

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KOL DIŞ İSKELET TASARIMINDA BİYOMİMETİK DÖKÜM
TEKNOLOJİLERİ VE SERVO MOTOR DESTEKLİ İTERATİF
ÖĞRENME KONTROLÜ UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan Kaan UYANIK

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Nur AY GÜL

Haziran 2025

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KOL DIŞ İSKELET TASARIMINDA BİYOMİMETİK DÖKÜM
TEKNOLOJİLERİ VE SERVO MOTOR DESTEKLİ İTERATİF
ÖĞRENME KONTROLÜ UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan Kaan UYANIK

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 24/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Nur AY GÜL	Başarılı
Üye: Doç. Dr. Kasım SERBEST	Başarılı
Üye: Doç. Dr. Muhammed Kürşad UÇAR	Başarılı

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Furkan Kaan UYANIK

24/06/2025

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Nur AY GÜL'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	iv
SİMGELER	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT	x

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	2
1.1.1. Üst ekstremite rehabilitasyonunda robotik sistemlerin kullanımı.....	5
1.1.2. Üst ekstremite dış iskelet kontrol yöntemlerinin gelişimi	8
1.1.3. Ev tabanlı üst ekstremite dış iskelet kullanımı.....	13
1.2. Biyomimetik Döküm Teknolojisi ve Uygulama Alanları	18
1.3. Araştırma Sorusu.....	21
1.4. Alt problemler	21
1.5. Tezin Amacı ve Önemi	21

BÖLÜM 2.

SİSTEM TASARIMI.....	22
2.1. Kavramsal Tasarım	22
2.1.1. Fonksiyon yapıları.....	23
2.1.2. Önerilen tasarım çözümleri.....	25
2.2. Donanım Tasarımı	29
2.2.1. Eklemeli imalat ve biyomimetik döküm teknolojisi	33
2.2.2. Cihazın maliyeti ve pazar potansiyeli	42

BÖLÜM 3.	
BİYOMEKANİK MODEL VE KONTROLÇÜ TASARIMI	44
3.1. Üst Ekstremitte Biyomekanik Model	44
3.2. Kontrolcü Tasarımı	48
3.2.1. Tekrarlamalı öğrenmeli kontrolör tasarımı	48
BÖLÜM 4.	
BULGULAR VE TARTIŞMA	51
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR	56
KAYNAKLAR	58
EKLER	64

KISALTMALAR

3D	: 3-Dimensions
BCI	: Beyin-Bilgisayar Arayüzü
BMI	: Beyin-Makine Arayüzü
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
DOF	: Serbestlik Derecesi
DSL	: Desired Sensation Level (İstenilen Duyum Seviyesi)
EEG	: Elektroensefalografi
ICSP	: In-Circuit Serial Programming
ILC	: Iterative Learning Control
ISP	: In-System Programmer
PWM	: Pulse Width Modulation
ROM	: Eklem Hareket Açıklığı
sEMG	: Yüzey Elektromiyografisi
TL	: Türk Lirası

SİMGELER

ϵ	: Enerji Girişi
E'	: Enerji Çıkışı
g	: Yerçekimi İvmesi (9.81 m/s ²)
H	: Sistem girdisinde yer alan kullanıcı
H'	: Rehabilitasyon sürecini tamamlamış ve çıkış yapan kullanıcı
I_{hh}	: Dışarıdan uygulanan harici kuvvet
I	: Dirsek etrafındaki dönme atalet momenti (kg·m ²)
K	: Cihazın kontrol biriminden aldığı komutlar
K'	: Hareket Çıktısı
l	: Ön kolun uzunluğu (m)
m	: Kütle (kg)
τ	: Uygulanan Tork (servo motor torku)
F_h	: Dirsek ekleminde meydana gelen viskoz sürtünme kuvveti bileşeni
G_h	: Yerçekimsel moment bileşeni
l_{f1}, l_{f2}	: Ön kol segmentinin başlangıç ve bitiş noktaları
l_{u1}, l_{u2}	: Üst kol segmentinin başlangıç ve bitiş noktaları
e	: Bir önceki iterasyondaki hata
m_f	: Ön kolun kütlesi
m_u	: Üst kolun kütlesi
u_k	: Bir önceki çıkış sinyali
γ	: Öğrenme Kazancı
$\theta(t), \phi$: Dirsek açısı

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Literatürde Üst Ekstremitte Dış İskeletlerinde Kullanılan Kontrol Yöntemleri.....	15
Tablo 1.2 Ev Ortamında Üst Ekstremitte Rehabilitasyonuna Yönelik Literatür Çalışmaları	16
Tablo 2.1 Tasarım Beklentileri Tablosu.....	23
Tablo 2.2 Tasarım Çözümleri Karşılaştırma.....	28
Tablo 2.3 Donanım Bileşenleri	29
Tablo 2.4 Biyomimetik Döküm Teknolojisi Avantajları	38
Tablo 2.5 Maliyet Analizi	42

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 : Dış İskelet Sınıflandırılması (Kocaoğlu ve Akdoğan, 2016).....	5
Şekil 1.2 : Çok serbestlik dereceli bir kol dış iskelet	6
Şekil 1.3 : Üst Ekstremitte Dış İskelet Sistemi (Lee ve diğerleri, 2012)	9
Şekil 1.4 : Elektrik Tahrikli Dirsek Rehabilitasyon Robotu (Vanderniepen ve diğerleri, 2009).....	11
Şekil 1.5 : Aktüatör ve Ayarlanabilir Yay Mekanizması (Vanderniepen ve diğerleri, 2009)	11
Şekil 1.6 : Dirsek Eklemi Rehabilitasyon Ortezi (Ripel ve diğerleri, 2014).....	13
Şekil 2.1 : Geliştirilen Ev Temelli Hibrit Dirsek Rehabilitasyon Cihazının Fonksiyon Blok Diyagramı	24
Şekil 2.2 : Tasarım Çözümü 1	26
Şekil 2.3 : Tasarım Çözümü 2.....	27
Şekil 2.4 : MG945 Model Servo Motor	30
Şekil 2.5 : Kuvvet Sensörü ve Güçlendirici HX711	31
Şekil 2.6 : Arduino Uno Mikrodenetleyici Kartı	32
Şekil 2.7 : Dirsek Rehabilitasyon Cihazı Donanım Bağlantı Yapısı	33
Şekil 2.8 : Cihazın Katı Model Montajı	35
Şekil 2.9 : Cihazın Katı Model Montajı ve Bileşenleri.....	35
Şekil 2.10 : Sistem Prototipi.....	366
Şekil 2.11 : Sistemin Kol Üzerindeki Görünümü	36
Şekil 2.12 : Omuz Bölgesi Maçası.....	37
Şekil 2.13 : Ön Kol Bölgesi Maçası.....	37
Şekil 2.14 : Omuz Bölgesi Teknik Resim Anteti.....	39
Şekil 2.15 : Kol Bölgesi CAD Görünümü	40
Şekil 2.16 : Omuz Arka Destek Teknik Resim Anteti.....	40
Şekil 2.17 : Genel Görünüm	41
Şekil 3.1 : Dirsek Eklemine ait 1-DoF Biyomekanik Model	45
Şekil 3.2 : 1-DoF Dış İskelet Modeli	46
Şekil 3.3 : Kısıtlanmış Model.....	47
Şekil 3.4 : ILC Blok Diyagramı	49
Şekil 4.1 : Sistem ILC Kontrolör Cevabı	51
Şekil 4.2 : Zamana Bağlı Hata Değerleri	52
Şekil 4.3 : Terapi Esnasında Oluşan Kuvvet Değerleri.....	53
Şekil 4.4 : Sistemin Test Düzenegi	54
Şekil A.1 : Kol Bölgesi Kalıp	64
Şekil A.2 : Kol Bölgesi	65
Şekil A.3 : Montaj.....	65
Şekil A.4 : Omuz Arka Destek.....	66
Şekil A.5 : Omuz Bölgesi	66
Şekil A.6 : Omuz Bölgesi Kalıp.....	67
Şekil A.7 : Ön Kol Destek	67

Şekil A.8 : Ön Kol Dış İskelet	68
Şekil A.9 : Loadcell.....	68
Şekil A.10 : Ön Kol Motor Destek	69
Şekil A.11 : Montaj Hali CAD Görünümü 1	69
Şekil A.12 : Montaj Hali CAD Görünümü 2	70
Şekil A.13 : Omuz Bölgesi CAD Görünümü.....	70
Şekil A.14 : Kol Bölgesi CAD Görünümü.....	71



KOL DIŞ İSKELET TASARIMINDA BİYOMİMETİK DÖKÜM TEKNOLOJİLERİ VE SERVO MOTOR DESTEKLİ İTERATİF ÖĞRENME KONTROLÜ UYGULAMASI

ÖZET

Bu tez kapsamında, üst ekstremite rehabilitasyonuna yönelik olarak biyomimetik ilkelere dayalı, hafif yapılı ve tekrarlamalı öğrenme kontrolü (Iterative Learning Control, ILC) ile desteklenmiş bir dış iskelet sistemi geliştirilmiştir. Sistem tasarımında doğadan ilham alınarak bal peteği geometrisi tercih edilmiş ve bu sayede hem mekanik dayanıklılık artırılmış hem de cihazın toplam kütlesi optimize edilmiştir. Geliştirilen sistemin ağırlığı yalnızca 750 gram olup, taşınabilirlik ve kullanıcı konforu açısından avantaj sunmaktadır. Kontrol altyapısında, özellikle tekrarlayan hareketlerin öğrenilerek hatanın zamanla azaltılmasını sağlayan ILC algoritması kullanılmıştır. Bu bağlamda, biyomekanik açıdan insan dirseği hareketine uygun şekilde tasarlanmış ve 0–100 saniyelik sürede dört periyot içeren, 150° tepe ve 45° dip değerlerine sahip sinüzoidal bir referans sinyali oluşturulmuş ve bu sinyal üzerinden sistemin kontrol performansı değerlendirilmiştir. Deneysel bulgular, servo motorun ilk 10 saniyelik süreçte referans sinyale kıyasla düşük tepki verdiğini, özellikle 0–3 saniye aralığında belirgin bir gecikme ve bozulma yaşandığını ortaya koymuştur. Bu durum, sistemin öğrenme sürecinin başlangıcında olduğunu ve ILC algoritmasının hatayı minimize etme sürecine yeni adapte olmaya başladığına göstermektedir. Ancak 10. saniyeden itibaren gerçek sinyalin referans sinyale başarılı şekilde yakınsadığı, genlik ve zamanlama doğruluğunun her döngüde iyileştiği ve sistemin adaptif bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Elde edilen hata sinyali, başlangıçta $\pm 10^\circ$ lik bir sapma gösterirken, zamanla bu değerin $\pm 5^\circ$ altına düşerek kararlı bir düzeye ulaştığını göstermiştir. Kuvvet sensör verileri de hata büyüklüğü ile orantılı olarak azalan tepkiler üretmiş ve zamanla destekleyici kuvvetlerin azalmasıyla birlikte daha doğal bir hareket paternine geçiş sağlanmıştır. Bu durum, hastanın motor becerilerini aktif şekilde kullanabilmesi açısından rehabilitasyon hedefleriyle uyumludur. Sonuç olarak, elde edilen tüm veriler, servo motor destekli ILC algoritmasının tekrarlayıcı referans sinyalini başarıyla öğrenerek kontrol doğruluğunu artırdığını, sistemin zamanla daha az kuvvetle daha hassas hareket gerçekleştirebildiğini ve bu özelliklerin biyomimetik rehabilitasyon uygulamaları açısından yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Geliştirilen platformun, özellikle felç sonrası motor geri kazanım süreçlerinde bireyselleştirilmiş terapi uygulamaları için ev ortamında kullanılabilir, ekonomik ve etkili bir rehabilitasyon çözümü sunduğu değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Üst ekstremite, Tekrarlamalı öğrenme kontrolü, Biyomimetik tasarım, Dış iskelet

APPLICATION OF BIOMIMETIC CASTING TECHNOLOGIES AND SERVO MOTOR-ASSISTED ITERATIVE LEARNING CONTROL IN ARM EXOSKELETON DESIGN

ABSTRACT

In this thesis, a lightweight, wearable exoskeleton system was developed for upper limb rehabilitation, inspired by biomimetic principles and enhanced through Iterative Learning Control (ILC). The mechanical structure was designed using a honeycomb geometry to optimize both structural integrity and weight, resulting in a compact system weighing only 750 grams—providing clear advantages in terms of portability and user comfort. The control framework employed an ILC algorithm, which facilitates error reduction over repetitive motion cycles by learning from previous iterations. A sinusoidal reference trajectory was generated to simulate the biomechanical motion of the human elbow, spanning 100 seconds and comprising four periods with peak and trough values of 150° and 45° , respectively. Experimental evaluations demonstrated that during the initial 0–3 seconds, the system exhibited a delayed and unstable response, reflecting the early adaptation phase of the control algorithm. However, from the 10th second onward, the actual trajectory closely converged with the reference signal, with notable improvements in amplitude accuracy and temporal alignment. The error signal, which initially fluctuated around $\pm 10^\circ$, progressively attenuated to within $\pm 5^\circ$, indicating enhanced stability and control precision through the learning process. Additionally, the force sensor data revealed that assistive torque was proportionally reduced as trajectory error decreased, enabling a more natural movement pattern. This gradual reduction in external assistance aligns with rehabilitation goals by promoting the patient's active motor engagement. In summary, the developed ILC-based exoskeleton system successfully learns and tracks repetitive motion patterns with increasing precision and decreasing effort. Its structural design and adaptive control strategy offer significant potential for use in personalized, cost-effective, and home-based rehabilitation, particularly in the recovery of motor function following neurological impairments such as stroke.

Keywords: Upper extremity, Iterative learning control, Biomimetic design, Exoskeleton

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Nörolojik hasarlar sonucu ortaya çıkan üst ekstremité fonksiyon kayıpları, bireylerin günlük yaşam aktivitelerine katılımını sınırlamakta ve yaşam kalitesini ciddi biçimde etkilemektedir. Bu tür motor bozuklukların tedavisinde etkili rehabilitasyon stratejilerine duyulan ihtiyaç her geçen gün artarken, robotik teknolojiler bu ihtiyaca yanıt verebilecek önemli araçlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle kol dış iskeletleri, kullanıcıya destek sağlayarak motor becerilerin yeniden kazanılmasını mümkün kılmakta ve tedavi süreçlerine yapılandırılmış bir çerçeve sunmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, bu sistemlerin yalnızca fiziksel destek sağlamakla kalmayıp aynı zamanda kullanıcı katılımını artıran, nörofizyolojik geri bildirimleri dikkate alan ve biyomimetik ilkelerle geliştirilen yenilikçi çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, kol dış iskeletlerinin tasarımı, kontrol mekanizmaları ve terapötik etkinlikleri üzerine yapılan kapsamlı araştırmalar, alandaki mevcut eğilimleri ve gelişim potansiyelini anlamak açısından büyük önem taşımaktadır.

Robotik rehabilitasyon sistemleri, terapistlerin aynı anda birden fazla hastayla ilgilenebilmesini mümkün kılarak sağlık hizmetlerinin verimliliğini artırmakta ve bireysel tedavi maliyetlerini azaltmaktadır. Bunun yanı sıra, bu sistemler hastanın performansına ilişkin verileri anlık olarak kaydetme, analiz etme ve tedavi sürecine entegre etme gibi işlevler sunmakta; böylece hasta takibini kolaylaştırmakta ve özellikle yoğun hasta yüküne sahip kliniklerde önemli bir destek sunmaktadır. Gelişmiş sensör sistemleri ve kontrol yazılımları aracılığıyla toplanan bu veriler, aynı zamanda hastaların ev ortamında bireysel rehabilitasyon programlarını sürdürebilmelerine de olanak tanımaktadır. Ancak mevcut rehabilitasyon robotları genellikle yüksek maliyetli, sınırlı taşınabilirliğe sahip ve kompleks kurulum gereksinimleri nedeniyle kullanıcı dostu olmaktan uzaktır. Bu durum, robotik sistemlerin yaygın klinik veya ev içi kullanımını sınırlamakta ve özellikle özelleştirilmiş rehabilitasyon ihtiyaçlarına cevap vermede yetersizlik yaratmaktadır. Bu bağlamda, dış iskelet sistemlerinin anatomik yapıya

uyumlu, hafif, taşınabilir ve kullanıcı tarafından kolayca takılıp çıkarılabilir şekilde tasarlanması büyük önem taşımaktadır.

Son dönemde, eklemeli imalat ve biyomimetik döküm teknolojileri gibi yeni üretim yöntemleri, insan anatomisine yüksek düzeyde uyum sağlayan dış iskelet yapılarının daha düşük maliyetle ve daha kısa sürede üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu teknolojiler, özellikle üst ekstremiteye yönelik dış iskelet sistemlerinde, doğal eklem hareketlerini taklit eden ve konforu artıran ergonomik tasarımların geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu tasarım yaklaşımı, hem tedavi sürecinin etkinliğini artırmakta hem de kullanıcı kabulünü yükseltmektedir. Bununla birlikte, dış iskelet sistemlerinde kullanılan geleneksel kontrol mekanizmaları çoğunlukla sabit ve tepkisiz yapılar üzerine kuruludur. Oysa rehabilitasyonun kişiselleştirilmiş ve dinamik yapısı, kullanıcının hareket kalıplarına gerçek zamanlı uyum sağlayabilen öğrenen kontrol sistemlerini gerekli kılmaktadır. Bu tez kapsamında hem tasarımı gerçekleştirilen hem de prototipi geliştirilen servo motor destekli dış iskelet sistemi, iteratif öğrenme tabanlı kontrol algoritması ile entegre edilerek, kullanıcının tekrarlayan hareketlerinden öğrenmekte ve zamanla daha uyumlu, etkili bir destek sağlamayı hedeflemektedir.

1.1. Literatür Araştırması

Son yıllarda kol rehabilitasyonuna yönelik geliştirilen dış iskelet sistemleri, felç ve omurilik yaralanmalarından etkilenen bireylerin motor fonksiyonlarını yeniden kazanmalarına yardımcı olmak amacıyla önemli ilerlemeler göstermiştir. Bu cihazlar, sadece hareketi desteklemekle kalmayıp aynı zamanda yapılandırılmış bir egzersiz ortamı sunarak terapi sürecini kolaylaştırmakta ve rehabilitasyon süresini azaltmaktadır (Molteni ve diğerleri, 2018). Görev odaklı aktivitelerin robotik sistemlerle entegrasyonu, tedavi etkinliğini artırmakta ve hastaların gerçek yaşam senaryolarına benzer ortamlarda çalışmasına olanak tanımaktadır. Molteni ve arkadaşlarının vurguladığı üzere, yalnızca tekrar sayısına değil, egzersizlerin içeriğine de odaklanmak terapötik kazanımları artırmaktadır (Molteni ve diğerleri, 2018). Bu yaklaşım, günlük yaşam becerilerinin geri kazanımı açısından büyük önem taşımaktadır. Nes ve arkadaşları dış iskeletlerin kronik omurilik yaralanmalı hastalarda yaşam kalitesini artırabileceğini göstermiştir. Yapılandırılmış, iki aylık bir eğitim süreci sonrası katılımcıların hem fiziksel hem de psikososyal açıdan iyileşme gösterdiği rapor edilmiştir (Nes ve diğerleri, 2022). Bu

bulgular, uzun dönemli kullanımın bireylerin genel refahı üzerinde çok boyutlu etkiler yaratabileceğini göstermektedir.

Tasarım ve kontrol stratejileri açısından, doğal hareketin taklit edilmesi hedeflenmiştir. Arm Light isimli bir dış iskeletin kullanıldığı çalışmada, minimal insan-makine etkileşimi sayesinde daha doğal hareket dinamikleri elde edilebildiği bulunmuştur (Pirondini ve diğerleri, 2016). Benzer şekilde, eklem hareket açıklığı (ROM) sinyallerine dayalı istemli kontrol kullanan sistemlerin hasta katılımını ve tedavi başarısını artırdığı gösterilmiştir (Alshahrani ve diğerleri, 2021). Kullanıcı deneyimi odaklı araştırmalar, cihazlara yönelik algıların rehabilitasyon sürecindeki rolünü ortaya koymaktadır. İnme geçiren bireyler ve fizyoterapistlerle yapılan görüşmeler, ilk baştaki tedirginliklerin cihazla etkileşim sonrasında yerini olumlu deneyimlere bıraktığını göstermiştir (Vaughan-Graham ve diğerleri, 2020). Bu sonuç, kullanıcı eğitimi ve destek süreçlerinin önemini vurgulamaktadır. Pnömatik sistemlerin entegrasyonu gibi yenilikçi çözümler, dış iskeletlerin tepki hızını artırmakta ve kullanıcıya daha sezgisel bir deneyim sunmaktadır. Özellikle rehabilitasyon sırasında artan hasta katılımı, motor iyileşme ve fonksiyonel bağımsızlık açısından katkı sağlamaktadır (Chen ve diğerleri, 2020). Bununla birlikte, yüzey elektromiyografi (sEMG) teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde, hastaların kas aktivite örüntülerine göre cihazlar gerçek zamanlı olarak uyarlanabilmektedir (Liu ve diğerleri, 2021). Nörofizyolojik değerlendirmeler, dış iskelet destekli rehabilitasyonun motor işlevler üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Bu tür sistemlerin, beyin-bilgisayar arayüzü (BCI) teknolojileriyle entegrasyonu, hem işlevsel hem de bilişsel iyileşme yollarını destekleyebilir (Duan ve diğerleri, 2022). Bununla birlikte, bu teknolojilere erişim hakkındaki eşitsizlikler de literatürde vurgulanmaktadır. Özellikle sosyoekonomik olarak dezavantajlı bireylerin gelişmiş tedavilere erişiminde ciddi kısıtlamalar olduğu belirtilmiştir (Rupal ve diğerleri, 2017). Bu nedenle, teknolojik ilerlemelerin kamu sağlığına yaygın ve eşit katkı sağlaması hedeflenmelidir.

Dış iskeletlerin kol tasarımlarında, insan anatomisine yakınlık büyük önem taşımaktadır. mExoArm gibi yedi serbestlik derecesine (7DOF) sahip sistemler, bilek hareketleri gibi karmaşık eylemleri daha etkili şekilde desteklemektedir (Gupta ve O'Malley, 2004). Bununla birlikte, bu tasarımlarda doğal eklem hareketlerinin taklit edilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Rahman ve diğerleri, 2010). EMG temelli kontrol sistemleri, koordineli ve eş zamanlı hareketleri yönetmek açısından dikkat çekmektedir. IntelliArm örneğinde olduğu gibi, omuz, dirsek ve bilek boyunca kullanıcıya uyum sağlayan sistemler, fiziksel

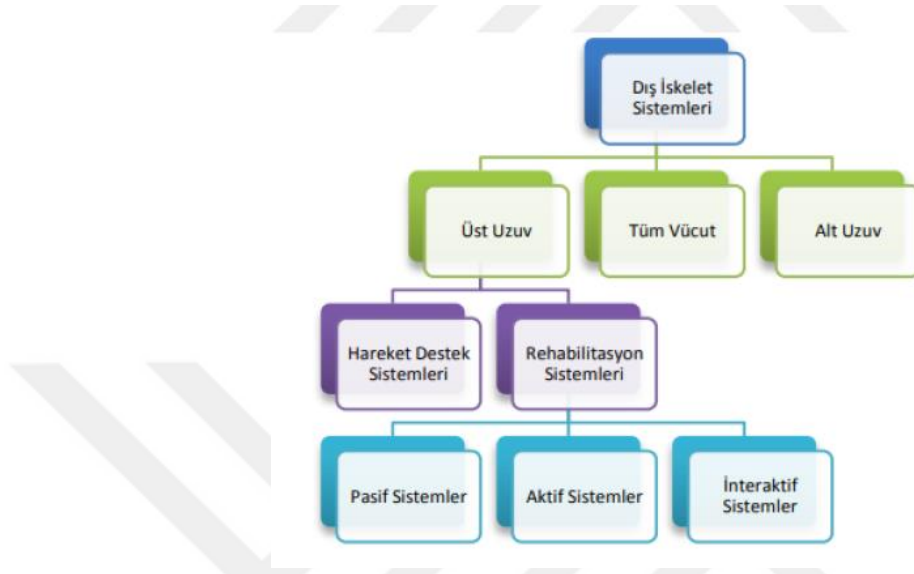
sinyallere gerçek zamanlı yanıt vererek terapi etkinliğini artırmaktadır (Liu ve diğerleri, 2017). Bulanık mantık ve makine öğrenmesi gibi yapay zekâ temelli kontrol stratejilerinin, cihaz tepkiselliğini artırarak bireyselleştirilmiş tedavi sunabileceği gösterilmiştir (Ersin ve Yaz, 2024). Bu tür algoritmalar, kullanıcı ihtiyaçlarına dinamik olarak uyum sağlayan sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Aktüasyon teknolojilerinde pnömatik kas kullanımı gibi çözümler, daha hafif ve uyarlanabilir sistemlerin geliştirilmesine imkân sağlamaktadır (Chen ve diğerleri, 2020). Ayrıca, yerçekimi telafisi sağlayan sistemler sayesinde kullanıcı yorgunluğu azaltılarak egzersiz verimliliği artırılmaktadır (Wu ve diğerleri, 2016). Üç serbestlik derecesine sahip sistemlerde yapılan kinematik analizler, cihazın çalışma alanının optimize edilmesinde kritik rol oynamaktadır (Shao ve diğerleri, 2014). Ayrıca, çift kollu sistemlerin çoklu eklem hareket kabiliyeti, eş zamanlı terapi uygulamalarında daha bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır (Ren ve diğerleri, 2013).

Biyomimetik tasarımlar ise dış iskelet sistemlerinin konfor, fonksiyon ve kullanıcı kabulünü artırmak amacıyla ön plana çıkmaktadır. Miyoelektrik kontrollü, yumuşak yapıları el dış iskeletleri gibi çözümler, doğal kavrama hareketlerini taklit ederek konforu ve kinematik uyumu artırmaktadır (Silva ve diğerleri, 2023). Ek olarak, BONES dış iskeletiyle yürütülen çalışmalar, çok eklemli ve tek eklemli egzersizlerin bir arada yapılabileceğini göstermiştir (Milot ve diğerleri, 2013). Bu yapıların kontrol sistemleri, bireyin doğal hareket aralığına uyum sağlayacak şekilde tasarlanmıştır (Rico ve diğerleri, 2016). Hayvan hareketlerinden esinlenerek geliştirilen tasarım yaklaşımları da literatürde yer bulmaktadır. Bu yaklaşımlar, doğal biyomekaniği taklit ederek daha sezgisel cihazların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Bonnechère, 2024). Biyomimetik kontrol sistemleriyle geliştirilen cihazlar, hareketlerin doğal adaptasyonunu sağlayarak kullanıcıyla etkileşimi daha uyumlu hale getirmektedir (Yadav, 2024). Bu sistemlerin tasarımında yörünge planlaması için kinematik modellemeler kullanılmıştır (Xie ve diğerleri, 2021). Alt ekstremiteye yönelik biyomimetik sistemler de, kullanıcı konforunu artıran yenilikçi tasarımlar içermektedir (Zhu ve diğerleri, 2013). Omuz eklemi mekanizmalarının daha doğru modellenmesi için hareket yakalama verilerinin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur (Piña-Martínez ve diğerleri, 2018). Ayrıca, empedans ve kabul temelli hibrit kontrol stratejilerinin, bireysel kullanıcı koşullarına dinamik uyum sağladığı belirtilmiştir (Silva ve diğerleri, 2020). Yumuşak robotik teknolojilerin biyomimetik tasarımlarla birleştirilmesi, dış iskelet sistemlerinin sadece

işlevsel değil, aynı zamanda kullanıcı konforunu önceleyen yapılar haline gelmesine olanak sağlamaktadır (Pacifico ve diğerleri, 2020).

Dış iskelet sistemleri, işlevsel ve yapısal özelliklerine göre çeşitli kategorilere ayrılmakta olup, bu sınıflandırma Şekil 1.1’de ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.



