
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SİKLOİD HIZ DÜŞÜRÜCÜ TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI

Mert KAYIŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2023

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.

Mert KAYIŞ
19/06/2023

SİKLOİD HIZ DÜŞÜRÜCÜ TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mert KAYIŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Sikloid hız düşürücüler, düşük sürtünme değerleri sunan ve aşınmaya karşı yüksek mukavemete sahip redüktörlerdir. Robotlar ve CNC torna tezgâhları gibi yüksek hassasiyet gerektiren sektörlerle birlikte pek çok farklı uygulamada kullanım alanı bulan sikloid hız düşürücüler, yüksek bir güç ve hız aktarma organı niteliğiyle öne çıkmaktadır. Bu çalışmada; Excel programı yardımıyla tek kademeli sikloid hız düşürücünün matematiksel modellenmesi yapılmış, Visual Basic programı yardımıyla kullanıcıdan giriş değerlerini alıp çıkış değerlerini 2 boyutlu grafik olarak kullanıcıya sunan arayüz geliştirilmiştir. Oluşturulan 2 boyutlu grafikler, SolidWorks ve VBA programı yardımıyla pim çapı değişmesi halinde hız düşürücüsünün tüm elemanlarının 3 boyutlu modelleme revizyonlarının otomatik yapılması sağlanmıştır. Detay tasarım şekillenmeden prototip imalatı gerçekleştirilmiş, prototip imalattan alınan verilerle de detay tasarım yapılmıştır. Dayanım hesabı sonucu, hafif ağırlık ve düşük hacim felsefesiyle, muadillerine göre dayanımı yüksek, düşük alanda yüksek çevrim oranına sahip sikloid hız düşürücü tasarlanmıştır. En kritik parça baz alınarak, farklı pim çaplarına göre giriş miline uygulanabilecek en büyük tork değerlerini oluşturan iki boyutlu eğri ve denklem türetilmiştir. Denklem sayesinde kullanıcı, giriş miline bağlayacağı step motorun tork değerini girerek, sikloid hız düşürücüde kullanılacak pim çapının en yakın değerini belirleyebilmektedir. Puma tipi endüstriyel robotların, yerli tasarım ve imalatının yaygınlaştırılmasında ihtiyaç duyulan sikloid hız düşürücünün, bilgisayar destekli modelleme, tasarım ve imalat teknolojileri esas alınarak alınarak imal edilebilirliğinin tartışıldığı bu çalışma, milli teknoloji tabanlı literatüre katkı sağlayacaktır.

Bilim Kodu	:	91406
Anahtar Kelimeler	:	Sikloid hız düşürücü tasarımı, dayanım hesabı, 3 boyutlu modelleme, tasarım iyileştirmeleri, prototip imalat
Sayfa Adedi	:	107
Danışman	:	Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

CYCLOID SPEED REDUCER DESIGN AND PROTOTYPE MANUFACTURING

(M. Sc. Thesis)

Mert KAYIŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

Cycloid speed reducers are reducers that offer low friction values and they have high resistance to wear. Cycloid speed reducers, which find use in many different applications together with sectors that require high precision such as robots and CNC lathes, stand out with their high power and speed transmission characteristics. In this study; the mathematical modeling of the single-stage cycloid speed reducer was made with the help of the Excel program, and an interface was developed with the help of the Visual Basic program, which takes the input values from the user and presents the output values to the user as 2D. With the help of the created 2D graphics, the SolidWorks and the VBA program, in case the pin diameter changes, the three-dimensional modeling revisions of all the elements of the speed reducer are made automatically. Prototype manufacturing was carried out before the detailed design was formed, and detailed design was made with the data obtained from the prototype manufacturing. As a result of the strength analysis, a cycloid speed reducer with a high cycle rate in low area and higher strength compared to its equivalents was designed with the philosophy of light weight and low volume. Based on the most critical part, a two-dimensional curve and equation were derived that create the largest torque values that can be applied to the input shaft according to different pin diameters. The equation, the user can determine the closest value of the pin diameter to be used in the cycloid speed reducer by entering the torque value of the stepper motor to be connected to the input shaft. This study, in which the manufacturability of the cycloid speed reducer, which is needed for the dissemination of the domestic design and manufacture of Puma type industrial robots, is discussed based on computer-aided modeling, design and manufacturing technologies, will contribute to the national technology-based literature.

Science Code	:	91406
Key Words	:	Cycloid speed reducer design, strength calculation, 3D modeling, design improvements, prototype manufacturing
Page Number	:	107
Supervisor	:	Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

TEŞEKKÜR

"Sikloid hız düşürücü tasarımı ve prototip imalatı" adlı tez çalışmasında, değerli katkılarıyla beni yönlendiren Danışmanım Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR'e yüksek lisans dönemimin her aşamasında gösterdiği anlayış, manevi destek ve şahsıma kattığı bilgi birikimi için tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Çalışmamın her aşamasında manevi desteklerini hiç esirgemeyen sevgili eşim Beyza Nur KAYIŞ' a, , tez çalışması sürecinde doğan canım oğlum Göktuğ Selamet KAYIŞ' a ve tez sürecinde hem teknik hem manevi desteklerini hiç esirgemeyen Birim Yöneticim Sn. İlker ÇALIŞIR' a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak haklarını asla ödeyemeyeceğim canım annem ve rahmetli babama bugüne kadar yaptıkları her şey için saygı ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 3

2.1. Literatürün Gözden Geçirilmesi 3

2.2. Literatür Araştırmalarının Değerlendirilmesi 17

3. SİKLOİD HIZ DÜŞÜRÜCÜLER 19

3.1. Redüktörün Tanımı 20

3.2. Redüktör Tipleri 21

3.3. Sikloid Redüktör Ana Elemanları ve Çalışma Prensibi 21

3.4. Diş Boşluğu 22

3.5. Sikloid Eğriler 23

3.5.1. Episikloid ve hiposikloid eğriler 23

3.6. Sikloid Hız Düşürücülerin Faydaları 24

3.7. Redüktörlerin Kıyaslanması 26

3.8. Plastik Sikloid Hız Düşürücüler 27

Sayfa

4. SİKLOİD HIZ DÜŞÜRÜCÜLERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODELLENMESİ 29

4.1. Sikloid Disk Profilinin Matematiksel ve 3 Boyutlu Modellenmesi 29

4.2. Sikloid Hız Düşürücünün Prototip Modeli ve İmalatı 33

4.3. Sikloid Diskin Matematiksel Denklemi 34

4.3.1. Denklemin Excel ortamına aktarılması 37

4.3.2. Matematiksel denklemin Excel VBA ortamına aktarılması 43

4.3.3. 2 boyutlu grafiğin 3 boyutlu ortama aktarılması 44

4.4. Sikloid Hız Düşürücünün Modellenmesi 47

4.4.1. Sikloid disk montajı ve alt parçalarının modellenmesi 47

4.4.2. Giriş gövde montajı ve alt parçalarının modellenmesi 48

4.4.3. Çıkış gövde montajı ve alt parçalarının modellenmesi 50

4.4.4. Sikloid hız düşürücü montajı 51

4.5. Sikloid Hız Düşürücü Modelinin 3 Boyutlu Yazıcıda Prototip İmalatı 52

4.6. Sikloid Hız Düşürücün Kritik Tasarım Faaliyetleri Kapsamında Tasarım İyileştirmelerinin Yapılması ve Modellemenin Dondurulması 53

4.7. Ham Malzeme ve Kaplama Seçimi 58

4.8. Standart Parça Seçimi 60

4.8.1. Standart parçaların montajlanmasında kullanılacak tolerans çifti 62

4.8.2. Rulmanların montajında kullanılacak yağlama tipi 62

4.9. Sikloid Hız Düşürücüsünde Yağlama 63

4.10. Sistemin Ağırlığının Hesaplanması 64

4.11. Eklemeli Modüler Yapının Modellenmesi 65

4.12. Sikloid Hız Düşürücüde Kullanılacak Step Motor 66

4.12.1. Kaplinin modellenmesi 67

Sayfa

4.13. Sikloid Hız Düşürücü Montajını Teknik Resim Çalışması 68

4.14. Sikloid Hız Düşürücünün Alüminyum 2024 Malzemeden Prototip İmalatı ... 68

4.15. Sikloid Hız Düşürücü Modellenmesinin Çıktıları 69

5. SİKLOİD HIZ DÜŞÜRÜCÜLERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ DAYANIM HESABI 73

5.1. SolidWorks Simulation Ortamında Parçaları Tanımlama ve Dayanım Hesabı 74

5.2. Dayanım Hesaplarının Değerlendirilmesi 78

5.3. Kritik Pim Parçasının Dayanımın Hesabı 80

5.4. Farklı Pim Çaplarına Göre Yapılan Dayanım Hesabı 83

5.5. Analiz Değerlendirmesi ve Sonuçlar 86

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 89

6.1. Sonuçlar 89

6.2. Öneriler 90

KAYNAKLAR 91

EKLER 95

EK-1. Excel tablosu 96

EK-2. Visual Basic ve formlar 98

EK-3. Sikloid hız düşürücünün 3 boyutlu modeli: (a) giriş gövde montajı, (b) çıkış gövde montajı, (c) çıkış gövde kesit görünümü, (d) sikloid hız düşürücü montajı 102

EK-4. AISI 1015 / C15 kalite imalat çeliğinin ve AISI 52100 rulman çeliğinin kimyasal kompozisyonları 104

EK-5. Montaj teknik resmi 105

ÖZGEÇMİŞ 107

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Verim değerlerinin kıyaslanması 15

Çizelge 3.1. Modüler ve sikloid dişli çevrim oranlarının karşılaştırması 26

Çizelge 3.2. Redüktör tiplerinin genel karşılaştırılması 26

Çizelge 4.1. Sikloid hız düşürücü matematiksel denklemi oluşturmak için gerekli giriş ve sabit değerler 37

Çizelge 4.2. $d\varphi$, N ve diskin çalışabilirlik fonksiyonel durumunun hesaplanması 38

Çizelge 4.3. $d\varphi$ açı konumunda Ψ açısının, B_x ve B_y koordinatlarının hesaplanması 38

Çizelge 4.4. $d\varphi$ açı konumunda gövde üzerinde bulunan pimlerin merkezinden geçen daireyi oluşturacak noktanın x ve y koordinatı 39

Çizelge 4.5. $d\varphi$ açı konumunda birinci sikloid pimin x ve y koordinatı 39

Çizelge 4.6. $d\varphi$ açı konumunda sikloid göbek çapının ve iğne bilyeli rulman yuvasının x ve y koordinatı 40

Çizelge 4.7. Standart parça listesi 61

Çizelge 4.8. Dişli yağları için kullanılacak elastomer seçimi 62

Çizelge 5.1. Sikloid disk ve giriş gövde analiz değerlendirme tablosu 79

Çizelge 5.2. Eksantrik mil analiz değerlendirme tablosu 80

Çizelge 5.3. Eksantrik kada analiz değerlendirme tablosu 80

Çizelge 5.4. Mevcut tasarımda kullanılan çap 10 mm pim için yapılan analiz değerlendirme tablosu 83

Çizelge 5.5. Tresca yırtılma gerilmesi EK değerinin 2 olması koşuluyla farklı pim çaplarında giriş miline ve pime uygulanabilecek en büyük tork değerleri 85

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Root üfleyicilerinin şeması 3

Şekil 2.2. İki kademeli sikloidal hız düşürücünün tasarımı ve imalatı: (a) sikloid gövde, (b) sikloid disk 4

Şekil 2.3. İki aşamalı sikloidal hız düşürücünün yeni bir konsepti 5

Şekil 2.4. Cam kodlarını türetmek için kullanılan algoritma 7

Şekil 2.5. Sabit bir halka dişli tipi hiposikloid redüktör için tasarım örneği: (a) lob profili, (b) simülasyon ekranı 8

Şekil 2.6. Kilit noktaların 5 adet konumu: (a) diş profilindeki 5 temel noktanın konum grafiği, (b) Modifikasyon boşluk eğrisindeki 5 temel noktanın konum grafiği 9

Şekil 2.7. Temas kuvvetinin, sürtünme torkuna ve verimliliğin, sürtünme katsayısına bağımlılığını gösteren grafikler 10

Şekil 2.8. Birinci aşama sikloid disk üzerindeki, Von-Mises stres dağılımı - temas halinde olan üç çift dişli ve merkezi disk üstündeki yükler 11

Şekil 2.9. İki kademeli sikloidal hız düşürücünün elemanları üzerindeki Von-Mises gerilim değerleri 11

Şekil 2.10. Sikloid diskler üzerindeki en büyük Von-Mises gerilim değerleri 11

Şekil 2.11. Malhotra ve Kudryavcev modeli için verimlilik sonuçları (mavi grafik Malhotra modeline ve kırmızı grafik Kudryavcev modeline ait) : (a) giriş gücü değişimi, (b) iletim oranı değişimi, (c) giriş RPM değişimi 12

Şekil 2.12. Titreşim test düzeneği 13

Şekil 2.13. Redüktörün tasarımı 13

Şekil 2.14. MS Excel'de oluşturulan hesaplama programının genel görünümü 14

Şekil 2.15. Gerekli giriş momenti değerlerinin kıyaslanması 15

Şekil 2.16. Sonlu elemanlar analizi: (a) tek sikloidal dişli için sonlu elemanlar analizi, (b) dört sikloidal dişli için sonlu elemanlar analizi 16

Şekil 2.17. Test edilen sikloid redüktör: (a) 3D model, (b) kesit, (c) üretilen redüktör 17

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.18. Analog kuvvet ölçümü: (1) tork ölçümlü elektrik motoru, (2) plastik sikloid redüktör, (3) tork ölçümlü manyetik fren, (4) güç kaynağı 17

Şekil 3.1. SPINEA redüktör iç yapısı ve kesit görünümü..... 19

Şekil 3.2. Sikloid redüktörün ana kompanentleri..... 20

Şekil 3.3. Redüktör iç yapısı..... 21

Şekil 3.4. Sikloid redüktör kesit görünüşü ve elamanları 22

Şekil 3.5. Diş boşluğu..... 23

Şekil 3.6. Ortosikloid eğri 23

Şekil 3.7. (a) Episikloid eğri, (b) hiposikloid eğri..... 24

Şekil 3.8. Tasarım karşılaştırması: (a) Kompakt tasarım (b) sade tasarım..... 25

Şekil 4.1. Sikloid diskin "Epicycloiad for Rhino 3D v2.0" uygulamasında 2 boyutlu grafiğinin oluşturulması..... 30

Şekil 4.2. Girdi değerler sonucu oluşan parametrik denklem..... 30

Şekil 4.3. Parametrik denklemin "Expression" komutu ile programa girilmesi 32

Şekil 4.4. "Law Curve" komutu ile çizim düzleminin oluşturulması 32

Şekil 4.5. Sikloid diskin katı modeli 33

Şekil 4.6. İlk imalatı yapılan sikloid hız düşürücünün prototip modeli..... 33

Şekil 4.7. Diskin noktalar halinde x ve y koordinatlarının çizilmesi 35

Şekil 4.8. Spline oluşturmak için gereken nokta sayısı k sabiti 36

Şekil 4.9. Sikloid disk ve eksantrik kadaların 2 boyutlu görsel grafiği oluşturmak için Excel ortamında, 1812 satırdan oluşan x ve y koordinatları tanıtılması. 42

Şekil 4.10. Excel'e tanıtılan verilerin, 2 boyutlu görsel grafiğe aktarılması 42

Şekil 4.11. 11:1 Çevrim oranında sikloid hız düşürücünün Excel ortamında oluşturulan matematiksel denklemin 2 boyutlu grafiğe parametrik olarak aktarılması..... 43

Şekil 4.12. 2 boyutlu grafikte yer alan renklerin parça bazında isimleri 43

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.13. Sikloid diski oluşturan noktaların x,y ve z koordinatları 44

Şekil 4.14. Sikloid diski oluşturan noktaların x,y ve z koordinatları 2 45

Şekil 4.15. Metin belgesine kayıt edilen koordinat değerleri 45

Şekil 4.16. Parametrelerin SW ortamına aktarma 46

Şekil 4.17. SolidWorks ortamına aktarılan koordinatlar ile eğri oluşturma 46

Şekil 4.18. Oluşturulan katı model..... 46

Şekil 4.19. Sikloid disk montaj bütünü: (a) ön görünüm, (b) arka görünüm 48

Şekil 4.20. Giriş gövde montajının tamamlanmış modeli: (a) ön görünüm, (b) arka görünüm 49

Şekil 4.21. Çıkış gövde montajının tamamlanmış modeli: (a) ön görünüm, (b) arka görünüm 50

Şekil 4.22. Sikloid hız düşürücünün montajlanmış modeli: (a) conta ve pimlerin yerleşimi, (b) pimin eksantrik kadaya bağlantısı, (c) giriş ve çıkış gövdeyi cıvata ile sabitleme 52

Şekil 4.23. Tasarım iyileştirmesi 1: (a) 3 mm boşluk, (b) 0,2 mm boşluk 54

Şekil 4.24. Tasarım iyileştirmesi 2..... 55

Şekil 4.25. Tasarım iyileştirmesi 3: (a) dişli tasarım revizyonu, (b) conta kanalı 55

Şekil 4.26. Tasarım iyileştirmesi 4: (a) kesit görünümü, (b) pim ve cıvata bağlantı delikleri 56

Şekil 4.27. Tasarım iyileştirmesi 5..... 56

Şekil 4.28. Tasarım iyileştirmesi 6..... 57

Şekil 4.29. Tasarım iyileştirme faaliyetleri kapsamında sikloid hız düşürücünün 3 boyutlu montajlanmış modeli 58

Şekil 4.30. Nx ortamında parçalara malzeme tanımlama 64

Şekil 4.31. Nx ortamında sikloid hız düşürücünün toplam ağırlığı 65

Şekil 4.32. Eklemeli modüler yapı..... 66

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.33. Ara bağlantı mili 3 boyutlu modeli ve sikloid hız düşürücüye montaj: a) sikloid redüktörün motor bağlantısı, b) bağlantının kesit görünümü, c) ara bağlantı mili 3 boyutlu modeli..... 68

Şekil 5.1. Eksantrik mil, giriş gövde ve sikloid disk' e atanan AISI 1015 soğuk çekilmiş çelik malzemenin verisi..... 74

Şekil 5.2. Pim ve eksantrik kadaya atananan AISI 4340 normalize çelik malzemenin verisi..... 75

Şekil 5.3. Sikloid disk ve giriş gövde temas setleri: (a) sikloid disk temas seti, (b) giriş gövde temas seti 76

Şekil 5.4. 24 N.m giriş tork değeri için sikloid disk ve giriş gövdede oluşan Von-Mises akma gerilmesi ve emniyet katsayısı: (a) sikloid disk için emniyet katsayısı, (b) giriş gövde için emniyet katsayısı 76

Şekil 5.5. Eksantrik mil temas setleri 77

Şekil 5.6. 24 N.m giriş tork değeri eksantrik milde için oluşan Von-Mises akma gerilmesi ve emniyet katsayı değeri 77

Şekil 5.7. Eksantrik kada temas seti 78

Şekil 5.8. 20 N.m tork değeri için Eksantrik kada da oluşan Von-Mises akma gerilmesi ve emniyet katsayı değeri 78

Şekil 5.9. Pim temas seti 81

Şekil 5.10. 20 N.m tork değeri için çap 10 mm pimde oluşan Von-Mises akma gerilmesi, Tresca yırtılma gerilmesi ve emniyet katsayı değerleri: (a) Von-Mises akma gerilmesi, (b) Tresca yırtılma gerilmesi 81

Şekil 5.11. 40 N.m tork değeri için çap 10 mm pimde oluşan Von-Mises akma gerilmesi, Tresca yırtılma gerilmesi ve emniyet katsayı değerleri: (a) Von-Mises akma gerilmesi ve emniyet katsayı değeri, (b) Tresca yırtılma gerilmesi ve emniyet katsayı değeri 82

Şekil 5.12. Farklı pim çaplarına göre giriş miline uygulanabilecek en büyük tork değerlerini oluşturan iki boyutlu eğri ve denklem..... 85

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Sikloid hız düşürücü prototip imalatı ve montajı 34

Resim 4.2. Prototip imalatı yapılan sikloid hız düşürücü ve çalıştırma esnasında deforme olan bölgeler: (a) deforme olan bölgeler, (b) prototip imalat ve montajı 52

Resim 4.3. Nema 34 frenli 12 N.m step motor 67

Resim 4.4. Alüminyum 2024 malzemeden üretilen sikloid hız düşürücünün üretim aşamaları ve montajı – 1: (a) giriş gövde, (b) sikloid disk, (c) çikiş mili ve pim montajı 69

Resim 4.5. Alüminyum 2024 malzemeden üretilen sikloid hız düşürücünün üretim aşamaları ve montajı – 2: (a) giriş gövde montaj, (b) çıkış gövde, (c) sikloid hız düşürücü montajı..... 69

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
mm	Milimetre
µm	Mikrometre
mm^2	Milimetrekare
mm^3	Milimetreküp
gr	Gram
kg	Kilogram
kg / mm^2	Kilogram / Milimetrekare
gr / mm^3	Gram / Milimetreküp
N	Newton
Hz	Hertz (Frekans)
L	Litre
MPa	Megapascal
N.m	Newton-Metre (Tork)

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AISI	American Iron and Steel Institute
Arcmin	Arcminute
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Normung
EKS	Emniyet Katsayısı
EPDM	EthylenePropylene Diene Monomer
HRC	Rockwell C
M	Metrik
NBR	Nitril Kauçuk

Kısaltmalar	Açıklamalar
SI	Uluslararası Birimler Sistemi
SW	SolidWorks
T	Tork
VBA	Visual Basic for Applications

1. GİRİŞ

Sikloid hız düşürücüler düşük sürtünme değerleri sunan ve aşınmaya karşı yüksek mukavemete sahip redüktörlerdir. Endüstri 4.0 uygulamalarının hızla gelişmesi, sanayi ve üretim hatlarında robot kullanımını arttırmış, kolaboratif ya da cobot adıyla anılan robotların kullanımı yaygınlaştırmıştır. Sikloid hız düşürücüler robotla üretim gerektiren ürünlerin imalatında beklentileri tam anlamıyla karşılayabilen nitelikler göstermektedir. Robotlar ve CNC torna tezgâhları gibi yüksek hassasiyet gerektiren sektörlerle birlikte pek çok farklı uygulamada kullanım alanı bulan sikloid hız düşürücüler, yüksek bir güç ve hız aktarma organı niteliğiyle öne çıkmaktadır.

Tez çalışmasında; benzer çevrim oranına sahip sikloid hız düşürücülerle karşılaştırıldığında, daha küçük ve hafif, ani yük değişimlerine ve aşırı yüklemeler karşı dirençli, yüksek verimli, birim hacim başına daha yüksek çevrim oranına sahip, düşük boşluklu yapısı ile tercih edilen sikloid hız düşürücünün tasarımı, prototip imalatı ve bilgisayar destekli dayanım hesabıyla iletilebilecek en büyük tork değerlerinin hesaplanması yapılmış ve uç uca eklenebilir çok sayıda sikloid hız düşürücülerin bir aparat yardımıyla birbirlerine bağlanabileceği amaçlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

Yüksek çevrim oranında kompakt tasarıma sahip, düşük mekanik boşlukta (1 arcmin. altında), diş sıyrılmasını ortadan kaldıracak, %500’ lük aşırı mukavemet olanağı sağlayan, çalışma koşullarında istikrarlı, mekanik ve termal tepkilere sahip, bomba imha robotu uzuv redüktörlerinde kullanılabilen sikloid hız düşürücüyü oluşturan profilin, matematiksel modeli hazırlanmış, Excel ortamında istenilen iletim oranına dayalı sikloid dişlinin 2 boyutlu tüm verilerini oluşturan arayüz geliştirilmiş, noktasal teması yüzeysel temasa çeviren ara adaptör parçası tasarlanmış, sikloid hız düşürücünün tüm parçalarıyla beraber CAE programı yardımıyla dayanım hesapları gerçekleştirilmiş ve tasarıma uygun 3D yazıcı ve CNC tezgahında prototip imalatın yapılmıştır. Ayrıca Visual Basic ortamından faydalanılmış, NX ve SolidWorks bilgisayar destekli tasarım paket programlarından istifade edilmiş ve rutin ofis programları kullanılmıştır.

Visual Basic programı yardımıyla kullanıcıdan giriş değerlerini alıp çıkış değerlerini 2 boyutlu grafik olarak kullanıcıya sunan arayüz geliştirilmiş, SolidWorks programı

yardımıyla VBA’ da oluşturulan 2 boyutlu grafikler, 3 boyutlu katı modele parametrik tasarım felsefesi ile yansıtılmış, detay tasarım şekillenmeden prototip imalatı gerçekleştirilmiş, prototip imalattan alınan verilerle de detay tasarım yapılmıştır. Kritik parça referans alınarak emniyet katsayısı 2 olacak şekilde farklı pim çapları için bilgisayar destekli dayanım hesabı yapılarak, sistem için gerekli en büyük giriş N.m tork değerleri belirlenip çalışma tamamlanmıştır.

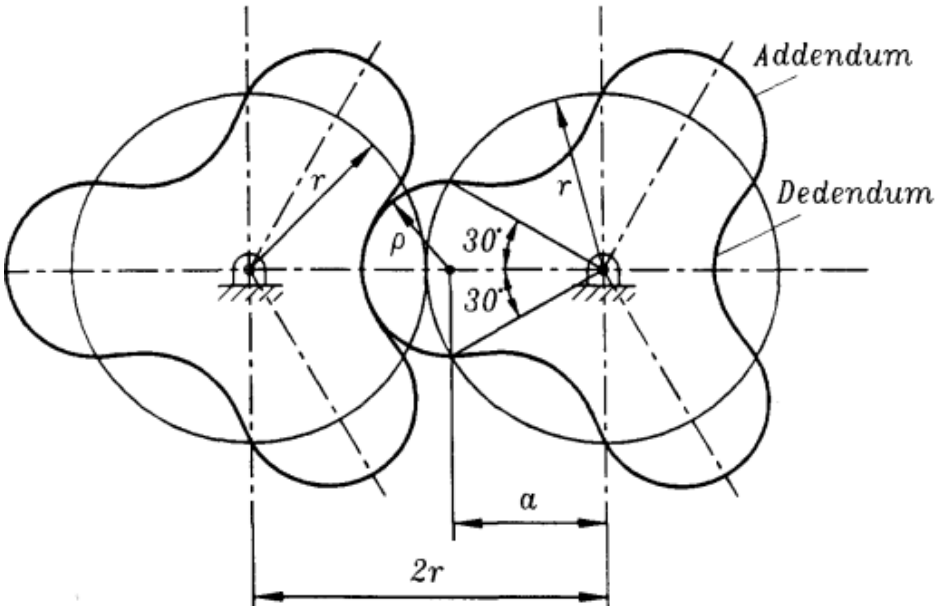
Sikloid hız düşürücü tasarımı ve prototip imalatı konulu tez çalışmasında, tasarım iyileştirmeleri ve analiz parametrelerimizle ilgili en az bir uluslararası yayına aracılık edileceği, ülkemizde sadece satışı gerçekleştirilen ürün için faydalı model / patent alınarak yerli tasarım ve üretim imkanının oluşturulması öngörülmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Sikloid hız düşürücülerin 2 boyutlu tasarımı, 3 boyutlu modellenmesi ve imalatı üzerine yapılmış çok sayıda çalışma ile karşılaşılmıştır. Çalışmaların 1-2 adedinin ulusal düzeyde yapıldığı, diğerlerinin uluslararası düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

2.1. Literatürün Gözden Geçirilmesi

Faydor[ve Feng [1] tarafından yapılan "sikloidal dişlilerin bilgisayarla tasarımı ve üretimi" adlı çalışmada; sikloidal (trochoidal) eğrilerinden oluşan 3 farklı endüstriyel ürün için eğrilerin tasarımını ve üretimini dikkate alınmıştır. Wankel motoru, root üfleyicileri ve pompalarda yer alan ve sikloidal eğrilerden oluşan düzlemsel dişlileri ve rotorları, 2 boyutlu çizen analitik hesapları geliştirmişlerdir. Parametrik formda trochoidal ve eşit uzaklıklı eğrilerden, eşitlikleri türetilmiş eğrilerin ve sabit dönüş noktalarının eğrilikleri elde edilmiş, üretilen trochoidal eğrilerin (Şekil 2.1) tekil olmasından kaçınılarak şartlar tanımlanmış, üretilen eğrilerin süpürdüğü çalışma uzayı belirlenmiş, artan çaplı bir takımın uyguladığı Wankel motorunun göbek kısmının üretilmesi gerçekleştirilmiş ve vidalı rotorları olan root üfleyicisinin tasarımı yapılmıştır. Hesapların doğruluğunu destekleyerek bilgisayar programı yazılmıştır [1].



Şekil 2.1. Root üfleyicilerinin şeması [1]

Lin, Shih ve Lee' nin [2] "iki kademeli sikloid dişli redüktör tasarımı diş modifikasyonları" adlı çalışmada; sikloid dişli redüktörler, kompakt, yüksek oranlı ve düşük boşluklu bir hız düşürme cihazları olarak vurgulanmıştır. Makinelerde hareket ve tork iletmek için yaygın olarak kullanılan diş modifikasyonları ile yeni bir iki aşamalı tasarımı yapılmıştır (Şekil 2.2). Sikloidal hız düşürücülerin yapısı, grafikler yardımıyla tartışılmış ve analiz edilmiştir. Yeni sikloid dişli redüktörler, topolojik analiz ve yeni bir iki aşamalı sikloidal dişli aracılığıyla numaralandırılmış ve daha basit yapıya sahip bir redüktör önerilmiştir. Önerilen sikloid dişli redüktörün tasarımı, profil üretimi ve modifikasyonları da dahil olmak üzere gerçekleştirilmiş sonra kinematik hatalar diş temas analiziyle elde edilmiş ve farklı kombinasyonlardan kaynaklanan sonuçlar dişli profili değişiklikleri nicel olarak sunulmuştur. Analize dayalı olarak yeni bir mekanizmanın fizibilitesini doğrulamak için sikloidal dişlinin maketi yapılmıştır [2].

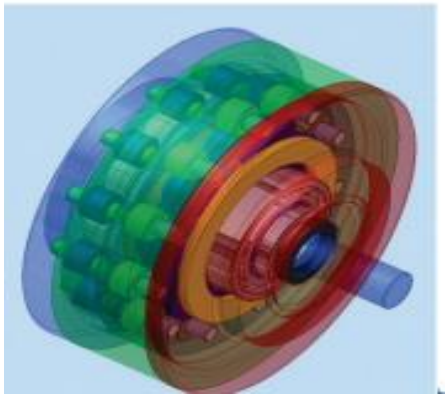


(a) (b)

Şekil 2.2. İki kademeli sikloidal hız düşürücünün tasarımı ve imalatı: (a) sikloid gövde, (b)sikloid disk[2]

Blagojević, Matejić, Ve Kostić' in [3] "iki aşamalı sikloidal hız düşürücünün dinamik davranışı ve yeni konseptinin tasarımı" adlı çalışmada; geleneksel sikloidal hız düşürücüler olağanüstü dinamik yapıya sahip olmasıyla tanıtılmıştır. Her aşamada yalnızca bir sikloid diskin kullanıldığı yeni bir kavram geliştirilmiş, iki aşamalı bir sikloidal hız düşürücüsünün (Şekil 2.3) dinamik davranışı analiz edilmiştir. Lagrange' ın yer değiştirme denklemleri, hem birinci hem de ikinci aşama için bağımsız dinamik modeller geliştirmek için kullanılmıştır. Sikloidin temasına etki eden normal bir kuvvet disk dişleri ve karşılık gelen dişli silindiri bir uyarma kuvveti olarak alınmıştır. Yeni tasarlanmış iki aşamalı sikloidal hız düşürücü için diferansiyel sistemleri, birinci ve ikinci aşama yer değiştirme denklemi olarak, Matlab – Simulink paket programı yardımıyla çözülmüştür. Elde edilen diyagramların kapsamlı bir analizi, birinci ve ikinci aşamanın elastik dinamik temas kuvvetlerinin belirli bir analojisini ortaya çıkarmıştır. Dinamik olarak ikinci aşamanın sikloid diski benzer şekilde davranmaktadır. Bu sikloid diskler karşılıklı olarak 180°'lik bir açı ile döndüklerinden,

sikloid disk yükü açısından, yeni bir tasarım konseptinin iki kademeli sikloidal hız düşürücüsünün, iyi bir dinamik denge ve kararlılık sergilendiği sonucuna varılmıştır [3].

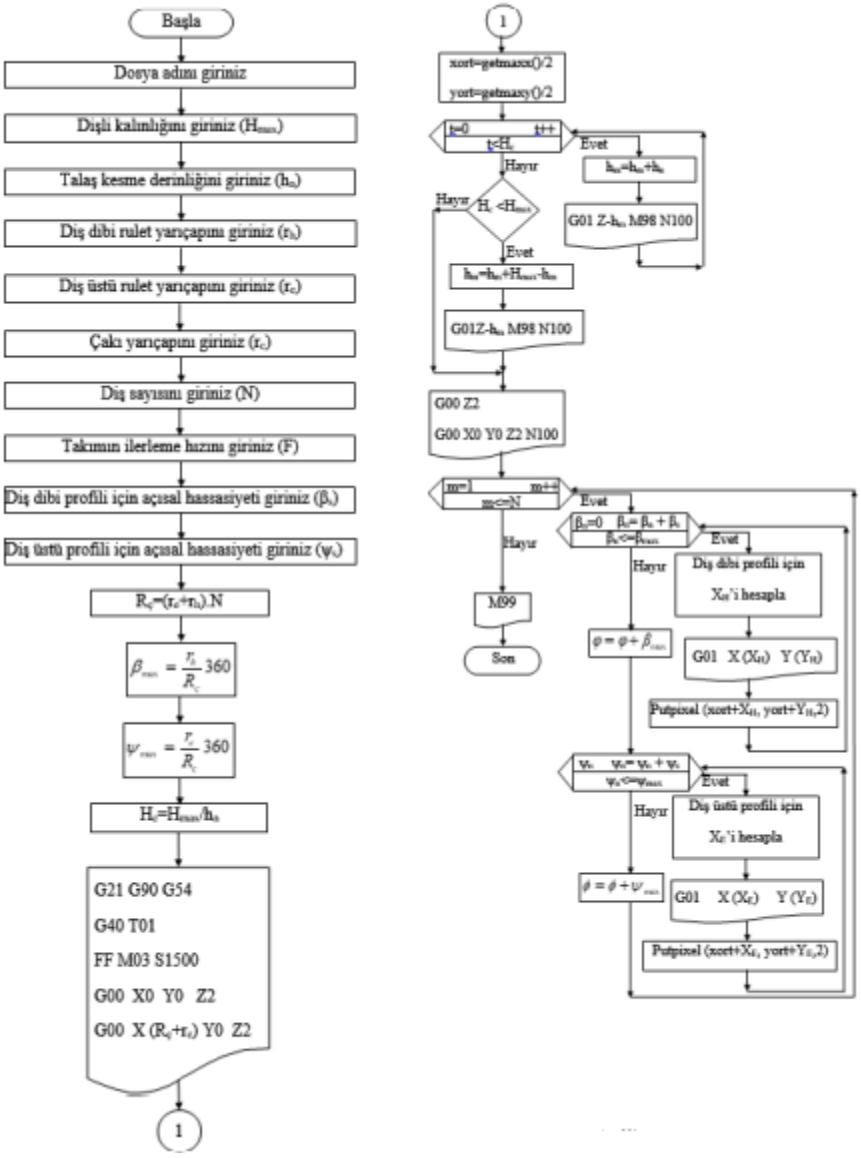


Şekil 2.3. İki aşamalı sikloidal hız düşürücünün yeni bir konsepti [3]

Maximov ve Hristov' un [4] "paralel eksenlere dönme ekleyerek hypocycloid yüzeylerin talaşlı işlenmesi bölüm 1: takım gövdesinin geometrisi" adlı çalışmada; paralel eksenlere dönme ilave ederek hypocycloid iç ve polihedral dış yüzeylerin talaşlı işlenmesinde kullanılan takım geometrisi sunulmuştur. Paralel eksenlere dönme ilave edilerek hypocycloid yüzeylerin talaşlı işlenmesinde, temel kesme açıları matematiksel olarak modellenmiştir. Bu yöntem torna tezgâhlarında ve dik işleme tezgâhlarında delme ve freze işleri için kullanılmaktadır. Bu yöntem, aynı geometrik parametrelere sahip dış ve iç hiposikloidal, polihedronlar işlenebilmekte olup, özellikle hiposikloidal bağlantıların işlenmesi için uygun hale getirmektedir [4].

Maximov ve Hristov' un [5] "paralel eksenlere dönme ekleyerek hypocycloid yüzeylerin talaşlı işlenmesi bölüm 2: metodun kinematiğine mümkün olan uygulama alanları" adlı çalışmada; paralel eksenlere dönme ilave ederek hypocycloid iç ve polihedral dış yüzeylerin talaşlı işlenmesinde kullanılan takım geometrisi sunulmuştur. Bu metot torna, freze matkap tezgâhları ve dikey işleme merkezlerinde kullanılarak bu tezgâhların imalat kapasitesini genişletmektedir. Paralel eksenler etrafında dönüşler ekleyerek hiposikloidal yüzeyleri işlerken, ana kesme açılarının matematiksel modelleri geliştirilmiştir. Elde edilen modeller, kesim için kullanışlı bir tasarımına izin vermektedir. Boşluk açıları kesme işlemi için özellikle önemli olduğundan etkili ana açıların minimum kabul edilebilir değerleri ayarlanırken dişler için statik ana boşluk açılarının değerleri belirlenmektedir [5].

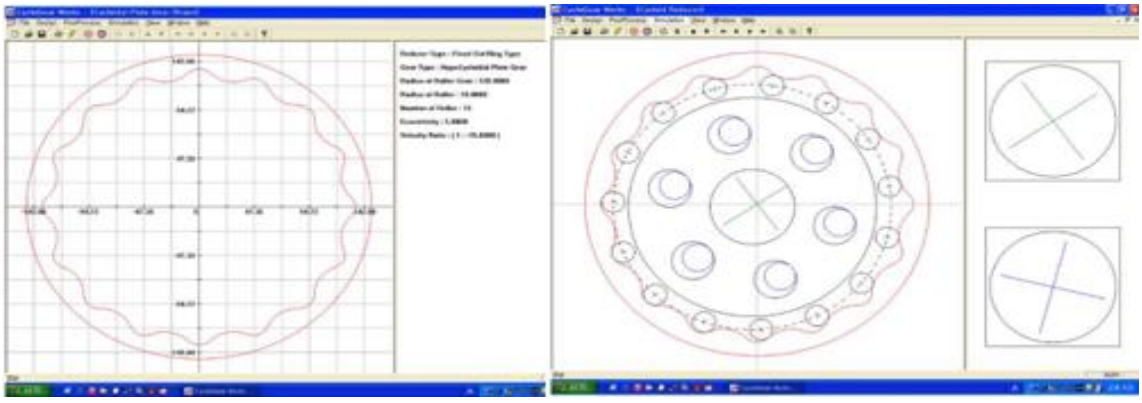
Özel, Ortaç ve Gürgenç' in [6] "yağ pompasında kullanılan sikloidal dişlilerin parmak freze ile CNC freze tezgâhlarında imalatının araştırılması" adlı çalışmada; hidrolik endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılan sikloidal dişli yağ pompalarındaki iç rotorun, geleneksel imalat yöntemlerindeki zorlukları ortadan kaldırmak için CNC freze tezgâhlarında imalatı amaçlanmıştır. Bunun için radyal kesme yöntemi belirlenmiş, sikloidal dişlileri işlemek için imalat denklemleri türetilmiştir. Bu dişlilerin CAM kodlarını elde etmek için bir C++ programı geliştirilmiştir. Programda otomatik CAM kodlarını oluşturma, G ve M kodları dikkate alınarak yapılmıştır (Şekil 2.4). CAM kodları ile Dyna 4M CNC freze tezgâhında çeşitli ölçülerde sikloidal dişliler imal edilmiştir. Bu yöntem ile imal edilen sikloidal dişlinin diş ölçüleri, elektronik bir kumpas ile ölçülmüş, sonra bu ölçüler ile bulunan matematiksel bağıntılar, hesaplanan diş ölçüleri bir tablo halinde karşılaştırılmıştır. Geliştirilen programla, standart ve standart olmayan sikloidal dişlilerin imal edilebileceği görülmüştür. Klasik yöntemlerde sadece standart olan sikloidal dişliler üretilebilmesine rağmen, sikloidal dişlileri imal etmek için klasik yöntemlerde kullanılan özel kesici, takım tezgâhları ve aparatlara gerek kalmayacağı öngörülmüştür. Sikloidal diş profillerinin kesilme hassasiyetinin 0,001 mm seviyesine kadar çıkabileceği, ancak bu durumda dişlinin imalat süresinin çok uzun olacağı beyan edilmiştir. Rulet çapının 2 mm den daha küçük olması durumunda bu tür sikloidal dişlilerin imal edilemeyeceği, dişliyi parmak frezeyle kesmenin daha uzun sürede olacağı ve kremayer kesiciyle kesmenin ise daha kısa sürede gerçekleşeceği tespit edilmiştir. Bulunan sonuçlara göre bu dişlilerin CNC freze tezgâhlarında imal edilebilecekleri öngörülmüş ve bu tezgâhlarda sikloidal dişlilerin imal edilebilirliklerinin değerlendirilmesi yapılmıştır [6].



