T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KORNEA SÜTUR ROBOTU TASARIMI, ANALİZİ VE UYGULAMASI

TUNÇ KÖSE

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN
YARD. DOÇ. DR. KADİR ERKAN

İSTANBUL, 2017

ÖNSÖZ

Başından sonuna kadar büyük bir heyecan ve şevk ile çalıştığım bu tez konusunu bana sunan ve tezi bu noktaya getirmemde maddi manevi hertürlü imkanı veren danışman hocam Yard. Doç. Dr. Kadir ERKAN'a, Yard. Doç. Dr. Hüseyin ÜVET'e ve Onurcan ŞAHİN'e sonsuz teşekkürü bir borç bilirim. Tez süresince teknik anlamda ellerinden gelen tüm desteklerini benden esirgemeyen arkadaşlarım ve meslektaşlarım Yük. Müh. Ali Anıl DEMİRÇALI'ya, Müh. Gürsel YENİ'ye, Müh. Halil İbrahim ERBAŞ'a ve Müh. Gizem AYDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım. Gerek iş hayatımda, gerek akademik hayatımda; maddi ve manevi olarak benden hiçbir desteğini bir an olsun bile esirgememiş olan, aldığım tüm kararlarda arkamda duran aileme de teşekkür ederim ve her daim teşekkür etmeye devam edeceğim.

Kasım, 2017

Tunç KÖSE

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vi

ŞEKİL LİSTESİ viii

ÇİZELGE LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 7
1.3 Hipotez 8

BÖLÜM 2

KONSEPT MEKANİK TASARIM ve KONTROL METODU ÇALIŞMALARI 9

2.1 Tasarımsal Sınırlamalar ve Gereksinimler 9
2.1.1 Göz ve Kornea Yapısı 9
2.1.2 Sütur(İğne) Seçimi 11
2.2 Konsept Mekanik Tasarım Çalışmaları 13
2.2.1 Sütur Atma Tekniğinin Belirlenmesi 13
2.2.2 Konsept Tasarım Çalışmaları 14
2.3 Kontrol Metodu Çalışmaları 18
2.3.1 Fiberoptik Sensör Tabanlı Kontrol Çalışmaları 18

BÖLÜM 3

BÜYÜK ÖLÇEKLİ PROTOTİP 23

3.1 Büyük Ölçekli Prototip Tasarımı 24
3.1.1 Ana Layer Tasarımı 24
3.1.2 Alt Layer Tasarımı 27
3.1.3 Üst Kapak Tasarımı 29

3.2 Büyük Ölçekli Prototip Üretimi 30
3.3 Büyük Ölçekli Prototip Montaj ve Testleri 34
3.3.1 Büyük Ölçekli Prototip Montajı 34
3.3.2 Büyük Ölçekli Prototip Testleri 37

BÖLÜM 4

GERÇEK ÖLÇEKLİ İLK PROTOTİP ÇALIŞMALARI 41

4.1 Mekanik Tasarım Çalışmaları 41
4.1.1 Ana Layer Uç Manipülatör Tasarımı 42
4.1.2 Dişlilerin Tasarlanması, Yerleşimi ve Hesapları 44
4.1.3 Silindir Tasarımları 50
4.1.4 Kullanılan Hazır Ekipmanlar 51
4.1.5 Motor Kapağı Tasarımı 53
4.1.6 Ön Kapak ve Arka Kapak Tasarımları 53
4.2 Sistemin Matematiksel Modeli 54
4.3 Gerçek Ölçekli İlk Prototip Parçalarının İmalatı ve Montajı 62
4.3.1 Gerçek Ölçekli İlk Prototip Parçalarının İmalatı 62
4.3.2 Gerçek Ölçekli İlk Prototipin Mekanik Montajı ı 66

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER 71

KAYNAKLAR 74

ÖZGEÇMİŞ 77

SİMGE LİSTESİ

b	Dişli kalınlığı
D	Nitelik indeksi
E	Elastiklik modülü
ε	Kavrama oranı
$F_{D1}, F_{D2}, F_{D3}, F_{D4}$	Birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü dişliler üzerindeki kuvvetler
F_{D5-6}, F_{D7-8}	Beşinci-altıncı dişliler ile yedinci-sekizinci dişliler üzerindeki kuvvetler
F_i	İğne üzerinde oluşan hareket yönündeki bileşke kuvvet
$F_ç$	İğne üzerine silindir tarafından aktarılan çevresel kuvvet
F_s	Silindir ile iğne arasındaki sürtünme kuvveti
g	Yerçekimi ivmesi
I_m	Motor rotorunun atalet momenti
I_{KD}	Konik dişlilerin atalet momenti
I_{Dw1}	w_1 dönüş hızındaki dişlilerin atalet momenti
I_{Dw2}	w_2 dönüş hızındaki dişlilerin atalet momenti
I_S	Silindirlerin atalet momenti
I_i	İğnenin atalet momenti
I_e	Motor şaftına binen toplam eşdeğer atalet momenti
KE	Elektrik motorunda harcanan kinetik enerji
Kd	Dinamik yük faktörü
Kf	Form faktörü
$Kç$	Çentik faktörü
m	Dişli modülü
m_s	Silindirin kütlesi
m_i	İğnenin kütlesi
M_D	Dişliler üzerindeki dönüş momenti
μ	Sürtünme katsayısı
n_1	Elektrik motorunun dönüş hızı
N_d	Dişlilerin çevrim oranı
N_i	İğnenin çevrim oranı
η_D	Her bir kademedeki dişli aktarım verimi
η_{DT}	Dişli sisteminin toplam verimi
P	Elektrik motorunun uyguladığı güç
P_{em}	Emniyet basıncı
r_D	Dişli yarıçapı

r_s	Silindir yarıçapı
S	Güvenlik katsayısı
t	Motor çalışma hızına ulaşma süresi
T_m	Elektrik motoru torku
w_1	Motor çıkışı açısal dönüş hızı
w_2	Dişli redüksiyon oranı sonucu ortaya çıkan açısal dönüş hızı
w_i	İğnenin açısal dönüş hızı
w_s	Silindirin açısal hızı
z_1	Küçük dişli diş sayısı
z_2	Büyük dişli diş sayısı
φm	Genişlik katsayısı
τ_{em}	Emniyet gerilmesi
τ_K	Kopma dayanımı
$\ddot{\theta}_i$	Elektrik motorunun açısal ivmesi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Korneanın kesilmesi ve donör korneanın hasta gözüne dikilmesi.....3
Şekil 1.2 Femtolazer ile korneanın kesilme çeşitleri.....4
Şekil 2.1 Gözün genel yapısı.....10
Şekil 2.2 Kornea Sütur Robotu uç manipülatör geometrik yapısı.....11
Şekil 2.3 Kornea nakli operasyonlarında kullanılan standart sütur(10-0 Alcon®).....12
Şekil 2.4 Alcon® sütur geometrik boyutları ve SEM görüntüsü.....12
Şekil 2.5 Süturun (Alcon®) dikiş atma pozisyonu.....13
Şekil 2.6 Süturun Kornea Sütur Robotu İçerisindeki Pozisyonu.....15
Şekil 2.7 Silindirlerle iğneye döner hareketin aktarıldığı sütur adımları.....16
Şekil 2.8 Silindirlere hareket aktaran konsept dişli mekanizma yapısı.....17
Şekil 2.9 Işık sinyallerinin fiber optik kablo içerisinde iletimi.....19
Şekil 2.10 Fiber optik sensör verici (transmitter) devresi.....21
Şekil 2.11 Fiber optik sensör alıcı (reciever) devresi.....21
Şekil 3.1 A: Büyük ölçekli tasarımda ana layer, B: Uç manipülatör ölçüt kriterleri.....25
Şekil 3.2 Büyük ölçekli tasarımda dişliler: $m = 1, Z = 20$.....26
Şekil 3.3 Silindir ve dişlilerin mekanizma içerisindeki konumlandırılması.....26
Şekil 3.4 Alt Layer ön(A) ve arka(B) tasarımları.....27
Şekil 3.5 Silindir mili(A) ve mile montajlanmış silindir(B) boyutlandırmaları.....28
Şekil 3.6 600 serisi rulman ölçüleri.....28
Şekil 3.7 Üst kapak tasarımı.....29
Şekil 3.8 Büyük ölçekli mekanizmanın kesitli montajı.....30
Şekil 3.9 Üretilen dişli ve teknik resmi.....31
Şekil 3.10 Üretilen Alt Layer ve rulman montajlı hali.....31
Şekil 3.11 3D Printer ile üretilen Ana Layer ve montajlı hali.....32

Şekil 3.12 Silindir ve mili.....33
Şekil 3.13 İki parçalı Üst Kapak.....33
Şekil 3.14 Alcon® iğnenin 10:1 ölçekli üretimi.....34
Şekil 3.15 Büyük ölçekli sistem tasarımının demontaj hali.....34
Şekil 3.16 Rulmanların Alt Layer'a montajı.....35
Şekil 3.17 Motorun Ana Layer'a montajı.....35
Şekil 3.18 Ana Layer ile Alt Layer'ın montajı.....36
Şekil 3.19 İğneye döner hareketi aktaracak silindirlerin montajı.....36
Şekil 3.20 Dişlilerin montajı.....37
Şekil 3.21 İğne ve Üst Kapağın montajı.....37
Şekil 3.22 Büyük Ölçekli(10:1) ilk prototip testi.....38
Şekil 3.23 Fiber optik sensör verilerinin ölçülmesi.....39
Şekil 4.1 Kornea Sütur Robotu uç manipülatör yerleşimi.....43
Şekil 4.2 Dişlilerin bölüm dairelerine göre yerleşimi.....45
Şekil 4.3 Bölüm dairesi çapı Ø2,5 mm olan dişli.....45
Şekil 4.4 Bölüm dairesi çapı Ø4,5 mm olan dişli.....46
Şekil 4.5 Tahrik silindir dişlileri ve aktarım dişlilerinin dizilimi.....46
Şekil 4.6 Mukavemet hesapları yapılan tahrik ve aktarma dişlileri.....47
Şekil 4.7 Tahrik silindiri.....50
Şekil 4.8 Precision Microdrives 206-108 DC motor.....51
Şekil 4.9 Konik dişli takımı.....51
Şekil 4.10 MR63 Rulman: D=6; d=3; H=2.....52
Şekil 4.11 Ana Layer gövdesi ön ve arka görünümü.....52
Şekil 4.12 Motor kapağı tasarımı.....53
Şekil 4.13 Ön Kapak tasarımı.....54
Şekil 4.14 Arka Kapak tasarımı.....54
Şekil 4.15 Kornea Sütur Robotu dişli aktarım modeli.....55
Şekil 4.16 İğne üzerine düşen kuvvet bileşenleri.....60
Şekil 4.16 EDM imalat teknolojisi.....63
Şekil 4.17 İmal edilen Kornea Sütur Robotu Ana Layer parçası.....64
Şekil 4.18 İmal edilen Ön Kapak.....64
Şekil 4.19 İmal edilen silindirik parçalar.....65
Şekil 4.20 İmal edilen dişliler.....65

Şekil 4.21 İmal edilen Motor Kapağı.....66
Şekil 4.22 İmalatı gerçekleştirilen ve temin edilen Kornea Sütur Robotu sistem kompanentlerin demonte resmi.....67
Şekil 4.23 Silindirik kompanentlerin mikroskop altında Ana Layer üzerine montajı.....67
Şekil 4.24 Sütur ve Ön Kapağın Ana Layer üzerine montajı.....68
Şekil 4.25 Ana Layer ön yüzeyine rulman ve konik dişli montajı.....68
Şekil 4.26 Ana Layer üst yüzeyine rulman, konik dişli ve DC motorun montajı.....69
Şekil 4.27 Dişlilerin ve Arka Kapağın montajı.....69
Şekil 4.28 Motor Kapağının Ana Layer ve motor üzerine montajı.....70

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 Dişli kademelerinde verim değerleri.....56

ÖZET

KORNEA SÜTUR ROBOTU TASARIMI, ANALİZİ VE UYGULAMASI

Tunç KÖSE

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yard. Doç. Dr. Kadir ERKAN

Cerrahi operasyonlarda Laparoskopik robotların kullanımı son yıllarda gün geçtikçe artmaktadır. Bu robotlar, özellikle hassas dokuların üzerindeki uygulamalarda, operatör cerrahların insiyatifini en aza indirgeyerek insan hatasından kaynaklı doku travmalarının önüne geçilmesinde ciddi bir avantaj sağlamaktadır.

Kornea nakli ameliyatlarında; kornea dokusu zarar görmüş, görme yetisini kaybetmiş veya kaybetmekte olan hastaların korneaları, donörlerden alınan kornealarla değiştirilerek hastalara görmelerini geri kazandırmak amaçlanmaktadır. Bu ameliyatlar zorunlu olup; müdahalenin olmadığı ya da uygun donör korneanın bulunamadığı durumlarda, hastalar görme yeteneklerini tamamen kaybetmektedir. Operasyonun her basamağında olduğu gibi, donör korneanın hastanın gözüne dikilme basamağı da operasyonun başarısına büyük etki etmektedir.

Tez konusunun amacı, kornea nakli operasyonlarında kritik öneme sahip olan sütur(dikiş) atma işlemini gerçekleştirebilecek robotik bir sistem geliştirmektir. Klasik çift kollu sitemler yerine, tek bir robotik kolla sütur atabilecek, yeni ve özgün bir tasarımın yapılması hedeflenmiştir. Keratoplasti adı verilen bu ameliyatlarda, donörden alınmış sağlıklı korneanın hastaya nakli sırasında standart bir tedavi yöntemi oluşturmak ve dikim başarısını arttırmak birincil hedefler arasında olmuştur. Vücuttaki diğer dikim operasyonları karşılaştırıldığında, kornea dikimi ciddi bir operasyon olup, oluşabilecek ufak hatalar ciddi görme bozukluklarına sebep olmaktadır. Hataların en aza indirilmesi ile gözde oluşabilecek yüksek derecelerde görme kusurlarının engellenmesi hedeflenmiştir.

Gelişen teknoloji ile birlikte, geçmişte sütur atılmasının gerekli olduğu birçok ameliyat günümüzde; bıçaksız ve sütursuz bir şekilde gerçekleştirilebilirken; kornea nakli ameliyatlarında ise halen sütur tekniği kullanılmaktadır. Sütur işleminin bu denli önemli olduğu bu ameliyatlarda; doktorların kullanabileceği ve ameliyat sürecini standartlaştırabilecek mikro-robotik bir sisteme ihtiyaç duyulmaktadır. Donör kornea, yapısı itibari ile çok hassas bir dokudur. Bu nakil ameliyatı sırasında yapılan her müdahale; her bir süturun, bu dokuda travmatik bir etki yaratmasına sebep olmaktadır. Bu etkiler, ameliyatın başarı kıstaslarından en önemlisini oluşturmakta ve travmatik etkilerin en aza indirgendiği ameliyatlar, başarılı olarak değerlendirilmektedir. Operasyon esnasında; atılması gereken bir süturun uygunsuzluğundan dolayı tekrarlanması, bahsedilen travmatik etkiyi arttırmaktadır. Tez kapsamında geliştirilen Kornea Sütur Robotu; bu ameliyatların başarı oranını, dolayısıyla hastanın ameliyat sonrası yaşam kalitesini arttırabilecektir. Tez çalışması sonunda ortaya konulan ilk prototip, alanında dünyada bir ilk olma özelliği taşımaktadır.

Bu tez çalışması dahilinde, uygulama fikri ortaya konan Kornea Sütur Robotu'nun konsept mekanik çalışmaları yapılarak uygulanacak mikro sistem mekanizması tespit edilmiş ve 10:1 ölçekli versiyonu üretilerek çalışabilirlik testleri yapılmıştır. Akabinde belirlenen konsept yapının mikro sisteme adapte edilmesi üzerine tasarımsal ve üretimsel ar-ge çalışmaları gerçekleştirilerek, ortaya çıkan tasarımın matematiksel modelleri ve statik hesaplamaları gerçeklenmiştir. Tez sonunda imal edilen mikro yapıdaki Kornea Sütur Robotu test ve deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Keratoplasti Cerrahisi, Laparoskopik Robotlar, Kornea Nakli, Sütur Robotu, Biomedikal Cihazlar, Mikro Robotik

ABSTRACT

CORNEA SUTURE ROBOT DESİGN, ANALYSIS AND IMPLEMENTATION

Tunç KÖSE

Department of Mechatronic Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Kadir ERKAN

The use of laparoscopic robots in surgical operations has been increasing day by day. These robots offer a serious advantage, especially in the applications on sensitive tissues, where the operator minimizes the surgeon's initiative to avoid tissue trauma caused by human error.

With corneal transplant surgery; corneal tissue is damaged, and corneas of patients who have lost sight or lose sight, or corneas taken from donors are replaced with corneas to restore illness. These surgeries are mandatory; when there is no intervention or when the appropriate donor cornea is not found, the patients completely lose their ability to see. As with every step of the operation, donor cornea of the patient's eye suturing has a great effect on the success of the operation.

The aim of the thesis is to develop a robotic system that can perform suturing with critical prescription in corneal transplant operations. It is aimed to make a new and original design that can throw sutures with a single robotic arm instead of classic double arm systems. In these operations, called keratoplasty, it is a primary goal of healthy cornea taken from the donor to establish a standard treatment method during the transplantation and to increase the planting success. When compared to other planting operations in the body, corneal stitching is a serious operation, and minor faults can cause

severe visual disturbances. It is aimed to prevent visual defects at high grades that may occur in the eye by reducing the most miscarriages.

Along with the developing technology, many operations in the past that require suturing can be carried out without blades and without fingers today; suture technique is still used in corneal transplant surgery. In keratoplasty operations where suture operation is important; there is a need for a micro-robotic system that can be used by doctors and standardize the surgical procedure. The donor cornea is a very sensitive tissue by its structure. Every intervention performed during this transplantation operation; each suture causes a traumatic effect on this tissue. These effects constitute the most important criteria for the success of the surgery and the operations with the least traumatic effects are evaluated as successful. During the operation; Repeated due to incompatibility of a suture to be thrown, increases the said traumatic effect. The cornea suture robot developed within the scope of the thesis will increase the success rate of these operations and the quality of life of the patient after surgery. The first prototype revealed at the end of the thesis work is the first in the world in its own field.

Within the scope of this thesis, conceptual mechanics studies of Cornea Suture Robot which application idea was put forth and micro system mechanism to be applied were determined and 10:1 scale version was produced and operability tests were performed. Afterwards, the design concept was applied to the micro system and then the design and production researches were carried out and the mathematical models and static analyzes of the emerging design were realized. At the end of the thesis, Cornea Suture Robot test and experiments were carried out and the results are presented.

Keywords: Keratoplasty Surgery, Laparoscopic Robots, Corneal Transplant, Suture Robot, Biomedical Devices, Micro Robotic

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Işık göz içerisinde farklı bölümlerle etkileşerek retina üzerine odaklanır, bu sayede optik ve maddesel olarak iki çeşit etkileşime girer. Bu etkileşimlerden ilki olan gözün ışığı kırma bozukluğu olarak da yaygınca bilinen optik etkileşimlerdir. Bu etkileşimler gözün yapısal olarak farklı olması nedeni ile retinanın önüne ya da arkasına odaklanması, net odaklanamaması durumunda ortaya çıkan görme bozukluklarına yol açmaktadır. İkinci olarak, ışık göz içerisindeki optik sistemlerle maddesel olarak etkileşir. Göz organik bir dokudur ve bütün bir optik sistem olarak düşüldüğünde farklı dokular ve yapısal bağlar bulundurur. Gözü oluşturan bu farklı dokular ve bağlar mükemmel değildirler. Her optik sistemde olduğu gibi gözde de bu yapısal bozukluklar ışıkla saçılımına neden olarak görüntü kalitesinde bozulmalara yol açmaktadır [1]. Göz bütün bir optik sistem olarak ele alındığında, bu sistemdeki herhangi bir elemandaki işlev ya da yapısal bozukluk, görme kalitesi üzerinde düşüşe sebep olmaktadır.

Kornea, insan gözünün en ön kısmında yer alan şeffaf ve yüksek kırıcılık özelliğine sahip olan dokudur. Ön yüzeyinin eğimi sayesinde göze gelen ışınlar kırılarak göz merceğinden de geçtikten sonra retina üzerinde odaklanırlar. Korneanın yüzeyinin düzgünlüğü ve de şeffaflığı düzgün görmenin sağlanması için en önemli etkenlerden biridir.

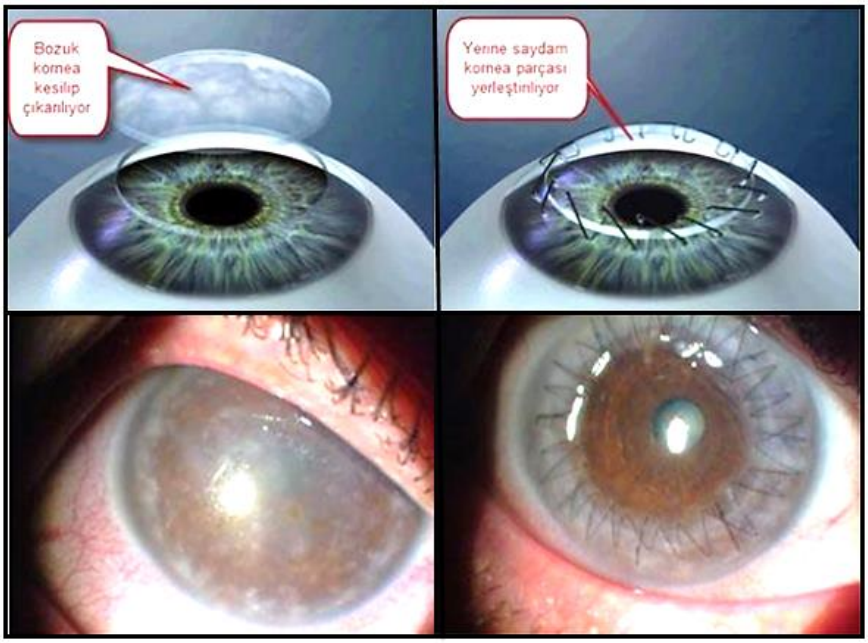
Kornea nakli (Keratoplasti), sağlığını çeşitli nedenlerle yitirerek, şeffaflığını kaybetmiş ya da şekli bozulmuş kornea dokusunun belirli büyüklükte dairesel şekilde çıkarılarak yerine kadavradan alınan ve yine uygun çapta kesilerek hazırlanmış sağlıklı kornea dokusunun yerleştirilmesi ameliyatıdır. Kornea, yapısı gereği üzerinde damarlar bulundurmayan bir

dokudur. Bu sebeple başarı oranı diğer nakillere oranla en yüksek doku naklidir ve de günümüzde sıklıkla gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmalar hastaların barındırdığı diğer hastalıklara göre farklılık gösterebilse de bu başarı oranı yaklaşık %18 dir [2].

Son zamanlarda; operasyon tekniklerinde ve kullanılan materyallerdeki gelişmeler, hücre koruyucu özel maddelerin kullanılması, donör (verici) korneanın sağlıklı ve steril koşullarda alınması, doku kalitesi ve uygunluğunun test edilmesi ile bu ameliyatın başarı oranı daha da artmaktadır. Kornea nakli ameliyatları (keratoplasti); görmeyi arttırmak (optik), kornea hastalığını tedavi etmek(teropatik), göz bütünlüğünü korumak(tektonik) ve dış görüntüsünü(kozmetik) düzeltmek amacıyla yapılabilir. Görme keskinliğini arttırmak, korneanın şeffaflığını bozan enfeksiyonlara bağlı skar dokuları ve damarlanmalar; korneada madde birikimleri ile ortaya çıkan distrofiler; göz içi cerrahiler sırasında veya kalıtsal bir hastalık olarak ortaya çıkan endotel yetmezlikleri gibi nedenler ile kornea saydamlığının bozulması en fazla rastlanan kornea nakil nedeni olan patolojilerdir. Ek olarak:

- Korneanın incelmesi ve özgün antimikrobial tedaviye cevap vermeyen keratitler,
- Göz cerrahisi sonrası korneanın şeffaf kalmasını sağlayan hücrelerin hasar görmesi ve kornea bulanıklaşması,
- Korneanın kubbe şeklinin bozulması, örneğin konikleşmesi (keratokonus),
- Kalıtsal geçiş gösteren bazı kornea hastalıklarında,
- Enfeksiyon nedeni ile korneada yara dokusu ve yeni damarlanma olması (örneğin, Herpes -uçuk virüsü- keratiti sonrası),
- Kazalar nedeniyle kornea bulanıklaşması veya bütünlüğü ağır derecede bozulması gibi durumlarda kornea nakli ameliyetları gerçekleştirilir.

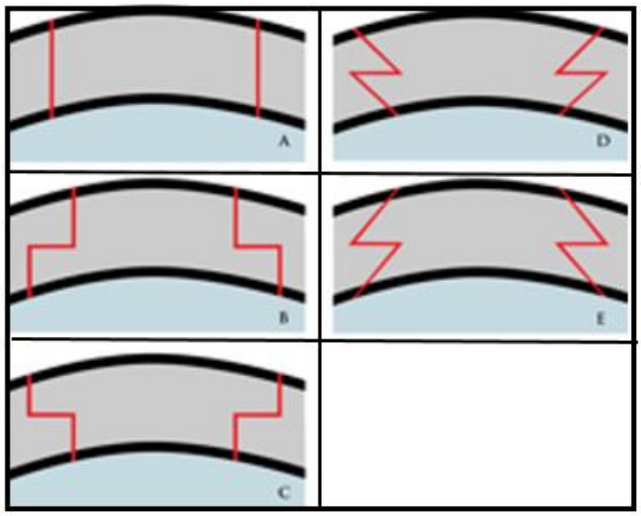
Bu ameliyatlar zorunlu olup; müdahalenin olmadığı ya da uygun donör korneanın bulunamadığı durumlarda, hastalar görme yeteneklerini tamamen kaybedebilmektedir. Kornea nakli ameliyatı çoğunlukla genel anestezi altında yapılır. Mikroskop altında, yuvarlak özel bir bıçak ya da femtosaniye lazerler [3][4][5] ile hastanın bulanık korneasının merkezinden 7,5-8 mm çapında bir pencere çıkarılır ve kadavradan alınan şeffaf kornea dokusu uygun boyutta kesilerek bu bölgeye dikilir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Korneanın kesilmesi ve donör korneanın hasta gözüne dikilmesi

Günümüzde halen sıklıkla gerçekleştirilen bu ameliyatlarda; bahsedilen kesme, yerleştirme ve sütur gibi işlemler operatör doktor (cerrah) tarafından gerçekleştirilmektedir. Operatörün tecrübesine göre, operasyonun zamanı ve korneaya yapılan müdahaleler farklılık göstermektedir. Bu durumda, ameliyatın başarısı; bütün insan kontrollü gerçekleşen ameliyatlarda olduğu gibi cerrahın beceri ve tecrübesiyle doğrudan bağlantılıdır.

Donör kornea ve nakledilecek gözün hazırlanması için çeşitli tıbbi cihazlar geliştirilmiştir. Günümüzde ilerleyen teknoloji ile birlikte donör kornea ve nakledilecek göz femtolazerler yardımıyla çok hassas ve başarılı bir biçimde oluşturulabilmektedir. Femtolazerler yetenekleri dahilinde gözü ve donör korneayı çeşitli şekillerde (Şekil 1.2) keserek dokuların daha iyi uyum sağlayabilmesi için seçenekler sunmaktadır. Teknolojinin getirdiği farklı yaklaşımlar ameliyatın başarısını arttırmaktadır [6][7][8].



Şekil 1.2 Femtolazer ile korneanın kesilme çeşitleri

Nakil edilecek göz ve donör korneanın hazırlanmasının dışında, kritik önem taşıyan aşamalardan bir tanesi de donör korneanın hastanın gözüne dikilmesidir. Kornea, yapısı itibariyle oldukça hassas ve zor bulunan bir doku olması sebebiyle hata yapma toleransı oldukça azdır. Ameliyat esnasında yapılan birleştirme aşaması halen geleneksel sütur teknikleri ile gerçekleştirilmektedir [9].

Ameliyat sırasında atılan her bir sütur iyileşme sürecinde az da olsa bir travmaya ve sonrasında göz görüş kalitesinde düşüşe sebep olmaktadır. Operasyon esnasında, atılması gereken bir süturun uygunsuzluğundan dolayı tekrarlanması bahsedilen travmatik etkiyi büyük oranda arttırmaktadır. Dolayısıyla kornea ameliyatlarının en büyük başarı kıstası, var olan bu travmatik etkilerin en az olması ile ölçülmektedir. Bu sebeple atılan süturun doğruluğu ve hassasiyeti oldukça önemlidir [10]. Bu noktada; atılacak süturun doğruluğu ve hassasiyetini arttırabilmek adına, günümüzde birçok uygulama alanında kullanılan cerrahi robotlar öne çıkmaktadır. Günümüzde çoğu cerrahi robotun, operatörlerden; doğruluk ve hassasiyet noktasında çok yüksek oranlarda istikrarlı ve hatasız olduğu, hız noktasında da yaklaşık olarak beş kat daha hızlı olduğunu görmekteyiz [11].

