



T.C.
DOĞUŞ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİLGİSAYAR VE ENFORMASYON BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

DENİ:DOKUNSA ETKİLEŞİMLİ NESNELERİN İNTERNETİ

Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan
ALPER BAŞARAN

İstanbul, 2024



T.C.
DOĞUŞ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜŐÜ
BİLGİSAYAR VE ENFORMASYON BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

DENİ:DOKUNSAE ETKİLEŞİMLİ NESNELERİN İNTERNETİ

Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan
Alper BAŞARAN
202191009003
0009-0006-8229-7195

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Dilek TÜKEL

İstanbul, 2024

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “DENİ: Dokunsal Etkileşimli Nesnelerin İnterneti” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere uygun şekilde tarafımdan yazıldığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, yararlandığım eserlerin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmamın içinde kullanıldıkları her yerde bunlara atıf yapıldığını, patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

Alper Başaran

30/05/2024



YÜKSEK LİSANS TEZ SINAV TUTANAĞI

Doküman No	FR.1.26
Yürürlük Tarihi	1.11.2017
Revizyon Tarihi	4.12.2020
Revizyon No	2
Sayfa	1 / 1

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Tarih : 03.07/2024

Anabilim/Anasanat Dalı

Bilgi-Seyar ve Enformasyon Bilimleri

Öğrencinin Adı Soyadı

Alper BAŞARAN

Öğrenci No

201491009003

Tez Danışmanının Adı Soyadı

Doç.Dr. Ayşe Dilek TİKEL

İkinci Tez Danışmanının Adı Soyadı

—

Tezin Başlığı

Derin Doküman Etkileşimli Nesnelerin
İnteraksiyonu

Doğuş Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin 33/4 addesi uyarınca yapılan değerlendirmeler sonunda;

☒ tezin kabul
edilmesine

☐ tezde düzeltme
verilmesine

☐ tezin
reddedilmesine

oy birliği / oy çokluğu ile karar verilmiştir. Gereği için arz olunur.

Danışman Üye

Üye

Üye

Üye

Üye

Anabilim/Anasanat Dalı Başkanı Onayı:

Doğuş Üniversitesi ("Üniversite") olarak kişisel verilerinizin güvenliği hakkında azami hassasiyet göstermekteyiz. Üniversite olarak, Üniversite ile ilişkili tüm şahıslara ait her türlü kişisel verinin 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu ("KVKK")'na uygun olarak işlenmesine ve gizliliğinin sağlanmasına büyük önem vermekteyiz. Anayasa m.20/3 ile tanıyan "kişisel verilerinizin korunmasını isteme" hakkınızın bilincinde olarak, KVKK kapsamında tanımlı "Veri Sorumlusu" sıfatıyla, kişisel verilerinizi mevzuata uygun şekilde işlemekteyiz. Daha geniş açıklama için Doğuş Üniversitesi <https://www.dogus.edu.tr/hakkimizda/kisisel-verilerin-korunmasi>

As Doğuş University ("University"), we show maximum sensitivity about the security of your personal data. As a university, we attach great importance to the processing and confidentiality of all personal data of all individuals associated with the University in accordance with the Law No. 6698 on Protection of Personal Data ("KVKK"). Being aware of your right to "ask for the protection of your personal data" recognized by the constitution article 20/3, as "Data Controller" defined within the scope of KVKK, we process your personal data in accordance with the legislation. For a broader explanation you can visit <https://www.dogus.edu.tr/hakkimizda/kisisel-verilerin-korunmasi>

hakkımızda: about us kişisel-verilerin-korunmasi: protection of personal data

(Form No: FR-001, Revizyon Tarihi:30.09.2016, Revizyon No:00)

Adı ve Soyadı : Alper Başaran
Danışmanı : Dr. Öğretim Üyesi Dilek Tükel
Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans Tezi - 03.06.2024
Alanı : Bilgisayar ve Enformasyon Bilimleri
Anahtar Kelimeler : Nesnelerin interneti (IoT), haptik geribildirim, dokunsal geribildirim, insan arayüz cihazları, insan-makine etkileşimi

ÖZET

DENİ: DOKUNSAL ETKİLEŞİMLİ NESNELERİN İNTERNETİ

Bu tez çalışması, nesnelerin interneti (IoT) uyumlu, haptik geribildirim destekli insan arayüz cihazlarının tasarımı ve uygulanması üzerine kapsamlı bir araştırma sunmaktadır. Araştırma, teknolojik ilerlemelerin insan-makine etkileşimine olan katkısını ve dokunsal geribildirim kullanıcısı deneyimini nasıl zenginleştirdiğini incelemektedir. Ayrıca, bu tür cihazların çeşitli uygulama alanlarındaki potansiyelini de vurgulamaktadır.

Çalışmada, gömülü sistem tabanlı bir elektronik kontrol sistemi/deney kiti tasarlanmakta ve açık kaynak olarak paylaşılmaktadır. Bu sistem, dokunmatik uygulamaların geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için deneysel bir platform olarak kullanılabilir gibi, işlevsel olup IoT ile bütünleşmiş cihazların kumanda ve kontrol edilmesi için de kullanılabilir.

Örnek olarak sunulan tasarım üzerinde çeşitli dokunsal geribildirim yöntemleri çalıştırılmakta ve belirli bir grup ile bir deneyim değerlendirme anketi yapılmaktadır.

Farklı senaryolarda farklı metotların işlevselliği ve deneyim kaliteleri kıyaslanmaktadır.

Sonuç olarak, bu tez IoT uyumlu dokunsal geribildirim destekli insan arayüz cihazlarının tasarımı ve uygulanması üzerine geniş bir bakış açısı sunmaktadır. Özellikle açık kaynak yaklaşımıyla bu alandaki bilgi paylaşımını ve iş birliğini teşvik etmektedir. Geliştirilen tasarım rehberleri ve stratejiler, bu teknolojinin kullanımını genişletmeyi ve IoT cihazlarını daha etkileşimli ve kullanıcı dostu hale getirmeyi amaçlamaktadır.

Name and Surname : Alper Başaran
Supervisor : Assist. Prof. Dilek TÜKEL
Degree and Date : Master’s Thesis – 03/06/2024
Major : Computer and Information Science
Keywords : Internet of Things (IoT), haptic feedback, human interface devices, human-machine interaction, user experience

ABSTRACT

INTERNET OF HAPTIC FEEDBACK ENABLED THINGS

This thesis presents a comprehensive study on the design and implementation of Internet of Things (IoT) compatible, haptic feedback-supported human interface devices. It examines the contribution of technological advancements to human-machine interaction and how haptic feedback enriches the user experience, highlighting its potential in various application areas. Additionally, the process of designing and sharing an open-source, microcontroller-based electronic control system/experiment kit is detailed; this system can be used as an experimental platform for the development and improvement of haptic applications, as well as for the command and control of functional devices integrated with IoT.

Various haptic feedback methods are tested on the presented design, and a user experience evaluation survey is conducted with a specific group to compare the functionality and experience quality of different methods in different scenarios. In conclusion, this thesis offers a broad perspective on the design and implementation of IoT-compatible haptic feedback-supported human interface devices, especially promoting knowledge sharing and collaboration in this field through an open-source approach. The developed design guides and strategies aim to expand the use of this technology and make IoT devices more interactive and user-friendly.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

ÖZET

ABSTRACT

TABLolar LİSTESİ.....iii

ŞEKİLLER LİSTESİ..... iv

KISALTMALAR.....vii

GİRİŞ1

BİRİNCİ BÖLÜM

METODOLOJİ

1.1. Araştırmanın Amacı..... 3

1.2. Veri Toplama Yöntemleri..... 3

İKİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Nesnelerin İnterneti.....4

2.1.1 Tarihsel Gelişim..... 5

2.1.2 Güncel Uygulama Alanları 6

2.1.3 Teknik Kısıtlar 8

2.2 Dokunsal Geribildirim10

2.2.1 Tarihsel Gelişim..... 11

2.2.2 Güncel Uygulama Alanları 12

2.2.3 Teknik Kısıtlar 14

2.3 Güncel Uygulamalı Çalışmalar.....15

2.3.1 SmartKnob 15

2.3.2 Döner Düğmeleri Haptik Sistem ile Prototipleme 17

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

DENEY KİTİ TASARIMI

3.1	Kavramsal Tasarım	20
3.1.1	Kontrolcü Modülleri	22
3.1.2	Giriş/Çıkış Modülleri.....	23
3.1.3	Sadece Giriş modülleri.....	24
3.1.1.	Sadece Çıkış Modülleri.....	24
3.1.4	Bağlantı Parçaları ve Kutu.....	25
3.1.5	Tasarım Başlangıcı ve Sınırlamalar	25
3.2	Elektronik Tasarım	29
3.1.2.	Motor.....	29
3.1.3.	Motor Kontrolcü Modülü.....	44
3.1.4.	Çevresel Kontrolcü Mikroişlemci Modülü	71
3.1.5.	Önyüz Modülü	72
3.3	Yazılım Tasarımı	73
3.3.1	Çevresel Kontrolcü Modülü Gömülü Yazılımı	73
3.3.2	Önyüz Modülü Kullanıcı Arayüzü ve Gömülü yazılımı	78
3.4	3 Boyutlu Tasarım	80

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

KULLANICI DENEYİM GÖSTERİMİ VE ANKETİ

4.1	Gösterim.....	82
4.2	Anket.....	83
4.3	Anket Sonuçları	88
SONUÇ.....		95
KAYNAKÇA		97

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa No.
Tablo 1. Deneme yapılacak motorlar	34
Tablo 2. Motor Kontrolcü Modüllerin Kıyaslanması	46
Tablo 3. 3x ve 6x PWM Modlarının Performans Kıyaslaması.....	48
Tablo 4. Manyetik Enkoder Yongaları Kıyaslama Tablosu	62



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 1- Metodoloji Diyagramı	2
Şekil 2 Haptik geribildirim teorisi diyagramı	11
Şekil 3. Smart Knob Uygulaması.....	15
Şekil 4. Ekran Bağlantı Devresi	17
Şekil 5. Deney Kiti Temel İşlev Diyagramı.....	20
Şekil 6. Temel Bileşenler Üstten Görünüm	22
Şekil 7. Temel bileşenler Yandan Kesit Görünüm	22
Şekil 8. Kontrolcü Mimarisi.....	23
Şekil 9. Dokunmatik Ekran Boyutu	25
Şekil 10. Dokunmatik Ekran ve Döner Düğme Boyutları	26
Şekil 11. Dokunmatik Ekran, Döner Düğme ve Taban Boyutları	27
Şekil 12. Motor Ölçü Sınırları.....	27
Şekil 13. Motor ve LED Halkası Ölçü Sınırları.....	28
Şekil 14. Belirnen Ölçüler.....	28
Şekil 15. Fırçasız DC Motor iç yapısı.....	31
Şekil 16. Fırçalı DC Motor iç yapısı	32
Şekil 17. Step Motor İç Yapısı.....	32
Şekil 18. Gimbal Motoru Örneği	33
Şekil 19. B motoru ürün açıklaması.....	34
Şekil 20. Seçilen ve deneme yapılan motorlar	34
Şekil 21. Deney Düzenekini Oluşturan Unsurlar.....	36
Şekil 22. Deney Düzenekinin Fotoğrafı.....	37
Şekil 23. Motorların Yüksüz Durumda Akım/Gerilim Eğrileri.....	38
Şekil 24. Motorların Yük Altında Akım-Gerilim Değişkenlikleri.....	39
Şekil 25. Motorların Sıcaklık Artış Eğrileri.....	40
Şekil 26. Motor Adım Tepki Grafikleri	41
Şekil 27. Faz Farkı Kıyaslaması	42
Şekil 28. Seçilen Motorun iç Yapısı ve Bileşenleri	43

Şekil 29. Motor Sürücü Devresi Referans Şeması	44
Şekil 30. Motor Kontrolcü İşlevsel Blok Diyagramı	44
Şekil 31. Motor Kontrolcü Boyut Sınırları	45
Şekil 32. TMC6300-BOB ve SimpleFOC Mini Modüllerinin Üstten Görüntüsü	47
Şekil 33. Deney Diyagramı	48
Şekil 34. SimpleFOC mini ve TMC6300 motor sürücülerin kıyaslanması deneyi	49
Şekil 35. DRV8313/TMC6300 Yongalarının Performans Kıyaslaması	50
Şekil 36. DRV8311 sade blok diyagramı	52
Şekil 37. DRV8313 ve DRV8311 Yongalarının Boyutlarının Kıyaslanması	52
Şekil 38. Üst Seviye Şematik Tasarımı	53
Şekil 39. Motor Sürücü Entegresi Şematik Tasarımı	53
Şekil 40. Motor Sürücü Devre Kartı PCB Tasarımı	54
Şekil 41. Motor Sürücü Devre Kartı PCB Tasarımı Üstten Görünüm	55
Şekil 42. Üretilen Motor Sürücü Baskı Devresinin Ön yüzü	55
Şekil 43. Üretilen Motor Sürücü Baskı Devresinin Arka yüzü	56
Şekil 44. Dizgi için kullanılan ekipmanlar	57
Şekil 45. Dizgi Sonrası Görünüm	57
Şekil 46. Test Düzeneği ve Test Edilen Motor Sürücüler	58
Şekil 47. Akım/Gerilim Eğrilerinin Kıyaslanması	59
Şekil 48. Motor Sürücülerin 50g Yük Altında Akım Dalgalanmalarının Kıyaslanması	59
Şekil 49. Hesaplanan Motor Verimi	60
Şekil 50. Motor Sürücülerin Sıcaklık Artış Eğrilerinin Kıyaslanması	61
Şekil 51. Deneme Yapılacak Enkoder Modülleri	62
Şekil 52. Enkoder performans deney düzeneği	63
Şekil 53. Enkoder Deney Düzeneği	63
Şekil 54. Güç Tüketim Kıyaslaması	64
Şekil 55. 12 bit Manyetik enkoder ölçümlerinin kıyaslaması	65
Şekil 56. 14 Bit Manyetik enkoder ölçümlerinin kıyaslaması	65
Şekil 57. AS5600 Pin numaralandırması	66

Şekil 58.MT6701 pin numaralandırması	66
Şekil 59.Motor kontrolcü Modülü Nihai Tasarımı	67
Şekil 60.Motor Kontrolcü Ünitesi Üst Düzey Şema Tasarımı.....	67
Şekil 61.Motor Sürücü Devresi Şeması	68
Şekil 62.Enkoder Devresi Şeması.....	68
Şekil 63.Enkoder Devresi Eklenmiş Motor Kontrolcü Modülü Devresi	69
Şekil 64. Motor Kontrolcü Modülü 3B Görünüm.....	70
Şekil 65.Üretilen Motor Kontrolcü Modülü Kartları	70
Şekil 66.ESP32 Super Mini Modülü Pin Tablosu.....	71
Şekil 67. ESP32-S3-Touch-LCD-1.28 Modülü	72
Şekil 68. Yazılım Genel Mimarisi	73
Şekil 69. Çevresel Kontrolcü Modülü Yazılımı UML tablosu	74
Şekil 70. Yaylı Girintiler Deseni Yazılım Örneği.....	75
Şekil 71. Manyetik Girintiler Deseni Yazılım Örneği	75
Şekil 72. Manyetik Tork Girintileri Deseni Yazılım Örneği,	76
Şekil 73. Elektromanyetik Girintiler Yazılım Örneği.....	76
Şekil 74. Sıvı Dirençli Girintiler Yazılım Örneği	76
Şekil 75. Titreşimli Girintiler Kuvvet Geribildirim Yazılım Örneği	77
Şekil 76. Çevresel Kontrolcü yazılımının USB mikroişlemciye yüklenmesi.	77
Şekil 77. Önyüz Modülü Basitleştirilmiş UML diagramı	78
Şekil 78. Örnek Kullanıcı Arayüz Ekranı	79
Şekil 79. 3B Tasarım İzometrik Görüntü.....	80
Şekil 80. 3B Tasarım Kesit Görüntüsü	80
Şekil 81. Montajı Tamamlanmış Deney Kiti	81
Şekil 82. Kullanıcı Deneyim Anketi 1. Ve 2. Sorular.....	84
Şekil 83. Kullanıcı Deneyim Anketi 3., 4., 5. ve 6. Sorular	85
Şekil 84. Kullanıcı Deneyim Anketi 7, 8 ve 9. Sorular	86
Şekil 85. Kullanıcı Deneyim Anketi 10., 11., 12. ve 13. Sorular	87
Şekil 86. Kullanıcı Deneyim Anketi 14., ve 15. Sorular	88
Şekil 87. Anket Katılımcılarının Cinsiyet Dağılımı.....	89
Şekil 88. Anket Katılımcılarının Yaş Dağılımı.....	89
Şekil 89. Anket Katılımcılarının Cinsiyet Dağılımı.....	89

Şekil 90. 1. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	90
Şekil 91. 3.Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	90
Şekil 92. 4. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	91
Şekil 93. 5. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	91
Şekil 94. 6. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	91
Şekil 95. 7. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	92
Şekil 96. 8. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	92
Şekil 97. 9. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	92
Şekil 98. 10. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	93
Şekil 99. 11. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	93
Şekil 100. 12. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	93
Şekil 101. 13. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	94
Şekil 102. 14. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı.....	94

KISALTMALAR

- 2B:** 2 boyutlu
3B: 3 boyutlu
AG: Artırılmış Gerçeklik
IoT: Internet of Things
Nİ: Nesnelerin İnterneti
RGB: Red Green Blue
SG: Sanal Gerçeklik
YZ: Yapay Zeka

GİRİŞ

Günümüzde insan-makine etkileşimi gündelik hayatta sıkça deneyimlediğimiz bir kavram haline gelmiştir. Yaşam alanlarımızda beyaz eşyalar, mutfak araç gereçleri, oyun ve eğlence platformları, ses ve ışık sistemleri gibi cihaz ve sistemlerle etkileşime girerken, pek çok kişi de mesleği gereği kaçınılmaz bir şekilde bilgisayarlar ve benzeri araçlarla etkileşime girmektedir.

Bu etkileşimler, kullanıcının cihaz ya da sisteme bir veya birden fazla komut vermesi ve sistemden geribildirim almasından ibarettir. Dokunsal geribildirim konsepti, kullanıcıya dokunma duyusu vasıtasıyla geribildirimde bulunarak sezgisel bir deneyim yaratarak kullanıcı deneyimini pekiştirmeyi ve iyileştirmeyi amaçlar. Öte yandan, nesnelerin interneti konsepti ise hem insan-makine hem de makine-makine etkileşimini mesafe fiziksel mesafe tanımaksızın mümkün hale getirip, belirli protokoller vasıtasıyla veri akışı sağlayarak gerçek dünyada bulunan fiziksel sistemlerin senkron bir şekilde sanal ortamda modellenmesini ve oluşturulan modeller arasındaki etkileşimlerin yazılım yoluyla tanımlanmasını ve bu sayede gerçek dünyadaki iş akışlarının otomatik hale getirilmesini mümkün kılmaktadır.

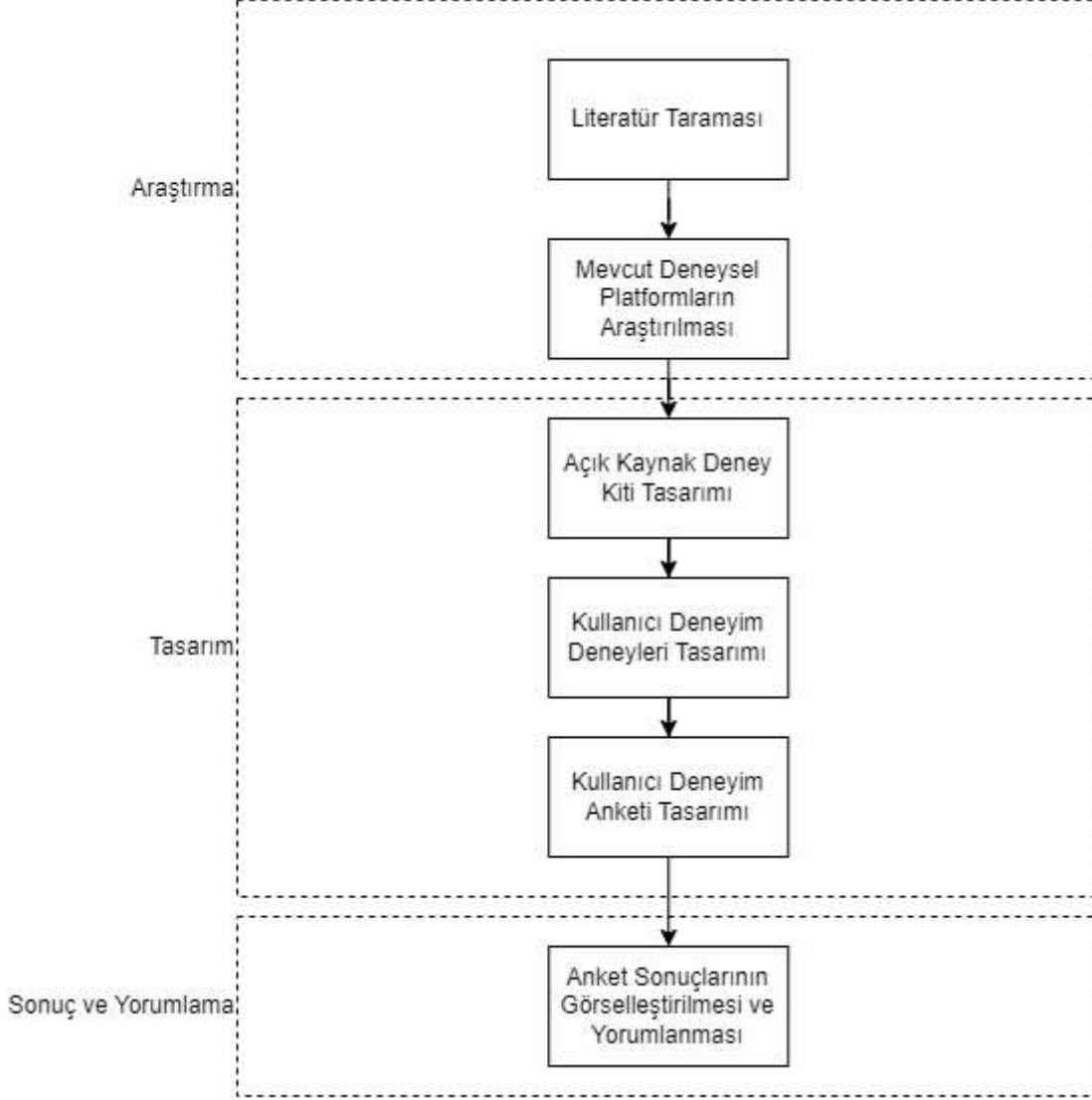
Haptik geribildirim ise insan-makine etkileşimini sensör ve aktüatörler vasıtasıyla insanların dokunma duyusunu uyararak sanal olarak daha gerçekçi bir deneyim yaşatarak iyileştirmeyi ve sanal deneyimleri daha sezgisel ve akla yatkın hale getirmeyi hedeflemektedir.

Her iki konseptin ortak alanı olan insan-makine etkileşimi, bir insan ile bir sistem arasındaki etkileşim noktası veya arayüz olarak tanımlanabilir.

Bu çalışmada, özellikle insanlar ile sanal sistemler arasındaki fiziksel etkileşimler ve bu etkileşimleri mümkün kılan dokunsal geribildirim teknolojisi araştırılmış, bu etkileşimlerin geliştirilmesi, iyileştirilmesi ve özelleştirilebilmesi için deneysel bir platform tasarlanmış ve bu platform üzerinde belirli etkileşimler ile alakalı bir anket yapıp bu anket vasıtasıyla dokunsal geri bildirimli kullanıcı deneyimi ölçümlenmiştir.

BİRİNCİ BÖLÜM

METODOLOJİ



Şekil 1. Metodoloji Diyagramı

Araştırma yöntemi olarak nicel yöntemler benimsenmiştir. Nicel araştırma, sayısal verilerin toplanması ve analiz edilmesi yoluyla genellemeler yapmayı amaçlar (Creswell, 2014).

Araştırma, genel olarak:

- Dokunsal geribildirimli döner düğmelerin güncel ve gelecekte öngörülen uygulama alanları
- Dokunsal geribildirimli döner düğmelerin tasarımı süreci, kısıtları ve isterleri
- Güncel nesnelerin internet ve ev otomasyonu uygulamaları

Dokunsal geribildirimli döner düğme uygulamalarının geliştirilebilmesi için geliştirilmiş deney kitleri ve bu çalışmalarda iyileştirilebilecek noktalar detaylı şekilde araştırılmıştır.

1.1. Araştırmanın Amacı

Bu araştırma, insan-makine ve insan-proses etkileşimli nesnelerin interneti arayüz cihazlarının “etkileşim” kısmına odaklanmış olup, dokunsal geribildirim teknolojisi başta olmak üzere, farklı etkileşim yöntemleri vasıtasıyla kullanıcı deneyimini artırmayı amaçlayan çalışmalarda kullanılmak üzere bir deney kiti tasarlamak ve tasarlanan kit ile dokunsal geribildirim uygulamaları üzerinden bir kullanıcı deneyim anketi düzenleyip, bu teknolojinin ev otomasyonu arayüz cihazlarına entegrasyonunun kullanıcı deneyimini artırıp artırmadığını incelemektedir.

1.2. Veri Toplama Yöntemleri

Veri toplama yöntemleri aşağıdaki unsurlardan oluşmaktadır.

- Literatür Taraması
- Kullanıcı Deneyim Anketi

Literatür taraması bölümünde nesnelerin interneti ve dokunsal geribildirim teknolojileriyle alakalı güncel araştırmalar ve çalışmalar araştırılmış ve özetlenmiştir.

Kullanıcı deneyim anketinde ise tasarlanan deney kiti ile kullanıcı demoları yapılmış ve kullanıcı geribildirimini görselleştirilmiş ve yorumlanmıştır.

İKİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

Nesnelerin interneti ve dokunsal geribildirim teknolojileriyle ilgili çalışmalar araştırılmış ve farklı başlıklar altında özetlenmiştir. Bu başlıklar aşağıda sıralanmıştır.

- Tanımın özeti
- Tarihsel gelişimi
- Güncel uygulama alanları
- Teknik kısıtlar
- Gelecekte kullanılması önerilen alanlar

Sonrasında, bu iki konseptin kesiştiği alana odaklanıp, bu alanda yapılan güncel çalışmalar ve deney kitleri araştırılmış ve özetlenmiştir.

Ayrıca, deney kitinin tasarımı aşamasında kullanılmak üzere dokunsal geribildirimli döner düğmeler için belirlenmiş standartlar, güncel araştırmalar ve mevcut açık kaynaklı deneysel platformlar araştırılmış ve incelenmiştir. Mevcut platformların iyileştirilebilecek noktaları belirlenmiş ve bu noktaları iyileştirmek için önerilerde bulunulmuştur.

2.1 Nesnelerin İnterneti

Nesnelerin interneti (IoT), sensörler, yazılım ve diğer teknolojilerle donatılmış fiziksel nesnelerin—"şeylerin"—internet üzerinden diğer cihazlar ve sistemlerle veri alışverişinde bulunmak üzere bağlandığı ağı tanımlar. Bu cihazlar, sıradan ev eşyalarından sofistike endüstriyel araçlara kadar çeşitlilik gösterir. Statista'nın (2021) raporuna göre, günümüzde 7 milyardan fazla bağlı IoT cihazı bulunmakta olup, uzmanlar bu sayının 2025 yılına kadar 10 milyara, 2030 yılına kadar ise 22 milyara ulaşmasını beklemektedir (Statista, 2021). IoT kavramı, fiziksel dünyanın bilgisayar tabanlı sistemlere doğrudan entegrasyonunu sağlayarak, insan müdahalesinin azaltılmasının yanı sıra verimlilik, doğruluk ve ekonomik yarar açısından iyileştirmeler sunması bakımından devrim niteliğindedir. Gubbi ve diğerleri (2013) tarafından belirtilen gibi, IoT'nin bu entegrasyonu, gerçek zamanlı veri izleme ve analizi ile, çeşitli sektörlerde operasyonel verimliliği artırmak için büyük potansiyele sahiptir (Gubbi, Buyya, Marusic, & Palaniswami, 2013).

IoT cihazlarının sunduğu avantajlar, sadece endüstriyel ve ticari uygulamalarla sınırlı değildir; bireysel kullanıcılar için de günlük yaşamı kolaylaştırıcı yenilikler getirmektedir. Al-Fuqaha ve diğerlerinin (2015) işaret ettiği üzere, akıllı ev teknolojileri, enerji yönetimi, güvenlik ve sağlık bakımı gibi alanlarda kullanıcıların hayat kalitesini önemli ölçüde iyileştirebilmektedir (Al-Fuqaha, Guizani, Mohammadi, Aledhari, & Ayyash, 2015). Bu geniş kapsamlı etkiler, IoT'nin nasıl bir "her şeyin interneti" dönüşümüne öncülük ettiğinin ve toplumumuzda ve ekonomimizde kalıcı değişiklikler yaratma potansiyeline sahip olduğunun bir göstergesidir.

2.1.1 Tarihsel Gelişim

IoT'nin kökenleri, 1999 yılında Kevin Ashton tarafından yapılan çalışmalara dayanır. Ashton, İngiliz bir teknoloji öncüsü, internetin yaygın sensörler aracılığıyla fiziksel dünya ile bağlandığı bir sistem anlamına gelen "nesnelerin interneti" terimini ortaya atmıştır (Ashton, 2009). Bu fikir, IoT'nin bugün ulaştığı noktanın temelini atmıştır ve yaşam şeklimizi ve çalışma biçimimizi etkileyebilecek potansiyele sahip bir araç olarak önemini korumaktadır. Ashton'ın vizyonu, nesnelerin internet üzerinden iletişim kurarak veri toplaması ve bu verileri kullanarak dünyamızı daha akıllı ve daha bağlantılı hale getirmesini içeriyordu.

IoT teknolojisinin bu denli yaygınlaşmasının arkasındaki temel itici güçlerden biri, yarı iletken endüstrisindeki ilerlemeler ve mikroçip üretim maliyetlerindeki düşüşlerdir. Moore Yasası, yarı iletken teknolojisindeki bu ilerlemeyi öngören ve her iki yılda bir, mikroçiplerin üzerine sığdırılabilecek transistör sayısının iki katına çıkacağını belirten bir kavramdır (Moore, 1965). Bu ilerleme, IoT cihazlarının daha küçük, daha ucuz ve daha güçlü hale gelmesini sağlamıştır. Miorandi ve diğerlerinin (2012) belirttiği gibi, yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler, IoT cihazlarının enerji tüketimini azaltırken işlem kapasitelerini artırmış ve bu cihazların daha geniş bir kullanım alanına sahip olmasını mümkün kılmıştır.

Bu teknolojik ilerlemelerle birlikte, gelişmiş mikroçiplerin kablosuz iletişim yeteneklerine erişilebilirliği, IoT cihazlarının kullanımını önemli ölçüde artırmıştır. Kablosuz iletişim teknolojilerindeki yenilikler, IoT cihazlarının internete bağlanmasını ve birbirleriyle iletişim kurmasını kolaylaştırarak, bu cihazların veri

toplama, işleme ve aktarma yeteneklerini genişletmiştir. Gubbi ve diğerlerinin (2013) açıkladığı gibi, gelişmiş mikroçipler sayesinde IoT cihazları, daha düşük enerji tüketimi ile daha yüksek veri iletim hızlarına ve daha geniş kapsama alanlarına ulaşabilmekte, bu da IoT'nin sağlık, eğitim, savunma ve havacılık gibi birçok sektörde etkili bir şekilde uygulanmasını sağlamaktadır.

Bu gelişmeler, IoT'nin sadece teknolojik bir ilerleme olmadığını, aynı zamanda toplumumuzun ve ekonomimizin dönüşümünde kritik bir rol oynayan bir fenomen olduğunu göstermektedir. Yarı iletken teknolojisindeki ilerlemeler ve kablosuz iletişim teknolojilerindeki yenilikler, IoT'nin potansiyelini genişleterek, dünyamızı daha akıllı ve daha bağlantılı bir yer haline getirme yolunda önemli adımlar atmamızı sağlamaktadır.

2.1.2 Güncel Uygulama Alanları

IoT teknolojisi, endüstriyel otomasyon, sağlık hizmetleri, eğitim, tarım, savunma ve havacılık gibi birçok alanda devrim yaratmaktadır. Bu teknolojinin uygulamaları, verimliliği artırma, maliyetleri düşürme ve yenilikçi çözümler sunma potansiyeline sahiptir. Dijital ikizler, fiziksel varlıkların sanal kopyalarını oluşturur ve bu, üretim süreçlerinin simülasyonunu ve analizini gerçekleştirmek için kullanılır. General Electric, rüzgâr türbinlerinin dijital ikizlerini kullanarak, her bir türbinin performansını optimize etmiş ve arızaları önceden tahmin ederek bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltmıştır (Tao, Sui, Liu, Qi, & Kusiak, 2018). Endüstri 4.0, otomasyon, veri toplama, siber-fiziksel sistemler ve IoT'nin entegrasyonunu içeren bir konsepttir ve üretim süreçlerinin daha verimli, esnek ve özelleştirilebilir hale gelmesini hedeflemektedir (Schrauf & Bertram, 2016). Kestirimci bakım ise, ekipman arızalarını önceden tahmin ederek üretimin planlanmamış bir şekilde duraksamasını engellemeyi hedefler. Siemens, trenlerde tahmini bakım uygulamalarını kullanarak, arızaları önceden belirleyip bakım planlamalarını optimize etmiş ve bu sayede operasyonel verimliliği artırmıştır (Lee, Bagheri, & Kao, 2015).

Öte yandan, akıllı ev teknolojileri, kullanıcıların evlerini daha verimli ve konforlu bir şekilde yönetmelerini sağlayarak modern yaşamın zorluklarına yenilikçi çözümler sunar. IoT tabanlı ev otomasyonu sistemleri, ışıkları, termostatları, güvenlik kameralarını ve diğer ev aletlerini uzaktan kontrol etme imkânı sunarak konfor ve

enerji verimliliği sağlar (Ala, Zaidan, Zaidan, Talal, & Kiah, 2017). Evde kullanılan IoT cihazları, kronik hastalıkları olan hastaların durumlarını sürekli olarak izleyerek, gerektiğinde sağlık hizmeti sağlayıcılarına gerçek zamanlı veri sağlar. Bu, hastaların yaşam kalitesini artırırken, hastanelerin yükünü hafifletir ve sağlık hizmetlerinin maliyetini azaltır (Islam, Kwak, Kabir, Hossain, & Kwak, 2015). Akıllı termostatlara ve enerji yönetim sistemleri, enerji tüketimini optimize ederek evlerin daha enerji verimli hale gelmesini sağlar. Bu sistemler, enerji kullanımını gerçek zamanlı olarak izler ve analiz eder, böylece kullanıcılar enerji tüketimini azaltabilir ve sürdürülebilir yaşamı teşvik edebilir (Han & Lim, 2010).