Şekil 2.4. Cam kodlarını türetmek için kullanılan algoritma [6]

Shin ve Kwon' un [7] "sikloid redüktörlerde lob profil kullanılarak anlık hız merkezi" adlı çalışmada; sikloid hız düşürücüler, makinenin dönme hızını düzenleyen cihazlardan biri olduğunu sunmaktadır. Yüksek küçültme oranı, daha yüksek doğruluk, aktarım oranının daha kolay ayarlanması gibi avantajlara ve diğer tüm redüktör türlerinden daha küçük çalışma alanına sahiptir olduğu görülmüştür. Çalışma sikloid redüktörün ana parçası olan sikloid plaka dişlisinin lob profil tasarımına yönelik yaklaşım ve genel temas mekanizmasındaki anlık hız merkezi prensibini vermektedir. Herhangi bir zamanda tüm loblardaki silindirlerle iç içe geçtiği için sikloid redüktör kendine özgü lob profiline sahip olduğu görülmüştür. Hata verilmemesi için merkez mesafesi "E" her durumda "R/N" oranından az olması gerekmektedir. Elde edilen lob profil denklemi halka olup olmadığına

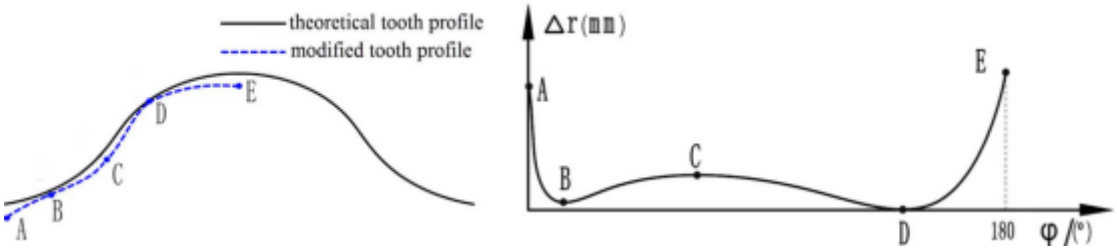
bakılmaksızın tamamen aynı formda ve geliştirilen tasarım metodolojisi sikloid hız düşürücülere başarıyla uygulanmıştır. Çalışmada sikloid redüktörlerin dört tipi ele alınmış olup bunlar; sabit halka dişli tipi episikloid redüktörler, dönen halka dişli tipi episikloid redüktör, sabit halka dişli tip hiposikloid redüktör ve dönen halka dişli tip hiposikloid redüktörlerdir. Tasarım örnekleri dört tip sikloid redüktör için çalışmayı simüle etmek için C++ dilinde geliştirilmiş, bilgisayar destekli bir program kullanılarak (Şekil 2.5) bu yaklaşımın uygulanabilirliği sağlanmıştır [7].



(a) (b)

Şekil 2.5. Sabit bir halka dişli tipi hiposikloid redüktör için tasarım örneği: (a) lob profili, (b) simülasyon ekranı [7]

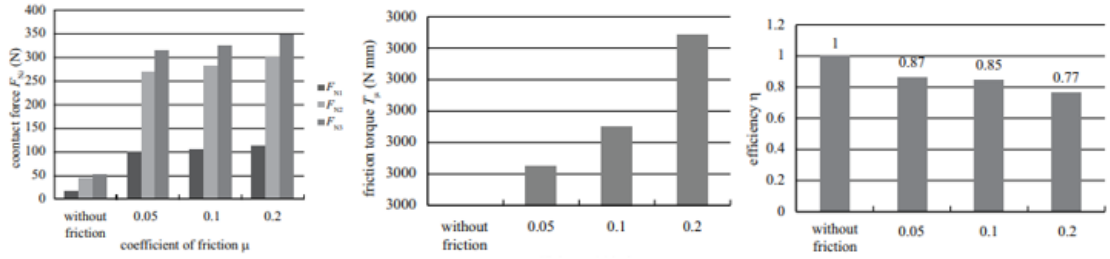
Rena, Maoa, Guo ve Guo' nun [8] "sikloid hız sürücülerinde, diş modifikasyonu ve dinamik performans" adlı tez çalışmada; yeni bir sikloid diş modifikasyonu yöntemi sunulmuştur. Çalışmada farklı modifikasyon hedeflerine uyum sağlamak için boşluk eğrileri tasarlanmış ve yeni modifikasyon boşluk eğrisinin prosedürü için 5 kilit noktanın konumu geliştirilmiştir (Şekil 2.6). Redüktörün kurulumu için döngüsel hızın, multi DOF doğrusal olmayan dinamik modeli ardından sikloid disk, dönme yer değiştirmesi ve dönme hızı zamana karşı farklı modifikasyon izni, Runge - Kutta sayısal yöntemiyle çözülmüştür. Sonuçlar bu yöntemin sikloidal hız düşürücünün taşıma kapasitesini iyileştirebileceğini ve gürültüyü ve titreşimi ortadan kaldırın ve iletim doğrulunun geliştirildiğini göstermektedir. İki sayısal deney ve dinamik simülasyonun karşılaştırılması ile sonuçlar, yeni yöntemin sikloidal hız düşürücünün taşıma kapasitesini iyileştirebileceğini, iletim doğruluğunu geliştirebileceğini ve sikloidal hız düşürücünün titreşimini ve gürültüsünü çıkarabileceğini göstermiştir [8]



(a) (b)

Şekil 2.6. Kilit noktaların 5 adet konumu: (a) diş profilindeki 5 temel noktanın konum grafiği, (b) Modifikasyon boşluk eğrisindeki 5 temel noktanın konum grafiği [8]

Blagojevi, Kocic, Marjanovic, Stojanovic, Dordevic, Ivanovic, Marjanovic' in [9] "sürtünmenin sikloid hız düşürücü verimliliği üzerindeki etkisi" adlı çalışmada; sikloid hız düşürücülerin yeni nesil mekanik dişliler olduğuna vurgu yapılmıştır. Sikloidal hız düşürücüler, iyi performansları nedeniyle modern mühendislikte giderek daha fazla kullanıldığı ve güç aktarımındaki güç kayıplarının ana nedenlerinden biri olarak sikloidal hız düşürücülerin hareketli elemanları arasındaki tüm temas noktalarında sürtünme olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada sikloid disk ve yatak makaralarının temas sürtünmesi dikkate alınırken, sikloid disk ve çıkış makaralarının temasındaki ve sikloid disk ve makaralı rulmanların temasındaki sürtünme ihmal edildiği vurgusuna dikkat çekilmiştir. Temas kuvvetinin dağılımına sürtünmenin etkisi, sürtünme momenti değerinin yanı sıra verimi de analiz edip, temas kuvveti ve sürtünme torku değerlerini hesaplamak için iki analitik model sunmaktadır. İkinci model sürtünme olgusunu hesaba katarak birinci modele karşı atıfta olup, sonuçların sürtünmenin normal kuvvet dağılımını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Elde edilen verimlilik değerleri, literatürdeki değerlere ve dünyanın en ünlü sikloidal hız düşürücü üreticisi olan Japon şirketi Sumitomo' nun üretici kataloglarındaki değerlerine oldukça uygun olduğu görülüp, sürtünmenin artması temas kuvvetlerini ürettiği ve sürtünme torku da artarken verimin düştüğü gözlemlenmiştir (Şekil 2.7) [9].



(a) (b) (c)

Şekil 2.7. Temas kuvvetinin, sürtünme torkuna ve verimliliğin, sürtünme katsayısına bağımlılığını gösteren grafikler [9]

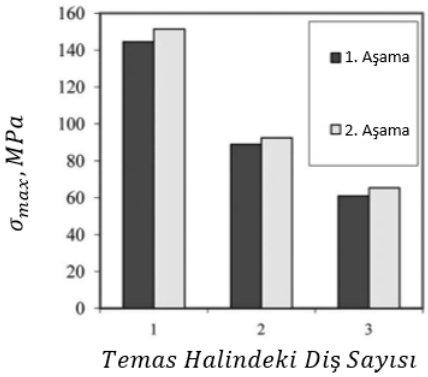
Blagojevic, Marjanovic, Djordjevic, Stojanovic, Disic' in [10] "iki kademeli sikloidal hız düşürücüsünde yeni bir tasarım" adlı çalışmada; iki aşamalı bir sikloidal hız düşürücünün yeni bir tasarımı sunulmaktadır. Çalışmada her aşama için yalnızca bir sikloid diskin kullanıldığı, iki aşamalı sikloidal hız düşürücünün yeni bir konseptini sunmaktadır. Birinci aşamadaki sikloid diskler için gerilme durumunun sonuçları kesinlikle vurgulanmalıdır. Redüktörün ilgili elemanları üzerindeki tork ifadelerinin yanı sıra sikloid disk dişleri üzerindeki temas kuvvetlerinin hesaplanması için ifadeler verilmiştir. Mekanik Tasarım Dergisi, redüktörün hayati unsurlarının (sikloid disk, merkezi disk, birinci kademenin sabit çember dişlisi, ikinci kademenin döner çember dişlisi ve eksantrik) stres durumunun sayısal analizi gerçekleştirip, gerinim ölçer tekniği kullanılarak birinci aşama sikloid diskin gerilim durumunun deneysel analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak, redüktörün tüm hayati elemanlarının eşit şekilde yüklendiği ve gerilme aralığının beklenen ömrü boyunca normal çalışma sağladığı sonucuna varıldığı ve yeni tasarlanmış iki kademeli sikloid hız düşürücü, her kademe için bir sikloid diske, toplamda iki sikloid diske sahip olduğu için oldukça kompakt olduğu görülmüştür. Sikloidal hız düşürücü elemanların gerilme durumu analizi, en kritik eşlenik dişli hareketi durumları için (temas halindeki bir, iki veya üç çift diş) sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak da gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8 - Şekil 2.9). Sikloid diskler için gerilme durumunun deneysel analizi gerinim ölçer yöntemi kullanılarak gerçekleştirilip (Şekil 2.10), en kritik durum için bile (bir çift dişin temas halinde olması) sikloid diskler üzerindeki gerilmelerin izin verilen sınırlar içinde olduğu ve redüktörün beklenen ömrü boyunca normal çalışmasını sağladığı sonucuna varılmıştır [10].



Şekil 2.8. Birinci aşama sikloid disk üzerindeki, Von-Mises stres dağılımı - temas halinde olan üç çift dişli ve merkezi disk üstündeki yükler [10]

	Von-Mises gerilimi (MPa)		
eleman	Bir çift diş (silindir) temas halinde	Temas halinde iki çift diş (silindir)	Üç çift diş (silindir) temas halinde
Sikloid disk—1. aşama	144,5	89	60,9
Sikloid disk—2. aşama	151,4	92,4	65,3
Merkezi disk	211	113	74,4
Birinci aşamanın sabit çember dişlisi	122	81,2	58,8
İkinci aşamanın dönebilen çember dişlisi	147	75.5	54.7
Eksantrik		129	

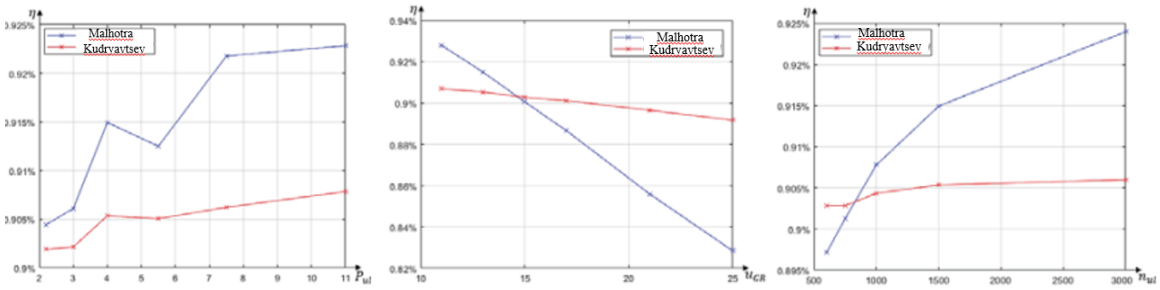
Şekil 2.9. İki kademeli sikloidal hız düşürücünün elemanları üzerindeki Von-Mises gerilim değerleri [10]



Şekil 2.10. Sikloid diskler üzerindeki en büyük Von-Mises gerilim değerleri [10]

Vasić, Matejić ve Blagojević' in [11] "sikloid tahrik verimliliğinin karşılaştırmalı hesaplaması" adlı çalışmada; şimdiye kadar en çok tanınan ve kabul edilen iki teorik modele (Malhotra modeli ve Kudryavcev modeli) dayalı olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır. En bilinen iki yöntem olan, Kudryavcev ve Malhotra için Matlab yazılımında hesaplamalı bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları her iki model için de benzer grafik şekillerinin elde edildiğini göstermektedir. Sapmalar

aralığı, %1,56 ile %6,34 arasında olduğu görülmüştür. Kudryavcev modelinin avantajı basitlik olmasına rağmen bu model ne çıkış silindirleri ve halka dişli silindirleri üzerindeki yükü, ne de çıkış silindirleri ile sikloid dişlideki delikler ve yuvarlanma arasındaki yuvarlanma sürtünmesinin hesaba katılmadığı görülmüştür. Ayrıca tüm silindirlerin eşit şekilde yüklendiğini varsayılır. Malhotra' ya göre dişli kutusunda boşluk olmadığında, her iki dişli de merkezi dişlinin silindirlerinin yarısı ve yük aktarma işlemine katılan çıkış silindirlerinin yarısı ile temas halindedir. Gerçek çalışma koşullarında, üretim nedeniyle daha kolay montaj ve de montaj, daha iyi yağlama sebebiyle silindirlerin yarısından daha azı yüklenir. Bu nedenle boşluğun boyutu, sikloid dişli ile temas halinde olan silindir sayısını doğrudan etkiler. Boşluk arttıkça yüklü silindir sayısı ve verim düşer. Bu nedenle Malhotra modeli, Kudryavcev modeline nazaran çok daha karmaşık olmasına rağmen daha doğru sonuçlar (Şekil 2.11) vermiştir [11].



(a) (b) (c)

Şekil 2.11. Malhotra ve Kudryavcev modeli için verimlilik sonuçları (mavi grafik Malhotra modeline ve kırmızı grafik Kudryavcev modeline ait) : (a) giriş gücü değişimi, (b) iletim oranı değişimi, (c) giriş RPM değişimi [11]

Yang ve Liu' nun [12] "Bir halka plakalı sikloid redüktörün tutarlılık analizine dayalı gürültü kaynağı tanımlaması" adlı çalışmada; koherens analizine dayalı olarak titreşim ve gürültünün özellikleri elde edilmiş ve gürültü kaynakları belirlenmiştir. Redüktör prototipinin titreşim ve gürültü testleri, head akustik çok kanallı gürültü test ve analiz sistemi kullanılarak tamamlanmıştır (Şekil 2.12). Halka plaka tipi bir sikloid hız düşürücü, düşük hacmi, kompaktlığı, performansı ve yüksek güvenilirliği nedeniyle en önemli redüktör tiplerinden biri olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar daha fazla gürültü araştırması ve halka plaka tipi sikloid redüktörün kontrolü için temeller sağlamış olup redüktörün gürültüsünü azaltmak için halka plakaların yapısı veya düzeneğin dengesizliği dikkate alınabileceğine dikkat çekmiştir [12].



Şekil 2.12. Titreşim test düzeneği [12]

Lee, Hong ve Oh' un [13] "ayaklı robotlar için hafif ve yüksek verimli kompakt sikloidal redüktör geliştirilmesi" adlı çalışmada; ayaklı robotlar için redüktör içindeki güç aktarma işlemi sırasında temasın meydana geldiği tüm parçalarda, iğneli makaralı rulmanlar kullanan, serbest makaralar kullanan bir sikloidal redüktöre kıyasla, verimliliği büyük ölçüde artıran, yüksek verimli kompakt bir dairesel redüktör geliştirilmiştir. Çalışmada yükü dağıtan ve sikloidal redüktörün bacaklı robotun hareketi sırasında meydana gelebilecek darbelere sağlam bir şekilde yanıt vermesini sağlayan bir alt taşıyıcı yapı önerilip, çoğu çalışma aralığında %90 verimlilikte, 766 gr ağırlığında ve 155 N.m' nin üzerinde torka dayanabilen sikloid redüktör tasarlanıp (Şekil 2.13) üretilmiştir. Motorla birleştirilmiş sikloid redüktör modülü, 72 Hz' lik bir tork kontrol bant genişliği gösterdiği için çevik hareketlere sahip bacaklı robotlarda kullanılabildiği vurgulanmıştır [13].



Şekil 2.13. Redüktörün tasarımı [13]

Güneş ve Dilipak' ın [14] "sürtünmenin sikloid dişli kutusunun verimi üzerindeki etkisinin hareket analizi ile incelenmesi" adlı çalışmada; sikloid dişli kutusunun hareket analizi yardımıyla verimi vurgulanmıştır. Sikloid dişli kutuları, istenilen hız ve moment değerlerini elde etmek için geliştirilmiş, hassas hareket iletimi ve yüksek çevrim oranlarına sahip mekanizmalardır. Dişli kutusunun temel bileşenleri giriş mili, sikloid dişliler, gövde, gövde

pimleri ve çıkış milidir. Çalışma prensibinden dolayı bu parçalar birbirleri ile sürekli temas halindedir ve bu parçalar arasındaki sürtünme sebebiyle güç kayıpları meydana gelmektedir. Bu çalışmada sikloid dişli kutularındaki sızdırmazlık elemanları, rulman, yağlama vb. faktörlerden kaynaklanan nispeten küçük sürtünmeler ihmal edilmiştir. Bunun yanı sıra temas bölgelerindeki büyük sürtünmelerin oluşturduğu ve dişli kutusunun veriminde önemli rol oynayan kayıpların verim üzerimdeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, belirlenen tasarım parametrelerine göre bir sikloid dişli kutusunun boyutlandırma hesapları yapılmıştır. Daha sonra bu hesaplamalara göre CAD yazılımında bir dişli kutusu tasarlanmıştır (Şekil 2.14). Tasarlanan dişli kutusunda sürtünmenin etkisi, dişli kutusunun verimindeki değişimler üzerinden incelenmiş ve belirlenen farklı sürtünme katsayıları için analitik hesaplamalar yapılmıştır (Çizelge 2.1). Yine belirlenen sürtünme katsayıları kullanılarak dişli kutusunun Altair Inspire ve Solidedge tasarım programlarının hareket analizi modülleri ile dişli kutusunun hareket analizleri yapılmıştır (Şekil 2.15). Hesaplamalar ve analiz sonuçlarında temas bölgelerinde meydana gelen kayıplar, oluşan tepki kuvvetleri çıktı olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçların paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar aynı zamanda sürtünmenin kuvvet dağılımını etkilediğini ve sürtünme katsayısındaki artışın verimde önemli bir düşüşe sebep olduğunu göstermiştir [14].

SİKLOİD DİŞLİ KUTUSU HESAPLAMA PROGRAMI

GİRDİLER

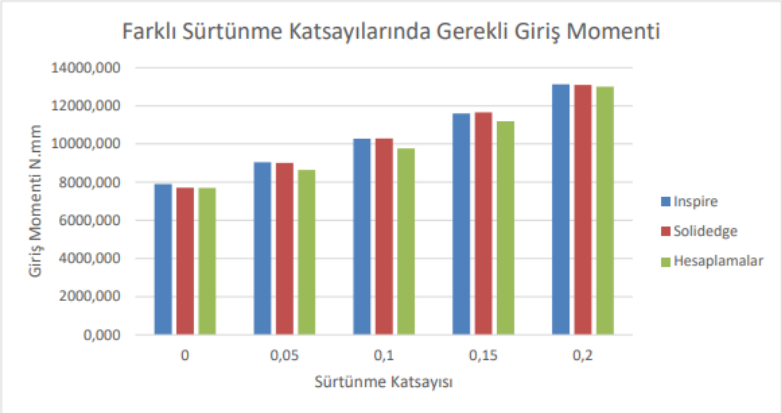
Tanım	Sembol	Değer
Modül	m	9
Çevrim Oranı	i	13
Profil Düzeltme Faktörü	x	0,333
Profil Şekillendirme Yarıçap Katsayısı	rc*	1
Sikloid Dişli Sayısı	p	2
Sikloid Dişli Kalınlığı (mm)	B	12
Çıkış Pimi Sayısı	u	6
Çıkış Pimi Yerleşim Çapı (mm)	dc	65
Çıkış Pimi Çapı (mm)	dp	15
Çıkış Momenti (Nm)	Tb	100
Giriş Hızı (rpm)	ωg	130
Sürtünme Katsayısı	μ	0,2

ÇIKTILAR

Tanım	Sembol	Değer
Sikloid Dişli Diş Sayı	z1	13
Gövdedeki Pim Sayısı	z2	14
Adım Çemberi (mm)	d1	117
Teorik Diş Dibi Çapı (mm)	dtf1	120,00
Teorik Diş Üstü Çapı (mm)	dta1	132,00
Gerçek Diş Dibi Çapı (mm)	df1	102,00
Gerçek Diş Üstü Çapı (mm)	da1	114,00
Sikloid Dişli Temel Dairesi (mm)	db1	78,0
Diş Yüksekliği (mm)	h1	6,00
Gövde Pimlerinin Adım Dairesi (mm)	d2	126
Gövde Pimlerinin Çapı (mm)	dc	18
Pimlerin Diş Üstü Çapı (mm)	da2	108
Gövde Pimleri Temel Dairesi (mm)	db2	42,0
Eksantriklik (mm)	e	3,00
Gövde Pimi Kuvvet/Kuvvet Kolu Oranı	km	31.558
Çıkış Pimi Kuvvet/Kuvvet Kolu Oranı	kc	17.025
Sikloid Dişli Giriş Momenti (Nm)	Tg	13
Sikloid Dişli Momenti (Nm)	Tm	91,03
Çıkış Hızı (rpm)	ωc	10
Giriş Gücü (W)	Pg	177,01
Çıkış Gücü (W)	Pc	104,71
Dişli Kutusu Verimi (%)	n	59,2

Tanım	Pim Açısı (°)	Moment Kolu (mm)	Sürtünme Moment Kolu (mm)	Tepki Kuvveti (N)	Sürtünme Kuvveti (N)
Gövde Pimi 5	82,28	5,24	56,73	89,21	17,84
Gövde Pimi 6	66,71	15,42	54,53	262,53	52,51
Gövde Pimi 7	50,69	24,71	50,44	420,69	84,14
Gövde Pimi 8	33,89	32,45	75,72	552,47	110,49
Gövde Pimi 9	14,49	37,76	40	642,87	128,57
Gövde Pimi 10	-10,47	38,35	38,03	652,91	130,58
Gövde Pimi 11	-54,18	22,83	46,59	388,68	77,74
Çıkış Pimi 1	30	16,25	-17,65	512,82	102.564
Çıkış Pimi 2	90	32,5	10,5	1025,64	205.128
Çıkış Pimi 3	150	16,25	38,65	512,82	102.564

Şekil 2.14. MS Excel'de oluşturulan hesaplama programının genel görünümü [14]

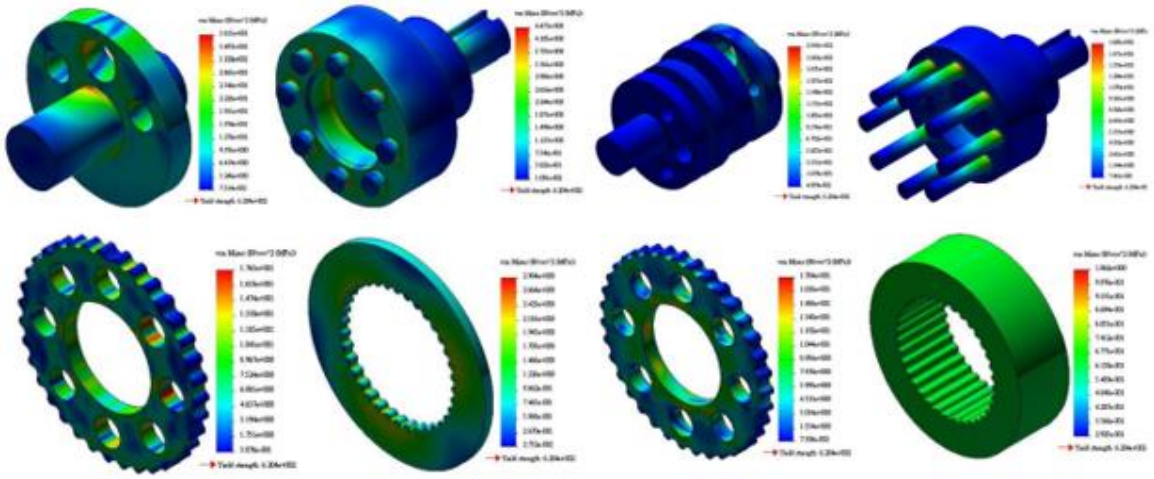


Şekil 2.15. Gerekli giriş momenti değerlerinin kıyaslanması [14]

Çizelge 2.1. Verim değerlerinin kıyaslanması [14]

Sürtünme Katsayısı	0	0,05	0,1	0,15	0,2
Verim- Hesaplanan (%)	100	89,1	78,7	68,7	59,2
Verim- Solidedge (%)	99,7	85,4	74,8	66,0	58,7
Verim- Inspire (%)	97,3	85,0	74,9	66,3	58,6

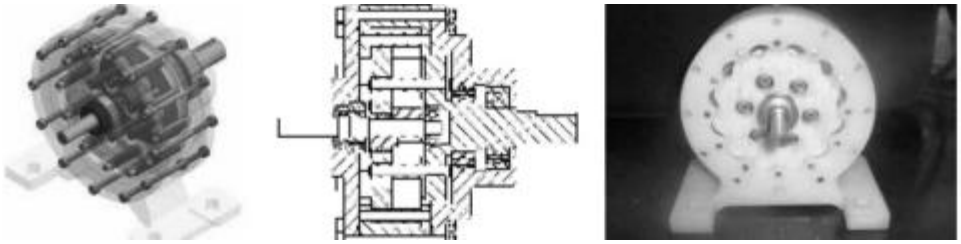
Hsieh ve Alfonso' nun [15] "sikloidal hız düşürücülerin performans tahmin yöntemi" adlı çalışmada; tasarım parametrelerinin, redüktör performansı üzerindeki etkisini vurgulanmıştır. Çalışmada, çeşitli tasarımların performans farklılıklarını belirlemek için sadece kararlılığı tahmin etmeyen aynı zamanda güç kaybını da tahmin eden bir tahmin yöntemi önermektedir. İlk olarak, tahmin yöntemini açıklamak ve verilerin hız düşürücü dinamik analizinden (Şekil 2.16) elde edildiği istatistiksel matematik modelleri oluşturmak için çıkış silindirlerinin farklı sayı ve hatve yarıçaplarını dikkate alan birkaç tasarım durumu kullanıldığı görülmüştür. Sonuçlar, çıkış silindiri sayısının stabilite üzerindeki etkisinin, çıkış silindirlerinin hatve yarıçapından daha büyük olduğunu göstermiş olup çıkış silindirlerinin sayısının artırılması titreşim riskini artırabilse de hız düşürücünün güç kaybı azaltılabildiğini belirtmektedir. Ayrıca önerilen tahmin yöntemi, pimsiz tasarımların genel performanslarını nasıl etkilediğini araştırmak için çoklu sikloidal dişlilere sahip redüktörlere de uygulanabilmektedir. Sikloidal dişli sayısı ikiden fazla olduğunda kararlılığın ve verimliliğin önemli ölçüde azaldığını ve böyle bir durumda ikili sikloidal dişli tasarımının en iyi seçenek olduğunu doğrulanmıştır [15].



(a) (b)

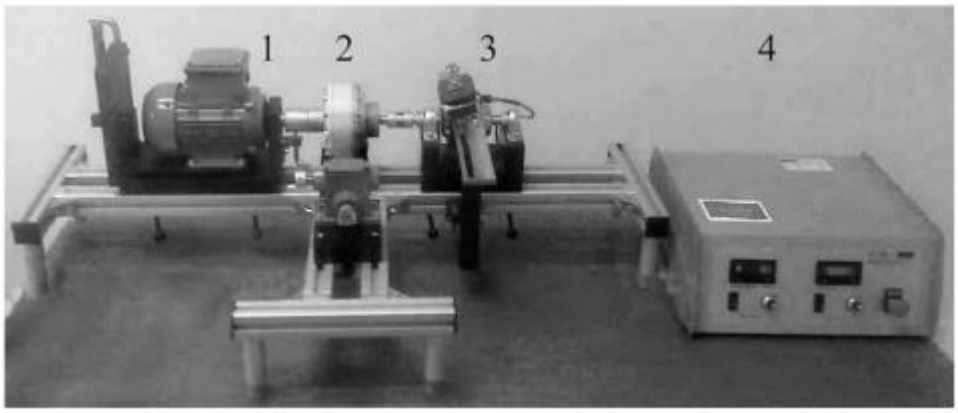
Şekil 2.16. Sonlu elemanlar analizi: (a) tek sikloidal dişli için sonlu elemanlar analizi, (b) dört sikloidal dişli için sonlu elemanlar analizi [15]

Blagojević, Matejić, Kostić, Petrović, Marjanović, ve Stojanović' in [16] "plastik sikloid redüktör veriminin kuru şartlar altında, teorik ve deneysel testi" adlı çalışmada; plastik sikloid redüktör tasarımı, üretimi ve performans testleri sayesinde avantaj ve dezavantajları vurgulanmıştır. Çalışmada, çelik dışında üretimleri henüz tam olarak araştırılmadığı gözlemlenip, bu doğrultuda tek kademeli bir sikloid redüktör tasarlanmış (Şekil 2.17) ve ağırlıklı olarak plastik bileşenlerden üretilip teorik verimlilik belirlenmiş ve deneysel olarak test edilmiştir (Şekil 2.18). Çalışma sonucunda, plastik parçalardan oluşan sikloid redüktörlerin kuru çalışma koşullarında çok yüksek verime sahip olabileceği sonucuna varılmıştır. Bulunan tek dezavantaj, dinamik kararlılığının yalnızca küçük giriş açısal hızlarıyla mümkün olup, yağlama, havalandırma veya soğutma devreye girmesi durumunda bu sorunun üstesinden gelinebileceği öngörüldü. Gelecekteki araştırmalar, yuvarlanma sürtünmesinin araştırılmasına ve verimlilik için hesaplama modeline uygulanmasına yönelik olabileceği dikkat çekilmiştir [16].



(a) (b) (c)

Şekil 2.17. Test edilen sikloid redüktör: (a) 3D model, (b) kesit, (c) üretilen redüktör [16]



Şekil 2.18. Analog kuvvet ölçümü: (1) tork ölçümlü elektrik motoru, (2) plastik sikloid redüktör, (3) tork ölçümlü manyetik fren, (4) güç kaynağı [16]

2.2. Literatür Araştırmalarının Değerlendirilmesi

Sikloid hız düşürücülerin; yoğun tasarım aşaması içeren, yüksek verimlik değerlerine ulaşan, düşük boşluklu çalışması sayesinde günümüzde ve gelecek mekanik sistemlerde yaygın tercih edilen redüktör tipleri arasında yer alacağı yapılan çalışmalar elde edilen ilk bulgu olarak öne çıkmıştır. Yağ pompalarından robotlara kadar endüstrinin hassasiyet, düşük hacim ve yüksek tork gerektiren alanlarında kendini kanıtlamış olan sikloid hız düşürücüler, episikloid ve hiposikloid eğrilerden oluşan disklerin imalatı sayesinde de titreşimsiz ve gürültüsüz bir çalışma imkânı sunmaktadır. Tek kademeli diskten başlayıp, dört kademeli diske kadar çıkabilen sikloid hız düşürücü tiplerinin tasarımı ve üretimi üzerine çalışmaların hali hazırda sürdüğü görülmektedir.

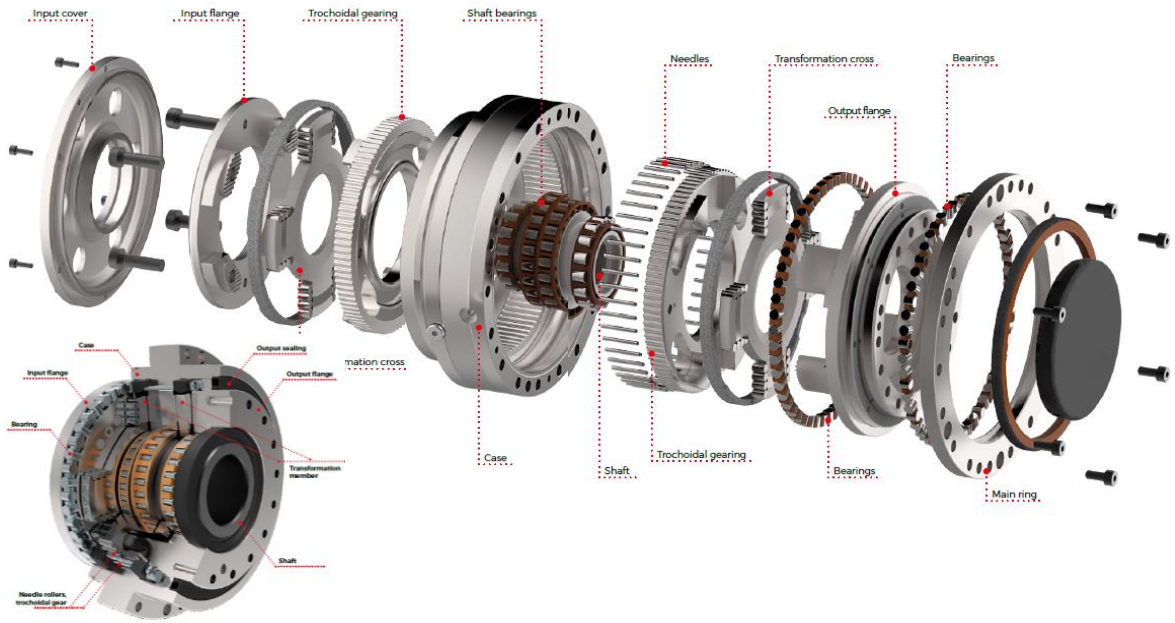
Bu çalışma ile sikloid dişlinin ve hız düşürücünün ön tasarımı, 3D yazıcıdan ön imalatı, 2 boyutlu sikloid dişlinin Excel ortamında hesaplanması ve çizim ara yüzünün geliştirilmesi, sikloid hız düşürücünün seri imalatına esas olacak 3 boyutlu tasarımı ve sikloid redüktörün dayanım açısından en riskli parçası olan çıkış mili tahrik piminin çap değişimine dayalı

parametrik redüktör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Literatür çalışmalarında, bu tez kapsamında yer alan aşamaların ayrı ayrı ulusal düzeyde ilk kez akademik düzeyde dikkate alındığı tespit edilmiştir.

3. SİKLOİD HIZ DÜŞÜRÜCÜLER

Sikloid hız düşürücüler, 1922 yılında Münich' deki Deckel firmasında bir mühendis olarak çalışan Lorenz Braren tarafından icat edilmiştir [17]. Deckel firması buluştan esinlenerek ilk kamera diyaframını yapmıştır [17]. Lorenz Braren bulduğu buluşu geliştirilerek Cyclo Getribebau firmasını kurmuştur [17]. Bu yeni redüktörün adına, Yunanca daire anlamına gelen κύκλος / Kyklos kelimesinden türetilen sikloid denilmiştir. Bugün cyclo veya sikloid denildiğinde akla sikloid diskli eksantrik hız düşürücü gelmektedir [17].

Robot kol uygulamalarında büyük tork değerleri ve hassasiyet söz konusudur. Klasik redüktörlerde, ihtiyaç duyulan tork çıkışına sahip redüktörler ya çok ağır ya da boşluk değerleri çok yüksektir. Bu sebeplerden ötürü robot kol uygulamasında, sikloid yapıda redüktörler kullanılmaktadır (Şekil 3.1 - Şekil 3.2). Sikloid hız düşürüler, yapıları itibarıyla boşluksuz olarak büyük tork değerleri aktarabilmektedir. Yüksek ağırlık / dayanım oranlarına sahip ve düşük iç atalete sahiptirler [17].

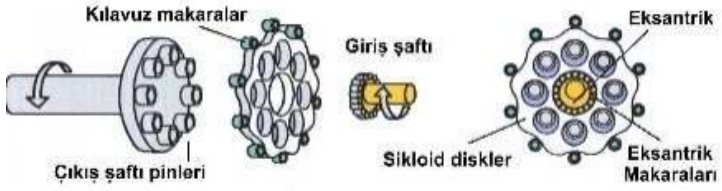


Şekil 3.1. SPINEA redüktör iç yapısı ve kesit görünümü [18]

Temel olarak, sikloid hız düşürücülerin prensibi, bir eksantrik tarafından tahrik edilen bir bileziğin iç yüzeyinde yuvarlanan bir diski içerir. Eksantrik mil tarafından tahrik edilen bu disk, eksantriğin dönüş yönünün tersi yönde daha düşük bir hızda döner. Uygulamada diskin dış hattı sikloidal eğriyi şekillendirmektedir. Eksantrik ile disk arasında makaralı yatak

mevcuttur. Dış bileziğin iç yüzeyine dairesel bir hat boyunca makaralar yerleştirilmiştir (Şekil 3.2). Makaralı yatakların kullanımı nedeniyle temas eden hareketli yüzeyler arasında kaymadan çok yuvarlanma mevcuttur. Sürtünme kayıpları oldukça azdır ve sikloid hız düşürücülerin verimi %95 civarındadır [17].

Konvansiyonel redüktörlerde kademeye bağlı olmakla birlikte ancak bir veya birkaç diş birbiriyle eş zamanlı temas halindedir. Moment, temas eden dişler üzerinden aktarılır. Sikloid diskinin büyük bölümü aynı anda dış bilezik makaralarına basan ve çıkış şaftına bağlı makaralarının tümü, sikloid diske aynı anda temas eden sikloid hız düşürücüler, nominal momentlerinin %500'ü kadar şok yüklemeyi hasarsız kaldırabilirler. Yapısı gereği sikloid hız düşürücüler için 20 yılı aşan problemsiz çalışma ömrü olağandır. Konvansiyonel redüktörlere göre oldukça kompakt bir yapıda olan sikloid hız düşürücüler, tek kademede 6:1 den 119:1'e, iki kademede de 7569:1'e kadar çevrim oranı sağlarlar. Hareketli yüzeyleri arasında yuvarlanma teması mevcut olduğu için sikloid hız düşürücülerin gürültü seviyesi oldukça düşüktür [17].

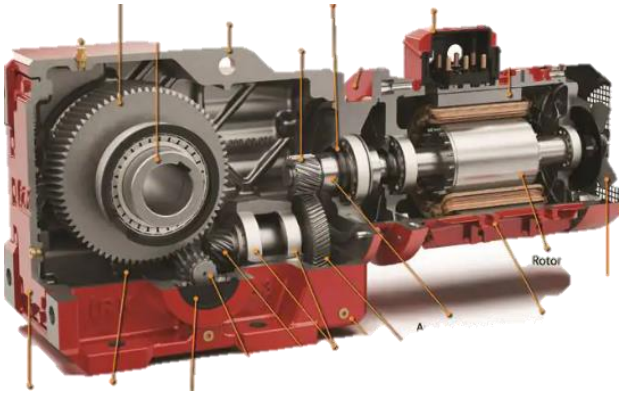


Şekil 3.2. Sikloid redüktörün ana kompanentleri [17]

Sikloid hız düşücüler redüktör sınıfında yer almaktadır. Sikloid disk yapısı sayesinde eksenel dönme hareketi yapan sikloid hız düşürücüler, sıfır boşluklu diş yapısı ile kullanıcıya boşluksuz bir işletim yapısı sunmaktadır.

3.1. Redüktörün Tanımı

Redüktör, bir dönme hareketinin devir-tork oranını dişliler yardımıyla değiştiren sistemdir. Yapısal bakımdan redüktörler gövde içine yerleştirilmiş dişli çarklar, miller, yataklar gibi parçalardan oluşan sistemlerdir. Diğer bir tanımı, elektrik motorlarının yüksek dönüş hızlarını makineler için gerekli olan dönüş hızlarına düşürmek veya iş görme gücünü yakalamak için tasarlanan (Şekil 3.3) kapalı dişli düzenekleridir [19].



Şekil 3.3. Redüktör iç yapısı [20]

3.2. Redüktör Tipleri

Günümüzde redüktörler çeşitli firmalar tarafından standart boyutlarda üretilerek piyasaya sürülmektedir. Redüktör tiplerinin seçiminde; tork, çevrim oranı, verim, boyut ve ağırlık gibi faktörleri göz önünde tutmak gerekir [19].

