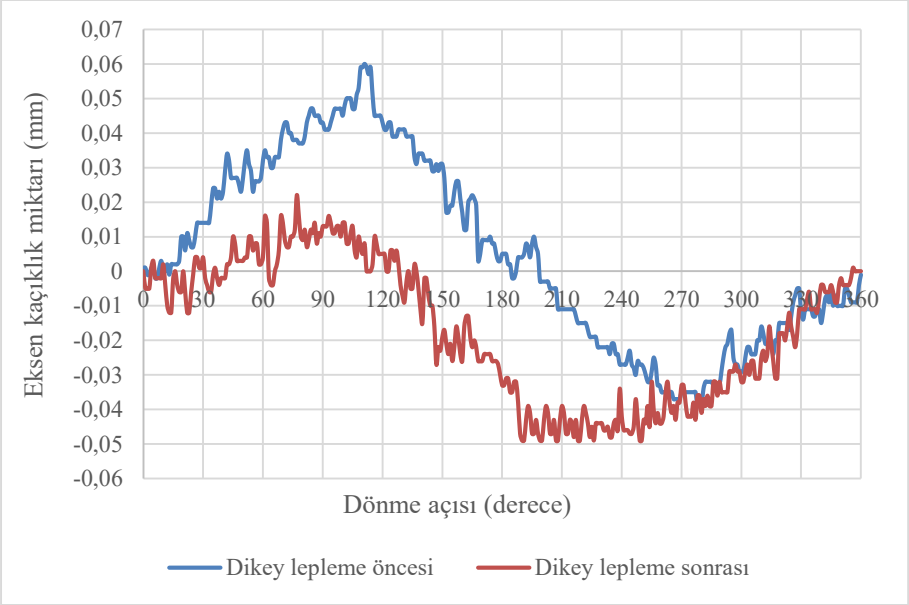


Şekil 1.9. Db-02 kodlu eliptik dişli çiftinin dikey konumda eksen kaçıklık miktarı.

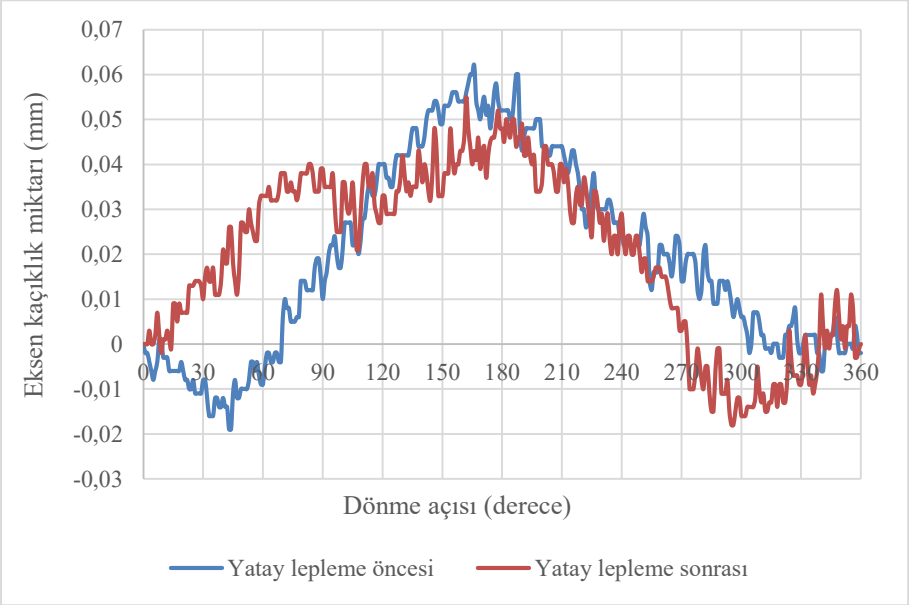


Şekil 1.10. Db-02 kodlu eliptik dişli çiftinin yatay konumda eksen kaçıklık miktarı.

EK-1. (devam) Eliptik dişlilerin lepleme operasyonu öncesi ve sonrası eksen kaçıklık miktarları.

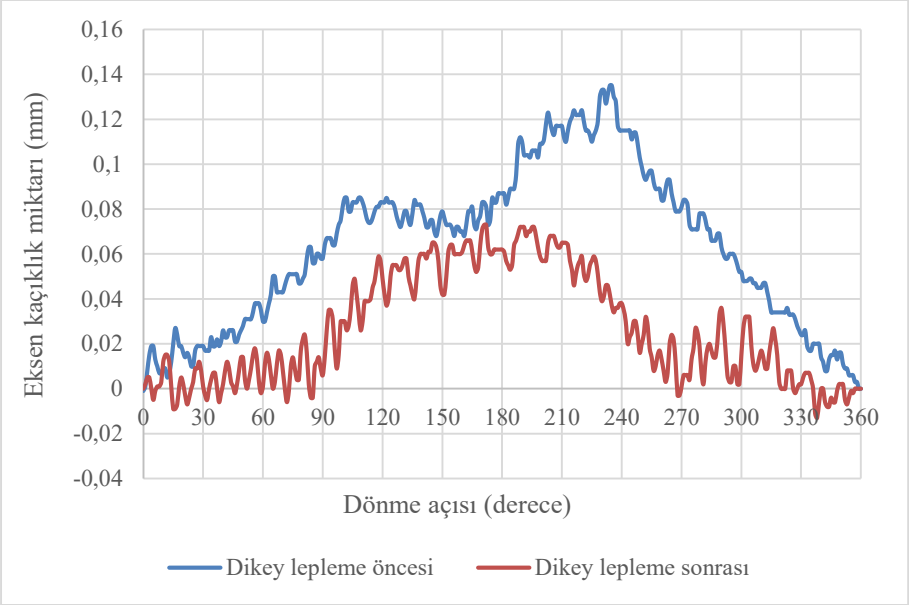


Şekil 1.11. Db-05 kodlu eliptik dişli çiftinin dikey konumda eksen kaçıklık miktarı.

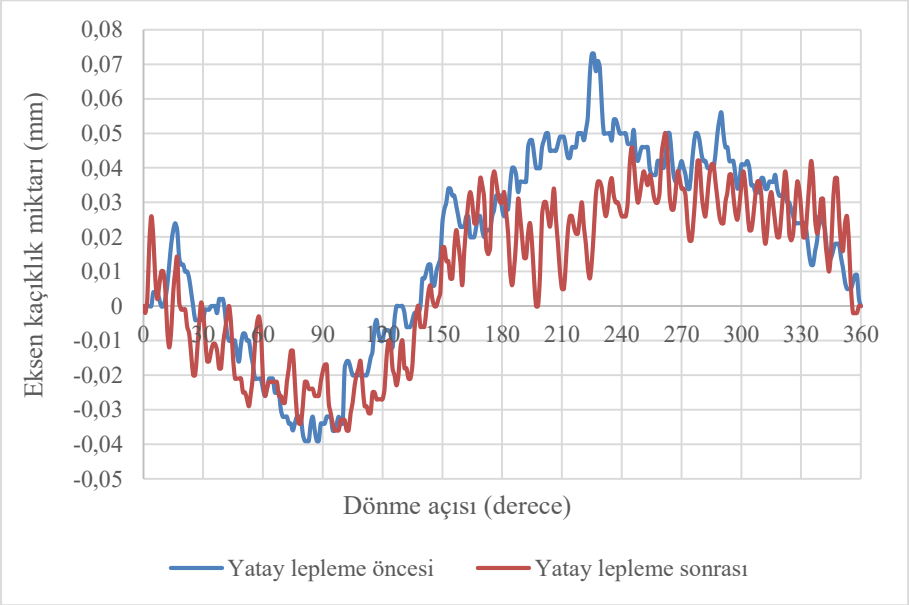


Şekil 1.12. Db-05 kodlu eliptik dişli çiftinin yatay konumda eksen kaçıklık miktarı.

EK-1. (devam) Eliptik dişlilerin lepleme operasyonu öncesi ve sonrası eksen kaçıklık miktarları.

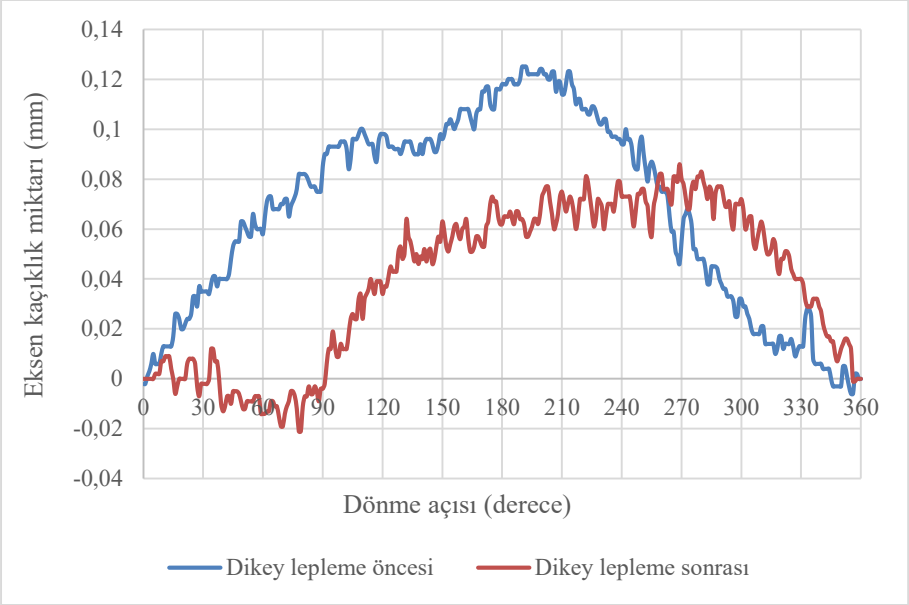


Şekil 1.13. Db-06 kodlu eliptik dişli çiftinin dikey konumda eksen kaçıklık miktarı.

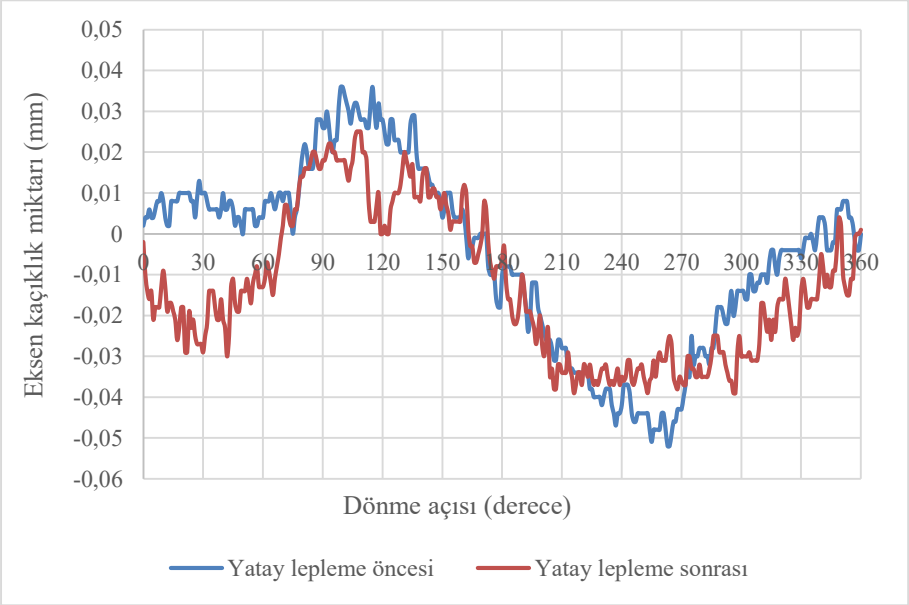


Şekil 1.14. Db-06 kodlu eliptik dişli çiftinin yatay konumda eksen kaçıklık miktarı.