Sağlık alanında, IoT ile giyilebilir cihazların entegrasyonu, hastaların vital belirtilerinin geleneksel klinik ortamların dışında sürekli olarak izlenmesini sağlayarak olağanüstü bir büyüme göstermiştir. Bu, sadece hasta bakımını geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda potansiyel sağlık sorunlarının erken tespitine de yardımcı olur (Majumder, Deen, & Banerjee, 2020). Ayrıca, hastanelerde IoT uygulamaları, hasta izleme, varlık yönetimi ve çevresel izleme için IoT cihazlarının kullanıldığı akıllı hastanelerin geliştirilmesine yol açmıştır, bu da sağlık hizmetlerinin verimliliğini ve hasta bakımını önemli ölçüde iyileştirir (Islam, Kabir, & Hossain, 2020).

Eğitimde IoT kullanımı, daha etkileşimli ve çekici öğrenme ortamlarının oluşturulmasına yol açmıştır. IoT tabanlı eğitim araçları ve uygulamaları, öğrencilerin öğrenme deneyimlerini interaktif ve kişiselleştirilmiş öğrenme sağlayarak geliştirir (Alam & Shakil, 2020). Ayrıca, IoT cihazları artık okullarda otomatik devam kaydı ve sağlık izleme için kullanılmaktadır, öğrencilerin sağlık verilerini ve devam durumlarını gerçek zamanlı olarak izleyerek güvenli bir öğrenme ortamı sağlar (Liu, Huang, & Miao, 2020).

Tarım ve hayvancılık alanında, IoT teknolojisi, toprak nemini, bitki sağlığını ve çevresel koşulları izlemek için sensörler ve IoT cihazlarını kullanan hassas tarımın ilerlemesinde önemli bir rol oynamıştır. Bu, tarımsal uygulamaları artırılmış üretkenlik ve sürdürülebilirlik için optimize eder (Li De, & Lin, 2020). Hayvancılıkta ise IoT uygulamaları, çiftçilerin hayvanlarının sağlığını ve konumunu gerçek zamanlı olarak takip etmelerini sağlar, hayvancılık yönetimini ve refahını iyileştirir (Taneja & Davy, 2020).

Savunma alanında, IoT destekli dronlar, gerçek zamanlı veri toplama ve analizi sunarak artan durumsal farkındalık için savunmada gözetleme ve keşif görevlerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır (Kapoor, Sharma, & Saha, 2020). Ayrıca, askerler için IoT giyilebilir cihazlar, sağlık ve çevresel koşulları izler, savaş alanındaki askerlerin güvenliğini ve performansını iyileştirir (Gupta, Quyyoom, & Qadri, 2020).

Havacılıkta, IoT teknolojisi, uçak bileşenlerinin durumunu gerçek zamanlı olarak izleyerek bakım ihtiyaçlarını tahmin eden ve uçak güvenliğini sağlayan gelişmiş uçak sağlık izleme sistemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır (Khan, Yuce, & Bulusu, 2020). Ayrıca, havalimanlarında IoT uygulamaları, bagaj yönetimi ve yolcu akışı yönetimi gibi, sensörler ve veri analitiği kullanarak havalimanı operasyonlarını streamline eden operasyonel verimliliği ve yolcu deneyimini artırır (Ahmed, Mahmood, & Islam, 2020).

Akıllı şehirlerde, IoT teknolojileri, trafik yönetimini optimize ederek şehir içi ulaşımı daha verimli hale getirir (Zanella, Bui, Castellani, Vangelista, & Zorzi, 2014). Ayrıca, IoT cihazları, atık yönetimi süreçlerini geliştirerek şehirlerin sürdürülebilirliğini artırır (Khan, Kiani, & Soomro, 2017). Akıllı şehir projelerinde IoT kullanımı, enerji verimliliğini artırarak çevresel etkiyi azaltır (Bibri & Krogstie, 2017).

Perakende ve tüketici elektroniği alanında, IoT, perakende sektöründe stok yönetimini ve müşteri deneyimini iyileştirir (Ngai, Moon, Riggins, & Yi, 2008). Giyilebilir IoT cihazları, kullanıcıların günlük yaşamlarını kolaylaştırır ve sağlık takibi sağlar (Lopez & Ranasinghe, 2017). Ayrıca, IoT, müşteri verilerini analiz ederek perakendecilere kişiselleştirilmiş pazarlama stratejileri sunar (Yan, Zhang, Yang, & Ning, 2014).

2.1.3. Teknik Kısıtlar

Nesnelerin İnterneti (IoT) yaygınlaştıkça, güvenlik ve gizlilik endişeleri giderek daha belirgin hale gelmektedir. Cihazların hacklenmesi, kişisel verilerin izinsiz kullanımı ve IoT altyapısının kötüye kullanılması potansiyeli, bu teknolojinin benimsenmesini zorlaştıran önemli faktörlerdir.

IPv4 Kısıtlamaları: IoT cihazlarının hızla artması, internet protokolü adreslerinin kıtlığına yol açmaktadır. Mevcut IPv4 sistemi, yaklaşık 4,3 milyar

benzersiz adresle sınırlıdır ve bu durum IoT'nin büyümesini engellemektedir. IPv6, daha geniş bir adres alanı sunmasına rağmen, geçiş süreci yavaş ve maliyetlidir (Deering & Hinden, 1998).

Elektrik Altyapısına Bağımlılık: IoT cihazlarının çoğu, sürekli bir elektrik kaynağına ihtiyaç duyar ve bu da elektrik altyapısına bağımlılığı artırır. Elektrik kesintileri, IoT tabanlı sistemlerin işleyişini ciddi şekilde etkileyebilir. Özellikle uzak veya gelişmekte olan bölgelerde güvenilir elektrik altyapısının eksikliği, IoT'nin potansiyelini sınırlamaktadır (Gubbi, Buyya, Marusic, & Palaniswami, 2013).

Siber Güvenlik Tehditleri: IoT cihazları, siber saldırılara karşı savunmasızdır. Zayıf şifreleme standartları ve güncellenmemiş yazılımlar nedeniyle bu cihazlar kolay hedefler haline gelir. Bir kez ihlal edildiklerinde, saldırganlar ağ üzerinden diğer cihazlara zarar verebilir veya kişisel verileri çalabilir. Bu güvenlik açıkları, kullanıcıların gizliliğini ve veri güvenliğini tehlikeye atmaktadır (Roman, Zhou, & Lopez, 2013).

Veri Yönetimi ve Gizlilik Sorunları: IoT cihazları tarafından üretilen büyük veri miktarının yönetimi önemli bir zorluktur. Veri depolama, işleme ve analizi hem teknik altyapı hem de maliyet açısından zorlayıcıdır. Ayrıca, bu verilerin nasıl kullanıldığına dair gizlilik endişeleri de bulunmaktadır. Kullanıcıların kişisel verilerinin izinsiz kullanımı, gizlilik ihlallerine yol açabilir (Atzori, Iera, & Morabito, 2010).

Enerji Tüketimi ve Sürdürülebilirlik: IoT cihazlarının sürekli çalışması enerji tüketimini artırır. Bu durum, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından yeterince yararlanılmadığı durumlarda, sürdürülebilirlik sorunlarına yol açabilir. Enerji verimli IoT cihazlarının geliştirilmesi, bu teknolojinin uzun vadeli sürdürülebilirliği için kritik öneme sahiptir (Perera, Liu, & Jayawardena, 2015).

Uyumluluk ve Standartlar: IoT ekosistemindeki cihazların ve platformların çeşitliliği, uyumluluk sorunlarına neden olabilir. Farklı üreticiler tarafından geliştirilen cihazlar ve sistemler, birbirleriyle etkili bir şekilde iletişim kuramayabilir. Bu durum, IoT çözümlerinin entegrasyonunu ve genişletilmesini zorlaştırır. Endüstri genelinde kabul edilen standartların ve protokollerin geliştirilmesi, bu sorunun çözümünde önemli bir adımdır (Bandyopadhyay & Sen, 2011).

Nesnelerin İnterneti, modern teknolojinin sunduğu en yenilikçi fırsatlardan biridir, ancak bu potansiyelin tam olarak gerçekleştirilmesi için, belirtilen teknik sınırlamaların üstesinden gelinmesi gerekmektedir. Bu zorlukların aşılması, IoT'nin daha güvenli, verimli ve erişilebilir hale gelmesini sağlayacak ve teknolojinin tüm avantajlarından yararlanmamıza olanak tanıyacaktır.

2.2 Dokunsal Geribildirim

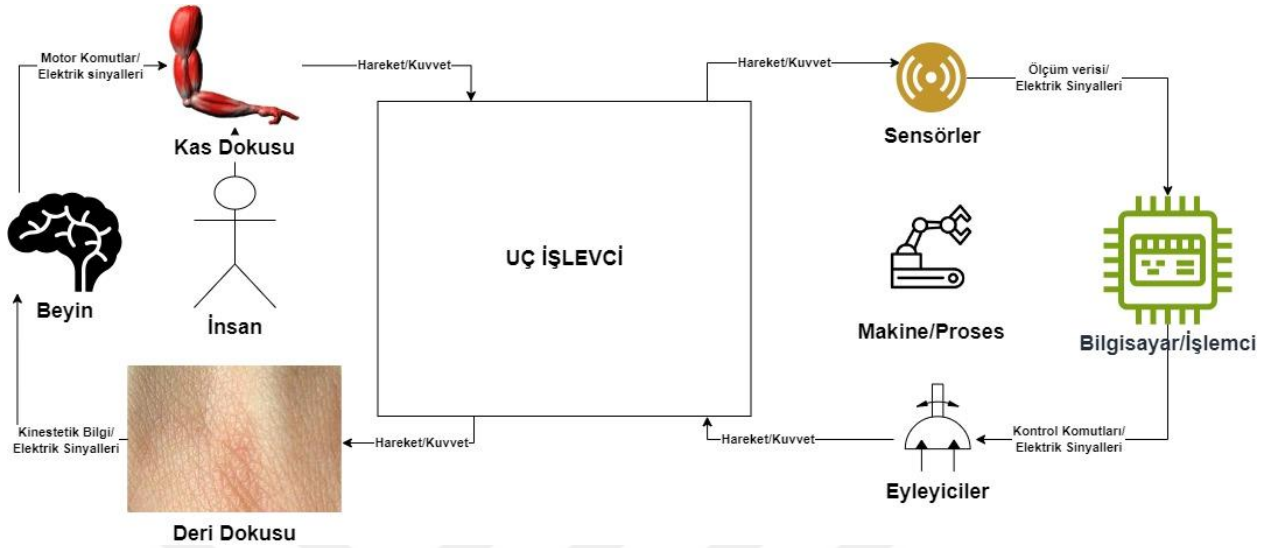
Dokunsal geri bildirim, titreşimler, kuvvetler ve hareketler yoluyla dokunma duygusunu simüle eden bir teknoloji, elektronik cihazlardan dokunsal yanıtlar alabilen kullanıcılara modern insan-bilgisayar etkileşiminin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu teknoloji, dokunma duyumuzun katılımını sağlayarak dijital etkileşimleri geliştirmek felsefesine dayanarak, sanal deneyimleri daha sürükleyici ve sezgisel hale getirmeyi amaçlamaktadır.

Bu kavram; insan algısı, karar verme ve hafıza üzerinde önemli bir etkisi olan çok duyuşal bir entegrasyon sürecini kapsar. Haptik geri bildirim tarafından sağlanan dokunsal bilgiler, bütünlük ve sürükleyici bir deneyim yaratmak için görsel ve işitsel verilerle entegre edilir. Bu çok duyuşal entegrasyon, öğrenme yeni beceriler veya sanal ortamlarda gezinme gibi karmaşık görevler için hayati önem taşır, burada duyuşal girdilerin uyumu, bilişsel işlemeyi ve tutumu artırır (Lederman & Klatzky, 2009).

Somutlanmış biliş kavramı, dijital etkileşimlerde Dokunsal geri bildirimin önemini anlamak için teorik bir çerçeve sağlar. Bu bakış açısına göre, bilişsel süreçler, vücudun çevresiyle etkileşimlerinde derinden kök salmıştır. Haptik geri bildirim, gerçek dünya etkileşimlerini taklit eden fiziksel duyumlar sağlayarak, vücudu bilişsel sürece dahil eder ve dijital içeriğin daha derin ve sezgisel bir anlayışına yol açar. Bu etkileşim, sadece dokunma eylemiyle ilgili değildir, ancak tüm vücudun duyuşal-motor yeteneklerini içerir, etkileşimi zenginleştirir ve dijital deneyimleri daha unutulmaz ve anlamlı kılar (Wilson, 2002).

Dokunsal geri bildirim, duyuşal tepkiler uyandırarak dijital içerikle duyuşal bağlantıyı da önemli ölçüde artırır. Dokunsal duyumlar, sıcaklık, güvenlik veya tanıdıklık hisleri uyandırabilir, bu da kullanıcının bir cihaz veya uygulamayla etkileşimini önemli ölçüde etkileyebilir. Örneğin, bir akıllı telefonun mesaj bildirimi sırasında hafifçe titreşmesi bağlantı ve beklenti duygusu yaratabilir. Bu duyuşal

etkileşim, duygusal rezonansın dijital deneyimin etkinliğini artırabileceği eğlence, eğitim ve terapi gibi uygulamalar için hayati önem taşır (Norman, 2004).



Şekil 2 Haptik Geribildirim Teorisi Diyagramı

2.2.1 Tarihsel Gelişim

Bu teknolojinin önerilmesinden günümüz cihazlarındaki yaygın uygulamalarına kadar olan yolculuğu, teknolojik yeniliklerin ve disiplinler arası araştırmalara ve gelişmelere dayanmaktadır. Haptik geri bildirim konsepti, 1950'ler ve 1960'lar boyunca radyoaktif malzemelerle çalışmak için tasarlanmış uzaktan kumanda sistemleri ile yapılan erken deneylere kadar dayanmaktadır. Bu sistemler, ilkel olsalar da fiziksel geri bildirimin uzaktan işlem görevlerini nasıl geliştirebileceğine dair anlayışın temelini atmıştır (Jones & Sarter, 2008). Ancak, haptik geri bildirim araştırmaları, robotik ve bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelerle tetiklenerek, 1970'lerde ve 1980'lerde ivme kazandı. Araştırmacılar, cerrahların aletlerinin dokular üzerinde uyguladığı kuvvetleri hissetmelerini sağlayarak, hassasiyeti ve güvenliği artıran robotik cerrahide kuvvet geri bildirimini kullanmayı araştırmaya başladılar (Rosenberg, 1992).

1990'lar, haptik teknoloji için önemli bir dönüm noktası oldu ve tüketici elektroniği ile profesyonel uygulamalar için tasarlanmış ticari haptik cihazların geliştirilmesiyle bu teknolojiye yönelik araştırma ve geliştirme çeşitli alanlarda, tıp,

sanal gerçeklik ve bilgisayar destekli tasarım dahil olmak üzere, daha erişilebilir hale geldi (Massie & Salisbury, 1994).

Günümüzde, haptik geri bildirim, akıllı telefonlar, oyun kontrolörleri ve giyilebilir cihazlar gibi tüketici elektroniğinde standart bir özellik haline gelmiştir. Haptik geri bildirim algoritmalarındaki ilerlemeler ve haptik aktüatörlerin fiziksel boyutlarının ufalması, daha sofistike ve nüanslı dokunma hisleri sağlayarak, uygulama için yeni olasılıklar açmıştır (Culbertson, Schorr, & Okamura, 2018)

2.2.2 Güncel Uygulama Alanları

Sanal Gerçeklik (VR) ve Artırılmış Gerçeklik (AR) uygulamaları, dokunsal geri bildirim teknolojisinden önemli ölçüde yararlanır. Kullanıcılar, sanal objeleri dokunarak hissedebilir ve hatta sanal dünyalarla etkileşime geçebilirler. Bu, oyunlardan eğitime, müzelerden pazarlama deneyimlerine kadar birçok alanda kullanıcı deneyimini zenginleştirir (Srinivasan & Basdogan, 1997). Eğitimde, VR ve AR ile bütünleşmiş haptik cihazlar, karmaşık konuları daha anlaşılır hale getirerek öğrencilerin öğrenme deneyimlerini geliştirebilir (Pan ve diğerleri., 2016).

Dokunsal geri bildirim cihazları, cerrahi simülasyonlarda ve tıbbi eğitimde önemli bir rol oynar. Cerrah adayları, gerçekçi dokunsal geri bildirim sağlayan cihazlar sayesinde, gerçek bir operasyonun dokusunu ve direncini hissederek pratik yapabilirler. Bu, öğrencilerin prosedürleri güvenli bir sanal ortamda öğrenmelerine ve becerilerini geliştirmelerine olanak tanır (Okamura, 2009). Ayrıca, rehabilitasyon süreçlerinde haptik geri bildirim kullanımı, hastaların fiziksel tedavi sırasında hareketlerini doğru bir şekilde yapmalarına yardımcı olur ve tedavi etkinliğini artırır (Swinnen ve diğerleri., 2010). Haptik geri bildirim ayrıca diş hekimliği eğitiminde de kullanılmakta olup, öğrencilerin diş prosedürlerini uygulamalı olarak öğrenmelerine olanak tanımaktadır (Pettorini ve diğerleri., 2016).

Modern taşıtlarda, sürücülerin dikkatini dağıtmadan kontrol paneli ile etkileşime geçmesini sağlar. Direksiyon simidindeki haptik geri bildirimler veya dokunmatik ekranlardaki titreşimler, sürücünün gözünü yoldan ayırmadan ayarları değiştirmesine yardımcı olur. Bu, sürüş güvenliğini artırır ve daha sezgisel bir kullanıcı deneyimi sunar (Brewster, Chohan, & Brown, 2007). Ayrıca, otomobil

üreticileri, araç içi eğlence ve bilgi sistemlerinde de haptik geri bildirimi kullanarak kullanıcı memnuniyetini artırmayı hedeflemektedir (Hwang & Salvendy, 2010).

Akıllı telefonlar ve tabletler, dokunsal geri bildirim sayesinde kullanıcıların yazı yazma veya uygulamalar arasında gezinme deneyimini iyileştirir. Örneğin, bir tuşa dokunduğunuzda hissedilen hafif bir titreşim, fiziksel bir klavyenin dokunsal yanıtını taklit eder ve kullanıcıya eylemin başarılı olduğunu bildirir (Brewster, 2002). Bu, kullanıcıların cihazlarını daha rahat ve etkin bir şekilde kullanmalarını sağlar. Aynı zamanda, mobil oyunlar ve uygulamalar da haptik geri bildirim sayesinde daha gerçekçi ve etkileşimli hale gelmiştir (Chang ve diğerleri., 2013).

Dokunsal geri bildirimli cihazlar, eğitim materyallerini daha etkileşimli hale getirerek öğrenme deneyimini iyileştirebilir. Özellikle STEM (Bilim, Teknoloji, Mühendislik ve Matematik) eğitiminde, öğrenciler karmaşık kavramları dokunarak öğrenebilir ve deneyimleyebilirler. Bu, öğrenme sürecini daha etkili ve akılda kalıcı hale getirir (Minogue & Jones, 2006). Ayrıca, sanat ve tasarım eğitiminde de haptik teknolojiler, öğrencilerin yaratıcı süreçlerini destekleyebilir ve daha derinlemesine bir öğrenme sağlayabilir (Berg & Vance, 2017).

Dokunsal geri bildirim, görme veya işitme engelli bireyler için teknolojiye erişimi kolaylaştırır. Örneğin, dokunsal geri bildirimli akıllı saatler, kullanıcılara mesajları veya bildirimleri hissederek algılamalarını sağlayarak, iletişimi ve günlük etkileşimleri destekler (Kuber & Tretter, 2010). Ayrıca, bilgisayar kullanımı sırasında dokunsal geri bildirim sağlayan cihazlar, görme engelli bireylerin dijital içeriklerle daha etkin bir şekilde etkileşim kurmalarını sağlar (Jayant ve diğerleri., 2010).

Nesnelerin interneti cihazları ile entegrasyon, dokunsal geribildirim teknolojisinin yeni kullanım alanlarını ortaya çıkarmaktadır. Akıllı ev otomasyonu, kullanıcıların ev cihazlarını daha sezgisel ve etkileşimli bir şekilde kontrol etmelerini sağlamak için önemli bir hedef alanıdır. Uzaktan eğitim, engelli bireyler için erişilebilirlik çözümleri ve gelişmiş kullanıcı arayüzleri, haptik teknolojinin potansiyelini açığa çıkarabilecek diğer alanlardır (Moin & Shah, 2020). Akıllı şehir projelerinde de haptik geri bildirim teknolojisi, kullanıcıların şehir altyapısı ile daha etkileşimli ve verimli bir şekilde etkileşimde bulunmalarını sağlayabilir (Krishna ve diğerleri., 2018).

2.2.3 Teknik Kısıtlar

Dokunsal geri bildirimli cihazlarının sunduğu deneyimler, kullanıcıların sanal ve uzaktan etkileşimlerini zenginleştirmektedir. Ancak, bu teknolojinin uygulanabilirliği ve etkinliği üzerinde birkaç teknik ve pratik kısıtlama bulunmaktadır.

Gerçekçilik ve Doğruluk: Dokunsal geri bildirimli cihazlar, fiziksel dünyanın karmaşıklığını ve dokunsal geri bildirimin zenginliğini tam olarak yansıtamayabilir. Gerçek dünyadaki dokunuşun nüanslarını simüle etmek, özellikle ince dokunuşlar ve yumuşak dokular söz konusu olduğunda, teknolojik olarak zorlayıcıdır (Salisbury & Srinivasan, 1997). Bu, tıp ve eğitim gibi alanlarda, gerçekçilik derecesinin kritik öneme sahip olduğu durumlarda, haptik simülasyonların sınırlılıklarını ortaya çıkarır.

Maliyet: Yüksek kaliteli dokunsal geri bildirim cihazları, gelişmiş motorlar ve hassas kontrol mekanizmaları gerektirdiğinden pahalı olabilir. Bu, özellikle eğitim, sağlık hizmetleri ve araştırma gibi bütçe kısıtlamalarının olduğu alanlarda, geniş çapta benimsenmelerini sınırlandıran bir faktördür (Culbertson, Schorr, & Okamura, 2018).

Teknik Karmaşa: Bu sistemlerinin tasarımı ve entegrasyonu, yüksek derecede teknik bilgi ve uzmanlık gerektirir. Bu sistemlerin geliştirilmesi ve bakımı, karmaşık yazılım ve donanım entegrasyonu içerir, bu da kullanımını ve uygulanabilirliğini sınırlandıran bir faktördür (Jones & Sarter, 2008).

Kullanıcı Deneyimi Farklılıkları: Kullanıcıların dokunsal algıları arasındaki bireysel farklılıklar, haptik geri bildirim cihazlarının etkinliğini etkileyebilir. Bazı kullanıcılar için yeterince güçlü olan dokunsal geri bildirim, diğerleri için yetersiz veya aşırı güçlü olabilir. Bu, özellikle çeşitli kullanıcı gruplarına hitap eden ürünlerde, kullanıcı deneyiminin kişiselleştirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarır (McGee, Gray, & Brewster, 2001).

Gecikmeler ve Senkronizasyon Sorunları: Haptik cihazlar ve uygulamalar arasındaki gecikmeler, kullanıcı deneyimini olumsuz etkileyebilir. Gerçek zamanlı dokunsal geri bildirim gerektiren uygulamalarda, bu gecikmeler, gerçekçilik hissini azaltabilir ve kullanıcı etkileşimini bozabilir (Basdogan, Ho, Srinivasan, & Slater, 2000).

Fiziksel ve Ergonomik Sınırlamalar: Haptik cihazların tasarımı, kullanıcıların uzun süreli kullanımı sırasında rahatlık ve ergonomi sağlamalıdır. Ancak, bazı haptik cihazlar, ağırlık ve boyut nedeniyle kullanımı zorlaştırabilir veya

kullanıcı yorgunluğuna yol açabilir. Bu, özellikle uzun süreli veya yoğun kullanım gerektiren uygulamalarda önemli bir sınırlılıktır (O'Malley & Gupta, 2008).

Devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları, bu teknolojik sınırlamaları aşmayı ve haptik geri bildirim cihazlarının daha geniş uygulama alanlarında etkili bir şekilde kullanılmasını sağlamayı amaçlamaktadır.

2.3 Güncel Uygulamalı Çalışmalar

Akademik kaynaklar, internet forumları ve paylaşım platformlarının taranması sonucunda bu konuda yapılmış ve bu alana önemli denilebilecek seviyede katkıda bulunmuş iki farklı çalışma incelenmiş ve özetlenmiştir. Bu çalışmaların olası iyileştirilebilecek yönleri tartışılmış ve önerilerde bulunulmuştur.

2.3.1 SmartKnob

SmartKnob, Scott Bezek tarafından geliştirilmiş açık kaynaklı bir haptik geri bildirimli döner düğme projesidir. Proje, haptik geri bildirim sağlamak için bir fırçasız motor ve manyetik bir enkoder kullanmaktadır.



Şekil 3. Smart Knob Uygulaması

Kaynak: Github, 2023, “Smart Knob Projesi.” Erişim adresi: <https://github.com/scottbez1/smartknob>

Bu cihaz, sanal girintiler ve sanal kutuplar gibi dokunsal geribildirim desenlerini gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca cihazın tabanındaki baskı devre kartlarına

monte edilmiş gerinim ölçer (strain gauge)'ler vasıtasıyla kullanıcıdan dokunma girdisi de alabilmektedir.

Sanal Kutuplar: Kullanıcı, düğmenin sanal kutuplarını yazılım aracılığıyla ayarlayabilir. Aç/Kapa uygulamaları için uygun bir dokunsal geri bildirim desenidir.

Sanal Girintiler: Düğme üzerinde hissedilebilir sanal çentikler oluşturulabilir. Bu çentiklerin konumu ve sayısı yazılım ile dinamik olarak değiştirilebilir. Analog değer ayarlama uygulamaları için uygun bir dokunsal geri bildirim desenidir.

Bu projede web tabanlı bir kullanıcı arayüzü mevcuttur. Bu arayüz, vasıtasıyla kullanıcılar düğme parametrelerini ayarlayabilir ve dokunsal etkileşimli gösterim senaryoları oluşturabilir.

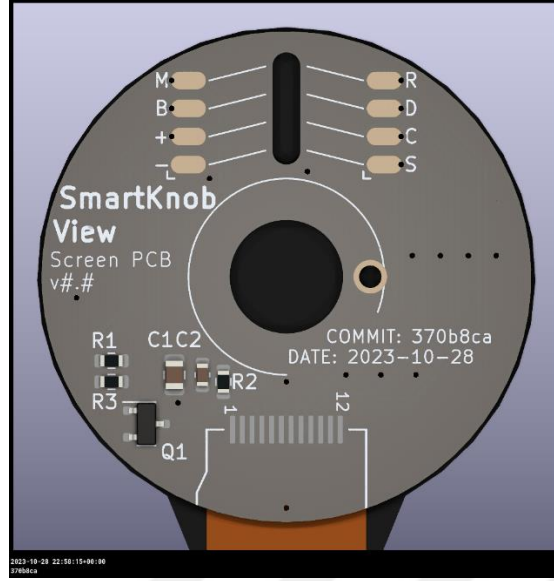
Bu senaryolar aşağıda listelenmiş alanlarda uyarlanabilmektedir:

- Ev Otomasyonu
- Müzik ve Multimedya Kontrolleri
- Endüstriyel ve Profesyonel Uygulamalar

Proje açık kaynaklı olduğu için, kullanıcılar kendi SmartKnob cihazlarını yapabilirler. Ancak, bu cihazın yapımı ileri düzey lehimleme becerileri gerektirir ve montaj süreci oldukça zaman alıcı ve hassastır. Proje dosyaları, şematikler, parça listeleri ve daha fazlası GitHub üzerinden erişilebilir durumdadır.

İyileştirilebilecek Yönlerin Tartışılması

- Cihazda kullanılan ekran, özel bir bağlantı parçası gerektirmektedir ve 8 tane kablonun 4mm çapında bir delikten beslenmesi gerekmektedir. Bu da tasarımı karmaşıktırmakta ve üretilebilirliği oldukça zorlaştırmaktadır.
- Kullanıcıdan dokunsal girdi alabilmek için gerinim ölçerlerin monte edilmesi gerekmektedir. Bu da aynı şekilde tasarımı karmaşıktırmakta ve üretilebilirliği zorlaştırmaktadır.



Şekil 4. Ekran Bağlantı Devresi

Kaynak: Github, 2023, “Smart Knob Projesi.” Erişim adresi: <https://github.com/scottbez1/smartknob>

- Sadece iki farklı dokunsal geri bildirim deseni mevcuttur

Öneriler

- Üzerinde hem ekran hem de kontrolcü bulunduran modüller kullanılarak seri, I2C gibi sadece 3 farklı bağlantı noktası gerektiren bir modül kullanılıp üretim ve montaj basitleştirilebilir
- Dokunmatik ekran kullanılarak kullanıcıdan dokunsal girdi alınması vasıtasıyla hem tasarım sadeleştirilebilir hem de kaydırma gibi daha fazla çeşit dokunsal girdinin mümkün olması sayesinde daha zengin bir etkileşim sağlanabilir.
- Gömülü yazılım ve kullanıcı arayüzü daha fazla dokunsal geri bildirim deseni eklenerek güncellenebilir.

2.3.2 Döner Düğmeleri Haptik Sistem ile Prototipleme

Kurnaz ve Göktürk (2024) tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, döner düğmelerin haptik geri bildirim sağlayan bir prototip sistem ile nasıl kullanılabileceğini ve bu sistemin kullanıcı deneyimini nasıl etkilediğini araştırmaktadır. Tüketici elektroniğinde fonksiyonellik ve dayanıklılık gibi temel özelliklerin standartlaşması, algısal kalite ve kullanılabilirlik gibi ayırt edici faktörlerin

önemini artırmıştır. Bu bağlamda, çalışmanın amacı döner düğmelerin algısal kalite ve kullanılabilirlik ilişkisini sayısallaştırmak ve optimize etmektir.

Önerilen sistem, şaft, motor, tork sensörü ve kontrol ünitesi ve yazılımından oluşmaktadır. Şaft, farklı döner düğme başlarının takılabileceği bir yapıdır. DC motor, kullanıcının aldığı haptik geri bildirimleri oluşturur ve tork sensörü, döner düğmenin anlık kuvvet ve açış değerlerini ölçer. Kontrol ünitesi ve yazılım, haptik geri bildirimlerin yönetimi ve verilerin toplanması için kullanılır. Bu sistemdeki haptik parametreler, kullanıcı deneyimini optimize etmek için detaylı olarak incelenmiştir. Bu parametreler arasında kuvvet katsayısı, sürtünme katsayısı, atalet katsayısı ve çentik katsayısı bulunmaktadır.

Prototip sistemde, kullanıcı arayüzü aracılığıyla haptik geri bildirimler ayarlanabilir ve izlenebilir. Kullanıcı arayüzü, döner düğmenin farklı parametrelerini kontrol etmeyi ve bu parametrelerin kullanıcı deneyimini nasıl etkilediğini gözlemlemeyi mümkün kılar. Bu bağlamda, döner düğme profili oluşturma, deney oluşturma ve anlık verilerin izlenmesi gibi işlemler gerçekleştirilebilir.

Bu çalışma, dokunsal geribildirimli döner düğmelerin sanal ortamda modellenmesi ve bir deney kiti ile gerçekleştirilmesini bilimsel olarak tarif ederek bu alanda yapılmış olan en güncel ve önemli çalışmalardan biridir. Çalışmada anlatılan dokunsal geribildirim desenlerinin gerçekleştirilebileceği bir deney kiti tasarlanmıştır. Bu deney kiti, döner düğme profillerinin belirlenmesi ve kullanıcı deneyimlerinin ölçülmesi için kullanılabilir. Haptik sistem bileşenleri ve kullanıcı arayüzü, kullanıcıların döner düğme profilleri oluşturmalarına ve bu profilleri test etmesine olanak tanır (Kurnaz & Göktürk, 2024).

İyileştirilebilecek Yönlerin Tartışılması

- Çalışmada kullanılan donanım ile ilgili kısıtlı bilgi mevcuttur. Dokunsal geribildirim alanında motor kontrolü ve ilgili ölçümlerin yapılması donanımla doğrudan ilişkili olduğundan çalışmada ortaya konulan kullanıcı arayüzünün herhangi bir dokunsal geribildirim donanımına uyarlanması çok kolay olmayacaktır.

- Çalışmada, control prosesinde geri besleme elemanı olarak tork sensörü kullanılmıştır. Bu da deney ekipmanının maliyetini, üretilebilirliğini ve ebatlarını önemli ölçüde etkilemektedir.

Öneriler

- Açık kaynak bir donanımı destekleyecek şekilde kullanıcı arayüzü güncellenebilir.
- Tork sensörü kullanmak yerine akım ve gerilim ölçümleri vasıtasıyla tork hesaplanabilir.



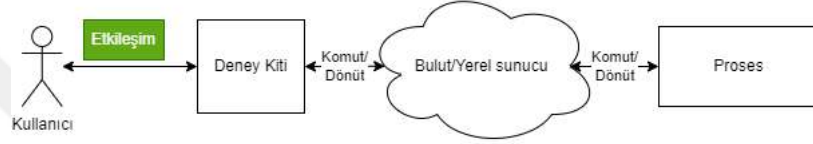
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

DENEY KİTİ TASARIMI

Literatür taraması, güncel uygulamalı çalışmalar ve bu çalışmalarda iyileştirilebilecek noktalar göz önünde bulundurularak deney kiti tasarımına başlanmıştır. Öncelikle kavramsal tasarım yapılmıştır.