Bazı redüktör tiplerinin adlandırılmasına dair örnekler aşağıdaki gibidir;

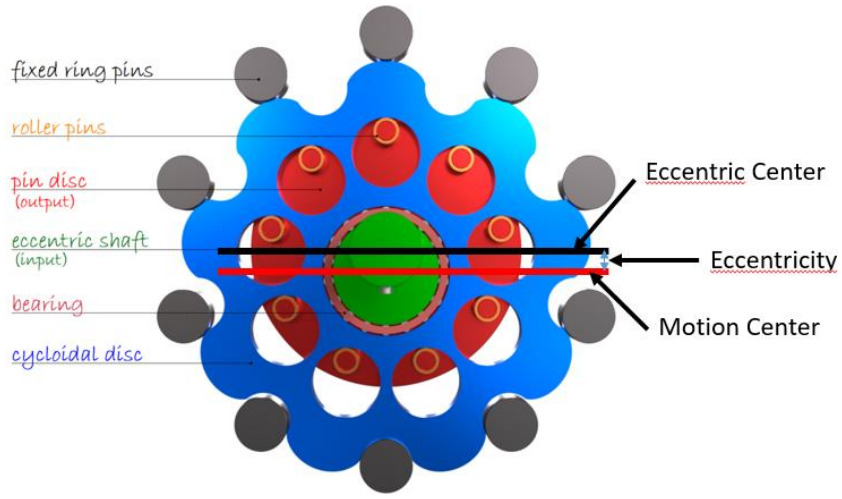
- Düz Dişli Redüktör
- Helisel Dişli Redüktör
- Planet Dişli Redüktör
- Harmonik Dişli Redüktör
- Kayış Kasnak Redüktör
- Konik Dişli Redüktör
- Sonsuz Dişli Redüktör
- Sikloid Dişli Hız Düşürücüler

3.3. Sikloid Redüktör Ana Elemanları ve Çalışma Prensibi

Sikloid hız düşürücülerin ana yapıları; eksantrik yataklı giriş mili, çıkış mili, sikloid rotor/disk, redüktör gövdesi, pimler ve yuvarlanma makaralarından oluşmaktadır (Şekil 3.4). Bu elemanlar bir sikloid hız düşürücüleri tanımlamak için gerekli en temel elemanlardır. Ortada bulunan eksantrik kam ok yönünde çevrildiğinde, sikloid diskleri, disklerin üzerinde merkezdeki büyük daireler çevresince döndürür. Bu harekete benzer olarak küçük daireler

içerisindeki hareketli makaralar üzerinde de diskler hareket eder. Sikloid diskler, gövdedeki hareketli makaralar etrafında saat yönünde bir yörünge izlerken, kendi ekseni etrafında yavaşça saat yönünün tersinde döner [21].

Sikloid hız düşürücülerin, hareket biçimini tanımlamak gerekirse, giriş mili eksantrik bir yapıya sahiptir. Bu eksantrik salınım hareketi, sikloid disk üzerinde dışa doğru radyal bir güç sarf eder. Eksantrik mil döndükçe, pim yataklı stator içinde sikloid disk eliptik hareketine başlar ve eksantrik mil bir tur döndüğünde, sikloid disk burçların hatvesi kadar ilerler (Şekil 3.4). Sikloid diskin salınım hareketi, çıkış şaftının düzgün eş eksenli hareketine dönüştürmek için sikloid diskin içine, birden fazla adette çıkış şaft pimleri yerleştirilir. Çıkış şaft pim çapı ve sikloid üzerindeki küçük daire çapı arasındaki fark, eksantrik milin eksantrikliğinin 2 katıdır. Mekanizma, eksantrik milin salınım hareketini, cycloid bir diskin elips şekline dönüştürme imkanını tanımlamaktadır. Bu çalışma prensibinde bahsedilen, eksantrik mil bir tur döndüğünde sikloid diskin aldığı yol sistemin çevrim oranı açıklar [21].

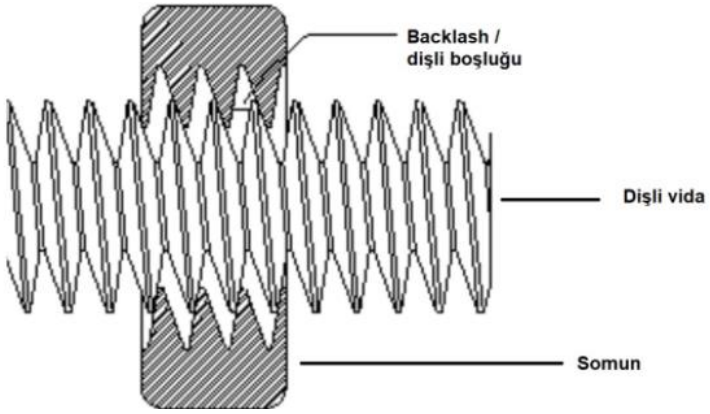


Şekil 3.4. Sikloid redüktör kesit görünüşü ve elamanları [22]

3.4. Diş Boşluğu

Geleneksel bir makineden örnek verilirse, bir eksende hareketin başladığı ya da yön değiştirdiği anda oluşan hareketsizliktir [23]. Örneğin, makineyi x ekseninde pozitif yönde 20 mm hareket ettirilirse ve ardından yine x ekseninde ters yönde 20 mm hareket ettirilirse, makinenin x ekseninde backlash (Şekil 3.5) varsa, makinenin yön değiştirdiği anda boşluk

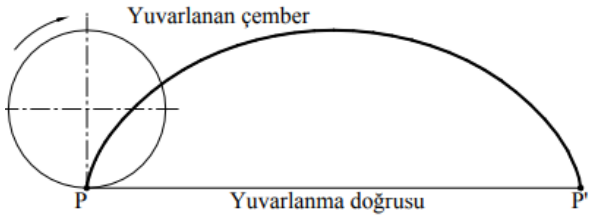
süresince hareket etmeyecektir. Bu nedenle makinenin alacağı mesafe 20 mm'den az olacaktır [23].



Şekil 3.5. Diş boşluğu [23]

3.5. Sikloid Eğriler

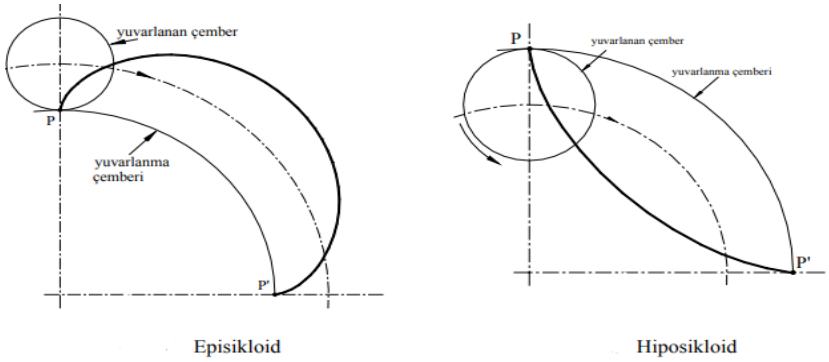
Sikloid profiller, evolvent olmayan profil şekillerinden, bir çemberin üzerinde seçilen bir noktanın, çemberin bir doğru veya bir çemberin dışında veya içinde yuvarlanmasından oluşmaktadır. Çember bir doğru üzerinde yuvarlanırsa ortosikloid eğrisi (Şekil 3.6) oluştuğu görülmektedir [24].



Şekil 3.6. Ortosikloid eğri [24]

3.5.1. Episikloid ve hiposikloid eğriler

Evolvent olmayan profil şekillerinde, iki önemli profil şekli vardır. Çember, bir çemberin dışında yuvarlanırsa profil diş başı eğrisinin adı episikloid ve çember, bir çemberin içinde yuvarlanırsa profil diş dibi eğrisinin adı hiposikloid (Şekil 3.7) olarak adlandırılmaktadır [24].



Şekil 3.7. (a) Episikloid eğri, (b) hiposikloid eğri [24]

Sikloid dişlilerde daima dış bükey yanak profili, iç bükey yanak profili ile temas ettiğinden yağlama ideal bir durum almaktadır. Böylece özgül yanak yüzey basıncı düşük olur ve çabuk aşınma olmaz. Bu şekilde büyük kuvvet taşımaları daha da kolaylaştırır ve diğer taraftan en küçük sınır diş sayısı da oldukça küçülür. Bu dişliler, beraber çalışan iki diskten oluştuğu için dişli çifti beraber çalışmaktadır. Kaydırmalı, değiştirmeli kademeler ancak yuvarlanan çember aynı büyüklükte olduğu zaman mümkündür [24].

3.6. Sikloid Hız Düşürücülerin Faydaları

Sikloid hız düşürücülerin sahip olduğu 1 arcmin altı boşluk değeri, bomba imha robotunda beş serbestlik dereceli robotik kollarında gerekli en düşük mekanik boşluk miktarını temin ederek, müdahale esnasında gerekli hassaslığı sağlamaktadır. Sahip olduğu yüksek şok ve yük dayanım miktarı, robotik kollara uygulanan kontrolsüz insan davranışı yüklerine dayanımı ile olası arıza durumlarının önüne geçmektedir.

Sahip olduğu hacim başına yüksek çevrim oranı miktarı ile düşük hacimlerde elde edilen yüksek çevrim oranı sayesinde, robotik kol tasarımında sektörde dünya klasının ötesinde tasarım imkanı sağlayacaktır. Sahip olduğu yüksek verim, kullanılan motor akım değerlerinde, yaklaşık %10 civarı bir azalmaya, buna bağlı olarak aynı oranda fazla operasyon süresine imkân kılacaktır.

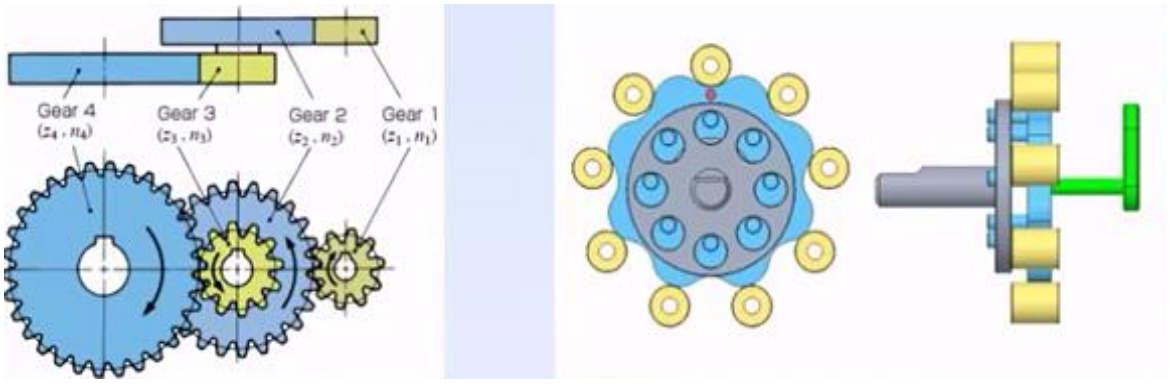
Sikloid hız düşürücü üreticisi, Simitomo redüktörünün, mekanik özellikleri; yük sikloid diskin tüm yüzeyine yayıldığından beş kat daha mukavemetli, neredeyse sıfır boşlukta büyük çıkış momenti (7,5 N.m – 68,200 N.m), bakımsız uzun ömürlü çalışma, en büyük çevrim

oranı tek kademede 119:1, çift kademede 7569:1 ve üç kademede 1.000.000:1 olması, rekabetçi piyasa imkanı sunmaktadır [25].

Sikloid hız düşürücülerin avantajları aşağıda görülmektedir [26];

- Uzun Hizmet Ömrü
- Kompakt Tasarım
- Sade Tasarım
- Şok Yüklemelere Karşı Dayanıklı
- Yüksek Çevrim Oranı
- Düşük Titreşim
- Yüksek Verimlilik
- Kolay Montaj

Sikloid hız düşürücülerin; daha az aşınma ve yıpranma özelliği, iç bükey ve dış bükey yüzey ile temas etme özelliği, yağ sızıntısı bulunmama özelliği, güçlü dişleri, pürüzsüz eğrilik özelliği ve dişlere zarar vermeden sıfır boşluklu yuvarlanma sağlama özelliği sayesinde uzun hizmet ömrü sunmaktadır. Sikloid hız düşürücüler, kompakt bir tasarım ve alandan tasarruf özelliği sayesinde planet dişliye kıyasla büyük dişli bulunmamaktadır (Şekil 3.8).



(a) (b)

Şekil 3.8. Tasarım karşılaştırması: (a) Kompakt tasarım (b) sade tasarım [26]

Sikloid hız düşürücülerin önemli özelliklerinin başında, geniş ve kısa diş profili gelmektedir. Dişli redüktörlerde bir veya iki diş contact halindedir. Sikloid hız düşürücüler, her zaman temas halinde olduğu için dişli redüktörlere kıyasla %500 daha fazla şok yükü kaldırabilir.

Yüksek çevrim oranı sayesinde kullanıcılarına hassas ilerleme kabiliyeti sunmaktadır. Sikloid hız düşürücülerde iki adet sikloid disk kullanılmasıyla yüksek hızlarda mekanik titreşimden kaynaklı denge sıkıntısı çözülebilmektedir (Çizelge 3.1). Ayrıca sikloid hız düşürücüler, modüler dişlilere göre daha yüksek çevrim oranı sahiptir [26].

Çizelge 3.1. Modüler ve sikloid dişli çevrim oranlarının karşılaştırması [26]

Sikloid Dişli	Modüler Dişli
Tek Kademede Azaltma Oranı	3 Kademede Azaltma Oranı
Redüksiyon Çevrim Oranı: $1/27$	Redüksiyon Çevrim Oranı: $(18/4).(18/54).(18/54) = 1/27$

3.7. Redüktörlerin Kıyaslanması

Modüler dişli redüktör, sonsuz dişli redüktör, planet dişli redüktör, sikloid hız düşürücüler ve hormonik dişli redüktörlerin çevrim oranı, performans ve boyut vb. özellikleri yönünden, birbirine göre kıyaslaması (Çizelge 3.2) yapılmıştır [26].

Çizelge 3.2. Redüktör tiplerinin genel karşılaştırılması [26]

Hız Düşürücüler		Düz Dişli	Sonsuz Dişli	Planet Dişli	Sikloid Dişli	Harmonik Dişli
Giriş / Çıkış Mil Yönü		Paralel	Sağ Açılı	Eş Merkezli		
1 kademeli redüksiyon sistemi	Pratik	1 // 5	5 // 100	3 // 10	6 // 10	3 // 320
	En Uygun	3	50	5	50	50
1. Verimlilik Aşaması		95	60	90	85	80
Kompaktlık	Dış Çap			xx	x	x (hafif)
	Pürüzsüzlük				xx	
Performans	Gürültü	x	xx	x	x	x
	Efektivite	x		x	x	
	Tokluk	x		x	xx	
	Sıfır Boşluk				x (olası)	x (olası)
Maliyet	Küçük Ebat	x	xx		x	
Avantajlar		Her yerde kullanılır	Düşük maliyet Güvenlikli Kısa çalışma ömrü	Kompakt	Pürüzsüz Boşluksuz Yüksek şok Dirençli	Pürüzsüz Boşluksuz Yüksek şok Dirençli
Endüstride Kullanımı		Küçük boyut ve büyük boyutlarda kullanılır	Küçük boyuta göre maliyet avantajı	Enjeksiyon makinalarında	6 eksen robot FB robot kollarında	6 eksen robot FA robot kollarında

3.8. Plastik Sikloid Hız Düşürücüler

Endüstri ihtiyaçlarının başında plastik sikloid hız düşürücüler gelmektedir. Endüstriler tarafından düşük maliyetli ve hafif, dişli redüktörlerin piyasaya sürülmesi beklenmektedir. Seri imalat aşamalarında enjeksiyon kalıp yöntemi ile aşırı yük gerilmesi olmayan basit mekanizmalarda hem ucuz hem de çalıştığı mekanizma bölgesine göre dayanıklı bir redüktör kullanılması, kullanıcı performansı açısından fayda sağlayacaktır. Maliyet bakımdan ise adetli siparişlerde ise 3D yazıcı baskılarda, geleneksel imalat yöntemlerinin maliyetlerine göre %3000'e yakın oranlara kadar kar yakalanabilmektedir. Blagojevıć, Matejıć, Kostıć, Petrovıć, Marjanovıć, ve Stojanovıć' in [16] "plastik sikloid redüktör veriminin kuru şartlar altında, teorik ve deneysel testi" adlı çalışmasında, sikloid hız düşürücü, plastikten üretilip testlere tabi tutularak bu ve benzeri çalışmalar için yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

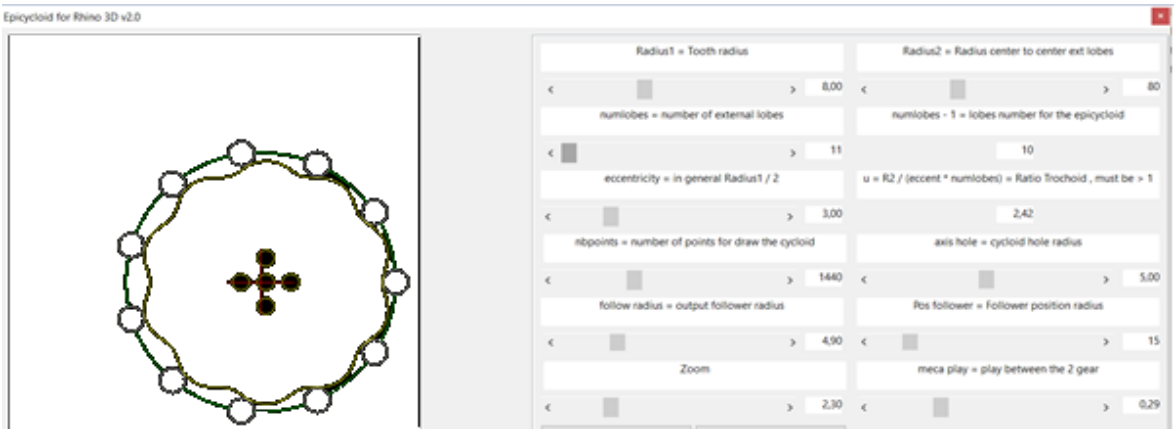
4. SİKLOİD HIZ DÜŞÜRÜCÜLERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODELLENMESİ

Tez çalışmasında, tasarlanacak sikloid hız düşürücü bilgisayar destekli ortamda modellenecektir. Modelleme aşamaları; sikloid disk profilinin matematiksel denkleminin oluşturulması, 3 boyutlu modellenmesi, sikloid hız düşürücüsünün diğer alt bileşenlerinin modellenmesi, standart ve hazır parça seçimi yer almaktadır. Kritik öneme sahip, tasarım aşaması olan kavramsal ve detay tasarım çalışması, tez çalışmasında rol model olarak alınmış ve modelleme faaliyetleri gerçekleştirilmiştir.

4.1. Sikloid Disk Profilinin Matematiksel ve 3 Boyutlu Modellenmesi

Sikloid diskin 2 boyutlu modeli "Epicycloiad for Rhino 3D v2.0" uygulamasında ilgili parametrik değerler girilerek yapılmaktadır (Şekil 4.1). Çevrim oranı, 10:1 olacak şekilde modellenip, uygulamada "U" parametre değeri, yuvarlanma eğrisi (trochoid eğrisi) oranı her zaman 1' den büyük olmalıdır. Parametre değeri 1' den küçük olduğu durumda episikloid ve hiposikloid eğriler, tanjant eğri olarak birleşmeyip çakışma gerçekleşmektedir. "Epicycloiad for Rhino 3D v2.0" uygulamasına girilen değerler aşağıda yer almaktadır (Şekil 4.1);

- Pim çapı $= 8\ mm$
- Eksantrik kaçıklık $= 3\ mm$
- Çevrim oranı $= 10$
- Pimin merkez çapı $= 80\ mm$
- Lobların sayısı $= 11\ adet$



Şekil 4.1. Sikloid diskin "Epicycloiad for Rhino 3D v2.0" uygulamasında 2 boyutlu grafiğinin oluşturulması

"Epicycloiad for Rhino 3D v2.0" uygulamasında yapılan 2 boyutlu grafik yapılacak olan modelleme için ön fikir oluşturmuştur. Oluşturulacak sikloid dişli profili için gerekli olan parametrik denklemin esas alındığı bir diğer yönteminde WEB ortamında (Şekil 4.2) ilgilenenlere sunulduğu görülmüştür. WEB sayfasında kullanıcıya sunulan girdi değerler verilerek parametrik denklem oluşturulabilmektedir [27].

- D : Pimlerin merkezlerinden geçen çap $= 80\ mm$
- d : Pimlerin çapı $= 8\ mm$
- N : Pim sayısı $= 11\ adet$
- E : Eksenden kaçıklık $= 3\ mm$
- i : İçeriye doğru verilecek offset değeri $(d/2)\ =\ 4\ mm$
- ε : Pimler arasındaki açı $(360/N)\ =\ 32,727°$

Hypocycloid Gear Calculator

The following online calculator computes the parametric equations of the cycloid disk of a hypocycloid drive.

Show Diagram

Basic Dimensions

Item	Symbol	Value
Ring Diameter	D	80
Pin Diameter	d	8
Number of Pins	N	11
Eccentricity	e	3
Inset Amount (d / 2)	i	4
Angle between pins (360° / N)	ε	32.727

Calculate Equations | Sıfırla

Unadjusted Cycloid Disk Profile

X equation	(36.364 + 3.636) * cos(2 * pi * u) + 3.000 * cos((36.364 + 3.636) * 2 * pi * u / 3.636)		
Y equation	(36.364 + 3.636) * sin(2 * pi * u) + 3.000 * sin((36.364 + 3.636) * 2 * pi * u / 3.636)		
Z equation	0		
U Min, Max, Step	0	1	1024

Şekil 4.2. Girdi değerler sonucu oluşan parametrik denklem [27]

X ve y ekseninde oluşacak nokta bulutunun denklemi, aşağıda verilmiştir (Eş. 4.1);

$$xt = \left((36{,}364 + 3{,}636).cos(2.pi.u) + 3.cos((36{,}364 + 3{,}636)\,.\,2.pi.u.\left(\frac{1}{3{,}636}\right)\right) mm$$

$$yt = \left((36{,}364 + 3{,}636).sin(2.pi.u) + 3.sin((36{,}364 + 3{,}636).2.pi.u.\left(\frac{1}{3{,}636}\right)\right)\ mm$$

$$zt = 0\ mm \tag{4.1}$$

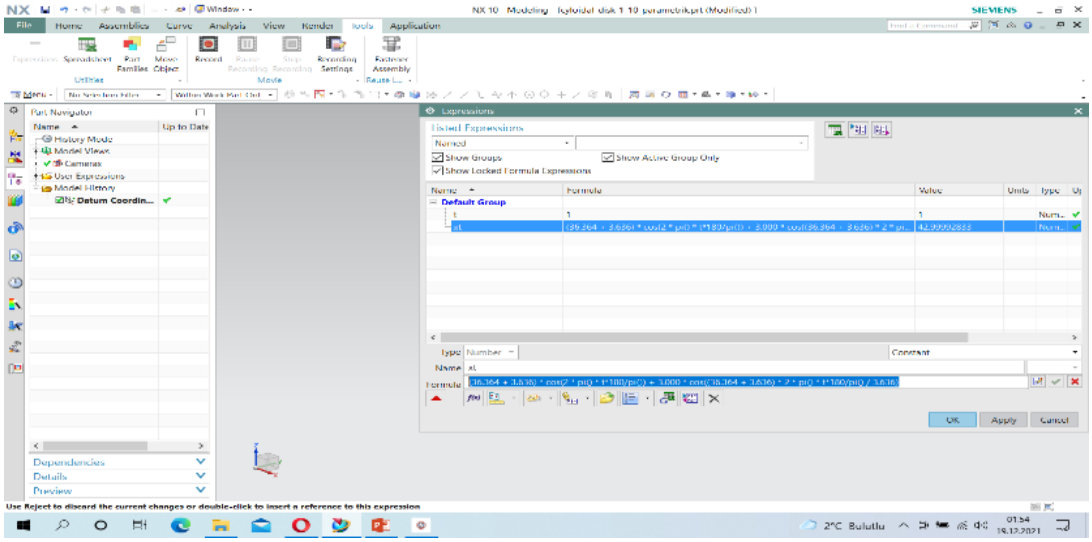
Parametrik denklemi oluşturulan sikloid hız düşürücünün bilgisayar destekli modellenmesi için Siemens Nx programı kullanılmıştır. Nx programında sikloid diski oluşturmak için gerekli x ve y parametrik denklemi, program içinde yer alan "Expression" komutu ile "t" değişkeni 1 olarak tanımlanır. Otvinta sitesinden hesaplatılan [27] x ve y nokta bulut denkleminde yer alan "u" değeri "t" olarak değiştirilir. Programın, "pi" değerini tanıyabilmesi için giriş değeri "pi()" olarak güncellenir. Programda "t" değerini radyal değere çevirmek için "180/pi()" değeri ile çarpma işlemi yapılır. Programda yer alan ölçü birimi "Constant" yani sabit olarak seçilir. Denklem aşağıda verilmiştir (Eş. 4.2).

$$xt = \begin{pmatrix} (36{,}364 + 3{,}636).cos\left(2.pi().t.180.\left(\frac{1}{pi()}\right)\right) \\ +3.cos\left((36{,}364 + 3{,}636).2.pi().t.180.\left(\frac{1}{pi()}\right).\left(\frac{1}{3.636}\right)\right) \end{pmatrix} mm$$

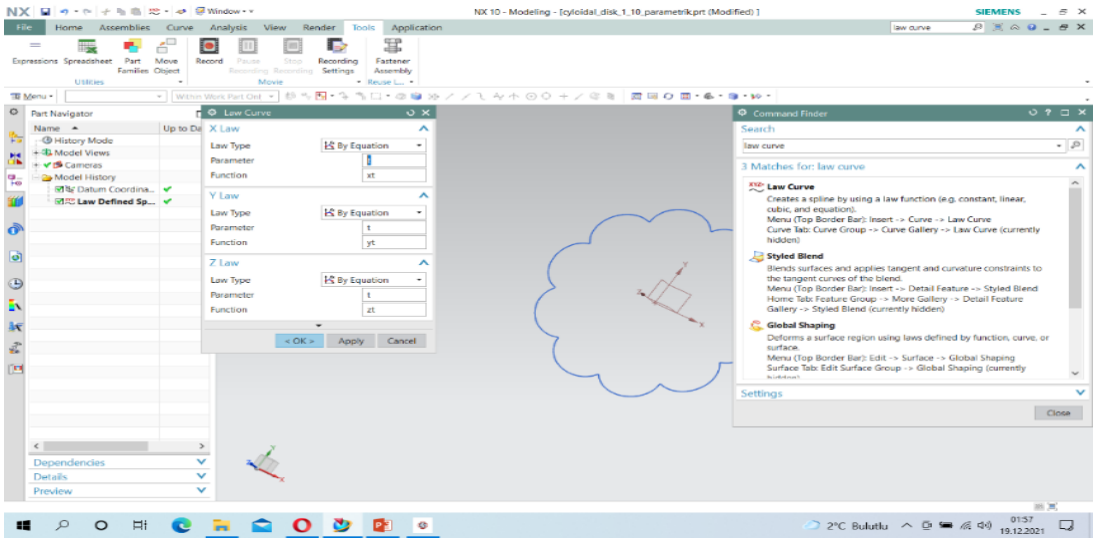
$$yt = \begin{pmatrix} (36{,}364 + 3{,}636).sin\left(2.pi().t.180.\left(\frac{1}{pi()}\right)\right) \\ +3.sin\left((36{,}364 + 3{,}636).2.pi().t.180.\left(\frac{1}{pi()}\right).\left(\frac{1}{3.636}\right)\right) \end{pmatrix} mm$$

$$zt = 0\ mm \tag{4.2}$$

Bulunan parametrik denklem Nx programında yer alan ilgili bölümlere girilir (Şekil 4.3) ve girilen parametrik denklem çizim ortamına "Law Curve" komutu ile aktarılır (Şekil 4.4).



Şekil 4.3. Parametrik denklemin “Expression” komutu ile programa girilmesi



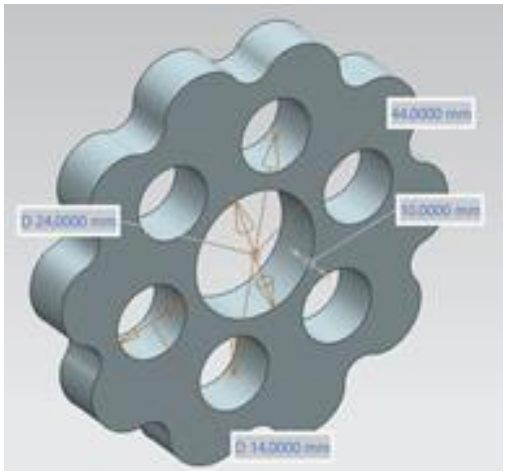
Şekil 4.4. “Law Curve” komutu ile çizim düzleminin oluşturulması

Oluşturulan eğri, içeriye doğru verilecek offset değeri kadar ötelenir. Ötelenen eğri “Extrude” komutu ile kalınlık değeri girilerek sikloid disk 3 boyutlu modele dönüştürülür. Sikloid diskin ön yüzeyine düzlem oluşturulup merkez referans çap değeri 44 mm olan, 60’ ar derecelik açılarla, 6 adet daire çizilerek “Cut” komutu ile daireler sikloid diskten çıkartılır (Eş. 4.3). Sikloid disk merkezine çap değeri 24 mm olan daire çizilerek, “Cut” komutu ile diskten çıkartılıp iç rulman yuvası oluşturulur. Çizime 10 mm kalınlık verilerek, sikloid disk 3 boyutlu modeli tamamlanır (Şekil 4.5).

Modellemede 6 adet olan pimlerin yuvarlanacağı, sikloid disk üzerinde delik sayısı; Lin,Shih ve Lee’ nin [2] “iki kademeli sikloid dişli redüktör tasarımı diş modifikasyonları”

adlı çalışmasında, Blagojević, Matejić, Ve Kostić' in [3] "iki aşamalı sikloidal hız düşürücünün dinamik davranışı ve yeni konseptinin tasarımı" adlı çalışmasında, Blagojevic, Marjanovic, Djordjevic, Stojanovic, Disic' in [10] "iki kademeli sikloidal hız düşürücüsünde yeni bir tasarım" adlı çalışmasında ve Blagojević, Matejić, Kostić, Petrović, Marjanović, ve Stojanović' in [16] "plastik sikloid redüktör veriminin kuru şartlar altında, teorik ve deneysel testi" adlı çalışmasında da görülerek referans alınmıştır.

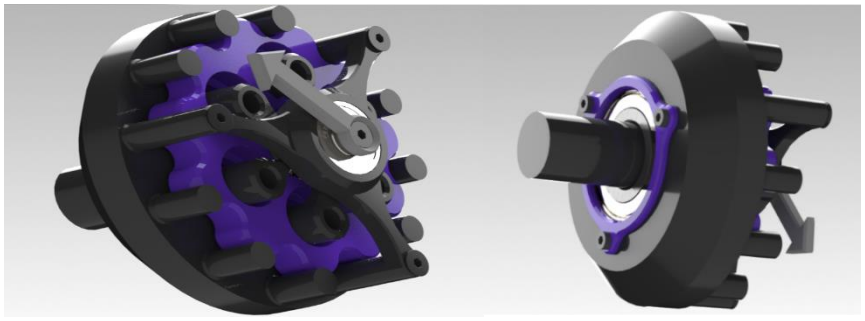
Çıkış pim yuva çapı $= d + (2 . E)\, mm$ (4.3)



Şekil 4.5. Sikloid diskin katı modeli

4.2. Sikloid Hız Düşürücünün Prototip Modeli ve İmalatı

Sikloid disk profilinin doğruluğu teyit edilmek amacıyla çevrim oranı 10:1 olan sikloid hız düşürücü modellenmesi yapılmış ve 3D yazıcıda baskı alınarak montajı yapılmıştır (Şekil 4.6, Resim 4.1).



Şekil 4.6. İlk imalatı yapılan sikloid hız düşürücünün prototip modeli

Montajı yapılan sikloid hız düşücünün pimleri ve sikloid eğri yüzeyi arasında pim ve eğrinin pürüzlülük değerinden kaynaklı boşluk oluşmaktadır. Sikloid diskin diş yüzeyinin olması gereken yüzey pürüzlülük değeri $Ra = 0{,}8\ \mu m$ altında olmadır. Boşluk hatasının temel sebebi 3D baskı üretiminin kapasitesinden kaynaklıdır (Resim 4.1).



Resim 4.1. Sikloid hız düşürücü prototip imalatı ve montajı

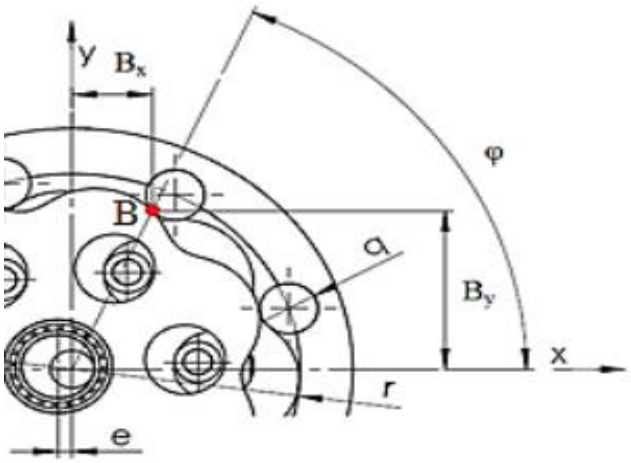
4.3. Sikloid Diskin Matematiksel Denklemi

Sikloid hız düşürücüler, donanımı oluşturan tüm iç parçaların uyumlu hareketiyle çalışan ve farklı tasarımlardan dolayı çok sayıda olumlu özellikler barındıran hız ve kuvvet iletme araçlarıdır. Yakalanabilen 70:1 çevrim oranı küçük alan kapsayan ve sürücüyü ilk hareketin yanında yüksek verimlilikle sessiz çalışan bir tahrik elemanı haline getirir. Ayrıca çok düşük atalet momenti, hareket yönünün ani değişimlerinde problemsiz geçişler sağlamaktadır. Sürücünün önemli bir aşırı yük kapasitesi ve değişimine tepki vermektedir. Sikloidal dişliler diğer dişlilerden oluşan hız düşürücüler arasında iletim oranı bakımından daha düşük kütlesi, gövdesi ve sessizliği ile ön plana çıkmaktadır. Yüksek dişli oranının talep edildiği makinelerde, gereken hız düşürücüyü elde etmek için en az üç tahrik oranına ihtiyaç duyulmakta ve böylesi hız düşürücülerden olan planet dişlilerden oluşan hız düşürücülerin her geçen gün daha da büyümesine ve ağırlaşmasına yol açmaktadır.

Sikloid dişlilerde sadece iki tahrik oranı bulunmaktadır. Küçük ve hafif olma özelliklerine sahip sikloid hız düşürücüler, robotlar, CNC kumandalı makineler vb. hassas hareket kabiliyetine sahip olması gereken alanlarda kullanılarak modern imalat endüstrisinde giderek yaygınlaşmaktadır. Sikloid hız düşürücüler robotların dirsek bağlantılarının yanında, vinçlerde ve döner tablalarda da sıklıkla tercih edilmektedir. Bununla birlikte sikloidal

sürücülerin gelişimi ve yayılması diğer hareket ve güç ileten donanımlarda olduğu kadar hızlı değildir. Bunun nedeni, sikloid hız sürücülerin tasarım karmaşıklığı ve imalatında zorluklar içermesinden kaynaklıdır [28].

Sikloid eğrilerden oluşan diş profillerine sahip dişli, diş eğrilerinin 2 boyutlu oluşturulmasını sağlayan noktaların x ve y koordinatlarıyla oluşturulmaktadır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Diskin noktalar halinde x ve y koordinatlarının çizilmesi [28]

B noktasının x (Eş. 4.4) ve y (Eş. 4.5) değerleri, Ψ açısının değeri (Eş. 4.6), φ açısının değer aralığı (Eş. 4.7) ve sikloid disk üzerinde yer alan pim sayısı (Eş. 4.8) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [28];

$$B_x = r.cos(\varphi) - q.cos(\varphi + \Psi) - e.cos(N.\varphi)\ mm \quad (4.4)$$

$$B_y = -r.sin(\varphi) + q.sin(\varphi + \Psi) + e.sin(N.\varphi)\ mm \quad (4.5)$$

$$\Psi° = \left[\frac{sin[(1-N).\varphi)}{\frac{r}{e.N} - cos[(1-N).\varphi}\right] \quad (4.6)$$

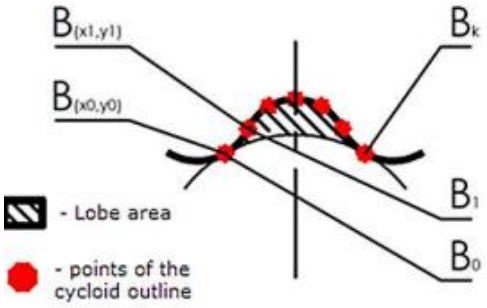
$$0° \leq \varphi° \leq 360° \quad (4.7)$$

$$N = (z_1 + 1)\ adet \quad (4.8)$$

Sikloid dişlinin diş profilleri, her B noktası koordinatlarını esas alan spline eğrisi ile oluşmakta, hesaplanan noktalardan geçen spline eğrisinin en kabul edilebilir biçimini oluşturan $d\varphi$, birim yer değiştirme olarak kabul edilmektedir. 360°' de oluşturulacak nokta sayısı, $d\varphi°$ değerine bölünerek bulunmaktadır. (Eş. 4.9) [28].

$$d\varphi° = \frac{360}{z_1.k} = 0{,}21° \tag{4.9}$$

B noktasının (Eş. 4.4 - Eş.4.5) bulunan açı artışıyla (Eş. 4.9), 0,21' er derece olmak üzere B noktası (Şekil 4.8), 1714 adet spline' ı birleştirerek sikloid diski oluşturmaktadır. Literatürde yer alan çalışmada [28] k sabitinin 95 alındığı görülmektedir. Yapılan 2 boyutlu muhtelif çalışmalarda 95 rakamının sikloid eğrinin spline türünde problemsiz oluşmasına yol açtığı görülmüştür. K sabit değeri (Eş. 4.10) referans alınarak, oluşan noktalardan birleştirilen spline (Şekil 4.8) aşağıda görülmektedir [28].



Şekil 4.8. Spline oluşturmak için gereken nokta sayısı k sabiti [28]

$$k: 95 \tag{4.10}$$

Sikloid disk çalışabilirlik fonksiyon değerinin (Eş. 4.11) [28], $\frac{r}{(e.N)} \geq$ 1,5 elde edilmesiyle oluşan spline eğrilerin, $\frac{r}{(e.N)} \geq$ 1 elde edilmesiyle oluşan spline eğrilerinden, daha uygun spline eğriler oluştuğu gözlemlenmiştir. Tez çalışmasında sikloid disk çalışabilirlik fonksiyonu $\frac{r}{(e.N)} \geq$ 1,5 olarak kabul edilmiştir.

$$\frac{r}{(e.N)} \geq 1 \tag{4.11}$$

Eşitlik 4.4' den Eşitlik 4.11' e kadar yer alan sembollerin ve formüllerin anlamları aşağıda verilmiştir (Şekil 4.7);

- B_x : 2 boyutlu düzlemde B noktasının x koordinatı, mm

- B_y : 2 boyutlu düzlemde B noktasının y koordinatı, mm
- r: Pimlerin merkezinden geçen yarıçap, mm
- e: Sikloid diskin eksenel kaçıklığı, mm
- N: Sikloid diskin üstündeki pim sayısı, mm
- z_1: Çevrim oranı
- q: Gövde üstündeki pimlerin yarıçapı, mm
- $\varphi°$: Orijin ve B noktasından geçen doğrultunun x ekseni ile yaptığı açı
- Ψ°: Gövde üstündeki pim ile sikloid dişli arasındaki açı
- $\frac{r}{(e.N)} \geq 1$: Sikloid diskin çalışabilirlik fonksiyonunu denetler
- $d\varphi°$: Oluşturulacak noktalar için belirlenen açısal adım
- k: Sikloid dış hattın oluşturulması için belirlenmiş nokta sayısı

4.3.1. Denklemin Excel ortamına aktarılması

Excel programını çalışır duruma getirmek ve sikloid hız düşürücünün matematiksel denkleminin doğruluğunu kontrol etmek adına, 11:1 çevrim oranında sikloid diskin matematiksel modelinin, 2 ve 3 boyutlu ortama aktarılması sağlanmıştır.