EK-1. (devam) Eliptik dişlilerin lepleme operasyonu öncesi ve sonrası eksen kaçıklık miktarları.

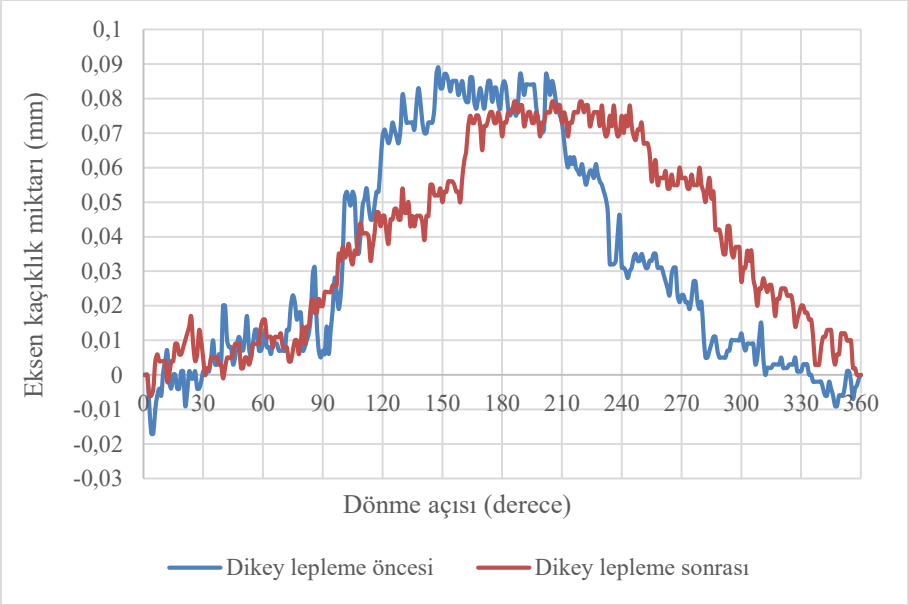


Şekil 1.15. Db-09 kodlu eliptik dişli çiftinin dikey konumda eksen kaçıklık miktarı.

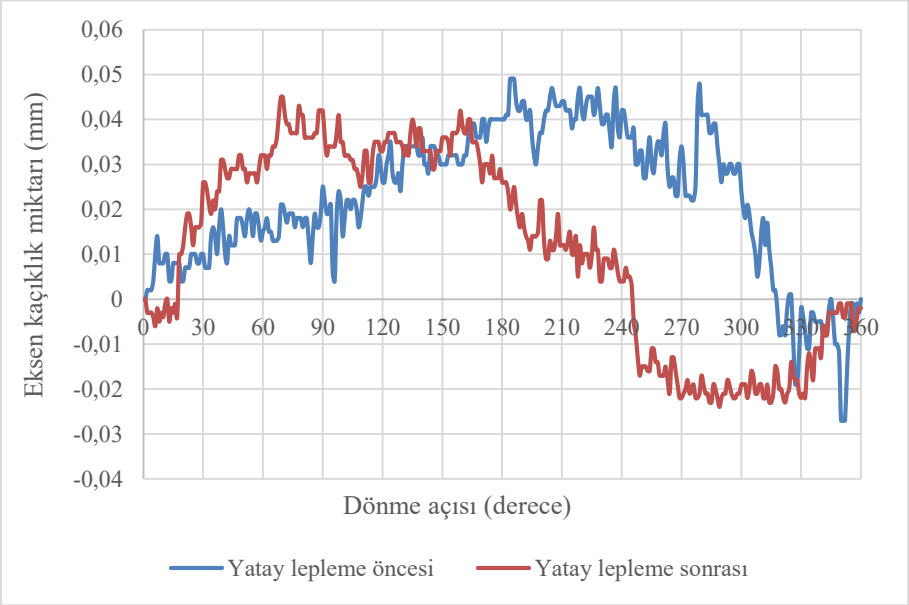


Şekil 1.16. Db-09 kodlu eliptik dişli çiftinin yatay konumda eksen kaçıklık miktarı.

EK-1. (devam) Eliptik dişlilerin lepleme operasyonu öncesi ve sonrası eksen kaçıklık miktarları.

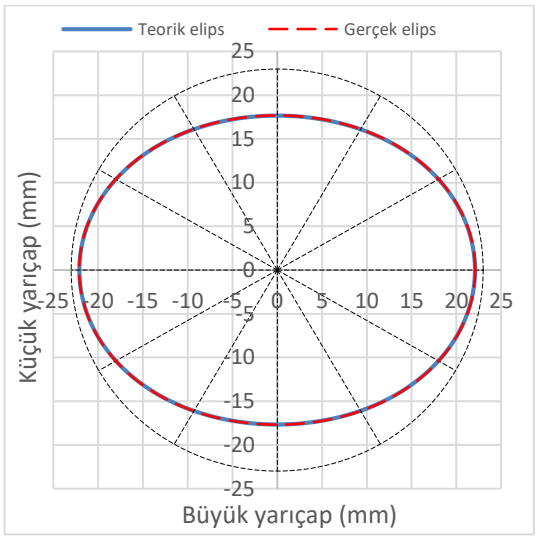


Şekil 1.17. Db-03 kodlu eliptik dişli çiftinin dikey konumda eksen kaçıklık miktarı.

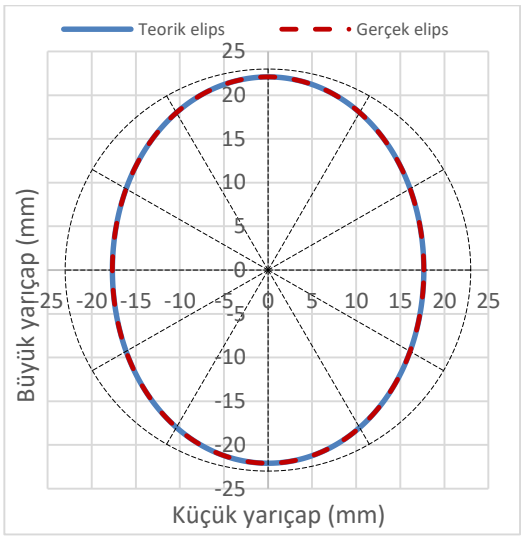


Şekil 1.18. Db-03 kodlu eliptik dişli çiftinin yatay konumda eksen kaçıklık miktarı.

EK-2. Eksen kaçıklık değerlerine göre gerçek ve teorik bölüm elipsi karşılaştırılması.

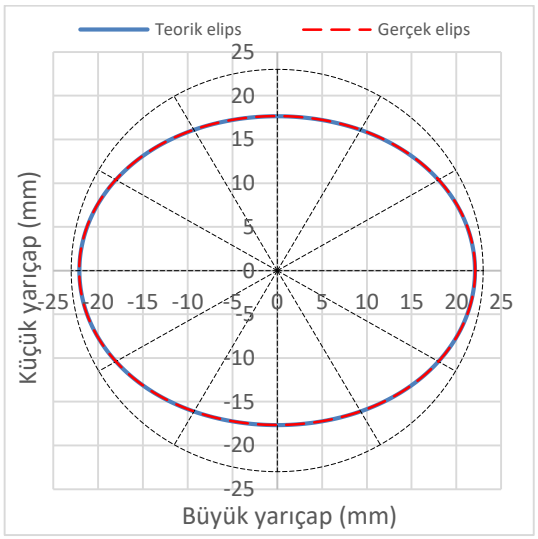


(a)

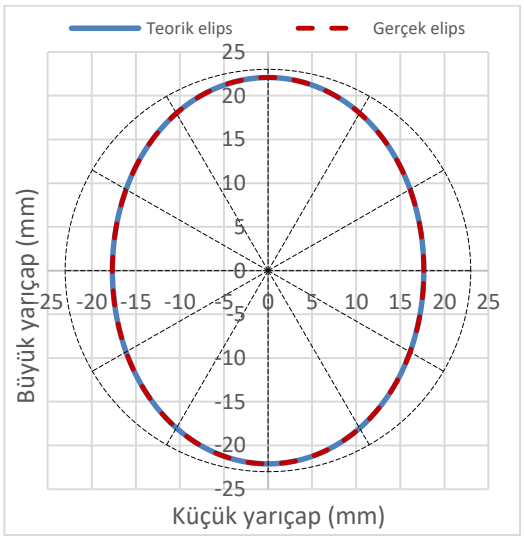


(b)

Şekil 2.1. Lepleme öncesi Db-01 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.



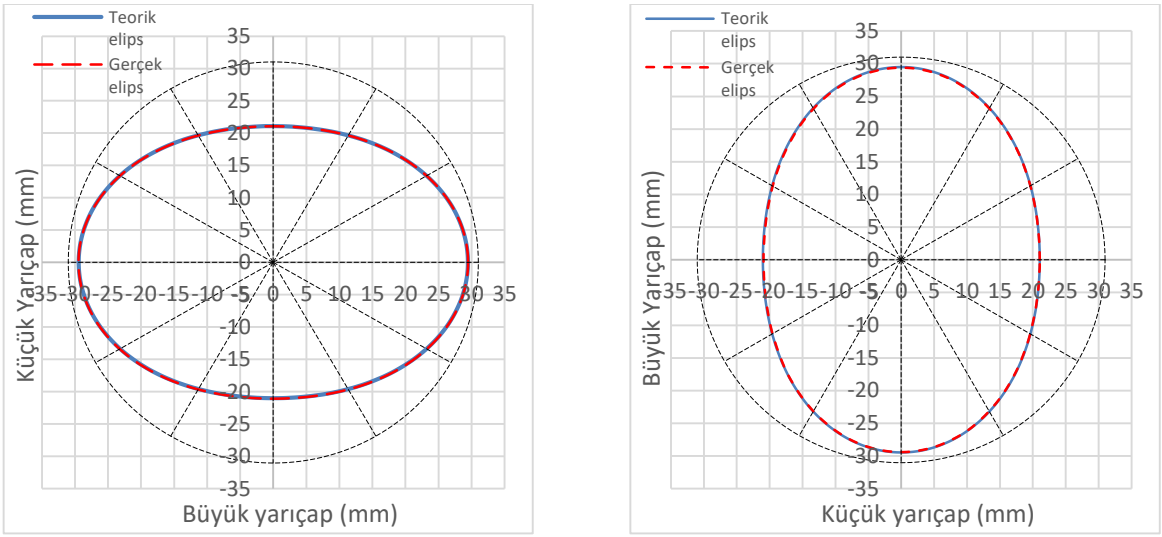
(a)



(b)

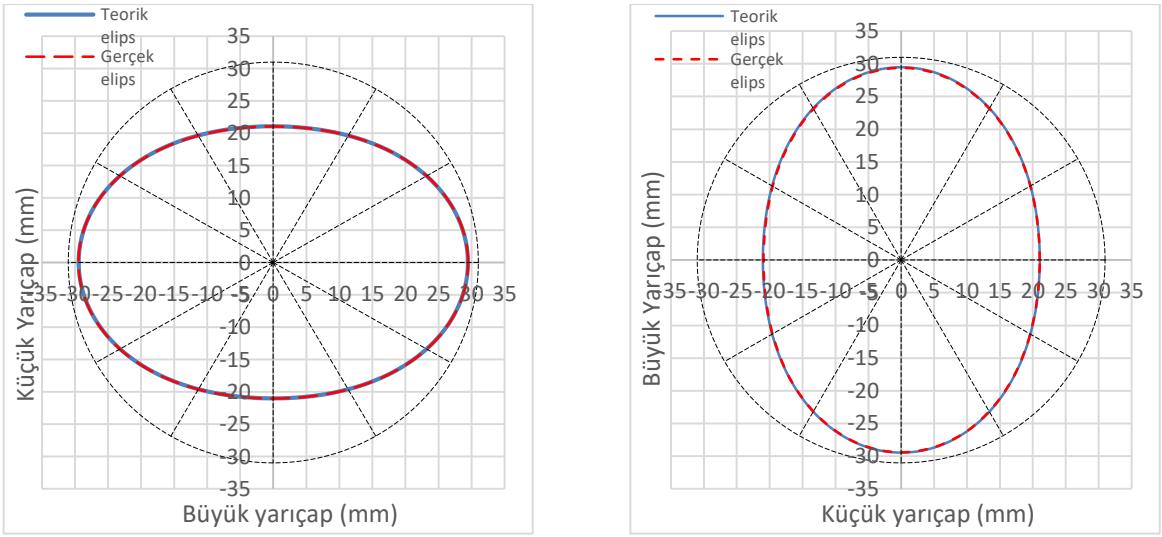
Şekil 2.2. Lepleme sonrası Db-01 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.