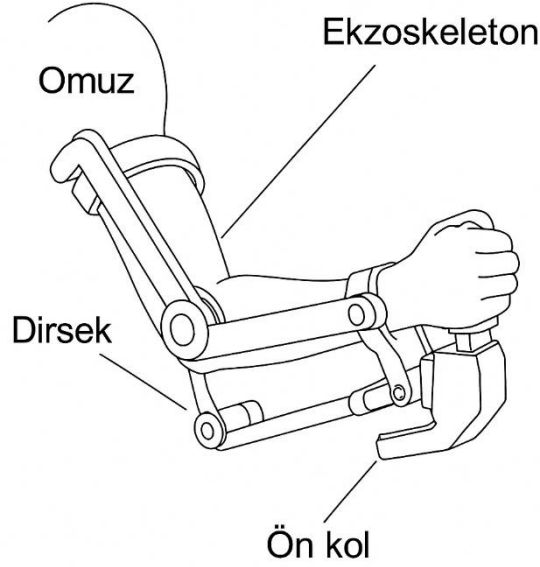
Şekil 1.1 : Dış İskelet Sınıflandırılması (Kocaoğlu ve Akdoğan, 2016)

1.1.1. Üst ekstremite rehabilitasyonunda robotik sistemlerin kullanımı

Üst ekstremite rehabilitasyonu, inme, travmatik beyin hasarı, omurilik yaralanması veya nöromusküler bozukluklar sonucu hareket kabiliyeti azalan bireylerin fonksiyonel bağımsızlığını yeniden kazanmasına yönelik kritik bir terapi sürecidir. Bu süreçte robot destekli rehabilitasyon sistemleri, geleneksel terapilere tamamlayıcı ya da alternatif olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle kol dış iskeletleri, kullanıcının omuz, dirsek ve bilek hareketlerini desteklemek amacıyla geliştirilen, insan anatomisine uyumlu mekanik yapılar olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, üst ekstremite dış iskeletlerinin yalnızca hareketi desteklemekle kalmayıp aynı zamanda tekrarlı, hedefe yönelik ve bireye özel egzersiz programları sunarak nöroplastisiteyi teşvik ettiğini göstermektedir (Molteni ve diğerleri, 2018; Liu ve diğerleri, 2021). Bu cihazlar, pasif hareket aralığı egzersizlerinden aktif-asiste hareketlere kadar geniş bir yelpazede terapi olanağı sunmakta ve sensör geri bildirimini sayesinde hasta performansını objektif olarak ölçebilmektedir.

Şekil 1.2 üst ekstremiteye yönelik dış iskelet sistemlerinin yapısal tasarımını, eklem hizalamalarını ve kullanıcıyla olan fiziksel etkileşim noktalarını göstermektedir. Tez

kapsamında, insan kol anatomisine uygun olarak geliştirilen çok serbestlik dereceli bir kol dış iskeletinin çizimi yer almakta olup; omuz, dirsek ve bilek bölgelerindeki eklem bağlantı noktaları detaylandırılmıştır.



Şekil 1.2 : Çok serbestlik dereceli bir kol dış iskelet

Üst ekstremitte rehabilitasyonunda robotik sistemlerin kullanımı, felç ve diğer nörolojik bozukluklardan etkilenen bireylerde fonksiyonel iyileşmeyi artırmak adına umut verici bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Literatürde, bu sistemlerin terapötik etkinliğini, mekanizmalarını ve kullanıcı deneyimlerini değerlendiren çok sayıda çalışma mevcuttur. Söz konusu çalışmalar, robotik sistemlerin tasarımı, uygulama alanları ve klinik faydaları hakkında önemli içgörüler sunmaktadır.

Lee ve arkadaşları tarafından yürütülen randomize kontrollü bir çalışmada, robot destekli terapilerin hemiplejik bireylerde üst ekstremitte fonksiyonlarını ve günlük yaşam aktivitelerini iyileştirmede etkili olduğu gösterilmiştir (Lee ve diğerleri, 2018). Araştırma sonuçları, robot destekli müdahalelerin kas gücünü ve motor işlevi artırabildiğini, aynı zamanda spastisiteyi azaltarak tekrarlı ve yoğun terapi yoluyla motor iyileşmeyi desteklediğini ortaya koymaktadır. Robotik terapilerde terapistin aktif rolüne vurgu yapan Kim ve arkadaşları, robot destekli egzersizlerin etkisinin, terapistin doğrudan katılımıyla anlamlı biçimde arttığını belirtmiştir (Kim ve diğerleri, 2023). Bu bulgular, insan rehberliğinin robotik yardımı tamamlayıcı bir rol üstlendiğini ve terapötik süreçte katılım ile motivasyonu artırarak sinerjik bir etki sağladığını ortaya koymaktadır. Ranzani ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, nörobilişsel rehabilitasyon

tekniklerinin robotik sistemlerle entegrasyonu incelenmiş ve bu tür hibrit müdahalelerin subakut felçli bireylerde motor iyileşmeyi daha ileri düzeyde desteklediği ortaya konmuştur (Ranzani ve diğerleri, 2020). Bu durum, robotik sistemlerin yalnızca fiziksel rehabilitasyon değil, bilişsel iyileşme süreçlerinde de etkin rol oynayabileceğini göstermektedir. Robotik sistemlerin kişiselleştirilmiş terapi sunma potansiyeline odaklanan Liu ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri ağ meta-analizinde, robot destekli terapilerin geleneksel yöntemlerle benzer düzeyde etkinlik gösterdiğini ortaya koymuşlardır (Liu ve diğerleri, 2025). Bu bulgular, robotik sistemlerin terapötik parametrelerini hastanın bireysel yeteneklerine ve ilerleyişine göre dinamik olarak uyarlayabilme kapasitesini vurgulamaktadır. Robot destekli rehabilitasyonun spastisite üzerindeki etkilerini değerlendiren Lee ve arkadaşları, motor becerilerdeki kazanımların günlük yaşam aktivitelerine otomatik olarak yansımayaabileceğini belirtmiş ve bu nedenle fonksiyonel eğitimin terapi programlarına entegre edilmesinin önemini vurgulamıştır (Lee ve diğerleri, 2016). Aktif katılımın önemi, Prange ve arkadaşlarının sistematik derlemesinde de vurgulanmıştır. Araştırma, robot destekli terapilerde aktif dirençli hareketlerin iyileşme üzerinde kritik rol oynadığını ve pasif müdahalelere kıyasla daha etkili sonuçlar sağladığını göstermektedir (Prange ve diğerleri, 2006). Bu bağlamda, hasta etkileşimini teşvik eden tasarımlar, rehabilitasyonun etkinliğini artırmaktadır. Duret ve arkadaşları ise, özellikle ağır üst ekstremitte felci geçirmiş bireylerde hasta-robot etkileşiminin iyileşme sonuçları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma, kullanıcının aktif katılımının nöromotor iyileşme sürecini olumlu yönde etkilediğini ve terapötik sonuçlara doğrudan katkı sağladığını ortaya koymuştur (Duret ve diğerleri, 2015). Lülldorff ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen karşılaştırmalı bir çalışmada, robotik eğitim ile sanal gerçeklik temelli müdahaleler analiz edilmiş ve robotik yardımcı rehabilitasyonun üst ekstremitte disfonksiyonlarının yönetiminde güvenilir ve etkili bir seçenek olmaya devam ettiği ifade edilmiştir (Lülldorff ve diğerleri, 2023). Bu karşılaştırma, robotik sistemlerin farklı kullanıcı gruplarında nasıl etki gösterdiğine dair çok yönlü bir bakış açısı sunmaktadır. Reis ve arkadaşlarının yürüttüğü bir meta-analiz, robotik terapi ile invaziv olmayan beyin stimülasyonu protokollerinin kombinasyonunu incelemiş ve sonuç ölçütlerinde standardizasyon eksikliğinin, bu tür protokollerin etkililiğine dair çıkarımların sınırlı kalmasına neden olduğunu belirtmiştir (Reis ve diğerleri, 2021).

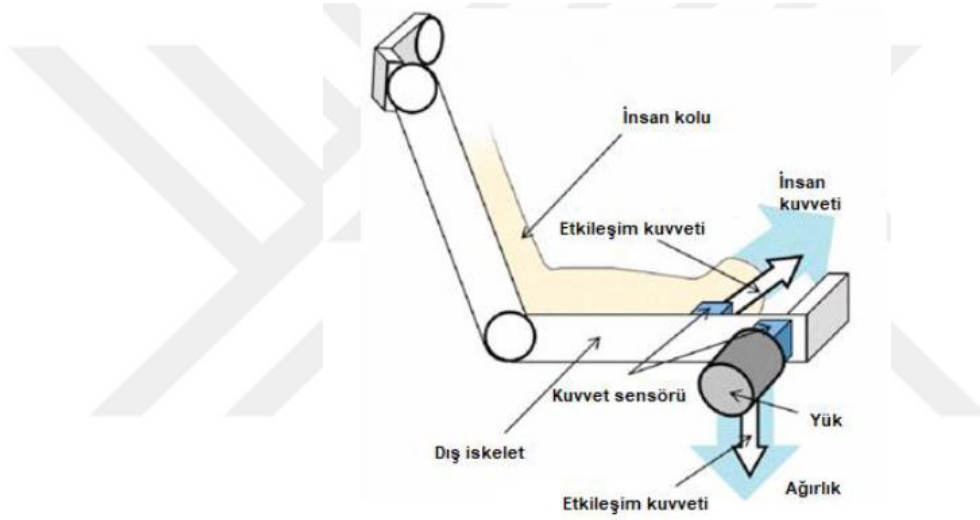
Robotik sistemlerin pediatrik popülasyona uygulanabilirliği, Fahr ve arkadaşlarının spastik serebral palsili çocuklara yönelik sistematik incelemesiyle desteklenmiştir. Bu çalışma, robotik rehabilitasyonun yalnızca yetişkin felç hastalarına değil, aynı zamanda çocuklarda seçici gönüllü motor kontrolünü geliştirmeye de katkı sunduğunu göstermektedir (Fahr ve diğerleri, 2020). Son olarak, Hyakutake ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, kronik felçli bireylerde ev tabanlı robotik terapi uygulamalarının, rehabilitasyon sürecini desteklemede etkili olduğu ve sağlık sistemi üzerindeki yükü azalttığı rapor edilmiştir (Hyakutake ve diğerleri, 2019). Bu bulgu, robotik sistemlerin yalnızca klinik ortamlarda değil, ev içi kullanıma uygun yapılarla da önemli faydalar sağlayabileceğini göstermektedir.

Üst ekstremitte rehabilitasyonunda robotik sistemlerin kullanımına ilişkin artan bilimsel kanıtlar, bu teknolojilerin motor ve bilişsel iyileşmeyi desteklemedeki potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Robotik teknolojilerin gelişmiş sensörler ve adaptif kontrol sistemleriyle donatılması, etkili terapist katılımı ve hasta merkezli tasarım ilkeleriyle bir araya geldiğinde, geleceğin kişiselleştirilmiş ve verimli rehabilitasyon protokolleri için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

1.1.2. Üst ekstremitte dış iskelet kontrol yöntemlerinin gelişimi

Üst ekstremitteye yönelik geliştirilen dış iskeletlerde kontrol yöntemlerinin uygulanması, özellikle nöromüsküler bozukluklara sahip bireylerin motor fonksiyonlarını iyileştirmeye yönelik rehabilitasyon robotik alanında kayda değer ilerlemelere yol açmıştır. Günümüzde birçok çalışma, kullanıcıların robotik cihazlarla etkili biçimde etkileşime geçebilmesini sağlayan yenilikçi kontrol stratejilerini araştırmakta ve bu sayede rehabilitasyon çıktılarını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, üst ekstremitte dış iskeletleri için geliştirilen kontrol metodolojilerinin önemli bir bölümü, kas kasılmalarıyla ortaya çıkan elektriksel aktivite olan miyoelektrik sinyallerin kullanımına dayanmaktadır. Örneğin, Yurkewich ve arkadaşları, felç sonrası günlük yaşam aktivitelerinde el fonksiyonunu desteklemek amacıyla geliştirilen, miyoelektrik tabanlı olmayan bir robotik eldiven sistemini tanıtmıştır. Bu sistem, kullanıcı niyetini yorumlamak ve robotik yapıları kontrol etmek amacıyla yüzey elektromiyografi (sEMG) sinyallerini kullanmakta, böylece hedef odaklı yardım sağlamaktadır. sEMG tabanlı kontrolün entegrasyonu, cihazın tepki süresini ve hassasiyetini artırmakta; insan-makine etkileşimini daha doğal ve sezgisel hale getirmektedir (Yurkewich ve diğerleri, 2020).

Üst ekstremite dış iskelet robotunun hareketi için dinamik model tabanlı bir kuvvet kontrolörü önerilmiş ve bu sistem deneysel olarak test edilmiştir. Önerilen kontrolör, kullanıcının uyguladığı hareketi referans olarak robot sistemine giriş sağlamak ve böylece kullanıcının kas gücünü nominal seviyeye tamamlamakta veya desteklemektedir. Dış iskelet sistemleri, günümüzde endüstriyel, askeri, medikal ve rehabilitasyon gibi farklı alanlarda küresel düzeyde yoğun olarak araştırılmaktadır. Lee ve arkadaşları tarafından geliştirilen bu sistem, insan-robot etkileşiminde ortaya çıkan kuvveti ölçebilmekte ve bu kuvveti robot kontrol girdisi olarak kullanma imkânı sunmaktadır (Lee ve diğerleri, 2012). Söz konusu dış iskeletin yapısal ve işlevsel detayları Şekil 1.3'te sunulmaktadır.



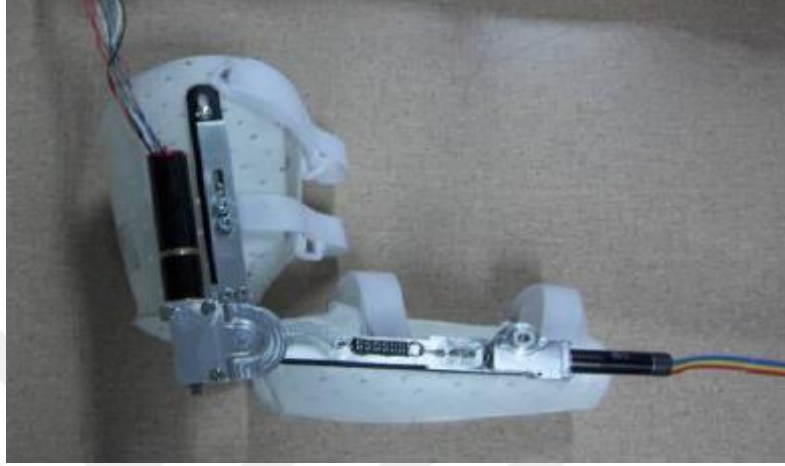
Şekil 1.3 : Üst Ekstremitte Dış İskelet Sistemi (Lee ve diğerleri, 2012)

Lee ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, üst ekstremite dış iskeleti için geliştirilen robotik sistemin tekil nokta etrafındaki kararlılığı, İstenilen Duyum Seviyesi (Desired Sensation Level – DSL) yöntemi ve uygulanan kontrolör aracılığıyla değerlendirilmiştir. Araştırmada, tekil noktada sözde ters matris (pseudo-inverse) yöntemine dayanan denetleyici ile DSL tabanlı kontrolör karşılaştırılmış ve DSL yönteminin kararlılık açısından daha başarılı sonuçlar verdiği doğrulanmıştır. Bu doğrulama, her iki kontrol stratejisinde aynı giriş sinyalinin uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, farklı nesne yükleri kullanılarak sistemin tepkisi analiz edilmiş ve robotun bu farklı yükler karşısında benzer davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, robot sisteminin yük değişimlerinden bağımsız kararlı bir performans sunduğunu ve operatörün kas gücünden daha yüksek düzeyde bir destek sağladığını göstermektedir (Lee ve diğerleri, 2012).

Randazzo ve arkadaşları ise elektroensefalografi (EEG) sinyallerine dayalı sürekli kontrol sağlayan giyilebilir bir el dış iskeleti geliştirmiştir. Bu sistem, beyin aktivitesini doğrudan robotik yardıma dönüştürme girişimiyle, beyin-makine arayüzleri (BMI) alanında önemli bir yeniliği temsil etmektedir. Çalışma, pasif hareketler ile dış iskelet destekli hareketler arasında kişiselleştirilmiş sınıflandırıcılar kullanılarak başarılı şekilde ayırım yapılabildiğini göstermiştir. Bu gelişme, bilişsel yükü azaltarak kullanıcı dostu, sezgisel robotik sistemlerin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır (Randazzo ve diğerleri, 2018). Mita ve arkadaşları tarafından geliştirilen, pnömatik yapay kaslarla çalışan ve özellikle felç sonrası spastisite yaşayan hastalar için tasarlanan giyilebilir bir robotik sistemde ise duyuşsal geri bildirim ve kullanıcı niyetine dayalı komutlar birleştirilmiştir. Bu hibrit kontrol yaklaşımı, kas tonusundaki değişimlere göre gerçek zamanlı adaptasyon sağlayarak, bireyselleştirilmiş terapi sunulmasına imkân tanımaktadır (Mita ve diğerleri 2022). Koginov ve arkadaşları, duruş tahmini üzerinden robot desteğinin kullanıcı hareketleriyle hassas şekilde senkronize edilmesini sağlamak amacıyla insan-robot arayüzündeki uyum hatalarını azaltan bir metodoloji önermiştir. Koordineli hareketler gerektiren rehabilitasyon uygulamalarında, küçük zamanlama hatalarının dahi etkinliği olumsuz etkileyebileceği göz önünde bulundurulduğunda, bu düzeydeki kontrol hassasiyetinin önemi büyüktür (Koginov ve diğerleri, 2022). Durandau ve arkadaşları ise çift taraflı dış iskeletler için adaptif kontrol stratejilerini yönlendirmek amacıyla nöromekanik modellerden faydalanmıştır. Bu modeller, farklı yürüme koşullarında biyolojik eklem torku ve EMG sinyallerinin değişimlerini temel alarak sistemin, kullanıcının geri bildirimini doğrultusunda destek seviyesini dinamik biçimde ayarlamasına olanak sağlamaktadır. Bu yaklaşım, kullanıcıya özgü değişkenliği tanıyabilen ve bu değişikliklere uyum sağlayabilen öğrenen sistemlerin geliştirilmesine katkı sunmaktadır (Durandau ve diğerleri 2022). Bilişsel ve performans temelli kontrol stratejilerinde ise makine öğrenmesi tekniklerinin entegrasyonu dikkat çekmektedir. Uğurlu ve arkadaşları, omuz eklemlerinde aşırı yüklenmeyi azaltmak amacıyla üst vücut eforunu minimize eden aktif uyum kontrol yöntemleri geliştirmiştir. Bu yöntemler, dış iskelet destekli yürüme sırasında kullanıcı konforunu artırmakta ve yorgunluğu azaltarak kullanıcı dostu sistemlerin geliştirilmesini teşvik etmektedir (Uğurlu ve diğerleri, 2020).

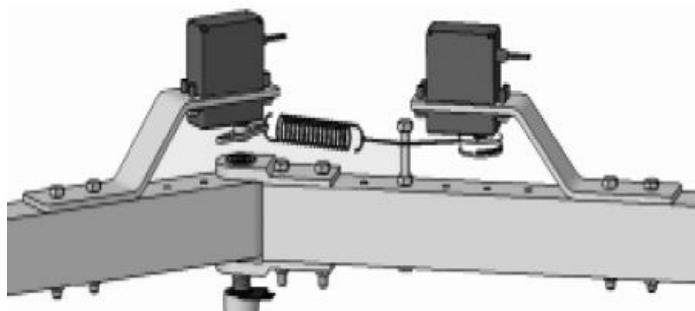
Vanderniepen tarafından geliştirilen elektrik tahrikli dirsek rehabilitasyon robotu, ortopedik rehabilitasyon projeleri kapsamında incelenmeye değer önemli bir sistemdir. Bu cihaz, dirsek eklemine yalnızca belirli açılar arasında güvenli şekilde hareket

etmesini sağlamak ve aşırı kuvvet uygulamalarına karşı koruma sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Sistemin her bireye uygulanabilir olması için, kullanıcıların uzuv özelliklerine uyarlanmış kişisel korsetler ile birlikte kullanılması gerekmektedir (Vanderniepen ve diğerleri, 2009). Cihazın görünüşüne ilişkin görsel Şekil 1.4'te sunulmaktadır.



Şekil 1.4 : Elektrik Tahrikli Dirsek Rehabilitasyon Robotu (Vanderniepen ve diğerleri, 2009)

Vanderniepen ve arkadaşları tarafından geliştirilen dış iskelet robotu, benzer sistemlerle karşılaştırıldığında daha küçük boyutlu bir yay ile çalışan tahrik mekanizmasına sahiptir. Bu kompakt yapı, sistemi ön yüklemelere karşı daha uygun hale getirmekte ve mekanik güvenliği artırmaktadır. Ayrıca bu tahrik mekanizması, cihazın uç noktalara erişim hızını yükselterek sistemin genel tepkiselliğini iyileştirmektedir. Mekanizmanın bir diğer önemli özelliği ise ayarlanabilir yapıya sahip olmasıdır; bu yönüyle farklı kullanıcı ihtiyaçlarına ve klinik senaryolara kolayca uyarlanabilmektedir. Sistem bileşenlerinden biri olan yay ve aktüatör mekanizmasının toplam ağırlığı yaklaşık 150 gramdır (Vanderniepen ve diğerleri, 2009). İlgili sistem yapısı ve yerleşimi Şekil 1.5'te görsel olarak sunulmaktadır.



Şekil 1.5 : Aktüatör ve Ayarlanabilir Yay Mekanizması (Vanderniepen ve diğerleri, 2009)

Cihaz, hafif ve ince bir yapıda tasarlanarak kullanıcıların ev ortamında da rehabilitasyon eğitimine devam edebilmesine olanak tanıyacak şekilde geliştirilmiştir. Dış iskelet sisteminin toplam ağırlığı yaklaşık 1.2 kg olup, bu ağırlık üst ekstremitte boyunca homojen şekilde dağıtılarak hem konfor hem de denge sağlanmaktadır. Söz konusu düşük ağırlık, sistemin taşınabilirliğini artırmakta ve aynı zamanda rehabilitasyon sürecinde tedavi uygulanacak uzuv üzerindeki mekanik yükün azaltılması açısından da önemli avantajlar sunmaktadır (Vanderniepen ve diğerleri, 2009).

Hu ve arkadaşları ise akıllı insan-makine etkileşimini kolaylaştırmak amacıyla triboelektrik tabanlı dokunsal yama sistemleri önermiştir. Bu sistemler, kullanıcıdan alınan duyuşal geri bildirim robot kontrol mekanizmalarına entegre ederek daha sezgisel ve etkileşimli bir kullanım sunmaktadır. Bu durum, klasik hareket kontrolünün ötesine geçilerek, kullanıcının niyet ve geri bildirimini sistem performansına doğrudan yansıdığı bir kontrol paradigmasının temellerini oluşturmaktadır (Hu ve diğerleri, 2021). Daha genel bir çerçeveden bakıldığında, Rzyman ve arkadaşları, üst ekstremiteye yönelik biyotik ortezlerde kullanılan kontrol sistemlerine dair kapsamlı bir derleme sunmuş; aktüatör teknolojilerindeki gelişmeler ve adaptif kontrol eğilimlerini detaylandırmıştır. Bu çalışma, insan ve robotik sistemin uyumlu çalışmasını sağlayacak entegrasyon stratejilerine ilişkin sürekli evrilen çabaları gözler önüne sermektedir (Rzyman ve diğerleri, 2020).

Ripel ve çalışma arkadaşları, robotik dış iskelet prensiplerinden ilham alarak, elektriksel aktüatörle çalışan aktif bir dirsek ortezi tasarlamıştır. Geliştirilen cihaz yalnızca dirsek eklemi için tasarlanmış olsa da, modüler yapısı sayesinde diğer eklemlere kolaylıkla uyarlanabilecek esnekliğe sahiptir. Sistemde entegre olarak bulunan bir kuvvet sensörü, hastanın hareket aktivitesini ölçmekte ve bu veriyi cihazın aktüatörünü kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu geri bildirim temelli kontrol mekanizması sayesinde kullanıcıya ihtiyaç duyduğu düzeyde destek sağlanabilmektedir (Ripel ve diğerleri, 2014). Şekil 1.6'da cihazın kol üzerine giyilmiş hâli görsel olarak sunulmaktadır.



Şekil 1.6 : Dirsek Eklemleri Rehabilitasyon Ortezi (Ripel ve diğerleri, 2014)

Sonuç olarak, üst ekstremite dış iskeletlerinde kullanılan kontrol yöntemlerine ilişkin literatür, hızla gelişen ve çeşitlenen bir araştırma alanını temsil etmektedir. Miyoelektrik sinyallerin kullanımı, adaptif kontrol yaklaşımları, duyuşal geri bildirim sistemlerinin entegrasyonu ve yapay zekâ temelli algoritmaların kullanımı, robotik rehabilitasyonun kullanıcı merkezli, hassas ve esnek bir yapıya evrilmesini mümkün kılmaktadır. Bu gelişmeler, nöromüsküler bozukluğu olan bireylerin motor fonksiyonlarını artırmakla kalmayıp, fonksiyonel bağımsızlıklarını da yeniden kazanmalarına olanak tanıyacak yeni nesil rehabilitasyon teknolojilerinin önünü açmaktadır.

1.1.3. Ev tabanlı üst ekstremite dış iskelet kullanımı

Son yıllarda, evde kullanılabilir üst ekstremite dış iskeletlerine yönelik araştırmalar belirgin bir artış göstermiştir. Bu çalışmalar, felçli bireylerde motor iyileşmeyi desteklemek amacıyla geliştirilen rehabilitasyon teknolojilerinin, hasta merkezli bakım modelleriyle entegrasyonuna ve klinik dışında uygulanabilirliğine odaklanmaktadır. Araştırmaların bulguları, robotik ve giyilebilir cihazların ev ortamında etkin biçimde kullanılabilmesini ve bu sayede geleneksel rehabilitasyonun mekânsal ve zamansal kısıtlarını aşarak daha erişilebilir bir tedavi süreci sunulabileceğini göstermektedir.

Maceira-Elvira ve arkadaşları (2019) tarafından yürütülen çalışmada, giyilebilir teknolojilerin felç rehabilitasyonundaki rolü kapsamlı biçimde incelenmiş ve ev ortamında sürdürülen rehabilitasyon programlarının merkez temelli terapilere kıyasla daha etkili sonuçlar doğurabileceği ortaya konmuştur. Barthel İndeksi ile yapılan değerlendirmelerde, giyilebilir cihaz desteğiyle evde rehabilitasyon uygulayan bireylerin,

felç sonrası altı ay içerisinde daha iyi fonksiyonel kazanımlar elde ettiği saptanmıştır. Bu bulgu, bireylerin tanıdık ve konforlu bir ortamda rehabilitasyon sürecine daha aktif katılım göstermelerinin, iyileşme sürecini olumlu yönde etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Langerak ve arkadaşları (2023), giyilebilir hareket sensörleriyle desteklenen ev temelli rehabilitasyon süreçlerinde kullanıcı gereksinimlerini analiz etmiş ve kullanıcı odaklı tasarımın önemini vurgulamıştır. Çalışma, cihazların ayarlanabilir, konforlu ve kullanıcıyı sürece dahil eden geri bildirim mekanizmaları ile donatılmış olması gerektiğini belirtmiştir. Benzer şekilde, Wittmann ve arkadaşları (2016), sensör destekli sanal gerçeklik sistemleri aracılığıyla bireyin kendi kendine yönlendirebildiği kol terapileri üzerine odaklanmış ve bu tür sistemlerin, ilk kurulumdan sonra bireylerin bağımsız şekilde terapiye devam edebilmelerini sağladığını göstermiştir. Katılımcıların önerilen terapi dozlarına ulaşabildiği ve bu durumun iyileşmeyi desteklediği rapor edilmiştir. Bu bulgular, sanal gerçeklik teknolojilerinin evde uygulanabilirliği ve motivasyonu sürdürülebilirliği açısından değerini ortaya koymaktadır.