Ancak kullanılan ve üzerinde çalışılan cerrahi robotların çoğu laparoskopik ameliyatlar için geliştirildiğinden [12][13][14]; bahsedildiği üzere büyük önemi olan göz ve dahilinde korneaya uygun boyut ve işlevde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeple, geliştirilen kornea sütur robotu; laparoskopik uygulamaların çoğunda, uygulamayı kolaylaştırması, doğruluğunu kesinleştirmesi ve hastada büyük ameliyat yarası olmaması,

hastanın ameliyat sonrası iyileşme ve normal yaşama dönme hızının daha yüksek olması sebebiyle kullanılan robotik sistemlerin, kornea nakli uygulamalarında kullanılmak üzere özel olarak tasarlanmış bir cerrahi robotudur. Günümüzde çeşitli cerrahi teknikleri uygulamak için, endüstriyel robotlar kullanılmaktadır. Bu robotların yardımı ile veya tamamen robotlar kullanılarak yapılan cerrahi ise 'robotik cerrahi' olarak adlandırılmaktadır.

Günümüzde kullanılan endoskopik cerrahi robotlarına bakacak olursak; Computer Motion firması "the AESOP Endoscope Positioner " [15] adıyla endoskopik cerrahide ses ile çalışan bir robotik sistem geliştirmiş ve 1993 yılında onay almış, ardından "The HERMES Control Center" [16] aynı firma tarafından geliştirilmiştir. 1998 yılında piyasaya sürülen ZEUS, ameliyat masasına monte edilen üç endoskopik cerrahi kol ve bir cerrahi kontrol ünitesi ile endoskopik robotik cerrahide ve koroner bypass girişiminde tamamen endoskopik olarak kullanılan ilk sistem olmuştur. "SOCRATES Robotic Telecollaboration System" [17] Computer Motion firması tarafından 2001'de geliştirilmiştir. Integrated Surgical Systems, geliştirdikleri sistemi yeniden dizayn edip geliştirerek "da Vinci" sistemini ortaya çıkarmıştır ve sistem üç boyutlu görüntü eşliğinde çalışma olanağı vermektedir. Son zamanlarda ise 'total endoskopik bypass' cerrahisi ile Amerika, Avrupa, Japonya ve Türkiye'de "da Vinci" sistemi ameliyathanelerde kullanıma girmiştir. Yeni jenerasyon "da Vinci" robot sistemine dördüncü kol da eklenmiştir [18].

Ancak, "da Vinci"nin başta olduğu bu cerrahi robotları; iki veya daha fazla kol ile geleneksel operatör süturunun, yine operatör tarafından kontrol edilerek uygulama yapılması temeline dayanan sistemlerdir. Bu durumda da operatörün teknik hatalarını kompanze edilemediğinden, çevre dokulara hasar verme ya da doktorun kuvvet oranını ayarlayamaması gibi ihtimallerin varlığı devam etmektedir. Bu da travma oluşmasının engellenememesi anlamına gelmektedir. Ayrıca bu tür sistemler; boyut olarak keratoplasti ameliyatlarında kullanılabilecek büyüklükte olmasına rağmen çok pahalı, dolayısıyla da ulaşılabilirliği düşüktür. Aynı zamanda, operasyon içindeki tek bir uygulama(sütur atma) için gereğinden büyük çaplı ve pahalı sistemlerdir.

"Da Vinci" gibi pahalı ve kornea sütur işlemi için büyük çaplı mekanizmalar yerine, 2010 yılında yine iki uygulama kollu ancak, daha az maliyetli olması hedeflenen bir robotik sistem; kornea süturu için özel olarak planlanan ilk sistem olma özelliğini taşımaktadır

[19]. Önceleri “zımbalama” adı verilen tıbbi birleştirme metodu kullanılması önerilen bu sistem geliştirilerek görüntüleme ve sensör teknolojisi eklenmiştir [20]. İki uygulama koluna sahiptir ve başlangıç olarak sütur atma işlemini bu şekilde gerçekleştirmektedir. Çalışmada kuvvet ve mesafe sensörleri ile birlikte servo ve DC motor kullanılmıştır ve diğer bütün iki kollu çalışmalarda olduğu gibi düğümleme işleminde sıkıntılar yaşanma ihtimali yüksektir. Çalışmanın klinik araştırmaları henüz tamamlanmamış olmakla birlikte yalnızca teknik prototipi oluşturulmuştur ve sistemim tam entegrasyonu için çalışmalar devam etmektedir.

Literatürde çoklu kolla uygulama yapma sorununun en az olduğu, sütur uygulamasının tek bir kol ile yapıldığı ilk uygulama Smart Tissue Anastomosis Robot (STAR)’ dır [11]. Robotun sütur ucunda Endo360◦ adı verilmiş sütur aracı kullanılmaktadır. Bu uç sayesinde operatörün sütur atılacak bölgeye yaklaşması ve tetikleme yapması ile tek kol yardımıyla sütur işlemi yapılmaktadır. Ancak bu uç, boyutsal olarak büyük ve çoğunlukla yapısal olarak çok da hassas olmayan dokularda kullanılmak üzere tasarlanmıştır; kornea gibi hassas ve küçük uygulama alanları için uygun bir çalışma değildir. Aynı zamanda sütur ucu çalışma mantığı, incelenen patentlerden anlaşıldığı üzere [21] klasik dikiş makinesi iğnesi sistemine benzemektedir. Bu da iğnenin korneaya iki kez işlem uygulaması anlamına gelmektedir. Yani bir adet dikiş gerçekleştirebilmek için iğne hem girmeli hem de aynı bölgeden dışarı çıkmalıdır. Diğer dokularda bu işlem bir sorun olarak ortaya çıkmasa da, kornea gibi hassas bir dokuda bu işlemin yapılması oldukça riskli ve operasyonun başarısını, dolayısıyla da hastanın görmesini doğrudan etkileyen negatif bir faktördür. Ek olarak, Endo360 sisteminde keratoplasti operasyonlarında kullanılan standart sütur malzemesi yerine, firmanın sistem için özel ürettiği sütur malzemesi kullanılmaktadır. Bu da fazladan bir maliyet ve erişim zorluğu getirmektedir.

Literatür taraması sonuçları değerlendirildiğinde; tek uygulama kolu ile yüksek hassasiyete sahip, kornea dokusuna mikro seviyelerde uygulama yapabilecek, ilk aşamada ayrık sütur atma tekniğini başarıyla uygulayabilecek bir robot ihtiyacı olduğuna kanaat getirilmiştir. Ayrık sütur atma tekniğinde süturu atacak olan robot, kesecek ve bağlayacak olan operatördür. Kornea nakli ameliyatlarında öncesinde de bahsedildiği üzere en kritik aşama süturun doğru atılmasıdır.

Geliştirilen kornea sütur cerrahi robotu, mikro üretim teknikleri kullanılarak üretilmiş özgün hareket mekanizması sistemi sayesinde donör korneadan girip, hastanın göz bölgesinden ayrılmak suretiyle yarı dairesel tek bir hareketle süturu gerçekleştirebilen alanında ilk robotik çalışmadır.

1.2 Tezin Amacı

Tez çalışmasının amacı, kornea nakli operasyonlarında kritik öneme sahip olan sütur(dikiş) atma işlemini gerçekleştirebilecek mikro robotik bir sistem geliştirmektir. Klasik çift kollu sitemler yerine, tek bir robotik kolla sütur atabilecek yeni ve özgün bir tasarımın yapılması hedeflenmiştir. Keratoplasti adı verilen kornea nakli ameliyatlarında, donörden alınmış sağlıklı korneanın hastaya nakli sırasında standart bir tedavi yöntemi oluşturmak ve dikim başarısını arttırmak birincil hedefler arasındadır. Vücuttaki diğer dikim operasyonları karşılaştırıldığında, kornea dikimi ciddi bir operasyon olup, oluşabilecek ufak hatalar ciddi görme bozukluklarına sebep olmaktadır. Hataların en aza indirilmesi ile gözde oluşabilecek yüksek derecelerde görme kusurlarının engellenmesi hedeflenmiştir.

Gelişen teknoloji ile birlikte, geçmişte sütur atılmasının gerekli olduğu birçok ameliyat günümüzde; bıçaksız ve sütursuz bir şekilde gerçekleştirilebilirken; kornea nakli ameliyatlarında ise halen sütur tekniği kullanılmaktadır. Bu sebeple cerrahların sütur atma konusunda tecrübe edebileceği ameliyatların sayısı ve olanağı azalmaktadır. Sütur işleminin bu denli önemli olduğu bu ameliyatlarda; doktorların kullanabileceği ve ameliyat sürecini standartlaştırabilecek mikro-robotik bir sisteme ihtiyaç duyulmaktadır. Donör kornea, yapısı itibari ile çok hassas bir dokudur. Bu nakil ameliyatı sırasında yapılan her müdahale; her bir süturun, bu dokuda travmatik bir etki yaratmasına sebep olmaktadır. Bu etkiler ameliyatın başarı kıstaslarından en önemlisini oluşturmakta ve travmatik etkilerin en aza indirgendiği ameliyatlar, başarılı olarak değerlendirilmektedir. Operasyon esnasında; atılması gereken bir süturun uygunsuzluğundan dolayı tekrarlanması, bahsedilen travmatik etkiyi arttırmaktadır. Geliştirilmiş olan Kornea Sütur Robotu; kornea dikimini insan faktöründen olabildiğince arındırıp oluşabilecek insan hatasını en düşük seviyeye getirerek bu ameliyatların başarı oranını, dolayısıyla hastanın ameliyat sonrası yaşam kalitesini arttırabilecektir. Tez çalışması sonunda oluşturulan ilk prototip cihazın, hedefleri doğrultusunda kendi alanında dünyada ilk olduğu görülmektedir.

1.3 Hipotez

Bu çalışma neticesinde; Keratoplasti operasyonları için özel olarak geliştirilmiş Kornea Sütur Robotu, dünya literatürüne alanında ilk olarak sunulmuştur. Göz cerrahları tarafından standart olarak el ile atılan sütur tekniklerinde kullanılan iğne-iplik(sütur) takımı ve göz geometrisi-mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak dönerek sütur atma metodu üzerine mikro-mekanik yapıda tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İğnenin dairesel profili çevresinde dönüş hareketi gerçekleştirilerek sütur atma metodu geliştirilmiştir. Boyutsal yapının mikro ölçütler dahilinde olmasından dolayı, ortaya atılan mekanizma fikri ilk etapta 12 kat büyük ölçekli yapıda gerçekleştirilmiş; geliştirilmesi hedeflenen mekanizmanın ilk optimizasyon çalışmaları büyük ölçekli versiyon üzerinde tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında mekanik yapı, mikro imalat metotları kullanılarak gerçek boyutlarına indirgenmiştir. Bu sayede Keratoplasti operasyonlarında kullanılmak üzere, literatürde bulunan en küçük yapıda ilk ve tek göz cerrahisi sütur robotu prototipi sunulmuştur.

BÖLÜM 2

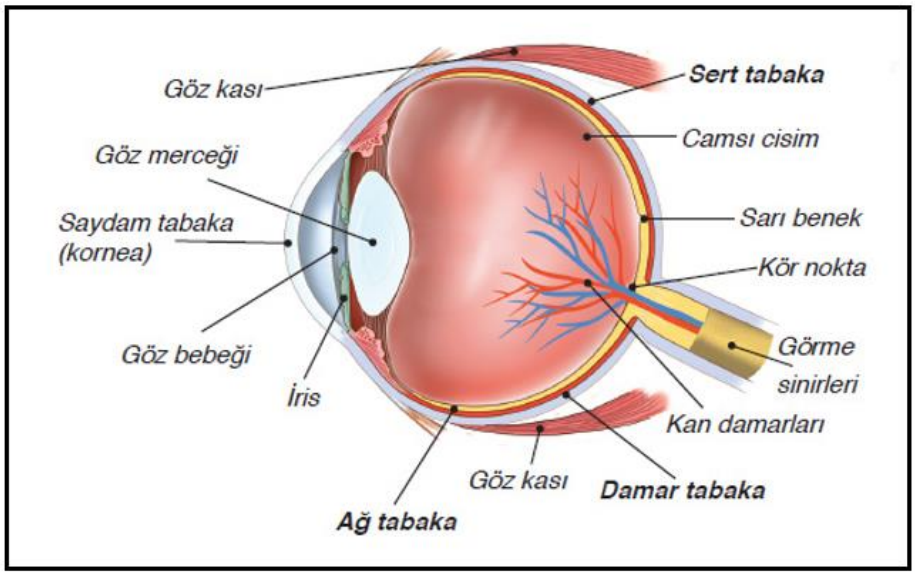
KONSEPT MEKANİK TASARIM ve KONTROL METODU ÇALIŞMALARI

Geliştirilmesi hedeflenen Kornea Sütur Robotunda belirlenmesi gereken ilk husus, dikiş atma(sütur) işlemini gerçekleştirecek iğnenin(süturun) ve gerçekleştirilecek dikiş tekniğinin tespiti olacaktır. Sistem tasarımı, gözün ve korneanın geometrik ve boyutsal sınırlandırmaları dahilinde; kullanılacak iğne ve gerçekleştirilmesi hedeflenen sütur atma işlemi ekseninde geliştirilmiştir. Bu sayede robot, literatürdeki diğer laparoskopik cerrahi robotlardan işlevsel ve boyutsal anlamda ayrışmaktadır. Bu çalışmada Kornea Sütur Robotunun sütur atma tekniği ve tasarım kriterleri ile, gerekli hareket aktarım mekanizmalarının belirlenmesiyle ortaya çıkartılan konsept tasarımlar anlatılacak; sistem üzerinde gerçekleştirilmesi düşünülen kontrol metotlarına değinilecektir.

2.1 Tasarımsal Sınırlamalar ve Gereksinimler

2.1.1 Göz ve Kornea Yapısı

Kornea, gözün en ön kısmında yer alan, ışığı odaklama ve gözü dış etkenlerden koruma görevine sahip, görme işlevinde büyük rolü olan gözün eğimli saydam tabakasıdır ve gözün en önemli kırıcı merceğidir. Kornea ve lens, dış ortamdan gelen ışığın etkin bir şekilde retinaya odaklanmasını sağlar. Korneanın kırıcılık gücü değişken değildir, buna karşın lensin kırıcılık gücü değişkendir. Hayvanlarda kornea, evrimsel olarak lens ve/veya iris içeren gözlerde bulunur. İnsanlarda ise gözün dış yüzeyinin 1/6'sını oluşturan oval bir yapıdır. Korneanın yatay çapı yaklaşık 12,6 mm, dikey çapı ise yaklaşık 11,7 mm'dir. Orta kısımdaki kalınlığı yaklaşık 520 µm, kenar kısımlarında ise 650 µm'dir.

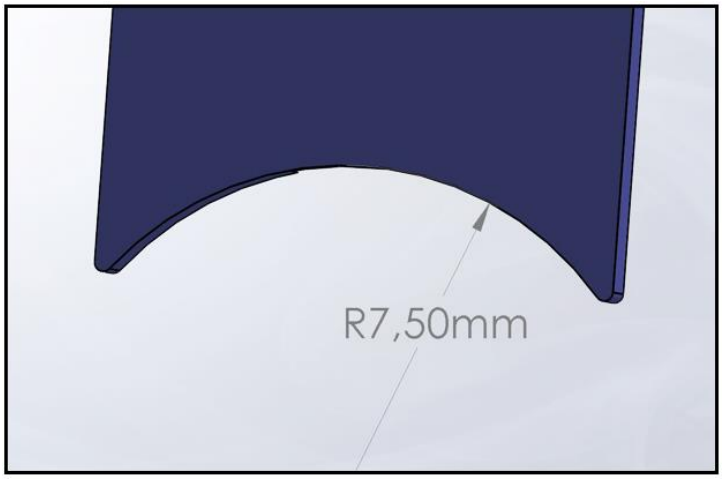


Şekil 2.1 Gözün genel yapısı

Korneanın saydamlığı birçok hastalık tarafından bozulabilir. Bu hastalıklar doğuştan, genetik kökenli veya mikrobik olabilir. Keratokonusun son döneminde görüş çok düşük ve hasta, kontakt lens veya kornea içi halkalardan faydalanamayacak durumda ise tedavi seçeneği kornea naklidir. Kornea nakli, korneanın şeklinin veya şeffaflığının bozulduğu hastalıklarda, hastalıklı dokunun sağlıklı donör (verici) doku ile değiştirilmesidir. Tıbbi olarak keratoplasti olarak bilinir. Bu operasyonun en sık yapıldığı hastalıklar; keratokonus, kornea ödemi, korneanın mikrobik ülserleri veya kazalar, yaralanmalar sonucu gelişen lekeler (opasiteler) ve kaltımsal kornea lekeleridir.

Keratoplasti operasyonları, hastanın gözünden kesilen hastalıklı kornea dokusunun yerine sağlıklı donör dokunun dikilmesi ile gerçekleştirilir. Mevcut sistemde operatör cerrahlar tarafından el ile gerçekleştirilen bu işlemin robotize edilebilmesi için robotik gripper ın uç manipülatör geometrisi, ortalama olarak kornea yapısına uygun ölçüt ve geometride olmalıdır.

Tıbbi destek ve danışmanlığını aldığımız Dünya Göz Hastanesi'nin Ar-Ge birim direktörlüğünden aldığımız veriler ışığında Kornea Sütur Robotumuzun uç manipülatörünün 7,5mm lik bir yarıçapa sahip olacak şekilde tasarlanması, bu sayede kornea üzerinde dikiş atılacak noktalarda doku ile sorunsuz bir şekilde temas edeceği öngörülmüştür.



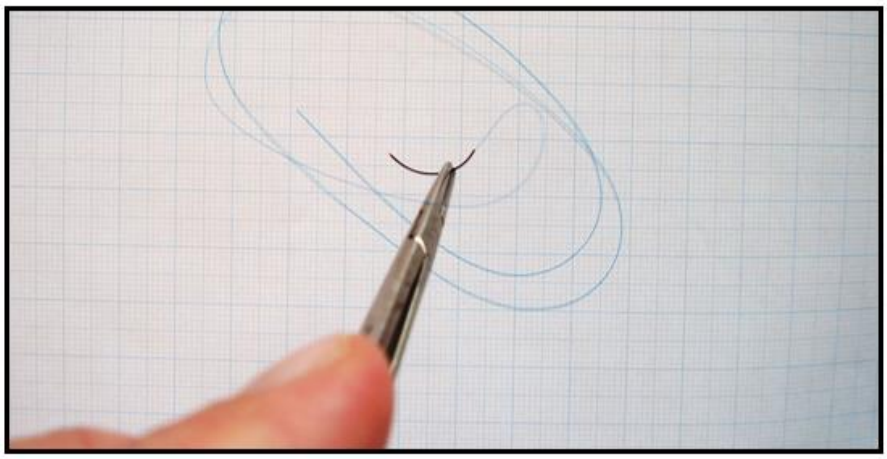
Şekil 2.2 Kornea Sütur Robotu uç manipülatör geometrik yapısı

2.1.2 Sütur(İğne) Seçimi

Günümüzde literatürde hali hazırda kullanılmakta olan laparoskopik cerrahi robotlar, mevcut çalışma prensiplerine ve mekanik yapılarına özel üretilmiş süturlarla dikiş atma işlemlerini gerçekleştirebilmektedirler. Geneli itibariyle yarım daire geometrili ve üzerlerinde hareket aktarım mekanizmaları için gerekli çentikler barındıran bu süturlar, in-vivo(vicut-doku içi) ortam şartlarındaki cerrehi operasyonlara uygun sertifikasyonlar dahilinde, uygulanacakları laparoskopik operasyonlara özel üretilirler.

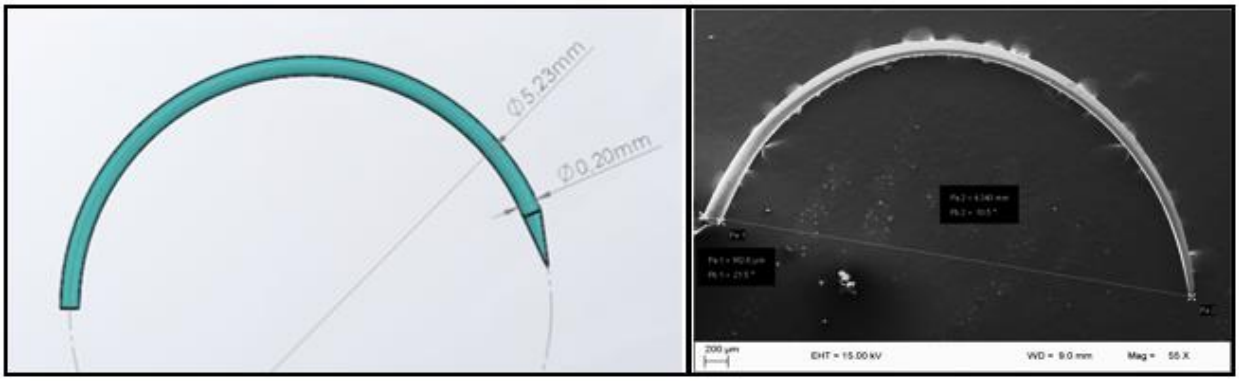
Sütur seçiminde, uygulanması istenen sütur atma işlemi ve sütura hareketin aktarılma mekanizmasının belirlenmesi önem arz etmektedir. Literatürdeki diğer laparoskopik robotlar gibi, Kornea Sütur Robotumuzun da yarım daire şeklindeki bir iğnenin dairesel hareketiyle gerekli dokular içerisinden geçmesi esasına dayanarak sütur atma işlemini gerçekleştirmesinde karar kılındı. Sütur atılacak bölgenin geometrik yapısının oldukça ufak olmasından dolayı Kornea Sütur Robotu için düşünülen özel iğne tasarımından, özellikle iğneye hareket aktarımı için iğne üzerinde çentik şeklindeki yapıların imalatının zor ve maliyetli olmasından dolayı vazgeçildi. Bunun yanında in-vivo ortam şartları için gerekli sertifikasyonların alınması gibi tıbbi ve hukuki gereksinimler de bizleri özel sütur tasarımı ve üretiminden uzaklaştıran önemli sebeplerin başında gelmektedir.

Kornea Sütur Robotunun tasarımı aşamasında, kullanılacak iğne için farklı yaklaşımlar üzerinde duruldu. Yapılan değerlendirmeler sonucunda ilgili iğnelerin geliştirilmesi, üretilmesi ve olası bir durumda kullanıcılara dağıtılması farklı zorluklar içermesi sebebiyle, bu operasyonlarda kullanılan standart iğneler(10-0 Alcon®) üzerine bir geliştirme yapılmasına karar verildi. Böylece Kornea Sütur Robotuna sahip olan her cerrah standart iğneleri kullanarak ameliyatlarını gerçekleştirebilmesi hedeflenerek sütur için ayrı bir geliştirme yapma ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 2.3 Kornea nakli operasyonlarında kullanılan standart sütur(10-0 Alcon®)

Halihazırda keratoplasti operasyonlarında cerrahlar tarafından kullanılmakta olan Alcon® sütur, 5.23 mm çapta yarım daire formunda ve 200 µm et kalınlığına sahip bir iğnedir.

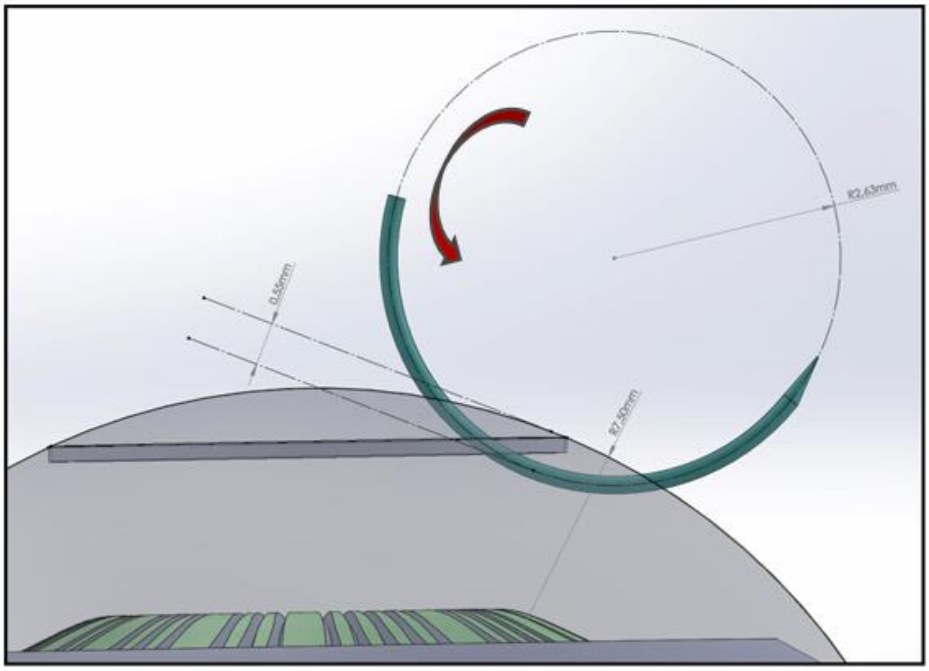


Şekil 2.4 Alcon® sütur geometrik boyutları ve SEM görüntüsü

2.2 Konsept Mekanik Tasarım Çalışmaları

2.2.1 Sütur Atma Tekniğinin Belirlenmesi

Geliştirilen Kornea Sütur Robotunda kullanacak süturun(Alcon®) yarım daire formunda olmasından faydalanarak, sahip olduğu dairesel çapı etrafında döndürülmesi hedeflenmiştir. Süturun robot uç manipülatöründen çıkarak sağlıklı kornea dokusuna girmesi, ardından hastanın korneasından çıkıp tekrardan robot mekanizması içerisine alınması fikri üzerinde durulmuş, ipliğin sağlıklı kornea ile hasta korneası içerisinden geçirilerek dikiş atılması işlemine hazır hale getirilmesi ön görülmüştür.



Şekil 2.5 Süturun (Alcon®) dikiş atma pozisyonu

İnsan korneası kalınlıkları 500 mikron ile 700 mikron aralığındadır. Bu bağlamda; geliştirilen Kornea Sütur Robotunda iğnenin kornea içerisine giriş derinliği, Dünya Göz hastanesi Ar-Ge birim direktörlüğü ve uzman doktorları ile yapılan görüşmelerde kendileriyle de istişare edilerek maksimum 550 mikron olarak tasarlanması planlanmıştır. Cerrahın sütur derinliği hassasiyetine sahip olmamasından dolayı geleneksel keratoplasti operasyonlarında oluşan dikiş derinliği farklılıkları ile meydana gelen travmalar, geliştirilen Kornea Sütur Robotu ile giderilerek istenen sürekli ve stabil dikiş derinliğinin elde edilmesi, aynı zamanda optimum dikiş kalitesi sağlanması hedeflenmiştir.

Keratoplasti operasyonları için hali hazırda iki çeşit sütur atma yöntemi cerrah operatörler tarafından uygulanmaktadır. Bunlardan ilki olan tekli(ayrık) sütur atma; süturun kornea dokusuna bir defa girip çıkması ve ipliğin kesilerek dokuya giriş-çıkış yaptığı noktalar arasında düğüm atılması ile dikiş işleminin tamamlanması yöntemidir. Bu işlem donör kornea etrafında ortalama 24 defa dikiş atılması ile sona erer. İkici yöntem ise sürekli sütur atma; süturun donör kornea etrafında ortalama 24 tur (iplik kesilmeden) birbirini takip eder şekilde dokuda gerekli noktalara girip çıkması ve son sütur işleminde ipliğinin kesilerek düğüm atılması esasına dayanır. Lakin doktorların birçoğunun tecihi ayrık sütur atma metodu olduğundan, Kornea Sütur Robotu tasarımı bu metod üzerinde şekillendirilmiştir.

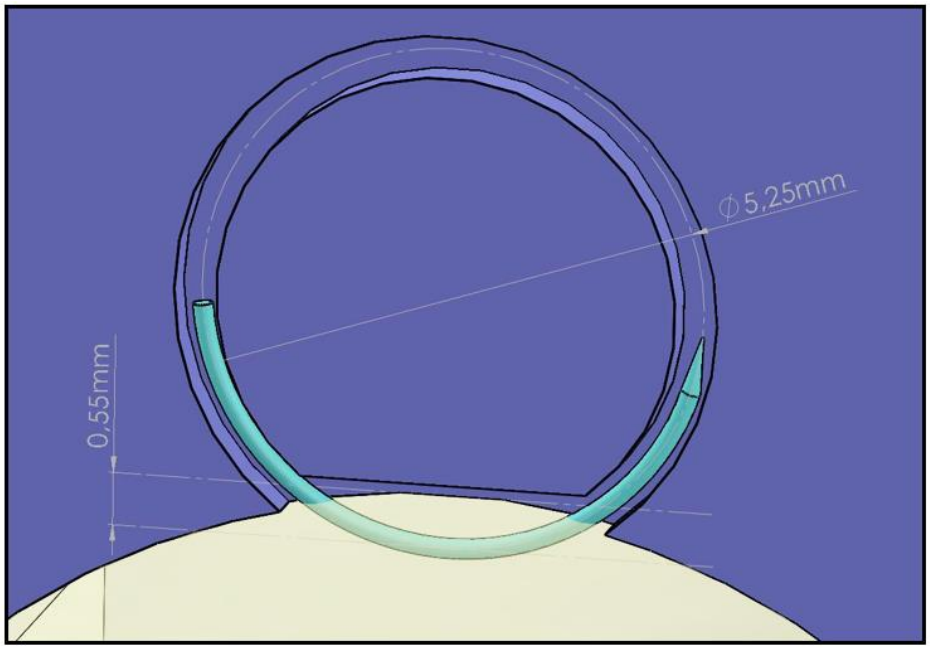
2.2.2 Konsept Tasarım Çalışmaları

Kornea Sütur Robotu konsept tasarımları, Bölüm 2.1'de belirtilen tasarımsal sınırlamalar ve gereksinimler ile belirlenen sütur tekniği ışığında yapılmıştır. Bu hususta:

- Robot uç manipülatör geometrisi: R7.5mm,
- İğne seçimi: Alcon®,
- Sütur tekniği: Tekli(ayrık) sütur,
- Sütur derinliği: 550 µm

kriterleri tasarım çalışmalarında baz alınmıştır.