EK-2. (devam) Eksen kaçıklık değerlerine göre gerçek ve teorik bölüm elipsi karşılaştırılması.



(a) (b)

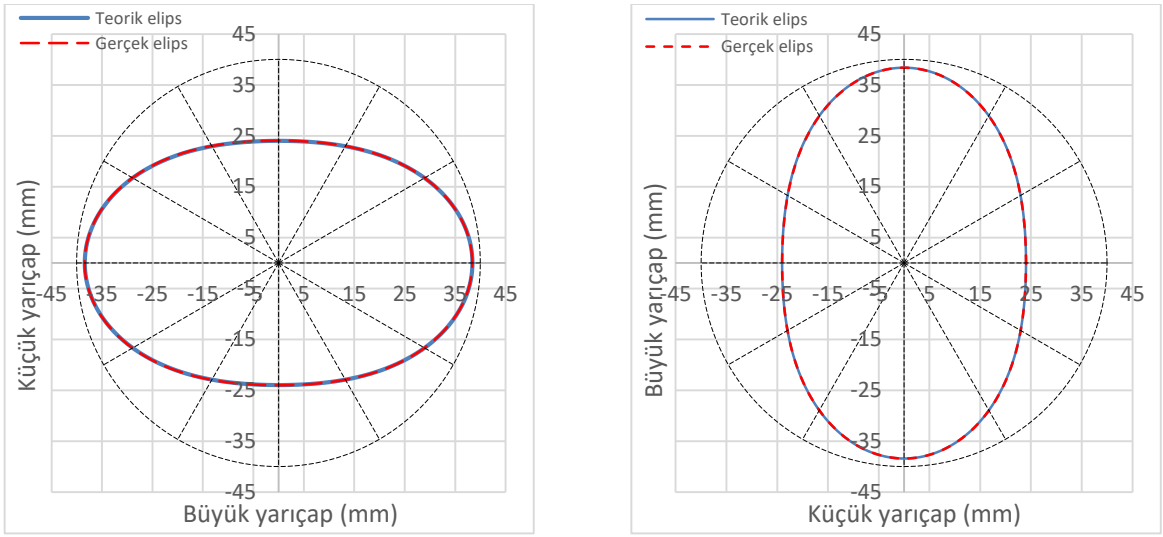
Şekil 2.3. Lepleme öncesi Db-04 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.



(a) (b)

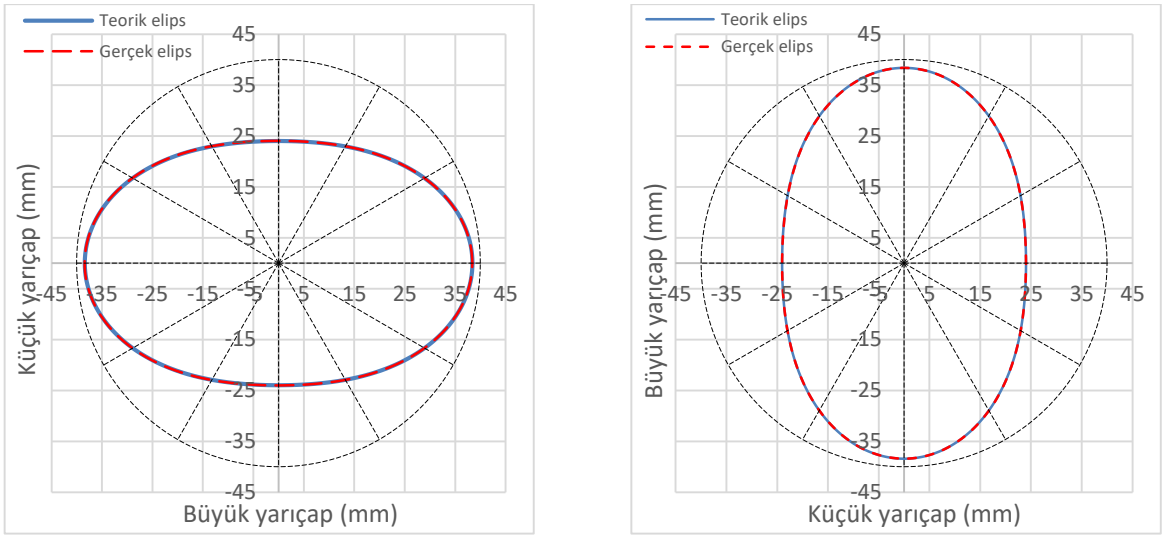
Şekil 2.4. Lepleme sonrası Db-04 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.

EK-2. (devam) Eksen kaçıklık değerlerine göre gerçek ve teorik bölüm elipsi karşılaştırılması.



(a) (b)

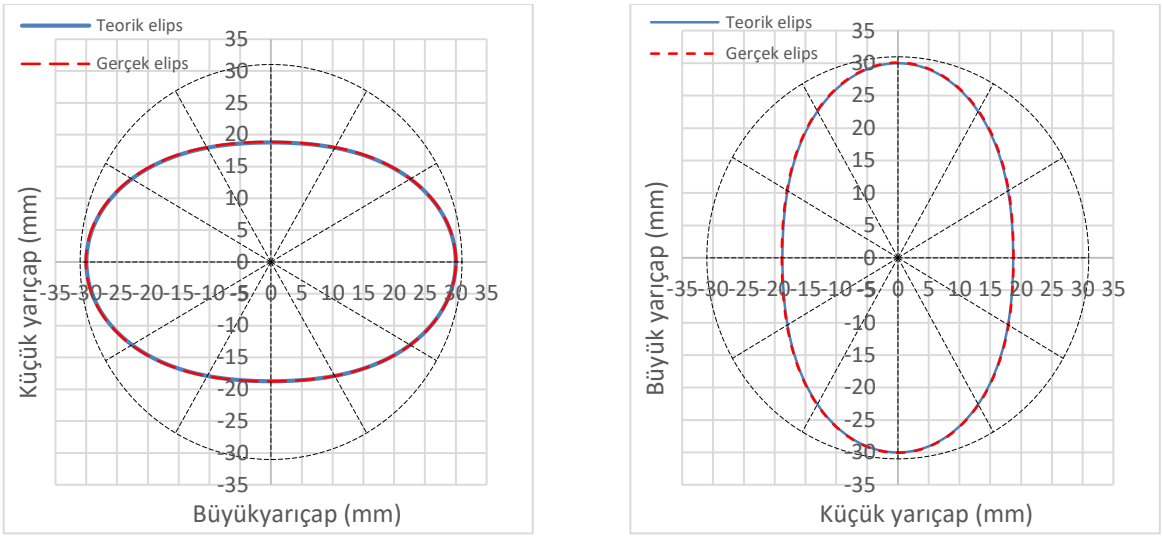
Şekil 2.5. Lepleme öncesi Db-07 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.



(a) (b)

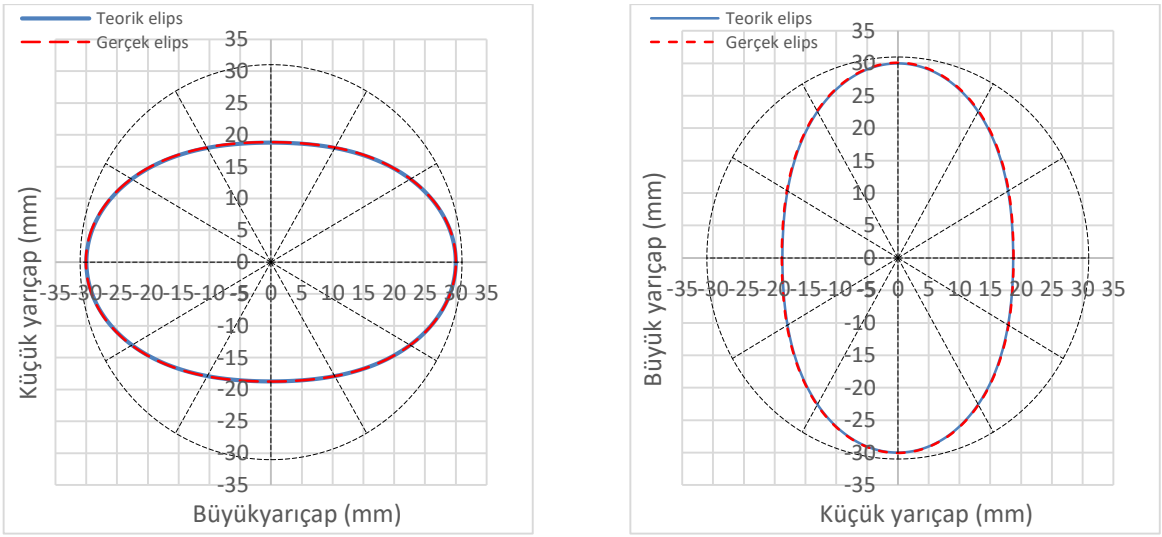
Şekil 2.6. Lepleme sonrası Db-07 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.

EK-2. (devam) Eksen kaçıklık değerlerine göre gerçek ve teorik bölüm elipsi karşılaştırılması.