3.1 Kavramsal Tasarım

Bu aşamada deney kitinin ana yapısı ve temel işlevselliği belirlenmiştir. Kit, bir kullanıcı ile etkileşime girerek, belirli süreçlerin uzaktan yönetilmesi üzerine uygulama geliştirmek için deneysel bir platform olarak tasarlanmıştır.



Şekil 5. Deney Kiti Temel İşlev Diyagramı

Kullanıcı ihtiyaçları

- Teknolojik gereksinimler
- Geliştirme ve entegrasyon süreleri
- Boyut
- Ergonomi
- Maliyet

Gibi kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Sade ve minimal bir yaklaşım ile, detaylı ve optimal bir tasarım ortaya çıkarılmıştır.

Öncelikle kitin temel işlev ve özellikleri belirlenmiştir. Bu unsurlar aşağıda listelenmiştir.

1. Kullanıcı cihazı tek eliyle rahatça kullanabilmeli
2. Kullanıcı döner düğmeyi çevirerek girdi sağlayabilmeli.
3. Kullanıcı ekrana dokunarak ve kaydırarak sisteme girdi sağlayabilmeli.
4. Kullanıcı döner düğmeyi kadar sağa, sola, ileri ve geri iterek sisteme girdi sağlayabilmeli
5. Cihaz, kullanıcıya dokunsal geribildirim sağlayabilmeli.

6. Cihaz, kullanıcıya görsel geribildirim sağlayabilmeli.
7. Cihaz, kullanıcıya sesli geribildirim sağlayabilmeli.
8. Cihaz, kablolu ve kablosuz şekilde bir sunucuyla haberleşebilmeli.
9. Cihaz, kullanıcıdan el jestleri vasıtasıyla komut alabilmeli.
10. Cihaz, ortam nem ve sıcaklığını ölçebilmeli ve görselleştirebilmeli.
11. Cihaz, ortam ışık şiddetini ölçebilmeli ve görselleştirebilmeli.
12. Cihaz, home assistant gibi açık kaynak ev otomasyonu platformlarına entegre edilebilmeli.
13. Cihaz, kişisel bilgisayar çevreselleri alanında kabul görmüş olan USB-C arayüzünü desteklemeli
14. Cihaz, mümkün olduğunca uygun maliyetli ve erişilebilir alt parçalardan oluşmalı.

Bu işlemlere göre kitin temel bileşenleri belirlenmiştir:

A. Kontrolcü Modülleri

- a) Çevresel kontrolcü modülü
- b) Motor kontrolcü modülü
- c) Önyüz ve uzak erişim kontrolcü modülü

B. Giriş/Çıkış modülleri

- a) Motor
- b) Dokunmatik ekran

C. Sadece giriş Modülleri

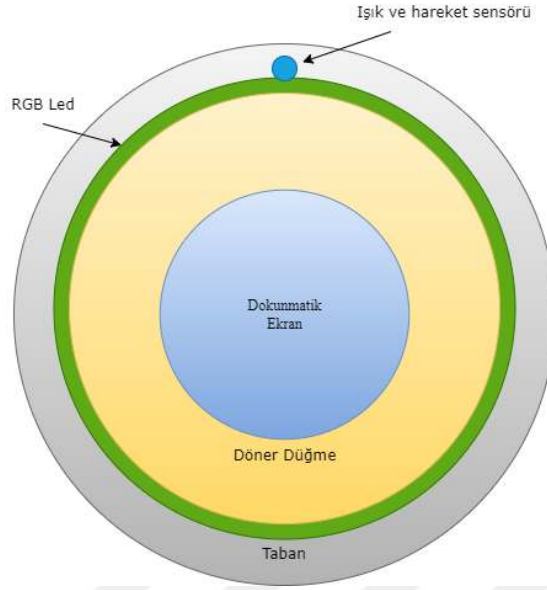
- a) Hareket ve ışık sensörü
- b) IMU sensörü
- c) Nem ve Sıcaklık sensörü

D. Sadece Çıkış Modülleri

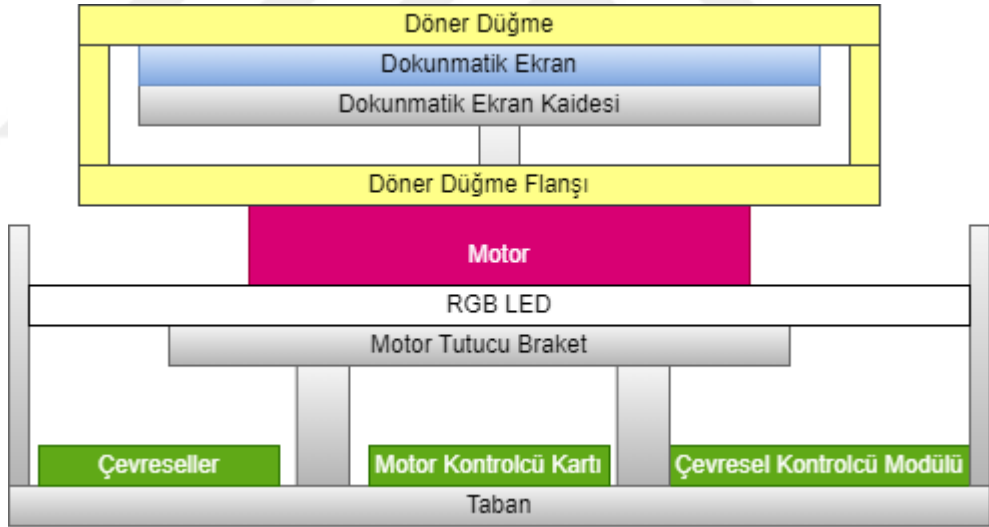
- a) RGB Led

E. Bağlantı parçaları ve kutu

- a) Döner düğme gövdesi
- b) Döner düğme flanşı
- c) Taban (Kutu)
- d) Motor braketi



Şekil 6. Temel Bileşenler Üstten Görünüm



Şekil 7. Temel bileşenler Yandan Kesit Görünüm

3.1.1 Kontrolcü Modülleri

Motor kontrolü, dokunmatik ekran kontrolü, RGB led animasyonları, uzak erişim gibi

birden fazla uygulama olduğundan, bu görevler;

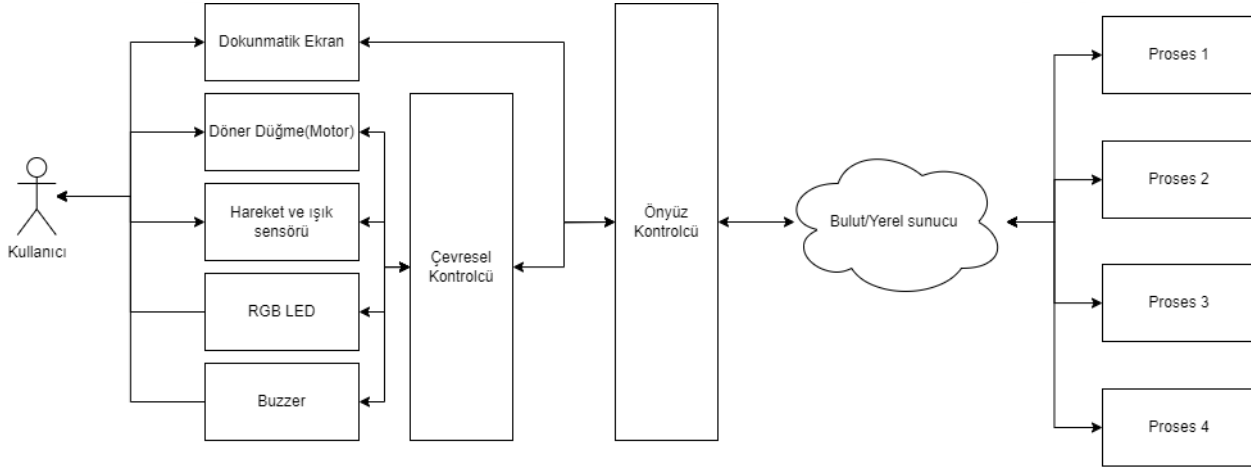
- Çevresel kontrolcü
- Önyüz ve uzak erişim kontrolcüsü

- Olacak şekilde iki farklı kontrolcüye bölüştürülmüştür.
- Buna göre, Önyüz modülü:
- Dokunmatik ekran kontrolü
- Uzak sunucu ile kablolu ve kablosuz haberleşme

Görevlerini üstlenirken, çevresel kontrolcü modülü ise:

- Motor kontrolü
- RGB led kontrolü
- Hareket ve ışık sensörü, IMU sensörü ve nem ve sıcaklık sensörlerinin izlenmesi

Görevlerinden sorumlu olacaktır.



Şekil 8. Kontrolcü Mimarisi

3.1.2 Giriş/Çıkış Modülleri

Dokunmatik Ekran: Kullanıcının ekrana dokunması vasıtasıyla: kısa basma, basılı tutma, kaydırma hareketleri algılanacaktır. Ayrıca, ekran üzerinde, yazı, grafik, animasyon gibi görseller gösterilip kullanıcıya görsel geribildirim sağlanacaktır.

Motor: Kullanıcının rotora bağlı bir döner düğmeyi çevirmesiyle, bir manyetik enkoder entegresi vasıtasıyla kullanıcıdan döner düğmeyi sağa ve sola çevirme şeklinde girdiler elde edilecektir. Bunun yanında, motorun uyguladığı kuvvet kontrol edilerek kullanıcıda dokunsal geribildirim sağlanacaktır.

3.1.3 Sadece Giriş modülleri

Hareket ve Işık Sensörü: Jest sensörü olarak da adlandırılan bu sensörler, herhangi bir fiziksel temas gerektirmeden kullanıcıdan girdi almayı mümkün kılacaktır. Bu sensör, aynı zamanda ortamdaki ışık şiddetini ölçerek ışıklandırma kontrol otomasyonu için kullanılabilir. Bu sensör vasıtasıyla, kullanıcının eliyle;

- İleri
- Geri
- Yukarı
- Aşağı
- Sağa
- Sola
- Saat yönü
- Ters saat yönü
- Yavaş el sallama
- Hızlı el sallama

Hareketleri algılanacaktır.

IMU Sensörü: Bu sensör sayesinde kitin gövdesi herhangi bir yönde eğim kazandığı zaman algılanabilecek olup, kullanıcının, döner düğme gövdesini bir yöne doğru itmesi vasıtasıyla sisteme girdi sağlanabilecektir.

Sıcaklık ve Nem Sensörü: Bu sensör sayesinde ortamın sıcaklık ve nem koşulları gözlemlenecek ve uzak sunucuya raporlanabilecektir. Bu sayede hem home assistant gibi açık kaynaklı ev otomasyonu platformlarına entegrasyon için bir örnek uygulama temeli oluşturulacak, hem de sistem bakımı için önemli bir veri elde edilecektir.

3.1.1. Sadece Çıkış Modülleri

RGB LED Halkası: Kullanıcıya görsel geribildirim sağlamak için kullanılacaktır.

- Açık/Kapalı
- Renk değişimi
- Yanıp sönme

- Yükleniyor animasyonu
- Artış animasyonu
- Azalma animasyonu

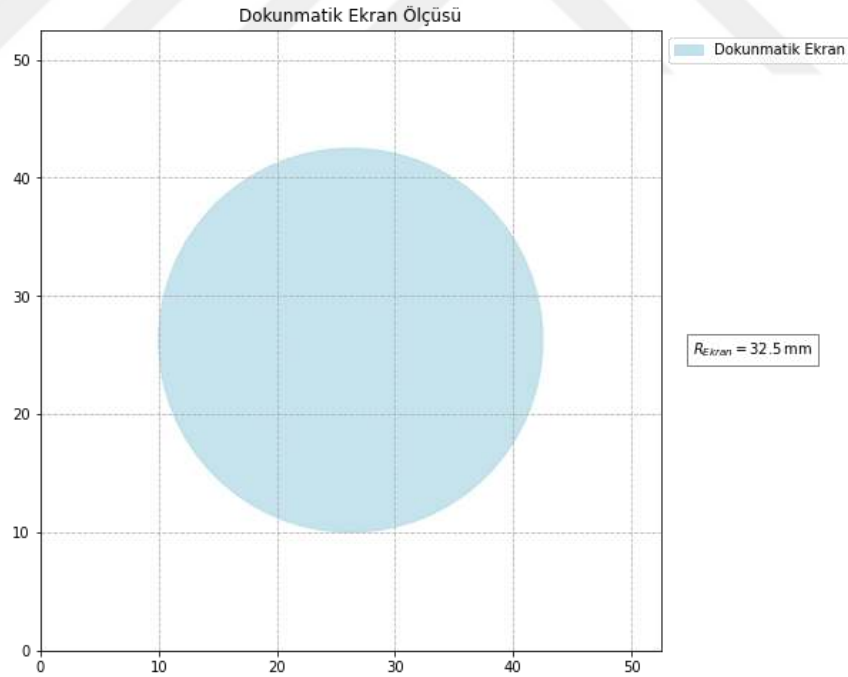
Gibi görseller sunularak kullanıcıya geribildirim sağlanacaktır.

3.1.4 Bağlantı Parçaları ve Kutu

Bütün modülleri sabitlemek ve deney cihazını makul bir boyutta ve ergonomik bir yapıda sabitlemek için bağlantı parçaları ve kutu tasarlanmıştır.

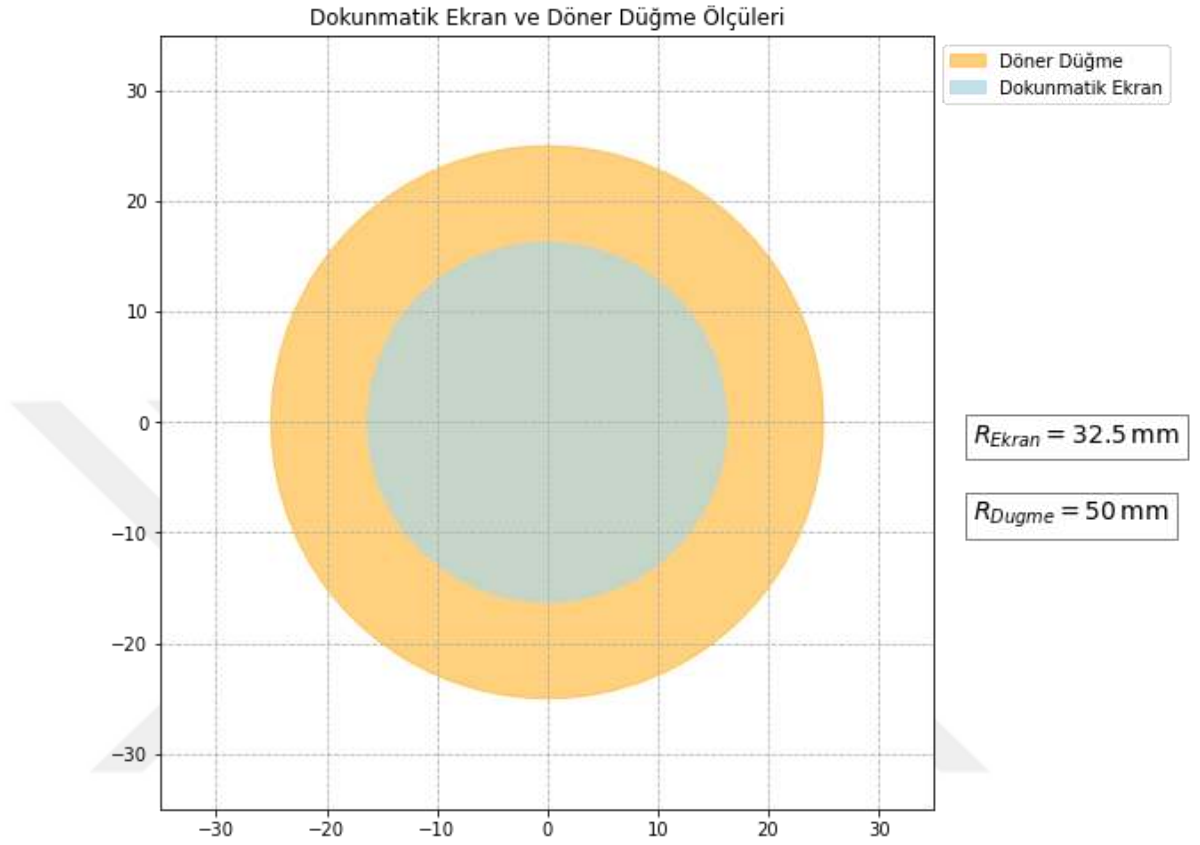
3.1.5 Tasarım Başlangıcı ve Sınırlamalar

Cihazın mekanik tasarımında başlangıç noktası ve esas kısıtlayıcı faktör olarak dokunmatik ekran boyutu referans alınmıştır. Döner düğmenin tek elle kullanılan bir cihaz olduğu düşünülerek, ergonomi göz önünde bulundurularak dokunmatik ekran çapı 1,28 in  yani yaklaşık 32,5 mm olarak belirlenmiştir. Bu boyut aynı zamanda akıllı saatlerde sıklıkla kullanılmaktadır.



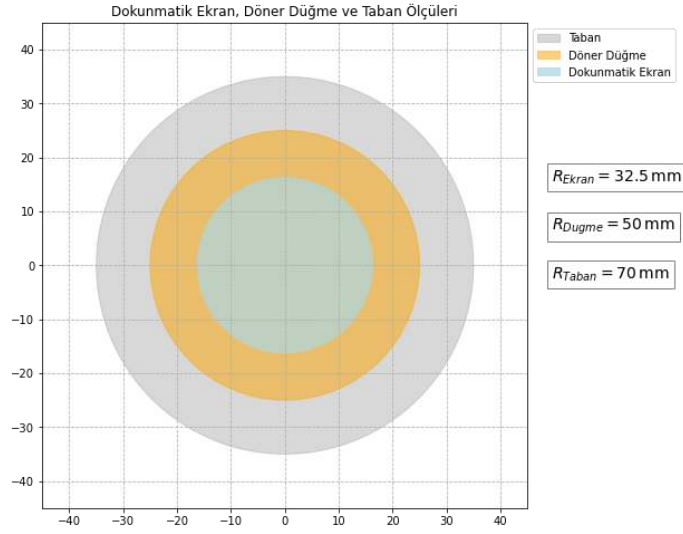
şekil 9. Dokunmatik Ekran Boyutu

Buradan yola çıkarak, döner düğmenin dokunmatik ekran etrafında ince bir tabaka şeklinde olacağı düşünülerek döner düğme çapı 50mm olarak belirlenmiştir.



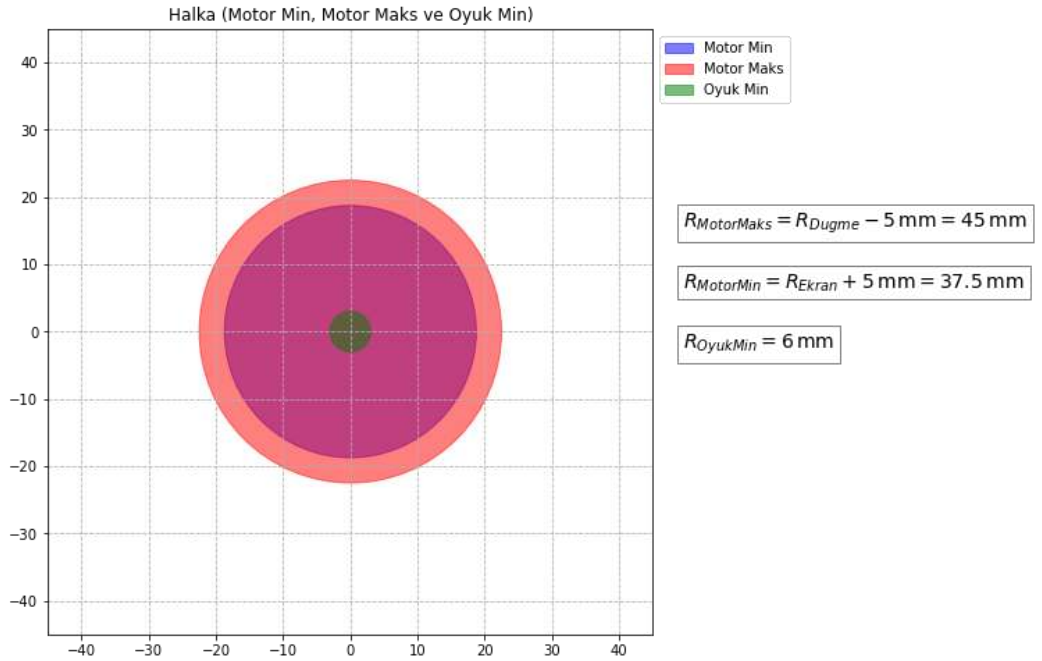
Şekil 10. Dokunmatik Ekran ve Döner Düğme Boyutları

Hareket ve ışık sensörünün sorunsuz çalışabilmesi için yaklaşık 10mm yakınında herhangi bir obje bulunmaması gerektiğinden, taban parçasının en az 70mm olması gerektiği belirlenmiştir.



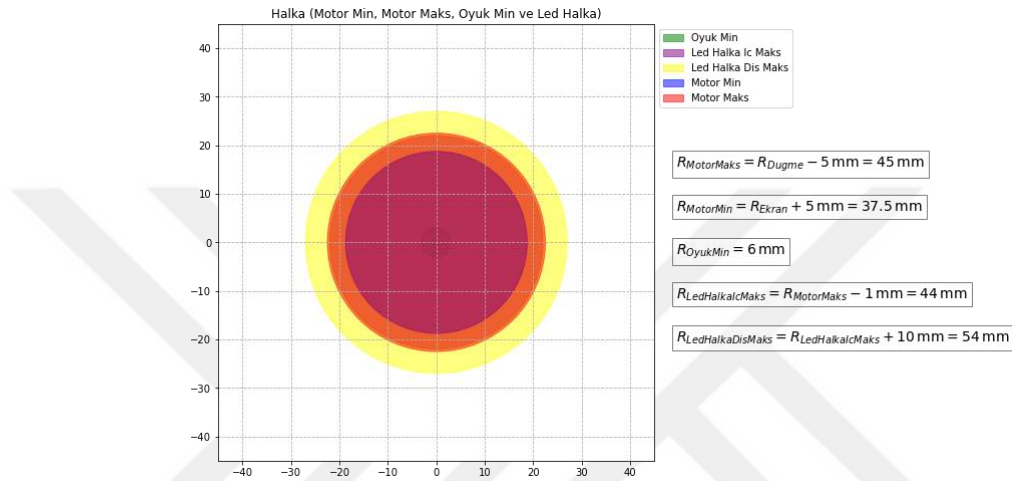
Şekil 11. Dokunmatik Ekran, Döner Düğme ve Taban Boyutları

Bu ölçüler göz önünde bulundurularak, motor çapı $45\text{mm} > R_{motor} > R_{ekran} (32.5\text{mm}) + 1\text{mm}$ eşitsizliği ile sınırlandırılmıştır. Aynı zamanda, dokunmatik ekran modülünün kaidesi ve enerji sağlamayıp haberleşmek için toplam 4 adet 30AWG kesitinde kablo bağlantısı motorun merkezinden geçirileceği için, motorun en az 5mm çapında oyuk şafta sahip olması gerekmektedir.

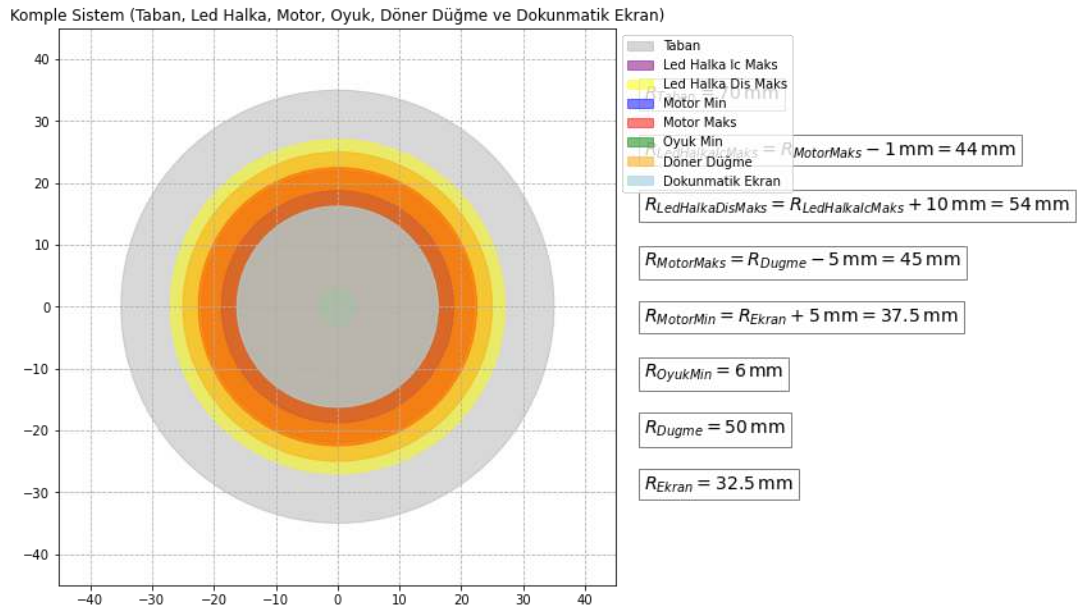


Şekil 12. Motor Ölçü Sınırları

RGB Led halkası, motor statorunun altında konumlanacak olup, çapı motorun çapına göre belirlenmelidir. Kısa devrenin önüne geçmek ve montaj sırasında zorluklarla karşılaşılabilmesi için LED halkasının iç çapının motor çapından en fazla 1mm daha dar olması gerekmektedir. Bu halkanın sağlayacağı ışığın kullanıcıyı rahatsız etmemesi adına zayıf bir ışık yayması gerekmektedir. Bu sebeple, Halkanın dış çapı, iç çapından en fazla 10 mm daha kalın olmalıdır.



Şekil 13. Motor ve LED Halkası Ölçü Sınırları



Şekil 14. Belirlenen Ölçüler

3.2 Elektronik Tasarım

Deneysel cihazın işlevselliğini sağlayan alt modüllerin tamamı elektronik modüller olduğundan, bu aşama tasarımın en önemli bölümlerinden biridir. Malzeme ve ürün seçimini belirleyebilmek için farklı modüllerle denemeler yapılmış ve bu denemelerin sonunda optimal bir tasarım elde edilmiştir.

Bu tasarım, özel tasarım bir motor kontrolcü devresi, erişilebilir ve uygun maliyetli bir motor ve yine aynı şekilde açık kaynaklı ve erişilebilir elektronik modüllerden oluşmaktadır.

Deneysel cihazda bulunan elektronik modüller aşağıdaki gibidir:

- Motor
- Motor kontrolcü
- Hareket ve ışık sensörü
- Sıcaklık ve nem sensörü
- RGB Led halka
- Çevresel kontrolcü
- Önyüz kontrolcüsü

Tasarım kısıtlarında motor boyutlarının belirleyici bir faktör olduğu göz önünde bulundurularak motor seçimi önceliklendirilmiştir. Motor seçimi sürecinde aşağıdaki faktörler göz önünde bulundurulmuştur:

3.1.2. Motor

Dokunsal geribildirim sağlayacak olan motor, bu sistemin en önemli unsurudur.

Rotör açısı ölçülerek döner düğme girdileri dinlenecek ve sargıları indüklenerek tork üretecek dokunsal geribildirim sağlayacaktır. Bu motor, kullanıcı tarafından fark edilebilecek ancak kullanıcıya zarar vermeyecek kadar tork üretebilmelidir.

Bu değerler, erkeklerin ayakta durma pozisyonunda ve serbest elleriyle kendilerini destekleyerek uygulayabilecekleri maksimum tork miktarlarını temsil etmektedir. Çalışmada düğme boyutu, eldiven kullanımı ve panel yönelimi gibi değişkenlerin etkileri incelenmiş ve bu limitler belirlenmiştir.

Uygun motor türünü belirlemek amacıyla Fırçasız DC motorlar, Fırçalı DC motorlar ve Step motorları karşılaştırmaktadır.

Mekanik kısıtlar:

- Döner düğme boyutları sebebiyle maksimum dış çap 45mm olmalı.
- Ön yüz modülü kaidesi için minimum oyuk şaft çapı 6mm olmalı
- Yüksekliği maksimum 25mm olmalı.

Elektronik kısıtlar:

- USB-C uyumluluk için 5 Volt gerilimle çalışabilmeli
- Kişisel bilgisayarlarla uyumluluk için 500 mA akım ile yeterli torku üretebilmeli
- Dokunsal geribildirim uygulamalarının kalitesi için pürüzsüz dönüş hissi sağlamalı yani düşük sürtünme katsayısına sahip olmalı

Üretilbilirlik kısıtları:

- Piyasada erişilebilir ve global tedarikçiler tarafından perakende olarak tedarik edilebilir olmalı
- Fiyatı 30 doların altında olmalı

Bu kriterler baz alınarak aşağıdaki motor türleri arasında bir kıyaslama yapılmıştır:

- Fırçasız DC Motor
- Fırçalı DC Motor
- Step Motor

Fırçasız DC Motorlar

Adından da anlaşılacağı gibi fırça içermezler. Yani rotör ve statör arasında elektriksel bir bağlantı yoktur. Stator üzerinde sabit mıknatıslar bulunur ve rotor, elektronik olarak komütasyon yapılır (Hendershot & Miller, 2010). Bu motorlar, uzun ömürlü ve bakım gerektirmeyen yapılarıyla bilinirler. Aynı zamanda rotor ve stator arasında sürtünme olmadığından en pürüzsüz dönme hissiyatını sağlayan motor türüdür.

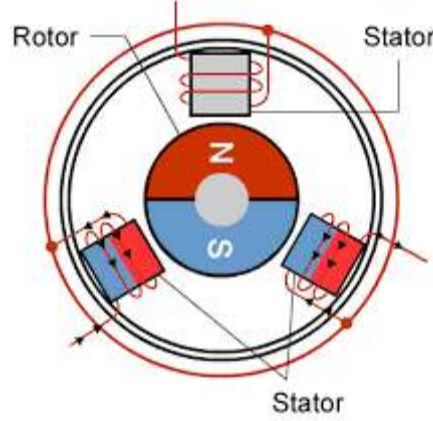
Avantajları

- Dayanıklılık: Fırça ve komütatör olmadığından aşınma çok azdır.
- Verimlilik: Yüksek verimlilikleri ile enerji tüketimini azaltır.

- Kontrol Hassasiyeti: Gelişmiş kontrol sistemleri ile hassas hız ve tork kontrolü sağlar.

Dezavantajları

- Maliyet: Diğer motor türlerine göre genellikle daha pahalıdır.



Şekil 15. Fırçasız DC Motor iç yapısı

Kaynak: Adafruit (2024a), Adafruit Motor Selection Guide, Erişim adresi: learn.adafruit.com

Statör sargılarının indüklenmesi vasıtasıyla oluşturulan elektromotor kuvvet, rotorün dönmesini sağlar. Bu şekilde statör sargılarının akım ve gerilim değerleri kontrol edilerek hassas tork/hız/pozisyon kontrolü sağlanır. Çok kutuplu yapısı sayesinde açık çevrim kontrol için de uygundur.

Fırçalı DC Motorlar

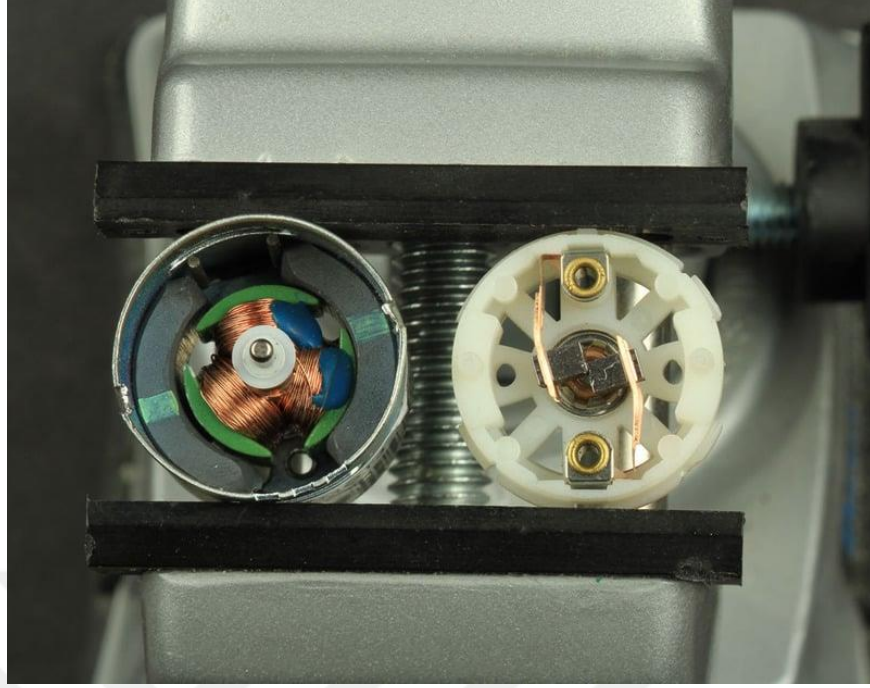
Fırçalı DC motorlar, rotor üzerinde sargılar ve stator üzerinde sabit mıknatıslar veya elektromıknatıslar bulunan geleneksel DC motorlardır. Fırçalar ve komütatör yardımıyla elektriksel komütasyon sağlanır (Hughes & Drury, 2019).

Avantajları

- Basitlik: Basit yapıları ile kolay kontrol edilirler.
- Düşük Maliyet: Göreceli olarak daha ucuzdur.

Dezavantajları

- Bakım Gereksinimi: Fırçalar zamanla aşınır ve değiştirilmesi gerekir.



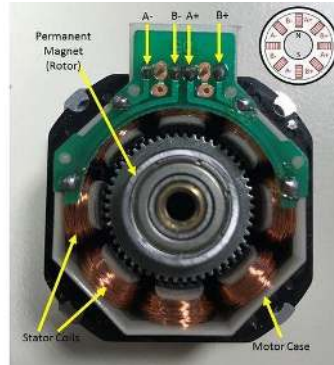
Şekil 16. Fırçalı DC Motor İç Yapısı

Kaynak: Adafruit (2024a), Adafruit Motor Selection Guide, Erişim adresi: learn.adafruit.com

Fırça kutuplarına gerilim uygulanması sonucu oluşan manyetik alan rotörün dönmesini sağlar.