İğnenin(Alcon®) kendi dairesel çapı etrafında döndürülmesiyle dikiş atılacak dokuya girip çıkması hedeflendiğinden, ilk olarak iğneye robot mekanizması içerisinde dairesel hareketini gerçekleştrebileceği bir hareket alanı ve bu döner hareket tahriğinin iğneye aktarılma şekli belirlenmiştir. Bu bağlamda ilk etapta iğnenin mekanizma içerisindeki hareket alanı(yarık) ve bu alanın 7.5mm yarıçaplı robot uç manipülatörüne göre konumlandırılması gerçekleştirilmiştir(Şekil 2.6).

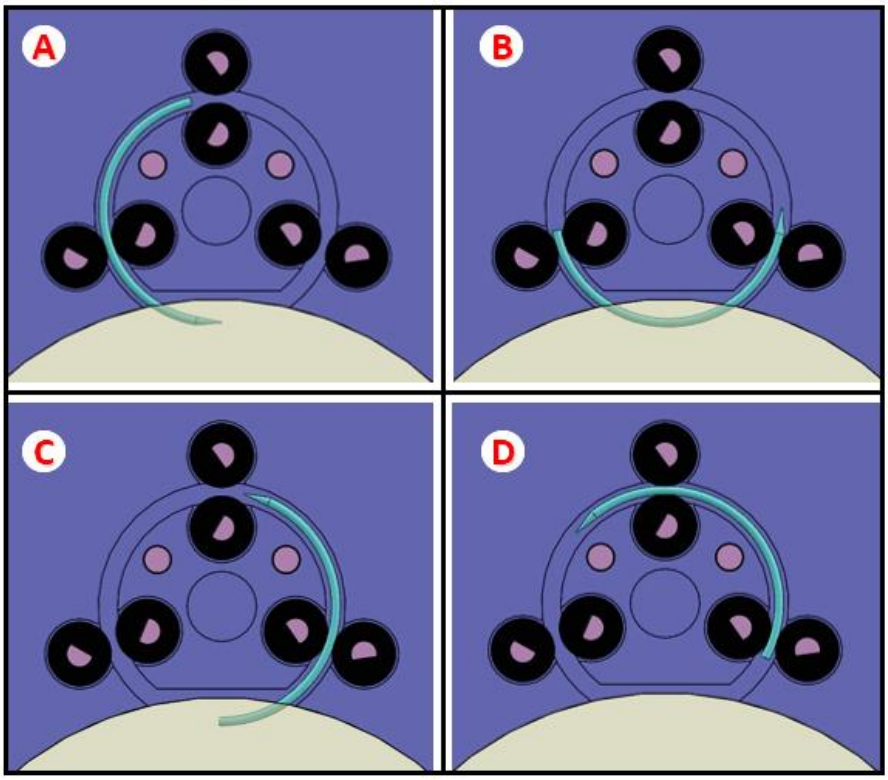


Şekil 2.6 Süturun Kornea Sütur Robotu İçerisindeki Pozisyonu

İğnenin robot içerisindeki hareket alanı maksadıyla açılması düşünülen yarık, dönüş merkezi Ø5,25mm olacak şekilde, iğne et kalınlığından(200 µm) yaklaşık 150 µm ofsetli olarak tasarlandı. Aynı şekilde yarığın robot uç manipülatörüne göre konumlandırılması da; iğnenin doku içerisinde maksimum 550 µm derinliğe gireceği şekilde ayarlandı.

İğnenin döner hareketini gerçekleştirdiği alanda, iğneye hareket tahrikini aktaracak mekanizmalar üzerinde duruldu. Literatürdeki benzer mantıkla sütur atan laparoskopik cihazların tam tersine; iğne üzerinde çentik-oyuk vs. açma gibi işlemler yapılamadığından kanca mekanizmaları ile iğne tahriği mekanizmasının uygulanması rafa kaldırıldı. Bu bağlamda; iğneye iç ve dış kısımlarından teğet olacak bir şekilde farklı nokatalardan temas eden silindirik yapıların döndürülmesi ile iğneye döner hareket tahriğinin aktarılması fikri üzerinde durularak geliştirmeler yapılmıştır(Şekil 2.7).

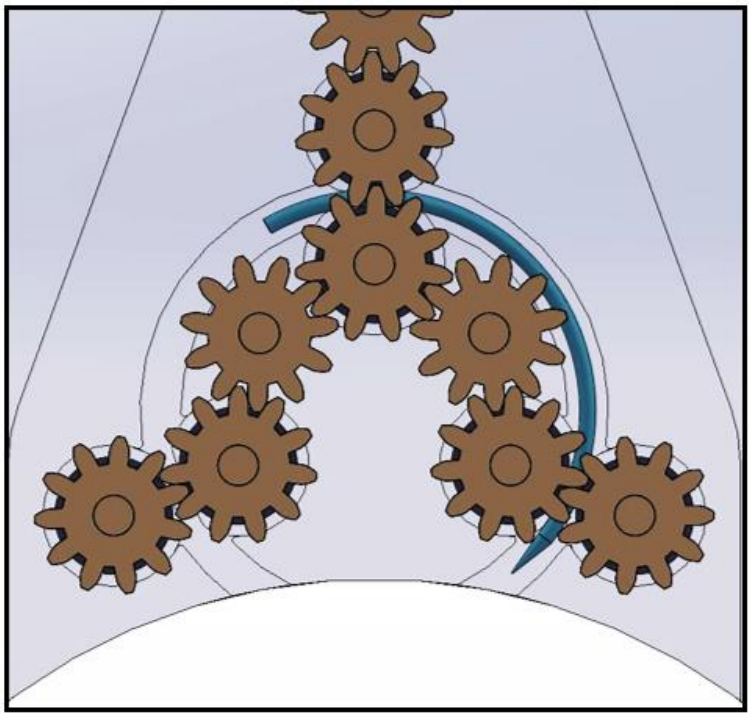
İğne malzemesinin metal olmasından dolayı, döner hareketi iğneye aktaracak silindirlerin yüksek yüzey sürtünmesine sahip olmaları, hatta mümkün olduğunca elastik yapıda olmaları gerektiği öngörülmüştür. Bu konuda yapılan çalışmalar, ar-ge süreçleri ve uygulama metodları ileriki bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



Şekil 2.7 Silindirlerle iğneye döner hareketin aktarıldığı sütur adımları; A: Süturun doku içerisine girmeye başlaması, B: Sütur doku içerisinde, C: Sütur dokudan robot mekanizmasına girmekte, D: Sütur robot mekanizması içerisinde.

Karşılıklı yerleştirilen ikili silindirik mikro yapıların, birbirine göre zıt yönlere dönmesi ile döner hareket tahrikinin iğneye aktarıldığı bu yapıda ikişerli silindir grupları; iğnenin robot uç manipülatöründen çıktığı bölgeye, doku içerisinden tekrar robot içerisine girdiği bölgeye ve yarık içerisinde dokuya göre en uç bölüme yerleştirilmiştir. Bu sayede iğnenin silindirik tahrik aktarım elemanlarıyla her noktada temas halinde olması ve döner hareketinde sürekliliğin sağlanması hedeflenmiştir.

İğneye döner hareketi aktaran mikro silindirik yapıların istenen yönde dönmelerini gerçekleştirebilmek için, tek bir elektrik motoru üzerinden tüm silindirlere tahrik aktarımı gerçekleştirecek bir mekanizma üzerinde çalışılmıştır. Bu hususta, silindirlerin her birine montajlanmış dişli gruplarını, ara aktarma dişlileri ile birbirlerine ve elektrik motoruna montajlı pinyon dişliye temas eder hale getirerek motordan elde edilen döner hareketin dişliler üzerinden her bir silindire aktarılması düşünülmüştür(Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Silindirlere hareket aktaran konsept dişli mekanizma yapısı

İğnenin ve silindirlerin bulunduğu yüzeyi robotun ön yüzü olarak tanımlayacak olursak, dişli grupları Şekil 2.8'deki gibi robotun arka yüzeyinde konumlandırılmıştır. Elektrik motoruna bağlı pinyon dişli üzerinden döner hareket; iç içe geçmiş olan diğer dişlilere ve bu dişliler ile montajı gerçekleştirilmiş olan silindirlere aktarılır. Bu sayede silindirler ile mekanik temas halinde olan iğneye istenen yönde gerekli döner hareket, silindirler üzerinden sürtünme direnç kuvvetleri vasıtası ile aktarılmış olur.

Konsept olarak tasarlanan Kornea Sütur Robotunda, bilgisayar ortamında oluşturulan mikro boyuttaki parçaların istenilen hassasiyetlerde üretimi için özel imalat metotları uygulanması gerekmektedir. Mikro yapıdaki Kornea Sütur Robotu mekanizmalarının çalışabilirliğini fiziki olarak test edebilmek için tüm bu parçaların tasarlandıkları mikron ölçülerde üretilmeleri, amacına yönelik düşünüldüğünde çok maliyetli olacaktır.

Bölüm 3' de anlatıldığı üzere; düşünülen konsept mekanik tasarımın fiziki olarak çalışabilirliğinin test edilebilmesi, yani öngörülen tahrik ve hareket aktarım sistemlerinin doğruluğunu minimum maliyetle ortaya koyabilmek için sistemin büyük ölçekli bir versiyonu tasarlanmıştır. Sistem doğrulamasının yapılmasının ardından sistem gerçek ölçülerde üretilebilir olacak şekilde tasarlanarak gerçeklenmiş, kurulan deney düzeneği üzerinde testleri gerçekleştirilmiştir.

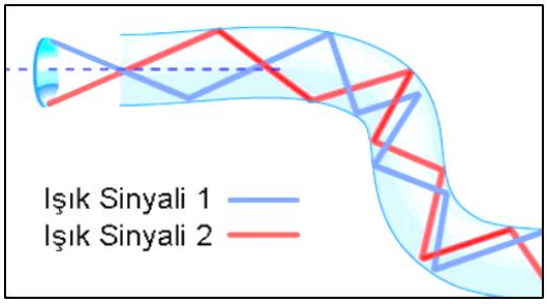
2.3 Kontrol Metodu Çalışmaları

2.3.1 Fiberoptik Sensör Tabanlı Kontrol Çalışmaları

İnsanoğlu ilkçağlardan bu yana uzak mesafeli iletişim sağlayabilmek için çeşitli yöntemler kullanmıştır. Özellikle 1930'lu yıllarda elektriksel haberleşme çağına geçilmiş, devam eden süreçte veri iletişiminde kısa zamanda büyük mesafeler kat edilmiştir. Bu aşamadan sonra bilginin bir noktadan diğer bir noktaya daha hızlı taşınması, yani haberleşmeyi daha hızlı hale getirmek hedeflenmiştir. Elektrik iletininden daha hızlı iletişim araçları aranmaya başlanmasıyla; ışığın elektrik iletiminden daha hızlı olması ilkesi baz alınarak, verilerin ışık iletimi vasıtasıyla bir noktadan başka bir noktaya taşınabileceği keşfedilmiştir.

Bu bağlamda ışığın ve dataların (bilginin) nasıl bir ortamda iletileceği araştırma konusu haline gelmiştir. Bu konudaki ilk deneme, ışığı yakınsak merceklerle iletilmeye çalışılması olmuştur; fakat bu sistem atmosferden etkilenmiş ve sadece havanın durgun olduğu zamanlarda birkaç yüz metre iletim sağlanabilmiştir. Bunun dışında 1960'larda metal veya helezon biçimli tellerden yapılmış dairesel dalga havuzları ve yansıtma boruları denenmiş; ancak bunlar da ışığın iletiminde yetersiz kalmıştır [22].

Günümüzde ışığın iletiminde fiber optik kablolar ve optik sistemler kullanılmaktadır. Optik fiberler bize çok sayıda bilginin ışık hızıyla tek bir fiber boyunca iletilebileceğini göstermektedir. Fiber optik, insanın saç teli kalınlığında ve çok hassas üretilmiş saf bir cam ip üzerinden ışığın iletilmesi prensibiyle çalışan bir sistemdir. Bu şekilde üretilmiş kabloların tercih edilmesinin en büyük sebebi, çevresel şartların ağır olduğu; nemli, rutubetli, elektriksel alan parazitlerinin yoğun olduğu yerlerden etkilenmemesi ve her zaman stabil bir bağlantı sunmasıdır. Fiber optik kablolar, iletimi ışık hızıyla yani saniyede 300 bin km'lik hızla gerçekleştirirler. Bu yönleri sebebiyle uzak mesafelere veri aktarımı için tasarlanmışlardır [23]. Lazer ışık kaynağından gönderilen ışın demeti ilk başta doğrusal bir yol izler. İlk etapta 'ışık sinyali 1 ve 2' olarak çıkan alt – üst sınır ışınları Şekil 2.9'da görüldüğü gibi kablonun kıvrıldığı noktalarda cam örtüye çarpıp geri yansır, bu şekilde yansıya yansıya merkezdeki yoluna yavaşlayarak ve bir miktar kayba uğrayarak da olsa devam ederler.



Şekil 2.9 Işık sinyallerinin fiber optik kablo içerisinde iletimi

Fiber optik kablo üzerindeki kıvrımların ışık iletiminde kayıplara sebebiyet vermesinden ötürü, fiber kabloların fazla kıvrım yapmadan genellikle düz bir yol izlemesi veri iletim hızı ve kalitesi açısından önemlidir. Cam örtü tabakası ışığı kesinlikle absorbe etmez ve neredeyse tam olarak yansıtır. Bu da bilginin kayıpsız şekilde ulaşması için çok önemli bir noktadır.

Fiber optik sistemlerin avantajlarını sıralayacak olursak:

- Çok geniş bir bant genişliği ve taşıma kapasitesine sahiptirler.
- Optik taşıma frekansı birkaç yüz Terrahertz'i (THz) geçebilmektedir.
- Fiber kılın kalınlığı bir saç telinin kalınlığını geçmez. Bu yüzden ne kadar kalın bir koruyucu madde ile kaplanırsa kaplansın, bakır normal bir kablonun kalınlığını geçmez. Ayrıca fiber optik kablolar çok daha hafif ve verimlidir. Bu yüzden uçak, gemi ve uydu gibi araçlarda fiber kullanımı yaygın hale gelmiştir.
- Elektriksel açıdan yalıtkan bir malzeme olduğundan parazitlenme (EMI, RFI, EMP) ve etkileşim gibi problemleri yoktur.
- Yineleyici (repeater) kullanılmadan bilgi taşıma mesafesi bakır kablolardan çok daha fazladır.
- Uzun mesafelerde bile veri kayıpları yok denecek kadar azdır.
- Gizlilik ve güvenlik sağlar. Fiber optik kablolardan bilgi çalmak mümkün değildir.

Fiber optik sensörler, ışık enerjisini elektriksel sinyallere dönüştüren geliştirilmiş cihazlardır. Fiber optik kablolar, ışığı uzak yerlere taşıyan mekaniksel bir komponenttir. Fiber optik sensör sistemi ise uzaktaki bir sensöre veya yükseltece bağlı fiber optik kablodan oluşur [24]. Bu sayede bir kaynaktan üretilerek fiber optik kablolar ile taşınan ışın formatındaki bilgi, başka bir fiber optik kablo ile alınarak sensör devresine iletilir ve burada işlenerek anlamlı hale getirilir.

Tasarladığımız ve geliştirdiğimiz Kornea Sütur Robotumuz için, iğnenin mekanizma içerisinde olup olmadığını anlayabilmek amacı ile fiber optik sensör kullanımı seçilmiştir. Mekanizma içerisine iğne yarığını görecek şekilde; alıcı (reciever) ve verici (transmitter) sensör devresine ışık verilerini taşıyan fiber optik kablolar yerleştirilir. Bu noktada, mikro boyutlardaki robotumuzun gövdesi içerisine konumlandırılabilecek boyutlarda fiberoptik kabloların mevcut ve erişilebilir olması, fiber optik sensör kullanımının tercih edilmesindeki en önemli sebeplerden birisidir.

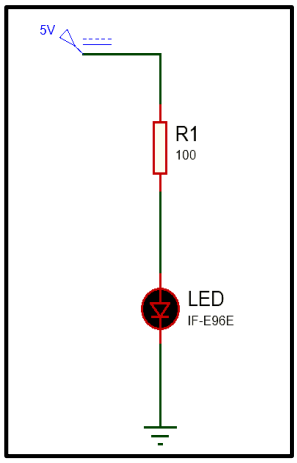
Robot metal gövdesi içerisine yerleştirilmiş olan fiber optik kablolardan verici kablonun mekanizma içerisine yaydığı ışığın bir kısmı, metal gövdedeki yansımalardan yararlanılarak alıcı kablo üzerinden sensör devresine iletilir. Sensörün alıcı devresi, gelen ışık miktarını işleyerek (yükselterek) voltaj çıktısı olarak bizlere sunar.

İğne mekanizma içerisine girdiğinde, metal ve parlak yüzeyi neticesinde fiber optik kabloların yerleştirildiği bölge içerisindeyken ortamda yayılan ışık yansımalarını değiştirerek alıcı devresine giden ışık miktarında değişime sebebiyet verir. Bu da aynı zamanda alıcı devresinin çıkışından ölçülen voltaj değerinin de değişmesi anlamına gelmektedir. Öncesinde öngörülen ve sonrasında geliştirilerek deneyleri yapılan sistemde, bu voltaj değişimleri ile iğnenin mekanizma içerisinde olup olmadığı anlık olarak takip edilebilmiştir.

Geliştirdiğimiz fiber optik sensörümüzde iki farklı devre kullanmaktayız. Birinci devre verici dediğimiz ışık üreten ve fiber optik kabaloya ışığı ileten yapıdan oluşurken, alıcı devremiz bu üretilen ışın sinyalini fiber optik kablo aracılığıyla alarak işleyen ve sonucunda voltaj verisi olarak çıktı alabildiğimiz yapıdır.

- Verici Devre:

  Verici devremizde ışın üreteci olarak Industrial Fiberoptics firmasının IF-E96E model ışın üretici LED'i kullanılmıştır. Bu LED ışın üreteci kılavuzunda da belirtildiği üzere 100 ohm'luk dirence seri bağlanmış, devre de 5V gerilim ile beslenmiştir (Şekil 2.10). Böylece LED'in çalışması için gerekli olan, üzerine düşen gerilim ve üzerinden geçen akım değerleri sağlanmış olur.



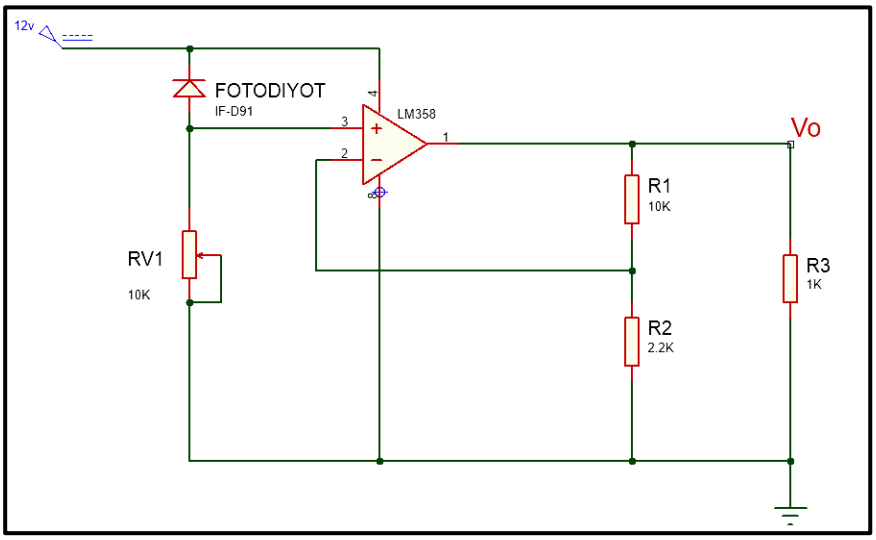
Şekil 2.10 Fiber optik sensör verici (transmitter) devresi

Verici (transmitter) devresinde kullanılan kompanentler;

- IF-E96E LED [25]
- 100 Ohm direnç
- 5V DC güç kaynağı

- Alıcı Devre:

Alıcı devremiz fiber optik kablodan gelen ışın sinyalini Industrial Fiberoptics firmasının IF-D91 model fotodiyotu aracılığıyla alıp bir yükselticiden geçirerek bize gerilim çıkışı vermektedir. Üzerine ışın geldiği durumlarda gelmediği duruma göre oldukça küçük gerilim farkı(mv'lar mertebesinde) olması sebebiyle bu fark yükseltilerek Vo noktasından 0-5V arası gerilim çıkışı sağlanmıştır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Fiber optik sensör alıcı (reciever) devresi

Alıcı (reciever) devresinde kullanılan kompanentler;

- IF-D91 [26]
- LM358 Op-Amp
- 10K ohm Potansiyometre
- 10K,2.2K,1K ohm dirençler

Geliştirdiğimiz Kornea Sütur Robotunda iğnenin konumunu algılamak ve sürekli kontrol edebilmek için farklı mikro boyutlarda sensörler de mevcuttur. İstediğimiz görevi gerçekleştirebilecek ve bize gerekli datayı sunabilecek proximity sensörler mevcut olmasına rağmen, kullanabileceğimiz mikro yapıdaki modelleri oldukça maliyetli olmaktadır. Buna karşın fiber optik sensör kullanımı; hem uygun boyutta fiber optik kabloların mevcut ve uygun fiyatlı olması, hem de düşük maliyetli kompanentlerle oluşturulan devre neticesinde çok basit bir şekilde uygun maliyetler ile istenilen kontrol mekanizmasını başarılı kılmıştır.

BÖLÜM 3

BÜYÜK ÖLÇEKLİ PROTOTİP

Geliştirilen Kornea Sütur Robotu mekanizması için düşünülen konsept tasarımın öngörülen tahrik aktarım sistemi bazında başarılı olup olamayacağı, çalışır ilk protorip ar-ge sürecine başlanmadan önce test edilmelidir. Zira literatürde benzer laparoskopik cihazlarla karşılaştırıldığında öngörülen konsept tasarım, uygulama alanı dışında çalışma prensibi babında da alanında bir ilke imza atacaktır. Fakat tüm sistemin üretilebilir ve çalışır ilk prototipinin geliştirilmesi uzun ve maliyetli bir süreç olacağından, konsept mekanik dizaynın çalışabilirliğinden emin olunması istendi.

Bu hususta üretimin standart(konvansiyonel) imalat metotları kullanılarak, üretim maliyetlerinin minimuma indirgenebileceği bir ön prototip çalışması yoluna gidilmiştir. Sistem gereksinimleri incelendiğinde maliyeti arttıran en önemli unsur mikro imalat yöntemlerinin uygulamasıdır. Bu unsuru ortadan kaldırabilmek için sistemin mikro yapıdan makro boyutlara ölçeklendirilmesinde karar kılındı. Bu sayede konsept tasarımda düşünülen ve öngörülen mekanik yapı, standart imalat yöntemleri ile düşük maliyetlerde üretilebilir ve montaj edilerek çalışabilirliği test edilebilir hale getirildi.

Bu çalışmada bahsi geçen 10:1 ölçekli makro yapıdaki ön prototipin tasarımı gerçekleştirilmiş, gerekli kompanent seçimleri yapılarak piyasadan temin edilmiş, mekanik sistem bileşenlerinin imalatı yaptırılmış ve tüm bileşenlerin montajı yapılarak sistem çalışır hale getirilmiştir. Düşünülen konsept tasarım dilinden uzaklaşmadan geliştirilen bu büyük ölçekli yapı üzerinde; öngörülen mekanizma mantığının çalışırlığı doğrulanmış, gerçek ölçekli prototip ar-ge çalışmalarına hazır hale gelinmiştir.

3.1 Büyük Ölçekli Prototip Tasarımı

Gerçekleştirilen büyük ölçekli tasarım, robot mekanizmasının mikro boyuttan makro boyuta çekilerek atölye ortamlarında standart imalat prosesleri ile düşük maliyetli üretilebilmesi ve çalışabilirlik testlerinin yapılabilmesi amacı ile geliştirilmiştir. Bu bağlamda boyutsal düşünüldüğünde 10:1 ölçek yeterli ve uygulanabilir görülmüştür.

Konsept tasarım göz önüne alındığında, belirlenen ölçek dahilinde kritik tasarımsal boyutlandırmalar büyük ölçekli tasarımda aşağıdaki şekilde ortaya çıkmıştır:

- Robot uç manipülatör geometrisi: R7.5mm'den ➔ R75mm,
- İğne(Alcon®) dönüş ekseni geometrisi: R2.63mm'den ➔ R26.3mm,
- Sütur derinliği: 550 µm'den ➔ 5.5mm.

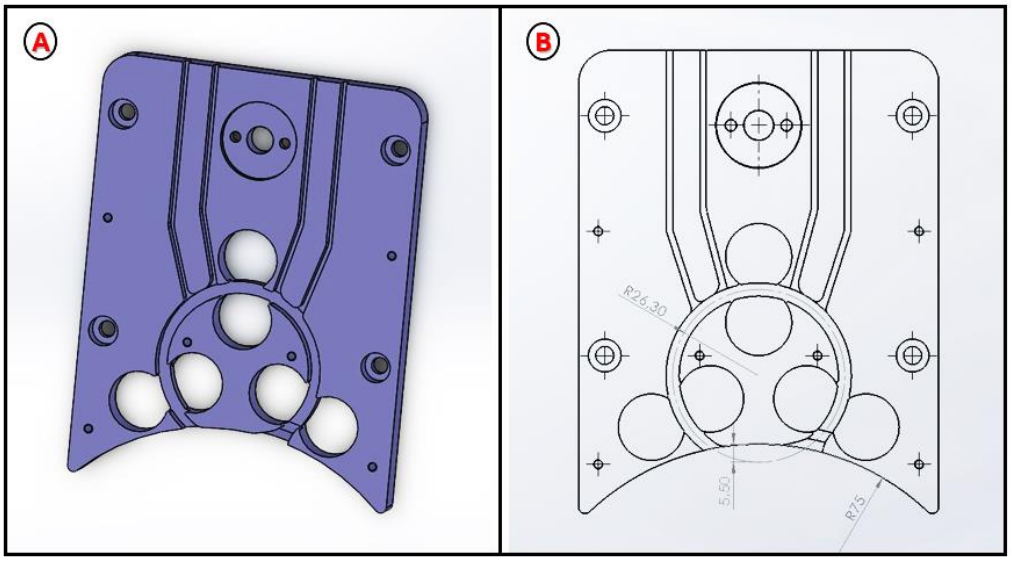
Uygulanacak ölçeğe göre belirlenen Kornea Sütur Robotu büyük ölçekli ilk prototipinin tasarımsal kritik boyutlandırmalarının ardından;

- Ana Layer(Katman) tasarımı: İğne yarığı ve silindirlerin konumlandırılması,
- Alt Layer(Katman) tasarımı: Dişlilerin konumlandırılması,
- Dişlilerin boyutlandırılarak tasarlanması,
- Silindir millerinin tasarlanması,
- Üst kapak tasarımı,
- Motor, rulman vb. hazır kompanentlerin tasarıma entegre edilmesi.

İşlemleri gerçekleştirilerek büyük ölçekli tasarım tamamlanmıştır.

3.1.1 Ana Layer Tasarımı

Ana Layer, sistem içerisinde iğnenin döner hareketini gerçekleştirdiği; iğneye döner hareketinin aktarıldığı silindirlerin, hareket tahrikinin sağlandığı elektrik motorun ve iğnenin konum kontrolünü sağlayan fiber optik sensörlerin konumlandırıldığı tabakadır. Robotun asli işinin gerçekleştirildiği katman olmasından dolayı, diğer tabakalar boyutsal anlamda Ana Layer baz alarak tasarlanmıştır.



Şekil 3.1 A: Büyük ölçekli tasarımda ana layer, B: Uç manipülatör ölçüt kriterleri

Belirlenen robot uç manipülatör geometrisi, iğne dönüş ekseni geometrisi ve sütur derinliği ölçülerine göre iğne yolu(yarığı) konumlandırılması gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda iğne, 26.3mm yarıçaplı eksen etrafında 5.5mm sütur derinliği elde edilecek şekilde hareketini gerçekleştirecektir. Silindirlerin konumlandırıldığı dairesel bölümlerin yerleşimi ise, silindir millerine montajı gerçekleştirilecek dişlilerin boyutlandırılması ve konumlandırılmalarıyla ortaya çıkmaktadır.