(a) (b)

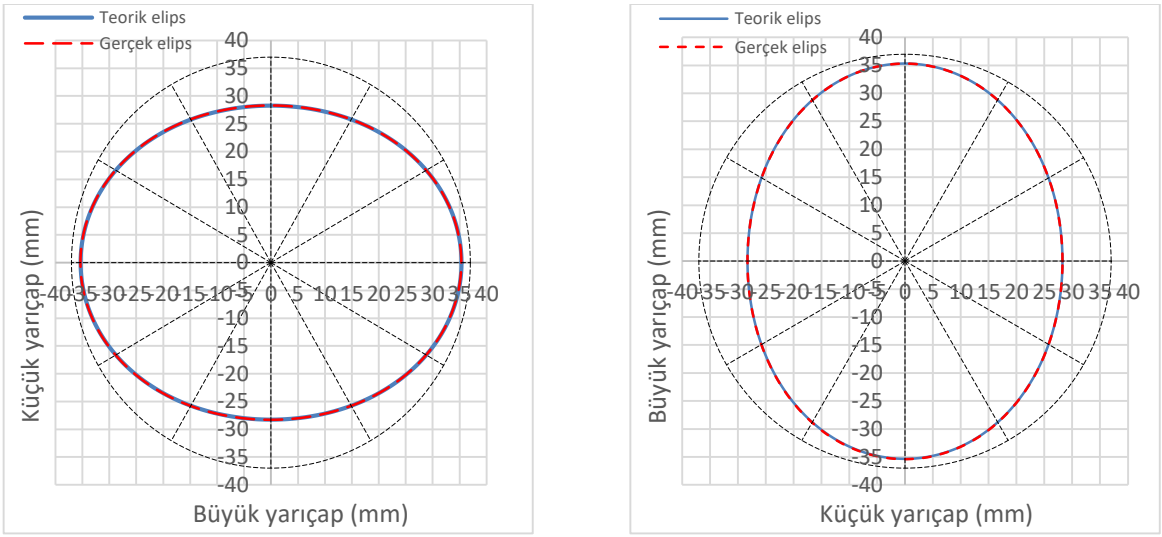
Şekil 2.7. Lepleme öncesi Db-08 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.



(a) (b)

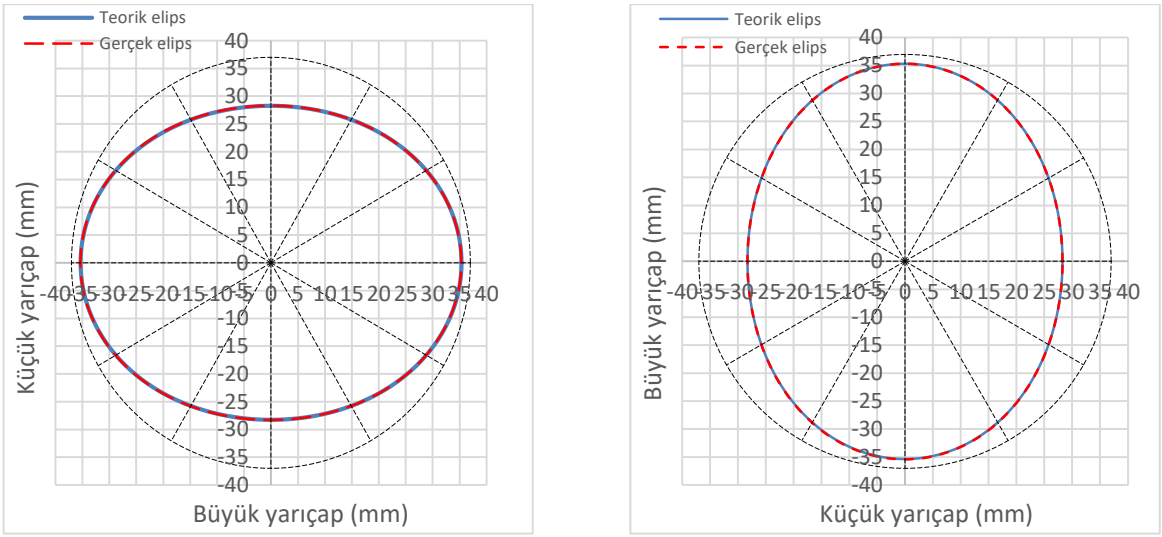
Şekil 2.8. Lepleme sonrası Db-08 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.

EK-2. (devam) Eksen kaçıklık değerlerine göre gerçek ve teorik bölüm elipsi karşılaştırılması.



(a) (b)

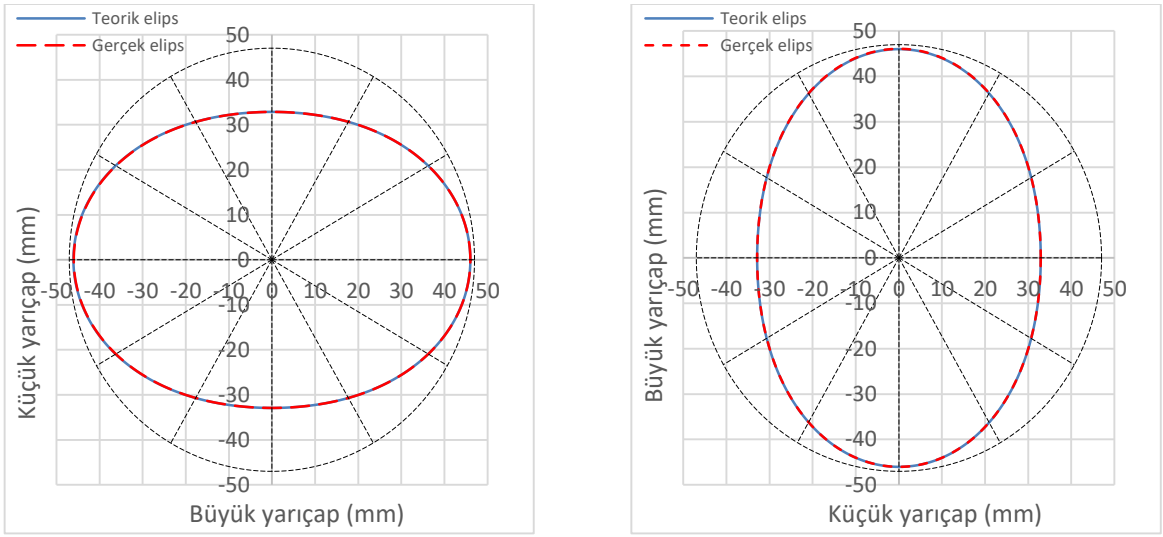
Şekil 2.9. Lepleme öncesi Db-02 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.



(a) (b)

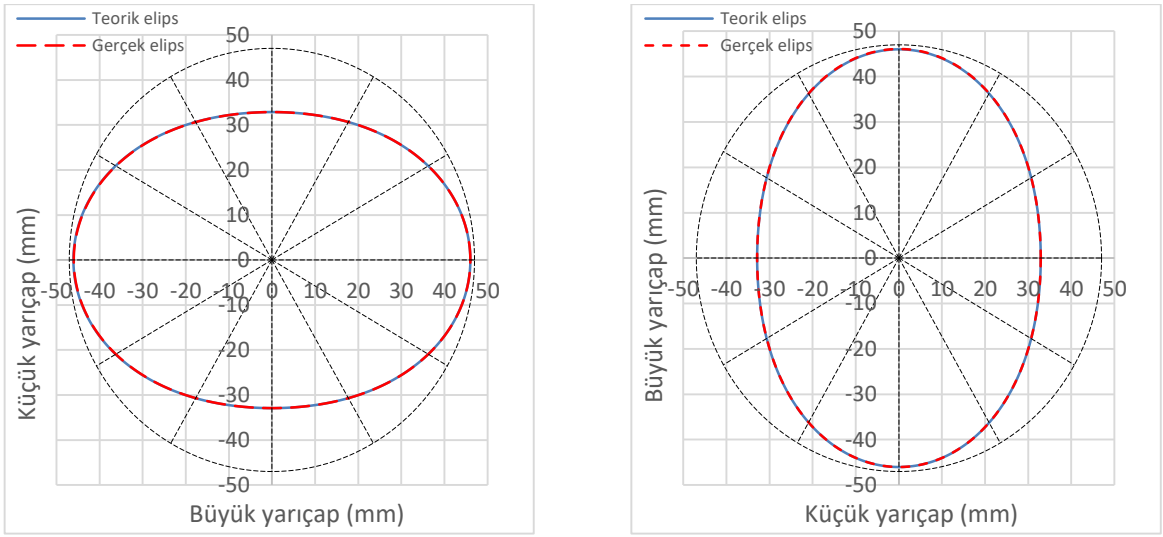
Şekil 2.10. Lepleme sonrası Db-02 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.

EK-2. (devam) Eksen kaçıklık değerlerine göre gerçek ve teorik bölüm elipsi karşılaştırılması.



(a) (b)

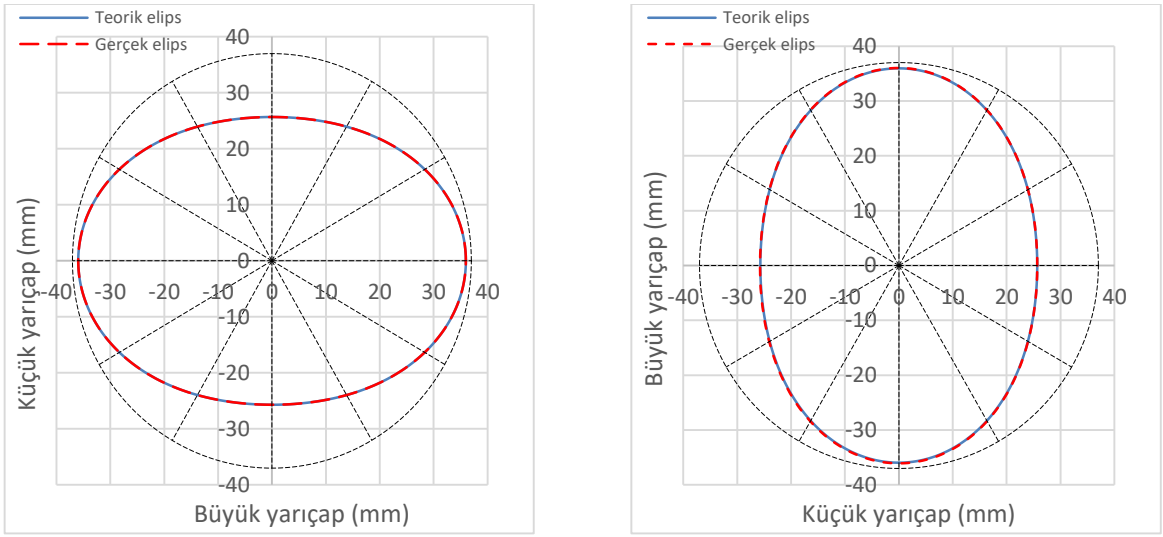
Şekil 2.11. Lepleme öncesi Db-05 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.



(a) (b)

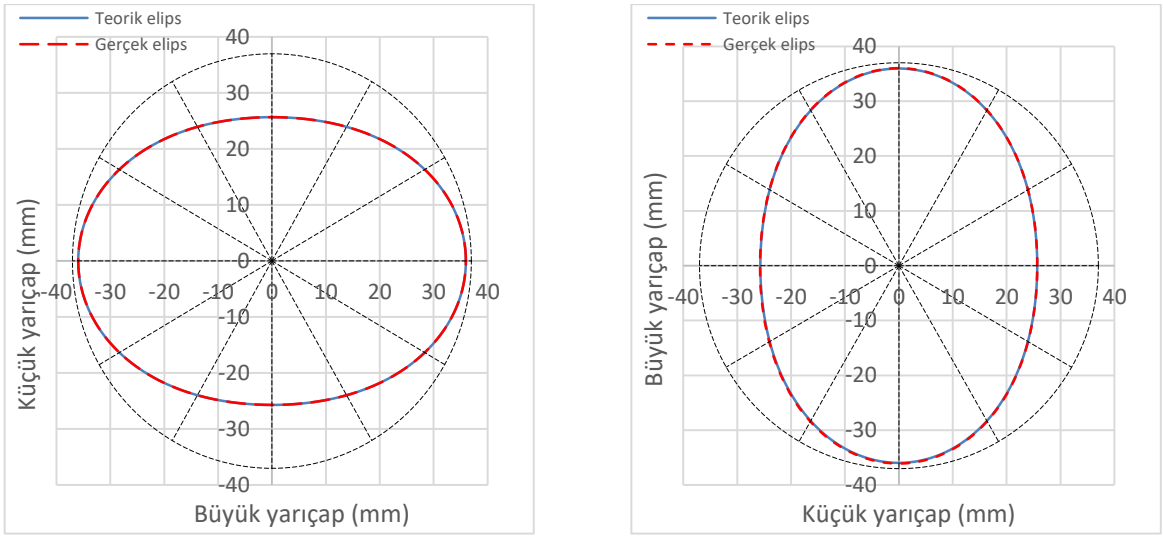
Şekil 2.12. Lepleme sonrası Db-05 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.