Eğrinin oluşturulması için B noktasının koordinat hesaplarında Excel ortamından yararlanılmıştır. $d\varphi°$ açı aralıklarıyla oluşturulan B_x ve B_y koordinatları, Excel grafiğinin hücrelerine giriş değeri girilerek sikloid disk eğrisi oluşturulmuştur. Eğriyi oluşturmak için gerekli girdiler ve sabit değerler Excel ortamında tanımlanmıştır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Sikloid hız düşürücü matematiksel denklemi oluşturmak için gerekli giriş ve sabit değerler

Hücre	B13	C13	D13	E13
Sembol	r	e	q	z_1
Açıklama	Sikloid Pimlerin Merkezinden Geçen Yarıçap	Eksantrik Kaçıklık	Sikloid Pimlerin Yarıçapı	Tahvil Oranı
Değer	80	2	5	11
Hesaplama	Girdi	Girdi	Girdi	Girdi

Hücre	F13	G13	H13	I13	J13	K13
Sembol	HH	HHC	SDG	HHA	HHD	c_y
Açıklama	İğne Bilyalı Rulman Göbeği Merkez Çapı	İğne Bilyalı Rulman Göbek Çapı	Sikloid Disk Göbek Çapı	İğne Bilyalı Rulman Göbek Sayısı	İğne Bilyalı Rulmanlar Arasındaki Açı	Sikloid Pimlerin Merkez Çizgisi
Değer	80	20	30	6	60	-20
Hesaplama	Girdi	Girdi	Girdi	Sabit	Sabit	Sabit

B noktalarının tamamını spline ile birleştirilecek sikloid eğrinin, noktalar arası açı artışı hesaplanmıştır (Eş. 4.9). Sikloid disk üzerindeki pim sayısı N değeri (Eş. 4.8), ve diskin çalışabilirlik fonksiyonu $\frac{r}{(e.N)} \geq 1$ (Eş. 4.11), girdiler alınarak (Çizelge 4.1) hesaplanmıştır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. $d\varphi$, N ve diskin çalışabilirlik fonksiyonel durumunun hesaplanması

Hücre	C7	AD13	AB13	AC13
Sembol	dφ	dφ	N	$r/((e*N)) \geq 1{,}5$
Açıklama	Oluşturulacak B Noktaları Arasındaki Açı Artışı	Oluşturulacak B Noktaları Arasındaki Açı Artışı	Sikloid Disk Üzerindeki Pim Sayısı	Diskin Çalısabilirlik Fonksiyonel Durumu
Formul	$d\varphi = \frac{360}{z_1 * k}$	(-)	$N = z_1 + 1$	$r/((e*N)) \geq 1{,}5$
Hesaplama	360 / (E13 * A13)	C7	E13 + 1	B13/(C13*AB13)
Sonuç	0,34	0,34	12	3,33

B noktasının $d\varphi = 0.34°$ konumunda, gövde üstündeki pim ile sikloid dişli arasındaki açı "Ψ" değeri (Eş. 4.6) ile B_x (Eş. 4.4) ve B_y (Eş. 4.6) koordinat değerleri, girdiler alınarak (Çizelge 4.2) hesaplanmıştır (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. $d\varphi$ açı konumunda Ψ açısının, B_x ve B_y koordinatlarının hesaplanması

Hücre	AE13	AF13	AG13
Sembol	Ψ	B_x	B_y
Açıklama	Gövde Üstündeki Pim ile Sikloid Dişli Arasındaki Açı	$d\varphi$ açısında B noktasının x koordinatı	$d\varphi$ açısında B noktasının y koordinatı
Formul	$\left[\frac{\sin[(1-N)*\varphi)}{\frac{r}{e*N} - \cos[(1-N)*\varphi}\right]$	$B_x = r*\cos(\varphi) - q*\cos(\varphi+\Psi) - e*\cos(N*\varphi)$	$B_y = -r*\sin(\varphi) + q*\sin(\varphi+\Psi) + e*\sin(N*\varphi)$
Hesaplama	ATAN((SİN(RADYAN((1-AB13)*AD13)))/((AC13)-(COS(RADYAN((1-AB13)*AD13)))))	((B13*COS(RADYAN(AD13)))-(D13*COS(RADYAN(AD13+AE13)))-(C13*COS(RADYAN(AB13*AD13))))	(-(B13*SİN(RADYAN(AD13)))+(D13*SİN(RADYAN(AD13+AE13)))+(C13*SİN(RADYAN(AB13*AD13))))
Sonuç	-0,02	73	-0,3

B_x ve B_y koordinat değerleri hesaplandığı gibi (Çizelge 4.3) $d\varphi = 0.34°$ açı artışıyla, 1812 satır tamamlanarak sikloid disk oluşturulmuştur. Gövdede bulunan pimlerin, $d\varphi = 0.34°$ açı artışıyla sikloid pimlerin merkezinden geçen noktanın x ve y koordinat noktası girdiler alınarak (Çizelge 4.2, Çizelge 4.3) hesaplanmıştır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. $d\varphi$ açı konumunda gövde üzerinde bulunan pimlerin merkezinden geçen daireyi oluşturacak noktanın x ve y koordinatı

Hücre	Z13	AA13
Sembol	SP_x	SP_y
Açıklama	$d\varphi$ Gövde Üzerinde Bulunan Pimlerin Yarıçap Değerinden Merkez X Koordinatı	$d\varphi$ Gövde Üzerinde Bulunan Pimlerin Yarıçap Değerinden Merkez Y Koordinatı
Formul	$SP_x = r * \cos(d\varphi) + e$	$SP_y = r * \sin(d\varphi)$
Hesaplama	(B13*COS(RADYAN(AD13)))+(C13)	(B13*SİN(RADYAN(AD13)))
Sonuç	82	0,48

$d\varphi = 0.34°$ açı artışıyla, 1812 satır tamamlanarak sikloid pimlerin merkezinden geçen daire ve gövde üzerindeki pimler 10°' lik artışlarla oluşturulmuştur. Pim sayısı, çevrim oranına bağlı olarak artıp azalacağı için en fazla 18 adet pim sayısı olacak şekilde Excel' e tanıtılmıştır. 18 adet pimden daha az olması durumunda daireler üst üste bindiği gözlemlenip, 2 ve 3 boyutlu modelde problem olmayacağı öngörülmüştür. Örnek olarak birinci pimin, $d\varphi = 0.34°$ açı konumunda x ve y koordinatları görülmektedir (Çizelge 4.5). 18 pimin $d\varphi = 0.34°$ açı konumunda x ve y koordinatları Excel hücrelerine işlenmektedir.

Çizelge 4.5. $d\varphi$ açı konumunda birinci sikloid pimin x ve y koordinatı

Hücre	BV	AH	AI	AJ
Sembol	$SPPA$	$SPAA$	$SPAA_x$	$SPAA_y$
Açıklama	Sikloid Pimlerin Aynı Anda (Pattern) Olarak Disk Eğrisi Üzerinde Tüm Yüzeylere Basacak Şekilde Konumlandırılması için Açı Artış Değeri	Sikloid Pim Sayısına Göre Pimler Arasındaki Açı	$d\varphi$ Açısında Gövde Üzerindeki Pimlerin Merkezinin X Koordinatı	$d\varphi$ Açısında Gövde Üzerindeki Pimlerin Merkezinin Y Koordinatı
Formul	Girdi	$SPAA = \frac{360}{N} + SPPA$	$SPAA_x = r * \cos(SPAA) + e$	$SPAA_y = r * \sin(SPAA)$
Hesaplama	Girdi	360/AB13 + BV13	(B13*COS(RADYAN(AH13)))+C13	B13*SİN(RADYAN(AH13))
Sonuç	14	44	59,54	55,57

Hücre	AK13	AL13	AM13
Sembol	$SPNAA$	$A13x$	$A13y$
Açıklama	10°' lik Açı Artışı ile 360°' ye Tamamlanarak Pim Dairelerinin Oluşumu (10°, 20°, 30° …. 360°, 36 Satır Tanıtıldı)	$d\varphi$ Açısında 1. Sikloid Pimin X Koordinatı	$d\varphi$ Açısında 1. Sikloid Pimin Y Koordinatı
Formul	Sabit	$A13x = SPAA_x + q * \cos(SPNAA)$	$A13y = SPAA_y + q * \sin(SPNAA)$
Hesaplama	Sabit	(AI13+(D13*COS(RADYAN(AK13))))	(AJ13+(D13*SİN(RADYAN(AK13))))
Sonuç	10	64,47	56,44

AK13 hücresi (Çizelge 4.5), 10°' lik artışlarla 360°' ye tamamlayacak şekilde tanımlanmıştır. Diğer hücreler 1812 satır tamamlayacak şekilde tanımlanarak pimi oluşturacak daire koordinat değerleri elde edilmiştir.

Sikloid disk üzerinde 6 adet iğne bilyeli rulman bulunmaktadır. Örnek olarak iğne bilyeli rulmanın oturacağı birinci, altıncı yuva ve sikloid diskin göbeğine oturacak rulman yuvasının, $d\varphi = 0.34°$ açısındaki konumunun x ve y koordinatları, girdiler alınarak (Çizelge 4.1 - Çizelge 4.2) oluşturulmuştur (Çizelge 4.6). Hücreler 1812 satır tamamlayacak şekilde tanımlanarak pimi oluşturacak koordinat değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.6. $d\varphi$ açı konumunda sikloid göbek çapının ve iğne bilyeli rulman yuvasının x ve y koordinatı

Hücre	J13	L13	M13	V13	W13	X13	Y13
Sembol	HHD	$A1_x$	$A1_y$	$A6_x$	$A6_y$	SR_x	SR_y
Açıklama	İğne Bilyeli Rulmanlar Arasındaki Açı	$d\varphi$ Açısında İğne Bilyeli Rulman 1. Göbek Çapı X Koordinatı	$d\varphi$ Açısında İğne Bilyeli Rulman 1. Göbek Çapı Y Koordinatı	$d\varphi$ Açısında İğne Bilyeli Rulman 6. Göbek Çapı X Koordinatı	$d\varphi$ Açısında İğne Bilyeli Rulman 6. Göbek Çapı Y Koordinatı	$d\varphi$ Açısında Sikloid Disk Rulman Göbek Yuvası X Koordinatı	$d\varphi$ Açısında Sikloid Disk Rulman Göbek Yuvası X Koordinatı
Formul	Sabit	$A1_x = (\left(\frac{HH}{2}\right) * \cos(HDD - HDD)) + (\left(\frac{HHC}{2}\right) * \cos(d\varphi))$	$A1_y = (\left(\frac{HH}{2}\right) * \sin(HDD - HDD)) + (\left(\frac{HHC}{2}\right) * \sin(d\varphi))$	$A6_x = (\left(\frac{HH}{2}\right) * \cos(HDD * 5)) + (\left(\frac{HHC}{2}\right) * \cos(d\varphi))$	$A6_y = (\left(\frac{HH}{2}\right) * \sin(HDD * 5)) + (\left(\frac{HHC}{2}\right) * \sin(d\varphi))$	$SR_x = \frac{SDG}{2} * \cos(d\varphi)$	$SR_y = \frac{SDG}{2} * \sin(d\varphi)$
Hesaplama	Sabit	(((F13/2)*COS(RADYAN(J13-J13))) + ((G13/2)*COS(RADYAN(AD13))))	(((F13/2)*SİN(RADYAN(J13-J13))) + ((G13/2)*SİN(RADYAN(AD13))))	(((F13/2)*COS(RADYAN(J13*5))) + ((G13/2)*COS(RADYAN(AD13))))	(((F13/2)*SİN(RADYAN(J13*5))) + ((G13/2)*SİN(RADYAN(AD13))))	((H13/2)*COS(RADYAN(AD13)))	((H13/2)*SİN(RADYAN(AD13)))
Sonuç	60	50	0,06	30	-34,58	15	0,09

Excel hücrelerinde kullanılan formüller aşağıda verilmiştir (Çizelge 4.4 - Çizelge 4.6);

$$SP_x = r * \cos(d\varphi) + e\ mm \tag{4.12}$$

$$SP_y = r * \sin(d\varphi)\ mm \tag{4.13}$$

$$SPAA = \frac{360}{N}.SPPA\ ° \tag{4.14}$$

$$SPAA_x = r.\cos(SPAA) + e\ mm \tag{4.15}$$

$$SPAA_y = r.\sin(SPAA)\ mm \tag{4.16}$$

$$A13_x = SPAA_x + q.\cos(SPNAA)\ mm \tag{4.17}$$

$$A13_y = SPAA_y + q * \sin(SPNAA)\ mm \tag{4.18}$$

$$A1_x = \left(\left(\frac{HH}{2}\right).\cos(HDD - HDD)\right) + \left(\left(\frac{HHC}{2}\right).\cos(d\varphi)\right)\ mm \tag{4.19}$$

$$A1_y = \left(\left(\frac{HH}{2}\right).\sin(HDD - HDD)\right) + \left(\left(\frac{HHC}{2}\right).\sin(d\varphi)\right)\ mm \tag{4.20}$$

$$A6_x = \left(\left(\frac{HH}{2}\right).\cos(HDD.5)\right) + \left(\left(\frac{HHC}{2}\right).\cos(d\varphi)\right)\ mm \quad (4.21)$$

$$A6_y = \left(\left(\frac{HH}{2}\right).\sin(HDD.5)\right) + \left(\left(\frac{HHC}{2}\right).\sin(d\varphi)\right)\ mm \quad (4.22)$$

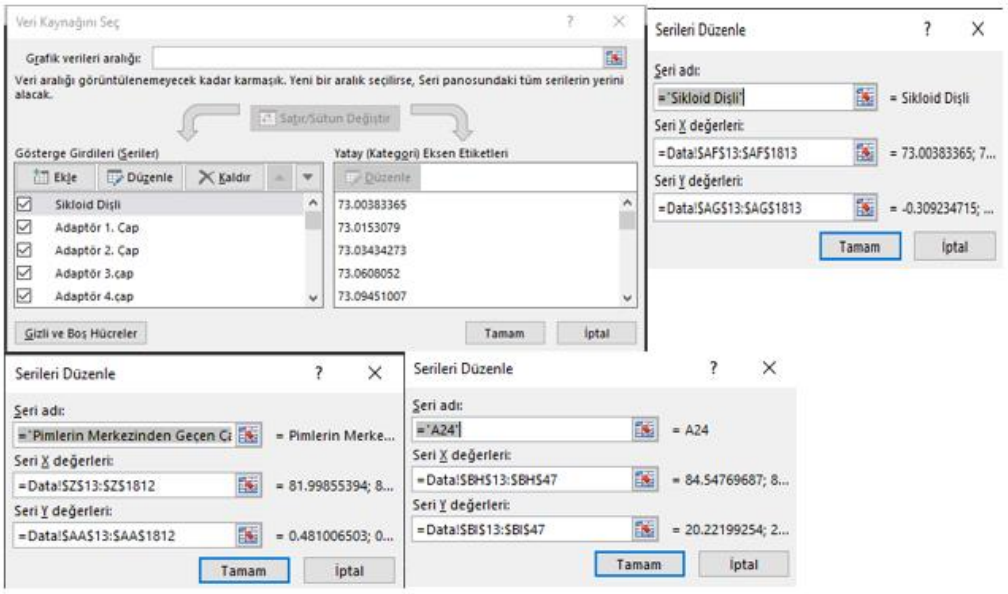
$$SR_x = \frac{SDG}{2}.\cos(d\varphi)\ mm \quad (4.23)$$

$$SR_x = \frac{SDG}{2}.\sin(d\varphi)\ mm \quad (4.24)$$

Sembollerin ve formüllerin anlamları aşağıda verilmiştir (Eşitlik 4.12 – Eşitlik 4.24);

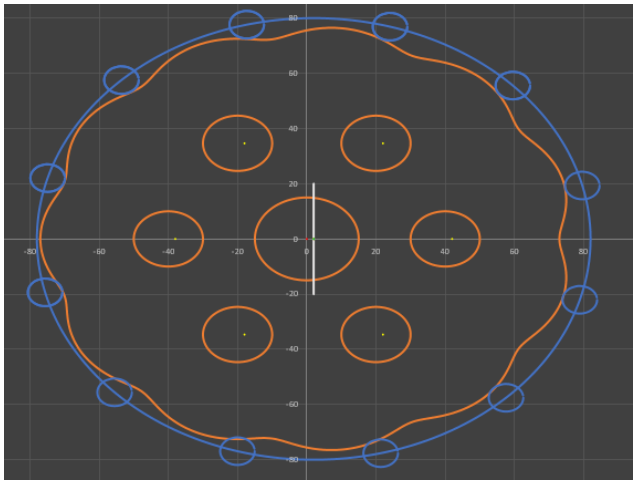
- SP_x: Gövde üzerinde bulunan pimlerin yarıçap değerinden merkez x koordinatı, mm
- SP_y: Gövde üzerinde bulunan pimlerin yarıçap değerinden merkez y koordinatı, mm
- $SPAA$: Sikloid pim sayısına göre pimler arasındaki açı, °
- $SPAA_x$: Pimlerin merkezinin x koordinatı, mm
- $SPAA_y$: Pimlerin merkezinin y koordinatı, mm
- $A13_x$: 1. Sikloid pimin x koordinatı, mm
- $A13_y$: 1. Sikloid pimin y koordinatı, mm
- $A1_x$: İğne bilyeli rulmanın 1. göbek çapının x koordinatı, mm
- $A1_y$: İğne bilyeli rulmanın 1. göbek çapının y koordinatı, mm
- $A6_x$: İğne bilyeli rulmanın 6. göbek çapının x koordinatı, mm
- $A6_y$: İğne bilyeli rulmanın 6. göbek çapının y koordinatı, mm
- SR_x: Sikloid disk rulman göbek yuvası x koordinatı, mm
- SR_y: Sikloid disk rulman göbek yuvası y koordinatı, mm
- $SPPA$: Sikloid pimlerin aynı anda (pattern) açı artış değeri
- HH: İğne bilyeli rulmanların merkezlerinden geçen çap değeri, mm
- HDD: İğne bilyeli rulmanlar arasındaki açı, °
- HHC: İğne bilyeli rulmanın oturacağı yuvanın çapı, mm
- SDG: Sikloid disk göbek çapı, mm
- $SPNAA$: Pimleri oluşturacak dairelerin nokta bulutunun belirlenmesi için noktalar arasındaki açı artış değeri, °

Sikloid disk ve eksantrik kadaların 2 boyutlu görsel grafiği için Excele, 1812 satırdan oluşan x ve y koordinatları tanıtılmıştır (Şekil 4.9).



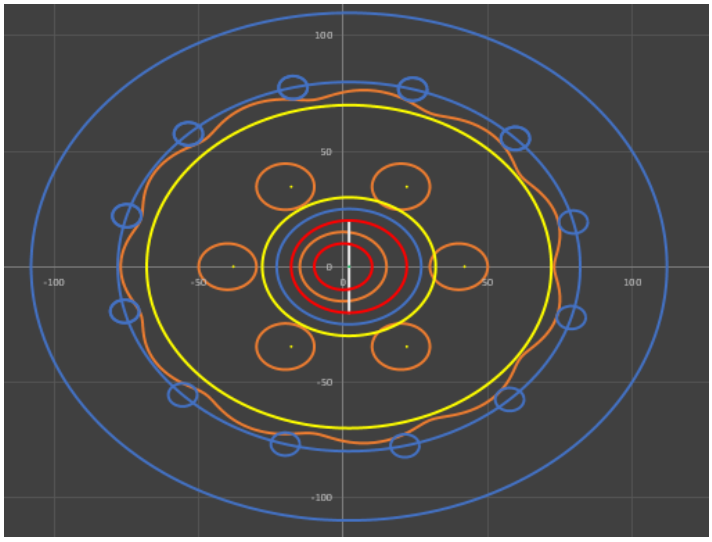
Şekil 4.9. Sikloid disk ve eksantrik kadaların 2 boyutlu görsel grafiği oluşturmak için Excel ortamında 1812 satırdan oluşan x ve y koordinatlarının tanıtılması

Excel'e tanıtılan veriler (Şekil 4.9), 2 boyutlu görsel grafiğe aktarılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Excel'e tanıtılan verilerin, 2 boyutlu görsel grafiğe aktarılması

Sikloid disk ve pim modelini oluşturan x ve y koordinatları, excel veri grafiğine 1812 satırdan oluşarak tanıtılmıştır. Sikloid hız düşürücünün diğer parçaları (çıkış gövde, giriş gövde, eksantrik mil) 1812 satırdan oluşacak şekilde Excel veri grafiğine tanıtılarak (Şekil 4.11). Excel'de oluşturulan 2 boyutlu grafikte, sikloid hız düşürücünün her parçası farklı bir renge boyanmış ve boyanan renkleri oluşturan parçaların isimleri gösterilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.11. 11:1 Çevrim oranında sikloid hız düşürücünün Excel ortamında oluşturulan matematiksel denklemin 2 boyutlu grafiğe parametrik olarak aktarılması

	ÇIKIŞ MİL
	GİRİŞ GÖVDE
	SİKLOİD DİŞLİ
	EKSANTRİK MİL
	ÇIKIŞ GÖVDE (GÖVDE DIŞ ÇAP MAVİ İLE BOYALI

Şekil 4.12. 2 boyutlu grafikte yer alan renklerin parça bazında isimleri

Oluşturulan Excel tablosu EK-1'de gösterilmiştir. 2 boyutlu programın yazılması için gerekli veriler belirtilen eklerde yer almaktadır. Bu çalışma sayesinde kullanıcıdan istenilen girdi değerler girildiğinde oluşan 2 boyutlu grafik değerlendirilerek, kavramsal tasarım çalışması için gerekli ön çalışma yapılmıştır.

4.3.2. Matematiksel denklemin Excel VBA ortamına aktarılması

Kullanıcı dostu ara yüz tasarlamak için kullanıcı girdi değerlerini girerek 1820 Excel satırını otomatik hücrelere aktaran Excel VBA' da makro yazılmıştır. Dashboard sekmesinde kırmızı kutucuk içine alınan girdi değerleri, data sekmesinde hesaplanarak "dashboard" sekmesinde yer alan 2 boyutlu grafiğe yansıtılmaktadır (EK-1). Eğriyi oluşturmak için ikinci bir seçenek olarak, "Sikloid Eğri Oluşturmak için Tıkla" butonuna basarak (EK-1), form ekranı gelmektedir (EK-2).

4.3.3. 2 boyutlu grafiğin 3 boyutlu ortama aktarılması

Sikloid hız düşürücünün matematiksel denklemi, Excel VBA' da çalışması yapılarak 2 boyutlu grafiği oluşturulup, yapılacak modelleme hakkında ön fikir vermektedir. 3 Boyutlu ortama aktarmak istenildiğinde, girdi parametreleri değiştirilip, parametrik olarak 3 boyutlu modeli SolidWorks programında yenilenmektedir.

2 Boyutlu grafik 3 boyutlu ortama aktarılırken lazım olan girdi değerler, sikloid hız düşürücüyü oluşturan parçaların 1820 satırdan oluşan x ve y koordinatları, SolidWorks ortamında spline komutu ile otomatik birleştirip, Excel ortamında görülen 2 boyutlu grafik SolidWorks ortamına aktarılır.

Excel ortamında "Import SW Sikloid", "Import SW Çıkış Gövde" gibi sikloid hız düşürücüyü oluşturan her bir parça için tek tek sekme açılmaktadır. Sekmelerin içine SolidWorks ortamına aktarılacak her bir parçanın x, y ve z koordinatları, 1812 satır olacak şekilde data sekmesinden aktarılmaktadır. Girdi değerleri güncellendikçe, x, y ve z koordinat değerleri de güncellenmektedir. Sikloid diski oluşturan parametrelerin 1812 satırdan oluşan x,y ve z koordinat değerleri görülmektedir (Şekil 4.13 - Şekil 4.14).

	A	B	C	D	E	F	G
1	Oluşturulan Pointlerin Arasındaki Açı	Eğisikloid Eğri Bx Point	Eğisikloid Eğri By Point	Eğisikloid Eğri Bz Point	İğne Bilyalı Rulman 1. Göbek Çapı x	İğne Bilyalı Rulman 1. Göbek Çapı y	İğne Bilyalı Rulman 1. Göbek Çapı z
2	0.344497608	62.00402613	-0.244232905	0	49.99981924	0.060125813	0
3	0.688995215	62.016078	-0.489153192	0	49.99927698	0.120249452	0
4	1.033492823	62.0360762	-0.735446532	0	49.99837322	0.180368744	0
5	1.377990431	62.06388873	-0.983794961	0	49.99710801	0.240481516	0
6	1.722488038	62.09933157	-1.234874558	0	49.99548139	0.300585593	0
7	2.066985646	62.14216946	-1.489352648	0	49.99349342	0.360678805	0
8	2.411483254	62.19211698	-1.747884518	0	49.99114417	0.420758977	0
.790	616.3062201	-13.26037868	61.63199704	0	37.63267328	-9.715748257	0
.791	616.6507177	-12.92971558	61.58489397	0	37.6911328	-9.729806382	0
.792	616.9952153	-12.6081016	61.53910655	0	37.74967578	-9.74351276	0
.793	617.3397129	-12.29525798	61.49532722	0	37.80830012	-9.756866897	0
.794	617.6842105	-11.99085735	61.45422607	0	37.86700369	-9.769868308	0
.795	618.0287081	-11.69452597	61.41644727	0	37.92578438	-9.782516524	0
.796	618.3732057	-11.40584642	61.38260556	0	37.98464004	-9.794811088	0
.797	618.7177033	-11.12436062	61.35328298	0	38.04356857	-9.806751555	0
.798	619.062201	-10.84957311	61.32902567	0	38.10256783	-9.818337494	0
.799	619.4066986	-10.58095464	61.310341	0	38.16163568	-9.829568486	0
.800	619.7511962	-10.31794598	61.2976948	0	38.22076999	-9.840444124	0
.801	620.0956938	-10.05996165	61.29150894	0	38.27996862	-9.850964016	0

... Dashboard | Eksantrik Mil | Formül ve İnpular | **İmp. SW Sikloid** | İmp. SW Çıkış Gövde | İmp. ... ⊕

Şekil 4.13. Sikloid diski oluşturan noktaların x,y ve z koordinatları

	A	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	Oluşturulan Pointlerin Arasındaki Açı	İğne Bilyalı Rulman 5. Göbek Çapı x	İğne Bilyalı Rulman 5. Göbek Çapı y	İğne Bilyalı Rulman 5. Göbek Çapı z	İğne Bilyalı Rulman 6. Göbek Çapı x	İğne Bilyalı Rulman 6. Göbek Çapı y	İğne Bilyalı Rulman 6. Göbek Çapı z	Sikloid Rulman Göbek Çapı x	Sikloid Rulman Göbek Çapı y	Sikloid Rulman Göbek Çapı z
2	0.344497608	-10.00018076	-34.58089034	0	29.99981924	-34.58089034	0	19.99963849	0.120251626	0
3	0.688995215	-10.00072302	-34.5207667	0	29.99927698	-34.5207667	0	19.99855395	0.240498904	0
4	1.033492823	-10.00162678	-34.46064741	0	29.99837322	-34.46064741	0	19.99674645	0.360737489	0
5	1.377990431	-10.00289199	-34.40053464	0	29.99710801	-34.40053464	0	19.99421603	0.480963032	0
6	1.722488038	-10.00451861	-34.34043056	0	29.99548139	-34.34043056	0	19.99096279	0.601171187	0
7	2.066985646	-10.00650658	-34.28033735	0	29.99349342	-34.28033735	0	19.98698685	0.721357609	0
8	2.411483254	-10.00885583	-34.22025717	0	29.99114417	-34.22025717	0	19.98228835	0.841517953	0
1790	616.3062201	-22.36732672	-44.35676441	0	17.63267328	-44.35676441	0	-4.734653444	-19.43149651	0
1791	616.6507177	-22.3088672	-44.37082253	0	17.6911328	-44.37082253	0	-4.617734409	-19.45961276	0
1792	616.9952153	-22.25032422	-44.38452891	0	17.74967578	-44.38452891	0	-4.500648436	-19.48702552	0
1793	617.3397129	-22.19169988	-44.39788305	0	17.80830012	-44.39788305	0	-4.383399759	-19.51373379	0
1794	617.6842105	-22.13299631	-44.41088446	0	17.86700369	-44.41088446	0	-4.265992615	-19.53973662	0
1795	618.0287081	-22.07421562	-44.42353268	0	17.92578438	-44.42353268	0	-4.148431249	-19.56503305	0
1796	618.3732057	-22.01535996	-44.43582724	0	17.98464004	-44.43582724	0	-4.030719912	-19.58962218	0
1797	618.7177033	-21.95643143	-44.44776771	0	18.04356857	-44.44776771	0	-3.912862858	-19.61350311	0
1798	619.062201	-21.89743217	-44.45935365	0	18.10256783	-44.45935365	0	-3.794864348	-19.63667499	0
1799	619.4066986	-21.83836432	-44.47058464	0	18.16163568	-44.47058464	0	-3.676728648	-19.65913697	0
1800	619.7511962	-21.77923001	-44.48146028	0	18.22076999	-44.48146028	0	-3.55846003	-19.68088825	0
1801	620.0956938	-21.72003138	-44.49198017	0	18.27996862	-44.49198017	0	-3.440062767	-19.70192803	0

Dashboard | Eksantrik Mil | Formül ve İnpular | İmp. SW Sikloid | İmp. SW Çıkış Gövde | İmp. ...

Şekil 4.14. Sikloid diski oluşturan noktaların x,y ve z koordinatları 2

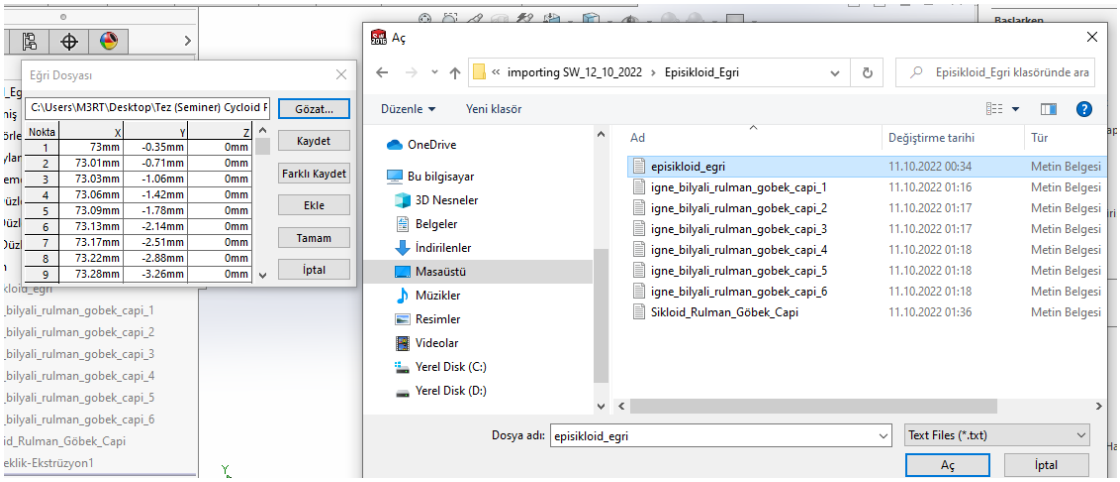
Part dosyası ve diski oluşturan her bir parametrenin koordinat değerleri, ayrı ayrı not defterine kayıt edilerek aynı klasör altında toplanır (Şekil 4.15).

Episikloid_Egri	11.10.2022 01:37	SOLIDWORKS Part...	441 KB
episikloid_egri	11.10.2022 00:34	Metin Belgesi	26 KB
igne_bilyali_rulman_gobek_capi_1	11.10.2022 01:16	Metin Belgesi	28 KB
igne_bilyali_rulman_gobek_capi_2	11.10.2022 01:17	Metin Belgesi	28 KB
igne_bilyali_rulman_gobek_capi_3	11.10.2022 01:17	Metin Belgesi	29 KB
igne_bilyali_rulman_gobek_capi_4	11.10.2022 01:18	Metin Belgesi	29 KB
igne_bilyali_rulman_gobek_capi_5	11.10.2022 01:18	Metin Belgesi	30 KB
igne_bilyali_rulman_gobek_capi_6	11.10.2022 01:18	Metin Belgesi	29 KB
Sikloid_Rulman_Gobek_Capi	11.10.2022 01:36	Metin Belgesi	29 KB

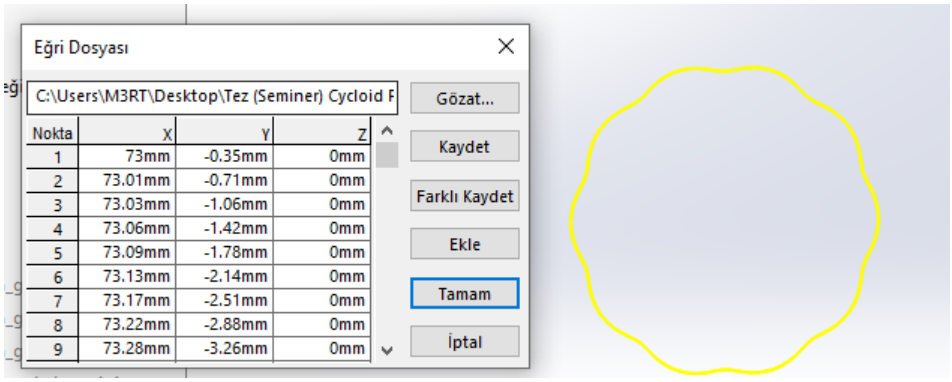
```
49.99981924    0.060125813    0
49.99927698    0.120249452    0
49.99837322    0.180368744    0
49.99710801    0.240481516    0
49.99548139    0.300585593    0
49.99349342    0.360678805    0
49.99114417    0.420758977    0
49.98843373    0.480823938    0
49.98536219    0.540871516    0
49.98192966    0.600899541    0
49.97813627    0.660905843    0
49.97398216    0.720888252    0
49.96946747    0.7808446      0
49.96459238    0.84077272     0
49.95935705    0.900670444    0
49.95376167    0.960535607    0
```

Şekil 4.15. Metin belgesine kayıt edilen koordinat değerleri

SolidWorks programından yeni part dosyası oluşturularak, “Eğri Dosyası” komutu ile oluşturulacak parametrenin koordinatlarının bulunduğu metin belgesi seçilerek eğri oluşmaktadır (Şekil 4.16 - Şekil 4.17).

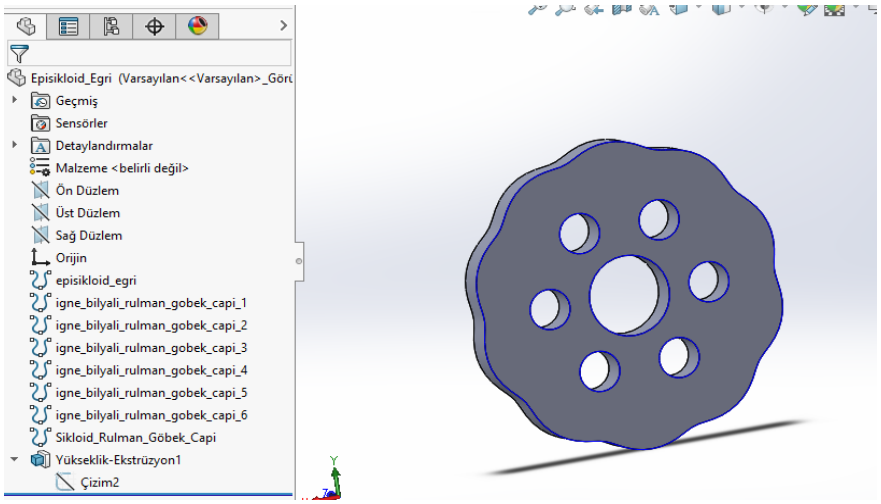


Şekil 4.16. Parametrelerin SW ortamına aktarma



Şekil 4.17. SolidWorks ortamına aktarılan koordinatlar ile eğri oluşturma

Sikloid diski oluşturan tüm parametreler için aynı işlemler yapılıp parçaya istenilen kalınlık verilerek 3 boyutlu modele dönüştürülmektedir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Oluşturulan katı model

Sikloid diski oluşturmak için yapılan adımlar, sikloid hız düşürücüyü oluşturan her bir parça için ayrı ayrı yapılmaktadır. Excel VBA ortamında girdi değerlerinin değişmesiyle değişecek olan koordinat değerleri, Excel ortamında parçaların koordinat değerlerinin bulunduğu sekmedeki değerler kopyalanarak, ilgili parça ve parametrenin bulunduğu metin belgesi klasör yolu değiştirilmeden bulunup kopyalanan değer, metin belgesinde yer alan değer ile değiştirilmektedir. SolidWorks ortamında model açıldığında yeni koordinat değerlerine göre model kendini otomatik güncellemektedir.

Modelleme aşamalarında, 2 boyutlu eğrinin oluşturulması ve C++ dilinde 3 Boyutlu ortama aktarılmasının benzer bir örneği, Shin ve Kwon' un "sikloid redüktörlerde lob profil kullanılarak anlık hız merkezi" adlı çalışmasında da görülmektedir [7]. Benzer çalışmadan başka örnek olarak, Güneş ve Dilipak' ın [14] "sürtünmenin sikloid dişli kutusunun verimi üzerindeki etkisinin hareket analizi ile incelenmesi" adlı çalışmada; sikloid dişli kutusunun hareket analizi yardımıyla MS Excel yazılımında oluşturulan hesaplama programı vurgulanmıştır.

4.4. Sikloid Hız Düşürücünün Modellenmesi

Sikloid hız düşürücünün, kritik tasarım faaliyetleri kapsamında, Visual Basic ortamında matematiksel modellemeden katı modele dönüşen alt bileşenler kontrol edilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan parçalar SolidWorks ortamından Siemens Nx ortamına step model olarak aktarılarak, Visual Basic ortamında düzeltilemeyen unsurlar (radyüs, pah vb.), düzeltilerek montajı yapılmıştır.

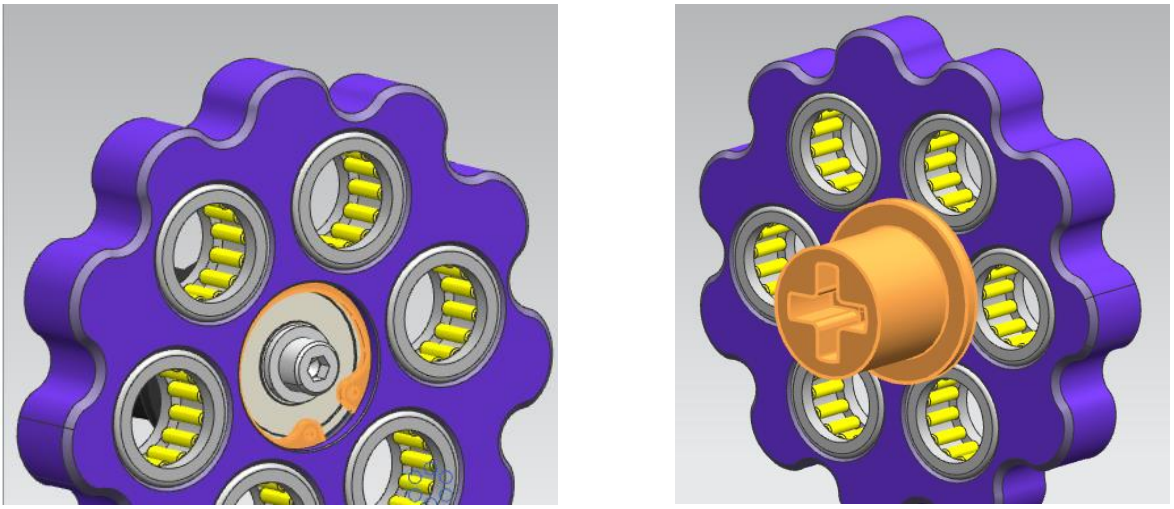
4.4.1. Sikloid disk montajı ve alt parçalarının modellenmesi

Sikloid disk ve eksantrik mil modellemesi, yazılım programından faydalanarak matematiksel modellemesi oluşturulup katı model ortamına aktarılmıştır. Gerekli radyüsler ve pahlar verilip standart parçalar kullanılarak sikloid disk montaj bütünü tamamlanmıştır (Şekil 4.19). Sikloid disk montajını oluşturan alt parçalar, maddeler halinde aşağıda yer almaktadır;

- 1 adet sikloid dişli
- 1 adet eksantrik mil

- 1 adet SKF608-2RS rulman
- 6 adet HK1212 iğne bilyeli rulman
- 1 adet M4 rondela
- 1 Adet M4 DIN912 cıvata
- 1 adet 22'lik segman

Pimlerin yuvarlanacağı 6 adet deliğe, HK1212 rulman ve sikloid diskin göbeğine, SKF608-2RS rulman çakılır. SKF608-2RS rulmanın iç bileziğine, hassas işlenmiş eksantrik mil sıkı geçme ile çakılır. M4 rondela (lazer kesim) ve M4 DIN 912 cıvata takılarak, eksantrik milin rulman içinden çıkması önlenir. Sikloid disk göbeğine çakılan rulman, içinde kilitlemek için 22' lik iç segman atılır. İşlemlerin ardından sikloid disk montaj bütünü tamamlanmaktadır (Şekil 4.19).