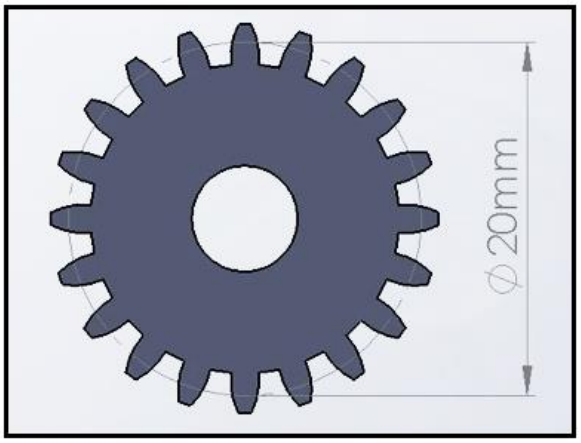
Dişliler, standart azdırma tezgahlarında üretilebilecek en düşük standart modüllerden 1 modülde ve 20 diş sayısında tasarlanmıştır. Buradan bölüm dairesi çapı şu şekilde elde edilir,

$$m = \frac{D}{Z} \tag{3.1}$$

Formül 3.1 de modül ve diş sayıları yerlerine konulduğunda,

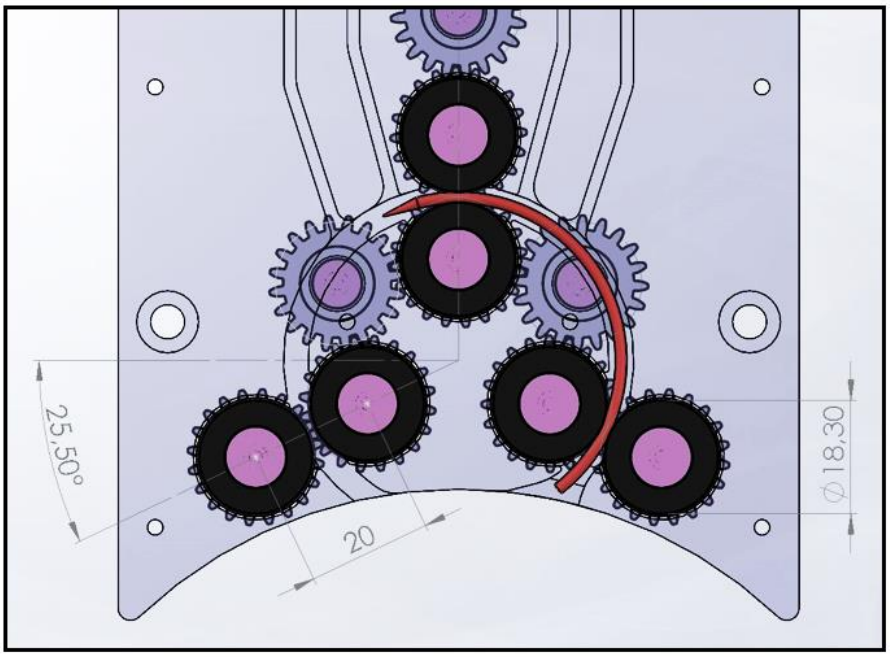
$$1 = \frac{D}{20} \tag{3.2}$$

İfadesinden dişlilerin bölüm dairesi çapı(D) 20mm olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 3.2 Büyük ölçekli tasarımda dişliler: $m = 1, Z = 20$

Belirlenen dişli boyutlarına göre silindirlerin yerleşimi, aktarım dişlilerinin çalışabilmesi için bölüm dairesi çapları birbirlerine teğet olacak şekilde yerleştirilmeleri ile ortaya çıkmaktadır. Keza iğnenin mekanizma içerisinden çıkış yaptığı ve mekanizmaya geri girdiği bölümlerdeki karşılıklı silindir gruplarının mümkün olabildiğince robot uç manipülatörüne yakın konumlanması gerekmektedir.



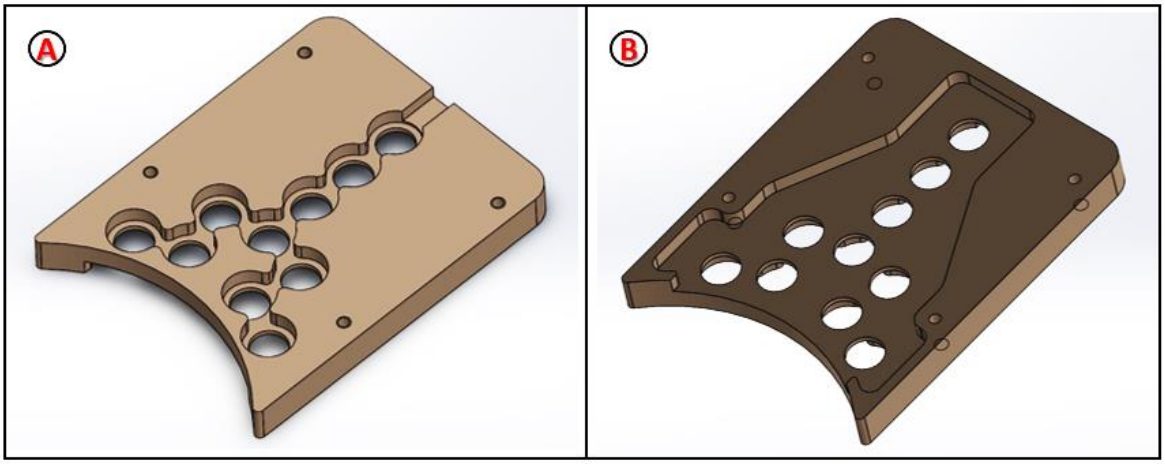
Şekil 3.3 Silindir ve dişlilerin mekanizma içerisindeki konumlandırılması

Belirlenen şartlar dahilinde dişli ve silindir yerleşimleri Şekil 3.3'de görüldüğü şekilde gerçekleştirilmiştir. Dişliler, bölüm dairesi çapları birbirlerine teğet olacak şekilde iç içe geçirilerek konumlandırılmıştır. Robot uç manipülatörüne en yakın konumdaki silindir

grupları ise, yatayda 25.5° açıyla aralarında 20mm mesafe olacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Bu yerleşim düzeninde silindir çapları Ø18.3mm olduğu takdirde silindirler, iğne ile temas eder ve hareket aktarımı sağlayabilir hale gelmektedirler.

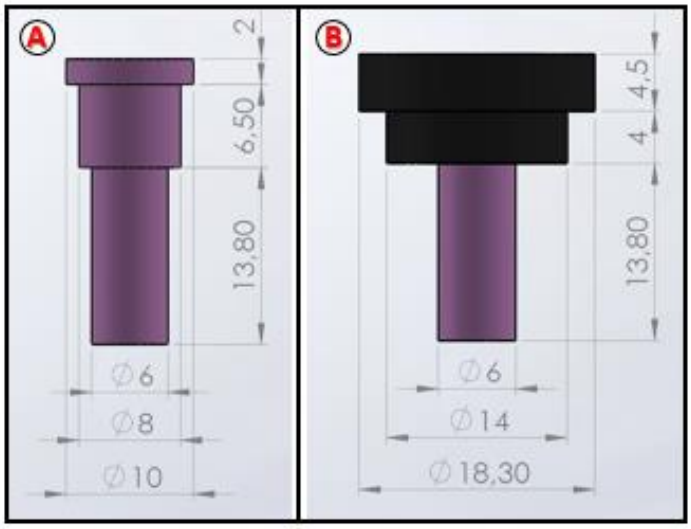
3.1.2 Alt Layer Tasarımı

Alt Layer, Ana Layer'daki silindirlerle eş merkezli olarak hizalanan dişlilerin ve silindirler ile dişlileri birbirine bağlayan millerin yataklandığı döner rulmanların konumlandırıldığı tabakadır. Üzerinde bulunan M5 diş açılmış delikler ile Ana Layer'a montajı gerçekleştirilir. Ana Layer ile öpüştüğü yüzeyde, dişliden aldığı döner hareketi silindire aktaran millerin yataklama elemanlarının yerleşimleri gerekli döner rulman seçimi sonucunda belirlenmiş ve rulman boşlukları açılmıştır. Arka yüzeyinde ise, konumlandırmaları Ana Layer tasarımında belirlenmiş dişli yarıkları mevcuttur(Şekil 3.4). Dişliler sistem içerisinde bu alanda çalışacaklardır.



Şekil 3.4 Alt Layer ön(A) ve arka(B) tasarımları

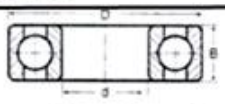
Silindir millerinin yataklama elemanı olarak kullanılacak rulmanların seçimi silindir mili çapına bağlıdır. Bu bağlamda hem rulman iç çapı standartlarına uygun, hem de torna tezgahlarında işlenebilecek boyutlarda silindir mili tasarımına gidilmiştir.



Şekil 3.5 Silindir mili(A) ve mile montajlanmış silindir(B) boyutlandırmaları

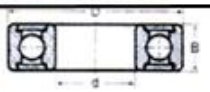
Tasarlanan silindir miline göre seçilmesi gereken döner rulman iç çapı 6mm olmalıdır. Milde yapılan Ø8mm'lik fatura yüzeyine rulman iç bileziği dayanacaktır. Keza rulman dış bileziği de Alt Layer'da açılan rulman boşluğunun faturasına dayandırılarak sistemin hareket sınırlandırmaları sağlanmış olmaktadır.

600 Serileri



Rulman	d	D	B
623	3	10	4
624	4	13	5
625	5	16	5
626	6	19	6
607	7	19	6
608	8	22	7
609	9	24	7
634	4	16	5
635	5	19	6
627	7	22	7
629	9	26	8

Kapaklı 600 Serileri



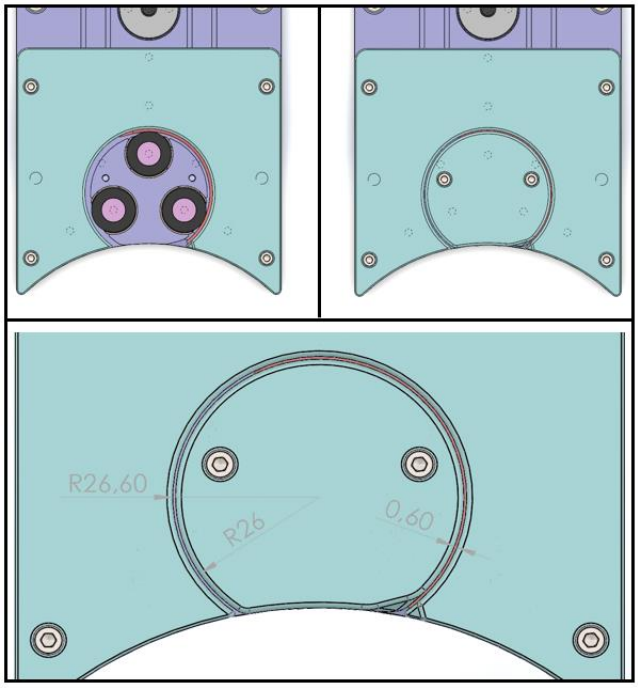
Rulman	d	D	B
623 Z/RS	3	10	4
624 Z/RS	4	13	5
625 Z/RS	5	16	5
626 Z/RS	6	19	6
607 Z/RS	7	19	6
608 Z/RS	8	22	7
609 Z/RS	9	24	7
634 Z/RS	4	16	5
635 Z/RS	5	19	6
627 Z/RS	7	22	7
629 Z/RS	9	26	8

Şekil 3.6 600 serisi rulman ölçüleri

Dizayn edilen silindir millerini yataklayacak rulman seçimi için belirlenen boyutlar göz önüne alınarak sabit bilyalı 600 serisi rulman kullanımı(Şekil 3.6), piyasada da kolay bulunabilir ve ulaşılabilir olduğundan dolayı tercih edilmiştir. Bu bağlamda 600 serisi rulmanlar içerisinde iç çapı 6 mm olan 626 Z/RS rulman(6x19x6), dış çap ve kalınlığı robot mekanizkası tasarım sınırları dahilinde olması ve kapaklı yapısından dolayı tercih edilmiştir.

3.1.3 Üst Kapak Tasarımı

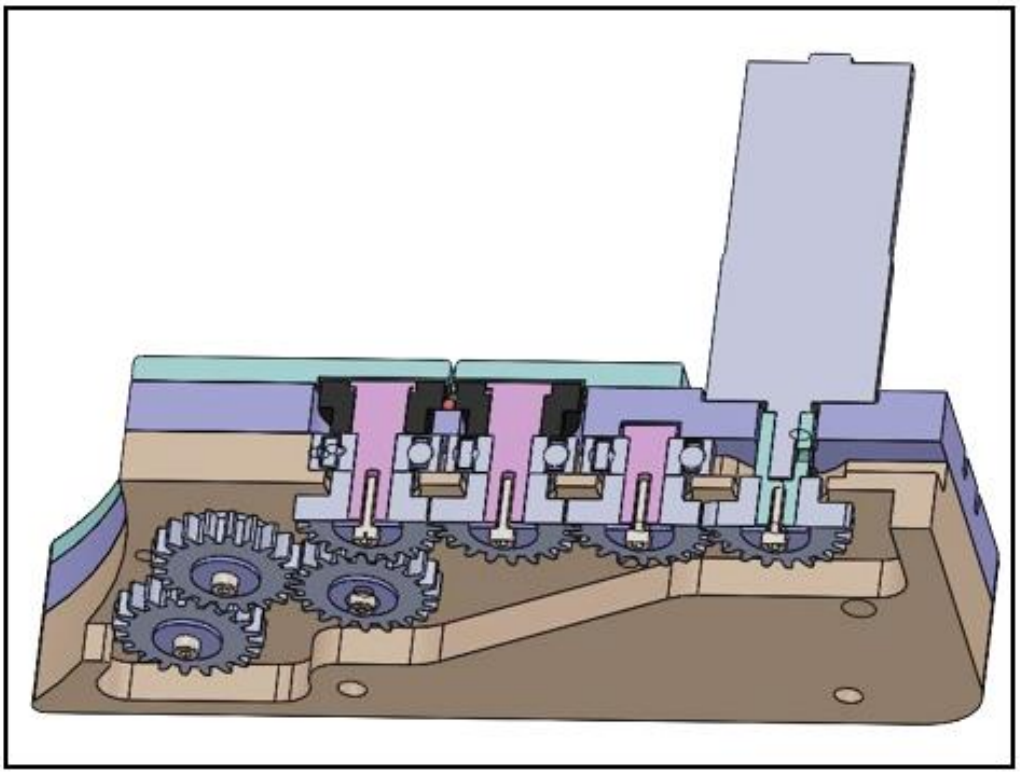
Ana Layer içerisinde hareket halinde olan iğne ve silindirlerin, bulundukları çalışma alanlarından çıkmadan güvenli bir şekilde çalışabilmeleri için, Ana Layer'ın üstüne monte edilerek çalışan mekanizmayı örtecek(hapsedecek) ve sınırlandıracak bir kapak tasarlanmıştır. İğne dikiş atabilmek için gerçekleştirdiği döner hareketi sırasında, ipliğin iğne yarığı içerisinde kalarak iğnenin tekrar mekanizmaya girişi esnasında engel teşkil etmemesi için iki ayrık kısımdan oluşan Üst Kapak tasarımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7 Üst kapak tasarımı

Tasarlanan çift gövdeli üst kapak; dış ve iç gövde olmak üzere iki ayrı parçadan oluşmaktadır(Şekil 3.7). Dış gövdenin iç kısmında kalan kesik bölge R26.6mm yarıçaplı, iç gövdenin dış geometrisi ise R26mm yarıçaplı yapıya sahiptir. Kapağın her iki parçası da Ana Layer üzerine monte edildiğinde dış ve iç gövde arasında, Ana Layer'daki iğne yarığına denk gelecek şekilde 0.6mm lik boşluk kalmaktadır. İğne sütur atma işlemini gerçekleştirirken, iğnenin arkasındaki iplik iğneyi Ana Layer'daki yarıkdan takip etmek yerine Üst Kapak'daki boşluk içerisinden geçerek mekanizma dışında takip edecektir. Bu sayede iğne dikiş attığı cisim içerisinden çıkıp mekanizma içerisine geri girdiğinde, yarık içerisinde iplik kalmamış olacak, iplik tarafından herhangi bir zorlanma, tıkanma yahut takılma gibi etkenlere maruz kalmayacaktır. Üst Kapak dış gövdesi Ana Layer'a 4 adet, iç gövde ise 2 adet M3 cıvata ile monte edilir.

Sisteme gerekli döner hareket tahriğini sağlamak için “Precision Microdrives 225-201” model DC Motor seçilmiştir [27]. Bu motor Ana Layer’a montajlanmış; tahriğini pinyon ve aktarım dişlileri üzerinden silindirlere ve iğneye ulaştırmaktadır. Şekil 3.8’de sistemin montaj halinin kesit görünümünde tahrik, aktarım ve yataklama elemanları görülmektedir.

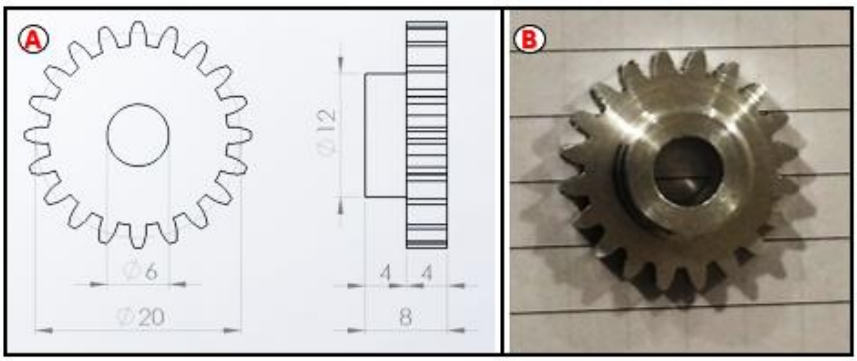


Şekil 3.8 Büyük ölçekli mekanizmanın kesitli montajı

3.2 Büyük Ölçekli Prototip Üretimi

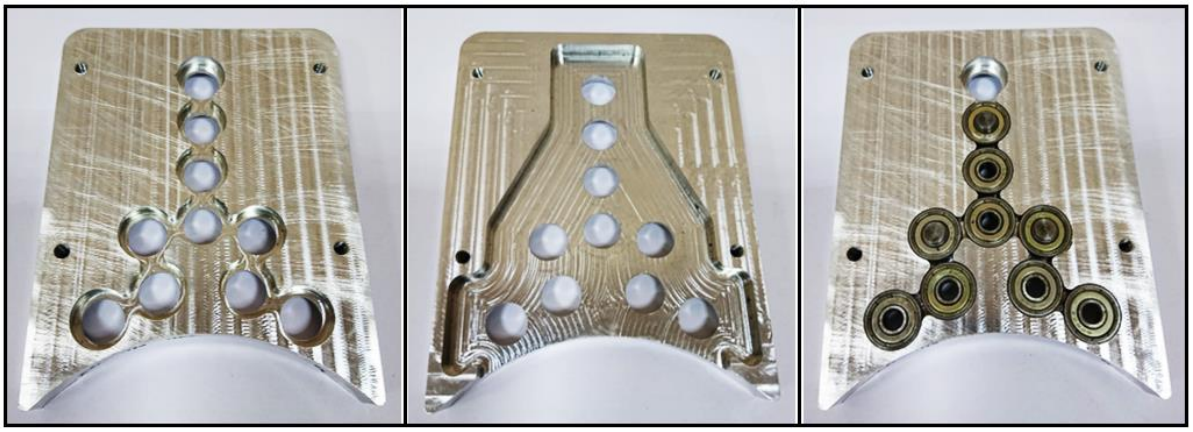
Bölüm 2’de anlatılan konsept tasarım ışığında tasarımı gerçekleştirilen 10:1 oranındaki Büyük Ölçekli Kornea Sütur Robotu, mikro yapıdan kurtularak makro boyutlara eriştiği için tüm parçalarının üretimi standart imalat metodları ile gerçekleştirilmiştir.

- Dişliler aşınmaya karşı mukavim ve uzun ömürlü olabilmeleri açısından alüminyum malzemeden, modül 1 ve diş sayısı 20 olacak şekilde azdırma tezgahında imal edilmişlerdir(Şekil 9).



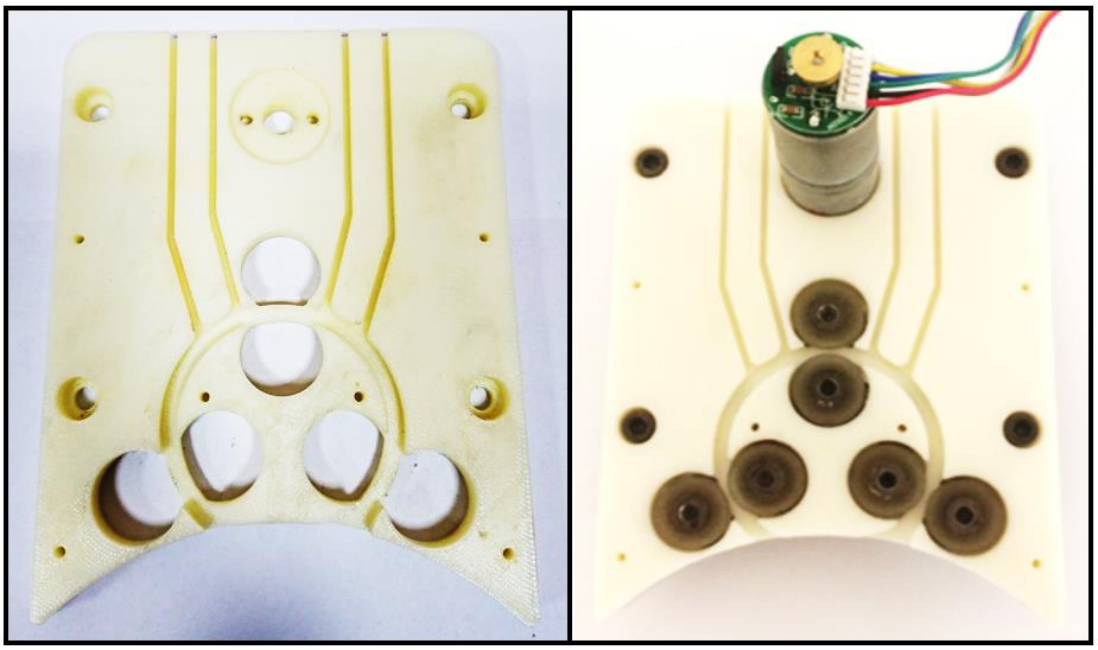
Şekil 3.9 Üretilen dişli ve teknik resmi

- Alt Layer, ön kısmındaki oyuklara metal yapıdaki döner rulmanların gömülecek olması ve arka kısmında alüminyum dişlilerin çalışacak olmasından dolayı, pürüzsüz ve hassas yüzey işlemesine tabi kalması gerekmiştir. Bu yüzden alüminyum blok malzemeden CNC dik işlem tezgahında üretilmiştir(Şekil 10).



Şekil 3.10 Üretilen Alt Layer ve rulman montajlı hali

- Ana Layer, herhangi bir metal yüzeyle etkileşimde olmayacağından montaj yahut çalışma zamanlarında aşınma riski bulunmamaktadır. Bu sebepten alüminyum işleme yerine çok daha az maliyetli olan 3D Printer(ABS malzeme) hizmeti alınarak istenen kalite ve hassasiyetlerde üretimi gerçekleştirilmiştir(Şekil 11).

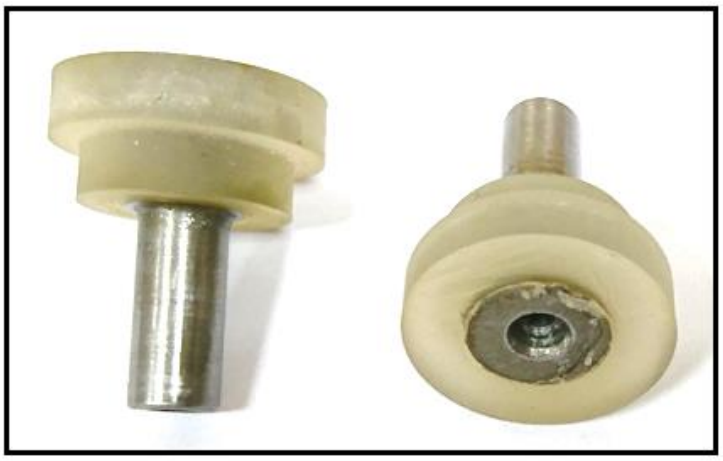


Şekil 3.11 3D Printer ile üretilen Ana Layer ve montajlı hali

- Silindir milleri, döner rulmanlar tarafından yataklanarak çalışacak, aynı zamanda Alt Layer'daki dişlilere cıvata ile çektirilerek montaj edileceği için alüminyum malzeme ile işlenmesi uygun görülmüştür. Temin edilen silindirik alüminyum parçalar, torna tezgahında gerekli ölçülerde işlenerek silindir milleri elde edilmiştir.

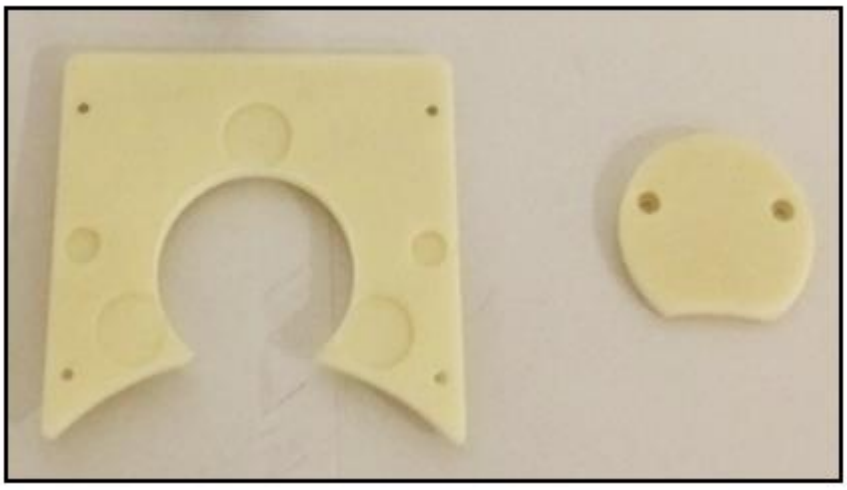
  Elde edilen bu millere, iğneye döner hareketi aktaracak silinidirlerin üretilip monte edilebilmesi için; mil üzerine polimer malzeme dökme metodu tercih edilmiştir. Bu sayede polimer malzemeden dökülen silindir, mille bütünleşik bir yapı oluşturur. Polimer malzeme olarak "Poliüretan(60 Shore)" seçilmiştir. Bu sayede elde edilen kauçuk ve yapı elastik yapı neticesinde iğneye karşı yüksek temas yüzeyi kapasitesi ile yüksek sürtünme sağlanarak hareket aktarımında kesintisiz güç transferi sağlanmıştır.

  Mil üzerine silindirik yapıda dökülen poliüretan, talaşlı işleme kabiliyeti sayesinde istenilen hassas ölçülerde torna tezgahı altında işlenerek(finishing) gerekli forma ulaştırılmıştır(Şekil 12).



Şekil 3.12 Silindir ve mili

- Üst Kapak, herhangi bir metal yüzeyle etkileşimde olmayacağından montaj yahut çalışma zamanlarında aşınma riski bulunmamaktadır. Bu sebepten alüminyum işleme yerine çok daha az maliyetli olan 3D Printer(ABS malzeme) hizmeti alınarak istenen kalite ve hassasiyetlerde iki parçalı olarak üretimi gerçekleştirilmiştir(Şekil 13).



Şekil 3.13 İki parçalı Üst Kapak

- Geliştirdiğimiz Kornea Sütur Robotunda kullanacağımız Alcon® iğnenin 10:1 ölçekli halini, standart talaşlı işleme yöntemleriyle üretmenin nerdeyse imkansız olması ve bunun yanında metal malzemeden üretilmesi gerektirğinden, Metal 3D Printer ile üretim tekniğine başvurulmuştur(Şekil 14).