EK-2. (devam) Eksen kaçıklık değerlerine göre gerçek ve teorik bölüm elipsi karşılaştırılması.



(a) (b)

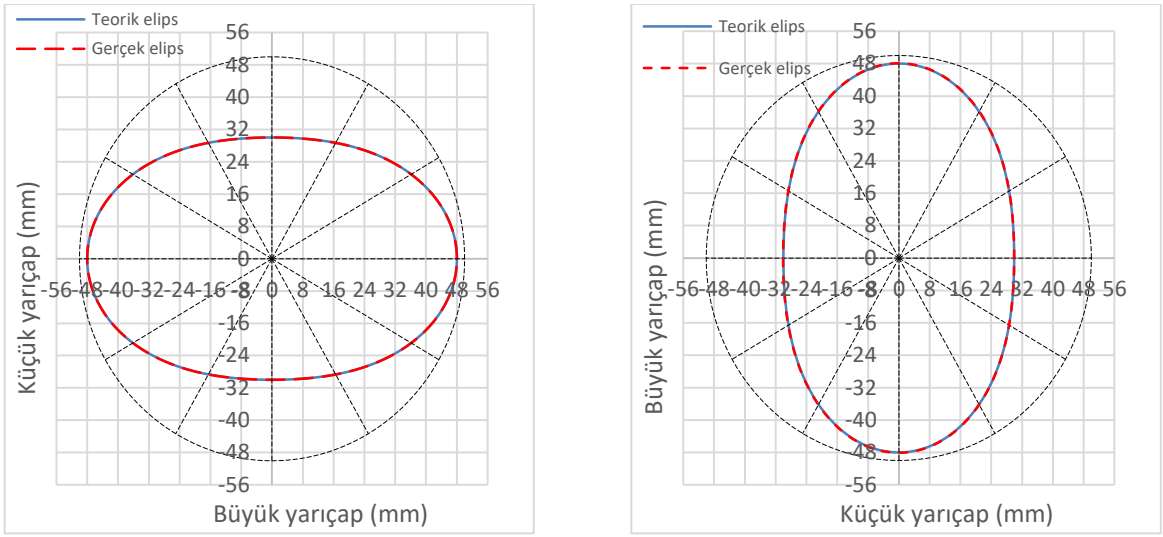
Şekil 2.13. Lepleme öncesi Db-06 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.



(a) (b)

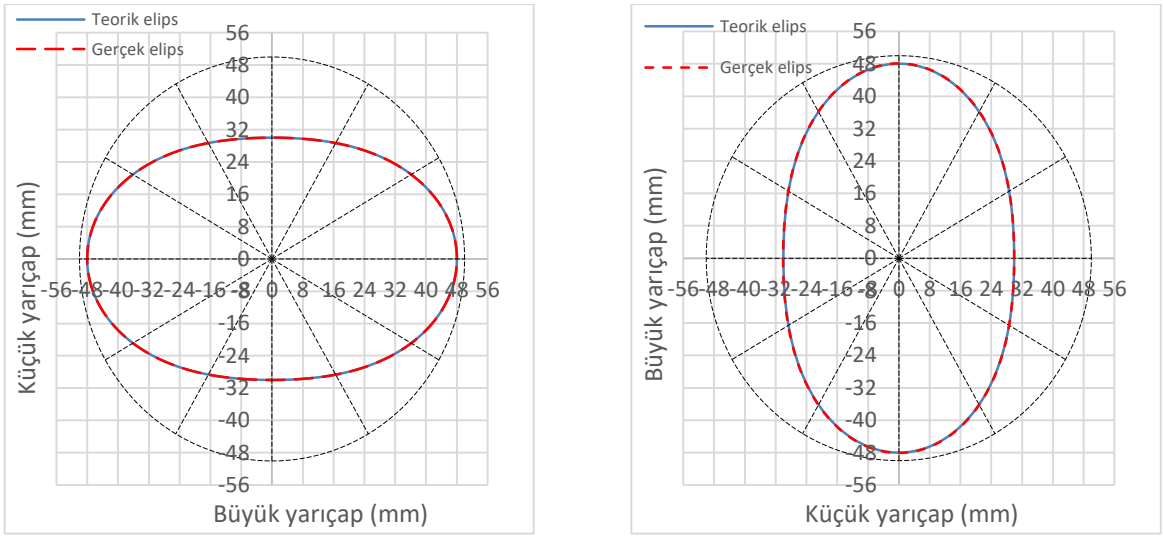
Şekil 2.14. Lepleme sonrası Db-06 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.

EK-2. (devam) Eksen kaçıklık değerlerine göre gerçek ve teorik bölüm elipsi karşılaştırılması.



(a) (b)

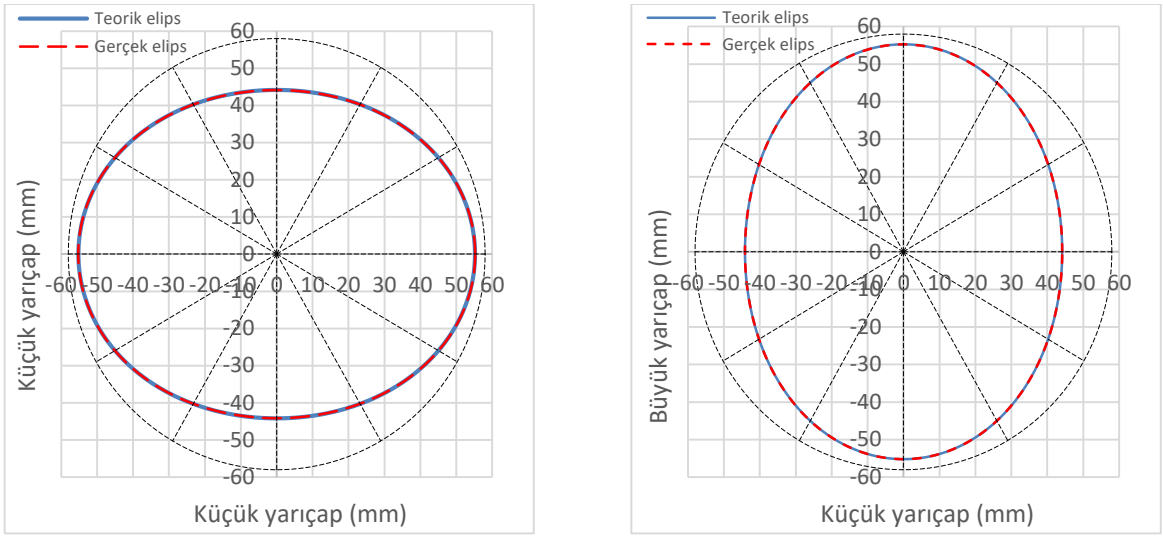
Şekil 2.15. Lepleme öncesi Db-09 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.



(a) (b)

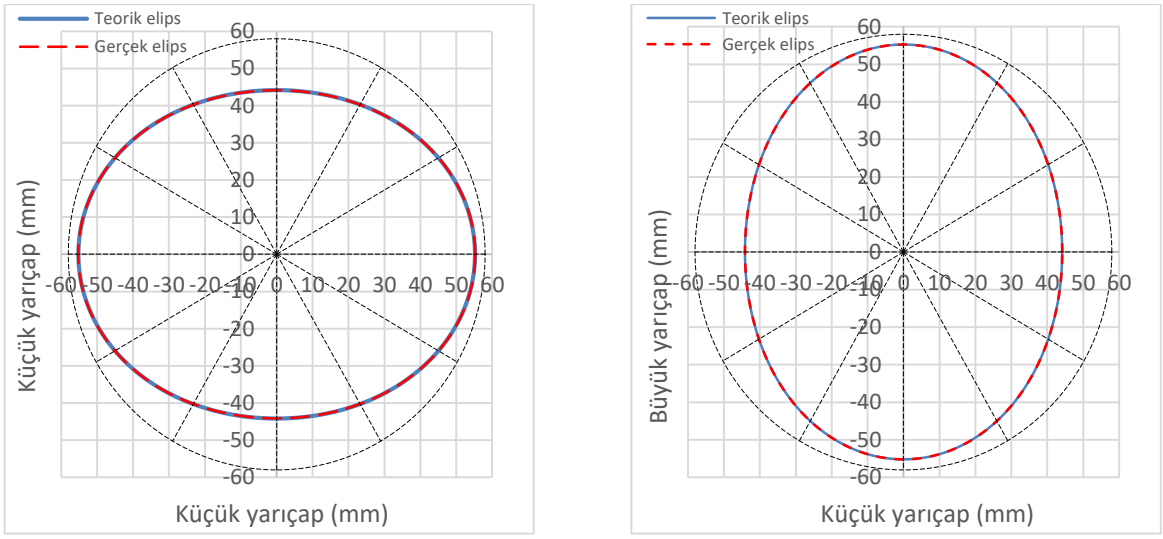
Şekil 2.16. Lepleme sonrası Db-09 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.

EK-2. (devam) Eksen kaçıklık değerlerine göre gerçek ve teorik bölüm elipsi karşılaştırılması.



(a) (b)

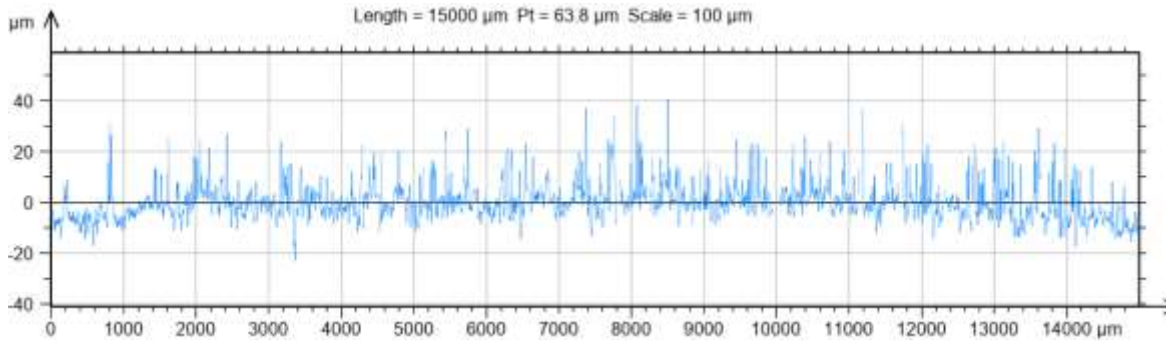
Şekil 2.17. Lepleme öncesi Db-03 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.