Song ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen sistematik derlemede, giyilebilir cihazlarla gerçekleştirilen rehabilitasyonun, felç sonrası üst ekstremit motor fonksiyonunu standart bakım uygulamalarına kıyasla anlamlı düzeyde iyileştirdiği saptanmıştır. Bu bulgu, teknoloji destekli yaklaşımların geleneksel yöntemlerle entegre edildiğinde, rehabilitasyon etkinliğini artırabileceğine dair güçlü bir kanıt sunmaktadır (Song ve diğerleri, 2024). Chae ve arkadaşları ise, kronik felçli bireylerde, makine öğrenmesi destekli web tabanlı bir rehabilitasyon sistemiyle entegre çalışan akıllı saat teknolojisinin kullanımını araştırmıştır. Bu sistem, bireylerin kendi rehabilitasyon süreçlerini yönetmelerini desteklemek amacıyla geliştirilmiş ve yapılan uygulamalarda motor fonksiyonlarda anlamlı iyileşmeler elde edilmiştir. Çalışma, bireylerin tedavi süreçlerine aktif katılım göstermelerini ve kendi gelişimlerini veri odaklı biçimde takip edebilmelerini mümkün kılan dijital çözümlerin önemini vurgulamaktadır (Chae ve diğerleri, 2020). Buna ek olarak, Toh ve arkadaşları, üst ekstremit telerehabilitasyonuna yönelik giyilebilir bir cihazın geliştirilmesini konu almış ve yapılan karma yöntemli çalışmada bu cihazın kullanıcılar tarafından uygulanabilir bulunduğu rapor edilmiştir. Çalışma, bireylerin bu cihazlarla bağımsız şekilde egzersizlerini sürdürebilmesinin, daha aktif katılım ve daha iyi motor kazanımlar ile ilişkili olduğunu göstermiştir (Toh ve diğerleri 2023). Poli ve arkadaşları tarafından ele alınan bir diğer çalışma ise, robotik teknolojilerin ev ortamındaki uygulamalarını ele almış ve bu sistemlerin göreve özgü,

yoğun ve tekrarlayan egzersizleri sağlamakta oldukça etkili olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, bu sistemlerin bireyselleştirilebilir özellikleri sayesinde, hastanın motivasyonunu artırma ve ilgisini sürdürme gibi psikososyal boyutlarda da olumlu katkılar sunduğu ifade edilmiştir (Poli ve diğerleri 2013).

Ev tabanlı üst ekstremitte dış iskelet sistemlerine yönelik literatür, teknoloji destekli rehabilitasyon yaklaşımlarına olan ilginin arttığını ve bu yaklaşımların motor kazanımlar, kullanıcı katılımı ve kendi kendine yönetim açısından önemli faydalar sağladığını göstermektedir. Giyilebilir cihazlar ve robotik sistemler; hasta motivasyonunu artırma, egzersizlere devamlılığı teşvik etme ve fonksiyonel bağımsızlığı destekleme açısından umut vadeden çözümler sunmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, bu sistemlerin daha erişilebilir, uygun maliyetli ve bireyselleştirilmiş formlarda yaygınlaştırılması, rehabilitasyon uygulamalarında dönüşüm yaratma potansiyeline sahiptir.

Literatürde üst ekstremitte dış iskeletlerinde kullanılan kontrol yöntemlerinin özeti Tablo 1.1’de gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Literatürde Üst Ekstremitte Dış İskeletlerinde Kullanılan Kontrol Yöntemleri

Yazarlar	Kontrol Yöntemi	Temel Katkı
Yurkewich et al. (2020)	sEMG tabanlı kontrol	sEMG ile hedefli yardım sağlayan eldiven sistemi
Randazzo et al. (2018)	EEG tabanlı beyin-makine arayüzü	EEG ile sezgisel kontrol ve sınıflayıcı geliştirme
Mita et al. (2022)	Pnömatik kaslarla hibrit kontrol	Kas durumu ve komutlar arasında adaptif geçiş
Koginov et al. (2022)	Postür tahminine dayalı kontrol	İnsan-robot senkronizasyonunda hata azaltma
Durandau et al. (2022)	Nöromekanik model temelli adaptif kontrol	Kullanıcı geri bildirimini ile adaptif tork ayarı
Uğurlu et al. (2020)	Makine öğrenmesi ile aktif uyum kontrolü	Üst vücut eforunu azaltan kontrol stratejisi
Hu et al. (2021)	Triboelektrik dokunsal geri bildirim	Dokunsal geri bildirim ile etkileşim artırımı
Rzyman et al. (2020)	Genel kontrol sistemleri derlemesi	Kontrol sistemleri ve aktüatör gelişmeleri

Ev ortamında üst ekstremitte rehabilitasyonuna yönelik literatür çalışmalarının özeti Tablo 1.2’de gösterilmektedir.

Tablo 1.2 Ev Ortamında Üst Ekstremitte Rehabilitasyonuna Yönelik Literatür Çalışmaları

Yazarlar	Yöntem / Sistem	Temel Bulgular
Maceira-Elvira et al. (2019)	Giyilebilir cihazla evde rehabilitasyon	Evde uygulanan terapi Barthel indeksine göre merkez temellilere kıyasla daha etkili
Langerak et al. (2023)	Giyilebilir sensörler ile kullanıcı gereksinin analizi	Cihazlar ayarlanabilir, konforlu ve anlık geri bildirim sunmalı
Wittmann et al. (2016)	Sensörlü sanal gerçeklik temelli kol terapisi	Katılımcılar terapiye bağımsız olarak devam edebildi, yeterli doz sağlandı
Song et al. (2024)	Giyilebilir cihazların sistematik incelemesi	Üst ekstremitte motor fonksiyonları anlamlı düzeyde iyileşti
Chae et al. (2020)	Web tabanlı sistem + akıllı saat + makine öğrenimi	Öz yönetim gelişti, motor fonksiyonlarda belirgin kazanımlar sağlandı
Toh et al. (2023)	Telerehabilitasyon için giyilebilir cihaz	Bağımsız egzersiz yapılabilirdi, katılım düzeyi yükseldi
Poli et al. (2013)	Göreve özgü ev tipi robotik sistem	Tekrarlı ve yoğun terapi sağlandı, Kullanıcı motivasyonu arttı

Mevcut literatür incelendiğinde, kol dış iskeletlerine yönelik araştırmaların son yıllarda hız kazandığı görülse de, bazı önemli boşlukların hâlâ giderilemediği dikkat çekmektedir. Öncelikle, biyomimetik tasarım yaklaşımları genellikle teorik düzeyde ele alınmakta, ancak doğrudan biyolojik yapıların mekanik ve fonksiyonel özelliklerini taklit eden döküm tabanlı üretim tekniklerinin uygulandığı kapsamlı çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Bunun yanında, rehabilitasyon sistemlerinde kontrol stratejileri sıklıkla sabit yapılı veya klasik algoritmalarla sınırlı olup, iteratif öğrenme temelli kontrol yöntemlerinin servo

motor destekli uygulamalarla bütünleştiği örnekler neredeyse hiç bulunmamaktadır. Oysa bu tür algoritmalar, tekrarlayan görevler içeren rehabilitasyon süreçleri için doğal bir uyum potansiyeline sahiptir. Ayrıca, mekanik tasarım ile kontrol algoritmalarının bütüncül biçimde entegre edildiği sistematik yaklaşımların eksikliği göze çarpmaktadır; çoğu çalışma yalnızca donanıma ya da yazılıma odaklanmakta, bu iki boyutun etkileşimi ihmal edilmektedir. Öte yandan, kullanıcıya özel uyarlanabilirlik sağlayan sistemlerde gerçek zamanlı biyolojik geri bildirimlerin değerlendirilmesi ve bu verilerle kontrol algoritmasının dinamik biçimde güncellenmesi konusunda da önemli araştırma açıkları mevcuttur. Klinik geçerliliği ve uzun süreli kullanıcı deneyimini merkez alan çok disiplinli çalışmaların azlığı, geliştirilen prototiplerin terapötik etkinliğinin bilimsel düzeyde kanıtlanmasını engellemektedir. Bununla birlikte, çok eklemli, çift kollu hareket senaryolarının gerçekçi biçimde modellenmediği, özellikle üst ekstremité rehabilitasyonunun karmaşık yapısının yeterince karşılanamadığı görülmektedir. Son olarak, yerli literatürde biyomimetik döküm teknolojilerinin dış iskelet sistemlerine entegrasyonuna yönelik hem teorik hem de uygulamalı çalışmaların yetersizliği, bu alandaki ulusal düzeydeki özgün katkı ihtiyacını ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışması, kol dış iskelet sistemlerine yönelik hem yapısal hem de kontrolörde yenilikler içermesi bakımından literatüre çok boyutlu ve özgün katkılar sunmaktadır. Literatürde sınırlı sayıda örneği bulunan biyomimetik döküm teknolojilerinin, üst ekstremité dış iskelet tasarımında uygulanması bu çalışmanın temel yeniliklerinden biridir. Doğrudan insan anatomisine benzerlik taşıyan, kemik ve eklem yapılarının mekanik olarak taklit edildiği bu döküm temelli tasarım, dış iskeletlerin kullanıcı konforunu ve hareket uyumunu artırmak üzere özgün bir fiziksel yapı sunmaktadır. Bu yönüyle, konvansiyonel üretim tekniklerinden ayrılarak hem estetik hem de işlevsel açıdan biyolojik uyumluluğu önceleyen bir yaklaşım benimsenmektedir. Çalışmanın bir diğer önemli katkısı ise, servo motorlarla entegre çalışan iteratif öğrenme temelli kontrol algoritmasıdır. Literatürde yaygın olarak kullanılan klasik PID veya kural tabanlı kontrol sistemlerinden farklı olarak, bu tezde önerilen algoritma, kullanıcının tekrarlı hareketlerinden öğrenerek kontrol başarımını zamanla iyileştirebilecek bir yapıya sahiptir. Bu kontrol yaklaşımı, dış iskeletin bireysel hareket kalıplarına adapte olmasını mümkün kılarak, her kullanıcıya özgü dinamik destek sağlamaktadır. Böylece, sistemin hem rehabilitasyon verimliliği artmakta hem de uzun vadede öğrenme tabanlı bir kişiselleştirme düzeyi elde edilmektedir. Ayrıca, bu tez çalışmasında kontrol algoritması

ile mekanik yapının birlikte tasarlandığı bütüncül bir mühendislik yaklaşımı benimsenmiştir. Bu sayede, yalnızca kontrol başarımı değil; aynı zamanda hareket doğruluğu, kinematik uyumluluk ve kullanıcı geri bildirimini dikkate alınarak sistemin genel etkinliği değerlendirilmiştir. Söz konusu bütünlük yaklaşım, literatürde genellikle ayrı ayrı ele alınan tasarım ve kontrol bileşenlerinin senkronize edilmesine yönelik yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Hem yerli tasarım hem de üretim bileşenleriyle geliştirilen prototip, özellikle biyomimetik döküm teknolojisi ve tekrarlamalı öğrenmeli kontrol algoritmalarının birlikte uygulandığı ilk örneklerden biri olma özelliği taşımaktadır. Bu yönüyle çalışma, sadece bilimsel katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda yerli robotik rehabilitasyon teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik stratejik bir adım olarak değerlendirilmektedir.

1.2. Biyomimetik Döküm Teknolojisi ve Uygulama Alanları

Biyomimetik döküm teknolojileri, doğadaki karmaşık yapıları taklit etme yetenekleri sayesinde son yıllarda önemli bir araştırma alanı hâline gelmiş ve özellikle malzeme bilimi ile doku mühendisliği gibi disiplinlerde yenilikçi çözümler sunmuştur. Bu teknolojiler, biyolojik sistemlerde bulunan yapısal ve işlevsel prensipleri taklit ederek, biyomedikal mühendislikten yapısal kompozitlere ve çevresel çözümlere kadar birçok disiplinde kayda değer ilerlemelere olanak sağlamıştır. Bu bağlamda öne çıkan tekniklerden biri, kontrollü süspansiyon dondurulmasıyla gözenekli yapılar elde etmeye olanak tanıyan ve “buz şablonlama” olarak da adlandırılan dondurarak döküm yöntemidir. Bu yöntem, gözeneklerin boyutu, morfolojisi ve hizalaması gibi mikro yapısal özelliklerin kontrolüne imkân vererek, biyolojik mimarileri taklit eden işlevsel malzemelerin üretiminde yüksek potansiyel göstermektedir (Shao ve diğerleri, 2020; Zeng ve diğerleri, 2022). Biyomimetik döküm teknolojilerinin öne çıkan uygulama alanlarından biride doku mühendisliğidir. Dondurarak döküm gibi teknikler, hücreli büyümeyi ve doku rejenerasyonunu destekleyen kontrollü gözenek mimarileri oluşturmak amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır (Shao ve diğerleri, 2020; Ye ve diğerleri, 2024). Bu yöntem, doğal doku yapılarıyla yüksek düzeyde yapısal benzerlik taşıyan iskeletlerin üretimini mümkün kılarak, biyoyumlu ve fonksiyonel materyal tasarımını desteklemektedir. Örneğin, Pei ve arkadaşları, cilt dokusu mühendisliğinde kullanılmak üzere, doğal dokulardaki karmaşık mikro ortamları taklit eden iki aşamalı bir biyobaskı yaklaşımı geliştirmiştir (Pei ve diğerleri, 2024). Benzer şekilde, elektro-

eğrilmiş liflerin yüksek yüzey alanı ve gözenekli yapılarının, yara iyileşmesini hızlandırdığı ve hücre adezyonu ile göçünü kolaylaştırdığı gösterilmiştir (Heydari ve ark., 2024). Dolayısıyla Shao ve arkadaşları, dondurarak döküm tekniğinin seramik ve polimerler dâhil olmak üzere çeşitli malzeme türlerinde gözenekli biyomimetik yapılar elde etmeyi nasıl mümkün kıldığını ve bu sayede bu yapıların işlevsellik ve uygulama yelpazesinin nasıl genişletildiğini kapsamlı biçimde ele almıştır (Shao ve diğerleri, 2020).

Bu teknolojinin diğer malzeme üretim teknikleriyle entegrasyonu yoluyla mikro yapısal kontrolün daha da artırılabilceği ortaya konmuştur. Zeng ve arkadaşları, doku mühendisliği uygulamaları açısından kritik olan mikro yapısal özelliklerin, biyomimetik olarak üretilmiş yapıların mekanik performansını doğrudan etkileyebileceğini vurgulamaktadır (Zeng ve diğerleri, 2022). Bu kapsamda Bai ve ekibi, kemik dokusundaki yapısal kusurları gidermeyi hedefleyen, 3 boyutlu baskı ile geliştirilmiş biyomimetik iskele tasarımlarının biyoyumluluk ve mekanik bütünlük açısından nasıl avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır (Bai ve diğerleri, 2022). Benzer şekilde, Klang ve Nickel, deniz kestanesi dikenlerinde görülen doğal yapılardan esinlenerek fonksiyonel olarak derecelendirilmiş seramik malzemelerin üretimi üzerine çalışmış ve bu tür yapıları elde etmek amacıyla nişasta karışımı döküm gibi biyomimetik ilkelere dayalı yöntemlerin kullanımını önermiştir (Klang ve Nickel, 2021). Bu yaklaşım, biyomimetik döküm teknolojilerinin yalnızca doğal yapıları taklit etmekle kalmayıp, aynı zamanda bu yapılardan ilham alarak işlevsel yenilikler ortaya koyabileceğini göstermektedir.

Bununla birlikte, bu teknolojilerin uygulama alanı sadece seramik veya polimerlerle sınırlı kalmayıp, organik-inorganik kompozit malzemelere de yayılmaktadır. Liu ve çalışma arkadaşları, "tuğla ve harç" konfigürasyonunda yapılandırılmış kompozit malzemelerin üretiminde dondurarak dökümün nasıl kullanıldığını detaylı biçimde incelemekte ve bu yöntemle karmaşık, biyomimetik yapılar elde etmenin mümkün olduğunu göstermektedir (Liu ve diğerleri, 2023).

Biyomimetik döküm teknolojileri aynı zamanda çevresel uygulamalarda da umut vadetmektedir. Özellikle yüzey mühendisliği alanında yapılan çalışmalar, biyolojik yapıların taklit edilmesiyle çevresel dayanıklılığı ve işlevselliği artırma potansiyelini ortaya koymuştur. Gonen ve Kasem, yapışma performansını optimize etmek amacıyla, mantar benzeri mikro yapıların poli(vinilsiloksan) bazlı döküm teknikleriyle üretimini gerçekleştirmiş ve bu yapıların alt tabaka mekanik özelliklerine göre yapışma etkinliğinde farklılıklar gösterdiğini raporlamıştır (Gonen ve Kasem, 2023). Gomes ve çalışma

arkadaşları ise, yaprak yüzeylerinin antibakteriyel performansını taklit eden biyomimetik yüzeylerin diş mumu kullanılarak üretildiği ve bu yüzeylerin bakteri tutunmasına karşı doğal yapraklara göre daha dirençli olduğunu göstermiştir (Gomes ve diğerleri, 2023).

Eklemeli imalat (additive manufacturing), biyomimetik tasarımların gerçekleştirilmesinde önemli bir kolaylaştırıcı olarak öne çıkmaktadır. Özellikle polimer tabanlı 3D baskı teknikleri, doğal malzemelerin çok ölçekli yapısal özelliklerini taklit edebilen karmaşık ve hiyerarşik düzenlemelerin üretimini mümkün kılmıştır. Shao ve arkadaşları, grafen ve karbon nanotüpler gibi malzemeler kullanılarak dondurarak döküm tekniği ile elde edilen nanoyapılı gözenekli yapıların, hem sağlık hizmetleri hem de elektronik endüstrilerinde geniş bir uygulama alanına sahip olabileceğini belirtmiştir (Shao ve diğerleri, 2020). Benzer şekilde, Raheem ve diğerleri, biyomimetik döküm teknolojilerinin çok yönlülüğünü farklı uygulama örnekleriyle ortaya koymuştur (Raheem ve diğerleri, 2021).

Biyomimetik döküm teknolojilerinin uygulama potansiyelini artıran bir diğer alan ise mekanik performans açısından doğadaki üstün örneklerin taklit edilmesidir. Özellikle sedef gibi doğal olarak oluşan kompozitlerin gösterdiği yüksek tokluk ve esneklik, hafif ama dayanıklı malzeme ihtiyacının olduğu mühendislik uygulamaları için ilham kaynağı olmuştur. Klang ve Nickel, bu tür yapıların replikasyonu için dondurarak döküm ve modifiye slip döküm tekniklerinin kullanılabilirliğini vurgulamaktadır (Klang ve Nickel, 2021). Benzer şekilde, Libonati ve çalışma arkadaşları, doğadaki mekanik olarak üstün malzemelerin yapay ortamlarda çoğaltılması yönündeki ilerlemeleri detaylandırmıştır (Libonati ve diğerleri, 2019).

Sonuç olarak, biyomimetik döküm teknolojilerinin çok yönlü uygulamaları, tıbbi implantlardan doku iskelelerine, çevresel koruma çözümlerinden yüksek performanslı yapısal bileşenlere kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Dondurarak döküm ve 3D baskı gibi ileri üretim tekniklerinin entegrasyonu, yalnızca doğal yapıların taklit edilmesini değil, aynı zamanda bu yapılardan ilhamla yenilikçi tasarımların geliştirilmesini de mümkün kılmakta; böylece malzeme bilimi ve mühendislik alanlarında geleceğe dönük güçlü bir perspektif sunmaktadır.

1.3. Araştırma Sorusu

“Biyomimetik döküm teknolojileriyle tasarlanmış bir kol dış iskelet sisteminde, servo motor destekli iteratif öğrenme tabanlı kontrol algoritmasının entegrasyonu, rehabilitasyon süreçlerinde kullanıcıya özgü hareket uyumu ve terapötik etkinlik açısından nasıl bir katkı sağlamaktadır?” olarak belirlenmiştir.

1.4. Alt problemler

- Biyomimetik döküm teknolojileri, kol dış iskeletinin insan anatomisine uyumlu hareket kabiliyeti ve mekanik performansı üzerinde nasıl bir etki yaratmaktadır?
- Servo motor destekli iteratif öğrenme algoritması, kullanıcı hareketlerine gerçek zamanlı adaptif yanıt verme kapasitesine ne ölçüde katkı sağlamaktadır?
- Geliştirilen dış iskelet sistemi, geleneksel sabit kontrollü sistemlerle karşılaştırıldığında hareket doğruluğu, akıcılığı ve tekrar edilebilirliği açısından ne gibi farklılıklar göstermektedir?

1.5. Tezin Amacı ve Önemi

Bu tezin temel amacı, üst ekstremité rehabilitasyonu için geliştirilecek bir kol dış iskelet sisteminde, biyomimetik döküm teknolojilerinin uygulanması ve servo motor destekli iteratif öğrenme temelli bir kontrol mekanizmasının entegrasyonu ile hem mekanik hem de kontrol düzeyinde doğal insan hareketlerine daha yakın, kullanıcı dostu ve terapötik etkinliği yüksek bir dış iskelet prototipi ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, biyolojik sistemlerin morfolojik ve kinematik özelliklerini taklit eden döküm tabanlı tasarım prensipleriyle oluşturulmuş iskelet yapısı, insan anatomisine uyumlu bir fiziksel temel sağlayacaktır. Buna paralel olarak, servo motor tabanlı ve iteratif öğrenme yaklaşımına dayalı kontrol algoritması sayesinde, sistemin kullanıcının hareketlerine dinamik olarak uyum sağlaması ve bireysel tedavi ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışma, hem mevcut literatürde sınırlı sayıda ele alınan biyomimetik döküm teknolojisinin uygulamalı örneklerinden biri olması, hem de tekrarlamalı öğrenimli kontrol algoritmalarıyla dış iskelet sistemlerinin rehabilitasyon etkinliğini artırmaya yönelik yeni bir yaklaşım sunması hedeflenmiştir.

BÖLÜM 2. SİSTEM TASARIMI

Bu bölümde, geliştirilen biyomimetik döküm teknolojisine dayalı, ev temelli kullanım için tasarlanmış üst ekstremitte rehabilitasyonuna yönelik hibrit cihazın tasarım süreci sistematik bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Özgün bir cihaz geliştirme sürecinde karşılaşılan temel zorluklardan biri, mevcut tasarım alternatifleri arasından en uygun çözümün belirlenmesidir. Bu doğrultuda, sistematik tasarım yaklaşımı; sezgisel ve deneysel yöntemlerin ötesine geçerek süreci daha sağlam, izlenebilir ve yapılandırılmış bir biçimde yönetmeyi mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada, söz konusu sistematik yaklaşımın geliştirilen biyomimetik temelli hibrit cihaza uygulanabilirliği öngörülmuş ve tasarım süreci bu yöntem doğrultusunda kurgulanmıştır.

2.1. Kavramsal Tasarım

Tasarım çözümünün temelinde üç önemli ilke yer almaktadır: emniyet, açıklık ve basitlik. Tasarım süreci, öncelikle sistemin sahip olması gereken işlevlerin ve kullanıcı gereksinimlerinin sistematik biçimde tanımlandığı bir ihtiyaç listesi ile başlatılmaktadır. Egzersize dayalı insan kolu rehabilitasyonuna yönelik geliştirilecek bir cihazın sahip olması gereken temel özellikler, Tablo 2.1’de yapılandırılmış şekilde sunulmuştur. Bu tabloda yer alan ‘İhtiyaçlar’, cihazın mutlaka karşılaması gereken temel fonksiyonları ifade ederken; ‘Arzular’, sistemde bulunması tercih edilen ancak zorunlu olmayan ek özellikleri temsil etmektedir. Başka bir ifadeyle, ihtiyaçlar karşılanması zorunlu olan tasarım gereklerini, arzular ise isteğe bağlı, ek kullanıcı beklentilerini yansıtmaktadır (Serbest, 2017). Geliştirilen cihazın ihtiyaçlara uygunluğu değerlendirildiğinde, hedeflenen geometrik yapı doğrultusunda farklı kullanıcıların kol ölçülerine uyum sağlayabilmesi, kullanım kolaylığı sunması ve taşınabilir yapıda olması ön plana çıkmaktadır. Sistem, erişkin bireyler için tasarlandığından, çeşitli antropometrik özelliklere sahip kullanıcıların üst ekstremitte boyutlarına uyum gösterebilmesi

beklenmektedir. Ayrıca sistemin, fizyoterapistler tarafından belirlenen egzersiz protokollerini, hastaların aktif katılımıyla gerçekleştirebilecek yapıda olması hedeflenmektedir. Kinematik ve kuvvet üretme kapasiteleri açısından değerlendirildiğinde, cihazın ev ortamında kullanılabilirliğini sağlayacak şekilde düşük serbestlik derecelerine sahip olması, kompakt bir yapıda tasarlanması ve standart ev tipi elektrik enerjisi ile çalışabilir olması beklenmektedir. Bununla birlikte, sistemin güvenlik kriterlerini karşılaması, kullanıcı açısından herhangi bir fiziksel risk oluşturmaması ve aynı zamanda üretim maliyetlerinin düşük tutulması sayesinde piyasada rekabet edebilir bir ürün niteliği taşıması da temel tasarım beklentileri arasındadır.

Tablo 2.1 Tasarım Beklentileri Tablosu

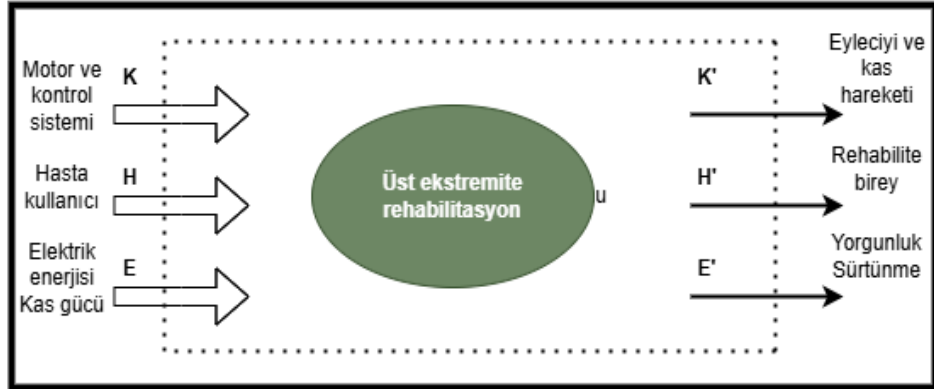
Özellikler	İhtiyaçlar (Zorunlu Özellikler)	Arzular (Tercih Edilen Ek Özellikler)
Anatomik Uyum	Farklı kol ölçülerine uyum sağlamalı	Modüler bileşenlerle genişletilebilirlik
Kullanım Kolaylığı	Yetişkin bireyler tarafından rahatça kullanılabilir olmalı	Kullanıcı arayüzünde kişiselleştirilebilir ayarlar
Taşınabilirlik	Ev ortamında taşınabilir olmalı	Katlanabilir yapı
Egzersiz Uygunluğu	Fizyoterapist tarafından belirlenen egzersizleri uygulayabilmeli	Egzersiz esnasında görsel/işitsel geri bildirim sağlama
Kinematik Yapı	Düşük serbestlik derecelerine sahip olmalı	Gelişmiş hareket izleme Sensörleri
Enerji Gereksinimi	Ev tipi elektrikle çalışabilmeli	Pil ile de çalışabilme opsiyonu
Güvenlik	Kullanıcı güvenliğini tehdit etmeyecek donanıma sahip olmalı	Acil durdurma ve hata uyarı Sistemi
Üretim Maliyeti	Düşük üretim maliyetine sahip olmalı	Yerel üretimle maliyet daha da Düşürülebilir

2.1.1. Fonksiyon yapıları

Tasarım sürecinde ‘fonksiyon’ kavramı, geliştirilmek istenen sistemin girdileri ile çıktıları arasındaki ilişkiyi tanımlayan temel bir bileşen olarak ele alınmaktadır. Özellikle

büyük ve karmaşık sistemlerde, genel fonksiyonun daha küçük ve yönetilebilir alt fonksiyonlara ayrılması, hem çözüm üretme sürecini sadeleştirmekte hem de sistematik ilerlemeyi kolaylaştırmaktadır (Serbest, 2017). Tasarım ölçütleri doğrultusunda geliştirilen dirsek rehabilitasyon cihazının tam işlevsel yapısı Şekil 2.1'de şematik olarak sunulmaktadır.