(a) (b)

Şekil 4.19. Sikloid disk montaj bütünü: (a) ön görünüm, (b) arka görünüm

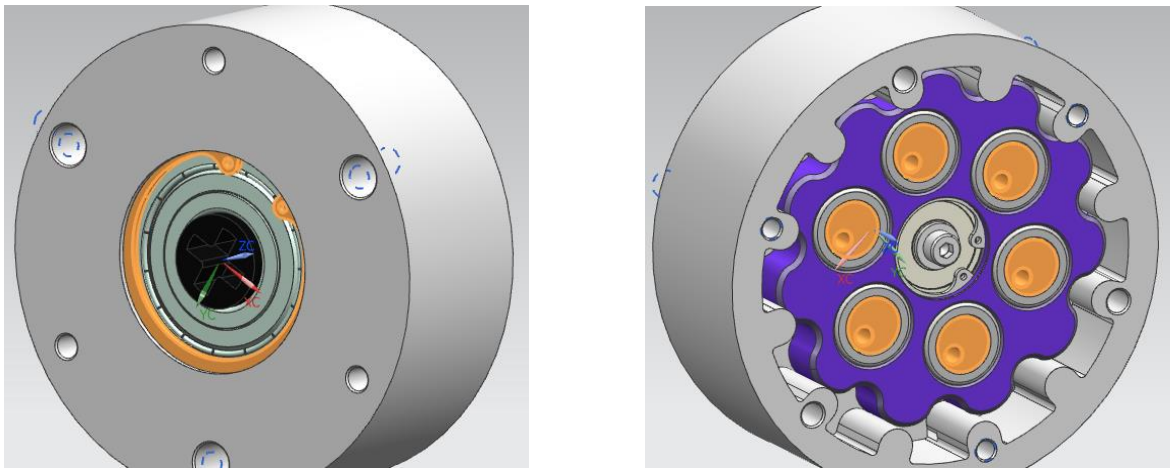
4.4.2. Giriş gövde montajı ve alt parçalarının modellenmesi

Giriş gövde montajını oluşturan alt parçalar maddeler halinde aşağıda yer almaktadır;

- 1 adet sikloid disk montajı
- 1 adet giriş gövde
- 1 adet 6204-ZZ rulman
- 6 adet eksantrik kada

- 1 adet 47’lik segman

Giriş gövde montajının tanımı, giriş gövdede yer alan parçaların montajlanıp, ardından sikloid disk montaj bütünü entegre edilerek tamamlanmaktadır. Giriş gövde montajında ilk olarak, giriş gövde montajının ana elemanı olan giriş gövde parçası eklenir. Giriş gövde parçasının iç yuvasına çıkış gövde montajında yer alan çıkış mili parçasının hareketini sağlamak için 6204-ZZ rulman presle sıkı geçme yapılır. Rulmanın arka kısmına turuncu ile gösterilen bölgeye rulmanı sabitlemek için 47’ lik segman atılır (Şekil 4.20). Sikloid disk montajında bulunan eksantrik mil 6204-ZZ rulmanının iç bileziğine oturacak biçimde, eksantrik milin fatura yüzenine dayandırılır (Şekil 4.20). Çıkış gövde montajında bulunan çıkış mili üzerinde montajlanan pimler, sikloid diskin hareketini gerçekleştirmek amaçlı sikloid diskte pimlerin geçeceği yuva ihtiyacı vardır. Bu hareketi gerçekleştirmek için turuncu ile gösterilen eksantrik kada modellemesi yapılmıştır (Şekil 4.20). Eksantrik kadanın modellenmesi, Vasić, Matejić, Blagojević’ in [11] “sikloidal hız düşürücülerin performans tahmin yöntemi” adlı çalışmasında boşluk miktarının azalmasının verim üzerinde artışa sebebiyet olacağı yönünde çalışmalar yapılmış olup, ve bu çalışmayı tasarımı yansıtmak için eksantrik kada tasarımı yapılıp pim ile yuva arasındaki boşluğu azaltılmıştır. 6 adet eksantrik kada sikloid disk montajında yer alan HK1212 iğne bilyeli rulman yuvasına takılıp, eksantrik kadalar, HK1212 rulman içerisinde yuvarlanarak sikloid diske salınım hareketi gerçekleştirmektedir (Şekil 4.20).



(a) (b)

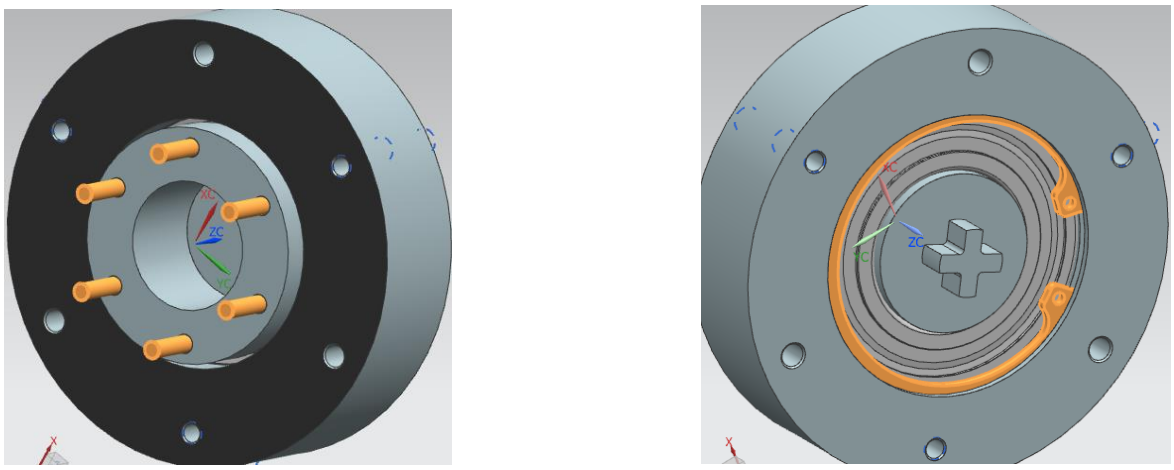
Şekil 4.20. Giriş gövde montajının tamamlanmış modeli: (a) ön görünüm, (b) arka görünüm

4.4.3. Çıkış gövde montajı ve alt parçalarının modellenmesi

Çıkış gövde montajını oluşturan alt parçalar, maddeler halinde yer almaktadır;

- 1 adet gövde çıkış parçası
- 1 adet 6007-2Z rulman
- 1 adet çıkış mili
- 6 adet Ø4 x 18 mm pim
- 1 adet 62’ lik segman

Çıkış gövde montajı, çıkış gövde ve milinden oluşan iki ana parçaya sahiptir. Çıkış gövde montajı, giriş gövde montajından gelecek eksantrik hareketleri, çıkış mili sayesinde doğrusal harekete çevirir. Doğrusal hareket yapacak çıkış mili tahrik edeceği elemana bağlanarak redüktör görevini yerini getirir. Çıkış gövde montajı için ilk olarak çıkış gövde parçası eklenir. Çıkış gövdenin, hassas işlenmiş iç yuvasına SKF 6007-2Z rulman presle sıkı geçme ile montajlanır (Şekil 4.21). Rulmanın sabit kalabilmesi için 62’ lik segman turuncu ile gösterilen bölgeye atılır (Şekil 4.21). Çıkış mili parçasına, sikloid diskte yer alan eksantrik kada içine oturan Ø 4 x 18 mm ebatlarında masura bilyeler sıkı geçme yapılır (Şekil 4.21). 6 adet pim, çıkış miline montajlandıktan sonra eksantrik hareketi doğrusal harekete çevirecek olan çıkış mili, SKF 6007-2Z rulman iç bileziğine çıkış milinde yer alan fatura kısmına kadar oturtulur. İşlemlerin ardından çıkış gövde montaj bütünü tamamlanmaktadır.



(a) (b)

Şekil 4.21. Çıkış gövde montajının tamamlanmış modeli: (a) ön görünüm, (b) arka görünüm

4.4.4. Sikloid hız düşürücü montajı

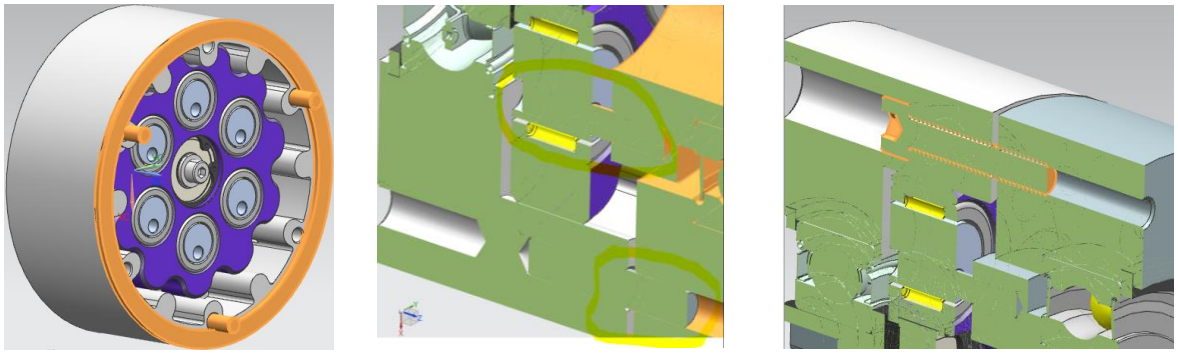
Sikloid hız düşürücü montajını oluşturan montaj bütünleri ve standart parçalar maddeler halinde aşağıda yer almaktadır;

- 1 adet çıkış gövde montajı
- 1 adet giriş gövde montajı
- 1 adet 2 mm EPDM conta
- 3 adet M5 x 24 pim
- 3 adet DIN912 M5 x 25 cıvata

Sikloid hız düşürücü montajı, giriş gövde montajının ve çıkış gövde montajının birbirlerine montajlanmasıyla gerçekleşir. Giriş gövde montajının ve çıkış gövde montajının birleştirilmesi için turuncu ile gösterilen giriş gövde parçasının üzerindeki M5 pim yuvalarına M5 x 24 pim sıkı geçme ile takılmaktadır (Şekil 4.22). Sikloid hız düşürücünün içine kuru çalışmaması için yağ konulması gerekir. Bunun için giriş gövde montajı ve çıkış gövde montajı birleşim noktasına, turuncu ile gösterilen bölgeye 2 mm kalınlığında EPDM conta Loctite 480 ile yapıştırılır (Şekil 4.22). Bu şekilde sızdırmazlık sağlanmaktadır.

Çıkış gövde montajında yer alan, çıkış miline takılan 6 adet rulman masuralarını, sikloid disk üzerinde yer alan 6 adet eksantrik kada yuvasına, çıkış gövde montajı ile birlikte masuralar yuvaya gelecek biçimde ve giriş gövde üzerindeki 3 adet pim, çıkış gövde üzerindeki 3 adet yuvaya sarı ile işaretli bölgeye denk gelecek şekilde montajlanıp, giriş gövde montajı ve çıkış gövde montajının birleştirilmesi tamamlanmaktadır (Şekil 4.22).

Giriş gövde montajı ile çıkış gövde montajı birleştirilip civata ile sabitlenir. Giriş gövde parçasının yuvasından DIN912 M5 x 24 civata, çıkış gövde üzerinde bulunan M5 dişli yuvaya tutturulup torklanarak, iki ana yapı arasındaki conta sayesinde sızdırmazlık da önlenerek, montaj tamamlanmaktadır (Şekil 4.22).



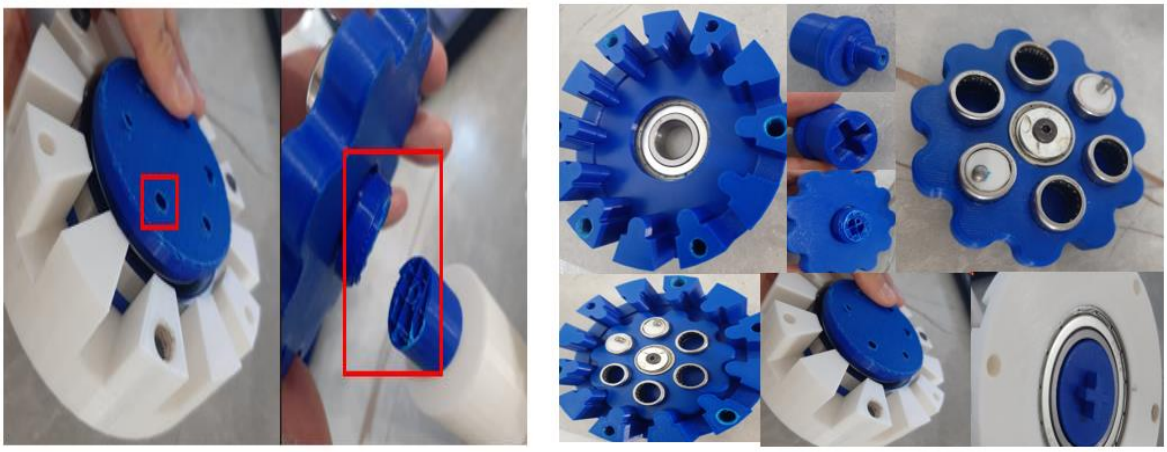
(a) (b) (c)

Şekil 4.22. Sikloid hız düşürücünün montajlanmış modeli: (a) conta ve pimlerin yerleşimi, (b) pimin eksantrik kadaya bağlantısı, (c) giriş ve çıkış gövdeyi cıvata ile sabitleme

4.5. Sikloid Hız Düşürücü Modelinin 3 Boyutlu Yazıcıda Prototip İmalatı

Ön Tasarım faaliyetleri kapsamında, tasarımın dayanımını görmek için bir adet 10:1 çevrim oranında 3 boyutlu yazıdan sikloid hız düşürücüsü üretimi yapılmıştır. Sikloid hız düşürücü montajı yapılıp giriş milinden tork verilmiştir. Ø4 mm pimler çıkış milinin pim yuvaları ezip, eksantrik giriş mili göbek bölgesinde, kırmızı ile gösterilen bölgede kopmaya sebebiyet vermiştir (Resim 4.2).

Üretilip montajı yapılan sikloid hız düşürücü, tasarım iyileştirme faaliyetleri kapsamında yol gösteri olmuştur (Resim 4.2).



(a) (b)

Resim 4.2. Prototip imalatı yapılan sikloid hız düşürücü ve çalıştırma esnasında deforme olan bölgeler: (a) deforme olan bölgeler, (b) prototip imalat ve montajı

4.6. Sikloid Hız Düşürücün Kritik Tasarım Faaliyetleri Kapsamında Tasarım İyileştirmelerinin Yapılması ve Modellemenin Dondurulması

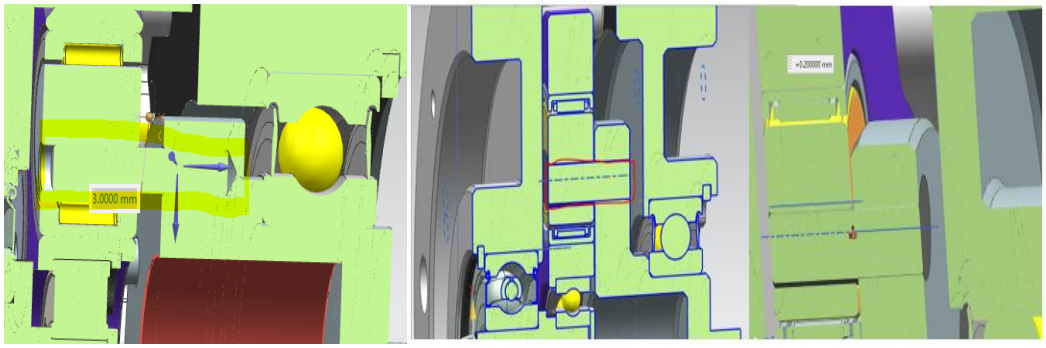
Üretilen prototip imalattan alınan veriler ışığında, ön tasarımı yapılan sikloid hız düşürücü modellemesine göre daha performanslı, verimli, mukavim ve hafif bir redüktör yapma ihtiyacı oluşmuştur. Tasarım iyileştirme faaliyetleri kapsamında yapılacak maddeler aşağıda yer almaktadır;

1. Vasić, Matejić, Blagojević' in [11] "sikloidal hız düşürücülerin performans tahmin yöntemi" adlı çalışmasına istinaden, eksantrik kada ile çıkış mili mesafesini 3 mm' den 0,2 mm' ye düşürerek pim üstüne gelen torkun azaltılması
2. Prototip imalat sonucu alınan veriler ışığında, dayanımı düşük olan pimin çap değerinin 4 mm' den 10 mm' ye büyütülmesi
3. Pimin, çıkış gövde parçasının arkasından patlatılarak modelin güncellenmesi
4. Pimin çapı büyüdüğü için eksantrik kadanın iç ve dış çapının büyütülmesi
5. Eksantrik kada büyüdüğü için sikloid disk üzerinde yer alan rulman yuvalarının, pimlerin merkezinde geçen çap değerlerinin büyütülmesi ve yuvaları büyütüldüğü için standart rulmanların değiştirilmesi
6. Eksantrik giriş milinin, sikloid disk göbek yuvasında yer alan rulmanın iç bileziğine oturan yüzeyine ait çap değerinin büyütülmesi
7. Sikloid diskin, pim merkezinden geçen çap değeri büyütüldüğü için sikloid diskin çap değerinin büyütülmesi, giriş gövde ve çıkış gövde dış çap değerlerinin büyütülmesi
8. Sızdırmazlık elemanı EPDM contadan, NBR O-ring contaya dönülmesi
9. Sikloid hız düşürücünün, tüm parçaları üzerinde hafifletme çalışmalarının yapılması
10. Giriş gövde montaj ile çıkış gövde montajı birleştiren 3 adet pim sayısını, 2' ye düşürerek tolerans yığılmasının azaltılması
11. Modellemeyi eklemeli modüler yapıya uygun hale getirmek için gerekli unsurların oluşturulması
12. Yağ koyma tapasının model üzerinde düzeltmesi

Vasić, Matejić, Blagojević' in [11] "sikloidal hız düşürücülerin performans tahmin yöntemi" adlı çalışmasında boşluk miktarlarının ne kadar azaltılırsa verim artacağı yönünde çalışmalar yapmışlardır. Yapılan tez çalışmasına istinaden 1, 2 ve 3 numaralı iyileştirme faaliyeti kapsamında, torku yükseltmek için boşluk miktarının 3 mm' den, 0,2 mm' ye düşürme

çalışması (Şekil 4.23), kesme ve burkulmayı dayanımı arttırmak için pim çap değerinin 4mm' den 10 mm' ye çıkartma çalışması (Şekil 4.23) yapılmıştır.

Pim, çıkış milinin arkasından patlatılarak, kesme dayanımı için çıkış miline gelen alan arttırılarak pimin kesme dayanım değeri yükseltilmiştir (Şekil 4.23).

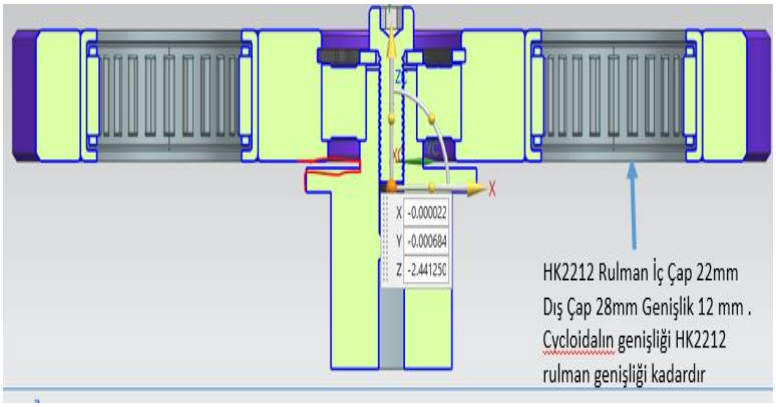


(a) (b)

Şekil 4.23. Tasarım iyileştirmesi 1: (a) 3 mm boşluk, (b) 0,2 mm boşluk

4,5 ve 6 numaralı iyileştirme faaliyetleri kapsamında, pim çap değeri 4 mm' den 10 mm' ye çıktığı için eksantrik kadanın geometrik ölçüleri değişmiştir. Eksantrik kadanın iç çapı 10 mm ve dış çapı 22 mm' ye yükseltilmiştir. Eksantrik kada büyütüldüğü için yuvası da büyümüştür. HK1212 standart rulman, HK2212 olacak şekilde güncellenip, eksantrik kada, rulman iç yuvasına oturması sağlatılmıştır.

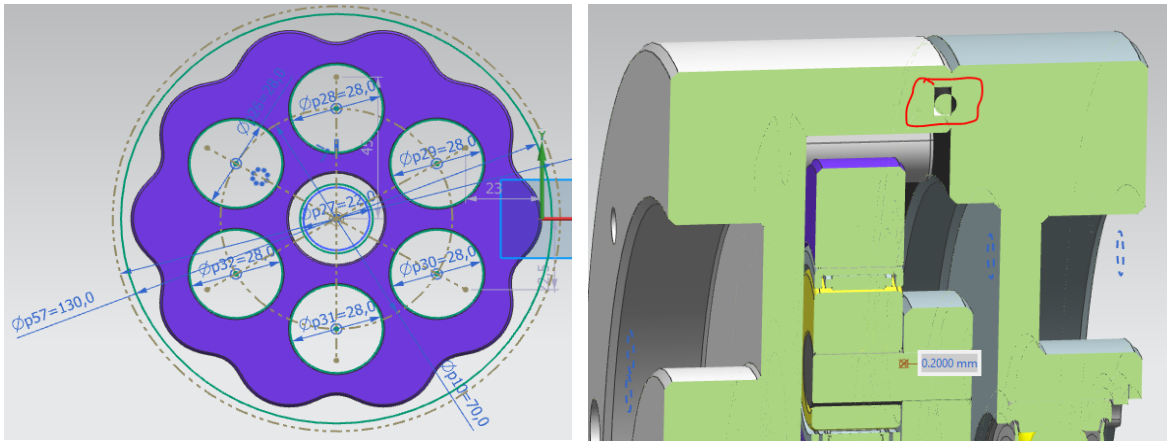
Eksantrik giriş milin rulman yuvasına oturan, çap değeri 8 mm olan unsuru, kesme dayanımını azalttığı için çap değeri 15 mm' ye yükseltilmiştir. Çap değeri büyütüldüğü için sikloid disk göbeğine oturan rulman, 6002 kapaksız rulman olarak güncellenmiştir. 6002 rulman iç çap değeri 15 mm ve dış çap değeri 32 mm olduğu için sikloid disk göbek yuvasının çapı, 6002 rulmana uygun olacak şekilde, çap 32 mm' ye yükseltilmiştir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24. Tasarım iyileştirmesi 2

7 ve 8 numaralı iyileştirme faaliyetleri kapsamında, sikloid disk üzerinde bulunan yuvaların çapları büyütüldüğü için sikloid disk pimlerinin merkezinden geçen çap değeri, 70 mm' den 130 mm' ye yükseltilmiştir. Giriş ve çıkış gövdelerinde dış çap değerleri, 100 mm' den 150 mm' ye çıkarılmıştır. Giriş ve çıkış gövde de kullanılan mevcut rulmanlarda değişiklik olmamıştır. Pim merkezinden geçen çap değeri, sikloid disk büyütülüp eksantrik kadanın merkez çap değeri değişlik olduğundan, 44 mm' den 70 mm' ye yükseltilmiştir.

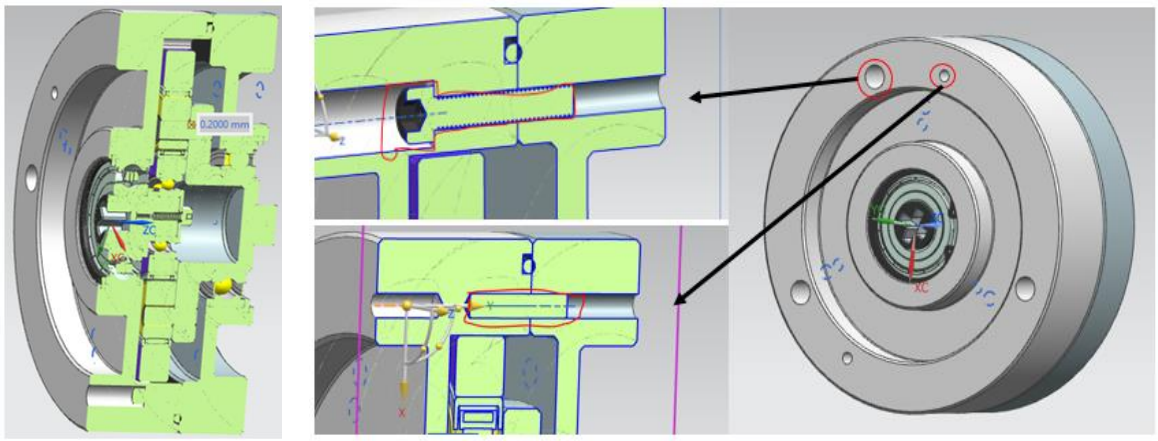
Giriş gövde montajı ve çıkış gövde montajı arasındaki sızdırmazlığı sağlayan EPDM conta, hafifletme çalışmaları kapsamında, alanda daralma ve EPDM contanın alan darlığı sebebiyle işlevini getiremeyeceği öngörüsü, "NBR70 Code 505" O-Ring conta tipi kullanılmasına yöneltmiştir. Conta kanal yuvası değerleri [29] referans alınarak giriş gövde üzerine O-Ring conta kanalı açılmıştır (Şekil 4.25).



(a) (b)

Şekil 4.25. Tasarım iyileştirmesi 3: (a) dişli tasarım revizyonu, (b) conta kanalı

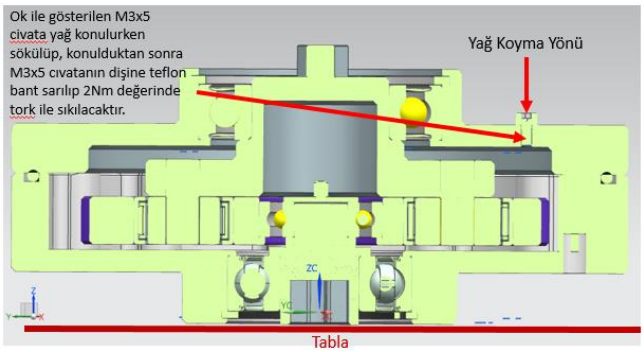
9 ve 10 numaralı iyileştirme faaliyetleri kapsamında, ağırlık hafifletme çalışmaları yapılmış, dayanımı azaltmayan yüzeylerden boşaltma yapılarak ağırlık kaldırılmıştır. Sikloid disk cidar kalınlığı, dayanım kriterini sağlayacak şekilde azaltılmış, giriş gövde ve çıkış gövde de muhtelif bölgelerden boşaltmalar yapılmıştır (Şekil 4.26). Kırmızı ile gösterilen bölgeden, iki gövde montajının merkezlenmesi tolerans birikmesini önlemek adına 3 adet pimden 2 adet pime düşürülmüş ve giriş gövdenin dış yüzeyinde kalan 2 adet pim deliği kaldırılmıştır (Şekil 4.26).



(a) (b)

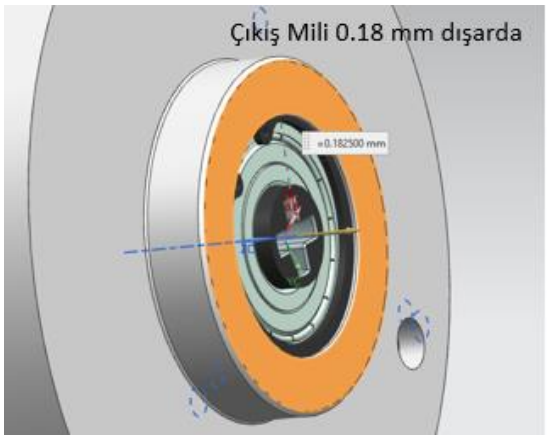
Şekil 4.26. Tasarım iyileştirmesi 4: (a) kesit görünümü, (b) pim ve cıvata bağlantı delikleri

11 numaralı iyileştirme faaliyetleri kapsamında, sisteme yağ ekleyebilmek için çıkış gövdeye yağ tapası deliği açılıp M3 kılavuz çekilmiştir. Ok ile gösterilen yönde yağ konulup, DIN912 M 3 x 5 cıvataya sızdırmazlık sağlaması adına teflon bant sarılıp (Şekil 4.27), cıvata tork sıkma tablosundan alınan veriler ışığında 2 N.m değeriyle torklanır [30-31]. Yağ koyma pozisyonu, giriş gövde montajı tabla, masa vb. düz yüzeye oturtulup yapılmaktadır (Şekil 4.27).



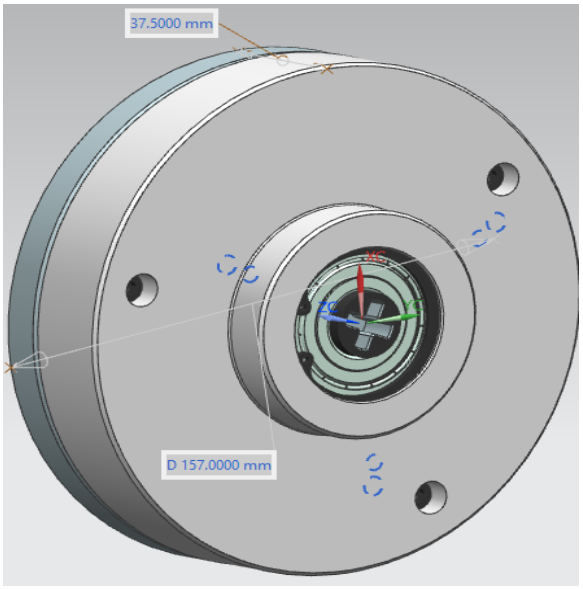
Şekil 4.27. Tasarım iyileştirmesi 5

12 numaralı iyileştirme faaliyetleri kapsamında, eklemeli redüktör yapısına sahip olan model, giriş gövdenin turuncu ile gözüken düzlemden, giriş mili arasındaki mesafe 1,1 mm mesafe içeride görülmektedir (Şekil 4.28). Arka arkaya eklenecek redüktör yapısı, içeride olduğundan dolayı giriş milinin arkasına takılacak çıkış mili, 1,1 mm mesafe dışarıda kalmasına sebebiyet vermektedir. Bu sebeble, giriş gövde yüzeyine göre 1,1 mm mesafe içeride olan giriş mili, 0,18 mm dışarıda kalacak şekilde model güncellenmiştir (Şekil 4.28).



Şekil 4.28. Tasarım iyileştirmesi 6

Tasarım iyileştirme faaliyetleri kapsamında, gövde dış çap değeri 100 mm' den 157 mm çıkartılıp, dış çapın büyümesi ağırlık anlamında artış yaşatmıştır. Bu artışı telefi edebilmek için ağırlık hafifletme çalışmaları kapsamında gerekli boşaltmalar yapılarak, sikloid hız düşürücünün çap 100 mm değerindeki ağırlığından daha hafif bir model elde edilmiştir. Genişlik, 55 mm' den 37,5 mm' ye düşürülerek, sistemde boşluklardan dolayı oluşan burkulma ve kesme dayanımın değerlerinde azaltma gerçekleşip aynı zamanda ağırlıktan kazanç sağlanmıştır. Genişliğin azalmasındaki diğer fayda, alandan % 35 tasarruf edilerek portatif sikloid hız düşürücü tasarım felsefesine uygunluğu korunmuştur (Şekil 4.29).



Şekil 4.29. Tasarım iyileştirme faaliyetleri kapsamında sikloid hız düşürücünün 3 boyutlu montajlanmış modeli

Kritik tasarım faaliyetleri kapsamında sikloid hız düşürücü katı model görüntüleri EK-3'te mevcuttur.

4.7 Ham Malzeme ve Kaplama Seçimi

Sikloid hız düşürücü tasarımında kullanılacak parçaların, malzeme ve kaplama çeşitleri maddeler halinde aşağıdaki gibidir;

1. Giriş Gövde: Malzeme, AISI 1015 (DIN ST37-2) seçilmiştir. Parçaya kumlama yaptırılmış, kaplama tip olarak, katı film yağlayıcı (SI-0000-0195) tip 1 ve üzerine çinko fosfat (MIL-DTL-1623G) tip z sınıf 4 yapılacaktır.
2. Çıkış Gövde: Malzeme, AISI 1015 (DIN ST37-2) seçilmiştir. Parçaya kumlama yaptırılmış, kaplama tip olarak, katı film yağlayıcı (SI-0000-0195) tip 1 ve üzerine çinko fosfat (MIL-DTL-1623G) tip z sınıf 4 yapılacaktır.
3. Sikloid Disk: Malzeme, AISI 1015 (DIN ST37-2) seçilmiştir. Parçaya kumlama yaptırılmış, kaplama tip olarak, katı film yağlayıcı (SI-0000-0195) tip 1 ve üzerine çinko fosfat (MIL-DTL-1623G) tip z sınıf 4 yapılacaktır.
4. Eksantrik Giriş Mili: Malzeme, AISI 1015 (DIN ST37-2) seçilmiştir. Parçaya kumlama yaptırılmış, kaplama tip olarak, katı film yağlayıcı (SI-0000-0195) tip 1 ve üzerine çinko fosfat (MIL-DTL-1623G) tip z sınıf 4 yapılacaktır.

5. Çıkış Mili: Malzeme, AISI 1015 (DIN ST37-2) seçilmiştir. Parçaya kumlama yaptırılmış, kaplama tip olarak, katı film yağlayıcı (SI-0000-0195) tip 1 ve üzerine çinko fosfat (MIL-DTL-1623G) tip z sınıf 4 yapılacaktır.
6. Eksantrik Kada: Malzeme, AISI 52100 (Rulman Çeliği) seçilmiştir. Parçaya kumlama yaptırılmış, kaplama tip olarak, katı film yağlayıcı (SI-0000-0195) tip 1 ve üzerine cadmium kaplama yapılacaktır.
7. Pim: Malzeme, AISI 52100 (Rulman Çeliği) seçilmiştir. Parçaya kumlama yaptırılmış, kaplama tip olarak, katı film yağlayıcı (SI-0000-0195) tip 1 ve üzerine cadmium kaplama yapılacaktır.

Üzerine gelen yük, pim ve eksantrik kadadan daha düşük olan parçaların malzemesi, 120 HRB sertliğinde ve malzeme tipi olarak AISI 1015, DIN ST 37-2, EN S235JR, C15 malzemelerinden herhangi biri seçilebilmektedir. Pim ve eksantrik kadanın malzemesi, parçaların üzerine yük geldiği için AISI 52100 rulman çeliği seçilmiştir. Rulman çeliği seçilmesinin sebebi, akma mukavemetinin yüksek olması ve bu bölgelerin geometrik yapısından dolayı gelecek olan yüksek Von-Mises sonuçlarından kaynaklıdır.

Eksantrik giriş mili ve çıkış mili rulmanların göbek çaplarına sıkı geçme olacaktır. Gövdeler ve sikloid diske geçecek rulmanlar presle sıkı geçme yapılarak montajlanacaktır. Rulmanların sertlik değeri parçaların sertlik değerinden daha yüksek olduğu için sıkı geçme işlemi sırasında parçalar rulmanı ezemeyecek ve rulmanların sertlik değeri daha yüksek olduğu için parçayı ezerek sıkı geçme montajı yapılmasına sebebiyet verecektir. Bu sebeple rulman yüzeyine oturtulan parçaların sertlik değeri, rulman çeliğinden daha düşük sertlik değerine sahip olan malzemeden seçilmelidir.

Sertlik değeri 48 HRC ve malzemesi AISI 52100 rulman çeliği olan pim ve eksantrik kada, çıkış miline ve HK2212 rulmanın içine montajı yapılacaktır. Çıkış miline montajı yapılacak pim malzemesinin sertlik değeri çıkış milinden yüksektir. Bu sebeple sıkı geçme montajı yapılırken çıkış mili üzerinde yer alan pim yuvarının içine ezerek geçecektir. HK2212 rulman iç yuvasına eksantrik kadalar, tatlı geçme toleransı ile montajlanacaktır.

Malzemeye kumlama yapılması, arkasından yapılacak kaplamanın yüzeye daha iyi yapışmasını sağlayacaktır. Katı film yağlayıcı ve kaplama yapılması, malzemenin aşınma direncini arttırıp korozyon dayanım ömrünü uzatacaktır.

AISI 1015 çeliğinin karşılığı olan C15 çeliğinin kimyasal kompozisyonu ve AISI 52100 rulman çeliği malzemesinin kimyasal kompozisyonu tablo halinde EK-4'te yer almaktadır.

Kaplama çeşitlerinin teknik özellikleri maddeler halinde aşağıda yer almaktadır [34-35];

1. Kumlama: Metalin zamanla pas ve korozyona uğramasından dolayı üzerindeki yağ, kir, pas ve korozyonu kaldırıp boyama işlemi ile metalin kullanım ömrünü uzatmak için uygulanan bir yöntemdir.
2. Katı Film Yağlayıcı: Genellikle hareketli parçalara uygulanan ve kullanımları esnasında sürtünmeden oluşacak zararları en aza indiren bir kaplamadır. Parçaya yağlayıcı özellik vererek parçaların aşırı yüklendiği zorlu çalışma koşullarında bile sağlam kalmasını sağlar.
3. Çinko Fosfat Kaplama: Fosfatlama işlemiyle metal yüzeyinde yalıtkan ve suda çözünemeyen fosfat kristallerinden meydana gelen koruyucu bir film oluşturulur. Fosfat uygulamasının temel amaçları; boyanın tutunmasını artırarak boya altında meydana gelebilecek korozyonu engellemek, pas giderici yağlar için iyi bir zemin sağlayarak korozyon direncini arttırmaktır.
4. Cadmium Kaplama: Elektrolitik Cadmium kaplama çelik ve dökme demir eşyanın korozyondan korunması amacıyla sanayide yaygın olarak uygulanmaktadır. Genelde 10 ila 20 mikronluk bir kaplama kalınlığı açık hava şartlarında ana metali korozyondan korumaya yeterlidir.

4.8. Standart Parça Seçimi

Standar parça olarak; rulman, cıvata, masura, segman ve O-Ring kullanılmıştır. Kullanılan standart parçaların listesi tabloda gösterilmiştir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. Standart parça listesi

Rulmanlar	Cıvatalar	Masuralar	Segmanlar	O-Ring
6204_2Z Rulman (Keçeli)	DIN 912 M4 x 12 8.8	AISI 52100 100 CR6 Ø10 x 22	DIN 472 Ø47	NBR70 Code 505 O-Ring
6002 Rulman (Kapaksız)	DIN 912 M5 x 25 8.8	AISI 52100 100 CR6 Ø5 x 23,8	DIN 472 Ø62	
6007_2Z Rulman (Keçeli)	DIN 912 M3 x 5 8.8			
HK2212 İğne Bilyeli Rulman				

Rulmanlar, parçanın yapacağı mekanik hareket yapısına, üzerine gelecek eksenel ve radyal yüklere ve oturacağı yuvanın geometrik boyutlarına göre seçilmiştir [36].

Giriş gövde montaj ile çıkış gövde montajını birleştirmek için bağlantı elemanı olarak, cıvata kullanılmaktadır. Malzeme sınıflandırması olarak çelik ve paslanmaz olarak ikiye ayrılır. Tasarımda kullanılan cıvata tipi DIN 912 (imbus başlı), malzemesi 8.8 mukavemetinde çelik olacak şekilde seçilmiştir (Eş. 4.25, Eş. 4.26). DIN 912 cıvatanın metrik sınıfına göre boyutları ve torkmetre değerleri yer almaktadır [30-31].

Cıvatanın çekme dayanımı: $8.8 = 64\ {}^{Kg}/_{mm^2} = 64\,.\,9{,}81 = 627{,}84\ MPa$ (4.25)

Cıvatanın kopma dayanımı: $8.10 = 80\ {}^{Kg}/_{mm^2} = 80\,.\,9{,}81 = 784{,}8\ MPa$ (4.26)

Tasarımda kullanılan masuraların tipi AISI 52100 100 CR6 seçilmiştir, sertlik değeri 60-64 HRC aralığındadır ve rulman çeliği kategorisine girmektedir (EK-4). Tasarımda DIN 472 iç segman kullanılmıştır ve paslanmaz yay çeliğinden üretilmektedir Ölçüleri; iç çap değeri 47 mm ve dış değeri 62 mm ölçülerinde seçilmiştir [37]. O-Ring' in malzemesi, Sikloid hız düşürücünün içinde kullanılacak O-Ring malzemesi (Çizelge 4.8), yağ ile uyumlu O-ring malzemesi NBR70 Code 505 (Akrilonitril Butadiyen Kauçuk) seçilmiştir [38]. NBR piyasa adı "nitril kauçuk" olarak adlandırılmaktadır. Fiyat ve fonksiyon yönünden en çok tercih edilen malzeme tipidir. NBR' nin çalışma sıcaklığı aralığı, $-50\ °C\ ile\ 120\ °C$' dir.