(a) (b)

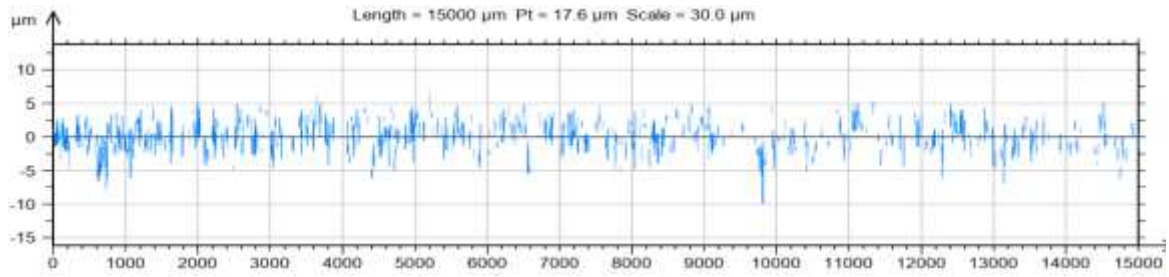
Şekil 2.18. Lepleme sonrası Db-03 kodlu eliptik dişli çifti. a) Yatay konum. b) Dikey konum.

EK-3. Eliptik dişlilerin yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	3.62	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	2.48	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	6.10	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	4.28	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	37.5	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	1.29	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	1.83	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	1.01		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	3.40		Gaussian filter, 0.08 mm

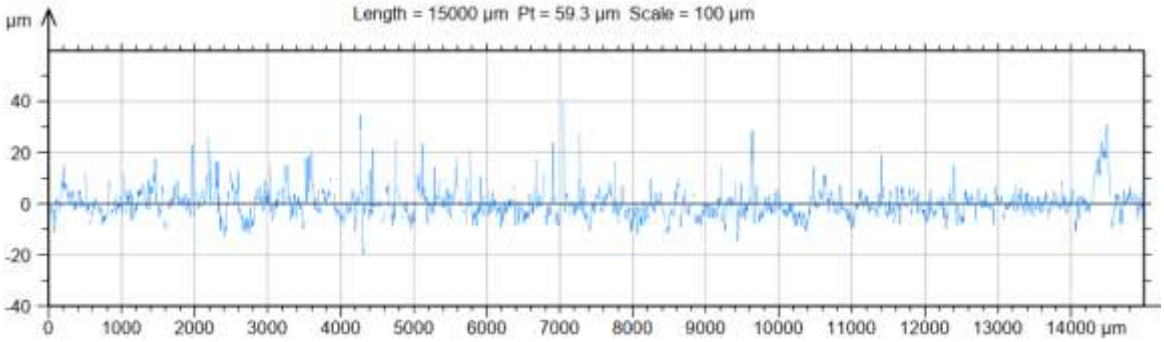
Şekil 3.1. Db-01 kodlu eliptik dişlinin lepleme öncesi yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	1.91	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	1.99	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	3.89	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	2.14	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	9.82	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	0.810	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	1.01	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	0.345		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	2.36		Gaussian filter, 0.08 mm

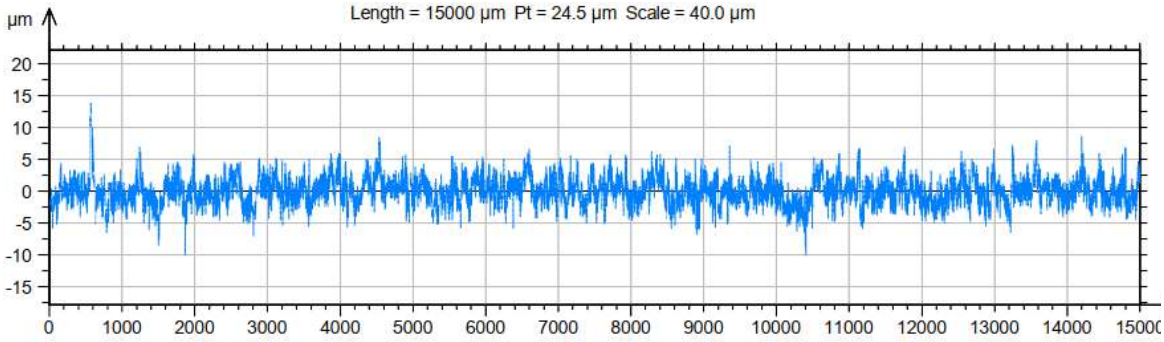
Şekil 3.2. Db-01 kodlu eliptik dişlinin lepleme sonrası yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.

EK-3. (devam) Eliptik dişlilerin yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	2.79	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	2.65	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	5.45	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	5.12	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	28.9	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	1.15	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	1.69	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	0.136		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	3.86		Gaussian filter, 0.08 mm

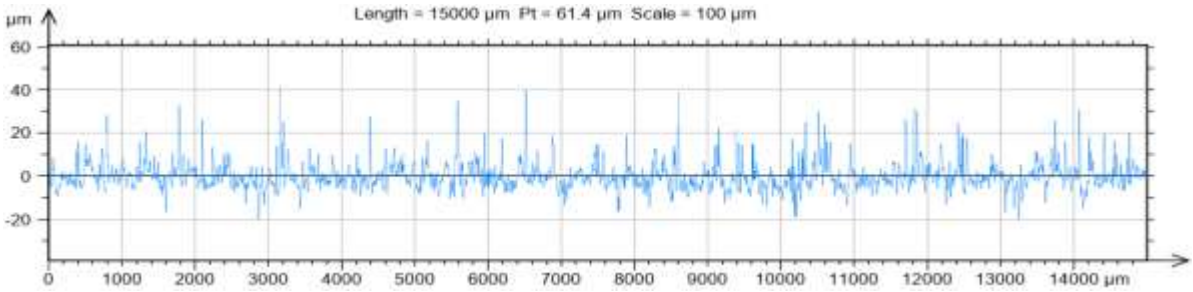
Şekil 3.3. Db-04 kodlu eliptik dişlinin lepleme öncesi yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	2.88	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	2.71	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	5.59	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	2.93	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	12.8	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	0.926	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	1.04	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	0.184		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	3.74		Gaussian filter, 0.08 mm

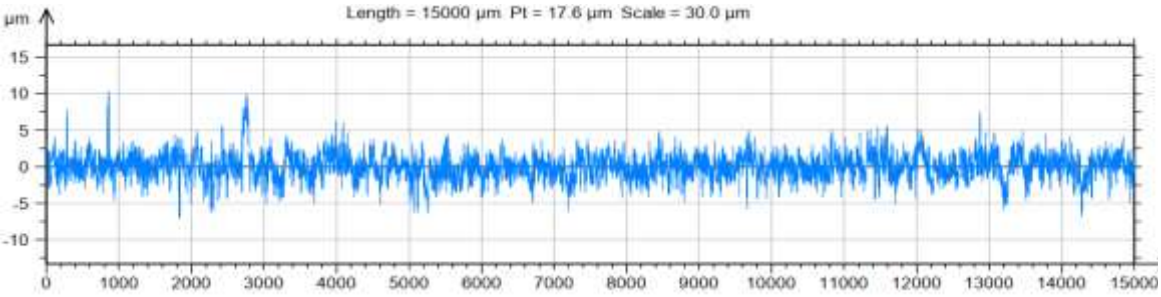
Şekil 3.4. Db-04 kodlu eliptik dişlinin lepleme sonrası yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.

EK-3. (devam) Eliptik dişlilerin yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	4.24	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	2.57	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	6.80	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	6.57	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	35.7	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	1.70	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	1.42	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	0.862		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	2.91		Gaussian filter, 0.08 mm

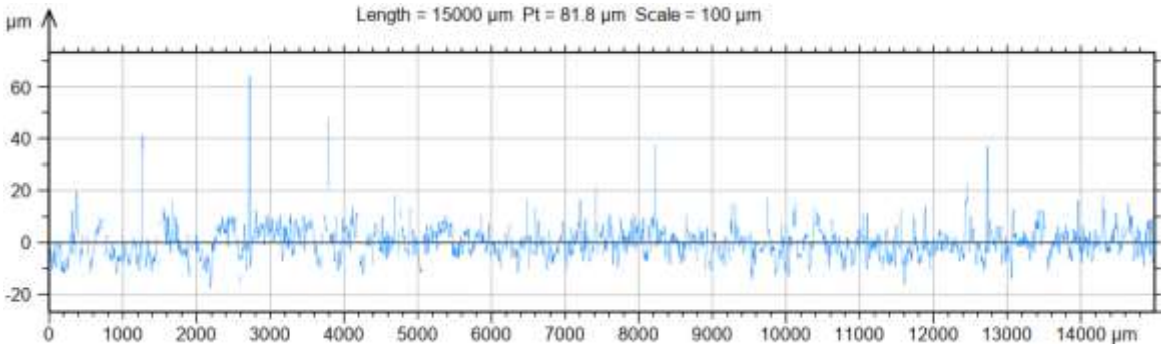
Şekil 3.5. Db-07 kodlu eliptik dişlinin lepleme öncesi yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	3.55	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	2.86	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	6.41	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	3.14	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	13.2	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	1.08	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	1.35	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	0.0607		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	3.20		Gaussian filter, 0.08 mm

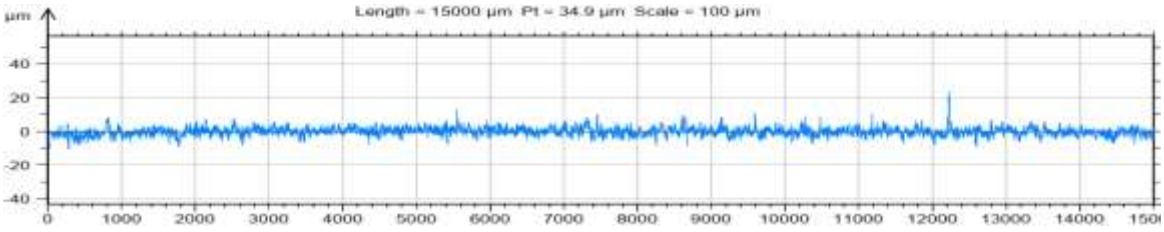
Şekil 3.6. Db-07 kodlu eliptik dişlinin lepleme sonrası yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.