Step Motorlar

Step motorlar, belirli açısal adımlarla dönen motorlardır. Rotor, stator üzerindeki sargıların belirli bir sırayla enerjilendirilmesiyle hareket eder (Kenjo & Sugawara, 1994). Her adım motorun belirli bir açıyla dönmesini sağlar. Yüksek tutma torkları ve hassas control edilebilirliği sayesinde 3D Printerlar ve CNC makineleri gibi iş parçalarının hassas pozisyonlanması gereken uygulamalarda sıklıkla tercih edilirler.



Şekil 17. Step Motor İç Yapısı

Kaynak: Adafruit (2024), Adafruit Motor Selection Guide, Erişim adresi: learn.adafruit.com

Avantajları

- Yüksek Hassasiyet: Hassas pozisyon kontrolü sunar (Johnson vd., 2020).
- Açık Çevrim Kontrol: Geri beslemeye ihtiyaç duymadan kontrol edilebilir (Smith & Williams, 2019).

Dezavantajları

- Verimlilik: Sürekli enerji tüketimi nedeniyle daha düşük verimliliğe sahiptir (Brown vd., 2021).
- Elektronik Kontrol Gereksinimi: Daha karmaşık elektronik sürücüler gerektirir (Davis & Miller, 2018).

Bu kıyaslamaya göre bu cihaz için en uygun motor çeşidinin fırçasız DC motor olduğu belirlenmiştir. Bunun başlıca sebepleri aşağıda listelenmiştir:

- İnce gövde yapısı
- Pürüzsüz dönüş hissi
- Oyuk şaft özelliği
- Yüksek verimliliği
- Piyasada erişilebilirliği

Özellikle gimbal motoru olarak adlandırılan, çok kutuplu ve iç yapısı iyi dengelenmiş motorlar bu cihaz için en uygun motor türü olarak belirlenmiştir.



Şekil 18. Gimbal Motoru Örneği

Bu seçim yapıldıktan sonra, aşağıda listelenmiş kriterlere uyan fırçasız gimbal motorları araştırılmış olup 5 farklı motor seçilmiş ve denemeler yapılmıştır.

Bu 5 seçenek arasından en uygun model belirlenirken:

- Boyut
- Güç
- Pürüzsüz dönme hissi

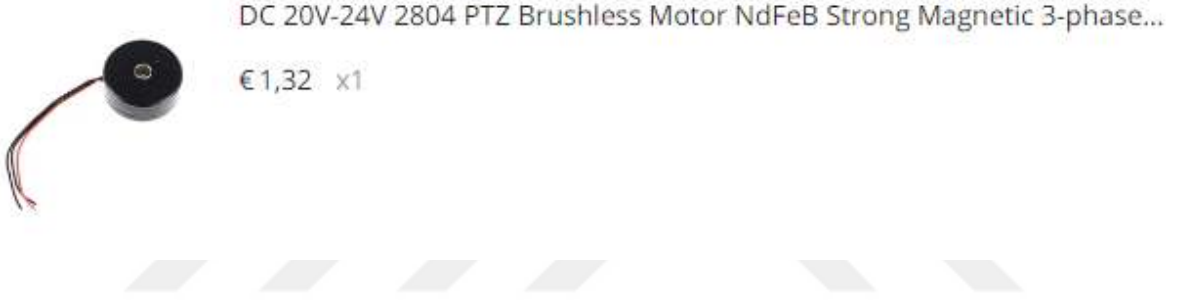
- Fiyat ve erişilebilirlik
- Radyal polarize magnet bulundurup bulundurmaması

Kriterleri göz önünde bulundurularak aşağıdaki tablo oluşturulmuştur.

Tablo 1. Deneme yapılacak Motorlar

	Model Adı	Dış çap(mm)	Oyuk şaft çapı(mm)	Yükseklik(mm)	Kutup sayısı	Ağırlık(g)	Radyal polarize magnet	Fiyat(\$)
A	FlyCat 2804	34.5	5	13.1	11	21	Hayır	10
B	-	33	5.5	9.5	11	22	Hayır	13
C	iPower GBM2804	35	6.5	25	12	50	Evet	26
D	OT-EM3215D2450Y1R- BEZE	32	6	11.5	8	30	Evet	25
E	DYS 2.0kg Gbm5208- 75	63	12	23.5	24	189	Hayır	29

B motoruna ait marka ve model bilgisi bulunmamakta olup, AliExpress platformu üzerinden “gimbal motoru” adı altında tedarik edilmiştir.



Şekil 19. B motoru ürün açıklaması



Şekil 20. Seçilen ve deneme yapılan motorlar

Sonrasında, bu motorların elektromekanik karakterlerinin analiz edilmesi için bir deneme ortamı oluşturulup çeşitli deneme analizler yapılmıştır.

Elektromekanik karakterlerinin analiz edilmesi için oluşturulan deneme ortamında yapılan testler ve analizler şu şekildedir:

- **Motorların Yüksüz Durumdaki Gerilim/Akım Eğrileri**

Motorların yüksüz durumdayken gerilim ve akım eğrileri ölçülmüştür. Bu eğrinin doğrusallığının yüksek olması, motorun elektromekanik olarak ideal yapıda olduğunu gösterir. Ayrıca dokunsal geribildirim sağlamak için tetiklenen hareketlerin düzgün bir şekilde gerçekleşmemesi, kullanıcı deneyiminin zayıflamasına sebep olabilir. Kim ve diğerleri (2018), Lee ve Smith (2016), Johnson ve Brown (2019) ve Wang ve diğerleri (2021) gibi araştırmalar, bu doğrusal ilişkinin motorun elektromekanik stabilitesini ve ideal çalışma koşullarını gösterdiğini ortaya koymuştur.

- **Motorların Yük Altındaki Gerilim/Akım Değişkenlikleri**

Motorlar, 50 gram yük altındayken sargıların gerilim ve akım değişkenlikleri ölçülmüştür. İdeal olarak gerilim ve akım eğrileri arasında 90 derecelik bir faz farkı beklenmektedir. Bu faz farkının 90 dereceden uzaklaşması, motorun elektromekanik yapısında bir tutarsızlık olduğunu gösterir. Kim ve diğerleri (2015) ve Pascoe ve diğerleri (2013), motor performansının değerlendirilmesinde bu ölçümlerin önemini vurgulamıştır.

- **Motorların Sıcaklık Artışları**

Motorlar aynı koşullarda ve sürede çalıştırılarak sıcaklık artışları gözlemlenmiştir. Sıcaklık artış eğrisi, motorun verimliliği hakkında önemli bir veridir. Nominal koşullarda 70 dereceyi geçecek ısılar, cihazın genel yapısını ve çevresindeki diğer cihazları tehlikeye atmaktadır. Kim ve diğerleri (2015), Shigematsu ve diğerleri (2017), Pascoe ve diğerleri (2013) ve Senefeld ve diğerleri (2020), sıcaklık artışlarının motor verimliliği ve yapısal bütünlüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

- **Motorların Adım Tepkileri**

Motorların adım tepkileri ölçülüp kıyaslanmıştır. Motorlar 10 RPM başlangıç hızıyla çalıştırılıp her 15 saniyede bir 1 RPM artış yapılarak 250g yük altında adım tepkisi eğrileri incelenmiştir. Masuda ve diğerleri (2019), Pascoe ve diğerleri (2013) ve Senefeld ve diğerleri (2020) bu konudaki araştırmaları desteklemektedir. Adım

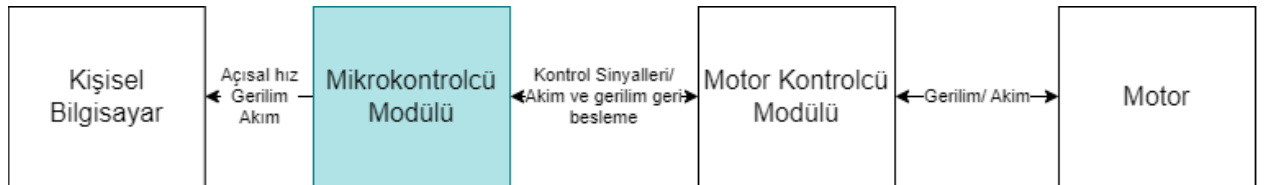
tepkilerindeki düzensizlikler, tekrarlayan ve artan sönümlmeler, rastgele tepeler motorun elektromekanik yapısının ideal olmadığını gösterir.

Bu analizler, motorların performansını değerlendirmek ve ideal çalışma koşullarını belirlemek için önemli veriler sağlamıştır. Motorların elektromekanik yapısındaki tutarsızlıkların kullanıcı deneyimini olumsuz etkileyebilecek olmasından ötürü bu tutarsızlıkların tasarım aşamasında belirlenmesi gerekmektedir.

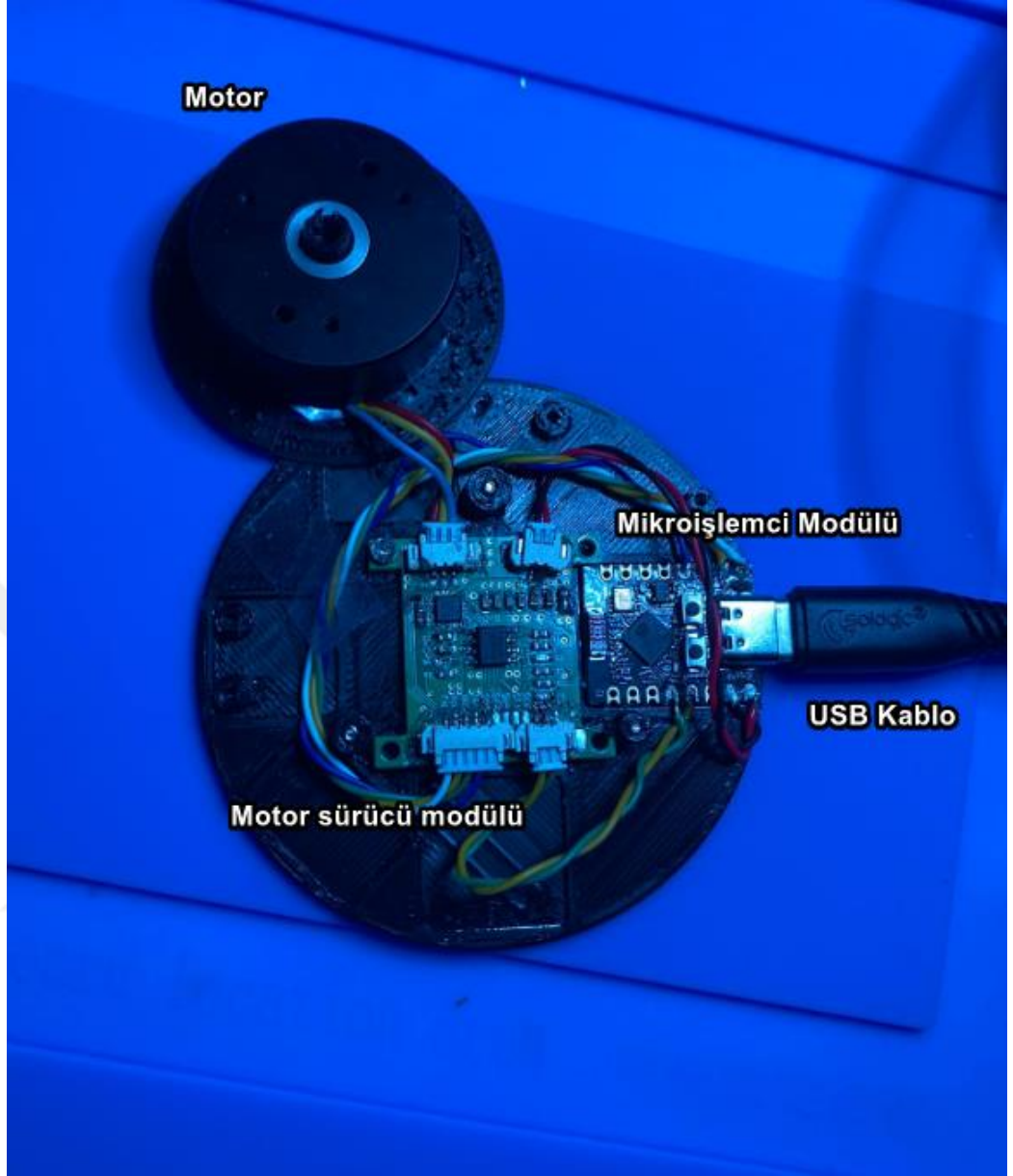
Deney Düzeneği

Deney düzeneği, aşağıdaki unsurlardan oluşmaktadır:

- Motor sürücü modülü
- Mikroişlemci modülü
- USB kablosu
- Kişisel bilgisayar
- Python yazılımı



Şekil 21. Deney Düzeneğini Oluşturan Unsurlar

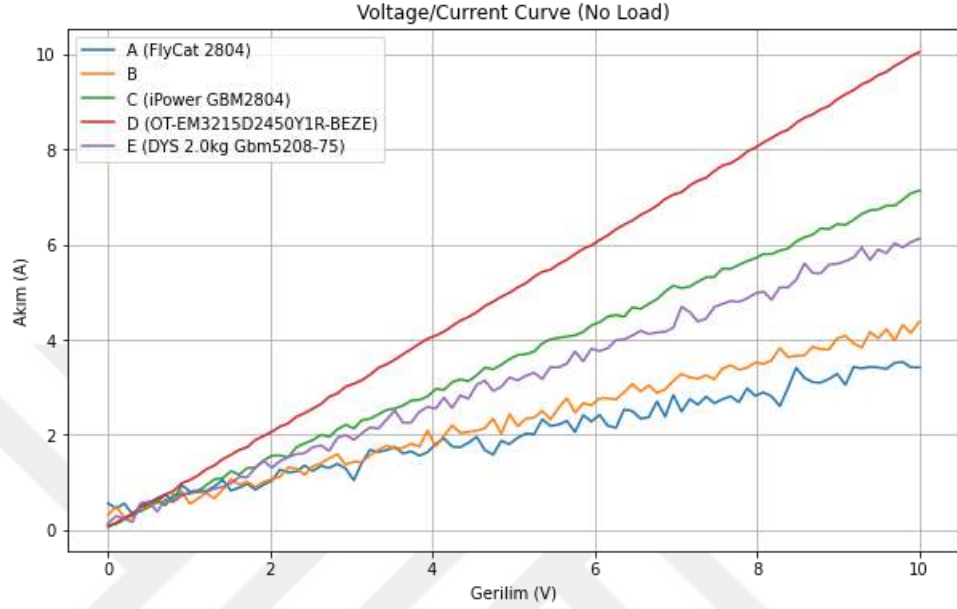


Şekil 22. Deney Düzeneyinin Fotoğrafı

Deney sonuçları

Yapılan deneylerde toplanan veriler .csv formatında Python ortamında görselleştirilmiş ve kıyaslanmıştır.

Motorların Yüksüz Durumdaki Gerilim/Akım Eğrileri:



Şekil 23. Motorların Yüksüz Durumda Akım/Gerilim Eğrileri

Motor D: En iyi performansı sergilemiştir. Gerilim ve akım eğrisi en doğrusal olan motor D'dir, bu da onun elektromekanik olarak ideal bir yapıda olduğunu gösterir.

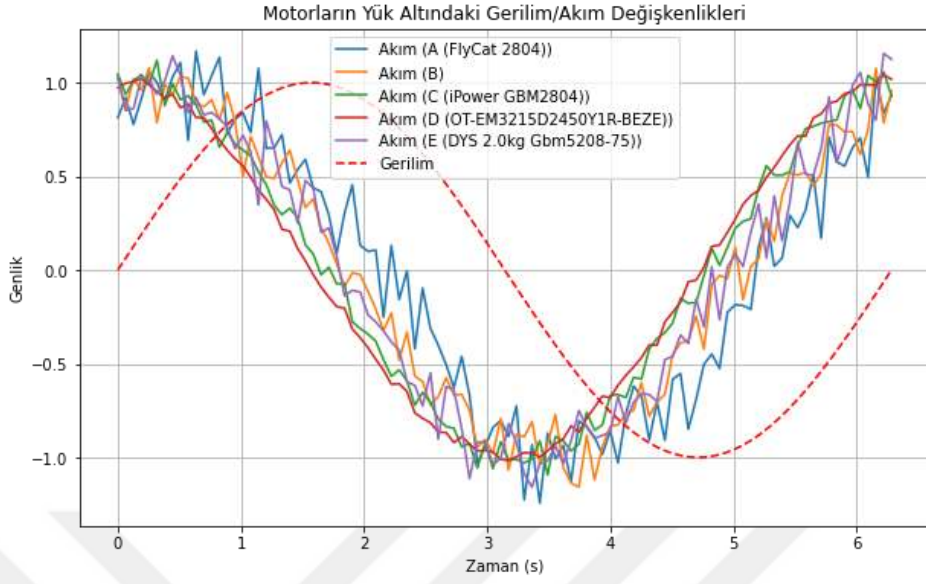
Motor C: Gerilim ve akım eğrisi oldukça doğrusal ve verimlidir. Motorun elektromekanik yapısı iyi durumdadır.

Motor E: Gerilim ve akım eğrisi orta derecede doğrusal ve kabul edilebilir seviyededir.

Motor B: Gerilim ve akım eğrisi biraz daha az doğrusal olup, bazı elektromekanik dengesizlikler gösterebilir.

Motor A: En kötü performansı sergilemiştir. Gerilim ve akım eğrisi en az doğrusal olan motor A'dır, bu da onun elektromekanik olarak ideal bir yapıda olmadığını gösterir.

Motorların Yük Altındaki Gerilim/Akım Değişkenlikleri:



Şekil 24. Motorların Yük Altında Akım-Gerilim Değişkenlikleri

Motor D: İdeale en yakın faz farkı (88,61 derece) ile en iyi performansı göstermiştir. Bu, motorun elektromekanik yapısında tutarsızlık olmadığını ve yük altında stabil çalıştığını gösterir.

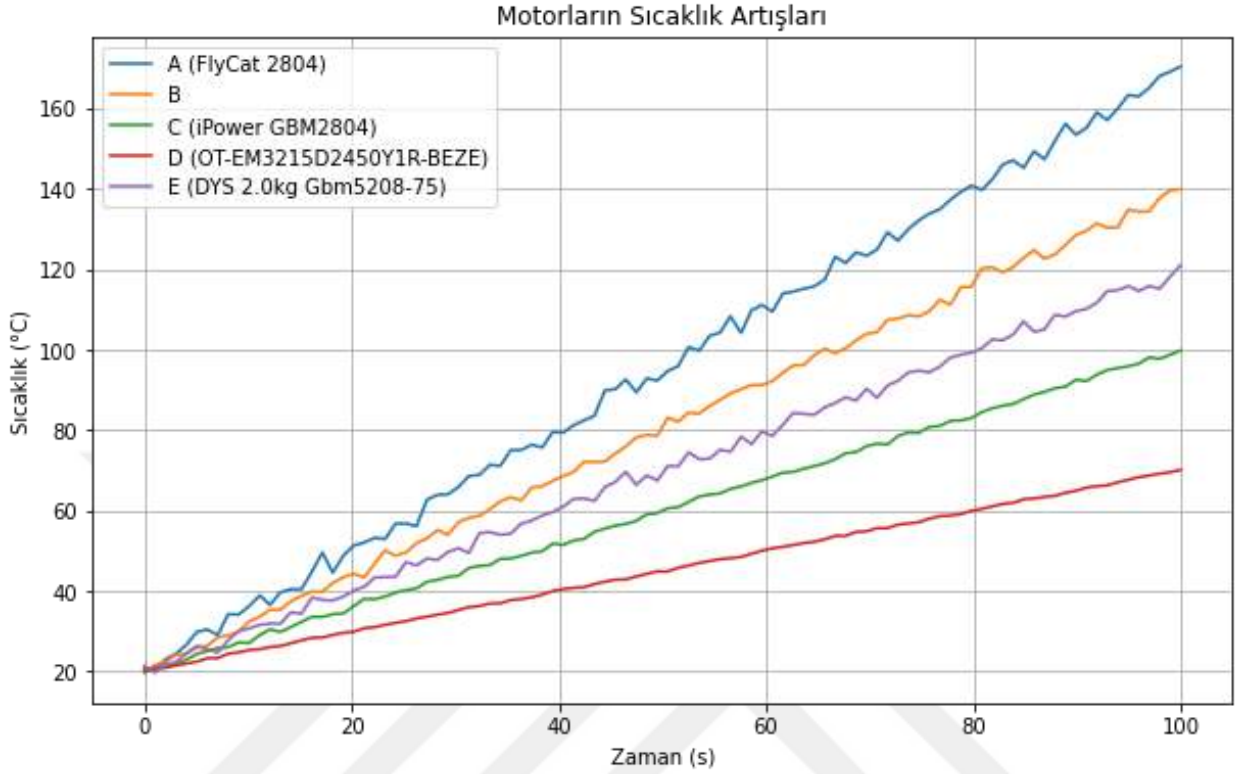
Motor C: Faz farkı 84,38 derece olup, oldukça iyi bir performans göstermektedir. Elektromekanik yapısı stabil ve verimlidir.

Motor E: Faz farkı 81,92 derece olup, orta derecede bir performans sergiler. Elektromekanik yapısında bazı tutarsızlıklar olabilir.

Motor B: Faz farkı 79,75 derece olup, daha düşük bir performans sergiler. Elektromekanik yapısı daha az stabil olabilir.

Motor A: En kötü performansı sergilemiştir. Faz farkı 70,12 derece olup, motorun elektromekanik yapısında ciddi tutarsızlıklar olduğunu gösterir.

Motorların Sıcaklık Artışları Yönünden Kıyaslanması



Şekil 25. Motorların Sıcaklık Artış Eğrileri

Motor D: En düşük sıcaklık artışıyla yüksek verimliliği göstermektedir. Motor D'nin sıcaklık artış eğrisi daha yavaş yükselmekte, bu da onun daha verimli ve güvenli çalıştığını gösterir.

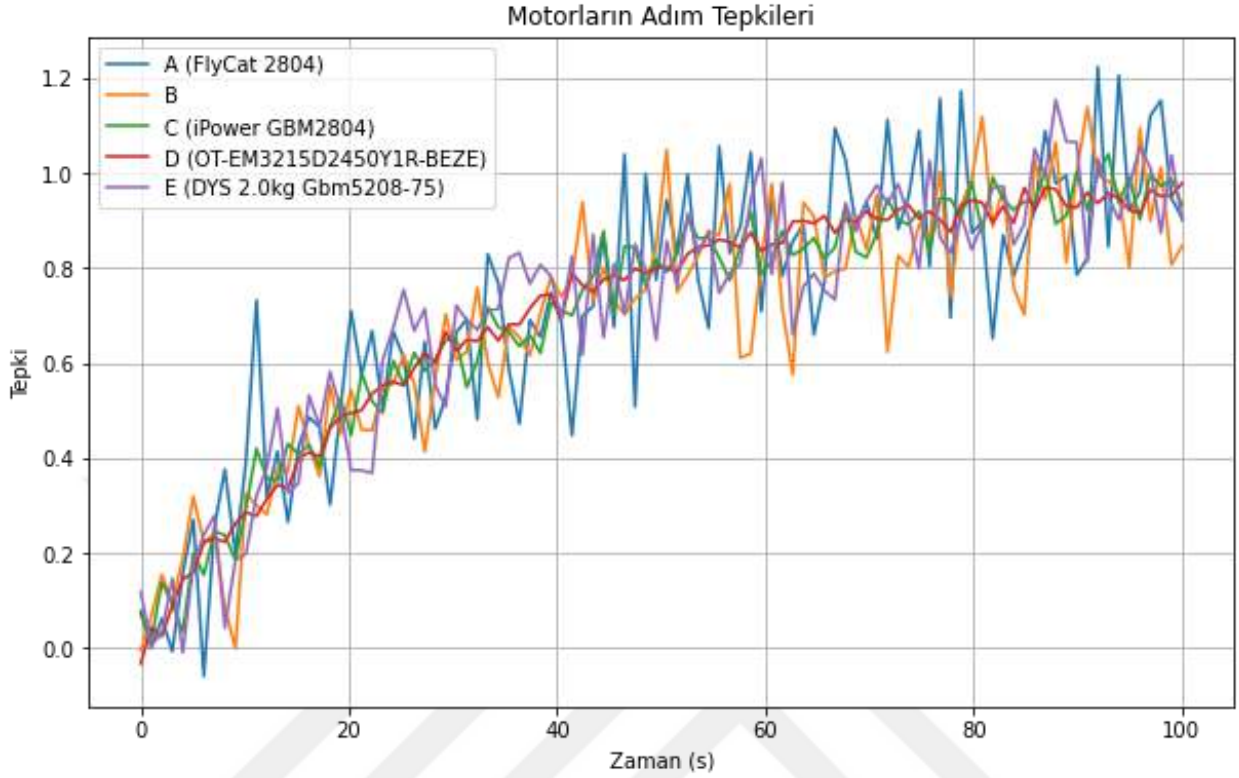
Motor C: Sıcaklık artışı düşük olup, yüksek verimlilik sergilemiştir. Güvenli çalışma koşullarına sahiptir olduğu çıkarımı yapılabilir.

Motor E: Sıcaklık artışı orta düzeyde olup, kabul edilebilir verimlilik sergiler.

Motor B: Sıcaklık artışı biraz daha yüksek olup, verimliliği orta düzeydedir.

Motor A: En kötü performansı sergilemiştir. En yüksek sıcaklık artışına sahip olup, düşük verimlilik sergilemiştir.

Motorların Adım Tepkilerine Göre Kıyaslanması



Şekil 26. Motor Adım Tepki Grafikleri

Motor D: En hızlı ve en kararlı adım tepkisini göstermiştir. Dinamik stabilite ve performans açısından diğer motorlara göre daha üstün performans sergilemiştir.

Motor C: Hızlı ve kararlı adım tepkisiyle iyi bir performans göstermektedir. Dinamik stabilitesi yüksektir.

Motor E: Orta derecede hızlı ve kararlı adım tepkisiyle kabul edilebilir bir performans sergilemiştir.

Motor B: Daha yavaş ve daha az kararlı adım tepkisine sahiptir. Dinamik tutarlılık açısından bazı sorunlar olabilir.

Motor A: En kötü performansı sergilemiştir. En yavaş ve en az kararlı adım tepkisine sahip olup, dinamik olarak tutarsızlık sergilemektedir.

Motorların Faz Farkı Hesaplamalarının kıyaslanması

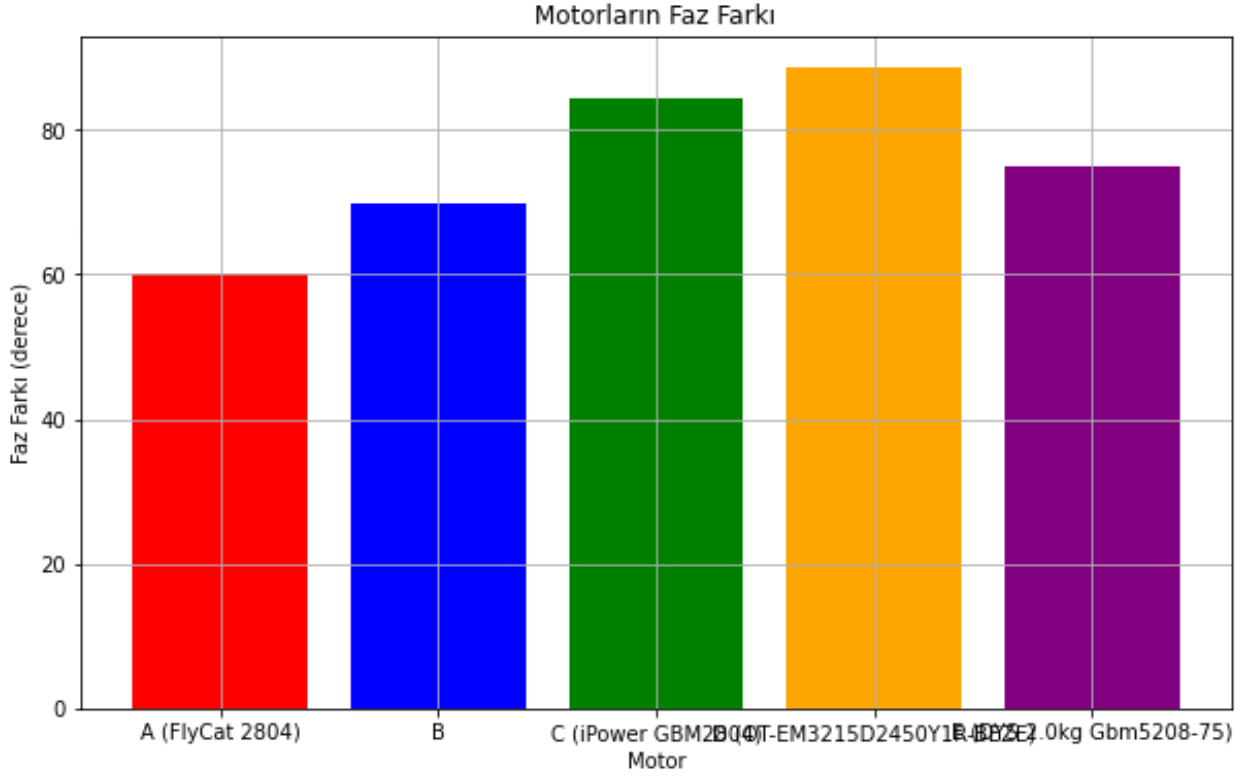
Motor A: 60,12 derece

Motor B: 69,75 derece

Motor C: 84,38 derece

Motor D: 88,61 derece

Motor E: 74,92 derece



Şekil 27. Faz Farkı Kıyaslaması

Bu grafikleri inceleyerek, Motor D'nin en iyi performansı sergilediği, yüksek verimlilik ve stabilite sağladığı açıkça görülmektedir. Diğer motorlar arasında en kötü performans A motoruna aittir, bu motor düşük verimlilik ve stabilite sorunları göstermektedir.

[Sonuç olarak, cihaz için en uygun modelin D” OT-EM3215D2450Y1R-BEZE” olduğuna kanaat getirilmiştir. Bunun başlıca sebepleri:

- En pürüzsüz dönme hissiyatını sağlıyor olması
- Termal performansının başarılı olması ve diğer modellere göre daha az ısınması. Bu aynı zamanda motorun daha verimli çalıştığını göstermektedir.

- Rotoru bütünleşmiş radyal polarize mıknatıs bulundurması
- Uluslararası büyük tedarikçilerden tedarik edilebilmesi
- Fiyatının görece makul olması

Şeklinde dir.



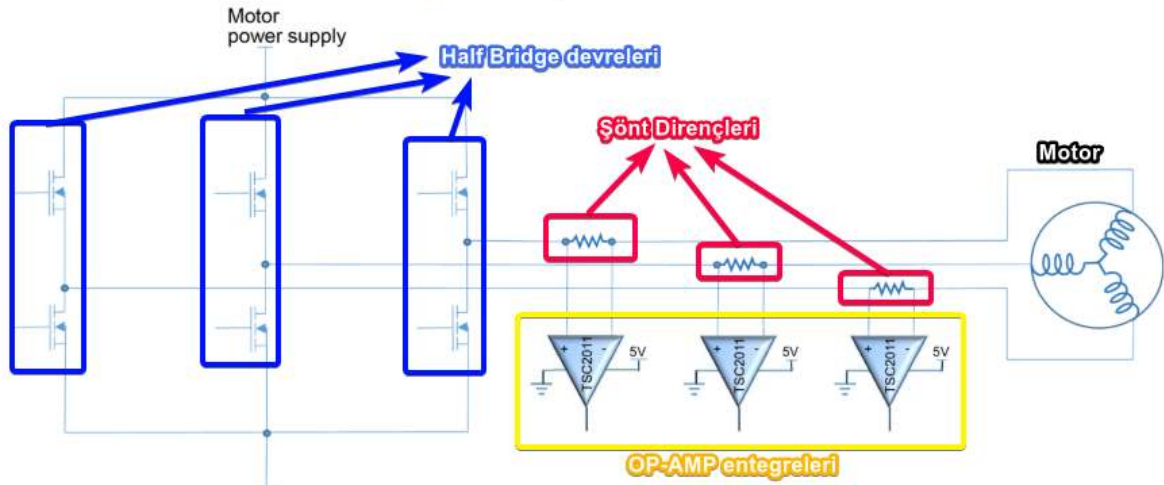
Şekil 28. Seçilen Motorun iç Yapısı ve Bileşenleri

Motor seçimi yapıldıktan sonra, motor kontrolcü modülünün tasarımı ve ürün seçimi aşamasına geçilmiştir.

3.1.3. Motor Kontrolcü Modülü

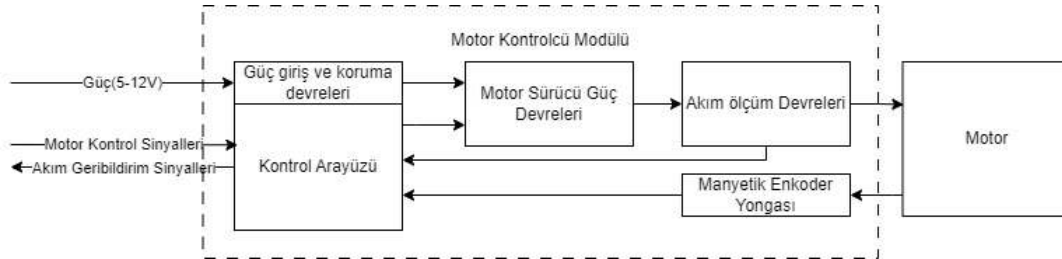
Öncelikle seçilen motora uygun bir sürücü modülünün araştırılabilmesi ve/veya geliştirilebilmesi için isterler belirlenmiştir. Bu isterler aşağıda listelenmiştir.

- Motor kontrolcü modülü, fırçasız DC motorları sürmek için gerekli güç elektroniği devrelerini içinde barındırmalıdır. Bu devreler, half-bridge olarak adlandırılan ve tek yönlü akım ve gerilim kontrolü için kullanılan devreler, koruma devreleri ve akım ölçüm devrelerinden oluşmaktadır.