Çizelge 4.8. Dişli yağları için kullanılacak elastomer seçimi [38]

Dişli yağlarının conta malzemeleri ile uyumuna genel bakış

	Kısaltmalar	NBR	ACM	VQM	FKM	PTFE
	Tip	Akrilonitril butadiyen kauçuk	Akrilat kauçuk	Silikon kauçuk	Florlanmış kauçuk, örn: Viton	Politetrafuro etilen
	Termal direnç	100 °C'ye kadar	125 °C'ye kadar	125 °C'ye kadar	150 °C'ye kadar	150 °C'ye kadar
Klüberoil GEM 1 N	Mineral yağ	•	•		■	■
Klübersynth GEM 4 N	Polialfaolefin	•	•		•	•
Klübersynth GH 6 Klübersynth UH1 6	Poliglikol	•	X		■	•

• uyumlu ■ belli koşullarda uyumlu ■ Mineral yağlar sadece 125 °C'ye kadar olan contalarla uyumludur.
Tüm dişli yağları ile uyumlu ancak hava dağılımı bozulabilir X uyumlu değil

4.8.1. Standart parçaların montajlanmasında kullanılacak tolerans çifti

Rulmanların, geçme tolerans çifti olarak “H7 / k5” tolerans çifti kullanılmıştır. Eksantrik kadanın ile HK2212 rulman arasında ve AISI 52100 100 CR6 Ø10 x 22 masura ile eksantrik kada pim yuvası arasında tolerans çifti içinde rahat hareket edebilmesi için için kaygan geçme “H8 / h9” tolerans çifti kullanılmıştır Giriş gövde montajı ile çıkış gövde montajı arasında kullanılan masura gövde yuvası arasında “H7 / k5” tolerans çifti kullanılmıştır [39-40].

4.8.2. Rulmanların montajında kullanılacak yağlama tipi

Gres; baz yağ, koyulaştırıcı ve katkı maddesi içeren bir kayganlaştırıcıdır. Aşırı yağ, çalışma sırasında yatağın sıcaklığını artırma eğilimindedir. Sentetik gres 20-30 °C düşme noktasının altındaki bir sıcaklıkta kullanılmalıdır. Yatak yüküne göre gres seçilirken, ağır yük için küçük penetrasyonlu gres seçilmelidir. Yüksek basınç altında çalışırken, küçük penetrasyona ek olarak, aynı zamanda yüksek yağ filmi mukavemeti ve aşırı basınç performansına sahiptir. Gres aynı zamanda, toz, nem ve diğer yabancı maddelerin yatağa girmesini önleyen bir sızdırmazlık fonksiyonuna sahiptir [41].

Geniş uygulama alanına sahip, üstün performanslı içeren, lityum kompleks sabunlu sentetik grestir. Yüksek kalitede sentetik yağ yüzdesiyle üretilmiş özel bir grestir. Yüksek sıcaklık ve basıncın bulunduğu ve suya karşı yüksek dayanımın istendiği tüm yağlama noktalarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Otomotiv ve endüstriyel uygulamalarda rulman ve yataklarda, üniversal bağlantılar ve şasilerde kullanılabilir. İş makineleri, traktörler ve tüm

tarım makineleri, sabit ve mobil vinçler, kamyon, tır çekicileri, kaya kırıcılarında kullanıma uygundur. Ayrıca kâğıt ve şeker makinelerinde, ıslak kısım rulmanlı yataklar ve madencilik endüstrisi uygulamaları için tavsiye edilir [42].

Rulman gövde yuvasına, presle sıkı geçme yöntemiyle montajı yapılacaktır. Sıkı geçme yapmadan önce hem iki malzemenin birbirine karşı korozyonunu önlemek, hem de sıvama yapmadan rahat şekilde sıkı geçme yapabilmek adına, yuvaya ve rulman dış çapına gres [42] sürülmesi gerekmektedir. Aynı yöntem rulman göbeklerine mil oturtulurken de yapılmalıdır.

4.9. Sikloid Hız Düşürücüsünde Yağlama

Araç şanzımanlarında kullanılan yağ oranları, karter iç hacmin %50 ile %70' değer aralığını aşmamaktadır. Sikloid hız düşürücüsünün içine koyulacak yağ hacmi, %70 olarak hesaplanmıştır. Sikloid hız düşürücünün yağ konulacak bölgenin hacmi hesaplanırken toplam hacimden giriş ve çıkış gövdenin hacmi harici diğer tüm parçaların hacmi çıkarılmıştır. Parçalara parametreler tanımlanıp, sikloid hız düşürücüsüne konulacak yağ miktarı, hesaplanmıştır (Eş. 4.27).

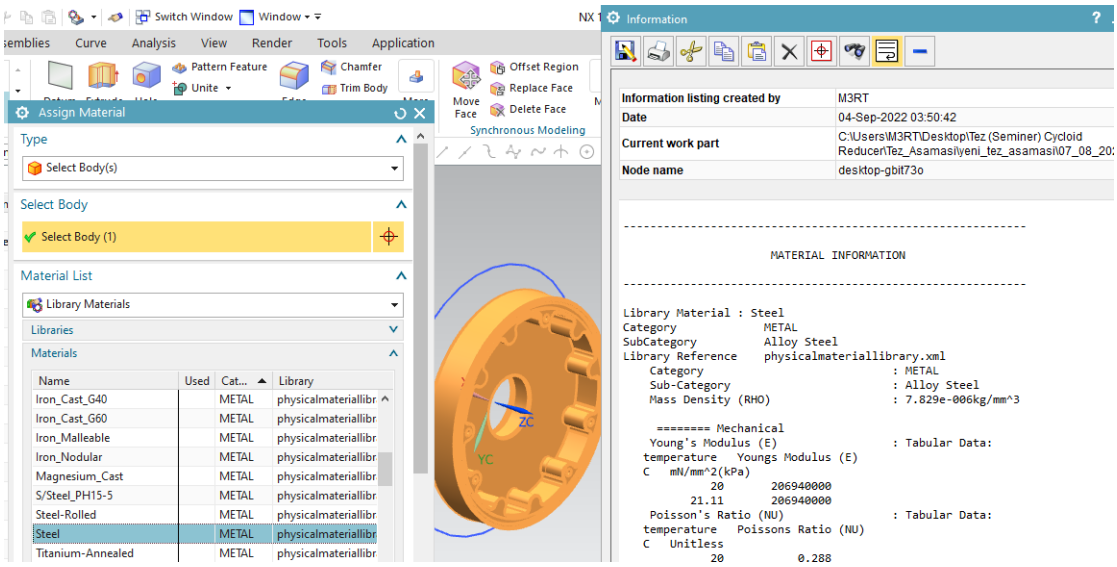
A: Giriş gövde montaj hacim, mm^3
B: Çıkış gövde montaj hacim, mm^3
C: Toplam hacim, mm^3
D: Giriş gövde montajında kullanılan, giriş gövde parçası hariç toplam hacim, mm^3
E: Çıkış gövde montajında kullanılan, çıkış gövde parçası hariç toplam hacim, mm^3
F: Çıkış ve giriş gövde montajında kullanılan, giriş ve çıkış gövde parçası hariç toplam hacim, mm^3
G: Karter iç hacmi, L
H: Konulacak yağ oranı (Karter hacminin %70' i), L

$$C = A + B = 271992\ mm^3 + 76512\ mm^3 = 348504\ mm^3 = 0{,}348\ dm^3 = 0{,}348\ L$$
$$F = D + E = 119517\ mm^3 + 63778\ mm^3 = 183295\ mm^3 = 0{,}183\ dm^3 = 0{,}183\ L$$
$$G = C - F = 0{,}348\ L - 0{,}183\ L = 0,164\ L\ (Karter\ \%100\ dolu\ olduğunda)$$
$$H = G.\%70 = 0{,}164\ L\ .\ {}^{7}/_{10} = 0{,}115\ L = 115\ mL \quad (4.27)$$

50 mL' lik enjektör ile yağ koyma tapasından, yapılan hesaplamalar sonucu [38], ISO VG 220 standartına uygun Shell Omela S4 GX V 220 marka yağından [43], 115 mL eklenecektir. Yağ eklendikten sonra NBR 70 contadan yağ kaçağının olup olmadığı tespit edilip, sızıntının olmadığı doğrulanıp, Shell Omela S4 GX V 220 marka yağ [43] kutusu üzerinde bulunan bakım periyotları ve talimatı uygulanmalıdır.

4.10. Sistemin Ağırlığının Hesaplanması

Sistemin ağırlığının hesaplanması için Nx ortamında malzeme ataması yapılmıştır. Sistemde kullanılan tüm parçalar çelik olduğu için malzeme tanımlamasına "Alloy Steel" ve yoğunluğu 7,83 $^{gr}/_{cm^3}$ olacak şekilde tüm parçalara malzeme ataması yapılmıştır (Şekil 4.30)



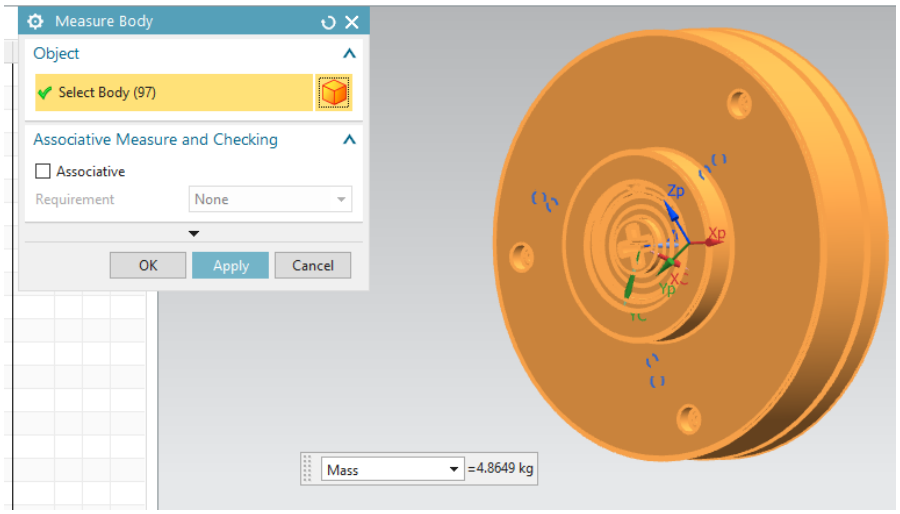
Şekil 4.30. Nx ortamında parçalara malzeme tanımlama

Eksantrik kada: $27\ gr\ .6\ adet = 162\ gr$, DIN 912 M4 x 12: $2\ gr$, Ø4 rondela : $2\ gr$, eksantrik mil: $58\ gr$, sikloid disk: $618\ gr$, HK2212 rulman: $15\ gr\ .6\ adet = 90\ gr$, 6002 rulman: $28\ gr$, 47' lik segman: $6\ gr$, 6204 rulman: $106\ gr$, giriş gövde: $1760\ gr$, olmak üzere giriş gövde montajının toplam ağırlığı; $2832\ gr$ olarak tespit edilmiştir.

Ø10 Masura: $13\ gr\ .6\ adet = 78\ gr$, çıkış mili: $474\ gr$, 62' lik segman: $11\ gr$, 6204 rulman: $152\ gr$, çıkış gövde: $1267\ gr$, olmak üzere çıkış gövde montajının toplam ağırlığı; $1982\ gr$ olarak tespit edilmiştir.

DIN 912 M5 x 25: $5\ gr\ .3\ adet\ =\ 15\ gr$, Ø5 masura: $4\ gr\ .2\ \ adet\ =\ 8\ gr$, DIN 912 M5 x 3: $1\ gr$, NBR70 O-Ring: $1\ gr$ olmak üzere standart parçaların toplam ağırlığı; $28\ gr$ olarak tespit edilmiştir.

Sistemin toplam ağırlığı; $2{,}83\ kg + 1{,}98\ kg + 0{,}028\ kg = 4{,}82\ kg$ olarak tespit edilmiştir.



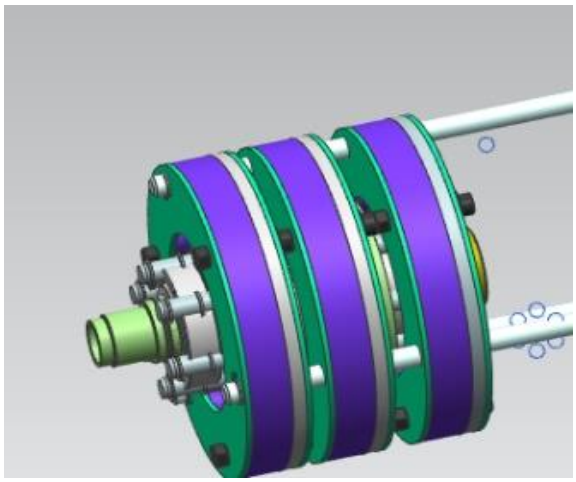
Şekil 4.31. Nx ortamında sikloid hız düşürücünün toplam ağırlığı

Yapılan tasarım iyileştirme çalışmalarıyla, başlangıçta yapılan ilk modeldeki redüktör 6,70 kg ağırlığından 4,86 kg ağırlığı düşerek, yaklaşık 2 kg' a kadar bir hafifletme kazanılmıştır. Sikloid hız düşürücünün parçaları 3 boyutlu yazıdan üretilirse, standart parçalar ile birlikte sistemin ağırlığı yaklaşık 1 kg olmaktadır.

4.11. Eklemeli Modüler Yapının Modellenmesi

Çalışma kapsamında, çok sayıda farklı iletim oranlarına sahip hız düşürücülerin hareket ve kuvvet iletim hattında, uç uca eklenebilirliği de çalışılmıştır. Eklemeli modüler yapı, montajı yapılmış farklı çevrim oranındaki sikloid hız düşürücülerin, aynı tasarıma sahip olan giriş ve çıkış milleri sayesinde uça uca eklenmesiyle oluşmaktadır. Örnek olarak, çevrim oranları 1:9, 1:10 ve 1:11 olan 3 adet sikloid hız düşürücü belirlenir. Kırmızı ile işaretlenmiş Ø8 mm ölçüsünde miller (Şekil 4.32) ile eksenel kaçıklığı koruyup sikloid hız düşürücüleri sabit tutmaktadır. Sikloid hız düşürücülerin birbirlerine bağlanışı (Şekil 4.29) dişi ve erkekten oluşan "+" ile modele eklenmiş bağlantı ile montajlanır. Üçlü modüler bağlantının çevrim

oranı, $9 . 10 . 11 = 990$ olmaktadır. Giriş milinden 990 tur çevrildiğinde, çıkış milinden 1 tur dönmektedir.



Şekil 4.32. Eklemeli modüler yapı

4.12. Sikloid Hız Düşürücüde Kullanılacak Step Motor

Step motorlar elektrik enerjisini dönme hareketi ile fiziksel enerjiye çeviren elektromekanik aygıtlardır. İsimlerinden de anlaşıldığı üzere adım adım hareket eden motorlardır. Biraz daha detaylı olarak açıklanırsa, girişlerine uygulanan pals sinyallerine karşı analog dönme hareketi çıkışı üreten, bu dönme hareketini adım adım ve çok hassas kontrolle sağlayan sabit mıknatıs kutuplu motorlardır. Step motorların yapıları rotor, stator ve rulmanlardan oluşmaktadır. Rulmanlar, rotora bağlı şaftın rahat hareket etmesini sağlarlar. Statorun birden fazla kutbu vardır. Kutup sayısı motordan motora değişmektedir ancak genellikle bu sayı sekizdir. Kutupların polaritesi elektronik anahtarlar vasıtasıyla sürekli değişir. Rotorun mıknatıslını ya sabit mıknatıs ile ya da dış uyarım teknikleri ile meydana getirilir [44].

Sistemde kullanılan step motor, robot kollarında ve CNC router tezgahlarında kullanılan Nema 34 modelidir. Step motorun özellikleri aşağıda yer almaktadır;

- Frenli step motor
- 12 N.m tutma torku
- 1.8 Derece Adım Açısı
- Step Motor Mil Çapı Ø14 mm

12 N.m tutma torku (Resim 4.3), milin donüş yönünün tersine 12 N.m tork uygulandığında milin durdurmaya etki eden tork değeridir [45].



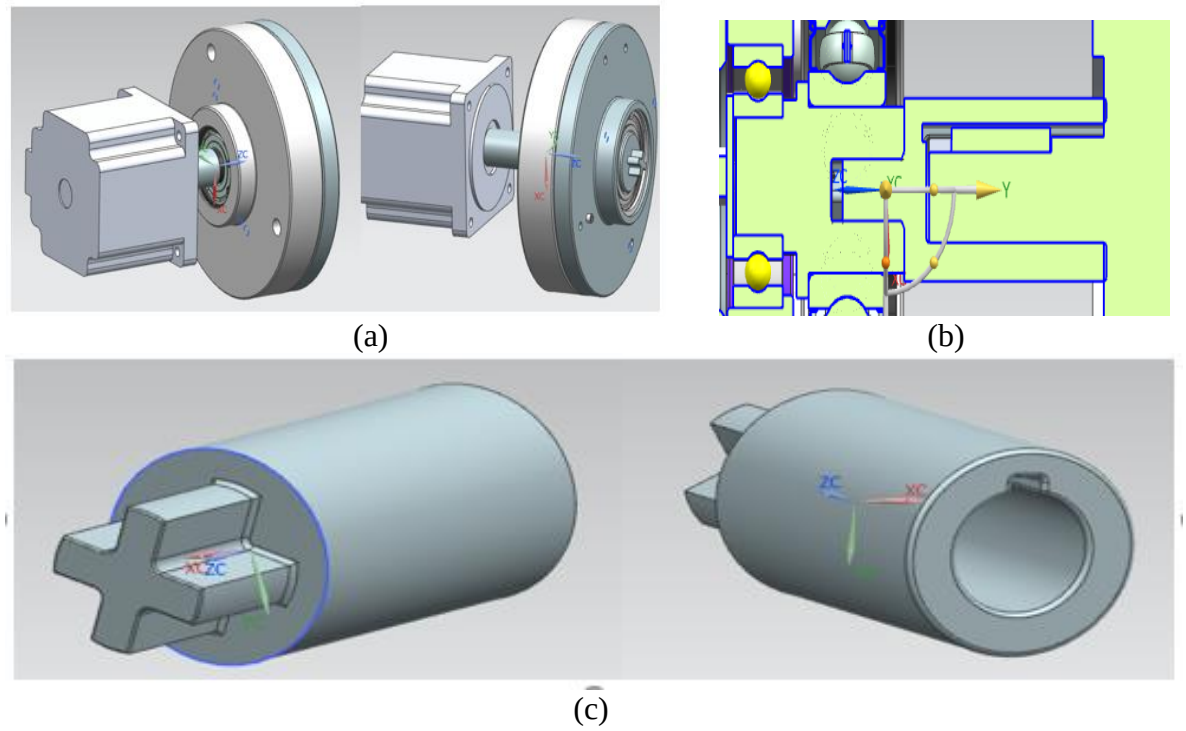
Step Motor Gücü	12 Nm
Nema Ölçüsü	Nema 34
Step Motor Flanş Ölçüsü	42x42 mm
Step Motor Mil Çapı	14 mm
Step Motor Civata Ölçüsü	M6

Resim 4.3. Nema 34 frenli 12 N.m step motor [45]

4.12.1. Kaplinin modellenmesi

Nema 34 step motorun hareketini giriş miline aktarılabilmesi için ara bağlantı mili modellenmesi gerekmektedir. Ara bağlantı milinin bir ucuna kama kanalı diğer ucuna giriş mili erkek bağlantılı olacak şekilde tasarlanmıştır. DIN 6885 kama tipi [46] ve ölçüleri 3 mm x 3 mm x 18 mm seçilmiştir.

Ara bağlantı mili, modelin ana ürünü değildir. Step motor ile redüktör arasındaki aktarımı yapabilmek için modellenmiştir. Sikloid hız düşürücüye farklı bir step motor bağlanması gerekirse, bağlanacak step motora ait bağlantı mili modellenmesi gerekecektir. Nema 34 frenli 12 N.m step motor [45] için tasarlanan ara bağlantı milinin montajı yapılmıştır (Şekil 4.33).



Şekil 4.33. Ara bağlantı mili 3 boyutlu modeli ve sikloid hız düşürücüye montaj: a) sikloid redüktörün motor bağlantısı, b) bağlantının kesit görünümü, c) ara bağlantı mili 3 boyutlu modeli

4.13. Sikloid Hız Düşürücü Montajını Teknik Resim Çalışması

Sikloid hız düşürücünün montaj resimleri ve imalatı yapılacak detay parçaların resimleri EK-5'te mevcuttur.

4.14. Sikloid Hız Düşürücünün Alüminyum 2024 Malzemeden Prototip İmalatı

Modellenmesi tamamlanan sikloid hız düşürücünün Alüminyum malzemeden üretimi yapılmıştır. Giriş gövde, çıkış gövde ve çıkış mili parçalarının üretimi için tornalık teknik resim hazırlanmıştır. Hazırlanan teknik resimlere uygun olarak CNC tornada kaba boşaltmaları gerçekleşmiştir. Kaba boşaltması yapılan parçalar ile birlikte, eksantrik kada parçası, eksantrik giriş mili parçası ve sikloid disk parçası CNC dik işleme tezgahına aktarılmıştır. Montaj yapılabilmesi için cıvata, rondela, pim, conta ve gres satın alınmıştır.

Parçalar, CNC dik işleme tezgahında hazırlanan teknik resimlere uygun olarak işlenmiştir. Teknik resim toleranslarına ek olarak, birbiri üzerinde yuvarlanma hareketi yapan giriş

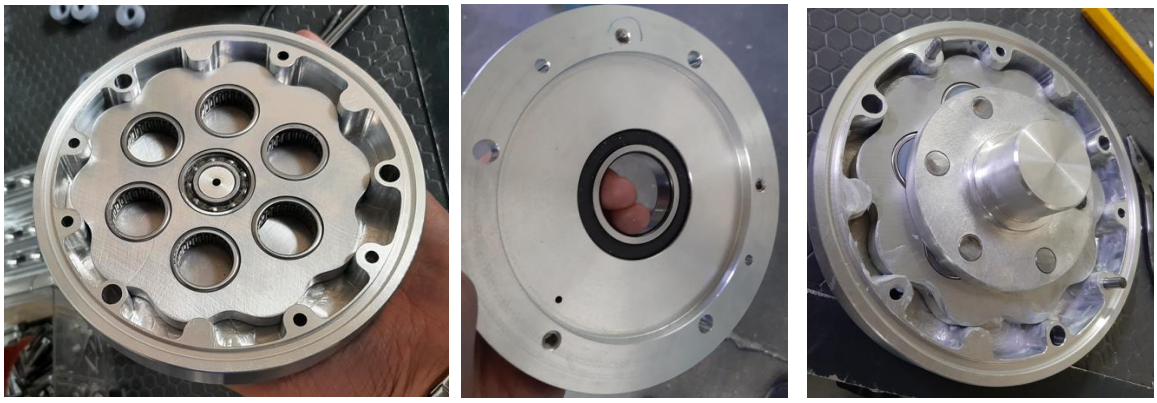
gövde ve sikloid disk yüzeyleri tolerans birikmemesi adına, sikloid diskte içeriye doğru 0.01 mm offset ve giriş gövde de dışarıya doğru 0.01 mm offset verilerek işlenmiştir.

Tezgahtan çıkan parçalara gerekli tesviye, raybalama, matkapla delik büyütme ve kılavuz çekme işlemlerinin ardından standart parçalar ile montajı tamamlanmıştır. (Resim 4.4 - Resim 4.5).



(a) (b) (c)

Resim 4.4. Alüminyum 2024 malzemeden üretilen sikloid hız düşürücünün üretim aşamaları ve montajı – 1: (a) giriş gövde, (b) sikloid disk, (c) çikiş mili ve pim montajı



(a) (b) (c)

Resim 4.5. Alüminyum 2024 malzemeden üretilen sikloid hız düşürücünün üretim aşamaları ve montajı – 2: (a) giriş gövde montaj, (b) çıkış gövde, (c) sikloid hız düşürücü montajı

4.15. Sikloid Hız Düşürücü Modellenmesinin Çıktıları

Muadil tasarımlara göre avantajı aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

1. Farklı çevrim oranında sikloid hız düşürücüler modellenip montajlandığında, her bir redüktör uç uca eklenebilmektedir. Modüler eklenebilir yapısı sayesinde çevrim oranı ve tork değeri yüksek sikloid hız düşürücü ortaya çıkmıştır.
2. Excel VBA uygulaması ile kullanıcının giriş değerini çıkış denklemine dönüştüren bir uygulama geliştirilerek, kullanıcının isteğine bağlı bir modelleme yapmasına olanak sağlanmıştır.
3. HK2212 iğne bilyeli rulmanın yuvasına oturan eksantrik kada, çıkış milinde yer alan pimin noktasal temas basmasını önleyip yüzeysel basmasını sağlamaktadır. Yüzeysel temas yüksek tork değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır.

Modelleme çalışmasının kronolojik sırası ve maddeleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

1. İnternet ortamından, istenilen ebatlarda modellenen sikloid diskin, parametrik denkleminin elde edilmesi
2. Elde edilen denklem ile 10:1 çevrim oranında prototip sikloid hız düşürücü modelinin yapılması
3. Modellemesi yapılan sikloid hız düşürücünün 3 boyutlu yazıcıda prototip imalatının yapılması
4. Excel VBA ortamında parametrik denklemin yapılıp, 2 boyutlu grafiğe ve parametrik tasarım felsefesiyle 3 boyutlu modele aktarılması
5. İstenilen giriş parametrelerinin ardından, Excel VBA ortamından, SolidWorks ortamına 3 boyutlu modellerin (sikloid disk, giriş ve çıkış gövdeleri, giriş ve çıkış milleri) aktarılması
6. Standart parçaların (rulman, rondela, cıvata, masura) belirlenmesi,
7. Tasarlanan sikloid hız düşürücünün 3 boyutlu ortamda montajının yapılması
8. 3 boyutlu yazıcıdan prototip imalatın yapılması
9. Prototip imalat sonucunda görülen hataların, tasarım iyileştirme çalışma faaliyetleri kapsamında modelin güncellenmesi
10. Parçaların, ham malzeme cinsinin ve kaplama tiplerinin belirlenmesi
11. Standart parçaların mekanik ve kimyasal özelliklerinin araştırılıp, belirlenen standart parçalar ile özelliklerin doğrulanması, standart parçaların montaj senaryosunda gerekli olan parametrelinin belirlenmesi (cıvata sıkma tork değeri, rulman yağlama tipi vb.)
12. Sisteme koyulacak yağ tipinin belirlenmesi ve eklenecek yağ miktarının hesaplanması
13. Sistemin ağırlığının hesaplanması

14. Eklemeli modüler yapı modelinin oluşturulması
15. Sikloid hız düşürücü montaj resimlerinin ve imalat resimlerinin çizilmesi

Yukarı belirtilen 15 madde sonucunda modelleme aşamaları tamamlanmıştır.

5. SİKLOİD HIZ DÜŞÜRÜCÜLERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ DAYANIM HESABI

Bir önceki bölümde sikloid hız düşürücülerin modellenmesi adım adım hazırlanmış, 3 boyutlu montaj model üzerinden ağırlık hafifletme çalışması, eksantrik kada modellemesi ve sikloid hız düşürücülerin birbiri üzerine monte edilebilirliğine dair iyileştirmeler yapılmıştır. Bu bölümde sikloid hız düşürücülerin hareket ve kuvvet iletiminde en riskli görülen pimlerin ve montajlı haldeki tüm parçaların dayanım hesaplarıyla elde edilmiştir.

Dayanım hesaplarıyla pim çapı ve iletilebilecek en büyük tork değerleri oranında anlamlı bir ilişki kurulmaya çalışılmış, pim çapının değişimine dayalı kısmi parametrik tasarım mantığında hız düşürücüyü oluşturan tüm elemanların doğrudan boyutlarının otomatik oluşturulmasını sağlayan süreç kurgulanmıştır (Bkz. Bölüm 4.3.3).

Dayanım hesabının ilk aşamasında, tasarım faaliyetlerinin sonunda modellenen 3 boyutlu hız düşürücünün giriş miline 12 N.m tork uygulanarak yapılmıştır. 12 N.m tork değeri Nema 34 tip adım motorunun [45] çıkış torku (tutma torku) olarak tespit edilmiştir. Bu torku üzerinde barındıran veya taşıyan hız düşürücü parçaları giriş milini yataklayan gövde, sikloid disk ve eksantrik giriş mili olarak belirlenmiştir. Hız düşürücünün 10:1 iletim oranına sahip olacak şekilde modellenmesi sebebiyle verim ihmal edildiğinden çıkış milinden elde edilen tork miktarı 120 N.m olmaktadır.

Tasarımda 6 adet olan pimlerin yuvarlanacağı, sikloid disk üzerinde delik sayısı; Lin,Shin ve Lee' nin [2] "iki kademeli sikloid dişli redüktör tasarımı diş modifikasyonları" adlı çalışmasında, Blagojević, Matejić, Ve Kostić' in [3] "iki aşamalı sikloidal hız düşürücünün dinamik davranışı ve yeni konseptinin tasarımı" adlı çalışmasında, Blagojevic, Marjanovic, Djordjevic, Stojanovic, Disic' in [10] "iki kademeli sikloidal hız düşürücüsünde yeni bir tasarım" adlı çalışmasında ve Blagojević, Matejić, Kostić, Petrović, Marjanović, ve Stojanović' in [16] "plastik sikloid redüktör veriminin kuru şartlar altında, teorik ve deneysel testi" adlı çalışmasında da görülerek referans alınmıştır. Pim sayısı ve disk üzerindeki delik sayısı belirtilen referanslar baz alınarak tasarım yapıldığında, pim başına düşen tork değeri 20 N.m olduğu tespit edilmiştir (Eş. 5.1).

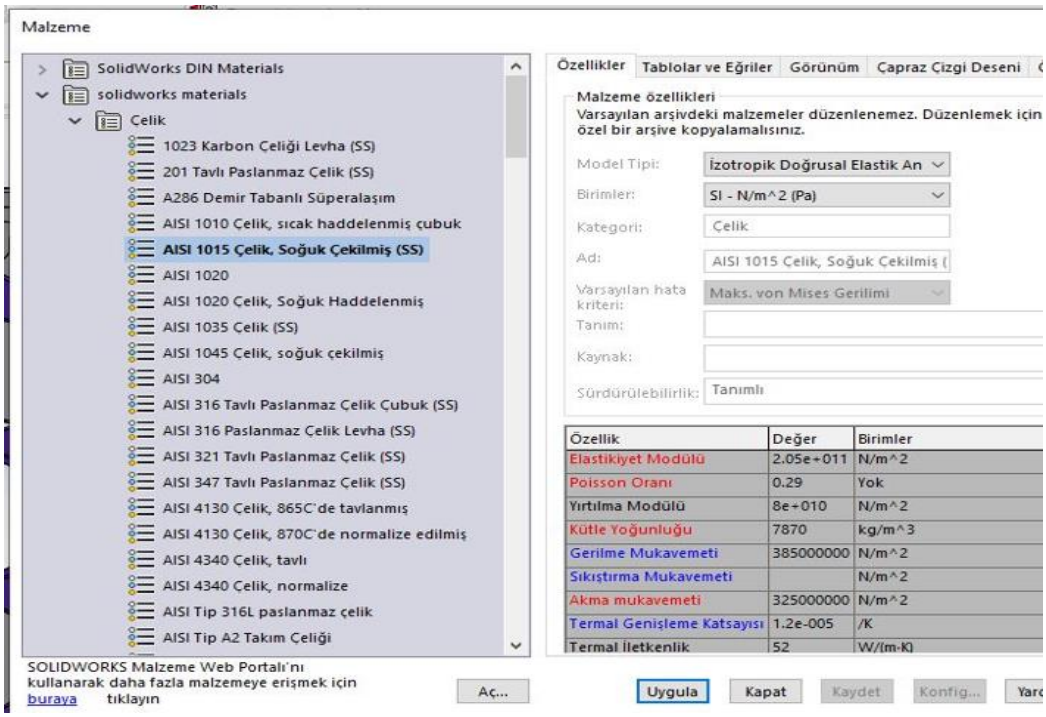
$$\frac{Çıkış\ Torku}{Toplam\ pim\ veya\ eksantrik\ kada\ sayısı} = \frac{120}{6} = 20\ \frac{N.m}{adet} \quad (5.1)$$

Parçaların üzerine gelen tork değerlerinde emniyetli kalmak için giriş tork değeri 24 N.m olacak şekilde step motor seçilmiş, 10:1 iletim oranından dolayı çıkış milinden elde edilecek çıkış tork değeri 240 N.m olmuştur. 6 adet pim sayısı baz alındığında pim basına düşen tork değeri 40 N.m olduğu görülmüştür (Eş. 5.2).

$$\frac{Çıkış\ Torku}{Toplam\ pim\ veya\ eksantrik\ kada\ sayısı} = \frac{240}{6} = 40\ \frac{N.m}{adet} \quad (5.2)$$

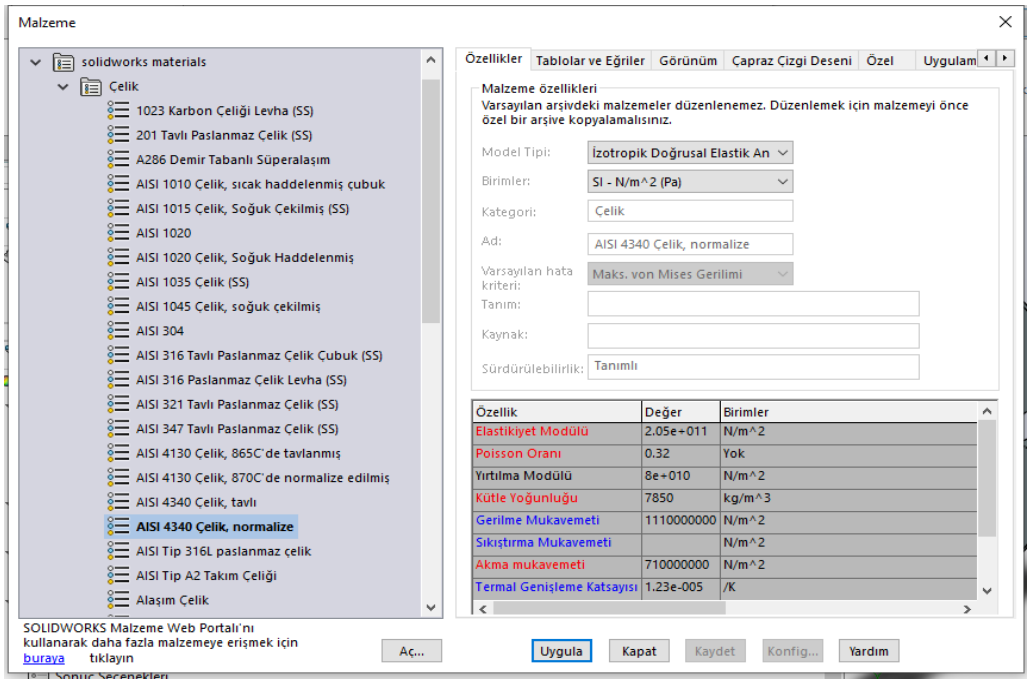
5.1. SolidWorks Simulation Ortamında Parçaları Tanımlama ve Dayanım Hesabı

Analizlerde yer alacak sikloid hız düşürücünün eksantrik mil, giriş gövde ve sikloidal disk adlı parçalarının malzemesi DINST37-2 normunun karşılığı olan AISI 1015 olarak belirlenmiştir. Ticari ortamda adlandırılan malzemenin SolidWorks malzeme kütüphanesindeki akma dayanımı 325 MPa ve çekme dayanımı 385 MPa olarak tanımlıdır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Eksantrik mil, giriş gövde ve sikloid disk' e atanan AISI 1015 soğuk çekilmiş çelik malzemenin verisi

Sikloid hız düşürücünün iç bünyesinde, güç aktaran pim ve eksantrik kada isimli parçaların malzemesi olarak AISI52100 standart adıyla bilinen ve SolidWorks malzeme kütüphanesinde en yakın malzeme türü AISI 4340 normalize edilmiş çelik şeklinde belirlenmiştir. AISI 52100 kodlu malzemenin akma dayanımı 738 MPa (EK-4) ve çekme dayanımı ise 855 MPa' dır. SolidWorks ortamındaki bu dayanıma en yakın alaşımlı çelik sınıfı malzeme olan AISI 4340 normalize edilmiş çeliğin ise akma dayanımı 710 MPA ve çekme dayanımı 1110 MPa' dır (Şekil 5.2). Bu iki malzemenin dayanım olarak yakın olduğu varsayılmıştır.



Şekil 5.2. Pim ve eksantrik kadaya atananan AISI 4340 normalize çelik malzemenin verisi

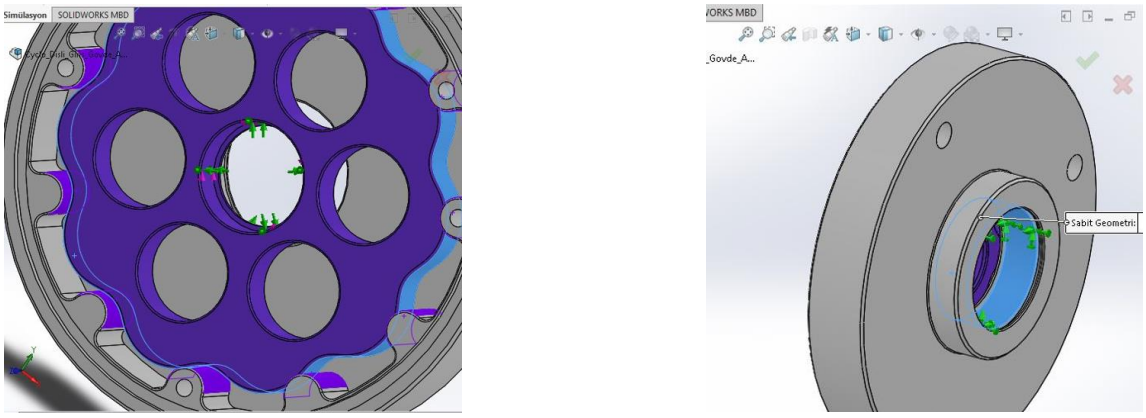
Dayanım hesabında sınırlılıklar ve kabul kriterleri için iki farklı emniyet katsayısı dikkate alınmıştır. Bunlardan birincisi;

$$EK = \frac{\sigma_{Von-Misses\ max}}{\sigma_{Akma}} \tag{5.3}$$

Hesaplama sonucu elde edilen en büyük Von-Mises gerilmesinin, malzemenin akma dayanımına olan oranıdır (Eş. 5.3). Diğeri ise Tresca kesme dayanımı esas olan emniyet katsayı değeridir (Eş. 5.4).

$$EK = \frac{\tau_{max}}{(\sigma_{Çekme} .0,5)} \quad (5.4)$$

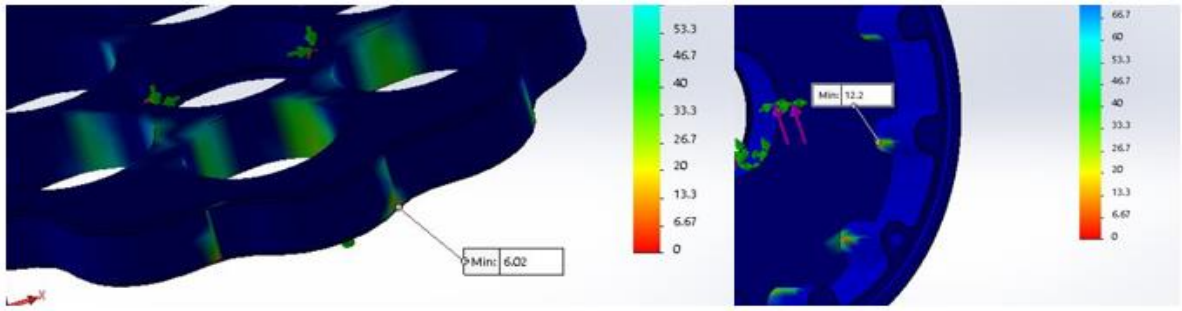
Sikloid diskin eksantrik giriş miline temaslı yüzeyi sabit kısımlar ve diskin teğetsel yüzeylerden oluşan eğrisel dış yüzeyi torkun uygulandığı kısımlar olarak seçilmiştir (Şekil 5.3).