EK-3. (devam) Eliptik dişlilerin yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	5.35	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	4.09	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	9.44	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	5.27	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	57.5	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	2.03	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	1.78	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	0.180		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	2.31		Gaussian filter, 0.08 mm

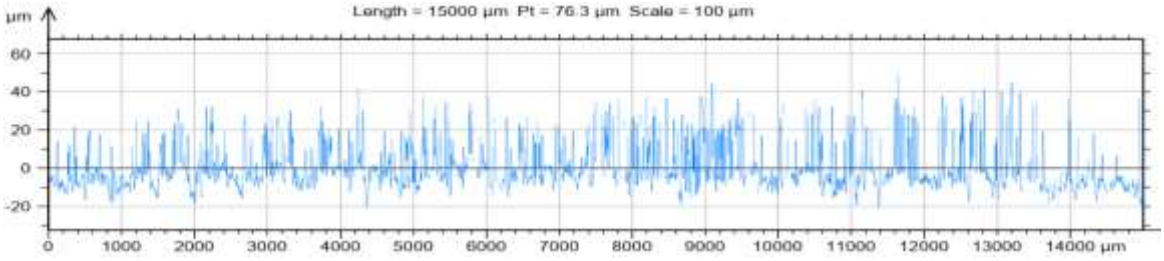
Şekil 3.7. Db-08 kodlu eliptik dişlinin lepleme öncesi yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	4.29	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	4.02	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	8.31	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	4.13	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	23.7	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	1.48	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	2.03	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	-0.0541		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	3.16		Gaussian filter, 0.08 mm

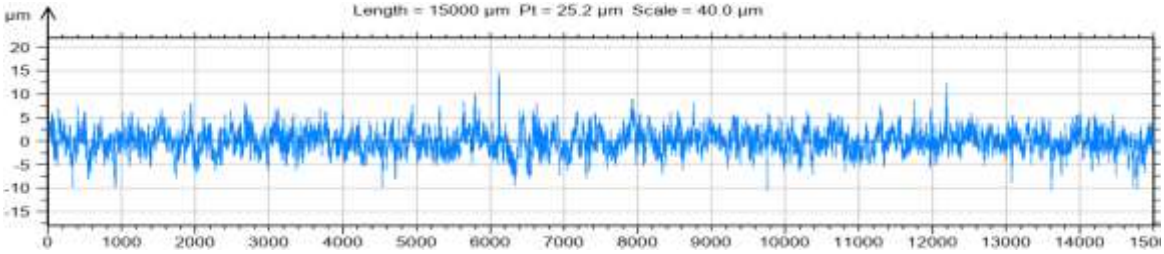
Şekil 3.8. Db-08 kodlu eliptik dişlinin lepleme sonrası yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.

EK-3. (devam) Eliptik dişlilerin yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	10.3	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rv	4.67	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rz	15.0	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rc	11.5	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rt	52.7	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Ra	2.61	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rq	4.02	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rsk	1.08		*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rku	4.62		*Gaussian filter, 0.08 mm*

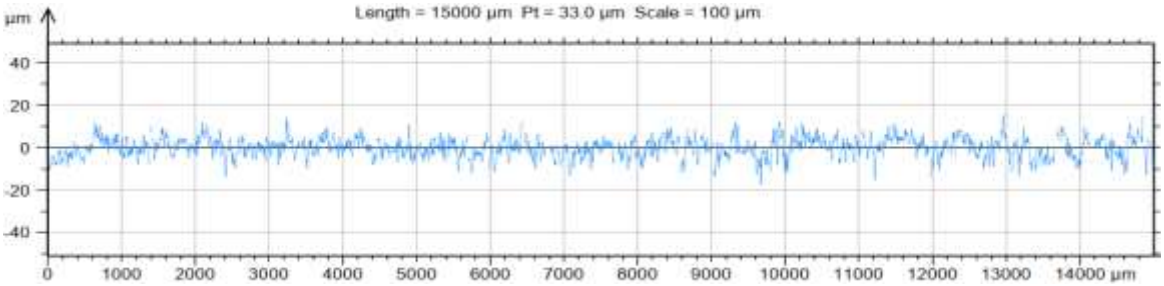
Şekil 3.9. Db-02 kodlu eliptik dişlinin lepleme öncesi yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	4.53	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rv	4.81	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rz	9.34	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rc	4.80	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rt	22.2	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Ra	1.47	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rq	1.91	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rsk	-0.091		*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rku	3.57		*Gaussian filter, 0.08 mm*

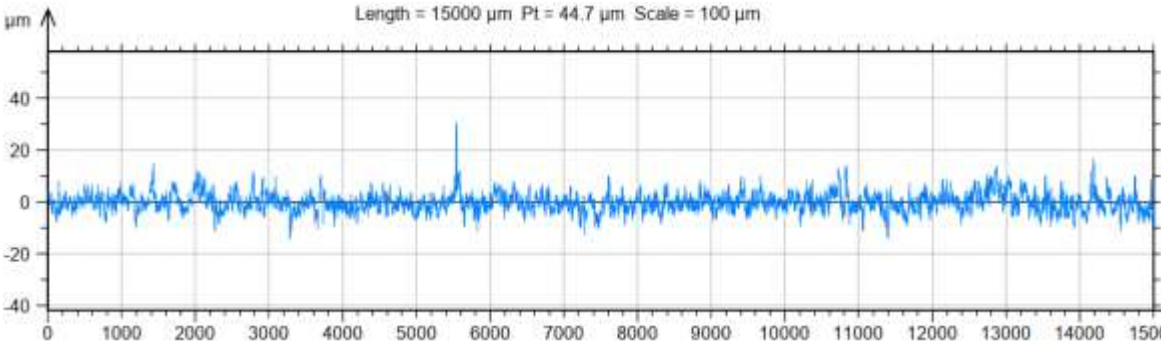
Şekil 3.10. Db-02 kodlu eliptik dişlinin lepleme sonrası yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.

EK-3. (devam) Eliptik dişlilerin yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	2.05	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	2.46	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	4.51	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	3.17	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	16.6	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	1.56	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	1.29	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	-0.4		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	2.56		Gaussian filter, 0.08 mm

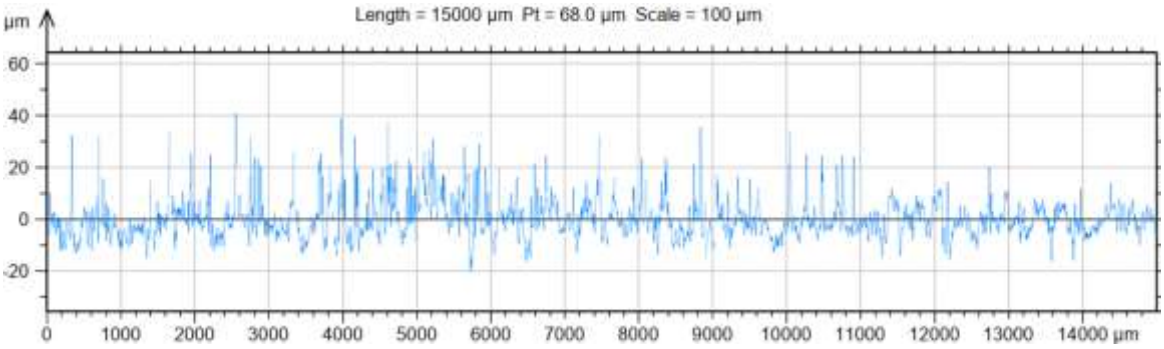
Şekil 3.11. Db-05 kodlu eliptik dişlinin lepleme öncesi yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	4.31	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	3.22	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	7.53	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	4.33	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	29.2	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	1.36	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	1.87	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	0.514		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	4.72		Gaussian filter, 0.08 mm

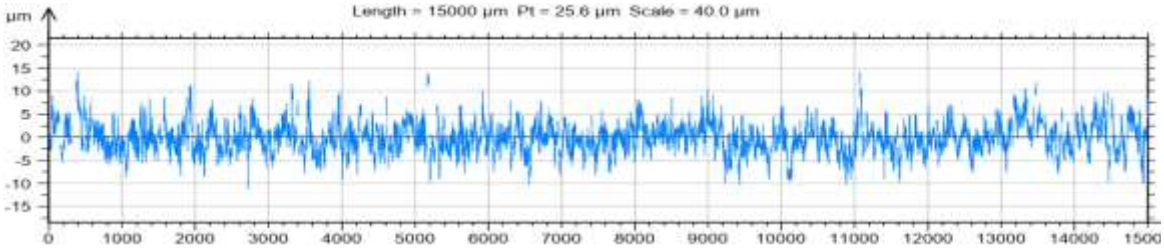
Şekil 3.12. Db-05 kodlu eliptik dişlinin lepleme sonrası yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.

EK-3. (devam) Eliptik dişlilerin yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	8.17	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rv	4.75	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rz	12.9	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rc	8.85	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rt	42.6	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Ra	2.39	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rq	2.41	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rsk	-0.0159		*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rku	2.53		*Gaussian filter, 0.08 mm*

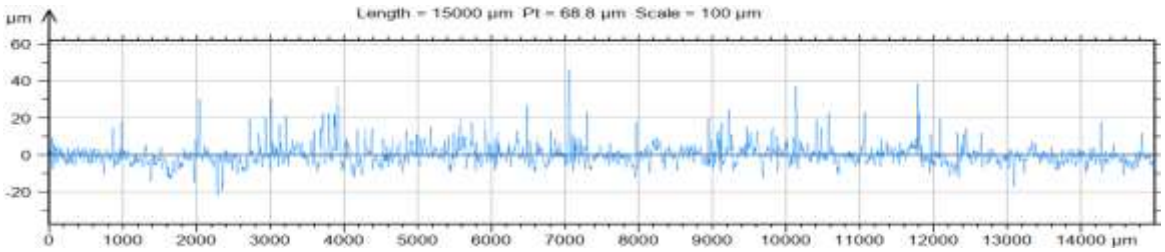
Şekil 3.13. Db-06 kodlu eliptik dişlinin lepleme öncesi yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	3.45	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rv	2.33	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rz	5.79	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rc	4.52	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rt	19.4	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Ra	1.25	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rq	1.56	µm	*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rsk	0.642		*Gaussian filter, 0.08 mm*
Rku	3.18		*Gaussian filter, 0.08 mm*

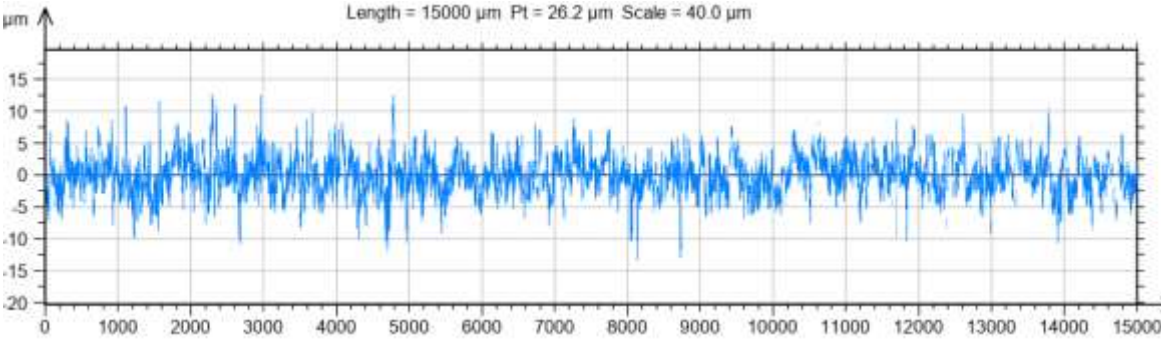
Şekil 3.14. Db-06 kodlu eliptik dişlinin lepleme sonrası yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.