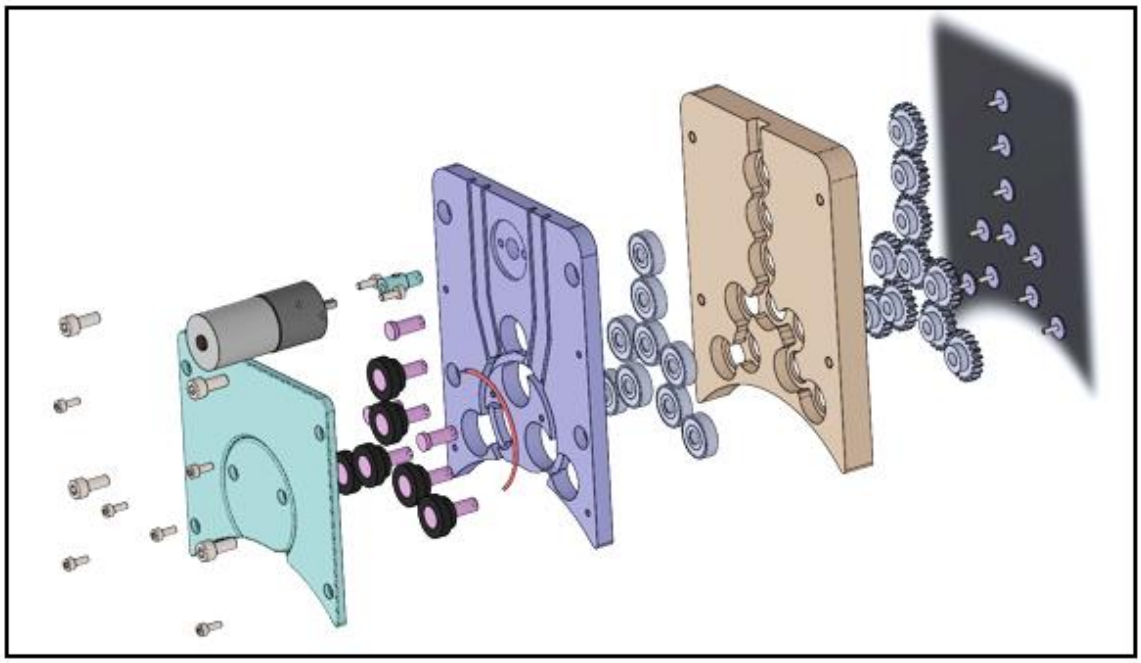


Şekil 3.14 Alcon® iğnenin 10:1 ölçekli üretimi

3.3 Büyük Ölçekli Prototip Montaj ve Testleri

3.3.1 Büyük Ölçekli Prototip Montajı

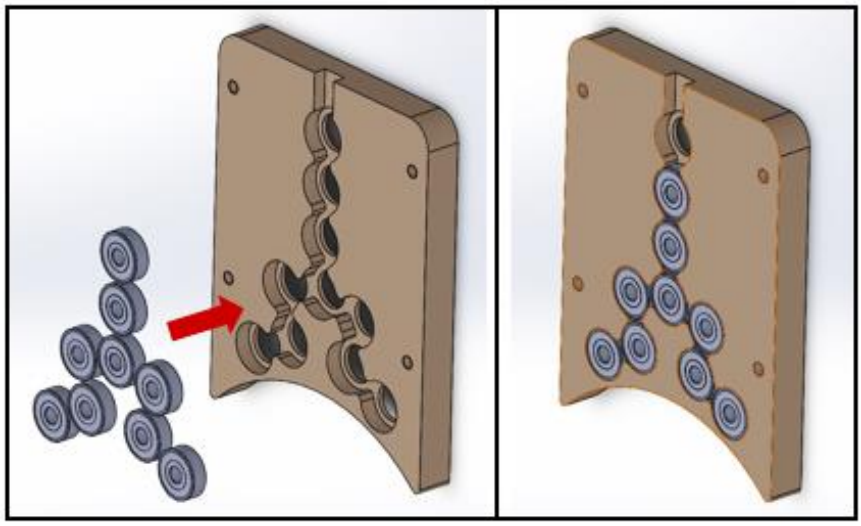
Büyük ölçekli(10:1) Kornea Sütur Robotu prototipi, fiziki anlamda uygulamaya geçirilerek konsept tasarımda karar kılınan mekanizmanın uygulanabilirliğinin testlerini gerçekleştirilebilmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu bağlamda tasarım aşamasında sistemin standart imalat metodlarıyla üretilebilir olarak tasarlanmasının yanında, kolay montaj edilebilir olması da göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 3.15 Büyük ölçekli sistem tasarımının demontaj hali

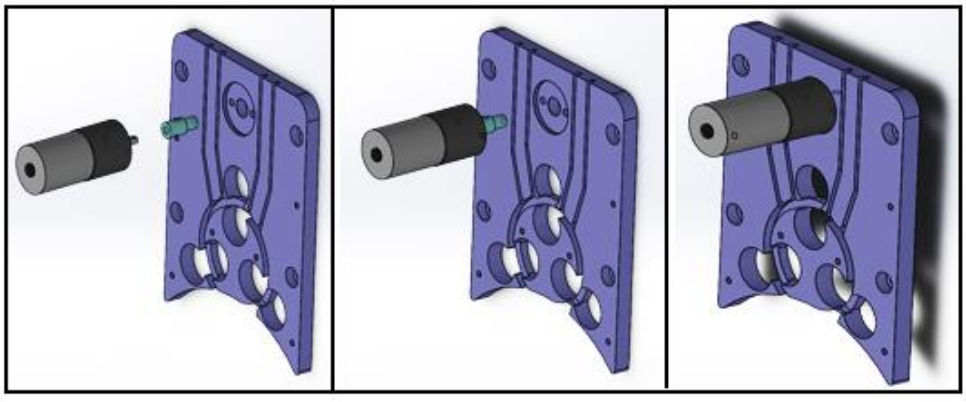
Tasarım esnasında her bir parçanın birbiriyle olan montaj yöntemi ve sıralaması, fiziksel olarak gerçekleştirilebilecek şekilde tayin edilmiştir. Bu hususta sistem imal edildikten sonra sırası ile aşağıda belirtilen adımlar takip edilerek montaj işlemi gerçekleştirilmiştir:

- Alt Layer'da bulunan rulman yataklarına 626 Z/RS rulmanlar, dış bilezikleri rulman yatağında bulunan faturaya dayanana kadar çakılarak monte edilir (Şekil 3.16).



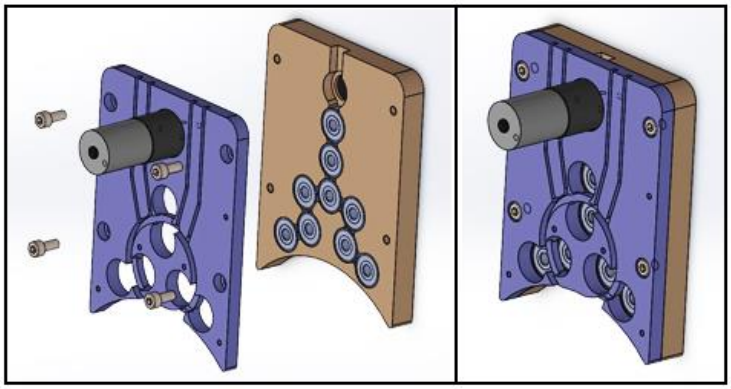
Şekil 3.16 Rulmanların Alt Layer'a montajı

- Sistemde kullanılan "Precision Microdrives 225-201" model DC motor mili, ilk etapta pinyon şişli bağmantı miline setiskur ile bağlanır. Sonrasında motor gövdesi, Ana Layer üzerinde bulunan motor flanşı içersine 2mm gömülecek şekilde girer. Motoru Ana Layer üzerinde bu noktada sabitleyebilmek için 2 adet M3 cıvata kullanılmıştır (Şekil 3.17).



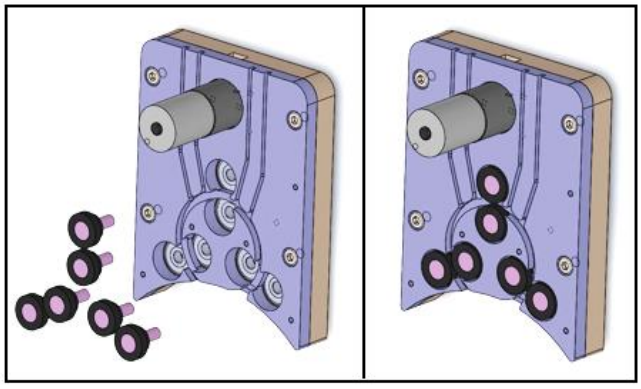
Şekil 3.17 Motorun Ana Layer'a montajı

- Motor ile montajı gerçekleştirilen Ana Layer'ın, öncesinde rulmanların yerleştirildiği Alt Layer' a montajı gerçekleştirilir. Bu iki Layer birbirine Alt Layer'da açılan M5 dişli delikler vasıtası ile, 4 adet M5 cıvata tarafından montajlanır (Şekil 3.18).



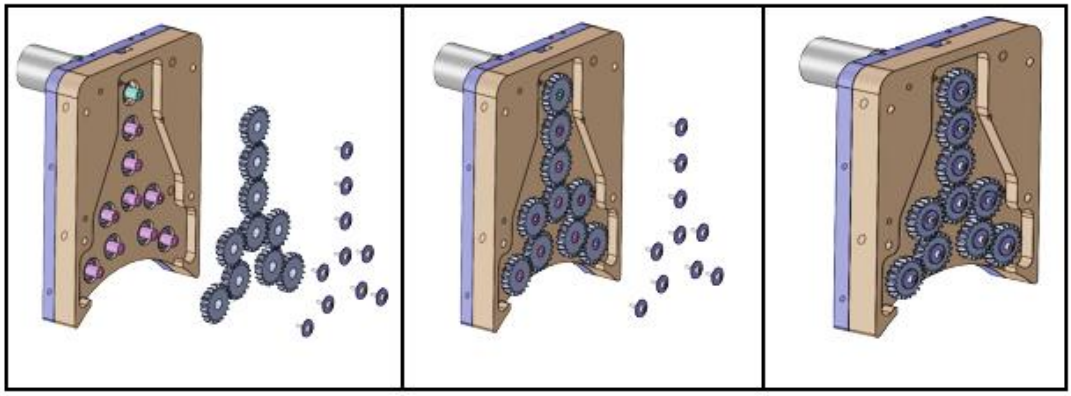
Şekil 3.18 Ana Layer ile Alt Layer'ın montajı

- İğneye döner hareketi aktaracak silindir-silindir mili grubu, Ana Layer üzerinde bulunan çalışma alanlarına montaj edilir. Silindir mili, Alt Layer'daki rulman içerisinden geçerek üzerinde bulunan faturaya dayanır. Bu sayede Üst Layer sınırları dahilinde kalan poliüretan malzemeli silindir, rulmanlardan geçen mili vasıtasıyla yataklanmıştır (Şekil 3.19).



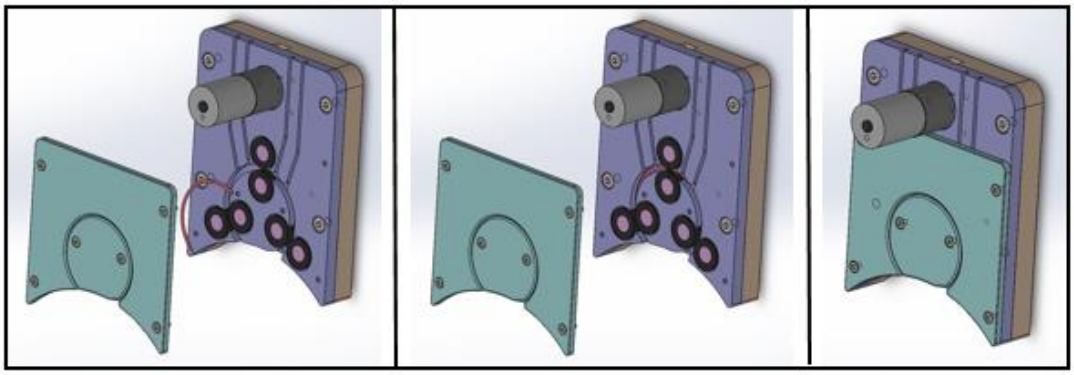
Şekil 3.19 İğneye döner hareketi aktaracak silindirlerin montajı

- Alt Layer'daki rulmanlar tarafından yataklanan silindir millerinin arka yüzeylerine imal edilirlerken M3 dişi delik açılarak diş çekilmiştir. Dişliler merkezlerindeki mil ile aynı çaptaki delikten silindir millerine geçirilirler. Millerin arkasında açılan M3 dişi delik vasıtasıyla millere geçirilen dişliler, M3 pul ve somun kullanılarak monte edilirler (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 Dişlilerin montajı

- Dişlilerin montajı ile sistem mekanizması çalışır hale gelmiştir. Test çalışmalarına başlayabilmek için metal 3D Printer'dan basılan 10:1 ölçeğindeki iğnemizi, Ana Layer'daki iğne yarığı içerisine, poliüretan silindirlerin arasına denk gelecek şekilde yerleştiriyoruz. Bunun yanında iğnenin çalışma esnasında yarık içerisinden dışarıya çıkamaması, ipliğin ise mekanizma dışarısından iğneyi takip edebilmesi için çift gövdeli Üst Kapak Ana Layer'a M3 cıvatalar vasıtasıyla montajlanır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 İğne ve Üst Kapağın montajı

3.3.2 Büyük Ölçekli Prototip Testleri

Büyük ölçekli sistemin tüm parçalarının montajı tamamlandıktan sonra 10:1 ölçekli ilk Kornea Sütur Robotu prototipi çalıştırılmaya ve test edilmeye hazır hale getirilmiştir. Sisteme döner hareket tahriğini sağlayacak olan DC motor kabloları uçlarına, güç kaynağı tarafından ayarlı olarak kademeli bir şekilde voltaj verilmiş, motor milinin dönüşü ile üretilen döner hareketin pinyon dişliden başlayarak diğer dişlilere aktarılışı

gözlemlenmiştir. Silindir millerine bağlı dişliler de aynı şekilde üzerlerindeki hareketi rulmanlar tarafından yataklanmış silindir milleri vasıtasıyla silindirlere aktarmıştır.

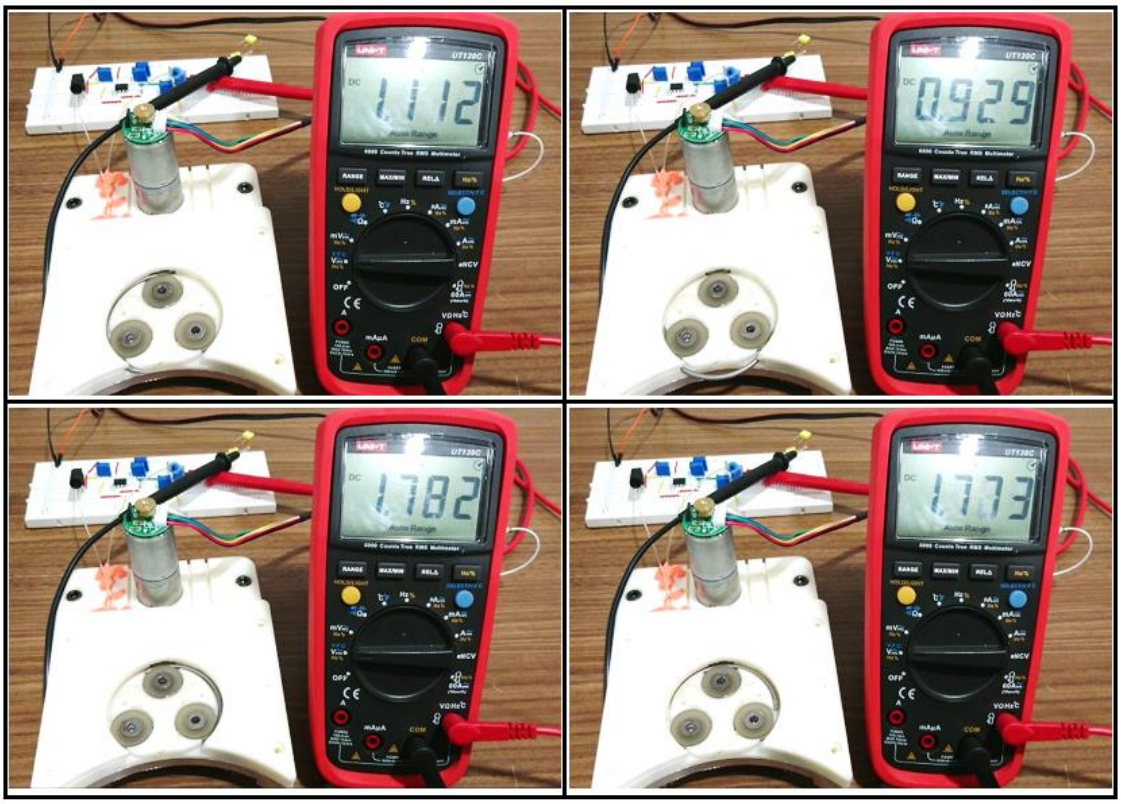


Şekil 3.22 Büyük Ölçekli(10:1) ilk prototip testi

Belirlenen konsept tasarım ışığında geliştirilen ve ortaya çıkartılan 10:1 ölçekli Kornea Sütur Robotu mekanizması testler esnasında, motordan silindirlere kadar her bir hareket aktarım organıyla öngörülen çalışma şeklini istenen hassasiyetlerde başarıyla icra etmiştir. Keza döner hareketin aktarıldığı poliüretan silindirler de, iğneye yeterli tork ile döner hareket aktarımını Şekil 3.22'de görüldüğü gibi sıkıntısız bir şekilde gerçekleştirebilmiştir.

İğnenin arkasına bağlı olan iplik, iki gövdeli Üst Kapağın oluşturduğu yarık içerisinden mekanizma dışına çıkarak, iğnenin dönüşü esnasında iğneyi mekanizma dışarısında öngördüğümüz şekilde takip edebilmiştir. Bu sayede iplik, iğnenin mekanizma dışından tekrar robot içersine girişi esnasında yarık içerisinde kalmamış; mekanizmanın istenildiği şekilde çalışmasına engel olacak kritik bir sıkıntının önüne geçilmiştir.

Tahrik aktarım mekanizmasının test edilmesinden sonra, Ana Layer'da bulunan 4 adet fiber optik kablo yarıklarından birine alıcı ve verici kablolar yerleştirilmiş, Bölüm 2.3.2 de detayları anlatılmış olan fiber optik alıcı-verici devresine entegre edilmiştir (Şekil 3.23). Bu şekilde sisteme entegre edilen fiber optik sensörler ile iğnenin mekanizmada bulunan yarık içerisindeki ve mekanizma dışındaki konumu ölçümlenerek yorumlanabilmiştir.



Şekil 3.23 Fiber optik sensör verilerinin ölçülmesi

Robot içerisine konumlandırılmış olan fiber optik sensör, verici kablo yoluyla ortama ışın gönderir ve alıcı kablo bu ışınların yansımasını sensör devresine geri iletir. Alıcı kablonun aldığı ışın miktarına göre sensör devresinde bir gerilim farkı meydana gelmektedir. Mekanizma içerisindeki iğne, fiber optik sensör alıcı-verici kablolarının çevresine yaklaştığında ve önünden geçtiğinde, metal yapısının da etkisiyle sensör ışınlarının ortam içerisindeki kırılma ve yansıması değişmektedir. Bu sebeple sensör devresinde oluşan gerilim değeri de doğru orantılı olarak değişkenlik göstermektedir. Şekil 3.23'de görüldüğü üzere, fiber optik sensör devresine paralel bağladığımız bir avometre üzerinden iğnenin farklı konumları için voltaj ölçüm değerleri gösterilmiştir.

İğne robot mekanizması içerisindeyken avometre üzerinde 1.77 V gerilim ölçülmüştür. Bu voltaj değeri; iğne mekanizma içerisinden çıkma anında 1.1 V seviyelerine ve doku içerisindeyken 0.9 V seviyelerine düşmüş, mekanizma içerisine tekrar girdiğinde 1.78 V civarlarına geri yükselmiştir. Bu sensör ölçüm tekniği ile iğnenin gerçek zamanlı olarak konum kontrolünün yapılabildiği ispatlanmış ve ortaya konulmuştur.

Gerçekleştirilen büyük ölçekli prototip neticesinde, belirlenen konsept mekanizma yapısının tahrik, hareket aktarım ve kontrol metotları babında fiziki olarak uygulanabilir

olduğu görülmüştür. Mikro ölçeklere inildiğinde fiziksel şartların, imalat hassasiyetlerinin ve hazır kompanent kullanımının makro boyutlu mekanizmadan çok daha farklı olacağı bilinmesine karşın, bu hususlar dikkate alınarak yapılan Ar-Ge çalışmalarıyla mikro boyuttaki Kornea Sütur Robotu, aynı mekanizma mantığı korunarak geliştirilmeye başlanmıştır.

BÖLÜM 4

GERÇEK ÖLÇEKLİ İLK PROTOTİP ÇALIŞMALARI

Ortaya çıkartılan konsept tasarım 10:1 ölçekli şekilde üretilerek fizibil yapıda olduğu görüldükten sonra, keratoplasti operasyonları için belirlenen ölçü kriterlerinde; yani 1:1 ölçekli mikro yapıdaki Kornea Sütur Robotu Ar-Ge çalışmaları bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Mikro boyutlar ve gereksinimleri göze alınarak; imal edilebilir yapıdaki mekanik tasarım gerçekleştirilmiş, ortaya çıkan mekanik sistemin matematiksel modeli çıkartılmış, COMSOL programı üzerinden gerekli statik analizleri gerçekleştirilmiş ve mekanik parçaların imalatı yapılmıştır.

4.1 Mekanik Tasarım Çalışmaları

Uygulanabilir yapıda olduğu 10:1 ölçekli versiyonun testleriyle ortaya konmuş konsept tasarım mantığı, mikro konstrüksiyon şartları ve imalat metotları göz önüne alınarak 1:1 ölçekte tasarlanmıştır. Bu noktadaki en kritik nokta uygun imalat metodunun ve tölerans hassasiyetlerinin belirlenmesidir, keza geometrik detaylardaki minimum yapılar seçilen imalat metodunun sağlayabileceği maksimum tölerans değerlerince tasarlanmalıdır. Ölçüsel olarak takribi 300 µ ila 500 µ aralığında olacak geometrik yapılarımızın olduğu düşünüldüğünde, tölerans hassasiyetimizin 20 µ'un üzerinde olmaması gerektiği aşikardır.

Kullanılacak imalat yöntemlerinin seçimindeki bir diğer kritik unsur da üretim maliyetleridir. Mikton hassasiyetli imalat metotlarına bakacak olursak:

- FEMTO Print: Cam ve türevi transparan malzemelerle mikron yapıda imalat tekniğidir. Ülkemiz sınırları içerisinde bu teknolojiyi uygulayan bir kurum bulunmamaka ve üretim maliyetleri 40.000 $'ı bulmaktadır.

- MEMS(Micro Electro-Mechanical Systems): Mikro ve nano üretim denildiğinde akla ilk gelen metotdur. 2 boyutlu parçaların imalatı özellikle LIGA tekniği ile çok zorlanmadan üretilebilmektedir. Fakat 3 boyutlu kompleks yapıların imalatı hem çok zorlaşmakta, hem de üretim maliyetleri çok artmaktadır.
- Micro-EDM: Yüzey üzerinden bakır elektrotlar ile oluşturulan elektrik arkı vasıtasıyla partikül seviyesinde parçacık kaldırılarak yüzey işlenmesi metotudur. Elektrik iletkenliğine sahip tüm sert ve metal yapıdaki parçalar bu metot ile şekillendirilebilir. EDM tezgahları özellikle hassas işçilik yapan kalıpçılarda oldukça kullanılmaktadırlar. Hassasiyet dereceleri, tezgah kalitesine göre 1 µ ile 10 µ arasında değişkenlik göstermektedir. Konvensiyonel dik işlem merkezlerine nazaran daha maliyetli bir teknik olsa da, diğer mikro-nano imalat teknikleriyle kıyaslandığında çok daha ekonomik ve ulaşılabilir bir metotdur.

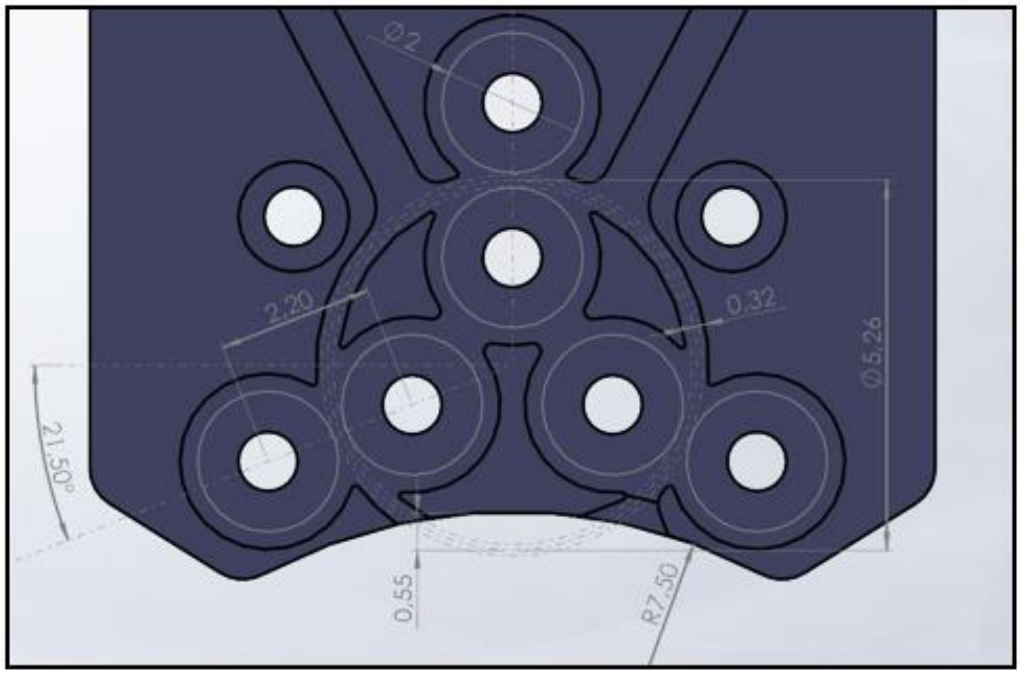
Micro-EDM imalat metodu; hem bizim için gerekli hassasiyetleri karşıladığından, hem de ülke sınırları içerisinde ulaşılabilir ve diğer mikro-nano imalat yöntemlerine göre düşük maliyetli olmasından ötürü, tasarlayacağımız Kornea Sütur Robotu parçalarının üretiminde kullanılmıştır.

4.1.1 Ana Layer Uç Manipülatör Tasarımı

Konsept tasarım çalışmaları esnasında belirlenen Kornea Sütur Robotu uç manipülatörü bayutlarını tekrar hatırlamak gerekirse:

- Robot uç manipülatör geometrisi: R7.5mm,
- İğne(Alcon®) geometrisi: R2.63 mm-Ø200 µ,
- Sütur derinliği: 550 µm.

Kornea Sütur Robotu prototipi, yukarıda belirlenen ve konsept tasarımda da uygulanmış olan tasarım kriterleri ölçülerine sadık kalınarak tasarlanmıştır. Fakat burda 10:1 ölçekli yapıya göre iki önemli fark mevcuttur; ilki silindir millerinin yataklanması için o boyutlarda hazır döner rulman yataklarının bulunmaması, ikincisi ise bahsedilen mikro boyutlar için montaj metodu olarak somun-cıvata kullanılamayacak olmasıdır.



Şekil 4.1 Kornea Sütur Robotu uç manipülatör yerleşimi

Konsept tasarımda gerçekleştirildiği gibi Kornea Sütur Robotu uç manipülatör geometrisi, ortalama kornea yarıçapı olarak belirlenen R7,5 mm'lik radüs şeklinde tasarlanmıştır. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi 5,26 mm çapındaki iğne yarığı; iğne mekanizma içerisinden çıkıp kornea dokusu içerisine girdiğinde 550 µ derinliğe dalarak sütur atma işlemini gerçekleştireceği şekilde konumlandırılmıştır. Et kalınlık çapı 200 µ olan Alcon® iğnenin mekanizma içerisinde konumlanacağı bu iğne yarığı, 320 µ olacak şekilde açılmıştır. Dış çapı 2 mm olması planlanan, iğneye döner hareketi aktaran silinidirler ikili gruplar halinde; iğnenin mekanizma içerisine giriş-çıkış yaptığı alanlara yatayda 21,5° açı ile ve uç manipülatöre dik olacak şekilde en uzak bölüme konumlandırılmışlardır. Karşılıklı konumlanmuş ikili silindirler arası mesafe ise 2,2 mm'dir.

Silindir milleri yataklaması için rulman gibi hazır bir ekipman kullanılamadığından, millerin robot gövdesi üzerinde bulunan deliklerle direkt olarak yataklanması düşünülmüş, millerin geçeceği delik ölçü ve töleransları ona göre belirlenmiştir. Bunun yanında sistem içerisinde ekstra bir yataklama elemanının olmayacak olmasından dolayı, 10:1 ölçekli versiyonda yapıldığı gibi üst üste iki katmanlı yapı yerine tek katmanlı robot gövdesi tasarlanmıştır.

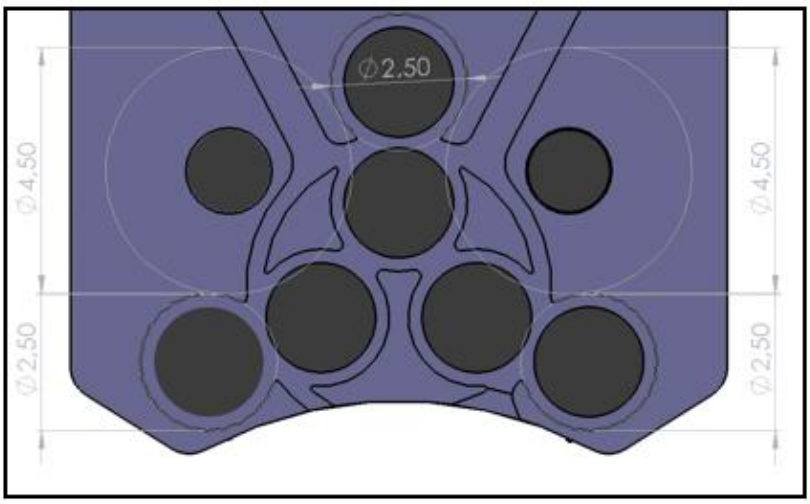
Mikro boyutlu sistem dahilinde montajlama elemanı olarak somun ve cıvata ekipmanları kullanılamadığından, çift katmanlı gövde yapısı yerine tek katmanlı olarak tasarlanması, sistem montajını kompleks bi yapıdan kurtarmıştır. Bunun haricinde, 10:1 ölçekli versiyondaki gibi dişlileri cıvata ile bağlayarak hem hareket aktarımının gerçekleştirilmesi, hem de sistemin birbirini sınırlandırılması imkansızdır. Mikro boyutta geliştirilen mekanik yapı dahilinde dişli ve silindir milleri, bir erkek-dişi profil öpüşmesi ile birbirlerine tahrik aktarımı sağlayacak şekilde tasarlandı. Dişlileri bulundukları konumdan çıkmadan sınırlandırabilmek için 10:1 ölçekli versiyonun aksine bir arka kapak tasarımı da gerçekleştirilmiştir.