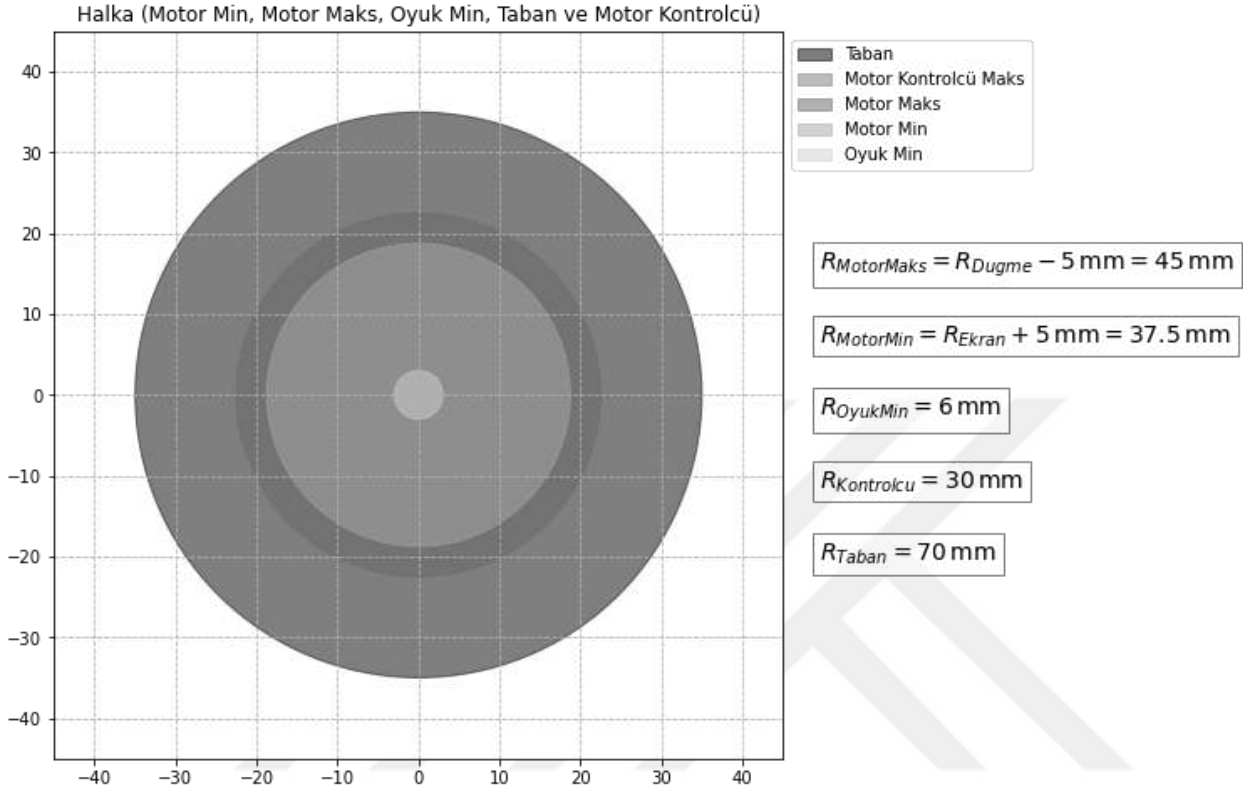
Şekil 29. Motor Sürücü Devresi Referans Şeması

- Motor kontrolcü modülü, manyetik enkoder yongasını içinde barındırmalıdır. Enkoder yongasının çözünürlüğü en az 12 bit olmalıdır.
- Motor kontrolcü modülü, 5V gerilim ile çalışabilmelidir.
- Motor kontrolcü modülü, 2 ampere kadar akım iletebilmelidir.



Şekil 30. Motor Kontrolcü İşlevsel Blok Diyagramı

- Motor kontrolcü modülü, taban alanı göz önünde bulunarak çapı 30mm olan bir dairenin içine sığabilecek ebatlarda olmalı ve yüksekliği en fazla 5mm olmalı.



Şekil 31. Motor Kontrolcü Boyut Sınırları

Seçilen motora uygun bir sürücü modülü için araştırma yapılmış, çeşitli yongalar ve elektronik komponentler ile denemeler yapılmış ve iterasyonlar sonucunda optimal bir elektronik tasarım elde edilmiştir. Bu Tasarım,

- Elektronik Komponent Seçimi
- Elektronik Şema Tasarımı
- Baskı Devre Tasarımı

Elektronik Komponent seçimi

Tasarım kısıtlamaları göz önünde bulundurularak komponent seçimleri yapılmıştır. Bu noktada temel kısıtlamalar aşağıdaki şekildedir:

- Motor sürücü entegresi 5V gerilim ile çalışabilmelidir
- Manyetik enkoder entegresi en az 12 bit çözünürlüğe sahip olmalıdır.
- Tasarlanacak olan kartın üretilebilirliği açısından seçilen entegreler standart kılıflara ve el ile lehimlenebilir boyutlara sahip olmalıdır.

Bu kısıtlamalardan yola çıkarak, öncelikle motor sürücü seçimi için araştırma yapılmış, piyasada erişilebilir ve uygun maliyetli fırçasız DC motor sürücü modülleri taranmış ve kıyaslanmıştır. Bu taramaya göre, potansiyel olarak bu uygulama için olabilecek modüller aşağıda listelenmiştir.

Tablo 2. Motor Kontrolcü Modüllerin Kıyaslanması

Modül Adı	Merkezi Yonga	Boyut	Yükseklik(mm)	Kontrol modu	Donanımsal Akım Sınırlama	Akım ölçümü	Açık Kaynak Tasarım	Fiyat(\$)
SimpleFOC mini	DRV8313	26x21	6	3x/6x PWM	Var	Yok	Evet	5
TMC6300-BOB	TMC6300	25 x 20	3	6x PWM	Var	Yok	Evet	20
SimpleFOC shield	-	50x35	7	6x PWM	Yok	Var	Evet	12

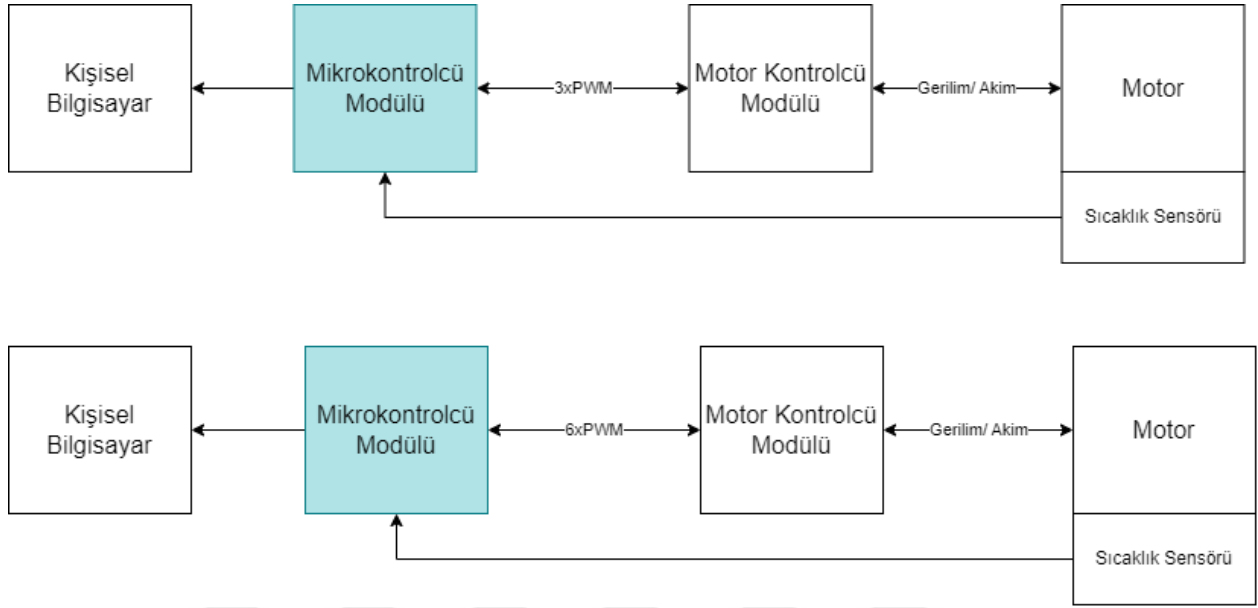
Bu kıyaslamaya göre, simpleFOC shield modülü ebatları nedeniyle kullanılmak üzere değerlendirilememiştir. SimpleFOC mini ve TMC-6300 modülleri

her ne kadar akım ölçümü özelliğini bulundurmuyor olsa da çeşitli denemeler yapılmak üzere tedarik edilmiştir.



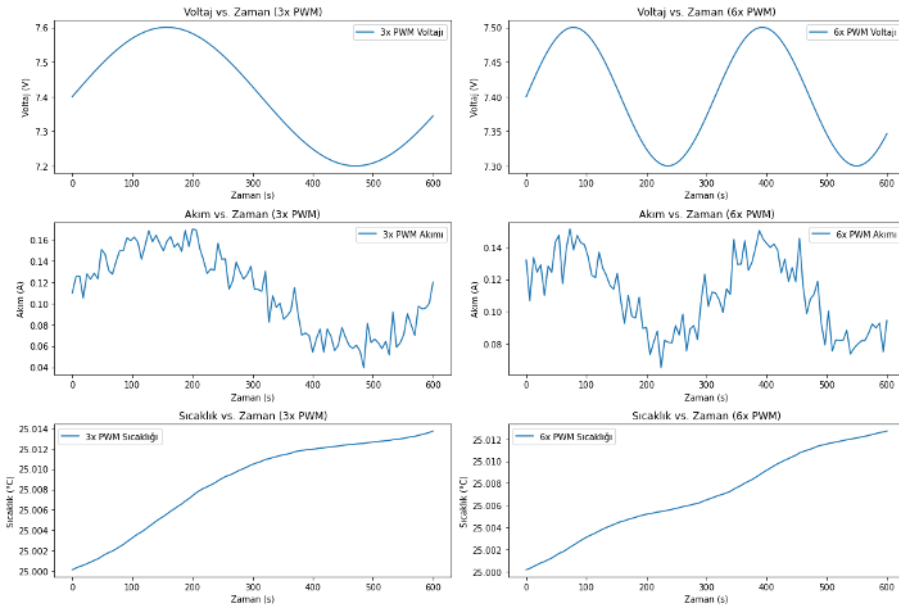
Şekil 32. TMC6300-BOB ve SimpleFOC Mini Modüllerinin Üstten Görüntüsü

Daha sonra, 3xPWM ve 6xPWM kontrol arayüzlerinin performans kıyaslamasını yapmak için bir deney tasarlanmış ve yürütülmüştür. Bu deney, simpleFOC mini modülü, harici akım izleme devresi ve motora bağlı bir sıcaklık sensöründen meydana gelmektedir. Bu iki modda gerilim/akım eğrileri ve motor sıcaklık artış desenleri ölçümlenip değerlendirilecektir. Arada göz ardı edilebilecek kadar fark olması durumunda arayüz sadeliği açısından 3x PWM modu tercih edilmiştir.



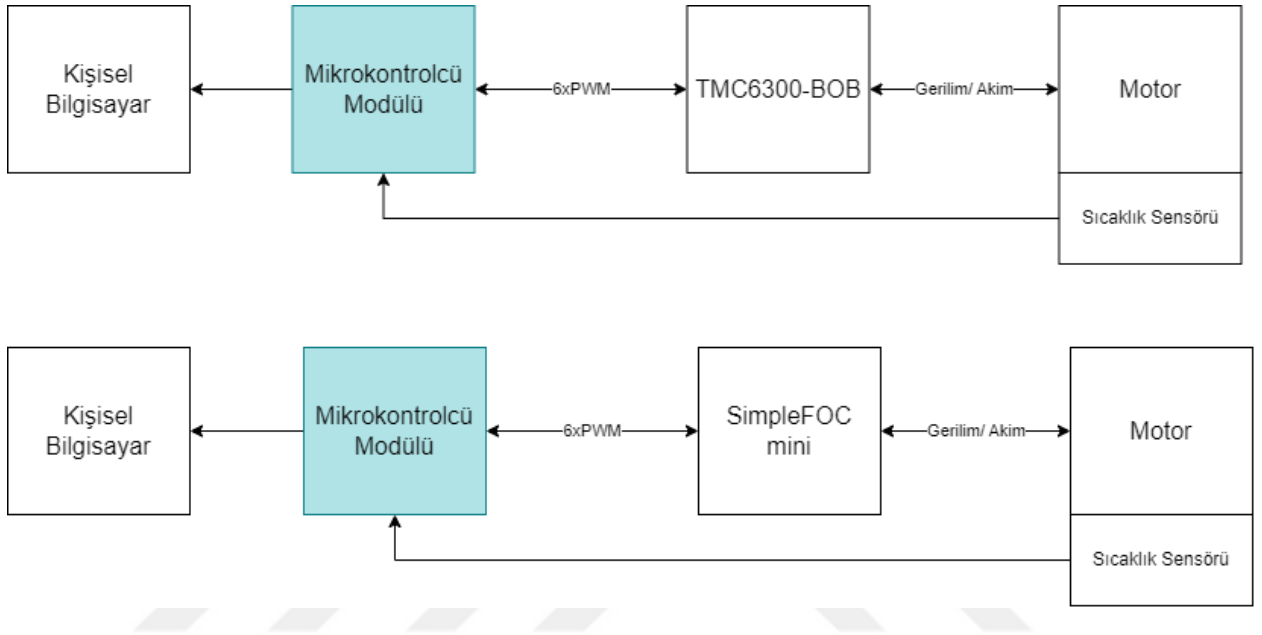
Şekil 33. Deney Diyagramı

Bu deneyde elde edilen verilere göre 3x ve 6x PWM modları arasında uygulamanın kalitesini azaltabilecek bir fark olmadığı görülmektedir. 6x PWM modunda sıcaklık artışı daha düzgün ve lineerdir ve aynı zamanda akım değişkenliğinin daha stabil olduğu gözlemlenmiştir.



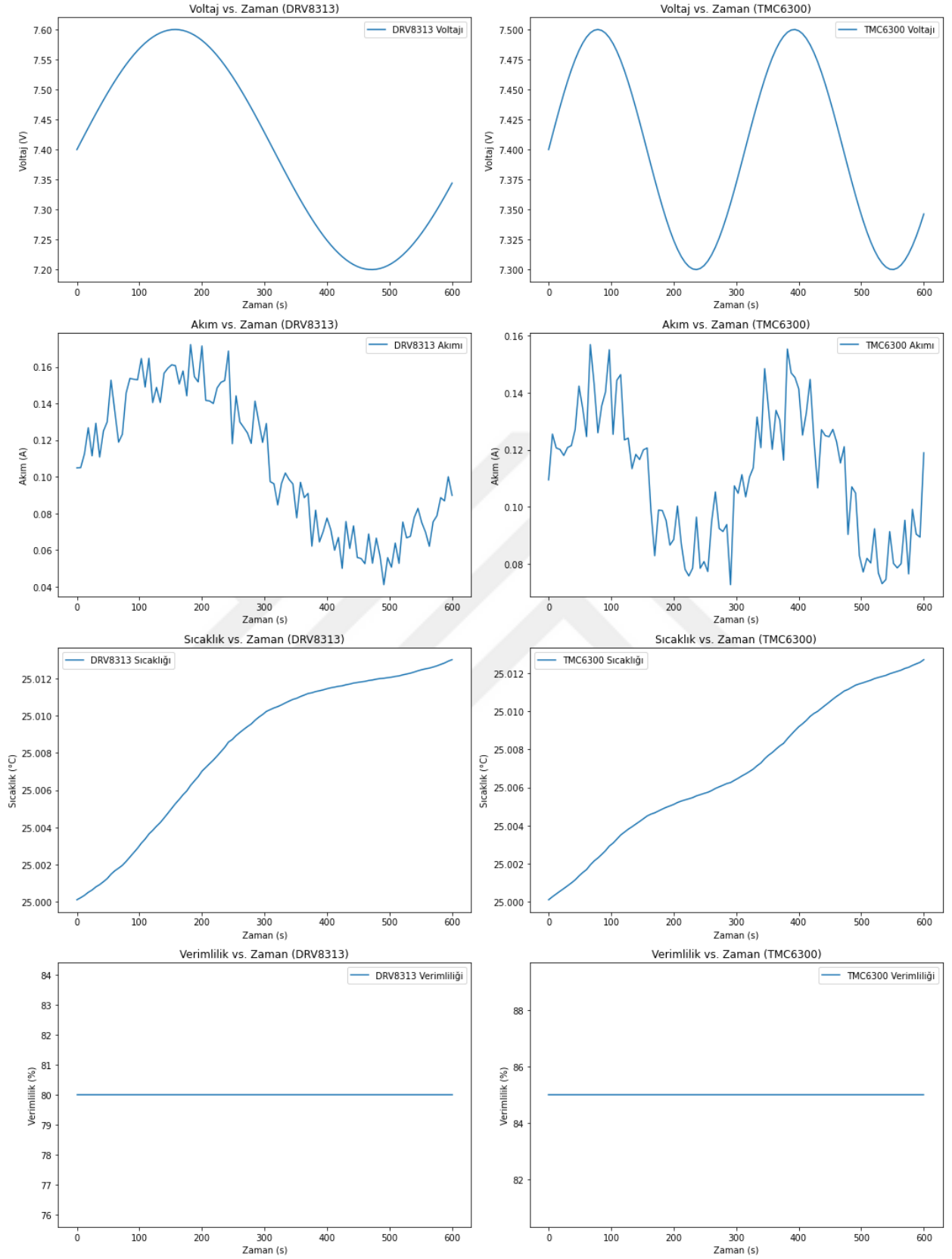
Tablo 3. 3x ve 6x PWM Modlarının Performans Kıyaslaması

Daha sonra, simpleFOC mini ve TMC6300 BOB modüllerinin akım değişkenliği, ısı artış ve hesaplanan verimlilik değerleri ölçülmüş ve kıyaslanmıştır. Bir önceki deney düzeneğiyle aynı düzenek kullanılmıştır.



Şekil 34. SimpleFOC mini ve TMC6300 motor sürücülerin kıyaslanması deneyi

Bu deneyin sonuçlarına göre TMC6300 entegresinin daha düşük RDS (on) değerine sahip olması ve daha az enerji kaybı yaşaması nedeniyle daha yüksek verimlilik sağladığı görülmektedir. Ancak, uygulamanın gereksinimleri ve TMC 6300 entegresinin sadece 6x PWM modunu desteklemesi sebebiyle cihazda kullanıma uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 35. DRV8313/TMC6300 Yongalarının Performans Kıyaslaması

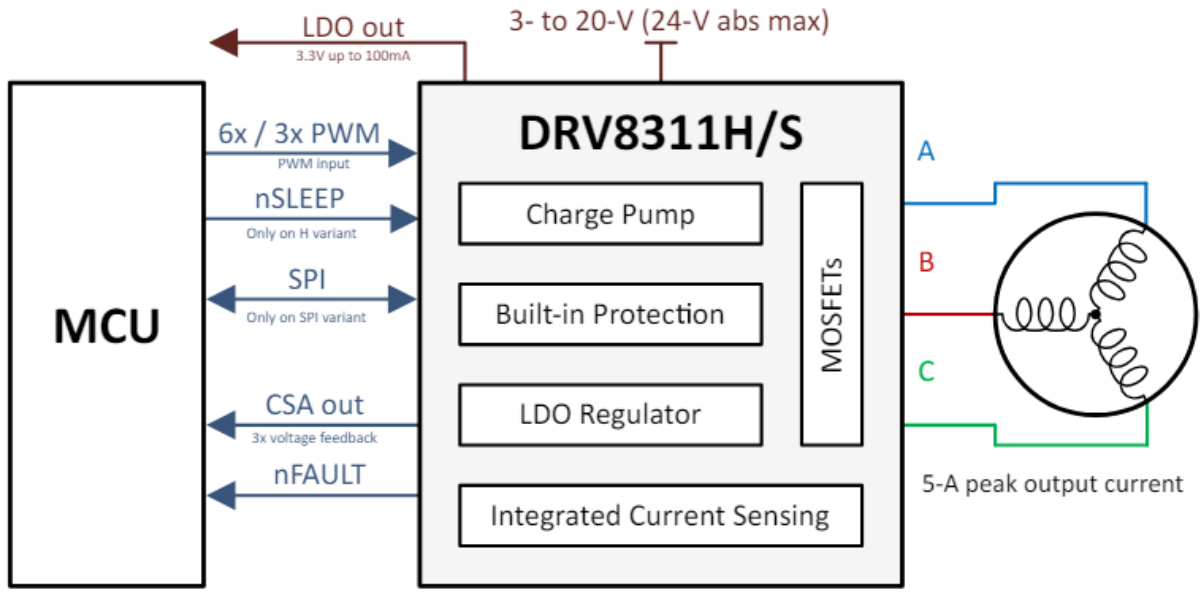
Bu sonuçlara bakarak, motor sürücü entegresinin 3xPWM modunda çalışmayı desteklemesi gerektiği belirlenmiştir. Her ne kadar simpleFOC mini modülü isterlerin çoğunu karşılıyor olsa da akım geri bildirimi sağlamadığı için bu cihazda kullanılamayacaktır. Araştırmalar sonucunda bu cihazın isterlerini karşılayan, uygun maliyetli ve erişilebilir bir hazır modül olmadığı fark edilmiş ve özel tasarım bir çözüm üzerine yoğunlaşmıştır.

Bu çözüme göre, isterler göz önünde bulundurularak bir motor sürücü entegresi seçilecek ve bu entegre için bir baskı devre tasarlanacaktır.

Aşağıda listelenmiş isterler göz önünde bulundurularak motor sürücü entegre seçimi yapılmıştır:

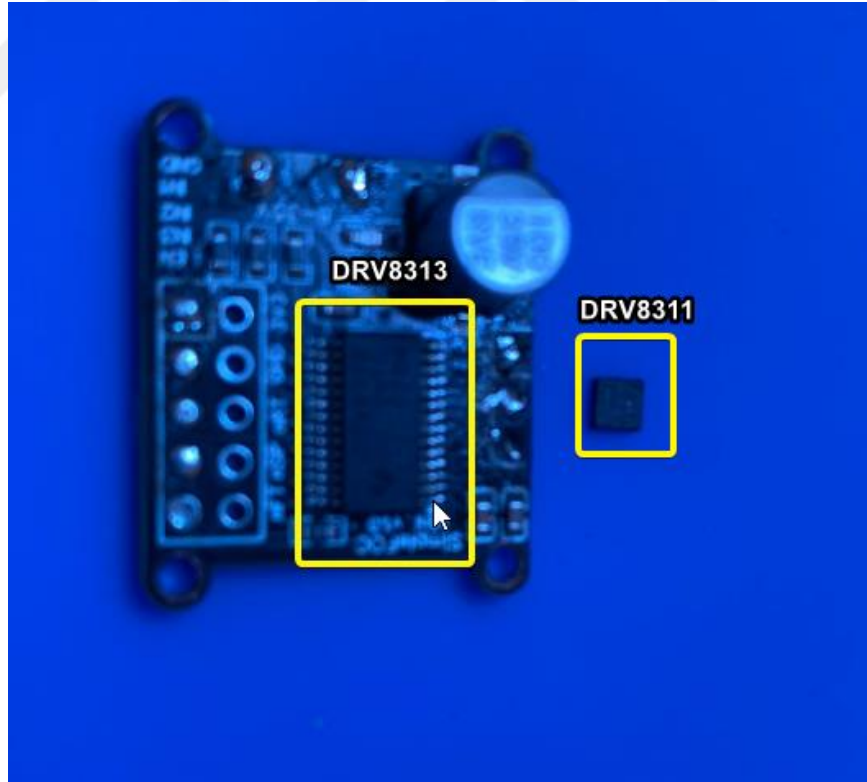
- En az 5V gerilim ile çalışma
- En fazla 2A ya kadar akım sağlama
- 3xPWM arayüzü
- En fazla 25RdsOn değeri
- Dahili mosfet ve koruma diyotları
- Akım ölçümü geribildirimi.
- Uygun maliyet

Bu isterleri karşılayan Texas Instruments firmasının ürettiği DRV8311H entegresi bu uygulama için ideal olarak belirlenmiştir. Hem boyut hem de maliyet açısından DRV8313 entegresinden daha uygun olan bu entegre için baskı devre tasarlama aşamasına geçilmiştir.



Şekil 36. DRV8311 sade blok diyagramı

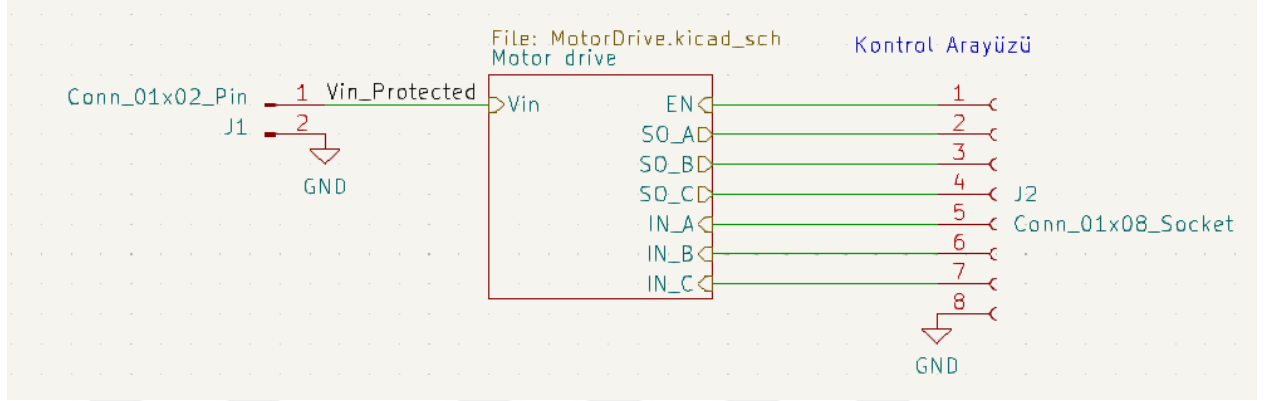
Kaynak: Texas Instrument (2021) DRV8311 Datasheet dökümanı. Erişim adresi: <https://www.ti.com/product/DRV8311>



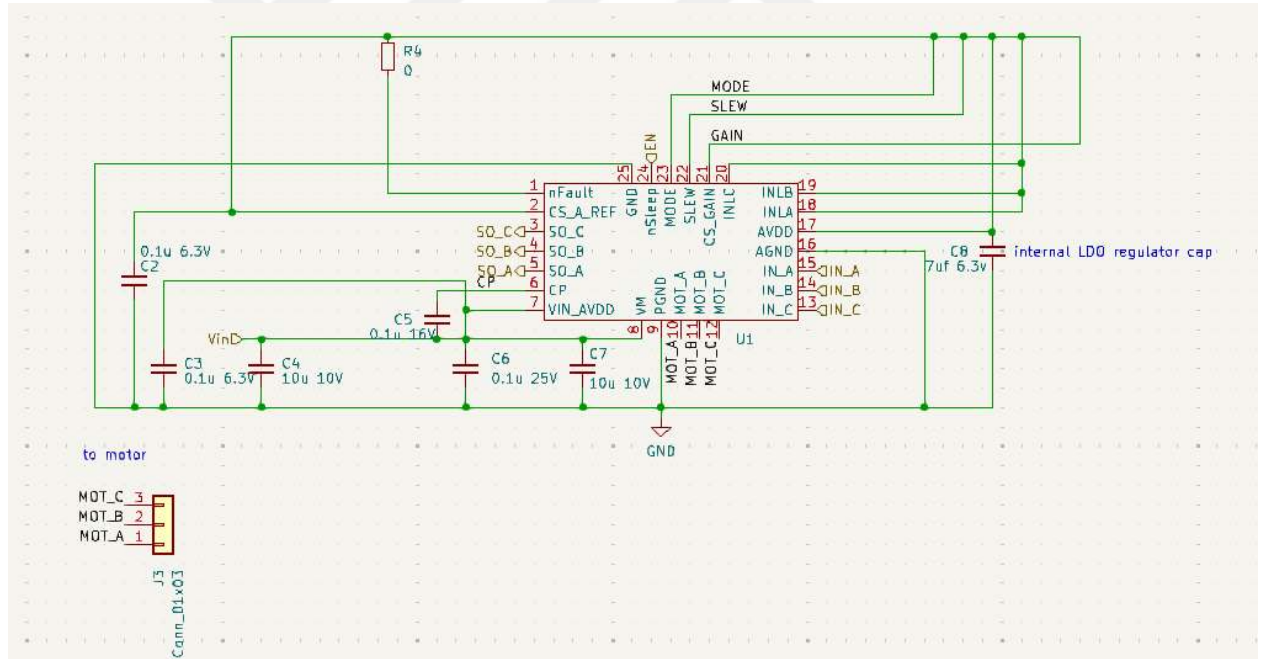
Şekil 37. DRV8313 ve DRV8311 Yongalarının Boyutlarının Kıyaslanması

Sonrasında KiCAD 8.0 yazılımı vasıtasıyla bu entegre için bir kart tasarlanmıştır.

Kart tasarımı için öncelikle şema tasarımı yapılmıştır. Bu tasarım yapılırken entegrenin datasheetinde bulunan bilgi ve açıklamalar göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 38. Üst Seviye Şematik Tasarımı



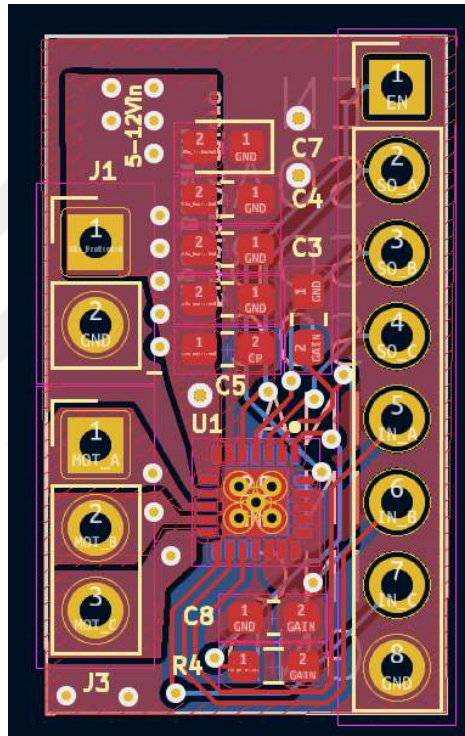
Şekil 39. Motor Sürücü Entegresi Şematik Tasarımı

Daha sonra baskı devre tasarım aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada da entegre datasheetindeki bilgi ve açıklamaların yanı sıra boyut, maliyet ve üretilebilirlik kriterleri göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre, bu kart:

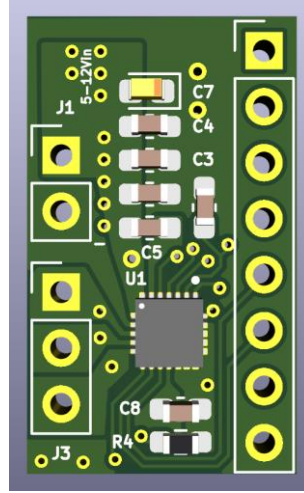
- En fazla 30mm çapında
- 2 katmanlı yapıda
- En fazla 1.6mm kalınlığında

Olmalı ve 0603 paketinden daha küçük komponentler bulundurmamalıdır. Minimum yol kalınlığı 6mil olmalı ve en ince delik boyutu 0.3mm olmalıdır.

Bu kriterler göz önünde bulundurularak kart tasarımı yapılmıştır.



Şekil 40. Motor Sürücü Devre Kartı PCB Tasarımı



Şekil 41.Motor Sürücü Devre Kartı PCB Tasarımı Üstten Görünüm

Tasarım kontrolleri ve üretim dosyalarının oluşturulmasının ardından kartlar üretilmiştir.



Şekil 42.Üretilen Motor Sürücü Baskı Devresinin Ön yüzü



Şekil 43.Üretilen Motor Sürücü Baskı Devresinin Arka yüzü

Üretim maliyeti kart başına 2,7 dolar olarak hesaplanmıştır. Elektrolitik yerine tantalum kondansatör kullanılmış olması her ne kadar maliyeti artırıyor olsa da alan açısından oldukça yer kazanılmasını sağlamaktadır.

Üretilen kartlar teslim alındıktan sonra dizgi işlemine geçilmiştir. Bu işlem sırasında

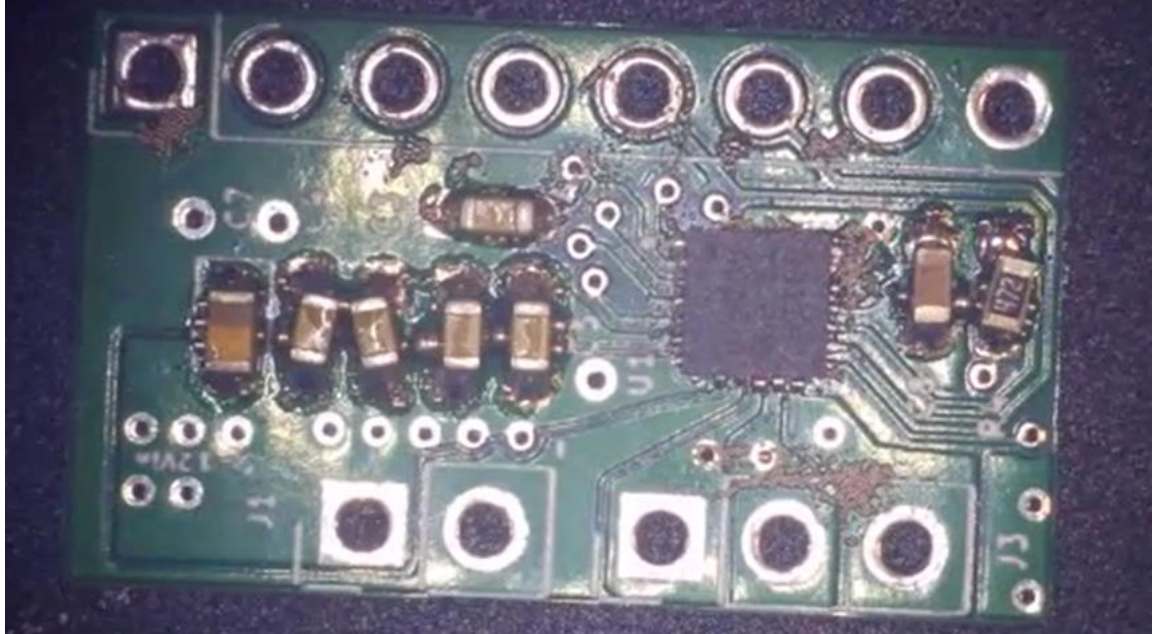
- Kurşunsuz krem lehim
- Lehim pastası
- Flux
- Isıtıcı tabla
- Sıcak hava tabancası
- Ameliyet maskesi
- ESD cımbız

Gibi ekipmanlar kullanılmıştır.