Bu şekil üzerinden sistem sınırları eksen çizgileriyle belirtilmiş olup, sisteme uygulanan enerji girişi E , sistemden elde edilen enerji çıkışı ise (E') ile temsil edilmektedir. Cihazın hareket mekanizması, hem elektrik enerjisi hem de kullanıcının kas gücü ile sağlanmakta olup, sistem aktif ve pasif rehabilitasyon senaryolarına uygun olarak yapılandırılmıştır. Dolayısıyla, enerji girişine kas gücü etkisi de dahil edilebilmektedir. Dirsek bölgesine entegre edilen aktüatöre sağlanan elektrik enerjisi, sistem içerisinde mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm sırasında, kaçınılmaz olarak belirli düzeyde sürtünme kaynaklı enerji kayıpları meydana gelmektedir. Ayrıca, cihaz kas gücüyle desteklenerek kullanıldığında, kullanıcıların özellikle tekrarlı egzersizler sırasında kas yorgunluğu yaşaması mümkündür. Sistem girdisinde yer alan kullanıcı, (H) ile; rehabilitasyon sürecini tamamlamış ve çıkış yapan kullanıcı ise (H') ile gösterilmektedir. Cihazın kontrol biriminden aldığı komutlar (K) ile ifade edilirken, bu komutların sonucunda aktüatör aracılığıyla oluşturulan hareket çıktısı (K') olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.1 : Geliştirilen Ev Temelli Hibrit Dirsek Rehabilitasyon Cihazının Fonksiyon Blok Diyagramı

Geliştirilen cihazın, kullanıcı tarafından başka bir kişiye ihtiyaç duyulmadan kolayca giyilebilir olması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, cihazın kola takılabilirliğini artırmak amacıyla biyomimetik döküm teknolojisi kullanılarak RTV-2 silikon malzeme tercih edilmiştir. Bu esnek ve deri dostu malzeme, cihazın farklı kol yapısına sahip kullanıcılar tarafından rahatça giyilmesini mümkün kılmaktadır.

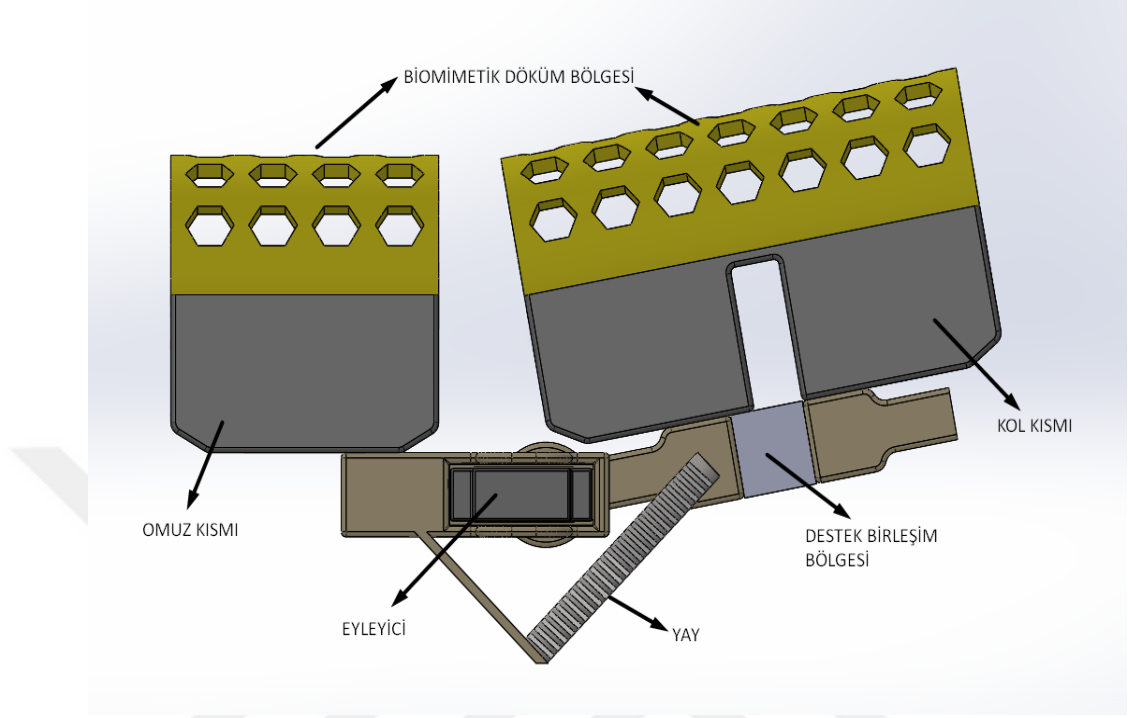
Cihazın üst ve ön kol bölümleri, kullanıcı vücut ölçülerine uygun şekilde küçük, orta ve büyük boyutlarda standartlaştırılmış olarak üretilebileceği gibi, bireysel farklılıkları daha hassas biçimde karşılayabilmek amacıyla hastaya özel olarak da tasarlanabilir. Bu kapsamda, hastanın kolundan alınan ölçüler doğrultusunda 3D yazıcı teknolojisi kullanılarak özelleştirilmiş parçalar üretilebilmektedir. Ayrıca, cihazın üst kol ve ön kol segmentleri arasında yer alan bağlantı yapısının ayarlanabilir olması, sistemin farklı kullanıcılar arasında ergonomik uyum sağlamasını kolaylaştırmaktadır. Alternatif olarak, bu bağlantı elemanlarının farklı boyutlarda modüler biçimde üretilmesi de kullanıcı konforunu ve cihazın evrensel uygulanabilirliğini artıran bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

2.1.2. Önerilen tasarım çözümleri

Tasarım çözümleri, hem aşırı kuvvet etkilerinden kullanıcıyı koruyacak şekilde güvenliğin sağlanması hem de cihazın farklı kullanıcı profillerine uyarlanabilirliği esas alınarak geliştirilmiştir. Bu kapsamda oluşturulan tasarım alternatifleri Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te sunulmaktadır. Şekil 2.2'de yer alan birinci tasarım çözümünde, dış iskelet sisteminde herhangi bir kuvvet sensörü kullanılmaksızın, ortalama bir insan koluna zarar vermeyecek düzeyde tork ve kuvvet üretebilecek bir aktüatör tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, sistemin güvenliğini basitleştirilmiş ve maliyet etkin bir yöntemle sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, cihazın üst kol ve ön kol bağlantısında yer alan yay mekanizması ile fleksiyon ve ekstansiyon hareketlerinin kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Özellikle fleksiyon hareketi, yay desteği sayesinde pasif egzersiz formunda uygulanabilmekte, bu da cihazı hem aktif hem pasif rehabilitasyon senaryolarına uygun hale getirmektedir. Tasarımda dikkat çeken bir diğer unsur ise biyomimetik döküm teknolojisinin entegrasyonudur. Cihazın omuz ve kol bölgelerinde kullanılan biyomimetik döküm yüzeyleri, kullanıcı anatomisine uyum sağlayacak şekilde esnek ve yarı geçirgen bir yapı sunmaktadır.

Bu yüzeyler, RTV2 silikon malzemesiyle üretilmiş olup, hem konforu artırmakta hem de farklı vücut tiplerine kolayca adapte olabilmektedir. Altıgen yapıdaki delikli tasarım, yalnızca estetik bir tercih değil, aynı zamanda cihazın ağırlığını azaltarak taşınabilirliğini artıran fonksiyonel bir çözümdür. Şekil 2.2'de gösterilen bu çözüm; eyleyici, yay, destek birleşim bölgesi ve biyomimetik döküm parçalarının birlikte çalışmasıyla, düşük

maliyetli, güvenli, ergonomik ve hasta dostu bir rehabilitasyon sisteminin temelini oluşturmaktadır.

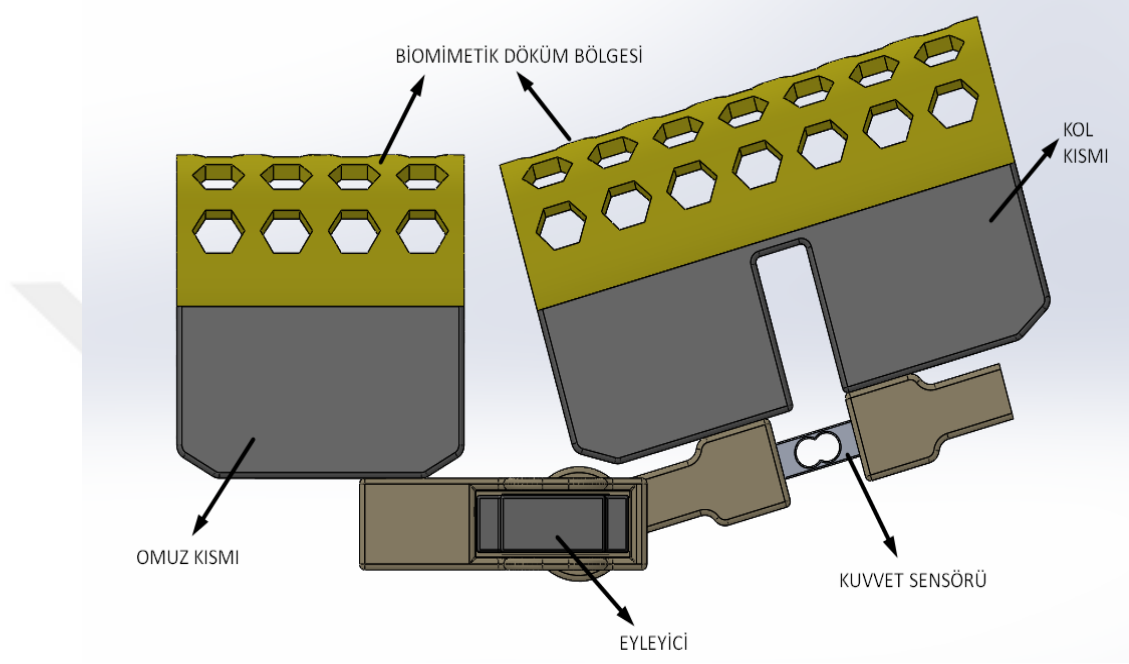


Şekil 2.2 : Tasarım Çözümü 1

Şekil 2.3'te ikinci tasarım çözümü sunulmaktadır. Bu yapı, ilk tasarım çözümünden farklı olarak, kullanıcı güvenliğini artırmak amacıyla bir kuvvet sensörü entegre edilerek geliştirilmiştir. Sistemde yer alan kuvvet sensörü, ön kol ile dış iskelet arasında zıt yönlü olarak oluşan kuvvetleri ölçerek cihazın çalışmasını güvenli sınırlar içerisinde tutmaktadır. Böylece eyleyici seçimindeki sınırlandırmalar ortadan kaldırılmış, daha güçlü ancak kontrollü bir hareket mekanizması kurulabilmiştir. Bu versiyonda, birinci tasarımda pasif rehabilitasyonu desteklemek amacıyla kullanılan yay çıkarılmıştır. Bu durum, cihazın yalnızca aktif rehabilitasyon uygulamaları için kullanılabilmesi anlamına gelmektedir. Her iki tasarımda da, dirsek ekleminde fleksiyon ve ekstansiyon hareketleri gerçekleştirilmekte olup; ikinci çözümde bu hareketler daha hassas kuvvet geri bildirimini ile izlenebilir hâle getirilmiştir. Tasarımda, önceki çözümde olduğu gibi biyomimetik döküm teknolojisi aktif şekilde kullanılmıştır. Her iki tasarımda ortak olan önemli bir unsur, biyomimetik döküm teknolojisidir.

Bu teknoloji, doğada verimlilik ve dayanıklılığıyla bilinen bal peteği yapısından ilham alınarak geliştirilmiş altıgen geometrik desenlere sahiptir. Cihazın omuz ve kol

kısımlarında yer alan biyomimetik döküm bölgeleri, RTV2 silikon gibi esnek ve cilde uyumlu malzemelerle üretilmiştir. Altıgen hücre yapısı, hem cihazın genel ağırlığını azaltmakta hem de yapısal dayanıklılığı ve hava geçirgenliğini artırmaktadır. Bu tasarım sayesinde, cihaz farklı kullanıcı kol tiplerine kolayca uyum sağlayabilmekte ve uzun süreli kullanımda konfor sunmaktadır.



Şekil 2.3 : Tasarım Çözümü 2

Her iki tasarım çözümünde de dairesel hareketin elde edilmesi amacıyla aktüatör olarak servo motor tercih edilmiştir. İlk tasarım çözümünde kullanılan servo motor, rehabilitasyon egzersizlerini gerçekleştirebilecek kapasitede seçilmiş; ancak kullanıcının koluna zarar vermeyecek şekilde düşük tork değerine sahip olacak biçimde sınırlandırılmıştır. Bu yaklaşım, sistemde herhangi bir kuvvet sensörü kullanılmadığı için güvenlik önlemi olarak düşük güçlü motor kullanımını zorunlu kılmıştır. Buna karşılık, ikinci tasarım çözümünde ön kola entegre edilen kuvvet sensörü sayesinde, kullanıcının koluna uygulanan kuvvetler gerçek zamanlı olarak izlenebildiğinden, servo motor seçiminde önceki tasarımdaki gibi bir kısıt bulunmamaktadır. Bu nedenle daha yüksek tork üretebilen, dolayısıyla daha güçlü ve etkili bir servo motor tercih edilmiştir. Her iki durumda da eyleyiciler, elektrik enerjisi ile çalışan sistemler olarak tasarlanmıştır.

Ayrıca, birinci tasarım çözümünde yer alan yay bileşeni, rehabilitasyon hareketlerinin pasif olarak desteklenmesi amacıyla kullanılmıştır ve bu yay, yaylanma özelliği taşıyan

uygun her türlü elastik malzemeden üretilebilecek şekilde esnek bir yapıda tasarlanmıştır. Geliştirilen cihazın tasarım çözümlerinin karşılaştırmaları Tablo 2.2’de gösterilmektedir.

Tablo 2.2 Tasarım Çözümleri Karşılaştırma

Özellikler	Tasarım Çözümü 1	Tasarım Çözümü 2
Kullanılan Servo Motor Tipi	Düşük torklu standart servo motor	Yüksek torklu güçlendirilmiş servo motor
Tork (Nm)	Yaklaşık 3 Nm	10 Nm ve üzeri
Güç Sınırlaması	Evet (kullanıcı güvenliği için)	Hayır (kuvvet sensörü ile güvenlik sağlanıyor)
Kontrol Hassasiyeti	Düşük düzey	Yüksek düzey (geri bildirimli)
Kuvvet Sensörü Kullanımı	Yok	Var (ön kol kuvvet ölçümü)
Rehabilitasyon Türü	Ekstansiyon aktif, fleksiyon pasif	Eks. ve flek. Aktif
Enerji Kaynağı	Elektrik	Elektrik
Ek Destek Mekanizması	Yay (pasif destek)	Yok

Her iki tasarımda da servo motor aktüatör olarak kullanılmış olsa da, Tasarım Çözümü 2 kontrol edilebilirlik açısından belirgin bir üstünlük sunmaktadır. Birinci tasarımda, kullanıcı güvenliğini sağlamak amacıyla düşük torklu bir motor tercih edilmiş ve pasif hareket desteği için yay mekanizması eklenmiştir. Bu yapı, düşük riskli ancak sınırlı kontrol hassasiyetine sahip bir çözüm sunmaktadır. Buna karşılık, ikinci tasarımda entegre edilen kuvvet sensörü sayesinde, kullanıcıya uygulanan kuvvetler gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte ve bu sayede daha güçlü bir motor kullanımına olanak sağlanmaktadır. Tasarım Çözümü 1’in tamamen yetersiz olduğu sonucu çıkarılamaz; ancak doğrudan kullanıcı tarafından güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için sistemin belirli test ve değerlendirme süreçlerinden geçirilmesi gerektiği açıktır.

Bu yapı, yalnızca eyleyicilerin güç kapasitesini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda yüksek düzeyde kontrol hassasiyeti ve güvenlik sağlamaktadır. Geri bildirimli kontrol döngüsü sayesinde, cihazın kullanıcıya uyguladığı kuvvet sürekli olarak denetlenebilmekte, böylece bireysel farklılıklara duyarlı ve daha kişiselleştirilmiş bir

rehabilitasyon süreci mümkün olmaktadır. Bu özellikler, Tasarım Çözümü 2’yi özellikle aktif rehabilitasyon senaryoları için daha uygun ve ev temelli rehabilitasyon açısından daha güvenilir bir seçenek hâline getirmektedir.

2.2. Donanım Tasarımı

Bu bölümde, geliştirilen cihazın donanım bileşenleri, kullanılan malzemeler ve bu bileşenlerin sistem içerisindeki işlevleri açıklanacaktır. Ayrıca genel donanım tasarımı ile donanım bileşenlerinin birbiriyle olan etkileşimleri ele alınacaktır. Geliştirilen ev tabanlı dirsek rehabilitasyon cihazı, toplamda dört temel donanım bileşeninden oluşmaktadır.

Bu bileşenler sırasıyla; servo motor (MG945), kuvvet sensörü (HX711), mikrodenetleyici (Arduino) ve biyomimetik döküm teknolojisiyle üretilmiş yapı bileşenleri şeklinde tanımlanabilir. Eyleyici biriminde servo motor tercih edilmesinin temel nedeni, bu motorların mikrodenetleyicilerle kolaylıkla programlanabilir olması ve özellikle konum kontrolü gerektiren rehabilitasyon uygulamaları için uygun özellikler sunmasıdır. Bu sayede, dirsek eklemine fleksiyon ve ekstansiyon hareketleri hassas biçimde gerçekleştirilebilmekte ve sistem, hedeflenen doğrulukta çalışabilmektedir.

Tablo 2.3’de donanım bileşenleri, görevleri ve teknik özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 2.3 Donanım Bileşenleri

Donanım Bileşeni	Görevi	Teknik Özellikleri
Servo Motor (MG945)	Dirsek eklemine fleksiyon ve ekstansiyon hareketi sağlamak	Tork: 10 kg·cm, Gerilim: 4.8–6.6V, PWM tabanlı kontrol
Kuvvet Sensörü (HX711)	Kullanıcının koluna uygulanan kuvveti ölçmek	24-bit çözünürlük, düşük gürültü, analog-dijital dönüşüm modülü
Mikrodenetleyici (Arduino)	Tüm sistem bileşenlerini kontrol etmek ve verileri işlemek	ATmega328P tabanlı, dijital/analog giriş-çıkış, USB üzerinden programlanabilir
Biyomimetik Döküm Teknolojisi	Kullanıcı anatomisine uygun, konforlu ve esnek dış yapı sağlamak	RTV2 silikon bazlı, altıgen yapılı, hafif ve esnek biyomimetik tasarım

Şekil 2.4'te, sistemde kullanılan MG945 model servo motorun yapısal görünümü ve bağlantı arayüzü görsel olarak sunulmaktadır.



Şekil 2.4 : MG945 Model Servo Motor

Sistemin eyleyici birimini oluşturan MG945 model servo motor, dirsek eklemine fleksiyon ve ekstansiyon hareketlerini gerçekleştirmek üzere kullanılmıştır. Bu motor, 10 kg·cm tork üretebilen güçlü bir yapıya sahiptir ve rehabilitasyon senaryolarında gerekli olan kademeli ve kontrollü hareketleri sağlamak için uygundur. PWM (Pulse Width Modulation) sinyali ile çalıştığı için, düşük enerji tüketimiyle yüksek hassasiyetli konumlandırma yapılmasına olanak tanır. Ayrıca, Arduino gibi mikrodenetleyicilerle doğrudan entegre olabilmesi, sistemde donanım-yazılım uyumunu kolaylaştırmakta ve kontrol algoritmalarının verimli bir şekilde uygulanmasına olanak sağlamaktadır.

MG945 servo motoru, elektrik enerjisi ile çalışan bir aktüatör olup, 4.8–7.2 V DC gerilim aralığında güvenli şekilde çalışabilmektedir. Motorun çalışma konum aralığı 0° ile 180° arasında olup, bu özellik sayesinde dirsek eklemi hareketlerinin kontrollü biçimde simülasyonu gerçekleştirilebilmektedir. Kompakt yapısı, düşük enerji tüketimi ve mikrodenetleyici sistemlerle kolay entegrasyon imkânı sunması nedeniyle MG945, ev ortamında kullanılacak rehabilitasyon cihazları için son derece uygun bir tercih oluşturmaktadır.

Cihazın kullanıcı güvenliğini sağlamak amacıyla, dış iskeletin ön kol kısmına entegre bir kuvvet sensörü yerleştirilmiştir. Bu sensör, dış iskelet yapısında oluşabilecek ani ve

yüksek kesme gerilmelerini algılayarak, kullanıcının maruz kalabileceği potansiyel fiziksel zararlara karşı bir önlem mekanizması olarak görev yapmaktadır.

Kullanılan kuvvet sensörünün temel yapısı, dış iskeletten kaynaklanabilecek düşük düzeydeki kesme gerilmelerini algılamada sınırlı hassasiyete sahip olduğundan, sisteme bir ağırlık sensörü kuvvetlendirici modülü entegre edilmiştir. Bu modül sayesinde ölçüm doğruluğu ve duyarlılık artırılmış, böylece daha güvenilir veri elde edilmesi sağlanmıştır. Sensör, yaklaşık olarak -50 N ile $+50\text{ N}$ aralığında kuvvet ölçebilmektedir; bu değerler, yaklaşık -5 kg ile $+5\text{ kg}$ aralığında bir yük karşılığına denk gelmektedir. Ölçümlerdeki pozitif ve negatif yönler, kuvvetin doğrultusuna göre farklı gerilim türlerini (çekme ve basma) temsil etmektedir.

Şekil 2.5'te, sistemde kullanılan kuvvet sensörünün yapısal görünümü sunulmaktadır.



Şekil 2.5 : Kuvvet Sensörü ve Güçlendirici HX711

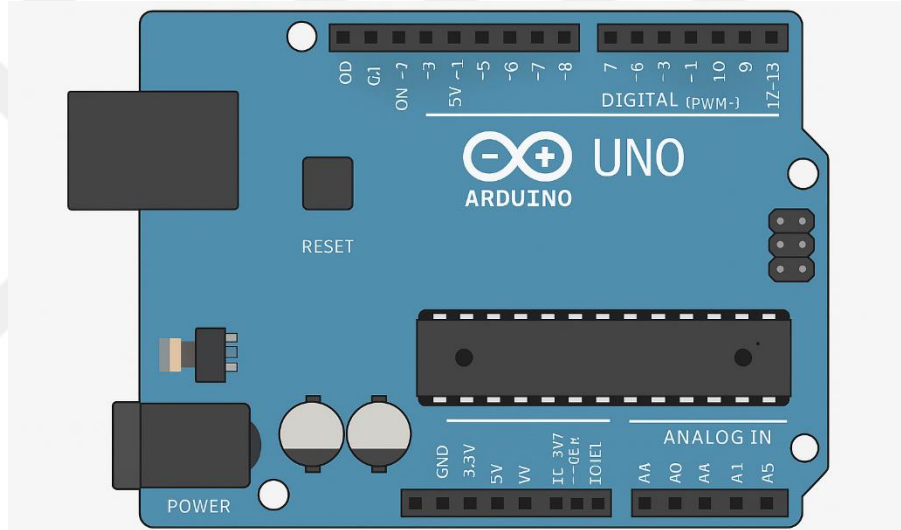
Yukarıda belirtilen ölçüm aralıkları, ağırlık sensörü kuvvetlendirici modülünden (HX711) geçirildikten sonra, mikrodenetleyici (Arduino) üzerinde yazılımsal olarak -50 ile $+50$ arasında olacak şekilde yeniden ölçeklendirilmiştir. Bu sayede analog sinyalden elde edilen veriler, sistem tarafından daha tutarlı ve anlamlı bir biçimde işlenebilmekte; kuvvet ölçümleri doğrudan Newton cinsinden yorumlanabilir hâle gelmektedir.

Mikrodenetleyici birimi olarak Arduino Uno tercih edilmiştir. Bu tercih, Arduino Uno'nun standart boyutlarda bir kontrol kartı olması, farklı zorluk seviyelerindeki elektronik uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahip olması, kullanıcı dostu

programlama altyapısı sunması ve düşük maliyetli yapısıyla ekonomik açıdan avantajlı olması gibi nedenlere dayanmaktadır.

Arduino Uno, diğer Arduino modellerinde olduğu gibi, Arduino IDE yazılım ortamı aracılığıyla programlanabilmektedir. Geliştirilen yazılımlar, kartın üzerinde bulunan bootloader yazılımı sayesinde kolayca yüklenebilmektedir. Bununla birlikte, bootloader yazılımının atlanarak doğrudan mikrodenetleyiciye programlama yapılması da mümkündür. Bu durumda, kart üzerindeki ICSP (In-Circuit Serial Programming) header bağlantı noktası kullanılarak, bir ISP (In-System Programmer) yardımıyla mikrodenetleyici doğrudan programlanabilmektedir.

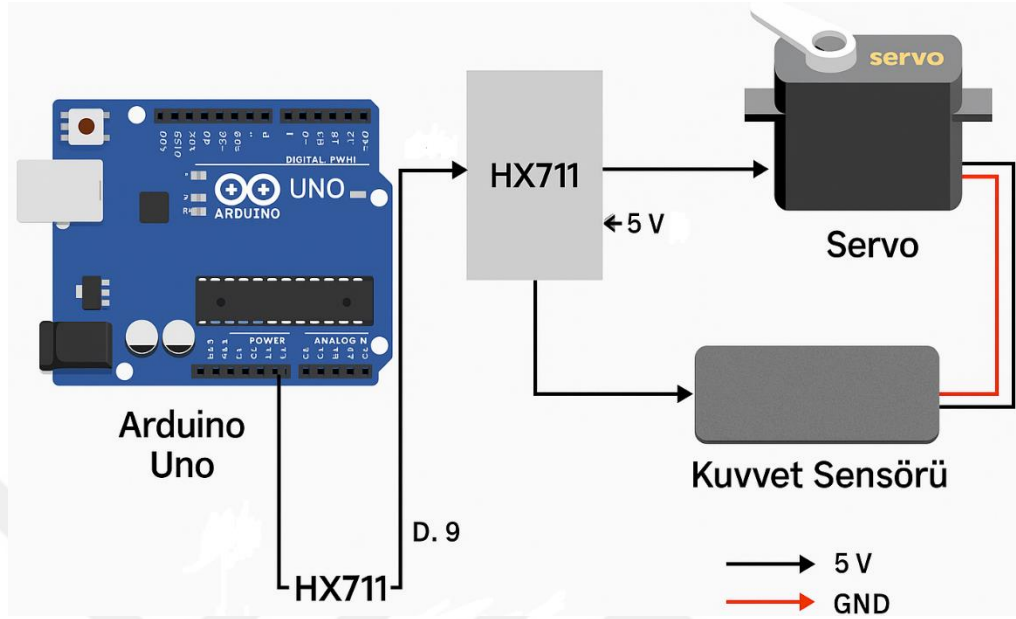
Şekil 2.6’da, sistemde kullanılan Arduino Uno kartının yapısal görünümü sunulmaktadır.