4.1.2 Dişlilerin Tasarlanması, Yerleşimi ve Hesapları

Dişlilerin tasarlanması, belirlenen imalat metodu ve işlenebilme hassasiyetleri göz önüne alınarak yapılması gereken en hassas ve kritik işlemdir. Keza sistem ölçütlerimize göre mikro boyutta tasarlanacak ve imal edilecek dişlilerin diş arası mesafeleri, özellikle de diş dibi mesafeleri seçilen modül ve diş sayısına göre 180 µ ile 300 µ arasında çıkmaktadır.

Tasarlayacağımız sistemin boyutsal işlem kapasitesi ve hassasiyet gereksinimlerine bakarak belirlediğimiz Micro-EDM imalat metodunu gerçekleştirebileceğimiz bir kalıpçı ile konuşularak anlaşıldı. Kalıpçının elindeki EDM tezgahında, işleme yapabilecek en küçük bakır elektrot çapı 250 µ ve işleme hassasiyeti 10 µ olduğu bilgileri kendilerinden temin edildi. Bu hassasiyet değerlerinin, özellikle Ana Layer parçasının işlenebilmesi için yeterli olduğu görülmüş, dişli tasarımları sonucunda ortaya çıkan boyutlar da bu değerler içerisinde kalacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Dişlilerin birbirleriyle bütünleşik şekilde çalışabilmeleri için Ana Layer'ın arka kısmında birbirlerine göre yerleşimleri, bölüm daireleri birbirleriyle teğet olacak şekilde yapılmıştır. Bölüm dairesi çapı, dişli modülü ve diş saysıyla bağlantılı olduğundan, imalat için uygun diş dibi ölçüleri de göz önünde bulundurularak dişli modül ve diş sayıları belirlenmiştir.



Şekil 4.2 Dişlilerin bölüm dairelerine göre yerleşimi

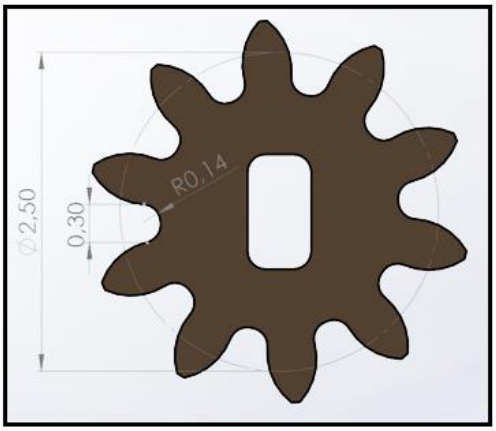
$$m = \frac{D}{Z} \tag{4.1}$$

İfadesine göre, Şekil 4.2'de görünen bölüm dairelerine göre yerleşimden; aynı modülde iki farklı bölüm dairesi çapına sahip dişli ortaya çıkmıştır. Bunun haricinde ikili silindir gruplarının dişlilerinden iç bölgede kalanlarda dişli kullanılamamıştır. İç bölgede kalan bu silindirler, avare şekilde dönüşlerini gerçekleştirmektedir.

Bölüm dairesi çapı Ø2.5 mm olan dişlinin diş sayısı ve modülü belirlenirken, diş dibi mesafesinin imal edebileceğimiz minimum sınırın altına inmemesi dikkate alınmıştır. Keza diş sayısı da 10'un altına inmemelidir. Bu hususta;

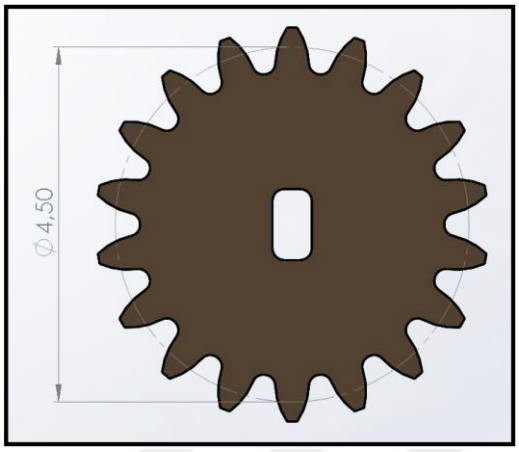
$$m = \frac{2{,}5}{10} \tag{4.2}$$

İfadesinden $m = 0{,}25$ çıkmaktadır.



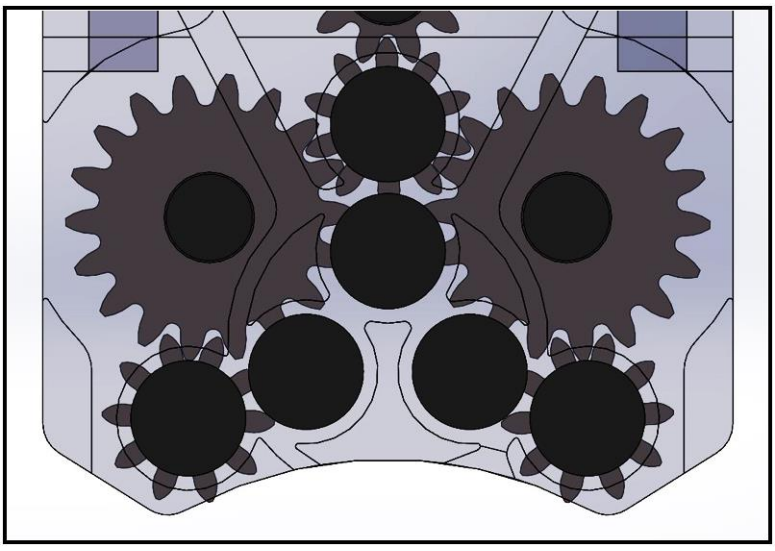
Şekil 4.3 Bölüm dairesi çapı Ø2,5 mm olan dişli

Modül 0,25 ve diş sayısı 10 olan Ø2,5 mm bölüm dairesi çaplı şekil 4.3'de gösterilen dişlinin diş dibi ölçüleri 250 µ'luk EDM elektrotları ile işlenebilir boyutlardadır. Bu bağlamda bölüm dairesi çapı Ø4,5 mm olan dişlinin aynı modülde diş sayısı 18 olmaktadır(Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Bölüm dairesi çapı Ø4,5 mm olan dişli

Dişlilerin ortasında açılan dikdörtgen profilli dişi yarıklar, silindir milleri uçlarına tasarlanacak erkek karşılıkları ile iç içe girerek dişli üzerinden silindirlere döner hareketin aktarılabilmesi için yapılmıştır. 10:1 ölçekli prototipin aksine mikro boyutta geliştirilen mekanizmada cıvata ve somun gibi montaj elemanları kullanılamadığından bu şekilde bir hareket aktarım mantığı üzerinde durulmuştur. Bu da dişlilerin mekanizma içerisinde istenilen bir noktaya tutturularak sabitlenememesi anlamına gelmektedir. Bu da dişlilerin silindir milleri üzerindeki profilden çıkmasını engellemek amacıyla bir arka kapak tasarımını zorunlu tutmuştur.



Şekil 4.5 Tahrik silindir dişlileri ve aktarım dişlilerinin dizilimi

Dişlide mukavemet hesaplarının yapılabilmesi için temel ve geometrik ölçülerin tamamen yapılmış olması ve bilinmesi gereklidir. Mukavemet hesapları sonucu bu değerler değiştirilirse, hesaplar yeni değerlerle yeniden yapılır. Seçilen geometrik ölçüt ve değerler kapsamında yapılan hesaplar, mukavemetsel güvenlik sınırların içerisinde kalana kadar yapılarak doğru değerlerin saptanması gerçekleştirilir.

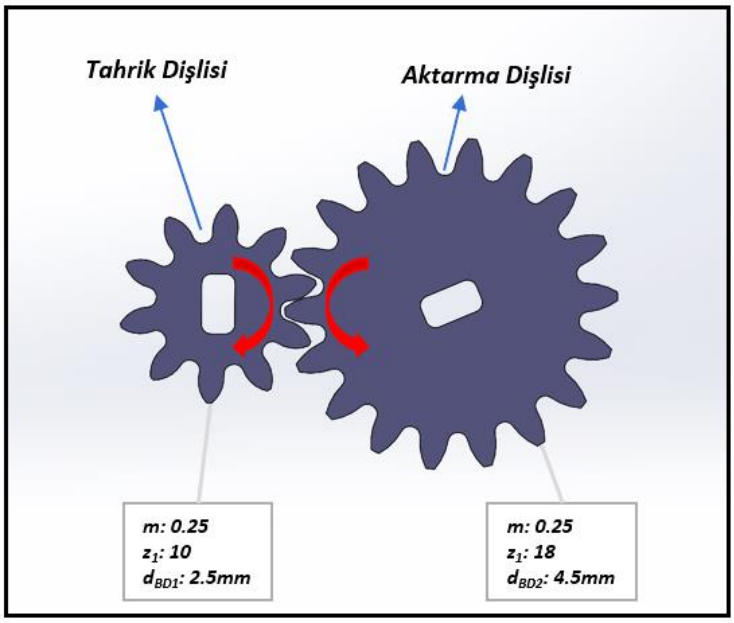
Dişlilerde mukavemet kontrolü, iki farklı bakış açısı üzerinden gerçekleştirilir:

- Diş dibi kırılmasına göre mukavemet hesabı,
- Diş yüzeyi ezilmesine(yüzey basıncına) göre mukavemet hesabı.

Geliştirdiğimiz Kornea Sütur Robotu'nun silindir yerleşimine göre yapılan dişli yerleşimi neticesinde belirlenen dişli modülleri m:0.25; bölüm dairesi çapları d_{b1}:Ø2.5mm, d_{b2}:Ø4.5mm, dişli kalınlığı b:0.4mm'dir. Bölüm dairelerine göre büyük ve küçük dişli arasındaki çevrim oranı aşağıdaki gibidir:

$$N_d = \frac{4{,}5}{2{,}5} = 1{,}8 \tag{4.3}$$

Tasarlanan dişli mekanizmasında tahrik girişinden(Pinyon dişli) çıkışına(Silindir dişlileri) çevrim oranı 1'dir. Fakat aktarma dişli kademelerinde Formül 4.3'de görülen çevrim oranları mevcut olduğundan, Şekil 4.6'da gösterilen dişliler arasında mukavemet hesapları yapılarak doğruluk değerleri saptanmıştır.



Şekil 4.6 Mukavemet hesapları yapılan tahrik ve aktarma dişlileri

Diş dibi kırılmasına göre mukavemet hesabı yaparsak:

$$m > \sqrt[3]{\frac{2.S.M_{d1}.Kd.Kf}{z_1.\varphi_m.\tau_{em}.\varepsilon}} \quad (4.4)$$

$$\tau_{em} = \frac{\tau_D}{K_Ç}\,;\ \tau_D = 0{,}5\tau_K \quad (4.5)$$

$$\varphi_m = \frac{b}{m} \quad (4.6)$$

$$M_{d1} = 9550\frac{P}{n_1} \quad (4.7)$$

Bu eşitliklerde;

- Güvenlik katsayısı *S=1,25*
- Kavrama oranı ε*=1,25*
- Hesaplar tahrik dişlisi üzerinden yapılacağından z_1*=10*
- Seçilen dişli kalınlığı *b=0,4mm* ve seçilen modül *m=0,25*
- Seçilen DC motorun dönüş hızı n_1*=28d/d*, uygulanan devir bandındaki gücü *P=30mW*
- Dinamik yük faktörü *Kd=1,25*
- Düşük dönme hızları için form faktörü *Kf=3,4*.
- DIN 1,2344 çelik malzemenin 52 HRC sertlikde kopma dayanımı τ_K*=1820 N/mm²*
- Çentik faktörü *Kç=1,5.*

Formül 4.5'de değerler yerine konulduğunda emniyet gerilmesi τem:

$\tau_{em} = \frac{0.5x1820}{1.5}$ = 606.66 N/mm²

Formül 4.6'da değerler yerine konulduğunda genişlik sayısı φm:

$\varphi_m = \frac{0{,}4}{0{,}25}$ = 1.6

Formül 4.7'de değerler yerine konulduğunda *Md1:*

$M_{d1} = 9550 \frac{30x10^{-6}}{28}$ = 0.0102 Nm = 10.2 Nmm

Hesaplanan tüm değerleri, modül kontrolü için kullanılacak olan Formül 4.4'de yerine koyarsak olması gereken minimum modül *m:*

$m > \sqrt[3]{\frac{2x1,25x10,2x1,25x3,4}{10x1,6x606,66x1,25}}$ = 0.2074

Seçtiğimiz modül(*m=0,25*), hesaplanan minimum modül değerinden büyük olduğu için yaptığımız dişli sistem tasarımı, diş dibi kırılması mukavemetine göre güvenlidir.

Diş yüzeyi ezilmesine(yüzey basıncına) göre mukavemet hesabı yaparsak:

$$m > \sqrt[3]{\frac{2.S.M_{d1}.E.Kf.(1+N_d)}{{z_1}^2.{P_{em}}^2.\varepsilon.\varphi_m.N_d}} \quad (4.8)$$

$$P_{em} = 0,25\ \tau_K \quad (4.9)$$

Bu eşitliklerde;

- Elastiklik modülü *E=202500 N/mm²* (20°C sıcaklıkda)
- Çevrim oranı N_d*=1,8*

Formül 4.9'da değerler yerine konulduğunda emniyet basıncı *Pem*:

P_{em} *= 0,25x1820 = 455 N/mm²*

Hesaplanan değerleri, modül kontrolü için kullanılacak olan Formül 4.8'de yerine koyarsak, yüzey basıncına göre olması gereken minimum modül m:

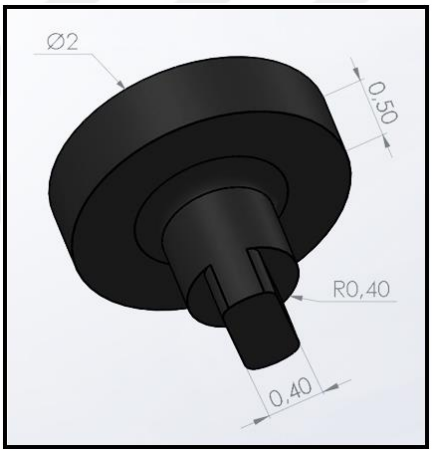
$m > \sqrt[3]{\frac{2x1,25x10,2x202500x3,4x(1+1,8)}{10^2x455^2x1,25x1,6x1,8}}$ = 0,87

Çıkan minimum modül miktarı, seçtiğimiz modülün üzerinde olduğu için tasarladığımız dişli sistemi, yüzey basıncı mukavemetine göre uzun süreli ve yüksek devirli çalışmalar için güvenli değildir. Fakat sistem konstrüksiyonu neticesinde dişli modülünü daha fazla büyütemediğimizden ve diş dibi kırılması mukavemeti anlamında sistem bu haliyle güvenilir olduğundan herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir.

4.1.3 Silindir Tasarımları

İğneye(Alcon®) döner hareket tahriğini aktaracak silindirlerin dış yüzeyleri, hareket aktarımının yüksek verimde gerçekleşebilmesi için mümkün olduğunca yüksek sürtünmeli ve kauçuk(elastik) bir yapıda olmalıdır. Bu ihtiyaç 10:1 ölçekli prototipte; metal yapılı silindir mili üzerine poliüretan dökülüp, torna tezgahında dökülen poliüretan dış çapının istenen boyutlarda işlenmesi ile gerçekleştirilmişti.

Dış çapı 2 mm ve yüksekliği 0,5 mm olan tahrik silindirlerinin(Şekil 4.7) dış yüzeyine, ortalama 160 µ et kalınlığına sahip PDMS kaplanması planlanmıştır. PDMS'in yüksek sürtünmeli ve kauçuk yüzey yapısı sayesinde döner hareket aktarım verimliliğinin istenen düzeye çıkartılabileceği düşünülmüştür. Bunun çalışmaları Bölüm 4.4'de detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



Şekil 4.7 Tahrik silindiri

İğneye hareket aktarımını gerçekleştiren silindirler, 10:1 ölçekli versiyonda olduğu gibi dişli üzeriden döner hareket tahriğini silindire taşıyan silindir mili ile yekpare olarak tasarlanmıştır. Gövde çapı Ø0,8 mm olarak tasarlanan silindir milleri için bu boyutlara uygun hazır yataklama elemanları bulunamadığından, Ana Layer gövdesinde açılan Ø0,84 mm çapındaki deliklerde yataklanmışlardır.

Silindir milinin en alt kısmında 0,4 mm genişliğinde kesilmiş dikdörtgen formundaki erkek profil, dişli mekrezindeki dişi karşılığı ile iç içe girecek şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede dişliler üzerlerindeki döner hareket tahriğini dikdörtgen profil üzerinden silindir millerine aktarabilmektedir. Fakat bu montaj tekniği ile dişli ve silindir milleri birbirlerine mekanik montajlı olarak bağlanamamaktadır. Bu da arka kapak tasarımını zorunlu kılmaktadır.

İğneye hareket aktaran silindir dişlileri haricinde, ara bağlantı dişlileri de mevcuttur. Bu dişliler de aynı mantık ile işlenmiş ve Ana Layer'da yataklanmış millere montajlanmıştır.

4.1.4 Kullanılan Hazır Ekipmanlar

Kornea Sütur Robotu'nun döner hareket tahrik kaynağı olarak Precision Microdrives firmasının 10 mNm torklu 28 rpm maksimum devirli "206-108" DC motor modeli(Şekil 4.8) kullanılmıştır [28]. 6 mm gövde çapı ve 21 mm uzunlığından dolayı Ana Layer'a bağlantısı, 10:1 ölçekli modelde tasarlandığı gibi robot gövdesi üzerine dik olarak değil, Ana Layer üst yüzeyinden paralel olarak monte edilmiştir. Motoru bu bölgede sabitleyebilmek için bir motor bağlantı kapağı da dizayn edilmiştir.



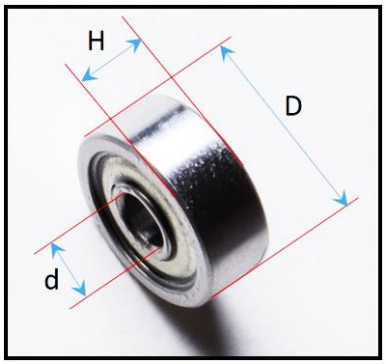
Şekil 4.8 Precision Microdrives 206-108 DC motor

Ana Layer'ın üst yüzeyinden robot gövdesine paralel olarak montajlanacak DC motorun döner şaftı, radyal hareketini robot gövdesi arka yüzeyindeki dişlilere aktarmalıdır. Fakat robot gövdesine yerleşim şekli neticesiyle dişliler ile arasında 90° lik bir faz farkı oluşmaktadır. Döner hareket eksenleri arasındaki bu faz farkını ortadan kaldırabilmek için, motor şaftı ile Ana Layer arka yüzeyindeki pinyon dişli arasına modül 0,3 - 14 diş adetli plastik konik dişli takımı yerleştirilmiştir(Şekil 4.9).



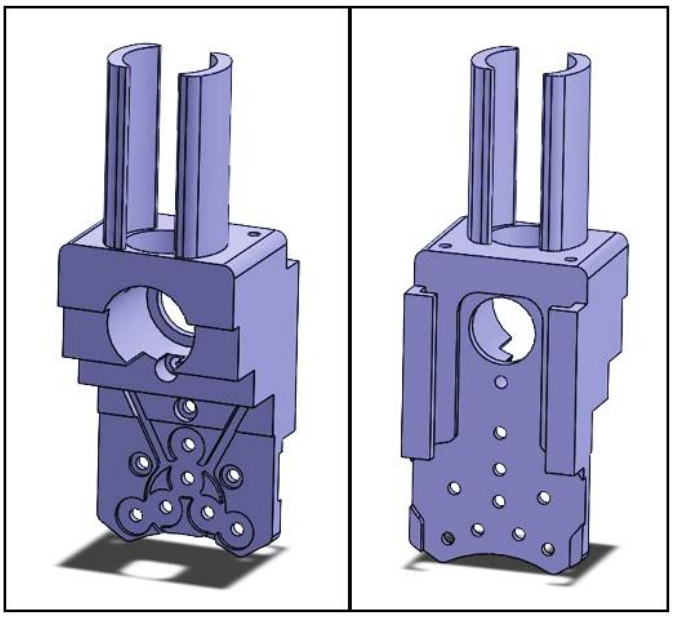
Şekil 4.9 Konik dişli takımı

Kullanılacak DC motor şaftına monte edilen konik dişlilerin stabil ve kasıntı yapmadan çalışabilmeleri için, her iki tarafından da MR63 minyatür rulmanlarla(Şekil 4.10) yataklanmışlardır.



Şekil 4.10 MR63 Rulman: D=6; d=3; H=2

Kornea Sütur Robotu prototipi mekanizması dahilinde kullanılacak tüm ekipmanlar belirlendikten sonra, uç manipülatör tasarımı gerçekleştirilen Ana Layer'ın Şekil 4.11'da görülmekte olan tüm gövde tasarımı tamamlanmıştır. Ana Layer'ın ön ve arkasına, silindir ve dişlilerin hareket alanlarının sınırlandırılması ve mekanizma içerisinde hapsedilmesi amacıyla Ön Kapak ve Arka Kapak tasarımları da, tamamlanan Ana Layer geometrisi referans alınarak yapılmıştır. Ana Layer gövde tasarımı tamamlanırken kapak tasarımları da dikkate alınmış, özellikle arka kapak yerleşimi için çentikli ve slotlu bir yapı gövde arkasında oluşturulmuştur.

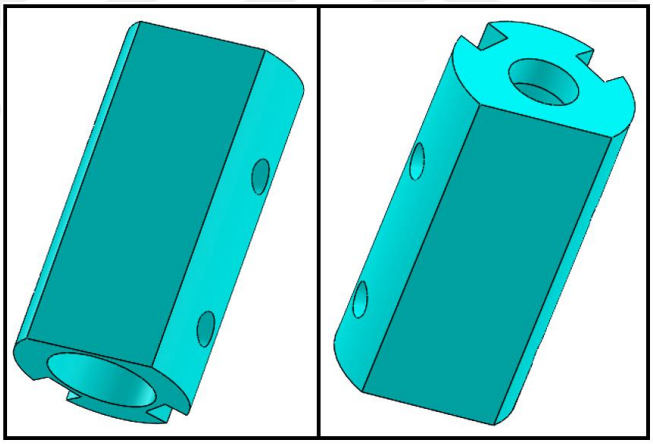


Şekil 4.11 Ana Layer gövdesi ön ve arka görünümü

4.1.5 Motor Kapağı Tasarımı

Kornea Sütur Robotu prtototipi için döner tahrik hareket kaynağı olarak seçilen Precision Microdrives 206-108 modeli, Ana Layer gövdesinin üst yüzeyinde bulunan yarıklı uzun delik içerisine monte edilecektir. Ön görülen hareket aktarım mekanizmasında DC motorun şaftına bağlanarak döner hareketi kendi ekseninden 90° çevirerek aktaran konik dişliler, çalışma esnasında motor gövdesi ekseninde yukarı yönde kuvvete maruz kalacaktır. Bu da motorun yerleştirildiği yuvadan çıkma eğilimi göstermesine ve konik dişlilerin temasında anlık kopmalar ile güç aktarımında kesintilere sebebiyet verecektir.

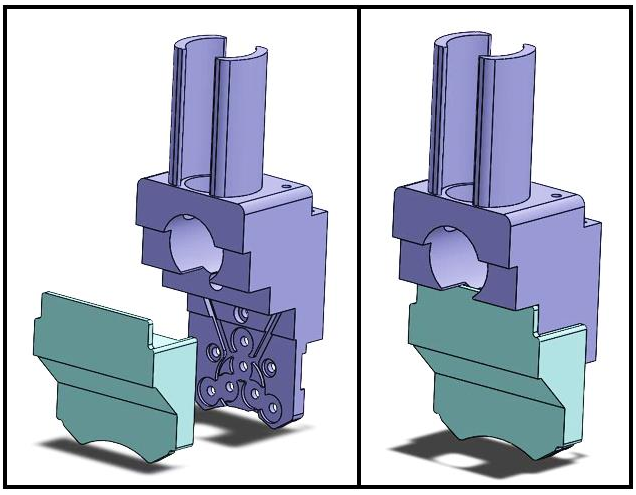
Motor miline baplı konik dişlinin yukarı yönde maruz kaldığı eksenel kuvvete karşı gerelerek motorun yuvasından çıkma eğilimini engellemek amacıyla, motor yarığının dışından Ana Layer'a montajlanarak motor gövdesini motor üst yüzeyinden sınırlandıran bir motor kapağı tasarlanmıştır (Şekil 4.12). Bu motor kapağı Ana Layer'a M3 setüskur ile monte edilir. Motor kapağı iç deliği üst bölümünde yer alan fatura, motor gövdesinin üst yüzeyine dayanarak motorun eksenel hareketini sınırlandırmak için yapılmıştır.



Şekil 4.12 Motor kapağı tasarımı

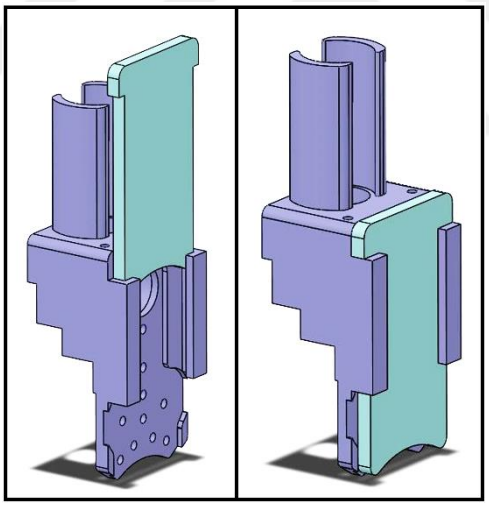
4.1.6 Ön Kapak ve Arka Kapak Tasarımları

Ana Layer bünyesinde çalışacak mekanizma dahilinde; silindir ve iğnenin Ana Layer ön yüzeyinde bulunan çalışma alanlarından çıkmamaları için Şekil 4.13'de görülen Ön Kapak tasarımı yapılmıştır. Ön Kapak, Ana Layer yan yüzeylerinde sıkı geçme olacak şekilde üstten geçirilerek Ana Layer ön yüzeyine öpüştürülür.



Şekil 4.13 Ön Kapak tasarımı

Ana Layer bünyesinde çalışacak mekanizma dahilinde; pinyon ve hareket aktarım dişlilerinin Ana Layer arka yüzeyinde bulunan çalışma alanlarından çıkmamaları için Şekil 4.14'de görülen Arka Kapak tasarımı yapılmıştır. Arka Kapak, Ana Layer arka yüzeyine yapılan çentik şeklindeki slotun üstünden kızak mantığı ile yürütülerek yerleştirilir.

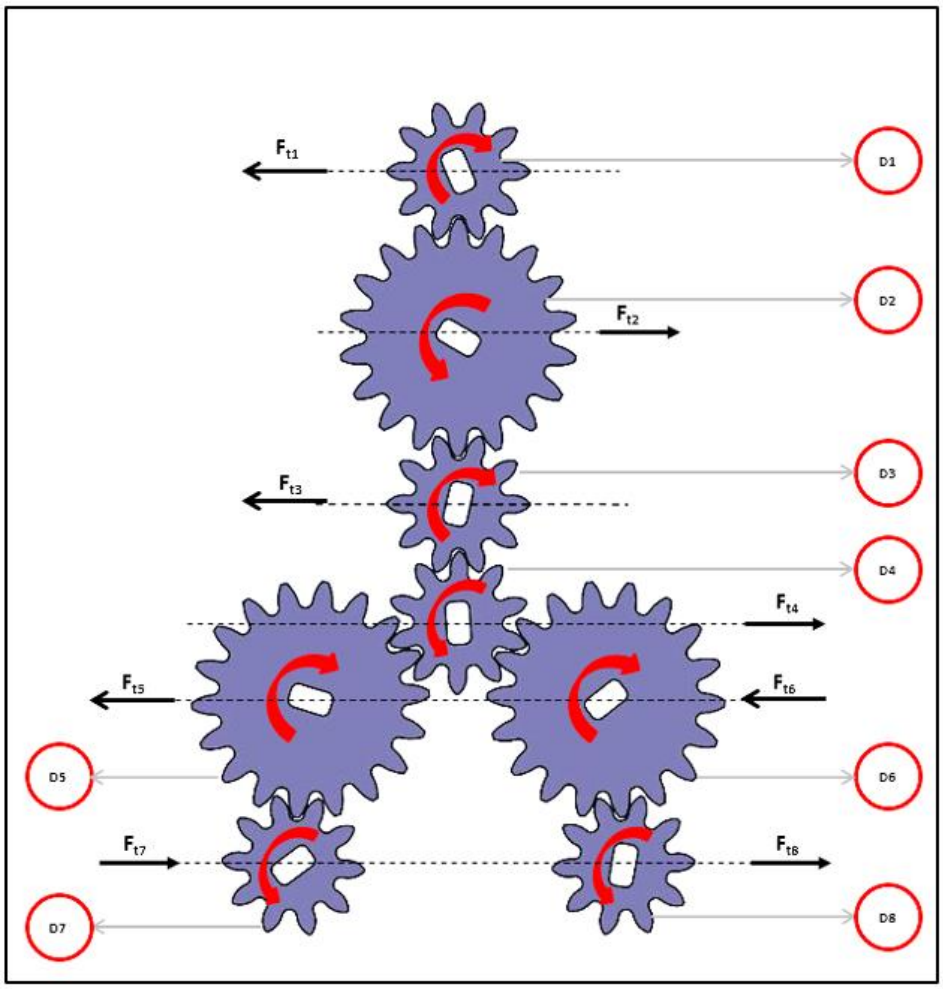


Şekil 4.14 Arka Kapak tasarımı

4.2 Sistemin Matematiksel Modeli

Kornea Sütur Robotu çalışır ilk prototip mekanik sistem tasarımı, Ar-Ge süreci boyunca yapılan geliştirme ve denemeler neticesinde son haline kavuştu. Tasarlanan bu mekanik yapının hareketli ve belli bir iş yapan parçaları, sistem dahilinde meydana gelen kuvvetsel ve açısal(eksenel dönüş) anlamda matematiksel ifadelerle tanımlanmış, sistem modeli matematiksel olarak ortaya konmuştur.