(a) (b)

Şekil 5.3. Sikloid disk ve giriş gövde temas setleri: (a) sikloid disk temas seti, (b) giriş gövde temas seti

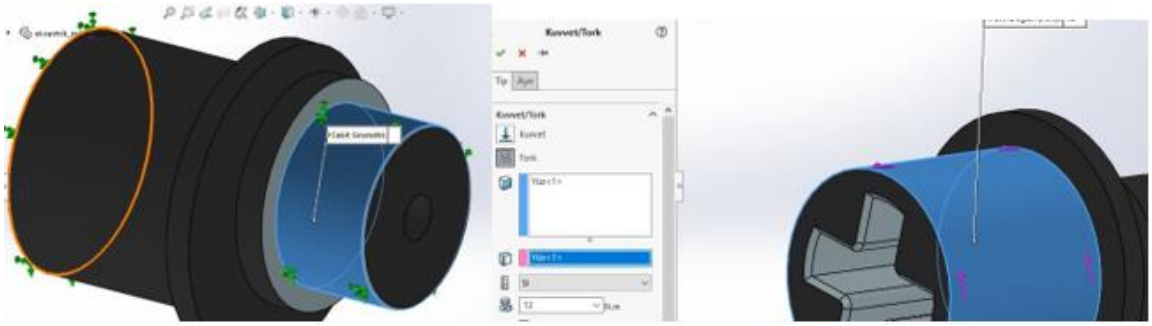
Emniyetli olması bakımından giriş tork değeri 24 N.m alınarak çözümleme yapılmıştır. Çözümleme sonucu sikloid diskte oluşan Von-Mises akma gerilmesi 54 MPa ve EKS değeri 6,02, giriş gövdede oluşan Von-Mises akma gerilmesi 26,7 MPa ve EKS değeri 12 olarak çözümlenmiştir Blagojevic, Marjanovic, Djordjevic, Stojanovic, Disic' in [10] "iki kademeli sikloidal hız düşürücüsünde yeni bir tasarım" adlı çalışmasında diskin diş diplerinde stresin biriktiği görülmüştür (Şekil 5.4).



(a) (b)

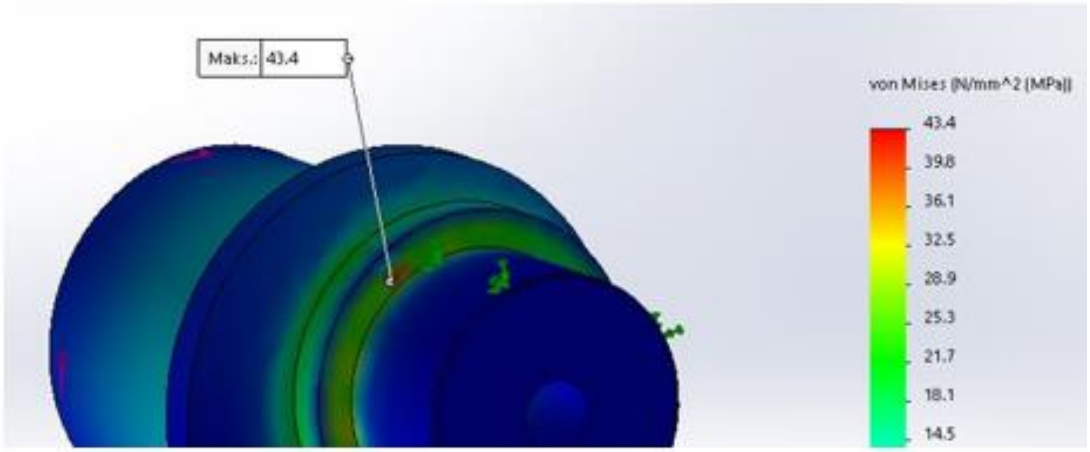
Şekil 5.4. 24 N.m giriş tork değeri için sikloid disk ve giriş gövdede oluşan Von-Mises akma gerilmesi ve emniyet katsayısı: (a) sikloid disk için emniyet katsayısı, (b) giriş gövde için emniyet katsayısı

Rulmanın oturduğu, eksantrik giriş milin yüzeyi sabit bölge, eksantrik giriş miline kuvvet uygulanacak bölge, torkun uygulanacağı bölge seçilmiştir (Şekil 5.5).



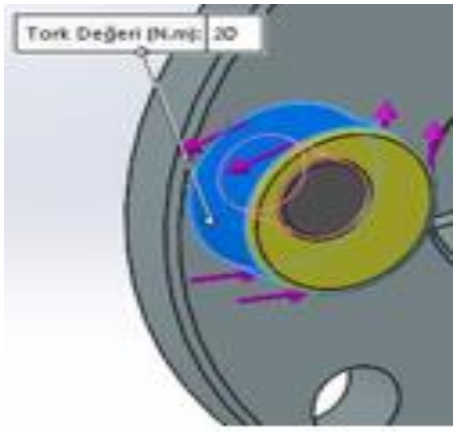
Şekil 5.5. Eksantrik mil temas setleri

Emniyetli olması bakımından giriş tork değeri 24 N.m alınarak çözümleme yapılmıştır. Çözümleme sonucu eksantrik giriş milinde oluşan Von-Mises akma gerilmesi 43,4 MPa, ve eksantrik giriş milinde 43,4 MPa Von-Mises akma gerilmesi için oluşan emniyet katsayı değeri 6,49’ dur (Şekil 5.6).



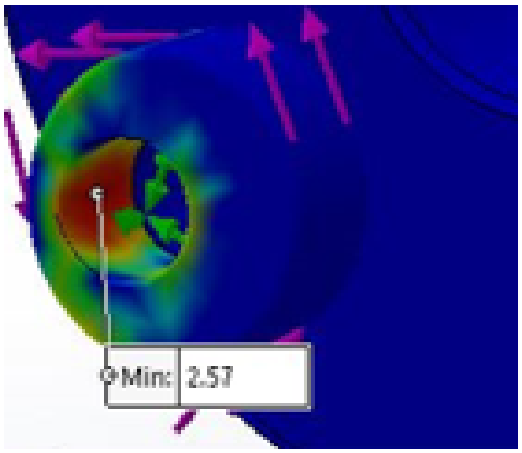
Şekil 5.6. 24 N.m giriş tork değeri eksantrik milde için oluşan Von-Mises akma gerilmesi ve emniyet katsayı değeri

Eksantrik kadanın dış çapı, uygulanacak tork bölgesi ve çıkış gövde üzerinde yer alan pim yuvasının yüzeyi, sabit bölge olarak seçilmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Eksantrik kada temas seti

Eksantrik kada parçası kritik olduğundan dolayı eksantrik giriş miline 12 N.m tork uygulanacaktır. 12 N.m giriş torku için çıkış milinde bulunan pimlere ve eksantrik kadaların adedine gelen tork değeri, 20 N.m' dir. Eksantrik kadaya 20 N.m giriş tork değeri uygulandığında oluşan Von-Mises akma gerilmesi 277 MPa ve emniyet katsayı değeri 2,57' dir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. 20 N.m tork değeri için eksantrik kada da oluşan Von-Mises akma gerilmesi ve emniyet katsayı değeri

5.2. Dayanım Hesaplarının Değerlendirilmesi

Sikloid disk ve giriş gövde çiftinde malzemeye y ekseninde kesme kuvveti (Tresca yırtılma kuvveti) olmadığı için incelenmemiştir. Von-Mises yükleri en çok dişlerin temas ettiği yüzeyin dip köşe, sivri noktalarında oluşmuştur. 12 N.m giriş tork değeri için bulunan Von-Mises emniyet katsayı değeri sikloid diskte 12 ve giriş gövde de 24,3 olarak bulunmuştur.

Diskte ve gövdenin diş bölgelerindeki radyüs arttırılırsa o bölgelere gelen yüklerin daha da azalabileceği öngörülmektedir. Emniyetli kalmak adına 24 N.m giriş tork değeri uygulanıp analiz yapılığında emniyet katsayı değeri sikloid disk için 6 giriş gövde için 12,2 olarak bulunmuştur. EKS 2' den büyük olduğu için tasarım değişikliğine gidilmemiştir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Sikloid disk ve giriş gövde analiz değerlendirme tablosu

Parça Adı	Malzeme	Muadili	Malzeme Akma Gerilmesi	Giriş Tork (Nm)	Von Mises (N/mm^2) (Mpa) Max Gerilme	Von Mises Minimum Emniyet Katsayısı	Max Yer Değiştirme (mm)
Cycloidal Disk 1:10 Mevcut Tasarım	AISI 1015 Soğuk Çekilmiş Çelik	C-15 CK15 S235JR ST37-2	325 Mpa	12	27	12	0,002
				24	54	6,02	0,005
Parça Adı	Malzeme	Muadili	Malzeme Akma Gerilmesi	Giriş Tork (Nm)	Von Mises (N/mm^2) (Mpa) Max Gerilme	Von Mises Minimum Emniyet Katsayısı	Max Yer Değiştirme (mm)
Cycloidal Giriş Gövde 1:10 Mevcut Tasarım	AISI 1015 Soğuk Çekilmiş Çelik	C-15 CK15 S235JR ST37-2	325 Mpa	12	13,4	24,3	0,002
				24	26,7	12,2	0,004

Eksantrik milde y ekseninde kesme kuvveti olduğundan Tresca yırtılma gerilmesi de incelenmiştir. En çok kesmeye ve akmaya maruz kalan bölge sikloid diskin göbek çapına giren bölgenin fatura noktası olarak görülmüştür. Giriş tork değeri 12 N.m uygulandığında oluşan Von-Mises emniyet katsayı değeri 7,5 ve Tresca emniyet katsayı değeri 7,49 olarak bulunmuştur. Giriş tork değeri 24 N.m uygulandığında oluşan Von-Mises emniyet katsayı değeri 3,75 ve Tresca emniyet katsayı değeri 3,25 olarak bulunmuştur olup oldukça güvenli bir değerdir. Hem Von-Mises hem de Tresca emniyet katsayısı, iki farklı giriş tork değeri içinde 2' den büyük olduğu için tasarımsal bir değişiklik yapılma ihtiyacı duyulmamıştır (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2. Eksantrik mil analiz değerlendirme tablosu

Parça Adı	Malzeme	Muadili	Malzeme Akma Gerilmesi	Giriş Tork (Nm)	Von Mises (N/mm^2) (Mpa) Max Gerilme	Von Mises Minimum Emniyet Katsayısı	Max Yer Değiştirme (mm)	Tresca Yırtılma Gerilmesi (N/mm^2) (Mpa) Max Gerilme Çekme Gerilmesi (+)	Tresca Yırtılma Gerilmesi (N/mm^2) (Mpa) Max Gerilme Basma Gerilmesi (-)	Tresca Yırtılma Gerilmesi Minimum Emniyet Katsayısı
Eksantrik Mil Ø15 Orijinal Tasarım	AISI 1015 Soğuk Çekilmiş Çelik	C-15 CK15 S235JR ST37-2	325 Mpa	12	43,4	7,5	0,00196	16,1	-14,3	6,49
				24	86,7	3,75	0,00392	32,2	-26,6	3,25

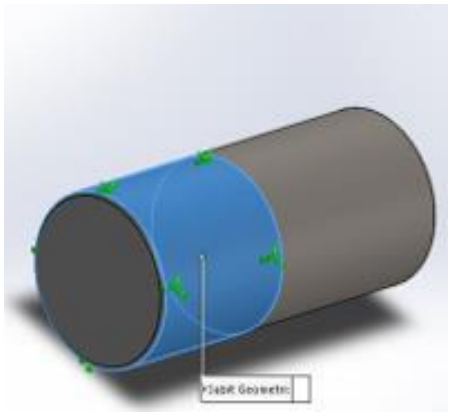
Giriş tork değeri 12 N.m için eksantrik kadada 20 N.m tork oluşmaktadır. Eksantrik kada için 20 N.m giriş tork değeri uygulandığında sistem emniyetli çıkmaktadır. Von-Mises emniyet katsayı değeri 2,57 ve Tresca emniyet katsayı değeri 2,42 olduğu görülmektedir. Eksantrik kada parçasının 24 N.m giriş tork değeri için parçaya iletilen 40 N.m tork değeri uygulandığında, parçanın Von-Mises ve Tresca emniyet katsayı değeri 2' nin altına düştüğü için tasarımı kritik duruma sokmaktadır. Ancak en kritik parça pim parçası olduğundan, tasarıma iletilecek en büyük tork değeri pim parçasının dayanımına göre yapılacaktır (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3. Eksantrik kada analiz değerlendirme tablosu

Parça Adı	Malzeme	Muadili	Malzeme Akma Gerilmesi	Giriş Tork (Nm)	Von Mises (N/mm^2) (Mpa) Max Gerilme	Von Mises Minimum Emniyet Katsayısı	Max Yer Değiştirme (mm)	Tresca Yırtılma Gerilmesi (N/mm^2) (Mpa) Max Gerilme Çekme Gerilmesi (+)	Tresca Yırtılma Gerilmesi (N/mm^2) (Mpa) Max Gerilme Basma Gerilmesi (-)	Tresca Yırtılma Gerilmesi Minimum Emniyet Katsayısı
Eksantrik Kada Ø10	AISI 4340	AISI 52100 Rulman Çeliği	710 Mpa	20	277	2,57	0,775	76,1	-127	2,42
				40	467	1,52	0,54	163	-219	1,44

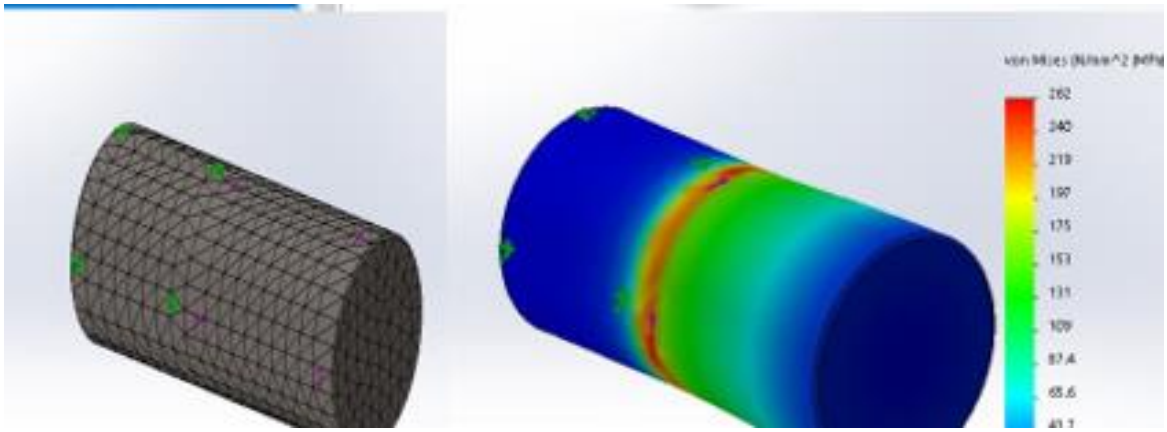
5.3. Kritik Pim Parçasının Dayanımın Analizi

Mevcut tasarımda çap 10 mm pim kullanılmaktadır. Pimin sikloid disk içinde kalan alanı sabit bölge seçilip kalan diğer yüzeyleri torkun uygulandığı bölge seçilmiştir (Şekil 5.9).

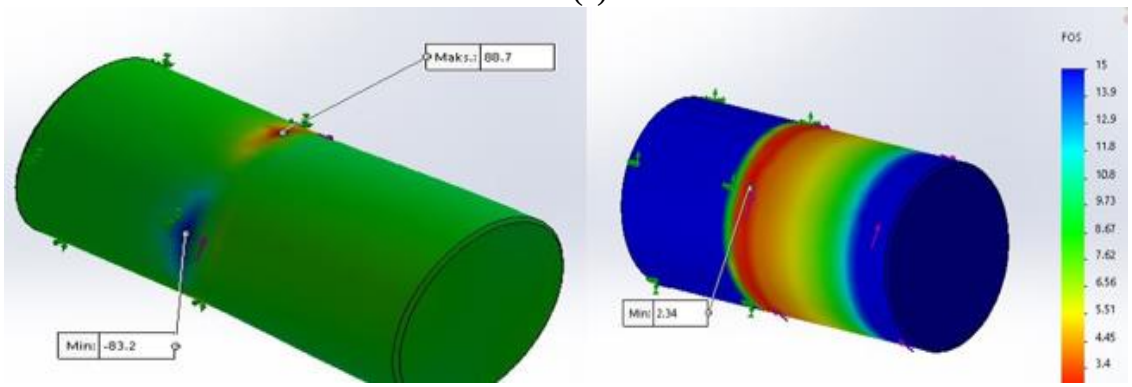


Şekil 5.9. Pim temas seti

Giriş tork değeri 12 N.m uygulandığında pim parçasına 20 N.m değerinde moment iletilmektedir. Pime 20 N.m tork uygulandığında oluşan Von-Mises gerilmesi 262 MPa ve emniyet katsayı değeri 2,71 olarak görülmüştür. Tresca çekme gerilmesi 88,7 MPa ve basma gerilmesi 83,2 MPa olup, emniyet katsayı değeri 2,34 olarak görülmüştür (Şekil 5.10).



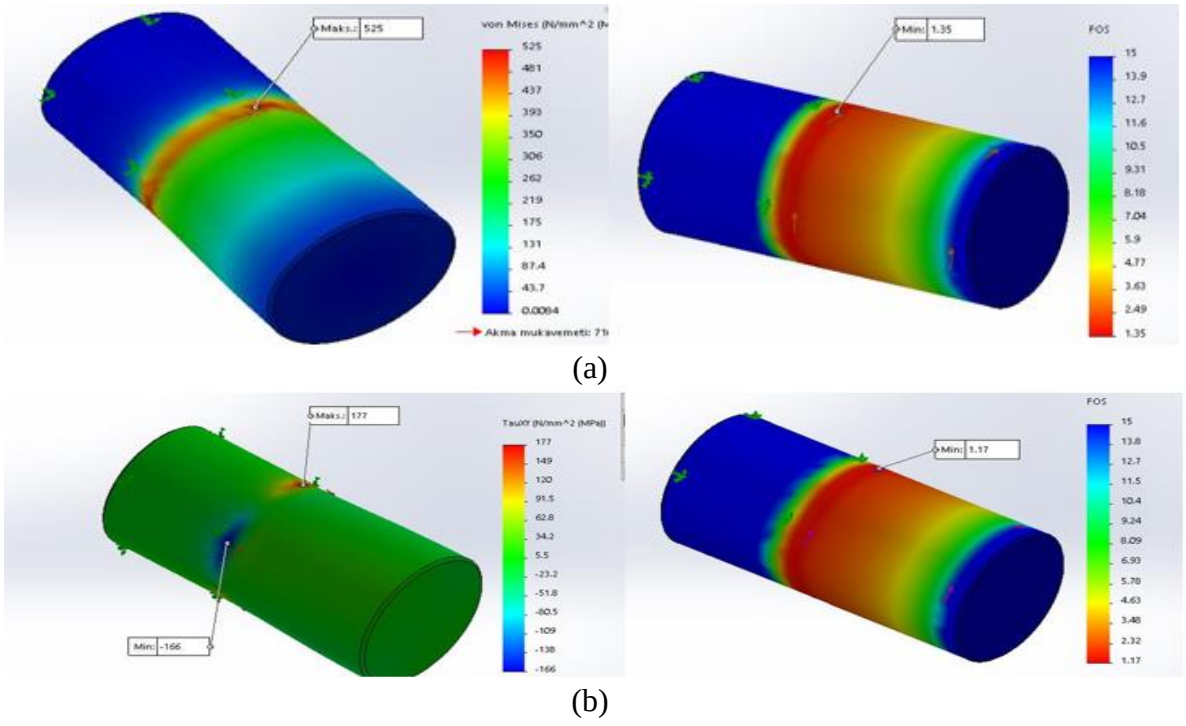
(a)



(b)

Şekil 5.10. 20 N.m tork değeri için çap 10 mm pimde oluşan Von-Mises akma gerilmesi, Tresca yırtılma gerilmesi ve emniyet katsayı değerleri: (a) Von-Mises akma gerilmesi, (b) Tresca yırtılma gerilmesi

Giriş tork değeri 24 N.m uygulandığında pim parçasına 40 N.m değerinde moment iletilmektedir. Pime 40 N.m tork uygulandığında oluşan Von-Mises gerilmesi 525 MPa ve emniyet katsayı değeri 1,35 olarak görülmüştür. Tresca çekme gerilmesi 177 MPa ve basma gerilmesi 166 MPa olup, emniyet katsayı değeri 1,17 olarak görülmüştür (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. 40 N.m tork değeri için çap 10 mm pimde oluşan Von-Mises akma gerilmesi, Tresca yırtılma gerilmesi ve emniyet katsayı değerleri: (a) Von-Mises akma gerilmesi ve emniyet katsayı değeri, (b) Tresca yırtılma gerilmesi ve emniyet katsayı değeri

Yapılan değerlendirme sonucunda çap 10 mm değerinde pim parçasına, giriş miline uygulanan 12 N.m tork sonucu iletilen 20 N.m tork değeri uygulanırsa, parçanın hem Von-Mises akma gerilme emniyet katsayısı hem de Tresca gerilmesi emniyet katsayısı 2’ nin üzerinde çıkmaktadır. Ancak giriş miline uygulanan 24 N.m tork sonucu iletilen 20 N.m tork değeri uygulanırsa, parçanın hem Von-Mises akma gerilme emniyet katsayısı hem de Tresca gerilmesi emniyet katsayısı 2’ nin altında kalmaktadır (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4. Mevcut tasarımda kullanılan çap 10 mm pim için yapılan analiz değerlendirme tablosu

Parça Adı	Malzeme	Muadili	Malzeme Akma Gerilmesi	Giriş Tork (Nm)	Von Mises (N/mm^2) (Mpa) Max Gerilme	Von Mises Minimum Emniyet Katsayısı	Max Yer Değiştirme (mm)	Tresca Yırtılma Gerilmesi (N/mm^2) (Mpa) Max Gerilme Çekme Gerilmesi (+)	Tresca Yırtılma Gerilmesi (N/mm^2) (Mpa) Max Gerilme Basma Gerilmesi (-)	Tresca Yırtılma Gerilmesi Minimum Emniyet Katsayısı
Pim Ø10 Orijinal	AISI 4340	AISI 52100 Rulman Çeliği	710 Mpa	20	213	3,33	0,081	37,6	-32,6	2,89
				40	427	1,66	0,051	50,9	-58,1	1,45

5.4. Farklı Pim Çaplarına Göre Yapılan Dayanım Hesabı

Bu bölümde, tasarımın en kritik parçası olan pim üzerinden, emniyet katsayısı 2 olacak şekilde sisteme uygulanabilecek en büyük tork değeri belirlenecektir. Tasarımın en kritik parçası olmasından dolayı, emniyet katsayı değeri 2 olarak belirlenip, analiz sonucuna göre çıkan giriş tork değeri, sistemin tüm parçalarının emniyetli şekilde çalışmasını sağlayacaktır. Pim çap değeri 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm ve 16 mm için Tresca yırtılma gerilmesi emniyet katsayı değeri 2 olacak şekilde, sistemin giriş miline uygulanabilecek en büyük tork değeri ve Von-Mises akma gerilmesi bulunacaktır.

Çap 8 mm pime, tresca emniyet katsayısı 2 olacak şekilde uygulanabilecek en büyük tork değeri hesaplanmıştır. Pime en büyük 12,96 N.m tork uygulandığında, Tresca yırtılma gerilmesi emniyet katsayısı 2 ve Von-Mises gerilmesi emniyet katsayısı 2,31 çıkmaktadır. Çap 8 mm pim için giriş miline uygulanacak tork değeri 7,77 N.m olarak bulunmuştur (Eş. 5.5).

$$\frac{(Pime\ Uygulanacak\ Tork\ .\ Pim\ Sayısı)}{Tahvil\ Oranı}\ \frac{12{,}96\ .\ 6}{10} = 7{,}77\ \mathrm{N.m} \tag{5.5}$$

Çap 10 mm pime, tresca emniyet katsayısı 2 olacak şekilde uygulanabilecek en büyük tork değeri hesaplanmıştır. Pime en büyük 23,4 N.m tork uygulandığında, Tresca yırtılma gerilmesi emniyet katsayısı 2 ve Von-Mises gerilmesi emniyet katsayısı 2,31 çıkmaktadır. Çap 10 mm pim için giriş miline uygulanacak tork değeri 14,04 N.m olarak bulunmuştur (Eş. 5.6).

$$\frac{(Pime\ Uygulanacak\ Tork\ .\ Pim\ Sayısı)}{Tahvil\ Oranı} = \frac{23{,}4\ .\ 6}{10} = 14{,}04\ \mathrm{N.m} \tag{5.6}$$

Çap 12 mm pime, tresca emniyet katsayısı 2 olacak şekilde uygulanabilecek en büyük tork değeri hesaplanmıştır. Pime en büyük 37,5 N.m tork uygulandığında, Tresca yırtılma gerilmesi emniyet katsayısı 2 ve Von-Mises gerilmesi emniyet katsayısı 2,31 çıkmaktadır. Çap 12 mm pim için giriş miline uygulanacak tork değeri 22,5 N.m olarak bulunmuştur (Eş. 5.7).

$$\frac{(Pime\ Uygulanacak\ Tork\ .\ Pim\ Sayısı)}{Tahvil\ Oranı} = \frac{37{,}5\ .\ 6}{10} = 22{,}5\ \mathrm{N.m} \tag{5.7}$$

Çap 14 mm pime, tresca emniyet katsayısı 2 olacak şekilde uygulanabilecek en büyük tork değeri hesaplanmıştır. Pime en büyük 65 N.m tork uygulandığında, Tresca yırtılma gerilmesi emniyet katsayısı 2 ve Von-Mises gerilmesi emniyet katsayısı 2,31 çıkmaktadır. Çap 14 mm pim için giriş miline uygulanacak tork değeri 39 N.m olarak bulunmuştur (Eş. 5.8).

$$\frac{(Pime\ Uygulanacak\ Tork\ .\ Pim\ Sayısı)}{Tahvil\ Oranı} = \frac{65\ .\ 6}{10} = 39\ \mathrm{N.m} \tag{5.8}$$

Çap 16 mm pime, tresca emniyet katsayısı 2 olacak şekilde uygulanabilecek en büyük tork değeri hesaplanmıştır. Pime en büyük 92 N.m tork uygulandığında, Tresca yırtılma gerilmesi emniyet katsayısı 2 ve Von-Mises gerilmesi emniyet katsayısı 2,31 çıkmaktadır. Çap 16 mm pim için giriş miline uygulanacak tork değeri 39 N.m olarak bulunmuştur (Eş. 5.9).

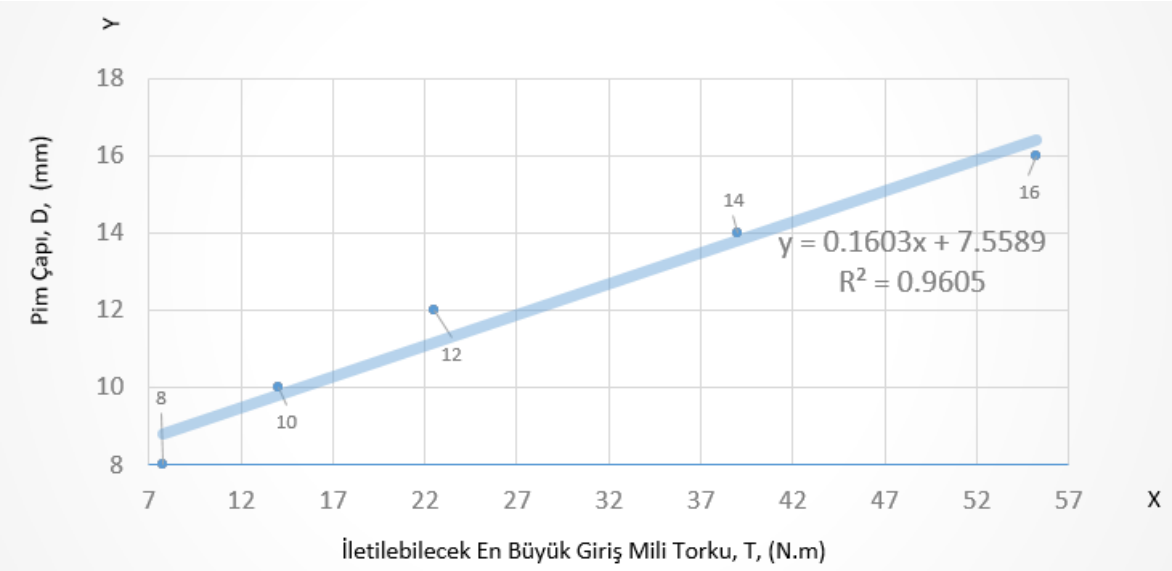
$$\frac{(Pime\ Uygulanacak\ Tork\ .\ Pim\ Sayısı)}{Tahvil\ Oranı} = \frac{92\ .\ 6}{10} = 55{,}2\ \mathrm{Nm} \tag{5.9}$$

Yapılan analiz çalışmasında Tresca yırtılma gerilmesi emniyet katsayısı baz alınmıştır. Tresca yırtılma gerilmesi malzemeyi kesecek gerilmeyi ifade eder. Pim parçasının malzemesi için referans alınan Tresca yırtılma dayanımının sayısal değeri, Von-Mises akma dayanımından daha düşük olup, pim parçasına gelen kesme kuvveti değerleri diğer parçalara göre fazladır. Bu sebeple pim parçasının hem geometrik yapısı hem de sistem yapısı gereği kesmeye fazlaca maruz kaldığı için Tresca yırtılma gerilmesi emniyet katsayısı 2 olacak şekilde sisteme uygulanacak giriş tork değeri hesaplanmıştır (Çizelge 5.5).

Çizelge 5.5. Tresca yırtılma gerilmesi EK değerinin 2 olması koşuluyla farklı pim çaplarında giriş miline ve pime uygulanabilecek en büyük tork değerleri

Pim Çapı (mm)	Giriş Miline Uygulanacak En Büyük Tork Değeri (N.m)	Pime Uygulanacak En Büyük Tork Değeri (N.m)	Tresca Yırtılma Gerilmesi EK (Birimsiz)
8	7,77	12,96	2
10	14,04	23,4	2
12	22,5	37,5	2
14	39	65	2
16	55,2	92	2

Emniyet katsayı değeri 2 olması koşuluyla farklı pim çapları için giriş miline uygulanacak en büyük tork değeri excelde grafiğe dökülerek, eğrinin tipi belirlenmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12. Farklı pim çaplarına göre giriş miline uygulanabilecek en büyük tork değerlerini oluşturan iki boyutlu eğri ve denklem

Yapılan analizler sonucu oluşan y eksenine ait formül yer almaktadır (Eş. 5.10). Giriş miline uygulanacak en büyük tork değeri (Eş. 5.10) formülde yer almaktadır. Formülde (Eş. 5.10) "x" değeri yerine yazarak oluşan sonuç; emniyet katsayı değeri en düşük 2 olacak şekilde, "y" ekseni sistemde kullanılabilecek en küçük pim çap değerini vermektedir.

$$y = 0{,}1603.x + 7{,}5589\ N.m \tag{5.10}$$

5.5. Analiz Değerlendirmesi ve Sonuçlar

Yapılan analizler sonucu pim çapı ve giriş miline uygulanacak en büyük tork değerini hesaplatan formül ve grafik çıkarılmıştır (Eş. 5.10). Bu sayede istenilen giriş tork değerine göre emniyet katsayı değeri en küçük 2 olan, sistemde kullanılacak pim çapının en küçük değeri bulunmuştur.

Nema 34 step motorun giriş tork değeri 12 N.m' dir ve yapılan analiz değerlendirmeleri sonucu, sistemde en kritik parça pim parçası olarak belirlenmiştir. Mevcut tasarımda kullanılan pim parçasının giriş tork değeri, 12 N.m için dayanım şartlarını sağlayan ancak giriş tork değeri 24 N.m için dayanım şartlarını sağlamayan bir parça olarak gözlemlenmiştir.
Sikloid hız düşürücülerde önemli bir konu olan "kademe" durumu da incelenmiş olup sonuçlar paylaşılmıştır. Üç kademeli diskler için yapılan FEM analizlerinde, diske gelen yüklerde azalma oluşmuş olsa da, 3 diski çevirecek pim boyu uzamış olduğundan dolayı kritik parça olan pimlere gelecek yük fazla olmuştur. Hsieh ve Alfonso' nun [15] "sikloidal hız düşürücülerin performans tahmin yöntemi" adlı çalışmasında, iki üstü sikloidal hız düşürücülerin verimliliği azalttığına dair analiz çalışmaları yapmıştır. Kademe artışının avantajı, gelecek ani yük ve darbelere karşı sistemi mukavim hale getirmektir. Kademe artışının çevrim oranının artışına etkisi bulunmamaktadır. Kademenin artmasının diğer dezavantajları, teoride hesaba katılmayan sürtünme katsayısının disk sayısının fazlalığından kaynaklı artması, gürültü ve titreşimin artması, ağırlığın ve hacmin artışından kaynaklı kompakt dizayna sahip olmamasıdır. Fakat aşırı yüksek tork ve basıncın geldiği bölgelerde veya giriş çok tork değerinin tek ya da iki kademeli diske göre yüksek olduğu yerlerde kullanılacak bir redüktör tip seçimi olduğunda, 3 kademeli redüktörler, gelecek statik ve dinamik yüklere karşı kararlığını çok net bir şekilde koruyacaktır.

Mevcut 10:1 iletim oranına sahip sikloid hız düşürücüsünde kullanılan Nema 34 step motor, 12 N.m tutma tork değerine sahiptir. Pim çapı 10 mm ve EK 2 değeri için hesaplanan (Eş. 5.6), giriş miline uygulanabilecek en büyük tork değeri 14,4 N.m olduğu görülüp Nema 34 step motorun en büyük tork değerinden daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple mevcut sikloid hız düşürücü tasarımı analiz açısından güvenlidir.

Tez çalışmasında, ihmal edilen verim, Güneş ve Dilipak' ın [14] "sürtünmenin sikloid dişli kutusunun verimi üzerindeki etkisinin hareket analizi ile incelenmesi" adlı çalışmasında sikloid dişli kutusunun hareket analizi yardımıyla verimi belirlenerek, literatüre katkı sağlamıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında, tek kademeli sikloid hız düşürücüler incelenmiş, dayanım hesapları sonucu, hafif ağırlık ve düşük hacim felsefesiyle muadillerine göre dayanımı yüksek, düşük alanda yüksek çevrim oranına sahip, pim çap değişimine dayalı parametrik tasarım yapılmış ve en kritik parça baz alınarak, dayanım hesabı sonucu formül oluşturulması hedeflenmiştir.

6.1. Sonuçlar

Elde edilen ilk montajlı modelden hareketle, sikloid hız düşürücünün eklemeli imalat yöntemiyle imalatı yapılmış, kullanılan 3 boyutlu yazıcıların hassasiyetinden kaynaklı, parçaların yüzey pürüzlük değerlerinden dolayı verimde düşüş gözlemlenmiştir. 3 boyutlu yazıcıdaki baskı hatalarından kaynaklı, metalden bir üretim ihtiyacı doğmuş olup, bu tez çalışması kapsamında alüminyum malzemeden üretimi yapılmıştır.

İlk kez ulusal düzeyde sikloid hız düşürücünün tam anlamıyla tasarımı yapılmış ve tüm parçalarının gerçekçi boyutta modelleri ve imalat resimleri oluşturulmuştur. Kullanıcıdan giriş değerlerini alarak sikloid hız düşürücünün Excel VBA ortamında 2 boyutlu grafiği elde edilmiş ve SolidWorks ortamında 3 boyutlu modele aktarılmıştır. Bilgisayar destekli dayanım hesabı yapılarak sistemdeki en kritik parça belirlenmiştir. Pim çap değişimine bağlı olarak iletilebilecek en büyük tork değeri arasındaki ilişki çıkarılmıştır.

Tasarımda en önemli girdi kriteri olarak, hız düşürücünün iletebileceği en büyük tork miktarı; hız düşürücünün dayanımı açısından en kritik elemanı olan pimin 2 kat emniyetli olmasına dayalı olarak bilgisayar destekli dayanım hesaplarıyla belirlenmiştir. Farklı pim çaplarına göre giriş miline uygulanabilecek en büyük tork değerlerini oluşturan iki boyutlu eğri ve denklem türetilmiştir. Kullanıcı giriş miline bağlayacağı step motorun tork değerini girerek, sikloid hız düşürücüde kullanılacak pim çapının en yakın değeri belirlenebilmektedir. Pim çap değişimine dayalı parametrik tasarım prosedürü kurgulanmış ve pim çapı değişmesi halinde hız düşürücüsünün tüm elemanlarının parametrik tasarım mantığına uygun olarak 3 boyutlu modelleme revizyonlarının otomatik yapılması sağlanmıştır.

Literatürde, çelik malzemeden üretim, dayanım ve titreşim analizleri gibi sonlu elemanlar yöntemi esaslı bilgisayar destekli mühendislik çalışmaları da mevcuttur. Sikloid hız düşürücülerin, iki veya daha fazla kademeli tiplerinde, en kritik durum için bile (bir çift dişin temas halinde olması), sikloid diskler üzerindeki gerilmelerin izin verilen sınırlar içinde olduğu ve dolayısıyla redüktörün beklenen ömrü boyunca normal çalışmasını sağladığı sonucunun bu çalışma için geçerli olduğu düşünülmektedir.

Puma tipi endüstriyel robotların, yerli tasarım ve imalatının yaygınlaştırılmasında ihtiyaç duyulan sikloid hız düşürücünün, bilgisayar destekli modelleme, tasarım ve imalat teknolojileri esas alınarak, imal edilebilirliğinin tartışıldığı bu çalışmanın, milli teknoloji tabanlı literatüre katkı sağlayacağı beklenmektedir.

6.2. Öneriler

Ulusal düzeyde önemi henüz tam anlamıyla fark edilmemiş olan plastik sikloid redüktör kullanımının yaygınlaşması için tez çalışmalarında farkındalık yaratılmalıdır. Tez çalışmalarının genişletilmesinin önerilmesi; çelikten üretim redüktör maliyetleri yüksek olduğu için yüzey pürüzlülük değeri daha düşük 3 boyutlu yazılarda imalatı ve montajı yapılarak, kullanılacak malzeme tipine göre dayanım hesaplarının incelenip tasarımsal revizyonlar ile dayanımını arttırmaktır.

Teknik resimde verilen boyutlandırma ve geometrik toleranslardan kaynaklı oluşan üretim hatası montaj hattında birikip, gerçekte verilecek toleransların belirlenmesi için adetli sayıda üretimi gerçekleştirilmesi önerilir. Bu sayede, her adet için farklı tolerans değerleri verilerek, sikloid hız düşürücünün açısal boşluğu ve çalışma verimi ayrı ayrı hesaplanıp, en idael üretim tolerans değerlerinin yakalanabilir.

KAYNAKLAR

1. Faydor, L. L. and Feng, P. H. (1995). Computerized design and generation of cycloidal gearings. *Mechanism and Machine Theory*, 31(7), 891-911.

2. Lin, W. S., Shih, Y. P. and Lee, J. J. (2014). Design of a two-stage cycloidal gear reducer with tooth modifications. *Mechanism and Machine Theory*, 79, 184–197.

3. Blagojević, M., Matejić, M. and Kostić, N. (2018). Dynamic behaviour of a two-stage cycloidal speed reducer of a new design concept. *Technical Gazette* , 25(2), 291-298.

4. Maximov, J. and Hristov, H. (2005). Machining of hypocycloidal surfaces by adding rotations around parallel axes part I: kinematics of the method and rational field of application. *Trakya University Journal of Natural Sciences,* 6(1), 1-11.

5. Maximov, J. and Hristov, H. (2005). Machining of hypocycloidal surfaces by adding rotations around parallel axes part II: geometry of the body of the tool. *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 6(1), 13-18.

6. Özel, C., Ortaç, Y. ve Gürgenç, T. (2017). Yağ pompasında kullanılan sikloidal dişlilerin parmak freze ile cnc freze tezgâhlarında imalatının araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29 (2), 97-110.

7. Shin, J. H. and Kwon, S. M. (2005). On the lobe profile design in a cycloid reducer using instant velocity center. *Journal of Mechanism And Machine Theory*, 41, 596–616.

8. Rena, Z. Y., Maoa, S. M., Guo, W. C. and Guo Z. (2017). Tooth modification and dynamic performance of the cycloidal drive. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 85, 857–866.

9. Blagojevi, M., Kocic, M., Marjanovic, N., Stojanovic, B., Dordevic, Z., Ivanovic, L. and Marjanovic, V. (2012). Influence of the friction on the cycloidal speed reducer efficiency. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 18(2) 217–227.

10. Blagojevic, M., Marjanovic, N., Djordjevic, Z., Stojanovic, B. and Disic, A. (2011). A new design of a two-stage cycloidal speed reducer. *Journal of Mechanical Design*, 133, 1-7.

11. Vasić, M. P., Matejić, M. and Blagojević, M. (2020). *A comparative calculation of cycloid drive efficiency*. Conference on Mechanical Engineering Technologies and Application 5. International Scientific Conferance, 259-266.

12. Yang, B. and Liu, Y. (2013). Noise source ıdentification of a ring-plate cycloid reducer. based on coherence analysis. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 1-5.

13. Lee, K., Hong, S. and Oh, J. O. (2019). Development of a lightweight and high-efciency compact cycloidal reducer for legged robots. *Advanced Institute of Science and Technology*, 291, 305-338.

14. Güneş, H. ve Dilipak, H. (2023). Sürtünmenin sikloid dişli kutusunun verimi üzerindeki etkisinin hareket analizi ile incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-94

15. Hsieh, C. F. and Alfonso F.A. (2019). Performance prediction method of cycloidal speed reducers. *Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(186), 1-15.

16. Blagojević, M., Matejić, M., Kostić, N., Petrović, N., Marjanović, N. and Stojanović B. (2017). Theoretical and experimental testing of plastic cycloid reducer efficiency in dry conditions. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 23,(2), 367-375.