Şekil 2.6 : Arduino Uno Mikrodenetleyici Kartı

Arduino Uno, proje kapsamında kullanılan mikrodenetleyici birimdir ve sistemin tüm donanım bileşenlerinin yönetimini üstlenmektedir. Kart üzerinde bulunan ATmega328P mikrodenetleyici, analog ve dijital sinyalleri okuyup işleyebilme yeteneğine sahiptir. Servo motor ve kuvvet sensörü gibi çevresel birimlerle doğrudan entegre çalışabilen Arduino Uno, Arduino IDE platformu üzerinden kolayca programlanabilmektedir. Ayrıca, gelişmiş kontrol ihtiyaçları için kart üzerindeki ICSP pinleri kullanılarak doğrudan donanım programlaması da yapılabilmektedir. Kompakt boyutu, açık kaynaklı altyapısı ve düşük maliyeti sayesinde, ev tipi rehabilitasyon cihazları gibi gömülü sistem projeleri için ideal bir mikrodenetleyici platformu sunmaktadır. Şekil 2.7’de HX711

kuvvet sensörü ve MG945 servo motorun arduino üzerinden kontrolüne ait bağlantı diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.7 : Dirsek Rehabilitasyon Cihazı Donanım Bağlantı Yapısı

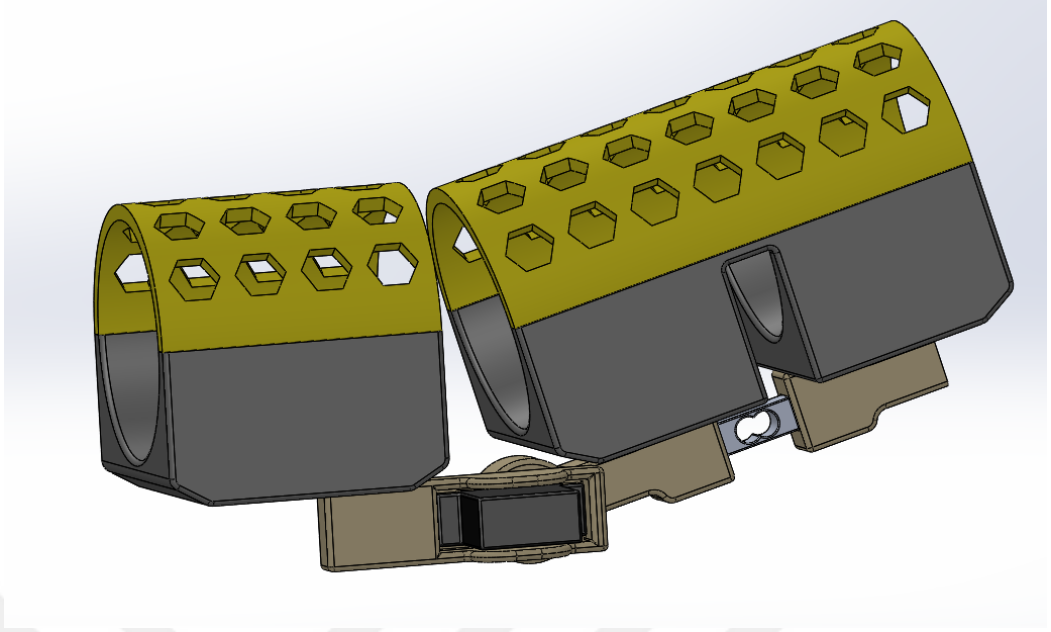
Şekil 2.7’deki bağlantı diyagramı, sistemde kullanılan temel donanım bileşenlerinin birbirleriyle olan etkileşimini göstermektedir. Kuvvet algılama birimi olarak kullanılan HX711 modülü, yük hücresi üzerinden elde edilen analog sinyali dijital formata çevirerek Arduino mikrodenetleyiciye aktarmaktadır. Arduino, bu verileri işleyerek kullanıcıya uygulanan kuvvetin anlık değerlerini değerlendirir ve gerektiğinde eyleyici olan MG945 servo motoru uygun şekilde çalıştırır. Servo motorun kontrolü PWM sinyali aracılığıyla sağlanmakta olup, motorun dönme açısı bu sinyallerle hassas biçimde belirlenmektedir. Bu yapı sayesinde, sistem hem sensör verilerine dayalı olarak gerçek zamanlı geri besleme ile çalışmakta hem de güvenli ve kontrollü hareket üretimini mümkün kılmaktadır. Bağlantılar, sistemin kompakt yapısını bozmadan minimum kablolama ile gerçekleştirilmiş ve ev tipi kullanım senaryolarına uygun bir donanım mimarisi oluşturulmuştur.

2.2.1. Eklemeli imalat ve biyomimetik döküm teknolojisi

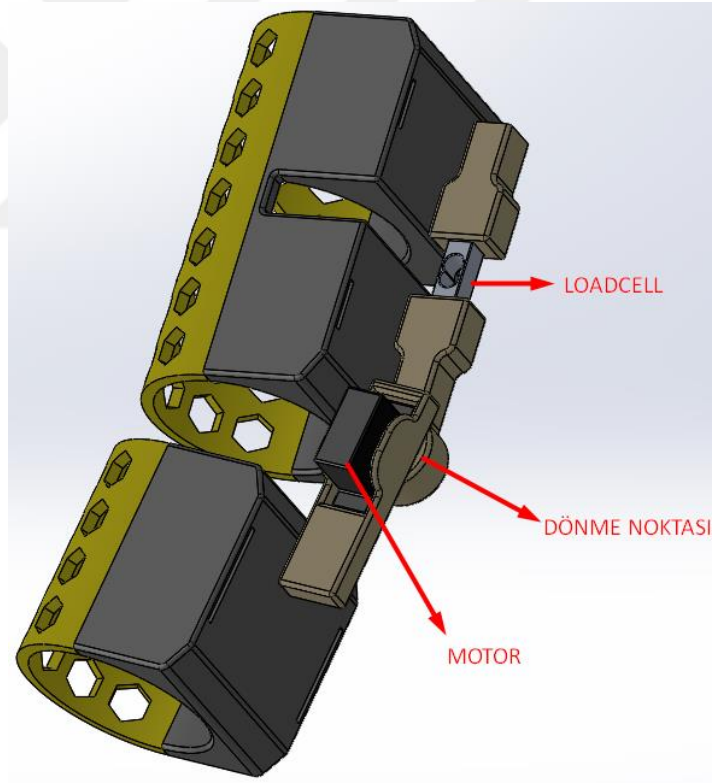
Bu bölümde, geliştirilen cihazın prototip imalat süreci ile birlikte CAD (Computer Aided Design) ortamında gerçekleştirilen tasarım adımları açıklanmaktadır. Cihazın tasarımı ve üretimi sırasında, insan kolunun anatomik yapısına uyumlu ve dirsek hareketlerini

destekleyecek şekilde ergonomik bir yapı hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, hem maliyet etkinliği sağlamak hem de hızlı ve hassas prototipleme gerçekleştirmek amacıyla imalat sürecinde 3 boyutlu (3D) yazıcı teknolojisi tercih edilmiştir. Üretimi yapılan parçalar, SolidWorks yazılımı kullanılarak üç boyutlu ortamda çizilmiş, katılaştırılmış ve ardından montajlanarak bütünsel cihaz yapısı elde edilmiştir. Bağlantı noktaları, dayanıklılığı artırmak ve montaj kolaylığı sağlamak amacıyla standart metrik civata-somun bağlantıları ile birleştirilmiştir. Ek olarak, cihazın üst iskelet (dış yüzey) kısmında, kullanıcıyla doğrudan temas edecek alanlarda biyomimetik döküm teknolojisi uygulanmıştır. Bu yöntemde doğadan esinlenilerek bal peteği (hexagonal) yapısal desenleri kullanılmıştır. Bal peteği formu, doğadaki en verimli taşıyıcı yapılardan biri olması sebebiyle tercih edilmiş; bu sayede cihazın hem yapısal sağlamlığı artırılmış hem de ağırlığı azaltılmıştır. Bu petek desenli yüzeyler, RTV2 silikon malzeme kullanılarak döküm yöntemiyle şekillendirilmiştir. RTV2 silikon, esnek, cilde uyumlu ve yarı geçirgen özellikleri sayesinde hem kullanıcı konforunu artırmakta hem de cihazın farklı kol yapılarına uyum sağlamasını kolaylaştırmaktadır. Biyomimetik dökümle üretilen bu yüzey, yalnızca estetik bir tasarım unsuru değil, aynı zamanda uzun süreli kullanımda cilt tahrişini önleyici, hava geçirgenliğini destekleyici ve cihazın taşınabilirliğini kolaylaştırıcı bir mühendislik çözümü olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 2.8’de, cihazın parçalarının SolidWorks ortamında çizilip üç boyutlu hale getirildiği ve montajlandığı görünüm, Şekil 2.9’da bu montajlanan görselin temel bileşenleri gösterilmektedir.

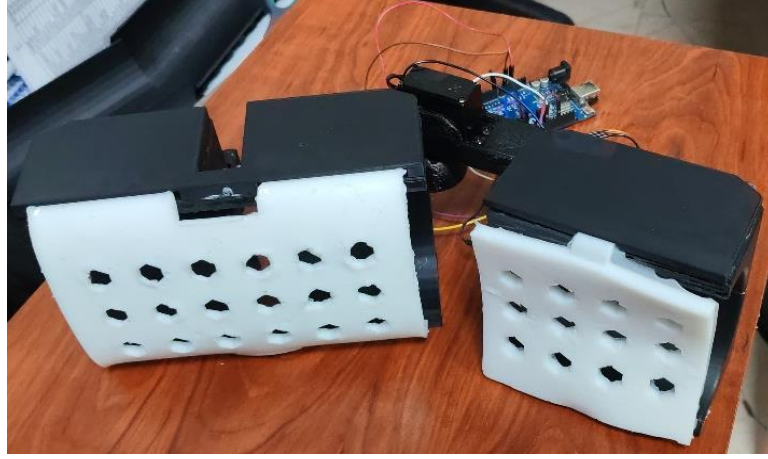


Şekil 2.8 : Cihazın Katı Model Montajı

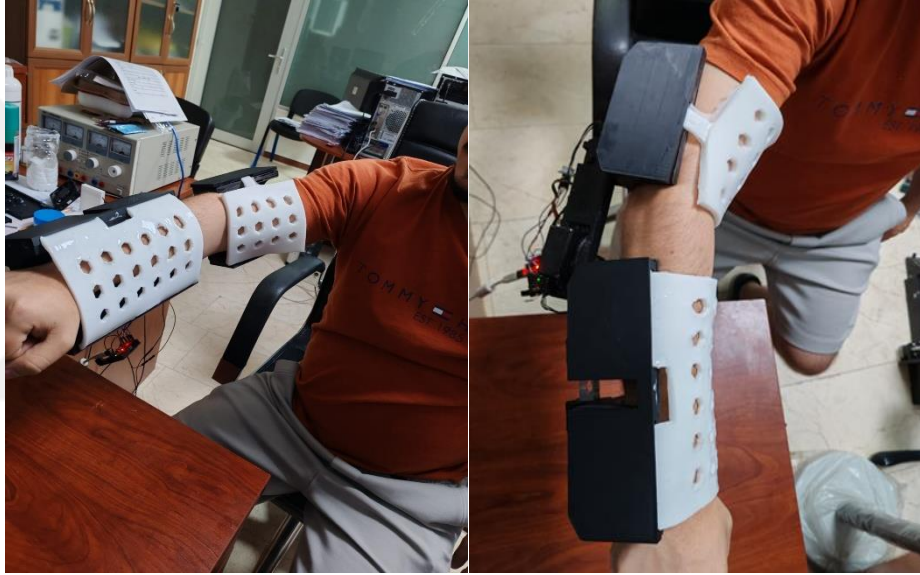


Şekil 2.9 : Cihazın Katı Model Montajı ve Bileşenleri

Tasarım süreci sonucunda ortaya çıkan nihai prototipin genel görünümü ve bileşen yerleşimi Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de detaylı biçimde gösterilmektedir.



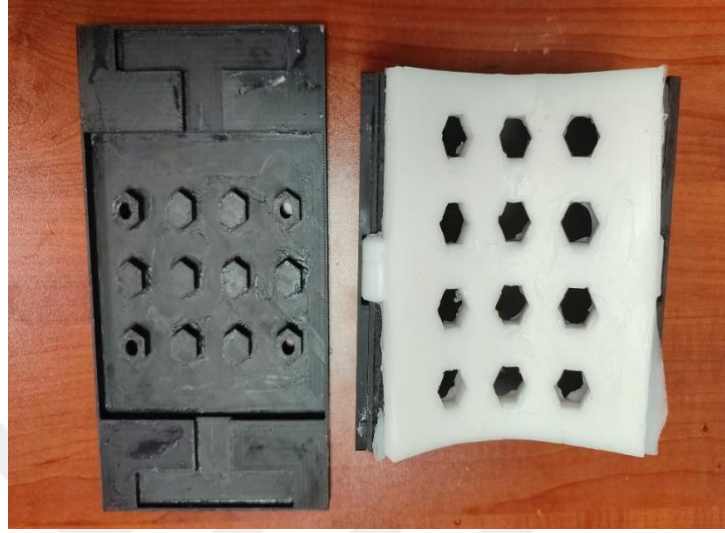
Şekil 2.10 : Sistem Prototipi



Şekil 2.11 : Sistemin Kol Üzerindeki Görünümü

Bu çalışmada kullanılan biyomimetik döküm maçaları, doğadaki yapıların optimize edilmiş geometrilerinden esinlenerek tasarlanmıştır. Özellikle bal peteği ve kemik trabeküler dokusunu andıran iç yapılar, mekanik dayanıklılığı artırırken aynı zamanda malzeme tasarrufu sağlamayı amaçlamaktadır. Maçaların bu özgün yapısı, döküm sırasında hem akışkan metalin yönlendirilmesini kolaylaştırmakta hem de son ürünün iç gerilmelerden arındırılmış, hafif ve sağlam olmasına katkıda bulunmaktadır. Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te sunulan görseller, maçaların kalıp içerisindeki yerleşimini ve yüzey morfolojisini detaylı biçimde göstermektedir. Bu görsel veriler, biyomimetik tasarımın klasik döküm elemanlarına kıyasla ne denli farklı ve yapısal olarak işlevsel biçimde üretilebildiğini ortaya koymakta; döküm süreciyle bütünleşik olarak hem fonksiyonel

hem de estetik sonuçlar elde edildiğini kanıtlamaktadır. Görsel incelemeler, aynı zamanda üretim öncesi bilgisayar destekli tasarım (CAD) süreci ile üretim sonrası fiziksel örnekler arasındaki uyumu da doğrulamaktadır.



Şekil 2.12 : Omuz Bölgesi Maçası



Şekil 2.13 : Ön Kol Bölgesi Maçası

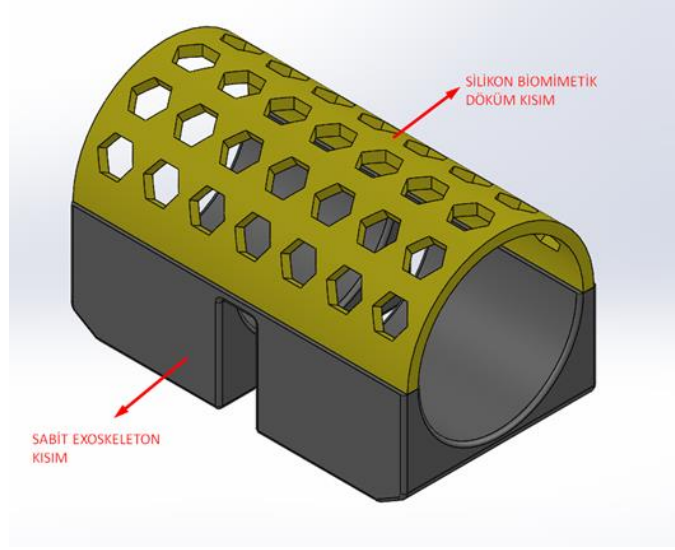
Biyomimetik döküm teknolojisi, doğadaki yapıların fonksiyonel ve mekanik özelliklerinden ilham alarak geliştirilen bir üretim yaklaşımıdır ve özellikle dış iskelet sistemleri gibi biyomekanik uyum gerektiren uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır. Bu teknoloji sayesinde doğada sıkça gözlenen petek, kabuk veya kemik dokusu gibi optimize edilmiş geometriler döküm süreçlerine entegre edilerek, hem yapısal dayanıklılık artırılmakta hem de malzeme kullanımı minimize edilmektedir.

Böylece, ortaya çıkan parçalar daha hafif, sağlam ve enerji verimliliği açısından daha elverişli hale gelmektedir. Ayrıca, biyomimetik tasarımın sunduğu yük dağılımı ve darbe emici özellikler, özellikle giyilebilir sistemlerde kullanıcı konforunu ve güvenliğini artırmaktadır. Biyomimetik döküm süreçleri, geleneksel yöntemlere kıyasla daha karmaşık ve işlevsel geometrilerin üretimini mümkün kıldığı için, ergonomik ve kişiye özel cihazların geliştirilmesinde de önemli bir rol oynamaktadır. Bu yönüyle biyomimetik döküm teknolojisi, mühendislik ve biyomedikal alanların kesişiminde yenilikçi çözümler sunarak, rehabilitasyon teknolojilerinde performansı ve hasta uyumunu artıran stratejik bir üretim yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır. Tablo 2.4'te ev temelli rehabilitasyonda dış iskeletin dış yüzeyinde kullanılan geleneksel yüzey ve biyomimetik döküm teknolojisi özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 2.4 Biyomimetik Döküm Teknolojisi Avantajları

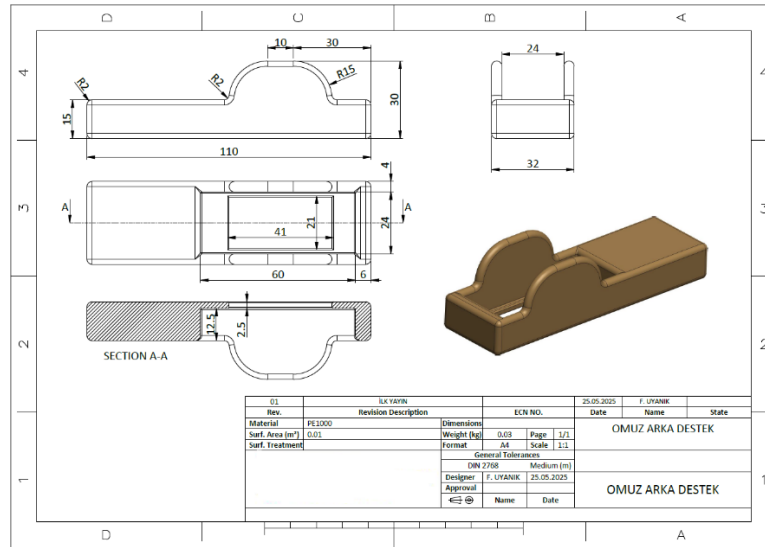
Özellik	Düz Yüzeyle Silikon	Biyomimetik Bal Peteği Desenli Silikon
Ağırlık (g/cm ²)	Yüksek (~1.2)	Düşük (~0.7)
Esneklik	Orta (düz yüzey direnci yüksek)	Yüksek (esnek hücreli yapı)
Hava Geçirgenliği	Düşük	Yüksek (hexagonal boşluklar sayesinde)
Yapısal Dayanım	Orta	Yüksek (yükü hücreler arası dağıtır)
Cilt Dostu Kullanım	Sınırlı	Gelişmiş (terleme ve tahriş riskini azaltır)

Yukarıdaki karşılaştırma tablosu, rehabilitasyon cihazlarında kullanılan iki farklı silikon yapı arasındaki performans farklarını göstermektedir. Geleneksel düz yüzeyle silikon, yüksek ağırlığı ve sınırlı esnekliği nedeniyle uzun süreli kullanımda konfor dezavantajları yaratabilmektedir. Buna karşılık, biyomimetik bal peteği desenli silikon, doğadan ilham alan altıgen hücreli yapısı sayesinde hem düşük ağırlık, hem de yüksek esneklik ve hava geçirgenliği sunmaktadır. Bu yapı, yükün yüzeye eşit dağılmasını sağlayarak yapısal dayanımı artırmakta; aynı zamanda terleme ve cilt tahrişine karşı daha dirençli bir yüzey oluşturarak kullanıcı konforunu ve güvenliğini önemli ölçüde yükseltmektedir. Bu nedenle biyomimetik döküm teknolojisiyle üretilmiş yüzeyler, rehabilitasyon cihazlarında özellikle kullanıcı ile doğrudan temas eden bileşenlerde öncelikli tercih haline gelmiştir.



Şekil 2.15 : Kol Bölgesi CAD Görünümü

Omuz arka destek parçası, cihazın üst koldaki biceps bölgesi ile ön kol bölgesini birleştiren yapısal bağlantı görevini üstlenmektedir. Bu parça, cihazın kullanıcı vücudu üzerinde stabil kalmasını sağlarken, yük dağılımını optimize ederek hem kullanım konforunu artırmakta hem de rehabilitasyon sırasında cihazın doğal hareket ekseninde kalmasını desteklemektedir. Bu bağlantı sayesinde üst ekstremité boyunca uzanan yapının biyomekanik uyumu korunmakta, aynı zamanda ön kol ve kol segmentleri arasındaki kuvvet aktarımı da güvenli bir biçimde gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.16'da bu parçaya ait teknik çizim sunulmaktadır.



Şekil 2.16 : Omuz Arka Destek Teknik Resim Anteti

Üretilen parçalar, montaj aşamasında uygun çap ve boyuttaki civata, pul ve somun elemanları kullanılarak birleştirilmiştir. Mekanik bağlantı elemanlarının tercih edilmesi, parçaların sökülebilirliğini ve gerektiğinde kolay revize edilebilmesini sağlamaktadır. Üç boyutlu yazıcıdan alınan parçaların montaj işlemi tamamlandıktan sonra, cihazın bütünleşik hâli elde edilmiştir.

Şekil 2.17’de, montajı tamamlanmış olan prototip cihazın genel görünümü gösterilmektedir.



Şekil 2.17 : Genel Görünüm

Cihaza ait diğer parçalara ilişkin teknik resimler ve bu parçalara ait katı model görselleri, detaylı biçimde ek dosyada sunulmuştur. Teknik çizimlerde antet bilgileri yer almakta olup, her bir bileşenin boyutlandırma, tolerans ve montaj referansları açık şekilde belirtilmiştir.

2.2.2. Cihazın maliyeti ve pazar potansiyeli

Bu bölümde, geliştirilen cihazın üretim maliyeti detaylı olarak analiz edilecek ve potansiyel pazar payı üzerine değerlendirmelerde bulunulacaktır. Geliştirme sürecinde kullanılan tüm donanım bileşenleri, mekanik parçalar ve üretim teknolojilerine ait maliyetler kalem kalem çıkarılmıştır.

Tablo 2.5'te, cihazda kullanılan parçaların adı, türü ve Türk Lirası (TL) cinsinden birim fiyatları sunulmakta olup, bu tablo aracılığıyla cihazın toplam maliyet yapısı şeffaf bir şekilde ortaya konmuştur.

Tablo 2.5 Maliyet Analizi

Parça Adı	Türü	Fiyatı (TL)
Servo motor	MG945	400
Mikrodenetleyici	Arduino Uno	190
Kuvvet Sensörü	HX711	145
Sıvı Silikon+Katalizör	RTV2	550
Dış İskelet Parçaları	PLA	950
Pil	9V	80
Sarf Malzemeler	Vida,pul vb.	110

Yapılan hesaplamalar sonucunda, cihazda kullanılan tüm bileşenlerin toplam malzeme maliyeti yaklaşık olarak 2.425 TL olarak belirlenmiştir. Bu tutar; mekanik parçalar, elektronik bileşenler ve özel üretim (3D baskı, biyomimetik döküm) malzemelerini kapsamaktadır.

Bu çalışmada malzeme seçimi, ev ortamında kullanılabilir ve kullanıcıya optimum egzersiz imkânı sunabilecek bir rehabilitasyon kiti oluşturulması hedefi doğrultusunda yapılmıştır. Yapılan pazar araştırmaları ve rakip analizleri sonucunda, bu konseptte doğrudan ev tipi kullanım için optimize edilmiş bir dış iskelet tasarımının literatürde veya piyasada yer almadığı tespit edilmiştir. Geliştirilen ürün, özellikle sinir sistemi ve kas dokusu zayıflamış, fizik tedavi ve motor beceri rehabilitasyonuna ihtiyaç duyan bireyler için tasarlanmıştır. Türkiye pazarı incelendiğinde, benzer nitelikte doğrudan rekabet

içinde olunan bir ürün bulunmamaktadır. Uluslararası pazarda ise yalnızca sınırlı sayıda firma bu alanda üretim yapmakta olup, fiyat karşılaştırmaları yapıldığında; benzer dış iskelet sistemlerinin ortalama satış fiyatının yaklaşık 245 Euro (yaklaşık 10.818,47 TL) seviyesinde olduğu görülmektedir. Buna karşılık olarak, geliştirilen prototip cihazın toplam malzeme maliyeti 54,92 Euro (yaklaşık 2.425 TL) düzeyindedir. Cihazın satış fiyatı, döviz kuru dalgalanmaları da göz önüne alınarak asgari 120 Euro (yaklaşık 5.298,84 TL) olarak belirlenmiştir. Bu fiyatlandırma stratejisi, cihazın hem uygun maliyetli hem de erişilebilir olmasını sağlamakta; pazarda rekabet avantajı yaratmaktadır. Bu bağlamda ürünün iç pazarda güçlü bir konum elde edebileceği ve ihracat potansiyeli taşıdığı değerlendirilmektedir.

İleriye dönük olarak, cihazın hedef kitleye yönelik kullanımından elde edilecek geri bildirimler doğrultusunda, hastaneler ve medikal eczaneler gibi profesyonel sağlık kuruluşlarına dağıtımını planlanmaktadır. Bu süreçte, daha dayanıklı ve fonksiyonel malzemelerle geliştirilmiş versiyonların üretilmesi ve sağlık sektörüne özel standartların karşılanması amaçlanmaktadır. Seri üretim senaryolarında, bu cihazın pazar payını koruyarak yaygın biçimde kullanılacak yerli bir medikal teknoloji ürünü olarak konumlanması hedeflenmektedir.

BÖLÜM 3. BİYOMEKANİK MODEL VE KONTROLCÜ TASARIMI

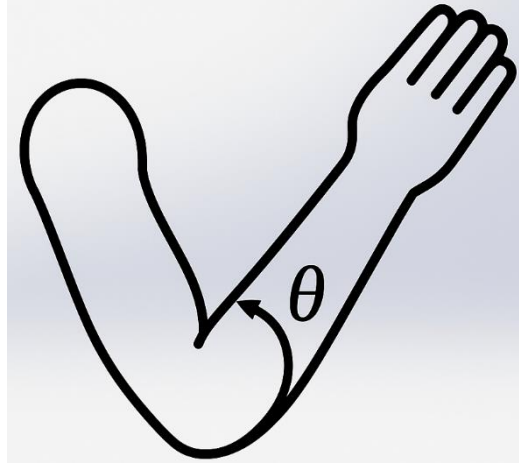
Bu bölümde, kontrolcü tasarımına geçilmeden önce sistemin ve üst ekstremite hareketinin matematiksel modeli türetilerek, dinamik davranışlar tanımlanacaktır. Elde edilen model doğrultusunda, geliştirilen rehabilitasyon cihazının kontrol stratejisine uygun bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirilecektir. Bu süreç, sistemin doğrusal ve doğrusal olmayan dinamiklerine yanıt verebilecek şekilde yapılandırılacak olup, servo motorun pozisyon kontrolü ve kullanıcıdan gelen biyomekanik geri beslemeler temel alınarak yürütülecektir.

3.1. Üst Ekstremitte Biyomekanik Model

Dirsek eklemine açı takibine dayalı kontrolünün sağlanabilmesi için, sistemin biyomekanik ve fiziksel temellerine uygun matematiksel modelinin oluşturulması gerekmektedir. Bu doğrultuda, kolun biyomekanik davranışı ile dış iskelet sisteminin dinamiği birlikte ele alınmalı ve akuple (birbirine bağlı) sistem modeli çıkartılmalıdır. İnsan kolu, farklı eklemler aracılığıyla çok eksenli hareket kabiliyetine sahiptir. Bu hareketler anatomik olarak omuz, dirsek ve bilek eklem merkezleri aracılığıyla gerçekleştirilmekte olup, her bir bölge farklı sayıda serbestlik derecesine (DoF) sahiptir. Bu çalışmada, yalnızca dirsek eklemi dikkate alınarak, sistem tek serbestlik dereceli (1-DoF) kabul edilmiş ve bu bölgede meydana gelen fleksiyon/ekstansiyon hareketi modellemeye dahil edilmiştir.

Modelleme süreci kapsamında öncelikle insan kolunun dirsek merkezli biyomekanik modeli oluşturulmakta, ardından bu modele uygun bir dış iskelet sisteminin fiziksel parametreleri tanımlanarak sistem bütünlüğü sağlanmaktadır. Bu yaklaşım, kontrolcü tasarımında sistem dinamiklerinin doğru şekilde temsil edilmesine olanak tanımaktadır.

Şekil 3.1’de insan kolunun dirsek eklem açısı model diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Dirsek Eklemine ait 1-DoF Biyomekanik Model

Dirsek eklemi tek serbestlik derecesine sahiptir ve fleksiyon/ekstansiyon hareketi üzerinden modellenebilir. Dirsekten itibaren ön kol, bir rijit çubuk gibi kabul edilir ve bir uca bağlı aktüatör tarafından döndürülür.

$\theta(t)$: Dirsek açısı (rad)

m : Ön kolun kütlesi (kg)

l : Ön kolun uzunluğu (m)

I : Dirsek etrafındaki dönme atalet momenti ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), genellikle $I = (1/3)\cdot m\cdot l^2$

τ : Uygulanan tork (servo motor torku)

g : Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s^2)

Tek serbestlik dereceli üst ekstremitede kinetik enerji denklemi Denklem 3.1’de verilmektedir.

$$T = (1/2)\cdot I\cdot(\dot{\theta})^2 \quad (3.1)$$

Potansiyel enerji denklemi ise Denklem 3.2’de gösterilmektedir.

$$V = m\cdot g\cdot(l/2)\cdot\cos(\theta) \quad (3.2)$$

Kullanılan Lagrange denklemi yaklaşımında Denklem 3.3’de gösterilmektedir.