Elektrik motorundan elde edilen döner hareketi silindirlere ve iğneye aktaran dişli mekanizması, kendi içerisinde kapalı ve dengede olan bir sistemdir. Şekil 4.15'de gösterilen Kornea Sütur Robotu prototipinin dişli aktarım modelinde görülen kuvvetler toplamının, denge şartının sağlanabilmesi için teorik olarak sıfıra eşit olması gerekmektedir.



Şekil 4.15 Kornea Sütur Robotu dişli aktarım modeli

Dişli mekanizmalarında, bir dişliden diğer dişliye gerçekleşen her bir hareket ve tork aktarım kademesi, bir verim kaybıyla gerçekleşmektedir. Her bir kademede oluşan bu verim kayıpları, dişlilerin imalat metodu ve çalışma şartları ile ilişkilendirilerek tablolanmıştır(Tablo 4.1) [29].

Çizelge 4.1 Dişli kademelerinde verim değerleri

	Tanımı	Sembol	Değeri
1.	Taşlanmış ve iyi yağlanan dişli kademesi	η_D	0,995
2.	İşlenmiş ve iyi yağlanan dişli kademesi	η_D	0,990
3.	İşlenmemiş ve iyi yağlanan dişli kademesi	η_D	0,980

Üretilen dişliler Tablo 4.1'de ikinci madde olan işlenmiş ve gerekli yağlama işlemleri gerçekleştirilmiş olarak mekanizma içerisinde çalışacağından, tasarladığımız sistemin dişli aktarım verimi her kademede $\eta_D = 0{,}99$ olarak kullanılmıştır. Seçilen dişli aktarım verimi ile beraber; her bir dişli üzerindeki moment ve kuvvet analizleri aşağıdaki gibi yapılmış olup, giriş ve çıkış momentleri üzerinden sistem verimi elde edilmiştir.

Birinci(pinyon) dişli üzerindeki moment, motor çıkış momenti olduğundan 28 d/d dönüş hızında $M_{D1} = 0{,}010\ Nm$ [28], dişli çevrim oranı $N_D = 1{,}8$ dir. Aynı zamanda birinci dişli üzerindeki yanal kuvvet:

$$F_{D1} = \frac{M_{D1}}{r_{D1}} \tag{4.10}$$

Formül 4.10' da değerler yerine konulursa;

$$F_{D1} = \frac{0{,}010}{1{,}25.10^{-3}} = 8\ N$$

İkinci dişli üzerindeki moment:

$$M_{D2} = M_{D1}\eta_D N_D \tag{4.11}$$

Formül 4.11' de değerler yerine konulursa;

$$M_{D2} = 0{,}01x1{,}8x0{,}99 = 0{,}01782\ Nm$$

İkinci dişli üzerindeki yanal kuvvet:

$$F_{D2} = \frac{M_{D2}}{r_{D2}} \tag{4.12}$$

Formül 4.12' de değerler yerine konulursa;

$$F_{D2} = \frac{0,01782}{2,25.10^{-3}} = 7,92\ N$$

Üçüncü dişli üzerindeki moment:

$$M_{D3} = \frac{M_{D2}}{N_D}\eta_D \quad (4.13)$$

Formül 4.13' de değerler yerine konulursa;

$$M_{D3} = \frac{0,01782}{1,8}x0,99 = 0,00980\ Nm$$

Üçüncü dişli üzerindeki yanal kuvvet:

$$F_{D3} = \frac{M_{D3}}{r_{D3}} \quad (4.14)$$

Formül 4.14' de değerler yerine konulursa;

$$F_{D3} = \frac{0,00980}{1,25.10^{-3}} = 7,84\ N$$

Üçüncü dişli ile dördüncü dişli arasındaki çevrim oranı 1 olduğundan dördüncü dişli üzerindeki moment:

$$M_{D4} = M_{D3}\eta_D \quad (4.15)$$

Formül 4.15' de değerler yerine konulursa;

$$M_{D4} = 0,00980x0,99 = 0,00970\ Nm$$

Dördüncü dişli üzerindeki yanal kuvvet:

$$F_{D4} = \frac{M_{D4}}{r_{D4}} \quad (4.16)$$

Formül 4.16' da değerler yerine konulursa;

$$F_{D4} = \frac{0,00970}{1,25.10^{-3}} = 7,76\ N$$

Beşinci ve altıncı dişliler üzerindeki moment:

$$M_{D5-6} = M_{D4}\eta_D N_D \quad (4.17)$$

Formül 4.17' de değerler yerine konulursa;

$$M_{D5-6} = 0,00970x0,99x1,8 = 0,01728\ Nm$$

Beşinci ve altıncı dişliler üzerindeki yanal kuvvetler:

$$F_{D5-6} = \frac{M_{D5-6}}{r_{D5-6}} \quad (4.18)$$

Formül 4.18' de değerler yerine konulursa;

$$F_{D5-6} = \frac{0,01728}{2,25.10^{-3}} = 7,68\ N$$

Yedinci ve sekizinci dişliler üzerindeki moment:

$$M_{D7-8} = \frac{M_{D5-6}}{N_D}\eta_D \quad (4.19)$$

Formül 4.19' da değerler yerine konulursa;

$$M_{D7-8} = \frac{0,01728}{1,8} x 0,99 = 0,00950\ Nm$$

Yedinci ve sekizinci dişliler üzerindeki yanal kuvvetler:

$$F_{D7-8} = \frac{M_{D7-8}}{r_{D7-8}} \quad (4.20)$$

Formül 4.20' de değerler yerine konulursa;

$$F_{D7-8} = \frac{0,00950}{1,25.10^{-3}} = 7,6\ N$$

Hesaplanan moment ve kuvvet aktarım verileri incelendiğinde, her dişli kademesinde yukarıda belirtilen değerde verim kaybı; yani moment ve kuvvet kayıpları gerçekleşmiştir. Dişli sisteminin pinyon dişli girişi ile çıkışı arasındaki teorik redüksiyon oranı 1 olduğundan; dişli sisteminden çıkan tork ile sisteme giren torkun oranı, tasarlanan dişli sisteminin toplam verimini verir:

$$\eta_{DT} = \frac{M_{çıkış}}{M_{giriş}} = \frac{M_{D7-8}}{M_{D1}} \quad (4.21)$$

Formül 4.21'de değerler yerine konulduğunda dişli sistemi toplam verimi;

$$\eta_{DT} = \frac{0,00950}{0,010} = 0,95$$

Dişli sistemi çalışır pozisyonda mekanik denge halinde olduğundan, teorik olarak kuvvet dengesi mevcuttur. Yukarıda hesaplanan dişli kuvvetleri belirtilen eksenleri dahilinde toplandığında, sistemin denge şartının oluşması için sonucun sıfıra eşit olması gerekmektedir:

$$F_{D1} + (-F_{D2}) + F_{D3} + (-F_{D4}) + F_{D5-6} + (-F_{D7-8}) = 0 \quad (4.22)$$

Formül 4.22'de değerler yerine konularak sonucu kontrol edersek;

$$8 + (-7{,}92) + 7{,}84 + (-7{,}76) + 7{,}68 + (-7{,}6) = 0{,}24\ N$$

Denge halinde çalışan dişli sisteminin eksenel kuvvetleri toplamının sıfırdan farklı çıkması, dişli sisteminin içerisindeki verim kayıplarından kaynaklanmaktadır. Formül 4.22'nin sonucunda çıkan bu fazlalık kuvvet değeri, dişliler üzerinden silindir milleri yataklarına dağılarak dengelenir.

Kornea Sütur Robotu prototipi sisteminin matematiksel olarak modellenmesi; tüm çalışan mekanizma sistemi ataletlerinin, motor mili etrafında w_1 hızıyla dönen tek bir atalet olarak indirgenmesiyle gerçekleştirilmiştir [30]. Motor şaftı üzerindeki bu eşdeğer ataleti elde edebilmek için, sistemin toplam kinetik enerji ifadesini çıkartarak hızı w_1 cinsinden ifade ettik.

$$KE = \frac{1}{2}(I_m + I_{KD1} + I_{KD2} + I_{D1} + I_{D3} + I_{D4} + I_{D7} + I_{D8}){w_1}^2 + \frac{1}{2}(I_{D2} + I_{D5} + I_{D6}){w_2}^2 + \frac{1}{2}(I_{S1} + I_{S2} + I_{S3} + I_{S4} + I_{S5} + I_{S6}){w_1}^2 + \frac{1}{2}I_i{w_i}^2 \quad (4.23)$$

Formül 4.23'de yazılan sistem kinetik enerji ifadesinde; bölüm dairesi çapı Ø4,5mm olan dişlinin dönüş hızı w_2 ve iğnenin dönüş hızı w_i, motor şaft hızı w_1 cinsine çevirilir:

$$w_2 = \frac{w_1}{N_D} \quad (4.24)$$

$$w_i = \frac{w_1}{N_i} \quad (4.25)$$

Birbiriyle aynı geometrik ve mekanik özelliklere sahip oldukları için eşit atalete sahip olan kompanentleri aynı ifade altında toplayabiliriz:

- $I_{KD1} = I_{KD2} = I_{KD}$
- $I_{D1} = I_{D3} = I_{D4} = I_{D7} = I_{D8} = I_{Dw1}$
- $I_{D2} = I_{D5} = I_{D6} = I_{Dw2}$
- $I_{S1} = I_{S2} = I_{S3} = I_{S4} = I_{S5} = I_{S6} = I_S$

Formül 4.24 ve Formül 4.25'deki eşitlikler de Formül 4.23'de yerine konulursa:

$$KE = \frac{1}{2}(I_m + 2I_{KD} + 5I_{Dw1}){w_1}^2 + \frac{1}{2}(3I_{Dw2})(\frac{w_1}{N_D})^2 + \frac{1}{2}(6I_S){w_1}^2 + \frac{1}{2}I_i(\frac{w_1}{N_i})^2 \quad (4.26)$$

Kinetik enerji ifadesinde tüm açısal hız değerleri Formül 4.26'daki gibi motor şaft hızı w_1 cinsinden yazıldıktan sonra ortak paranteze alınırsa:

$$KE = \frac{1}{2}{w_1}^2\left(I_m + 2I_{KD} + 5I_{Dw1} + \frac{3I_{Dw2}}{{N_D}^2} + 6I_S + \frac{I_i}{{N_i}^2}\right) \quad (4.27)$$

Formül 4.27'de parantez içerisindeki ifade, aşağıdaki gibi motor şaftına binen toplam eşdeğer atalet olarak yazılabilir:

$$I_m + 2I_{KD} + 5I_{Dw1} + \frac{3I_{Dw2}}{{N_D}^2} + 6I_S + \frac{I_i}{{N_i}^2} = I_e \quad (4.28)$$

Formül 4.28'de elde edilen toplam eşdeğer atalet, Formül 4.27de yerine konulduğunda kinetik enerji ifadesi:

$$KE = \frac{1}{2}I_e{w_1}^2 \quad (4.29)$$

Motor şaftı üzerine düşen toplam moment (T_m); Formül 4.28'de elde edilen eşdeğer ataletin w_1 hızındaki zamana göre değişimi içerisinde oluşturduğu "atalet momenti" ve silindir ile iğne arasında oluşan momentlerin toplamıdır:

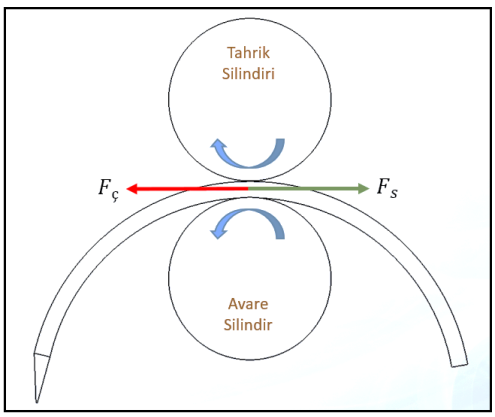
$$T_m = I_e\dot{w}_1 + \frac{1}{N_i}F_i r_s \quad (4.30)$$

Formül 4.30'da w_1 ifadesini θ cinsinden yazarsak:

$$w_1 = N_i w_i = N_i\dot{\theta}_i \quad (4.31)$$

Formül 4.31'de w_1 yerine yazılacak değer Formül 4.30'da yerine konulduğunda sistemin matematiksel ifadesi en basit haliyle:

$$I_e\ddot{\theta}_i = T_m - \frac{1}{N_i}F_i r_s \quad (4.32)$$



Şekil 4.16 İğne üzerine düşen kuvvet bileşenleri

Şekil 4.16'da tahrik silindirinden iğneye aktarılan döner hareketi ve bu hareketi oluşturan iğne zerindeki kuvvet bileşenlerini görmekteyiz. Bu kuvvetlerden tahrik silindirinin çevresel kuvveti $F_ç$ ve iğne-silindir arasındaki sürtünme kuvveti F_s:

$$F_ç = \frac{m_s {V_s}^2}{r_s} = m_s {w_s}^2 r_s \quad (4.33)$$

$$F_s = \mu m_i g \quad (4.34)$$

İğneye döner tahrik hareketinin aktarıldığı esnada iğne üzerinde oluşan hareket yönündeki bileşke kuvvet F_i:

$$F_i = F_ç - F_s \quad (4.35)$$

Formül 4.33 ve Formül 4.34'deki ifadeler Formül 4.35'de yerine konulduğunda:

$$F_i = m_s {w_s}^2 r_s - \mu m_i g \quad (4.36)$$

Formül 4.32'deki matematiksel model ifadesinde F_i yerine Formül 4.36'daki ifadeler konulduğunda:

$$I_e \ddot{\theta}_ı = T_m - \frac{1}{N_i}(m_s {w_s}^2 r_s - \mu m_i g) r_s \quad (4.37)$$

Formül 4.28'de motor şaftına binen toplam eşdeğer ataleti bulmak için, formül dahilindeki tüm ataletlerin çıkartılması gerekmektedir. Bu bağlamda;

- $I_m = 1{,}67\ gmm^2$
- $I_{KD} = 0{,}028\ gmm^2$
- $I_{Dw1} = 0{,}01\ gmm^2$
- $I_{Dw2} = 0{,}12\ gmm^2$
- $I_S = 0{,}01\ gmm^2$
- $I_i = 0{,}1\ gmm^2$

Tespit edilen tüm atalet değerleri Formül 4.28'de yerine yazıldığında motor şaftına binen toplam eşdeğer atalet I_e:

$$I_e = 1{,}67 + 2x0{,}028 + 5x0{,}01 + \frac{3x0{,}12}{1{,}8^2} + 6x0{,}01 + \frac{0{,}1}{2{,}63^2} = 1{,}9615\ gmm^2 \quad (4.38)$$

Formül 4.37'deki diğer ifadeleri yazacak olursak:

- Motor torku $T_m = 10\ mNm$
- İğneye döner hareketi aktaran silindirlerin kütlesi $m_s = 0{,}02\ g$
- İğneye döner hareketi aktaran silindirlerin dönüş hızı $w_s = 28\ d/dk$
- İğneye döner hareketi aktaran silindirlerin yarıçapı $r_s = 1\ mm$
- İğne ile silindir arasındaki sürtünme katsayısı $\mu = 0{,}2$
- İğnenin kütlesi $m_i = 0{,}0023\ g$
- Yerçekimi ivmesi $g = 9{,}81\ m/s^2$

Formul 4.37'de değerler yerine yazılırsa:

$$10 = 1{,}9615\ddot{\theta}_i + \frac{1}{2{,}63}(0{,}02x\left(\frac{28}{60}\right)^2 x1 - 0{,}2x0{,}0023x(9{,}81x1000))x1 \quad (4.39)$$

$$1{,}9615\ddot{\theta}_i = 11{,}7142 \quad (4.40)$$

Formül 4.40'dan açısal ivme $\ddot{\theta}_i$ değeri çekilirse:

$$\ddot{\theta}_i = 37{,}522\ rad/s^2 \quad (4.41)$$

Formül 4.41'de çıkan sonuç, DC motorumuzun kalkış rampasını (ivmelenmesini) vermektedir. Buradan ulaşmasını istediğimiz motor çalışma hızına ($w_s = 28\frac{d}{d} = 2{,}932\ \frac{rad}{s}$) ulaşma süremiz:

$$t = \frac{w_s}{\ddot{\theta}_i} = \frac{2{,}932}{37{,}522} = 0{,}078\ s = 78\ ms \quad (4.42)$$

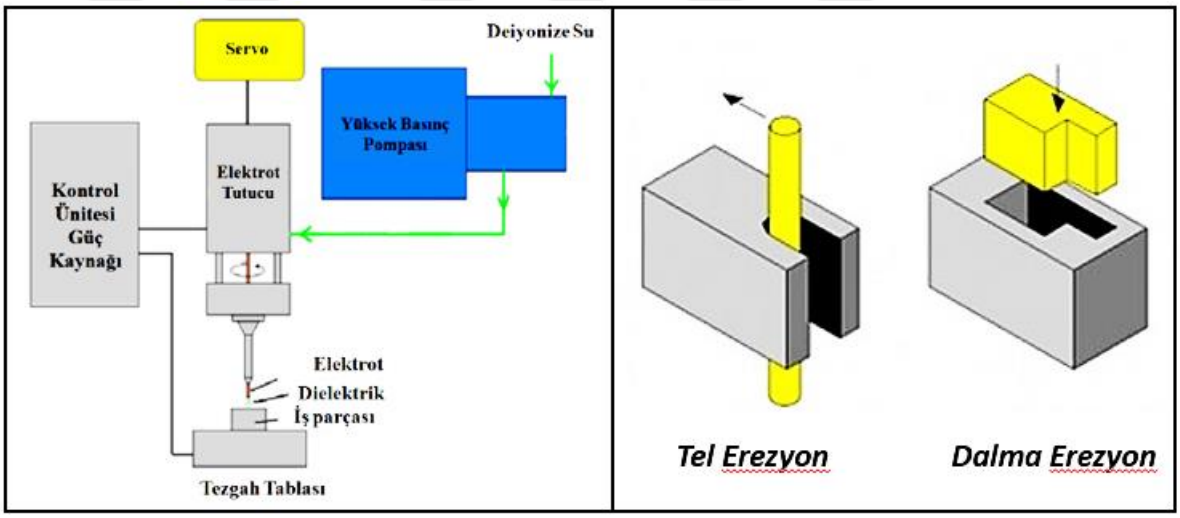
4.3 Gerçek Ölçekli İlk Prototip Parçalarının İmalatı ve Montajı

4.3.1 Gerçek Ölçekli İlk Prototip Parçalarının İmalatı

Büyük ölçekli (10:1) ilk prototip ışığında tasarımı ve teorik hesaplamaları gerçekleştirilen gerçek ölçekli Kornea Sütur Robotu prototipi parçaları, tasarım iş planı öncesinde belirlenen; tasarım boyutlandırmalarında hassasiyet ve tölerans anlamında göz önüne

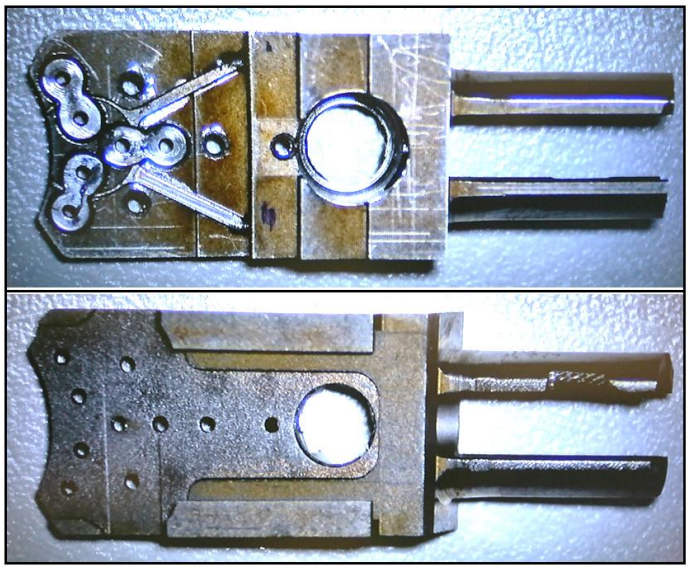
alınan mikro-EDM imalat metodu ile üretilmişlerdir. Ölçüsel olarak 300 µ ila 500 µ aralığında geometrik yapılarımızın olduğu düşünüldüğünde, tölerans hassasiyetimizin 20 µ'un üzerinde olmaması gerektiği aşikardır.

EDM teknolojisi (Şekil 4.16) özellikle hassas işçilik yapan kalıpçılarda oldukça kullanılmaktadırlar. Hassasiyet dereceleri tezgah kalitesine göre 1 µ ile 10 µ arasında değişkenlik göstermektedir. Keza parçalarımızın imalatı için anlaştığımız kalıpçının elindeki EDM tezgahları için, işleme yapabilecek en küçük bakır elektrot çapı 250 µ ve işleme hassasiyeti 10 µ olduğundan, üretimini gerçekleştireceğimiz parçalar göz önüne alındığında yeterli imalat kalitesine ulaşılmıştır. Üretilen Kornea Sütur Robotu prototipi parçaları, EDM teknolojisi ile işlenmeye uygun olan 52 HRC sertliğindeki DIN 1,2344 çelik malzeden imal edilmiştir.



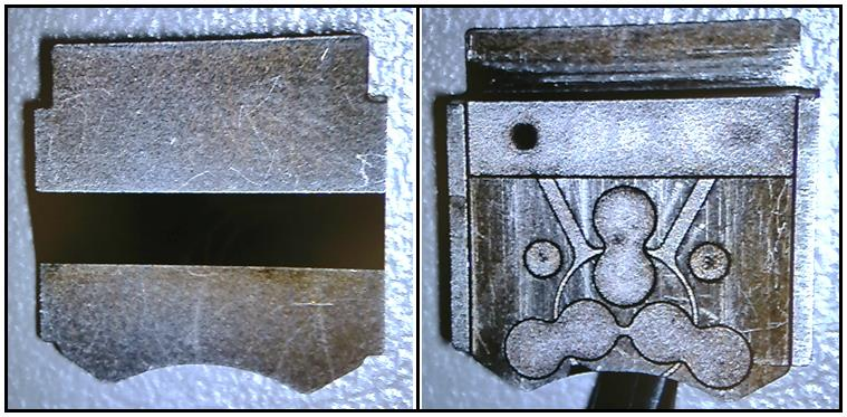
Şekil 4.16 EDM imalat teknolojisi

- Kornea Sütur Robotu prototipi Ana Layer parçamız, üzerinde bulunan her bir geometrik detayın işlenebilmesi için 8 farklı EDM elektrodu ile; ön yüzünden, arka yüzünden ve üst yüzeyinden olacak şekilde tezgaha farklı noktalarından bağlanarak işlenmiştir. İşçiliği en zor ve uzun işleme gereksinimi olan parçadır.



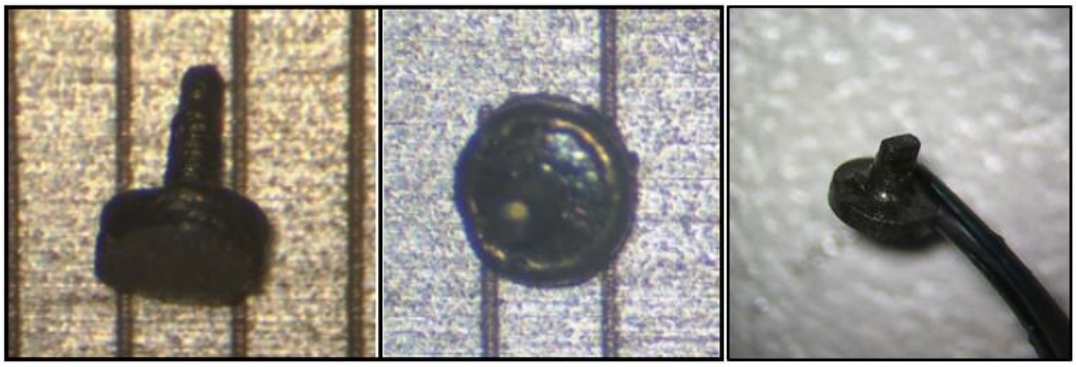
Şekil 4.17 İmal edilen Kornea Sütur Robotu Ana Layer parçası

- Kornea Sütur Robotu mekanizması montajı gerçekleştirildiğinde, mekanizma kompanentlerinin yerlerinden çıkmaması ve hareket alanlarının sınırlandırılması için Ana Layer üzerine monte edilecek Ön Kapak ve Arka Kapak üretilmiştir. Ön Kapak 5 farklı EDM elektrodu ile ön ve arka yüzeylerinden işlenmişken, Arka Kapak tek bir yüzeyden iki boyutlu işlemeye tabi kalmıştır.



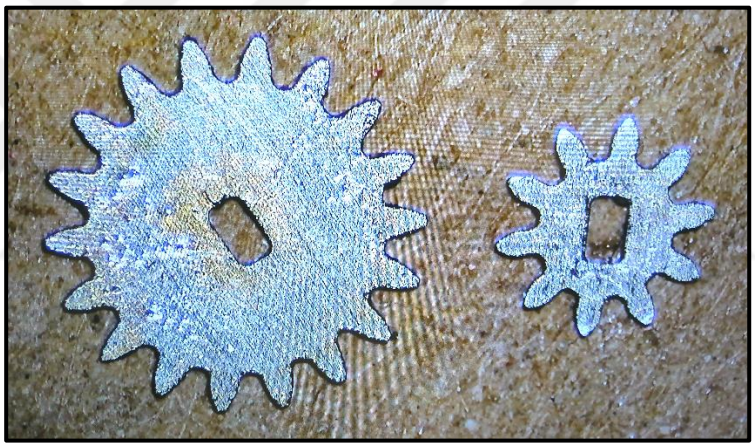
Şekil 4.18 İmal edilen Ön Kapak

- Kornea Sütur Robotu mekanizması bünyesinde tasarlanan mikron boyutlardaki silindirik parçalar; iğneye döner hareket tahriğini aktaran silindirler ve aktarma dişlisi yataklama milleri, önceden hazırlanan 2 farklı EDM elektrodu ile işlenerek imal edilmişlerdir.



Şekil 4.19 İmal edilen silindirik parçalar

- Kornea Sütur Robotu prototipi parçaları dahilindeki en küçük ölçülerde geometrik detaylara sahip olan tahrik aktarım dişlileri yüzeysel (iki boyutlu) geometriye sahip olduğundan, tek bir yüzeyinden kesme işlemi uygulanarak imal edilmiştir. Kesme işlemi, 250 µ'luk tel elektrotlar ile uygulanmıştır.



Şekil 4.20 İmal edilen dişliler

- Kornea Sütur Robotu prototipi hareket tahrik kaynağı olan DC motorun eksenel hareketini sınırlandırmak ve güç aktarımında çıkabilecek sıkıntıların önüne geçmek amacıyla tasarlanan Motor Kapağı'nın üretimi gerçekleştirilmiştir. İlk etapta silindirik dış ve iç geometrileri oluşturulan parçanın, yüzey yarıkları açıldıktan sonra yan yüzeylerine setüskur bağlantısı için M3 delik delinerek diş açılmıştır.