Dizgi işlemi yaklaşık 15 dakika kadar sürmektedir.

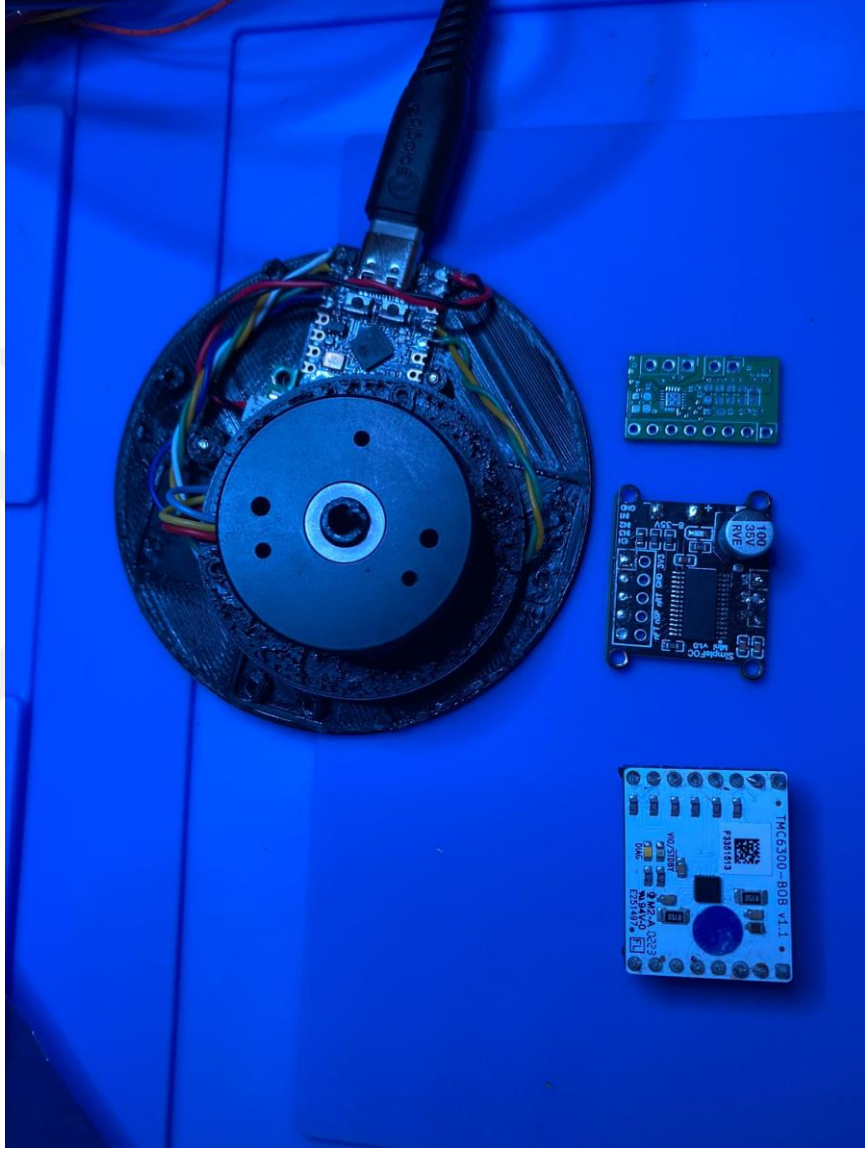


Şekil 44. Dizgi için kullanılan ekipmanlar

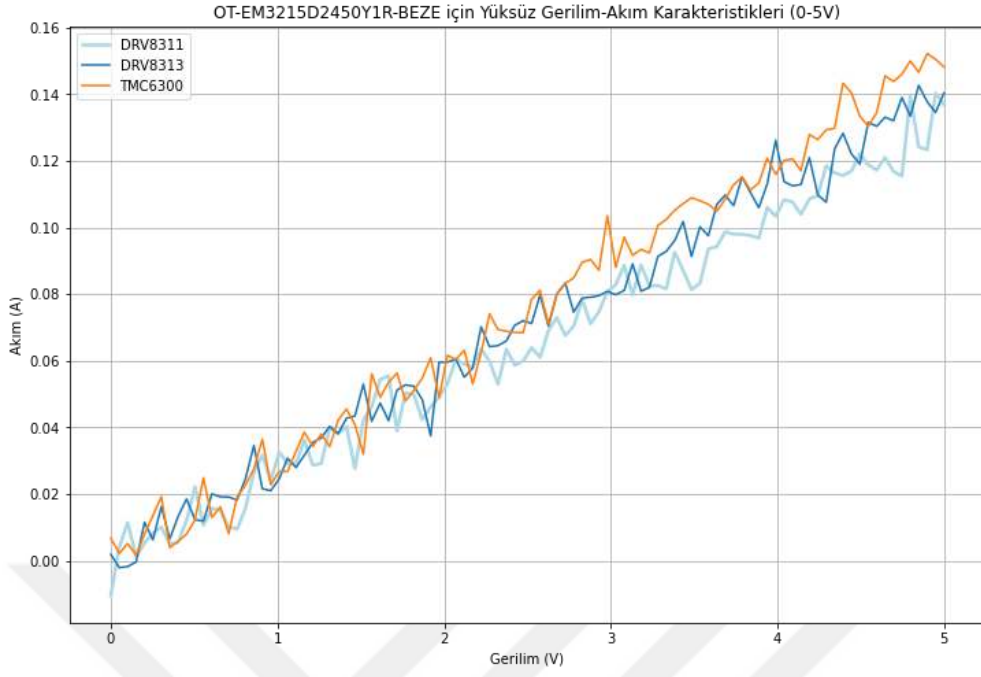


Şekil 45.Dizgi Sonrası Görünüm

Dizgi işleminin ardından, diğer motor sürücülere yapılan testler bu sürücü için tekrarlanmıştır ve benzer seviyede termal ve elektronik performansa sahip olduğu görülmüştür.

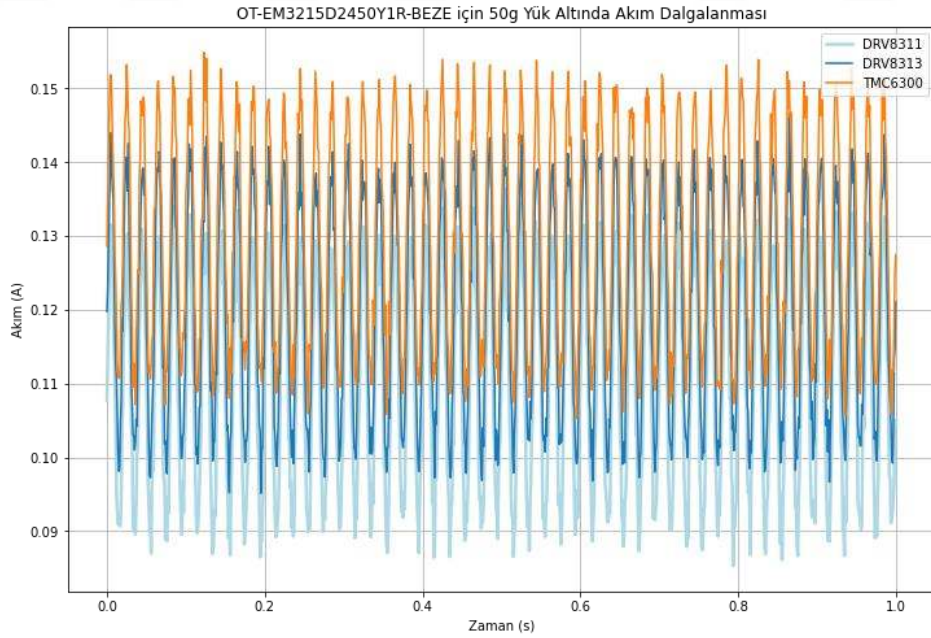


Şekil 46. Test Düzeneği ve Test Edilen Motor Sürücüler



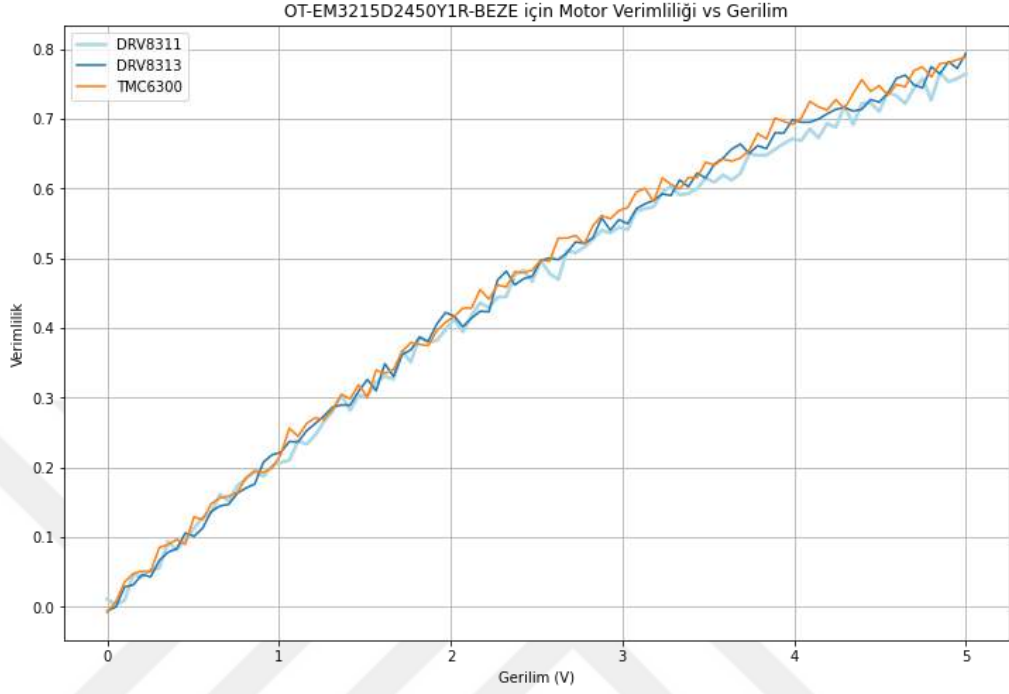
Şekil 47.Akım/Gerilim Eğrilerinin Kıyaslanması

Bu grafiğe göre her 3 sürücü de aynı motorla oldukça benzer akım/gerilim karakteristiği sergilemiştir.



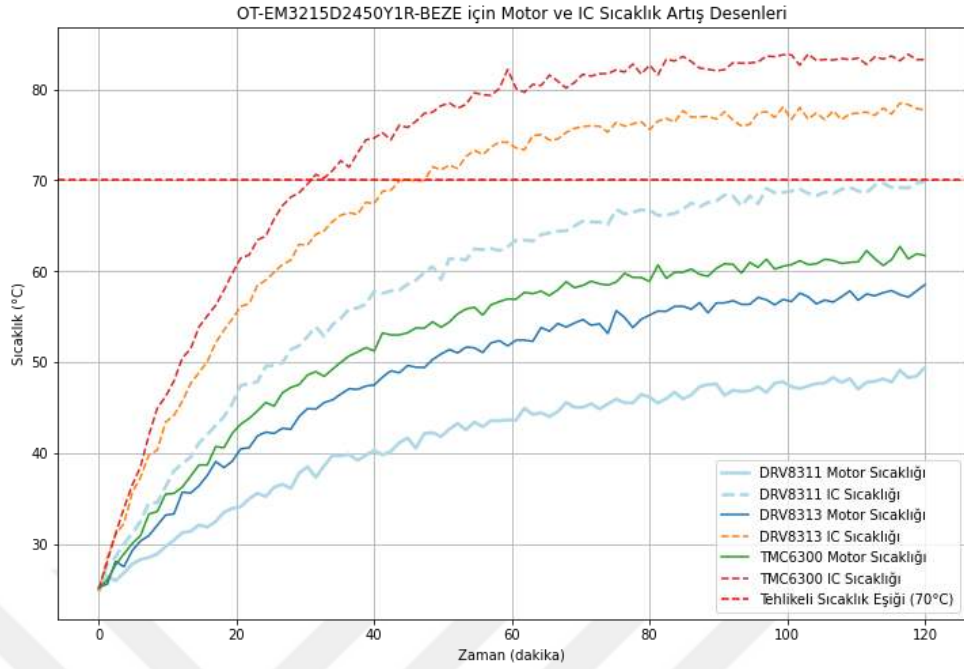
Şekil 48.Motor Sürücülerin 50g Yük Altında Akım Dalgalanmalarının Kıyaslaması

Bu grafiğe göre her üç sürücü de aynı motorla oldukça benzer akım dalgalanması karakteristiği sergilemiştir.



Şekil 49.Hesaplanan Motor Verimi

Bu grafiğe göre hesaplanan motor verimi her üç sürücü için de benzerdir. Bu da hem motorun hem de sürücülerin stabil performans gösterdiğini doğrular niteliktedir.



Şekil 50. Motor Sürücülerin Sıcaklık Artış Eğrilerinin Kıyaslaması

Bu tabloya göre en iyi termal performansı DRV8311 modülü yani özel olarak tasarlanan baskı devre kartı göstermiştir.

Bu şekilde, özel bir tasarım yaparak maliyet ve alandan tasarruf edilerek performans sabit tutulmuştur ve bu tasarım açık kaynak olarak paylaşılmıştır.

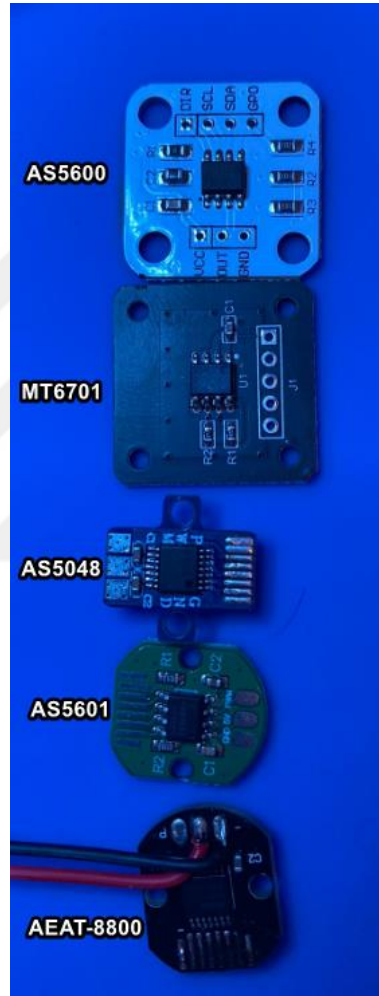
Motor sürücü tasarımı tamamlandıktan sonra manyetik enkoder modülü için araştırmalar yapılmış ve aşağıdaki model manyetik enkoder yongaları uygulama için potansiyel olarak uygun görülmüştür. Bu modüller tedarik edilip performansları kıyaslanmıştır.

Araştırma sırasında şu isterler göz önünde bulundurulmuştur:

- En az 12 bit çözünürlük
- I2C haberleşme
- <100 mA güç tüketimi

Tablo 4. Manyetik Enkoder Yongaları Kıyaslama Tablosu

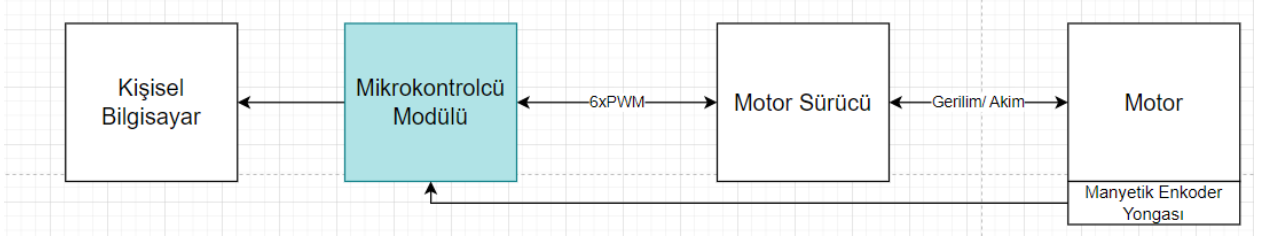
	Çözünürlük	Açı Çözünürlüğü	Güç Tüketimi(mA)	Hata Oranı(%)	Histeresis	Fiyat(\$)
AS5600	12 bit	0.088	6	1.4	<0.35	1.5
AS5601	12 bit	0.088	6	1.4	<0.35	4
AS5048	14 bit	0.022	16	0.05	<0.05	7
MT6701	14 bit	0.022	5	0.2	<0.1	1,5
AEAT-8800	14 bit	0.022	15	0.3	<0.1	12



Şekil 51. Deneme Yapılacak Enkoder Modülleri

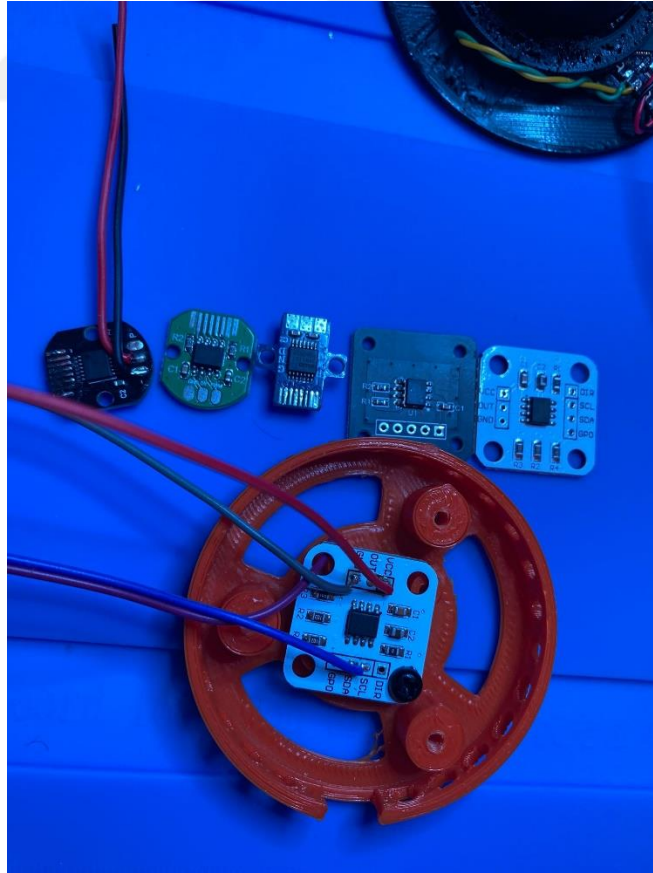
Deney Yöntemi

Enkoder modülleri ve motorun dairesel polarize mıknatısı birbirlerine eş merkezli olacak şekilde sabitlenecek, motorlar farklı hızlarda sabit hızlarda çalıştırılacak, ortalama güç tüketimleri ve hata oranları ölçülecek ve değerlendirilecektir.

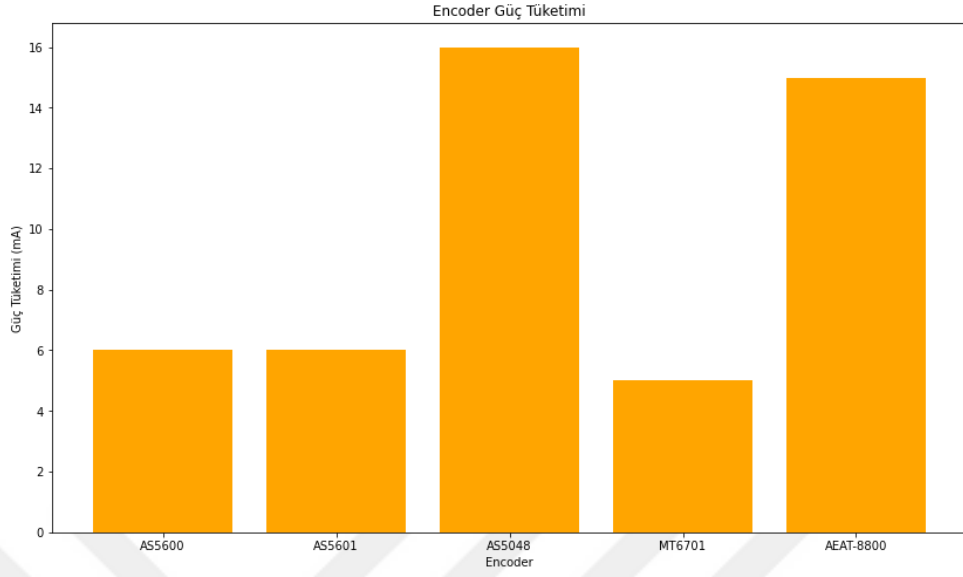


Şekil 52.Enkoder Performans Deney Düzenegi

Buna göre, her enkoder için motor sırasıyla 10 30 ve 60 devirde sabit hızda 15 saniye döndürülecektir. Motor yüksüz olarak çalıştırılacak ve açık çevrim pozisyon kontrolündeki hata oranının bütün enkoder denemelerinde aynı olacağı varsayılmıştır.



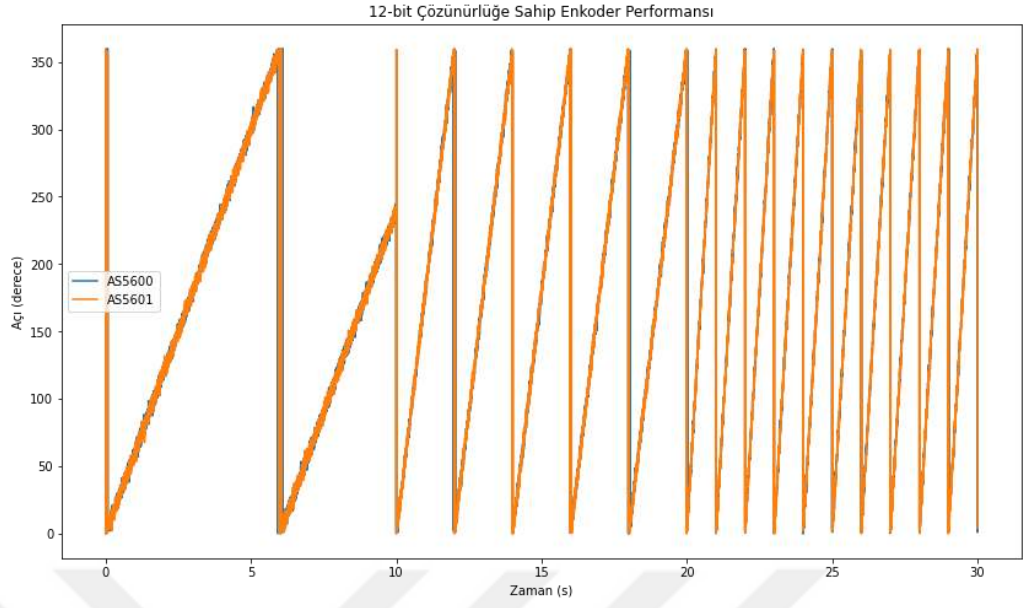
Şekil 53.Enkoder Deney Düzenegi



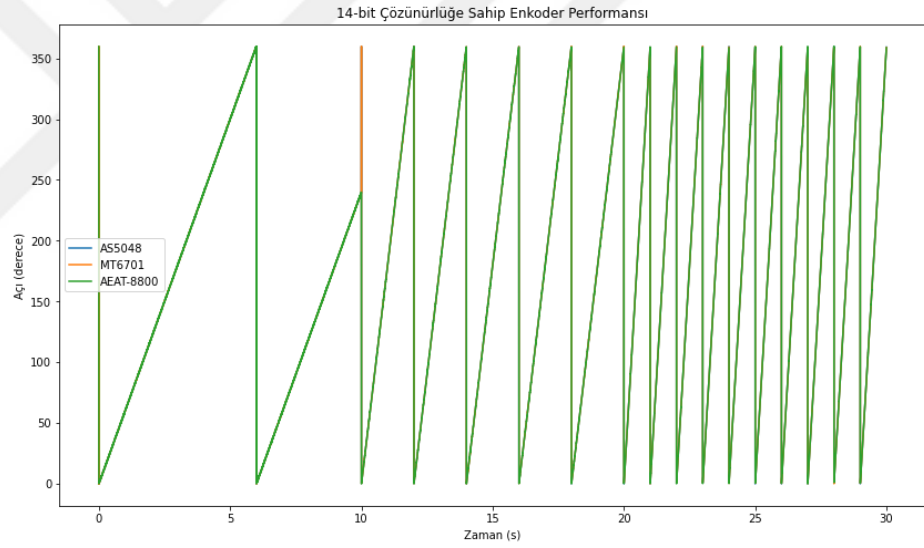
Şekil 54.Güç Tüketim Kıyaslaması

Bu kıyaslamaya göre bütün seçenekler 100mA olan limite oldukça uzak gözükmemektedir. Bu yüzden bu aşamada hiçbir seçenek birbirine göre daha avantajlı gözükmemektedir.

Sonrasında, sabit hız modunda enkoder pozisyon ölçümleri incelenmiştir. Bu incelemeye göre, 10, 30 ve 60 RPM hızlarında bütün seçenekler sistemin isterlerini karşılamaktadır. Bu sebeple, maliyet ve üretilebilirlik açısından bakılarak AEAT-8800, AS5048 ve AS5601 modelleri yüksek fiyatlarından ötürü seçenekler arasından çıkarılmıştır.



Şekil 55.12 bit Manyetik enkoder ölçümlerinin kıyaslaması



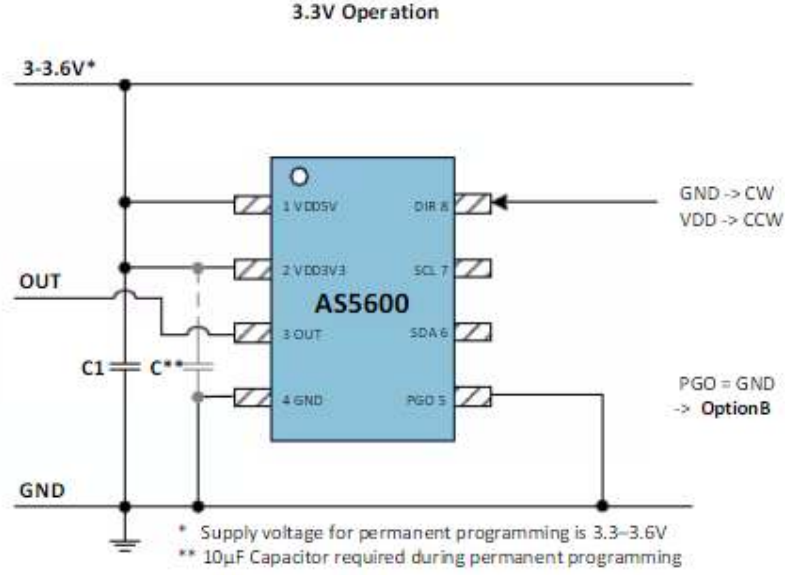
Şekil 56.14 Bit Manyetik enkoder ölçümlerinin kıyaslaması

Buna göre aşağıdaki iki modelin bu uygulama için optimal olduğuna kanaat getirilmiştir.

Tablo 6. Optimal Enkoder Entegreleri

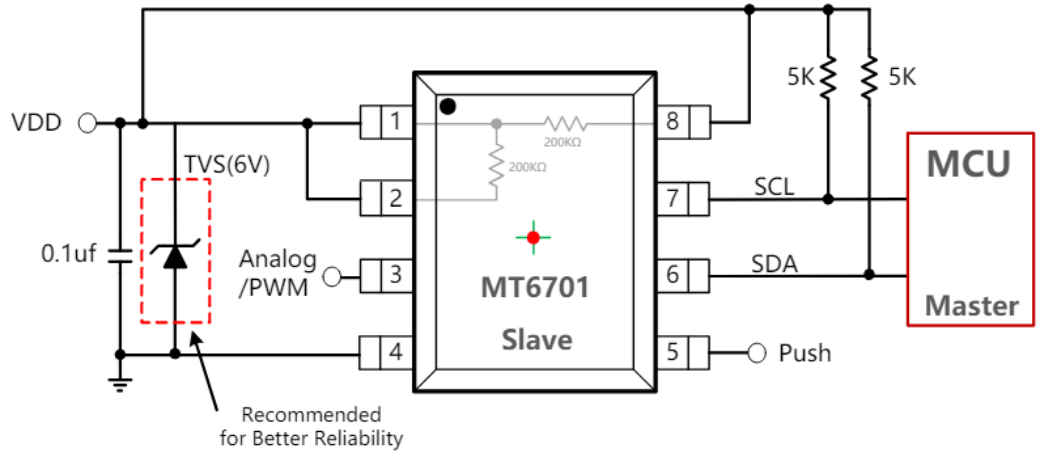
	Çözünürlük	Açı Çözünürlüğü	Güç Tüketimi(mA)	Hata Oranı(%)	Histeresis	Fiyat(\$)
AS5600	12 bit	0.088	6	1.4	<0.35	1.5
MT6701	14 bit	0.022	5	0.2	<0.1	1,5

Sonrasında bu entegrelerin teknik detayları incelenmiş ve bu iki entegrenin tamamen aynı kılıf ve pin numaralandırmasına sahip olduğu ve aynı çevresel pasif komponentleri gerektirdiği fark edilmiştir.



Şekil 57.AS5600 Pin numaralandırması

Kaynak: AMS-OSRAM (2016) AS5600 Datasheet dökümanı. Erişim adresi: <https://look.ams-osram.com/m/7059eac7531a86fd/original/AS5600-DS000365.pdf>

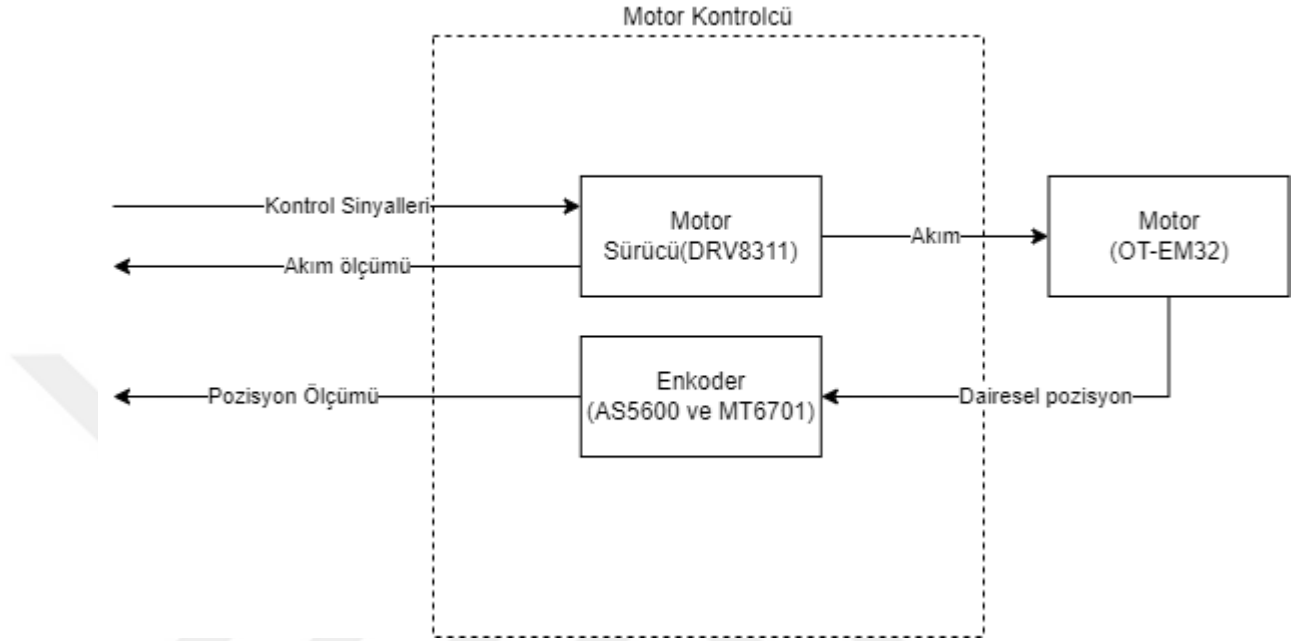


Şekil 58.MT6701 pin numaralandırması

Kaynak: Magnatech (2016) MT6701 Datasheet dökümanı. Erişim adresi: https://uploadcdn.oneyac.com/attachments/files/brand_pdf/magntek/F3/CA/MT6701QT-STD.pdf

Bu bilgiler doğrultusunda, motor kontrolcü modülünün hem MT6701 hem de AS5600 entegreleriyle uyumlu olacak şekilde tasarlanması uygun görülmüştür.

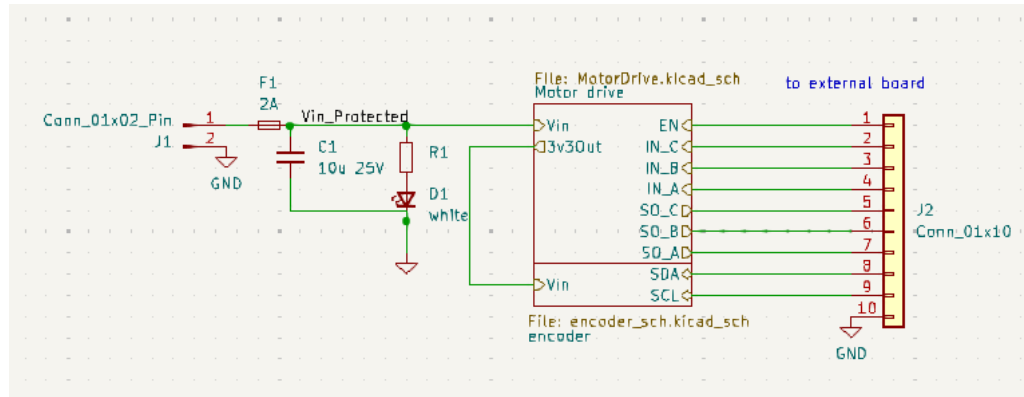
Bu şekilde, motor ve kontrolcü modülünün nihai tasarımı aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:



Şekil 59. Motor kontrolcü Modülü Nihai Tasarımı

Daha sonra, KiCad 8.0 yazılımı kullanılarak önceki bölümde tasarlanmış olan motor sürücü kartına enkoder entegresi ve çevreselleri dahil edilerek tasarım güncellenmiştir.