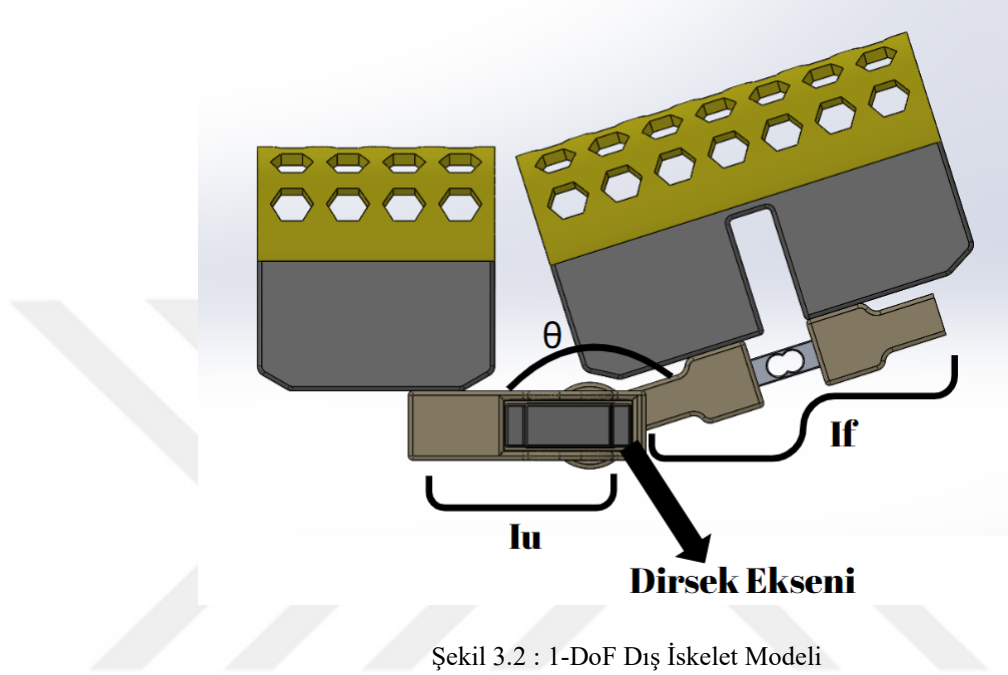
$$d/dt (\partial L/\partial \dot{\theta}) - \partial L/\partial \theta = \tau \quad (3.3)$$

Burada $L = T - V$ olduğundan dirsek hareket dinamiği Denklem 3.4’te verilmiştir.

$$I \cdot \ddot{\theta} + (m \cdot g \cdot l/2) \cdot \sin(\theta) = \tau \quad (3.4)$$

Bu ifade, dirsek hareketinin servo motor torku altındaki dinamiğini tanımlamaktadır.

Şekil 3.2’de dış iskelet sisteminin etkileşimini gösteren kinematik model diyagramı sunulmaktadır.



Şekil 3.2 : 1-DoF Dış İskelet Modeli

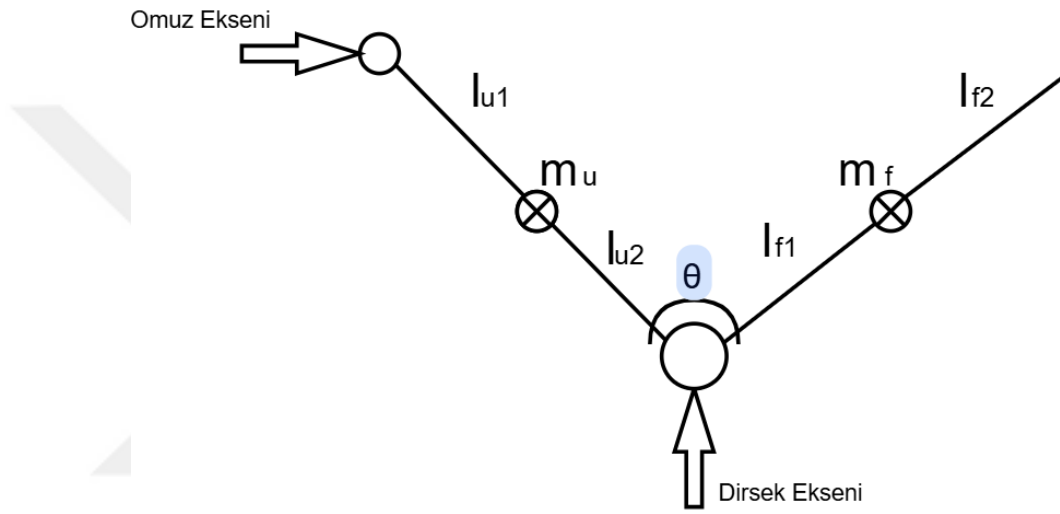
Şekil 3.2’de geliştirilen dış iskelet sistemine ait temel geometrik modelleme sunulmaktadır. Modelde, ilk uzuv olan omuzdan dirseğe kadar uzanan segment u ile, ikinci uzuv olan dirsekten bileğe kadar olan ön kol bölgesi ise f ile temsil edilmiştir. Kinematik modelde üst ekstremite, yatay düzlemde hareket etmekte olup, bu modelleme yaklaşımı dirsek eksenini etrafında tek eksenli bir döner hareketin (fleksiyon/ekstansiyon) gerçekleştiğini varsayar.

Bu kısıtlı yapı, modelin sadeleştirilerek yalnızca dirsek eklemi üzerinden tanımlanan bir serbestlik derecesiyle (1-DoF) analiz edilmesine imkân sağlar. Modelde, ϕ açısı, dirsekten itibaren ön kolün üst kola göre yaptığı açısal hareketi ifade etmekte olup, bu açı sayesinde sistemin x-y düzlemi üzerindeki doğrultusu tanımlanabilmektedir.

Şekil 3.3’te kısıtlanmış model gösterilmektedir. Model üzerinde kütle merkezleri ve yöneltilmiş bağlantılar da gösterilmiştir. Burada:

- l_{u1} ve l_{u2} , omuzdan dirseğe kadar olan üst kol segmentinin başlangıç ve bitiş noktalarını,
- l_{f1} ve l_{f2} , dirsek ile bilek eklemi arasındaki ön kol segmentini,
- m_u ve m_f , sırasıyla üst kol ve ön kolün kütlelerini (her biri segmentin orta noktasında konumlanmış kabul edilmektedir)

göstermektedir.



Şekil 3.3 : Kısıtlanmış Model

Bu modelleme, hem dış iskeletin biyomekanik uyumunu değerlendirmek hem de kontrolcü tasarımı için gerekli fiziksel parametrelerin belirlenmesini sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

Dirsek eklemine uygulanan momentler ve sistem dinamikleri, aşağıdaki biçimde matematiksel olarak modellenmiştir ve Denklem 3.5'te gösterilmektedir.

$$J(\ddot{\phi}) + C(\dot{\phi}) + Fh(\dot{\phi}) + Gh(\phi) = g(\phi) - hh \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'de yer alan terimlerden J , sistemin açısal ivmesine karşı gösterdiği direnci temsil eden atalet momenti; C , açısal hıza bağlı olarak oluşan Coriolis ve merkezkaç etkilerini ifade etmektedir. Fh , dirsek eklemine meydana gelen viskoz sürtünme kuvveti bileşenini; Gh ise açısal pozisyona bağlı olarak etkili olan yerçekimsel moment bileşenini göstermektedir. Son olarak, hh , dışarıdan uygulanan harici kuvvet ya da tork girdisini temsil etmektedir (Kutlu, 2017).

Dış iskelet modeli ile kısıtlanmış insan kol modeli karşılaştırıldığında, her iki yapının tanımladığı dirsek eklem açısı arasında kabul edilebilir düzeyde farklar tespit edilmiştir. Kısıtlanmış kol modelinde dirsek hareketi açısı ϕ ile ifade edilirken, dış iskelet modelinde aynı açısal hareket θ ile tanımlanmıştır. Bu iki parametre arasındaki farkı sınırlı ve izlenebilir tutmak amacıyla, modelleme sürecinde her iki sistemin dinamik davranışlarını ilişkilendiren bir haritalama fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu sayede insan biyomekaniği ile robotik dış iskelet arasındaki uyum dinamik olarak kurulmuş ve birleşik kontrol altyapısı mümkün hâle getirilmiştir.

Bu ilişkinin matematiksel olarak ifade edildiği denklem 3.6 aşağıda verilmiştir.

$$J(\theta) + C(\theta) + F(\theta) + G(\theta) + K(\theta) = -h \quad (3.6)$$

Modelleme kapsamında ϕ ile θ açıları arasında çift yönlü haritalama (bi-directional mapping) kurulmuş olup, bu yaklaşım insan-kontrolüyle çalışan dış iskelet sisteminin birleşik model altında senkronize şekilde çalışmasını mümkün kılmaktadır.

3.2. Kontrolcü Tasarımı

Bu bölümde, rehabilitasyon amaçlı geliştirilen dış iskelet sistemine entegre edilmek üzere, tekrarlamalı öğrenmeye dayalı bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirilecektir. Tasarlanacak kontrol yapısı, kullanıcının biyomekanik hareketlerine uyum sağlayacak şekilde sürekli geri besleme alarak performans iyileştirmeyi hedeflemekte ve rehabilitasyon süreciyle senkronize çalışacak şekilde yapılandırılacaktır.

3.2.1. Tekrarlamalı öğrenmeli kontrolör tasarımı

Tekrarlamalı öğrenmeli kontrol (ILC), sınırlı bir zaman aralığında aynı hareketi defalarca tekrar eden sistemler için geliştirilen özel bir kontrol yöntemidir. Rehabilitasyon sistemlerinde bu yöntem, kullanıcı tarafından her egzersiz periyodunda tekrar edilen hareketlerin performansını iyileştirmek amacıyla kullanılır. ILC sisteminin en önemli özelliği, sistem dinamiklerine ilişkin doğrudan bilgiye ihtiyaç duymadan yalnızca geçmiş denemelerdeki çıkış ve hata değerlerini kullanarak öğrenme gerçekleştirmesidir.

Bu çalışmada kullanılan ILC yapısı, basit yapısı ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle tercih edilmiştir. Bu yapıda sistem, her iterasyonda önceki periyotta oluşan hata bilgilerini

bellekte saklar ve bir sonraki iterasyonda bu hataları telafi etmeye çalışır. Her bir ILC döngüsü, sabit bir başlangıç kol konumuyla başlatılır ve her yeni tekrarda sistemin çıktısı, hata bilgisi yardımıyla güncellenerek referans sinyale daha da yakınsar.

ILC'nin öğrenme mantığı Denklem 3.6 ile ifade edilmektedir.

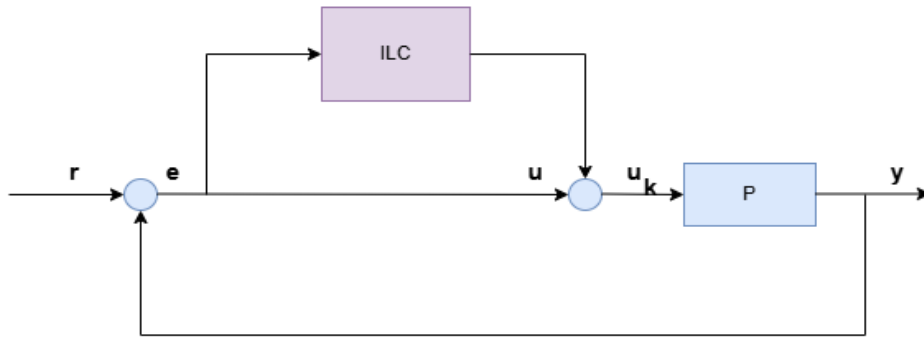
$$u_{k+1} = u_k + \gamma e \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'da ifade edilen u_k , iterasyonda sisteme uygulanan kontrol sinyalini göstermektedir. Bu sinyal, önceki tekrarın sonucuna göre belirlenmektedir. Denklemde yer alan γ , sistemin referans sinyale yakınsama hızını ve konum hatası düzeyini doğrudan etkileyen öğrenme kazancıdır. Skaler bir katsayı olan bu değer, genellikle $0 < \gamma < 1$ aralığında seçilir.

Öğrenme kazancının değeri, sistemin yakınsama davranışını etkiler: $\gamma \rightarrow 0$ olduğunda sistem daha yavaş yakınsar, ancak öğrenme süreci daha karardır ve hata salınımları düşüktür. $\gamma \rightarrow 1$ yaklaştığında sistem hızlı öğrenir, ancak hata büyüklüklerinde artış ve kararsızlık riski ortaya çıkabilir.

Yeni iterasyonda sisteme uygulanacak kontrol sinyali u_{k+1} , Denklem 3.6'da verildiği gibi $u_{k+1} = u_k + \gamma \cdot e$

Bu formül, bir önceki çıkış sinyali u_k ile bir önceki iterasyondaki hata e 'nin, öğrenme kazancı γ ile çarpılması ve toplanması esasına dayanır. Böylece sistem, seçilen öğrenme kazancına bağlı olarak referans sinyale doğru yavaş veya hızlı şekilde yakınsayan bir davranış sergiler. Şekil 3.4'te ILC blok diyagramı gösterilmektedir.



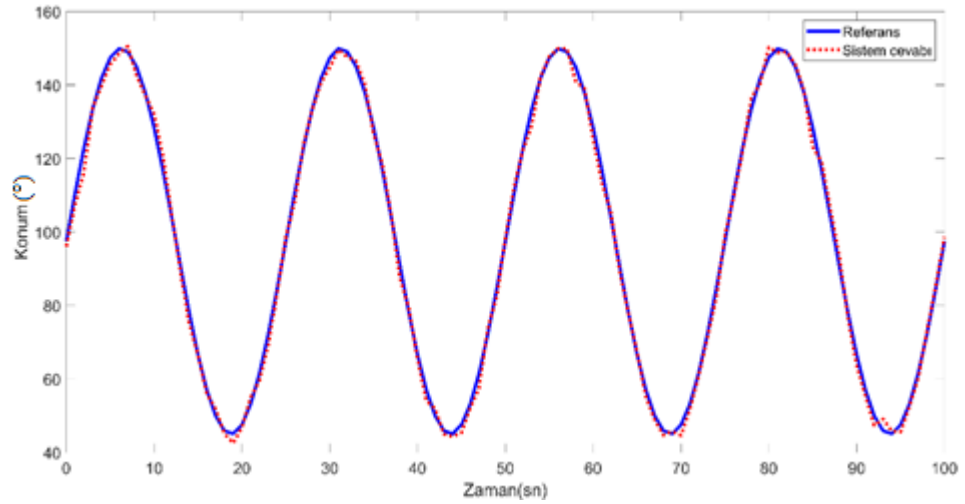
Şekil 3.4 : ILC Blok Diyagramı

Şekil 3.4'de sunulan blok diyagramında, ILC bloğu, sistem geçmişine ait çıkış ve hata değerlerini bellekte tutarak öğrenme güncellemesini sağlar. Her bir iterasyonda,

kontrolörün ürettiği sinyal ile ILC kontrol sinyali toplanarak yeni kontrol sinyali olan uk elde edilir ve bu değer doğrudan servo motora uygulanır. Bu yapı sayesinde hem anlık hata düzeltilmesi hem de geçmiş bilgiye dayalı öğrenme tek bir hibrit kontrol yapısında birleştirilmiş olur. ILC, sistemin önceki iterasyonlarda elde ettiği çıkış ve hata bilgilerini kullanarak kontrol performansını zamanla iyileştiren bir yöntemdir. Bu çalışmada kullanılan ILC yaklaşımı, temel olarak her yeni iterasyonda uygulanan kontrol sinyalinin, bir önceki kontrol sinyaline hata bilgisinin öğrenme kazancı ile çarpılarak eklenmesi prensibine dayanmaktadır. Denklem 3.6’da ifade edilen $uk+1=uk+\gamma \cdot e$ formülü, bu güncelleme mekanizmasını tanımlamaktadır. Burada uk bir önceki kontrol sinyalini, e ilgili iterasyondaki hata değerini ve γ ise öğrenme kazancını temsil etmektedir. Sistemin bu yapı ile referans sinyale hızlı veya yavaş bir şekilde yakınsaması, seçilen γ parametresine bağlıdır. Şekil 3.4’te sunulan ILC blok diyagramı, kontrol sürecinin her iterasyonunda geçmiş çıkış ve hata bilgilerini bellekte tutarak, kontrol sinyalini güncellediğini göstermektedir. Bu güncellenmiş sinyal, klasik kontrolörün çıktısıyla toplanarak servo motora uygulanmakta; böylece hem mevcut hata düzeltilmesi hem de geçmiş deneyime dayalı öğrenme, tek bir hibrit yapı içerisinde bütünleştirilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle tekrar eden görevlerde sistemin zamanla daha hassas ve kararlı bir yanıt üretmesini sağlamaktadır.

BÖLÜM 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

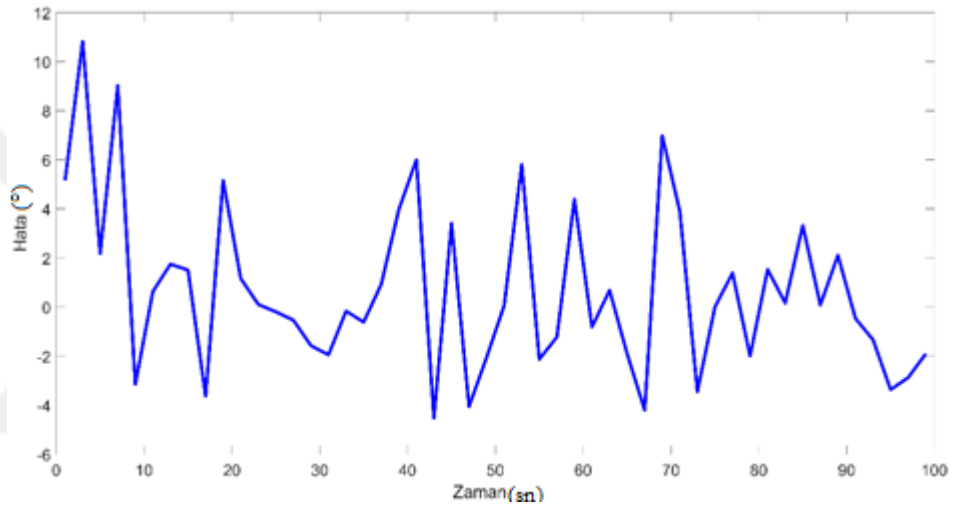
Bu çalışmada geliştirilen hibrit dış iskelet sisteminin tekrarlamalı öğrenme kontrolü (Iterative Learning Control – ILC) altında gösterdiği performans, referans sinyali takibi, hata sönümlenmesi ve tahmini kuvvet çıktıları bakımından çok boyutlu olarak değerlendirilmiştir. Sistem, biyomimetik prensiplere dayalı olarak oluşturulan sinüzoidal bir referans sinyalini izlemekle görevlendirilmiştir. Referans sinyali, 0–100 saniyelik zaman aralığında dört tam periyot içeren, tepe noktası 150° ve dip noktası 45° olan bir sinüs fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Bu sinyal, üst ekstremité eklem hareket açıklığı sınırlarında olacak şekilde belirlenmiş ve kullanıcının elini bir yörünge üzerinde sürekli olarak ekstansiyon–fleksiyon taşıyacak şekilde tanımlanmıştır. Bu sinyal, üst ekstremité rehabilitasyonunda sıklıkla karşılaşılan tekrarlayıcı kavrama ve uzanma hareketlerini temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 4.1’de cihazın referans sinyali ile sistemin hareket cevabının grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.1 : Sistem ILC Kontrolör Cevabı

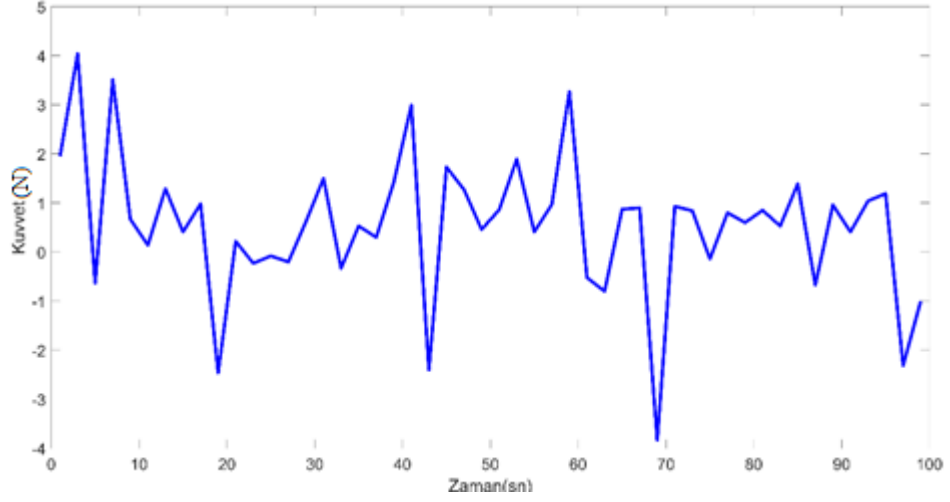
İlk 10 saniyelik süreçte elde edilen veriler, servo motorun başlangıçta referans sinyaline kıyasla düşük tepki verdiğini ve özellikle 0–3 saniye aralığında dikkat çeken bir gecikme ve bozulma yaşandığını göstermektedir. Bu durum, sistemin ilk öğrenme aşamasında

olduğunu ve kontrol algoritmasının hatayı minimize etme sürecine yeni başladığını ortaya koymaktadır. Buna rağmen 10. saniyeden itibaren gerçek sinyalin referans sinyale yakınsadığı gözlemlenmiş ve hem üst hem de alt tepe noktalarında (yaklaşık 150° ve 45°) daha iyi uyum sağlanmıştır. Gerçek sinyaldeki iyileşmenin en dikkat çekici olduğu kısım, her periyot içinde genliğin doğruluğunun artması ve zamanlama hatalarının azalmaya başlamasıdır. Öğrenme temelli kontrol sistemi sayesinde servo motorun her bir tekrar döngüsünde referans sinyale daha yakın hareket ettiği, böylece sistemin adaptif bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.2’de referans sinyali ile sistem cevabı arasındaki hatanın zamana bağlı değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : Zamana Bağlı Hata Değerleri

Elde edilen hata sinyali verileri ise sistemin ilk saniyelerde yaklaşık $\pm 10^\circ$ 'lik dalgalı bir sapma gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu hata değeri, özellikle başlangıçta daha yüksek olmakla birlikte, zamanla sönümlenerek $\pm 5^\circ$ altına düşmektedir. Bu durum, ILC algoritmasının öğrenme mekanizmasının etkili çalıştığını ve hata bileşenlerinin tekrar eden görevler üzerinden giderek azaldığını göstermektedir. Elde edilen bu eğilim, sistemin kararlılığının artmakta olduğunu ve uzun vadede daha hassas bir kontrol performansına ulaşabileceğini desteklemektedir. Şekil 4.3’te terapi esnasında referans sinyali takip eden sistemin(dış iskeletin) kol üzerinde oluşturduğu kuvvet değerleri (N) gösterilmektedir.



Şekil 4.3 : Terapi Esnasında Oluşan Kuvvet Değerleri

Buna karşılık oluşturulan kuvvet sensör verileri, hata büyüklüğüyle doğrusal orantılı olacak şekilde modellenmiştir. Başlangıçta büyük hata değerleri nedeniyle sensör tepkisi yüksek olmuş, ancak zaman içinde hata küçüldükçe bu değerler de sönümlenmiştir. Bu bağlamda, sistemin kullanıcıya uyguladığı destekleyici kuvvetin giderek azaldığı ve doğal harekete geçişin sağlandığı sonucuna ulaşılmıştır. Kuvvet çıktılarındaki bu azalma, rehabilitasyon uygulamalarında istenilen bir durum olup, hastanın kendi motor becerilerini aktif kullanabilmesine olanak sağlamaktadır.

Şekil 4.4'te, geliştirilen biyomimetik dış iskelet sisteminin nihai prototipine ait genel görünümü yansıtmaktadır. Görselde, servo motor entegreli mekanizma, kullanıcıyı destekleyen yapısal çerçeve ve biyomimetik döküm teknolojisiyle üretilmiş maça bileşenleri net şekilde izlenebilmektedir. Ergonomik tasarım ilkeleri doğrultusunda şekillendirilen sistem, kullanıcı koluna uyum sağlayacak biçimde yerleştirilen bağlantı noktaları ve hareketli eklemler aracılığıyla yüksek biyomekanik uyumluluk sunmaktadır. Ayrıca sistemin kompakt yapısı, hem taşınabilirlik hem de bireysel kullanım kolaylığı açısından avantaj sağlamaktadır. Şekilde yer alan düzenek, iteratif öğrenme tabanlı kontrol algoritmasının uygulandığı yapısal platformu temsil etmekte olup, tasarımın işlevsel, kullanıcı dostu ve düşük ağırlıklı bir rehabilitasyon çözümü sunma hedeflerini görsel olarak desteklemektedir.



Şekil 4.4 : Sistemin Test Düzenegi

Elde edilen tüm veriler, servo motor destekli ILC algoritmasının tekrarlayıcı referans sinyali başarıyla öğrenerek kontrol doğruluğunu artırdığını, sistemin zamanla daha az kuvvetle daha hassas hareket gerçekleştirebildiğini ve bu özelliklerin biyomimetik rehabilitasyon uygulamaları açısından yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada geliştirilen 750 gram ağırlığa sahip hafif yapılı ve giyilebilir dış iskelet sisteminin, üst ekstremitte rehabilitasyonuna uygun olarak tasarlanmış referans hareketleri izleme performansı ILC algoritması ile değerlendirilmiştir. Geliştirilen sistemde sinüzoidal formda, 0–100 saniye arasında 4 periyot içeren, tepe değeri 150° ve dip değeri 45° olan bir referans sinyali kullanılmış, bu sinyal insan dirseğini modelleyebilecek biyomekanik uyumlulukta tasarlanmıştır. Bu özellikleriyle sinyal, literatürde üst ekstremitte rehabilitasyon hareketlerinde yaygın olarak kullanılan tekrarlayan fleksiyon-ekstansiyon yönündeki hareketlere benzemektedir (Vanderniepen ve diğerleri, 2009). Kontrol algoritması olarak uygulanan ILC, kullanıcının hareket paternini öğrenerek her iterasyonda hata seviyesini azaltma esasına dayanmakta ve bu sayede tekrarlayan hareketlerin hassas izlenmesini sağlamaktadır. Bulgular, sistemin ilk 10 saniyede “geçici rejim” olarak tanımlanabilecek bir uyum sürecine sahip olduğunu, ancak sonraki zaman dilimlerinde referans sinyali yaklaşık $\pm 5^\circ$ hassasiyetle izleyebildiğini ortaya koymuştur. Bu durum, literatürde Mita ve ark. tarafından geliştirilen kas tonusu uyarlamalı hibrit kontrol stratejilerindeki erken yanıt bulgularıyla uyumludur (Mita ve diğerleri, 2022). Ancak elde edilen grafiksel bulgular, sistemin tepe ve dip noktalarında (maksimum ve minimum konumlarda) doygunluk benzeri bozulmalar sergilediğini göstermiştir. Bu

durum, servo motorun mekanik sınırları, çıkış tork limitleri ya da geri besleme hassasiyeti ile ilişkili olabilir. Lee ve ark. tarafından raporlanan DSL tabanlı kontrol yaklaşımında da benzer kararlılık analizleri yapılmış ve tepe noktalarındaki sistem hassasiyetinin kritik olduğu gözlemlenmiştir (Lee ve diğerleri 2012).