Şekil 4.21 İmal edilen Motor Kapağı

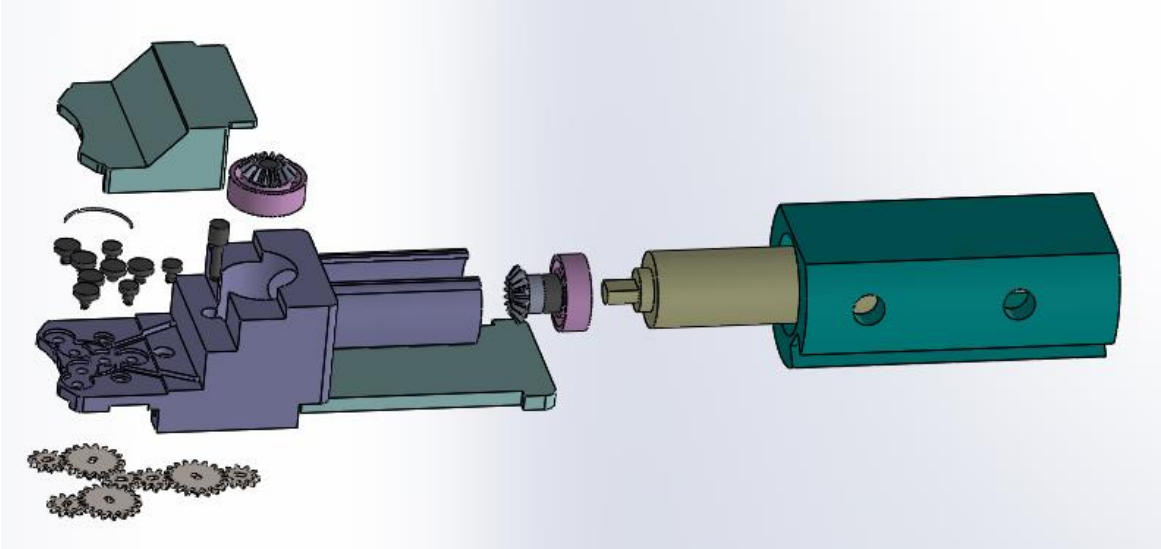
Kornea Sütur Robotu prototipi parçaları imal edilme süresi dahilinde, eş zamanlı olarak sistem mekanizması içerisinde kullanılan hazır kompanentlerin teminleri de gerçekleştirilmiştir. Bu kompanentler, tasarım çalışması bölümünde de bahsedildiği üzere:

- Precision Microdrives 206-108 6mm DC motor,
- Modülü 0,3 ve 14 diş adetli plastik konik dişli takımı,
- MR63 minyatür rulman (D=6; d=3; H=2).

İmal edilen ve temin edilen hazır kompanentlerin hepsi tamamlandıktan sonra, Kornea Sütur Robotu prototipi mekanik montaja hazır hale gelmiştir.

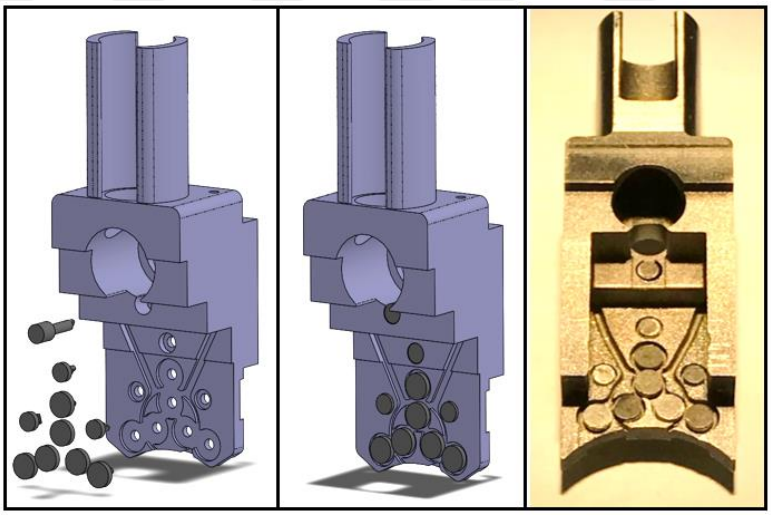
4.3.2 Gerçek Ölçekli İlk Prototipin Mekanik Montajı

Tasarlanan konsept ve büyük ölçekli (10:1) prototip tasarımları ışığında geliştirilen Kornea Sütur Robotu çalışır ilk prototipi, mikro yapısı göz önüne alınarak; uygun montaj teknikleri ile kolay montaj edilebilcek şekilde tasarlandı. Sistem mekanik kompanentlerinin birbileriyle montajı adım adım gösterilmiştir.



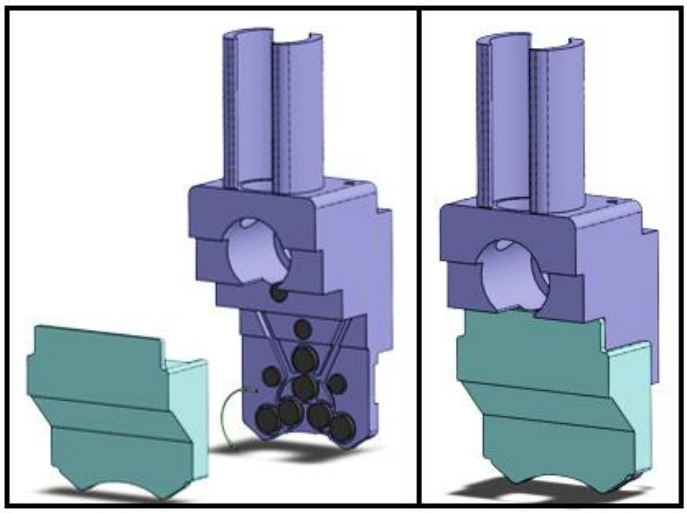
Şekil 4.22 İmalatı gerçekleştirilen ve temin edilen Kornea Sütur Robotu sistem kompanentlerin demonte resmi

- Üretilen silindirik kompanentler (iğneye döner tahrik hareketini aktaran silindirler ve aktarma dişlisi yataklama milleri), Ana Layer üzerinde işlenmiş yuvalarına mikroskop altında cımbız yardımıyla monte edilir (Şekil 4.23).



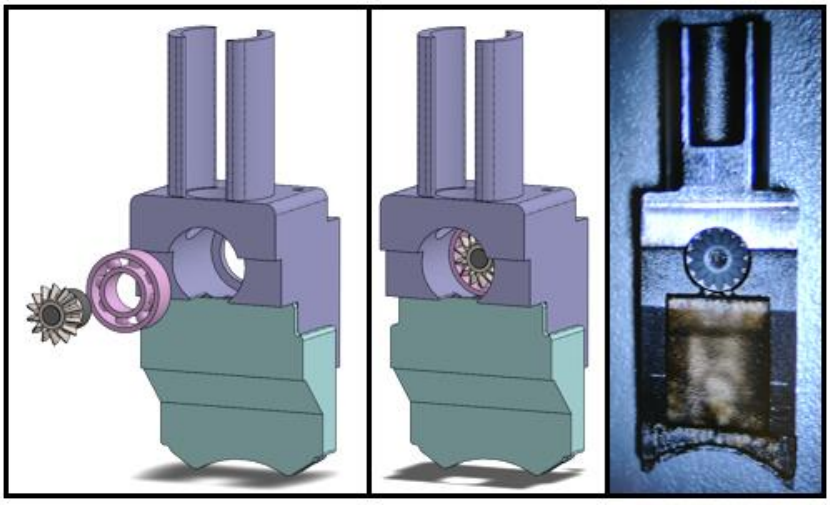
Şekil 4.23 Silindirik kompanentlerin mikroskop altında Ana Layer üzerine montajı

- İğneye döner tahrik hareketini aktaran silindirlerin montajından sonra, sütur (Alcon®) Ana Layer ön yüzeyindeki iğne yarığı içerisine silindirlerin arasına denk gelecek şeklide yerleştirilir. Silindirik parçaların ve iğnenin Ana Layer ön yüzeyindeki çalışma bölmelerinden çıkmamaları için Ön Kapak, Ana Layer ön yüzeyine monte edilir (Şekil 4.24).



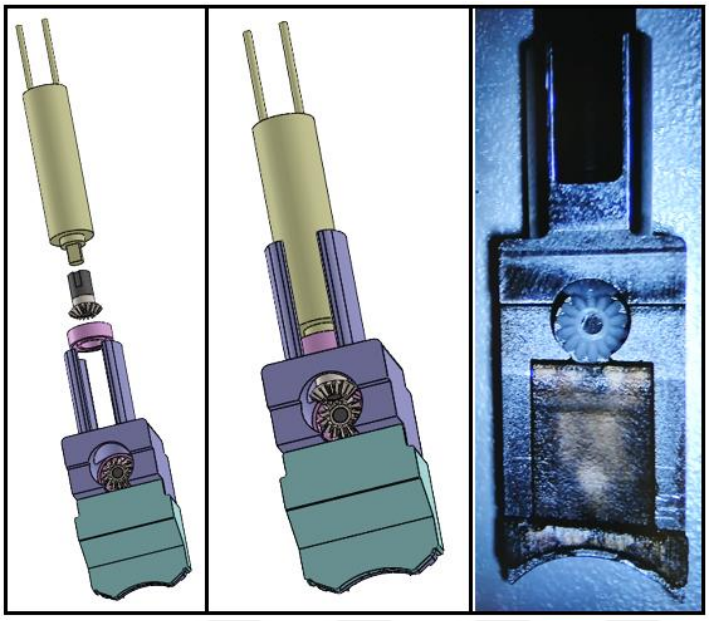
Şekil 4.24 Sütur ve Ön Kapağın Ana Layer üzerine montajı

- Ana Layer ön yüzü üzerinde 6mm çapındaki yarık içerisine MR63 minyatür rulman, yarık içerisindeki faturaya rulman dış bileziği dayanana kadar çakılır. Konik dişli çiftinin bir tanesi, rulmana iç bileziğine dayanacak şekilde yerleştirilerek yataklanır (Şekil 4.25).



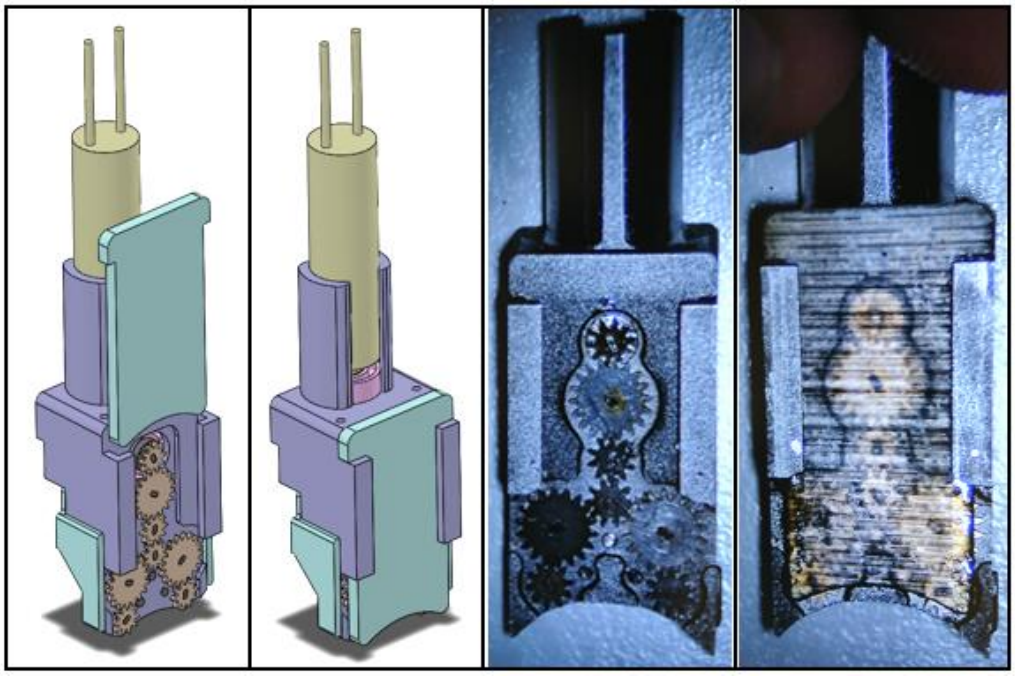
Şekil 4.25 Ana Layer ön yüzeyine rulman ve konik dişli montajı

- Ana Layer üst yüzeydeki yarıklı deliğe MR63 minyatür rulman, yarık tabanındaki faturaya dış bileziği dayanana kadar çakılır. Konik dişli çiftlerinden biri, gövdesi 6mm çapında olan DC motor şaftına yapıştırılarak monte edilir. Konik dişlinin montajlandığı DC motor, çapı 6,01mm olan yarıklı delik içerisine sıkı geçme olarak delik dibine monte edilen rulmana ve karşılık konik dişlisine temas edecek şekilde monte edilir (Şekil 4.26).



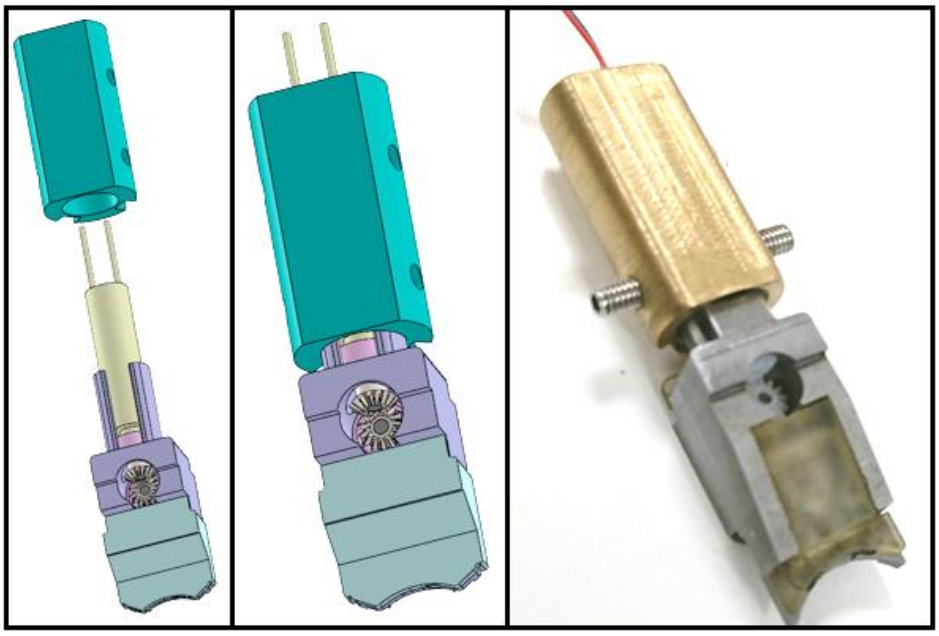
Şekil 4.26 Ana Layer üst yüzeyine rulman, konik dişli ve DC motorun montajı

- Ana Layer arka yüzeyine yerleştirilecek dişliler, iğneye döner hareketi atkaran silindir milleri ve aktarma dişli yatak millerinin uçlarında işlenmiş olan dikdörtgen profilli faturalar üzerine yerleştirilerek monte edilirler. Ana Layer arka yüzeyine işlenen kızaklı yapı sayesinde; dişlilerin yerleştirildikleri bölmelerden çıkmadan çalışabilmeleri için tasarlanan Arka Kapak, kızaklı bölme içerisinden geçirilerek Ana Layer arka yüzeyine monte edilir (Şekil 4.27).



Şekil 4.27 Dişlilerin ve Arka Kapağın montajı

- Dc motordan elde edilen döner hareket aktarımı gerçekleştirilirken, konik dişli üzerinde oluşan motor gövdesi ekseninde ve yukarı yöndeki kuvvete karşı gelmesi amacıyla tasarlanan ve imal edilen motor kapağı; Ana Layer motor yarığı üzerine motoru da kapsayacak şekilde M3 setüskur yardımıyla monte edilir (Şekil 4.28).



Şekil 4.28 Motor Kapağının Ana Layer ve motor üzerine montajı

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında keratoplasti (kornea nakli) operasyonlarında sütur atma işleminin robotik sistem entegresi ile gerçekleştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Bu hususta literatürde laparoskopik uygulamalarda gördüğümüz çift kollu sistemler yerine tek bir robotik kol tasarımı üzerinde durulmuştur. Tek bir robotik kol ile sütur atma işleminin yanında, göz üzerinde özelleşmiş ilk cerrahi robot çalışması olmuş, mikro boyutlardaki yapısıyla diğer tüm cerrahi robotlar üzerinde farkını ortaya koymuştur.

Kornea Sütur Robotu ilk prototipi geliştirme süreci, bir konsept tasarım oluşturarak başlamıştır. Kornea ve atılması gereken dikiş yapıları analiz edilerek tasarım kriterleri ve sınırlandırmaları ortaya konmuştur. Robot mekanizmasında kullanılan iğne seçiminden sonra tek kollu robot yapısı geliştirmek amacıyla, iğnenin yarımay geometrisinden de faydalanılarak sütur atma tekniği belirlenmiştir. İğnenin kendi geometrik şekli eksenindeki dönüşünü gerçekleştirecek silindir yapıları ve tahrik hareketini silindirlere taşıyacak dişli sistemi, aynı zamanda iğne konum kontrolü için kullanılacak fiber optik sensör yapısı konsept tasarım aşamasında belirlenmiştir.

Uygulanması düşünülen konsept tasarım, mantıksal doğrulamasının yapılabilmesi için mikro yapıda geliştirilmeden önce 10:1 ölçekli makro boyutlarda uygulanmıştır. Büyük ölçekli bu ilk prototipte; iğneye döner tahrik hareketinin aktarılması, iğne ipliğinin (süturun) mekanizma içerisinde kalmadan iğneyi takip edebilmesi ve fiber optik sensör sisteminin kurguladığımız robotik sistem içerisinde istediğimiz şekilde çalışması başarı ile sağlanmıştır. Bu bizlere, konsept tasarım kurgumuzun doğruluk payının bir göstergesi olmuştur.

Büyük ölçekli ilk prototip ışığında gerçek ölçekte mikro yapıdaki Kornea Sütur Robotu çalışmaları başlamıştır. Micro-EDM imalat metodu seçimi sonucunda tüm tasarım ve ar-ge, belirlenen imalat metodu tölerans aralığında gerçekleştirilmiştir. Fakat mikro yapıda, 10:1 ölçekli prototipte tasarlanan çift parçalı Üst Kapak yapısı aynı mantık dahilindeki tasarım anlayışı ile uygulanamadığından, Üst Kapak tek parçalı olarak geliştirilmiştir. Bunun haricinde dişli üzerindeki döner hareketi silindire ileten miller ile yekpare yapıda tasarlanan metal gövdeli silindirlerin yanal yüzeyleri, mikro yapısı neticesinde büyük ölçekli prototipteki gibi kauçuk yapıda ve yüksek sürtünme yüzeyine sahip bir malzeme ile kaplanamamıştır. Bundan dolayı iğneye döner hareket, metal silindirlerin metal iğne gövdesiyle direk teması üzerinden iletilcek şekilde gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu hususta hareket aktarımını sağlayabilmek adına silindir yanal yüzeyindeki sürtünmeyi arttırabilmek için, iğneyle temasa geçen silindir yanal yüzeyleri kumlama işlemine tabi tutulmuştur.

Büyük ölçekli prototipe göre mikro yapıda gerçekleştirilebilmesi sıkıntılı olan durumların yukarıda belirtildiği gibi uygulandığı Kornea Sütur Robotu ilk prototipi parçaları üretildikten ve hazır parçalar temin edildikten sonra, montaj işlemleri gerçekleştirilerek sistem çalışmaya hazır hale getirilmiştir. Teorik hesaplamaların gösterdiği sonuçlar gibi mekanik hareket aktarım sistemi başarlı bir şekilde çalışmıştır. Bu hususta DC motordan elde edilen döner hareket tahriği, dişliler üzerinden silindirlere sıkıntısız bir şekilde aktarılmıştır.

Mukavemet analizleri sonucunda seçilen dişli modülü için; diş dibi kırılmasına göre güvenli, yüksek hızlarda ve sürekli çalışma şartlarında diş yüzeyi ezilmesine göre güvensiz sonucu çıkan dişli aktarım mekanizmamız, 28 d/d gibi düşük bir hızda kısa süreli çalışma şartlarında herhangi bir sıkıntı oluşturmadan döner hareket aktarımını gerçekleştirmiştir.

Sistemin matematiksel modeli; hareketli ve iş yapan tüm parçaların motor miline indirgenmiş ataletleri kinetik enerji dönüşümünden elde edilerek, Dc motorumuzun torku ve iğnenin silindir üzerindeki momentleri çıkartılarak oluşturulmuştur. Matematiksel model sonucu elde edilen seçilen elektrik motorunun sistem üzerinde oluşturduğu açısal ivme, yeterli tork değerine sahip bir motor seçildiğinin göstergesidir.

Kornea Sütur Robotu prototipi montajı tamamlanarak test ve deneyler yapıldığında, silindirler tarafından iğneye döner hareket aktarımının kayıpsız yani %100 verimle aktarılamadığı, kesintili bir iğne dönüşü gözlemlenmiştir. Bunun yanında mekanizma içerisinden çıkıp tekrar mekanizma içerisine geri dönen iğne, ipliği (süturu) robot mekanizması iğne yarığında kaldığı için robot gövdesi içerisine girmekte sıkıntı yaşamaktadır. Büyük ölçekli (10:1) yapıda bu sıkıntıların yaşanmamasına rağmen mikro boyuttaki gerçek prototipte yaşamış olmamızın sebepleri;

- İmal edilen silindirler: Büyük ölçekli prototipte kauçuk yapıdaki polietilen kaplı silindirlerle, polietilen malzemenin esnek mekanik yapısı sayesinde iğneyi kavrayarak yüksek sürtünme kuvveti neticesinde hareket aktarımı kayıpsız gerçekleştirilmiştir. Gerçek ölçekli prototipte silindirler üzerine elastik ve yüksek sürtünmeli bir kaplama gerçekleştirememiş olduğumuzdan, hareket aktarımı rijit parçalar arasında noktasal temas ile gerçekleşmeye çalışmaktadır. Bu da sistem içerisinde esnemelere sebebiyet verdiğinden, noktasal temasın kesintiye uğraması, iğne döner hareketinin kesintili gerçekleşmesine sebep olmuştur.
- Üst Kapak tasarımı: Çift parçalı tasarlanan büyük ölçekli prototip Üst Kapağı sayesinde iplik (sütur) iğneyi robot mekanizması dışından takip etmiştir. Bu sayede iğnenin bir tam turu sonunda iğne yarığında iplik kalmamış, iğne mekanizma içerisine rahatlıkla girebilmiştir. Gerçek ölçekli prototipte ise, tek parçalı kapak tasarımından dolayı iğne yarığında kalan iplik iğnenin doku içerisinden robot içerisine tekrardan girmesine mani olmaktadır.

Bu tezde, ortaya çıkan tüm sıkıntılarıyla beraber Kornea Sütur Robotu ilk prototipi sunulmuştur. Mikro boyutlardaki bu robotun geliştirilmesi, özellikle döner tahrik hareketinin silindirler üzerinden iğneye aktarımı konusu üzerine devam etmektedir. Bunun için Litografi metodu ile silindirler için kalıp imal edilmesi ve kalıba yerleştirilen silindirlerin etrafına PDMS dökülerek fırında kürlenmesi ile silindir yüzeylerine kaplanması fikri ön plandadır. PDMS'in elastik ve yüksek sürtünmeli yapısı ile silindir yanal yüzeylerine kaplandığında hareket aktarımındaki sıkıntının önüne geçileceği ön görülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Tang, Q., Hoffer, K. J., Olson, M. D. ve Miller, K. M., (2009). "Accuracy of Scheimpflug Holladay equivalent keratometry readings after corneal refractive surgery", J. Cataract Refract. Surg., 35(7): 1198–1203.

[2] Hoffart, L., Proust, H., Matonti, F., Ridings, B. ve Conrath, J., (2008). "Short-term Results of Penetrating Keratoplasty Performed with the Femtec Femtosecond Laser", Am. J. Ophthalmol., 146(1).

[3] Por, Y. M., Cheng, J. Y. C., Parthasarathy, A., Mehta, J. S. ve Tan, D. T. H., (2008) "Outcomes of Femtosecond Laser-Assisted Penetrating Keratoplasty", Am. J. Ophthalmol., 145(5).

[4] Holzer, M. P., Rabsilber, T. M. ve Auffarth, G. U., (2007). "Penetrating keratoplasty using femtosecond laser", Am J Ophthalmol, 143(3): 524–526.

[5] Parthasarathy, A., Mehta, J. S., Ming, P. Y., Cajucom-Uy, H. ve Tan, D. T. H., (2007). "The Use of the Femtosecond Laser in Penetrating Keratoplasty," Am. J. Ophthalmol., 144(6): 975–976.

[6] Seitz, B., Brünner, H., Viestenz, A., Hofmann-Rummelt, C., Schlötzer-Schrehardt, U., Naumann, G. O. H. ve Langenbucher, A., (2005). "Inverse mushroom-shaped nonmechanical penetrating keratoplasty using a femtosecond laser", Am. J. Ophthalmol., 139(5): 941–943.

[7] Price, F. W. ve Price, M. O., (2008). "Femtosecond Laser Shaped Penetrating Keratoplasty: One-year Results Utilizing a Top-hat Configuration," Am. J. Ophthalmol., 145(2).

[8] Kim, S. J., Wee, W. R., Lee, J. H. ve Kim, M. K., (2008). "The effect of different suturing techniques on astigmatism after penetrating keratoplasty," J. Korean Med. Sci., 23(6): 1015–1019.

[9] Christo, C. G., van Rooij, J., Geerards, a J., Remeijer, L. ve Beekhuis, W. H., (2001). "Suture-related complications following keratoplasty: a 5-year retrospective study.", Cornea, 20(8): 816–819.

[10] Leonard, S., Wu, K. L., Kim, Y., Krieger, A. ve Kim, P. C. W., (2014). "Smart tissue anastomosis robot (STAR): a vision-guided robotics system for laparoscopic suturing.", IEEE Trans. Biomed. Eng., 61(4): 1305–17.

[11] Finkelstein, J., Eckersberger, E., Sadri, H., Taneja, S. S., Lepor, H. ve Djavan, B., (2010). "Open Versus Laparoscopic Versus Robot-Assisted Laparoscopic Prostatectomy: The European and US Experience.", Rev. Urol., 12(1): 35–43.

[12] Hubens, G., Coveliers, H., Balliu, L., Ruppert, M. ve Vaneerdeweg, W., (2003). "A performance study comparing manual and robotically assisted laparoscopic surgery using the da Vinci system", Surg. Endosc. Other Interv. Tech., 17(10): 1595–1599.

[13] Sun, L. W. ve Yeung, C. K., (2007). "Port placement and pose selection of the Da Vinci surgical system for collision-free intervention based on performance optimization", IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst., 1951–1956.

[14] Nathan, C. A. O., Chakradeo, V., Malhotra, K., D'Agostino, H. ve Patwardhan, R., (2006). "The voice-controlled robotic assist scope holder AESOP for the endoscopic approach to the sella", Skull Base, 16(3): 123–132.

[15] Kothari, N., Nagaraja, K., Raghunathan, V., Sultan, F. ve Chakradhar S., (2008). "HERMES: A software architecture for visibility and control in wireless sensor network deployments", in Proceedings - 2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2008: 395–406.

[16] Jacobs, J., Freeman, G., Grygier, J., Morton, D., Schultz, G., Staschus, K. ve Stedinger, J., (1995). "SOCRATES: A system for scheduling hydroelectric generation under uncertainty", Ann. Oper. Res., 59(1): 99–133.

[17] Ruurda, J. P., Wisselink, W., Cuesta, M. A., Verhagen, H. J. M. ve Broeders I. A. M. J., (2004). "Robot-assisted versus standard videoscopic aortic replacement. A comparative study in pigs.", Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg., 27(5): 501–6.

[18] Yang, Y., Deng, S., Xiao, J. ve Xu, C., (2010). "Design and research of a corneal grafting robotic system", Proc. - 2010 Int. Conf. Digit. Manuf. Autom. ICDMA 2010, 1: 486–490.

[19] Hu, Y., Li, D., Zong, G. ve Sun, X., (2005). "Robotic system for microsurgical keratoplasty.", Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc., 6: 5762–5765.

[20] Krieger, A., Kim, P., Wilson, C. ve Abellera, S., (2001). "Anastomosis clipping tool with half-loop clip", 20(1): 4008-8621.

[21] Jo, B. H., Van Lerberghe, L. M., Motsegood, K. M. ve Beebe, D. J., (2000). "Three-dimensional micro-channel fabrication in polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer", J. Microelectromechanical Syst., 9(1): 76–81.

[22] İTÜ Bilgi İşlem Daire Başkanlığı veb sitesi, http://bidb.itu.edu.tr/seyirdefteri/blog/2013/09/07/fiber-optik-sistemler.

[23] Bilgi ustam veb sitesi, http://www.bilgiustam.com/fiber-optik-nedir-fiber-optik-kablolar-isigi-nasil-iletir.

[24] Elektrik Port veb sitesi, http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/fiber-optik-sensor-nasil-calisir/16862#ad-image-0.

[25] Industrial Fiber Optics, Inc. www.i-fiberoptics.com, IF E96E Plastic Fiber Optic Red LED Datasheet.

[26] Industrial Fiber Optics, Inc. www.i-fiberoptics.com, IF D91 Plastic Fiber Optic Photodiode Datasheet.

[27] Precision Microdrives 225-201 25mm DC gearmotor-55mm type-datasheet.

[28] Precision Microdrives 206-108 6mm DC gearmotor-21mm type-datasheet.

[29] M. Güven Kutay, Mukavemet Değerleri Formüller Ve Tablolar, 05-7, Kasım 2009.

[30] William J. Palm III, System Dynamics Second Edition, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Tunç KÖSE

Doğum Tarihi ve Yeri : 1989-Bakırköy

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : tunc.kose89@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Lisans	Makina Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lise	Özel	Koza Koleji	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2013	ROBOPLAS LTD.	Proje Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Kose T., Sahin O., Erkan K., Uvet H., Pallikaris I., (2017). “Corneal Suture Robot for Keratoplasty Operations”, International Congress of the Hellenic Society of Intraocular Implant and Refractive.