Öncelikle, şematik tasarıma enkoder devresi eklenmiştir.



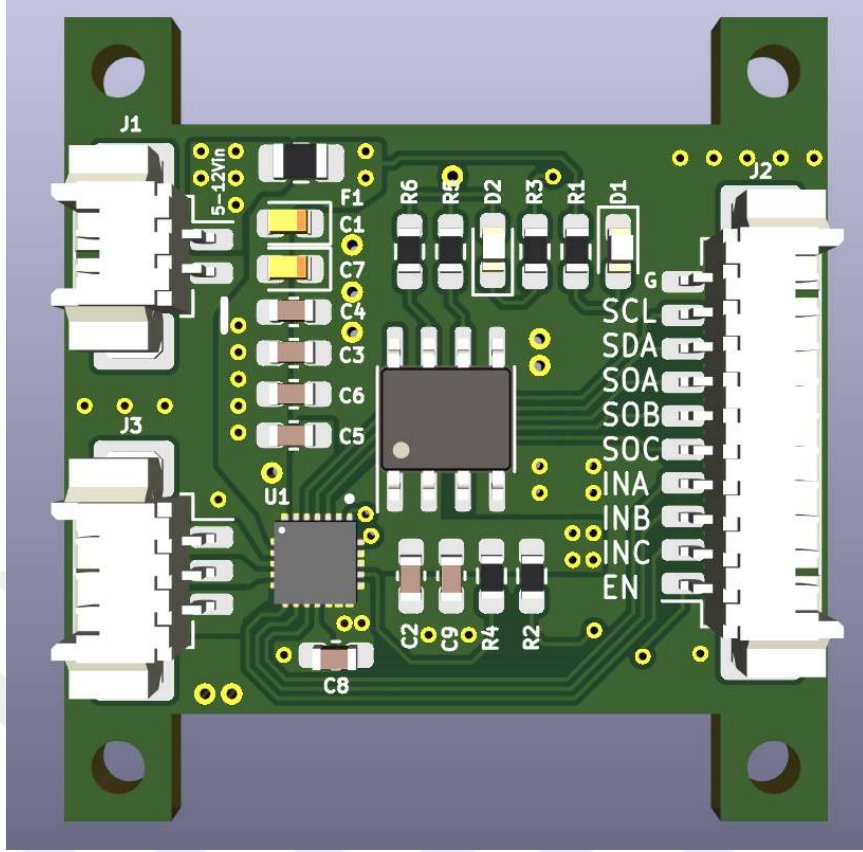
Şekil 60. Motor Kontrolcü Ünitesi Üst Düzey Şema Tasarımı

- En fazla 30mm çapında bir daire kadar alan kaplamalı
- Manyetik enkoder entegresi, cıvata deliklerinin fiziksel olarak X ve Y ekseninde orta noktasında bulunmalı

Bu kriterler göz önünde bulundurularak, baskı devre tasarımı güncellenmiştir.

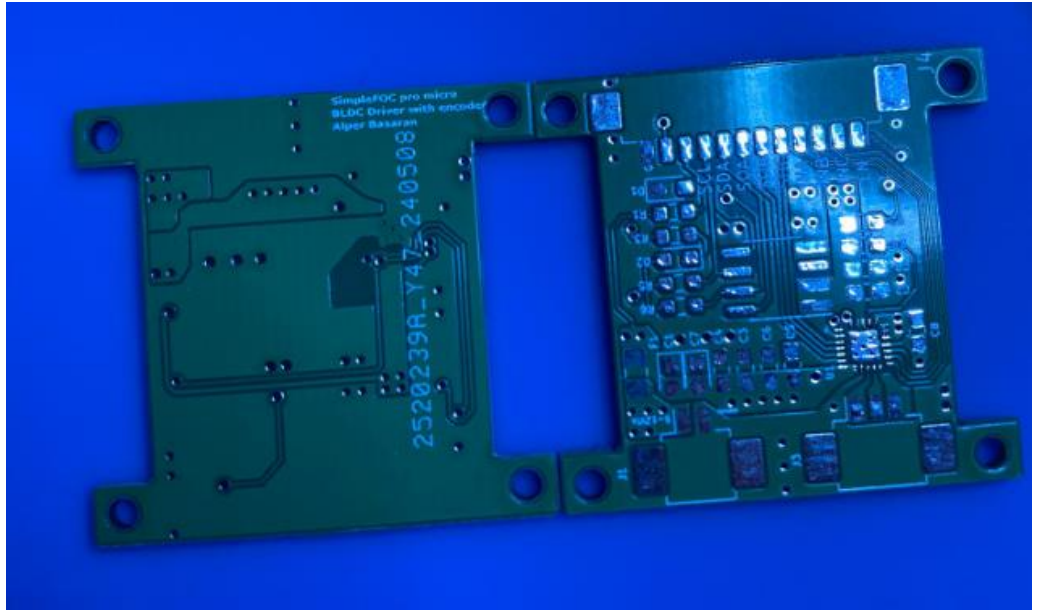
- Bu kriterler göz önünde bulundurularak, baskı devre tasarımı güncellenmiştir.





Şekil 64. Enkoder Devresi Eklenmiş Motor Kontrolcü Modülü Baskı Devresi 3B Görünüm

Tasarım kontrolleri ve üretim dosyalarının oluşturulmasının ardından kartlar üretilmiştir.



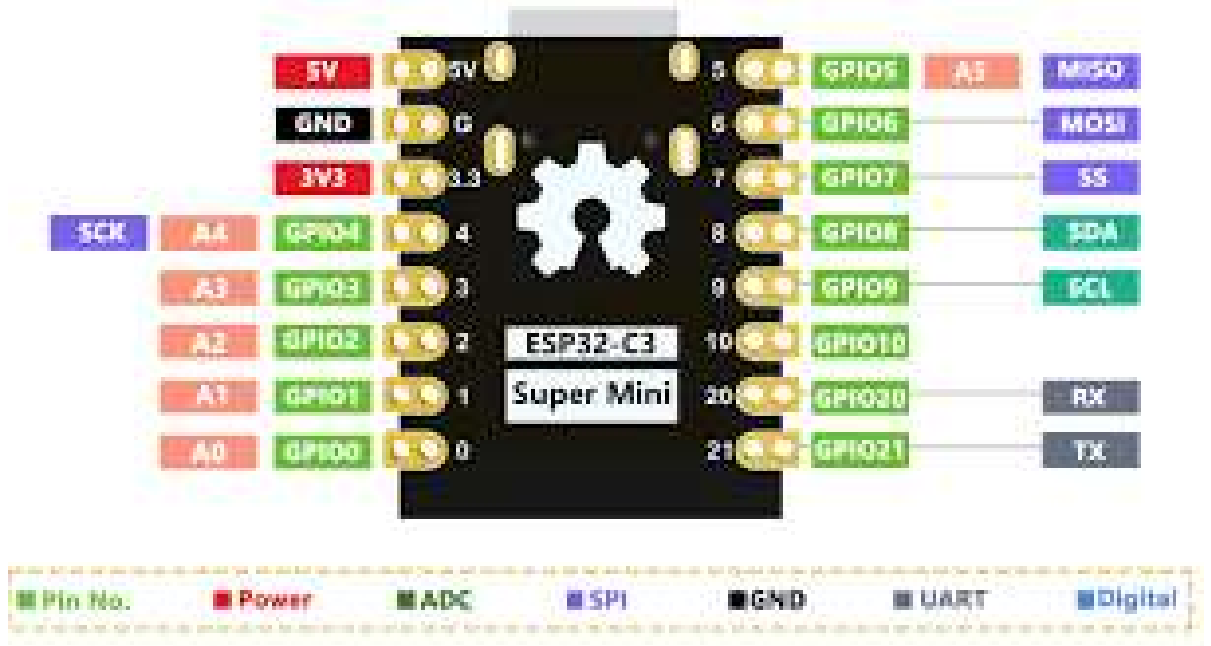
Şekil 65. Üretilen Motor Kontrolcü Modülü Kartları

3.1.4. Çevresel Kontrolcü Mikroişlemci Modülü

Mikroişlemci modülü için araştırma yapılırken aşağıdaki kısıtlar göz önünde bulundurulmuştur.

- 32 bit ARM işlemci mimarisine sahip olmalı
- I2C haberleşme türünü desteklemeli
- Kablosuz haberleşebilmeli
- Yeterli giriş ve çıkış sayısına sahip olmalı.

Buna göre “ESP32 C3 süper mini” isimli modül uygun görülmüştür.



Şekil 66.ESP32 Süper Mini Modülü Pin Tablosu

Kaynak: Adafruit (2024b) ESP32 Super mini modulu bilgi dökümanı. Erişim adresi: <https://learn.adafruit.com/adafruit-qt-py-esp32-c3-wifi-dev-board/low-power-usage>

3.1.5. Önyüz Modülü

Önyüz modülü için araştırma yapılırken aşağıdaki kısıtlar göz önünde bulundurulmuştur:

- 1.28 inç boyutunda renkli ekran ve dokunmatik panele sahip olmalı
- Ekran sürücü ve dokunmatik panel dinleyici entegrelerini barındırmalı
- Üzerinde IMU modülü bulundurmalı,
- Kablosuz haberleşebilmeli

Bu kısıtlar göz önünde bulundurularak, “ESP-32-1.28-touchscreen” modülü uygun görülmüştür.



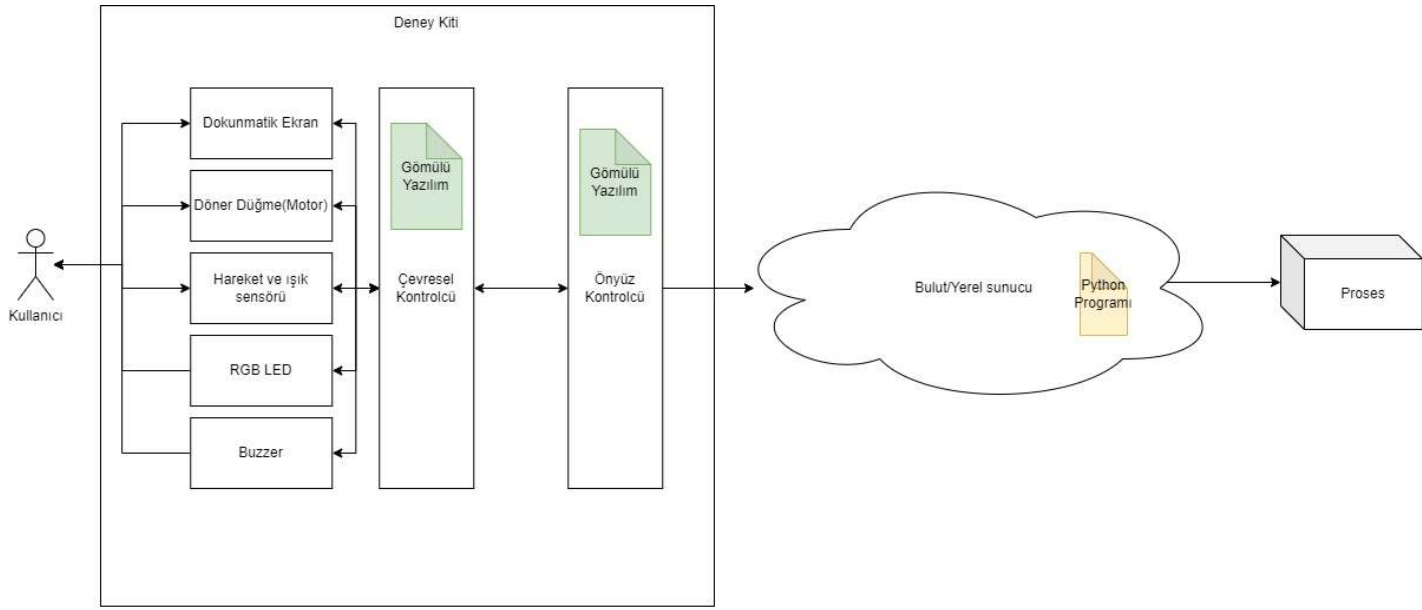
Şekil 67. ESP32-S3-Touch-LCD-1.28 Modülü

Kaynak: Waveshare (2024) ESP32 touch lcd modülü bilgi dökümanı. Erişim adresi: <https://www.waveshare.com/esp32-s3-touch-lcd-1.28.htm>

3.3 Yazılım Tasarımı

Tasarlanan deney kiti üç farklı yazılım unsuru barındırmaktadır. Bu unsurlar aşağıda listelenmiştir:

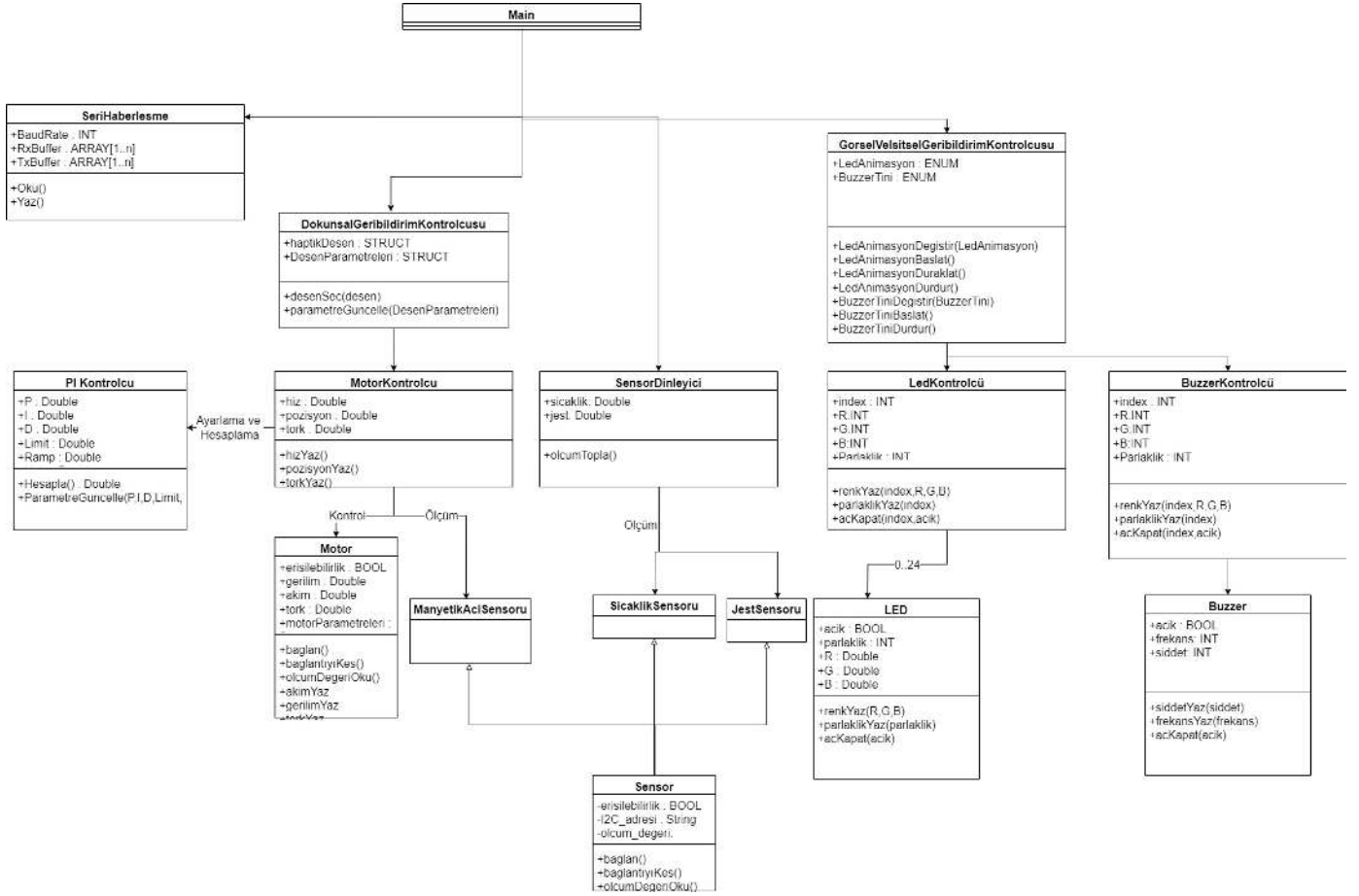
- Çevresel kontrolcü modülü gömülü yazılımı
- Önyüz modülü gömülü yazılımı
- Sunucu tarafı Python programı



Şekil 68.Yazılım Genel Mimarisi

3.3.1 Çevresel Kontrolcü Modülü Gömülü Yazılımı

Çevresel kontrolcü, birden fazla sensörden veri toplamak ve dokunsal geribildirim sağlamak görevlerinden sorumludur. Bu sebeple, nesne yönelimli yaklaşım tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, yazılım mühendisliğinde iyi bilinen SOLID prensiplerini takip ederek daha esnek ve sürdürülebilir bir kod yapısı oluşturmayı sağlar (Martin, 2000). Bu prensipler tek sorumluluk ilkesi (Single Responsibility Principle), açık-kapalı ilkesi (Open-Closed Principle), Liskov yer değiştirme ilkesi (Liskov Substitution Principle), arayüz ayrımı ilkesi (Interface Segregation Principle) ve bağımlılıkların tersine çevrilmesi ilkesi (Dependency Inversion Principle) olarak sıralanabilir.



Şekil 69.Çevresel Kontrolcü Modülü Yazılımı Basitleştirilmiş UML tablosu

Dokunsal geribildirim sağlamak için aşağıdaki desenler tasarlanmış ve modellenmiştir:

- **Yaylı Girintiler**

Yaylı girintiler, yay sabiti (k) ve yer değiştirme (x) ile hesaplanan bir kuvvet sağlar. Bu mekanizmada, bir yay, düğmenin belirli pozisyonlarda durmasını sağlamak için kullanılır. Yay, pozisyon değişikliklerinde kuvvet üretir ve kullanıcının dokunsal geri bildirim almasını sağlar.

$$F_g = -k \cdot x$$

Denklem 1-Yaylı Girintiler Deseni Kuvvet Geribildirim Formülü

```
function yayliGirinti(pozisyon, yaySabit, girintiPozisyonu):
    yerDegistirme = pozisyon - girintiPozisyonu
    kuvvet = -yaySabit * yerDegistirme
    return kuvvet
```

Şekil 70-Yaylı Girintiler Deseni Yazılım Örneği

- **Manyetik Girintiler**

Manyetik girintiler, manyetik dipol momentleri (m_1 , m_2) ve bunların arasındaki mesafe (r) ile hesaplanan kuvvetle çalışır. Bu sistemde, manyetik kuvvetler düğmeyi belirli konumlarda tutar.

$$F_m = \frac{\mu_0 \cdot m_1 \cdot m_2}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

Denklem 2-Manyetik Girintiler Deseni Kuvvet Geribildirim Formülü

```
function manyetikGirinti(m1, m2, mesafe):
    mu0 = 4 * pi * 10^-7
    kuvvet = (mu0 * m1 * m2) / (4 * pi * mesafe^2)
    return kuvvet
```

Şekil 71-Manyetik Girintiler Deseni Yazılım Örneği

- **Elektriksel Girintiler**

Elektriksel girintiler, yükler (q_1 q_2) arasındaki Coulomb kuvvetine dayanır.

$$F_e = k_e \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Denklem 2-Elektriksel Girintiler Deseni Kuvvet Geribildirim Formülü

- **Manyetik Tork Girintileri**

Manyetik tork girintileri, manyetik dipol momentleri (m) ve manyetik alan (B) arasındaki tork ile çalışır. Bu tork, düğmenin belirli konumlarda durmasını sağlar. Açısall sapma (θ) ile tork hesaplanır.

$$\tau = m \cdot B \cdot \sin(\theta)$$

Denklem 3- Manyetik Tork Girintileri Kuvvet Geribildirim Formülü

```
function manyetikTorkGirinti(dipolMomenti, manyetikAlan, aci):
    tork = dipolMomenti * manyetikAlan * sin(aci)
    return tork
```

Şekil 72-Manyetik Tork Girintileri Deseni Yazılım Örneği,

- **Elektromanyetik Girintiler**

Elektromanyetik girintiler, bir telden geçen akım (I) ve manyetik alan (B) arasındaki etkileşim ile çalışır. Bu etkileşim, telin uzunluğu (L) ve açılal sapma (θ) ile hesaplanır.

$$F_{em} = I \cdot L \cdot B \cdot \sin(\theta)$$

Denklem 4-Elektromantetik Girintiler Kuvvet Geribildirim Formülü

```
function elektromanyetikGirinti(akim, uzunluk, manyetikAlan, aci):
    kuvvet = akim * uzunluk * manyetikAlan * sin(aci)
    return kuvvet
```

Şekil 73-Elektromanyetik Girintiler Yazılım Örneği

- **Sıvı Dirençli Girintiler**

Sıvı dirençli girintiler, bir cismin sıvı içinde hareket ederken maruz kaldığı direnç kuvvetine dayanır. Viskozite (η), kürenin yarıçapı (r) ve hız (v) ile hesaplanır. Bu tür girintiler, akışkan direnci kullanarak dokunsal geri bildirim sağlar.

$$F_f = 6\pi\eta rv$$

Denklem 5-Sıvı Dirençli Girintiler Kuvvet Geribildirim Formülü

```
function sıvıDirencGirinti(viskozite, yarıcap, hız):
    kuvvet = 6 * pi * viskozite * yarıcap * hız
    return kuvvet
```

Şekil 74-Sıvı Dirençli Girintiler Yazılım Örneği

- **Titreşimli Girintiler**

Titreşimli girintiler, bir titreşim kaynağından üretilen kuvvet ile çalışır. Genlik (A) ve açılal frekans (ω) ile zaman (t) kullanılarak hesaplanır. Bu mekanizma, kullanıcının dokunsal geri bildirim alması için belirli aralıklarla titreşimler üretir.

Titreşimli girintiler, taşınabilir cihazlarda ve dokunsal arayüzlerde yaygın olarak kullanılır.

$$F_v = A \cdot \sin(\omega t)$$

Denklem 6-Titreşimli Girintiler Kuvvet Geribildirim Formülü

```
function titresimGirinti(genlik, acisalFrekans, zaman):  
    kuvvet = genlik * sin(acifreksans * zaman)  
    return kuvvet
```

Şekil 75-Titreşimli Girintiler Kuvvet Geribildirim Yazılım Örneği

Yazılım C dilinde yazılmış ve VSCode üzerinde geliştirilip Arduino eklentisi ile derlenerek mikroişlemciye USB portu üzerinden yüklenmiştir.



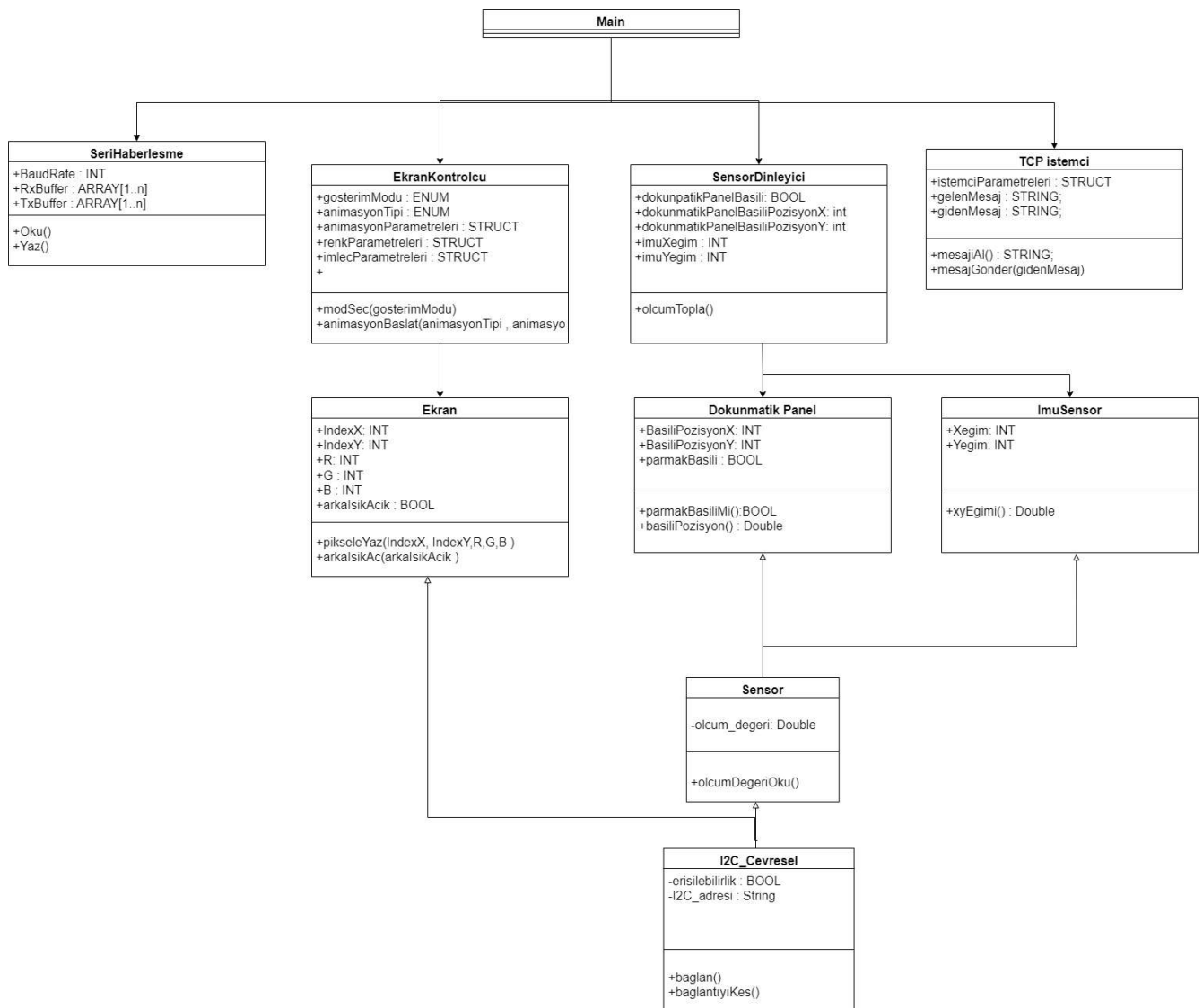
Şekil 76- Çevresel Kontrolcü yazılımının USB üzerinden mikroişlemciye yüklenmesi

Bu yazılımda kullanılmış olan açık kaynak kütüphaneler aşağıda listelenmiştir.

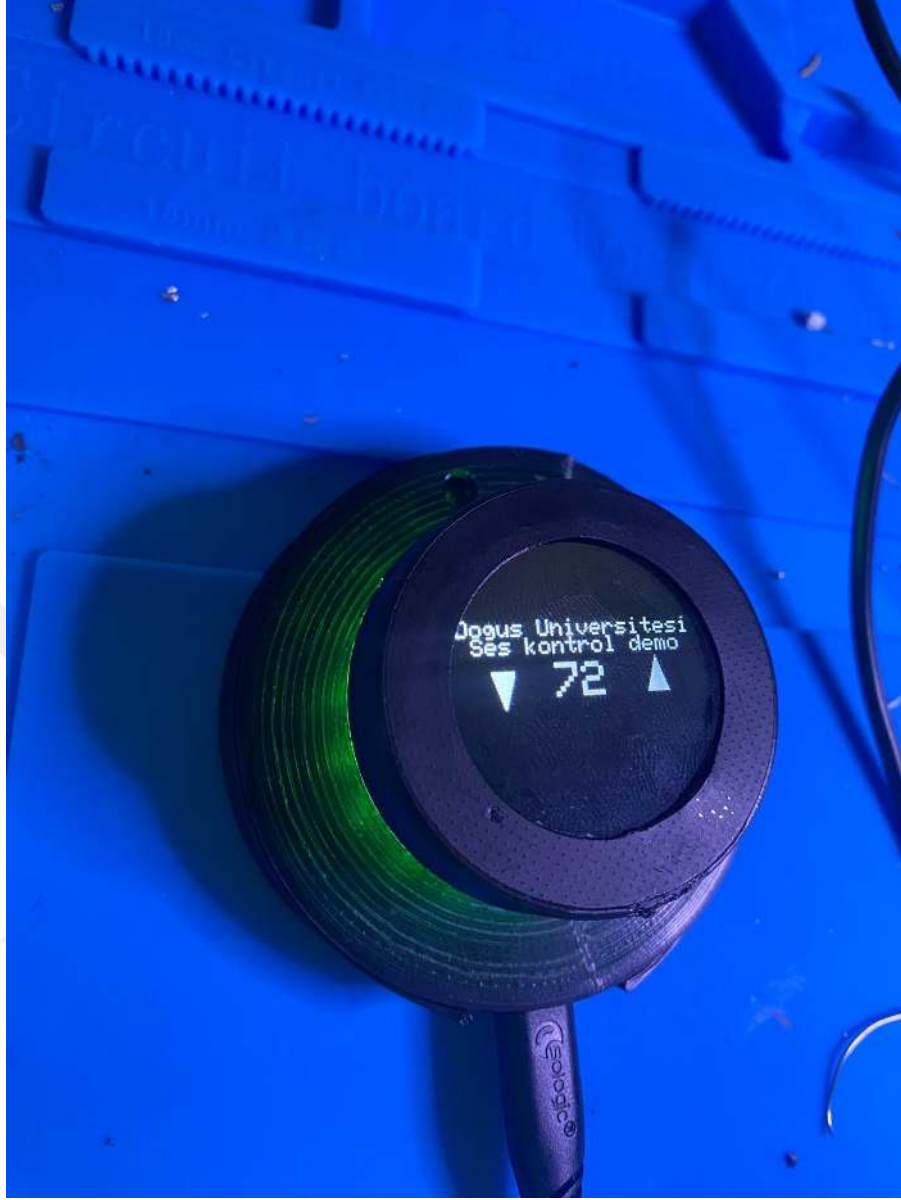
- simpleFOC
- Adafruit_AHTX0
- DFRobot_PAJ7620U2

3.3.2 Önyüz Modülü Kullanıcı Arayüzü ve Gömülü yazılımı

Önyüz modülü, çevresel kontrolcü ve uzak sunucudan gelen verileri görselleştirme, dokunmatik ekran ve IMU sensörü vasıtasıyla kullanıcıdan girdi alma görevlerinden sorumlu olacaktır. 240x240 piksel çözünürlüklü ekranda ışıık şiddeti, rengi, ses yüksekliği gibi kullanıcının etkileşime girdiği süreçler ile alakalı veriler gösterilirken dokunmatik ekran vasıtasıyla dokunma, basılı tutma, bırakma, kaydırma gibi girdiler alınacaktır. IMU sensöründen gelen X, Y,Z eksenlerindeki eğim verisi işlenerek sağa, sola, ileri, geri yatırma girdisi alınacaktır.



Şekil 77. Önyüz Modülü Basitleştirilmiş UML diyagramı

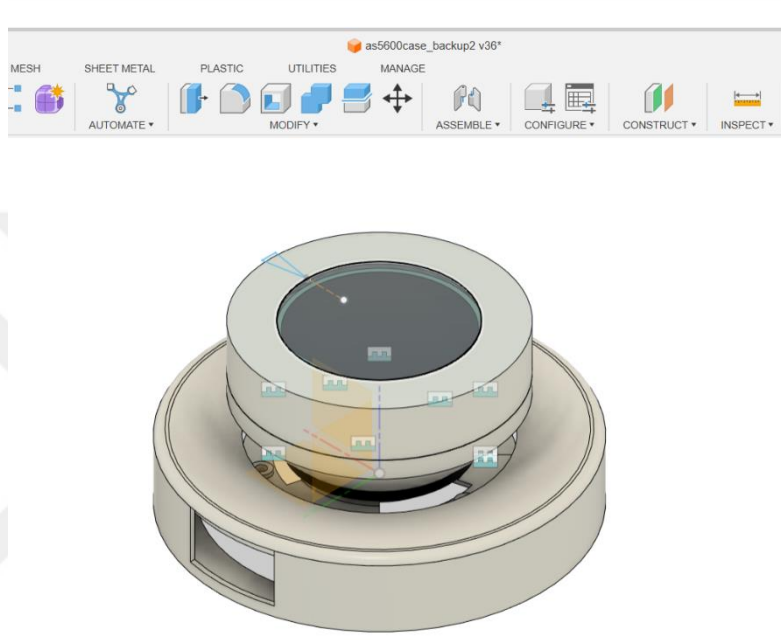


Şekil 78-Örnek Kullanıcı Arayüz Ekranı

3.4 3 Boyutlu Tasarım

Elektronik komponentlerin, döner düğmenin ve önyüz modülünün bir arada sağlam bir şekilde durabilmesi için 3 boyutlu çizim/ tasarım yapılmış ve 3B baskı yöntemiyle üretilmiştir.

Tasarım için Fusion 360 programı kullanılmıştır.



Şekil 79. 3B Tasarım İzometrik Görüntü



Şekil 80. 3B Tasarım Kesit Görüntüsü

Daha sonra, tasarlanan parçalar CURA yazılımı kullanılarak dilimlenmiş ve Creality Ender 3 model 3B yazıcı ile PLA türünde filament kullanılarak üretilmiştir.

Bütün parçalar toplam 20 gram civarında olup toplam baskı süresi 5 saat civarında sürmektedir.

Daha sonra üretilen plastik parçalar ve elektronik modüller monte edilerek deney kiti son nihai fiziksel formuna erişmiştir.



Şekil 81. Montajı Tamamlanmış Deney Kiti

Tasarım ve üretimin tamamlanmasının ardından, kullanıcı deneyim gösterimi ve anketinin yürütülmesi bölümüne geçilmiştir.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

KULLANICI DENEYİM GÖSTERİMİ VE ANKETİ

4.1 Gösterim

Dokunsal geribildirim uyarlanabileceği senaryolar gözden geçirilmiş ve aşağıdaki 3 gösterimin örnek olarak uyarlanması uygun görülmüş ve buna göre 3 farklı basit uygulama uyarlanmıştır.