17. İnternet: Cyclo. *Robotek*, Web: http://www.robotek.com.tr/Urun/Reduktor/Cyclo.html, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

18. İnternet: Sikloid redüktör. *Spinea*, Web: https://www.spinea.com, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

19. İnternet: Redüktör. *Vikipedi*, Web: https://tr.wikipedia.org/wiki/Redüktör, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

20. İnternet: Konik dişli redüktör nedir. *Güç Aktarım*, Web: https://gucaktarim.com/konik-disli-reduktor-nedir/, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

21. Polat Grup A.Ş. (2008). Sikloid redüktör. *Mühendis Ve Makine Dergisi*, 49(586), 9-11.

22. İnternet: How do cycloidal gears work. *Motion Control*, Web: https://www.motioncontroltips.com/how-do-cycloidal-gears-work-and-where-are-they-used/, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

23. İnternet: Backlash. *Stepcraft–Türkiye*, Web: https://www.stepcraft-turkiye.com/stepcraft-turkiye/nasil/uccnc/uccnc-backlash/backlash-sifirlama, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

24. İnternet: Dişli çarklar. *Güven Kutay*, Web: http://www.guven-kutay.ch/disliler/12_00_disliler_genel.pdf, Son Erişim Tarihi : 19.06.2023

25. İnternet: Sikloid redüktör. *Sumitomo*, Web: http://www.sumitomocorp.com.tr, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

26. İnternet: Cycloidal drive presentation. *Cam Group*, Web: https://www.youtube.com/watch?v=rP4kJjTSm-g&t=2s, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

27. İnternet: Hypocycloidal gear calculator. *Otvinta*, Web: http://www.otvinta.com/cycloid.html, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

28. Nachimowicz, J. and Rafalowski, S. (2016). Modelling the meshing of cycloidal gears. *Bialystok University of Technology Department of Mechanical Engineering Faculty of Mechanical Engineering*, 10(2), 137-140.

29. İnternet: O-ring nbr70. *Elbaşı*, Web: https://www.elbasi.com.tr/tr/urunler/detay/oring-nbr-70, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

30. İnternet: Alyan cıvatalar. *Berat Cıvata*, Web: http://www.beratcivata.com/imbus_alyan_civatalar.html, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

31. İnternet: Torklama tablosu. *Netratek*, Web: https://www.netratek.com/wp-content/uploads/2018/07/Civata-Torklama-Tablosu-NETRATEK.pdf, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

32. İnternet: C15 özellikleri. *Uslular Hadde,* Web: https://uslularhadde.com/c-15-celik-ozellikleri, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

33. İnternet: Specialty alloys. *Carpenter*, Web: https://www.carpentertechnology.com/ Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

34. İnternet: Katı film yağlayıcı. *Ader Savunma*, Web: http://www.adersavunma.com.tr/hizmetlerimiz/kati-film-yaglayici, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

35. İnternet: Kadmiyum kaplama. *Hidro Mekanik Kaplama Metal ve Pompa,* Web: http://www.solidfilm.web.tr/urun/66/KADMIYUM-KAPLAMA, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

36. İnternet: Rulmanlar. *Rulman Listesi,* Web: https://rulmanlistesi.com, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

37. İnternet: İç segman. *Murat Rulman,* Web: http://muratrulman.net/celik_ic_segman_din_472_8_43.html, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

38. İnternet: Dayanıklı ve kararlı yağlar ile sürekli performans. *Klueber*, Web: https://www.klueber.com/tr/tr/urunler-ve-servisler/yaglayicilar/sivi-yaglar/, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

39. İnternet: Rulman yataklama düzenlerinin tasarımı için gerekli teknik veriler. *Daslager*, Web: https://www.daslager.com.tr/wp-content/uploads/2019/02/rulman-yataklama-duzenlerinin-tasarimi-icin-gerekli-teknik-veriler.pdf, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

40. İnternet: Geçme tolerans çiftleri. *Makine Eğitimi*, Web: https://www.makinaegitimi.com/gecme-toleranslari-tolerans-ciftleri/, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

41. İnternet: Gres yağı seçimi. *Protech*, Web: https://protech.web.tr/gres-yaginin-hangi-ozelliklerine-secim-yapilir, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

42. İnternet: Slk sentetik gres. *Speedol* Web: http://speedol.com.tr/slk-sentetik-gres/, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

43. İnternet: Yağlar. *İmak Redüktör*, Web: https://imakreduktor.com/, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

44. İnternet: Step motor nedir. *Robotistan*, Web: https://maker.robotistan.com/step-motor-nedir/, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

45. İnternet: Nema 34 step motor, *Mermak CNC Otomasyon*, Web: https://www.cnc-marketi.com/urun/12-nm-step-motor-frenli-nema-34, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

46. İnternet: Kama yuvası ölçüleri. *Ei Tasarım*, Web: https://www.eitasarim.com/2019/05/kama-yuvasi-acma-olculeri-din-6885/, Son Erişim Tarihi: 19.06.2023

EKLER

EK-1. Excel tablosu

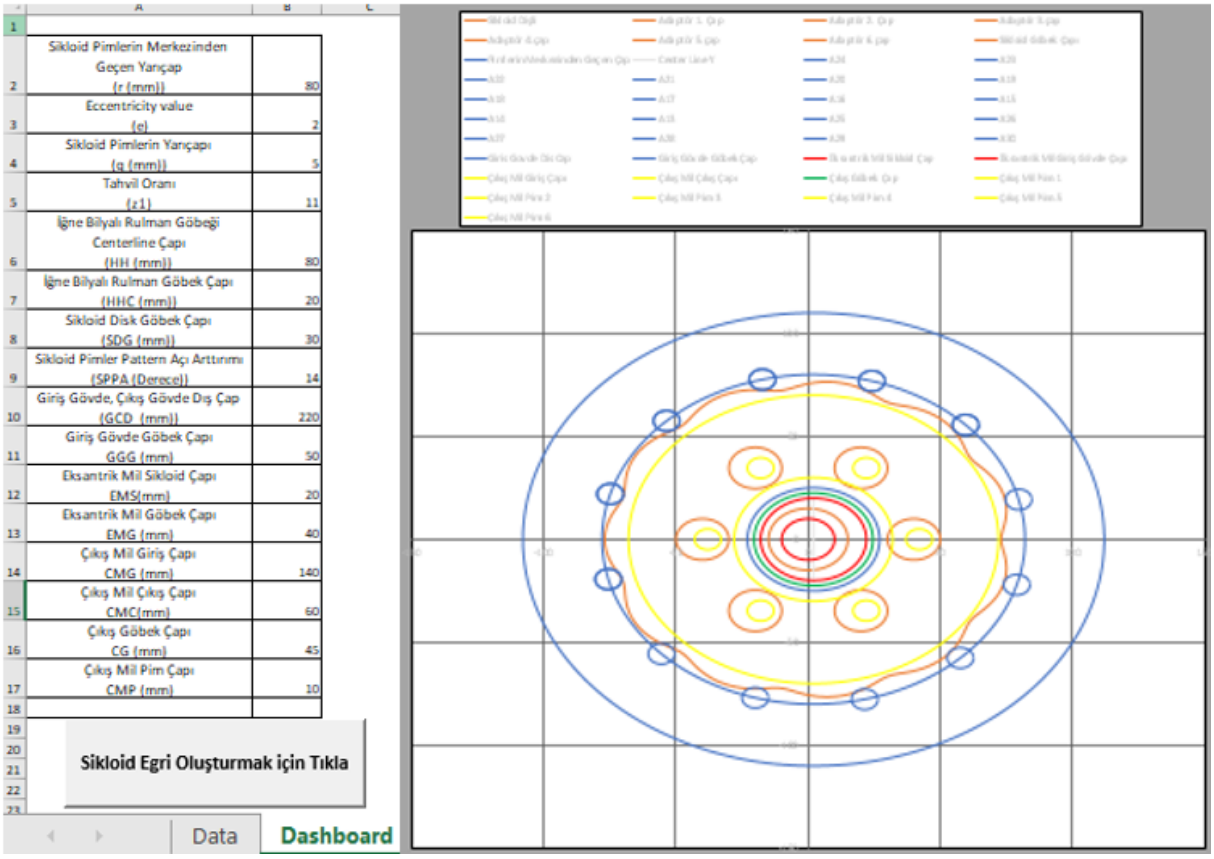
xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
F3	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Sabit	İnput	İnput	İnput	İnput	İnput	İnput	İnput
k =95	r (mm)	e (mm)	q (mm)	z1 (Adet) = (Pim Sayısı -1)	HH (mm)	HHC (mm)	SDG (mm)
k number B points per each lobe of the gear	Sikloid Pimlerin Merkezinden Geçen Yarıçap	Eccentricity value	Sikloid Pimlerin Yarıçapı	Tahvil Oranı	İğne Bilyalı Rulman Göbeği Centerline Çapı	İğne Bilyalı Rulman Göbek Çapı	Sikloid Disk Göbek Çapı
95	80	2	5	11	80	20	30
95	80	2	5	11	80	20	30
95	80	2	5	11	80	20	30

xxx	xxx	xxx	Giriş Gövde (Sikloid Disk)	Giriş Gövde (Sikloid Disk)	Giriş Gövde (Sikloid Disk)	Giriş Gövde (Sikloid Disk)	Giriş Gövde (Sikloid Disk)
xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Sabit	Sabit	Sabit	Output	Output	Output	Output	Output
HHA (adet)	HHD (derece)	Cy (-20;+20 arası)	A1x (mm)	A1y (mm)	A2x (mm)	A2y (mm)	A3x (mm)
İğne Bilyalı Rulman Göbek Sayısı	İğne Bilyalı Rulmanlar Arasındaki Açı	Sikloid Pimlerin Merkez Çizgisi	İğne Bilyalı Rulman 1. Göbek Çapı	İğne Bilyalı Rulman 1. Göbek Çapı	İğne Bilyalı Rulman 2. Göbek Çapı	İğne Bilyalı Rulman 2. Göbek Çapı	İğne Bilyalı Rulman 3. Göbek Çapı
6	60	-20	49.99981924	0.060125813	29.99981924	34.70114196	-10.00018076
6	60	-19	49.99927698	0.120249452	29.99927698	34.7612656	-10.00072302
6	60	-18	49.99837322	0.180368744	29.99837322	34.8213849	-10.00162678

Giriş Gövde (Sikloid Disk)	Giriş Gövde (Sikloid Disk)	Giriş Gövde (Sikloid Disk)	Giriş Gövde (Sikloid Disk)	Giriş Gövde	Giriş Gövde	xxx	xxx
xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	G3	H3
Output	Output	Output	Output	Output	Output	Hesaplanmış Veri	Hesaplanmış Veri
A6x (mm)	A6y (mm)	SRx (mm)	SRy (mm)	SPx (mm)	SPy (mm)	N (Adet) =z1+1	r / (e*N) > 1,5
İğne Bilyalı Rulman 6. Göbek Çapı	İğne Bilyalı Rulman 6. Göbek Çapı	Sikloid Rulman Göbek Çapı	Sikloid Rulman Göbek Çapı	Sikloid Pimlerin Merkezinden Geçen Centerline Yarıçap	Sikloid Pimlerin Merkezinden Geçen Yarıçap	Sikloid Pim Sayısı	Fonksyonel Çalışabilirlik Durumu
29.99981924	-34.58089034	14.99972886	0.090188719	81.99855394	0.481006503	12	3.333333333
29.99927698	-34.5207667	14.99891547	0.180374178	81.99421582	0.961995618	12	3.333333333
29.99837322	-34.46064741	14.99755984	0.270553116	81.98698579	1.442949954	12	3.333333333

xxx	xxx	Giriş Gövde (Sikloid Disk)	Giriş Gövde (Sikloid Disk)	xxx	xxx	xxx	xxx
F	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Hesaplanmış Veri	Hesaplanmış Veri	Output	Output	Hesaplanmış Veri	Hesaplanmış Veri	Hesaplanmış Veri	Sabit
ϕ (Derece) (Değişken I) (dϕ)	ψ=ATAN((SİN((1-N)*φ) / (r/(e*N)))-(COS((1-N)*φ)))	Bx (mm)= ((r*cos (φ)) - (q * cos (φ + ψ)) - (e * cos (N * φ)))	By (mm)= (- (r*sin (φ)) + (q * sin (φ + ψ)) + (e * sin (N * φ)))	SPA (Derece)	SPAAx (mm)	SPAAy (mm)	SPNAA (Derece)
Oluşturulan Pointlerin Arasındaki Açı	ψ° Açısı Hesaplama	Eğisikloid Eğri Bx Point	Eğisikloid Eğri By Point	Sikloid Pimler Arasındaki Açı	Sikloid Pimler Arasındaki Açı Point x	Sikloid Pimler Arasındaki Açı Point y	Sikloid Pimlerin Noktasal Arasındaki Açısı
0.344497608	-0.028290471	73.00383365	-0.309234715	44	59.54718403	55.57266964	10
0.688995215	-0.05625496	73.0153079	-0.619174673	74	24.05098847	76.90093568	20
1.033492823	-0.083579144	73.03434273	-0.930522243	104	-17.35375165	77.6236581	30

EK-1. (devam) Excel tablosu



Sikloid Pimlerin Merkezinden Geçen Yarıçap (r (mm))	80
Eccentricity value (e)	2
Sikloid Pimlerin Yarıçapı (q (mm))	5
Tahvil Oranı (z1)	11
İğne Bilyalı Rulman Göbeği Centerline Çapı (HH (mm))	80
İğne Bilyalı Rulman Göbek Çapı (HHC (mm))	20
Sikloid Disk Göbek Çapı (SDG (mm))	30
Sikloid Pimler Pattern Açı Arttırımı (SPPA (Derece))	14
Giriş Gövde, Çıkış Gövde Dış Çap (GCD (mm))	220
Giriş Gövde Göbek Çapı GGG (mm)	50
Eksantrik Mil Sikloid Çapı EMS(mm)	20
Eksantrik Mil Göbek Çapı EMG (mm)	40
Çıkış Mil Giriş Çapı CMG (mm)	140
Çıkış Mil Çıkış Çapı CMC(mm)	60
Çıkış Göbek Çapı CG (mm)	45
Çıkış Mil Pim Çapı CMP (mm)	10

Sikloid Egri Oluşturmak için Tıkla

Data | Dashboard

	ÇIKIŞ MİL
	GİRİŞ GÖVDE
	SİKLOİD DİŞLİ
	EKSANTRİK MİL
	ÇIKIŞ GÖVDE (GÖVDE DIŞ ÇAP MAVİ İLE BOYALI

EK-2. Visual Basic ve formlar

“Private Sub CommandButton1_Click() “**Input Değeri Gir Buttonu**”

```
Sheet1.Range("B2") = TextBox1.Value
Sheet1.Range("B3") = TextBox2.Value
Sheet1.Range("B4") = TextBox3.Value
Sheet1.Range("B5") = TextBox4.Value
Sheet1.Range("B6") = TextBox5.Value
Sheet1.Range("B7") = TextBox6.Value
Sheet1.Range("B8") = TextBox7.Value
Sheet1.Range("B9") = TextBox8.Value
Sheet1.Range("B10") = TextBox9.Value
Sheet1.Range("B11") = TextBox10.Value
Sheet1.Range("B12") = TextBox11.Value
Sheet1.Range("B13") = TextBox12.Value
Sheet1.Range("B14") = TextBox13.Value
Sheet1.Range("B15") = TextBox14.Value
Sheet1.Range("B16") = TextBox15.Value
Sheet1.Range("B17") = TextBox16.Value
End Sub
```

Private Sub CommandButton2_Click() “**Excel Input Değerlerini Temizle Buttonu**”

```
Sheet1.Range("B2").Clear
Sheet1.Range("B3").Clear
Sheet1.Range("B4").Clear
Sheet1.Range("B5").Clear
Sheet1.Range("B6").Clear
Sheet1.Range("B7").Clear
Sheet1.Range("B8").Clear
Sheet1.Range("B9").Clear
Sheet1.Range("B10").Clear
Sheet1.Range("B11").Clear
Sheet1.Range("B12").Clear
Sheet1.Range("B13").Clear
```

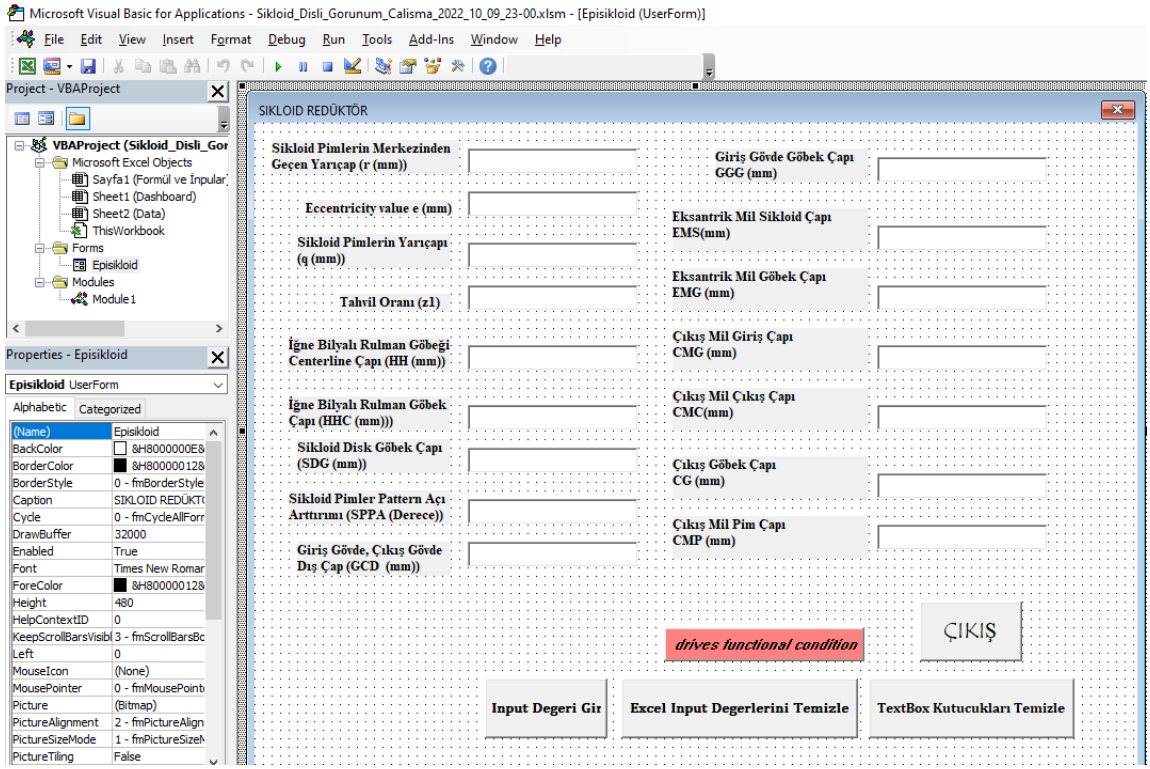
EK-2. (devam) Visual Basic ve formlar

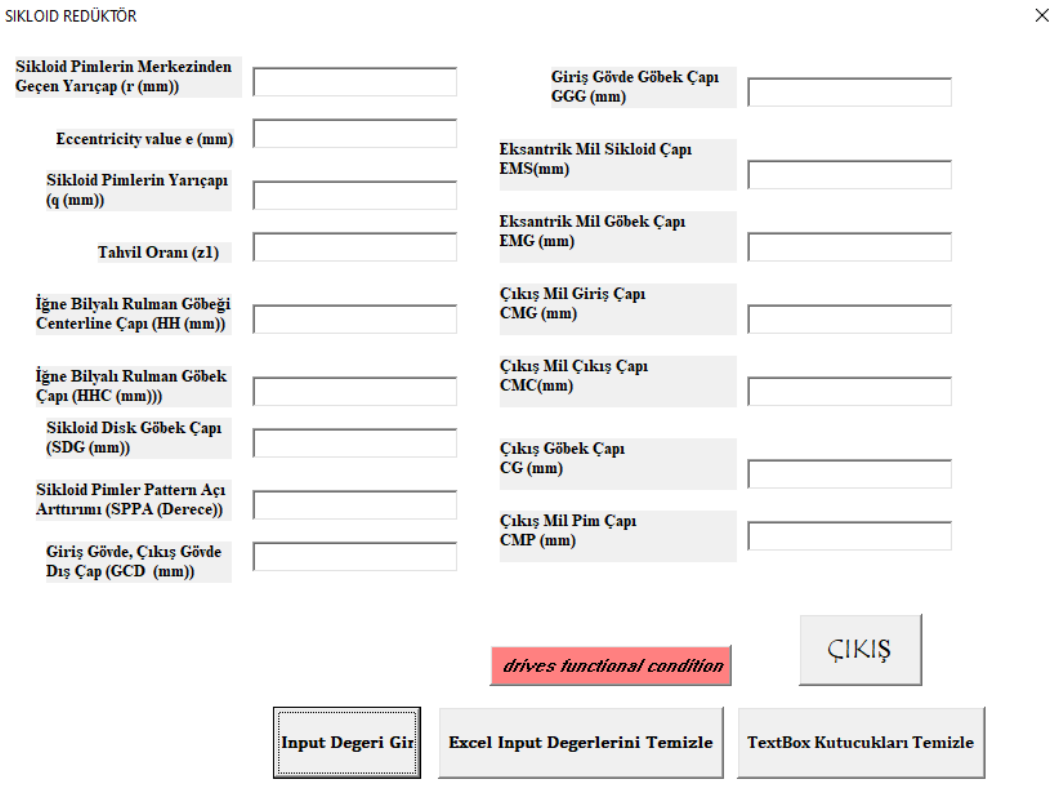
```
        Sheet1.Range("B14").Clear
        Sheet1.Range("B15").Clear
        Sheet1.Range("B16").Clear
        Sheet1.Range("B17").Clear
End Sub
Private Sub CommandButton3_Click() “Textbox Kutucuklarını Temizle Buttonu”
        TextBox1.Value = ""
        TextBox2.Value = ""
        TextBox3.Value = ""
        TextBox4.Value = ""
        TextBox5.Value = ""
        TextBox6.Value = ""
        TextBox7.Value = ""
        TextBox8.Value = ""
        TextBox9.Value = ""
        TextBox10.Value = ""
        TextBox11.Value = ""
        TextBox12.Value = ""
        TextBox13.Value = ""
        TextBox14.Value = ""
        TextBox15.Value = ""
        TextBox16.Value = ""
        Sheet1.Range("B2") = TextBox1.Value
        Sheet1.Range("B3") = TextBox2.Value
        Sheet1.Range("B4") = TextBox3.Value
        Sheet1.Range("B5") = TextBox4.Value
        Sheet1.Range("B6") = TextBox5.Value
        Sheet1.Range("B7") = TextBox6.Value
        Sheet1.Range("B8") = TextBox7.Value
        Sheet1.Range("B9") = TextBox8.Value
        Sheet1.Range("B10") = TextBox9.Value
```

EK-2. (devam) Visual Basic ve formlar

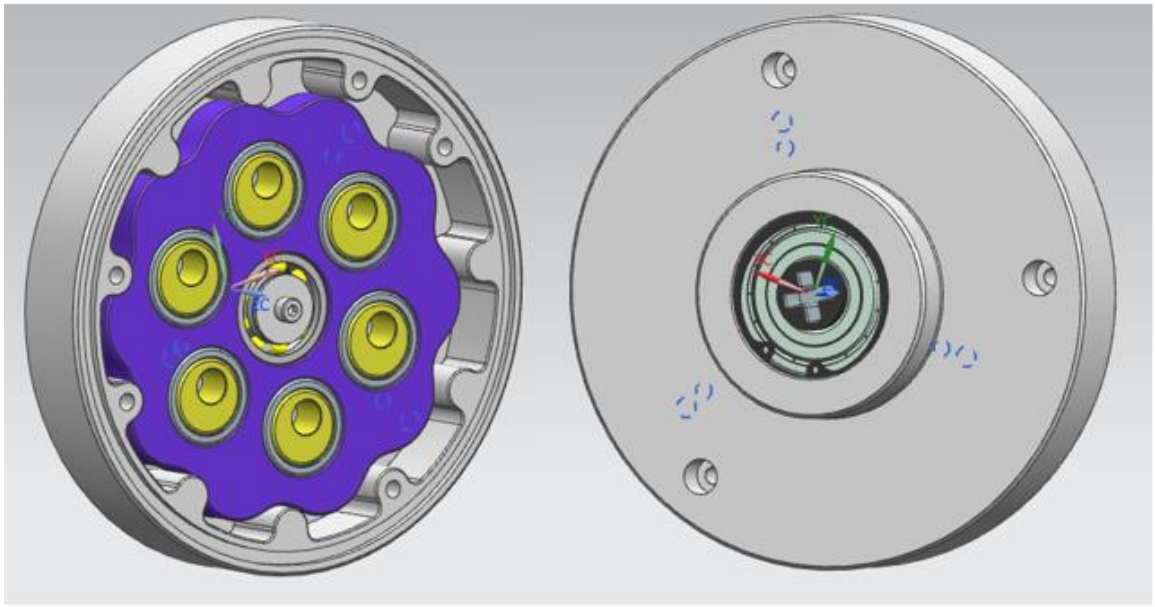
```
        Sheet1.Range("B11") = TextBox10.Value
        Sheet1.Range("B12") = TextBox11.Value
        Sheet1.Range("B13") = TextBox12.Value
        Sheet1.Range("B14") = TextBox13.Value
        Sheet1.Range("B15") = TextBox14.Value
        Sheet1.Range("B16") = TextBox15.Value
        Sheet1.Range("B17") = TextBox16.Value
End Sub
Private Sub CommandButton4_Click() "drives functional condition buttonu"
  If Sheet2.Range("AC13") < 1.5 Then
   MsgBox ("!!!!!!Pimlerin merkezinden geçen çapı BÜYÜT yada eksantriklik ve çevrim oranını AZALT!!!!!!!!")
    Else
      MsgBox ("Mevcut r/e*N > 1.5 oranını koru")
  Exit Sub
  End If
End Sub
Private Sub CommandButton5_Click() "Çıkış Buttonu"
Unload Me
```

EK-2. (devam) Visual Basic ve formlar

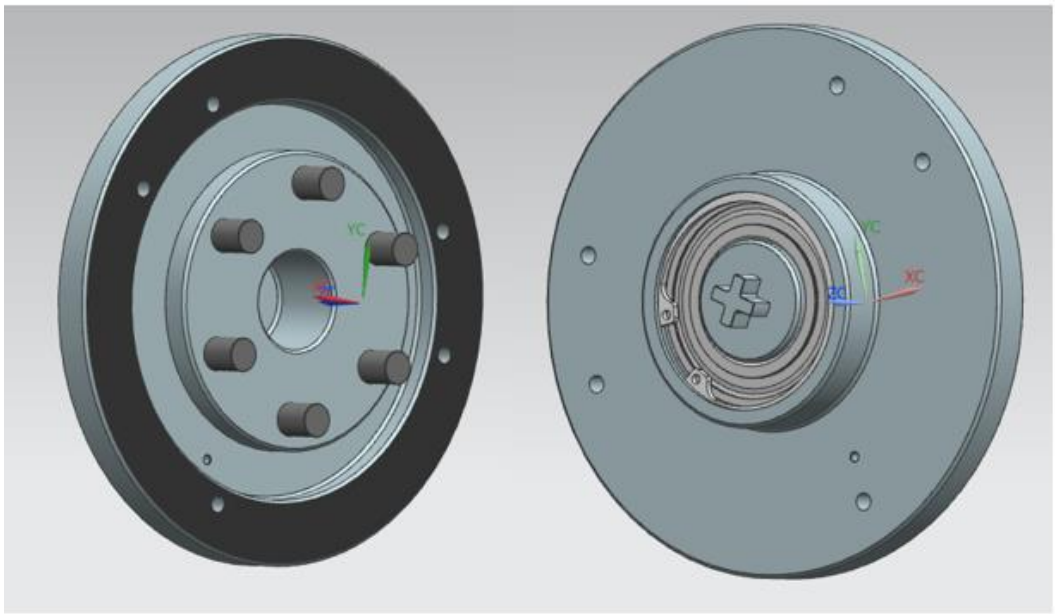




EK-3. Sikloid hız düşürücünün 3 boyutlu modeli: (a) giriş gövde montajı, (b) çıkış gövde montajı, (c) çıkış gövde kesit görünümü, (d) sikloid hız düşürücü montajı

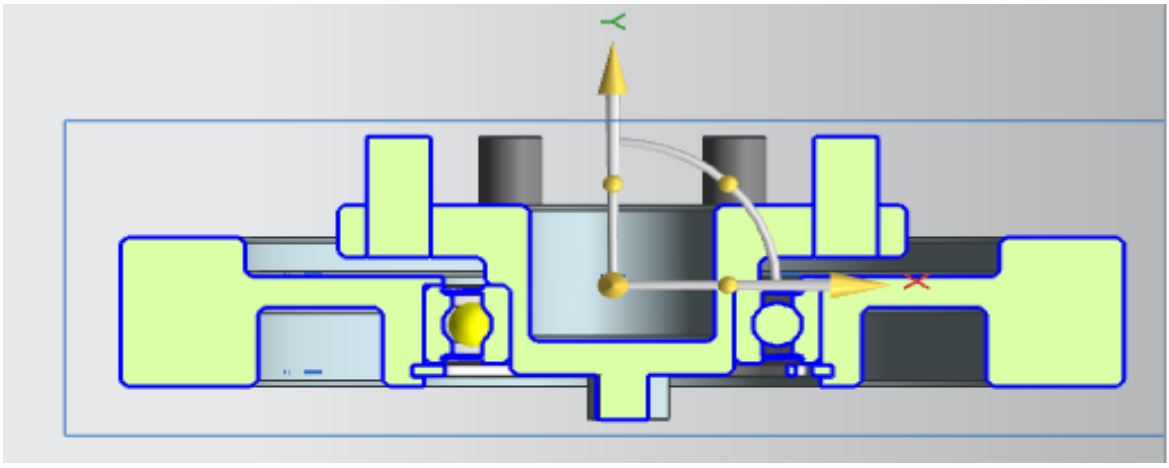


(a)

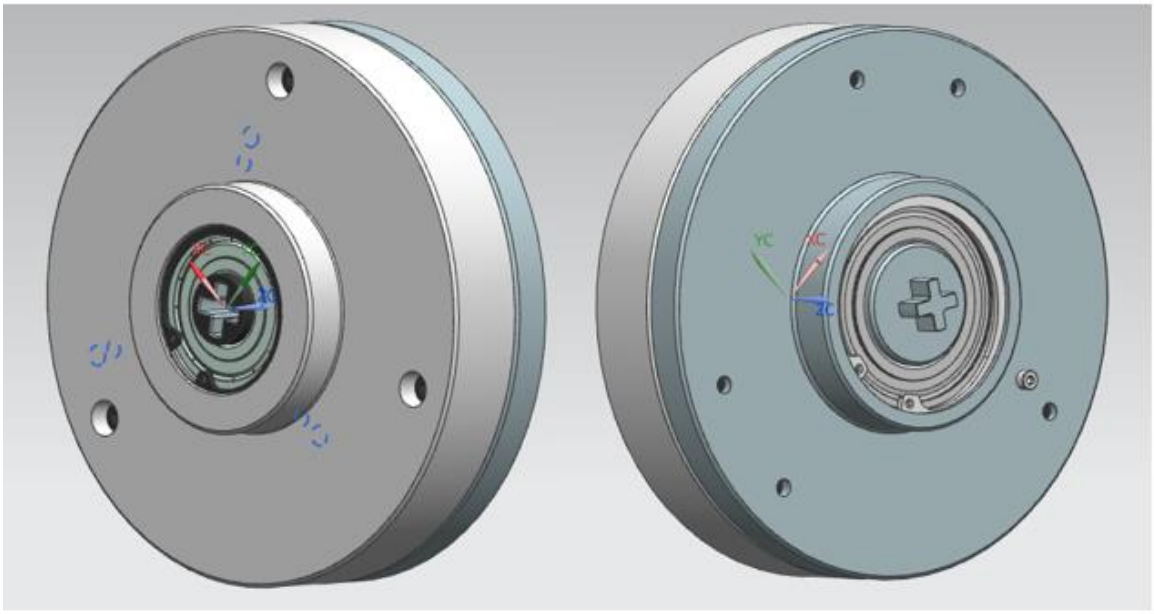


(b)

EK-3 (devam) Sikloid hız düşürücünün 3 boyutlu modeli: (a) giriş gövde montajı, (b) çıkış gövde montajı, (c) çıkış gövde kesit görünümü, (d) sikloid hız düşürücü montajı



(c)



(d)

EK-4. AISI 1015 / C15 kalite imalat çeliğinin ve AISI 52100 rulman çeliğinin kimyasal kompozisyonları [32-33]

Sınıf	C 15
Numara	10.401
Sınıflandırma	Alaşımsız kalite yapısal çelik
Standart	EN 10277-2: 2008 Parlak çelik ürünler. Teknik teslim şartları. Genel mühendislik amaçlı çelikler

C 15 Çeliğin Kimyasal Özellikleri %

C	Si	Mn	P	S
0.12 - 0.18	max 0.4	0.3 - 0.8	max 0.045	max 0.045

C 15 Çeliğin Mekanik Özellikleri

Nominal kalınlık (mm):	5-10	10-16	16 - 40	40 - 63	63 - 100
Rm - Çekme dayanımı (MPa) (+ C)	500-800	480-780	430-730	380-670	340-600

Nominal kalınlık (mm):	5-10	10-16	16 - 40	40 - 63	63 - 100
$R_{p0.2}$ % 0.2 akma dayanımı (MPa) (+ C)	380	340	280	240	215

Nominal kalınlık (mm):	5-10	10-16	16 - 40	40 - 63	63 - 100
A - Min. kırılma uzaması (%) (+ C)	7	8	9	11	12

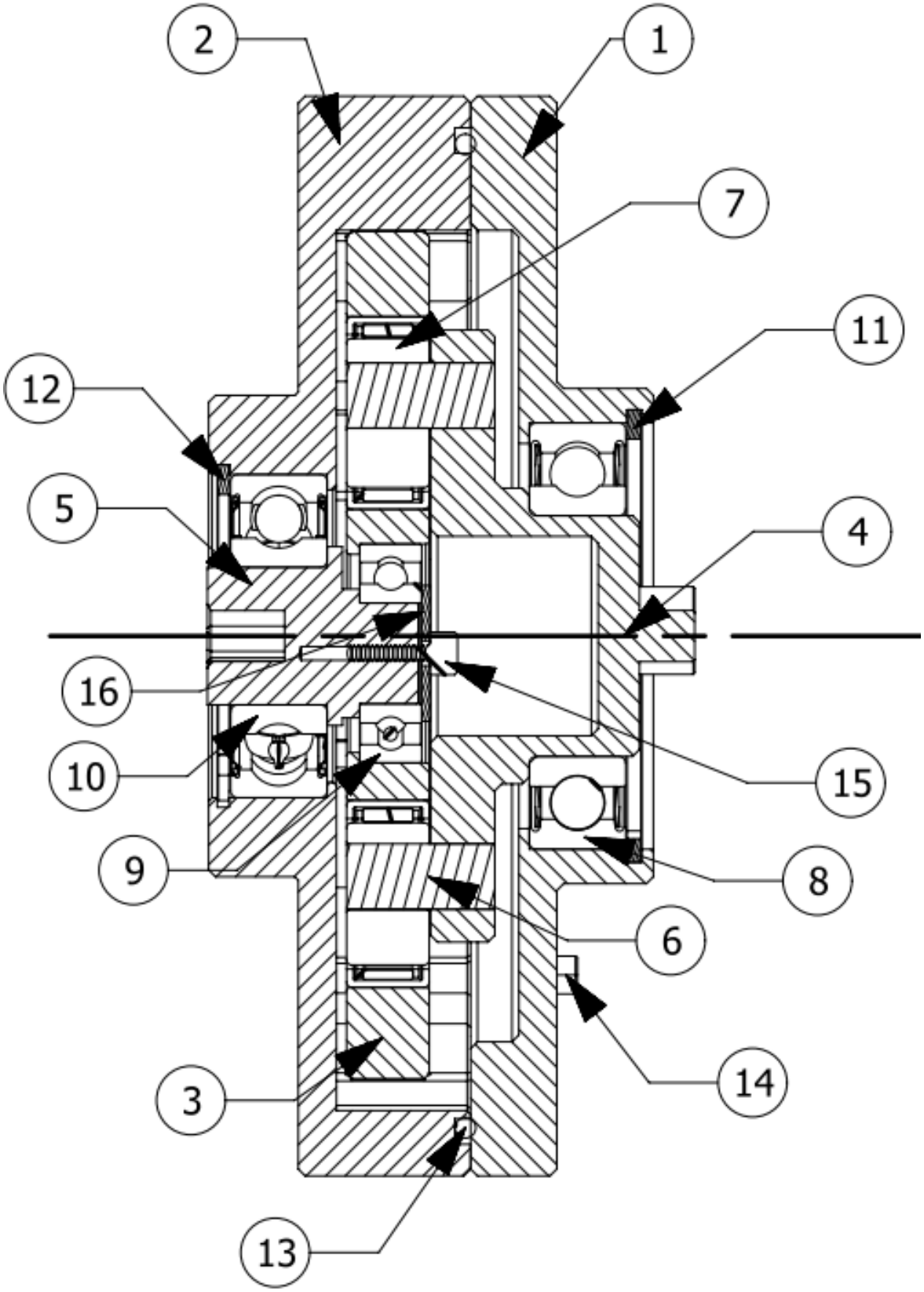
Typical Mechanical Properties — Carpenter VIM-VAR 52100
Spheroidized annealed bars

Condition	0.2% Yield Strength		Tensile Strength		% Elongation in 2" (50.8 mm)	% Reduction of Area	Hardness Brinell
	ksi	MPa	ksi	MPa			
1" Rounds							
Turned & Polished	62	427	94.4	651	27	62.5	179
Cold Drawn	87.5	603	107	738	17	54.9	229
7/16" Rounds							
13% Cold Work	91.2	629	104.8	723	25	57.0	229
26% Cold Work	106	731	124	855	16	50.0	262

Tempering
The following chart illustrates Rockwell C hardness values which may be expected by tempering VIM-VAR 52100 for 1 hour at various temperatures.

Tempering Temperature		Rockwell C Hardness	
°F	°C	Water Quenched	Oil Quenched
As hardened		66	64
300	149	64	62
400	204	61	60
500	260	60	58
600	316	57	57
700	371	54	54
800	427	—	51
900	482	—	48

EK-5. Montaj teknik resimleri



EK-5. (devam) Montaj teknik resimleri

Sıra	Parça Adı	Tanım
1	Çıkış Gövde	Gövde parçasıdır
2	Giriş Gövde	Gövde parçasıdır
3	Cycloidal Disk	Disk redüktörün salınım hareketi yapmasına olanacak sağlar.
4	Çıkış Mili	6 nolu balonda belirtilen pimler yardımıyla eksantrik dönüş doğrusal dönüş olarak cıkış miline aktarılır
5	Eksantrik Giriş Mili	Diskin eksenel salınım hareket yapmasını sağlayan aynı zamanda elektrik motorunun bağlandığı mildir.
6	Pim	Cycloidal disk ile çıkış mili arasındaki aktarımı sağlar
7	Eksantrik Yüzeysel Basma Yüzüğü	Eksantrik salınım hareketi yapan diskin HK2212 rulman içine yerleştirilen eksenel pimin noktasal temasyan yüzeysel temasını sağlar
8	SKF-6007-2Z Rulman	Çıkış milinin dönmesini sağlar
9	SKF-6002 Rulman	Eksenel giriş milinin kaçık silindir bölgesinin dönmesini sağlar
10	SKF-6204-2Z Rulman	Giriş milinin doğrusal eksende dönmesini sağlar
11	DIN472 İç Segman (62' lik)	8 numaralı balonda gösterilen çıkış mili rulmanının çıkış gövde de sabit kalmasını sağlar
12	DIN472 İç Segman (47' lik)	10 numaralı balonda gösterilen giriş mili rulmanının giriş gövde de sabit kalmasını sağlar
13	NBR70 Code 505 O-Ring	Giriş gövde ile çıkış gövde arasında yağ sızdırmazlığının önlemesini sağlar
14	Yağlama Tıpası DIN912 M5x3 8.8	Yağın konulacağı bölgedir.
15	Eksantrik Giriş Mil Civata DIN912 M4x12 8.8	Giriş milini 9 numaralı rulmanla arasında sabit kalmasını sağlar
16	Eksantrik Giriş Mil Pul Lazer Kesim	Giriş milini sabit tutan 15 numaralı balonda gösterilen civata ile basmasını sağlayan lazer kesim puldur
17	HK2212-İğne Bilyalı Rulman	7 numaralı balonda gösterilen eksantrik yüzeysel basma yüzüğünün oturduğu ve kayıcı sürtünmeyi en aza indiren rulmandır
18	Merkezleme Pimi	Giriş gövde ve cıkış gövde montajı esnasında merkezlemek için kullanılan pim
19	DIN912 M5x25 Civata	Giriş gövde ve cıkış gövde montajı esnasında kullanılan civata



Gazili olmak ayrıcalıktır