Bu çalışmanın farklılaştığı noktalardan biri, klasik PID kontrolcüler yerine, öğrenmeye dayalı bir yapının uygulanmasıdır. ILC kullanılarak sistemin performansı, her tekrarda daha stabil ve uyumlu hale gelmiş, bu da rehabilitasyon süreci boyunca hastanın bireysel ilerlemesine uygun dinamik bir destek sağlamıştır. Randazzo ve ark. tarafından EEG tabanlı robotik yardım uygulamalarında vurgulanan kişiselleştirilmiş kontrol ihtiyacı, bu çalışmada uygulanan ILC yapısı ile desteklenmektedir (Randazzo ve diğerleri, 2018). Cihazın yalnızca 750 gramlık ağırlığa sahip olması, Vanderniepen ve ark. tarafından geliştirilen sistemlere göre daha taşınabilir ve kullanıcı dostu bir alternatif sunmasını sağlamaktadır. Özellikle ev tipi rehabilitasyon uygulamalarında kullanılabilirliği artıran bu tasarım, Durandau ve ark. tarafından vurgulanan bireye özgü destek seviyelerinin uyarlanması konusundaki yaklaşımlarla örtüşmektedir (Vanderniepen ve diğerleri, 2009; Durandau ve diğerleri, 2022). Farklılaştığı bir diğer nokta, bu çalışmada cihaz tasarımı biyomimetik bir yaklaşımla şekillendirilmiştir. Özellikle bal peteği yapısından ilham alınarak geliştirilen mekanik form, hem yapısal dayanımı artırmakta hem de cihazın ağırlığını minimize etmektedir. Literatürde biyomimetik tasarımın, dış iskelet sistemlerinde konfor ve kullanıcı kabulünü artırdığı vurgulanmıştır (Silva ve diğerleri, 2023; Yadav, 2024). Bu çalışmadaki bal peteği tabanlı yapı da benzer biçimde, ergonomik ve doğal harekete uyumlu bir yapı sunarak kullanıcıyla etkileşimi iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Özellikle rehabilitasyon uygulamalarında biyomimetik yöntemler, doğal yörünge planlaması ve biyomekanik uyum açısından önem arz etmektedir (Xie ve diğerleri, 2021; Bonnechère, 2024).

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu makalede, biyomimetik tasarım ilkelerine dayalı olarak geliştirilen ve tekrarlamalı öğrenme kontrolü (Iterative Learning Control – ILC) ile desteklenen üst ekstremite dış iskelet sisteminin kontrol performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Özellikle, sinüzoidal yapıdaki tekrarlayıcı referans sinyalleri temelinde yapılan analizler, sistemin hem yapısal hem de algoritmik olarak rehabilitasyon uygulamaları için uygunluğunu ortaya koymaktadır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, servo motorların ilk periyotlarda referans sinyali izlemekte zorlandığını, ancak ILC algoritmasının öğrenme kabiliyeti sayesinde sonraki döngülerde referans sinyale başarıyla yakınsadığını göstermiştir. Özellikle sistemin 10. saniyeden sonra hatayı belirgin şekilde azaltarak hedef hareketi daha hassas ve dengeli biçimde tekrar edebildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, ILC algoritmasının sistem dinamiklerine uyum sağladığını ve zaman içinde kontrol başarımını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır. Referans ve gerçek sinyal arasındaki hata analizi, sistemin başlangıçta $\pm 10^\circ$ seviyelerinde sapmalar gösterdiğini ancak bu değerlerin ilerleyen süreçte $\pm 5^\circ$ altına düştüğünü kanıtlamaktadır. Bu sonuç, dış iskeletin rehabilitasyon sürecinde doğal ve güvenli hareketi destekleyebilecek yeterlilikte bir izleme performansına ulaştığını göstermektedir. Hata sinyalinin zamanla sönümlenmesi, sadece algoritmanın başarısını değil aynı zamanda sistemin kararlılığını da işaret etmektedir. Ek olarak, simüle edilen kuvvet sensör verileri, sistemin kontrol hatasına bağlı olarak uyguladığı destekleyici kuvvetin zaman içinde azaldığını ve böylece kullanıcıya bağımsız hareket alanı sunduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, rehabilitasyonun temel hedeflerinden biri olan motor kontrolün geri kazanılması açısından oldukça olumlu bir göstergedir. Kullanıcıya uygulanan kuvvetin, hatanın azalmasıyla birlikte düşmesi, sistemin fazla müdahaleci olmadan gerektiği kadar destek sağladığını göstermektedir.

Çalışma kapsamında biyomimetik döküm teknolojileriyle tasarlanan kol dış iskelet sistemine entegre edilen servo motor destekli iteratif öğrenme tabanlı kontrol algoritması,

rehabilitasyon süreçlerinde kullanıcıya özgü hareket kalıplarını zamanla öğrenerek yüksek düzeyde bireysel uyum sağlamıştır. Deneysel bulgular, sistemin her tekrar döngüsünde referans sinyale daha yakın hareket ettiğini, hata oranlarının belirgin şekilde azaldığını ve kontrol doğruluğunun istikrarlı biçimde arttığını göstermiştir. Özellikle genlik ve zamanlama doğruluğundaki gelişmeler, kullanıcının doğal hareket desenine uyumun güçlendiğini ortaya koymaktadır. Kuvvet sensörü verilerinin zamanla azalan destekleyici tepki üretmesi ise, sistemin dışsal yardımı giderek azaltarak kullanıcının aktif motor katılımını teşvik ettiğini ve bu yönüyle terapötik etkinliği artırdığını göstermektedir. Bu sonuçlar, geliştirilen sistemin hem kullanıcıya özgü adaptif hareket desteği sağladığını hem de nöroplastisiteyi destekleyen aktif rehabilitasyon yaklaşımlarına uygun bir platform sunduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen dış iskelet sisteminin:

- Hafif, biyomimetik döküm yapısıyla mekanik uyumu sağladığı,
- ILC algoritması sayesinde zaman içinde öğrenerek kontrol başarımını artırdığı,
- Hata sönümlenme ve destek kuvvetini azaltma gibi önemli kontrol başarımlarını gerçekleştirdiği tespit edilmiştir.

Bu çalışma, özellikle felç sonrası motor beceri geri kazanımına odaklanan üst ekstremité rehabilitasyon süreçlerinde kullanılabilir düşük maliyetli, kullanıcı dostu ve etkili bir sistemin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarla, sistemin çok eklemlili yapıya uyarlanması, farklı hareket senaryoları ile test edilmesi ve klinik ortamda doğrulanması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Alshahrani, Y., Zhou, Y., Chen, C., Joines, H., Tao, T., Xu, G., ... & Lemos, S. (2021). Performance validation of an upper limb exoskeleton using joint rom signal. *Archives of Orthopaedics*, 2(1). <https://doi.org/10.33696/orthopaedics.2.022>
- Bai, B., Hao, J., Hou, M., Wang, T., Wu, X., Liu, Y., ... & Zhou, G. (2022). Repair of large-scale rib defects based on steel-reinforced concrete-designed biomimetic 3D-printed scaffolds with bone-mineralized microenvironments. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(37), 42388-42401.
- Bonnechère, B. (2024). Animals as architects: building the future of technology-supported rehabilitation with biomimetic principles. *Biomimetics*, 9(12), 723. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9120723>
- Chae, S. H., Kim, Y., Lee, K., & Park, H. (2020). Development and clinical evaluation of a web-based upper limb home rehabilitation system using a smartwatch and machine learning model for chronic stroke survivors: Prospective comparative study. *JMIR mHealth and uHealth*, 8(7), e17216. <https://doi.org/10.2196/17216>
- Chen, C., Lien, W., Chen, C., & Wu, Y. (2020). Implementation of an upper-limb exoskeleton robot driven by pneumatic muscle actuators for rehabilitation. *Actuators*, 9(4), 106. <https://doi.org/10.3390/act9040106>
- Duan, F., Lv, Y., Sun, Z., & Li, J. (2022). Multi-scale learning for multimodal neurophysiological signals: Gait pattern classification as an example. *Neural Processing Letters*, 54(3), 2455–2470. <https://doi.org/10.1007/s11063-021-10738-w>
- Duret, C., Courtial, O., Grosmaire, A., & Hutin, É. (2015). Use of a robotic device for the rehabilitation of severe upper limb paresis in subacute stroke: Exploration of patient/robot interactions and the motor recovery process. *BioMed Research International*, 2015, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2015/482389>
- Durandau, G., Rampeltshammer, W., van der Kooij, H., & Sartori, M. (2022). Neuromechanical model-based adaptive control of bilateral ankle exoskeletons: Biological joint torque and electromyogram reduction across walking conditions. *IEEE Transactions on Robotics*, 38(3), 1380–1394. <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3170239>
- Ersin, Ç., & Yaz, M. (2024). Implementation and comparison of wearable exoskeleton arm design with fuzzy logic and machine learning control. *Journal of Sensors*, 2024, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2024/6808322>
- Fahr, A., Keller, J. W., & van Hedel, H. J. A. (2020). A systematic review of training methods that may improve selective voluntary motor control in children with spastic cerebral palsy. *Frontiers in Neurology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.572038>
- Gomes, L. C., Saubade, F., Amin, M., Spall, J., Liauw, C. M., Mergulhão, F., & Whitehead, K. A. (2023). A comparison of vegetable leaves and replicated

- biomimetic surfaces on the binding of escherichia coli and listeria monocytogenes. *Food and Bioproducts Processing*, 137, 99-112.
- Gonen, M., & Kasem, H. (2023). Effect of the mechanical properties of soft counter-faces on the adhesive capacity of mushroom-shaped biomimetic microstructures. *Biomimetics*, 8(3), 327.
- Gupta, A., & O'Malley, M. K. (2004). Design of a haptic arm exoskeleton for training and rehabilitation. *Dynamic Systems and Control, Parts A and B*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2004-59353>
- Heydari, P., Zargar Kharazi, A., & Shariati, L. (2024). Enhanced wound regeneration by PGS/PLA fiber dressing containing platelet-rich plasma: an in vitro study. *Scientific Reports*, 14(1), 12019.
- Huang, B., Li, Z., Wu, X., Ajoudani, A., Bicchi, A., & Liu, J. (2019). Coordination control of a dual-arm exoskeleton robot using human impedance transfer skills. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 49(5), 954–963. <https://doi.org/10.1109/tsmc.2017.2706694>
- Hu, Z., Wang, J., Wang, Y., Wang, C., Wang, Y., Zhang, Z., ... & Xu, M. (2021). A robust and wearable triboelectric tactile patch as intelligent human-machine interface. *Materials*, 14(21), 6366. <https://doi.org/10.3390/ma14216366>
- Hyakutake, K., Morishita, T., Saita, K., Fukuda, H., Shiota, E., Higaki, Y., ... & Uehara, Y. (2019). Effects of home-based robotic therapy involving the single-joint hybrid assistive limb robotic suit in the chronic phase of stroke: A pilot study. *BioMed Research International*, 2019, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2019/5462694>
- Kim, S., Kim, Y., Koo, S., Park, H., & Yoon, Y. (2023). Effects of therapist intervention during upper-extremity robotic rehabilitation in patients with stroke. *Healthcare*, 11(10), 1369. <https://doi.org/10.3390/healthcare11101369>
- Klang, K., & Nickel, K. G. (2021). The plant-like structure of lance sea urchin spines as biomimetic concept generator for freeze-casted structural graded ceramics. *Biomimetics*, 6(2), 36.
- Kocaoğlu, S., & Akdoğan, E. (2015). Üst Uzuv Dış İskelet Rehabilitasyon Robotları. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK*, 10–12.
- Koginov, G., Sternberg, K., Wolf, P., Schmidt, K., Duarte, J. E., & Riener, R. (2022). An algorithm to reduce human–robot interface compliance errors in posture estimation in wearable robots. *Wearable Technologies*, 3. <https://doi.org/10.1017/wtc.2022.29>
- Kutlu, M. C. (2017). *A home-based functional electrical stimulation system for upper-limb stroke rehabilitation* (Doctoral dissertation, University of Southampton).
- Langerak, A. J., Regterschot, G. R. H., Selles, R. W., Meskers, C. G. M., Evers, M., Ribbers, G. M., ... & Bussmann, J. B. J. (2023). Requirements for home-based upper extremity rehabilitation using wearable motion sensors for stroke patients: A user-centred approach. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 19(4), 1392–1404. <https://doi.org/10.1080/17483107.2023.2183993>
- Lee, B. K., Lee, H. D., Lee, J. Y., Shin, K., Han, J. S., & Han, C. S. (2012, May). Development of dynamic model-based controller for upper limb exoskeleton robot. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3173–3178. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224663>
- Lee, K. W., Kim, S. B., Lee, J. H., Lee, S. J., & Yoo, S. W. (2016). Effect of upper extremity robot-assisted exercise on spasticity in stroke patients. *Annals of Rehabilitation Medicine*, 40(6), 961. <https://doi.org/10.5535/arm.2016.40.6.961>

- Lee, M., Lee, J., & Lee, S. M. (2018). Effects of robot-assisted therapy on upper extremity function and activities of daily living in hemiplegic patients: A single-blinded, randomized, controlled trial. *Technology and Health Care*, 26(4), 659–666. <https://doi.org/10.3233/thc-181336>
- Libonati, F., Vellwock, A. E., Ielmini, F., Abliz, D., Ziegmann, G., & Vergani, L. (2019). Bone-inspired enhanced fracture toughness of de novo fiber reinforced composites. *Scientific reports*, 9(1), 3142.
- Liu, F., Yang, H., & Feng, X. (2023). Research progress in preparation, properties and applications of biomimetic organic-inorganic composites with “brick-and-mortar” structure. *Materials*, 16(11), 4094.
- Liu, J., Kang, S. H., Xu, D., Ren, Y., Lee, S. J., & Zhang, L. (2017). EMG-based continuous and simultaneous estimation of arm kinematics in able-bodied individuals and stroke survivors. *Frontiers in Neuroscience*, 11, Article 480. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00480>
- Liu, Q., Liu, Z., Xu, Y., Liu, L., Wang, F., Zhao, F., ... & Hu, X. (2025). Comparative efficacy of robot-assisted therapy associated with other different interventions on upper limb rehabilitation after stroke: A protocol for a network meta-analysis. *PLOS ONE*, 20(1), e0304322. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304322>
- Liu, Y., Li, X., Zhu, A., Zheng, Z., & Zhu, H. (2021). Design and evaluation of a surface electromyography-controlled lightweight upper arm exoskeleton rehabilitation robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 18(3). <https://doi.org/10.1177/17298814211003461>
- Lülsdorff, K., Junker, F. B., Studer, B., Wittenberg, H. R., Pickenbrock, H., & Schmidt-Wilcke, T. (2023). Neurorehabilitation of the upper extremity – immersive virtual reality vs. robot-assisted training: a comparative study. *medrxiv*. <https://doi.org/10.1101/2023.09.19.23295411>
- Maceira-Elvira, P., Popa, T., Schmid, A., & Hummel, F. C. (2019). wearable technology in stroke rehabilitation: towards improved diagnosis and treatment of upper-limb motor impairment. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0612-y>
- Milot, M., Spencer, S. J., Chan, V., Allington, J., Klein, J., Chou, C., ... & Reinkensmeyer, D. J. (2013). A crossover pilot study evaluating the functional outcomes of two different types of robotic movement training in chronic stroke survivors using the arm exoskeleton bones. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 10(1), 112. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-112>
- Mita, M., Suzumori, K., Kudo, D., Saito, K., Chida, S., Hatakeyama, K., ... & Miyakoshi, N. (2022). Utility of a wearable robot for the fingers that uses pneumatic artificial muscles for patients with post-stroke spasticity. *Japanese Journal of Comprehensive Rehabilitation Science*, 13, 12–16. <https://doi.org/10.11336/jjcrs.13.12>
- Molteni, F., Gasperini, G., Cannaviello, G., & Guanzioli, E. (2018). Exoskeleton and end-effector robots for upper and lower limbs rehabilitation: narrative review. *PM&R*, 10(9S2). <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2018.06.005>
- Nam, H. S., Seo, H. G., Leigh, J., Kim, Y. J., Kim, S., & Bang, M. S. (2019). External robotic arm vs. upper limb exoskeleton: what do potential users need? *Applied Sciences*, 9(12), 2471. <https://doi.org/10.3390/app9122471>
- Nes, I. J. W. van, Dijsseldonk, R. B. van, Herpen, F. H. van, Rijken, H., Geurts, A. C. H., & Keijsers, N. (2022). Improvement of quality of life after 2-month exoskeleton

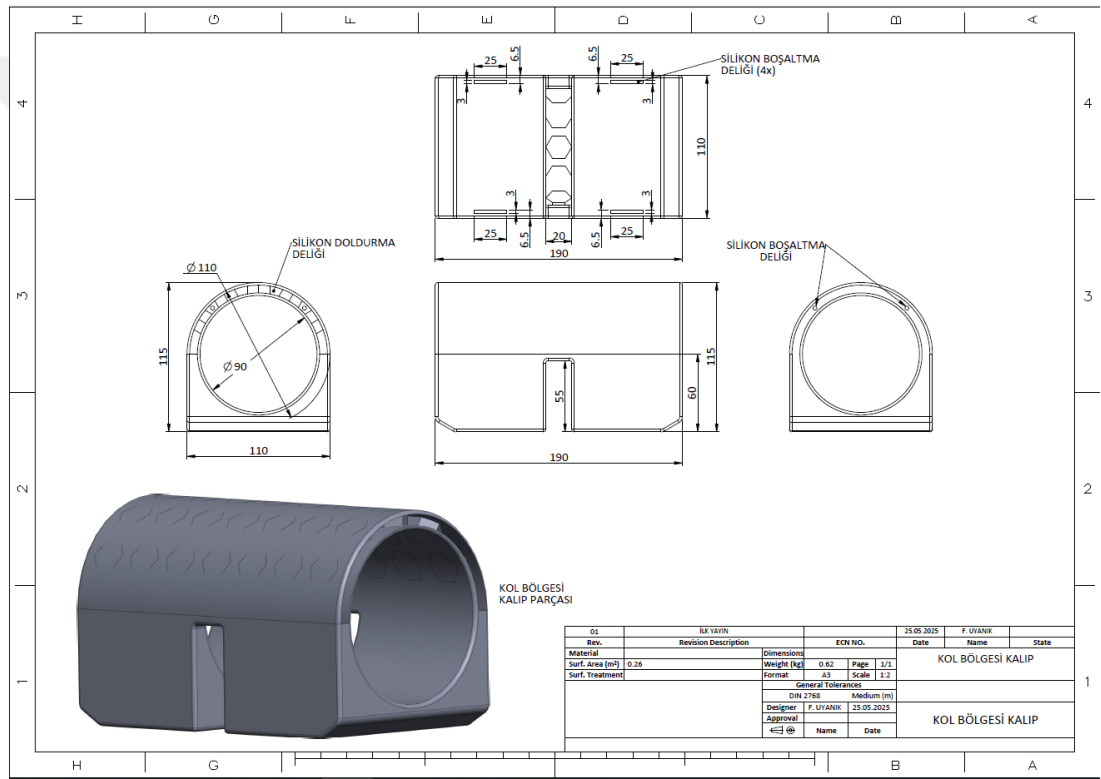
- training in patients with chronic spinal cord injury. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, 47(3), 354–360. <https://doi.org/10.1080/10790268.2022.2052502>
- Ochoa-Luna, C., Rahman, M. H., Saad, M., Archambault, P. S., & Zhu, W. (2014). Virtual decomposition control of an exoskeleton robot arm. *Robotica*, 34(7), 1587–1609. <https://doi.org/10.1017/s026357471400246x>
- Pacifico, I., Scano, A., Guanziroli, E., Moisè, M., Morelli, L., Chiavenna, A., ... & Crea, S. (2020). An experimental evaluation of the Proto-Mate: A novel ergonomic upper-limb exoskeleton to reduce workers' physical strain. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 27(1), 54–65. <https://doi.org/10.1109/mra.2019.2954105>
- Pei, N., Hao, Z., Wang, S., Pan, B., Fang, A., Kang, J., ... & Wang, L. (2021). 3D printing of layered gradient pore structure of brain-like tissue. *International Journal of Bioprinting*, 7(3), 359.
- Piña-Martínez, E., Roberts, R., Leal-Merlo, S., & Rodriguez-Leal, E. (2018). Vision system-based design and assessment of a novel shoulder joint mechanism for an enhanced workspace upper limb exoskeleton. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2018, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2018/6019381>
- Poli, P., Morone, G., Rosati, G., & Masiero, S. (2013). Robotic technologies and rehabilitation: New tools for stroke patients' therapy. *BioMed Research International*, 2013, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2013/153872>
- Prange, G. B., Jannink, M., Groothuis-Oudshoorn, C. G. M., Hermens, H., & IJzerman, M. J. (2006). Systematic review of the effect of robot-aided therapy on recovery of the hemiparetic arm after stroke. *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, 43(2), 171–184. <https://doi.org/10.1682/jrrd.2005.04.0076>
- Raheem, A. A., Hameed, P., Whenish, R., Elsen, R. S., Jaiswal, A. K., Prashanth, K. G., & Manivasagam, G. (2021). A review on development of bio-inspired implants using 3D printing. *Biomimetics*, 6(4), 65.
- Rahman, M. H., Saad, M., Kenné, J., & Archambault, P. S. (2010). Modeling and development of an exoskeleton robot for rehabilitation of wrist movements. *2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/AIM.2010.5695839>
- Randazzo, L., Iturrate, I., Perdakis, S., & Millán, J. d. R. (2018). MANO: A wearable hand exoskeleton for activities of daily living and neurorehabilitation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(1), 500–507. <https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2771329>
- Ranzani, R., Lamercy, O., Metzger, J., Califfi, A., Regazzi, S., Dinacci, D., ... & Gassert, R. (2020). Neurocognitive robot-assisted rehabilitation of hand function: A randomized control trial on motor recovery in subacute stroke. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00746-7>
- Reis, S. B., Bernardo, W. M., Oshiro, C. A., Krebs, H. I., & Conforto, A. B. (2021). Effects of robotic therapy associated with noninvasive brain stimulation on upper-limb rehabilitation after stroke: Systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 35(3), 256–266. <https://doi.org/10.1177/1545968321989353>
- Ren, Y., Kang, S. H., Park, H., Wu, Y., & Zhang, L. (2013). Developing a multi-joint upper limb exoskeleton robot for diagnosis, therapy, and outcome evaluation in neurorehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 21(3), 490–499. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2012.2225073>

- Rico, Z. P., Lucio, J. A. S. de, López, F. J., & Cruz-Alcántar, P. (2016). Design of an exoskeleton for upper limb robot-assisted rehabilitation based on co-simulation. *Journal of Vibroengineering*, *18*(5), 3269–3278. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.16857>
- Ripel, T., Krejsa, J., Hrbacek, J., & Cizmar, I. (2014). Active elbow orthosis. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *11*(9), 143. <https://doi.org/10.5772/58984>
- Rupal, B. S., Rafique, S., Singla, A., Singla, E., Isaksson, M., & Virk, G. (2017). Lower-limb exoskeletons. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *14*(6), 172988141774355. <https://doi.org/10.1177/1729881417743554>
- Rzyman, G., Szkopek, J., Redlarski, G., & Pałkowski, A. (2020). Upper limb bionic orthoses: General overview and forecasting changes. *Applied Sciences*, *10*(15), 5323. <https://doi.org/10.3390/app10155323>
- Serbest, K. (2017). *El kaslarının rehabilitasyonu için aktif dinamik el-el bileği ortezi tasarımı* (Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya).
- Shao, G., Hanaor, D. A., Shen, X., & Gurlo, A. (2020). Freeze casting: from low-dimensional building blocks to aligned porous structures—a review of novel materials, methods, and applications. *Advanced Materials*, *32*(17), 1907176.
- Shao, Z., Tang, X., & Yi, W. (2014). Optimal design of a 3-DOF cable-driven upper arm exoskeleton. *Advances in Mechanical Engineering*, *6*, 157096. <https://doi.org/10.1155/2014/157096>
- Silva, L. D. L. de, Pereira, T. F., Leithardt, V. R. Q., Seman, L. O., & Zeferino, C. A. (2020). Hybrid impedance-admittance control for upper limb exoskeleton using electromyography. *Applied Sciences*, *10*(20), 7146. <https://doi.org/10.3390/app10207146>
- Silva, R. C., Lourenço, B., Ulhoa, P. H. F., Dias, E. A. F., Cunha, F. L. de, Tonetto, C., ... & Andrade, R. M. (2023). Biomimetic design of a tendon-driven myoelectric soft hand exoskeleton for upper-limb rehabilitation. *Biomimetics*, *8*(3), 317. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8030317>
- Song, Q., Qin, Q., Suen, L. K. P., Liang, G., Qin, H., & Zhang, L. (2024). Effects of wearable device training on upper limb motor function in patients with stroke: A systematic review and meta-analysis. *Journal of International Medical Research*, *52*(10). <https://doi.org/10.1177/03000605241285858>
- Toh, S. F. M., González, P. C., & Fong, K. N. K. (2023). Usability of a wearable device for home-based upper limb telerehabilitation in persons with stroke: A mixed-methods study. *Digital Health*, *9*. <https://doi.org/10.1177/20552076231153737>
- Uğurlu, B., Oshima, H., Sarıyıldız, E., Narikiyo, T., & Babič, J. (2020). Active compliance control reduces upper body effort in exoskeleton-supported walking. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, *50*(2), 144–153. <https://doi.org/10.1109/thms.2019.2961969>
- Vanderniepen, I., Van Ham, R., Van Damme, M., Versluys, R., & Lefeber, D. (2009, June). Orthopaedic rehabilitation: A powered elbow orthosis using compliant actuation. In *2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics* (pp. 172–177). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2009.5209502>
- Vaughan-Graham, J., Brooks, D., Rose, L., Nejat, G., Pons, J. L., & Patterson, K. K. (2020). Exoskeleton use in post-stroke gait rehabilitation: A qualitative study of the perspectives of persons post-stroke and physiotherapists. *Journal of*

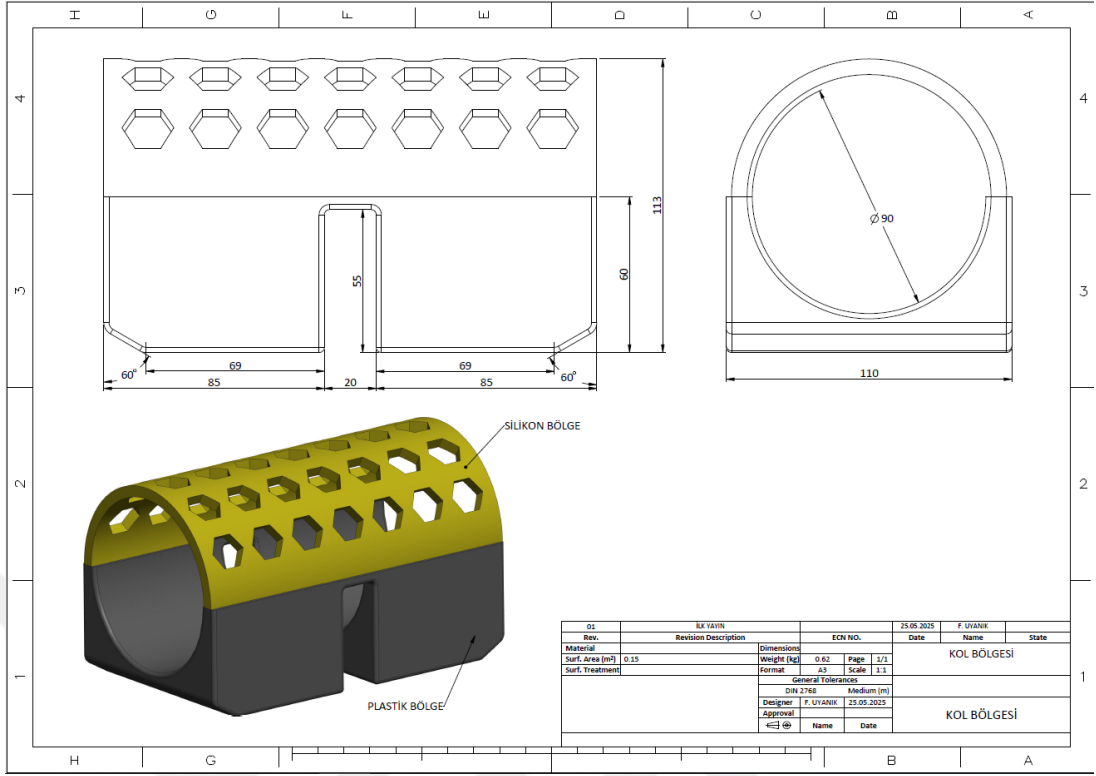
- NeuroEngineering and Rehabilitation*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00750-x>
- Wittmann, F., Held, J. P. O., Lamercy, O., Starkey, M. L., Curt, A., Höver, R., ... & Gonzenbach, R. (2016). Self-directed arm therapy at home after stroke with a sensor-based virtual reality training system. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-016-0182-1>
- Wu, Q., Wang, X., & Du, F. (2016). Development and analysis of a gravity-balanced exoskeleton for active rehabilitation training of upper limb. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 230(20), 3777–3790. <https://doi.org/10.1177/0954406215616415>
- Xie, Q., Meng, Q., Zeng, Q., Yu, H., & Shen, Z. (2021). An innovative equivalent kinematic model of the human upper limb to improve the trajectory planning of exoskeleton rehabilitation robots. *Mechanical Sciences*, 12(1), 661–675. <https://doi.org/10.5194/ms-12-661-2021>
- Yadav, T. (2024). Bio-inspired robotic exoskeletons with adaptive electrical control for enhanced upper extremity rehabilitation. *Journal of Electrical Systems*, 20(1s), 1023–1035. <https://doi.org/10.52783/jes.870>
- Ye, J., Zhou, X., Huang, Z., Zhang, X., Huang, W., Wu, B., & Zhou, H. (2024). Low-temperature-field-assisted fabrication of cross-scale tissue engineering scaffolds. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 7(2), 022011.
- Yurkewich, A., Kozak, I. J., Ivanović, A., Rossos, D., Wang, R. H., Hébert, D., ... & Mihailidis, A. (2020). Myoelectric untethered robotic glove enhances hand function and performance on daily living tasks after stroke. *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1177/2055668320964050>
- Zeng, Z., Wu, N., Liu, J., & Nyström, G. (2022). Mimicking biological architectures via freeze casting. *Matter*, 5(8), 2519-2522.
- Zhu, Y., Cui, J., & Zhao, J. (2013). Biomimetic design and biomechanical simulation of a 15-DOF lower extremity exoskeleton. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2013.6739614>