Döner düğme vasıtasıyla müzik sesini açıp kısma gösterimi

Döner düğme vasıtasıyla bilgisayarın sistem sesi kontrol edilerek müzik sesi yükselip alçaltılacaktır. Bu işlem sırasında öncelikle döner düğme kullanıcıya sanal girintiler desenine göre geri bildirim uygulanacaktır. Sonrasında dokunsal geribildirim özelliği devre dışı bırakılacak ve görsel geribildirim moduna geçilecektir. Bu modda ses değerine göre dokunmatik ekran parlaklığı ve arka plan ışıklandırmasının ışık şiddeti kontrol edilecektir. Bu şekilde, ses yükseltip alçaltma işlemi dokunsal, görsel ve işitsel geribildirimli olmak üzere üç farklı şekilde kullanıcıya deneyimlendirilecektir.

Döner düğme vasıtasıyla ortam ışık şiddeti ayarlama gösterimi

Döner düğme vasıtasıyla ortam ışık aydınlatmasının ışık şiddeti artırılıp azaltılacaktır. Bu etkileşim sırasında öncelikle döner düğme kullanıcıya değişken direnç desenine göre dokunsal geribildirim uygulayacaktır. Yani, aydınlatma şiddeti yükseldikçe döner düğmeyi çevirmek zorlaşacak ve azaldıkça kolaylaşacaktır. Sonrasında dokunsal geribildirim devre dışı bırakılacak ve işitsel geribildirim moduna geçilecektir. Bu modda, döner ışık şiddeti değiştikçe cihaz motor vasıtasıyla yüksek frekanslı bir ses çıkaracak ve kullanıcıya geri bildirim sağlayacaktır. Bu şekilde ışık şiddeti yükseltip alçaltma işlemi dokunsal, görsel ve işitsel geribildirimli olmak üzere üç farklı şekilde kullanıcıya deneyimlendirilecektir.

Bu bağlamda kullanıcılar 3 farklı örnek uygulama özelinde dokunsal geri bildirimli döner düğme deney kitiyle etkileşime girecek ve sonrasında yapılacak bir anket vasıtasıyla kullanıcının dokunsal geribildirim deneyimiyle alakalı his ve düşünceleri ölçülecektir. Bu ölçüm sonuçlarına göre gündelik hayattaki döner düğme

etkileşimlerinin dokunsal geribildirim ile iyileştirilip iyileştirilemeyeceği tartışılacaktır.

Bunun yanında, kullanıcılara nesnelerin interneti konseptiyle alakalı sorular da sorulacak olup toplanan yanıtlara göre geliştirilebilecek dokunsal geri bildirimli uygulamalar önerilecektir.

Döner düğme vasıtasıyla CAD tasarım programıyla etkileşim gösterimi

Bu gösterimde kullanıcı döner düğme vasıtasıyla Fusion360 yazılımıyla etkileşime girecektir. Döner düğmeyi sağa veya sola çevirerek tasarlanan 3 boyutlu modelin gösterim açısı değiştirilecektir. Bu esnada kullanıcıya sanal girintiler desenine göre dokunsal geribildirim sağlanacaktır.

4.2 Anket

Ölçümlenmek istenen veriler aşağıdaki gibidir:

- Kullanıcıların haptik geri bildirim ve nesnelerin interneti tanımlarına ne kadar aşina olduğu
- Kullanıcıların günlük hayatta nesnelerin interneti ile uyumlu cihazları kullanıp kullanmadığı
- Kullanıcıların günlük hayatta nesnelerin interneti ile uyumlu cihazlarla daha fazla etkileşime girmeyi tercih edip etmediği
- Kullanıcıların günlük hayatta nesnelerin interneti ile uyumlu hangi cihazlarla etkileşime girdikleri
- Kullanıcıların nesnelerin interneti uyumlu cihazlarla günlük hayatta girdiği etkileşimlerin dokunsal geri bildirim vasıtasıyla iyileştirilip iyileştirilemeyeceği

Anket, Google forms üzerinde hazırlanmış ve yürütülmüş olup sorular aşağıda listelenmiştir.

1. Nesnelerin interneti tabanlı ev otomasyonu konseptiyle ne kadar aşinasınız ?

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

	1	2	3	4	5	
Hiç	☐	☐	☐	☐	☐	Çok

2. Yaşam alanlarınızda nesnelerin interneti uyumlu aletler var mı ?

Uygun olanların tümünü işaretleyin.

☐	Işıklandırma
☐	Termostat
☐	Klima
☐	Ses
☐	Fırın
☐	Ocak
☐	Bulaşık makinası
☐	Çamaşır makinası
☐	Kurutma makinası
☐	Doğal gaz vanası
☐	Elektrik şalterleri
☐	Diğer: _____

Şekil 82. Kullanıcı Deneyim Anketi 1. ve 2. Sorular

3. Işıklandırma sisteminin nesnelerin interneti uyumlu olmasının gündelik yaşam kalitenizi artıracığını düşünüyor musunuz ?

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

	1	2	3	4	5	
Hiç	☐	☐	☐	☐	☐	Çok

4. Termostat/Klima sisteminin nesnelerin interneti uyumlu olmasının gündelik yaşam kalitenizi artıracığını düşünüyor musunuz ?

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

	1	2	3	4	5	
Hiç	☐	☐	☐	☐	☐	Çok

5. Ses sisteminin nesnelerin interneti uyumlu olmasının gündelik yaşam kalitenizi artıracığını düşünüyor musunuz ?

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

	1	2	3	4	5	
Hiç	☐	☐	☐	☐	☐	Çok

6. Yeni bir eve taşınacak olsanız, taşınacağınız evde nesnelerin interneti uyumlu ev aletlerinin olması, o evi tercih etme olasılığınızı artırır mı ?

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

	1	2	3	4	5	
Hiç	☐	☐	☐	☐	☐	Çok

Şekil 83. Kullanıcı Deneyim Anketi 3., 4., 5. ve 6. Sorular

7. Yeni bir eve taşınacak olsanız, taşınacağınız evde hangi cihaz ve sistemlerin nesnelerin interneti uyumlu olmasını isterdiniz ?

Uygun olanların tümünü işaretleyin.

- ☐ Işıklandırma
- ☐ Termostat
- ☐ Klima
- ☐ Ses
- ☐ Fırın
- ☐ Ocak
- ☐ Bulaşık makinası
- ☐ Çamaşır makinası
- ☐ Kurutma makinası
- ☐ Doğal gaz vanası
- ☐ Elektrik şalterleri

8. Önceden dokunsal geri bildirimli arayüz cihazı kullandınız mı? *

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

1 2 3 4 5

Hiç ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Çok

9. Cihaz tarafından sağlanan dokunsal geri bildirimin yoğunluğunu nasıl değerlendirirsiniz? *

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

1 2 3 4 5

Hiç ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Çok

Şekil 84. Kullanıcı Deneyim Anketi 7, 8 ve 9. Sorular

10. Cihaz tarafından sağlanan dokunsal geri bildirimin gerçekliğini nasıl değerlendirirsiniz? *

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

	1	2	3	4	5
Hiç	☐	☐	☐	☐	☐
					Çok

11. Dokunsal geribildirim cihaz ile olan etkileşiminizi daha iyileştirdi mi ? *

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

	1	2	3	4	5
Hiç	☐	☐	☐	☐	☐
					Çok

12. Dokunsal geribildirim cihazın işlevini daha anlaşılır hale getirdi mi ?

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

	1	2	3	4	5
Hiç	☐	☐	☐	☐	☐
					Çok

13. Dokunsal geribildirim ve işitsel geribildirim kıyaslandığında, hangisi daha sezgisel hissettirdi ? *

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

- ☐ Dokunsal
- ☐ İşitsel
- ☐ Aynı

Şekil 85. Kullanıcı Deneyim Anketi 10., 11., 12. ve 13. Sorular

14. Dokunsal geribildirim ve işitsel geribildirim kıyaslandığında, hangisi daha sezgisel hissettirdi ?

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

- ☐ Dokunsal
☐ Görsel
☐ Aynı

15. Cihazı kullanırken dokunsal geri bildirim nedeniyle herhangi bir rahatsızlık veya yorgunluk yaşadınız mı?

Yalnızca bir şıkkı işaretleyin.

1 2 3 4 5

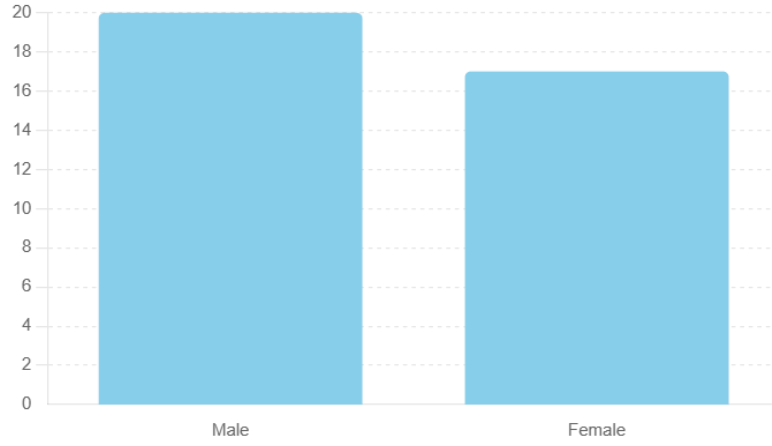
Hiç ☐ ☐ ☐ ☐ Çok

Şekil 86. Kullanıcı Deneyim Anketi 14., ve 15. Sorular

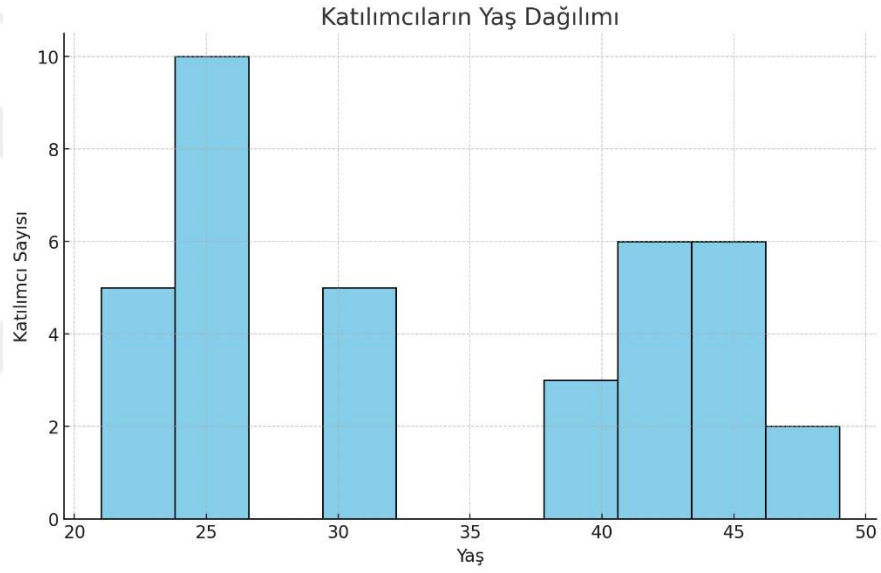
4.3 Anket Sonuçları

Yapılan anketin sonuçlara göre, katılımcıların nesnelerin interneti konseptine aşina olduğu ve bu teknolojinin insan hayatına değer kattığının düşünüldüğü gözlemlenmiştir. Bütün katılımcıların en az bir adet nesnelerin interneti uyumlu cihaza sahip olduğu ve gündelik hayatta kullandığı fark edilmiştir.

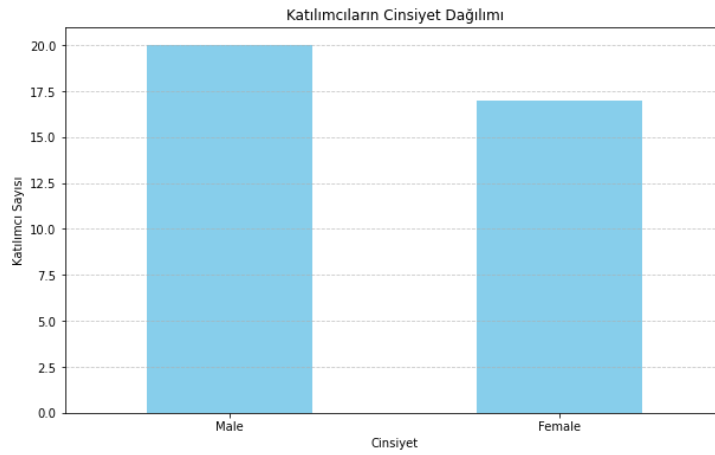
Kullanıcıların, görsel ve işitsel geribildirimle kıyasla dokunsal geribildirim vasıtasıyla daha sezgisel ve anlaşılabilir bir deneyim yaşadığı gözlemlenmiştir. Buradan yola çıkarak, dokunsal geribildirimli döner düğme uygulamalarının nesnelerin interneti ve akıllı ev otomasyonu uygulamalarına entegre edilmesi, bireylerin gündelik hayattaki etkileşimlerini iyileştirebileceği öngörülebilir.



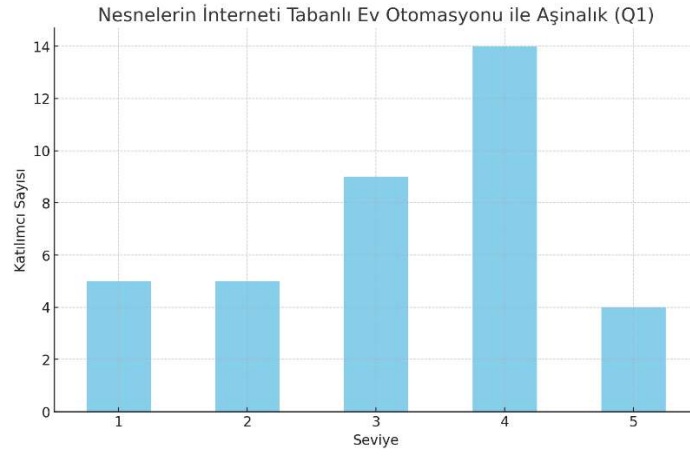
Şekil 87. Anket Katılımcılarının Cinsiyet Dağılımı



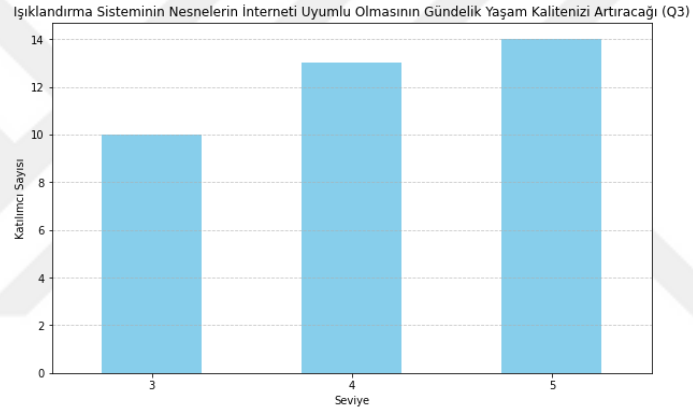
Şekil 88. Anket Katılımcılarının Yaş Dağılımı



Şekil 89. Anket Katılımcılarının Cinsiyet Dağılımı

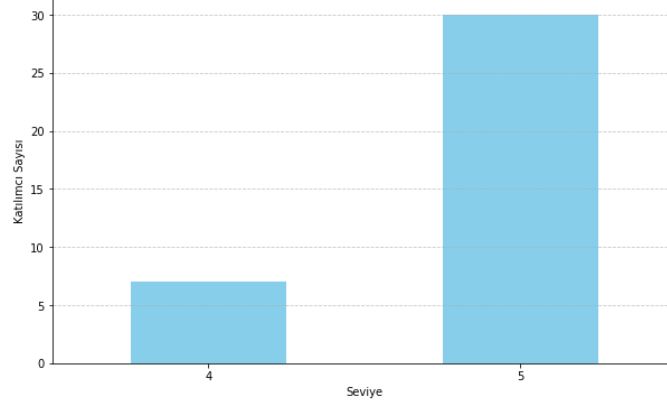


Şekil 90. 1. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı



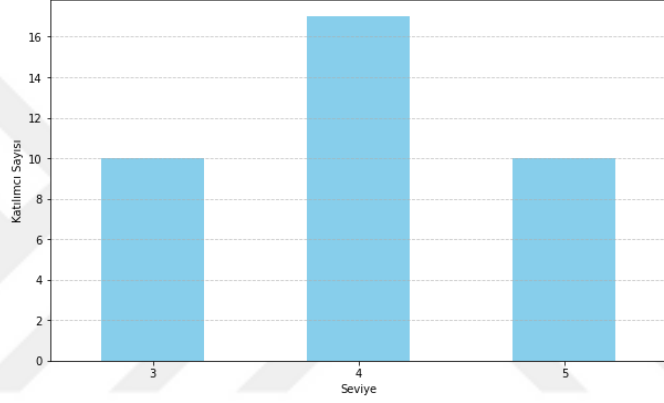
Şekil 91. 3.Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı

Termostat/Klima Sisteminin Nesnelerin İnterneti Uyumlu Olmasının Gündelik Yaşam Kalitenizi Artıracağı (Q4)



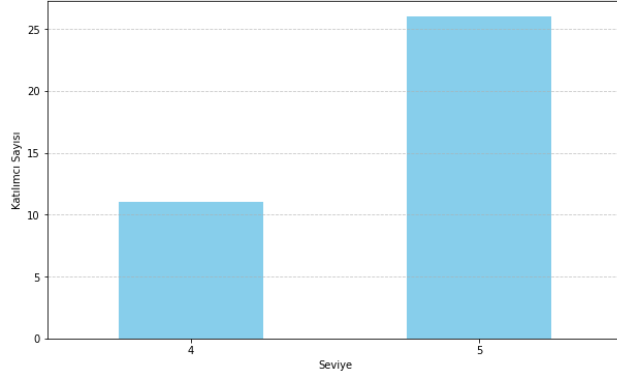
Şekil 92. 4. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı

Ses Sisteminin Nesnelerin İnterneti Uyumlu Olmasının Gündelik Yaşam Kalitenizi Artıracağı (Q5)

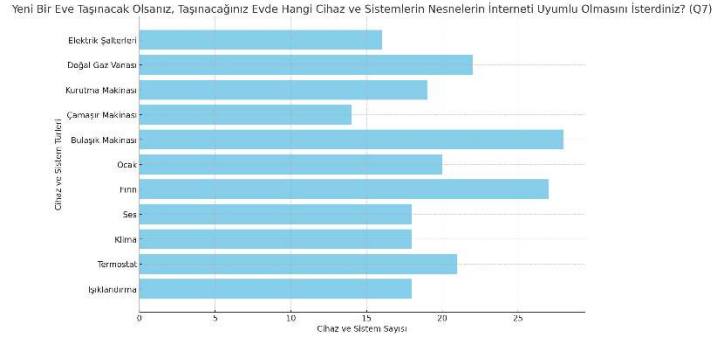


Şekil 93. 5. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı

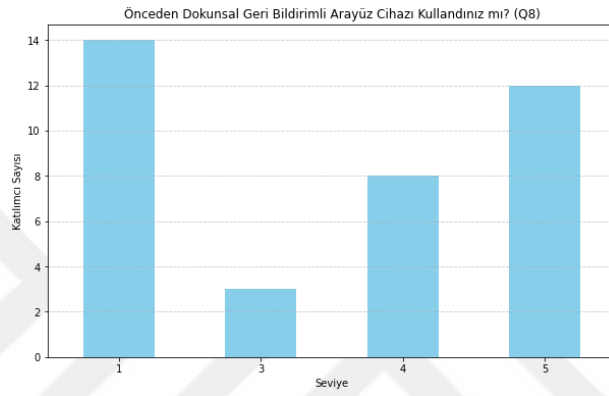
Yeni Bir Eve Taşınacak Olsanız, Taşınacağınız Evde Nesnelerin İnterneti Uyumlu Ev Aletlerinin Olması (Q6)



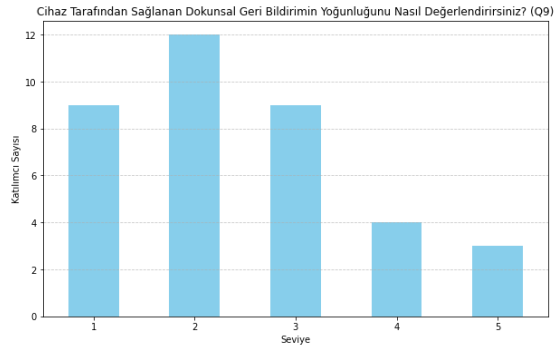
Şekil 94. 6. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı



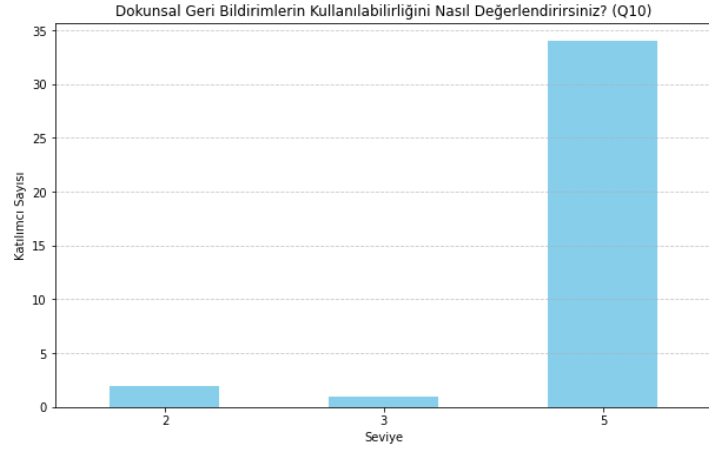
Şekil 95. 7. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı



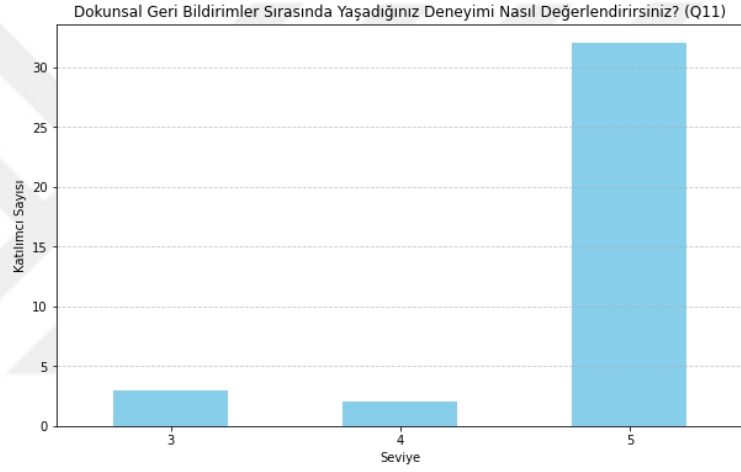
Şekil 96. 8. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı



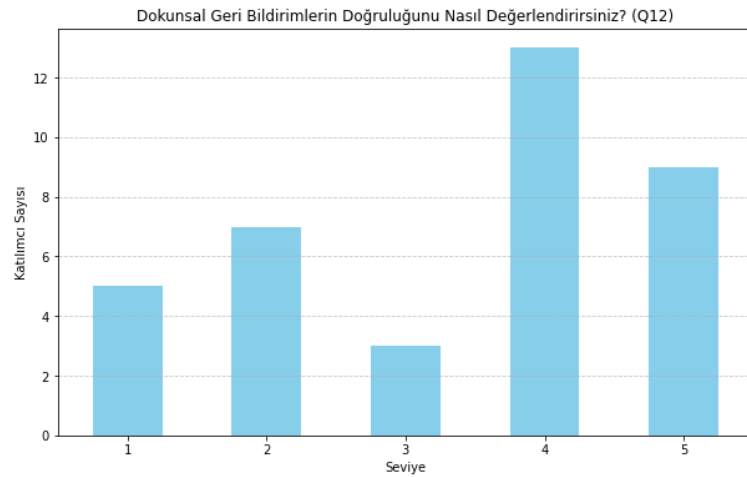
Şekil 97. 9. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı



Şekil 98. 10. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı

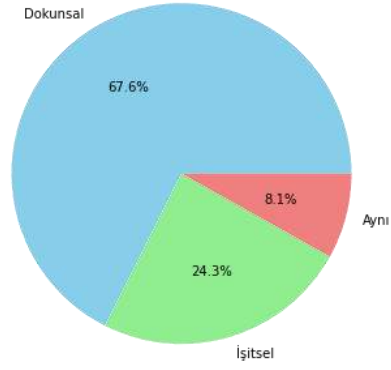


Şekil 99. 11. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı



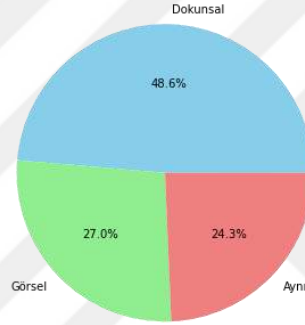
Şekil 100. 12. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı

Dokunsal geri bildirim ve işitsel geri bildirim kıyaslandığında, hangisi daha sezgisel hissettirdi? (Q13)



Şekil 101. 13. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı

Dokunsal geri bildirim ve görsel geri bildirim kıyaslandığında, hangisi daha sezgisel hissettirdi? (Q14)



Şekil 102. 14. Soruya Verilen Yanıtların Dağılımı

SONUÇ

Bu çalışmada, nesnelerin interneti (IoT) uyumlu dokunsal geribildirim destekli insan arayüz cihazlarının tasarımı ve uygulanması üzerine kapsamlı bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında, kullanıcı deneyimini iyileştirmek amacıyla dokunsal geribildirim teknolojisinin potansiyeli incelenmiş ve bu teknolojinin nesnelerin interneti ile entegrasyonu üzerine odaklanılmıştır.

Çeşitli motor ve enkoderlerin performansları değerlendirilmiş ve belirli parametrelerin kullanıcı deneyimini nasıl etkilediği incelenmiştir. En yüksek performansı gösteren motorun seçimi, kullanıcı deneyimini optimize etmek için kritik bir adım olmuştur. Motorların adım tepkileri, gerilim/akım eğrileri ve sıcaklık artışları gibi parametreler detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Sonrasında, dokunsal geribildirim desenlerinin gerçekleştirilebileceği bir deney kiti tasarlanmış ve bu kit ile yapılan testler, kullanıcıların bu tür sistemlerle etkileşimlerinin optimize edilebileceğini ortaya koymuştur.

Yapılan deney ve anketler sonucunda, kullanıcıların dokunsal geribildirim vasıtasıyla daha sezgisel ve anlaşılabilir bir deneyim yaşadığı gözlemlenmiştir. Katılımcılar, görsel ve işitsel geribildirimlere kıyasla dokunsal geribildirim daha etkili olduğunu belirtmiştir. Bu bulgu, dokunsal geribildirim kullanıcının deneyimini önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermektedir.

Nesnelerin interneti uyumlu cihazlarla yapılan deneyler, dokunsal geribildirim bu cihazlara entegrasyonunun kullanıcıların etkileşimlerini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Özellikle akıllı ev otomasyonu uygulamalarında dokunsal geri bildirimli arayüzlerin kullanıcı deneyimini artırabileceği öngörülmüştür.

Araştırma sonuçları, dokunsal geribildirim teknolojisinin nesnelerin interneti uyumlu cihazlara entegrasyonunun, kullanıcı deneyimini iyileştirme potansiyelini ortaya koymaktadır. Özellikle akıllı ev otomasyonu gibi uygulama alanlarında, dokunsal geri bildirimli arayüzlerin kullanımı, kullanıcıların cihazlarla daha sezgisel ve tatmin edici etkileşimler yaşamasını sağlayabilir.

Bu çalışmanın bulguları hem akademik hem de endüstriyel alanda önemli katkılar sağlayabilir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, bu teknolojilerin farklı senaryolarda ve kullanıcı gruplarıyla daha kapsamlı test edilmesi ve optimize

edilmesine odaklanabilir. Ayrıca, dokunsal geribildirim teknolojisinin diğer insan-makine etkileşim alanlarında da kullanım potansiyeli araştırılmalıdır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, nesnelerin interneti uyumlu dokunsal geribildirim destekli insan arayüz cihazlarının tasarımı ve uygulanması konusunda önemli bulgular sunmakta ve bu teknolojinin gelecekteki gelişimine yönelik önerilerde bulunmaktadır.



KAYNAKÇA

- Adafruit (2024a), Adafruit Motor Selection Guide, Erişim adresi: learn.adafruit.com
- Adafruit (2024b) ESP32 Super mini modülü bilgi dökümanı. Erişim adresi: <https://learn.adafruit.com/adafruit-qt-py-esp32-c3-wifi-dev-board/low-power-usage>
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347-2376.
- Ala, B. Z., Zaidan, A. A., Zaidan, B. B., Talal, M., & Kiah, M. L. M. (2017). Review on the IoT based smart homes technologies. *Information Systems*, 72, 231-252.
- Ashton, K. (2009). That ‘internet of things’ thing. *RFID Journal*, 22(7), 97-114.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787-2805.
- Bandyopadhyay, D., & Sen, J. (2011). Internet of things: Applications and challenges in technology and standardization. *Wireless Personal Communications*, 58(1), 49-69.
- Berg, L. P., & Vance, J. M. (2017). Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: A survey. *Virtual Reality*, 21(1), 1-17.
- Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2017). Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*, 31, 183-212.
- Brewster, S. A. (2002). Haptic feedback for ubiquitous computing. Proceedings of the 14th annual ACM symposium on User interface software and technology, 1-10.
- Brewster, S.A, Chohan, F., & Brown, L. (2007). Tactile feedback for mobile interactions. Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, 159-162.

- Chang, A., O'Modhrain, S., Jacob, R. J., Gunther, E., & Ishii, H. (2013). ComTouch: design of a vibrotactile communication device. *Proceedings of the 4th conference on Designing Interactive systems: processes, practices, methods, and techniques*, 312-320.
- Deering, S., & Hinden, R. (1998). Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification. RFC 2460. Erişim adresi: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8200>
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660.
- Gupta, P., Quyyoom, F., & Qadri, N. (2020). IoT based wearable technology for military applications. *Journal of Defense Management*, 10(1), 1-6.
- Han, D. M., & Lim, J. H. (2010). Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and zigbee. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 56(3), 1403-1410.
- He, W., & Yan, G. (2020). Developing an edge computing platform for IoT-based smart grid. *Future Generation Computer Systems*, 88, 639-645.
- Hwang, W., & Salvendy, G. (2010). Number of people required for usability evaluation: the 10±2 rule. *Communications of the ACM*, 53(5), 130-133.
- Islam, S. M. R., Kwak, D., Kabir, M. H., Hossain, M., & Kwak, K. S. (2015). The internet of things for health care: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 3, 678-708.
- Islam, S. M. R., Kabir, M. H., & Hossain, M. (2020). IoT for healthcare: From design to implementations. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(2), 10189-10201.
- Jayant, C., Acuario, C., Johnson, W., Hollier, J., & Ladner, R. E. (2010). V-braille: Haptic braille perception using a touch-screen and vibration on mobile phones. *Proceedings of the 12th International ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, 295-296.
- Kapoor, K., Sharma, S., & Saha, A. (2020). IoT based surveillance system using drone. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(2), 1403-1410.

- Khan, R. R., Kiani, F. A., & Soomro, T. R. (2017). Smart waste management using IoT. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 2(3), 103-110.
- Khan, R., Yuce, M. R., & Bulusu, N. (2020). IoT-based health monitoring: Current trends and future challenges. *IEEE Access*, 8, 168851-168869.
- Krishna, S., Colbry, D., Black, J., Balasubramanian, V., & Panchanathan, S. (2018). A systematic requirements analysis and development of an assistive device to enhance the social interaction of people who are blind or visually impaired. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 3(3), 169-179.
- Kuber, R., & Tretter, M. (2010). Developing a haptic-enhanced keyboard: performance, efforts and situation awareness. *Universal Access in the Information Society*, 9(2), 143-157.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3(1), 18-23.
- Li, L., De, A. M., & Lin, J. (2020). IoT for smart agriculture: Trends, challenges, and opportunities. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(6), 4425-4444.
- Liu, Y., Huang, X., & Miao, Y. (2020). IoT-based smart campus: Opportunities and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(5), 4313-4326.
- Lopez, G., & Ranasinghe, D. C. (2017). Wearable IoT devices: An overview. *Proceedings of the IEEE*, 105(10), 1-17.
- Magnatech (2016). MT6701 Datasheet dökümanı. Erişim adresi: https://uploadcdn.oneyac.com/attachments/files/brand_pdf/magntek/F3/CA/MT6701QT-STD
- Minogue, J., & Jones, M. G. (2006). Haptics in education: Exploring an untapped sensory modality. *Review of Educational Research*, 76(3), 317-348.
- Moin, A., & Shah, S. A. A. (2020). Haptic feedback in remote education: An overview. *Education and Information Technologies*, 25(4), 2679-2700.

- Okamura, A. M. (2009). Haptic feedback in robot-assisted minimally invasive surgery. *Current Opinion in Urology*, 19(1), 102-107.
- Osram (2016) AS5600 Datasheet dökümanı. Erişim adresi: <https://look.ams-osram.com/m/7059eac7531a86fd/original/AS5600-DS000365.pdf>
- Pan, Z., Cheok, A. D., Yang, H., Zhu, J., & Shi, J. (2016). Virtual reality and mixed reality for education. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 16(4), 041013.
- Perera, C., Liu, C. H., & Jayawardena, S. (2015). The emerging internet of things marketplace from an industrial perspective: A survey. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 3(4), 585-598.
- Pettorini, B., Ricciardi, R., di Domenico, M., Masiello, G., & Petrone, G. (2016). Haptic technologies for dental education: an integrative review. *Journal of Dental Education*, 80(7), 867-875.
- Roman, R., Zhou, J., & Lopez, J. (2013). On the features and challenges of security and privacy in distributed internet of things. *Computer Networks*, 57(10), 2266-2279.
- Srinivasan, M. A., & Basdogan, C. (1997). Haptics in virtual environments: Taxonomy, research status, and challenges. *Computers & Graphics*, 21(4), 393-404.
- Statista. (2021). Number of connected IoT devices worldwide from 2021 to 2030. Erişim adresi: <https://www.statista.com/statistics/1101442/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>
- Swinnen, E., Kerckhofs, E., Lefevre, N., Sermon, A., & Duerinck, S. (2010). The use of haptics in rehabilitation robotics. *Technology and Disability*, 22(1-2), 31-41.
- Texas Instrument (2021) DRV8311 Datasheet dökümanı. Erişim adresi: <https://www.ti.com/product/DRV8311>
- Waveshare (2024) ESP32 touch lcd modülü bilgi dökümanı. Erişim adresi: <https://www.waveshare.com/esp32-s3-touch-lcd-1.28.htm>