EK-3. (devam) Eliptik dişlilerin yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	3.69	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	3.38	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	7.07	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	5.41	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	38.1	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	1.69	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	2.18	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	0.353		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	2.86		Gaussian filter, 0.08 mm

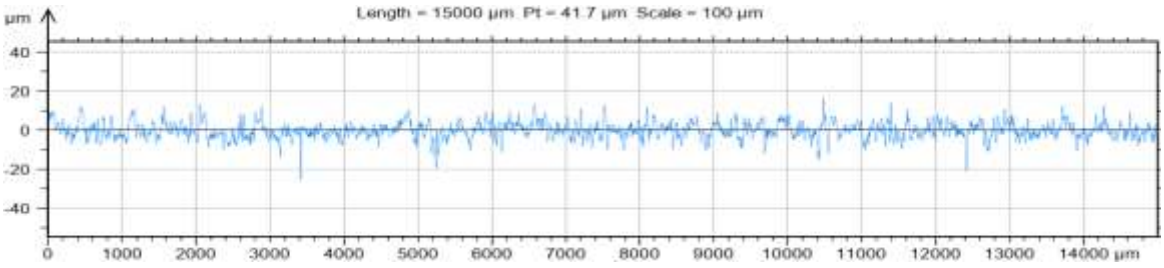
Şekil 3.15. Db-09 kodlu eliptik dişlinin lepleme öncesi yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	4.07	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	4.23	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	8.29	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	4.48	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	21.6	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	1.49	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	1.86	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	-0.114		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	2.87		Gaussian filter, 0.08 mm

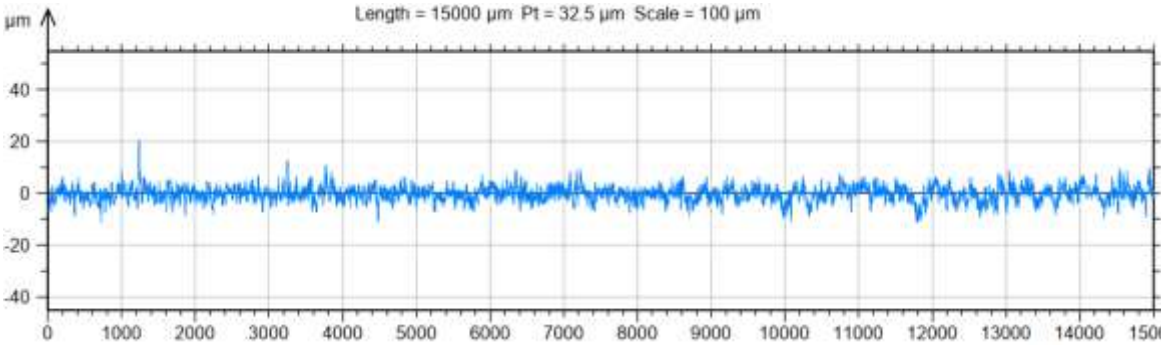
Şekil 3.16. Db-09 kodlu eliptik dişlinin lepleme sonrası yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.

EK-3. (devam) Eliptik dişlilerin yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	2.61	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	2.25	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	4.86	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	4.67	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	26.8	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	1.52	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	1.38	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	0.566		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	2.32		Gaussian filter, 0.08 mm

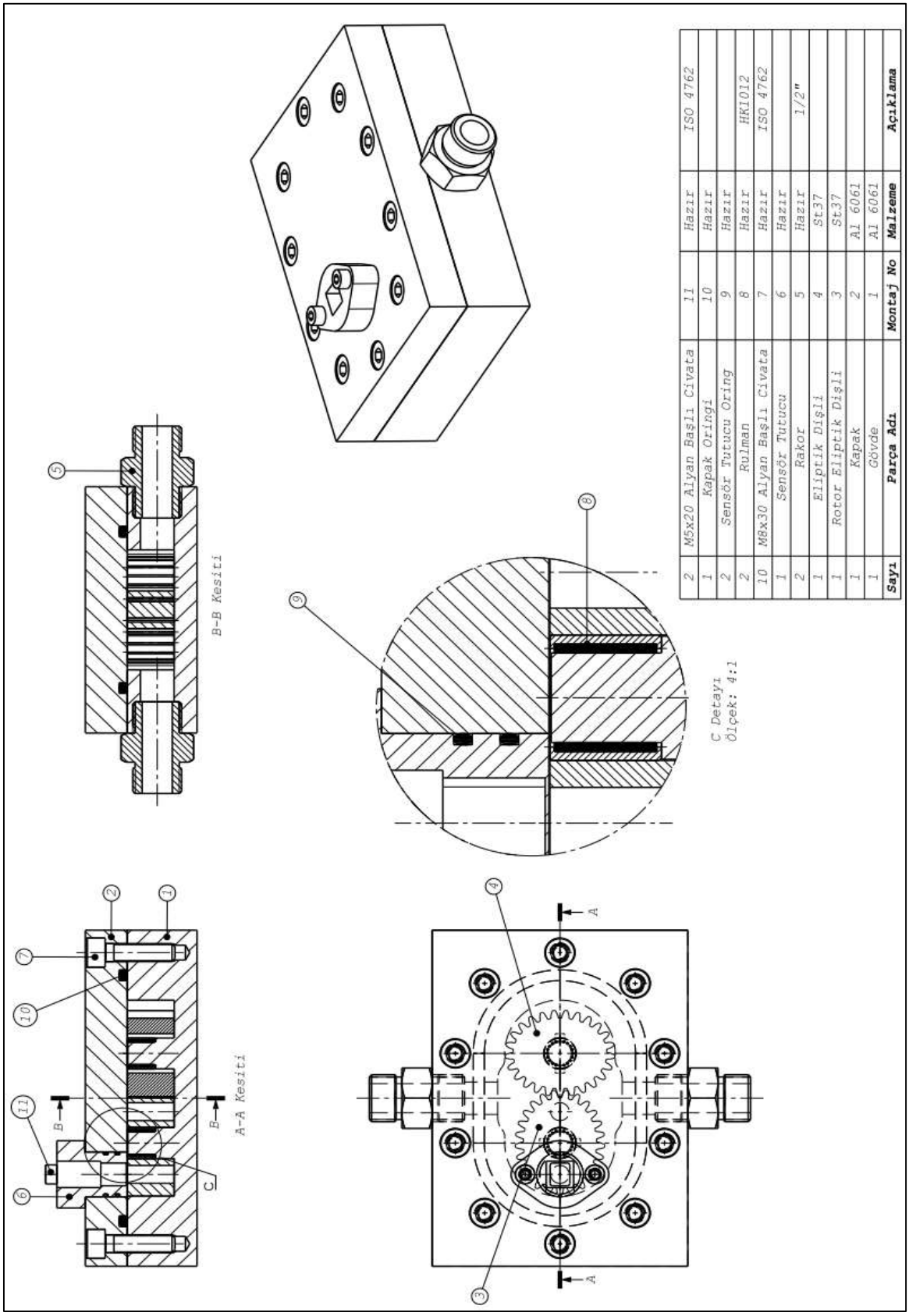
Şekil 3.17. Db-03 kodlu eliptik dişlinin lepleme öncesi yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	3.75	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rv	4.01	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	7.76	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rc	3.62	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rt	21.3	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Ra	1.33	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rq	1.73	µm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rsk	-0.175		Gaussian filter, 0.08 mm
Rku	3.38		Gaussian filter, 0.08 mm

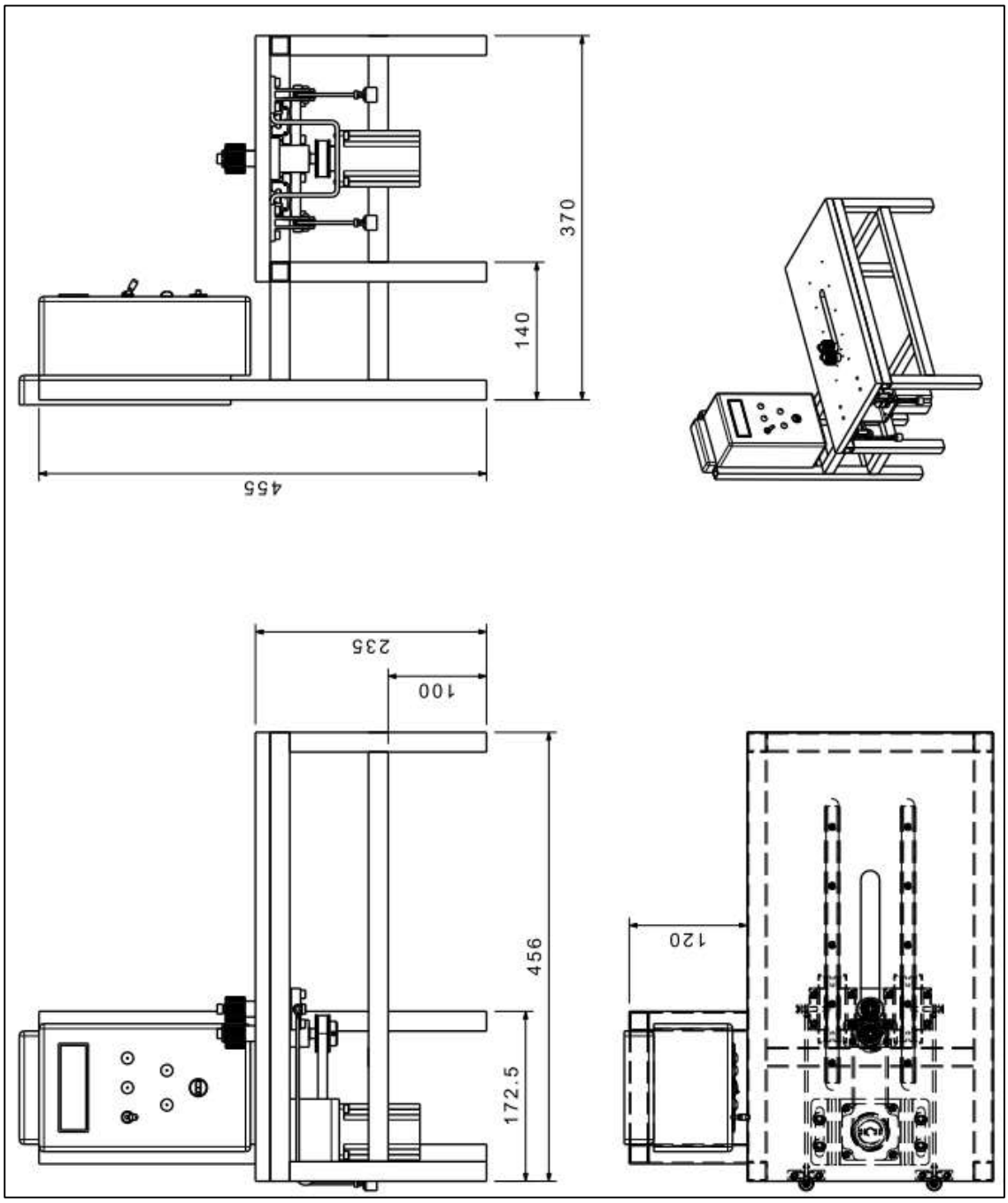
Şekil 3.18. Db-03 kodlu eliptik dişlinin lepleme sonrası yüzey pürüzlülük grafiği ve yüzey pürüzlülük değerleri.

Ek - 4. Debimetrenin montaj resmi



Sayı	Parça Adı	Montaj No	Malzeme	Açıklama
2	M5x20 Alyan Başlı Civata	11	Hazır	ISO 4762
1	Kapak Oringi	10	Hazır	
2	Sensör Tutucu Oring	9	Hazır	
2	Rulman	8	Hazır	HK1012
10	M8x30 Alyan Başlı Civata	7	Hazır	ISO 4762
1	Sensör Tutucu	6	Hazır	
2	Rakor	5	Hazır	1/2"
1	Eliptik Dişli	4	St37	
1	Rotor Eliptik Dişli	3	St37	
1	Kapak	2	Al 6061	
1	Gövde	1	Al 6061	

Ek -5. Lepleme ve eksen kaçıklık cihazı montaj resmi





Gazili olmak ayrıcalıktır