EKLER

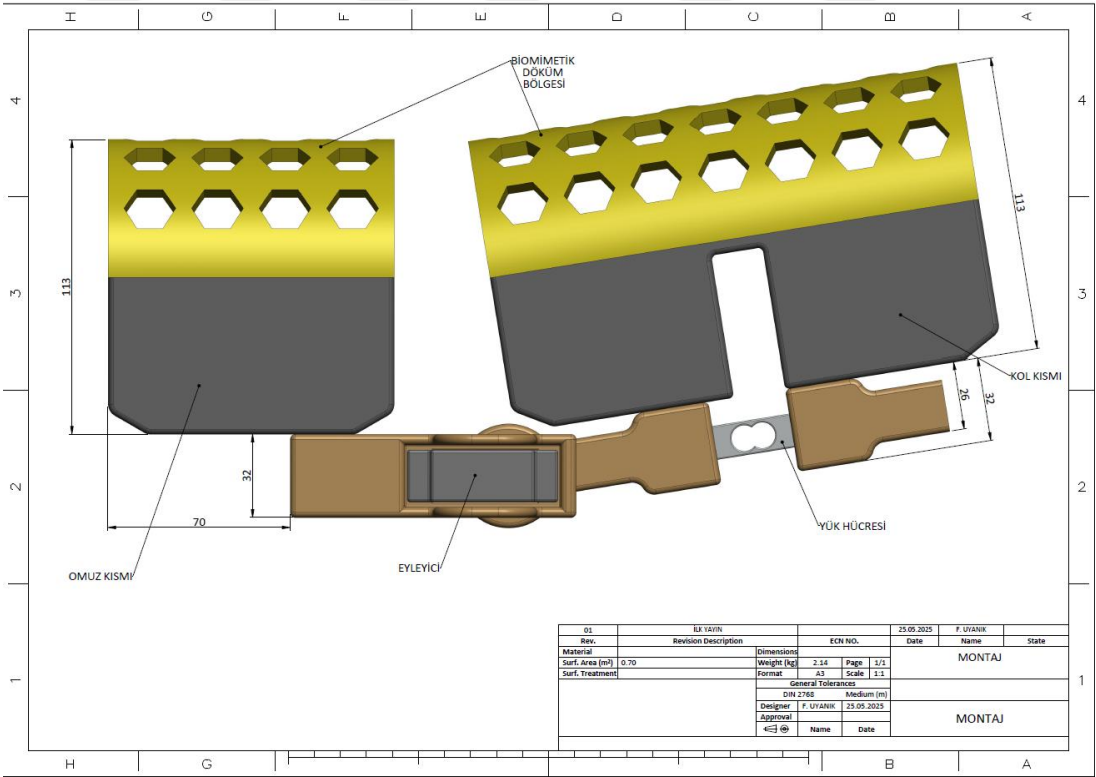
EK A:



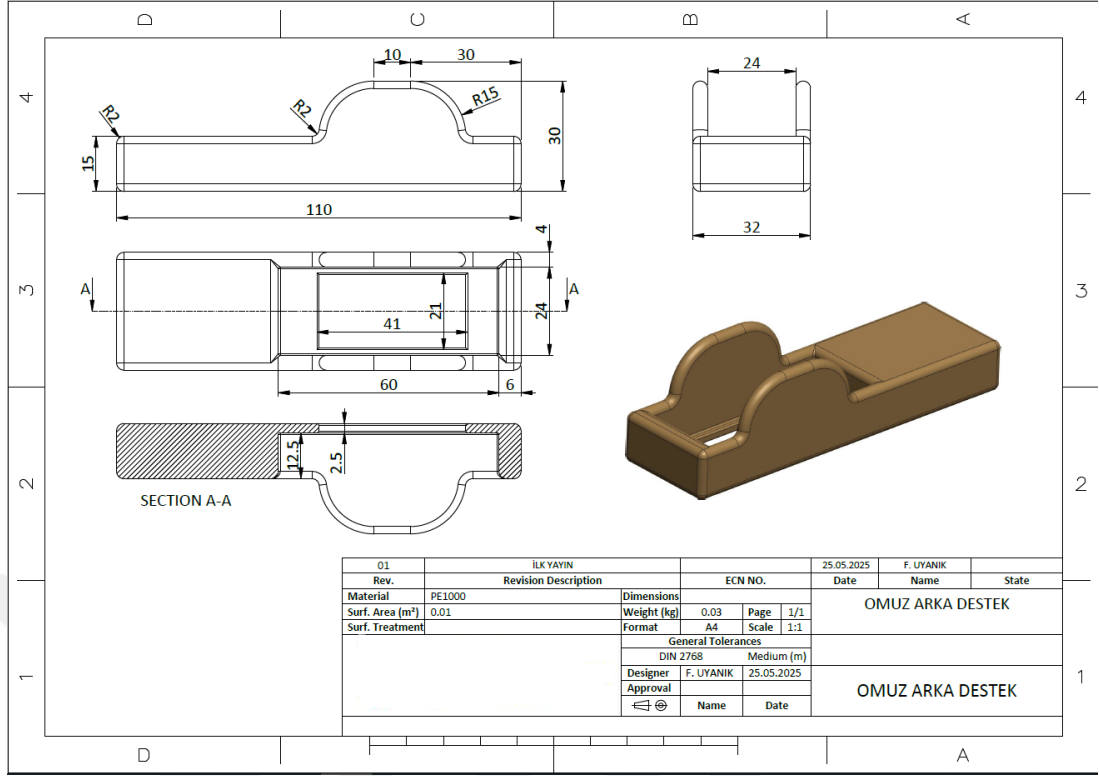
Şekil A.1 : Kol Bölgesi Kalıp



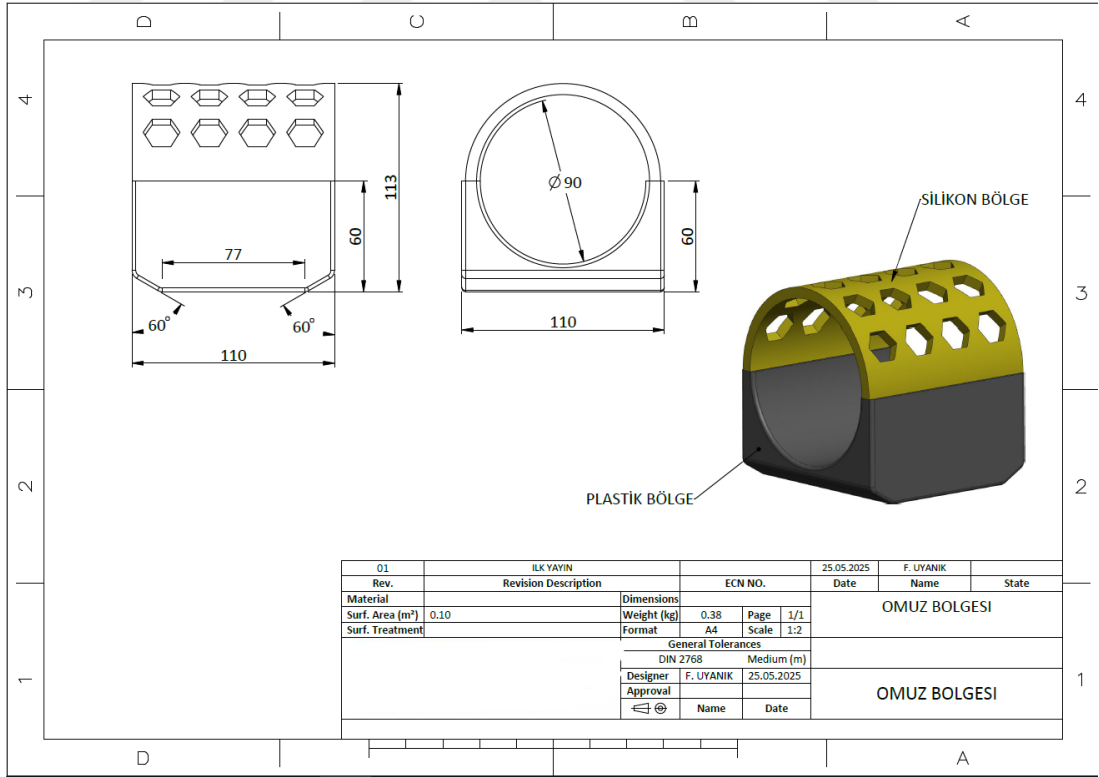
Şekil A.2 : Kol Bölgesi



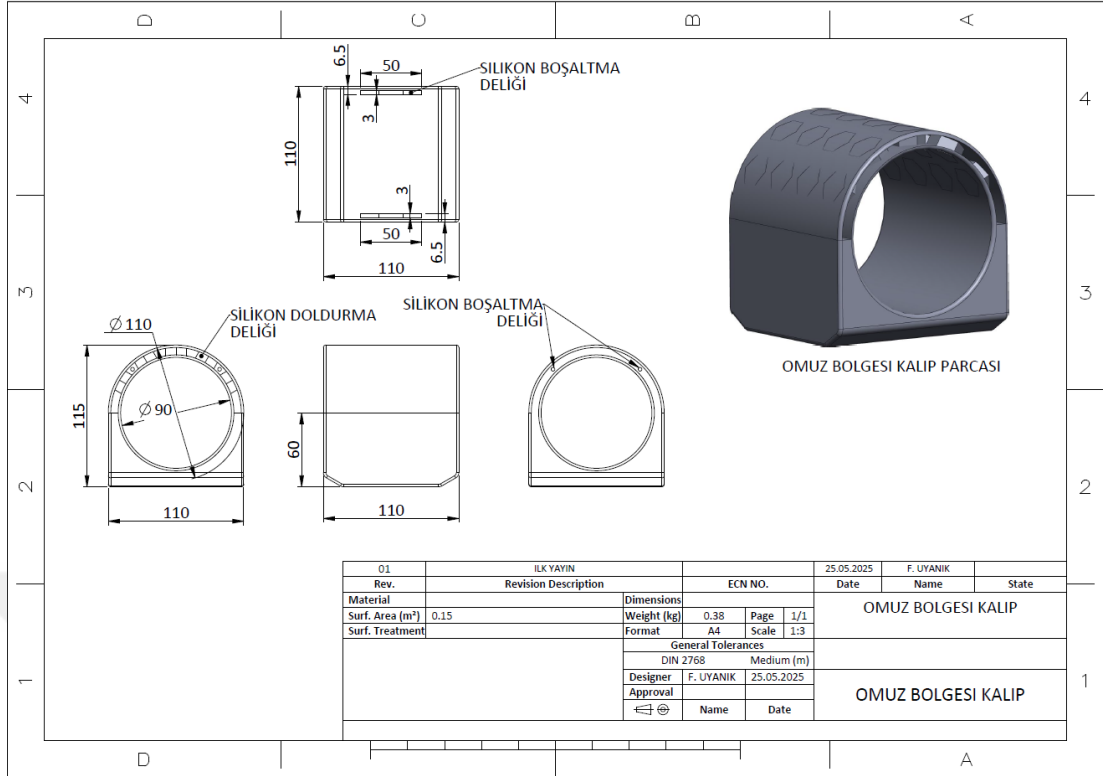
Şekil A.3 : Montaj



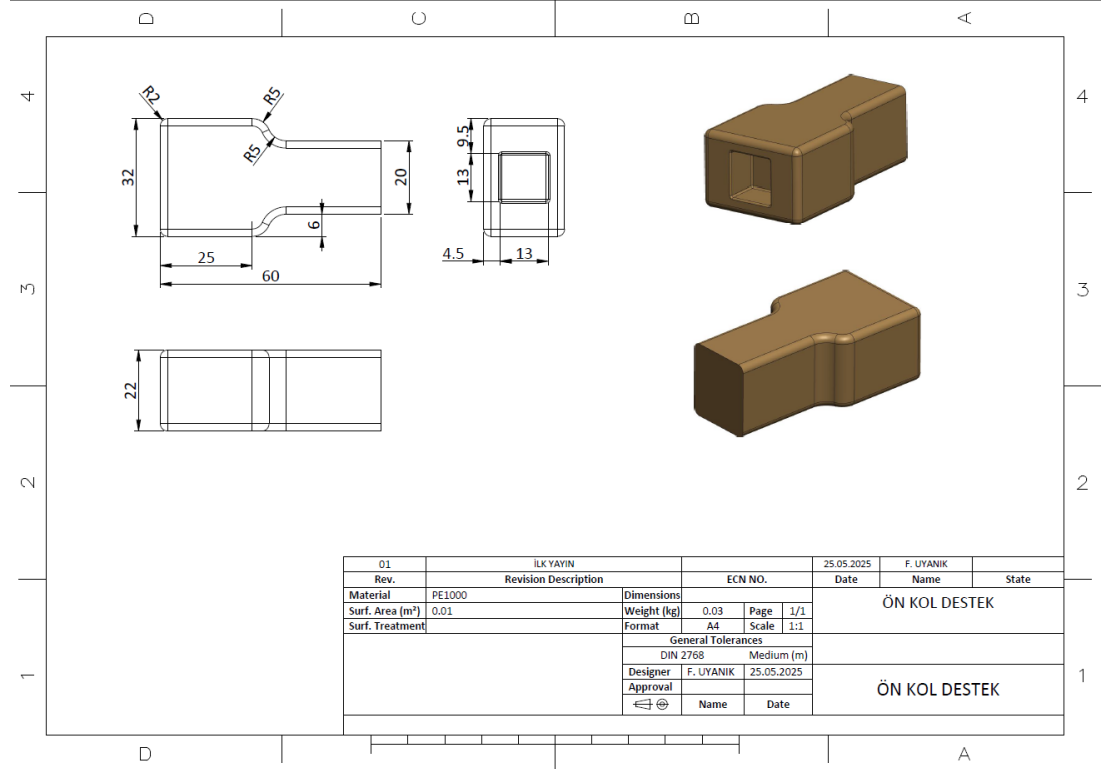
Şekil A.4 : Omuz Arka Destek



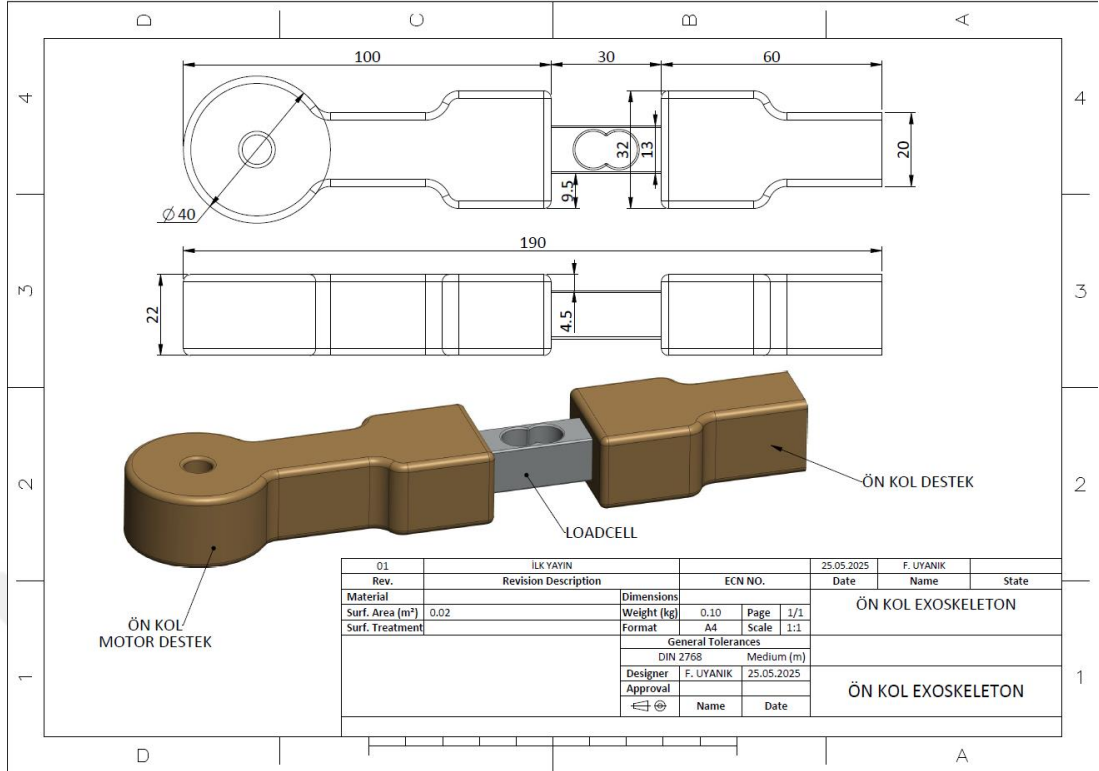
Şekil A.5 : Omuz Bölgesi



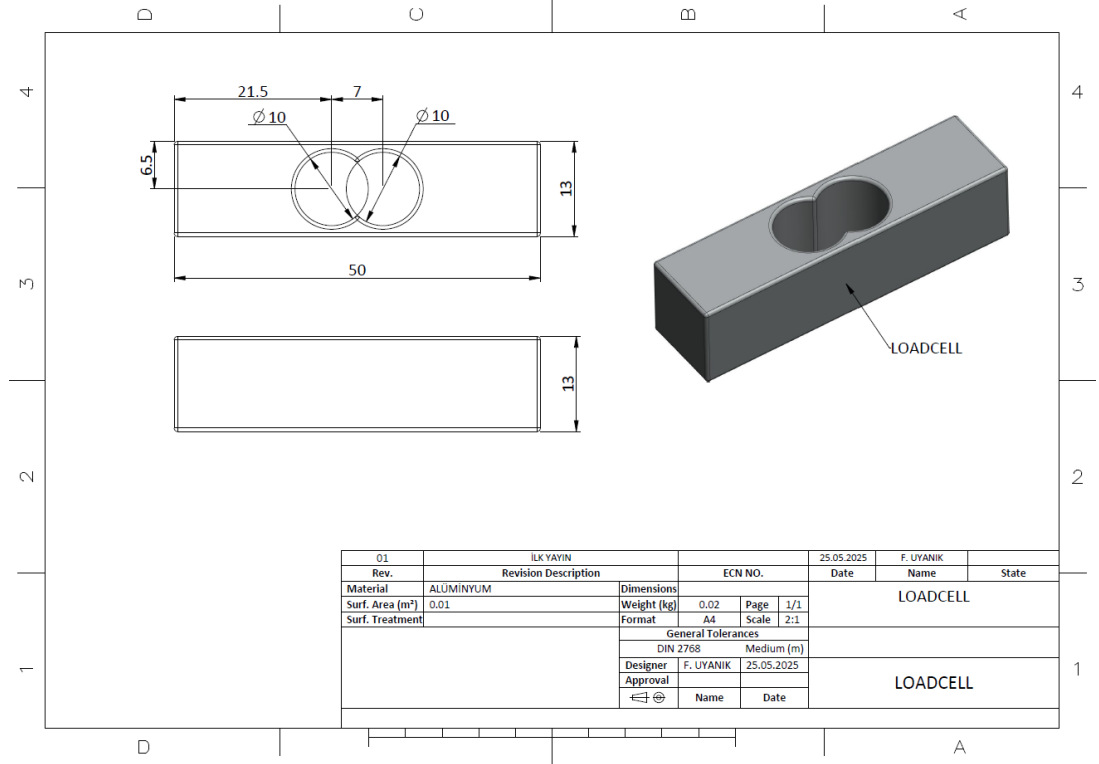
Şekil A.6 : Omuz Bölgesi Kalıp



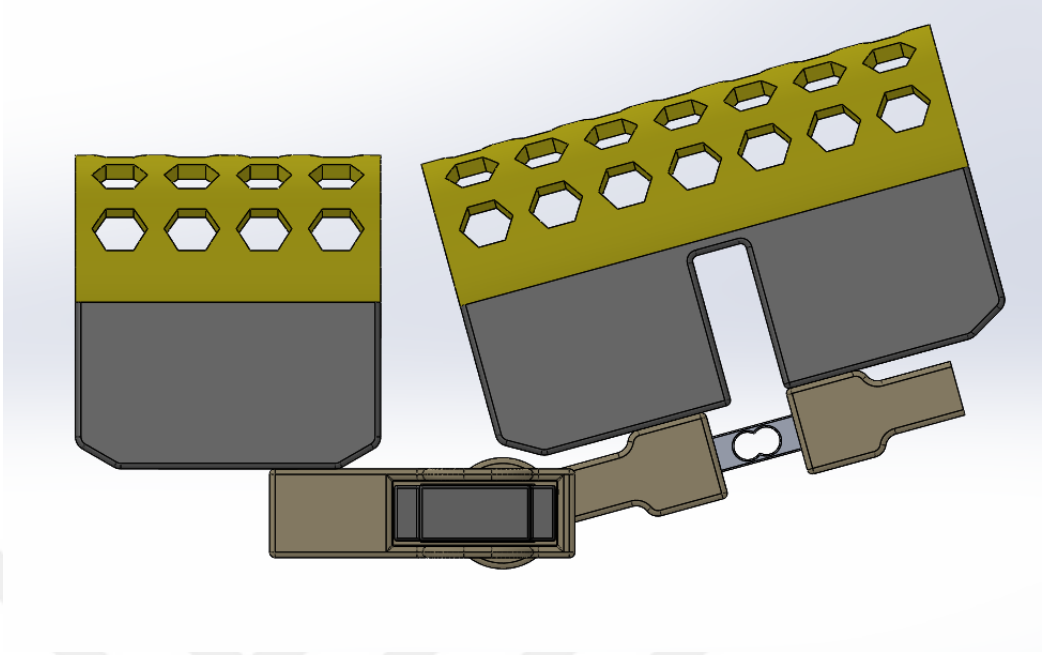
Şekil A.7 : Ön Kol Destek



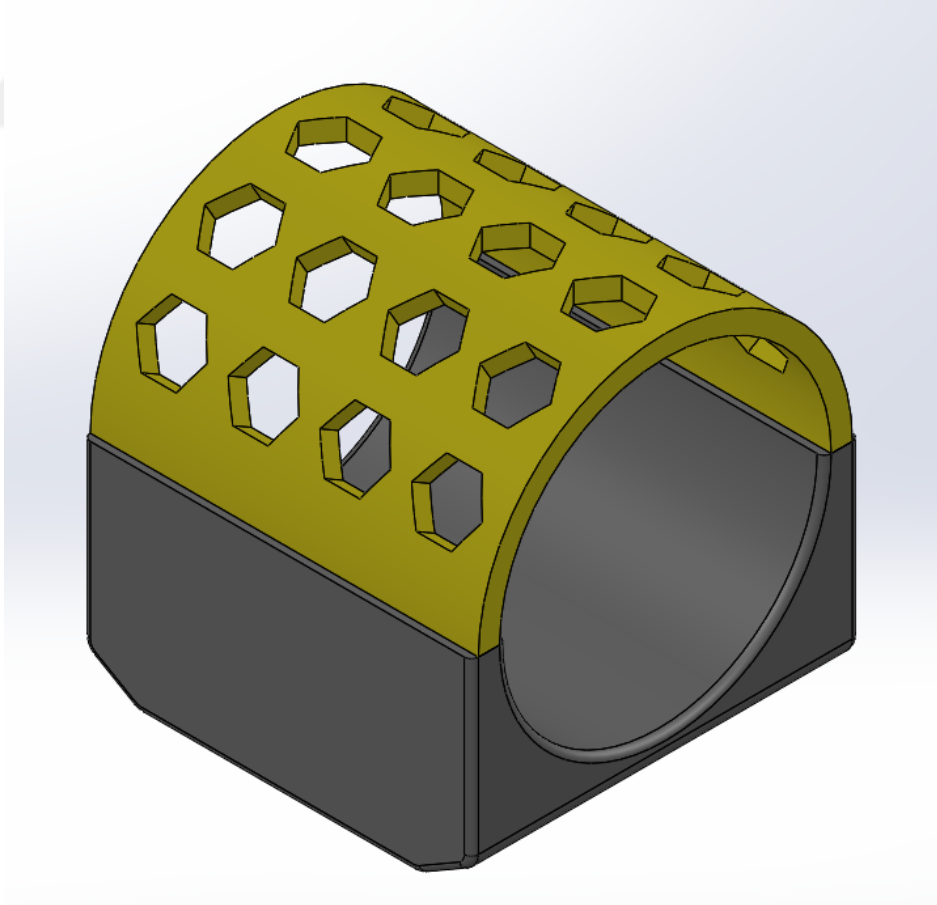
Şekil A.8 : Ön Kol Dış İskelet



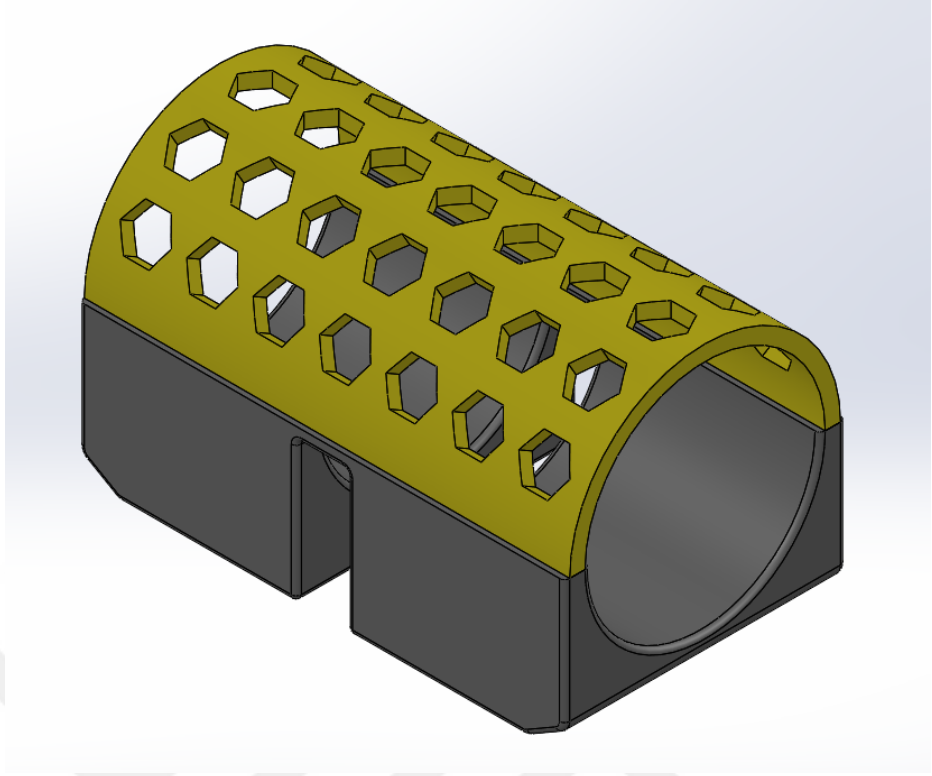
Şekil A.9 : Loadcell



Şekil A.12 : Montaj Hali CAD Görünümü 2



Şekil A.13 : Omuz Bölgesi CAD Görünümü



Şekil A.14 : Kol Bölgesi CAD Görünümü